

# **Eine Methode zur Entwicklung modularer Produktfamilien**

Vom Promotionsausschuss der  
Technischen Universität Hamburg-Harburg

zur Erlangung des akademischen Grades  
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von  
Christoph Bles

aus  
Wittlich

2011

1. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Dieter Krause

2. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Harald Meerkamm

Tag der mündlichen Prüfung: 29. April 2011

## **Vorwort**

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Produktentwicklung und Konstruktionstechnik der TU Hamburg-Harburg. Die Arbeit konnte ich nur erfolgreich fertig stellen, weil ich von vielen Kollegen und Freunden fachlich und persönlich unterstützt wurde. All denen möchte ich an dieser Stelle danken.

Besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Dieter Krause für das mir entgegengebrachte Vertrauen und die Betreuung der Arbeit. Er hat mich nicht nur an das Thema Modulare Produktfamilien herangeführt, sondern hat grundlegende Impulse für die Arbeit geliefert.

Außerdem bedanke ich mich sehr herzlich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Harald Meerkamm für die Übernahme des Zweitgutachtens. Herrn Prof. Dr. Dr. h. c. Wolfgang Kersten und Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Hermann Lödding danke ich für die zusätzliche Begutachtung; Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Hermann Lödding danke ich darüber hinaus für die Übernahme des Vorsitzes des Prüfungsausschusses.

Während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter habe ich mehrheitlich Forschungsprojekte für die Airbus Operations GmbH bearbeitet. Obwohl Flugzeugkabinen nicht unmittelbar in der Arbeit erwähnt werden, entstammen die grundlegenden Ansätze der Arbeit aus diesen Projekten. Dafür möchte ich mich vor allem bei meinen Projektleitern Dr. Marcus Gehm, Ralf Koblitz, Sebastian Umlauf und Sebastian Weitzel bedanken.

Mein Dank gilt auch den Mitarbeitern eines norddeutschen „Tauchpumpen-Herstellers“, auch wenn diese nicht namentlich genannt werden dürfen.

Meinen ehemaligen Kollegen gilt mein Dank nicht nur für die fachliche Unterstützung, sondern auch dafür, dass sie das Institut zu einem Ort gemacht haben, an dem ich gerne gearbeitet habe. Besonders hervorheben möchte ich Thomas Kipp, meinen „methodischen“ Sparringspartner, und Dr. Thomas Wünscher, der mich an seinen wertvollen Erfahrungen hat teilhaben lassen. Darüber hinaus danke ich Dr. Jens Schmidt, Thomas Gumpinger, Niklas Halfmann, Henry Jonas, Gregor Beckmann und Steffen Elstner.

Abschließend gilt mein Dank all den Menschen, die mich nicht nur während der Erstellung einer Dissertation unterstützen: meinen Eltern, meinem Bruder, meinen Freunden und meiner Freundin Daniela.

Christoph Blees



# ***Inhaltsverzeichnis***

<b>1</b>	<b>Einleitung .....</b>	<b>1</b>
1.1	Ausgangssituation .....	1
1.2	Zielsetzung der Arbeit .....	3
1.3	Aufbau der Arbeit .....	3
<b>2</b>	<b>Problemanalyse .....</b>	<b>7</b>
2.1	Begriffliche Grundlagen modularer Produktfamilien.....	7
2.1.1	Produkt und Produktfamilie .....	7
2.1.2	Produktstruktur und Produktarchitektur .....	8
2.1.3	Arten der Produktstruktur .....	9
2.1.4	Modular strukturierte Produktfamilien.....	12
2.2	Potentiale und Grenzen modularer Produktfamilien .....	15
2.3	Anforderungen an die Entwicklung modularer Produktfamilien .....	18
<b>3</b>	<b>Stand der Wissenschaft.....</b>	<b>21</b>
3.1	Entwicklung von Produktplattformen .....	21
3.1.1	Grundlagen der Plattformentwicklung .....	21
3.1.2	Methoden zur Entwicklung von Produktplattformen .....	22
3.1.3	Bewertung der Methoden.....	26
3.2	Entwicklung von modularen Produktstrukturen .....	27
3.2.1	Grundlagen der Entwicklung modularer Produktstrukturen .....	27
3.2.2	Methoden zur Entwicklung von modularen Produktstrukturen .....	28
3.2.3	Bewertung der Methoden.....	49
3.3	Bewertung von modularen Produktfamilien.....	52
3.3.1	Grundlagen der Bewertung modularer Produktfamilien.....	52
3.3.2	Methoden zur Bewertung von modularen Produktfamilien.....	53
3.3.3	Bewertung der Methoden.....	60

---

3.4	Forschungsbedarf .....	61
<b>4</b>	<b>Methode zur Entwicklung modularer Produktfamilien.....</b>	<b>65</b>
4.1	Arbeitsschritte der Methode .....	67
4.2	Zieldefinition.....	71
4.3	Ist-Aufnahme .....	71
4.3.1	Aufnahme der Unterscheidungsmerkmale .....	72
4.3.2	Aufnahme der Funktionsstruktur .....	72
4.3.3	Aufnahme der Wirkprinzipien .....	74
4.3.4	Aufnahme der Komponenten im Module Interface Graph .....	75
4.4	Variantengerechte Produktgestaltung .....	78
4.4.1	Lösungssuche auf Ebene der Komponenten .....	80
4.4.2	Lösungssuche auf Ebene der Wirkprinzipien und -elemente .....	80
4.4.3	Lösungssuche auf Ebene der Funktionen.....	81
4.4.4	Lösungssuche auf Ebene der Unterscheidungsmerkmale .....	81
4.5	Technisch-funktionale Modularisierung .....	82
4.5.1	Bewertung der Flüsse .....	83
4.5.2	Anwendung der Heuristiken .....	83
4.5.3	Abgleich mit räumlich-geometrischen Anforderungen.....	85
4.6	Produktstrategische Modularisierung.....	85
4.6.1	Weiterentwicklung des Modultreiberkonzepts .....	86
4.6.2	Vorgehen zur Modulbildung .....	88
4.6.3	Entwicklung einer entwicklungsgerechten Produktstruktur.....	90
4.6.4	Entwicklung einer beschaffungsgerechten Produktstruktur .....	92
4.6.5	Entwicklung einer herstellungsgerechten Produktstruktur.....	94
4.6.6	Entwicklung einer vertriebsgerechten Produktstruktur.....	96
4.6.7	Entwicklung einer nutzungsgerechten Produktstruktur.....	97
4.6.8	Entwicklung einer recyclinggerechten Produktstruktur.....	98
4.7	Zusammenführung der Produktstrukturen.....	99

---

4.7.1	Abbildung der Produktstrukturen im Module Process Chart.....	100
4.7.2	Ausarbeitung des Modularisierungsprozesses .....	102
4.8	Konzeptbewertung und -auswahl .....	106
4.8.1	Bewertung mit der Kennzahl Module Coupling Independence .....	106
4.8.2	Bewertung mit der Kennzahl Module Driver Independence .....	108
4.8.3	Konzeptauswahl .....	111
4.9	Ableitung der Baustruktur .....	112
<b>5</b>	<b>Validierung der Methode in einer Fallstudie .....</b>	<b>117</b>
5.1	Planung der Fallstudie .....	117
5.1.1	Prüfungshypothesen.....	117
5.1.2	Anwendungsfall.....	118
5.1.3	Datenerhebung .....	119
5.2	Durchführung der Fallstudie .....	120
5.2.1	Fallbeispiel einer Produktfamilie von Tauchpumpen.....	120
5.2.2	Entwicklung einer modularen Produktfamilie von Tauchpumpen....	121
5.3	Auswertung der Fallstudie.....	144
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>149</b>
<b>Anhang .....</b>	<b>.....</b>	<b>153</b>
A	Zusammenstellung der Kennzahlen .....	153
B	Zuordnung der Modultreiber zu den Produktlebensphasen.....	167
C	Unterscheidungsmerkmale der Produktfamilie von Sprühgeräten .....	169
D	Aufstellen von Funktionsstrukturen .....	170
E	Konzeptauswahl Tauchpumpen .....	172
<b>Literatur .....</b>	<b>.....</b>	<b>181</b>



# 1 Einleitung

## 1.1 Ausgangssituation

Industrieunternehmen befinden sich in einer schwierigen Wettbewerbssituation. Auf der einen Seite steht die anhaltende Globalisierung, die dazu führt, dass immer mehr Wettbewerber in den Markt eintreten. Für die Unternehmen ergibt sich daraus ein zunehmender Druck, die Kosten für die Entwicklung und Herstellung ihrer Produkte zu senken. Auf der anderen Seite steht die weiter voranschreitende Individualisierung. Die Kunden fordern individuelle Produkte, die ihre Anforderungen bestmöglich erfüllen. Die resultierende Produktvielfalt führt allerdings zu einer steigenden Komplexität bei der Leistungserstellung und wirkt sich somit negativ auf die Kosten aus.

Um in dieser Wettbewerbssituation Marktanteile zu erhalten oder auszubauen, kann die modulare Strukturierung von Produktfamilien einen entscheidenden Beitrag leisten. Modulare Produktfamilien zielen darauf ab, eine große marktseitige Produktvielfalt auf Grundlage einer kleinen internen Vielfalt zu erzeugen. Möglich wird dies durch die Konfiguration von Produktvarianten mit Hilfe von Modulen.

Die Potentiale modularer Produktfamilien gehen aber weit über dieses Kernziel hinaus. Im gesamten Produktleben können Vorteile erschlossen werden. So wird die Produktentwicklung maßgeblich unterstützt, da aufgrund der technisch-funktionalen Entkopplung der Module die Komplexität der Entwicklungsaufgabe verringert und zudem eine parallele Entwicklung von Modulen ermöglicht wird. Die Folge sind niedrigere Kosten und kürzere Entwicklungszeiten. In der Beschaffung können die Kosten dadurch gesenkt werden, dass durch den Zukauf ganzer Module die Anzahl der zu koordinierenden Lieferanten gesenkt wird und darüber hinaus die Auslagerung von Forschungs- und Entwicklungsleistungen durch modulare Produktstrukturen vereinfacht wird. In der Herstellung ergeben sich aus der Wiederverwendung von Modulen höhere Stückzahlen, die aufgrund von Skalen- und Lernkurveneffekten zu einer Kostenreduzierung und zu einer Verringerung der Fehlerrate führen. Im Vertrieb kann durch die Konfiguration

von Produktvarianten nicht nur eine große Produktvielfalt am Markt angeboten werden, sondern es können zudem kurze Lieferzeiten realisiert werden.

Im Anschluss an die Produkterstellung können Vorteile während der Produktnutzung und bei der Verwertung der Altprodukte erschlossen werden. In der Nutzungsphase ermöglicht die modulare Produktstruktur einen einfachen Austausch von Modulen, wodurch der Aufwand für die Instandhaltung gesenkt und der Funktionsumfang der Produkte erweitert oder angepasst werden kann. Am Ende des Produktlebens können Altprodukte in recycelgerechte Module zerlegt werden, was wiederum eine wirtschaftliche Verwertung der Produkte erlaubt.

Die vielfältigen Potentiale machen modular strukturierte Produktfamilien zu einem entscheidenden Wettbewerbsvorteil, mit dem die Attraktivität der Produkte für den Kunden gesteigert und gleichzeitig die Kosten für die Produkterstellung reduziert werden können. Die Vielfalt der zu berücksichtigenden Anforderungen macht die Entwicklung modularer Produktfamilien allerdings auch zu einer bedeutenden Herausforderung. Um die Potentiale modularer Produktfamilien erschließen zu können, müssen nicht nur technisch-funktionale Kopplungen zwischen Komponenten berücksichtigt werden, sondern auch produktstrategische Anforderungen. Darüber hinaus ist ihre Entwicklung infolge des tiefgreifenden Einflusses der Produktstruktur auf alle Produktlebensphasen eine sehr anspruchsvolle Aufgabe. In Unternehmen steht hinter jeder Produktlebensphase ein Fachbereich, der die Umsetzung seiner Anforderungen an die Produktstruktur anstrebt. So fordert gegebenenfalls der Bereich Beschaffung eine Zusammenfassung von Komponenten, die von einem gemeinsamen Lieferanten bezogen werden können, während aus Sicht der Herstellung die Bildung eines Moduls angestrebt wird, das einem Funktionstest unterzogen werden kann. Für die Produktstrukturierung ergibt sich daraus die Herausforderung, dass nicht nur eine Vielzahl von Anforderungen zu berücksichtigen ist, sondern zudem ein Ausgleich zwischen teilweise widersprüchlichen Zielsetzungen gefunden werden muss.

Wie im weiteren Verlauf der Arbeit aufgezeigt wird, bestehen im Stand der Wissenschaft bereits Ansätze, die in Teilbereichen die Entwicklung modularer Produktfamilien unterstützen. In den meisten Ansätzen werden allerdings ausschließlich technisch-funktionale Kopplungen zwischen Komponenten oder produktstrategische Anforderungen an die Produktstruktur betrachtet. Darüber hinaus wird in den bestehenden Ansätzen weder die Widersprüchlichkeit der Produktstrukturen aus Sicht der unterschiedlichen Produktlebensphasen berücksichtigt, noch werden die Unterscheidungsmerkmale der Produktfamilie unmittelbar in die Entwicklung einbezogen. Dies ist jedoch eine Voraussetzung, um Produktstrukturen entwickeln zu können, die durch eine eindeutige Zuordnung von varianten Merkmalen und Modulen eine einfache Konfiguration von Produktvarianten erlauben.

Im Folgenden werden die Ziele für die Entwicklung einer neuen Methode aufgestellt, die eine durchgehende Unterstützung der Entwicklung modularer Produktfamilien bietet.

## 1.2 Zielsetzung der Arbeit

Modulare Produktfamilien bieten Vorteile in allen Phasen des Produktlebens. Damit liefern sie einen wichtigen Beitrag zum Ausbau der Wettbewerbsposition eines Unternehmens; die Berücksichtigung der vielfältigen und teilweise widersprüchlichen Anforderungen macht die Entwicklung von modularen Produktfamilien aber auch zu einer anspruchsvollen Aufgabe. Ziel muss daher eine Vorgehensweise sein, die den Anwender durchgehend bei der Entwicklung modularer Produktfamilien unterstützt. Ergebnis der Anwendung der Methode soll eine Produktstruktur sein, die

- eine Konfiguration einer großen Vielfalt von Produktvarianten auf Grundlage einer kleinen internen Vielfalt erlaubt und
- die Potentiale modularer Produktfamilien in allen Produktlebensphasen erschließt.

Damit eine entsprechende Produktstruktur entwickelt werden kann, müssen sowohl technisch-funktionale Kopplungen zwischen Komponenten als auch produktstrategische Anforderungen an die Produktstruktur berücksichtigt werden. Zudem muss die Methode die Bildung eines Ausgleichs zwischen den vielfältigen und teilweise widersprüchlichen Anforderungen der unterschiedlichen Produktlebensphasen unterstützen und die Unterscheidungsmerkmale der Produktfamilie müssen unmittelbar in die Entwicklung einfließen.

Die Methode soll sich vorzugsweise an Hersteller variantenreicher maschinenbaulicher Produkte richten. Um eine breite Anwendbarkeit sicherzustellen, muss die Vorgehensweise für den Anwender leicht verständlich und gut nachvollziehbar sein.

## 1.3 Aufbau der Arbeit

Einen grafischen Überblick über den Aufbau der vorliegenden Arbeit gibt Bild 1.1. Wie der Darstellung zu entnehmen ist, folgt im zweiten Kapitel die Analyse der Problemstellung. Dies beinhaltet die Vorstellung der begrifflichen Grundlagen der Arbeit sowie die Betrachtung der Potentiale und Grenzen modularer Produktfamilien. Anhand dessen werden die Anforderungen an eine Methode zur Entwicklung modularer Produktfamilien aufgestellt.

1. Einleitung		
1. 1 Ausgangssituation		
1. 2 Zielsetzung der Arbeit		
1. 3 Aufbau der Arbeit		
2. Problemanalyse		
2. 1 Begriffliche Grundlagen modularer Produktfamilien		
2. 2 Potentiale und Grenzen modularer Produktfamilien		
2. 3 Anforderungen an die Entwicklung modularer Produktfamilien		
3. Stand der Wissenschaft		
3. 1 Entwicklung von Produktplattformen	3. 2 Entwicklung von modularen Produkt- strukturen	3. 3 Bewertung von modularen Produkt- familien
3. 4 Forschungsbedarf		
4. Methode zur Entwicklung modularer Produktfamilien		
4. 1 Arbeitsschritte der Methode		
4. 2 Zieldefinition		
4. 3 Ist-Aufnahme		
4. 4 Variantengerechte Produktgestaltung		
4. 5 Technisch-funktionale Modularisierung		
4. 6 Produktstrategische Modularisierung		
4. 7 Zusammenführung der Produktstrukturen		
4. 8 Konzeptbewertung und -auswahl		
4. 9 Ableitung der Baustuktur		
5. Validierung der Methode in einer Fallstudie		
5. 1 Planung der Fallstudie		
5. 2 Durchführung der Fallstudie		
5. 3 Auswertung der Fallstudie		
6. Zusammenfassung und Ausblick		

Bild 1.1: Aufbau der vorliegenden Arbeit

Im dritten Kapitel wird der Stand der Wissenschaft bei der Entwicklung von Produktplattformen und modularen Produktstrukturen sowie bei der Bewertung von modularen Produktfamilien zusammengefasst und mit Hilfe der im zweiten Kapitel aufgestellten Anforderungen beurteilt. Da keine der bestehenden Methoden eine durchgehende

Unterstützung bei der Entwicklung modularer Produktfamilien bietet, ergibt sich der am Ende des Kapitels vorgestellte Forschungsbedarf.

Die neu entwickelte Methode zur Entwicklung modularer Produktfamilien wird im vierten Kapitel vorgestellt. Dazu wird eingangs ein Überblick über die einzelnen Arbeitsschritte der Methode gegeben, bevor die Schritte im Detail erläutert werden.

Im fünften Kapitel der Arbeit wird die entwickelte Methode in einer Einzelfallstudie validiert. Als Fallstudie dient die Entwicklung einer modularen Produktfamilie von Tauchpumpen. Das Kapitel untergliedert sich in die Planung, Durchführung und Auswertung der Fallstudie. Anhand des im dritten Kapitel aufgestellten Forschungsbedarfs werden im Rahmen der Planung der Fallstudie Hypothesen abgeleitet, die auf Grundlage der Anwendung der Methode auf die Produktfamilie von Tauchpumpen überprüft werden.

Den Abschluss der Arbeit bilden die Zusammenfassung und der Ausblick. Neben der Zusammenfassung wird in diesem Kapitel ein Ausblick auf Ansatzpunkte für weitere Forschungsarbeiten gegeben, die sich aus Teilbereichen der vorliegenden Arbeit ergeben.



## 2 Problemanalyse

In diesem Kapitel wird die Problemstellung bei der Entwicklung modularer Produktfamilien analysiert. Dazu werden eingangs die begrifflichen Grundlagen für das Verständnis von modular strukturierten Produktfamilien gelegt. Dies beginnt mit den Begrifflichkeiten Produkt, Produktfamilie und Produktvariante sowie der Unterscheidung von Produktstrukturen und -architekturen, bevor die grundlegenden Ansätze zur Strukturierung von Produkten vorgestellt werden. Darauf aufbauend werden modulare Produktstrukturen vertiefend definiert und die Potentiale und Grenzen modular strukturierter Produktfamilien aufgezeigt. Abschließend werden Anforderungen an eine Methode zur Entwicklung modularer Produktfamilien abgeleitet.

### 2.1 Begriffliche Grundlagen modularer Produktfamilien

#### 2.1.1 Produkt und Produktfamilie

Als Produkt kann laut KOTLER alles bezeichnet werden, das einer Person angeboten werden kann, um einen Wunsch oder ein Bedürfnis zu befriedigen [Kot07]. Eine weitergehende Definition liefert Gablers Wirtschaftslexikon. Demnach ist ein Produkt das Ergebnis der Produktion, das Sachziel einer Unternehmung oder ebenfalls ein Mittel der Bedürfnisbefriedigung. Produkte werden in materielle Sachgüter, immaterielle Dienstleistungen sowie Energieleistungen unterteilt [Ali04]. Aufgrund der Ausrichtung der vorliegenden Arbeit werden Produkte im Folgenden als materielle, maschinenbauliche Sachgüter verstanden.

Wie in Bild 2.1 dargestellt ist, wird die Gesamtheit der Produkte, die ein Unternehmen am Markt anbietet, als Produktprogramm bezeichnet. Dieses kann sich wiederum aus dem Produktionsprogramm des Unternehmens sowie aus Produkten zusammensetzen,

die zugekauft und ohne substantielle Änderungen am Markt angeboten werden [Rup80].

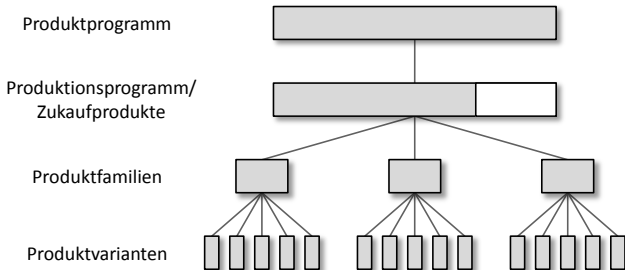


Bild 2.1: Gliederung eines Produktprogramms in Anlehnung an [Kom98;Sek05]

Das Produktprogramm kann sich darüber hinaus aus Produktfamilien zusammensetzen, wobei Produktfamilien eine Menge verschiedener Produkte darstellen, die sich gemeinsame Komponenten und Funktionen teilen und auf ähnliche Anwendungsbereiche abzielen (vgl. [Mey97;Göp98]).

Die einzelnen Vertreter einer Produktfamilie werden als Varianten bezeichnet [Del06]. In Anlehnung an FRANKE können Varianten von Produkten als andere Produkte des gleichen Zwecks bezeichnet werden, die sich in mindestens einem Merkmal unterscheiden [Fra02]. Man spricht von den Unterscheidungsmerkmalen einer Produktfamilie, die unterschiedlich ausgeprägt sein können (vgl. [Rob98]).

### 2.1.2 Produktstruktur und Produktarchitektur

Die Struktur eines Produkts kann anhand seiner funktionalen Elemente oder seiner physischen Komponenten beschrieben werden. Die Umsetzung der funktionalen Anforderungen in ein physisches Produkt erfolgt im Entwicklungsprozess nach PAHL und BEITZ in der Konzept- und Entwurfsphase [Pah07]. In der Konzeptphase wird die Gesamtfunktion des Produkts ermittelt und in ihre Teilfunktionen gegliedert. Durch die Verknüpfung der einzelnen Teilfunktionen ergibt sich die Funktionsstruktur, die das Produkt funktional beschreibt. Darauf aufbauend werden die Wirkprinzipien bestimmt, durch die die Teilfunktionen erfüllt werden.

Ergebnis der Konzeptphase ist somit eine prinzipielle Festlegung der Lösung. Die darauf aufbauende Entwicklung einer Baustruktur erfolgt in der Entwurfsphase. In dieser Phase werden den Teilfunktionen technische Funktionsträger, die Komponenten des Produkts, zugeordnet. Die Komponenten können Einzelteile oder Baugruppen sein, wobei sich Baugruppen wiederum aus Einzelteilen oder untergeordneten Baugruppen zusammensetzen können [Sch05]. Durch das Zusammenfassen der Komponenten zu

übergeordneten Baugruppen und weiter zu einem Gesamtprodukt wird die Baustruktur des Produkts schlussendlich festgelegt.

Die Zuordnung von Funktionsstruktur und Baustruktur ist in Bild 2.2 dargestellt. Die Gesamtheit der funktionalen und physikalischen Beschreibung eines Produkts, also die Zusammenfassung von Funktionsstruktur und Baustruktur, stellt die Produktarchitektur dar. Sie wird von ULRICH als die Anordnung von funktionalen Elementen, die Zuordnung von funktionalen Elementen zu den physischen Komponenten sowie die Spezifikation der Schnittstellen zwischen den physischen Komponenten definiert [Ulr04].

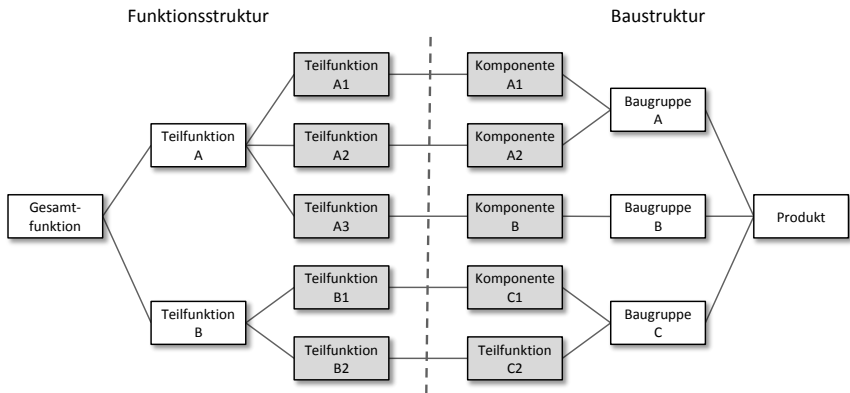


Bild 2.2: Schematische Darstellung einer Produktarchitektur in Anlehnung an [Kop04]

Im Gegensatz zur Produktarchitektur bezieht sich die Produktstruktur ausschließlich auf den physischen Aufbau eines Produkts und kann daher mit der Baustruktur gleichgesetzt werden. SCHUH definiert die Produktstruktur als die strukturierte Zusammensetzung eines Produkts aus seinen Komponenten. Baugruppen und Einzelteile bilden dabei Strukturstufen, indem sie Komponenten auf tieferer Ebene der Produktstruktur zusammenfassen [Sch05].

### 2.1.3 Arten der Produktstruktur

Die Produktstruktur ist für die Güte einer Entwicklung von entscheidender Bedeutung. Unter anderem wird die Fertigungs- und Beschaffungsart durch die Struktur des Produkts bestimmt, der Montageablauf wird durch die Bildung von Baugruppen weitgehend festgelegt und Qualitätssicherung und -kontrolle werden beeinflusst [Pah07]. Für die erfolgreiche Entwicklung von Produkten ist eine geeignete Produktstruktur daher eine grundlegende Voraussetzung. Im Folgenden werden die gängigsten Bauweisen und Arten der Produktstruktur vorgestellt.

## Differenzial- und Integralbauweise

KOLLER definiert das Zusammenfassen mehrerer Bauteile gleicher oder unterschiedlicher Funktion zu einem Bauteil mit der gleichen Anzahl an Funktionen als Integralbauweise. Demgegenüber bezeichnet die Differenzialbauweise das Zergliedern eines Bauteils mit mehreren Funktionen in mehrere Bauteile mit jeweils einer geringeren Anzahl an Funktionen (Bild 2.3) [Kol94].

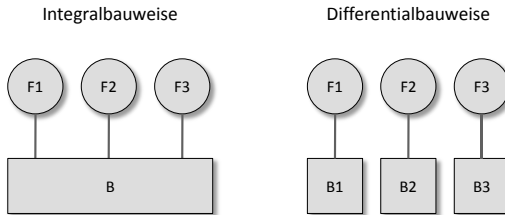


Bild 2.3: Integralbauweise und Differenzialbauweise (*F*: Funktion, *B*: Bauteil) nach [Kol94]

Vorteile der Differenzialbauweise können die Verwendung von handelsüblichen Normteilen oder die verringerten Abmessungen von Einzelteilen während des Transports sein. Bei der Integralbauweise können dagegen Fügstellen und somit auch Montageschritte eingespart werden.

## Baureihe

Baureihen sind nach KOLLER dadurch gekennzeichnet, dass sich ihre Baustufen nach dem Gesetz der Reihe ordnen lassen. Der die Baureihe bestimmende Parameter kann beispielsweise eine physikalische Größe (Leistung, Drehzahl, Geschwindigkeit etc.), die Gestalt oder auch der Werkstoff sein. Die Stufung wird dazu meist auf Basis geometrischer Reihen festgelegt, die sich durch einen gleichbleibenden prozentualen Zuwachs auszeichnen. Am Anfang sind dementsprechend kleine absolute Sprünge, später größere vorhanden (Bild 2.4) [Kol94].

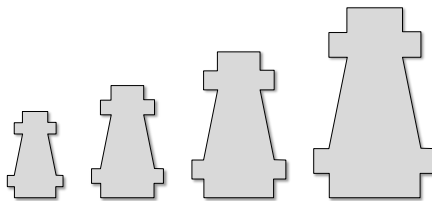


Bild 2.4: Schematische Darstellung einer Baureihe

Für den Hersteller einer Baureihe ist insbesondere der deutlich reduzierte Konstruktionsaufwand von Vorteil. Aufgrund der Abstufung der Parameter können die Betriebsigenschaften des Produkts allerdings nicht immer optimal erfüllt werden.

### **Baukasten**

In einem Baukasten lassen sich laut PAHL und BEITZ verschiedene Gesamtfunktionen durch die Kombination von Bausteinen mit oft unterschiedlichen Lösungen erfüllen. Durch mehrere Größenstufen von Bausteinen enthalten Baukästen oft auch Baureihen. Die Bausteine sollen dabei nach möglichst ähnlicher Technologie gefertigt werden [Pah07].

Durch einen Baukasten kann eine sehr große Anzahl an Produkten mit einer begrenzten Anzahl an Bausteinen erzeugt werden. Der Vorteil für den Hersteller sind unter anderem große Losgrößen in der Fertigung, eine kostengünstige Lagerung und kurze Lieferzeiten.

### **Modulbauweise**

KOLLER definiert die Modulbauweise als das Zusammenfassen und Verwirklichen von Funktionen eines technischen Systems in eigenständige, funktionsfähige Module. Standardisierte Schnittstellen sind für das Zusammenwirken verschiedener Module eine notwendige Voraussetzung. Er sieht den Vorteil der Modulbauweise in der vereinfachten Reparatur des Gesamtprodukts durch den Austausch von Modulen. Als Nachteil sieht er den höheren Fertigungsaufwand infolge der zusätzlichen Schnittstellen [Kol94].

Aufgrund der grundlegenden Bedeutung der Modulbauweise für die vorliegende Arbeit werden modulare Produktstrukturen in Abschnitt 2.1.4 eingehender betrachtet.

### **Produktplattform**

In einem engen Zusammenhang zur modularen Bauweise steht die Produktplattform. Eine Produktplattform ist laut MEYER und LEHNERD ein Satz von Subsystemen und Schnittstellen, die eine gemeinsame Struktur bilden, von der Produktvarianten abgeleitet werden können [Mey97]. Die Plattform besteht somit aus den Komponenten, Schnittstellen und Funktionen, die über die ganze Produktfamilie vereinheitlicht und auch zeitlich stabil sind [Sch05]. Die übergreifende Verwendung von Komponenten ermöglicht es Unternehmen, die am Markt geforderte Produktvarianz anzubieten, ohne Skaleneffekte zu vernachlässigen.

Der Begriff der Plattform wird in der Literatur vielfach weiter ausgelegt. Neben den physischen Komponenten wird der Plattformbegriff in entsprechenden Veröffentlichungen auch auf Technologien, Prozesse und Organisationen ausgedehnt (vgl. [Mey97]).

## Paketbildung

Laut SCHUH setzen sich Pakete aus Anbauteilen für verschiedene Ausstattungen und Funktionen zusammen. Durch die bewusste Einschränkung der vom Produkt gebotenen Konfigurationsmöglichkeiten wird der Aufwand in der Entwicklung und Disposition reduziert [Sch89].

Bei Paketen handelt es sich nicht um eine Produktstruktur im eigentlichen Sinne, sondern vielmehr um eine Strukturierung des angebotenen Produktprogramms. Die Paketbildung kann dabei auf einem als Baureihe, als Baukasten oder auf einem modular strukturierten Produkt aufsetzen [Rap99].

### 2.1.4 Modular strukturierte Produktfamilien

In der Literatur existiert eine große Anzahl von Definitionen für modular strukturierte Produkte. Selbst innerhalb einzelner Branchen, wie beispielsweise der Automobilindustrie, besteht keine einheitliche Definition. In der Automobilindustrie ist allerdings eine aus der Montagesicht geprägte Definition von Modularität vorherrschend. PILLER und WARINGER definieren in ihrer branchengeprägten Arbeit ein Modul als eine unter Montageaspekten abgrenzbare und einbaufertige Einheit, deren Bausteine physisch miteinander verbunden sind [Pil99]. Der Aspekt der räumlichen Abgeschlossenheit wird ebenfalls von WILHELM hervorgehoben. Er bezeichnet ein Modul als eine räumlich abgegrenzte, komplexe Baugruppe mit definierten Schnittstellen für mechanische Verbindungen und für alle zu übertragenden Leistungen und Informationen [Wil01].

Im Gegensatz zu den vorangegangenen Definitionen wird die Modularität eines Produkts von ULRICH anhand seiner Architektur definiert [Ulr95]. Modulare Produktarchitekturen weisen nach seiner Definition die folgenden Merkmale auf:

- Die Teilfunktionen werden in Eins-zu-eins-Beziehungen durch die physischen Komponenten der Produktstruktur abgebildet (*one-to-one mapping*).
- Die Schnittstellen zwischen den Komponenten sind entkoppelt.

Durch das erste Kriterium grenzt ULRICH modulare Produktarchitekturen von integralen Produktarchitekturen ab. Eine Produktarchitektur ist vollständig modular, wenn jeder Teilfunktion genau eine physische Komponente zugeordnet wird. Sind einer physischen Komponente mehrere Funktionen zugeordnet, liegt eine integrale Produktarchitektur vor. Produktarchitekturen weisen allerdings im Allgemeinen beide Beziehungen auf. Laut GÖPFERT stellt Modularität daher eine graduelle Eigenschaft der Produktarchitektur dar [Göp98].

Das zweite Kriterium bezieht sich auf die Kopplung von Komponenten über Schnittstellen. Eine Entkopplung liegt dann vor, wenn die Änderung einer Komponente nicht die

Änderung einer anderen Komponente erforderlich macht. Die Kopplung von Komponenten bezieht sich hierbei nicht ausschließlich auf geometrische Abhängigkeiten, sondern schließt auch physikalische Phänomene wie Wärme oder Magnetismus ein [Ulr95].

Eine systemtechnische Betrachtung von Modularität erfolgt in den Arbeiten von GÖPFERT [Göp98] und KOPPENHAGEN [Kop04]. Sie definieren modulare Systeme anhand der Ausprägungsstärke der Beziehungen zwischen ihren Subsystemen. Demnach ist ein System modular, wenn es aus Subsystemen besteht, deren innere Beziehungen stärker ausgeprägt sind als die Beziehungen zwischen den Subsystemen.

Einen Ansatz zur Vereinheitlichung der vielfältigen Definitionen unternimmt SALVADOR [Sal07]. Aus ingenieurs- und betriebswissenschaftlichen Veröffentlichungen leitet er fünf Merkmale modularer Produkte ab:

- *Kommunalität der Module*: Komponenten bzw. Module werden an mehreren Stellen innerhalb einer Produktfamilie verwendet.
- *Kombinierbarkeit der Module*: Produkte können durch die Kombination von Komponenten bzw. Modulen konfiguriert werden.
- *Funktionsbindung*: Es besteht eine feste Zuordnung zwischen Funktionen und Komponenten bzw. Modulen.
- *Schnittstellenstandardisierung*: Die Schnittstellen zwischen den Modulen sind standardisiert.
- *Entkopplung der Module*: Die Interaktionen der Komponenten innerhalb eines Moduls sind stärker ausgeprägt als die Interaktionen zwischen Komponenten verschiedener Module.

In Bild 2.5 werden die Merkmale modularer Produktstrukturen dargestellt und zusammengefasst.

Den genannten Merkmalen modularer Produkte stellt SALVADOR seine eigene Definition gegenüber. Demnach ist ein Produkt modular, wenn sich seine Komponenten bzw. Module vom Gesamtprodukt separieren lassen und untereinander kombinierbar sind. Während die Kombinierbarkeit direkt ein von ihm ermitteltes Merkmal modularer Produkte darstellt, bringt er die verbleibenden Merkmale in Zusammenhang mit seiner Definition.

Das Merkmal *Entkopplung der Module* stellt somit eine Voraussetzung für die geforderte Separierbarkeit eines Moduls dar. Gleichzeitig ist eine schwache Kopplung der Module erforderlich, um die Kombinierbarkeit der Module zu ermöglichen.

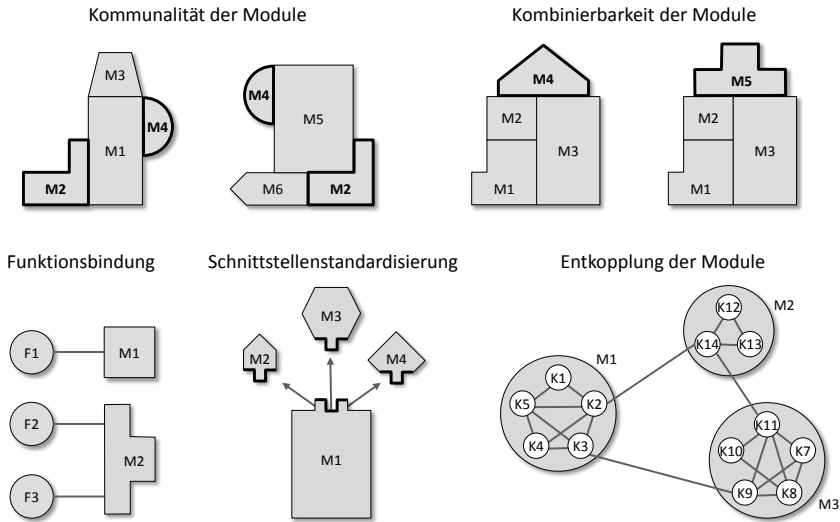


Bild 2.5: Merkmale modularer Produkte (*F: Funktion, K: Komponente, M: Modul*)

Die Merkmale *Funktionsbindung* und *Schnittstellenstandardisierung* zielen ebenfalls auf die Kombinierbarkeit von Modulen ab. Laut SALVADOR ist die Kombinierbarkeit von Modulen sichergestellt, wenn Funktionsbindung sowie standardisierte Schnittstellen vorliegen. Dabei ist es nicht erforderlich, dass Funktionen eins zu eins abgebildet werden. Vielmehr kann durch ein Modul auch ein festgelegter Satz an Funktionen abgebildet werden.

Das verbleibende Merkmal *Kommunalität der Module* sieht SALVADOR schließlich als direkte Folge einer Separierbarkeit und Kombinierbarkeit von Modulen. Er vervollständigt damit den Zusammenhang der fünf Merkmale modularer Produkte zu seiner Definition.

Im Gegensatz zu den vorangegangenen Definitionen bezieht ERIXON die Gründe für die Bildung von Modulen mit in die Definition ein. Er sieht in der Modularisierung die Zerlegung eines Produkts in Module mit definierten Schnittstellen aufgrund unternehmensspezifischer Gründe [Eri98]. Aufbauend auf dieser Definition bezeichnet KOEPPEN ein Modul als eine Teilgruppe von untereinander stark gekoppelten Komponenten. Dabei sieht sie es als unerheblich an, ob die Kopplung auf geometrischen, funktionalen oder betriebswirtschaftlichen Aspekten beruht [Koe08a]. Entsprechend muss ein Modul weder physisch zusammenhängen noch funktional separierbar sein. Beispiele für physisch nicht zusammenhängende Module können Komponenten sein, die gemeinsame Entwicklungs- oder Fertigungsprozesse durchlaufen oder die bei einem gemeinsamen Zulieferer eingekauft werden.

In der vorliegenden Arbeit orientiert sich die Entwicklung modularer Produktfamilien ebenfalls an den technisch-funktionalen Kopplungen zwischen Komponenten und den produktstrategischen Treibern, die für die Bildung von Modulen vorliegen. Aufbauend auf den vorangegangenen Definitionen werden modulare Produktfamilien daher wie folgt definiert:

*Eine Produktfamilie ist modular strukturiert, wenn sie aus Modulen mit definierten Schnittstellen aufgebaut ist, deren innere technisch-funktionale und produktstrategische Beziehungen stärker ausgeprägt sind als die Beziehungen untereinander. Innerhalb der Produktfamilie können Produktvarianten durch die Kombination von Modulen konfiguriert werden.*

Es muss allerdings festgehalten werden, dass die Modularität einer Produktfamilie eine graduelle Eigenschaft ist, die Vor- und Nachteile aufweist. Ziel der Modularisierung ist daher nicht die Entwicklung möglichst modularer Produktfamilien, sondern die bestmögliche Erfüllung der an die Produktstruktur gestellten Anforderungen.

## 2.2 Potentiale und Grenzen modularer Produktfamilien

Durch eine modulare Strukturierung von Produktfamilien können Potentiale in allen Phasen des Produktlebens erschlossen werden (Bild 2.6). Die Potentiale, aber auch die Grenzen modularer Produktfamilien, werden im Folgenden erläutert.

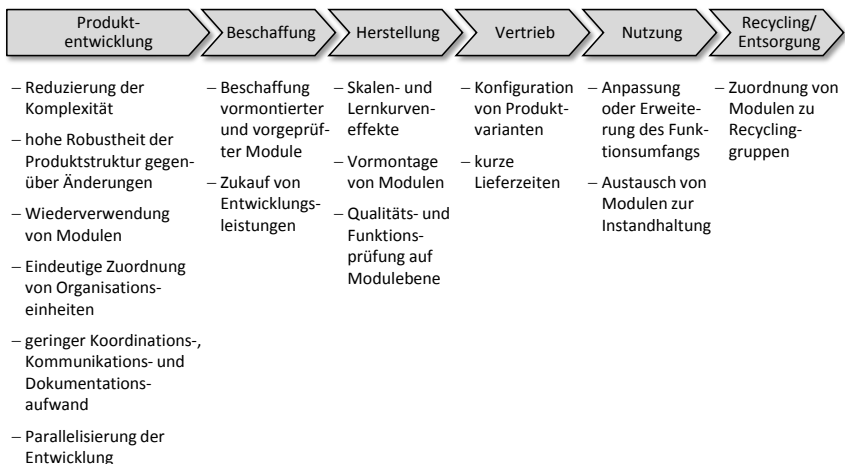


Bild 2.6: Einordnung der Potentiale modularer Produkte in die Produktlebensphasen

In der Produktentwicklung können Potentiale modularer Produktfamilien insbesondere aufgrund der technisch-funktionalen Entkopplung erschlossen werden. So kann durch die Abgeschlossenheit der Module eine Reduzierung der Komplexität der Entwicklungsaufgabe erreicht werden. Die Komplexität von Produkten bestimmt sich durch die Anzahl ihrer Komponenten sowie der Beziehungen und Wirkflächen zwischen den Komponenten (vgl. [Mer06]). Durch die Entkopplung von Modulen kann die Anzahl der Beziehungen verringert werden, die im Rahmen der Entwicklung berücksichtigt werden müssen.

Darüber hinaus wird durch die technisch-funktionale Entkopplung eine hohe Robustheit des Produkts gegenüber konstruktiven Änderungen erreicht. Änderungen bleiben aufgrund der Entkopplung der einzelnen Module weitgehend auf die entsprechenden Module beschränkt und beeinflussen das Gesamtprodukt nur in geringem Maße [Göp98]. Dieser Effekt kann bei modularen Produkten in vielfältiger Form genutzt werden. Module können beispielsweise im Lauf des Produktlebenszyklus weiterentwickelt werden, um technische Neuerungen in das Produkt einfließen zu lassen. Neben Produktpflegemaßnahmen ermöglicht die Abgeschlossenheit der Module auch eine schnelle Reaktion auf geänderte Rahmenbedingungen. Dies können neue Technologien sein, aber auch neue oder geänderte Normen oder Gesetze.

Bei der Weiterentwicklung von Produkten ermöglicht die Abgeschlossenheit der Module eine Wiederverwendung einzelner Module des Vorgängerprodukts. Damit kann nicht nur der Aufwand für die Weiterentwicklung deutlich gesenkt werden, sondern auch die Dauer.

Die Abgeschlossenheit der Module wirkt sich aber auch positiv auf die Strukturierung des Entwicklungsprozesses aus. Bei einer entsprechend aufgebauten Organisationsstruktur können Entwicklungsaufgaben eindeutig Organisationseinheiten zugeordnet werden. Dies verringert den erforderlichen Koordinations-, Kommunikations- und Dokumentationsaufwand [Kop04] und erlaubt die parallele Bearbeitung von Entwicklungsaufgaben. Durch die Parallelisierung von Entwicklungsaufgaben wird nicht nur eine Verkürzung der Entwicklungszeiten ermöglicht, sondern erlaubt bei klar definierten Schnittstellen auch die Einbindung von externen Entwicklungspartnern [Bal98].

In der Beschaffung ermöglicht eine modulare Strukturierung von Produkten den Zukauf von Modulen, die vom Zulieferer bereits vormontiert und geprüft sind. Wie bereits aufgezeigt, können darüber hinaus auch Entwicklungsleistungen ausgelagert werden. Insbesondere bei komplexen Produkten ist ein Zukauf von Modulen erforderlich, um nicht das Netz der Zulieferer bis hin zum Komponentenhersteller als Ganzes verwalten zu müssen [Bal93].

Wie bereits in der Entwicklung können auch in der Herstellung Potentiale durch die Wiederverwendung von Modulen erschlossen werden. Durch höhere Stückzahlen können Skaleneffekte genutzt werden und durch die Verwendung von Baugruppen, die bereits eine hohe Reife erreicht haben, kann die Fehlerrate verringert werden [Göp98]. Zusätzlich ist die Möglichkeit einer hierarchischen Strukturierung der Produktionsprozesse von besonderer Bedeutung für die Herstellung. Bei einer parallelen Vormontage von Modulen verkürzt dies die Durchlaufzeiten deutlich. Zugleich können Qualitäts- und Funktionsprüfungen an den vormontierten Modulen separat durchgeführt werden. Fehlerhafte Module können somit frühzeitig erkannt werden.

Im Vertrieb ist die einfache Erstellung von Produktvarianten mit Hilfe von varianten Modulen ein bedeutender Vorteil [Ulr04]. Bei einer eindeutigen Zuordnung der Unterscheidungsmerkmale einer Produktfamilie zu ihren varianten Modulen wird die Konfiguration von Produktvarianten ermöglicht. Eine hohe Produktvielfalt kann somit bei begrenzten Auswirkungen auf den Entwicklungs- und Herstellungsprozess realisiert werden [Rat93]. Darüber hinaus erlaubt die Konfiguration von Produktvarianten auch die Umsetzung von kurzen Lieferzeiten.

Durch die Verwendung von standardisierten Modulen in der gesamten Produktfamilie können auch bei variantenreichen Produkten Skalen- und Lernkurveneffekte erschlossen werden. Zusätzlich kann es durch eine unternehmensübergreifende Standardisierung ermöglicht werden, auf bereits am Markt verfügbare Module zurückzugreifen [Göp98].

In der Nutzungsphase kann die Austauschbarkeit von Modulen einen Vorteil für den Kunden darstellen [Ulr95]. Dabei kann es sich um die Aufwertung eines Produkts durch hochwertigere Ersatzmodule handeln oder um die Anpassung des Produkts an die jeweiligen Einsatz- und Umgebungsbedingungen. Der Austausch von Modulen kann aber auch bei der Wartung oder Reparatur von Produkten vorteilhaft sein. Wartungstätigkeiten können durch das Zusammenfassen von Verschleißteilen oder Verbrauchsmaterialien vereinfacht werden. Reparaturen können durch den Austausch von defekten Modulen durchgeführt werden. Schäden müssen somit nur bis auf Modulebene lokalisiert werden und gegebenenfalls wird eine Reparatur vor Ort und unter ungünstigen Bedingungen möglich.

Das Recycling und die Entsorgung des Altprodukts werden durch eine Zuordnung von Modulen zu Recyclinggruppen unterstützt [Kra94]. Somit wird durch eine modulare Produktstruktur eine wirtschaftliche Verwertung ermöglicht. Auch eine Wiederverwendung einzelner Module ist dabei möglich.

Neben den vielfältigen Potentialen, die durch eine modulare Produktstruktur erschlossen werden können, müssen jedoch auch die Grenzen berücksichtigt werden. Grundle-

gend ist hierbei, dass die modulare Struktur eines Produkts die Optimierung der Gesamtfunktion behindern kann [Kop04]. Zwar können die Funktionen der Einzelmodule optimiert werden, sie sind aber bei einer übergreifenden Verwendung in einer Produktfamilie vielfach überdimensioniert oder zumindest nicht optimal auf das jeweilige Endprodukt angepasst.

Des Weiteren erfordern modular strukturierte Produkte im Gegensatz zu integral strukturierten Produkten die Bereitstellung von Schnittstellen. Diese bringen allerdings ein Mehrgewicht des Produkts mit sich, erfordern zusätzlichen Bauraum und stellen einen Kostenfaktor dar. Produkte, die hinsichtlich Gewicht und Bauraum hohen Anforderungen unterliegen, werden daher zu einem höheren Grad integral strukturiert. Dies gilt ebenfalls für einfache Produkte, die mit einer geringen Varianz in hohen Stückzahlen gefertigt werden. Hierbei sind die Kosten der Schnittstellen ausschlaggebend.

Der angestrebte hohe Anteil standardisierter Module bietet zwar grundlegende Vorteile, muss aber auch kritisch hinterfragt werden. Eine Gefahr, die ein hoher Standardisierungsgrad mit sich bringt, ist eine mangelnde Produktdifferenzierung aus Sicht des Kunden. Für die Produktstrukturierung muss daher ermittelt werden, bis zu welchem Grad die interne Komplexität durch die Standardisierung von Modulen reduziert werden kann, ohne die externe Vielfalt zu begrenzen. Ein weiteres Risiko ergibt sich bei einer unternehmensübergreifenden Standardisierung von Modulen. In diesem Fall wird Konkurrenten die Substitution von Modulen erheblich erleichtert [Göp98].

Zusammenfassend ergibt sich aus der Betrachtung der Potentiale und Grenzen von modularen Produktfamilien, dass eine Entscheidung zugunsten einer eher integralen oder eher modularen Produktstruktur nur unter Berücksichtigung des jeweiligen Produkts und der unternehmensspezifischen Strategie getroffen werden kann.

### 2.3 Anforderungen an die Entwicklung modularer Produktfamilien

Wie im letzten Abschnitt verdeutlicht wurde, kann die modulare Strukturierung ein bedeutender Faktor für den Erfolg einer Produktfamilie sein. Insbesondere bei komplexen und variantenreichen Produkten ist eine geeignete Strukturierung unumgänglich, um den vielfältigen Zielsetzungen aus allen Phasen des Produktlebens gerecht zu werden. An eine Methode, die bei der Entwicklung einer modularen Produktfamilie unterstützt, stellen sich allerdings vielfältige Anforderungen. Diese ergeben sich nicht nur aus den vorangegangenen Betrachtungen, sondern stellen auch allgemeingültige Anforderungen an Methoden dar:

**Eignung für die Entwicklung modularer Produktfamilien:** Durch die modulare Strukturierung von Produktfamilien soll einerseits eine einfache Konfiguration von Produkta-

rianten ermöglicht werden, andererseits sollen aber auch die im gesamten Produktleben angesiedelten Potentiale der Modularisierung erschlossen werden. Daher müssen bei der Entwicklung modularer Produktfamilien nicht nur die Unterscheidungsmerkmale berücksichtigt werden, durch die sich die einzelnen Varianten innerhalb der Produktfamilien voneinander abgrenzen, sondern auch die Anforderungen, die sich aus dem gesamten Produktleben ergeben.

**Berücksichtigung produktstrategischer und technisch-funktionaler Beziehungen:** Die Potentiale einer modularen Produktstruktur ergeben sich aus der Bildung von Modulen aufgrund von technisch-funktionalen und produktstrategischen Beziehungen. In einer Vorgehensweise zur Produktstrukturierung müssen daher beide Beziehungsarten Berücksichtigung finden.

**Berücksichtigung unterschiedlicher Zielsetzungen:** Zur Entwicklung modularer Produktfamilien muss eine Vielzahl von teilweise widersprüchlichen Anforderungen aus allen Produktlebensphasen berücksichtigt werden. Ein Hauptaugenmerk einer Methode zur Entwicklung modularer Produktfamilien muss daher darauf liegen, Widersprüche für den Anwender sichtbar zu machen und ihn bei der Entwicklung von Lösungsansätzen zu unterstützen.

**Berücksichtigung der variantengerechten Produktgestaltung:** Die variantengerechte Gestaltung und die Produktstrukturierung bedingen sich laut FRANKE gegenseitig [Fra02]. Erst wenn die Komponenten in einer Weise gestaltet wurden, die eine einfache Abbildung der varianten Merkmale einer Produktfamilie erlaubt, können Module abgeleitet werden, die eine einfache Konfiguration von Produktvarianten ermöglichen. Eine Methode zur Entwicklung modularer Produktfamilien muss die variantengerechte Produktgestaltung daher mit in das ganzheitliche Vorgehen einbeziehen.

**Berücksichtigung konstruktiver Lösungsansätze:** Eine modulare Produktstruktur steht in einem engen Wechselspiel mit der baulichen, konstruktiven Umsetzung des Produkts. In die Entwicklung modularer Produktfamilien müssen daher auch konstruktive Lösungsansätze eingebracht werden.

**Darstellung und Dokumentation:** Eine Methode zur Entwicklung modularer Produktfamilien muss grundsätzlich eine einfache Darstellung und Dokumentation von Konzepten ermöglichen. Eine leicht verständliche Darstellung der Konzepte ist erforderlich, um die Kommunikation zwischen verschiedenen Fachbereichen zu fördern und ein übergreifendes Verständnis für die Konzepte sicherzustellen. Zusätzlich ist eine detaillierte Dokumentation des Vorgehens sicherzustellen, um im Laufe der Entwicklung getroffene Entscheidungen nachvollziehbar zu gestalten.

**Nachvollziehbarkeit und Verständlichkeit:** Allgemeingültig sollten Methoden für den Anwender gut nachvollziehbar und leicht verständlich sein. Dies ist erforderlich, um die

Akzeptanz der Anwender gegenüber dem Einsatz der Methode sowie den erzielten Ergebnissen sicherzustellen.

**Bewertung und Auswahl von Konzepten:** Bei der Entwicklung modularer Produktfamilien kann die parallele Weiterverfolgung alternativer Lösungskonzepte erforderlich sein, damit zur Konzeptauswahl ein ausreichend hohes Informationsniveau sichergestellt werden kann. Bestandteil einer Methode zur Entwicklung modularer Produktfamilien muss daher ein geeignetes Verfahren zur Bewertung und Auswahl von Konzepten sein. Das Verfahren muss eine ausreichende *Aussagekraft* haben, um eine objektive Bewertung von modularen Produktfamilien zu ermöglichen. Gleichzeitig muss der *Aufwand* zur Ermittlung der Messgrößen möglichst gering sein und in einem sinnvollen Verhältnis zum Nutzen der Bewertungsgröße stehen. Außerdem ergibt sich die Anforderung der *Transparenz*, da auch ein Bewertungsverfahren leicht verständlich und gut nachvollziehbar sein muss, um beim Anwender eine Akzeptanz der Bewertungsergebnisse zu erzielen [Jun05].

## **3 Stand der Wissenschaft**

In diesem Kapitel wird der derzeitige Stand der Wissenschaft bei der Entwicklung von Produktplattformen und modularen Produktstrukturen zusammengefasst und analysiert. Beide Ansätze zielen auf die Entwicklung und Strukturierung von Produktfamilien. Methoden der Plattformentwicklung beziehen dabei oftmals die Produktprogrammplanung mit in den Betrachtungsrahmen ein. Im Gegensatz dazu finden in den Methoden zur Modularisierung auch Aspekte aus anderen Produktlebensphasen, wie aus der Herstellung oder der Nutzungsphase, Berücksichtigung. Ergänzt wird die Zusammenstellung der Entwicklungsmethoden durch Methoden zur Bewertung von modularen Produktfamilien. Nach jedem Abschnitt werden die vorgestellten Methoden den Anforderungen gegenübergestellt, die am Ende des vorangegangenen Kapitels aufgestellt wurden. Anhand dessen wird abschließend der Forschungsbedarf für die vorliegende Arbeit abgeleitet.

### **3.1 Entwicklung von Produktplattformen**

#### **3.1.1 Grundlagen der Plattformentwicklung**

Grundgedanke bei der Entwicklung von Produktplattformen ist der Ausgleich zwischen der vom Markt geforderten Vielfalt und den aus Kosten- und Komplexitätsgründen erforderlichen Kommunalitäten. Ziel ist daher eine Aufteilung der Produktstruktur in Plattform- und Nicht-Plattform-Anteile entsprechend der Differenzierungsanforderungen oder der Vereinheitlichungspotentiale. Kriterien für die Übernahme in die Plattform sind stabile Marktbedürfnisse sowie Robustheit und Ähnlichkeit, während Elemente mit hohen Flexibilitätsanforderungen, sich schnell ändernden Marktbedürfnissen und hohen Differenzierungsansprüchen außerhalb der Plattform bereitgestellt werden müssen [Hof01].

Das Plattformkonzept zielt somit auf der einen Seite darauf ab, durch Vorausplanung von Produktfamilien den Gleichteileanteil über verschiedene Produktvarianten hinweg zu erhöhen. Auf der anderen Seite soll eine Plattform aber auch über mehrere Produktgenerationen hinweg eingesetzt werden können. Dies ermöglicht eine Verkürzung des Innovationszyklus, da nicht das gesamte Produkt neu entwickelt werden muss. Die Plattformentwicklung erweitert den Betrachtungsrahmen somit von einer Produktgeneration auch auf zukünftige Produktgenerationen [Rap99].

Im Folgenden werden die strategischen Vorgehensweisen zur Plattformentwicklung nach MEYER/LEHNERD und ROBERTSON/ULRICH sowie die stärker konzeptionell ausgerichteten Ansätze nach MARTIN/ISHII, GOZALEZ-ZUGASTI et al. und SIMPSON et al. vorgestellt.

### 3.1.2 Methoden zur Entwicklung von Produktplattformen

#### 3.1.2.1 The Power Tower nach MEYER/LEHNERD

Der Power Tower von MEYER und LEHNERD [Mey97] stellt die Produktplattform in den Zusammenhang von Zielmärkten und gemeinsamen technischen und organisatorischen Bausteinen (Bild 3.1).

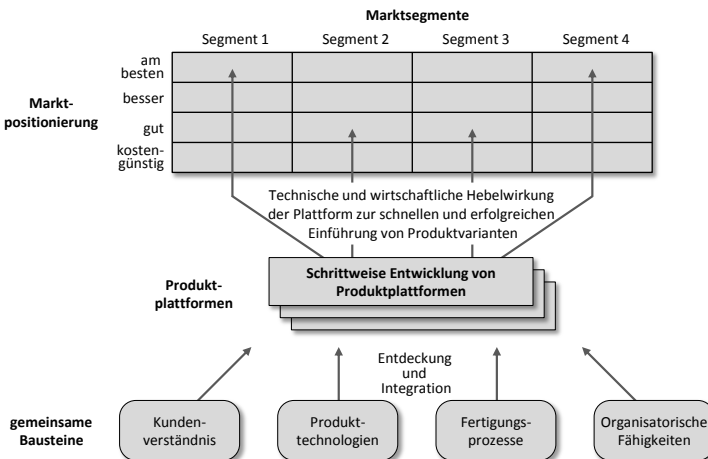


Bild 3.1: Der Power Tower nach [Mey97]

Grundlage der Plattformentwicklung sind die gemeinsamen Bausteine Kundenverständnis, Produkttechnologien, Fertigungsprozesse und organisatorische Fähigkeiten des Unternehmens. Aus diesen Bausteinen werden einzelne Produktplattformen abgeleitet. Produktplattformen werden von MEYER und LEHNERD nicht als zeitlich starr angesehen, sondern unterliegen einer kontinuierlichen Weiterentwicklung. Von der Produktplattform werden Produktvarianten abgeleitet, die in verschiedenen Marktseg-

menten positioniert werden können. Die Plattform stellt dabei den Hebel für einen schnellen und erfolgreichen Markteintritt dar.

Für die Einführung einer Plattformstrategie definieren MEYER und LEHNERD ein Vorgehen in fünf Schritten. Ausgangspunkt ist das Erstellen eines Netzplans, in dem die Marktsegmente in der Horizontalen und die Positionierung innerhalb der Segmente in der Vertikalen aufgetragen werden (vgl. Bild 3.1). Daran schließt sich im folgenden Schritt die Bewertung des Wachstumspotentials der einzelnen Zielmärkte an.

Die Definition der Plattform erfolgt im dritten Schritt. MEYER und LEHNERD schlagen Blockdiagramme vor, um gemeinsame Subsysteme und Schnittstellen darzustellen. Im darauffolgenden Schritt werden die entwickelte Plattform und die abgeleiteten Produktvarianten mit Wettbewerbsprodukten verglichen. Ziel ist die Bestimmung der Merkmale, welche die eigenen Produkte gegenüber dem Wettbewerb herausheben. Abgeschlossen wird das Vorgehen mit der Betrachtung möglicher Initiativen auf Grundlage der Plattform.

*Bewertung:* Die Arbeit von MEYER und LEHNERD vertieft das Verständnis für Produktplattformen. Es fehlt allerdings ein eindeutiges Vorgehen für die eigentliche Plattformentwicklung.

### 3.1.2.2 Planning for Product Platforms nach ROBERTSON/ULRICH

ROBERTSON und ULRICH [Rob98;Rob99] unterstützen mit ihrem Vorgehen die Abstimmung zwischen den vom Kunden wahrgenommenen Unterscheidungsmerkmalen auf der einen Seite und der Komponenten- und Prozesskommunalität auf der anderen Seite. Als Hilfsmittel werden der Produktplan, der Differenzierungsplan und der Kommunalitätsplan eingesetzt:

- Im Produktplan werden die Produktvarianten ihren Zielmarktsegmenten zugeordnet und ihrem geplanten Markteintritt entsprechend eingezeichnet. Er spiegelt somit die Produktstrategie des Unternehmens wider.
- Im Differenzierungsplan werden die maßgeblichen Unterscheidungsmerkmale sowie deren Ausprägungen für die einzelnen Produktvarianten eingetragen. Zusätzlich erfolgt eine Bewertung der relativen Bedeutung des Unterscheidungsmerkmals aus Sicht des Kunden.
- Im Kommunalitätsplan werden die geschätzten Entwicklungs-, Werkzeug- und Herstellungskosten für die Ableitung der einzelnen Produktvarianten abgebildet.

Die Plattformplanung stellt einen iterativen Abstimmungsprozess zwischen den einzelnen Plänen dar (Bild 3.2). Hierbei wird ein Ausgleich zwischen einer breiten Marktab-

deckung, einer klaren Abgrenzung der einzelnen Produktvarianten und einer Reduzierung von Entwicklungs- und Herstellungskosten angestrebt.

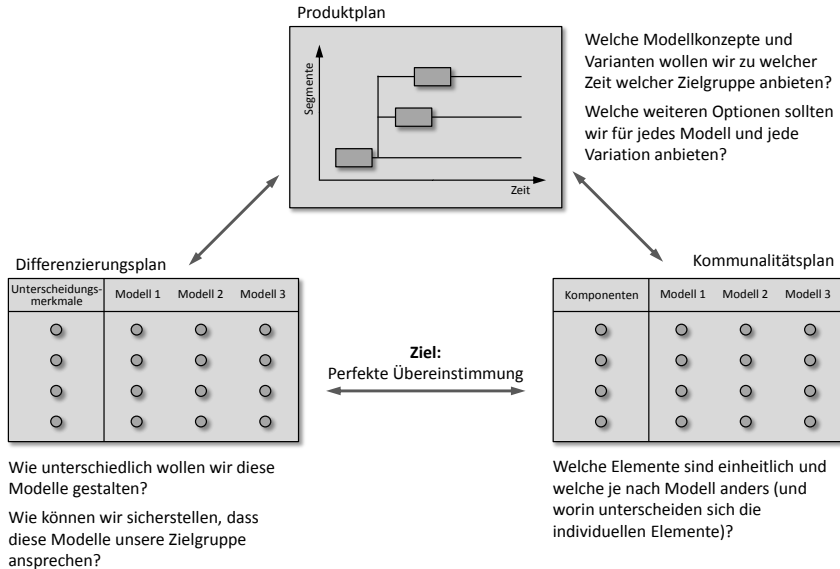


Bild 3.2: Prozess der Plattformplanung nach [Rob99]

**Bewertung:** ROBERTSON und ULRICH verdeutlichen durch ihren Ansatz das Spannungsfeld zwischen der vom Markt geforderten Vielfalt sowie den intern angestrebten Kommunalitäten. Eine Unterstützung bei der eigentlichen Plattformentwicklung bietet der Ansatz aber nicht.

### 3.1.2.3 Design for Variety nach MARTIN

Grundlage für das Vorgehen nach MARTIN [Mar99] sind die beiden Kennzahlen *Generational Variety Index (GVI)* und *Coupling Index (CI)*. Dabei ist der GVI ein Indikator für den Entwicklungsaufwand, der geleistet werden muss, um eine Komponente an zukünftige Anforderungen anzupassen. Zur Berechnung werden die Produktkomponenten den zukünftigen Anforderungen gegenübergestellt. Auf einer Skala von 0 (keine Änderungen erforderlich) bis 9 (weitgehende Änderungen erforderlich) wird der erforderliche Änderungsaufwand bewertet. Aus der Summation der Einzelbewertungen ergibt sich der GVI.

Der CI ist dagegen eine Kenngröße für die Kopplungsstärke der Komponenten eines Produkts. Er unterteilt sich in die beiden Kenngrößen *Coupling Index Receiving (CI-R)* und *Coupling Index Supplying (CI-S)*. Der CI-R gibt an, wie stark die Komponente von

anderen Komponenten abhängig ist, während der CI-S angibt, wie stark sich eine Änderung der Komponente auf andere Komponenten auswirkt. Zur Berechnung werden die Abhängigkeiten zwischen den Komponenten wiederum auf einer Skala von 0 bis 9 bewertet.

Im Anschluss an die Berechnung der Kennzahlen werden aus ihnen Maßnahmen der Plattformentwicklung abgeleitet. Dies beinhaltet insbesondere die Standardisierung von Komponenten und die Modularisierung. Komponenten mit einem hohen GVI und CI-S sollten standardisiert werden, da sie einerseits einen hohen Entwicklungsaufwand zur Anpassung an zukünftige Anforderungen erfordern und andererseits ihre starke Kopplung leicht zu Änderungen an anderen Komponenten führt. Für die Bildung von Modulen kommen dagegen Komponenten in Betracht, die einen hohen GVI und CI-R haben und somit mit hoher Wahrscheinlichkeit Änderungen unterliegen werden. Der CI-S dieser Komponenten sollte allerdings auf null reduziert werden, um Auswirkungen auf andere Komponenten zu vermeiden.

*Bewertung:* MARTIN stellt mit seinem Vorgehen eine Methode bereit, die durch die Verwendung des GVIs sowie des CIs strukturiert Ansatzpunkte für die Plattformentwicklung aufzeigt. Sie fokussieren allerdings ausschließlich auf die Produktvarianz. Weitere Einflussfaktoren finden keine Berücksichtigung.

#### **3.1.2.4 Method for Architecting Product Platforms nach GONZALEZ-ZUGASTI et al.**

Das Vorgehen nach GONZALEZ-ZUGASTI et al. [Gon00] untergliedert sich in vier Schritte. Im ersten Schritt werden unabhängig voneinander Systemmodelle für einzelne Produktvarianten erstellt, die neben technischen Leistungsanforderungen auch monetäre Aspekte berücksichtigen müssen. Auf Basis dieser Modelle wird im zweiten Schritt die Plattform abgeleitet. Entscheidungsgrundlage für die Einbeziehung von Subsystemen in die Plattform sind die Ähnlichkeit der Anforderungen, die Flexibilität der Subsysteme und gegebenenfalls auch noch weitere Anforderungen. Nach der Bildung der Plattform wird diese eingefroren und es erfolgt die Entwicklung der auf der Plattform aufbauenden Produktvarianten. Im abschließenden vierten Schritt wird die entwickelte Plattform bewertet und gegebenenfalls überarbeitet.

*Bewertung:* Der Ansatz nach GONZALEZ-ZUGASTI et al. gibt einen grundsätzlichen Rahmen für die Entwicklung einer Plattform vor. Eine klar abgegrenzte Vorgehensweise bietet er allerdings nicht.

#### **3.1.2.5 Product Platform Concept Exploration Method nach SIMPSON et al.**

SIMPSON et al. [Sim01] stellen einen Ansatz für die Entwicklung von Produktplattformen vor, der eine Skalierbarkeit von Produktvarianten in den Vordergrund stellt. Ausgehend von einem Marktsegmentierungsnetz (vgl. [Mey97]) definieren SIMPSON et al. beschrei-

bende Kenngrößen für die einzelnen Segmente sowie dazugehörige Wertebereiche. Darauf aufbauend wird ein Metamodell zur Abbildung des Systemverhaltens der geplanten Produktfamilie erstellt. Anhand der Eingangsdaten wird ein sogenanntes *Decision Support Problem (DSP)* formuliert. Durch das DSP werden die Entwicklungsparameter berechnet, die unter Berücksichtigung der festgelegten Grenzen die teilweise widersprüchlichen Anforderungen bestmöglich erfüllen. Das Metamodell und die Auswertung des DSP dienen als Entscheidungsgrundlage für die Ableitung der Plattform.

*Bewertung:* SIMPSON et al. erweitern die Betrachtung der Plattformentwicklung um den Aspekt der Skalierbarkeit. Aufgrund der erforderlichen Modellierung erscheint eine Anwendung auf komplexe Produkte jedoch nicht möglich.

### 3.1.3 Bewertung der Methoden

In diesem Abschnitt werden die vorgestellten Methoden zur Entwicklung von Produktplattformen anhand der am Ende des vorangegangenen Kapitels aufgestellten Anforderungen zusammenfassend bewertet. Einen Überblick der Methodenbewertung gibt Bild 3.3.

	Anforderungen							
	Eignung für die Entwicklung modularer Produktfamilien	Berücksichtigung von... ...technisch-funktionalen Beziehungen	...produktstrategischen Beziehungen	Berücksichtigung unterschiedlicher Zielsetzungen	Berücksichtigung der variantengerechten Produktgestaltung	Berücksichtigung konstruktiver Lösungsansätze	Darstellung und Dokumentation	Nachvollziehbarkeit und Verständlichkeit
<b>Methoden der Plattformentwicklung</b>								
The Power Tower nach MEYER/LEHNERD	✘	○	○	○	○	○	-	-
Planning for Product Platforms nach ROBERTSON/ULRICH	✘	○	○	○	○	○	-	-
Design for Variety nach MARTIN	(✓)	◐	◐	○	◐	◐	◐	◐
Method for Architecting Product Platforms nach GONZALEZ-ZUGASTI et al.	✘	○	○	○	○	○	-	-
Product Platform Concept Exploration Method nach SIMPSON et al.	✘	○	○	○	○	○	-	-

● erfüllt    ◐ teilweise erfüllt    ○ nicht erfüllt    ✓ zutreffend    (✓) bedingt zutreffend    ✘ nicht zutreffend

Bild 3.3: Bewertung bestehender Methoden der Produktplattformentwicklung

**Eignung für die Entwicklung modularer Produktfamilien:** In den Methoden der Plattformentwicklung werden ausschließlich Aspekte der Variantenvielfalt betrachtet. Da keine weiteren Anforderungen einbezogen werden, sind die vorgestellten Methoden nicht für die Entwicklung modularer Produktstrukturen unter Berücksichtigung aller Produktlebensphasen geeignet.

**Berücksichtigung produktstrategischer und technisch-funktionaler Beziehungen:** In Methoden zur Plattformentwicklung werden Beziehungen zwischen Komponenten kaum berücksichtigt. Eine Ausnahme bildet der Ansatz nach MARTIN, der technisch-funktionale Beziehungen in die Kennzahl Coupling Index überführt und für die Bildung von Modulen verwendet.

**Berücksichtigung unterschiedlicher Zielsetzungen:** Die Ansätze der Plattformentwicklung konzentrieren sich ausschließlich auf die Produktvielfalt. Weitere Zielsetzungen bleiben daher grundsätzlich unberücksichtigt.

**Berücksichtigung der variantengerechten Produktgestaltung:** Die variantengerechte Produktgestaltung wird ausschließlich im Rahmen des Vorgehens nach MARTIN berücksichtigt.

**Berücksichtigung konstruktiver Lösungsansätze:** Die eigentliche Bildung von Modulen ist nur bei MARTIN Teil des methodischen Vorgehens. Dabei bezieht er auch konstruktive Lösungsansätze ein, um die Kopplungsstärke zwischen Komponenten zu reduzieren.

**Darstellung und Dokumentation:** Die Ansätze nach MEYER/LEHNERD und ROBERTSON/ULRICH sowie GONZALEZ-ZUGASTI et al. und SIMPSON et al. bieten kein konkretes Vorgehen zur Produktstrukturierung. Im Hinblick auf die Darstellung und Dokumentation bei der Entwicklung modularer Produktfamilien sind diese Methoden daher nicht bewertbar. Bei MARTIN erfolgt die Darstellung und Dokumentation weitestgehend über die dem Ansatz zugrunde liegenden Kennzahlen.

**Nachvollziehbarkeit und Verständlichkeit:** Aufgrund der Verwendung von Kennzahlen bietet der Ansatz von MARTIN eine strukturierte Vorgehensweise, erfordert aber auch eine starke Abstraktion der Problemstellung. Die Nachvollziehbarkeit und Verständlichkeit der übrigen Methoden ist wiederum nicht bewertbar.

## 3.2 Entwicklung von modularen Produktstrukturen

### 3.2.1 Grundlagen der Entwicklung modularer Produktstrukturen

Die modulare Strukturierung von Produktfamilien ist ein entscheidender Faktor für den Erfolg eines Produkts am Markt. In der Wissenschaft ist die Entwicklung von Modulari-

sierungsmethoden bereits seit den 1990er Jahren ein viel beachtetes Forschungsgebiet. Dabei haben sich zwei grundlegende Ansätze zur Modularisierung herausgebildet. Der erste Ansatz basiert auf der Betrachtung der technisch-funktionalen Beziehungen zwischen den Komponenten. Ziel ist die Zusammenfassung von Komponenten, die über starke technisch-funktionale Kopplungen verfügen. Die gebildeten Module sollten untereinander wiederum nur schwach gekoppelt sein. Demgegenüber verfolgt der zweite Ansatz eine Zusammenführung von Komponenten zu Modulen auf der Grundlage von produktstrategischen Anforderungen. Diese werden von sogenannten Modultreibern abgebildet und den Komponenten des Produkts gegenübergestellt [Eri98].

Neben den eindeutig technisch-funktional oder produktstrategisch orientierten Ansätzen wurden verschiedene Ansätze entwickelt, die eine gemeinsame Betrachtung technisch-funktionaler und produktstrategischer Beziehungen anstreben. Diese Ansätze bauen auf den bestehenden Grundlagen auf und führen diese zusammen.

Die bestehenden Methoden zur Entwicklung modularer Produktstrukturen werden im Folgenden zusammengestellt. Dabei werden eingangs technisch-funktional orientierte Methoden vorgestellt, bevor auf Methoden eingegangen wird, die produktstrategische Treiber für die Bildung von Modulen verwenden oder die beide Ansätze zusammenführen.

## **3.2.2 Methoden zur Entwicklung von modularen Produktstrukturen**

### **3.2.2.1 Gliedern in realisierbare Module nach VDI 2221**

Im Rahmen der VDI-Richtlinie 2221 [VDI93] zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte werden im vierten Arbeitsschritt realisierbare Module gebildet. Ziel dieses Arbeitsschritts ist die Gliederung der zuvor entwickelten prinzipiellen Lösung in Module, um eine effiziente Aufteilung der Konstruktionsarbeit zu ermöglichen und um Entwicklungsschwerpunkte vereinfacht erkennen und lösen zu können. Modulare Strukturen können sich aus Konstruktionsmodulen nach arbeitstechnisch-pragmatischen Gesichtspunkten, Montagemodulen zur montagegerechten Produktgestaltung, Wartungsmodulen für einen instandhaltungsgerechten Produktaufbau, Recycling-Modulen sowie Basis- und Variationsmodulen zusammensetzen [Ric84].

*Bewertung:* Die VDI-Richtlinie 2221 zeigt die große Bedeutung der Modularisierung für die Produktentwicklung auf. Eine methodische Vorgehensweise für die Entwicklung modularer Produktstrukturen fehlt in der Richtlinie allerdings.

### **3.2.2.2 Baukastenentwicklung nach PAHL/BEITZ**

PAHL und BEITZ [Pah74;Pah07] verwenden Funktionsstrukturen für die Entwicklung von Baukästen. Die Gesamtfunktion eines Produkts wird dazu in Grundfunktionen sowie in

Sonder-, Hilfs- und Anpassfunktionen aufgeteilt. Es wird angestrebt, die Gesamtfunktion durch die Kombination möglichst weniger und einfacher Grundbausteine zu erfüllen. Die Grundbausteine stellen Muss-Bausteine dar, die in allen Produktvarianten vorkommen. Seltener geforderte Varianten werden dagegen mit Sonderbausteinen erstellt, die spezielle Ergänzungen der Grundbausteine darstellen. Zusätzlich können Hilfsbausteine mit Verbindungs- oder Anschlussfunktionen vorgesehen werden sowie Anpassbausteine zur Anpassung an umliegende Systeme. Eine Zuordnung von Funktions- und Bausteinarten ist Bild 3.4 zu entnehmen. Während der linke Teil der Grafik ein reines Baukastensystem darstellt, wird durch die Erweiterung des Baukastens um auftragspezifische Funktionen ein sogenanntes Mischsystem erstellt.

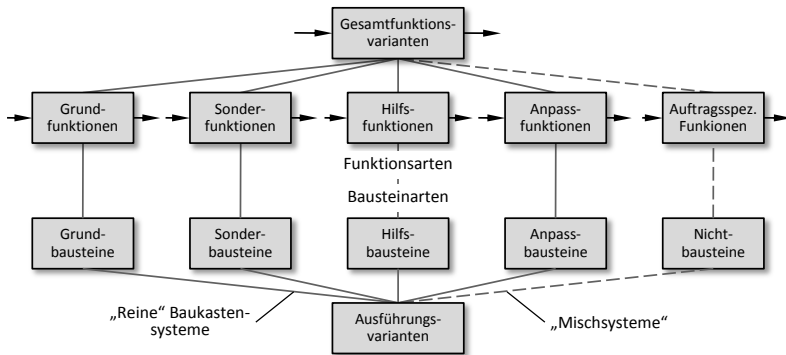


Bild 3.4: Zuordnung von Funktions- und Bausteinarten nach [Pah74]

*Bewertung:* Die Baukastenentwicklung nach PAHL und BEITZ gibt erste Ansätze für die Produktstrukturierung auf Basis von Funktionsstrukturen; eine eindeutige Vorgehensweise bietet sie allerdings nicht.

### 3.2.2.3 Modular Design Methodology nach STONE

Wie PAHL und BEITZ verwendet auch STONE [Sto97;Sto00] umsatzorientierte Funktionsstrukturen als Grundlage für die Produktstrukturierung, entwickelt aber ein deutlich konkreteres Vorgehen. Ausgangspunkt der Methode ist die Aufnahme der Kundenanforderungen sowie ihre Gewichtung. Im Anschluss wird die Funktionsstruktur durch Aufteilen der Gesamtfunktion des Produkts in Teilfunktionen aufgestellt. Um sicherzustellen, dass hierbei ein ausreichender Detaillierungsgrad erreicht wird, stellt STONE einen Katalog mit Funktionen zur Verfügung. Die Aufgliederung wird beendet, wenn die Gesamtfunktion des Produkts durch die von ihm vorgegebenen Funktionen beschrieben werden kann.

Zusätzlich werden die Flüsse der Funktionsstruktur in eine Reihenfolge entsprechend ihrer Bedeutung für die Erfüllung der Kundenanforderungen gebracht. Dazu werden die

Kundenanforderungen zuerst auf einer Skala von 1 bis 5 bewertet. Danach werden die zugehörigen Flüsse ermittelt. Der Reihenfolge der Flüsse ergibt sich, indem für jeden Fluss die Werte der Kundenanforderungen aufsummiert werden.

Die eigentliche Modularisierung erfolgt mit Hilfe dreier Heuristiken, die auf die Funktionsstruktur angewendet werden. Im ersten Schritt wird die Heuristik *Dominanter Fluss* eingesetzt (Bild 3.5). Aufgrund dieser Heuristik werden Funktionen zu einem Modul zusammengefasst, die von einem dominanten Fluss durchflossen werden. Ob ein Fluss dominant ist, ergibt sich aus der zuvor aufgestellten Reihenfolge der Flüsse. Das Modul endet, wenn der Fluss aus dem System austritt oder die Flussart umgewandelt wird.

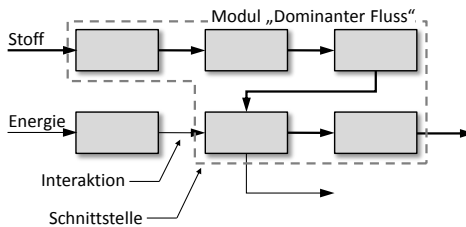


Bild 3.5: Anwendung der Heuristik *Dominanter Fluss* nach [Sto97]

Als zweiter Schritt wird die Heuristik *Verzweigung* angewendet. Im Sinne dieser Heuristik werden parallele Funktionsketten zu Modulen zusammengefasst. In Bild 3.6 ist ein entsprechendes Beispiel dargestellt.

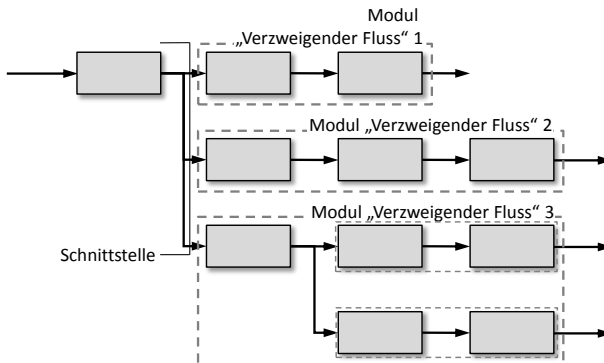


Bild 3.6: Anwendung der Heuristik *Verzweigender Fluss* nach [Sto97]

Durch die verbleibende Heuristik *Umwandlung und Übertragung* werden Module auf Grundlage von Funktionen gebildet, die einen Fluss umwandeln. Wie in Bild 3.7 dargestellt, werden auch Teilfunktionen in das Modul einbezogen, wenn diese sich ausschließlich auf den gewandelten Fluss beziehen.

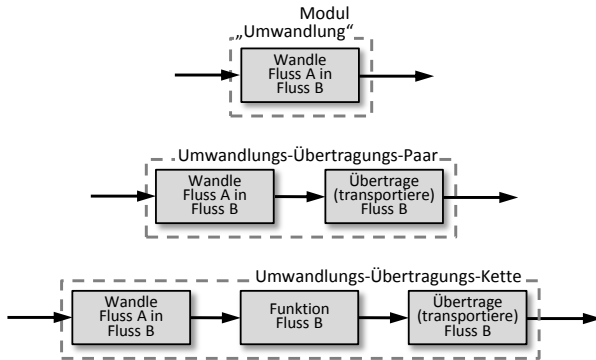


Bild 3.7: Anwendung der Heuristik *Umwandlung* und *Übertragung* nach [Sto97]

Nach der Anwendung der drei Heuristiken werden die vorgeschlagenen Module zu einer Gesamtlösung zusammengefasst. Sollten sich hierbei Module gegenseitig überlappen, werden beide Module in die folgende Konzeptentwicklung einbezogen. Erst in der abschließenden Bewertung der Konzepte wird die Entscheidung getroffen, welche Modulaufteilung umgesetzt wird.

*Bewertung:* Da der Ansatz von STONE auf Funktionsstrukturen aufbaut, kann er bereits in der Konzeptphase des Konstruktionsprozesses eingesetzt werden. Die Heuristiken sind leicht nachvollziehbar und einfach anwendbar. Aufgrund der Überschneidungen der Heuristiken folgt aus ihrer Anwendung allerdings keine eindeutige Modularisierung. Gegebenenfalls müssen mehrere Konzepte weiter ausgearbeitet werden. Neben dieser Problematik in der Anwendung ist die Fokussierung des Ansatzes auf technisch-funktionale Beziehungen eine Schwachstelle. Produktstrategische Anforderungen finden keine Berücksichtigung.

#### 3.2.2.4 Erweiterungen der Modular Design Methodology nach OTTO et al.

ZAMIROWSKI und OTTO [Zam99] erweitern den Ansatz von STONE für eine Anwendung auf Produktfamilien. Im Gegensatz zu STONE bilden ZAMIROWSKI und OTTO nicht eine Funktionsstruktur für ein Produkt, sondern fassen alle Produkte einer Produktfamilie in einer Funktionsstruktur zusammen (Bild 3.8). Auf diese Funktionsstruktur werden zunächst rein funktionale, weitgehend von STONE übernommene Heuristiken angewendet, bevor zusätzlich variantenbezogene Heuristiken angewendet werden. Dabei sieht die Heuristik *Isolierung von Varianz* eine Isolierung von varianten Funktionen in Modulen vor, während die Heuristik *Funktionsstrukturmodifikation zur Reduzierung der Varianz* anstrebt, variante Funktionen zu standardisieren, um eine höhere Kommunalität in der Produktfamilie zu erreichen.

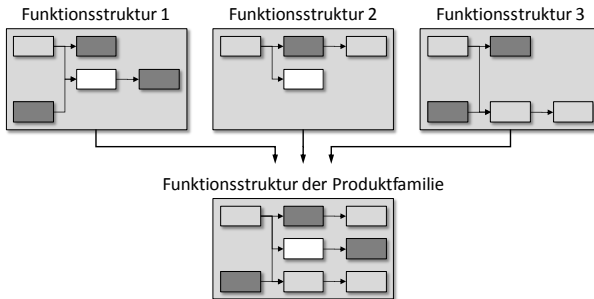


Bild 3.8: Funktionsstruktur einer Produktfamilie nach [Zam99]

DAHMUS et al. [Dah01] ergänzen das Vorgehen um eine Modularitätsmatrix. In dieser Matrix werden den in einer Produktfamilie auftretenden Funktionen die Produktvarianten gegenübergestellt und in den Matrixfeldern werden die jeweiligen Ausprägungen der Funktionen eingetragen. Module werden in der Matrix durch farbliche Hinterlegung der entsprechenden Felder dargestellt.

*Bewertung:* Gegenüber der ursprünglichen Modular Design Methodology nach STONE wird der Einsatzbereich durch die entwickelten Erweiterungen deutlich breiter. Über die Produktvarianz hinausgehende produktstrategische Anforderungen finden jedoch keine Berücksichtigung.

### 3.2.2.5 Development of Modular Products nach KUSIAK

KUSIAK/SZCZERBICKI [Kus93] und KUSIAK/HUANG [Kus96] entwickeln ein Vorgehen zur Modularisierung auf der Grundlage von Kopplungsgraphen (Bild 3.9).

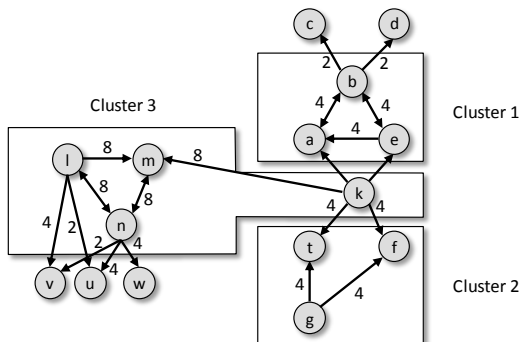


Bild 3.9: Beispiel für einen Kopplungsgraphen nach [Kus96]

In den Graphen werden die Komponenten eines Produkts durch Knoten abgebildet, während Kanten zwischen den Knoten Kopplungen darstellen. Diese werden wiederum

danach gewichtet, in wie vielen Produktvarianten die Kopplung auftritt. Indem stark gekoppelte Knoten durch einen heuristischen Algorithmus zusammengefasst werden, können Module (Cluster) aus dem Kopplungsgraphen abgeleitet werden.

In einer späteren Veröffentlichung verwenden HUANG und KUSIAK [Hua98] statt des Graphen eine Modularitätsmatrix, die sich aus einer Kopplungsmatrix sowie einer Verträglichkeitsmatrix zusammensetzt. Bild 3.10 zeigt eine Modularitätsmatrix am Beispiel einer Tischlampe. In der Kopplungsmatrix wird durch Zahlenwerte angegeben, ob eine Kopplung zwischen den Komponenten vorliegt und gegebenenfalls in wie vielen Produktvarianten diese Kopplung auftritt. Dagegen wird in der Verträglichkeitsmatrix eingetragen, ob sich zwei Komponenten für die Bildung eines Moduls eignen (durch ein a im Matrixfeld gekennzeichnet) oder nicht (durch ein o gekennzeichnet).

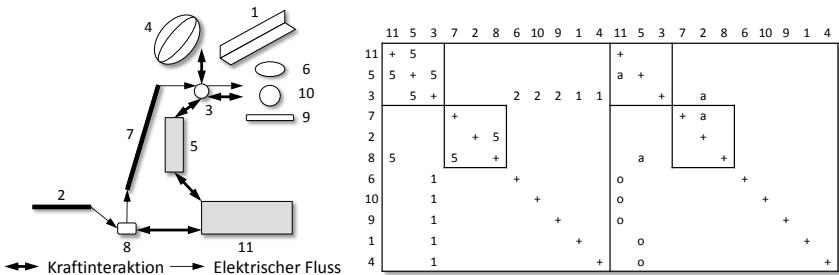


Bild 3.10: Prinzipskizze und Modularitätsmatrix einer Tischlampe nach [Hua98] (1-4: verschiedene Schirme; 2,7: Kabel; 3: Fassung; 5: Ständer; 6,9,10: vers. Glühlampen; 8: Schalter; 11: Sockel)

**Bewertung:** Der Ansatz von KUSIAK berücksichtigt weitestgehend nur technisch-funktionale Kopplungen zwischen Komponenten. Unterschiedliche Intensitäten der Kopplungen finden dabei keine Berücksichtigung.

### 3.2.2.6 Integration Analysis Methodology nach PIMMLER/EPPINGER

PIMMLER und EPPINGER [Pim94] verwenden in ihrem Vorgehen die *Design Structure Matrix (DSM)* nach STEWARD [Ste81], um Komponenten anhand ihrer technisch-funktionalen Beziehungen zu Modulen zusammenzufassen. Die Methode untergliedert sich in die drei Arbeitsschritte:

1. Dekomposition des Systems in Elemente
2. Dokumentation der Beziehungen zwischen den Elementen
3. Clustern der Elemente in Blöcke

Für die im ersten Arbeitsschritt durchzuführende Dekomposition ist es vom Stand der Entwicklung abhängig, ob es sich bei den Elementen um Funktionen handelt oder ob

bereits Funktionsträger des Produkts (Komponenten) verwendet werden können. Der Grad der Dekomposition sollte dabei um eine Stufe detaillierter sein als der angestrebte Detaillierungsgrad der Produktarchitektur.

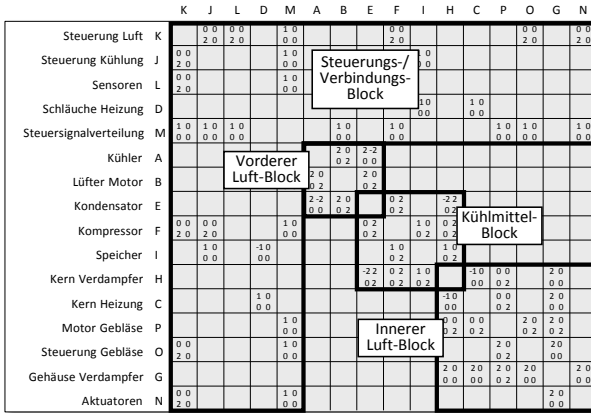
Um die gegenseitigen Beziehungen der Elemente bewerten zu können, werden diese im folgenden Schritt in der Design Structure Matrix gegeneinander aufgetragen. Zur Beschreibung der Beziehungen zwischen den Elementen schlagen die Autoren die Beziehungsarten *Räumliche Anordnung*, *Energie*, *Information* und *Material* vor. Zur Bewertung steht eine Skala von -2 (schädliche Beziehungen) über -1 (unerwünschte Beziehung), 0 (indifferente Beziehung) und +1 (erwünschte Beziehung) bis hin zu +2 (erforderliche Beziehung) zur Verfügung. Damit ergibt sich aus der Bewertung eine zur Diagonalen symmetrische Dreiecksmatrix. Da sich die Komponenten auf der Diagonalen selbst referenzieren, werden diese Elemente der Matrix nicht ausgefüllt. Eine DSM ist in Bild 3.11 für das Beispiel einer Pkw-Klimaanlage dargestellt.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
Kühler	A	2 0 0 2			2 -2 0 0											
Lüfter Motor	B				2 0 0 2								1 0 0 0			
Kern Heizung	C			1 0 0 0			2 0 0 0	-1 0 0 0								0 0 0 2
Schläuche Heizung	D		1 0 0 0						-1 0 0 0							
Kondensator	E	2 -2 0 0	2 0 0 2			0 2 0 2		-2 2 0 2								
Kompressor	F				0 2 0 2		0 2 0 2	1 0 0 0	0 0 0 0	0 0 2 0	2 0 2 0		1 0 0 0			
Gehäuse Verdampfer	G		2 0 0 0				2 0 0 0	2 0 0 0						2 0 0 0	2 0 0 0	2 0 0 2
Kern Verdampfer	H		-1 0 0 0		-2 2 0 2	0 2 0 0	2 0 0 0	1 0 0 2								2 0 0 2
Speicher	I			-1 0 0 0		1 0 0 2		1 0 0 2	1 0 0 0							
Steuerung Kühlung	J					0 0 2 0		1 0 0 0		0 0 2 0			1 0 0 0			
Steuerung Luft	K					0 0 2 0		0 0 2 0		0 0 2 0	0 0 2 0	1 0 2 0	0 0 2 0	0 0 2 0	0 0 2 0	
Sensoren	L									0 0 2 0			1 0 0 0			
Steuersignalverteilung	M	1 0 0 0				1 0 0 0			1 0 0 0	1 0 0 0	1 0 0 0	1 0 0 0	1 0 0 0	1 0 0 0	1 0 0 0	
Aktuatoren	N					2 0 0 0		2 0 0 0		2 0 0 0		1 0 0 0				
Steuerung Gebläse	O					2 0 0 0		2 0 0 0		2 0 0 0		1 0 0 0		1 0 0 0	2 0 0 2	
Motor Gebläse	P		0 0 0 2			2 0 0 2	0 0 0 2						1 0 0 0		2 0 0 2	

Legende:  
 Räumlich: R E :Energie  
 Information: I M :Material

Bild 3.11: Design Structure Matrix am Beispiel einer Pkw-Klimaanlage nach [Pim94]

Im dritten Schritt erfolgt das Clustern der Elemente in Blöcke. Hierbei werden die Spalten und Zeilen der Matrix mit Hilfe eines Algorithmus in der Weise umgeordnet, dass die positiv bewerteten Beziehungen näher zur Diagonalen verschoben werden. Die daraus resultierende Blockstruktur der Matrix kann nun als Indikator für die Entwicklung von Modulen verwendet werden, wobei die einzelnen Blöcke potenzielle Module darstellen. Da das Clustern differenziert nach den Beziehungsarten erfolgt, liegen allerdings vier Blockmatrizen für die Modulbildung vor. Entsprechend müssen die Einzelansichten zu einer integralen Produktstruktur zusammengefasst werden. Bild 3.12 zeigt die resultierende DSM für das Beispiel der Pkw-Klimaanlage.



Legende:  
 Räumlich: R E :Energie  
 Information: I M :Material

Bild 3.12: DSM in Blockstruktur am Beispiel einer Pkw-Klimaanlage nach [Pim94]

**Bewertung:** Vorteile der Anwendung der DSM sind insbesondere die klar strukturierte Vorgehensweise und die Möglichkeit einer rechnerunterstützten Auswertung. Damit eignet sich die DSM grundsätzlich auch für die Anwendung auf große, sehr komplexe Problemstellungen. Nachteilig ist dagegen, dass die rechnerunterstützte Auswertung für den Anwender nur schwer nachvollziehbar ist, was wiederum die Akzeptanz des Ergebnisses schwächt. Darüber hinaus muss bemängelt werden, dass eine Unterstützung bei der Zusammenführung der Blockmatrizen fehlt und ausschließlich technisch-funktionale Kopplungen berücksichtigt werden.

**3.2.2.7 Structural Complexity Management nach LINDEMANN et al.**

Im Rahmen des Structural Complexity Managements nach LINDEMANN et al. wird die Modularisierung von Produktfamilien am Beispiel von Hochdruckpumpen beschrieben [Lin09]. Die Grundlage für die Modularisierung bildet die *Multiple-Domain Matrix (MDM)*, die sich aus mehreren DSMs sowie *Domain Mapping Matrizen (DMM)* zusammensetzt. Während in einer DSM die Elemente einer Domäne in Zusammenhang gebracht werden, werden in DMMs verschiedene Domänen gegenübergestellt. In der MDM liegen die DSMs daher auf der Diagonalen der Matrix, während die verbleibenden Matrixelemente von DMMs belegt werden. Beispielsweise wird das erste Element der in Bild 3.13 dargestellten MDM von der DSM der Komponenten gebildet, während das benachbarte Element Komponenten und Funktionen in einer DMM in Zusammenhang bringt.

Im Beispiel der Modularisierung von Hochdruckpumpen erfolgt zuerst die Systemdefinition. Dazu werden die Domänen Komponenten, Funktionen, Features und Produkti-

onsrandbedingungen sowie die Abhängigkeiten zwischen ihnen bestimmt. Die Aufnahme der Beziehungen zwischen den Elementen erfolgt in Workshops.

	<b>Ko</b>	<b>Fu</b>	<b>Fe</b>	<b>PRB</b>
Komponenten <b>Ko</b>	Ko hat geometrischen oder räumlichen Einfluss auf Ko	Ko dient Fu	Ko hat Einfluss auf Fe	Ko bringt PRB mit sich
Funktionen <b>Fu</b>	---	Fu erfordert Fu (funktionale Beschreibung)	---	---
Features <b>Fe</b>	Fe hat Einfluss auf Ko	---	Fe hat Einfluss auf Fe	Fe bringt PRB mit sich
Produktionsrandbedingungen <b>PRB</b>	PRB bedingt Ko	---	PRB bedingt Fe	PRB hat Einfluss auf PRB

Bild 3.13: Domänen und Beziehungen in einer MDM zur Modularisierung nach [Lin09]

Zur Bestimmung von Beziehungen zwischen den Elementen werden allerdings nicht nur direkte Beziehungen ermittelt, sondern darüber hinaus auch indirekte Beziehungen abgeleitet. Bei indirekten Beziehungen werden Elemente einer Domäne über eine weitere Domäne gekoppelt. Beispielsweise sind Komponenten indirekt über die Domäne der Funktionen gekoppelt, wenn sie einer gemeinsamen Funktion dienen. Neben der Matrix der direkten geometrischen Kopplungen der Komponenten werden daher zusätzlich Matrizen aufgestellt, welche die abgeleiteten, indirekten Kopplungen der Komponenten abbilden.

In der anschließenden Strukturanalyse erfolgt, wie bereits aus der Integration Analysis Methodology nach PIMMLER/EPPINGER bekannt, die Modulbildung durch eine Clusteranalyse. Da funktionale Beziehungen zwischen Komponenten als entscheidend für die Modulbildung angesehen werden, wird die Clusteranalyse auf die Matrix der funktionalen Beziehungen angewendet. Das Ergebnis der Analyse sind somit funktional stark gekoppelte Cluster. Um neben funktionalen Kopplungen auch direkte geometrische Kopplungen sowie Kopplungen über Features zu berücksichtigen, werden die entsprechenden Matrizen analog zur funktional gekoppelten Matrix permutiert und mit dieser überlagert.

Abschließend werden die Ergebnisse der Analyse auf die Produktgestalt übertragen. An dieser Stelle werden auch konstruktive Änderungen des Produkts angestrebt, beispielsweise um eine störende geometrische Abhängigkeit zwischen Komponenten aufzulösen.

*Bewertung:* Die MDM bietet den Vorteil einer sehr breiten Anwendbarkeit. Neben dem beispielhaft vorgestellten Vorgehen zur Modularisierung von Hochdruckpumpen ist auch eine Erweiterung des Ansatzes um zusätzliche Domänen möglich. Eine explizite Berücksichtigung von produktstrategischen Anforderungen ist allerdings nicht erkennbar. Darüber hinaus gilt, wie bereits für die Anwendung der DSM, auch für die MDM, dass die rechnerunterstützte Auswertung für den Anwender nur schwer nachvollziehbar ist und die Akzeptanz des Ergebnisses somit geschwächt wird.

### 3.2.2.8 Modular Function Deployment nach ERIXON

In der von ERIXON [Eri93;Eri98] entwickelten Methode *Modular Function Deployment (MFD)* werden Produkte anhand von produktstrategischen Aspekten modularisiert. Das Vorgehen unterteilt sich in fünf Schritte:

1. Klärung der Kundenanforderungen
2. Auswahl technischer Lösungen
3. Konzeptentwicklung
4. Konzeptbewertung
5. Verbesserung der Module

Ausgangspunkt der Methode ist die Klärung der Kundenanforderungen. Durch diesen Schritt soll sichergestellt werden, dass die Anforderungen der Kunden in geeignete technische Anforderungen umgesetzt werden. Erixon verwendet hierfür das Quality Function Deployment (QFD). Um zu verdeutlichen, inwieweit eine modulare Produktstruktur zu den Kundenanforderungen beiträgt, wird Modularität in die erste Spalte der QFD-Matrix eingetragen.

Im zweiten Schritt der Methode werden technische Lösungen entwickelt. Dazu wird das Produkt in Funktionen und Subfunktionen zerlegt und den Funktionen werden technische Lösungen zugeordnet. Um die Entwicklung einer robusten modularen Produktstruktur zu ermöglichen, wird eine hohe Unabhängigkeit zwischen den einzelnen Funktionen und Funktionsträgern angestrebt.

Die eigentliche Modularisierung erfolgt im dritten Schritt. Als Grundlage hierfür dienen die sogenannten Modultreiber. Bei ihnen handelt es sich um produktstrategische Gründe für die Bildung von Modulen, die in Fallstudien ermittelt wurden:

*Carry-over:* Bei Carry-over-Komponenten handelt es sich um Komponenten, die über mehrere Produktgenerationen hinweg verwendet werden.

*Technology Push:* Dieser Treiber bezieht sich auf Funktionsträger eines Produkts, für die eine Technologieänderung aufgrund stark veränderter Kundenanforderungen erwartet werden kann.

*Product Planning:* Dieser Treiber verweist auf Komponenten, die im Laufe des Produktlebens von geplanten Produktpflegemaßnahmen betroffen sein werden.

*Different Specification:* Zur Erzeugung von Produktvarianten können Komponenten, die diesem Treiber unterliegen, technisch unterschiedlich spezifiziert werden.

*Styling:* Styling-Komponenten sind stark von Änderungen des Produktdesigns betroffen.

*Common Unit:* Die Komponente wird in der Produktfamilie mehrfach verwendet.

*Process/Organisation:* Komponenten oder ganze Module, die von diesem Modultreiber betroffen sind, durchlaufen gleiche oder zumindest ähnliche Prozessschritte in der Produktion oder stellen einen passenden Arbeitsumfang für eine Organisationseinheit dar.

*Separate Testing:* Im Produktionsprozess kann die Funktion der Komponente oder des Moduls getestet werden, bevor die Komponente oder das Modul in der Endmontage verbaut wird.

*Black-Box Engineering:* Die Komponente oder das Modul kann von einem Zulieferer zugekauft werden.

*Service/Maintenance:* Bei einem Defekt kann eine Reparatur des Produkts durch den Austausch des defekten Moduls erfolgen.

*Upgrading:* Durch den Austausch von Komponenten oder Modulen kann die Funktion des Produkts in der Nutzungsphase geändert oder erweitert werden.

*Recycling:* Das Zusammenfassen von gleichen oder ähnlichen Materialien erleichtert das Recycling von Produktbestandteilen.

Die Modultreiber werden in der sogenannten *Module Indication Matrix (MIM)* den Komponenten des Produkts gegenübergestellt. In Bild 3.14 ist eine MIM am Beispiel eines Staubsaugers dargestellt. Die Bedeutung der einzelnen Modultreiber wird in der Matrix mit 1 Punkt (= schwacher Treiber), 3 Punkten (= mittlerer Treiber) oder 9 Punkten (= starker Treiber) bewertet. Die Punkte der einzelnen Komponenten werden im

Anschluss aufsummiert. Komponenten mit einer hohen Punktezahl stellen Kandidaten für die Bildung von Modulen dar. Diese Modulkandidaten können ein eigenes Modul bilden oder mit niedriger bewerteten Komponenten ergänzt werden. Dabei sollten die Komponenten über ähnliche Bewertungsprofile verfügen oder zumindest nicht über widersprüchliche Bewertungen. Beispielsweise sollten nicht Carry-over-Komponenten mit Technology-push-Komponenten in einem Modul zusammengefasst werden.

Funktionsträger		Geräuschdämmung, Gr.																	Geräuschdämmung, M.																
		Gebälse	Elektromotor	Dämpfer	Chassis	Beutel	Filter	Trisistor & Knauf	Schalter & Knauf	Gehäuse	Kabel & Stecker	Griff	Hinterrad	Vorderrad	Accessories	Stoßleiste	Cover	Anzeige	Dichtungscover	O-Ring	Kabeltrommel	Beutelsperre	Bremse & Knauf												
Entwicklung & Konstruktion	Carry-over	●	●					●	●									●			●		●												
	Technology push						●	●																											
	Product planning																																		
Varianz	Technical specification	○	○	○				○	○	○		○																							
	Styling							●	●	●		●	○				●						●												
Herstellung	Common unit	○	○	○	●	●	●	●	○	○	○		○	○	●	●	●	●	●	●	●	●	○												
	Process/Organisation	●	●		●	●				●																									
Qualität	Separate testing		●							○																									
Beschaffung	Black-box engineering							●	●		●																								
After-Sales	Service/Maintenance		○					○	○	○																									
	Upgrading							●																											
	Recycling		●			●				●											○														
	● = 9 ○ = 3 ○ = 1	Gewicht der Treiber Vertikal summiert																																	
	Modulkandidaten	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓											✓														

Bild 3.14: Module Indication Matrix (MIM) am Beispiel eines Staubsaugers nach [Eri98]

Im vierten Schritt werden die in der MIM entwickelten Konzepte bewertet, um ein Konzept zur weiteren Ausarbeitung auszuwählen. Dies beinhaltet einerseits eine Betrachtung der Schnittstellen zwischen den Modulen und andererseits die eigentliche Bewertung mit Hilfe von Kennzahlen und Regeln aus den Bereichen Entwicklung, Montage und After-Sales. Das Bewertungsverfahren wird in Abschnitt 3.3.2.2 detailliert vorgestellt.

Der abschließende fünfte Schritt des Vorgehens beinhaltet die Ausarbeitung der Module. Dieser Schritt wird allerdings in der Methode MFD nicht unterstützt. Stattdessen wird auf die gängigen Entwicklungsmethoden sowie DfX-Richtlinien verwiesen.

**Bewertung:** Das Module Function Deployment bietet eine gut nachvollziehbare und sehr breit anwendbare Vorgehensweise. Durch die Modultreiber wird eine sehr umfassende Berücksichtigung der produktstrategischen Gründe zur Bildung von Modulen ermöglicht. Technisch-funktionale Kopplungen werden in der Methode allerdings nicht betrachtet.

### 3.2.2.9 Erweiterung der Methode Modular Function Deployment nach STAKE

In der Arbeit von STAKE [Sta00] werden einerseits die von ERIXON aufgestellten Modultreiber tiefgehend analysiert und andererseits Clusteranalysen zur Entwicklung von Modularisierungskonzepten eingesetzt.

Der Schwerpunkt bei der Analyse des Modultreiberkonzepts liegt auf der gegenseitigen Abhängigkeit der Modultreiber. Wie in Bild 3.15 dargestellt, werden die Treiber zu den Gruppen *Produktfamilienplanung* und *Funktionale Reinheit* zugeordnet. Die Gegensätzlichkeit mancher Modultreiber wird insbesondere in der ersten Gruppe deutlich.

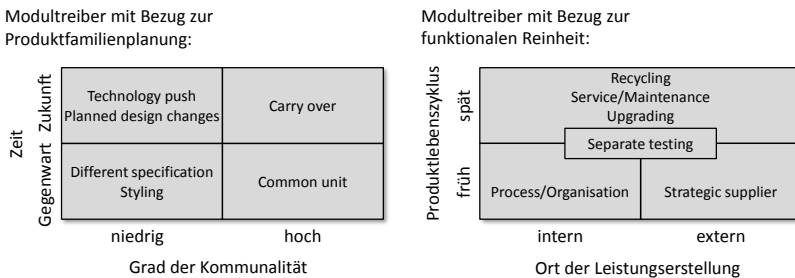


Bild 3.15: Gruppierung der Modultreiber nach [Sta00]

Im zweiten Teil der Arbeit untersucht STAKE die Anwendung verschiedener Methoden der Clusteranalyse, um Konzepte für die modulare Strukturierung von komplexen Produkten zu entwickeln. Durch die Clusteranalyse werden Komponenten zusammengefasst, die ein ähnliches Bewertungsprofil in der MIM aufweisen. Er weist jedoch darauf hin, dass die Anwendung der Algorithmen zwar Konzeptideen liefern kann, nicht aber den Entscheidungsprozess ersetzen kann.

*Bewertung:* Durch die Arbeit von STAKE wird das Verständnis des von ERIXON entwickelten Modultreiberkonzepts vertieft. Ein neues, durchgehendes Vorgehen zur Modularisierung bietet STAKE allerdings nicht.

### 3.2.2.10 Zusammenführung von DSM und MIM nach LANNER/MALMQVIST

LANNER/MALMQVIST [Lan96] entwickeln in ihrer Veröffentlichung eine gemeinsame Darstellung für die Design Structure Matrix und Module Indication Matrix. Bei der entwickelten Matrix handelt es sich um eine DSM, deren bisher nicht genutzte Diagonalelemente mit den Bewertungen aus der MIM besetzt werden. Dazu werden die Modultreiber einem Buchstaben von A bis L zugeordnet und entsprechend auf den Diagonalelementen der Matrix angeordnet (Bild 3.16).

	O1	O2	O3	O4	O5	O5
Organ 1 O1	1 3 3	2 0 0 0	2 -2 0 -2	2 0 0 -2	2 0 0 0	
Organ 2 O2	2 0 0 0	9 9 3 3 3 9 9	2 0 0 0			
Organ 3 O3	2 -2 0 -2	2 0 0 0	3 9 1 9 3 9	1 0 0 0		
Organ 4 O4	2 0 0 -2		1 0 0 0	3 1 3 9 1 3 3	2 0 0 0	2 0 0 0
Organ 5 O5	2 0 0 0			2 0 0 0	9 3 1 1	
Organ 6 O6				2 0 0 0		9 9 9 3

Legende:

Nicht-Diagonal-  
elemente:

Räumlich: R E :Energie  
Information: I M :Material

Diagonal-  
elemente:

A	B	C	D	E
F	G	H	I	J
K	L			

Bild 3.16: Beispiel für eine Matrix nach [Lan96]

Wie aus der Anwendung der DSM bekannt, wird die Matrix durch Permutation der Spalten und Zeilen in eine Blockstruktur überführt. Die Umstrukturierung der Matrix erfolgt allerdings nur für eine priorisierte Beziehungsart. Die verbleibenden Beziehungen werden ausschließlich in der folgenden Analyse und Diskussion der vorgeschlagenen Modulaufteilung verwendet.

*Bewertung:* In der entwickelten Matrix werden technisch-funktionale und produktstrategische Aspekte gemeinsam betrachtet. Aufgrund der vielfältigen, bei der Modulbildung gleichzeitig zu berücksichtigenden Beziehungsarten erscheint eine Anwendung der Matrix allerdings nicht praktikabel.

### 3.2.2.11 Modularisierung nach BLACKENFELT

BLACKENFELT [Bla99;Bla01] strebt in seiner Arbeit eine Integration der produktstrategischen Aspekte der Modularisierung in die technisch-funktionale DSM an. Aufbauend auf der Arbeit von STAKE betrachtet er in seinem Vorgehen die Gegensätzlichkeit verschiedener Modularisierungsstrategien.

Während die produktstrategischen Aspekte in einer früheren Veröffentlichung [Bla99] noch aus der MIM nach ERIXON abgeleitet werden, stellt er in einer späteren Veröffentlichung [Bla01] ein eigenes Bewertungsschema zur Verfügung. In seinem Schema verfolgt BLACKENFELT die vier Strategien *Reuse or Develop*, *Make or Buy*, *Commonality or Variaty* und *Carry over or Change*. Die Aspekte des After-Sales werden von BLACKENFELT vernachlässigt. In Bild 3.17 wird das Vorgehen zur Bewertung anhand der Entscheidung *Commonality or Variaty (Kommunalität oder Varianz)* dargestellt.

Um die Beziehung zwischen zwei Komponenten bewerten zu können, werden die Komponenten zuerst separat bewertet. Eingangs wird ermittelt, ob die Komponente

standardisiert oder variiert werden soll. Darauf aufbauend erfolgt die Bewertung der Bedeutung der Standardisierung oder der Varianz der Komponente. Bei varianten Komponenten wird bewertet, ob die Varianz von einer niedrigen oder hohen Bedeutung ist. Die Bewertung der Standardisierung erfolgt dagegen auf Grundlage der Kosten der Komponente.

	Technische Lösung 1	Technische Lösung 2
Kommunalität oder Varianz?	<b>Standard</b>	<b>Varianz</b>
Wichtigkeit der Varianz: Nutzen der techn. Lösung, niedrig (1) oder hoch (2)		<b>1</b>
Wichtigkeit der Kommunalität: Kosten der techn. Lösung, niedrig (1) oder hoch (2)	<b>2</b>	

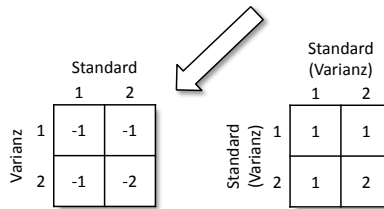


Bild 3.17: Bewertungsschema nach [Bla01]

Im Anschluss werden die Beziehungen zwischen den beiden Komponenten bewertet. Wie in Bild 3.17 zu sehen, wird dazu die in der DSM gebräuchliche Bewertungsskala von -2 bis 2 verwendet. Nach Bewertung aller Komponentenpaarungen kann daher eine produktstrategische DSM für die vier Modularisierungsstrategien aufgebaut werden. Statt der funktionalen Beziehungsarten der DSM nach PIMMLER/EPPINGER werden in dieser Matrix die Bewertungsergebnisse der produktstrategischen Beziehungen aufgetragen.

Abschließend führt BLACKENFELT die beiden Matrizen in einer kombinierten DSM zusammen. Da die Matrizen symmetrisch aufgebaut sind, kann eine kombinierte DSM durch das Zusammensetzen einer funktionalen und einer produktstrategischen Dreiecksmatrix gebildet werden. Ein Verfahren zur Umordnung dieser kombinierten Matrix zeigt BLACKENFELT in seiner Arbeit allerdings nicht auf.

**Bewertung:** BLACKENFELT gibt mit seiner Arbeit eine Möglichkeit zur Integration von DSM und MIM. Vorteilhaft ist, dass die MIM in ein der DSM entsprechendes Bewertungsschema überführt wird. Wie BLACKENFELT selbst aufzeigt, erscheint bei zunehmender Komplexität eine Auswertung der Matrix ohne Rechnerunterstützung allerdings nicht möglich.

### 3.2.2.12 Modularisierung anhand von Komponentenkopplungen nach KOEPPEN

KOEPPEN [Koe08a;Koe08b] berücksichtigt in ihrer Arbeit ebenfalls technisch-funktionale und produktstrategische Beziehungen zur Modularisierung. Im Gegensatz zu vorangegangenen Ansätzen führt sie allerdings nicht mehrere Matrizen zusammen, sondern stellt eine globale Kopplungsmatrix zur Bildung von Modulen auf. In dieser Matrix werden die Komponentenkopplungen anhand von technischen und betriebswirtschaftlichen Modultreibern beschrieben. Um dies zu ermöglichen, werden die weitestgehend von ERIXON übernommenen produktstrategischen Modultreiber durch die technischen Modultreiber *Geometrische Abhängigkeit* sowie *Energie-, Material- und Informationsübertragung* erweitert.

Das Vorgehen lehnt sich an die von PIMMLER/EPPINGER aufgestellten Schritte (1) *Zerlegung des Produkts*, (2) *Analyse der Komponentenkopplungen* und (3) *Modulbildung* an. Da der Schwerpunkt ihrer Arbeit auf der Analyse der Komponentenkopplungen liegt, wird dieser Schritt in drei weitere Schritte untergliedert:

- 2.1 Identifikation der wesentlichen Modultreiber
- 2.2 Abbildung der Kopplungen für jeden Modultreiber
- 2.3 Zusammenfassung der Kopplungswerte zu einem Gesamtwert

Mit der Identifikation der wesentlichen Modultreiber in Schritt 2.1 berücksichtigt KOEPPEN, dass produkt- oder unternehmensspezifische Ziele zu unterschiedlichen Optima für die modulare Produktstruktur führen. Bevor die Komponentenkopplungen abgebildet werden, erfolgt daher eine Gewichtung der Modultreiber durch die Produktverantwortlichen des Unternehmens. Für die Modularisierung werden nur Modultreiber verwendet, die 80 % bis 85 % des Gesamtwerts auf sich vereinen.

Die Kopplungen zwischen den Komponenten werden in Schritt 2.2 separat für die ausgewählten Modultreiber erfasst. Dies wird durch Abbildungsfunktionen ermöglicht, die KOEPPEN für alle Modultreiber bereitstellt. Aus den Abbildungsfunktionen ergeben sich niedrige Werte für schwache Kopplungen und hohe Werte für starke Kopplungen. Die Wertebereiche sowie Einheiten der Kopplungswerte unterscheiden sich jedoch in Abhängigkeit von den unterschiedlichen Treibern.

In Schritt 2.3 werden die Bewertungen in einer globalen Kopplungsmatrix zusammengefasst. Dazu erfolgt eingangs eine Normierung der Kopplungswerte auf einen Wertebereich von 0 bis 1. Die normierten Kopplungswerte werden im Anschluss in einer gewichteten Summation zusammengeführt und in die Gesamtkopplungsmatrix eingetragen. Für die Summation werden die Gewichtungen der Modultreiber aus Schritt 2.1 verwendet.

Die Bildung von Modulen erfolgt, wie von auf der DSM basierenden Methoden bekannt, durch die Permutation der Gesamtkopplungsmatrix mit Hilfe eines Optimierungsalgorithmus. Die Ergebnisse der Optimierungsrechnung werden abschließend analysiert und die vorgeschlagene Modulaufteilung wird diskutiert. Hierzu schlägt KOEPPEN vor, die permutierte Gesamtkopplungsmatrix in die Einzelmatrizen der Modultreiber aufzulösen. Auf diesem Weg wird verdeutlicht, welchen Anteil die einzelnen Modultreiber an der Bildung der Module haben.

*Bewertung:* Im Gegensatz zu weiteren Ansätzen, die eine gemeinsame Betrachtung technisch-funktionaler und produktstrategischer Beziehungen in einer Kopplungsmatrix anstreben, leitet KOEPPEN die Kopplungswerte nicht aus separaten Matrizen her. Dadurch wird ein Informationsverlust bei der Normierung der Matrizen vermieden. Problematisch erscheinen allerdings die Kopplungsfunktionen. Bei ihnen besteht die Gefahr eines Informationsverlusts aufgrund des hohen Abstraktionsgrads.

### 3.2.2.13 Modular Engineering nach KOPPENHAGEN

In der von KOPPENHAGEN [Kop04;Ker02] entwickelten Methode *Modular Engineering* werden neben den technisch-funktionalen und produktstrategischen Beziehungen zusätzlich die Kundenanforderungen in die Modulbildung einbezogen. Wie in Bild 3.18 dargestellt, kombiniert KOPPENHAGEN hierzu die DSM, die MIM sowie eine QFD-Matrix nach AKAO [Aka92].

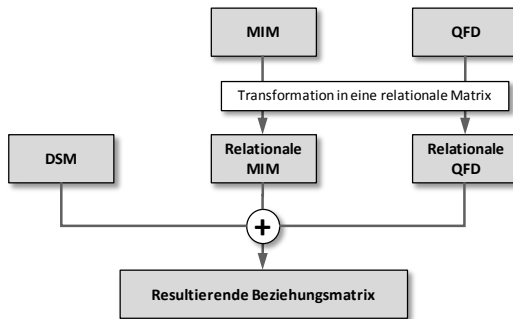


Bild 3.18: Zusammenführung der Betrachtungsebenen nach [Kop04]

Im Gegensatz zu PIMMLER/EPPINGER modifiziert KOPPENHAGEN die DSM für seine Methode leicht. Dazu ergänzt er die ursprünglich vorgeschlagenen Beziehungsarten Material-, Energie- und Signalfluss sowie geometrische Abhängigkeit um die Beziehungsart Kraftfluss. Des Weiteren wird diese Matrix nicht für alle Beziehungsarten separat erstellt, sondern es erfolgt eine gemeinsame Betrachtung und Bewertung aller Beziehungsarten. Für die Beziehungsstärke werden die Werte 0, 1, 3, 5, oder 7 vergeben, wobei eine 7 für eine starke Beziehung steht.

Die produktstrategischen Zielsetzungen werden in der weitestgehend unverändert von ERIXON übernommenen MIM abgebildet. In der Matrix werden Komponenten und Modultreiber gegenübergestellt und ihre Beziehungsstärke wird auf einer Skala mit den Werten 0, 1, 3 oder 9 bewertet.

Zusätzlich wird eine QFD-Matrix verwendet, um Komponenten und Kundenanforderungen gegenüberzustellen. Für die Bewertung der Beziehungen wird die gleiche Werteskala wie in der MIM verwendet. In der QFD-Matrix bedeutet eine Bewertung mit 9, dass die Komponente einen sehr hohen Beitrag zur Erfüllung der Kundenanforderung leistet.

Um die eigentliche Modulbildung durchführen zu können, müssen die drei Einzelmatrizen in einer globalen Beziehungsmatrix zusammengeführt werden. Die MIM sowie die QFD-Matrix werden daher in eine relationale Form überführt, in der sich die Komponenten direkt gegenüberstehen. KOPPENHAGEN definiert hierzu einen *Profile Similarity Index (PSI)*, mit dessen Hilfe aus dem Vergleich der Modultreiber- bzw. Kundenanforderungsprofile ein Beziehungswert errechnet wird. Die Beziehungswerte werden wiederum auf die in der DSM verwendete Bewertungsskala projiziert, um schlussendlich die Bildung der resultierenden Beziehungsmatrix durch Summation der Einzelwerte zu ermöglichen.

Die Entwicklung von Modulen erfolgt mit Hilfe der gebildeten Beziehungsmatrix. Wie aus der Anwendung der DSM bekannt, wird diese durch einen Optimierungsalgorithmus in eine Blockdiagonalmatrix umgeformt. Inwieweit diese Blockstruktur einer günstigen Modulbildung entspricht, ermittelt KOPPENHAGEN anhand eines dazu aufgestellten Modularitätsmaßes.

*Bewertung:* Durch den Ansatz von KOPPENHAGEN können technisch-funktionale Kopplungen sowie produktstrategische Anforderungen berücksichtigt werden. Der Nutzen einer zusätzlichen Betrachtung von Kundenanforderungen ist allerdings nicht erkennbar. Zusätzlich besteht die Gefahr des Informationsverlusts bei der Zusammenführung der drei Matrizen.

### **3.2.2.14 Modularisierung anhand von Life-Cycle-Aspekten nach NEWCOMB et al.**

NEWCOMB et al. [New98] streben in ihrer Arbeit eine Modularisierung anhand der After-Sales-Aspekte *Material Recycling*, *Service* und *Post Life Intent* an. Zur Modularisierung werden Design Structure Matrizen zu den drei berücksichtigten Aspekten aufgestellt. In die Matrizen wird die Verträglichkeit der einzelnen Komponenten auf einer Skala von 1 bis 4 eingetragen. Beispielsweise wird eine 1 für eine gute Material-Verträglichkeit der Komponenten aus Sicht des Recyclings vergeben, und eine 4 bei unverträglichen Materialien. Um aus den Matrizen Module abzuleiten, wird ein Algorithmus zur Permutation der Spalten und Zeilen der Matrizen angewendet.

Neben der Modulbildung anhand der drei Life-Cycle-Sichten stellen NEWCOMB et al. in ihrer Veröffentlichung die Kennzahlen *Correspondence Ratio* ( $CR_{overall}$ ) und *Cluster Independence* ( $CI$ ) vor. Durch den  $CR_{overall}$  wird die Übereinstimmung zwischen den Modularisierungen verschiedener Sichten gemessen. Hierzu werden die Quotienten aus der Anzahl der gemeinsamen Komponenten zweier Module durch die Anzahl aller Komponenten der beiden Module aufsummiert und durch die Anzahl aller Komponenten im Produkt geteilt. Der  $CI$  bezieht sich dagegen auf die physischen Verbindungen zwischen Komponenten. Dazu wird die Anzahl der physikalischen Verbindungen, die innerhalb der Module auftreten, durch die Gesamtanzahl der Verbindungen geteilt (vgl. 3.3.2.1).

In späteren Veröffentlichungen ergänzen COULTER et al. [Cou98] sowie NEWCOMB et al. [New03] das Vorgehen um Überarbeitungsschleifen, in denen schrittweise tiefergehende Änderungen vorgenommen werden, um die modulare Struktur des Produkts zu verbessern.

*Bewertung:* Der Ansatz nach NEWCOMB et al. begrenzt sich auf drei Aspekte aus dem After-Sales und ist somit nicht allgemeingültig anwendbar. Interessant sind jedoch die differenzierte Betrachtung unterschiedlicher Aspekte sowie der Einsatz von Überarbeitungsschleifen, um die modulare Produktstruktur zu verbessern.

### 3.2.2.15 Modulare Produktentwicklung nach GÖPFERT

GÖPFERT [Göp98] konzentriert sich in seiner Arbeit weniger auf das eigentliche Zusammenfassen von Komponenten zu Modulen, sondern strebt eine gemeinsame Entwicklung von Produktarchitektur und Produktentwicklungsorganisation an. Ziel ist die in Bild 3.19 dargestellte modulare Produktentwicklung, bei der sowohl Produktarchitektur als auch Entwicklungsorganisation modular gestaltet sind und sich gegenseitig entsprechen. Dem gegenüber steht bei einer integralen Gestaltung von Architektur und Organisation die integrale Produktentwicklung. In diesem Fall wird einem Produkt mit vielen technischen Interdependenzen durch eine eng gekoppelte Organisationsform entsprochen. Im Gegensatz dazu führt die Entwicklung eines integralen Produkts in einer modularen Entwicklungsorganisation zu einem ausufernden Koordinationsbedarf, während bei der Entwicklung eines modularen Produkts in einer integralen Organisation Potentiale verschenkt werden.

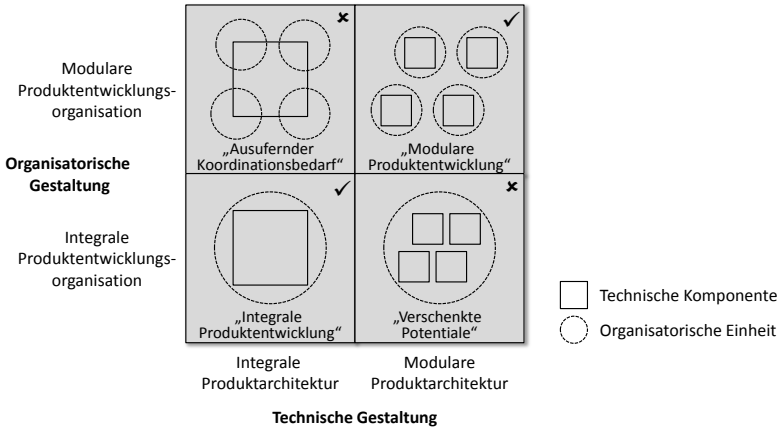


Bild 3.19: Technische und organisatorische Gestaltung nach [Göp98]

Kern des von GÖPFERT entwickelten Vorgehens zur gemeinsamen Entwicklung von Technik und Organisation ist die Visualisierung der Funktions- und Baustruktur des Produkts in einem rautenförmigen Diagramm (Bild 3.20). Mit Hilfe dieser Darstellung werden Module gebildet, die funktional und physisch weitgehend unabhängig sind. Diesen Modulen werden im Folgenden organisatorische Einheiten zugeordnet. In der Rauten-Darstellung werden diese durch farbige Hinterlegungen visualisiert.

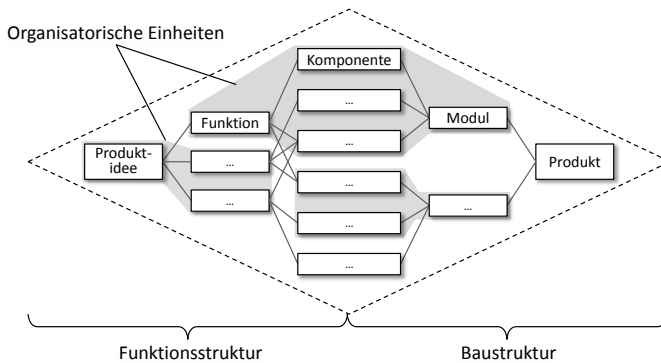


Bild 3.20: Rautendarstellung nach [Göp00]

**Bewertung:** Die von GÖPFERT entwickelte Rautendarstellung ermöglicht eine einfache Visualisierung von Produktstrukturen. Zusätzlich wird der Betrachtungsrahmen der Modularisierung durch die Einbeziehung organisatorischer Aspekte erweitert. Eine klar

abgegrenzte Vorgehensweise zur Entwicklung von Modulen bietet der Ansatz jedoch nicht.

### 3.2.2.16 Produktstrukturierung für mechatronische Systeme nach STEFFEN

Das Verfahren zur Produktstrukturierung für fortgeschrittene mechatronische Systeme nach STEFFEN [Ste07] bezieht technische, organisatorische sowie produktstrategische Beziehungen in die Modularisierung ein. Dabei gliedert sich das Vorgehen in vier Phasen (Bild 3.21).

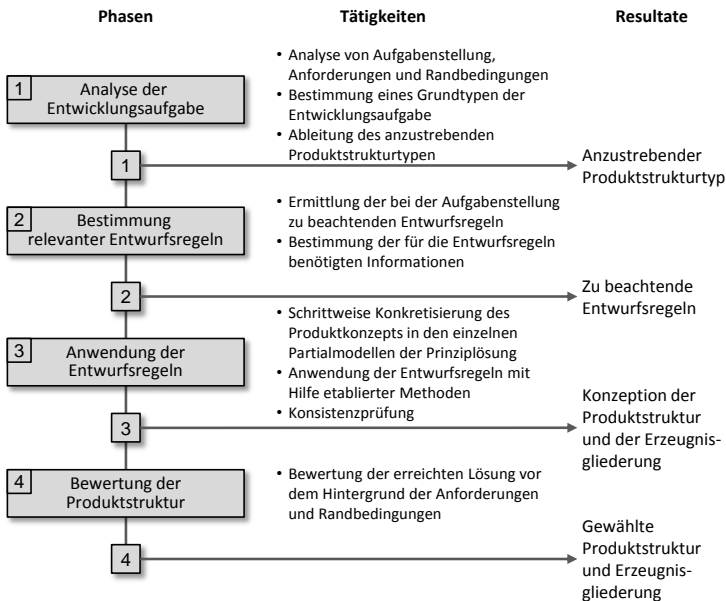


Bild 3.21: Phasenmodell des Verfahrens zur Produktstrukturierung nach [Ste07]

In der ersten Phase des Vorgehens wird die Entwicklungsaufgabe analysiert. Dazu wird die Entwicklungsaufgabe im Hinblick auf Kriterien aus den Bereichen Produkt, Produktprogramm und Produktentstehung bewertet. Die Ausprägungen der Kriterien können für eine modulare oder integrale Produktstruktur sprechen oder bezüglich der Produktstruktur neutral sein. Das entstandene Bewertungsprofil wird mit Grundtypen für Entwicklungsaufgaben abgeglichen, die im Rahmen der Arbeit aufgestellt wurden. Durch die Zuordnung zu einem Grundtyp wird die Entwicklungsaufgabe charakterisiert und ein geeigneter Produktstrukturtyp bestimmt.

In der zweiten Phase des Vorgehens werden der Entwicklungsaufgabe relevante Entwurfsregeln zugewiesen. Dazu werden die in der Arbeit aufgestellten Entwurfsregeln in

einer Tabelle den Grundtypen von Entwicklungsaufgaben zugeordnet und hinsichtlich ihrer Relevanz bewertet.

Die Anwendung der Entwurfsregeln bildet den dritten Schritt des Vorgehens. Die wichtigsten Methoden zur Anwendung der Entwurfsregeln bilden die Design Structure Matrix nach PIMMLER/EPPINGER, die Module Indication Matrix nach ERIXON, die Integration der beiden genannten Matrizen nach BLACKENFELT sowie eine selbst entwickelte *Reconfiguration Structure Matrix*. Durch die Reconfiguration Structure Matrix wird die Bildung von Modulen in selbstoptimierenden Systemen angestrebt. Dabei werden selbstoptimierende Systeme als intelligente, autonome Systeme verstanden, die flexibel auf sich ändernde Umfeldbedingungen reagieren [Gau05]. Zur Modularisierung von selbstoptimierenden Systemen werden eingangs Design Structure Matrizen für alle Anwendungsszenarien des Produkts aufgestellt. Darauf aufbauend wird die Reconfiguration Structure Matrix durch Summation der Beziehungen in den Anwendungsszenarien gebildet. In der Produktstruktur sollten Basiseinheiten grundsätzlich von Systemelementen gebildet werden, die in jedem Anwendungsszenario auftreten. Dagegen sollten Systemelemente, die nur in einzelnen Anwendungsszenarien aktiviert werden, in autonomen Zusatzmodulen zusammengefasst werden.

Den Abschluss des Vorgehens bildet die Bewertung der Produktstruktur in einer Nutzwertanalyse. Das verwendete Bewertungsverfahren wird im Rahmen der Vorstellung der Methoden zur Bewertung modularer Produktfamilien in Abschnitt 3.3 vorgestellt.

*Bewertung:* Insbesondere die in der Arbeit aufgestellten Entwurfsregeln bilden ein praktisches Hilfsmittel bei der Strukturierung von Produkten. Darüber hinaus wird berücksichtigt, dass Produkte eher integral oder eher modular aufgebaut sein sollten. Dagegen erscheint das Gesamtverfahren aufgrund der nicht eindeutig abgegrenzten Anwendung verschiedener Ansätze wie der Design Structure Matrix oder der Module Indication Matrix nur schwer durchgängig anwendbar.

### 3.2.3 Bewertung der Methoden

Wie zuvor bereits die Methoden der Plattformentwicklung werden in diesem Abschnitt die Methoden zur Entwicklung modularer Produktstrukturen anhand der in Abschnitt 2.3 aufgestellten Anforderungen bewertet. Bild 3.22 gibt einen Überblick über die Einzelbewertungen.

**Eignung für die Entwicklung modularer Produktfamilien:** Die Methoden zur Modularisierung eignen sich grundsätzlich nur für die Entwicklung von Produktfamilien, wenn sie produktstrategische Beziehungsaspekte berücksichtigen. Allerdings erfolgt in keinem der bekannten Ansätze eine unmittelbare Berücksichtigung der Unterscheidungsmerkmale von Produktfamilien. Die Strukturierung von Produktfamilien in einer Weise,

die eine Konfiguration von Produktvarianten ermöglicht, ist daher auch mit den vorgestellten produktstrategischen Modularisierungsansätzen nicht möglich.

	Anforderungen							
	Eignung für die Entwicklung modularer Produktfamilien	...technisch-funktionalen Beziehungen	...produktstrategischen Beziehungen	Berücksichtigung unterschiedlicher Zielsetzungen	Berücksichtigung der variantengerechten Produktgestaltung	Berücksichtigung konstruktiver Lösungsansätze	Darstellung und Dokumentation	Nachvollziehbarkeit und Verständlichkeit
<b>Methoden zur Entwicklung modularer Produktstrukturen</b>								
Gliedern in realisierbare Module nach VDI 2221	x	○	○	◐	○	○	○	○
Baukastenentwicklung nach PAHL/BEITZ	(✓)	◐	◐	○	○	○	○	◐
Method of Module Heuristics nach STONE	x	●	○	◐	○	○	◐	●
Erweiterungen MMH nach ZAMIROWSKI/OTTO und DAHMUS et al.	(✓)	●	◐	◐	○	○	◐	◐
Development of Modular Products nach KUSIAK	x	◐	○	○	○	○	○	○
Integration Analysis Methodology nach PIMMLER/EPPINGER	x	●	○	○	○	○	◐	◐
Structural Complexity Management nach Lindemann et al.	(✓)	●	◐	○	○	●	◐	◐
Modular Function Deployment nach Erixon	(✓)	○	●	◐	○	◐	◐	●
Erweiterung der Methode MFD nach STAKE	(✓)	○	●	◐	○	○	◐	◐
Zusammenführung von DSM und MIM nach LANNER/MALMQVIST	(✓)	●	●	○	○	○	○	○
Modularisierung nach BLACKENFELT	(✓)	●	●	○	○	○	◐	◐
Modularisierung nach KOEPPEN	(✓)	●	●	◐	○	○	○	○
Modular Engineering nach KOPPENHAGEN	(✓)	●	●	○	○	○	○	○
Modularisierung nach NEWCOMB et al.	x	◐	◐	●	○	◐	○	◐
Modulare Produktentwicklung nach GÖPFERT	(✓)	◐	◐	◐	○	○	●	●
Produktstrukturierung für mechatronische Systeme nach STEFFEN	(✓)	●	●	●	○	○	○	○

● erfüllt    ◐ teilweise erfüllt    ○ nicht erfüllt    ✓ zutreffend    (✓) bedingt zutreffend    x nicht zutreffend

Bild 3.22: Bewertung bestehender Methoden zur Entwicklung modularer Produktstrukturen

**Berücksichtigung produktstrategischer und technisch-funktionaler Beziehungen:** Die Berücksichtigung technisch-funktionaler wie auch produktstrategischer Beziehungen für die Entwicklung von Modulen ist Zielsetzung mehrerer Methoden. Die Zusammenführung erscheint allerdings in keinem der Ansätze uneingeschränkt umsetzbar.

**Berücksichtigung unterschiedlicher Zielsetzungen:** Der Umgang mit unterschiedlichen und teilweise widersprüchlichen Zielsetzungen findet in den bekannten Ansätzen nur wenig Beachtung. Hervorzuheben ist das Vorgehen nach NEWCOMB et al., das eine differenzierte Betrachtung mehrerer Ziele aus dem After-Sales ermöglicht. Darüber hinaus verfolgt KOEPPEN das Ziel, eine modulare Produktstruktur zu entwickeln, die auf produkt- oder unternehmensspezifische Zielsetzungen angepasst ist.

**Berücksichtigung der variantengerechten Produktgestaltung:** Die variantengerechte Produktgestaltung ist bei keiner der vorgestellten Methoden Teil des Vorgehens.

**Berücksichtigung konstruktiver Lösungsansätze:** Konstruktive Lösungsansätze werden in nur sehr wenigen Ansätzen berücksichtigt. ERIXON verweist im letzten Schritt seiner Methode auf gängige Entwicklungsmethoden sowie DfX-Richtlinien zur Ausgestaltung der entwickelten Module. LINDEMANN et al. berücksichtigen in ihrer Methode explizit die Übertragung der auf abstrakter Ebene gefundenen Ansätze auf die Produktgestalt. Dies beinhaltet auch die Suche nach Lösungen zur Überwindung von Widersprüchen. NEWCOMB et al. beziehen in der Weiterentwicklung ihres Ansatzes auch konstruktive Lösungen zur Verbesserung des zuvor entwickelten Konzepts mit ein.

**Darstellung und Dokumentation:** Für die Darstellung und Dokumentation von Beziehungsaspekten werden vielfach Matrizen eingesetzt. Matrizen erweisen sich bei einer rechnerunterstützten Auswertung als vorteilhaft, sind jedoch bei einer manuellen Bearbeitung nur schwer handhabbar. Eine einfachere, leichter nachzuvollziehende Darstellungsweise bietet der rautenförmige Netzplan von GÖPFERT. Aufgrund der starken Abstraktion bietet diese Visualisierung allerdings keinen klaren Bezug zur Produktgestalt.

**Nachvollziehbarkeit und Verständlichkeit:** Für den Anwender gut nachvollziehbar und leicht verständlich sind insbesondere die von STONE aufgestellten Heuristiken sowie das Vorgehen von ERIXON. Die in vielen Methoden angestrebte Nutzung von Algorithmen zur Modulbildung erleichtert zwar den Umgang mit einer großen Anzahl von Komponenten, ist für den Anwender allerdings nur schwer nachvollziehbar.

### 3.3 Bewertung von modularen Produktfamilien

#### 3.3.1 Grundlagen der Bewertung modularer Produktfamilien

Aufgrund der Komplexität der Entwicklung modularer Produktfamilien müssen vielfach mehrere Konzepte parallel verfolgt werden, bis ein ausreichendes Informationsniveau für die Bewertung und Auswahl erreicht ist. Daher ist ein Verfahren, das bereits in einer frühen Entwicklungsphase eine Bewertung von modularen Produktstrukturen ermöglicht, für die Entwicklung von Produktfamilien von ausschlaggebender Bedeutung.

Für die Bewertung eignen sich insbesondere Kennzahlen und Kennzahlensysteme, da sie schnell und prägnant über ein Aufgabenfeld informieren können, für das eine Vielzahl relevanter Einzelinformationen vorliegt [Web98]. Dabei können Kennzahlen in absolute Zahlen und Verhältniszahlen unterteilt werden (Bild 3.23).

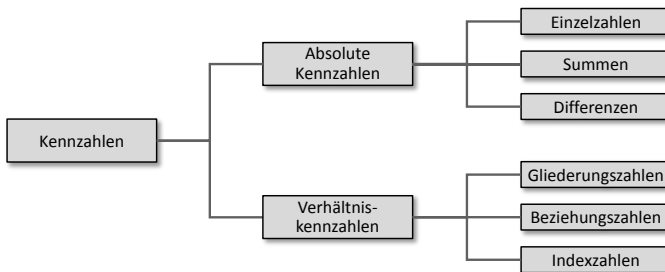


Bild 3.23: Arten von Kennzahlen

Absolute Zahlen beschreiben unmittelbar einen Zustand, einen Vorgang oder eine Entscheidung, ohne mit einer anderen Größe in Relation gesetzt zu werden [Ben07]. Sie können Einzelwerte, Summen oder Differenzen sein. Im Gegensatz dazu stellen Verhältniskennzahlen eine relative Größe dar. Sie werden in drei Arten unterteilt:

- *Beziehungszahlen* bestehen aus zwei begrifflich verschiedenen Größen, die gegeneinander ins Verhältnis gesetzt werden.
- *Gliederungszahlen* geben den Anteil einer Größe an einer Gesamtmenge an.
- *Indexzahlen* setzen zwei gleichartige Größen, die sich durch ein zeitliches, räumliches oder sachliches Merkmal unterscheiden, in einen Zusammenhang. Eine der Größen wird als Basisgröße verwendet und mit der Zielgröße verglichen.

In der Regel können komplexe Sachverhalte durch Einzelkennzahlen nicht mit ausreichender Genauigkeit bewertet werden. Um die Aussagekraft von Kennzahlen zu erhöhen, können mehrere Kennzahlen zu einem Kennzahlensystem kombiniert werden.

Von Kennzahlensystemen spricht man, wenn zwei oder mehr Kennzahlen, die in einer Beziehung zueinander stehen, sich ergänzen oder erklären [San04].

### 3.3.2 Methoden zur Bewertung von modularen Produktfamilien

Im Folgenden werden im dem Stand der Wissenschaft bestehende Ansätze zur Bewertung von modularen Produktfamilien zusammengestellt. Dies umfasst die Kennzahl Cluster Independence nach NEWCOMB et al., die beiden Kennzahlensysteme nach ERIXON und HÖLTTÄ-OTTO/OTTO sowie das Bewertungsschema nach STEFFEN. Aufgrund des großen Umfangs werden das Kennzahlensystem nach HÖLTTÄ-OTTO/OTTO und das Bewertungsschema von STEFFEN im Folgenden nur zusammenfassend vorgestellt; eine detaillierte Zusammenfassung kann dem Anhang A entnommen werden. An dieser Stelle sind zusätzlich weitere Kennzahlen aus dem Bereich der kundenindividuellen Massenfertigung zusammengefasst.

#### 3.3.2.1 Cluster Independence nach NEWCOMB et al.

Die Kennzahl *Cluster Independence (CI)* nach NEWCOMB et al. [New98] zielt auf die technisch-funktionale Entkopplung von Modulen. Um diese zu berechnen, wird der Quotient aus der Anzahl der Beziehungen innerhalb der Module und der Gesamtanzahl von Beziehungen im Produkt gebildet:

$$CI = \frac{\text{Anzahl der Beziehungen innerhalb der Module}}{\text{Gesamtanzahl der Beziehungen}}$$

Entsprechend der Berechnungsvorschrift strebt die Kennzahl einem theoretischen Idealwert von 1 entgegen. In diesem Fall liegen alle Beziehungen innerhalb der Module; die Module sind also voneinander losgelöst.

*Bewertung:* Mit der Kennzahl Cluster Independence schaffen NEWCOMB et al. eine einfach anwendbare Kennzahl für die Bewertung der technisch-funktionalen Entkopplung von Modulen. Produktstrategische Anforderungen gehen allerdings nicht in die Bewertung ein.

#### 3.3.2.2 Bewertung modularer Produktstrukturen nach ERIXON

Im Rahmen seiner Methode Modular Function Deployment (vgl. 3.2.2.8) stellt ERIXON [Eri98] einen Ansatz zur Bewertung und Auswahl von modular strukturierten Produkten vor. In Tabelle 3.1 sind die von ihm aufgestellten Kennzahlen und Regeln zusammengefasst.

Die Auswirkungen der Modularisierung auf die Entwicklung eines Produkts werden anhand der Entwicklungsdauer, den Entwicklungskosten und der Entwicklungskapazität

bewertet. Auf die *Entwicklungsdauer* schließt ERIXON über die Kennzahl *Schnittstellenkomplexität*. Der Gedanke hinter dieser Kennzahl ist, dass durch eine modulare Produktstruktur eine Parallelisierung der Entwicklungstätigkeiten ermöglicht wird und die Dauer der Entwicklung somit verkürzt werden kann. Um den Abstimmungsbedarf zwischen den einzelnen Arbeitspaketen gering zu halten, sind einfach spezifizierbare Schnittstellen zwischen den Modulen erforderlich.

Tabelle 3.1: Kennzahlen und Regeln zur Bewertung modularer Produktstrukturen nach [Eri98]

Effekt im Produktlebenszyklus	Produkteigenschaft	Kennzahl/Regel
<b>Entwicklung</b> 1. Entwicklungsdauer 2. Entwicklungskosten 3. Entwicklungskapazität	Schnittstellenkomplexität Anteil Carry-over-Module Anteil Zukaufmodule	Kennzahl Regel Regel
<b>Montage</b> 4. Produktkosten 5. Systemkosten 6. Durchlaufzeit 7. Qualität	Sortiments-Komplexität Anteil Zukaufmodule Anzahl der Module im Produkt Anzahl der separat getesteten Module	Kennzahl Regel Kennzahl Kennzahl
<b>Vertrieb/After-Sales</b> 8. Variantenflexibilität 9. Service/Upgrading 10. Recyclebarkeit	Wiederverwendung Funktionsreinheit in Modulen Materialreinheit in Modulen	Kennzahl Regel Regel

Schnittstellen sind im Sinne der Methode *Design for Assembly* nach BOOTHROYD und DEWHURST [Boo02] optimal gestaltet, wenn von ihnen weder der Handhabungsprozess noch der Fügevorgang erschwert wird. Da eine entsprechend gestaltete Schnittstelle auch einfach zu spezifizieren sein sollte, stellt ERIXON die Hypothese auf, dass aus der Montagegerechtheit der Schnittstellen auf die Parallelisierbarkeit von Entwicklungstätigkeiten geschlossen werden kann. Die Kennzahl *Schnittstellenkomplexität* ist daher der Quotient aus der aufsummierten Montagezeit der Modul-Schnittstellen und der optimalen Montagezeit. Dabei wird als optimale Montagezeit der von BOOTHROYD und DEWHURST empirisch ermittelte Wert von drei Sekunden verwendet.

$$\text{Schnittstellenkomplexität} = \frac{\sum_{i=1}^{N_m-1} T_{BDI_i}}{3}$$

mit:  $N_m$  = Modulanzahl in einer Produktvariante

$T_{BDI_i}$  = Montagezeit für eine Schnittstelle  $i$

Als zweiten Effekt der Modularisierung in der Entwicklungsphase sieht ERIXON die Reduzierung von *Entwicklungskosten* durch die Wiederverwendung von Modulen. Diesen

Effekt quantifiziert er allerdings nicht in einer Kennzahl, sondern stellt die Regel auf, dass ein möglichst hoher Anteil an Carry-over-Modulen eingesetzt werden sollte.

Ebenfalls durch eine Regel wird die *Entwicklungskapazität* abgedeckt. Durch den Zukauf von Entwicklungsleistungen für einzelne Module kann der Bedarf an eigener Entwicklungsleistung angepasst werden. Aufgrund der Komplexität der Frage „Make or buy?“ wird allerdings keine eindeutige Handlungsanweisung gegeben.

Als Kriterien für die Bewertung der Auswirkungen der Modularisierung auf die Montage werden die Produkt- und Systemkosten sowie die Durchlaufzeit und die Qualität verwendet. Für die *Produktkosten* kann bei modularen Produkten zwar ein Anstieg aufgrund von zusätzlichen Schnittstellen erwartet werden, dieser kann laut ERIXON aber durch die Wiederverwendung von Modulen in der Produktfamilie oder durch standardisierte Produktionsprozesse überkompensiert werden. Um die Produktkosten gering zu halten, sollten die Kundenanforderungen durch ein möglichst einfach strukturiertes Produktprogramm erfüllt werden. In Anlehnung an PUGH [Pug90] wird daher die Kennzahl *Sortiments-Komplexität* zur Beschreibung der Komplexität des Produktprogramms verwendet.

$$\text{Sortiments – Komplexität} = \sqrt[3]{N_m N_{mtot} N_c}$$

mit:  $N_m$  = Modulanzahl in einer durchschnittlichen Produktvariante  
 $N_{mtot}$  = Modulvariantenanzahl in der gesamten Produktfamilie  
 $N_c$  = Kontaktflächenanzahl zwischen den Modulen eines Produkts

Entsprechend der Kennzahl nimmt die Komplexität eines Produktprogramms mit der Anzahl der für die Bildung von Produktvarianten erforderlichen Module, der Anzahl der im gesamten Produktprogramm erforderlichen Modulvarianten sowie der Anzahl der Schnittstellen zwischen den Modulen zu.

Die *Systemkosten* werden wiederum mit einer Regel betrachtet. Hierbei handelt es sich um die Kosten, die für Zukauf, Produktionsplanung, Qualitätskontrolle, Produktionsmitelentwicklung und Logistik anfallen. Um die Systemkosten zu reduzieren, kann ein höherer Anteil an Zukaufmodulen angestrebt werden.

Für die Berechnung der *Durchlaufzeit* stellt ERIXON die Annahme auf, dass alle Module zeitgleich vormontiert und schließlich in einer Endlinie zum Gesamtprodukt zusammengefügt werden. Wenn man zusätzlich davon ausgeht, dass in der Modulmontage keine Wartezeiten auftreten, kann die Durchlaufzeit wie folgt berechnet werden:

$$\text{Durchlaufzeit} = \frac{N_p T_{norm}}{N_m} + T_{test} + (N_m - 1)T_{int}$$

- mit:  $N_p$  = Teileanzahl in einem Produkt  
 $T_{norm}$  = Durchschnittliche Montagezeit für ein Teil in der Vormontage (10 Sekunden nach [Boo92])  
 $N_m$  = Modulanzahl in einer durchschnittlichen Produktvariante  
 $T_{test}$  = Durchschnittliche Zeit für den Funktionstest eines Moduls  
 $T_{int}$  = Durchschnittliche Montagezeit für ein Modul in der Endlinie

Die Kennzahl *Durchlaufzeit* ergibt sich somit aus der Summation der Durchlaufzeit der Module in der Vormontage, der Dauer für die Funktionstests der vormontierten Module und der Dauer der Montage der Module. Unter Annahme einer gleichen Dauer für die Teilmontage in der Vormontage sowie für die Endmontage der Module leitet ERIXON zusätzlich die Modulanzahl her, bei der eine minimale Durchlaufzeit erreicht werden kann. Die ideale Modulanzahl errechnet sich unter diesen Annahmen aus der Quadratwurzel der Teileanzahl.

$$N_m = \sqrt{N_p}$$

Der letzte betrachtete Effekt der Modularisierung auf die Montage ist die *Qualität*. Aufgrund der schnelleren Rückkopplung von Fehlern kann die Qualität eines Produkts gesteigert werden, indem die Funktion von Modulen geprüft wird, bevor sie in die Endlinie geliefert werden. Um die Wahrscheinlichkeit einer fehlerfreien Modulmontage zu berechnen, baut ERIXON auf der Kennzahl für eine fehlerfreie Bauteilmontage nach BARKAN und HINCKLEY [Bar93] auf. Aus der auf Bauteile bezogenen Kennzahl leitet ERIXON eine Kennzahl ab, mit der die Wahrscheinlichkeit für eine fehlerfreie Montage eines modularen Produkts berechnet werden kann.

$$P_{A_{test}} = [1 - C_k(T_{int} - 3)^k]^{N_m - 1} [1 - C_k(T_{norm} - 3)^k]^{N_{notest}}$$

- mit:  $P_{A_{test}}$  = Wahrscheinlichkeit eines fehlerfreien Endprodukts  
 $C_k$  = Konstante der Qualitätskontrolle  
 $k$  = Exponent der Fehleranfälligkeit über die Montagezeit  
 $T_{int}$  = Durchschnittliche Montagezeit für ein Modul in der Endlinie  
 $T_{norm}$  = Durchschnittliche Montagezeit für ein Teil in der Vormontage  
 $N_m$  = Modulanzahl in einer durchschnittlichen Produktvariante

$N_{notest}$  = Anzahl nicht vorgeprüfter Module

Die Kennzahl setzt sich aus zwei Klammertermen zusammen. Durch den linken Klammerterm wird die Wahrscheinlichkeit berechnet, mit der die Endmontage fehlerfrei erfolgt. Die Berechnung der Wahrscheinlichkeit einer fehlerfreien Montage baut auf Untersuchungen von BOOTHROYD und DEWHURST auf, wonach die Fehlerwahrscheinlichkeit mit der Montagedauer zunimmt. Durch den Klammerausdruck  $(T_{int}-3)$  wird daher ermittelt, inwieweit die reale Montagedauer von der idealen Montagedauer abweicht. Da davon ausgegangen wird, dass die Module jeweils eine Schnittstelle zueinander haben, wird der Klammerterm mit  $N_m-1$  potenziert. Der rechte Klammerterm gibt dagegen die Wahrscheinlichkeit einer fehlerfreien Montage für die Vormontage der Module an. Unter der Annahme, dass vorgetestete Module fehlerfrei sind, wird dieser Term mit der Anzahl der nicht vorgetesteten Module potenziert.

In der Vertriebs- und After-Sales-Phase sieht ERIXON die Variantenflexibilität, Service/Upgrading und die Recycelbarkeit als Effekte der Modularisierung. Ziel der *Variantenflexibilität* ist es, die vom Kunden geforderten Produktvarianten mit einer möglichst geringen Vielfalt an Modulen zu erzeugen. Damit soll ein möglichst hoher Wiederverwendungsanteil von Modulen und Prozessen ermöglicht werden. Um diesen Effekt in einer Kennzahl zu erfassen, wird der Quotient aus der Anzahl der Varianten in einem Produktprogramm und der Anzahl der erforderlichen Module gebildet.

$$E_{var} = \frac{N_{var}}{N_{mot}}$$

mit:  $N_{var}$  = Anzahl der Varianten im gesamten Produktprogramm

$N_{mot}$  = Anzahl der Module im gesamten Produktprogramm

Die beiden verbleibenden Effekte, Service/Upgrading und Recycelbarkeit, werden durch Regeln abgebildet. Um Vorteile im Bereich *Service/Upgrading* zu erschließen, sollte eine eindeutige Zuordnung von Funktionen und Modulen gegeben sein. Eine Aufteilung einer Teilfunktion auf mehrere Module sollte vermieden werden. Die *Recycelbarkeit* wird dagegen entscheidend durch die in den Modulen verwendeten Materialien beeinflusst. Es sollten daher weitgehend gleiche Materialien innerhalb der Module angestrebt werden.

**Bewertung:** ERIXON stellt im Rahmen seiner Modularisierungsmethode eine umfassende Zusammenstellung von Kennzahlen und Regeln zur Bewertung modularer Produktfamilien vor. Teilweise beruhen die Kennzahlen allerdings auf Annahmen, deren Allgemeingültigkeit kritisch hinterfragt werden muss. Darüber hinaus ergibt sich ein hoher Aufwand zur Erstellung der Kennzahlen.

### 3.3.2.3 Platform Concept Evaluation nach HÖLTTÄ-OTTO/OTTO

HÖLTTÄ-OTTO und OTTO [Höl06] entwickeln in ihrer Arbeit ein Kennzahlensystem, um Produktplattformen bereits in der Konzeptphase bewerten zu können. Dazu leiten sie 19 Kennzahlen ab und ordnen diese den Bereichen Kundenzufriedenheit, Produktvielfalt, After-Sales, Organisation, Änderungsflexibilität und Entwicklungskomplexität zu (Tabelle 3.2). Die Kennzahlen werden auf einen Wertebereich von 0 bis 10 normiert und zur eigentlichen Konzeptauswahl in einem Mittelwert oder in einer gewichteten Summe zusammengeführt. Eine Erläuterung der verwendeten Kennzahlen kann Anhang A.1 entnommen werden.

Tabelle 3.2: Beispiel für eine Konzeptbewertung in Anlehnung an [Höl06]

	Bestehendes Konzept	Konzept A	Konzept B
<b>Bewertung Portfolio Kundenzufriedenheit</b>			
Kosten-Wert-Verteilung	8,0	7,6	7,2
Kundenanforderungen	6,3	6,7	7,0
<b>Bewertung Produktvielfalt</b>			
Übernahmemodule	9,4	9,3	7,2
Gemeinsame Module	5,9	5,9	5,4
Spezifikationsvielfalt	10,0	10,0	10,0
<b>Bewertung After-Sale-Unterstützung</b>			
Aufteilung für Zuverlässigkeit	8,6	8,5	7,9
Aufteilung für Service	10,0	10,0	10,0
Umweltfreundlichkeit	8,1	8,1	8,1
<b>Bewertung Organisation</b>			
Montagegerechtheit	6,9	7,4	6,7
Übereinstimmung mit Organisation	5,4	4,6	1,5
Make-or-Buy	9,2	8,8	8,6
Prüfbarkeit	5,4	5,5	5,7
<b>Bewertung Änderungsflexibilität</b>			
Unbekannte Änderungen	10,0	10,0	10,0
Änderungsflexibilität	9,1	9,0	6,4
<b>Bewertung Entwicklungskomplexität</b>			
Funktionszuordnung	9,7	9,6	9,5
Schnittstellenflexibilität	10,0	10,0	10,0
Vermeidung von Gegenläufigkeiten	0,0	0,0	0,0
1-Freiheitsgrad-Einstellung	10,0	10,0	10,0
Begrenzung von Extremas	6,6	6,6	6,6
<b>Gesamtbewertung</b>	<b>8,0</b>	<b>7,9</b>	<b>7,3</b>

*Bewertung:* Wie das Bewertungsverfahren von ERIXON bezieht auch der Ansatz nach HÖLTTÄ-OTTO/OTTO eine Vielzahl von Aspekten in die Bewertung ein. Unter der Annahme, dass die bei der Definition der Kennzahlen getroffenen Annahmen zutreffen, kann eine hohe Aussagekraft bei der Bewertung von Produktfamilien erreicht werden. Der hohen Aussagekraft steht allerdings auch ein sehr hoher Aufwand zur Erfassung der einzelnen Kennzahlen gegenüber.

### 3.3.2.4 Bewertungsschema für Produktstrukturen nach STEFFEN

Als Bestandteil seines Verfahrens zur Produktstrukturierung von mechatronischen Systemen stellt STEFFEN [Ste07] dem Anwender ein Bewertungsschema zur Auswahl von Konzepten zur Verfügung. In seinem Bewertungsschema unterscheidet STEFFEN zwischen Fest- und Wunschforderungen. Während bei Festforderungen die Erfüllung abgeprüft wird, werden die Wunschforderungen einer Nutzwertanalyse unterzogen. Dazu werden die Kriterien gewichtet und ihre Ausprägung auf einer Skala von 0 bis 10 bewertet. Einen Ausschnitt aus dem Bewertungsschema gibt Tabelle 3.3; eine vollständige Zusammenfassung findet sich in Anhang A.2.

Tabelle 3.3: Kriterien zur Bewertung der Produktstruktur nach [Ste07] (Ausschnitt)

Checkliste zur Beurteilung des Produktkonzepts		F	W		
Produkt		[✓]	[%]	[1-10]	
Produkt-komplexität	Ist das System in überschaubare Einheiten gegliedert? Ist die Anzahl von Modulen in einem System höherer Ebene überschaubar? Sind Abhängigkeiten möglichst in Modulen gekapselt? Sind die Module interferenzfrei? Sind Schnittstellen eindeutig und klar definiert?		20	5	
Design	Erfüllt das System die Designvorgaben?	✓			
Bauraum	Werden die Abmessungen und Genauigkeitsanforderungen eingehalten? Werden die Anforderungen an die Kinematik (Bewegungsmöglichkeiten, Fahrwege etc.) eingehalten? Werden die erforderlichen Kräfte aufgenommen oder erzeugt? Ist die Belastbarkeit der Tragstruktur gegeben?	✓			
...	...				
Produktprogramm					
Produktpro-grammbreite	Werden Systemelemente im Produkt oder in der Produktfamilie konsequent mehrfach verwendet?		20	6	
Produkt-generationen	Werden Systemelemente aus/in anderen Produktgenerationen konsequent wiederverwendet? Werden strategische Entscheidungen des Unternehmens berücksichtigt?		10	8	
...	...				
Produktentstehung					
Entwicklungs-zeit/-aufwand	Steht der Aufwand zur Entwicklung einer Produktstruktur (einer Plattform) im Verhältnis zum Aufwand? Ist der Time-to-Market erreichbar?	✓			
Entwicklungs-tiefe	Sind alle notwendigen Kompetenzen zur Ausarbeitung vorhanden? Sind Zulieferer eingebunden bzw. verfügbar?	✓			
...	...				
Zusammenfassende Bewertung				100	5,7

Legende: F Festforderung W Wunschforderung

**Bewertung:** Das Bewertungsschema nach Steffen beinhaltet eine Vielzahl von Kriterien zur Bewertung von Produktstrukturen und ermöglicht somit eine hohe Aussagekraft. Des Weiteren ist die Durchführung der Bewertung mit vergleichsweise geringem Aufwand möglich. Als Nachteil des Vorgehens muss allerdings angeführt werden, dass die Bewertung der Ausprägungen nicht auf quantitativ messbaren Größen beruht.

### 3.3.3 Bewertung der Methoden

Die im Vorangegangenen sowie in Anhang A vorgestellten Ansätze zur Bewertung modularer Produktfamilien werden im Folgenden hinsichtlich ihrer Aussagekraft, des Aufwands zur Erstellung der Messgrößen sowie der Transparenz für den Anwender bewertet. Bild 3.24 gibt eine Zusammenfassung der Einzelbewertungen.

	Eignung für die Bewertung modularer Produktfamilien	Anforderungen		
		Aussagekraft	Aufwand	Transparenz
<b>Methoden zur Bewertung modularer Produktfamilien</b>				
Cluster Independence nach NEWCOMB et al.	✘	○	◐	◑
Bewertung modularer Produktstrukturen nach ERIXON	✓	◐	○	○
Platform Concept Evaluation nach HÖLTTÄ-OTTO/OTTO	✓	◐	○	○
Bewertungsschema für Produktstrukturen nach STEFFEN	✓	◐	●	◐
Degree of Commonality Index nach COLLIER	✘	○	-	●
Total Constant Commonality Index nach WACKER/TRELEVEN	✘	○	-	●
Component Part Commonality Index nach JIAO/TSENG	✘	○	-	◐
Design for Variety-Kennzahlen nach MARTIN/ISHII	✘	○	-	●

✓ zutreffend (✓) beängigt zutreffend ✘ nicht zutreffend ● erfüllt ◐ teilweise erfüllt ○ nicht erfüllt

Bild 3.24: Beurteilung bestehender Methoden zur Bewertung von modularen Produktfamilien

**Aussagekraft:** Bei der Bewertung modularer Produktfamilien erweist sich insbesondere die Breite der Aspekte, die durch die Produktstruktur beeinflusst werden, als Schwierigkeit. Aus diesem Grund eignen sich weder die Kennzahl Cluster Independence noch

die in Anhang A zusammengestellten Kennzahlen aus dem Bereich der kundenindividuellen Massenfertigung für eine umfassende Bewertung modularer Produktfamilien. Während die Kennzahl Cluster Independence nach NEWCOMB et al. ausschließlich die technisch-funktionale Kopplung der Module bewertet, berücksichtigen die Kennzahlen nach COLLIER, WACKER/TRELEVEN, JIAO/TSENG und MARTIN/ISHII nur die Variantenvielfalt der Produktfamilie.

Eine umfassende Bewertung erfolgt dagegen durch die Kennzahlensysteme nach ERIXON und HÖLTTÄ-OTTO/OTTO sowie durch das Bewertungsschema nach STEFFEN. Die Ansätze nach ERIXON und HÖLTTÄ-OTTO/OTTO beruhen allerdings auf teilweise sehr weitgehenden Annahmen. Nachteil des Bewertungsschemas nach STEFFEN ist dagegen, dass die Bewertung nicht anhand von quantitativ messbaren Größen erfolgt.

**Aufwand:** Insbesondere die Bewertungsverfahren nach ERIXON und HÖLTTÄ-OTTO/OTTO bringen einen hohen Aufwand für die Erhebung der Kennzahlen mit sich. Teilweise müssen für die Kennzahlen nur schwer zu erfassende Informationen ermittelt werden. Mit deutlich geringerem Aufwand kann eine Bewertung modularer Produktfamilien mit Hilfe des von STEFFEN entwickelten Schemas erfolgen.

Der Aufwand für die Erhebung einer Kennzahl kann nur unter Berücksichtigung ihrer Aussagekraft bewertet werden. Da sowohl die Kennzahl Cluster Independence als auch die Kennzahlen aus dem Bereich der kundenindividuellen Massenfertigung keine ausreichende Aussagekraft für die Bewertung modularer Produktfamilien mitbringen, kann ihr Erhebungsaufwand ebenfalls nicht bewertet werden.

**Transparenz:** Die Kennzahl Cluster Independence, die Kennzahlen aus dem Bereich der kundenindividuellen Massenfertigung und das Bewertungsschema nach STEFFEN sind für den Anwender weitestgehend leicht verständlich und gut nachvollziehbar. Die Ansätze nach ERIXON und HÖLTTÄ-OTTO/OTTO weisen dagegen eine deutlich geringere Transparenz auf. Da die Kennzahlen teilweise auf stark abstrahierten Zusammenhängen beruhen, sind sie für den Anwender nur schwer nachvollziehbar.

### 3.4 Forschungsbedarf

Aus dem Stand der Wissenschaft ergibt sich, dass derzeit keine Methode besteht, die eine durchgehende Unterstützung bei der Entwicklung modularer Produktfamilien bietet. Auf der einen Seite konzentrieren sich die Methoden der Plattformentwicklung ausschließlich auf die Variantenvielfalt als Treiber für die Produktstrukturierung. Ziel bei der Anwendung der Methoden ist es, eine große externe Vielfalt auf Grundlage einer kleinen internen Vielfalt bereitzustellen. Da modulare Produktfamilien Potentiale in allen Produktlebensphasen erschließen sollen, ist der Betrachtungsrahmen der Me-

thoden der Plattformentwicklung für die Entwicklung modularer Produktfamilien nicht ausreichend. Im Gegensatz zu den bestehenden Ansätzen muss eine neu zu entwickelnde Methode nicht nur die Produktvielfalt berücksichtigen, sondern auch die vielfältigen Anforderungen aus allen Produktlebensphasen.

Auf der anderen Seite beziehen die Methoden zur Entwicklung modularer Produktstrukturen ein breiteres Feld an Anforderungen mit in die Produktstrukturierung ein. Neben technisch-funktionalen Komponentenkopplungen finden vielfach auch produktstrategische Anforderungen aus allen Produktlebensphasen Berücksichtigung. Aufgrund der im Folgenden erläuterten Schwachstellen bieten aber auch diese Ansätze keine ausreichende Unterstützung bei der Entwicklung modularer Produktfamilien. So finden die produktstrategischen Anforderungen im Allgemeinen durch Modultreiber Eingang in die Modularisierung. Die Modultreiber ermöglichen aber keine differenzierte Berücksichtigung der produktspezifischen Gründe für die Bildung von Modulen. Beispielsweise wird durch den Modultreiber *Different Specification* nur pauschal auf Komponenten verwiesen, die unterschiedlichen Spezifikationen unterliegen. Eine Konfiguration von Produktvarianten wird jedoch erst möglich, wenn eine eindeutige Zuordnung zwischen den varianten Modulen und den Unterscheidungsmerkmalen der Produktfamilie gegeben ist. In einer neu zu entwickelnden Methode muss das Modultreiberkonzept daher in geeigneter Weise weiterentwickelt werden.

Neben der fehlenden Berücksichtigung der produktspezifischen Gründe für die Bildung von Modulen wird in den bestehenden Methoden der Umgang mit den vielfältigen und teilweise widersprüchlichen Anforderungen nur unzureichend unterstützt. Da sich aus den einzelnen Produktlebensphasen unterschiedliche Anforderungen an die Modularisierung stellen, können sich aus Sicht der Phasen auch unterschiedliche modulare Produktstrukturen ergeben. Um aus den unterschiedlichen Anforderungen ein abgestimmtes Gesamtkonzept für die Modularisierung einer Produktfamilie ableiten zu können, muss eine neu zu entwickelnde Methode einen Ausgleich zwischen den Anforderungen aller Produktlebensphasen schaffen. Dazu muss die Methode Widersprüche zwischen den Produktstrukturen der unterschiedlichen Produktlebensphasen aufzeigen und eine Unterstützung bei der Entwicklung von Lösungsansätzen bieten. Da die Produktstruktur in einem Wechselspiel mit der konstruktiven Umsetzung der Produktfamilie steht, muss an dieser Stelle auch eine konstruktive Umgestaltung von Komponenten und Modulen berücksichtigt werden.

Weitergehend ist die Abbildung von modularen Produktstrukturen in den bestehenden Methoden verbesserungswürdig. In den meisten Ansätzen erfolgt ihre Abbildung ausschließlich in Matrizen. Für den Anwender sind Matrizen aufgrund der starken Abstraktion der Produktstruktur allerdings nicht intuitiv verständlich. Insbesondere geometrische Randbedingungen können aus einer Matrix kaum abgelesen werden. Es muss

daher eine leicht verständliche Visualisierung für Produktstrukturen entwickelt werden, die eine gut nachvollziehbare Darstellung der geometrischen Randbedingungen ermöglicht.

Über die eigentliche Produktstrukturierung hinaus geht die variantengerechte Produktgestaltung. Diese ist erforderlich, um eine einfache Abbildung der Unterscheidungsmerkmale auf Komponentenebene sicherzustellen. Erst eine geeignete Gestaltung der Komponenten ermöglicht die Entwicklung einer Produktstruktur, die durch die eindeutige Zuordnung von Unterscheidungsmerkmalen und Modulen eine einfache Konfiguration von Produktvarianten erlaubt. Die variantengerechte Produktgestaltung muss daher ein Bestandteil einer Methode für die Entwicklung modularer Produktfamilien sein.

Neben der unzureichenden Unterstützung bei der Entwicklung modularer Produktfamilien fehlt es an einem Verfahren zur Bewertung und Auswahl von Konzepten. Es muss daher ein Bewertungsverfahren entwickelt werden, das bereits in einer frühen Entwicklungsphase und unter vertretbarem Aufwand eine aussagekräftige Bewertung der entwickelten Konzepte ermöglicht.

Darüber hinaus müssen sowohl das methodische Vorgehen und die darin enthaltenen Visualisierungsmethoden als auch das Bewertungsverfahren für den Anwender leicht nachvollziehbar und gut verständlich sein. Dies ist erforderlich, um die Akzeptanz des Anwenders gegenüber dem Einsatz der Methode sowie den erzeugten Ergebnissen sicherzustellen.

Im folgenden Kapitel wird eine Methode vorgestellt, die auf dem erkannten Forschungsbedarf aufbaut und eine durchgehende Unterstützung bei der Entwicklung modularer Produktfamilien bietet.



## 4 Methode zur Entwicklung modularer Produktfamilien

Die Methode zur Entwicklung modularer Produktfamilien setzt an dem in Bild 4.1 dargestellten Spannungsfeld an. Auf der linken Seite steht die externe Vielfalt, welche die für den Kunden nutzbare Vielfalt von Produktvarianten darstellt. Durch sie werden Kundenwünsche erfüllt und der Produktnutzen erhöht. Die externe Vielfalt trägt somit zur Steigerung des Unternehmensumsatzes bei. Dagegen steht auf der rechten Seite die interne Vielfalt. Diese beschreibt die im Unternehmen resultierende Vielfalt an Komponenten, Modulen, Produkten und Prozessen. Mit der internen Vielfalt steigt allerdings auch die Komplexität im Unternehmen. Die Folge sind steigende Kosten im gesamten Produktleben.

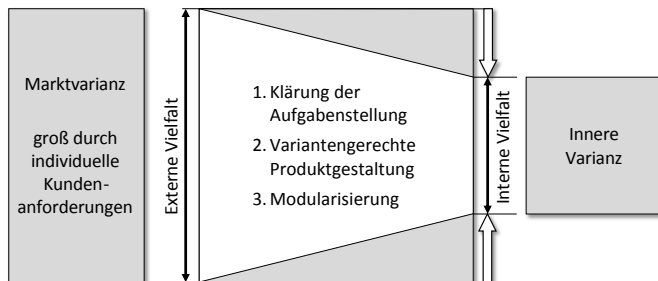


Bild 4.1: Einordnung der Methode zur Entwicklung modularer Produktfamilien

Entsprechend der vorangegangenen Betrachtung muss es das Ziel der Entwicklung variantenreicher Produkte sein, eine große externe Vielfalt auf Grundlage einer kleinen internen Vielfalt bereitzustellen. Um dieses Ziel zu erreichen, müssen Produktfamilien variantengerecht gestaltet und modular strukturiert werden. Durch die variantengerechte Gestaltung wird eine einfache Abbildung der Unterscheidungsmerkmale der Produktfamilie auf Komponentenebene erreicht, während eine modulare Produkt-

struktur die Konfiguration von Produktvarianten mit Hilfe von Modulen ermöglicht. Somit kann dem Kunden auf Grundlage einer begrenzten Anzahl von Modulen eine große Vielfalt an Produktvarianten bereitgestellt werden.

Die variantengerechte Gestaltung und die modulare Strukturierung von Produkten sind somit die maßgeblichen Ansätze, um dem Kunden bei vertretbarem Aufwand eine große Produktvielfalt bereitstellen zu können. Die modulare Produktstruktur muss neben der Variantenvielfalt allerdings auch einer Vielzahl von Anforderungen aus allen Produktlebensphasen gerecht werden. Beispielsweise sollte eine modulare Produktstruktur eine parallele Entwicklung von Modulen erlauben, den Zukauf von Modulen ermöglichen, den Austausch von Wartungsmodulen zulassen oder auch das Recycling des Altprodukts unterstützen. Die in den folgenden Abschnitten vorgestellte Methode zur Entwicklung modularer Produktfamilien zielt daher auf die Gestaltung und Strukturierung von Produktfamilien in einer Weise,

- die eine Konfiguration einer großen Vielfalt von Produktvarianten auf Grundlage einer kleinen internen Vielfalt ermöglicht und
- die Potentiale modularer Produktfamilien im gesamten Produktleben erschließt.

Wie bereits im vorangegangenen Kapitel herausgestellt wurde, wird eine entsprechende Zielsetzung von bestehenden Methoden nicht durchgehend unterstützt.

Die neu entwickelte Methode gliedert sich in drei Arbeitsphasen (vgl. Bild 4.1). Die erste Arbeitsphase besteht in der Klärung der Aufgabenstellung. Sie dient der Definition von Zielen sowie der Beschaffung von Informationen. Im Anschluss erfolgt in der zweiten Arbeitsphase die variantengerechte Gestaltung der Komponenten. Die variantengerechte Gestaltung ist eine Vorbedingung für die anschließende Modularisierung, da erst eine direkte Zuordnung von Unterscheidungsmerkmalen und Komponenten die Entwicklung einer variantengerechten Produktstruktur erlaubt. Die dritte Phase bildet mit der Modularisierung der Produktfamilie den Abschluss des Vorgehens.

Die Methode zur Entwicklung modularer Produktfamilien wurde am Institut für Produktentwicklung und Konstruktionstechnik der TU Hamburg-Harburg im Rahmen eines übergreifenden Forschungsvorhabens entwickelt [Ble10b;Kip10]. Für die variantengerechte Produktgestaltung wird daher auf den ebenfalls in diesem Rahmen entstandenen Ansatz nach KIPP zurückgegriffen. Dieser Methodenbaustein wird in Abschnitt 4.4 zusammenfassend vorgestellt. Detailliertere Angaben können der Arbeit von KIPP [Kip11] entnommen werden.

## 4.1 Arbeitsschritte der Methode

Die Arbeitsschritte zur Entwicklung modularer Produktfamilien werden in Bild 4.2 zusammengefasst. Während die ersten beiden Arbeitsschritte die zuvor erläuterte Phase Klärung der Aufgabenstellung bilden, entspricht der folgende Arbeitsschritt der variantengerechten Produktgestaltung der zweiten Phase. Die Modularisierung der Produktfamilie erfolgt in der abschließenden, dritten Phase und umfasst die Arbeitsschritte vier bis acht.

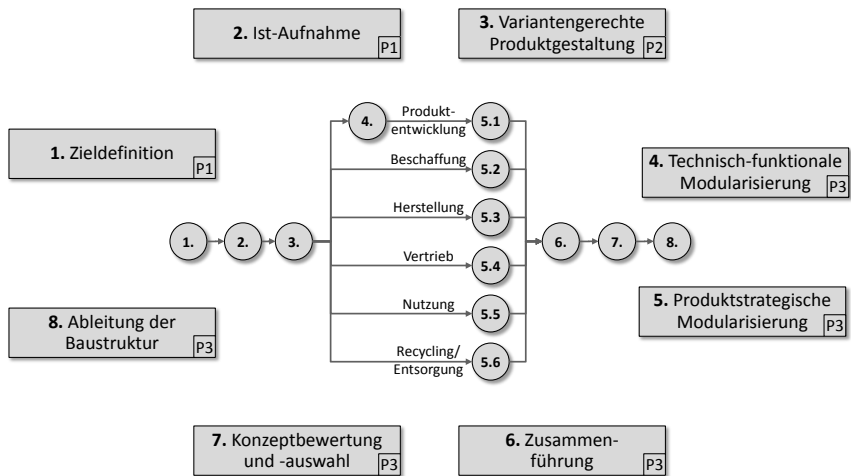


Bild 4.2: Arbeitsschritte der Methode zur Entwicklung modularer Produktfamilien (P: Phase)

Wie in Bild 4.2 dargestellt ist, ist die Definition erreichbarer Ziele der Ausgangspunkt für die Entwicklung modularer Produktfamilien. Durch diesen Schritt werden die Schwerpunkte für die folgenden Tätigkeiten festgelegt und es wird bei allen Beteiligten ein gemeinsames Verständnis für die im Rahmen der Entwicklung verfolgten Ziele erzeugt.

Darauffolgend werden die für die Entwicklung erforderlichen Informationen aufgenommen. Dazu zählen die Unterscheidungsmerkmale, die Funktionen, die Wirkprinzipien sowie die Komponenten der Produktfamilie. Während die Unterscheidungsmerkmale in einem Merkmalsbaum aufgenommen werden können, die Funktionen in einer Funktionsstruktur und die Wirkprinzipien in Prinzipskizzen, existiert für die Aufnahme von Komponenten und ihrer Schnittstellen kein geeignetes Werkzeug. Der Module Interface Graph (MIG) wurde daher neu entwickelt.

Im dritten Arbeitsschritt erfolgt die variantengerechte Gestaltung der Komponenten. Wie bereits zuvor aufgezeigt wurde, wird für den Methodenbaustein der variantengerechten Produktgestaltung auf die Arbeit von KIPP [Kip11] und das in diesem Rahmen entwickelte Variety Allocation Model (VAM) zurückgegriffen.

Die eigentliche Modularisierung der Produktfamilie erfolgt im Anschluss an die variantengerechte Produktgestaltung. Im Gegensatz zu bestehenden Ansätzen berücksichtigt die neu entwickelte Methode differenziert die unterschiedlichen Lebensphasen eines Produkts. Dazu werden zuerst unabhängig modulare Produktstrukturen für die einzelnen Produktlebensphasen entwickelt und im Anschluss in einem Prozess über das Produktleben zusammengefasst.

Als Ausgangspunkt für die Entwicklung modularer Produktstrukturen wird im vierten Arbeitsschritt mit Hilfe der in Abschnitt 3.2.2.3 vorgestellten Heuristiken eine technisch-funktionale Modularisierung erstellt. Darauf aufbauend werden in den Arbeitsschritten 5.1 bis 5.6 die produktstrategischen Modularisierungen für die Phasen Produktentwicklung, Beschaffung, Herstellung, Vertrieb, Nutzung und Recycling/Entsorgung entwickelt. Dabei wird das in Abschnitt 3.2.2.8 vorgestellte Modultreiberkonzept zur Entwicklung der Produktstrukturen aufgegriffen. Da die Modultreiber keine ausreichende Unterstützung der Entwicklung modularer Produktstrukturen unter Berücksichtigung von produktspezifischen Gründen bieten, wird das Modultreiberkonzept in der vorliegenden Arbeit allerdings weiterentwickelt und durch Modultreiber-ausprägungen erweitert. Zusätzlich wurden die Modultreiber den unterschiedlichen Produktlebensphasen zugeordnet, um eine Entwicklung modularer Produktstrukturen aus Sicht der unterschiedlichen Produktlebensphasen zu ermöglichen (Bild 4.3). Eine detaillierte Begründung für die Zuordnung der Modultreiber zu den einzelnen Produktlebensphasen kann Anhang B entnommen werden.

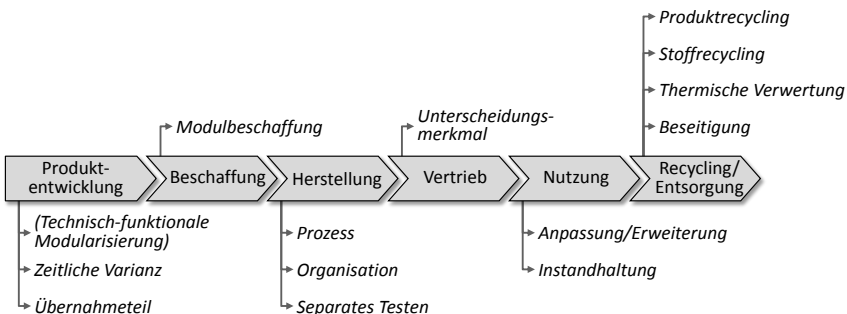


Bild 4.3: Zuordnung der Modultreiber zu den Produktlebensphasen

Im sechsten Arbeitsschritt werden die Produktstrukturen der unterschiedlichen Produktlebensphasen in einem übergreifenden Prozess zusammengefasst. Um diesen Arbeitsschritt zu unterstützen, wurde der Module Process Chart (MPC) neu entwickelt. Im MPC werden die Produktstrukturen einander gegenübergestellt, wodurch Widersprüche zwischen den Produktstrukturen offensichtlich werden. Der MPC ist somit die Grundlage für die Entwicklung von Lösungsansätzen, durch die auftretende Widersprüche überwunden werden können.

Durch das nach Produktlebensphasen differenzierte Vorgehen und die Betrachtung modularer Produktstrukturen als Prozess können zwei grundlegende Vorteile erschlossen werden. Auf der einen Seite kann sich die Produktstruktur über das Produktleben hinweg entwickeln. Beispielsweise können Module der Produktlebensphase Beschaffung von unterschiedlichen Lieferanten zugekauft werden, bevor sie in der Herstellungsphase zu einem größeren Modul zusammengefasst und einem Test unterzogen werden. In der folgenden Vertriebsphase kann das neu gebildete Modul mit weiteren Modulen zu einer Produktvariante montiert werden. Nach der Produkterstellung können wiederum einzelne Module zur Instandhaltung ausgetauscht werden und am Ende des Produktlebens kann das Altprodukt in recyclinggerechte Module zerlegt werden. Im Gegensatz zur gängigen Sichtweise, die eine modulare Produktstruktur als über das gesamte Produktleben unveränderlich auffasst, können bei einer Betrachtung als Prozess unterschiedliche Produktstrukturen in den verschiedenen Lebensphasen berücksichtigt werden. Die modulare Produktstruktur muss somit nicht einen Kompromiss über alle Produktlebensphasen bilden, sondern kann auf die Anforderungen der einzelnen Phasen ausgerichtet werden.

Auf der anderen Seite ist die differenzierte Berücksichtigung der unterschiedlichen Produktlebensphasen in der Anwendung der Methode von Vorteil. So können die Fachbereiche phasenspezifische Produktstrukturen entwickeln, die ihre Anforderungen bestmöglich erfüllen. Durch die folgende Gegenüberstellung im Module Process Chart werden Widersprüche zwischen den Produktstrukturen der unterschiedlichen Phasen leicht erkennbar dargestellt. Das Vorgehen ermöglicht daher die Entwicklung von Konfliktlösungen, was wiederum zu einer Verbesserung der Produktstrukturierung führt. Zudem wird durch die transparente Darstellung im Module Process Chart die strukturierte Bildung eines Ausgleichs zwischen den vielfältigen und teilweise widersprüchlichen Anforderungen der unterschiedlichen Fachbereiche unterstützt.

Aus der Strukturierung der Produktfamilie in den vorangegangenen Arbeitsschritten können gegebenenfalls mehrere Konzepte hervorgehen. Im siebten Schritt der Methode erfolgt daher die Bewertung und Auswahl von Konzepten. Dazu wurde ein Kennzahlensystem neu entwickelt, das die Bewertung modularer Produktstrukturen bereits in frühen Entwicklungsphasen erlaubt. Die Bewertung erfolgt differenziert anhand der

Schnittstellen zwischen den Modulen und anhand der Modultreiberausprägungen. Zur Konzeptauswahl werden die technisch-funktionale und die produktstrategische Bewertung zusammengeführt.

Abgeschlossen wird das Vorgehen durch die Ableitung der Baustruktur im achten Arbeitsschritt. Dazu werden geeignete Verbindungstechniken für die Module der Produktlebensphasen bestimmt.

Die folgende, detaillierte Erläuterung der einzelnen Arbeitsschritte wird am Beispiel einer Produktfamilie von Sprüheräten für Herbizide durchgeführt<sup>1</sup>. Ein Sprüherät aus dieser Produktfamilie ist in Bild 4.4 dargestellt. Bei dieser Bauart von Sprüheräten wird durch die Drehung des Laufrads eine Axialkolbenpumpe angetrieben, die das zu versprühende Präparat aus dem Tank zur Zerstäuberdüse fördert. Durch den Antrieb der Pumpe über das Rad wird eine wegabhängige Ausbringung des Präparats ermöglicht. Das Präparat wird von der Zerstäuberdüse versprüht, die wiederum von einem Elektromotor angetrieben wird. Der Sprühbereich wird durch einen Sprühschirm geschützt, der verhindert, dass der Sprühnebel vom Wind abgetrieben wird.

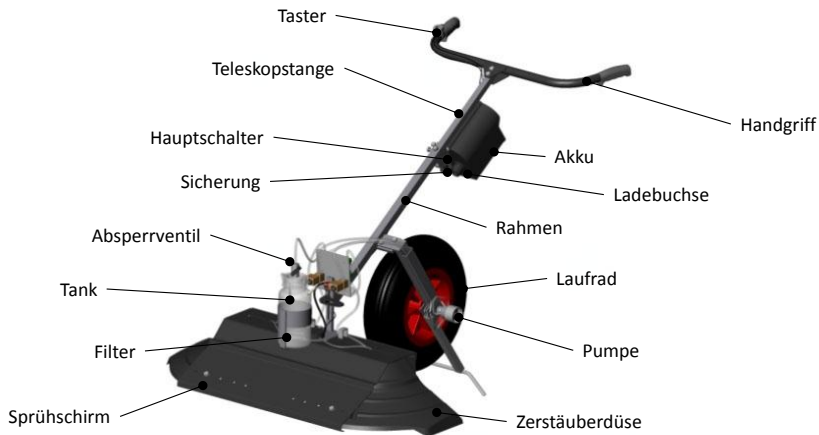


Bild 4.4: Sprüherät für Herbizide [Man09]

Aufgrund der vielfältigen Einsatzbedingungen der Sprüheräte ergeben sich vielfältige Kundenanforderungen, die durch die einzelnen Varianten der Produktfamilie abgebildet werden müssen. Unterscheidungsmerkmale zwischen den Produktvarianten sind

<sup>1</sup> Die in diesem Kapitel in abgewandelter Form dargestellte Entwicklung einer modularen Produktfamilie von Sprüheräten erfolgte im Rahmen eines von der AiF im Programm ProInno II geförderten Forschungsprojekts.

die Sprühbahnbreite, die Anordnung und Anzahl der Sprühbahnen, die flexible Anpassung des Sprühschirms, das selektive Sprühen sowie die Geländegängigkeit des Geräts. Eine Erläuterung der Unterscheidungsmerkmale kann Anhang C entnommen werden.

## 4.2 Zieldefinition

Durch die modulare Strukturierung von Produktfamilien kann eine Vielzahl von Zielen verfolgt werden. Wie bereits in Abschnitt 2.2 aufgezeigt, können beispielsweise die Parallelisierung von Entwicklungsaufgaben, die Erzielung von Skaleneffekten oder die Konfiguration von Produktvarianten Ziele sein. Da im Allgemeinen nicht alle Ziele gleichbedeutend verfolgt werden, muss zu Beginn der Entwicklung eine Klärung der vorrangig angestrebten Zielsetzungen erfolgen.

Grundsätzlich sollten alle an der Entwicklung der Produktfamilie beteiligten Fachbereiche in die Zieldefinition einbezogen werden, um ein gemeinsames, übergreifendes Verständnis sicherzustellen. Die Ziele müssen eindeutig formuliert werden und im Rahmen der Produktstrukturierung realistisch erreichbar sein. Um im Laufe der Entwicklung die Zielerreichung überprüfen zu können, sollte die Messbarkeit der festgelegten Ziele gewährleistet werden. Wenn die Entwicklung auf einer bestehenden Produktfamilie aufsetzt, können die in Abschnitt 4.8 vorgestellten Kennzahlen verwendet werden, um die Zielerreichung in Bezug auf die bestehende Produktfamilie zu bewerten.

## 4.3 Ist-Aufnahme

Im Rahmen der Ist-Aufnahme werden die für die modulare Strukturierung der Produktfamilie erforderlichen Informationen aufgenommen. Dies beinhaltet einerseits die Variantenvielfalt der Produktfamilie. Dazu werden die Unterscheidungsmerkmale sowie deren Ausprägungen aufgenommen und in einem Merkmalsbaum abgebildet. Andererseits muss aber auch die konstruktive Umsetzung der Produktfamilie erfasst werden. In Anlehnung an das konstruktionsmethodische Vorgehen nach PAHL und BEITZ [Pah07] werden die Arbeitsergebnisse der Konzept- und Entwurfsphase aufgenommen. Dies betrifft in der Konzeptphase die Funktionsstruktur und die Wirkprinzipien. Für die Entwurfsphase kann der Konstruktionsmethodik dagegen keine geeignete Darstellungsweise entnommen werden. Der Module Interface Graph (MIG) wurde daher zur Aufnahme der Komponenten sowie der Schnittstellen zwischen ihnen neu entwickelt.

### 4.3.1 Aufnahme der Unterscheidungsmerkmale

Im Rahmen der Aufnahme der Unterscheidungsmerkmale werden die varianten Merkmale erfasst, durch die sich die Varianten der Produktfamilie aus Sicht des Kunden unterscheiden. Die Entscheidung, welche Merkmale variiert werden sollen, muss bereits im Vorfeld im Rahmen der Produktprogrammplanung erfolgt sein (vgl. [Hic86]).

Die Abbildung der geplanten Varianz erfolgt in einem Merkmalsbaum (Bild 4.5). Im Merkmalsbaum wird in jeder Spalte ein Unterscheidungsmerkmal abgebildet. Der Baum fächert sich entsprechend der Ausprägungen der Merkmale auf. Somit stellt jeder Zweig des Baums eine Produktvariante dar. Es werden allerdings nur Produktvarianten in den Baum aufgenommen, die am Markt angeboten werden sollen. „Tote Äste“ können durch gestrichelte Pfeile angedeutet werden. Gegenüber einer tabellarischen Abbildung bietet eine Baumstruktur den Vorteil einer intuitiv erfassbaren Darstellung, bei der sich die Variantenvielfalt direkt in der Breite des Baums widerspiegelt.

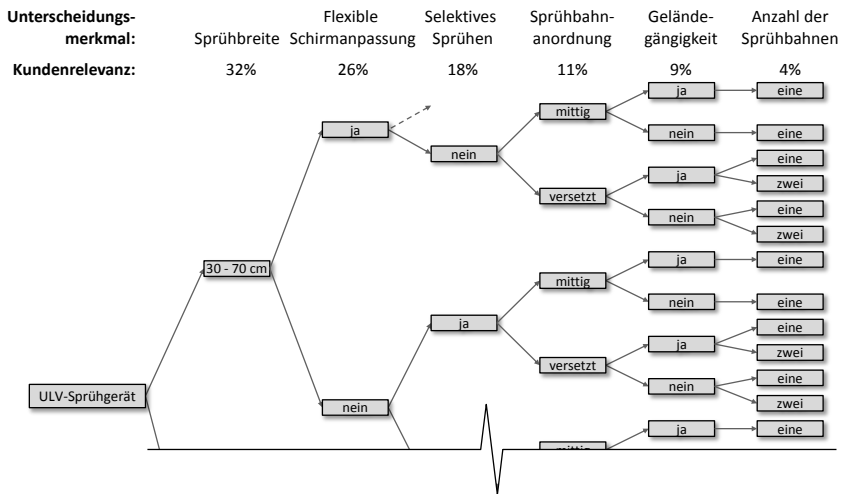


Bild 4.5: Merkmalsbaum der Produktfamilie von Sprühgeräten (Ausschnitt)

Um im Merkmalsbaum den Entscheidungsprozess des Kunden abzubilden, werden die Unterscheidungsmerkmale absteigend nach ihrer Relevanz aus Sicht des Kunden geordnet. Die Bewertung der Kundenrelevanz kann durch Vertreter des Marketings und Vertriebs vorgenommen werden oder kann direkt in einer Kundenbefragung erfolgen.

### 4.3.2 Aufnahme der Funktionsstruktur

In einer Funktionsstruktur werden die von einem Produkt zu erfüllende Teilfunktionen zu einer Gesamtfunktion verknüpft. Während in hierarchischen Funktionsstrukturen

die Teilfunktionen in einer Baumstruktur geordnet werden, verknüpfen umsatzorientierte Funktionsstrukturen die Teilfunktionen über Energie-, Stoff- oder Informationsflüsse. Da für die Bildung von Modulen die Beziehungen zwischen den Teilfunktionen entscheidend sind, wird für die Entwicklung modularer Produktfamilien eine umsatzorientierte Funktionsstruktur erstellt.

Für die Abbildung der Funktionsstruktur wird die im Anhang D erläuterte, formalisierte Beschreibung über Zustände, Relationen und Operationen verwendet. Im Gegensatz zu der bekannten Beschreibung muss für die Entwicklung von Produktfamilien allerdings nicht nur eine Produktvariante, sondern die gesamte Produktfamilie abgebildet werden können. Es werden daher alle in der Produktfamilie vorhandenen Funktionen in die Funktionsstruktur aufgenommen. Zusätzlich wird die Varianz der Funktionen abgebildet. Dabei werden drei Arten der Varianz unterschieden und in der Funktionsstruktur differenziert dargestellt:

- Funktionen, die in mehreren Ausprägungen vorliegen, werden durch eine Hinterlegung des Operators gekennzeichnet (Bild 4.6 b).
- Bei optionalen Funktionen wird der Operator von einer gestrichelten Linie umrandet (Bild 4.6 c).
- In unterschiedlicher Anzahl auftretende Funktionen werden durch eine gestrichelt umrandete Hinterlegung des Operators gekennzeichnet (Bild 4.6 d).

In Bild 4.6 sind die Darstellungsformen für Funktionen in Produktfamilien zusammengefasst.

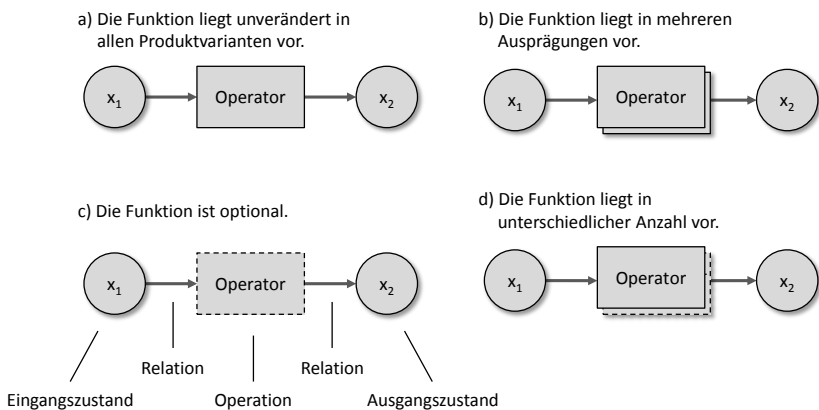


Bild 4.6: Abbildung der Varianz in der Funktionsstruktur

Als Beispiel für die funktionale Beschreibung einer Produktfamilie zeigt Bild 4.7 einen Ausschnitt der umsatzorientierten Funktionsstruktur für die Produktfamilie der Sprühgeräte. Durch die Funktionen *Elektrische Energie schalten* und *Mechanische Energie schalten* wird dem Anwender die Möglichkeit gegeben, das Herbizid selektiv auszubringen. Da diese Funktionen nur optional verfügbar sind, werden sie in der Funktionsstruktur von einer gestrichelten Linie umrandet dargestellt.

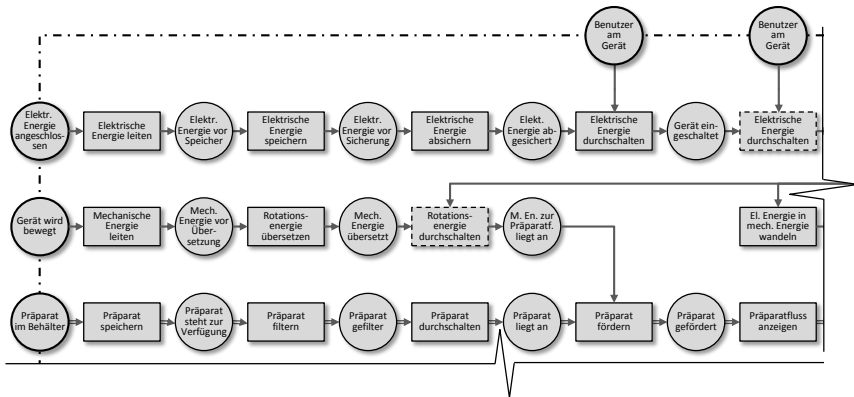


Bild 4.7: Umsatzorientierte Funktionsstruktur des Sprühgeräts (Ausschnitt)

### 4.3.3 Aufnahme der Wirkprinzipien

Zur Umsetzung der Teilfunktionen werden im Verlauf der Produktentwicklung Wirkprinzipien entwickelt und zu einer Wirkstruktur verknüpft. Die Wirkprinzipien bestehen aus den zur Erfüllung der Funktionen erforderlichen physikalischen Effekten sowie geometrischen und stofflichen Merkmalen. Im Gegensatz zu Funktionsstrukturen bietet die Konstruktionsmethodik für Wirkprinzipien keine formalisierte Darstellungsweise, sondern verwendet allgemeingültig Prinzipskizzen.

Wie bereits in der Funktionsstruktur muss auch auf der Ebene der Wirkprinzipien die Varianz aufgenommen werden. Dabei können Wirkprinzipien vollständig oder teilweise variant sein. Vollständig variante Wirkprinzipien sind beispielsweise optional oder beruhen auf unterschiedlichen physikalischen Effekten (Bild 4.8 a). Dagegen sind bei teilweise varianten Prinzipien nur einzelne Wirkflächen, die Wirkbewegung oder der Werkstoff variant. In diesem Fall wird nur das variante Wirkelement in der Prinzipskizze hervorgehoben (Bild 4.8 b).

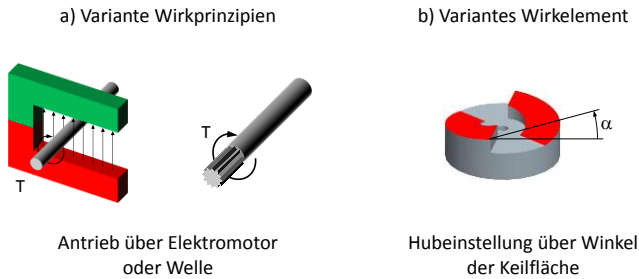


Bild 4.8: Darstellung von varianten Wirkprinzipien und -elementen

#### 4.3.4 Aufnahme der Komponenten im Module Interface Graph

Für die Aufnahme und Abbildung der Komponenten wurde der Module Interface Graph (MIG) neu entwickelt. Beim MIG handelt es sich um eine schematische Abbildung der Komponenten mitsamt den erforderlichen strukturellen Verbindungen sowie den zwischen ihnen verlaufenden Leistungs-, Stoff- und Informationsflüssen. Die Komponenten werden in ihrer ungefähren Größe, Lage und Form in den MIG eingezeichnet und durch die Flüsse verbunden. Durch die skizzenhafte Abbildung wird ein einfacher Überblick über die Schnittstellen zwischen den Komponenten gegeben und es wird sichergestellt, dass bei der Bildung von Modulen Randbedingungen bezüglich der Lage von Komponenten berücksichtigt werden können [Ble08a]. Der MIG berücksichtigt damit die Einbeziehung eines entscheidenden Einflussfaktors, der in Methoden, die Produktstrukturen in Matrizen abbilden, nur unzureichend unterstützt wird.

Damit durch den Module Interface Graph eine Produktfamilie mit sämtlichen Produktvarianten abgebildet werden kann, müssen alle in der Produktfamilie vorhandenen Komponenten und Flüsse aufgenommen werden. Komponenten werden dabei als grau eingefärbte Formen dargestellt. Die Art und Größe der Formen richtet sich nach den Komponenten. Sie werden in ungefähre Entsprechung ihrer Lage im Produkt in den MIG eingezeichnet.

Wie bereits die Funktionen und Wirkprinzipien werden auch die Komponenten entsprechend ihrer Varianz differenziert abgebildet. Während Standardkomponenten mit einer durchgezogenen Umrandungslinie (Bild 4.9 a) dargestellt werden, sind variante Komponenten durch eine Hinterlegung gekennzeichnet (Bild 4.9 b). Darüber hinaus werden optionale und in varianter Anzahl vorliegende Komponenten mit gestrichelten Umrandungslinien dargestellt. Bei optionalen Komponenten ist die Form selbst gestrichelt umrandet (Bild 4.9 c), während bei Komponenten, die in unterschiedlicher Anzahl in einer Produktvariante auftreten, die Hinterlegung gestrichelt umrandet ist (Bild 4.9 d).

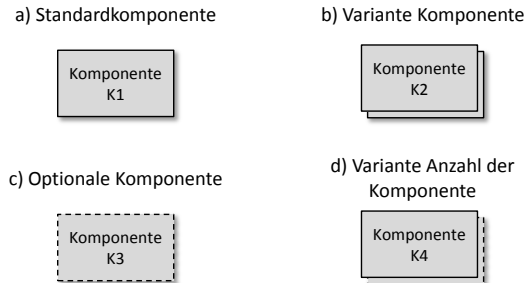


Bild 4.9: Darstellung von Komponenten im Module Interface Graph (*K: Komponente*)

Einen Überblick über die Darstellung von Flüssen gibt Bild 4.10. Flüsse können ungerichtet, gerichtet oder wechselerichtet sein. Ungerichtete Flüsse bilden insbesondere strukturelle Verbindungen ab. Aufgrund von Kräfte- oder Momentengleichgewichten kann bei Strukturverbindungen keine eindeutige Flussrichtung angegeben werden. Strukturverbindungen werden zu Beginn allerdings nur in den MIG eingezeichnet, wenn die Anbindung der entsprechenden Komponente eindeutig vorgegeben ist. Dies stellt sicher, dass konstruktive Freiheitsgrade bewahrt bleiben. Leistungs-, Stoff- oder Informationsflüsse haben dagegen eine eindeutige Flussrichtung und werden dementsprechend als gerichteter Fluss in den MIG eingetragen. Sollte sich die Flussrichtung entsprechend unterschiedlicher Betriebszustände ändern, wird ein wechselerichteter Fluss eingezeichnet.

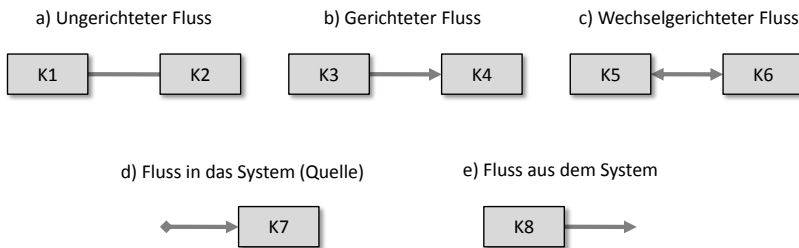


Bild 4.10: Darstellung von Flüssen im Module Interface Graph (*K: Komponente*)

Neben Flüssen zwischen Komponenten des betrachteten Systems können Flüsse auch in das System ein- oder austreten. Flüsse in das System werden mit einer als Raute dargestellten Quelle gekennzeichnet, während Flüsse aus dem System durch einen austretenden Pfeil dargestellt werden.

In Bild 4.11 ist das Sprühergerät in einem Module Interface Graph dargestellt. Neben den erforderlichen Strukturverbindungen sind die Flüsse elektrische und mechanische Leistung und der Präparatfluss eingezeichnet. Die elektrische Leistung läuft von den

Komponenten Ladebuchse, Akku, Sicherung und Hauptschalter weiter über den Taster bis hin zur Magnetkupplung sowie zum Elektromotor. Dabei handelt es sich beim Taster sowie bei der Magnetkupplung um optionale Komponenten, die zur Umsetzung des optionalen Merkmals *Selektives Sprühen* eingesetzt werden. Die erforderliche mechanische Leistung wird vom Laufrad abgenommen und treibt über Welle, Pumpengetriebe und Magnetkupplung die Pumpe an. Durch die optionale Magnetkupplung kann der mechanische Leistungsfluss zum selektiven Sprühen geschaltet werden. Dabei werden die Magnetkupplung und der Elektromotor über den Taster aktiviert. Das Präparat selbst wird von der Pumpe aus dem Tank und über Filter und Absperrventil angesaugt und über die Durchflusskontrolle zur Zerstäuberdüse gefördert.

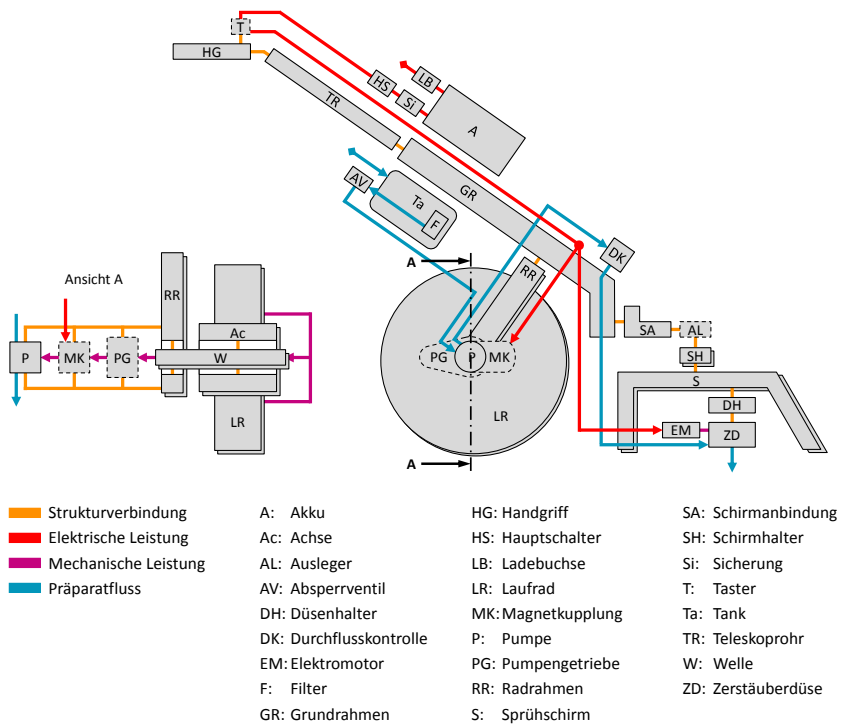


Bild 4.11: Abbildung des Sprühgeräts im Module Interface Graph nach [Ble10]

Neben der räumlichen Anordnung der Komponenten und der Flüsse zwischen ihnen sind die Kosten der Komponenten ein bedeutender Einflussfaktor. Insbesondere für die variantengerechte Produktgestaltung sind die Kosten entscheidend, da Maßnahmen zur Umgestaltung bevorzugt auf Komponenten mit hohen anteiligen Kosten konzentriert werden. Neben der Abbildung im MIG wird daher eine Klassifizierung der

Komponenten in Kostenklassen vorgenommen. Dazu wird eine ABC-Analyse durchgeführt, in der die Komponenten in drei Kostenklassen einordnet werden:

- Komponenten mit einem Anteil von 80 % an den Gesamtkosten des Produkts bilden die Klasse A.
- Die Klasse B wird von Komponenten mit einem Anteil von 15 % an den Gesamtkosten gebildet.
- Komponenten mit einem Kostenanteil von 5 % bilden die Klasse C.

In Tabelle 4.1 ist ein Ausschnitt der ABC-Analyse für die Komponenten der Sprühgeräte dargestellt. Die Analyse stützt sich auf die Kosten der Komponenten des Vorgängermodells. Um eine intuitive Darstellung der Kostenklassen zu ermöglichen, werden diese durch €-Symbole gekennzeichnet (A-Komponenten: €€€, B-Komponenten: €€, C-Komponenten: €).

Tabelle 4.1: Einordnung der Komponenten in Kostenklassen

Komponente	Kostenklasse
Akku	€€€
Achse	€
Ausleger	€€
Absperrventil	€
Düsenhalter	€
Durchflusskontrolle	€
Elektromotor	€€

#### 4.4 Variantengerechte Produktgestaltung

Vor der eigentlichen Modularisierung der Produktfamilie erfolgt die variantengerechte Gestaltung der Komponenten nach KIPP [Kip11]. Die variantengerechte Produktgestaltung strebt grundsätzlich an,

- Komponenten in Standardkomponenten und variante Komponenten zu differenzieren,
- variante Komponenten zum Träger des Unterscheidungsmerkmals zu reduzieren,
- eine Eins-zu-eins-Zuordnung zwischen Unterscheidungsmerkmalen und Komponenten sicherzustellen und

- variante Komponenten weitgehend zu entkoppeln.

Bei Erfüllung dieser Kriterien sind die Komponenten eines Produkts in einer Weise gestaltet, die eine Erzeugung einer großen externen Vielfalt auf Grundlage einer kleinen internen Vielfalt ermöglicht [Kip08].

Bei der Annäherung der Komponenten an den Idealzustand, der in den vier Kriterien aufzeigt wird, dient das von KIPP entwickelte *Variety Allocation Model (VAM)* als unterstützende Visualisierung. Im VAM wird die Variantenvielfalt auf den Abstraktionsebenen der Entwicklungs- und Konstruktionsmethodik abgebildet und in einen kausalen Zusammenhang gebracht. Wie in Bild 4.12 zu sehen, umfasst das VAM die Ebenen der Unterscheidungsmerkmale, der Funktionen, der Wirkprinzipien sowie der Komponenten. Zugunsten einer einfachen Übersichtlichkeit werden nur variante Elemente in das Modell aufgenommen. Das VAM wird daher bei einer variantengerechten Gestaltung der Produktfamilie zunehmend einfacher und kompakter und zeigt somit eine Annäherung an den Idealzustand qualitativ auf.

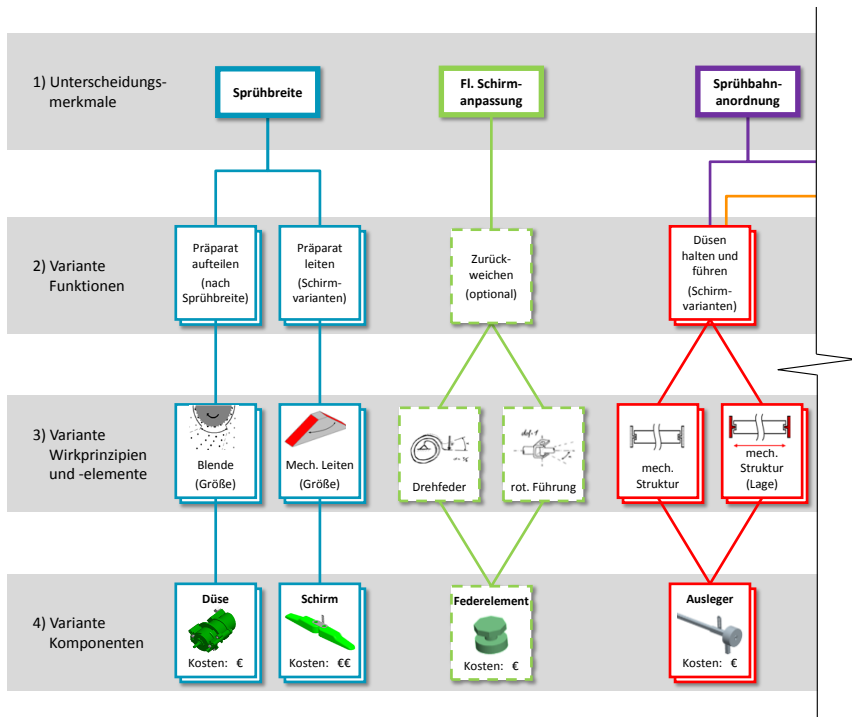


Bild 4.12: Variety Allocation Model in Anlehnung an [Kip11] (Ausschnitt)

Im VAM werden Beziehungen zwischen Unterscheidungsmerkmalen, Funktionen, Wirkprinzipien und Komponenten durch Verbindungslinien dargestellt. Dabei werden die Verbindungslinien sowie die Umrandungen der Elemente in der Farbe des Unterscheidungsmerkmals dargestellt, das ihre Varianz verursacht. Sollte ein Element unterschiedlichen Unterscheidungsmerkmalen zugeordnet sein, wird das Element rot umrandet.

In der Lösungssuche zur variantengerechten Produktgestaltung dient das VAM vornehmlich zur Identifikation von Handlungsschwerpunkten. Ziel ist eine eindeutige Zuordnung von Unterscheidungsmerkmalen und Komponenten. Dabei werden Lösungen auf allen Abstraktionsebenen gesucht, wobei das Modell ausgehend von den Komponenten über die Wirkprinzipien und Funktionen bis hin zu den Unterscheidungsmerkmalen der Produktfamilie durchlaufen wird.

Im Folgenden werden die gängigen Strategien zur Lösungssuche auf allen vier Ebenen vorgestellt. Weitergehende Erläuterungen und Beispiele für die Anwendung der variantengerechten Produktgestaltung auf das Sprühgerät können [Kip11] entnommen werden.

#### **4.4.1 Lösungssuche auf Ebene der Komponenten**

Auf der Ebene der Komponenten kann technische Varianz vermieden werden und variante Komponenten können zerlegt oder integriert werden.

Technische Varianz liegt dann vor, wenn eine variante Komponente im VAM keine Verbindung zu einem der Unterscheidungsmerkmale hat. Die Komponente trägt somit nicht zur Produktdifferenzierung aus Sicht des Kunden bei und sollte daher standardisiert werden.

Die Zerlegung einer Komponente wird vorgenommen, wenn die Komponente hohe anteilige Kosten aufweist, nur zu einem geringen Teil variant ist oder nicht eindeutig einem Unterscheidungsmerkmal zuzuordnen ist. Durch die Zerlegung kann die Auswirkung der Varianz begrenzt werden oder eine eindeutige Zuordnung zu einem Unterscheidungsmerkmal sichergestellt werden.

Komponenten werden dagegen integriert, wenn diese einem gemeinsamen Unterscheidungsmerkmal zugeordnet sind. Durch dieses Vorgehen kann die Zuordnung zu dem entsprechenden Unterscheidungsmerkmal verbessert werden.

#### **4.4.2 Lösungssuche auf Ebene der Wirkprinzipien und -elemente**

Der Beitrag der Ebene der Wirkprinzipien liegt im Wesentlichen in einer Reduzierung der Kosten der varianten Komponenten. Ausgangspunkt für die Suche nach Verbesserungsansätzen sind daher Wirkprinzipien mit Beziehung zu einer Komponente mit

hohen anteiligen Kosten. Für entsprechende Wirkprinzipien können drei Strategien verfolgt werden.

Die erste Strategie wird verfolgt, wenn die Ausprägungen eines Unterscheidungsmerkmals die Anwendung unterschiedlicher Wirkprinzipien zur Folge haben. In diesem Fall ist nach einem einheitlichen Wirkprinzip zu suchen, das die Varianz auf einzelne Wirkelemente begrenzt. Als zweite Strategie können alternative Wirkprinzipien gesucht werden, die eine Abbildung der Varianz mit wenigen, einfachen oder kostengünstig zu realisierenden Wirkelementen ermöglichen. Die letzte Strategie zielt auf die Verwendung von mechatronischen Wirkprinzipien, um physische Varianz in Softwareanteile zu verlagern. Diese Strategie erscheint besonders zielführend, wenn das Produkt bereits mechatronische Lösungen aufweist.

#### **4.4.3 Lösungssuche auf Ebene der Funktionen**

Auf Ebene der Funktionen wird eine Eins-zu-eins-Zuordnung zwischen den Unterscheidungsmerkmalen der Produktfamilie und den varianten Funktionen angestrebt. Um sich diesem Ideal anzunähern, werden wiederum drei Strategien verfolgt.

Entsprechend der ersten Strategie wird eine Verlagerung der Variantenbildung auf eine Funktion angestrebt, die im Stoff-, Energie- oder Informationsumsatz erst spät angeordnet ist. So kann vermieden werden, dass infolge eines varianten Umsatzes alle nachstehenden Funktionen von der Varianz betroffen sind.

Entgegen der Verlagerung der Variantenbildung auf eine späte Funktion strebt die zweite Strategie die frühestmögliche Standardisierung eines varianten Umsatzes an. Um dies zu ermöglichen, kann eine bestehende Funktion angepasst oder eine zusätzliche Funktion zur Standardisierung eingesetzt werden. Beispielsweise kann durch ein externes Netzteil verhindert werden, dass die nachfolgenden Funktionen aufgrund verschiedener Betriebsspannungen unterschiedlich ausgeprägt werden müssen.

Die dritte Strategie zur Lösungssuche auf Ebene der Funktionen strebt eine Entkopplung von Funktionen mit varianten Umsätzen an. Im Allgemeinen können variante Umsätze dazu führen, dass weitere, von diesem Umsatz betroffene Funktionen ebenfalls variant ausgelegt werden müssen. Dem kann durch die Entkopplung der Funktionen entgegengewirkt werden.

#### **4.4.4 Lösungssuche auf Ebene der Unterscheidungsmerkmale**

Durch die Unterscheidungsmerkmale wird die Vielfalt einer Produktfamilie am Markt abgebildet. Die variantengerechte Produktgestaltung soll die externe Vielfalt grundsätzlich nicht einschränken. Im Rahmen der variantengerechten Gestaltung wird daher eine Beibehaltung der Unterscheidungsmerkmale angestrebt. Wenn die Ausprägungen

der Unterscheidungsmerkmale in einer Stufung vorliegt, die den Kundenanforderungen nicht gerecht wird, ist allerdings die Entwicklung einer geeigneten Größenstufung erforderlich. Dies kann mit Hilfe von geometrischen Reihen erfolgen, durch die manuelle Festlegung anhand von Marktbedürfnissen oder mittels einer numerischen Optimierung. Eine detaillierte Gegenüberstellung dieser Ansätze kann KIPP [Kip09] entnommen werden.

Zusammenfassend wird die Produktfamilie durch die variantengerechte Produktgestaltung derart umgestaltet, dass eine einfache Abbildung der Varianz sichergestellt werden kann. Durch die eindeutige Zuordnung von Unterscheidungsmerkmalen wird die Grundlage für die Entwicklung einer Produktstruktur gelegt, die eine einfache Konfiguration von Produktvarianten erlaubt. Beispielsweise konnte KIPP in seiner Arbeit die Auswirkung des Unterscheidungsmerkmals *Geländegängigkeit* auf die Komponenten des Sprüheräts deutlich begrenzen [Kip11]. Durch die variantengerechte Gestaltung konnte beispielsweise vermieden werden, dass der große Laufraddurchmesser bei geländegängigen Varianten des Sprüheräts unterschiedliche Ausführungen des Grundrahmens bedingt. Erst durch die Umgestaltung wird die in Abschnitt 4.6.6 vorgestellte Bildung eines kompakten Moduls ermöglicht, das eine einfache Konfiguration von geländegängigen Produktvarianten erlaubt.

## 4.5 Technisch-funktionale Modularisierung

Die technisch-funktionale Modularisierung bildet den ersten Arbeitsschritt zur Entwicklung einer modularen Produktstruktur. Ziel ist Bildung von Modulen, die weitgehend voneinander entkoppelt sind. Insbesondere aus Sicht der Produktentwicklung ist eine technisch-funktionale Entkopplung von Modulen vorteilhaft. Sie erlaubt eine Reduzierung der Komplexität der Entwicklungsaufgabe, verringert den Koordinationsaufwand und ermöglicht eine unabhängige und parallele Entwicklung von Modulen. Darüber hinaus sind technisch-funktional entkoppelte Module auch in den nachfolgenden Produktlebensphasen von Vorteil. Beispielsweise sinkt der Koordinationsaufwand von Zulieferern in der Beschaffung, in der Herstellung reduziert sich die Anzahl der zu montierenden Schnittstellen und die Wartung wird durch die geringere Anzahl der Schnittstellen zwischen den Modulen vereinfacht. Die technisch-funktionale Modularisierung ist daher nicht nur für die Produktentwicklung entscheidend, sondern bildet auch die Grundlage für die Produktstrukturen der nachfolgenden Phasen.

Zur Entwicklung der technisch-funktionalen Modularisierung wird auf die von STONE entwickelten Heuristiken *Dominanter Fluss*, *Verzweigung* und *Umwandlung und Übertragung* zurückgegriffen. Die bereits in Abschnitt 3.2.2.3 vorgestellten Heuristiken bieten den Vorteil, leicht anwendbar und gut nachvollziehbar zu sein. Dies steigert die

Akzeptanz der Ergebnisse und ermöglicht dem Anwender eine gezielte Einflussnahme auf das Ergebnis (vgl. 3.4). Darüber hinaus kann das Vorgehen in frühen, aber auch in späteren Entwicklungsphasen eingesetzt werden. So bietet sich bei einer Neuentwicklung die Möglichkeit, bereits in einer frühen Phase der Entwicklung Module auf Grundlage einer Funktionsstruktur zu bilden. Die Entwicklungsaufgabe kann somit bereits früh strukturiert werden, bevor zu einem späteren Zeitpunkt und auf einem höheren Informationsniveau die produktstrategische Modularisierung durchgeführt und mit den technisch-funktionalen Anforderungen abgeglichen wird. Im Fall einer Anpasskonstruktion und somit auf einem per se höheren Informationsniveau können die Heuristiken dagegen auf den Module Interface Graph angewendet werden. Da die Anwendung der Heuristiken auf den MIG neu entwickelt wurde, wird dieser Anwendungsfall für die folgende Erläuterung verwendet.

#### 4.5.1 Bewertung der Flüsse

Für die Anwendung der Heuristiken ist es erforderlich, die Flüsse in eine Rangfolge zu bringen. Dabei wird zwischen einem Hauptsatz und den Nebensätzen unterschieden. Der Hauptsatz bestimmt sich aus der Gesamtfunktion des Systems. Im Fall des Sprüngeräts bildet das Präparat den Hauptsatz. Weitere Flüsse werden als Nebensätze mit abnehmender Relevanz für die Erfüllung der Gesamtfunktion geordnet. Eine entsprechende Rangfolge kann beispielsweise in einem paarweisen Vergleich ermittelt werden. In Tabelle 4.2 ist die ermittelte Rangfolge der Umsätze des Sprüngeräts dargestellt.

Tabelle 4.2: Rangfolge der Umsätze des Sprüngeräts

Relevanz	Umsatz
Hauptfluss	Präparat
1. Nebenfluss	Mechanische Leistung
2. Nebenfluss	Elektrische Leistung
3. Nebenfluss	Haltekraft

#### 4.5.2 Anwendung der Heuristiken

In der Funktionsstruktur oder im MIG werden die Module anhand der bereits in Abschnitt 3.2.2.3 vorgestellten Heuristiken identifiziert. Im ersten Schritt wird die Heuristik *Dominanter Fluss* angewendet. Aufgrund dieser Heuristik werden Funktionen oder Komponenten zu Modulen zusammengefasst, die von einem gemeinsamen Fluss durchflossen werden. Das Modul endet, wenn der Fluss aus dem System austritt oder die Flussart umgewandelt wird. Dabei werden die Flüsse entsprechend der zuvor er-

stellten Rangfolge priorisiert. In Bild 4.13 werden die Komponenten Tank, Filter, Absperrventil, Pumpe, Durchflusskontrolle und Zerstäuberdüse aufgrund des dominanten Flusses *Präparat* zu einem Modul zusammengefasst.

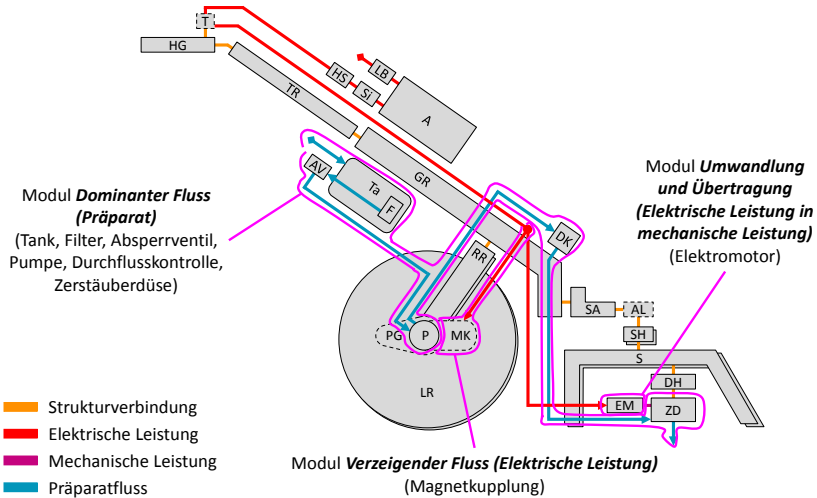


Bild 4.13: Anwendung der Heuristiken auf den MIG des Sprüheräts

Als zweiter Schritt wird die Heuristik *Verzweigung* angewendet. Im Sinne dieser Heuristik werden parallele Funktions- oder Komponentenketten zu Modulen zusammengefasst. In Bild 4.13 wird diese Heuristik auf die Magnetkupplung angewendet, da diese im verzweigenden Fluss der elektrischen Leistung liegt.

Durch die verbleibende Heuristik *Umwandlung und Übertragung* werden Module aus Funktionen oder Komponenten gebildet, die einen Fluss umwandeln. Wie in Bild 4.13 dargestellt, bildet der Elektromotor aufgrund dieser Heuristik ein Modul. Der Elektromotor wandelt elektrische Leistung in mechanische Leistung um.

Bei der Modulbildung kann es zu Überschneidungen von Heuristiken kommen. Beispielsweise bildet die Magnetkupplung im Sinne der Heuristik *Verzweigung* ein eigenes Modul, obwohl sie aufgrund der Umwandlung von elektrischer in mechanischer Leistung auch der Heuristik *Umwandlung* unterliegt. Sollte aus unterschiedlichen Heuristiken eine abweichende Modulaufteilung erfolgen, muss in Abhängigkeit vom vorliegenden Fall eine Aufteilung priorisiert werden, oder es müssen beide Konzepte alternativ weiterverfolgt werden. Darüber hinaus muss ein besonderes Augenmerk auf Komponenten gelegt werden, die ausgeprägte Beziehungen zu einem Modul haben, diesem durch die Heuristiken allerdings nicht zugeordnet wurden. Beispielsweise werden die Komponenten Laufrad, Welle und Pumpengetriebe aufgrund des Flusses *Mechanische*

*Leistung* zu einem Modul zusammengefasst. Da die Komponenten des Moduls in enger Wechselwirkung mit dem Radrahmen und der Achse stehen, werden diese Komponenten ebenfalls in das Modul einbezogen. Es muss daher festgehalten werden, dass die Heuristiken Ansätze für die Bildung von Modulen liefern, diese aber unter Berücksichtigung des Anwendungsfalls kritisch hinterfragt und gegebenenfalls überarbeitet werden müssen.

### 4.5.3 Abgleich mit räumlich-geometrischen Anforderungen

Abschließend werden die gebildeten Module mit räumlich-geometrischen Anforderungen abgeglichen. Ziel ist die Betrachtung, ob infolge von Randbedingungen ein Auftrennen der Module in mehrere Submodule erforderlich ist. Dabei ist die Berücksichtigung der Schnittstellen ein grundlegender Bestandteil des Arbeitsschritts. Das Auftrennen der Module sollte derart erfolgen, dass Schnittstellen zwischen Modulen minimiert werden.

Als Grundlage für diesen Arbeitsschritt dient wiederum der MIG. Berücksichtigt man beispielsweise die Anordnung der Komponenten im zuvor in Bild 4.13 dargestellten MIG, wird aufgrund der räumlichen Randbedingungen eine Aufteilung des Moduls Präparatfluss in vier Submodule (Modul Tank/Filter/Absperrventil, Modul Pumpe, Modul Durchflusskontrolle und Modul Zerstäuberdüse) erforderlich. Um die Anzahl der Submodule und damit auch die Schnittstellen zwischen den Modulen zu reduzieren, werden die Komponenten Pumpe und Durchflusskontrolle konstruktiv verlegt (Bild 4.14). Die Pumpe wird am Grundrahmen angeordnet und über eine Welle angetrieben. Die Durchflusskontrolle wird dagegen auf den Sprühschirm verlegt. Dadurch können ein oberes und ein unteres Präparatfluss-Modul gebildet werden, wobei der Sprühschirm aufgrund der räumlichen Anordnung ebenfalls in das untere Modul einbezogen wird.

## 4.6 Produktstrategische Modularisierung

Die produktstrategische Modularisierung erfolgt unabhängig für die Produktlebensphasen Entwicklung, Beschaffung, Herstellung, Vertrieb, Nutzung und Recycling/Entsorgung. Für die Bildung von Modulen wird das von ERIXON entwickelte Modultreiberkonzept aufgegriffen und weiterentwickelt. Wie in Abschnitt 3.2.2.8 aufgezeigt wurde, sind die Modultreiber produktstrategische Gründe für die Bildung von Modulen.

Im Folgenden wird zuerst auf die Weiterentwicklung des Modultreiberkonzepts eingegangen, bevor das Vorgehen zur Produktstrukturierung grundsätzlich sowie schrittweise am Beispiel der unterschiedlichen Produktlebensphasen vorgestellt wird.

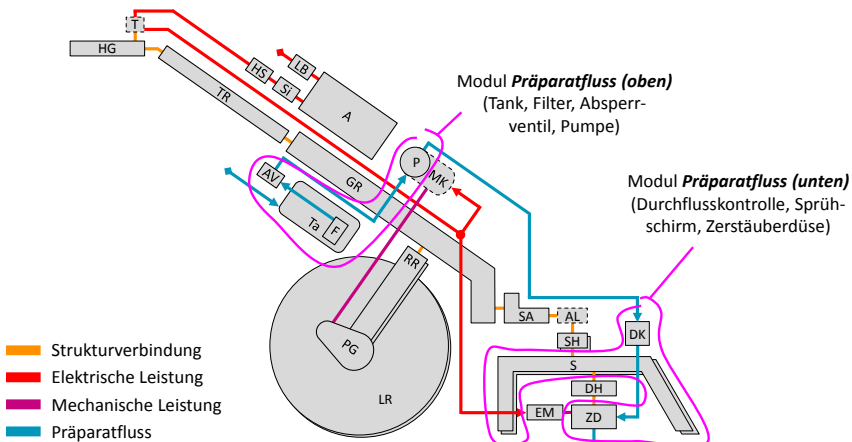


Bild 4.14: Aufteilung des Moduls Präparatfluss

#### 4.6.1 Weiterentwicklung des Modultreiberkonzepts

Die in dieser Arbeit verwendeten Modultreiber sind in Tabelle 4.3 zusammengefasst. Wie bereits in Abschnitt 4.1 erläutert wurde, sind die Modultreiber den unterschiedlichen Produktlebensphasen zugeordnet und bilden somit jeweils die Sicht einer Phase ab. Allerdings muss berücksichtigt werden, dass im Allgemeinen nicht alle Modultreiber verwendet werden und unter Umständen auch zusätzliche Modultreiber definiert werden müssen.

Vorteile des Modultreiberkonzepts sind die einfache Anpassbarkeit auf unterschiedliche Anwendungsfälle und das leicht nachvollziehbare Vorgehen zur Entwicklung von Modulen (vgl. Abschnitt 3.4). Als entscheidender Nachteil muss allerdings gesehen werden, dass die Gründe für die Bildung von Modulen durch die Modultreiber nicht ausreichend detailliert erfasst werden. So erfolgt in den Modultreibern keine differenzierte Berücksichtigung produktspezifischer Gründe für die Bildung von Modulen. Beispielsweise verweist der Modultreiber *Unterscheidungsmerkmal*<sup>1</sup> pauschal auf Komponenten, die von den varianten Merkmalen einer Produktfamilie betroffen sind. Allerdings kann erst durch die eindeutige Zuordnung von Unterscheidungsmerkmalen und Modulen eine Produktstruktur gebildet werden, die eine Konfiguration von Produktvarianten erlaubt. Aus diesem Grund ist die differenzierte Berücksichtigung der Unterscheidungsmerkmale bei der Entwicklung modularer Produktfamilien zwingend erforderlich.

<sup>1</sup> Der Modultreiber *Unterscheidungsmerkmal* entspricht den Modultreibern *Technical Specification* und *Styling* in Abschnitt 3.2.2.8.

Tabelle 4.3: Zusammenstellung der verwendeten Modultreiber

<b>Produktentwicklung</b>	
Zeitliche Varianz	Das Design oder die technische Spezifikation des Moduls unterliegen einer geplanten Änderung oder werden von einem Technologiewechsel betroffen sein.
Übernahmeteil	Das Modul soll aus der vorangegangenen Produktgeneration übernommen werden oder in der nachfolgenden Produktgeneration beibehalten werden.
<b>Beschaffung</b>	
Modulbeschaffung	Das Modul soll aus betriebswirtschaftlichen, technischen oder strategischen Gründen fremdbezogen werden.
<b>Herstellung</b>	
Prozess	Das Modul unterliegt speziellen Fertigungs- oder Montageprozessen.
Organisation	Das Modul bildet einen geeigneten Arbeitsumfang für eine Organisationseinheit.
Separates Testen	Das Modul soll vor der Endmontage separat geprüft werden.
<b>Vertrieb</b>	
Unterscheidungsmerkmal	Das Modul bildet ein Unterscheidungsmerkmal der Produktfamilie ab.
<b>Nutzung</b>	
Anpassung/Erweiterung	Zur Anpassung oder Erweiterung des Produkts muss das Modul für den Nutzer austauschbar sein.
Instandhaltung	Das Modul muss für Wartungs-, Instandsetzungs- oder Inspektionsmaßnahmen demontierbar sein.
<b>Recycling/Entsorgung</b>	
Produktrecycling	Das Modul soll unter Beibehaltung der Gestalt in ein neues Gebrauchsstadium übernommen werden.
Stoffrecycling	Das Modul soll in einen neuen Produktionsprozess rückgeführt werden.
Thermische Verwertung	Das Modul soll thermisch verwertet werden.
Beseitigung	Das Modul muss beseitigt werden.

Aufgrund der vorangegangenen Betrachtung wird das Modultreiberkonzept in der vorliegenden Arbeit weiterentwickelt. Daraus ergibt sich eine dreistufige Aufteilung des Konzepts (Bild 4.15). Die oberste Stufe wird von den Produktlebensphasen gebildet, denen die Modultreiber auf mittlerer Stufe zugeordnet sind. Auf unterster Stufe werden die Modultreiber durch *Modultreiberausprägungen* erweitert. Die Ausprägungen werden für den jeweiligen Anwendungsfall aufgenommen und ermöglichen eine produktspezifische Differenzierung des Modultreibers. Beispielsweise bilden die varianten Merkmale einer Produktfamilie die Ausprägungen des Modultreibers *Unterscheidungsmerkmal*. Im Fall des Sprühgeräts sind dies unter anderem die *Geländegängigkeit*, das *selektive Sprühen* oder die *Sprühbahnanordnung*. Durch Zusammenfassen der Komponenten, die in Beziehung zu einer der Ausprägungen stehen, können Module gebildet werden, die eindeutig einem varianten Merkmal zugeordnet sind und die somit eine Konfiguration von Produktvarianten ermöglichen.

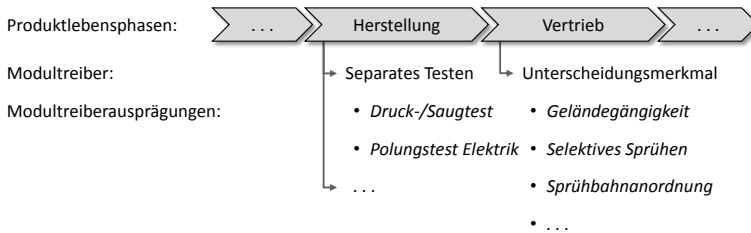


Bild 4.15: Produktlebensphasen, Modultreiber und Modultreiberausprägungen

Die Weiterentwicklung des Modultreiberkonzepts ist allerdings nicht nur für die Konfiguration von Produktvarianten erforderlich, sondern unterstützt die Entwicklung von Modulen in allen Produktlebensphasen maßgeblich. So wird beispielsweise der Modultreiber *Separates Testen* des Sprühgeräts durch die Ausprägungen *Druck-/Saugtest* und *Polungstest Elektrik* konkretisiert. Erst durch diese Erweiterung des Modultreibers wird die gezielte Bildung von Modulen ermöglicht, die parallel den entsprechenden Tests unterzogen werden können.

Grundsätzlich können die Modultreiberausprägungen in integrierende und differenzierende Ausprägungen unterteilt werden. Bei integrierenden Ausprägungen werden die Komponenten zu einem Modul zusammengefasst, die in Beziehung zu einer gemeinsamen Modultreiberausprägung stehen. Beispielsweise werden aufgrund der Modultreiberausprägung *Polungstest Elektrik* die betroffenen Komponenten Ladebuchse, Sicherung, Hauptschalter und Akku zu einem Modul zusammengefasst. Dagegen zielen differenzierende Modultreiberausprägungen unmittelbar auf Komponenten, die allein gestellt werden sollen. Die entsprechende Komponente wird dazu in der Modultreiberausprägung benannt. So wird aufgrund der Modultreiberausprägung *Übernahme Pumpe* die Bildung eines separaten Moduls angestrebt, das nur aus der Pumpe besteht und das in die nachfolgende Produktgeneration übernommen werden kann.

#### 4.6.2 Vorgehen zur Modulbildung

Grundlegende Zielsetzung der Entwicklung produktstrategischer Module ist es, Komponenten, die eine Beziehung zu einer gemeinsamen Modultreiberausprägung haben, zu Modulen zusammenzufassen. Idealerweise sollten die gebildeten Module weder weitere Komponenten umfassen, noch sollten Komponenten der Module Beziehungen zu weiteren Ausprägungen haben. Während im ersten Fall der Umfang der Module erweitert wird, ohne dass eine produktstrategische Begründung vorliegt, besteht im zweiten Fall keine eindeutige Zuordnung zwischen den Ausprägungen und den Modulen. Die Vorteile einer modularen Produktstruktur können dadurch deutlich gemindert werden. Beispielsweise können Beziehungen zu mehreren Unterscheidungsmerkmalen

dazu führen, dass aufgrund von Multiplikationseffekten die Anzahl der für die Erstellung von Produktvarianten bereitzuhaltenden Modulvarianten stark ansteigt.

Zur visuellen Unterstützung wird bei der Ableitung von Modulen ein Netzplan eingesetzt, der auf der rautenförmige Darstellung von Produktstrukturen nach GÖPFERT aufsetzt (vgl. Abschnitt 3.2.2.15). In der vorliegenden Arbeit bildet die linke Seite des Netzplans die Modultreiberstruktur der jeweiligen Produktlebensphase ab, während die rechte Seite die Produktstruktur darstellt (Bild 4.16). Der maßgebliche Vorteil des Netzplans ist die einfache Darstellung von Produktstrukturen, wodurch die manuelle Ableitung von Modulen ermöglicht wird (vgl. 3.4).

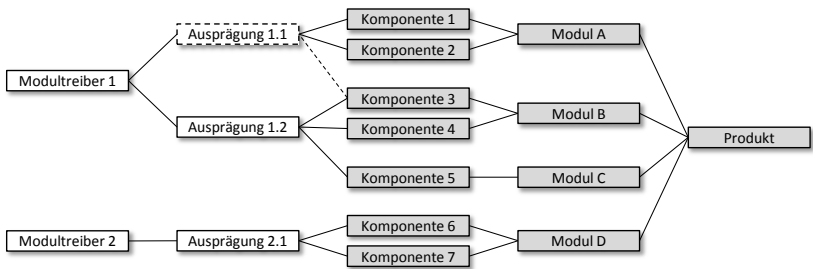


Bild 4.16: Beispiel für einen Netzplan zur Modulbildung für eine Produktlebensphase

Im Netzplan werden die Beziehungen zwischen Ausprägungen und Komponenten durch Verbindungslinien dargestellt. Dabei wird zwischen starken und schwachen Beziehungen unterschieden. Während bei einer starken Beziehung die Komponente unbedingt in das Modul einbezogen werden sollte, ist dies bei einer schwachen Beziehung nicht zwingend erforderlich. Eine schwache Beziehung liegt zum Beispiel bei einer Komponente vor, die in einen Funktionstest auf Modulebene einbezogen werden soll, für die Durchführung des Tests aber nicht unerlässlich ist. Im Netzplan wird die Stärke der Beziehung mit Hilfe von durchgezogenen Verbindungslinien für starke Beziehungen und gestrichelten Linien für schwache Beziehungen dargestellt (Bild 4.17 a/b).

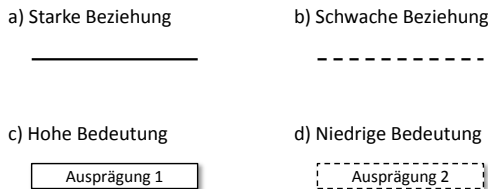


Bild 4.17: Gewichtung von Beziehungen und Modultreiberausprägungen im Modularisierungs-Netzplan

Neben den Beziehungen wird zwischen Modultreiberprägungen mit einer hohen und Modultreiberprägungen mit einer niedrigen Bedeutung für die Produktfamilie unterschieden. Im Netzplan werden wiederum durchgezogene oder gestrichelte Linien verwendet, um die Bedeutung der Ausprägungen abzubilden (Bild 4.17 c/d).

Zusammenfassend kann das Vorgehen zur Entwicklung von modularen Produktstrukturen für die unterschiedlichen Produktlebensphasen in vier Schritte unterteilt werden:

- *Aufnahme der Modultreiberprägungen:* Im ersten Schritt werden die Modultreiber durch Ausprägungen konkretisiert. Die Ausprägungen sollten von Experten aus dem betroffenen Fachbereich aufgestellt werden. Modultreiber, für die sich keine Ausprägungen ergeben, werden nicht weiter berücksichtigt.
- *Gewichtung der Modultreiberprägungen:* Im zweiten Schritt wird die Bedeutung der Modultreiberprägungen bewertet. Dabei wird zwischen Ausprägungen mit einer hohen oder einer niedrigen Bedeutung für die Produktfamilie unterschieden.
- *Aufnahme der Beziehungen:* Im dritten Schritt werden die Beziehungen zwischen den Modultreiberprägungen und den Komponenten aufgenommen und in den Netzplan eingezeichnet. Die Beziehungen können stark oder schwach sein.
- *Bildung von Modulen:* Im letzten Schritt werden Komponenten mit Beziehung zu einer gemeinsamen Ausprägung zu Modulen zusammengefasst. Die Module sollten weder weitere Komponenten umfassen, noch sollten die Komponenten Beziehungen zu mehreren Modultreiberprägungen haben. Bei Überschneidungen ist die Bedeutung der Ausprägungen oder die Stärke der Beziehungen zu berücksichtigen. Darüber hinaus muss auch die Lage der Komponenten im Produkt berücksichtigt werden, indem die Umsetzbarkeit der Module im Module Interface Graph überprüft wird.

In den folgenden Abschnitten wird die Entwicklung von produktstrategischen Modularisierungen für die einzelnen Produktlebensphasen vorgestellt.

### 4.6.3 Entwicklung einer entwicklungsgerechten Produktstruktur

Aus Sicht der Produktentwicklung wurde bereits eine technisch-funktionale Modularisierung entwickelt. Im Rahmen der produktstrategischen Betrachtung der Entwicklungsphase werden die Modultreiber *Zeitliche Varianz* und *Übernahmeteil* der technisch-funktionalen Modularisierung gegenübergestellt. Ziel ist die Bildung von Modulen, die nicht nur technisch-funktional entkoppelt sind, sondern auch den produktstra-

tegischen Treibern für die Bildung von Modulen gerecht werden. In diesem Fall wird durch die technisch-funktionale Entkopplung der Module erreicht, dass sich Änderungen an zeitlich varianten Modulen nicht oder nur in geringem Maße auf andere Module auswirken oder dass bei einer Weiterentwicklung des Produkts Änderungen an Übernahmemodulen vermieden werden können.

Die Entwicklung der Module erfolgt in einem Modularisierungs-Netzplan, der entsprechend der technisch-funktionalen Modularisierung vorstrukturiert ist. Wie in Bild 4.18 am Beispiel des Sprühgeräts dargestellt ist, werden die Ausprägungen der Modultreiber *Zeitliche Varianz* und *Übernahmeteil* in diesen Netzplan eingetragen.

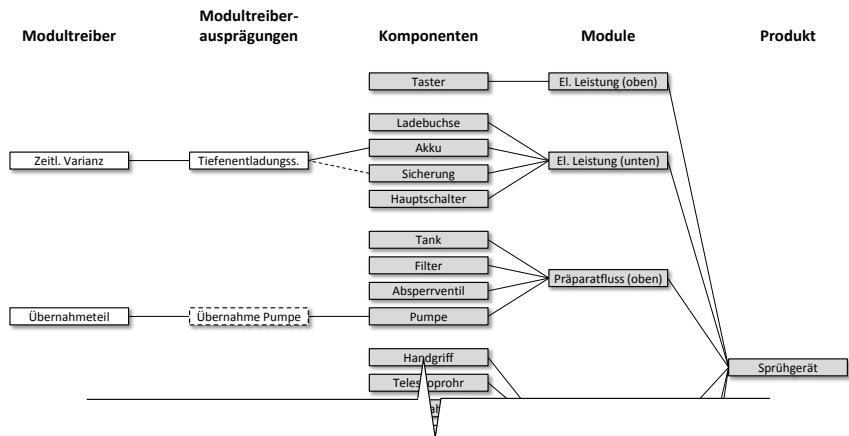


Bild 4.18: Ausgangszustand des Modularisierungs-Netzplans der Phase Produktentwicklung (Ausschnitt)

Idealerweise zeigt sich im Netzplan, dass ein produktstrategisches Modul genau einem technisch-funktionalen Modul entspricht. In diesem Fall können sowohl die technisch-funktionalen als auch die produktstrategischen Anforderungen uneingeschränkt umgesetzt werden. Im Allgemeinen beziehen sich die Ausprägungen allerdings nur auf einige Komponenten der technisch-funktionalen Module. Dies bedingt, dass entweder die technisch-funktionalen Module aufgeteilt oder die produktstrategischen Module auf den Umfang der technisch-funktionalen Module erweitert werden müssen.

Durch das Aufteilen von Modulen kann erreicht werden, dass nur die direkt betroffenen Komponenten weiterentwickelt oder in nachfolgende Produktgenerationen übernommen werden müssen. Allerdings müssen dabei die technisch-funktionalen Kopplungen zwischen den neu gebildeten Modulen berücksichtigt werden. Nur bei weitgehend entkoppelten Modulen kann sichergestellt werden, dass sich die Weiterentwicklung eines Moduls nicht auf angrenzende Module auswirkt oder dass ein Modul ohne

Änderungen in eine nachfolgende Produktgeneration übernommen werden kann. Beispielsweise kann die Pumpe im Fall des Sprüheräts ein eigenes Modul bilden, da die Schnittstelle zu den verbleibenden Komponenten des Moduls *Präparatfluss (oben)* von einer einfach zu spezifizierenden Schlauchverbindung gebildet wird (Bild 4.19).

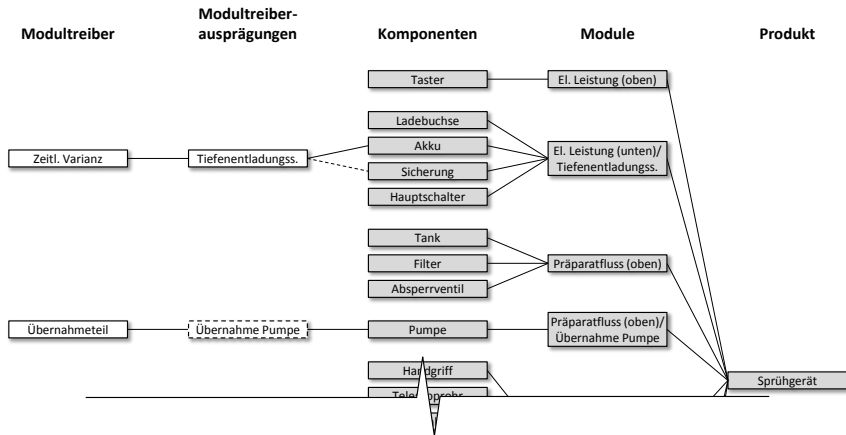


Bild 4.19: Modularisierungs-Netzplan der Phase Produktentwicklung (Ausschnitt)

Bei technisch-funktional stark gekoppelten Modulen muss der Modulumfang dagegen auf das gesamte technisch-funktionale Modul ausgeweitet werden. So werden im Beispiel des Sprüheräts Komponenten Ladebuchse und Hauptschalter in das zeitlich variante Modul einbezogen, obwohl sie keine Beziehung zu der entsprechenden ModultreiberAusprägung haben. Die Erweiterung des Modulumfangs bringt es allerdings mit sich, dass bei einer Weiterentwicklung zusätzliche Komponenten von Änderungen betroffen sind oder dass zusätzliche Komponenten in folgende Produktgenerationen übernommen werden.

#### 4.6.4 Entwicklung einer beschaffungsgerechten Produktstruktur

Eine beschaffungsgerechte Produktstruktur zielt auf die Bildung von Modulen, die gegebenenfalls von einem Zulieferer entwickelt, montiert und geprüft werden können. Der Zukauf ganzer Module stellt dabei eine Beschaffungsstrategie dar, die als Modular Sourcing bezeichnet wird (Bild 4.20).

Durch die Beschaffungsstrategie Modular Sourcing wird es dem Abnehmer ermöglicht, die Fertigungstiefe zu reduzieren und gleichzeitig die Lieferantenzahl zu verringern [Sch01]. Gegenüber der traditionellen Beschaffung einzelner Komponenten von einer Vielzahl unabhängiger Lieferanten, dem Unit Sourcing oder Component Sourcing, können die vielfältigen Informations- und Warenflüsse zwischen den Lieferanten und dem

Abnehmer reduziert werden. Gleichzeitig kann sich der Abnehmer auf seine Kernkompetenzen konzentrieren oder sogar das Know-how von Zulieferern für sich nutzen. Dabei kann die Entwicklungs- und Qualitätsverantwortung in vollem Umfang auf den Zulieferer übertragen werden [Eic91].

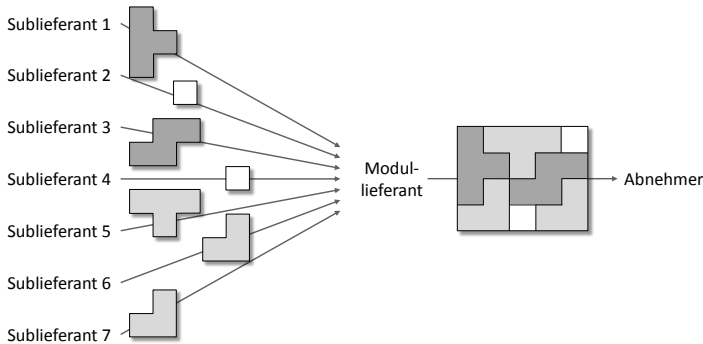


Bild 4.20: Grundprinzip des Modular Sourcing nach [Eic91]

Für die Bestimmung der Ausprägungen des Modultreibers *Modulbeschaffung* können die Gründe für die Eigenfertigung oder den Fremdbezug einer Komponente („Make-or-Buy-Entscheidung“) als Hilfestellung herangezogen werden (Tabelle 4.4). Modultreiberausprägungen können beispielsweise von Technologien oder Produktionsverfahren gebildet werden, auf die ein Zulieferer spezialisiert ist, können aber auch direkt auf Standardkomponenten oder -module verweisen, die am Markt verfügbar sind.

Tabelle 4.4: Gründe für eine Make-or-Buy-Entscheidung in Anlehnung an [Bec08]

Eigenfertigung	Fremdbezug
In Kostenanalysen wurde ermittelt, dass die Eigenentwicklung und/oder -fertigung günstiger ist als der Fremdbezug.	In Kostenanalysen wurde ermittelt, dass der Fremdbezug günstiger ist als die Eigenentwicklung und/oder -fertigung.
Durch die Eigenentwicklung und/oder -fertigung wird das Produkt-Know-how, die maschinelle Ausstattung oder die Tradition gestärkt.	Die erforderlichen Kompetenzen oder Ressourcen für eine Eigenentwicklung und/oder -fertigung stehen nicht zur Verfügung.
Die eigenen Kapazitäten können besser ausgelastet werden.	Aufgrund der geringen Stückzahlen oder des Kapitalbedarfs ist eine Investition in die eigene Entwicklung und Fertigung nicht sinnvoll.
Aufgrund der hohen Produktkomplexität ist eine verstärkte Kontrolle im eigenen Haus erforderlich.	Es sind spezielle Technologien oder Produktionsverfahren und -ausstattungen erforderlich.
Das Produkt ist nur schwer oder zu unverhältnismäßig hohen Kosten transportierbar.	Es handelt sich nicht um eine Kernkompetenz des Unternehmens.
Aus Geheimhaltungsgründen sollte die Entwicklung und/oder Produktion im eigenen Haus erfolgen.	Die Existenz von Patenten spricht für einen Fremdbezug.
Die Abhängigkeit von einem Lieferanten soll vermieden werden.	

Die Entwicklung von Modulen erfolgt wiederum im Modularisierungs-Netzplan. Im Gegensatz zu der vorangegangenen Entwicklungsphase hat die technisch-funktionale Produktstruktur allerdings keinen unmittelbaren Einfluss auf die Produktstruktur der Beschaffungsphase. Dementsprechend wird die technisch-funktionale Modularisierung nicht in den Netzplan der Beschaffungsphase einbezogen. Erst bei der Zusammenführung der unterschiedlichen Produktstrukturen erfolgt eine Abstimmung der beschaffungsgerechten Module mit der technisch-funktional ausgerichteten Produktstruktur der Entwicklungsphase.

In Bild 4.21 ist der modularisierte Netzplan der Beschaffungsphase für das Beispiel des Sprüheräts dargestellt. In der modularen Produktstruktur bildet die Komponente *Taster* ein eigenes Modul, das am Markt als Standardkomponente bezogen werden kann. Darüber hinaus werden anhand des Bearbeitungsverfahrens *Schweißkonstruktion* ein Modul und anhand des Bearbeitungsverfahrens *Spanende Bearbeitung* drei Module abgeleitet.

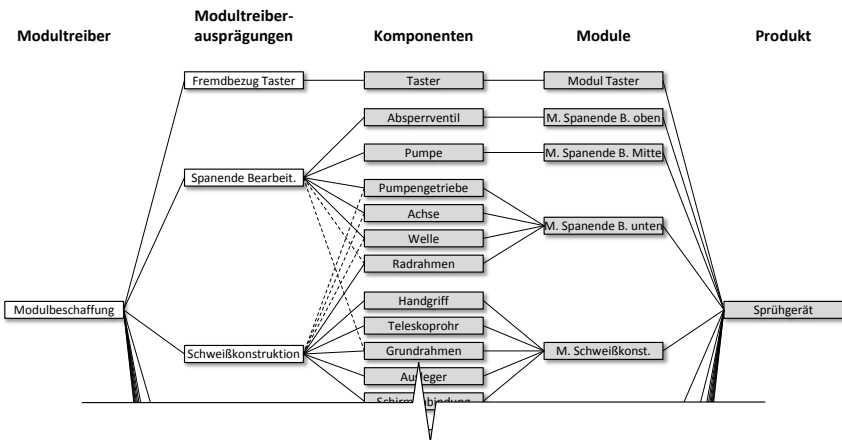


Bild 4.21: Modularisierungs-Netzplan der Phase Beschaffung (Ausschnitt)

Wie aus dem Module Interface Graph in Bild 4.22 hervorgeht, macht die Lage der Komponenten im Produkt die Aufteilung der in Beziehung zu der Ausprägung *Spanende Bearbeitung* stehenden Komponenten auf drei Module erforderlich.

#### 4.6.5 Entwicklung einer herstellungsgerechten Produktstruktur

In der Herstellungsphase werden die Anforderungen an die Modularisierung durch die Modultreiber Prozess, Organisation und Separates Testen abgebildet. Produktspezifische Ausprägungen des Modultreibers *Prozess* können beispielsweise Fügeprozesse wie Kleben oder Schweißen sein, die Verwendung bestimmter Werkzeuge oder auch

die automatisierte Ausführung von Montageprozessen. Ausprägungen des Modultreibers *Organisation* spezifizieren dagegen geeignete Arbeitsumfänge für Organisationseinheiten. Durch den Modultreiber *Separates Testen* werden Tests spezifiziert, die auf Modulebene durchgeführt werden müssen.

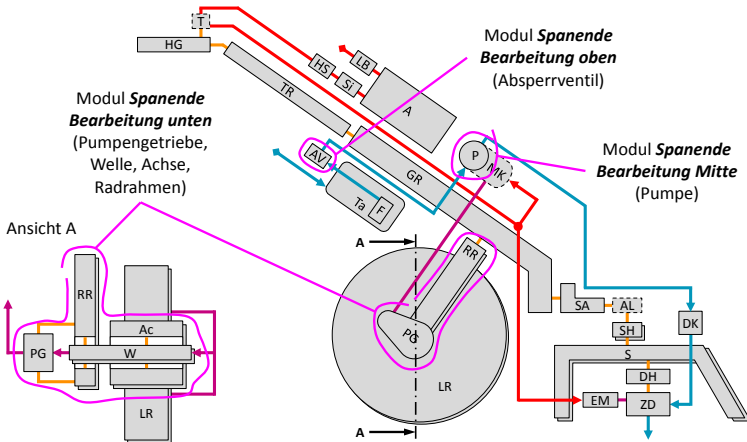


Bild 4.22: Aufteilung des Moduls *Spanende Bearbeitung*

Für die Ableitung der Modultreiberausprägungen kann der Montageprozess in einem Vorranggraph aufgenommen werden. Bei einem Montagevorranggraph handelt es sich um eine netzplanähnliche Darstellung von Teilverrichtungen. In ihm werden die Teilverrichtungen als Knoten dargestellt, während ihre Abhängigkeitsbeziehungen als Verbindungslinien eingezeichnet werden. Die Knoten werden zum Zeitpunkt ihrer frühesten Ausführbarkeit eingetragen, während das Ende der von den Knoten ausgehenden Verbindungslinien den Zeitpunkt verdeutlicht, zu dem die Teilverrichtung spätestens ausgeführt sein muss [Bul86]. In Bild 4.23 ist ein Ausschnitt aus dem Montagevorranggraph für das Sprühgerät dargestellt.

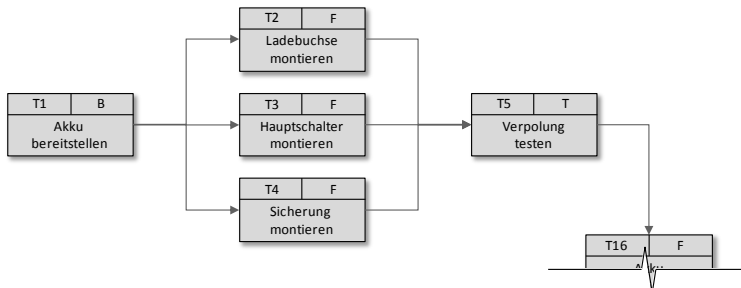


Bild 4.23: Ausschnitt aus dem Montagevorranggraph für das Sprühgerät  
(T: Teilverrichtung, B: Bereitstellen, F: Fügen, T: Testen)

Im Fall des Sprüheräts wird der Modultreiber *Separates Testen* durch die Ausprägungen *Druck-/Saugtest* und *Polungstest Elektrik* konkretisiert. Damit ergibt sich die in Bild 4.24 dargestellte Modularisierung. Ein großer Teil der Komponenten steht allerdings nicht in Beziehung zu einer der Modultreiberausprägungen und wird somit keinem der beiden Module zugeordnet. Grundsätzlich werden Komponenten, die bei der Entwicklung von Produktstrukturen nicht zu Modulen zugeordnet wurden, erst im Rahmen der Zusammenführung der Produktstrukturen in Abschnitt 4.7 zugeordnet.

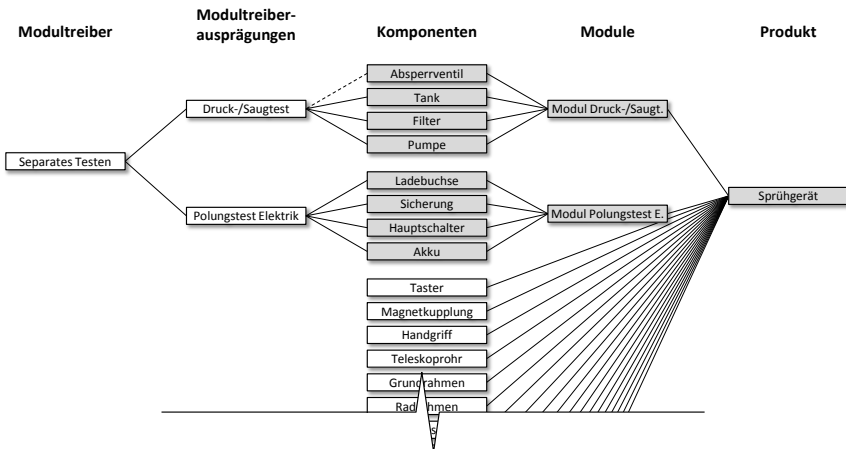


Bild 4.24: Modularisierungs-Netzplan der Phase Herstellung (Ausschnitt)

#### 4.6.6 Entwicklung einer vertriebsgerechten Produktstruktur

Für den Vertrieb steht eine Produktstruktur im Vordergrund, die eine einfache Konfiguration von Produktvarianten ermöglicht. Die Produktvarianten grenzen sich dabei durch die unterschiedliche Ausprägung ihrer varianten Merkmale voneinander ab. Die Unterscheidungsmerkmale werden in der Methode zur Entwicklung modularer Produktfamilien bereits im Rahmen der Ist-Aufnahme erfasst (vgl. Abschnitt 4.3.1). In die Modularisierung werden sie als Modultreiberausprägungen übernommen. Ziel der Modultreiberausprägungen der Vertriebsphase ist die Bildung von Modulen, die eindeutig einem der Unterscheidungsmerkmale zugeordnet sind.

Ergebnis der Entwicklung von Modulen auf Grundlage von Unterscheidungsmerkmalen ist eine Produktstruktur, die eine einfache Konfiguration von Produktvarianten ermöglicht. So werden beispielsweise aufgrund der Modultreiberausprägung *Geländegängigkeit* die Komponenten zu einem Modul zusammengefasst, die aufgrund des Unterscheidungsmerkmals in unterschiedlichen Ausprägungen vorliegen. Anhand des gebildeten Moduls *Geländegängigkeit* können geländegängige oder nicht geländegängige Sprüheräte konfiguriert werden (Bild 4.25).

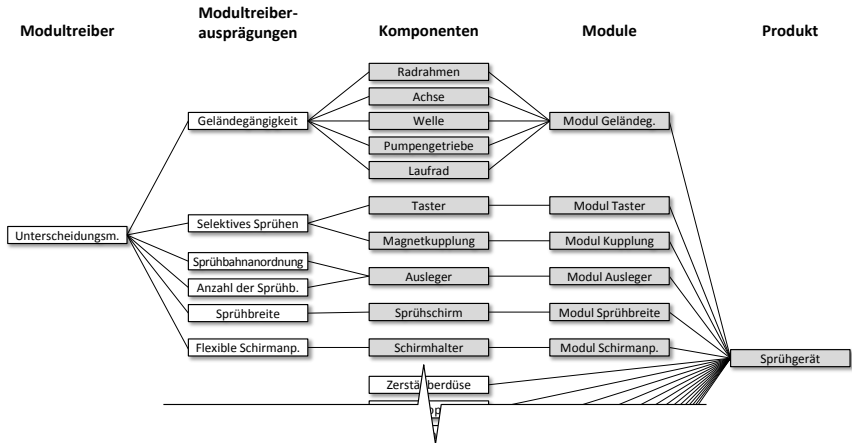


Bild 4.25: Modularisierungs-Netzplan der Phase Vertrieb (Ausschnitt)

#### 4.6.7 Entwicklung einer nutzungsgerechten Produktstruktur

Die Anforderungen der Nutzungsphase werden durch die Modultreiber *Erweiterung/Anpassung* und *Instandhaltung* abgebildet. Der Modultreiber *Erweiterung/Anpassung* zielt auf die Möglichkeit ab, durch den Austausch von Modulen das Produkt auf spezifische Einsatzbedingungen anzupassen oder die Funktionalität und Leistungsfähigkeit des Produkts im Laufe der Nutzungsphase zu erweitern. So wird der Modultreiber *Anpassung/Erweiterung* für das Sprühgerät durch die Modultreiberausprägung *Erweiterung Akku* spezifiziert. Damit soll dem Nutzer die Möglichkeit gegeben werden, die Betriebsdauer des Sprühgeräts durch den Einsatz eines leistungsstärkeren Akkus zu steigern.

Der Modultreiber *Instandhaltung* bezieht sich dagegen auf Maßnahmen zur Instandhaltung des Produkts. Dies beinhaltet Maßnahmen zur Bewahrung des Sollzustands (Wartung), zur Feststellung und Beurteilung des Istzustands (Inspektion) und zur Wiederherstellung des Sollzustands (Instandsetzung) [DIN03]. Beispielsweise ergeben sich für das Sprühgerät die Ausprägungen *Reinigung* als Wartungsmaßnahme sowie *Instandsetzung Elektromotor* und *Instandsetzung Akku* als Instandsetzungsmaßnahmen (Bild 4.26).

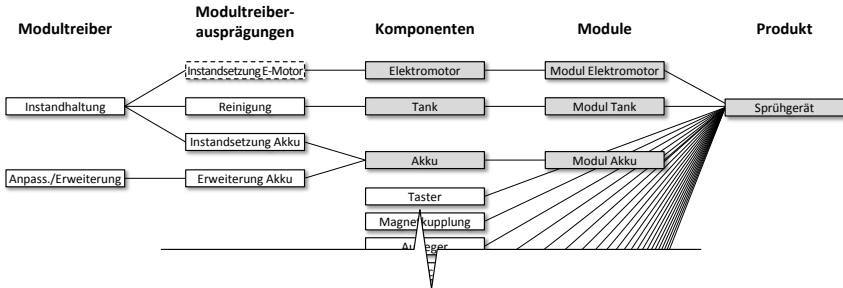


Bild 4.26: Modularisierungs-Netzplan der Phase Nutzung (Ausschnitt)

### 4.6.8 Entwicklung einer recyclinggerechten Produktstruktur

Unter Recycling versteht man die Verwertung oder erneute Verwendung von Produkten durch ihre Rückführung in Kreisläufen [Mey83]. In Bild 4.27 werden die unterschiedlichen Recyclingkreislaufarten, -formen und -behandlungsprozesse zusammengefasst.

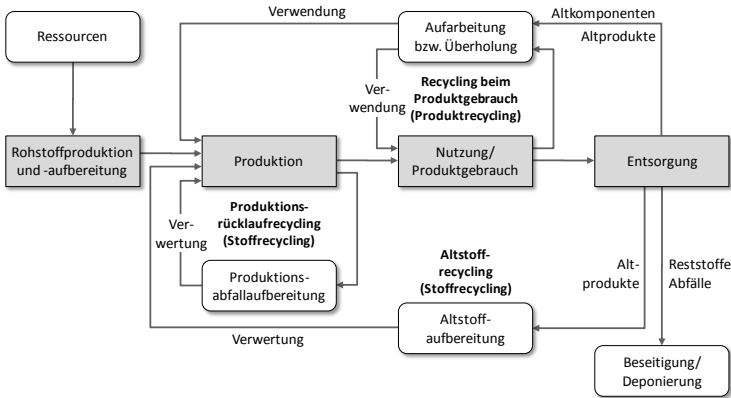


Bild 4.27: Recyclingkreislaufarten, -formen und -behandlungsprozesse nach [Bön99]

Innerhalb der Kreislaufarten Produktionsrücklaufrecycling, Altstoffrecycling und Recycling beim Produktgebrauch sind verschiedene Recyclingformen möglich. Eine Verwertung (Stoffrecycling) findet ausschließlich im Produktionsrücklauf- oder Altstoffrecycling statt. Dabei wird in Wieder- und Weiterverwertung unterschieden. Bei der Wiederverwertung werden Stoffe wieder zu gleichen Werkstoffen verwertet, während bei der Weiterverwertung Stoffe weiter zu anderen Werkstoffen verwertet werden.

Beim Recycling im Produktgebrauch (Produktrecycling) können Altbestandteile oder -produkte wieder- oder weiterverwendet werden. In beiden Fällen wird die Pro-

duktgestalt weitgehend beibehalten. Während unter Wiederverwendung die erneute Nutzung eines Altprodukts für den ursprünglichen Verwendungszweck verstanden wird, versteht man unter Weiterverwendung die erneute Nutzung eines Altprodukts für einen Verwendungszweck, für den es ursprünglich nicht hergestellt worden ist [Mey83].

Die Produktstruktur hat einen wesentlichen Einfluss auf die Recyclinggerechtigkeit eines Produkts. Ziel ist die Bildung von Modulen, die gemäß einer Recyclingform entsorgt werden können. Beispielsweise kann mittels einer ABC-Analyse der Selbstkosten erkannt werden, welche Komponenten wertvoll und somit für das Produktrecycling geeignet sind [Kra94]. Für das Stoffrecycling sollten Module aus Werkstoffen bestehen, die einer bestimmten Schrott- oder Altstoffgruppe zuzuordnen sind oder die zumindest bei der erneuten Werkstoffherstellung untereinander verträglich sind. Bild 4.28 gibt einen Überblick über die Merkmale zur Bildung von Recyclinggruppen in Abhängigkeit von der Recyclingform.

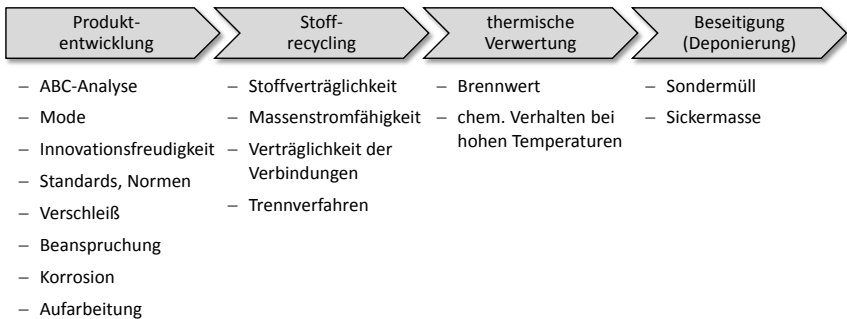


Bild 4.28: Merkmale zur Bildung von Recyclinggruppen in Anlehnung an [Kra94]

Wie in Bild 4.29 dargestellt ist, bilden die Modultreiber *Produktrecycling* und *Stoffrecycling* die Gründe für die recyclinggerechte Strukturierung der Sprühgeräte. Beispielsweise hat die Pumpe eine hohe Lebensdauer und wird daher für eine Wiederverwendung vorgesehen.

## 4.7 Zusammenführung der Produktstrukturen

In den vorangegangenen Schritten wurden modulare Produktstrukturen für die unterschiedlichen Produktlebensphasen entwickelt. Diese bilden die Anforderungen der einzelnen Phasen bestmöglich ab. Um aus den Produktstrukturen einen durchgehenden Prozess abzuleiten, müssen sie allerdings aufeinander abgestimmt werden. Dazu müssen bisher nicht berücksichtigte Komponenten Modulen zugeordnet werden und

Widersprüche zwischen den Phasen müssen erkannt und gelöst werden. Um diesen Arbeitsschritt zu unterstützen, ist der *Module Process Chart (MPC)* neu entwickelt worden [Ble10a]. Im MPC werden die Produktstrukturen in einen Prozess eingeordnet und somit einander gegenübergestellt. Durch die Gegenüberstellung können Widersprüche zwischen den Produktstrukturen einfach erkannt werden und sind leicht nachvollziehbar.

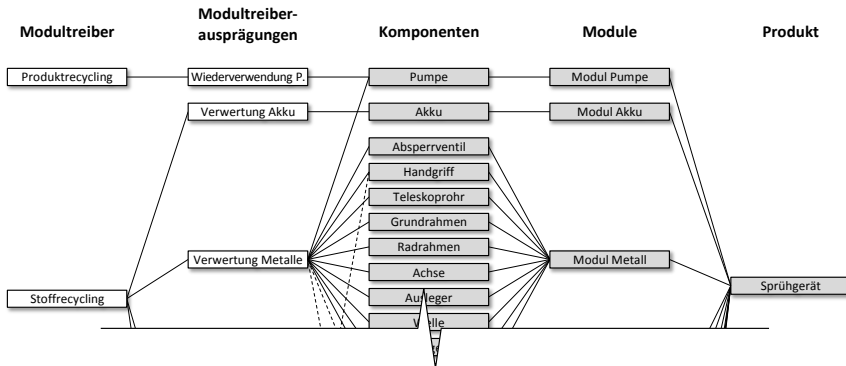


Bild 4.29: Modularisierungs-Netzplan der Phase Recycling/Entsorgung (Ausschnitt)

Im Folgenden wird eingangs erläutert, wie die Produktstrukturen im MPC abgebildet werden, bevor Lösungsansätze zum Umgang mit Widersprüchen aufgezeigt werden.

#### 4.7.1 Abbildung der Produktstrukturen im Module Process Chart

In Bild 4.30 ist ein Module Process Chart am Beispiel des Sprühgeräts dargestellt. Der MPC besteht aus einer Kopfzeile, in der die Produktlebensphasen verzeichnet werden, einer Informationsleiste am linken Rand, in der die Komponenten und ergänzende Informationen aufgelistet werden, und einem Arbeitsbereich, in dem die Produktstrukturen und die Verbindungen zwischen den Modulen und Komponenten dargestellt werden.

In der Informationszeile wird neben der Auflistung der Komponenten der Produktfamilie angegeben, ob es sich um Standardkomponenten (S) oder um variante (v), optionale (o) oder in varianter Anzahl (vA) vorliegende Komponenten handelt. Diese Unterscheidung ist für die Entwicklung von Produktfamilien von grundlegender Bedeutung, da Standardumfänge und variante Anteile eindeutig zu trennen sind. Darüber hinaus sind die anteiligen Kosten der Komponenten bei der Lösung von Widersprüchen entscheidend. Beispielsweise sollte ein Modul, das im Zuge von Wartungsmaßnahmen regelmäßig ersetzt werden muss, nur Komponenten mit geringen anteiligen Kosten umfas-

sen. In der Informationszeile des MPC wird daher zusätzlich die Kostenklasse der Komponente angegeben.

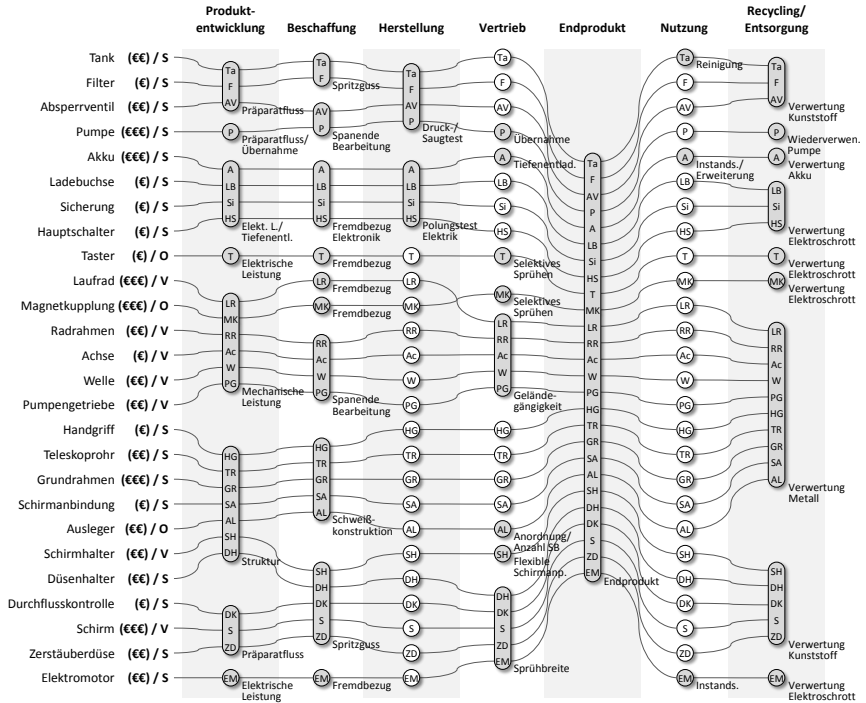


Bild 4.30: Module Process Chart der Produktfamilie von Sprühgeräten  
(v: variant, o: optional, S: Standard, vA: variante Anzahl)

Im Arbeitsbereich des MPC werden die modularen Produktstrukturen der Produktlebensphasen dargestellt. Zugunsten der Übersichtlichkeit wird zusätzlich das Endprodukt eingezeichnet. Komponenten, die noch keinem Modul zugeordnet wurden, werden im MPC weiß dargestellt, während Module grau hinterlegt werden (Bild 4.31).

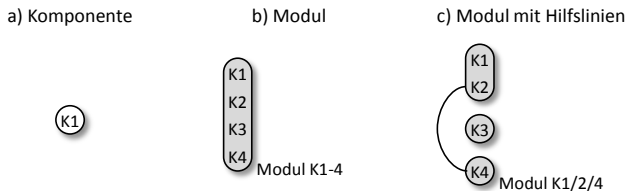


Bild 4.31: Darstellungsweisen von Modulen und Komponenten im MPC (K: Komponente)

Module können in zwei Darstellungsweisen im MPC abgebildet werden. Grundsätzlich werden sie als zusammenhängende Form dargestellt (Bild 4.31b). Alternativ können sie aber auch über Hilfslinien zusammengefasst werden, um Umbrüche in der Prozessdarstellung zu vermeiden (Bild 4.31c). In beiden Fällen wird am unteren rechten Rand die Begründung für die Modulbildung, also die zugrundeliegende Heuristik oder die Modultreiberausprägung, angegeben.

#### 4.7.2 Ausarbeitung des Modularisierungsprozesses

Im Rahmen der Ausarbeitung muss aus den unterschiedlichen Produktstrukturen ein durchgehender Prozess abgeleitet werden. Dazu müssen nicht nur bisher unberücksichtigte Komponenten Modulen zugeordnet werden, sondern es müssen auch Widersprüche zwischen den Produktlebensphasen gelöst werden. Beispielsweise kann nicht in der Herstellung ein umfassendes Modul gebildet und einem Test unterzogen werden, wenn im nachfolgenden Vertrieb mehrere Einzelmodule zur Konfiguration von Produktvarianten erforderlich sind. In diesem Fall besteht ein Widerspruch zwischen den Produktstrukturen der unterschiedlichen Phasen, für den ein Lösungsansatz entwickelt werden muss.

Ziel der Ausarbeitung ist ein Prozess, wie er in Bild 4.32 exemplarisch dargestellt ist. Ausgangspunkt des Prozesses ist die Produktstruktur der Entwicklungsphase, die mit der nachfolgenden Beschaffungsphase so weit wie möglich übereinstimmen sollte. In diesem Fall kann durch die technisch-funktionale Entkopplung der Module sichergestellt werden, dass auch bei einer Auslagerung der Entwicklung von Modulen nur ein geringer Aufwand zur Koordination der Zulieferer erforderlich ist.

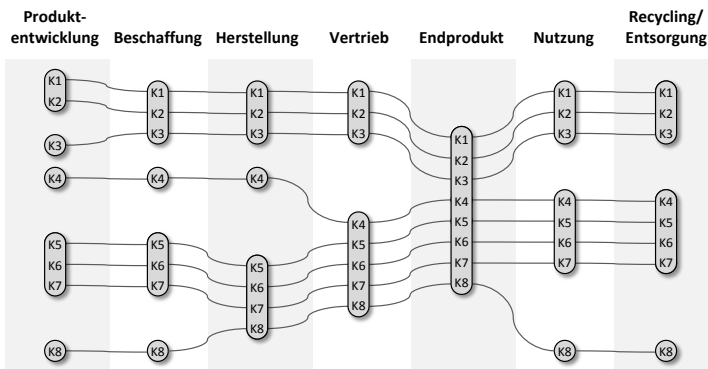


Bild 4.32: Beispiel für einen ausgearbeiteten Modularisierungsprozess (K: Komponente)

Grundsätzlich können sich Module der Entwicklungsphase aber auch in mehrere Beschaffungsmodulen aufteilen oder mehrere Entwicklungsmodulen können zu einem

Beschaffungsmodul zusammengefasst werden. In diesem Fall werden die Potentiale einer modularen Produktstruktur aber nicht in vollem Umfang genutzt.

In den folgenden Phasen vereinigen sich die Module bis hin zum Endprodukt. Dabei stellen die Vereinigungen die Montageschritte dar, in denen eine Produktvariante erstellt wird. Von der Beschaffung über die Herstellung und den Vertrieb bis hin zum Endprodukt können daher keine Verzweigungen im Prozess auftreten.

In den Phasen Nutzung und Recycling/Entsorgung teilt sich das Endprodukt dagegen wieder in Module auf, die beispielsweise zur Instandhaltung des Produkts ausgetauscht oder zum Recycling des Altprodukts demontiert werden müssen. In den Phasen, die sich an die Produkterstellung anschließen, sind dementsprechend Verzweigungen von Modulen vorherrschend.

Um aus den unabhängig entwickelten Produktstrukturen einen durchgehenden Prozess abzuleiten, müssen die erkannten Widersprüche durch das Aufteilen oder Zusammenfassen von Modulen gelöst werden. Mögliche Ansätze werden im Folgenden vorgestellt.

### **Produktentwicklung**

Ein Entwicklungsmodul muss aufgeteilt werden, wenn es sich im Prozess in mehrere Beschaffungsmodule verzweigt und die Entwicklung der einzelnen Beschaffungsmodule auf die entsprechenden Zulieferer ausgelagert werden soll. Durch das Aufteilen des Entwicklungsmoduls können Module geschaffen werden, deren Entwicklungsverantwortung eindeutig Zulieferern übertragen werden kann. Dabei muss allerdings berücksichtigt werden, dass die neu gebildeten Module unter Umständen starke technisch-funktionale Beziehungen zueinander haben. Dies kann im Laufe der Entwicklung zu einem hohen Abstimmungsbedarf zwischen den Zulieferern führen. In diesem Fall müssen geeignete organisatorische Maßnahmen getroffen werden. Beispielsweise kann ein Projektmanager eingesetzt werden, der die Entwicklung koordiniert und eine durchgehende Abstimmung sicherstellt.

Dagegen ist ein Zusammenfassen von Entwicklungsmodulen im Rahmen der Ausarbeitung des Modularisierungsprozesses nicht erforderlich. Gegebenenfalls können Entwicklungsmodule unabhängig voneinander entwickelt werden, aber gemeinsam als umfassendes Beschaffungsmodul von einem Zulieferer bezogen werden.

### **Beschaffung**

Beschaffungsmodule können aufgeteilt werden, um die beschaffungsgerechte Produktstruktur auf die nachfolgende Herstellungsphase abzustimmen. Dies ist beispielsweise der Fall, wenn in der Herstellung mehrere Module parallel Funktionstests unterzogen

werden sollen. Bei der Aufteilung muss allerdings berücksichtigt werden, dass zusätzliche Beschaffungsmodule gebildet werden, die zu einem höheren logistischen Aufwand in der Beschaffung führen.

Dagegen kann der logistische Aufwand durch das Zusammenfassen von Modulen reduziert werden. Die Erweiterung des Umfangs eines Beschaffungsmoduls bedingt aber auch, dass ein geeigneter Modullieferant verfügbar ist. Dieser muss nicht nur eine ausreichende Kompetenz für die Herstellung des Moduls mitbringen, sondern gegebenenfalls auch für die Entwicklung des Moduls übernehmen können.

### **Herstellung**

Durch das Aufteilen von Herstellungsmodulen entsprechend der Produktstruktur der Vertriebsphase kann vermieden werden, dass Varianten bereits in der Herstellungsphase gebildet werden. Allerdings kann die Aufteilung dazu führen, dass Tests nicht mehr auf Modulebene durchgeführt werden können oder dass eine eindeutige Zuordnung der Module zu Prozessen oder Organisationseinheiten verloren geht.

Durch ein Zusammenfassen von Herstellungsmodulen kann die Produktstruktur dagegen auf Module der Beschaffungsphase angepasst werden. Es muss allerdings berücksichtigt werden, dass unter Umständen Tests oder Bearbeitungsschritte nicht mehr parallel durchgeführt werden können.

### **Vertrieb**

Da der Vertrieb die letzte Phase vor der Endmontage des Produkts bildet, ist ein Aufteilen von Vertriebsmodulen nicht erforderlich. Beim Zusammenfassen von Modulen müssen dagegen unterschiedliche Strategien verfolgt werden. So sollten variante Module nicht zusammengefasst werden, da dies zu einer Vorverlegung des Variantenbildung führt. In diesem Fall muss eine deutlich höhere Anzahl an Modulvarianten bereitgehalten werden, um die Varianten der Produktfamilie zu erstellen.

Im Gegensatz dazu kann durch Zusammenfassen von Standardmodulen ein Grundprodukt gebildet werden, das als Grundlage für die Ableitung von Produktvarianten dient. Das Grundprodukt kann sich aus mehreren Standardmodulen zusammensetzen oder von einer Produktplattform gebildet werden (Bild 4.33).

### **Nutzung**

Ein Aufteilen von Nutzungsmodulen ist grundsätzlich nicht erforderlich. Bei einem Zusammenfassen von Nutzungsmodulen mit weiteren Komponenten oder Modulen muss dagegen der erweiterte Umfang des gebildeten Moduls berücksichtigt werden. Beispielsweise sollten Module, die im Zuge von Wartungsmaßnahmen regelmäßig

ersetzt werden müssen, nicht um Komponenten erweitert werden, die hohe Kosten auf sich vereinen.

- a) Grundprodukt als Standardmodule    b) Grundprodukt als Produktplattform

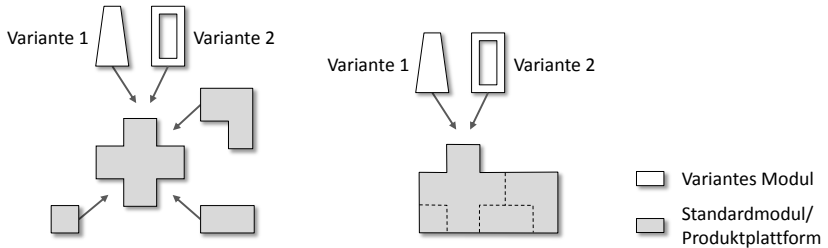


Bild 4.33: Grundprodukt als Menge von Standardmodulen oder als Produktplattform

Gegebenenfalls kann die Produktstruktur der Nutzungsphase auch angepasst werden, indem die Zuverlässigkeit der Module erhöht wird. In diesem Fall entfällt die Notwendigkeit zur Bildung von Nutzungsmodulen. Um die Zuverlässigkeit zu erhöhen, kann die Belastung des Moduls vermieden, die Übertragung der Belastung zum Modul verhindert oder die Belastbarkeit des Moduls erhöht werden [Moo91].

### Recycling/Entsorgung

Ein wirtschaftliches Recycling eines Altprodukts kann gewährleistet werden, wenn das Produkt in nur wenige Module zerlegt werden muss. Ein Aufteilen von Recyclingmodulen sollte daher vermieden werden. Das Zusammenfassen von Modulen ermöglicht es dagegen, den Aufwand für das Recycling des Altprodukts zu verringern. Dies bedingt aber, dass die Module aus untereinander verträglichen Werkstoffen aufgebaut werden können.

Als Beispiel für einen ausgearbeiteten Modularisierungsprozess ist in Bild 4.34 der MPC des Sprüheräts dargestellt. Ausgangspunkt sind die technisch-funktional weitgehend entkoppelten Module der Produktentwicklung. Diese werden teilweise als Beschaffungsmodule bei Zulieferern bezogen, teilweise teilen sie sich aber auch in mehrere Beschaffungsmodule auf, die separat zugekauft werden. In den folgenden Schritten werden die Module bis hin zum Endprodukt zusammengefasst. Dabei werden Produktvarianten auf Grundlage einer Produktplattform erstellt. Im Anschluss an die Produkterstellung werden die Nutzung und das Recycling des Sprüheräts unterstützt, indem Module zur Instandhaltung und Erweiterung ausgetauscht werden können und eine Zerlegung in recyclinggerechte Module ermöglicht wird.

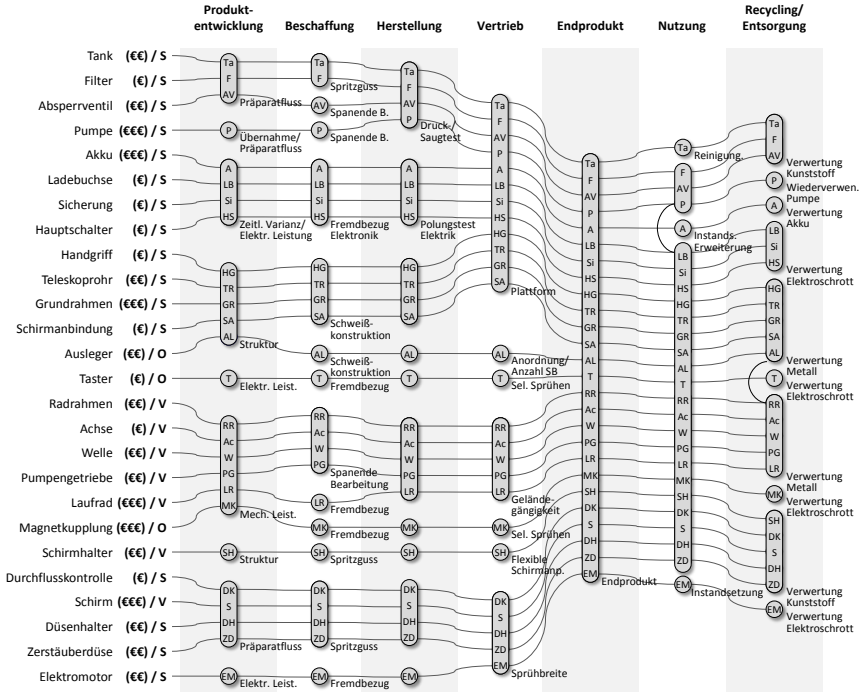


Bild 4.34: Ausgearbeiteter Module Process Chart der Produktfamilie von Sprüheräten  
(v: variant, o: optional, S: Standard, vA: variante Anzahl)

## 4.8 Konzeptbewertung und -auswahl

Wie bereits die Entwicklung der Konzepte erfolgt die Bewertung differenziert nach technisch-funktionalen und produktstrategischen Gesichtspunkten. In beiden Fällen wird die Wertigkeit der Konzepte mit Hilfe von Kennzahlen bestimmt, die sich aus dem Quotienten von Ist- und Idealzustand der modularen Produktstruktur berechnen. Anhand der Kennzahlen werden die Konzepte analysiert und schlussendlich für die weitere Ausarbeitung ausgewählt.

### 4.8.1 Bewertung mit der Kennzahl Module Coupling Independence

Aus technisch-funktionaler Sicht ist die Bildung entkoppelter Module das Ziel der Modularisierung. Die Komponenten der Module sollten untereinander stark gekoppelt sein, aber nur über sehr schwache Kopplungen zu Komponenten anderer Module verfügen. Auf Grundlage dieser Betrachtung kann ein theoretischer Idealzustand für die technisch-funktionale Modularisierung abgeleitet werden. In diesem Fall sind die

Module vollkommen voneinander entkoppelt; die Schnittstellen liegen also vollständig innerhalb der Module.

Um die technisch-funktionale Entkopplung der Module zu bewerten, wird daher der Quotient aus der Anzahl der Schnittstellen innerhalb der Module und der Gesamtanzahl der Schnittstellen im Produkt gebildet. Die Kennzahl läuft somit gegen den Wert 1, wenn sich die Anzahl der Schnittstellen innerhalb der Module der Gesamtanzahl der Schnittstellen annähert. Damit ergibt sich die Kennzahl *Module Coupling Independence (MCI)* (vgl. Abschnitt 3.3.2.1):

$$MCI = \frac{\text{Anzahl der Schnittstellen innerhalb der Module}}{\text{Gesamtanzahl der Schnittstellen}}$$

Um in der vorliegenden Methode die Entkopplung der Module zu bewerten, darf sich die Kennzahl allerdings nicht nur auf eine Produktlebensphase beziehen, sondern muss alle Produktstrukturen aus dem gesamten Produktleben berücksichtigen. Die Berechnung der Kennzahl erfolgt daher anhand der feingliedrigsten Modulaufteilung, die im Laufe des Produktlebens vorliegt. Sollten beispielsweise zwei Module der Beschaffungsphase in der nachfolgenden Herstellungsphase zu einem Modul zusammengefasst werden, wird nicht das zusammengefasste Modul, sondern die feingliedrigere Modulaufteilung der Beschaffungsphase für die Berechnung der Kennzahl herangezogen. Eine hohe Wertigkeit der Modularisierung ergibt sich somit, wenn die Module ihre technisch-funktionale Unabhängigkeit über das gesamte Produktleben hinweg beibehalten.

Bild 4.35 zeigt die Bestimmung der Anzahl der Schnittstellen am Beispiel des Sprühgeräts. Um für die Berechnung der Kennzahl alle Schnittstellen berücksichtigen zu können, wurden auch bisher unberücksichtigte strukturelle Verbindungen in den MIG eingezeichnet. Die Modulaufteilung wurde dem in Bild 4.34 dargestellten MPC entnommen. Beispielsweise wurde der Tank als eigenes Modul eingezeichnet, da er in der Nutzungsphase ein Modul bildet.

Die Berechnung der Kennzahl erfolgt anhand der aus dem MIG abgelesenen Schnittstellen. Wie Bild 4.35 entnommen werden kann, liegen 16 von insgesamt 40 Schnittstellen innerhalb der Module. Damit berechnet sich die Kennzahl MCI wie folgt:

$$MCI = \frac{\text{Anzahl der Schnittstellen innerhalb der Module}}{\text{Gesamtanzahl der Schnittstellen}} = \frac{16}{40} = 0,4$$

Um das Ergebnis der Kennzahl für die Bewertung der technisch-funktionalen Modularisierung heranzuziehen, muss die Art des betrachteten Produkts berücksichtigt werden. Der Reduzierung von Schnittstellen hat bei Produkten eine übergeordnete Bedeutung,



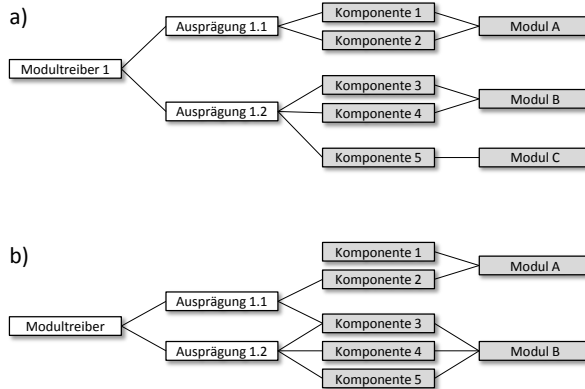


Bild 4.36: Beispiele für produktstrategische Modularisierungen

Die Kennzahl *Module Driver Independence (MDI<sub>j</sub>)* eines Modultreibers *j* wird daher wie folgt berechnet:

$$MDI_j = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{C_i}{C_{all\ i} + C_{\neq i}}}{n}$$

- mit:  $C_i$  = Anzahl der Komponenten mit Bezug zur Modultreiberausprägung *i*  
 $C_{all\ i}$  = Anzahl der Komponenten in Modulen mit Bezug zur Modultreiberausprägung *i*  
 $C_{\neq i}$  = Anzahl der Beziehungen der Komponenten in Modulen mit Bezug zur Modultreiberausprägung *i* zu Modultreiberausprägungen  $\neq i$   
 $n$  = Anzahl der Ausprägungen des Modultreibers

Im Zähler der Kennzahl werden die gebildeten Module bewertet. Dazu wird für jede Modultreiberausprägung ein Quotient gebildet. Im Zähler des Quotienten steht die Anzahl der Komponenten mit einem Bezug zur betrachteten Modultreiberausprägung *i*. Im Nenner wird dagegen die Summe aus allen Komponenten gebildet, die zur Bewertung der Modulaufteilung berücksichtigt werden müssen. Dies umfasst einerseits die Anzahl aller Komponenten in Modulen mit einem Bezug zur Ausprägung *i*. Der Quotient kann daher nur den Wert 1 annehmen, wenn die Module keine Komponenten umfassen, die nicht in Bezug zur betrachteten Ausprägung stehen. Andererseits sollte keine der Komponenten einen Bezug zu einer weiteren Modultreiberausprägung haben. In die Summe wird daher zusätzlich die Anzahl der Komponenten mit einer Beziehung zu einer Ausprägung ungleich *i* einbezogen. Sollten Komponenten in Beziehungen zu mehreren Ausprägungen ungleich *i* stehen, gehen diese mehrfach in die Summe ein.

Um die Kennzahl  $MDI_j$  für die Berechnung der Wertigkeit der Module eines Modultreibers  $j$  abzuleiten, wird aus den Quotienten der einzelnen Ausprägungen der Mittelwert gebildet. Dazu wird die Summe der Quotienten berechnet und durch die Anzahl der Modultreiberausprägungen  $n$  geteilt.

Als Beispiel für die Berechnung der Kennzahl  $MDI_j$  ist in Bild 4.37 die endgültige Produktstruktur des Sprüheräts für die Phase Vertrieb dargestellt (vgl. Bild 4.34). Im Gegensatz zum ursprünglichen Netzplan in Bild 4.25 wurde das Modul Sprühbreite um vier weitere Komponenten erweitert, die allerdings keinen Bezug zur entsprechenden Modultreiberausprägung haben. Die Berechnung der Kennzahl  $MDI_j$  für den Modultreiber *Unterscheidungsmerkmal* wird im Folgenden dargestellt.

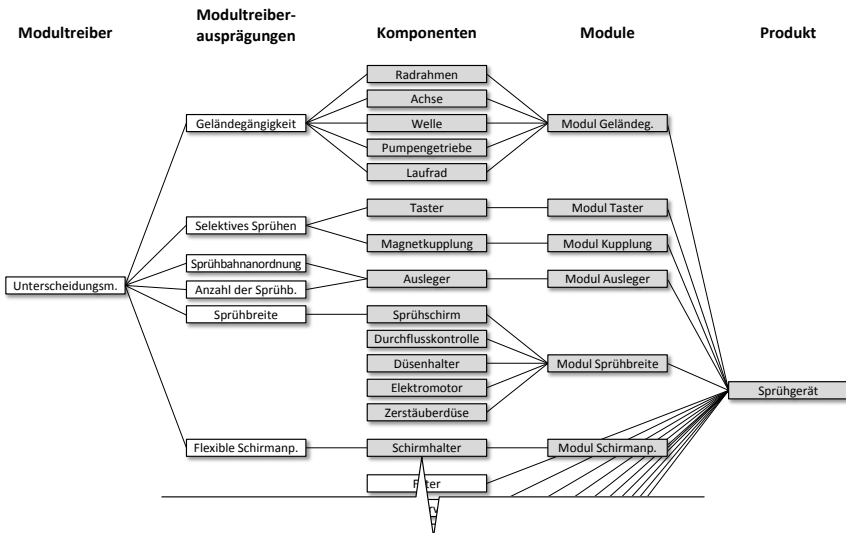


Bild 4.37: Ausgearbeiteter Modularisierungs-Netzplan der Phase Vertrieb am Beispiel des Sprüheräts

Während die Modultreiberausprägungen *Geländegängigkeit*, *Selektives Sprühen* und *Flexible Schirmanpassung* in der modularen Produktstruktur ideal umgesetzt werden, wirken sich die Ausprägungen *Sprühbahnanordnung* und *Anzahl der Sprühbahnen* auf dasselbe Modul aus. Dementsprechend errechnet sich für beide Ausprägungen nur eine geringe Wertigkeit. Darüber hinaus ergibt sich für die Umsetzung der Ausprägung *Schirmbreite* eine geringe Wertigkeit, da nur bei der Komponente Sprühschirm des gebildeten Moduls eine Beziehung zur Modultreiberausprägung besteht.

$$MDI_{UM} = \frac{\sum_{i=1}^m \frac{C_i}{C_{all i} + C_{\neq i}}}{n} = \frac{\frac{5}{5} + \frac{2}{2} + \frac{1}{2} + \frac{1}{2} + \frac{1}{5} + \frac{1}{1}}{6} = 0,7$$

Um die produktstrategische Gesamtwertigkeit von Konzepten zu ermitteln, werden die Einzelkennzahlen  $MDI_j$  der Modultreiber in der Kennzahl  $MDI$  zusammengefasst. Dazu wird der Mittelwert aus den Einzelkennzahlen  $MDI_j$  gebildet:

$$MDI = \frac{\sum_{j=1}^m MDI_j}{m}$$

mit:  $MDI_j$  = Kennzahl *Module Driver Independence* des Modultreibers  $j$   
 $m$  = Anzahl der berücksichtigten Modultreiber

Die produktstrategische Wertigkeit hat insbesondere bei variantenreichen Produkten, die in Einzel- oder Kleinserien hergestellt werden, eine hohe Bedeutung. Bei entsprechend ausgeprägten Produkten sollten gegebenenfalls produktstrategische Anforderungen umgesetzt werden, auch wenn sich dadurch zusätzliche Schnittstellen zwischen Modulen ergeben.

### 4.8.3 Konzeptauswahl

Zur Auswahl eines Konzepts müssen die technisch-funktionale und die produktstrategische Wertigkeit der Konzepte zusammengeführt werden. Wie bereits zuvor aufgezeigt wurde, kommt sowohl Produkten, die besonders hohen Anforderungen hinsichtlich Leistung, Bauraum oder Gewicht unterliegen, als auch komplexen Systemen oder kostenoptimierten Massenprodukten eine besonders hohe Bedeutung der technisch-funktionalen Modularisierung zu. Die Umsetzung der produktstrategischen Anforderungen hat dagegen insbesondere bei variantenreichen Einzel- oder Kleinserienprodukten eine hohe Bedeutung.

Die Zusammenführung der Kennzahlen erfolgt daher durch eine Gewichtung der technisch-funktionalen und der produktstrategischen Wertigkeit der Konzepte unter Berücksichtigung der Art des betrachteten Produkts. Die Gewichtung erfolgt mit Faktoren zwischen 0 und 1, wobei die Summe der beiden Faktoren gleich 1 sein muss. Beispielsweise werden die Sprühgeräte den variantenreichen Serienprodukten zugeordnet. Die produktstrategische Modularisierung wird daher mit 0,6 höher gewichtet als die technisch-funktionale Modularisierung mit 0,4.

Zur Berechnung des Gesamtwerts werden die Kennzahlen MCI und MDI in einer gewichteten Summe zusammengeführt. Der Gesamtwert eines Konzepts errechnet sich somit wie folgt:

$$Gw = g_{tf} \cdot MCI + g_{ps} \cdot MDI$$

mit:  $Gw$  = Gesamtwert  
 $g_{tf}$  = Gewichtung der technisch-funktionalen Wertigkeit  
 $g_{ps}$  = Gewichtung der produktstrategischen Wertigkeit

Es muss allerdings festgehalten werden, dass der errechnete Gesamtwert nur ein Anhaltswert für die Konzeptauswahl sein kann. Zur Absicherung müssen die Bewertungsergebnisse kritisch hinterfragt werden und einer qualitativen Konzeptbewertung gegenübergestellt werden.

## 4.9 Ableitung der Baustruktur

Abschließend wird die konstruktive Umsetzung der Baustruktur aus dem Prozess der Produktstrukturen abgeleitet. Dies beinhaltet insbesondere die Definition und Gestaltung der Schnittstellen zwischen den Modulen.

Um die Schnittstellen zwischen den Modulen zu bestimmen, werden der Module Interface Graph und der Module Process Chart als Hilfsmittel eingesetzt. Wie bereits zur Bewertung der technisch-funktionalen Entkopplung im vorangegangenen Abschnitt wird die feingliedrigste Modulaufteilung aus dem MPC abgelesen und in den MIG eingezeichnet (Bild 4.38). Für die Ableitung der Baustruktur findet die Entwicklungsphase allerdings keine Berücksichtigung, da die Entwicklungsmodule nicht unmittelbar baulich umgesetzt werden.

Die Schnittstellen zwischen Modulen können im MIG anhand der Flüsse abgelesen werden, die über Modulgrenzen fließen. Dazu müssen allerdings auch strukturelle Verbindungen ergänzt werden, die bei der Aufnahme des MIG nicht berücksichtigt worden sind.

Da aus dem MPC die feingliedrigste Modulaufteilung abgeleitet wurde, werden die in den MIG eingezeichneten Module im Laufe des Produktlebens nicht weiter aufgebrochen. Für sie kann daher eine integrale Bauweise angestrebt werden. Ein Beispiel dafür ist das Modul Schirm, das grundsätzlich als integrales Bauteil ausgeführt werden kann. Vorteil einer integralen Bauweise ist der Entfall von Verbindungselementen und Montageoperationen. Inwieweit eine integrale Bauweise funktionalen Anforderungen gerecht wird oder fertigungstechnisch sinnvoll ist, muss allerdings geprüft werden.

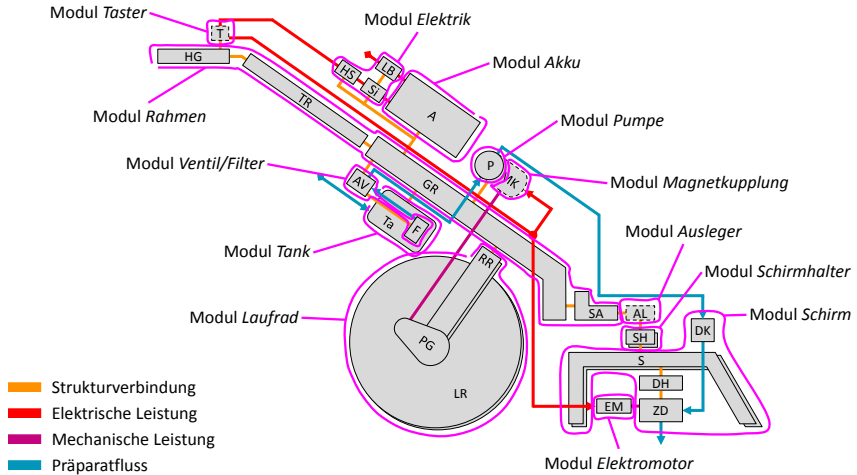


Bild 4.38: Darstellung der Module im Module Interface Graph

Für die Schnittstellen zwischen den Modulen müssen geeignete Verbindungstechniken in Abhängigkeit davon bestimmt werden, in welcher Produktlebensphase das Modul montiert und gegebenenfalls wieder demontiert werden muss. Dabei können in den Phasen der Produkterstellung alle lösbaren oder nicht lösbaren Verbindungstechniken eingesetzt werden. Das Hauptaugenmerk liegt auf der montagegerechten Gestaltung der Fügestellen. Dabei gilt es zu berücksichtigen, dass nicht lösbare Verbindungen und Fügeverfahren ohne Hilfsteile in der Regel wirtschaftlicher herstellbar sind als lösbare Verbindungen und solche mit Hilfsfügeteilen [Lot92].

Grundsätzlich kann der Montageaufwand durch Reduzieren, Vereinheitlichen und Vereinfachen der Fügestellen gesenkt werden [Pah07]. Richtlinien für die montagegerechte Gestaltung von Fügestellen werden im Folgenden zusammengefasst. Weitere Richtlinien können der Literatur zur montagegerechten Produktgestaltung entnommen werden ([Gai81], [And85], [Lot92], [Boo02] oder [Pah07]).

- Reduzieren der Verbindungselemente, zum Beispiel durch Klemm- oder Schnappverbindungen
- Anstreben unmittelbarer Verbindungen ohne Verbindungselemente
- Anstreben selbsttätigen Ausrichtens und Positionierens
- Bevorzugen selbstsichernder Verbindungselemente
- Verwenden gleicher Verbindungselemente

- Bevorzugen einfacher Einstellmöglichkeiten oder Vorsehen von Positionieranschlägen
- Vermeiden mehrachsiger Fügebewegungen und langer Fügewege
- Vorsehen von Fügeerleichterungen durch Einführschrägen
- Gewährleisten guter Zugänglichkeit für Montagewerkzeuge
- Anstreben symmetrischer Konturen, wenn keine Vorzugslage erforderlich ist
- Anstreben geometrischer Erkennungsmerkmale

Während in der Produkterstellung Module zu einem Endprodukt zusammengefasst werden, müssen Module in der Nutzungsphase austauschbar sein. Dies bedingt die Demontage, das Handhaben und die erneute Montage der Module. Schnittstellen der Nutzungsmodule müssen dementsprechend nicht nur montagegerecht gestaltet werden, sondern auch demontagegerecht. Neben den Richtlinien für eine montagegerechte Gestaltung müssen daher die folgenden Richtlinien für die demontagegerechte Gestaltung von Schnittstellen berücksichtigt werden [Moo91]:

- Gewährleisten der Lösbarkeit der Verbindungen von einer Person und ohne Spezialwerkzeug
- Verwenden von Schnellverbindungen wie Knebel, Kippbolzen, Viertelumdrehungsschrauben, Bügelverschlüsse usw.
- Sicherung von leicht zu verlierende Verbindungselemente, zum Beispiel durch Kettchen
- oft zu lösende Verbindungen verschleißfest ausführen
- Verbindungselemente, die verschmutzen oder beschädigt werden können, sind davor zu schützen
- Angriffspunkte zur Demontage vorsehen

Die Anforderungen der Recyclingphase gleichen in Teilen denen der Nutzungsphase, da ebenfalls eine einfache Demontage von Modulen vorzusehen ist. Bei Modulen, die nicht unter Beibehaltung ihrer Form einer neuen Gebrauchsphase zugeführt werden sollen (Produktrecycling), können Verbindungen allerdings auch zerstörend gelöst werden. Grundsätzlich gelten folgende Gestaltungsregeln für recyclinggerechte Verbindungen [Bön99]:

- Minimierung der Anzahl von Verbindungen
- Einsatz leicht lösbarer oder zerstörbarer Verbindungen

- Zugänglichkeit und Freiräume zum Lösen der Verbindungen vorsehen
- lebensdauerangepasste Verbindungen in Hinblick auf Alterung und Korrosion
- Sollbruchstellen und Wirkflächen für eine zerstörende Demontage vorsehen
- Kennzeichnung wesentlicher Verbindungselemente

Für die in Bild 4.38 dargestellte Modulaufteilung des Sprüheräts lassen sich die Anforderungen an die Schnittstellen aus MIG und MPC ablesen. Beispielsweise wird das Modul Schirm in der Endmontage an der Plattform montiert und erst in der Recyclingphase wieder demontiert. Die Verbindung muss dementsprechend montagegerecht und recyclinggerecht gestaltet werden. Die Module Tank, Akku und Elektromotor müssen dagegen auch in der Nutzungsphase demontiert werden können. Insbesondere für den Tank, der im Betrieb vielfach demontiert werden muss, ist eine leicht lösbare und verschleißfeste Verbindungstechnik vorzusehen.

Das endgültige Konzept der modularen Produktfamilie von Sprüheräten ist in Bild 4.39 am Beispiel der Produktstruktur der Vertriebsphase dargestellt.

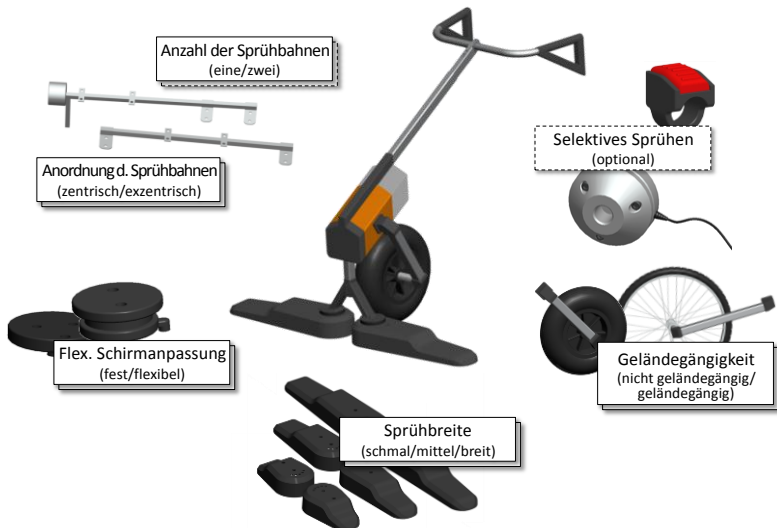


Bild 4.39: Konzept der modularen Produktfamilie von Sprüheräten (Phase Vertrieb)

In der Vertriebsphase ermöglicht die entwickelte Modularisierung die Bildung von 96 Produktvarianten auf Grundlage von einer Produktplattform und 11 varianten Modulen. Damit kann die gesamte vom Kunden geforderte Vielfalt abgebildet werden. Wie dem bereits in Bild 4.34 dargestellten Module Process Chart der Produktfamilie ent-

nommen werden kann, wird die Modularisierung aber auch den Anforderungen der verbleibenden Produktlebensphasen gerecht. Beispielsweise können Module vorgefertigt von Lieferanten bezogen werden oder Funktionstests können auf Modulebene durchgeführt werden.

## 5 Validierung der Methode in einer Fallstudie

Im Rahmen der Validierung gilt es zu überprüfen, ob die Methode zur Entwicklung modularer Produktfamilien den an sie gestellten Anforderungen gerecht wird. Die Methode wird daher in einer Einzelfallstudie angewendet. Eine Fallstudie ist laut Yin eine empirische Untersuchung, die auf zeitnahe Phänomene in ihrem realen Kontext angewendet wird, insbesondere wenn die Grenzen zwischen Phänomen und Kontext nicht klar sind (vgl. [Yin03]). Eine Einzelfallstudie kann für die Validierung einer Methode verwendet werden, wenn ein Anwendungsfall vorliegt, der die Prämissen der Methode besonders gut widerspiegelt.

Die Methode zur Entwicklung modularer Produktfamilien wurde an einem praktischen Beispiel aus der Industrie erfolgreich angewendet. Aus diesem Anwendungsfall wurde die Fallstudie abgeleitet, die im Folgenden abgewandelt vorgestellt wird. Dazu wird im ersten Schritt die Planung der Fallstudie dargelegt, die der eigentlichen Anwendung der Methode vorausgeht. Im Rahmen der Planung werden die in der Fallstudie zu überprüfenden Hypothesen aufgestellt, die Eignung des Anwendungsfalls wird untersucht und der Datenbedarf der Fallstudie wird ermittelt. Nach Anwendung der Methode erfolgt die Auswertung der Fallstudie. Dies beinhaltet die Prüfung der Hypothesen sowie die Ableitung von Verbesserungspotentialen.

### 5.1 Planung der Fallstudie

#### 5.1.1 Prüfungshypothesen

Um zu bewerten, in wie weit die Methode zur Entwicklung modularer Produktfamilien den an sie gestellten Anforderungen gerecht wird, werden die Ziele der Methode als Hypothesen formuliert und in der Fallstudie überprüft. Diese Prüfungshypothesen können anhand des in Abschnitt 3.4 abgeleiteten Forschungsbedarfs aufgestellt werden. Damit ergeben sich die folgenden Hypothesen:

1. *Die Methode unterstützt bei der Entwicklung von modularen Produktfamilien, die eine Konfiguration einer großen Vielfalt von Produktvarianten auf Grundlage einer kleinen internen Vielfalt erlauben.*
2. *Unter Anwendung der Methode können die Potentiale modularer Produktstrukturen im gesamten Produktleben erschlossen werden.*
3. *Die Betrachtung modularer Produktstrukturen als Prozess ermöglicht einen gezielten und strukturierten Umgang mit den vielfältigen und teilweise widersprüchlichen Anforderungen aus allen Produktlebensphasen.*
4. *Der Module Interface Graph unterstützt den Anwender bei der Berücksichtigung von geometrischen Randbedingungen.*
5. *Die variantengerechte Produktgestaltung unterstützt die Entwicklung einer variantengerechten Produktstruktur.*
6. *Das Bewertungsverfahren ermöglicht eine aussagekräftige Bewertung von modularen Produktfamilien bei geringem Aufwand zur Erhebung der Kennzahlen.*
7. *Die Vorgehensweise, die verwendeten Visualisierungsmethoden und das Bewertungsverfahren sind leicht nachvollziehbar und gut verständlich.*

### **5.1.2 Anwendungsfall**

Die Methode zur Entwicklung modularer Produktfamilien wird an einem praktischen Industriebeispiel validiert. Dabei handelt sich um eine Produktfamilie mit großer externer Vielfalt, für die eine geringe interne Vielfalt und eine einfache Konfigurierbarkeit von Produktvarianten angestrebt werden, für die aber auch die Potentiale modularer Produktstrukturen in anderen Produktlebensphasen erschlossen werden sollen. Dieser Anwendungsfall eignet sich als Fallstudie für die Validierung der Methode, da die verfolgten Ziele denen der Methode entsprechen. Darüber hinaus stellt die Entwicklung der Produktfamilie ein reguläres Entwicklungsprojekt bei einem Industrieunternehmen dar. Es kann daher davon ausgegangen werden, dass die Fallstudie einen allgemeingültigen Anwendungsfall im Unternehmensumfeld mit den entsprechenden Zeit-, Kosten und Qualitätszielen widerspiegelt.

Die Zugänglichkeit der Daten zur Auswertung der Fallstudie ist sichergestellt, da der Industriepartner den Zugang zu allen erforderlichen Daten, wie beispielsweise zu den Ergebnissen von Kundenbefragungen, gewährt. Darüber hinaus ist die Charakteristik des Anwendungsfalls als reguläres Entwicklungsprojekt hilfreich, da, im Gegensatz zu einer rein akademischen, künstlich ausgelösten Fallstudie, mit der uneingeschränkten Unterstützung durch die Projektteilnehmer gerechnet werden kann.

### 5.1.3 Datenerhebung

Vor Durchführung der Fallstudie muss sichergestellt werden, dass die zur Überprüfung der Hypothesen erforderlichen Daten erhoben werden können und eine ausreichende Aussagekraft mitbringen. Folgende Daten sind zur Validierung der Hypothesen zu berücksichtigen:

1. Mit Hilfe der Methode sollen Produktfamilien in einer Weise strukturiert werden, die eine Konfiguration von Produktvarianten auf Grundlage einer kleinen internen Vielfalt erlaubt. Es muss daher sowohl die Konfigurierbarkeit von Produktvarianten als auch das Verhältnis von interner zu externer Vielfalt bewertet werden.
2. Unter Anwendung der Methode sollen Potentiale in allen Produktlebensphasen erschlossen werden. Dies kann durch die Untersuchung der entwickelten Produktstrukturen sowie durch die Befragung der Vertreter der entsprechenden Unternehmensbereiche überprüft werden.
3. Die Betrachtung modularer Produktstrukturen als Prozess soll dem Anwender einen zielgerichteten Umgang mit den vielfältigen und teilweise widersprüchlichen Anforderungen ermöglichen. In wie weit dies in der Fallstudie erreicht wurde, kann anhand der erkannten und gelösten Widersprüche bewertet werden.
4. Die Unterstützung des Anwenders bei der Berücksichtigung von geometrischen Randbedingungen durch den Module Interface Graph ist anhand von Beobachtungen im Projektverlauf und Befragungen nach Projektende zu klären.
5. Um zu überprüfen, ob durch die variantengerechte Gestaltung die Produktstrukturierung unterstützt wird, sind die Auswirkungen dieses Arbeitsschritts auf die modulare Produktstruktur zu untersuchen.
6. In wie weit das entwickelte Kennzahlensystem eine aussagekräftige Bewertung von Produktfamilien ermöglicht, kann durch den Vergleich der Bewertung des im Rahmen der Fallstudie entwickelten Konzepts anhand des Kennzahlensystems und der qualitativen Bewertung durch die Projektteilnehmer überprüft werden. Der Aufwand für die Erhebung der Kennzahlen kann aus der Anwendung selbst bestimmt werden.
7. Die Überprüfung der Hypothese, dass die Vorgehensweise, die verwendeten Visualisierungsmethoden und das kennzahlenbasierte Bewertungsverfahren leicht verständlich und gut nachvollziehbar sind, kann durch Beobachtungen während der Durchführung der Fallstudie sowie durch die Befragung der Teilnehmer im Anschluss erfolgen.

Im Folgenden wird die Durchführung der Fallstudie vorgestellt. Die Überprüfung der Hypothesen erfolgt in der anschließenden Auswertung.

## 5.2 Durchführung der Fallstudie

Bei der Fallstudie handelt es sich um die Weiterentwicklung einer bestehenden Produktfamilie, die um mehrere variante Merkmale erweitert wird. Dieser Anwendungsfall stellt ein reales Entwicklungsprojekt bei einem Industriepartner dar, welches inhaltlich auf das fiktive Beispiel einer Produktfamilie von Tauchpumpen modifiziert werden musste. Die bestehenden Produktzusammenhänge entsprechen dem realen Beispiel, sodass die Validierung daran erläutert werden kann. Die Bearbeitung erfolgte auf Seiten des Industriepartners durch das Entwicklungsteam der Produktfamilie sowie durch Experten aus den Fachbereichen Beschaffung, Herstellung, Vertrieb und Nutzung.

Die Fallstudie wurde in Zusammenarbeit mit KIPP durchgeführt. Eine Zusammenfassung der Ergebnisse der Fallstudie aus Sicht der variantengerechten Produktgestaltung können seiner Arbeit entnommen werden [Kip11].

### 5.2.1 Fallbeispiel einer Produktfamilie von Tauchpumpen

Bei dem abgeleiteten Fallbeispiel handelt es sich um eine Produktfamilie von Tauchpumpen, die für den industriellen Einsatz ausgelegt ist. Tauchpumpen sind grundsätzlich so konzipiert, dass sie in die zu fördernde Flüssigkeit eingetaucht werden können. Sie finden typischerweise zum Auspumpen, Leerpumpen oder Umwälzen von klaren oder verschmutzten Flüssigkeiten aus Behältern, Becken oder Gruben Verwendung. Dabei wird die Flüssigkeit von einem Pumpenrad gefördert und über einen Druckschlauch weitergeleitet. Ein Beispiel für eine Tauchpumpe zeigt Bild 5.1.

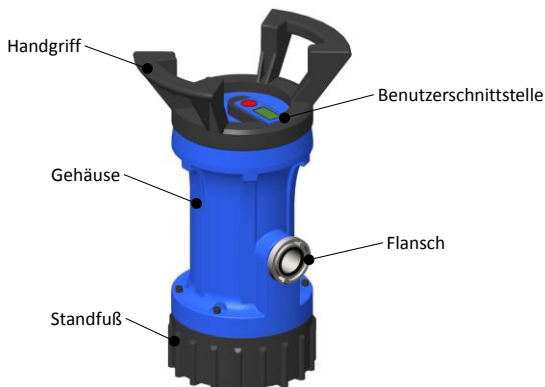


Bild 5.1: Beispiel für eine Tauchpumpe

Die Besonderheit der betrachteten Produktfamilie ist, dass die Tauchpumpen mit einem Akku betrieben werden und somit ohne externe Stromversorgung eingesetzt werden können. Ein vorgeschalteter Filter gestattet es, auch stark verschmutzte Flüssigkeiten zu fördern. Im Umwälzbetrieb ermöglicht der Filter zudem die Verwendung der Tauchpumpen zum Reinigen von Flüssigkeiten.

### 5.2.2 Entwicklung einer modularen Produktfamilie von Tauchpumpen

Zur Anwendung in der Fallstudie wurde die Methode zur Entwicklung modularer Produktfamilien als Workshop-Reihe aufbereitet. Die Reihe umfasst acht Workshops, die durch zusätzliche Vorbereitungsstermine ergänzt wurden.

Die Zuordnung der Workshops zu den Arbeitsschritten der Methode ist in Bild 5.2 dargestellt. Ausgangspunkt war sowohl in der Methode als auch in der Workshop-Reihe die Definition der Projektziele. Daran schloss sich die Ist-Aufnahme an, die aufgrund des hohen Arbeitsaufwands in zwei Workshops unterteilt wurde. Im ersten Workshop wurde die externe Vielfalt der Produktfamilie in einem Merkmalsbaum erfasst, während im zweiten Workshop die interne Vielfalt im Module Interface Graph aufgenommen wurde. Da es sich bei der Fallstudie um die Weiterentwicklung einer bestehenden Produktfamilie handelt, wurden Funktions- und Wirkstruktur nicht im Workshop erarbeitet, sondern auf Grundlage der bestehenden Produktfamilie erstellt.

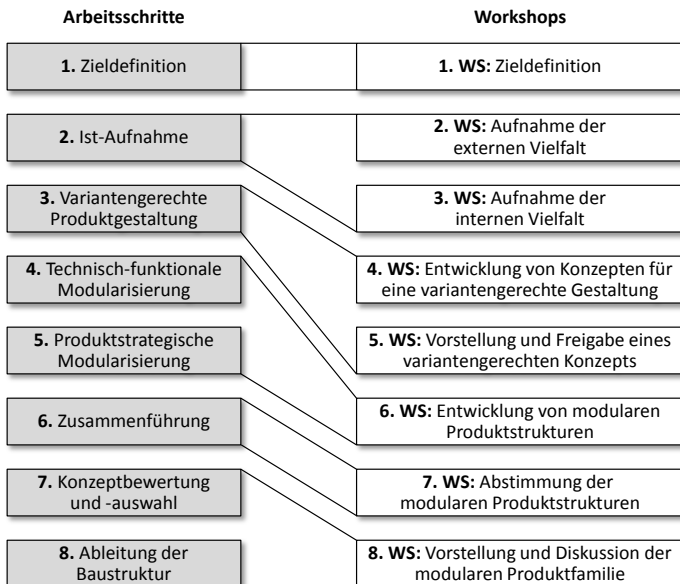


Bild 5.2: Zuordnung der Arbeitsschritte der Methode zu den Workshops der Fallstudie

Der nachfolgende Arbeitsschritt der Methode, die variantengerechte Produktgestaltung, wurde ebenfalls in zwei Workshops unterteilt. Im vierten Workshop der Reihe wurden Konzepte für die variantengerechte Gestaltung der Produktfamilie entwickelt, die im anschließenden, fünften Workshop vorgestellt und für die anschließende Modularisierung freigegeben wurden.

Die Modularisierung erfolgte auch in zwei Workshops, wobei der erste Workshop allerdings in mehrere Einzeltermine aufgeteilt wurde. In den Einzelterminen wurden die technisch-funktionale Modularisierung sowie die produktstrategischen Modularisierungen der Phasen Produktentwicklung, Beschaffung, Herstellung, Vertrieb und Nutzung entwickelt. Einer recyclinggerechten Produktstruktur wurde nur eine untergeordnete Bedeutung zugesprochen und daher im Rahmen der Fallstudie nicht betrachtet. Im zweiten Modularisierungs-Workshop wurden die unterschiedlichen Produktstrukturen im Module Process Chart zusammengeführt.

In den Modularisierungs-Workshops wurden zwei Konzepte für die Modularisierung der Produktfamilie entwickelt, wobei im ersten Konzept die Reduzierung der Schnittstellen und im zweiten Konzept die Umsetzung der produktstrategischen Anforderungen im Vordergrund stand. Die Auswahl eines der beiden Konzepte sowie die Ableitung der Baustuktur für das ausgewählte Konzept erfolgten im Anschluss an die Workshops.

Im abschließenden Workshop wurde das methodische Vorgehen noch einmal zusammenfassend dargestellt sowie das entwickelte Konzept für die modulare Produktfamilie von Tauchpumpen vorgestellt. Anschließend wurden das Vorgehen sowie das Konzept von den Anwesenden diskutiert und bewertet.

Im Folgenden wird die Fallstudie im Detail vorgestellt. Dabei orientiert sich die Vorstellung an den durchgeführten Workshops.

### 5.2.2.1 Zieldefinition

Die Zieldefinition im ersten Workshop bildete den Ausgangspunkt für die Entwicklung der modularen Produktfamilie. Teilnehmer waren die Mitglieder des Entwicklungsteams der Produktfamilie von Tauchpumpen sowie Vertreter aus den am Projekt beteiligten Fachbereichen. Um ein gemeinsames Verständnis für modulare Produktfamilien zu erzeugen, wurden zu Beginn des Workshops die fünf Merkmale modularer Produkte (vgl. Abschnitt 2.1.4) sowie die Potentiale und Grenzen modularer Produktfamilien (vgl. Abschnitt 2.2) vorgestellt. Darauf aufbauend wurden die Ziele bei der Entwicklung der modularen Produktfamilie von Tauchpumpen in einer Kartenabfrage aufgenommen.

Die Vielzahl der von den Teilnehmern des Workshops geäußerten Ziele konnte in die drei Gruppen *Sicht des Kunden*, *Produktion/Prozess/Kosten* und *Funktion/Schnittstellen* eingeordnet werden. Im Sinne der ersten Gruppe soll insbesondere eine individuelle

Kombinierbarkeit von Modulen bei geringer Komplexität und eine zielgerichtete Ausrichtung der Produktvarianten auf die Kundenwünsche und -bedürfnisse sichergestellt werden. Zielsetzungen der Gruppe Produktion/Prozess/Kosten sind eine kundennahe Variantenbildung sowie eine hohe Kommunalität von Komponenten, Werkstoffen und Prozessen. Aus Sicht der Gruppe Funktion/Schnittstellen wurden die Ziele einfache und einheitliche Schnittstellen, projektübergreifende Abstimmung und zukunftssichere Modularisierung genannt.

Abgeschlossen wurde der Termin mit der Vorstellung der Workshop-Reihe sowie der Planung der weiteren Termine und der Festlegung der dafür erforderlichen Teilnehmer.

### 5.2.2.2 Aufnahme der externen Vielfalt

Der Aufnahme der externen Vielfalt ging die Analyse einer Kundenbefragung voraus, die bereits im Vorfeld des Projekts durch den Industriepartner erstellt worden war. Auf dieser Grundlage wurde ein Vorschlag für einen Merkmalsbaum der Produktfamilie erstellt und im Workshop bei den Verantwortlichen des Produktprogramm-Managements sowie den Mitgliedern des Entwicklungsteams zur Diskussion gestellt. Ergebnis des Workshops war eine vollständige und abgestimmte Zusammenstellung der Unterscheidungsmerkmale der Produktfamilie und deren Ausprägungen.

Die Unterscheidungsmerkmale der Produktfamilie werden im Folgenden erläutert. Die Reihenfolge entspricht dabei der im Workshop bestimmten, absteigenden Relevanz der Merkmale aus Kundensicht. Ergänzend fasst der Merkmalsbaum in Bild 5.3 die geplante Vielfalt der Produktfamilie zusammen.

**Unterscheidungsmerkmal Explosionsschutz:** Neben der Grundauführung der Tauchpumpen sollen auch explosionsgeschützte Produktvarianten am Markt angeboten werden. Durch explosionsgeschützte Tauchpumpen wird es dem Anwender ermöglicht, auch leicht brennbare oder explosive Flüssigkeiten wie zum Beispiel Benzin, Petroleum oder Nitroverdünnung zu fördern.

**Unterscheidungsmerkmal Filterfeinheit:** Um unterschiedliche Partikelgrößen aus der Flüssigkeit abscheiden zu können, soll die Tauchpumpe mit einem Oberflächenfilter für grobe Partikel, einem Tiefenfilter für feine Partikel oder einem kombinierten Filter ausgestattet werden können.

**Unterscheidungsmerkmal Betriebsdauer:** Es werden zwei Varianten der Tauchpumpe mit unterschiedlicher Betriebsdauer entwickelt. Eine Betriebsdauer von zwei oder vier Stunden soll angeboten werden.

**Unterscheidungsmerkmal Externe Bedieneinheit:** Durch eine optionale externe Bedieneinheit soll die Bedienung der Pumpe aus der Entfernung ermöglicht werden. In der Grundauführung erfolgt die Bedienung direkt am Gerät.

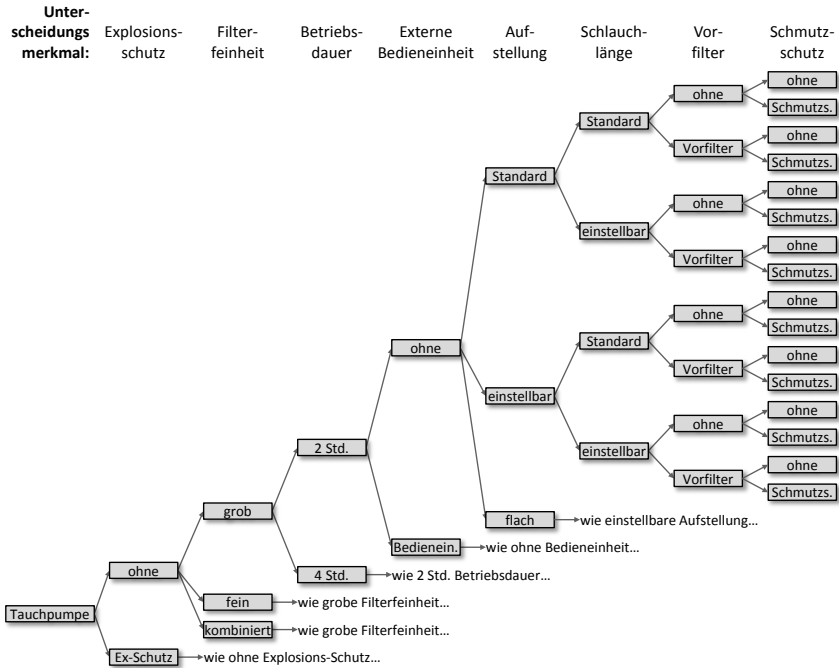


Bild 5.3: Merkmalsbaum der Produktfamilie von Tauchpumpen

**Unterscheidungsmerkmal Aufstellung:** Neben der Tauchpumpe mit Standardstandfuß werden zwei weitere Ausprägungen angeboten. Durch einen verstellbaren Standfuß kann die Tauchpumpe auch auf unebenem Untergrund sicher aufgestellt werden. Zusätzlich soll eine Produktvariante flachsaugend ausgelegt werden. Das heißt, der Standfuß erlaubt eine Absenkung der Pumpe, so dass eine Absaugung bis zu einer sehr geringen Flüssigkeitshöhe ermöglicht wird.

**Unterscheidungsmerkmal Schlauchlänge:** Der Schlauch wird in zwei Ausprägungen angeboten. Entweder in einer Standardlänge oder in einer in der Länge verstellbaren Variante.

**Unterscheidungsmerkmal Vorfilter:** Ein optionaler Vorfilter zur Abscheidung von groben Partikeln kann die Schmutzlast am Hauptfilter reduzieren.

**Unterscheidungsmerkmal Schmutzschutz:** Durch optionale und auswechselbare Cover können die Tauchpumpen vor Schmutz geschützt werden.

### 5.2.2.3 Aufnahme der internen Vielfalt

Im dritten Workshop wurde die interne Vielfalt der Produktfamilie mit den Mitgliedern des Entwicklungsteams aufgenommen. Als Grundlage diente ein im Vorfeld erstellter Module Interface Graph der Tauchpumpen, der im ersten Teil des Workshops diskutiert und überarbeitet wurde. Ergebnis war der in Bild 5.4 dargestellte MIG der Produktfamilie.

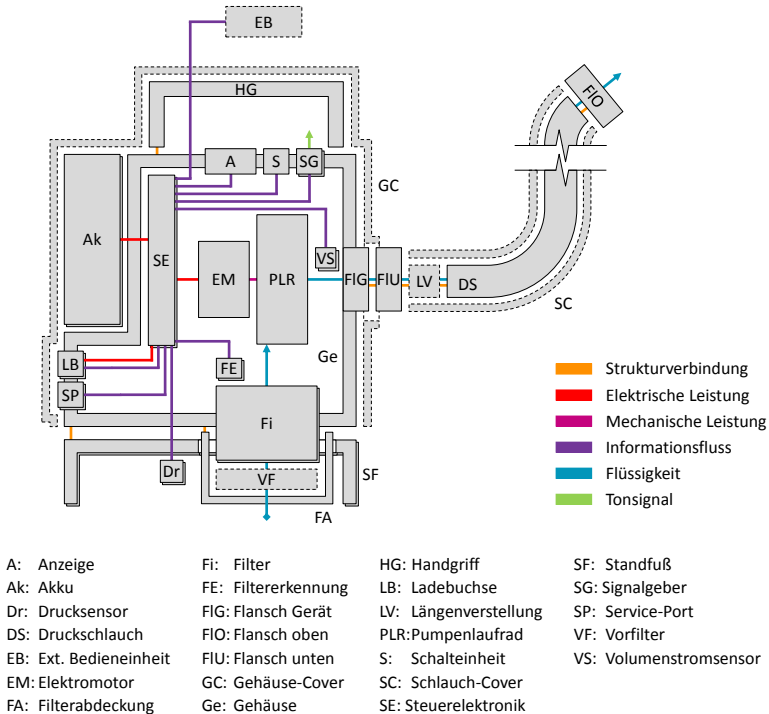


Bild 5.4: Module Interface Graph der Produktfamilie von Tauchpumpen

Wie im MIG dargestellt, wird die Flüssigkeit vom Pumpenlaufrad über Vorfilter und Filter angesaugt und über den Schlauch gefördert. Das Pumpenlaufrad wird von einem Elektromotor angetrieben, der von der Steuerelektronik angesteuert und über den Akku mit Energie versorgt wird. Der Akku kann wiederum über eine Ladebuchse aufgeladen werden. Über den daneben angeordneten Service-Port können Wartungsdaten ausgelesen werden oder neue Versionen der Gerätesoftware aufgespielt werden. Die Steuerelektronik wird über einen Sensor zur Filtererkennung, einen Sensor zur Messung des geförderten Volumenstroms sowie einen Drucksensor zur Messung des Flüssigkeitsdrucks auf Ansaughöhe mit den erforderlichen Eingangsgrößen versorgt. Als

Benutzerschnittstelle stehen am Gerät ein Schalter, eine Anzeige und ein akustischer Signalgeber zur Verfügung. Über den Schalter kann das Gerät eingeschaltet und der Förderstrom eingestellt werden, während die Anzeige den Benutzer über den Förderstrom der Pumpe und den Ladungszustand des Akkus informiert. Der Signalgeber weist den Benutzer durch einen Warnton auf Betriebsstörungen hin. Dies kann das Absinken des Förderstroms, beispielsweise aufgrund eines zugesetzten Filters, oder ein niedriger Ladungsstand des Akkus sein. Neben der an der Pumpe verbauten Benutzerschnittstelle kann die Bedienung auch über eine optional verfügbare externe Bedieneinheit erfolgen.

Um die Auswirkungen der Unterscheidungsmerkmale auf die Komponenten der Produktfamilie zu ermitteln, wurden die varianten Merkmale im zweiten Teil des Workshops den Komponenten gegenübergestellt. Dabei zeigte sich, dass der Explosionsschutz eine globale Auswirkung auf die Komponenten der Produktfamilie hat. Damit eine Tauchpumpe als explosionsgeschützt zugelassen werden kann, müssen Komponenten aus antistatischem Material gefertigt werden, elektrische Bauteile entsprechend zertifiziert sein und elektrische Kontakte vergossen werden. Um die resultierende Vielfalt zu begrenzen, wurde festgelegt, dass Komponenten, die kostengünstig überdimensioniert werden können, in allen Produktvarianten explosionsgeschützt ausgelegt werden. Als Grenzwert für eine entsprechende Überdimensionierung wurden 25% Mehrkosten festgelegt. Damit werden die Komponenten Gehäuse, Handgriff, Flansch am Grundgerät, Elektromotor, Pumpenlaufrad, Vorfilter, Filter, Standfuß sowie die Schmutzschutzcover grundsätzlich explosionsgeschützt ausgeführt. Darüber hinaus wird die externe Bedieneinheit nur in einer explosionsgeschützten Variante angeboten, da für diese Option nur geringe Stückzahlen zu erwarten sind und der zusätzliche Aufwand für eine Differenzierung daher vermieden werden soll. Bei Schalter und Anzeige ist dagegen grundsätzlich keine Differenzierung notwendig, da die geringe elektrische Leistung dieser Komponenten keinen Explosionsschutz erforderlich macht.

Im Gegensatz zu Schalter und Anzeige müssen die verbleibenden elektronischen Komponenten explosionsgeschützt ausgeführt werden. Dies bringt allerdings nicht nur Mehrkosten für die explosionsgeschützte Ausführung der Komponenten mit sich, sondern aufgrund des Vergusses der elektrischen Kontaktstellen auch ein deutliches Mehrgewicht der explosionsgeschützten Tauchpumpen.

Die neben dem Explosionsschutz verbleibenden Unterscheidungsmerkmale wirken sich auf einzelne Komponenten aus. So sind die externe Bedieneinheit, der Vorfilter, die Längenverstellung sowie das Geräte- und Schlauchcover aufgrund der zugeordneten Unterscheidungsmerkmale optionale Komponenten. In mehreren Ausprägungen liegen dagegen die Komponenten Standfuß, Akku und Filter vor. Während der Standfuß entsprechend dem Unterscheidungsmerkmal Aufstellung neben der Standardausführung

auch verstellbar oder flachsaugend ausgeprägt werden kann, ist der Akku von den Unterscheidungsmerkmalen Explosionsschutz und Betriebsdauer betroffen. Der Filter wird entsprechend der erforderlichen Filterfeinheit als Oberflächen-, Tiefen- oder kombinierter Filter ausgeführt.

Den Abschluss des dritten Workshops bildete die Zuordnung der Komponenten zu Kostenklassen. Da in der frühen Entwicklungsphase noch keine Angebote von Zulieferern vorlagen, erfolgte die Zuordnung auf Grundlage von Abschätzungen.

### 5.2.2.4 Entwicklung von Konzepten für eine variantengerechte Gestaltung

Im Vorfeld des vierten Workshops wurde das in Bild 5.5 ausschnittsweise dargestellte Variety Allocation Model der Produktfamilie erstellt. Aus dem Modell geht hervor, dass die Gestaltung der Tauchpumpen bereits weitgehend variantengerecht ist. Unterscheidungsmerkmale wie Vorfilter, Filterfeinheit und Aufstellung sind eindeutig einer Komponente zugeordnet. Das Unterscheidungsmerkmal Explosionsschutz wirkt sich zwar auf eine Vielzahl von Komponenten aus, zur Vermeidung erscheint allerdings nur eine Überdimensionierung in Form einer explosionsgeschützten Ausführung der Komponenten in allen Produktvarianten umsetzbar. Da die Überdimensionierung bereits zuvor berücksichtigt wurde, findet sie keinen Eingang in die variantengerechte Gestaltung.

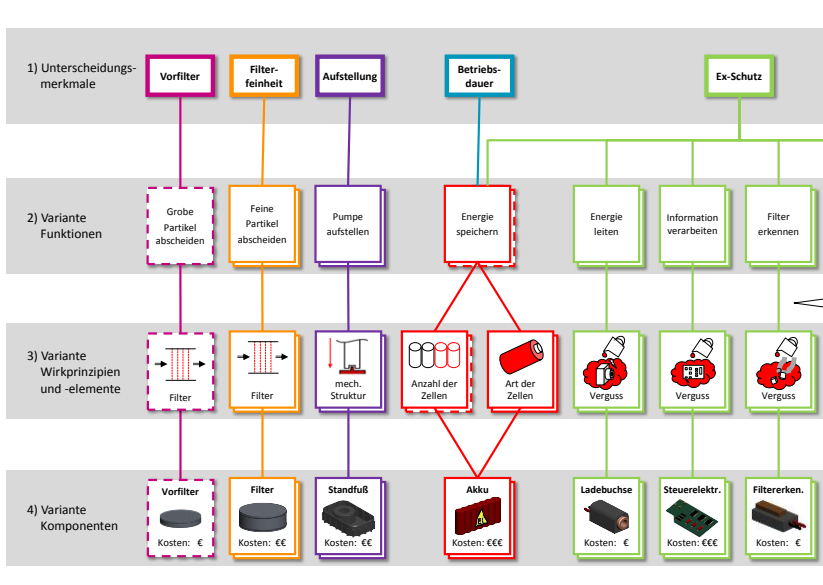


Bild 5.5: Variety Allocation Model der Produktfamilie von Tauchpumpen in Anlehnung an [Kip11] (Ausschnitt)

Eine aus Sicht der variantengerechten Gestaltung ungünstige Ausführung liegt allerdings bei der Komponente Akku vor. Diese Komponente ist nicht eindeutig einem Unterscheidungsmerkmal zugeordnet, sondern von den beiden varianten Merkmalen Betriebsdauer und Explosionsschutz abhängig. Die Folge ist, dass der Akku in vier Ausprägungen (für 2 oder 4 Stunden Betriebsdauer und explosionsgeschützt oder nicht explosionsgeschützt) vorliegen kann. Da es sich darüber hinaus beim Akku um eine Komponente der höchsten Kostenklasse handelt, wurde im vierten Workshop nach Lösungsansätzen für eine konstruktive Umgestaltung der Komponente gesucht.

Die Lösungssuche wurde in Form eines Brainstormings durchgeführt. In diesem Rahmen wurde der Ansatz entwickelt, den Akku aus zwei separaten Zellenpaketen zusammenzusetzen. Es wird ein Akkugehäuse verwendet, das mit ein oder zwei Zellenpaketen bestückt werden kann. Somit kann eine Betriebsdauer von 2 oder 4 Stunden durch die Anzahl der Akkupakete realisiert werden. Die Akkupakete können explosionsgeschützt oder nicht explosionsgeschützt ausgeführt werden.

Ergebnis der variantengerechten Gestaltung war ein Satz von Komponenten, der durch die eindeutige Abbildung der Unterscheidungsmerkmale der Produktfamilie die Grundlage für die Entwicklung einer modularen Produktstruktur bietet.

#### **5.2.2.5 Vorstellung und Freigabe eines variantengerechten Konzepts**

Im Rahmen des vierten Workshops wurde das Konzept für die variantengerechte Gestaltung der Produktfamilie vorgestellt und für die nachfolgende Modularisierung freigegeben. Anschließend wurde das Vorgehen zur Modularisierung eingehend erläutert und die folgenden Termine wurden geplant.

#### **5.2.2.6 Entwicklung von modularen Produktstrukturen**

Die Entwicklung von modularen Produktstrukturen für die Produktfamilie von Tauchpumpen erfolgte in mehreren Einzelterminen. In den Terminen wurde zuerst eine technisch-funktionale Modularisierung entwickelt, bevor die produktstrategischen Modularisierungen der betrachteten Produktlebensphasen erstellt wurden. Da keine Komponenten oder Module der Produktfamilie vom Industriepartner selbst gefertigt oder montiert werden, wurde die Abfolge der Produktlebensphasen auf den vorliegenden Fall angepasst.

Ausgangspunkt ist weiterhin die Produktentwicklung. Im Gegensatz zu der im vorangehenden Kapitel vorgestellten Abfolge der Phasen, schließen sich allerdings die Phasen Herstellung, Beschaffung und Vertrieb an. Entsprechend dieser Abfolge werden die Module beim Zulieferer hergestellt, an den Industriepartner geliefert und von diesem vertrieben. Die Variantenbildung erfolgt erst beim Vertriebspartner. Darüber hinaus wird im Anschluss an die Produkterstellung ausschließlich die Nutzungsphase betrach-

tet. Wie bereits zu Beginn des Kapitels erläutert, wird das Recycling der Tauchpumpen nicht im Rahmen der Produktstrukturierung berücksichtigt.

Im Folgenden wird zuerst auf die technisch-funktionale Modularisierung eingegangen, bevor die Einzeltermine zur produktstrategischen Modularisierung vorgestellt werden.

### **Technisch-funktionale Modularisierung**

Für die Entwicklung der technisch-funktionalen Modularisierung wurden die im MIG eingezeichneten Flüsse zuerst in eine Rangfolge gebracht. Der Hauptumsatz der Tauchpumpen wird demnach von der zu fördernden Flüssigkeit gebildet. Die Nebenumsätze sind in abnehmender Relevanz die elektrische Leistung, der Informationsfluss, die strukturellen Verbindungen, die mechanische Leistung sowie das Tonsignal.

Im Anschluss wurden die Modularisierungs-Heuristiken auf den MIG der Tauchpumpen angewendet. Daraus ergaben sich fünf Module einer technisch-funktionalen Modularisierung. Da die zu fördernde Flüssigkeit den Hauptumsatz der Pumpen darstellt, bilden die von ihr durchflossenen Komponenten ein Modul (Bild 5.6). Ebenfalls aufgrund der Heuristik *Dominanter Fluss* wurden die im Informationsfluss liegenden Komponenten zu einem Modul zusammengefasst.

Weitere Module wurden von den Komponenten Akku 1, Akku 2 und Elektromotor gebildet. Die Akkus bilden aufgrund des elektrischen Leistungsflusses ein gemeinsames Modul, während der Motor elektrische in mechanische Energie umwandelt und daher ein eigenes Modul bildet.

Als verbleibendes Modul wurden die Komponenten Handgriff, Gehäuse, Filterabdeckung und Standfuß zusammengefasst, da sie aufgrund der strukturellen Verbindungen und geometrischen Abhängigkeiten in enger Beziehung stehen. Diesem Modul wurden darüber hinaus das Gehäuse- und das Geräte-Cover zugewiesen, da diese Komponenten ebenfalls eine enge geometrische Beziehung zum Modul haben. Zugunsten der Übersichtlichkeit wurde das gebildete Modul *Strukturverbindung* in den MIG in Bild 5.6 nicht eingezeichnet.

### **Produktstrategische Modularisierung**

Die produktstrategischen Modularisierungen der Produktlebensphasen wurden in mehreren Einzelterminen erarbeitet. Im ersten Teil der Termine wurden jeweils die Modultreiber ausprägungen der Phasen aufgenommen. Dazu wurden zuerst die Modultreiber der betrachteten Produktlebensphase vorgestellt und erläutert. Im Anschluss wurden die Modultreiber von den Experten des betreffenden Fachbereichs in einer Zurufliste durch Ausprägungen detailliert.

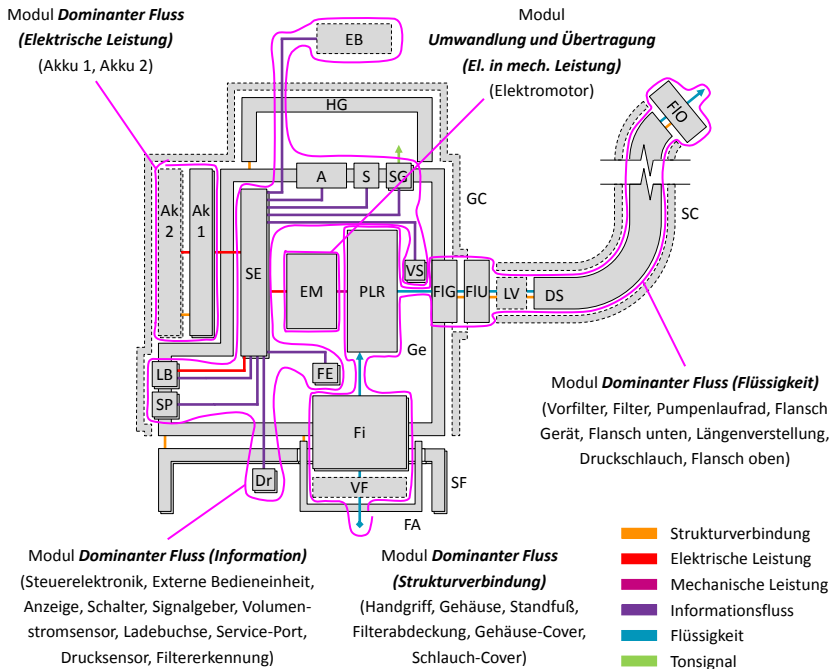


Bild 5.6: Technisch-funktionale Modularisierung der Produktfamilie von Tauchpumpen

Im zweiten Teil der Termine wurden die Modultreiberausprägungen aufgenommen und die Beziehungen zwischen den Ausprägungen und den Komponenten in den Modularisierungs-Netzplänen bewertet. Die eigentliche Entwicklung von Produktstrukturen erfolgte erst in der Nachbearbeitung der Termine auf Grundlage der Netzpläne und des MIG. Die daraus hervorgegangenen Produktstrukturen werden im Folgenden vorgestellt.

### Produktentwicklung

Aus Sicht der Produktentwicklung müssen mögliche Technologiewechsel als produktstrategische Treiber für die Modularisierung der Tauchpumpen berücksichtigt werden. Diese werden durch den Modultreiber *Zeitliche Varianz* erfasst.

Nach Einschätzung der Projektbeteiligten aus dem Bereich Entwicklung werden sich Technologiewechsel auf die *Energiespeicherung*, die *Filtertechnologie*, die *Anzeigetechnologie* sowie die Einführung einer *bedarfsgerechten Regelung* des Volumenstroms beziehen. Bei einer bedarfsgerechten Regelung wird die Leistung der Tauchpumpe an die zu fördernde Flüssigkeit angepasst und somit der Energieverbrauch der Pumpe verringert.

Die abgeleiteten Modultreiberausprägungen wurden der zuvor entwickelten, technisch-funktionalen Modularisierung gegenübergestellt. Anhand dessen wurde die in Bild 5.7 dargestellte modulare Produktstruktur abgeleitet. In dieser Produktstruktur bilden die Filter aufgrund des möglichen Technologiewechsels ein eigenes Modul. Da die Akkus bereits in der technisch-funktionalen Produktstruktur ein eigenes Modul bilden, führt die Berücksichtigung eines möglichen Wechsels der Energiespeichertechnologie nicht zu einer Änderung der Produktstruktur.

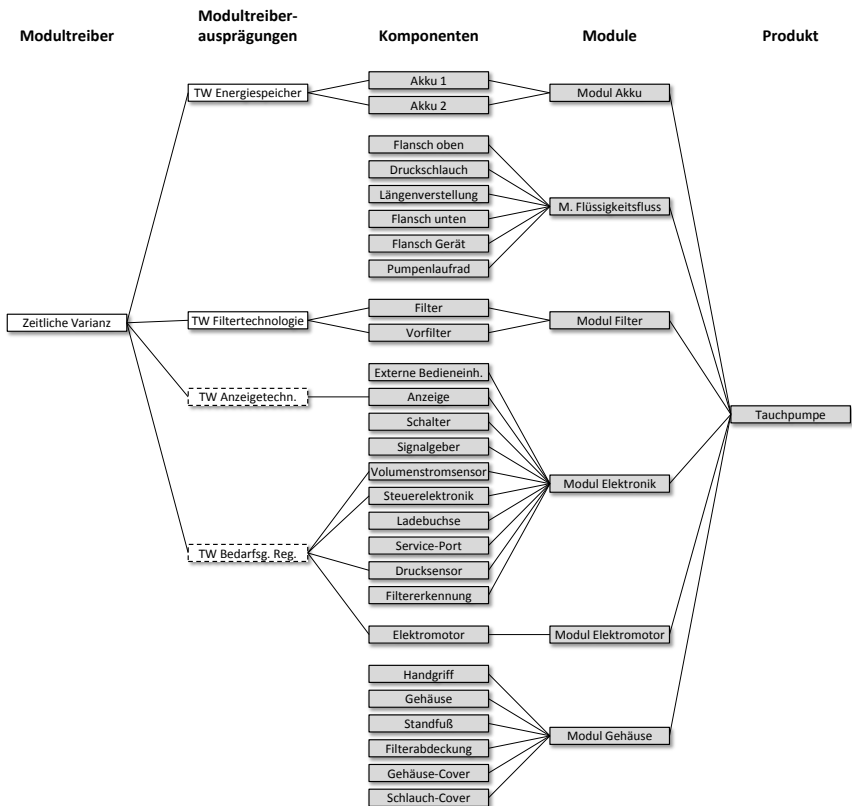


Bild 5.7: Modularisierungs-Netzplan der Phase Produktentwicklung

Da die Modultreiberausprägungen *Anzeigetechnologie* und *Bedarfsgerechte Regelung* von den Projektbeteiligten als Treiber mit einer geringen Relevanz bewertet wurden und die betroffenen Komponenten technisch-funktional eng mit weiteren Komponenten verknüpft sind, finden diese Ausprägungen keinen Eingang in die Produktstruktur.

## Herstellung

In der Herstellungsphase ergeben sich die Gründe für die Bildung von Modulen aus den Treibern *Prozess* und *Separates Testen*. Der Modultreiber Prozess wird durch die Ausprägungen *Verguss* und *Elektrostatische Entladung* detailliert. Die erste Ausprägung bezieht sich auf elektrische Komponenten, deren Kontakte mit Vergussmasse ummantelt werden müssen, um den Anforderungen des Explosionsschutzes gerecht zu werden. Durch den Verguss wird verhindert, dass heiße Oberflächen oder Funken in einer zündfähigen Atmosphäre zu einer Explosion führen können. Die zweite Ausprägung bezieht sich auf Komponenten, die in einer gegen elektrostatische Entladungen geschützten Umgebung montiert werden müssen. Da dies zu Mehrkosten führt, sollten nicht mehr Komponenten als erforderlich in einer entsprechenden Umgebung verbaut werden.

Separat getestet werden müssen die externe Bedieneinheit, der Filter und der Druckschlauch mitsamt der Flansche und der Längenverstellung. Bei der Bedieneinheit sowie dem Filter ist eine Überprüfung der Funktionsfähigkeit vor der Montage erforderlich. Dagegen müssen der Druckschlauch, die Flansche und die Längenverstellung als vormontiertes Modul auf Dichtigkeit getestet werden.

Aus den Modultreibern der Herstellungsphase und ihren Ausprägungen ergibt sich die in Bild 5.8 dargestellte Produktstruktur.

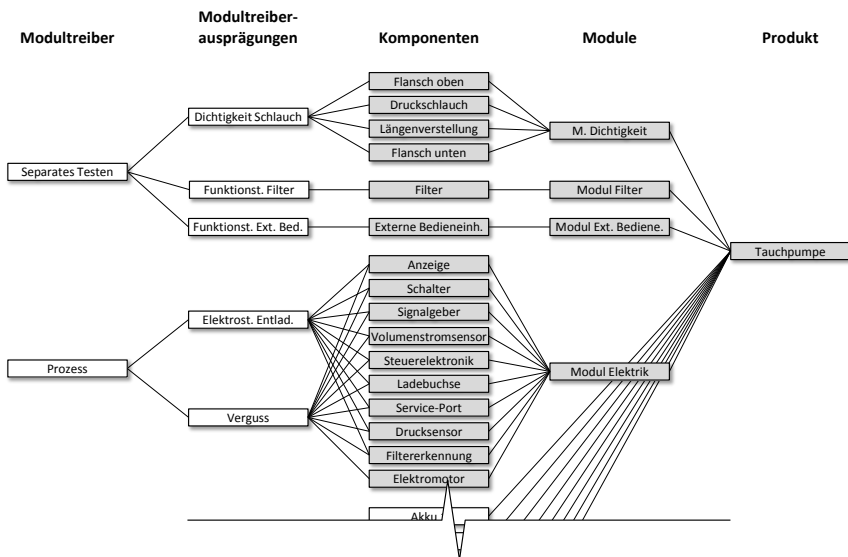


Bild 5.8: Modularisierungs-Netzplan der Phase Herstellung

In den aufgenommenen Modultreiberausprägungen der Herstellungsphase findet die ebenfalls erforderliche Kalibrierung der Tauchpumpen allerdings keine Berücksichtigung. Durch die Kalibrierung können Abweichungen der Förderleistung infolge von Fertigungstoleranzen an Elektromotor und Pumpenlaufrad vermieden werden. Daher wird für jede Tauchpumpe die Pumpenkennlinie für die Förderung einer Referenzflüssigkeit aufgenommen. Die ermittelten Kalibrierdaten werden auf der Steuerelektronik der Pumpe gespeichert und erlauben somit eine genaue Einstellung der Förderleistung.

Für die Kalibrierung müssen die Tauchpumpen allerdings so weit vormontiert sein, dass ein Betrieb der Pumpen unter Testbedingungen möglich ist. Die Herstellungsphase wird daher in die Phasen Herstellung und Kalibrierung unterteilt. In der Herstellungsphase können die Module vormontiert und getestet werden, bevor die Kalibrierung der Tauchpumpen in der nachfolgenden Phase erfolgt. In der Kalibrierphase wird daher das in Bild 5.9 dargestellte Modul gebildet.

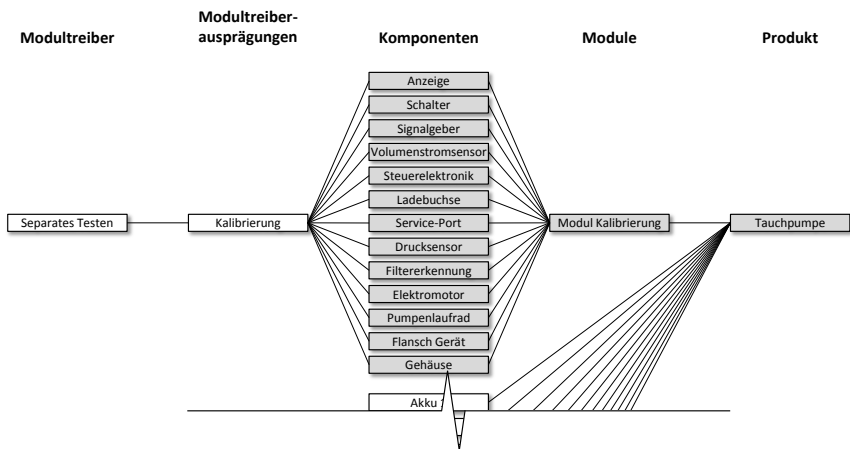


Bild 5.9: Modularisierungs-Netzplan der Phase Kalibrierung

### Beschaffung

Da keine Komponenten der Produktfamilie eigengefertigt werden, müssen alle Module fremdbezogen werden. Aus Sicht der Beschaffung wird dabei die Strategie verfolgt, die Anzahl der Lieferanten so weit wie möglich zu reduzieren.

Der Modultreiber *Modulbeschaffung* wurde durch die fünf geplanten Systemlieferanten für *Grundgerät*, *Filter*, *Energieversorgung*, *Schlauch* und *Cover* detailliert. Die Modulaufteilung, die anhand dieser Ausprägungen entwickelt wurde, ist in Bild 5.10 dargestellt. Obwohl die Akkus grundsätzlich auch vom Lieferanten für das Grundgerät bezogen werden könnten, werden sie von einem eigenen Lieferanten zugekauft, da

dieser über eine höhere Kompetenz bei der Entwicklung und Fertigung von Energiespeichern verfügt.

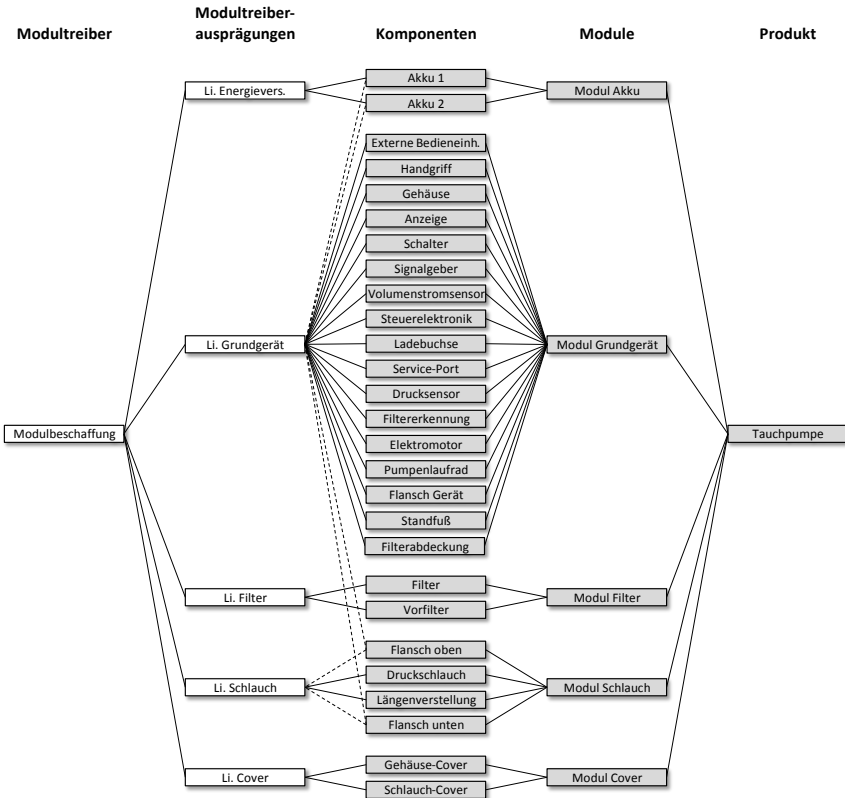


Bild 5.10: Modularisierungs-Netzplan der Phase Beschaffung

### Vertrieb

Bereits in der Zieldefinition wurde eine kundennahe Variantenbildung als eine zentrale Zielsetzung des Projekts festgelegt. Die Variantenbildung muss vor Ort bei den Vertriebspartnern erfolgen, da die Kunden in bestimmten Märkten keine langen Lieferzeiten tolerieren.

Die Modulbildung erfolgte anhand der Unterscheidungsmerkmale der Produktfamilie, die bereits im Rahmen der Aufnahme der externen Vielfalt erfasst worden waren. Wie in Bild 5.11 dargestellt, wurde eine Produktstruktur entwickelt, die weitgehend eine direkte Zuordnung von Unterscheidungsmerkmalen und Modulen sicherstellt. Eine Überschneidung tritt ausschließlich beim Akku 2 auf. Da sich die beiden Unterschei-

ungsmerkmale *Betriebsdauer* und *Explosionsschutz* auf das Modul auswirken, ist das Modul nicht nur optional, sondern liegt darüber hinaus in zwei unterschiedlichen Ausprägungen vor.

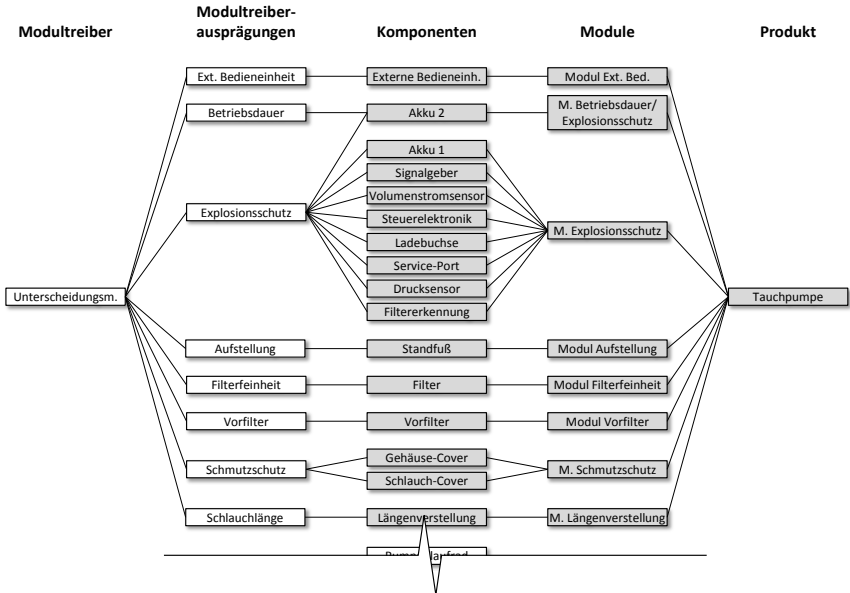


Bild 5.11: Modularisierungs-Netzplan der Phase Vertrieb

### Nutzung

Durch die modulare Produktstruktur der Nutzungsphase soll die Instandhaltung und die Erweiterung des Funktionsumfangs der Tauchpumpen erleichtert werden. Dabei wird die Instandhaltung durch Module unterstützt, die zur Wartung oder Instandsetzung der Tauchpumpen ausgetauscht werden können. Die Wartung der Tauchpumpen betrifft die Komponenten Vorfilter, Filter, Akku 1, Akku 2, Druckschlauch und Schmutzcover. Da diese Komponenten einem starken Verschleiß unterliegen, müssen sie regelmäßig ersetzt werden. Aus Sicht der Nutzung bilden Vorfilter, Filter und Druckschlauch daher eigene Module, die einfach ausgetauscht werden können. Die Akkus sowie die Schmutzcover werden dagegen jeweils zu Modulen zusammengefasst, da sie ein zeitlich vergleichbares Verschleißverhalten aufweisen.

Die Modultreiber-ausprägung *Instandsetzung* zielt dagegen auf Komponenten, die überdurchschnittlich oft von Ausfällen betroffen sind. Wie in Bild 5.12 zu sehen, wurden die Komponenten Signalgeber, Volumenstromsensor, Steuerelektronik, Drucksensor und Filtererkennung in einem Instandsetzungsmodul zusammengefasst. Bei

einem Defekt wird durch den Austausch des Moduls eine einfache und schnelle Reparatur der Tauchpumpe möglich.

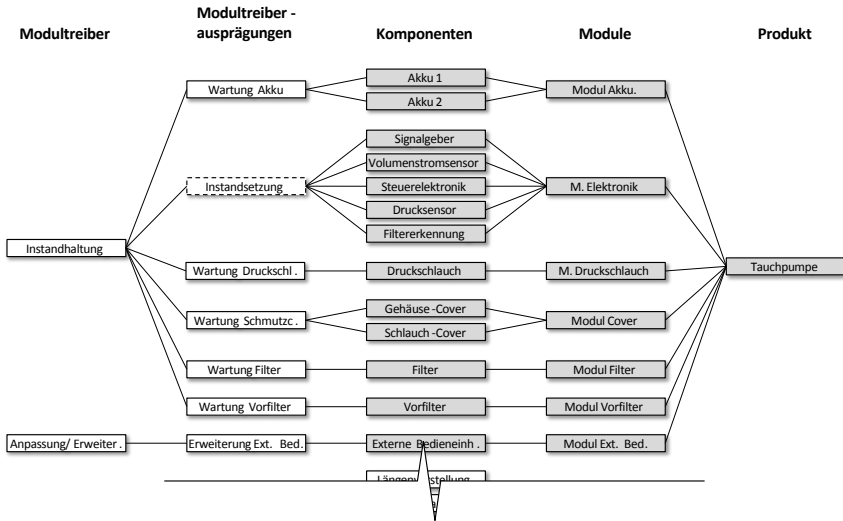


Bild 5.12: Modularisierungs-Netzplan der Phase Nutzung

Zusätzlich wird der Modultreiber *Anpassung/Erweiterung* durch die Ausprägung *Erweiterung Externe Bedieneinheit* detailliert. Die Bildung eines entsprechenden Moduls ermöglicht es dem Kunden, die externe Bedieneinheit in der Nutzungsphase des Produkts nachzukaufen, um die Funktionalität der Tauchpumpe zu erweitern.

### 5.2.2.7 Abstimmung der modularen Produktstrukturen

Im Anschluss an die Entwicklung der modularen Produktstrukturen wurden diese im Module Process Chart (MPC) zusammengeführt. Entsprechend der geänderten Abfolge der Phasen sowie der Aufteilung der Phase Herstellung ergibt sich ein Prozess über die Phasen Produktentwicklung, Herstellung, Kalibrierung, Vertrieb, Endprodukt und Nutzung.

Der in Bild 5.13 dargestellte MPC wurde im Vorfeld des siebten Workshops erstellt. Im Workshop selbst wurden die im MPC erkannten Widersprüche zwischen den Produktstrukturen der unterschiedlichen Produktlebensphasen bearbeitet. Zentrale Aufgabenstellung war die Lösung des Widerspruchs zwischen den Produktstrukturen der Phasen Kalibrierung, Beschaffung und Vertrieb. Wie durch die Darstellung der Produktstrukturen im MPC leicht zu erkennen ist, müssen die Tauchpumpen bereits in der Kalibrierphase weitgehend montiert sein, um die Durchführung des Kalibriertests zu ermöglichen. Darüber hinaus wird das Modul in der Beschaffungsphase um weitere Kompo-

nenen ergänzt, die von einem gemeinsamen Lieferanten für das Grundgerät bezogen werden sollen. Dagegen ist in der Vertriebsphase die Bildung mehrerer varianter Module erforderlich, um eine einfache und kundennahe Konfiguration von Produktvarianten zu ermöglichen.

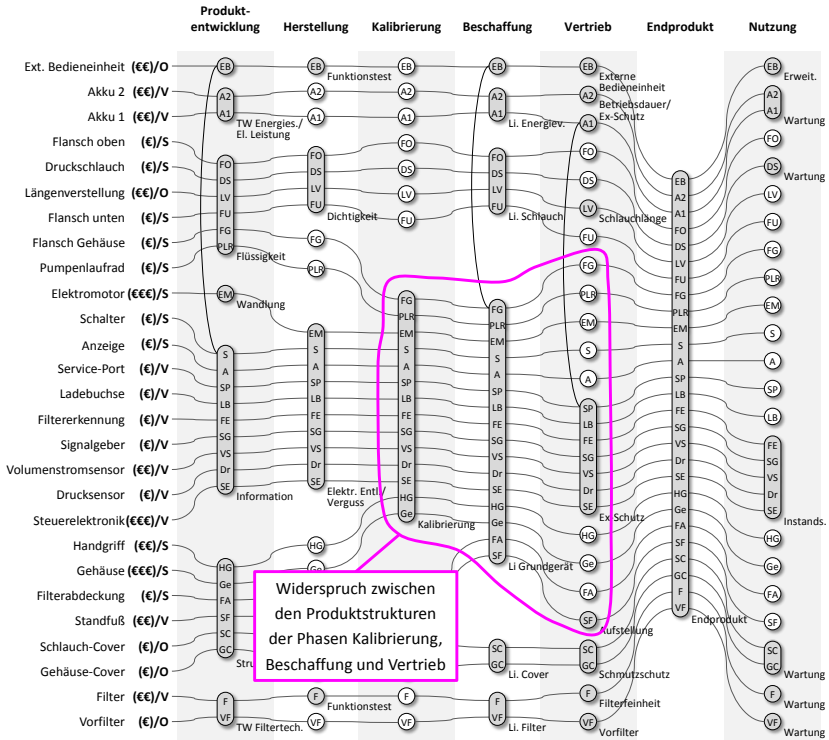


Bild 5.13: Module Process Chart der Produktfamilie von Tauchpumpen  
(v: variant, o: optional, S: Standard, vA: variante Anzahl)

Zur Lösung des Widerspruchs kann das in der Beschaffungsphase gebildete Modul entsprechend der Produktstruktur der Vertriebsphase aufgeteilt werden. Die gebildeten Module können weiterhin über den Lieferanten für das Grundgerät bezogen werden und erlauben zudem die Konfiguration von Produktvarianten im Vertrieb. Darüber hinaus muss allerdings auch das Kalibriermodule aufgeteilt werden. Dies ist jedoch nur möglich, wenn der Kalibriertest vermieden werden kann. Im Rahmen des Workshops wurden daher Lösungsansätze für die Vermeidung des Kalibriertests entwickelt.

Ergebnis des Workshops war der Ansatz, die Förderleistung der Pumpe im Betrieb durchgehend zu regeln. Da bereits ein Volumenstromsensor zur Überwachung der

Grenzwerte vorgesehen ist, müssen keine zusätzlichen Komponenten eingesetzt werden. Durch die Regelung des Volumenstroms kann die Kalibrierung der Taupumpen entfallen, was wiederum die Aufteilung des Kalibriermoduls ermöglicht.

Neben der Kalibrierung der Tauchpumpen wurden innerhalb des Workshops weitere Widersprüche betrachtet und durch die Erweiterung oder Aufteilung von Modulen gelöst. Ergebnis waren zwei Konzepte für die modulare Strukturierung der Produktfamilie. Im ersten Konzept wird zugunsten der Reduzierung der Schnittstellen die Bildung eines umfassenden Moduls angestrebt, das die elektronischen Komponenten der Tauchpumpe zusammenfasst, während im zweiten Konzept eine feingliedrigere Strukturierung der elektronischen Komponenten entsprechend der produktstrategischen Anforderungen verfolgt wird. Im Folgenden werden die beiden Konzepte vorgestellt, bevor auf die Konzeptbewertung und -auswahl eingegangen wird.

### **Konzept 1**

In Bild 5.14 ist der ausgearbeitete MPC für das erste Konzept dargestellt. Die bei der Entwicklung des Konzepts gelösten Widersprüche und die daraus resultierenden Produktstrukturen werden im Folgenden vorgestellt.

#### *Produktentwicklung*

Im Gegensatz zur technisch-funktionalen Modularisierung bilden die Komponenten Flansch Gerät und Pumpenlaufrad in der Produktstruktur der Entwicklungsphase ein eigenes Modul. Die Begründung für die Aufteilung des technisch-funktionalen Moduls ergibt sich aus der Beschaffung der Komponenten. Beide Komponenten werden vom Lieferanten für das Grundgerät entwickelt und hergestellt, während die verbleibenden Komponenten des Moduls *Dominanter Fluss Flüssigkeit* vom Lieferanten für das Modul *Schlauch* zugekauft werden. Durch die Aufteilung des Moduls wird eine eindeutige Zuordnung von Modulen und Lieferanten erreicht. Da die Schnittstelle zwischen den Modulen von einer genormten Flanschverbindung gebildet wird, kann der resultierende Abstimmungsbedarf zwischen den Entwicklungspartnern vernachlässigt werden.

Darüber hinaus wurden auch die Komponenten Gehäuse-Cover und Schlauch-Cover in einem Modul zusammengefasst. In diesem Fall werden die Komponenten von einem Lieferanten bezogen, der auf die Entwicklung und Herstellung von Schmutzschutzcovern spezialisiert ist.

#### *Herstellung/Kalibrierung*

Die modulare Produktstruktur der Phase Herstellung kann weitgehend in das Gesamtkonzept übernommen werden. Allerdings wurde der Elektromotor in die Produktplattform übernommen, obwohl grundsätzlich seine elektrischen Kontakte bei explosions-

geschützten Produktvarianten vergossen werden müssen. Um den Verguss zu vermeiden, wurde die Verwendung einer zündgeschützten Steckverbindung vorgesehen.

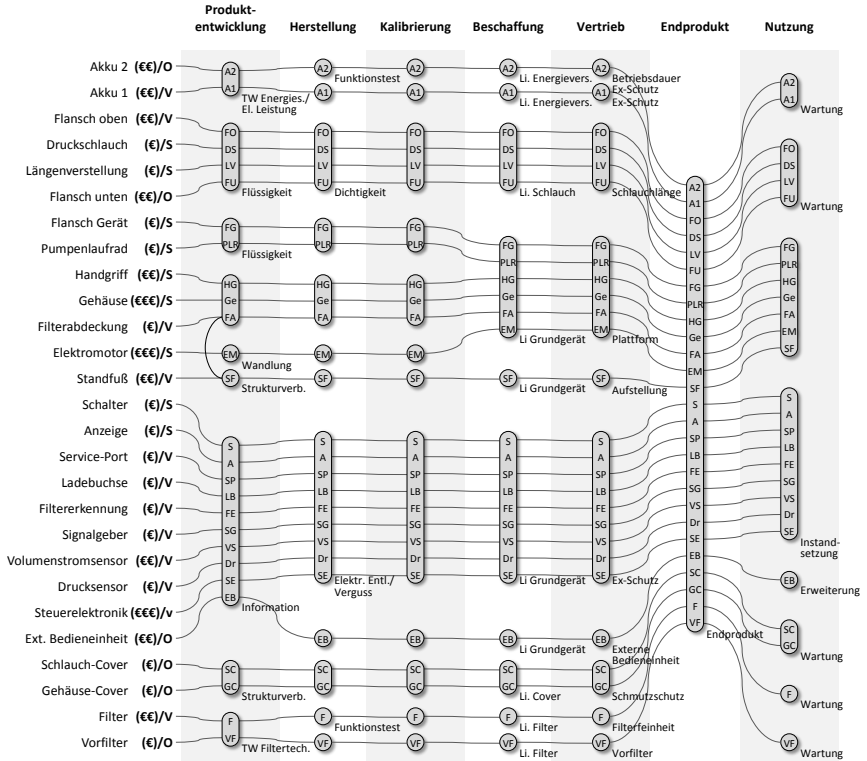


Bild 5.14: Ausgearbeiteter Module Process Chart der Produktfamilie (Konzept 1)  
(v: variant, o: optional, S: Standard, vA: variante Anzahl)

Die an die Herstellung anschließende Kalibrierung kann, wie zuvor erläutert, vollständig entfallen.

### Beschaffung

In der Produktstruktur der Beschaffungsphase wurden mehrere Module aufgegliedert. So werden die Akkus, die Filter und die Komponenten des Grundgeräts weiterhin von den vorgesehenen Lieferanten bezogen, aufgrund der Variantenbildung in der Vertriebsphase allerdings in Form mehrerer Einzelmodule.

### *Vertrieb*

Im Vertrieb bilden mehrere Standardkomponenten, die einen hohen Kostenanteil auf sich vereinen, die Plattform der Produktfamilie. Durch ein variantes Modul, in dem die gegebenenfalls explosionsgeschützt ausgeführten Komponenten zusammengefasst werden, können explosionsgeschützte Produktvarianten konfiguriert werden. Obwohl sie nicht von der Modultreiberausprägung Explosionsschutz betroffen sind, wurden die Komponenten Schalter und Anzeige ebenfalls in dieses Modul integriert, da sie wie die übrigen elektronischen Komponenten in einer gegen elektrostatische Entladungen gesicherten Umgebung montiert werden müssen. Ebenfalls aufgrund der Modulaufteilung in der Herstellungsphase bildet der Druckschlauch mitsamt Flanschen und Längverstellung ein Modul in der Vertriebsphase. Dieses kann in der Herstellungsphase einem Dichtigkeitstest unterzogen werden und in der Vertriebsphase zur Variantenbildung verwendet werden.

### *Nutzung*

In der Nutzungsphase wurden das Schlauch- und das Elektronik-Modul entsprechend der Module der vorangegangenen Produktlebensphasen erweitert. Dies bedingt im Fall von Instandhaltungsmaßnahmen zwar den Austausch von umfassenderen Modulen, im Gegenzug können aber zusätzliche lösbare Schnittstellen vermieden werden. Darüber hinaus wurden nur Komponenten in die Instandhaltungsmodule übernommen, die geringe anteilige Kosten auf sich vereinen.

## **Konzept 2**

Im zweiten Konzept wurde vorrangig die Umsetzung der produktstrategischen Anforderungen verfolgt. Statt, wie im ersten Konzept, die elektronischen Komponenten weitestgehend in einem Modul zusammenzufassen, werden diese auf mehrere Module aufgeteilt.

In Bild 5.15 ist der MPC für das zweite Konzept dargestellt. Da sich das Konzept nur durch die Strukturierung der elektronischen Komponenten vom ersten Konzept unterscheidet, wird nur das Grundgerät ohne Anbaumodule betrachtet.

Durch die Aufteilung der elektronischen Komponenten können in der Entwicklungsphase die Technologiewechselmodule *Anzeigetechnologie* und *Bedarfsgerechte Regelung* gebildet werden. Darüber hinaus können die Komponenten Anzeige und Schalter in einer gegen elektrostatische Entladungen geschützten Umgebung montiert werden und erweitern in der Vertriebsphase die Produktplattform. In der Nutzungsphase umfasst das Instandsetzungsmodul nur die Komponenten, die überdurchschnittlich oft ausfallen. Ein Austausch weiterer, nicht betroffener Komponenten kann somit vermieden werden.

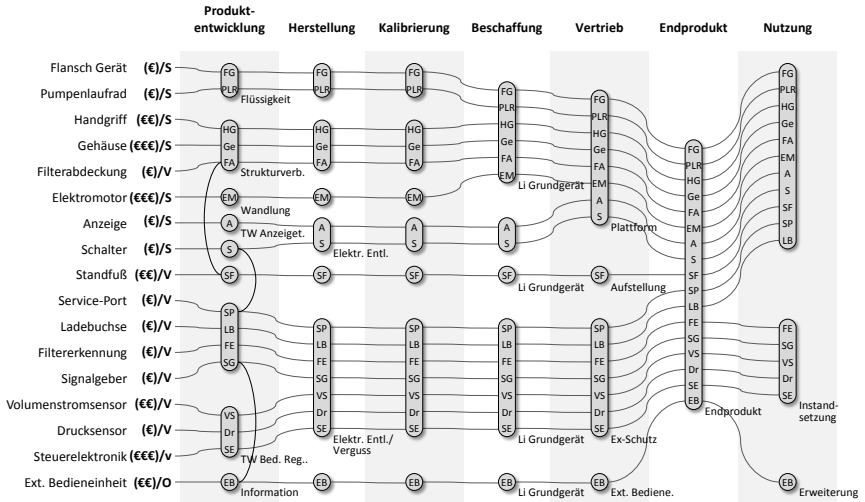


Bild 5.15: Ausgearbeiteter Module Process Chart der Produktfamilie (Konzept 2)  
 (v: variant, o: optional, S: Standard, vA: variante Anzahl)

### Konzeptauswahl

Die Auswahl eines der beiden Konzepte erfolgte unter Anwendung der Kennzahlen Module Coupling Independence und Module Driver Independence. Da sich die Konzepte nur in der Aufteilung der elektronischen Komponenten unterscheiden, wurde für die Konzeptauswahl ausschließlich das Grundgerät betrachtet.

Um eine Bewertung der technisch-funktionalen Entkopplung der Module zu ermöglichen, musste im ersten Schritt der Module Interface Graph um die bisher nicht berücksichtigten strukturellen Verbindungen ergänzt werden. Damit ergibt der in Bild 5.16 dargestellte MIG der Tauchpumpen.

Zur Bewertung der technisch-funktionalen Entkopplung der Module wurde die Kennzahl MCI für beide Konzepte aufgestellt. Anhang E gibt einen Überblick über die Schnittstellen der beiden Konzepte. Aufgrund der höheren Anzahl an Schnittstellen wird das zweite Konzept aus technisch-funktionaler Sicht deutlich schlechter bewertet:

$$MCI_{\text{Konzept 1}} = \frac{\text{Anzahl der Schnittstellen innerhalb der Module}}{\text{Gesamtanzahl der Schnittstellen}} = \frac{21}{27} = 0,78$$

$$MCI_{\text{Konzept 2}} = \frac{\text{Anzahl der Schnittstellen innerhalb der Module}}{\text{Gesamtanzahl der Schnittstellen}} = \frac{8}{27} = 0,30$$

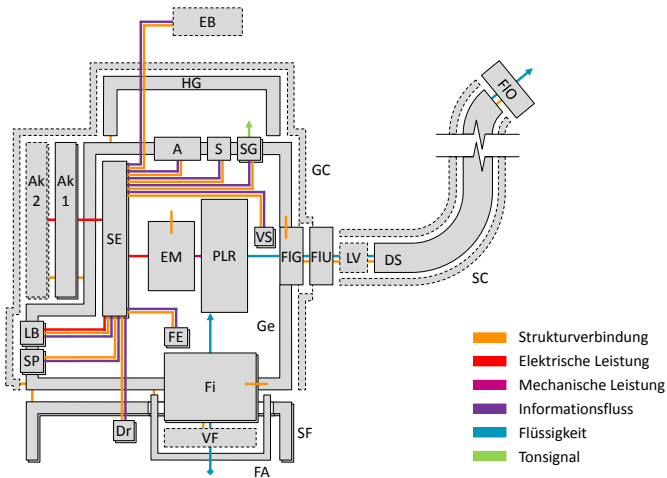


Bild 5.16: MIG der Produktfamilie mit ergänzten strukturellen Verbindungen

Zur Bewertung der produktstrategischen Modularisierung wurde für beide Konzepte die Kennzahl MDI berechnet. Dazu wurden die Modularisierungs-Netzpläne entsprechend der endgültigen Modulaufteilung umgestellt. Die Bewertungen der Modultreiber mit Hilfe der Einzelkennzahlen  $MDI_j$  sowie ihre Zusammenfassung zur Kennzahl MDI sind in Anhang E dargestellt. Da das zweite Konzept die Produktstruktur unmittelbar an den Modultreiberprägungen ausrichtet, ergibt sich für dieses Konzept eine bessere Bewertung:

$$MDI_{\text{Konzept 1}} = \frac{\sum_{j=1}^m MDI_j}{m} = 0,85$$

$$MDI_{\text{Konzept 2}} = \frac{\sum_{j=1}^m MDI_j}{m} = 0,93$$

Bei der Produktfamilie der Tauchpumpen handelt es sich um ein variantenreiches Serienprodukt. Damit kommt der produktstrategischen Sicht eine übergeordnete Bedeutung zu. Entsprechend erfolgt die Gewichtung der produktstrategischen Wertigkeit des Konzepts mit 0,6, während die technisch-funktionale Wertigkeit nur mit 0,4 gewichtet wird. Damit können die Gesamtwerte der beiden Konzepte wie folgt berechnet werden:

$$Gw_{\text{Konzept 1}} = 0,4 \cdot MCI + 0,6 \cdot MDI = 0,82$$

$$Gw_{\text{Konzept 2}} = 0,4 \cdot MCI + 0,6 \cdot MDI = 0,68$$

Aus der Berechnung ergibt sich ein deutlich höherer Gesamtwert für das erste Konzept. Da sich die Ergebnisse mit der qualitativen Bewertung der Konzepte durch die Projektteilnehmer decken, wurde das erste Konzept für die weitere Ausarbeitung ausgewählt.

### 5.2.2.8 Vorstellung und Diskussion der modularen Produktfamilie

Der abschließende Workshop wurde in zwei Teile untergliedert. Im ersten Teil wurde das methodische Vorgehen bei der Entwicklung der Produktfamilie in einer Präsentation zusammengefasst. Daran schloss sich eine Kartenabfrage an, in der die Projektbeteiligten die von ihnen erkannten Vor- und Nachteile den einzelnen Arbeitsschritten zuordneten.

Im zweiten Teil des Workshops wurde das bis hin zu einem CAD-Entwurf ausgearbeitete Konzept der modularen Produktfamilie vorgestellt. An die Vorstellung schloss sich die Bewertung des entwickelten Konzepts an.

Bild 5.17 zeigt die entwickelte Produktfamilie stellvertretend am Beispiel der Vertriebsphase. Durch die Produktstruktur können auf Grundlage einer Produktplattform und 15 varianten Modulen 576 Produktvarianten erstellt werden. Darüber hinaus sind die Schnittstellen zwischen den Modulen einfach gestaltet, was eine Konfiguration und Endmontage von Produktvarianten beim Vertriebspartner ermöglicht.

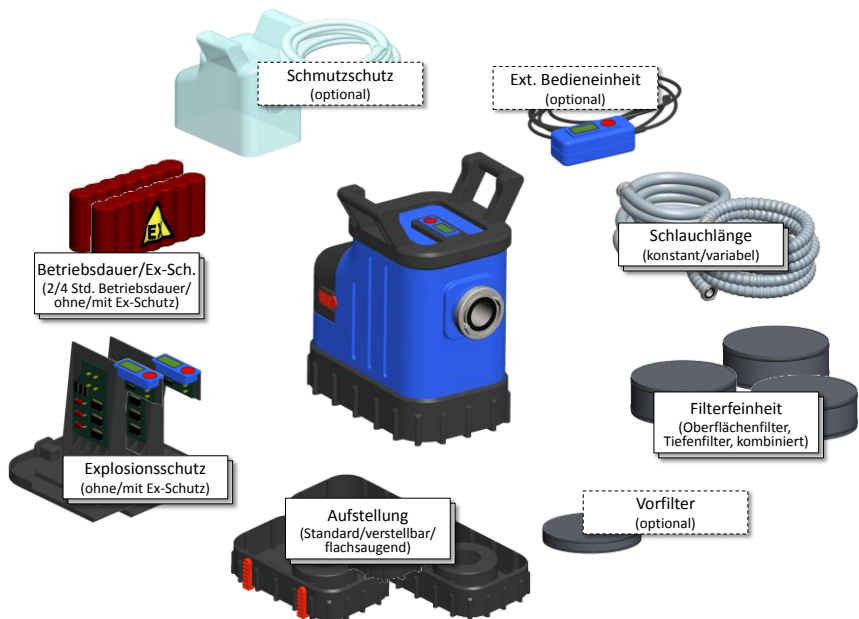


Bild 5.17: Konzept der modularen Produktfamilie von Tauchpumpen (Phase Vertrieb)

Die modulare Produktfamilie erfüllt aber auch die Anforderungen der übrigen Produktlebensphasen. Beispielsweise kann die Entwicklung technisch-funktional weitgehend abgeschlossener Module auf Zulieferer übertragen werden, in der Herstellung können erforderliche Tests auf Modulebene durchgeführt werden und während der Nutzung ermöglicht die Produktstruktur einen einfachen Austausch von Modulen zur Instandsetzung oder Wartung der Tauchpumpen.

Die von den Projektteilnehmern erkannten Vor- und Nachteile des methodischen Vorgehens werden an dieser Stelle nicht vorgestellt, sondern finden Eingang in die Auswertung der Fallstudie im folgenden Abschnitt.

### **5.3 Auswertung der Fallstudie**

Im Rahmen der Auswertung werden die in Abschnitt 5.1.1 aufgestellten Hypothesen der Fallstudie überprüft. Dazu wird einerseits das entwickelte Konzept einer modularen Produktfamilie von Tauchpumpen analysiert, andererseits finden aber auch die im Laufe des Projekts gemachten Beobachtungen sowie die Rückmeldungen durch die Projektteilnehmer Eingang in die Überprüfung der Hypothesen.

#### **Hypothese 1: Konfiguration von Produktvarianten**

Bereits in der Zieldefinition zu Beginn des Projekts wurde eine kundennahe, individuelle Kombinierbarkeit der Module als Ziel aufgenommen. Durch die Verwendung der Modultreiberprägungen konnte eine direkte Zuordnung von Unterscheidungsmerkmalen und Modulen erreicht werden. Somit kann mit einem Satz von 16 Modulen die Produktfamilie mit 576 möglichen Produktvarianten erstellt werden. Darüber hinaus ermöglicht es die entwickelte Produktstruktur, dass die Produktvarianten bei den Vertriebspartnern und somit überaus kundennah konfiguriert werden können.

Aus der vorangegangenen Betrachtung kann abgeleitet werden, dass die entwickelte Methode die Gestaltung und Strukturierung von Produktfamilien in einer Weise ermöglicht, die eine Konfiguration einer großen Vielfalt von Produktvarianten auf Grundlage einer kleinen internen Vielfalt erlaubt.

#### **Hypothese 2: Potentiale in allen Produktlebensphasen**

Wie bereits in Abschnitt 5.2.2.7 dargelegt wurde, erfüllen die entwickelte Modularisierung die Anforderungen der unterschiedlichen Produktlebensphasen. Durch die Modultreiberprägungen wurde weitgehend eine unmittelbare Abbildung der produktstrategischen Anforderungen in der Produktstruktur ermöglicht. Von den Vertretern der unterschiedlichen Fachbereiche des Unternehmens wurde dies ebenfalls bestätigt.

Aus der Untersuchung der Produktstrukturen sowie aus den Rückmeldungen von den Projektbeteiligten kann somit geschlossen werden, dass die Methode bei der Entwicklung von Produktstrukturen unterstützt, die Potentiale in allen Produktlebensphasen erschließen.

### **Hypothese 3: Betrachtung von Produktstrukturen als Prozess**

Durch die Betrachtung von modularen Produktstrukturen als Prozess konnte der Umgang mit den vielfältigen und teilweise widersprüchlichen Anforderungen an die Produktstruktur an mehreren Stellen entscheidend unterstützt werden. So konnten durch die Gegenüberstellung der Produktstrukturen im MPC mehrere Widersprüche erkannt und gelöst werden. Zentral war in der Fallstudie, dass eine Kalibrierung der Tauchpumpen durch eine konstruktive Umgestaltung vermieden werden konnte.

Darüber hinaus konnte durch die Gegenüberstellung der Produktstrukturen im Module Process Chart ein übergreifendes Verständnis bei allen beteiligten Fachbereichen geschaffen werden. Dies wurde von den Projektbeteiligten bestätigt.

Zudem soll durch die differenzierte Berücksichtigung der Produktlebensphasen eine bessere Berücksichtigung der unterschiedlichen Anforderungen ermöglicht werden. In der Fallstudie konnten die Produktstrukturen der unterschiedlichen Phasen allerdings so weit angeglichen werden, dass eine Überprüfung dieser Hypothese anhand der Fallstudie nicht eindeutig möglich ist.

In der Fallstudie hat sich außerdem gezeigt, dass die vorgesehenen, generischen Produktlebensphasen nicht allgemeingültig eingesetzt werden können. Um an die Lieferkette der betrachteten Produktfamilie angepasst zu werden, musste die Abfolge der Phasen geändert werden. Im Abschlussworkshop wurde daher angeregt, das Vorgehen durch eine Abstimmung mit der Lieferkette der Produktfamilie zu erweitern.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Betrachtung von Produktstrukturen als Prozess die Entwicklung modularer Produktfamilien maßgeblich unterstützt, die Methode darüber hinaus aber auch das Potential für eine Erweiterung durch die Berücksichtigung von Lieferketten bietet.

### **Hypothese 4: Geometrische Randbedingungen im Module Interface Graph**

Der Module Interface Graph wurde im Projekt durchgehend eingesetzt. Insbesondere produktstrategische Module, die auf Grundlage der Netzpläne abgeleitet worden waren, wurden im MIG hinsichtlich der räumlichen Randbedingungen überprüft. Es kann daher bestätigt werden, dass der MIG die Berücksichtigung geometrischer Randbedingungen ermöglicht.

### **Hypothese 5: Einbindung der variantengerechten Produktgestaltung**

In der Fallstudie konnte die Abhängigkeit des Akkus zu zwei Unterscheidungsmerkmalen durch die variantengerechte Produktgestaltung aufgehoben werden. In der darauf aufbauenden Produktstruktur konnte die Variantenbildung dadurch vereinfacht werden. Die Entwicklung modularer Produktfamilien wird somit durch Einbindung der variantengerechten Produktgestaltung vorteilhaft unterstützt.

### **Hypothese 6: Bewertung von modularen Produktfamilien**

Das Bewertungsverfahren wurde zur Auswahl eines Konzepts für die modulare Strukturierung der Produktfamilie von Tauchpumpen eingesetzt. Die Aufnahme der Kennzahlen konnte anhand des Module Interface Graphs sowie anhand der Netzpläne mit geringem Aufwand durchgeführt werden. Unter Berücksichtigung der Schnittstellen, die sich aus den beiden Konzepten ergeben, sowie der Umsetzung der produktstrategischen Anforderungen sind die Ergebnisse der Bewertung qualitativ nachvollziehbar. Zudem entspricht die kennzahlenbasierte Bewertung der Konzepte der qualitativen Bewertung durch die Projektteilnehmer. Es kann daher bestätigt werden, dass das Bewertungsverfahren die erforderliche Aussagekraft besitzt.

Die entwickelten Kennzahlen ermöglichen die Bewertung von modularen Produktstrukturen bereits in frühen Entwicklungsphasen. Im Abschlussworkshop wurde darüber hinaus die Ergänzung des Vorgehens um eine Bewertungsmethode vorgeschlagen, die in einer späteren Phase der Entwicklung eine monetäre Bewertung von Konzepten erlaubt.

### **Hypothese 7: Verständlichkeit und Nachvollziehbarkeit**

Das methodische Vorgehen zur Entwicklung modularer Produktfamilien konnte von den Projektteilnehmern ohne größere Einarbeitung nachvollzogen werden. Im Abschlussworkshop wurde darüber hinaus die strukturierte Vorgehensweise positiv hervorgehoben.

Die im Rahmen des Vorgehens entwickelten Visualisierungsmethoden werden im Folgenden einzeln betrachtet. Im Projektverlauf wurden die Visualisierungen im Vorfeld der Workshops erstellt und in den Terminen als großformatige Ausdrucke verwendet.

- Der Module Interface Graph wurde durchgehend von der Aufnahme der Komponenten bis zur Vorstellung der Konzepte eingesetzt. Bei den Projektbeteiligten konnte durch die Verwendung des MIG schnell ein Verständnis für die Produktstruktur geschaffen werden. Auch in den Rückmeldungen der Beteiligten wurde die Verwendung des MIG als verbindendes Element positiv hervorgehoben.

- Für das in der variantengerechte Produktgestaltung eingesetzte Variety Allocation Model wurde insbesondere positiv herausgestellt, dass Ansatzpunkte für die Überarbeitung des Produkts qualitativ sichtbar werden (vgl. [Kip11]).
- Die Modularisierungs-Netzpläne haben sich in der Anwendung ebenfalls als sehr vorteilhaft erwiesen. Sie ermöglichen ein strukturiertes Vorgehen bei der Aufnahme der Beziehungen zwischen Komponenten und Modultreiber-ausprägungen und stellen diese leicht nachvollziehbar dar.
- Der MPC wurde von den Projektteilnehmern bei der ersten Verwendung als unübersichtlich wahrgenommen. Nach einer Erläuterung des Aufbaus der Darstellung konnte das für die Arbeit mit dem MPC erforderliche Verständnis allerdings schnell geschaffen werden.

Darüber hinaus wurde auch das kennzahlbasierte Bewertungsverfahren aufgrund seines einfachen Aufbaus als leicht verständlich und gut nachvollziehbar wahrgenommen.

Auf Grundlage der vorangegangenen Betrachtungen kann geschlossen werden, dass sowohl das Vorgehen an sich wie auch die entwickelten Visualisierungsmethoden und das Bewertungsverfahren leicht verständlich und gut nachvollziehbar sind.

Zusammenfassend kann aus der erfolgreichen Anwendung der Methode in der Fallstudie abgeleitet werden, dass die Methode entscheidende Vorteile bei der Entwicklung modularer Produktfamilien bietet. Die Methode gewährt eine durchgehende Unterstützung bei der Produktstrukturierung und konnte alle wesentlichen Anforderungen erfüllen.



## 6 Zusammenfassung und Ausblick

In einem Markt, der von einem zunehmenden Konkurrenzdruck und einem steigenden Bedarf an kundenindividuellen Produkten geprägt ist, leisten modulare Produktfamilien einen entscheidenden Beitrag zur Sicherung und zum Ausbau der Wettbewerbsposition von Unternehmen. Durch die modulare Strukturierung von Produktfamilien wird es nicht nur ermöglicht, eine große Variantenvielfalt am Markt anzubieten, sondern darüber hinaus können auch bedeutende Potentiale im gesamten Produktleben erschlossen werden. Beispielsweise wird die Komplexität der Produktentwicklung durch die technisch-funktionale Entkopplung der Module gesenkt, werden die Kosten in der Beschaffung durch den Zukauf ganzer Module reduziert und wird die Verwertung von Altprodukten durch eine recycelgerechte Produktstruktur vereinfacht.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde eine Methode entwickelt, die eine durchgehende Unterstützung bei der Entwicklung modularer Produktfamilien bietet. Ausgangspunkt der Methodenentwicklung war die Problemanalyse, aus der Anforderungen an eine geeignete Vorgehensweise abgeleitet wurden. Anhand dieser Anforderungen wurden im folgenden Kapitel die im Stand der Wissenschaft bestehenden Methoden bewertet. Da die bestehenden Methoden nur Teilaspekte bei der Entwicklung modularer Produktfamilien unterstützen, wurde darauf aufbauend der Forschungsbedarf der Arbeit aufgestellt.

Im vierten Kapitel wurde die Methode vorgestellt. Unter Anwendung der Methode entwickelte Produktfamilien sollen die Konfiguration einer großen Vielfalt von Produktvarianten auf Grundlage einer kleinen internen Vielfalt ermöglichen und zudem die Potentiale modular strukturierter Produkte in allen Produktlebensphasen erschließen.

Die entwickelte Methode gliedert sich in acht Arbeitsschritte. Den Ausgangspunkt bildet die Zieldefinition, die der Festlegung der im entsprechenden Anwendungsfall verfolgten Ziele dient. Schwerpunkte können beispielsweise die Erzielung von Skaleneffekten in der Herstellung oder die kundennahe Konfiguration von Produktvarianten sein.

In der folgenden Ist-Aufnahme werden die für die Entwicklung erforderlichen Informationen aufgenommen. Dies beinhaltet sowohl die Variantenvielfalt der Produktfamilie als auch ihre konstruktive Umsetzung. Während die Unterscheidungsmerkmale der Produktfamilie in einem Merkmalsbaum erfasst werden, wird ihre konstruktive Umsetzung in einer Funktionsstruktur, in Wirkprinzipien und in einem Module Interface Graph aufgenommen. Der MIG wurde neu entwickelt, da die räumliche Lage von Komponenten in bestehenden Ansätzen zur Darstellung von Produktstrukturen nicht abgebildet werden kann.

Im dritten Schritt der Methode erfolgt die variantengerechte Gestaltung der Produktfamilie. Die variantengerechte Produktgestaltung ist erforderlich, um auf Komponentenebene eine einfache Abbildung der Unterscheidungsmerkmale der Produktfamilie sicherzustellen. Für diesen Arbeitsschritt wird auf den Ansatz von KIPP zurückgegriffen, der parallel zu der vorliegenden Arbeit entwickelt wurde [Kip11].

Die eigentliche Modularisierung der Produktfamilie erfolgt in den Schritten vier bis sechs. Ausgangspunkt ist die Entwicklung einer technisch-funktionalen Produktstruktur. Dazu werden Modularisierungs-Heuristiken auf die Funktionsstruktur oder den Module Interface Graph der Produktfamilie angewendet. Ergebnis ist eine Produktstruktur, die sich aus technisch-funktional weitgehend entkoppelten Modulen zusammensetzt. Durch die Entkopplung der Module können vor allem in der Produktentwicklung maßgebliche Vorteile erschlossen werden.

Im Anschluss werden produktstrategische Modularisierungen für die Produktlebensphasen Entwicklung, Beschaffung, Herstellung, Vertrieb, Nutzung und Recycling entwickelt. Um eine geeignete Unterstützung der Modularisierung zu bieten, wurde das aus dem Stand der Wissenschaft bekannte Modultreiberkonzept weiterentwickelt. Durch die neu entwickelten Modultreiberprägungen können Modultreiber produktspezifisch konkretisiert werden. Mit Hilfe der Ausprägungen kann beispielsweise eine eindeutige Zuordnung von Unterscheidungsmerkmalen und Modulen erreicht werden. Sie ermöglichen somit die Entwicklung von Produktstrukturen, die eine einfache Konfiguration von Produktvarianten erlauben.

Zur Bildung von Modulen wurde ein Netzplan entwickelt, in dem die Modultreiberprägungen den Komponenten der Produktfamilie gegenübergestellt werden. Komponenten werden zu Modulen zusammengefasst, wenn sie in Beziehung zu einer gemeinsamen Ausprägung stehen.

Die Produktstrukturen werden im sechsten Arbeitsschritt in einem Prozess über das Produktleben zusammengefasst. Um diesen Arbeitsschritt zu unterstützen, wurde der Module Process Chart entwickelt. Im MPC werden die Produktstrukturen der unterschiedlichen Produktlebensphasen in einer Prozessdarstellung abgebildet. Er ermög-

licht somit eine einfache Identifikation von Widersprüchen zwischen den Produktstrukturen und bildet die Grundlage für eine Verbesserung der Modularisierung durch die gezielte Entwicklung von Lösungsansätzen.

Im siebten Arbeitsschritt erfolgt die Bewertung und Auswahl der im Vorangegangenen entwickelten Konzepte. Um ihre Bewertung bereits in einer frühen Entwicklungsphase durchführen zu können, wurde ein geeignetes Kennzahlensystem entwickelt. Mit Hilfe von zwei einfach aufgebauten Kennzahlen werden die Konzepte anhand der technisch-funktionalen Kopplungen zwischen den Modulen und der Umsetzung der produktstrategischen Anforderungen bewertet. Zur Konzeptauswahl werden die beiden Kennzahlen in einer gewichteten Summe zusammengeführt.

Abgeschlossen wird das methodische Vorgehen durch die Ableitung der modularen Baustruktur. Dieser Arbeitsschritt beinhaltet die Definition und konstruktive Gestaltung der Schnittstellen zwischen den Modulen.

Nach Vorstellung der Methode erfolgte ihre Validierung im fünften Kapitel der Arbeit. Zur Validierung wurde eine Fallstudie am Beispiel der Entwicklung einer modularen Produktfamilie von Tauchpumpen durchgeführt. Unter Anwendung der Methode wurde eine Produktstruktur entwickelt, die auf Grundlage von 16 Modulen die Konfiguration von 576 Produktvarianten erlaubt. Zudem wird die entwickelte Produktfamilie den vielfältigen Anforderungen der unterschiedlichen Produktlebensphasen gerecht. Aus der entwickelten Produktfamilie, aber auch aus den positiven Rückmeldungen der Projektbeteiligten, konnte abgeleitet werden, dass die entwickelte Methode den gestellten Anforderungen gerecht wird und eine durchgehende Unterstützung bei der Entwicklung modularer Produktfamilien bietet.

Zusammenfassend leistet die entwickelte Methode einen maßgeblichen Beitrag für die erfolgreiche Entwicklung von modular strukturierten Produktfamilien. Die Methode ermöglicht eine umfassende Berücksichtigung der Gründe für die Bildung von Modulen, da sowohl technisch-funktionale Kopplungen als auch produktstrategische Anforderungen in die Entwicklung einfließen. Zudem können durch die Weiterentwicklung des Modultreiberkonzepts auch produktspezifische Anforderungen berücksichtigt werden.

Darüber hinaus bietet die Betrachtung modularer Produktstrukturen als Prozess wesentliche Vorteile. Da im Rahmen der Methode unterschiedliche Produktstrukturen für die einzelnen Produktlebensphasen entwickelt werden, können die Produktstrukturen den vielfältigen Anforderungen besser gerecht werden, als eine über das Produktleben unveränderliche Produktstruktur. Außerdem unterstützt das Vorgehen die Entwicklung eines Ausgleichs zwischen den unterschiedlichen Produktlebensphasen. Da die Metho-

de Widersprüche zwischen den Produktstrukturen aufzeigt, können gezielt Ansätze zur Verbesserung der Strukturierung der Produktfamilie entwickelt werden.

Aus der Methode können zudem Ansätze für weitere Forschungsarbeiten abgeleitet werden. Beispielsweise hat sich aus der Fallstudie ergeben, dass die im Rahmen der Methode aufgestellten Produktlebensphasen auf den entsprechenden Anwendungsfall angepasst werden müssen. Zukünftig sollte die Lieferkette der Produktfamilie daher in die Entwicklung einbezogen werden. Die Methode kann somit zu einer integrierten Vorgehensweise für die Entwicklung von Produktstrukturen und Lieferketten erweitert werden.

# Anhang

## A Zusammenstellung der Kennzahlen

### A.1 Platform Concept Evaluation nach HÖLTTÄ-OTTO/OTTO

HÖLTTÄ-OTTO und OTTO [Höl06] entwickeln in ihrer Arbeit ein Kennzahlensystem, um Produktplattformen bereits in der Konzeptphase bewerten zu können. Dazu leiten sie 19 Kennzahlen ab und ordnen diese den Bereichen Kundenzufriedenheit, Produktvielfalt, After-Sales, Organisation, Änderungsflexibilität und Entwicklungskomplexität zu. Die Kennzahlen auf einen Wertebereich von 0 bis 10 normiert und zur eigentlichen Konzeptauswahl durch eine gewichtete Summation zusammengeführt.

Die Kundenzufriedenheit wird durch die Kosten-Wert-Verteilung und der Kennzahl der Kundenanforderungen beschrieben. Für den ersten Aspekt erweitern HÖLTTÄ-OTTO und OTTO das in Bild A.1 dargestellte Kosten-Wert-Diagramm nach TANAKA [Tan89].

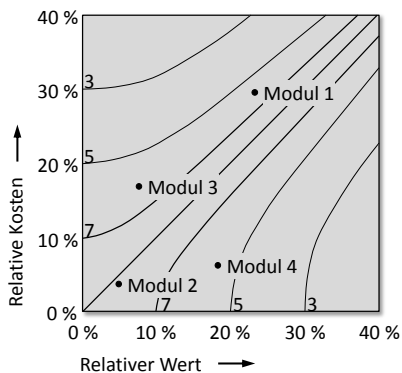


Bild A.1: Beispiel eines Kosten-Wert-Diagramms nach [Höl06]

Die Module der Produktfamilie werden entsprechend ihrer Kosten-Wert-Verteilung in das Diagramm eingetragen. Bei einem idealen 1:1-Verhältnis von Kosten und Wert

werden die Module mit 10 Punkten bewertet, während ungünstigere Verhältnisse mit 7, 5 oder 3 Punkten bewertet werden. Wie auch bei einem Großteil der folgenden Kennzahlen wird der Mittelwert aus den Einzelbewertungen für die Module berechnet, um die Kennzahl für die gesamte Produktfamilie zu berechnen.

Durch die Kennzahl *Customer Requirements* wird gemessen, in wie weit die Kundenanforderungen durch die Produktplattform erfüllt werden. Als Referenzwerte für die Kundenanforderungen können die Ziele verwendet werden, die beispielsweise in der Anwendung der Methode Quality Function Deployment abgeleitet wurden.

$$Y_{CR} = \frac{1}{M} \sum_{\text{variants } i} \frac{1}{K} \sum_{\text{requirements } j} w_{ij} R_{ij}$$

- mit:
- $w_{ij}$  = Gewichtung der Kundenanforderung  $j$  für das Produkt  $i$
  - $R_{ij}$  = Bewertung der Kundenanforderung  $j$  für das Produkt  $i$  auf einer Skala von 1 bis 10
  - $K$  = Anzahl der Kundenanforderungen
  - $M$  = Anzahl der Produktvarianten

Die erste Kennzahl aus dem Bereich Varianz, die Kennzahl *Carry-over*, bildet den Anteil der Funktionen eines Moduls ab, die in anderen Produktvarianten wiederverwendet werden können. Ziel ist es, Funktionen zu Modulen zusammenzufassen, die entweder in verschiedenen Varianten wiederverwendet werden können oder nur in einer Produktvariante verbaut werden.

$$Y_{\text{Carry}}^* = \frac{\text{Anzahl der Carry - over - Funktionen}}{\text{Anzahl der Funktionen}} \cdot 100$$

Für die Normierung der Kennzahl auf die verwendete Skala von 0 bis 10 werden, wie in Bild A.2 dargestellt, 10 Punkte bei 0 % oder 100 % Anteil Carry-over-Funktionen vergeben. Schlechtere Bewertungen werden für Module vergeben, deren Funktionen nicht eindeutig zugeordnet werden können.

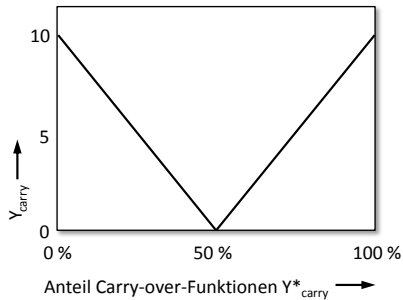


Bild A.2: Bestimmung der Kennzahl Carry-over nach [Höl06]

Ein wichtiger Aspekt, um von einer Plattform Produktvarianten abzuleiten, ist die Austauschbarkeit der plattformübergreifend verwendeten Module. Zur Bestimmung der Kennzahl *Common Modules* wird untersucht, in wie weit die Schnittstellen dieser Module angepasst werden müssen, um sie in verschiedenen Produktvarianten einzusetzen. Die Bewertung erfolgt anhand der folgenden Skala:

$$Y_{CM} = \begin{cases} 10 & \text{Kann unverändert in allen Varianten eingesetzt werden} \\ 7 & \text{Kann unverändert in mindestens zwei Varianten eingesetzt werden} \\ 5 & \text{Erfordert unterschiedliche Befestigungen} \\ 3 & \text{Erfordert konstruktive Änderungen der Schnittstellen} \\ 0 & \text{Erfordert für jede Variante eigene Schnittstellen} \end{cases}$$

Funktionen, die in der Produktfamilie in verschiedenen Spezifikationen auftreten können, werden durch die Kennzahl *Specification Variety* betrachtet. Wie bei der Kennzahl Carry-over ist es auch hier das Ziel, ausschließlich variante oder standardisierte Funktionen in einem Modul zusammenzufassen. Die Auswertung erfolgt daher analog zu der in Bild A.2 dargestellten Normierung, wobei der prozentuale Anteil der unterschiedlich spezifizierten Funktionen an der Gesamtanzahl der Funktionen eines Moduls als Eingangsgröße verwendet wird.

Als erster Effekt aus dem Bereich After-Sales wird die Zuverlässigkeit der Plattform durch die Kennzahl *Reliability* bewertet. HÖLTTÄ-OTTO und OTTO bauen ihre Kennzahl auf Vorarbeiten aus der Softwareentwicklung auf [Fer93]. Unter der Annahme einer gleichmäßigen Verteilung der Fehlermöglichkeiten wird die ideale Größe und Anzahl der Module aus der Quadratwurzel der Anzahl an möglichen Fehlern berechnet. Für größere Module wird eine größere Wahrscheinlichkeit für interne Fehler erwartet, während bei einer höheren Anzahl kleinerer Module ein Anstieg der Wahrscheinlichkeit für Fehler zwischen den Modulen angenommen werden kann. Die Kennzahl ergibt sich daher zu:

$$Y_{Rel\ 1} = 10 \cdot \min\left(\frac{\sqrt{n}}{\text{Anzahl der Module}}, \frac{\text{Anzahl der Module}}{\sqrt{n}}\right)$$

Da die Annahme einer gleichmäßig verteilten Anzahl an Fehlermöglichkeiten über alle Module jedoch eine starke Vereinfachung darstellt, wird eine weitere Zuverlässigkeitskennzahl definiert, die auf den Risiko-Prioritätszahlen aus einer Fehler-Möglichkeiten- und Einflussanalyse (FMEA) aufbaut.

$$Y_{Rel\ 2} = 10 - (RPZ_{max} - 1)^{\frac{1}{3}}$$

Aus Sicht der Wartung und des Service werden die Module dahingehend untersucht, ob sie mit benachbarten Modulen vereint oder separiert werden sollten. Auf einer Skala von 0 bis 10 wird der Anteil der Module bewertet, die geändert werden sollen.

Zur Bewertung der Umweltverträglichkeit der Produktplattform wird das in Tabelle A.1 dargestellte Bewertungsschema nach GRAEDEL et al. [Gra95] verwendet. In diesem Schema wird die Umweltverträglichkeit der einzelnen Module im gesamten Produktlebenszyklus auf einer Skala von 0 bis 4 bewertet. Bei einer optimalen Umweltverträglichkeit kann ein Modul 100 Punkte erreichen. Das Ergebnis der Bewertung auf den von HÖLTÄ-OTTO und OTTO verwendeten Bereich von 0 bis 10 skaliert.

Tabelle A.1: Bewertung der Umweltverträglichkeit eines Moduls nach [Gra95]

Phase im Produktlebenszyklus	Werkstoffe	Energieverbrauch	Feststoffe	Flüssigkeiten	Gase	Summe
Rohstoffabbau	2	2	2	3	3	12
Produktion	3	2	3	4	4	16
Verpackung und Transport	4	4	4	4	4	20
Betrieb	3	2	3	4	4	16
Aufarbeitung, Recycling, Entsorgung	2	3	4	4	4	17
<b>Summe</b>	<b>14</b>	<b>13</b>	<b>16</b>	<b>19</b>	<b>19</b>	<b>81</b>

Die Montage der Plattform betrachten HÖLTÄ-OTTO und OTTO im Bereich Organisation. Wie bereits für die Zuverlässigkeit werden zwei Kennzahlen definiert, die dem jeweiligen Erkenntnisstand entsprechend eingesetzt werden. Für die erste Kennzahl greifen sie auf die Berechnung von ERIXON zurück, wonach sich die ideale Anzahl an Modulen aus der Quadratwurzel der Teileanzahl des Produkts  $n$ , multipliziert mit einem firmenspezifischen Faktor  $K$ , ergibt. Es folgt in der Normierung auf die Skala von 1 bis 10.

$$Y_{Assy\ 1} = 10 \cdot \min\left(\frac{K\sqrt{n}}{\text{Anzahl der Module}}, \frac{\text{Anzahl der Module}}{K\sqrt{n}}\right)$$

Bei einem detaillierteren Erkenntnisstand wird die Montagegerechtigkeit der Produktplattform mit Hilfe der Methode Design for Assembly (DfA) nach BOOTHROYD und DEWHURST ermittelt. Unter der Annahme einer idealen Montagedauer von drei Sekunden und einer Modulanzahl von  $n$  kann das Verhältnis von idealer Montagedauer und der anhand der Methode DfA vorherbestimmten Montagedauer auf einer Skala von 0 bis 10 wie folgt berechnet werden:

$$Y_{Assy\ 2} = \frac{3n}{\text{Montagedauer}} \cdot 10$$

Durch eine Abstimmung von Produktstruktur und Entwicklungsorganisation kann die Entwicklung einer Produktplattform beschleunigt werden und Fehler können vermieden werden. Ziel ist die eindeutige Zuordnung von Entwicklungsteams und Modulen. Mittels des erweiterten DSM-Ansatzes nach Sosa et al. [Sosa03] ermitteln HÖLTTÄ-OTTO und OTTO jene Komponenten, die einem Modul oder einem Team zugeordnet sind. Die Kennzahl *Organization* wird aus der Schnittmenge der Teams oder Modulen zugeordneten Komponenten und der Vereinigungsmenge dieser Komponenten berechnet.

$$Y_{Org} = \frac{\text{Komponenten in Teams} \cap \text{Komponenten in Modulen}}{\text{Komponenten in Teams} \cup \text{Komponenten in Modulen}} \cdot 10$$

Die Fragestellung, welche Anteile einer Produktplattform zugekauft werden sollen, ist von vielen Aspekten wie der Verfügbarkeit eines Lieferanten, der Bedeutung des Moduls für die Firma oder dem technologischen Risiko abhängig. Durch eine geeignete Produktstrukturierung sollte sichergestellt werden, dass Eigenfertigungs- und Zukaufanteile eindeutig zugeordnet werden. Zur Berechnung der Kennzahl *Make-or-Buy* wird der Quotient aus der Anzahl der Zukaufkomponenten und der Anzahl der Komponenten eines Moduls berechnet. Die Normierung auf eine Skala von 0 bis 10 erfolgt wiederum analog zu Bild A.2.

$$Y_{\frac{M}{B}}^* = \frac{\text{Anzahl der Zukaufkomponenten}}{\text{Anzahl der Komponenten}} \cdot 100$$

Als verbleibender Effekt einer modularen Produktplattform im Bereich Organisation wird die Prüfbarkeit der Module abgebildet. Idealerweise kann die Funktion eines Moduls in seinem Systemumfeld bereits vor der Endmontage überprüft werden. Um die Prüfbarkeit eines Moduls in der Kennzahl *Testability* zu erfassen, werden die ein- und ausgehenden Flüsse des Moduls betrachtet. Allen Flüssen, die geprüft werden müssen, werden Bewertungen entsprechend der folgenden Liste zugewiesen. Die Kennzahl für ein Modul ergibt sich aus den Einzelbewertungen der Flüsse.

$$Y_{test} = \begin{cases} 10 & \text{direkte Prüfung der Flüsse unter Umgebungsbedingungen} \\ 7 & \text{indirekte Prüfung der Flüsse unter Umgebungsbedingungen} \\ 5 & \text{Prüfung mit statistischer Absicherung auf Prüfstand} \\ 3 & \text{Prüfung ohne statistische Absicherung auf Prüfstand} \\ 0 & \text{keine Prüfung} \end{cases}$$

Die Änderungsflexibilität einer Produktplattform beschreiben HÖLTTÄ-OTTO und OTTO mit den Kennzahlen *Unknown Isolation* und *Change Flexibility*. Die erste Kennzahl bezieht sich auf die Kapselung von Funktionen, die zu Beginn der Plattformentwicklung nicht eindeutig definiert werden können. Diese Funktionen werden zu Modulen zusammengefasst. Um eine spätere Integration in die Plattform sicherstellen zu können, müssen die Schnittstellen dieser Module allerdings anpassbar sein. Die Grundlage für die Berechnung der Kennzahl *Unknown Isolation* ist der Quotient aus vorhandenem und erforderlichem Spielraum für die Anpassung der Schnittstellen.

$$Y_{UI} = \frac{10}{\text{Anzahl der Module}} \sum_{\substack{\text{Schnittstellen} \\ \text{zu rel. Modulen}}} \frac{\text{vorhandener Bereich für Anpassungen}}{\text{erforderlicher Bereich für Anpassungen}}$$

Durch die zweite Kennzahl wird die Flexibilität der Plattform gegenüber Änderungen im Produktleben beschrieben. Die *Change Potential Number* wird anhand denkbarer Änderungsszenarien aufgestellt. In die Kennzahl fließt ein, in wie weit das Unternehmen auf eine entsprechende Änderung vorbereitet ist, ob die Plattform ohne konstruktive Änderungen angepasst werden kann sowie die Eintrittswahrscheinlichkeit für das betrachtete Szenario.

$$CPN = \frac{10}{N} \sum_{i=1}^N \frac{(R_i + F_i) - O_i + 8}{27}$$

- mit:  $N$  = maximale Anzahl der Änderungsarten, potentiellen Effekte der Änderung oder der Änderungsgründe
- $R$  = Grad der Vorbereitung auf einer Skala von 0 (gering) bis 10 (hoch)
- $F$  = Grad des Änderungsaufwands auf einer Skala von 0 (gering) bis 10 (hoch)
- $W$  = geschätzte Änderungshäufigkeit in einer Periode von 10 Jahren

In der letzten Gruppe werden die Kennzahlen zusammengefasst, die auf eine Reduzierung der Komplexität abzielen. Ein grundlegender Ansatz ist es hierbei, eine eindeutige Zuordnung von Funktionen und Modulen zu realisieren. Die Kennzahl *Form and Function Alignment* wird anhand der Komponenten berechnet, deren Zuordnung nicht eindeutig ist. Damit werden einerseits Komponenten berücksichtigt, die zwar einer

gemeinsamen Funktion zugeordnet sind, aber in verschiedenen Modulen verbaut sind und andererseits Komponenten, die zu einem gemeinsamen Modul gehören, im Produkt aber räumlich getrennt sind. Die Anzahl der jeweiligen Komponenten wird mit den Gewichtungsfaktoren  $w_1$  bzw.  $w_2$  multipliziert und aufsummiert.

$$Y_{f\&f}^* = w_1 \cdot (\text{Anzahl der Komponenten in mehreren Modulen}) \\ + w_2 \cdot (\text{Anzahl der räumlich getrennten Komponenten})$$

Zur Normierung auf die Skala von 0 bis 10 wird das in Bild A.3 dargestellte Diagramm verwendet. 10 Punkte werden für Produktplattformen vergeben, deren Komponenten vollständig räumlich und funktional zugeordnet werden können.

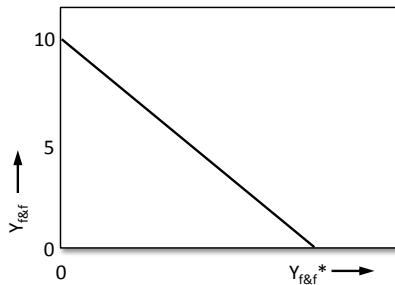


Bild A.3: Bestimmung der Kennzahl Form and Function Alignment nach [Höl06]

Eine Produktplattform wird im zeitlichen Verlauf vielfach ungeplanten Änderungen unterzogen. Durch die Kennzahl *Interface Flexibility* werden die Schnittstellen zwischen den Modulen der Plattform dahingehend betrachtet, wie stark sich Änderung eines Moduls auf die benachbarten Module auswirken. Zur Berechnung der Kennzahl greifen HÖLTTÄ-OTTO und OTTO auf eine eigene Vorarbeit [Höl05] zurück, in der sie verschiedene Flussarten zwischen Modulen hinsichtlich des Änderungsaufwands bei einer Weiterentwicklung bewerten. Darauf aufbauend werden die in Tabelle A.2 zusammengefassten Komplexitätsfaktoren abgeleitet.

Tabelle A.2: Komplexitätsfaktoren nach [Höl06]

Flussart	Faktor	Flussart	Faktor	Flussart	Faktor
Stofffluss	1,1	Mechanische Energie	1,7	Signal	1,3
Akustische Energie	3,8	Pneumatische Energie	3,2		
Elektrische Energie	1,2	Thermische Energie	2,2		

Die Kennzahl ergibt sich somit aus dem Quotient der Anzahl der Schnittstellen zwischen den Modulen und den aufsummierten Komplexitätsfaktoren.

$$Y_{re-d} = 10 \cdot 1,2 \left( \frac{\text{Anzahl der Schnittstellen}}{\sum \text{Komplexitätsfaktoren der Schnittstellen}} \right)$$

Aufgrund der starken Vernetzung der einzelnen Module einer Plattform können Änderungen an einem Modul sehr komplexe, nicht-lineare Auswirkungen auf das Gesamtsystem haben. Um ein vorhersehbares Systemverhalten zu realisieren, sollte die Änderung eines Flusses um einen Faktor die anderen Flüsse eines Moduls höchstens gleichgerichtet beeinflussen. Die Kennzahl *Interface Adjustment Factor (IAF)* wird entsprechend wie folgt bestimmt:

$$Y_{IAF} = \begin{cases} 0 & \text{kein IAF} \\ 3 & \text{IAF, aber 50 – 50 nicht gleichgerichtet} \\ 5 & \text{IAF, aber 75 – 25 nicht gleichgerichtet} \\ 10 & \text{IAF, Flüsse sind gleichgerichtet} \end{cases}$$

Um einen schnellen Austausch von Modulen zu Wartungszwecken sicherzustellen, sollte der Austausch bestenfalls keine Einstellarbeiten erfordern. Sehr aufwendig wird der Austausch eines Moduls, wenn Einstellarbeiten mit mehreren Freiheitsgraden vorgenommen werden müssen. Die Kennzahl für den Austausch von Modulen wird dementsprechend anhand der Freiheitsgrade ermittelt.

$$Y_{DOF} = \begin{cases} 10 & \text{keine Einstellarbeiten} \\ 5 & \text{Einstellarbeiten mit einem Freiheitsgrad} \\ 3 & \text{Einstellarbeiten mit zwei Freiheitsgraden} \\ 0 & \text{weitere} \end{cases}$$

Extreme Anforderungen führen mit einer hohen Wahrscheinlichkeit zu Problemen in der Entwicklung einer Plattform. Durch die Kennzahl *Limited Extremes* werden die aktuellen Anforderungen  $i$  mit denen des Vorgängerprodukts verglichen und mit einem Faktor für die Schwierigkeit (auf einer Skala von 0 bis 10) multipliziert. Die Kennzahl wird für jede Produktvariante einzeln berechnet. Zur Bewertung der Produktplattform wird der geringste Wert herangezogen.

$$Y_{ex} = \min \left( \left( \sum_i 10 - \left| \frac{\text{neue Anforderung}_i - \text{Anforderung}_i}{\text{Anforderung}_i} \right| \cdot \text{Schwierigkeit}_i \right) \right)$$

## A.2 Bewertungsschema für Produktstrukturen nach STEFFEN

Bereits in Abschnitt 3.3.2.4 ist das von STEFFEN [Ste07] entwickelte Bewertungsschema vorgestellt worden. In Tabelle A.3 und Tabelle A.4 werden die verwendeten Kriterien zusammengefasst.

Tabelle A.3: Bewertung der Produktstruktur (Produkt) nach [Ste07]

Checkliste zur Beurteilung des Produktkonzepts (1/2)		F	W	
Produkt		[✓]	[%]	[1-10]
Produkt-komplexität	Ist das System in überschaubare Einheiten gegliedert? Ist die Anzahl von Modulen in einem System höherer Ebene überschaubar? Sind Abhängigkeiten möglichst in Modulen gekapselt? Sind die Module interferenzfrei? Sind Schnittstellen eindeutig und klar definiert?			
Design	Erfüllt das System die Designvorgaben?			
Bauraum	Werden die Abmessungen und Genauigkeitsanforderungen eingehalten? Werden die Anforderungen an die Kinematik (Bewegungsmöglichkeiten, Fahrwege etc.) eingehalten? Werden die erforderlichen Kräfte aufgenommen oder erzeugt? Ist die Belastbarkeit der Tragstruktur gegeben?			
Gewicht	Werden die Anforderungen an das Systemgewicht und dessen Verteilung eingehalten?			
Leistung/ Effizienz	Werden die Vorgaben für die zu verwendende Energieart und –menge eingehalten? Werden die Vorgaben für die zu verwendenden Materialien und Betriebsstoffe eingehalten? Werden die Vorgaben für Information und Informationsaustausch eingehalten? Erfüllt das System seine Funktion unter allen definierten Betriebsbedingungen? Wird die Lebensdauer erreicht?			
Qualität/ Zuverlässigkeit	Lassen sich die Module getrennt testen und prüfen? Sind Redundanzen für risikobehaftete Systemelemente vorgesehen? Werden die Anforderungen der Arbeits- und Betriebssicherheit eingehalten?			
Demontage/ Recycling	Lassen sich die verwendeten Materialien und Betriebsstoffe trennen und dem Recycling zuführen?			
Verfügbarkeit/ Wartbarkeit	Sind das System oder kritische Systemelemente angemessen leicht wartbar?			
Erweiterbarkeit	Sind Systemelemente bei Veralterung austauschbar? Lässt sich die Produktleistung durch Mehrfachverwendung einzelner Module skalieren? Weisen austauschbare oder erweiterbare Module Steckkompatibilität auf?			
Rekonfigurier- barkeit	Werden Steuerungs- und Regelungsaufgaben möglichst dezentral abgearbeitet? Können Module ausgetauscht und das System rekonfiguriert werden?			
Gesetzliche Rahmenbed.	Werden alle rechtlichen Voraussetzungen erfüllt?			
Patente	Werden Patentrechte verletzt?			
Bedienung	Ist eine ergonomische Bedienung des Systems gegeben? Ist diese über die Produktfamilie vergleichbar?			
Kosten/Preis	Werden Kostenrestriktionen eingehalten?			

Legende:

F Festforderung

W Wunschforderung

Tabelle A.4: Bewertung der Produktstruktur (Produktprogramm/-entstehung) nach [Ste07]

Checkliste zur Beurteilung des Produktkonzepts (2/2)		F	W	
<b>Produktprogramm</b>		[✓]	[%]	[1-10]
Produktprogrammbreite	Werden Systemelemente im Produkt oder in der Produktfamilie konsequent mehrfach verwendet?			
Produktgenerationen	Werden Systemelemente aus/in anderen Produktgenerationen konsequent wiederverwendet? Werden strategische Entscheidungen des Unternehmens berücksichtigt?			
Stabilität	Ist die Produktstruktur ausreichend stabil gegen zukünftige Änderungen von Anforderungen und technologischen Randbedingungen?			
Differenzierungsqualität	Lassen sich Varianten gegeneinander ausreichend differenzieren? Bleibt Wieder- und Mehrfachverwendung auf nicht sichtbare Systemelemente beschränkt?			
Varianz der Kostenanforderungen	Kann die Varianz der Anforderungen in Kosten und Leistung mit angemessenem Aufwand gewährleistet werden?			
Standardisierbarkeit	Werden konsequent Normteile verwendet? Werden Industriestandards berücksichtigt und Zulieferer eingebunden?			
Erweiterbarkeit	Sind Technologiezyklen in der Produktstruktur berücksichtigt? Ist die Erweiterbarkeit des Systems langfristig sichergestellt?			
<b>Produktentstehung</b>				
Entwicklungszeit/-aufwand	Steht der Aufwand zur Entwicklung einer Produktstruktur (einer Plattform) im Verhältnis zum Aufwand? Ist der Time-to-Market erreichbar?			
Entwicklungstiefe	Sind alle notwendigen Kompetenzen zur Ausarbeitung vorhanden? Sind Zulieferer eingebunden bzw. verfügbar?			
Ablauforganisation	Kann das Entwicklungsprojekt durchgeführt werden? Sind ausreichend Kapazitäten vorhanden? Ist die Ablauforganisation richtig aufgestellt?			
Fertigung	Sind alle notwendigen Kompetenzen zur Fertigung vorhanden? Sind Zulieferer eingebunden bzw. verfügbar? Ist die Fertigung und Montage einfach möglich?			
Transport	Lässt sich das Produkt mit angemessenem logistischem Aufwand transportieren bzw. ausliefern?			
Lieferzeit	Ist die marktübliche Lieferzeit im Serienbetrieb realisierbar?			
...	...			
Zusammenfassende Bewertung			100	

Legende: F Festforderung W Wunschforderung

### A.3 Degree of Commonality Index nach Collier

Der *Degree of Commonality Index (DCI)* ist eine Kennzahl zur Bewertung der Komponentenkommunalität einer Produktplattform. COLLIER [Col81] leitet zur Berechnung der

Kennzahl DCI das Verhältnis von Ausgangskomponenten zu eindeutig abgrenzbaren Komponenten aus der Produktstruktur ab.

$$DCI = \frac{\sum_{j=i+1}^{i+d} \Phi_j}{d} \quad 0 \leq DCI \leq \beta = \sum_{j=i+1}^{i+d} \Phi_j$$

- mit:  $\Phi_j$  = Anzahl der direkten Ausgangskomponenten der Komponente  $j$   
 $d$  = Anzahl der eindeutig abgrenzbaren Komponenten  
 $i$  = Anzahl der Endprodukte

Bild A.4 zeigt drei Beispiele für die Berechnung der Kennzahl DCI für jeweils zwei Endprodukte. Während im ersten Fall beide Endprodukte aus verschiedenen Komponenten gefertigt werden, kann im Fall 3 durch die Wiederverwendung von Komponenten ein deutlich höherer DCI erreicht werden.

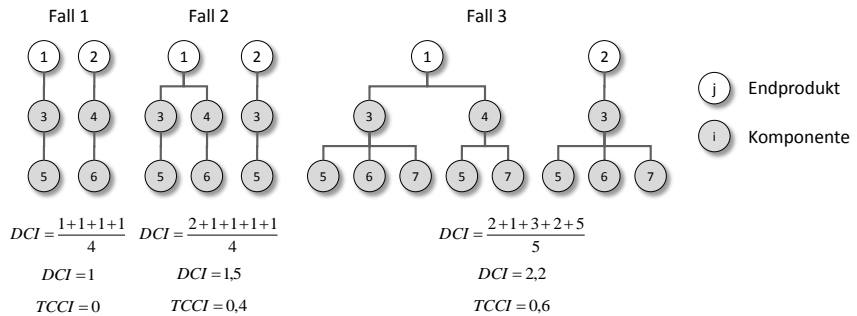


Bild A.4: Berechnungsbeispiele für die Kennzahlen DCI und TCCI

**Bewertung:** Da durch die Kennzahl nur die Kommunalität der Komponenten einer Produktfamilie bewertet wird, kann sie nicht für eine umfassende Bewertung von Produktfamilien eingesetzt werden.

#### A.4 Total Constant Commonality Index nach WACKER/TRELEVEN

Da der DCI nach COLLIER keinen festgelegten Wertebereich hat, ist er nur schwer für den Vergleich von Produktplattformen einsetzbar. WACKER und TRELEVEN [Wac86] leiten daher auf Grundlage des DCI den *Total Constant Commonality Index (TCCI)* ab. Der TCCI beschreibt die Kommunalität einer Produktfamilie in einem Wertebereich von 0 bis 1, wobei sich ein TCCI von 1 bei einer maximal möglichen Kommunalität ergibt. In Bild A.4 werden DCI und TCCI gegenübergestellt.

$$TCCI = 1 - \frac{d - 1}{\sum_{j=1}^d \Phi_j - 1}$$

*Bewertung:* Gegenüber dem DCI wird durch den TCCI die Vergleichbarkeit verbessert, die Anwendung ist aber weiterhin ausschließlich auf Kommunalitätsaspekte beschränkt.

### A.5 Component Part Commonality Index nach JIAO/TSENG

Bei dem von JIAO und TSENG [Jia00] entwickelten *Component Part Commonality Index* ( $CI^{(C)}$ ) handelt es sich um eine Erweiterung des DCI. Gegenüber der ursprünglichen Kennzahl beziehen JIAO und TSENG zusätzlich die Kosten der Komponenten, die Stückzahlen der verschiedenen Produktvarianten und die Anzahl an Komponenten, die für einen Montageschritt benötigt werden.

$$CI^{(C)} = \frac{\sum_{j=1}^d (P_j \sum_{i=1}^m \Phi_{ij} \sum_{i=1}^m (V_i Q_{ij}))}{\sum_{j=1}^d (P_j \sum_{i=1}^m (V_i Q_{ij}))} \quad 1 \leq CI^{(C)} \leq \alpha = \sum_{j=1}^d \sum_{i=1}^m \Phi_{ij}$$

- mit:
- $d$  = Anzahl der eindeutig abgrenzbaren Komponenten  $j$  in der Produktfamilie
  - $P_j$  = Preis einer Zukaufkomponente oder geschätzte Kosten einer eigengefertigten Komponente
  - $m$  = Anzahl der Endprodukte  $i$
  - $d_j$  = eindeutig abgrenzbare Komponente  $j$
  - $V_i$  = Stückzahl des Endprodukts  $i$  in der Produktfamilie
  - $Q_{ij}$  = Anzahl der für Produkt  $i$  erforderlichen eindeutig abgrenzbaren Komponente  $j$
  - $\Phi_j$  = Anzahl der direkten Ausgangskomponenten der Komponente  $j$  über alle Produktebenen von Endprodukt  $i$

In Bild A.5 sind drei Produktstrukturen für die Berechnung des  $CI^{(C)}$  abgebildet. Der den Komponenten angegliederte Wert gibt an, wie oft die Komponente für den jeweiligen Prozessschritt erforderlich ist.

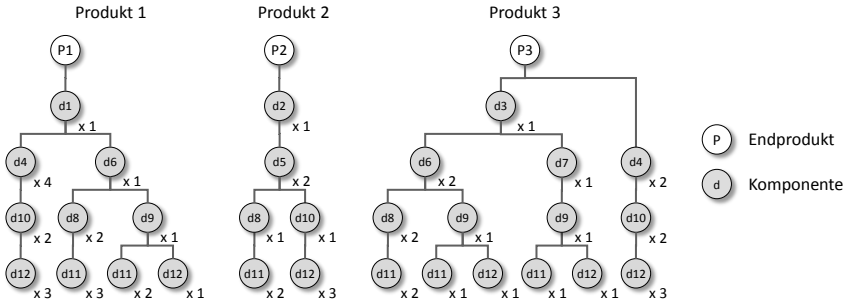


Bild A.5: Beispiel einer Produktfamilie zur Berechnung der Kennzahl CI(C)

Das Vorgehen zur Berechnung des  $CI^{(C)}$  für die dargestellte Produktfamilie zeigt Tabelle A.5. In diesem Beispiel ergibt sich ein  $CI^{(C)}$  von 3,79.

Tabelle A.5: Vorgehen zur Berechnung der Kennzahl  $CI^{(C)}$

$d_j$	$P_j$	$\sum_{i=1}^3 \Phi_{ij}$	$V_i=100, Q_{2j}$	$V_i=80, Q_{2j}$	$V_i=50, Q_{3j}$	$\sum_{i=1}^3 (V_i Q_{ij})$	$P_j \sum_{i=1}^3 \Phi_{ij} \sum_{i=1}^3 (V_i Q_{ij})$	$P_j \sum_{i=1}^3 (V_i Q_{ij})$
d <sub>1</sub>	6,4	1	1	0	0	100	640	640
d <sub>2</sub>	2,8	1	0	1	0	80	224	224
d <sub>3</sub>	7,1	1	0	0	1	50	355	355
d <sub>4</sub>	3,1	2	4	0	2	500	3100	1550
d <sub>5</sub>	3,9	1	0	2	0	160	624	624
d <sub>6</sub>	6,8	2	1	0	2	200	2720	1360
d <sub>7</sub>	4,1	1	0	0	1	50	205	205
d <sub>8</sub>	3,7	3	2	2	4	560	6216	2072
d <sub>9</sub>	1,15	3	1	0	3	250	862,5	287,5
d <sub>10</sub>	3,5	3	8	2	4	1160	12180	4060
d <sub>11</sub>	1,2	6	8	4	11	1670	12024	2004
d <sub>12</sub>	1,4	6	25	6	15	3630	30492	5082

**Bewertung:** Durch den  $CI^{(C)}$  wird gegenüber dem DCI und DCCI eine höhere Aussagekraft angestrebt. Dies bedingt allerdings auch einen höheren Aufwand bei der Erhebung der Kennzahl. Außerdem bleibt der Betrachtungsrahmen auf Kommunalitätsaspekte beschränkt.

### A.6 Design for Variety-Kennzahlen nach MARTIN/ISHII

Im Rahmen ihrer Methode Design for Variety [Mar96;Mar97] entwickeln MARTIN und ISHII drei Kennzahlen, um die Kosten eines variantenreichen Produktprogramms zu erfassen. Durch die Kennzahlen werden die Kommunalität der Produktplattform, der Variantenbildungspunkt im Produktionsprozess sowie die Rüstkosten abgebildet.

Als erster Aspekt wird die Kommunalität der Produktplattform durch die Kennzahl *Commonality Index (CI)* erfasst. Diese berechnet den Anteil an Alleinteilen in der Produktfamilie.

$$CI = \frac{u}{\sum_{j=1}^{v_n} p_j}$$

mit:  $u$  = Anzahl der einmalig verwendeten Teile  
 $p_j$  = Teilezahl in Produktvariante  $j$   
 $v_n$  = Anzahl der angebotenen Produktvarianten

Die Kennzahl *Differentiation Point Index (DI)* erfasst die Variantenbildung im Produktionsprozess. Durch eine späte Bildung von Varianten wird es ermöglicht, die Produktionsprozesse weitgehend zu standardisieren. Außerdem können Logistik- und Lagerhaltungsaufwände verringert werden. Der  $DI_1$  wird wie folgt berechnet.

$$DI_1 = \frac{\sum_{i=1}^n v_i}{n v_n}$$

mit:  $v_i$  = Anzahl der den Teilprozess  $i$  verlassenden Varianten  
 $n$  = Anzahl der Teilprozesse  
 $v_n$  = Anzahl der angebotenen Produktvarianten

Der  $DI_1$  berücksichtigt allerdings nicht die Durchlaufzeiten der einzelnen Teilprozesse. Beispielsweise hat es auch einen negativen Einfluss, wenn Varianten zwar in den letzten Prozessschritten gebildet werden, diese aber eine überdurchschnittliche Durchlaufzeit haben. MARTIN und ISHII erweitern den Differentiation Point Index daher um die Durchlaufzeit, die ein Produkt von Teilprozess  $i$  bis zum Verkauf hat.

$$DI_2 = \frac{\sum_{i=1}^n d_i v_i}{n d_1 v_n}$$

mit:  $d_i$  = Durchlaufzeit von Teilprozess  $i$  bis zum Verkauf  
 $d_1$  = Durchlaufzeit von Produktionsbeginn bis zum Verkauf

Allerdings wird auch durch den  $DI_2$  nicht die Kapitalbindung im Produktionsprozess berücksichtigt. Um die Kapitalbindung gering zu halten, sollten Bauteile und -gruppen mit einer hohen Kapitalbindung erst spät im Produktionsprozess verbaut werden. Entsprechend wird der DI um den Faktor des in Teilprozess  $i$  eingebrachten Kapitals erweitert.

$$DI_3 = \frac{\sum_{i=1}^n d_i v_i a_i}{n d_1 v_n \sum_{i=1}^n a_i}$$

mit:  $a_i$  = in Teilprozess  $i$  eingebrachtes Kapital

Neben der Kommunalität und dem Variantenbildungspunkt erfassen MARTIN und ISHII die Rüstkosten in einer Kennzahl. Um die Rüstkosten gering zu halten, sollten mit hohen Rüstkosten beaufschlagte Prozessschritte nur mit einer geringen Variantenvielfalt durchlaufen werden. Dies wird in der Kennzahl *Setup Cost Index (SI)* zum Ausdruck gebracht.

$$SI = \frac{\sum_{i=1}^n v_i c_i}{\sum_{j=1}^{v_n} C_j}$$

mit:  $v_i$  = Anzahl der den Teilprozess  $i$  verlassenden Varianten

$c_i$  = Rüstkosten für den Teilprozess  $i$

$C_j$  = Gesamtkosten (Material-, Arbeits- und Gemeinkosten) der Produktvariante  $j$

*Bewertung:* Die von MARTIN und ISHII aufgestellten Kennzahlen betrachten neben der Kommunalität in der Produktfamilie auch den Produktionsprozess. Für eine umfassende Bewertung modularer Produktfamilien ist der Betrachtungsrahmen der Kennzahlen DI und SI allerdings nicht ausreichend.

## B Zuordnung der Modultreiber zu den Produktlebensphasen

In der Produktentwicklung stellen sich neben der technisch-funktionalen Entkopplung auch produktstrategische Anforderungen an die Modularisierung. Diese werden durch die Modultreiber *Zeitliche Varianz* und *Übernahmeteil* abgebildet. Der Modultreiber *Zeitliche Varianz* betrifft Komponenten, die einer geplanten technischen Änderung oder einer Änderung des Produktdesigns unterliegen oder unter Umständen von einer Technologieänderung betroffen sein werden. Dagegen zielt der Modultreiber *Übernahmeteil* auf Komponenten, die von einer Produktgeneration in die nächste übernommen werden sollen. In beiden Fällen muss eine weitgehende Übereinstimmung mit der technisch-funktionalen Produktstruktur erreicht werden, da einerseits Änderungen an zeitlich varianten Modulen keine Auswirkungen auf andere Module haben sollten, während andererseits eine Weiterentwicklung des Produkts keine Änderungen an Übernahmemodulen zur Folge haben darf.

In der Produkterstellung schließt die Beschaffungsphase an die Produktentwicklung an. Im Gegensatz zu der vorangegangenen Entwicklungsphase werden in der Beschaf-

fangsphase Module ausschließlich aufgrund von produktstrategischen Treibern gebildet. Dabei wirkt sich die Beschaffungsstrategie Modular Sourcing direkt auf die Produktstrukturierung aus. Entsprechend dieser Beschaffungsstrategie werden vormontierte Module vom Lieferanten bezogen. Gegebenenfalls können auch Forschungs- und Entwicklungsleistungen vom Lieferanten erbracht werden. Aus der Beschaffungsstrategie Modular Sourcing wird der Modultreiber *Modulbeschaffung* abgeleitet. Er zielt auf die Zusammenfassung von Komponenten, die nach einer der Modular Sourcing-Strategie von einem Zulieferer bezogen werden sollen.

Die Herstellung von Produkten kann in Teilefertigung und Montage untergliedert werden. Der Modultreiber *Prozess* wirkt sich auf beide Teilbereiche aus. Module im Sinne dieses Treibers fassen Komponenten mit ähnlichen Fertigungs- oder Montageprozessen zusammen. Der Modultreiber *Organisation* fasst dagegen Komponenten zusammen, die einen geeigneten Arbeitsumfang für eine Organisationseinheit bilden. Der dritte Modultreiber der Herstellungsphase bezieht sich auf die Montage des Produkts. Durch den Modultreiber *Separates Testen* werden Komponenten zusammengefasst, die einer gemeinsamen Prüfung auf Modulebene unterliegen.

Der folgende Vertrieb bildet die Schnittstelle des Unternehmens zum Kunden. In dieser Phase ist die Bildung einer variantengerechten Produktstruktur das Ziel der Modularisierung, die eine Konfiguration von Produktvarianten durch den Kunden und bestenfalls ohne die Beteiligung Konstruktion ermöglicht [Sch80]. In der Vertriebsphase wird daher der Modultreiber *Unterscheidungsmerkmal* berücksichtigt. Durch diesen Modultreiber werden die Komponenten zusammengefasst, die von einem varianten Merkmal beeinflusst werden.

In der Nutzungsphase sollte die Produktstruktur den Nutzer zur Anpassung oder Erweiterung des Produkts durch den Austausch von Modulen befähigen und eine einfache Instandhaltung des Produkts gestatten. Der Modultreiber *Anpassung/Erweiterung* betrifft daher Komponenten, die in der Nutzungsphase des Produkts durch den Nutzer ausgetauscht werden sollen, um die Funktionalität des Produkts anzupassen oder zu erweitern. Die Instandhaltung wird dagegen betrieben, um das Produkt möglichst lange in einem betriebsfähigen Zustand zu halten oder nach einer Störung schnell wieder in einen funktionsfähigen Zustand zurückzusetzen [Lew85]. Der Modultreiber *Instandhaltung* betrifft dementsprechend Komponenten, die zu Wartungs-, Instandsetzungs- oder Inspektionsmaßnahmen demontierbar sein müssen.

Am Lebensende des Produkts steht das Recycling oder die Entsorgung. Nach der VDI-Richtlinie 2243 ist Recycling die erneute Verwendung oder Verwertung von Produkten, Teilen von Produkten sowie Werkstoffen in Form von Kreisläufen [VDI02]. Module sollten bestimmten Recyclinggruppen zuzuordnen sein, um ein wirtschaftliches Produktrecycling zu ermöglichen. Entsprechend der Recyclinggruppen ergeben sich für die

Phase Recycling/Entsorgung die Modultreiber *Produktrecycling, Stoffrecycling, Thermische Verwertung und Beseitigung*.

## C Unterscheidungsmerkmale der Produktfamilie von Sprühgeräten

Im Folgenden werden die Unterscheidungsmerkmale der Produktfamilie von Sprühgeräten vorgestellt und erläutert:

- *Sprühbahnbreite*: Die Herbizid-Sprühgeräte der Produktfamilie werden auf freien Flächen, aber auch in eng stehenden Reihenkulturen eingesetzt. Um in Reihenkulturen auf die entsprechende Pflanzungsbreite angepasst werden zu können, müssen Produktvarianten mit verschiedenen Sprühbahnbreiten verfügbar sein.
- *Sprühbahnanordnung*: Alternativ zur mittigen Anordnung der Sprühbahn sind auch Produktvarianten mit versetzt angeordneten Sprühbahnen erforderlich. Dies ist unter anderem in Baumpflanzungen vorteilhaft, in denen das Präparat möglichst nah an die Pflanzen herangebracht werden soll.
- *Flexible Schirmanpassung*: Bei Produktvarianten mit flexibler Schirmanpassung kann der Sprühschirm beim Auftreffen auf ein Hindernis zurückschwenken. Durch dieses Merkmal kann eine Beschädigung von empfindlichen Pflanzen vermieden werden oder eine Beschädigung des Schirms beim Auftreffen auf festen Hindernissen wie Baumstümpfen oder Parkbänken.
- *Selektives Sprühen*: Durch das optionale Merkmal selektives Sprühen kann die Herbizidausbringung selektiv gestartet werden. Dies ist bei einem ungleichmäßigen Unkrautbewuchs erforderlich, um aus Gründen des Umweltschutzes sowie der Wirtschaftlichkeit eine ununterbrochene Herbizidausbringung zu vermeiden.
- *Geländegängigkeit*: Durch das Merkmal Geländegängigkeit wird zwischen Sprühgeräten einer hohen Wendigkeit für einfache Geländebedingungen und Geräten für schwierige Bedingungen unterschieden. Während in der Grundausführung der Sprühschirm vor dem Laufrad montiert wird, ist bei geländegängigen Geräten der Sprühschirm hinter dem Laufrad positioniert. Zusätzlich wird ein Laufrad mit einem größeren Durchmesser verbaut. Durch das größere Laufrad können größere Hindernisse überwunden werden, während die Anordnung des Sprühschirms verhindert, dass es zu direkten Kollisionen zwischen Sprühschirm und Hindernissen kommt.

- *Anzahl der Sprühbahnen:* Bei einer seitlich versetzten Sprühbahn kann eine zweite Sprühbahn auf der gegenüber liegenden Seite angeordnet werden. Bei Reihenkulturen ermöglichen zwei Sprühbahnen die Behandlung von zwei Reihenseiten in einem Durchgang.

## D Aufstellen von Funktionsstrukturen

Für das Erstellen der Funktionsstruktur wird auf die formalisierte Beschreibung nach EHRENSPIEL [Ehr09] zurückgegriffen. Funktionen werden danach aus Eingangs- und Ausgangsgrößen, einer Operation, die eine Eigenschaftsänderung durch einen Funktionsträger bewirkt, und aus Relationen, die die Verbindungen darstellen, aufgebaut (Bild B.1). Dabei ist nur eine Verknüpfung über *Zustand – Relation – Operation – Relation – Zustand* zulässig. Einzelne Teilfunktionen werden über ihre Zustände zu einer Funktionsstruktur verbunden. Eine Funktionsstruktur darf somit nur mit Zuständen beginnen und enden.

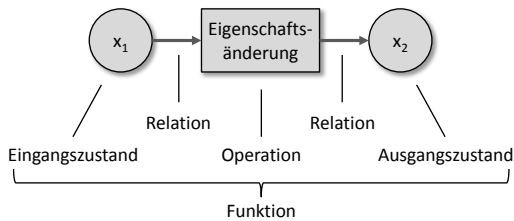


Bild B.1: Elemente zur Funktionsbeschreibung nach [Ehr09]

Die Eigenschaftsänderung der Funktion kann auf einer abstrakten Ebene durch die elementaren Operationen leiten, ändern, wandeln, vereinigen und speichern beschrieben werden. Zugunsten einer anschaulichen Beschreibung werden statt der elementaren Operationen im Allgemeinen technische Operationen verwendet. Beispielsweise kann die elementare Operation *leiten* durch technische Operationen wie zu- und abführen, tragen, transportieren, übertragen usw. beschrieben werden.

Relationen werden durch Pfeilsymbole angegeben. Es kann zwischen einfach wirkenden, rückwirkenden und ungerichteten Relationen unterschieden werden (Bild B.2). Bei einfach wirkenden Relationen ist eine eindeutige Ablaufrichtung von Eingangs- zu Ausgangszustand gegeben. Bei rückwirkenden Relationen kann die Zustandsänderungen sowohl in die eine als auch in die andere Richtung durchlaufen werden. Eine Differenzierung von Eingangs- und Ausgangszustand ist in diesem Fall nur für einen bestimmten Betriebszustand des Systems möglich. Bei ungerichteten Relationen ist dagegen eine Unterscheidung in Eingangs- und Ausgangszustand physikalisch nicht möglich.

Beispielsweise müssen bei Kraft- oder Momentengleichgewichten beide Zustände zugleich erfüllt sein.

Art der Relation	Symbol
einfach wirkend	$\longrightarrow$
rückwirkend	$\longleftrightarrow$
ungerichtet	$\text{---}$

Bild B.2: Arten von Relationen nach [Ehr09]

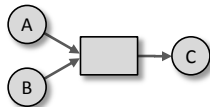
Mit Hilfe von Zuständen und Operationen lassen sich logische Sachverhalte darstellen. Unterschieden werden kann eine einfache Verknüpfung sowie Operationsvereinigungen (-verzweigungen) und Zustandsvereinigungen (-verzweigungen) (Bild B.3).

Einfache Zustandsänderung



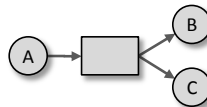
wenn A, dann B

Operationsvereinigung



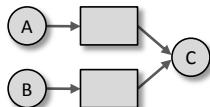
wenn A und B, dann C

Operationsverzweigung



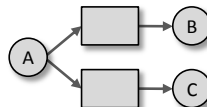
wenn A, dann B und C

Zustandsvereinigung



wenn A oder B, dann C

Zustandsvereinigung



wenn A, dann B oder C

Bild B.3: Logik der Zustandsänderungen bei gerichteten Relationen nach [Ehr09]

## E Konzeptauswahl Tauchpumpen

Im Folgenden werden die Module Interface Graphen sowie die Netzpläne der beiden Konzepte für die Modularisierung der Produktfamilie der Tauchpumpen vorgestellt. Im Anschluss wird die Berechnung des Gesamtwerts der beiden Konzepte anhand der Kennzahlen Module Coupling Independence und Module Driver Independence zusammengefasst.

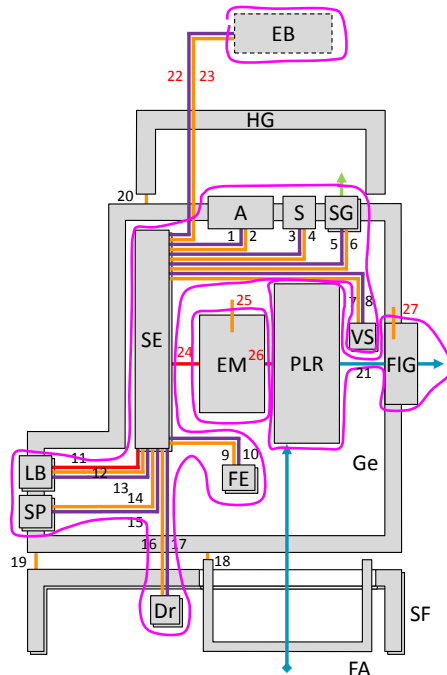


Bild E.1: Module Interface Graph mit der Anzahl der Schnittstellen innerhalb (schwarz) und zwischen (rot) den Modulen (Konzept 1)

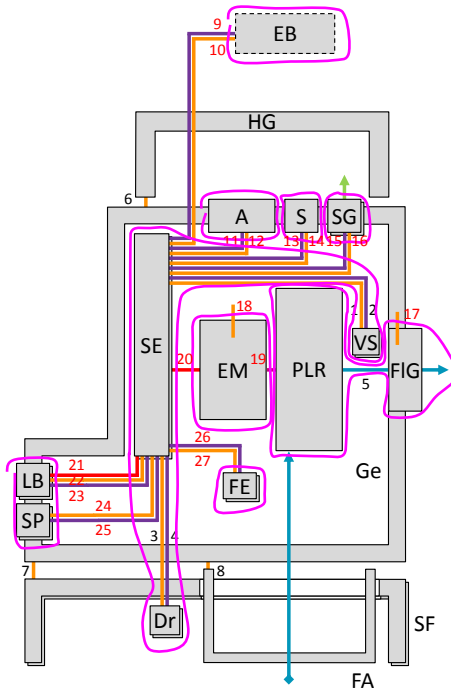


Bild E.2: Module Interface Graph mit der Anzahl der Schnittstellen innerhalb (schwarz) und zwischen (rot) den Modulen (Konzept 2)

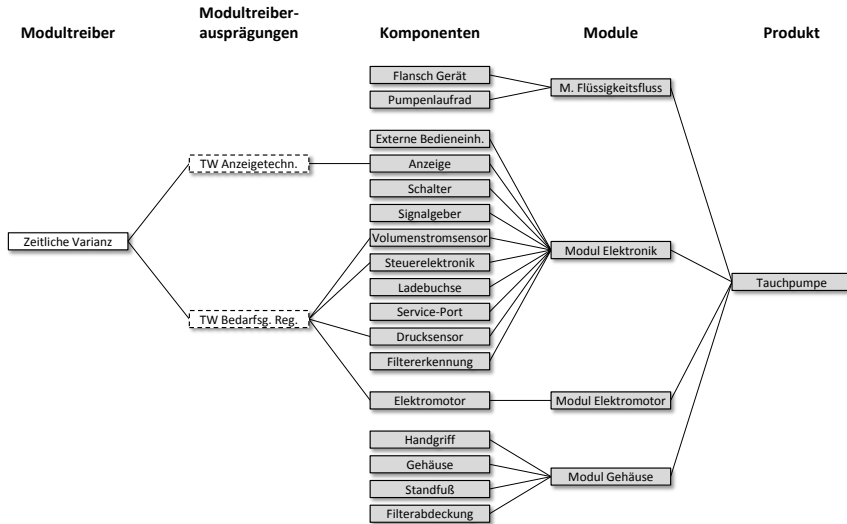


Bild E.3: Modulaufteilung der Phase Produktentwicklung (Konzept 1)

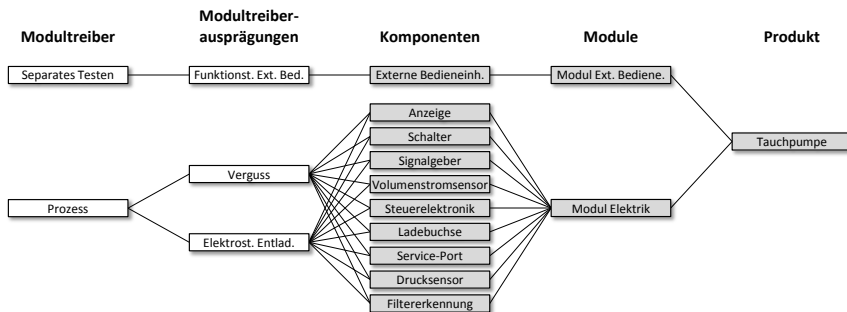


Bild E.4: Modulaufteilung der Phase Herstellung (Konzept 1)

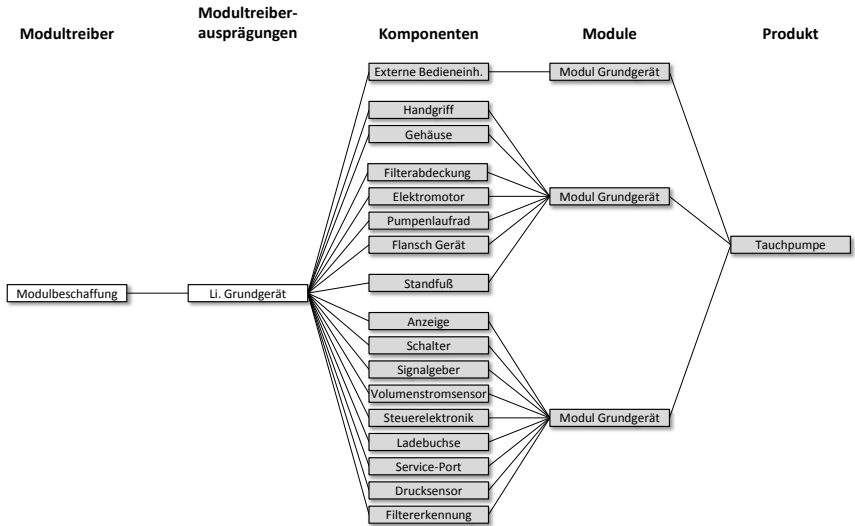


Bild E.5: Modulaufteilung der Phase Beschaffung (Konzept 1)

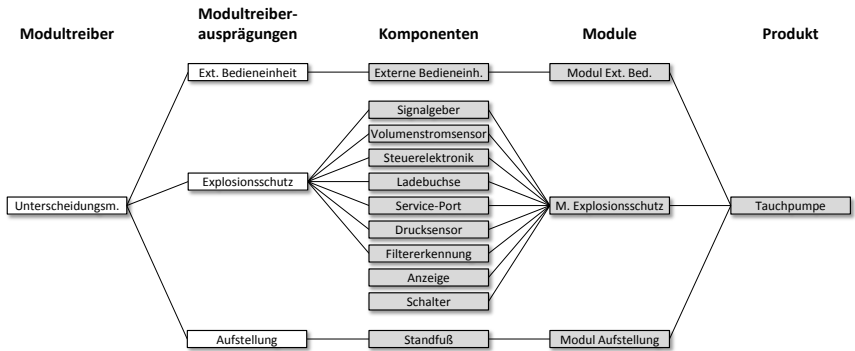


Bild E.6: Modulaufteilung der Phase Vertrieb (Konzept 1)

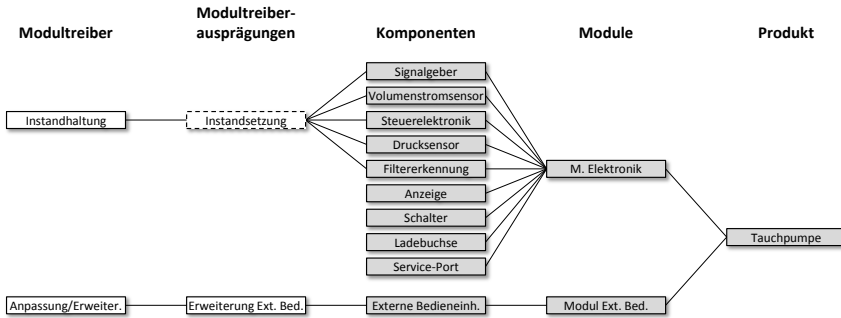


Bild E.7: Modulaufteilung der Phase Nutzung (Konzept 1)

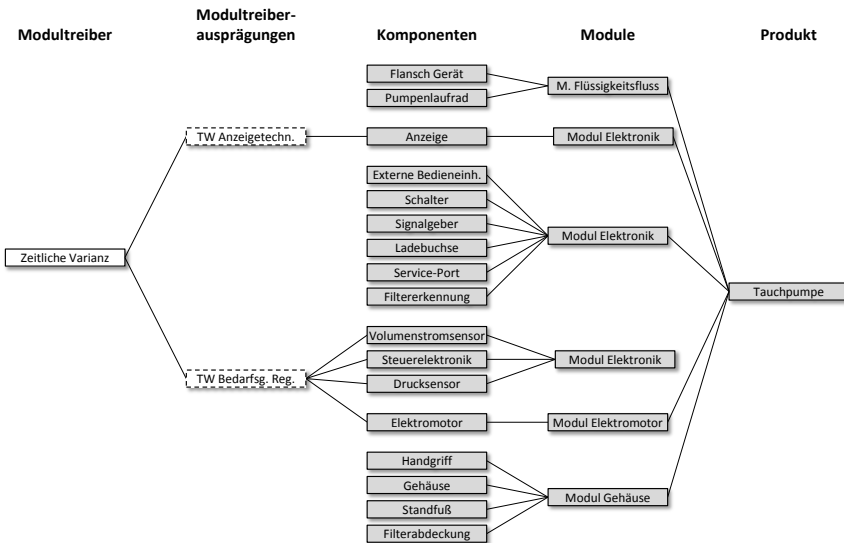


Bild E.8: Modulaufteilung der Phase Produktentwicklung (Konzept 2)

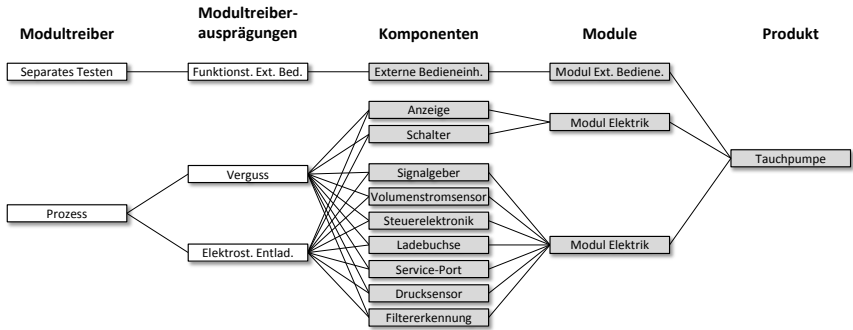


Bild E.9: Modulaufteilung der Phase Herstellung (Konzept 2)

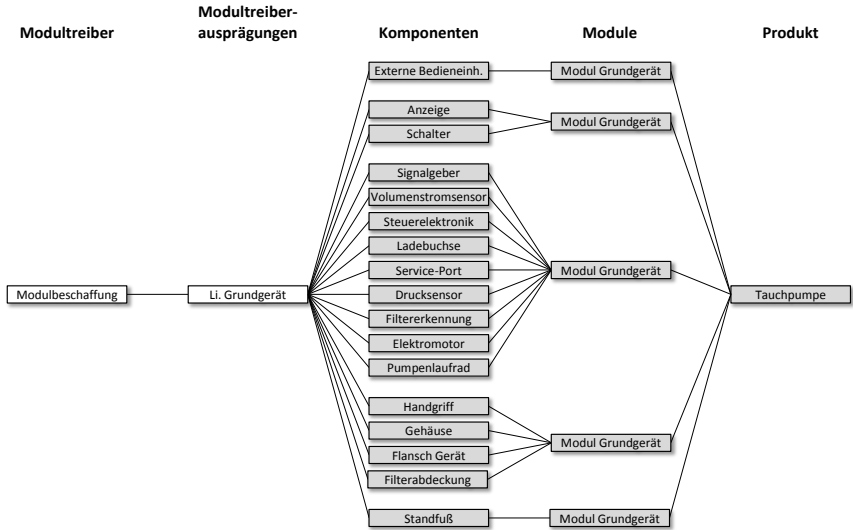


Bild E.10: Modulaufteilung der Phase Beschaffung (Konzept 2)

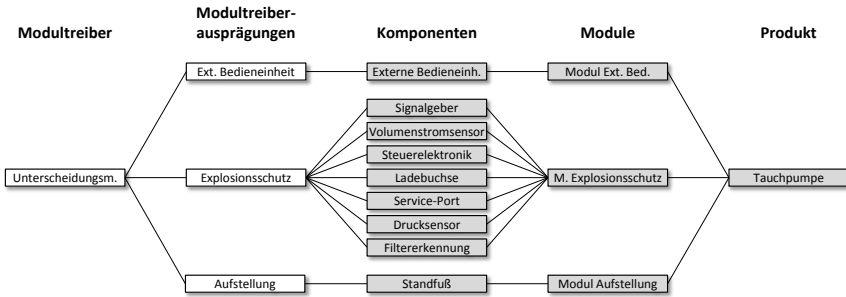


Bild E.11: Modulaufteilung der Phase Vertrieb (Konzept 2)

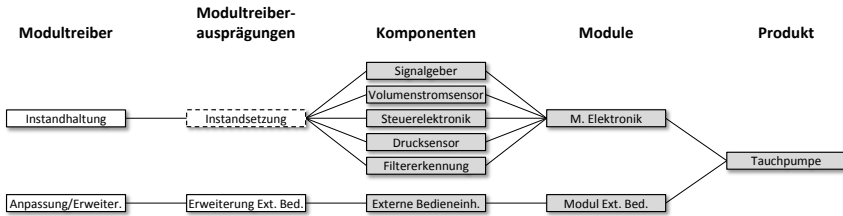


Bild E.12: Modulaufteilung der Phase Nutzung (Konzept 2)

Tabelle E.1: Berechnung des Gesamtwerts der Konzepte 1 und 2

	Konzept 1	Konzept 2
<b>Module Coupling Independence</b>		
	$MCI = \frac{21}{27} \approx 0,78$	$MCI = \frac{8}{27} \approx 0,30$
<b>Module Driver Independence</b>		
$MDI_1$ (Zeitl. Varianz)	$MDI_1 = \frac{1}{10+3} + \frac{4}{11+1} \approx 0,21$	$MDI_1 = \frac{1}{1} + \frac{4}{2} \approx 1$
$MDI_2$ (Sep. Testen)	$MDI_2 = \frac{1}{1} \approx 1$	$MDI_2 = \frac{1}{1} \approx 1$
$MDI_3$ (Prozess)	$MDI_3 = \frac{9}{9+9} + \frac{9}{9+9} \approx 0,50$	$MDI_3 = \frac{9}{9+9} + \frac{9}{9+9} \approx 0,50$
$MDI_4$ (Modulbes.)	$MDI_4 = \frac{17}{17} \approx 1$	$MDI_4 = \frac{17}{17} \approx 1$
$MDI_5$ (Untersch.)	$MDI_5 = \frac{1}{1} + \frac{7}{9} + \frac{1}{1} \approx 0,93$	$MDI_5 = \frac{1}{1} + \frac{7}{7} + \frac{1}{1} \approx 1$
$MDI_6$ (Instandhaltung)	$MDI_6 = \frac{5}{9} \approx 0,56$	$MDI_6 = \frac{4}{1} \approx 1$
$MDI_7$ (Anp./Erw.)	$MDI_7 = \frac{1}{1} \approx 1$	$MDI_7 = \frac{1}{1} \approx 1$
	$MDI = \frac{\sum_{j=1}^m MDI_j}{m} = 0,85$	$MDI = \frac{\sum_{j=1}^m MDI_j}{m} = 0,93$
<b>Gesamtwert</b>		
	$Gw = 0,4 \cdot MCI + 0,6 \cdot MDI = 0,82$	$Gw = 0,4 \cdot MCI + 0,6 \cdot MDI = 0,68$



## Literatur

- [Aka92] Akao, Y.: „QFD - quality function deployment: wie die Japaner Kundenwünsche in Qualität umsetzen“, Verlag Moderne Industrie, Landsberg/Lech, 1992.
- [Ali04] Alisch, K.: „Gabler-Wirtschaftslexikon“, Gabler, Wiesbaden, 2004.
- [And85] Andreasen, M. M., Kähler, S., Lund, T.: „Montagegerechtes Konstruieren“, Springer Verlag, Berlin, 1985.
- [Bal93] Baldwin, C.Y., Clark, K.B.: „The Benefits and Limitations of Structured Design Methodologies“, in: Manufacturing Review, Vol. 6, No. 3, 1993, S. 211-220.
- [Bal98] Baldwin, C.Y., Clark, K.B.: „Modularisierung: Ein Konzept wird universell“, in: Harvard Business Manager, Heft 2, 1998, S. 39-48.
- [Bar93] Barkan, P., Hinckley, C.M.: „The Benefits and Limitations of Structured Design Methodologies“, in: Manufacturing Review, Vol. 6, No. 3, 1993, S. 215-227.
- [Bec08] Beckmann, H., Schmitz, M.: „Beschaffung“, in: Arnold, D., Isermann, H., Kuhn, A., Tempelmeier, H., Furmans, K. (Hrsg.): „Handbuch Logistik“, Springer, Berlin, 2008.
- [Ben07] Benson, A.: „Qualitätssteigerung in komplexen Entwicklungsprojekten durch prozessbegleitende Kennzahlensysteme“, Culliver Verlag, Göttingen, 2007.
- [Bla99] Blackenfelt, M.: „On the Development of Modular Mechatronic Products“, Dissertation, The Royal Institute of Technology, Department of Machine Design, Stockholm, 1999.
- [Bla01] Blackenfelt, M.: „Managing Complexity by Product Modularisation“, The Royal Institute of Technology, Department of Machine Design, Stockholm, 2001.

- [Ble08a] Blees, C.; Krause, D.: „On the development of modular product structures: a differentiated approach“, in: Proceedings of the 10<sup>th</sup> International Design Conference - Design 2008, Dubrovnik, 2008, S. 301-308.
- [Ble08b] Blees, C.; Jonas, H.; Krause, D.: „Entwurf von modularen Produktarchitekturen unter Betrachtung unterschiedlicher Unternehmenssichten“, in: Design for X, Beiträge zum 19. Symposium, Neukirchen, 2008, S. 149-158.
- [Ble09] Blees, C.; Jonas, H.; Krause, D.: „Perspective-based Development of Modular Product Architectures“, in: Proceedings of the 17<sup>th</sup> International Conference on Engineering Design, Stanford, 2009, S. 4-95 - 4-106.
- [Ble10a] Blees, C.; Jonas, H.; Krause, D.: „Development of Modular Product Families“, in: Proceedings of 12<sup>th</sup> International DSM Conference, Cambridge, 2010.
- [Ble10b] Blees, C., Kipp, T., Beckmann, G., Krause, D.: „Development of Modular Product Families: Integration of Design for Variety and Modularization“, in: Proceedings of the NordDesign 2010, Göteborg, 2010, S. 159-168.
- [Bön99] Bönker, T.: „Beitrag zum Produktrecycling – Entwicklung einer modularen Bewertungs- und Planungssystematik“, Shaker Verlag, Aachen, 1999.
- [Boo92] Boothroyd, G.: „Assembly Automation and Product Design“, Marcel Dekker, New York, 1992.
- [Boo02] Boothroyd, G., Dewhurst, P.: „Product Design for Manufacture and Assembly“, Marcel Dekker, New York, 2002.
- [Bul86] Bullinger, H.J.: „Systematische Montageplanung“, Hanser Verlag, München, 1986.
- [Col81] Collier, D.: „The Measurement and Operating Benefits of Component Part Commonality“, in: Decision Sciences, Vol. 12, No. 1, 1981, S. 85-96.
- [Dah01] Dahmus, J.B., Gonzalez-Zugasti, J.P., Otto, K.N.: „Modular Product Architecture“, in: Design Studies, Volume 22, No. 5, 2001, S. 409-424.
- [Del06] Dellanoi, R.: „Kommunalitäten bei der Entwicklung variantenreicher Produktfamilien“, Dissertation, Universität St. Gallen, Hochschule für Wirtschafts-, Rechts- und Sozialwissenschaften, St. Gallen, 2006.
- [DIN03] DIN 31051: „Grundlagen der Instandhaltung“, Beuth Verlag, Berlin, 2003.
- [Ehr09] Ehrlenspiel, K.: „Integrierte Produktentwicklung“, Hanser Verlag, München, 2009.
- [Eic91] Eicke, H., Femerling, C.: „Modular Sourcing: Ein Konzept zur Neugestaltung der Beschaffungslogistik“, Huss-Verlag, München, 1991.

- [Eri93] Erixon, G., Östrgren, B.: „Synthesis and Evaluation Tool for Modular Design“, in: Proceedings of the International Conference on Engineering Design, The Hague, 1993, S. 898-905.
- [Eri98] Erixon, G.: „Modular Function Deployment: A Method for Product Modularisation“, Dissertation, The Royal Institute of Technology, Department of Manufacturing Systems, Assembly Systems Division, Stockholm, 1998.
- [Fei97] Feitzinger, E., Lee, H.L.: „Mass Customization at Hewlett-Packard: The Power of Postponement“, in: Harvard Business Review, Volume 75, No. 1, 1997, S. 116-121.
- [Fer93] Ferdinand, A.: „Systems, Software, and Quality Engineering“, Van Nostrand Reinhold, New York, 1993.
- [Fra02] Franke, H.-J., Hesselbach, J., Huch, B., Firchau, N.L. (Hrsg.): „Variantenmanagement in der Einzel- und Kleinserienfertigung“, Hanser Verlag, München, 2002.
- [Gai81] Gairola, A.: „Montagegerichtetes Konstruieren: Ein Beitrag zur Konstruktionsmethodik“, Dissertation, Technische Universität Darmstadt, Fachbereich Nachrichtentechnik, Darmstadt, 1981.
- [Gau05] Gausemeier, J., Frank, U., Steffen, D.: „Entwicklung selbstoptimierender Systeme“, in: Konstruktion, 57. Jg., Heft 10, 2005, S. 67-74.
- [Gon00] Gonzalez-Zugasti, J.P., Otto, K.N., Baker, J.D.: „A Method for Architecting Product Platforms“, in: Research in Engineering Design, Vol. 12, No. 2, S. 61-72.
- [Göp98] Göpfert, J.: „Modulare Produktentwicklung – Zur gemeinsamen Gestaltung von Technik und Organisation“, Deutscher Universitäts-Verlag, Wiesbaden, 1998.
- [Göp00] Göpfert, J., Steinbrecher, M.: „Modulare Produktentwicklung leistet mehr: Warum Produktarchitektur und Projektorganisation gemeinsam gestaltet werden müssen“, in: Harvard Business Manager, Band 22, Heft 3, 2000, S. 20-31.
- [Gra95] Graedel, T., Allenby, B., Comrie, P.: „Matrix Approaches to Abridged Life Cycle Assessment“, in: Environmental Science & Technology, Vol. 23, No. 3, 1995, S. 134A-139A.
- [Hic86] Hichert, R.: „Probleme der Vielfalt. Teil 3: Was bestimmt die optimale Erzeugnisvielfalt?“, in: wt - Zeitschrift für industrielle Fertigung, Band 76, Nr. 11, 1986, S. 673-676.

- [Hof01] Hofer, A.P.: „Management von Produktfamilien: Wettbewerbsvorteile durch Plattformen“, Dissertation, Universität St. Gallen, Hochschule für Wirtschafts-, Rechts- und Sozialwissenschaften, St. Gallen, 2001.
- [Höl05] Hölttä-Otto, K., Otto, K.: „Incorporating design effort complexity measures in product architectural design and assessment“, in: Design Studies, Vol. 26, No. 5, 2005, S. 463-485.
- [Höl06] Hölttä-Otto, K., Otto, K.: „Platform Concept Evaluation“, in: Simpson, T., Siddique, Z., Jiao, J. (Hrsg.): „Product Platform and Product Family Design“, Springer Verlag, New York, 2006, S. 49-72.
- [Hua98] Huang, C., Kusiak, A.: „Modularity in Design of Products and Systems“, in: IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part A: Systems and Humans, Vol. 28, No. 1, 1998.
- [Jia00] Jiao, J.J., Tseng, M.M.: „Understanding Product Family for Mass Customization by Developing Commonality Indices“, in: Journal of Engineering Design, Vol. 11, No. 3, 2000, S. 225-243.
- [Jun05] Junge, M.: „Controlling modularer Produktfamilien in der Automobilindustrie“, Deutscher Universitäts-Verlag, 2005.
- [Ker02] Kersten, W., Koppenhagen, F.: „Systematische Ableitung modularer Produktarchitekturen“, in: PPS Management, 7. Jg., Heft 1, 2002, S. 9-13.
- [Kip08] Kipp, T., Krause, D.: „Design for Variety – Ein Ansatz zur variantengerechten Produktstrukturierung“, in: 6. Gemeinsames Kolloquium Konstruktions-technik, Aachen, 2008, S. 159-168.
- [Kip09] Kipp, T., Krause D.: „Computer Aided Size Range Development - Data Mining vs. Optimization“, in: Proceedings of the 17th International Conference on Engineering Design, Stanford, 2009, S. 4-179 - 4-190.
- [Kip10] Kipp, T., Bleses, C., Krause D.: „Anwendung einer integrierten Methode zur Entwicklung modularer Produktfamilien“, in: Design for X - Beiträge zu 21. DfX-Symposium, Hamburg, 2010, S. 157-168.
- [Kip11] Kipp, T.: „Methodische Unterstützung der variantengerechten Produktgestaltung“, TuTech Verlag, Hamburg, voraussichtliche Veröffentlichung: 2011.
- [Koe08a] Koeppen, B.: „Modularisierung komplexer Produkte anhand technischer und betriebswirtschaftlicher Komponentenkopplungen“, Shaker Verlag, Aachen, 2008.
- [Koe08b] Koeppen, B., Kersten, W.: „Systematic Analyses of Component Couplings and their Application for Modularisation of Complex Products“, in: International Journal of Mass Customisation, Vol. 2, Nos. 3/4, 2008, S. 303-323.

- [Kol94] Koller, R.: „Konstruktionslehre für den Maschinenbau“, Springer Verlag, Berlin, 1994.
- [Kom98] Komorek, C.: „Integrierte Produktentwicklung“, Steuer- und Wirtschaftsverlag, Berlin, 1998.
- [Kot07] Kotler, P., Keller, K.L., Bliemel, F.: „Marketing-Management: Strategien für wertschaffendes Handeln“, Pearson Studium, München, 2007.
- [Kop04] Koppenhagen, F.: „Systematische Ableitung modularer Produktstrukturen“, Shaker Verlag, Aachen, 2004.
- [Kra94] Krause, D.: „Recyclinggerechte Produktgestaltung und wirtschaftliche Demontageplanung feinwerktechnischer Geräte auf Basis des Recyclinggraphen“, in: Tagungsbericht feinwerktechnischer Produkte, von der Produktplanung bis zum Recycling, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1994, S. 75-92.
- [Kus93] Kusiak, A., Szczerbicki, E.: „Transformation from Conceptual to Embodiment Design“, in: IIE Transactions, Vol. 25, No. 4, 1993.
- [Kus96] Kusiak, A., Huang, C.: „Development of Modular Products“, in: IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology, Part A, Vol. 19, No. 4, 1996.
- [Lan96] Lanner, P., Malmqvist, J.: „An Approach Towards Considering Technical and Economic Aspects in Product Architecture Design“, in: Proceedings of the 2<sup>nd</sup> WDK Workshop on Product Structuring, Delft, 1996, S. 173-179.
- [Lew85] Lewandowski, K.: „Instandhaltungsgerechte Konstruktion“, Verlag TÜV Rheinland, Köln, 1985.
- [Lin09] Lindemann, U., Maurer, M., Braun, T.: „Structural Complexity Management: An Approach for the Field of Product Design“, Springer Verlag, Berlin, 2009.
- [Lot92] Lotter, B.: „Wirtschaftliche Montage: ein Handbuch für Elektrogerätebau und Feinwerktechnik“, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1992.
- [Man09] Mantis ULV-Sprühgeräte GmbH: „Mankar Herbizid ULV-Sprühsysteme“, Produktbroschüre, Geesthacht, 2009.
- [Mar96] Martin, M., Ishii, K.: „Design for Variety: A Methodology for Understanding the Costs of Product Proliferation“, in: Proceedings of the 1996 ASME Design Engineering Technical Conferences and Computers in Engineering Conference, Irvine, 1996.
- [Mar97] Martin, M., Ishii, K.: „Design for Variety: Development of Complexity Indices and Design Charts“, in: Proceedings of the 1997 ASME Design Engineering Technical Conferences, Sacramento, 1997.

- [Mar99] Martin, M.: „Design for Variety: A Methodology for Developing Product Platform Architectures“, Dissertation, Stanford University, Department of Mechanical Engineering, Stanford, 1999.
- [Mer06] Meerkamm, H.: „Entwicklungsrisiken – ein Beitrag aus ingenieurwissenschaftlicher Sicht“, in: Vieweg, K. (Hrsg.): „Risiko – Recht – Verantwortung“, Carl Heymanns Verlag, Köln, 2006.
- [Mey83] Meyer, H.: „Recyclingorientierte Produktgestaltung“, VDI-Fortschrittsberichte Reihe 1, Nr. 98, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1983.
- [Mey97] Meyer, M.H., Lehnerd, A.P.: „The Power of Product Platforms: Building Value and Cost Leadership“, The Free Press, New York, 1997.
- [Moo91] van der Mooren, A.L.: „Instandhaltungsgerechtes Konstruieren und Projektieren“, Springer-Verlag, Berlin, 1991.
- [New98] Newcomb, P.J., Bras, B., D.W. Rosen: „Implications of Modularity on Product Design for the Life Cycle“, in: Journal of Mechanical Design, Vol. 120, No. 3, 1998, S. 483-490.
- [Pah74] Pahl, G., Beitz, K.: „Baukastenkonstruktionen“, in: Konstruktion, 26. Jg., Heft 4, 1974, S. 153-160.
- [Pah07] Pahl, G., Beitz, K., Feldhusen, J., Grote, K.-H.: „Pahl/Beitz Konstruktionslehre“, Springer Verlag, Berlin, 2007.
- [Pil99] Piller, F., Waringer, D.: „Modularisierung in der Automobilindustrie – neue Formen und Prinzipien“, Shaker Verlag, Aachen, 1999.
- [Pim94] Pimmler, T.U., Eppinger, S.D.: „Integration Analysis of Product Decompositions“, in: Proceedings of the 6th Design Theory and Methodology Conference, New York, 1994, S. 343-351.
- [Pug90] Pugh, S.: „Total Design – Integrated Methods for Successful Product Engineering“, Addison-Wesley Publishing Company, Strathclyde, 1990.
- [Rap99] Rapp, T.: „Produktstrukturierung“, Gabler Verlag, Wiesbaden, 1999.
- [Rat93] Rathnow, P.J.: „Integriertes Variantenmanagement“, Vandenhoeck & Ruprecht, Göttingen, 1993.
- [Ric84] Richter, W.: „Gliedern eines Projekts“, in: Konstruktion, 36. Jg., Heft 12, 1984, S. 488-490.
- [Rob98] Robertson, D., Ulrich, K.: „Planning for Product Platforms“, in: Sloan Management Review, Vol. 39, No. 4, 1998, S. 19-31.
- [Rob99] Robertson, D., Ulrich, K.: „Produktplattformen: Was sie leisten, was sie erfordern“, in: Harvard Business Manager, Vol. 21, No. 4, 1999, S. 75-85.

- [Rup80] Rupp, M.: „Produkt/Markt-Strategien“, Verlag Industrielle Organisation, Zürich, 1980.
- [Sal07] Salvador, F.: „Toward a Product System Modularity Construct: Literature Review and Reconceptualization“, in: IEEE Transactions on Engineering Management, Vol. 54, No. 2, 2007, S. 219-240.
- [San04] Sandt, J.: „Management mit Kennzahlen und Kennzahlensystemen: Bestandsaufnahme, Determinanten und Erfolgsauswirkungen“, Deutscher Universitäts-Verlag, Wiesbaden, 2004.
- [Sch89] Schuh, G.: „Gestaltung und Bewertung von Produktvarianten – Ein Beitrag zur systematischen Planung von Serienprodukten“, Fortschritts-Berichte VDI, Reihe 2, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1989.
- [Sch01] Schulte, G.: „Material- und Logistikmanagement“, Oldenbourg, München, 2001.
- [Sch05] Schuh, G.: „Produktkomplexität managen“, Hanser Verlag, München, 2005.
- [Sek05] Sekolec, R.: „Produktstrukturierung als Instrument des Variantenmanagements in der methodischen Entwicklung modularer Produktfamilien“, VDI-Verlag, Düsseldorf, 2005.
- [Sim01] Simpson, W.T., Maier, J.R.A., Mistree, F.: „Product platform design: method and application“, in: Research in Engineering Design, Vol. 13, No. 1, S. 2-22.
- [Sta00] Stake, R.: „On conceptual development of modular products“, The Royal Institute of Technology, Department of Manufacturing Systems, Assembly Systems Division, Stockholm, 2000.
- [Ste81] Steward, D.: „The Design Structure System: A Method for Managing the Design of Complex Systems“, in: IEEE Transactions on Engineering Management, Vol. EM-28, No. 3, New York, 1981, S. 71-74.
- [Ste07] Steffen, D.: „Ein Verfahren zur Produktstrukturierung für fortgeschrittene mechatronische Systeme“, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 207, Paderborn, 2007.
- [Sto97] Stone, R.B.: „Towards a Theory of Modular Design“, Dissertation, The University of Texas, Faculty of the Graduate School, Austin, 1997.
- [Sto00] Stone, R.B., Wood, K.L., Crawford, R.H.: „A Heuristic Method for Identifying Modules for Product Architectures“, in: Design Studies, Vol. 21, No. 1, 2000, S. 5-31.
- [Tan89] Tanaka, M.: „Cost Planning in the Design Phase of a new Product“, in: Monden, Y., Sakurai, M. (Hrsg.): „Japanese Management Accounting“, Productivity Press, Cambridge, 1989.

- [Ulr95] Ulrich, K.: „The Role of Product Architecture in the Manufacturing Firm“, Research Policy, Vol. 24, No. 3, 1995, S. 419-440.
- [Ulr04] Ulrich, K., Eppinger, S.D.: „Product Design and Development“, McGraw-Hill/Irwin, New York, 2004.
- [VDI93] VDI-Richtlinie 2221: „Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte“, Beuth Verlag, Berlin, 1993.
- [VDI02] VDI-Richtlinie 2243: „Recyclingorientierte Produktentwicklung“, Beuth Verlag, Berlin, 2001.
- [Wac86] Wacker, J.G., Treleven, M.: „Component Part Standardization: An Analysis of Commonality Sources and Indices“, in: Journal of Operations Management, Vol. 6, No. 2, 1986, S. 219-244.
- [Wil01] Wilhelm, B.: „Konzeption und Bewertung einer modularen Fahrzeugfamilie: Strategien und Methoden“, Shaker Verlag, Aachen, 2001.
- [Yin03] Yin, R.K.: „Case Study Research: Design and Methods“, Sage Publications, Thousand Oaks, 2003.
- [Zam99] Zamirowski, E.J., Otto, K.N.: „Identifying Product Portfolio Architecture Modularity Using Function and Variety Heuristics“, in: Proceedings of the 1999 ASME Design Engineering Technical Conferences, Las Vegas, 1999, S. 187-197.