Band
416

Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts
Prof. Dr.-Ing. Iris Gräßler (Hrsg.)
Produktentstehung

Xiaojun Yang

Eine Methode zur Unterstützung von Entscheidungen bei der Entwicklung modularer Leichtbauprodukte

HEINZ NIXDORF INSTITUT
UNIVERSITÄT PADERBORN

Xiaojun Yang

Eine Methode zur Unterstützung von Entscheidungen bei der Entwicklung modularer Leichtbauprodukte

A method to support decision-making in the development of modular lightweight products

Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek
Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über http://dnb.ddb.de abrufbar.

Band 416 der Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts

© Heinz Nixdorf Institut, Universität Paderborn – Paderborn – 2024

ISSN (Online): 2365-4422
ISBN: 978-3-947647-35-4

Das Werk einschließlich seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung der Herausgeber und des Verfassers unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigung, Übersetzungen, Mikroverfilmungen, sowie die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Als elektronische Version frei verfügbar über die Digitalen Sammlungen der Universitätsbibliothek Paderborn.

Satz und Gestaltung: Xiaojun Yang

Eine Methode zur Unterstützung von Entscheidungen bei der Entwicklung modularer Leichtbauprodukte

zur Erlangung des akademischen Grades eines
DOKTORS DER INGENIEURWISSENSCHAFTEN (Dr.-Ing.)
der Fakultät Maschinenbau
der Universität Paderborn

genehmigte
DISSERTATION

von
M.Sc. Xiaojun Yang
aus Yantai, China

Tag des Kolloquiums:	20.06.2023
Referent:	Prof. Dr.-Ing. Iris Gräßler
Korreferent:	Prof. Dr.-Ing. Sándor Vajna

Zusammenfassung

Modulleichtbau, also die Kombination aus Modularisierung und Leichtbau, ermöglicht es, wirtschaftlich Leichtbaustrukturen zu realisieren. Dadurch eröffnen sich für den Leichtbau zahlreiche Anwendungsfelder. Die Umsetzung des Modulleichtbaus ist jedoch sehr komplex, da es in der Anwendung zahlreiche Konflikte gibt, für die Kompromisse gefunden werden müssen. Dies führt zu aufwändigen und hoch iterativen Entwicklungsvorgängen. Insbesondere Änderungen in der Produktstruktur sorgen für langwierige Änderungsprozesse. Die in dieser Arbeit entwickelte Methode dient dazu, die Ermittlung der Produktstruktur beim Modulleichtbau zu optimieren. Konstruktionsentscheidungen werden hierzu bereits früh im Entwicklungsprozess geklärt und Auswirkungen auf die spätere Gestaltung anhand von Szenarien abgeschätzt. Hierbei werden alle Anforderungen und Restriktionen des gesamten Entwicklungsprozesses berücksichtigt. Das Ziel ist es, bereits früh Entscheidungen über die Ausgestaltung der Module zu treffen, also zum Beispiel, ob diese leichtbauoptimiert entwickelt werden oder ob Zukaufteile verwendet werden sollten. Diese Methode sieht hierbei ein Vorgehen in vier Phasen vor – von der Modulaufteilung über die Ableitung der Restriktionen bis zur Prognose und Bewertung der Module.

Durch die in dieser Arbeit entwickelte Methode erhalten die Entwickler sowohl einen klaren Entwicklungsfokus als auch die Konflikte, die sonst zu Iterationen geführt hätten, werden bereits früh im Entwicklungsprozess geklärt. Die Wirksamkeit der Methode konnte im Rahmen eines Fallbeispiels nachgewiesen werden.

Abstract

Modular lightweight design, i.e. the combination of modularization and lightweight design, makes it possible to realize lightweight structures economically. This opens up numerous fields of application for lightweight design. However, the implementation of lightweight modular design is very complex, as there are numerous conflicts in the application for which compromises have to be found. This leads to complex and highly iterative development processes. In particular, changes in the product structure led to long change processes. The method developed in this thesis serves to optimize the determination of the product structure in modular lightweight design. Design decisions are clarified early in the development process and the effects on the later design are estimated using scenarios. All requirements and restrictions of the entire development process are taken into account. The objective is to make decisions about the design of the modules at an early stage, for example whether they should be developed with optimized lightweight construction or whether bought-in parts should be used. The method provides for a procedure in four phases - from module division to prognosis and evaluation of the modules.

This gives the developers a clear development focus and conflicts that would otherwise have led to iterations are clarified early in the development process. The effectiveness of the method was proven in a case study.

Liste der Vorveröffentlichungen

2019

- Gräßler, Iris; Yang, Xiaojun: Product life cycle cost approach for modular lightweight design. In: Putnik, Goran D. (Hrsg.) Procedia CIRP - Proceedings of the 29th CIRP Design Conference, Band 84, S. 1048-1053, DOI: https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.03.199, ISSN: 2212-8271, Póvoa de Varzim, 8. - 10. Mai 2019 CIRP (Centre for International Research in Production), Elsevier B.V.

- Gräßler, Iris; Yang, Xiaojun: Entwicklung mechatronischer Systeme und Modulleichtbau: Anforderungen am Beispiel von Unmanned Aerial Vehicles (UAVs). In: Bertram, Torsten; Corves, Burkhard; Gräßler, Iris; Jansen, Klaus (Hrsg.) Fachtagung Mechatronik 2019 Paderborn, S. 167-172, 27. - 28. März. 2019

- Gräßler, Iris; Yang, Xiaojun: A holistic approach of complexity assessment for the development of product variants of mechatronic products and their supply chain networks. In: Proceedings of the 8th IFAC Symposium on Mechatronic Systems (Mechatronics 2019), S. 748-753, 4. Jan. - 6. Sep. 2019

2018

- Gräßler, Iris; Yang, Xiaojun: Bedeutung des Komplexitätsmanagements für die Verbreitung von Leichtbau in Unternehmen zur Unterstützung einer nachhaltigen Produktentstehung. In: Riegraf, Birgit; Berscheid, Anna-Lena (Hrsg.) Wissenschaft im Angesicht "Großer gesellschaftlicher Herausforderungen" - Das Beispiel der Forschung an hybriden Leichtbaumaterialien, Kapitel: 1.3, S. 51-70. transcript Verlag, 2018

2017

- Yang, Xiaojun; Berscheidt, Anna-Lena; Gräßler, Iris: Untersuchung der Interdisziplinarität im Leichtbau zur Erreichung einer nachhaltigen Wertschöpfungskette. In: Sustainability Management for Industries 7: Transformationen - Neue Wege zu industrieller Nachhaltigkeit, S. 31-42, Mai 2017

2016

- Gräßler, Iris; Hentze, Julian; Yang, Xiaojun: Eleven Potentials for mechatronic V-model. In: Production Engineering and Management, 6th International Conference, Band 01/2016, S. 257-268, 29. - 30. Sep. 2016 Hochschule Ostwestfalen-Lippe, Ostwestfalen-Lippe University of Applied Sciences, Lemgo

- Gräßler, Iris; Taplick, Patrick; Yang, Xiaojun: Educational Learning Factory of a holistic Product Creation Process. 6th CLF - 6th CIRP Conference on Learning Factories, Jun. 2016, Procedia CIRP

- Gräßler, Iris; Yang, Xiaojun: Interdisciplinary development of production systems using Systems Engineering. 26th CIRP Design Conference, Jun. 2016, Procedia CIRP

Inhaltsverzeichnis

Seite

1 Einleitung 1

2 Problemanalyse 7
2.1 Grundlegende Begriffe 7
2.2 Problemstellung 15
2.2.1 Ziele der Modularisierung 15
2.2.2 Ziele des Leichtbaus 17
2.2.3 Konflikt zwischen Modularisierung und Leichtbau 18
2.3 Ziel der Arbeit 23
2.4 Wissenschaftliche Herangehensweise 24

3 Stand der Forschung 26
3.1 Modularisierung 26
3.1.1 Generisches Vorgehen der Modularisierung 26
3.1.2 Modularisierungsmethoden mit technisch-funktionaler Perspektive 27
3.1.3 Modularisierungsmethoden mit organisatorischer und prozessualer Perspektive 32
3.1.4 Produktstrategische und integrative Modularisierungsmethoden 34
3.2 Leichtbau 35
3.2.1 Entwicklungsmethode zum Leichtbau nach Klein [Kle09] 36
3.2.2 Andere Entwicklungsmethoden zum Leichtbau 38
3.3 Modulleichtbau 40
3.3.1 Entwicklungsmethode zum Modulleichtbau nach Gumpinger 40
3.3.2 Entwicklungsmethode zum Modulleichtbau nach Plaumann 42
3.4 Abgrenzung zum Stand der Forschung 44

4 Entscheidungsunterstützende Methode zur Strukturierung modularer Leichtbauprodukte 49
4.1 Grundidee der Methode 51
4.2 Einordnung im Entwicklungsprozess 55
4.3 Erstellung des Systemmodells 56
4.4 Modulaufteilung 60
4.5 Restriktionen ableiten 69
4.5.1 Konstruktionsrichtlinie 72
4.5.2 Eigenschaftsbezogene spezifische Anforderungen 77

4.5.3 Konfliktäre Anforderungen zwischen der Modularisierung und dem Leichtbau ... 80
4.6 Prognose des Erfüllungsgrades ... 83
4.7 Bewertung ... 89

5 Exemplarische Anwendung der Methode ... 94
5.1 Portalroboter ... 94
5.2 Anwendung der Methode zur Unterstützung von Entwicklungsentscheidungen bei modularen Leichtbauprodukten ... 99
5.2.1 Erstellen des Systemmodells ... 100
5.2.2 Modulaufteilung ... 102
5.2.3 Restriktionen ... 106
5.2.4 Prognose ... 107
5.2.5 Bewertung ... 109
5.3 Ergebnis ... 111

6 Validierung ... 114
6.1 Prüfungshypothese ... 114
6.2 Darstellung der Validierungsergebnisse ... 115
6.3 Auswertung der Validierungsergebnisse ... 117

7 Schlussbetrachtung und Ausblick ... 120

Anhang

A1 Anforderungen an den Portalroboter ... A-1
A2 Portalroboter ... A-3
A3 Projekte ... A-5
A4 Interviewbögen ... A-8
A5 Einordnung in VDI 2221 ... A-11
A6 Verzeichnis betreuter Studienarbeiten ... A-14
A7 Lebenslauf ... A-**Fehler! Textmarke nicht definiert.**

1 Einleitung

Der Abbau von Rohstoffen pro Jahr hat sich seit 1970 mehr als verdreifacht [ORF-ol]. Setzt sich die aktuelle Entwicklung fort, wird sich der Ressourcenverbrauch bis 2060 noch einmal verdoppelt haben. Die Treibhausgasemissionen werden dabei um über 43 Prozent steigen [UMB-ol]. Seit einigen Jahren findet deswegen in der Gesellschaft ein Umdenken statt. Ressourcenschonende Lösungen werden vermehrt nachgefragt und Kunden sind auch bereit, da für höhere Kosten zu akzeptieren [OHN-ol]. Dieses Umdenken resultiert in politischen Entscheidungen, die wiederum eine große Auswirkung auf die Produktentwicklung haben. So bedeutet die Einführung von CO2-Grenzwerten für Automobilhersteller eine erzwungene strategische Neuausrichtung der Produktentwicklung für alle in der Automobilbranche tätigen Unternehmen. Ob aus eigenem Antrieb, zur Erfüllung politischer Vorgaben, für das Marketing von Produkten oder zur Erfüllung der Kundenerwartungen wird Nachhaltigkeit in der Produktentwicklung eine stetig steigende Bedeutung haben. Es muss das Ziel sein, neue ressourcenschonende Lösungen zu finden und bestehende Lösungen bezüglich des Ressourcenverbrauchs zu optimieren. Die Anwendung von Leichtbaumaßnahmen bildet dabei einen wesentlichen Faktor, um bestehende ingenieurwissenschaftliche Lösungen hinsichtlich des Ressourcenverbrauchs zu optimieren.

Das Ziel von Leichtbau ist es, Produkte unter Beibehaltung von Steifigkeit und Festigkeit mit möglichst geringem Gewicht zu realisieren [Wie07]. Hierdurch werden die eingesetzten Ressourcen für die Erstellung des Produktes unmittelbar minimiert. In der Nutzungsphase des Produktes ergeben sich aufgrund des geringeren Gewichts weitere Verbesserungen in dem Ressourcenverbrauch. Dies gilt insbesondere für Mobilitätslösungen, da bei diesen die aufgewendete Energie direkt von dem Gewicht des Produktes abhängt. Für den Ressourcenverbrauch einer Mobilitätslösung über dessen Produktlebenszyklus betrachtet, spielt das Gewicht des Produktes die tragende Rolle [AB11]. Leichtbau kann durch die Verringerung des Gewichtes Nutzlaststeigerungen und die Verringerung der Beschleunigungsträgheit oder des Rollwiderstandes erreichen, die dann zu einer Reduktion des Energieverbrauchs und der Emissionen führen. Somit bildet Leichtbau eine wesentliche Grundlage zur Entwicklung zukünftiger Mobilitätslösungen. Aber auch bei anderen technischen Produkten ergibt sich durch die Anwendung von Leichtbaumaßnahmen neben einem geringeren Ressourceneinsatz eine verbesserte Funktionalität [Wie07]. Allerdings ist zur Realisierung des Gewichtsminimums häufig, insbesondere im Luft- und Raumfahrtbereich, eine Individualisierung erforderlich [KSO+16]. Dadurch kann zwar die Wettbewerbsfähigkeit durch die Erfüllung der kundenindividuellen Anforderungen gestärkt werden. Aber die sich daraus ergebenden Herausforderungen bezüglich der steigenden Produktkosten und der verlängerten Entwicklungszeiten stellen die Unternehmen wiederum unter einen großen Wettbewerbsdruck [ABG06]. Daher besteht für die Hersteller die Schwierigkeit, die individuellen Leichtbauprodukte wettbewerbsfähig anbieten zu können. Ein wesentlicher Aspekt der Wettbewerbsfähigkeit ist neben den Kosten des

Leichtbauproduktes die Zeit, die das Unternehmen benötigt, um Innovation in Produkte umzusetzen.

Demgegenüber stehen Modularisierungsstrategien, die sowohl die Kosten als auch die Zeit reduzieren können und damit die Wettbewerbsfähigkeit auf Produktebene sichern [Grä04, GY19b]. Mit Hilfe von Modularisierung können über alle Produktlebensphasen hinweg Wettbewerbsvorteile erzielt werden. Die Produktentwicklung wird z.B. erheblich vereinfacht, da bei der Entwicklung auf bereits bestehende Module zurückgegriffen werden kann. Es ergeben sich Skaleneffekte in der Produktion und im Einkauf von Bauteilen und Baugruppen. Damit werden nicht nur Kosten in alle Produktlebensphasen gesenkt, sondern auch der Aufwand bei der Erstellung von Varianten erheblich reduziert. Gleichzeitig ermöglichen Modularisierungsstrategien, schnell auf individuelle Anforderungen und Veränderungen am Markt durch zum Beispiel einen entsprechenden Modulbaukasten zu reagieren.

Modulare Produktstrukturen führen zu standardisierten Komponenten. Durch die sich daraus ergebenden Skaleneffekte, können die Herstellkosten stark reduziert werden. Deswegen ist Modularisierung in der Industrie weit verbreitet. Durch die Standardisierung sind die dabei verwendeten Bauteile jedoch in der Regel überdimensioniert [KG18]. Zudem werden zusätzliche Schnittstellen in den Produkten notwendig, um die Module miteinander kombinieren zu können [KG18]. Demgegenüber wird jedoch für einen konsequenten Leichtbau versucht, gerade diese Schnittstellen zu minimieren und die jeweiligen Einzelprodukte individuell auszulegen. Zur Erreichung des Gewichtsminimums verlangt ein Leichtbauprodukt häufig nach individueller Konzipierung. Gleichzeitig kommen häufig höherpreisige Materialien, aufwändigere Fertigungsverfahren und komplexe individuelle Produktstrukturen zum Einsatz. Dabei ist zu erkennen, dass es konträre Zielsetzungen zwischen Leichtbau und Modularisierung gibt. Trotzdem ist es sinnvoll, bei der Entwicklung von Leichtbauprodukten auch die Vorteile der Modularisierung aufzugreifen. Das führt zu Herausforderungen bei der Produktentwicklung, diese beiden Ansätze miteinander zu kombinieren. Die Kombination beider Ansätze resultiert in modularen Leichtbauproduktstrukturen.

Der wesentliche Aspekt der Kombination liegt darin, bewusste Auswahlentscheidungen zwischen bestehenden Modulen und der individuellen Entwicklung neuer Leichtbaukomponenten optimal zu treffen. Bei der Auswahlentscheidung sollen nicht nur die technisch-funktionalen Anforderungen an das Produkt erfüllt werden, sondern insbesondere die strategisch wirtschaftlichen Ziele erreicht werden. Die Anwendung von Leichtbaumaßnahmen, auch im Vergleich zur Verwendung von bereits bestehenden Modulen, ist meist eine Kostenentscheidung [GY19c, GY18].

Zahlreiche empirische Studien belegen, dass die meisten späteren Kosten eines Produktes in der Produktentscheidung festgelegt werden [Wie70, EB09, Rin17]. In dieser Phase wird die Produktstruktur definiert, die maßgeblich den späteren wirtschaftlichen Erfolg

oder Misserfolg eines Produktes beeinflusst [PBF+13]. Zum Zeitpunkt der Produktstrukturierung finden somit zeitgleich Entscheidungen zu der Anwendung von Leichtbaumaßnahmen statt. Zu diesem Zeitpunkt ist jedoch wenig über die Auswirkungen der Konstruktionsentscheidungen auf das Produkt und die Kostenstruktur bekannt. Dieser Umstand ist in der Abbildung 1.1 verdeutlicht [Bro68, Ehr93, VDI2235, Wie70]. In der Abbildung 1.1 werden die festgelegten und verursachten Kosten der nach dem Produktlebenszyklus involvierten Funktionen dargestellt [Bro68]. Während der Produktentwicklung fallen über 70% der Kosten eines Produktes an. Dabei ist zu beachten, dass in diesem Ergebnis ausschließlich die Herstellkosten berücksichtigt wurde.

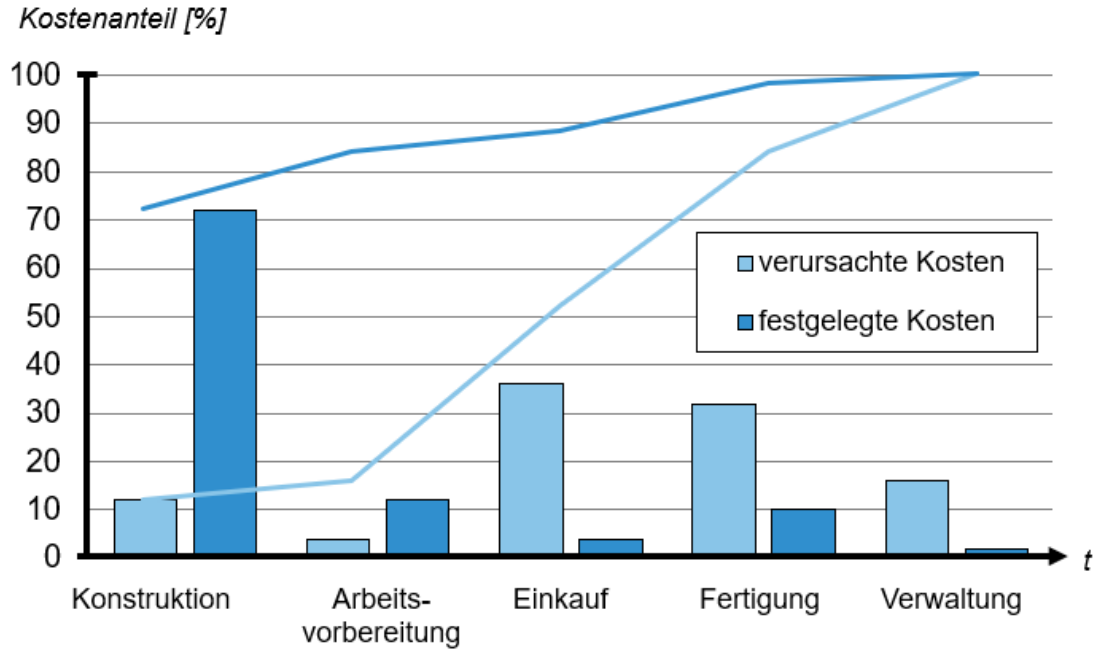


Abbildung 1: Kostenfestlegung und –verursachung in der Konstruktion [nach Bron68]

Vor diesem Hintergrund ist es besonders wichtig, methodische Unterstützungen für die Produktentwicklung, insbesondere für die Produktstrukturierung, anzubieten, damit die Entscheidungen über die Anwendung von individuellen Leichtbaustrukturen oder den bestehenden modularen Strukturen schneller bzw. optimal getroffen werden können.

Allerdings existiert derzeit noch keine umfassende, durchgängige Methode für die Entwicklung modularer Leichtbauproduktstrukturen. Dabei werden die Kosten zur Entwicklung und Auswahl von Produktkonzepten bisher nicht beziehungsweise unzureichend berücksichtigt [Gum15, KG18, KGP12, Pos16]. Darüber hinaus konzentrieren sich bestehende Methoden zur Entwicklung der modularen Leichtbauprodukte meist auf eine Optimierung der Bauweise oder auf eine vereinfachte Optimierung durch die Betrachtung bestimmter Produktlebensphasen. Der Fokus dieser Methode liegt auf der Optimierung bereits existierender Produktfamilien, nicht auf der Neuentwicklung modularer Leichtbauprodukte. Eine ganzheitliche Methode mit dem Schwerpunkt auf der kostengünstigen

und effizienten Entwicklung modularer Leichtbauprodukte, die sowohl für die Neuentwicklung als auch für bereits existierende modulare Produktfamilien geeignet ist, besteht derzeit nicht.

Ziel der Arbeit ist es daher, eine methodische Unterstützung mit einer ganzheitlichen Betrachtung aller Produktlebensphasen zur Entwicklung modularer Leichtbauprodukte zu entwickeln. Kern der Methode ist eine kostenbasierte Entscheidungsunterstützung bei der Auswahl zwischen bestehenden Modulen und individuellen Leichtbaukomponenten während der Produktstrukturierung. Bei dieser Methode werden die folgenden grundlegenden Schritte angewendet:

- Zusammenfassung und Analyse der von Kunden und vom Markt geforderten Anforderungen und Restriktionen aus allen Produktlebensphasen,
- Prognose der Wirtschaftlichkeit alternativer Produktstrukturkonzepte,
- Ganzheitliche Bewertung aller Produktstrukturkonzepte mit Berücksichtigung von quantitativen und qualitativen Kriterien

Das Ziel ist eine Prognose zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit, die einen Vergleich zwischen den Alternativen der Produktstrukturen ermöglicht. Dieser Vergleich soll Tendenzen aufzeigen, die insbesondere bei Produktstrukturentscheidungen im frühen Konzeptstadium unterstützen. Die in dieser Arbeit entwickelte Methode zur Unterstützung der Entwicklung von modularen Leichtbauprodukten richtet sich an produzierende Unternehmen, die Leichtbau auf modulare Produkte anwenden wollen.

Die Entwicklung modularer Leichtbauprodukte ist Teil der Produktentstehung (vgl. Abbildung 2). Das Ergebnis der Produktentstehung ist die Produktnutzung und umfasst die vier Abschnitte Strategische Planung und Innovationsmanagement, Systems Engineering und Entwicklungsmanagement, Realisierung und Produktionsmanagement sowie die digitale und virtuelle Produktentstehung [Grä15, S. 168].

Das Vorgehen in der Produktentwicklung wird durch verschiedene Entwicklungsmethoden unterstützt, wie zum Beispiel durch [PBF13+, Vaj20, Grä04]. Diese Arbeit dient dazu die komplexen, widersprüchlichen Anforderungen in der Entwicklung modularer Leichtbauprodukte besser zu beherrschen. Die in dieser Arbeit entwickelte Methode ist somit dem Entwicklungsmanagement zuzuordnen. In der Methode werden jedoch die Anforderungen aller vier Abschnitte des Produktentstehungsprozess berücksichtigt.

Der Aufbau der Arbeit gliedert sich wie folgt:

Das zweite Kapitel stellt nach einer Einführung in die grundlegenden Begriffe die Problemstellung dar. Es werden unter anderem die Begriffe im Bereich der Modularisierung, Leichtbau, Produktstrukturierung und restriktionsgerechte Entwicklung vorgestellt. Dabei werden die Konflikte zwischen Modularisierung und Leichtbau ausführlich dargestellt. Aus der Problemstellung wird das Ziel dieser Arbeit definiert und gleichzeitig werden Forschungsfragen zu der Zielsetzung dieser Arbeit abgeleitet.

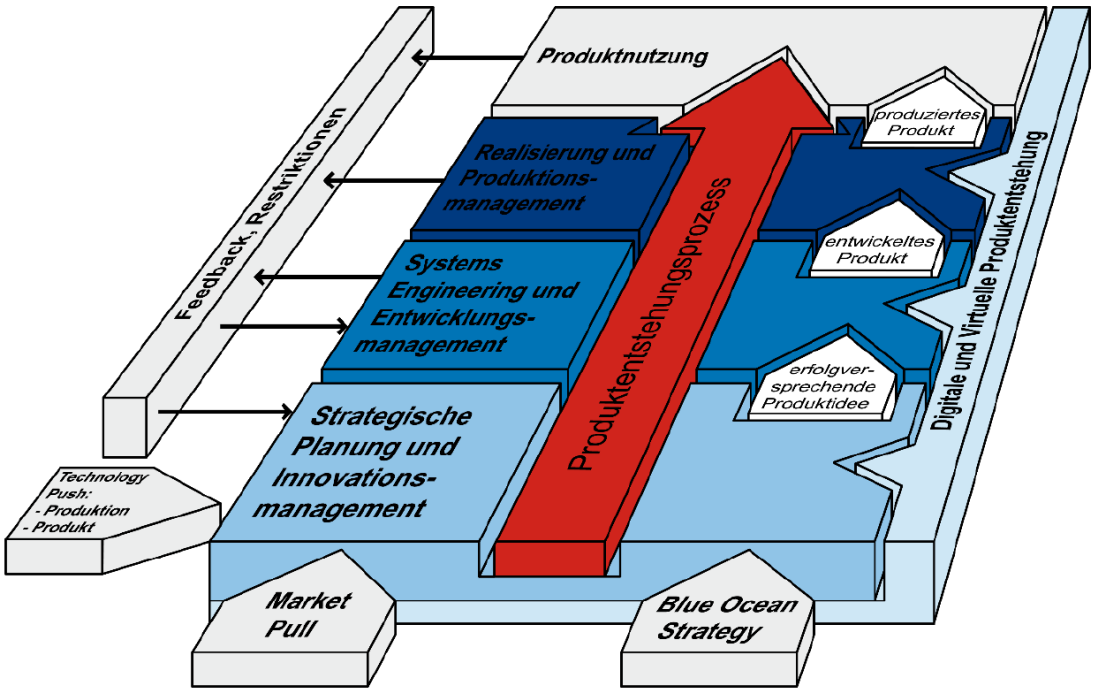


Abbildung 2: Handlungsfeld Produktentstehung nach [Grä15, S. 168]

Im dritten Kapitel wird der Stand der Wissenschaft zu Entwicklungsmethoden der Modularisierung, dem Leichtbau sowie dem Modulleichtbau zusammengefasst. Es werden zudem Kriterien zur Bewertung der bestehenden Methoden abgeleitet. Die bestehenden Methoden werden dann jeweils anhand dieser verschiedenen Kriterien bewertet und so der Forschungsbedarf abgeleitet. Am Ende des Kapitels wird eine Abgrenzungsmatrix zur Darstellung des Forschungsbedarfs und der Forschungslücke erstellt. Im vierten Kapitel wird die in dieser Arbeit entwickelte Methode vorgestellt. Dabei wird die Grundidee und die Einordnung der Methode im Entwicklungsprozess ausführlich beschrieben.

Dann wird die Methode in fünf Schritten vorgestellt: Erstellung des Systemmodells, Modulaufteilung, Restriktionen ableiten, Prognose und Bewertung. Im ersten Schritt zur Erstellung des Systemmodells behandelt die Abbildung eines Rahmenwerks des zu entwickelten Systems. Daraus ergibt sich eine systematische Erfassung der relevanten Daten, Beziehungen und Informationen für die Produktentwicklung. Dadurch wird eine vollständige Informationsbasis geschaffen. Mit Hilfe dieser Informationen werden im nächsten Schritt Module aufgeteilt. Daraus ergeben sich mehrere alternative Produktstrukturen, die aus der Zusammensetzung verschiedener Module entstehen. Im Anschluss werden die Restriktionen vom Gesamtsystem auf die einzelnen Module abgeleitet. Die Berücksichtigung der Restriktionen bietet eine gezielte Optimierung des Produktes im Rahmen des Modulleichtbaus. Danach wird der Erfüllungsgrad der funktionalen Anforderungen und der Restriktionen prognostiziert. Im letzten Schritt werden anhand der Ergebnisse der Prognose die Realisierung der funktionalen Anforderungen durch deren Wirtschaftlichkeit bewertet.

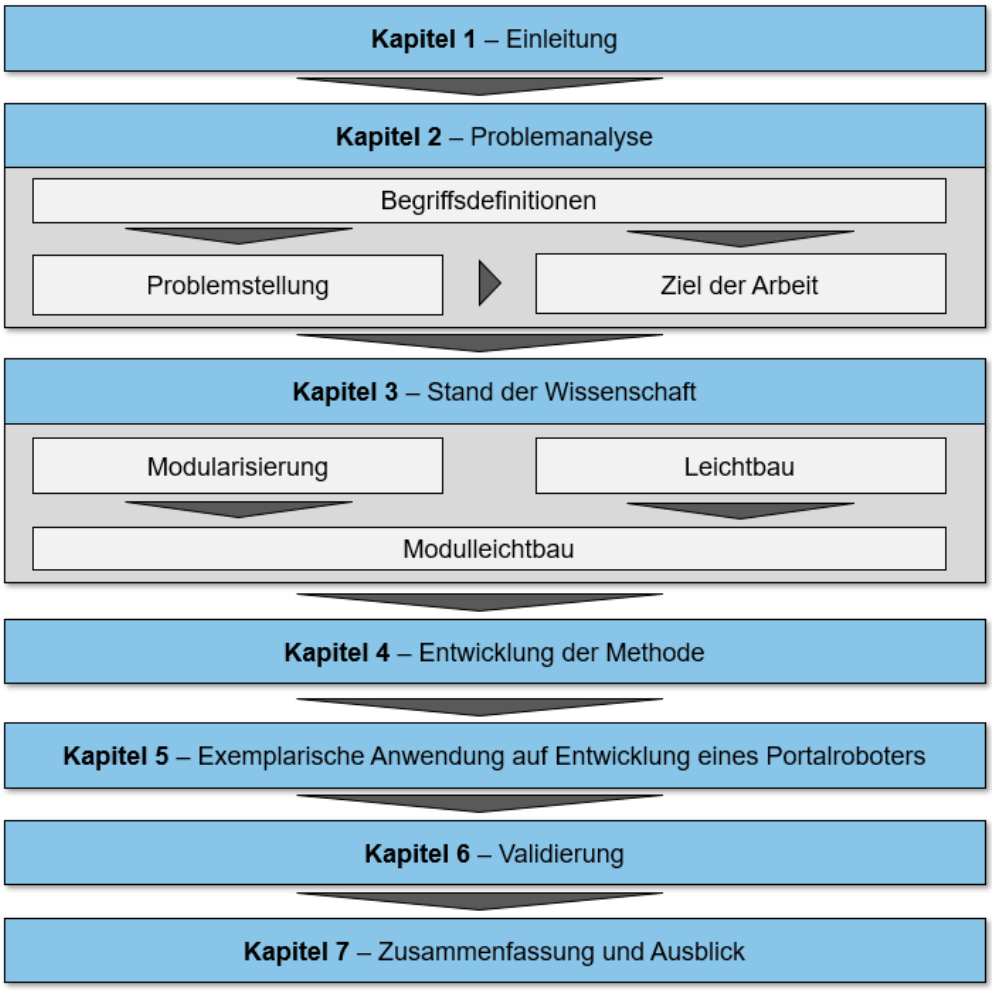


Abbildung 3: Aufbau der Arbeit

Eine Implementierung und Validierung der entwickelten Methode folgt in den Kapiteln 5 und 6 anhand der Anwendung auf die Entwicklung eines Portalroboters. Dabei wurden sowohl heutige übliche Methoden als auch die in dieser Arbeit entwickelte Methode verwendet. Die Entwicklungsergebnisse mit den verschiedenen Methoden werden anschließend dargestellt und miteinander verglichen. Anschließend wird die Arbeit mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick in Kapitel 7 abgeschlossen.

2 Problemanalyse

In diesem Kapitel werden zuerst die für diese Arbeit grundlegenden Begriffe erläutert und in der Literatur uneinheitlich verwendete Begriffe für die Arbeit definiert. Anschließend wird das Problemfeld eröffnet und die Problemanalyse durchgeführt. Daraus wird die Zielsetzung dieser Arbeit abgeleitet.

2.1 Grundlegende Begriffe

Die Begriffe Modularisierung, Leichtbau und allgemein die Produktentwicklung werden häufig in dieser Arbeit verwendet. Für ein einheitliches Verständnis und eine leichtere Nachvollziehbarkeit werden zunächst die grundlegenden Begriffe in dieser Arbeit definiert.

Leichtbau

Leichtbau strebt nach einem minimalen Baugewicht unter höchster Ausnutzung der Materialeigenschaften. Der höchsten Ausnutzung der Materialeigenschaften stehen die Restriktionen der zulässigen Verformungen und maximal nutzbaren Werkstoffkennwerte entgegen. In der Praxis ist eine Extremlösung somit in der Regel nicht zu verwirklichen, da auf Grund des Werkstoffs, der Bauweise oder der Herstellung Kompromisse eingegangen werden müssen [YBG17].

Abbildung 4: Einsatz von Leichtbau und damit verbundene Kosten [Kle09]

Somit kann nur ein optimierter Leichtbau realisiert werden. Dabei muss das Verhältnis zwischen Kosten und Nutzen mit einem sinnvollen Wert eingehalten werden. Die Abbildung 3 zeigt ein Leichtbaugrad- / Gewichts- und Kostenmodell, in dem dieses Verhältnis

zwischen Kosten und des Leichtbaugrads und Gewichts dargestellt wird. Die Kurve veranschaulicht, ob eine Leichtbauentwicklung bzw. -optimierung sich lohnt [Kle09]. Es ist zu erkennen, dass je höher der Leichtbaugrad ist, desto leichter ist das Gewicht. Gleichzeitig steigen die Kosten drastisch bei einem extremen Leichtbau. Aber nach dem Kostenminimum steigen die Kosten auch wegen der Steigerung des Gewichts wieder beim sogenannten Schwerbau. Daher liegt der interessante Bereich des Leichtbaus zwischen dem Gesamtoptimum (dem Punkt B) und dem Kostenminimum (dem Punkt A) und in ihrer Nähe. Darin befinden sich sowohl leichte als auch günstige Leichtbaulösungen.

Modularisierung

Modularisierung dient dazu, Produktstrukturen mit zielorientierter Modularität, Module und Schnittstellen zu entwickeln. Dafür wird die Produktstruktur in passende Komponenten aufgeteilt, welches als Dekomposition bezeichnet wird. Für die Dekomposition ist eine ganzheitliche Betrachtung erforderlich. Das heißt, dass die Rahmenbedingungen und die Zielsetzungen sowohl von dem Produkt als auch von seiner Herstellung berücksichtigt werden müssen. Danach werden die einzelnen Komponenten analysiert und anschließend in entsprechenden Modulen zugeordnet. Die Zuordnung der Komponenten wird nach technisch-funktionale und/oder produktstrategische Perspektiven durchgeführt. Daraus ergibt sich die neu entwickelte modulare Produktstruktur und die notwendigen Schnittstellen. Daraus ergeben sich die folgenden wesentlichen Vorteile der Modularisierung. In der Abbildung 5 wird ein Überblick über die Vor- und Nachteile einer modularen Produktstruktur in verschiedenen Produktlebensphasen gegeben.

- Kommunalität der Module: Wiederverwendung der Module (Skaleneffekte), dadurch werden Kosten gespart.
- Kombinierbarkeit der Module: Variantenreiche Konfiguration wird durch die Kombination verschiedener Module erreicht.

Dabei ist es wichtig, durch die Modularisierung eine strategisch, unternehmensspezifisch und produktspezifisch optimale Produktstruktur zu erzielen. Dadurch werden Vorteile in allen Produktlebensphasen erreicht. Dadurch kann die interne und externe Komplexität eines Unternehmens reduziert bzw. beherrscht werden. [Sal07, Sch05, KG18]

Variante

Technische Systeme werden als Varianten bezeichnet, wenn sie große Ähnlichkeiten hinsichtlich der Funktionen, dem Aufbau und einen hohen Anteil von gleichen Komponenten haben. Sie unterschieden sich in mindestens einer Relation oder einer Eigenschaft voneinander [DIN02, Fra02, PBF+13].

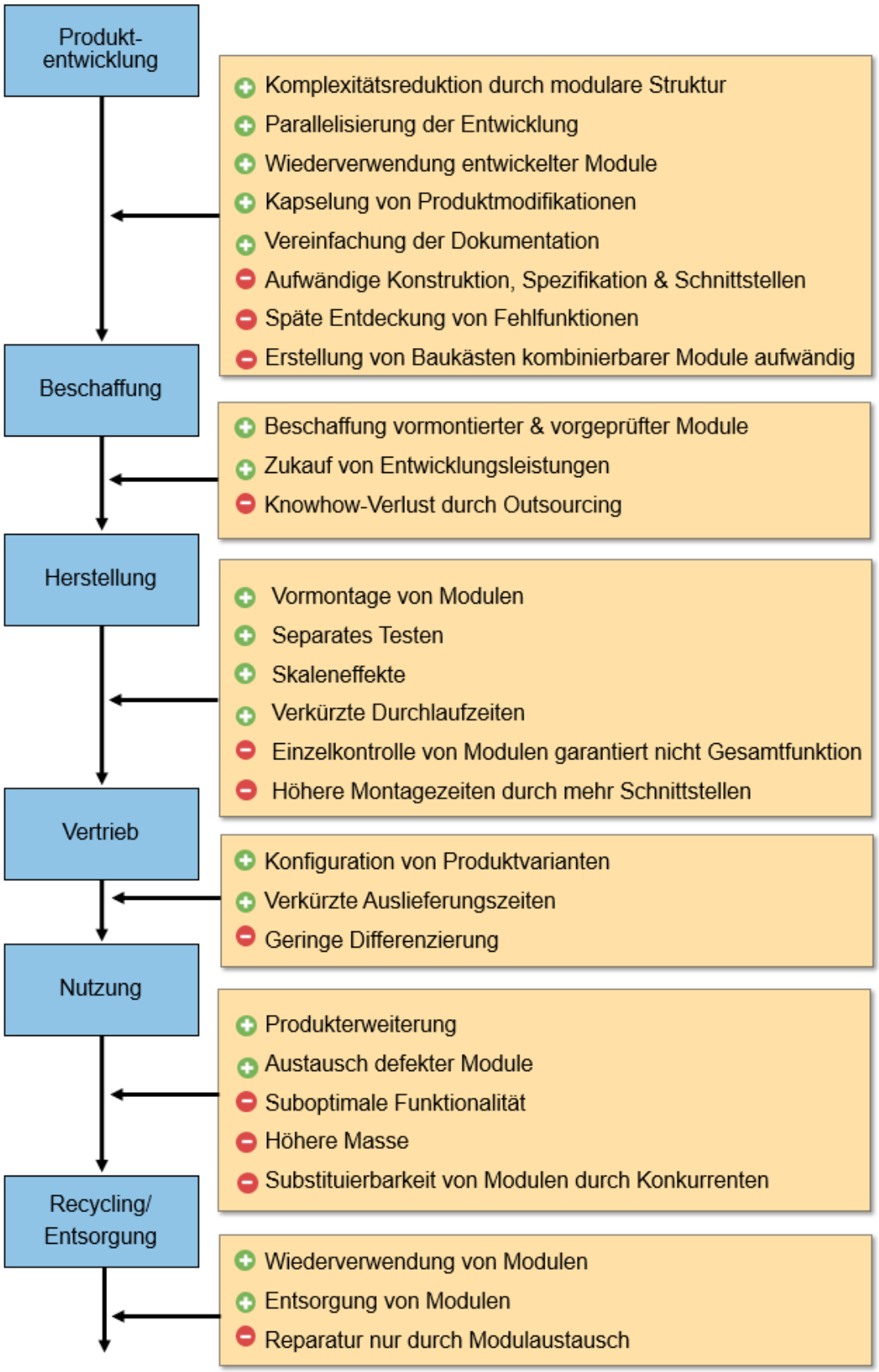


Abbildung 5: Vor- und Nachteile einer modularen Produktstruktur in gesamten Produktlebensphasen [KG18]

Externe und interne Variantenvielfalt

Vielfalt ist einer der entscheidenden Einflussfaktoren auf die Komplexität [Ada98, Wil98, Wil17, Sch05]. Die Vielfalt kann dabei auf einer Vielzahl von angebotenen Produkten, verwendeter Teile und Rohmaterialien und von Kunden- und Lieferantenbeziehung beruhen [PBF+13]. Die Vielfalt kann in interne und externe Vielfalt klassifiziert werden. Externe Vielfalt beschreibt dabei die vom Kunden wahrgenommene Vielfalt. Sie beruht deswegen in der Regel auf Anforderungen von Kunden. Die interne Vielfalt stellt die vom Unternehmen wahrgenommene Vielfalt dar [Fra02, Rip19].

Komplexität

Komplexität wird durch die Vielfalt, die Anzahl und die Beziehungen der Systemelemente zueinander sowie ihrer Zustände und Veränderlichkeit dargestellt [Ulr95, Sch05]. Komplexität eines Systems weist die folgenden Eigenschaften auf: nicht-deterministisch, dynamisch und unsicher. Im Vergleich dazu, spielt bei der Kompliziertheit die zeitliche Veränderlichkeit keine Rolle. (siehe Abbildung 5).

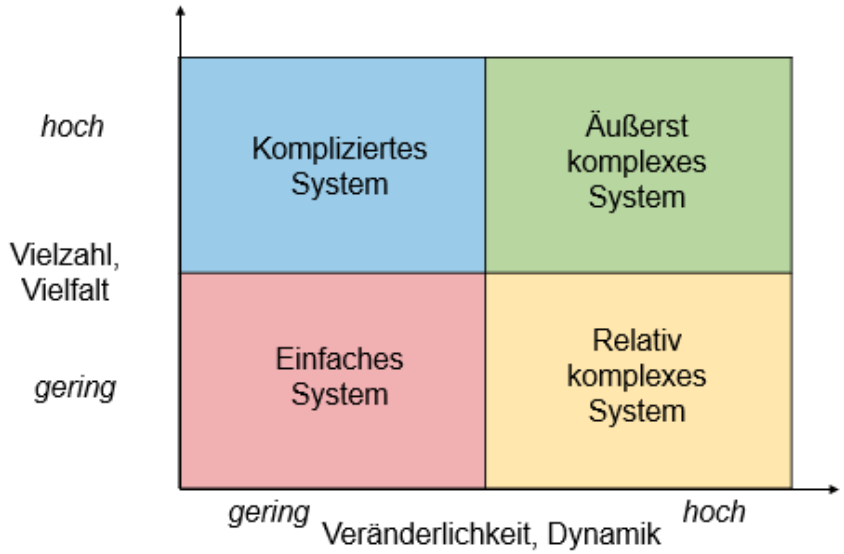


Abbildung 6: Zustände komplexer Systeme [Ulr95]

Die Komplexität ist zwar in den objektiven Teilaspekten messbar, aber in der Wahrnehmung subjektiv vom Betrachtungsrahmen, den Betrachtungsperspektiven und den Erfahrungen des jeweiligen Nutzers abhängig [Har13]. Zusätzlich spielt der Kontext der Betrachtung eine Rolle. Komplexität wirkt sich negativ bezüglich eines erhöhten Aufwands und Informationsbedarfs im Unternehmen aus. Komplexität kann aber auch positive Effekte erzielen, zum Beispiel als Markteinstiegsbarriere. Im Rahmen der Modularisierung bildet die Variantenvielfalt eine wesentliche Ursache der Komplexität.

Komponente

Komponenten beschreiben eine Aufteilung der Produktstruktur in kleinere Einheiten. Komponenten können Einzelteile oder Baugruppen eines Produktes darstellen. Einzelteile können nicht weiter aufgelöst werden. Baugruppen sind aus Einzelteilen oder Unterbaugruppen zusammengesetzt. [Sch05]

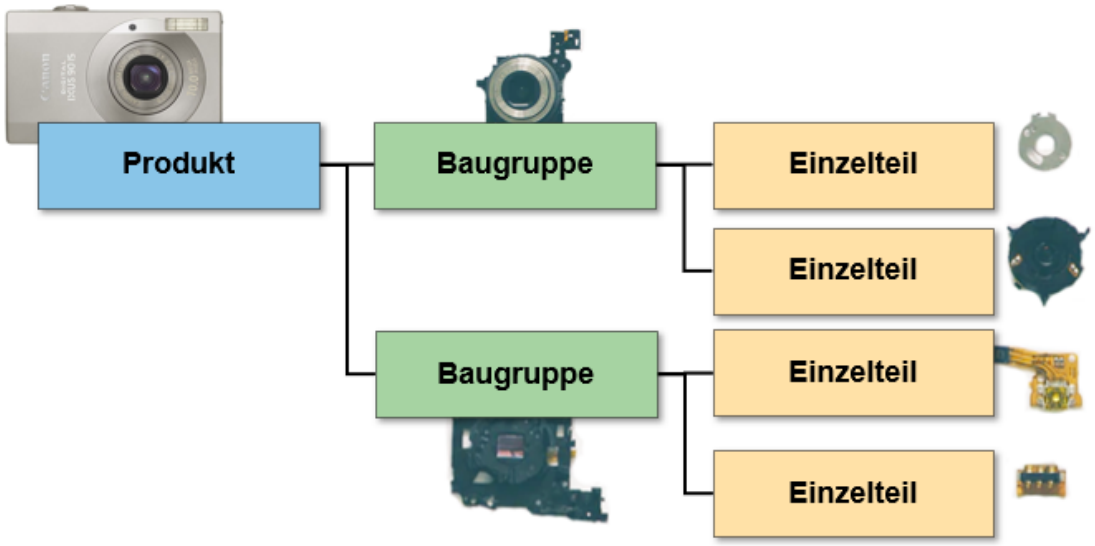


Abbildung 7: Aufteilung von Produkten - Baugruppen – Komponenten nach [Sch05]

Produktstruktur

Durch die Produktstruktur wird der Aufbau von Varianten einer Produktfamilie dargestellt. Die Produktstruktur ist dabei mit möglichen alternativen Prozessstrukturen verbunden. Aus Produktstruktur und Prozessstruktur kann die Kostenstruktur abgeleitet werden. [PBF+13]

Prozessstruktur

Die Prozessstruktur beschreibt produktbezogene Tätigkeiten in einem Unternehmen. Zum Beispiel können diese bei der Produktentstehung von dem Innovations- bis hin zum Produktionsprozess reichen. [PBF+13]

Produktprogramm

Das Produktprogramm bezeichnet alle Produkte eines Unternehmens. Das Produktprogramm kann wiederum in ein Produktionsprogramm und ein Absatzprogramm unterteilt werden. Das Produktionsprogramm umfasst die Produkte, die selbst produziert werden. Das Absatzprogramm umfasst ebenso die Produkte, die zugekauft werden. [ML97, RU98, Rap99].

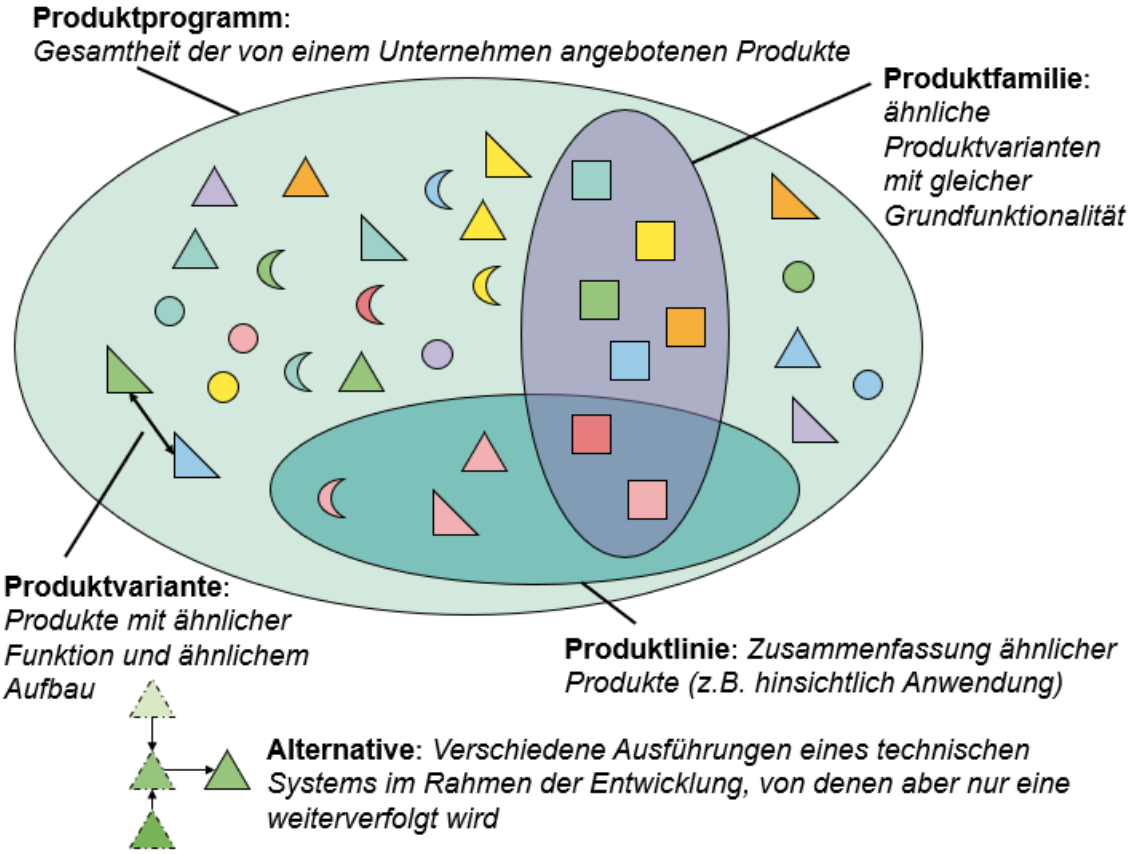


Abbildung 8: Produktprogramm → Produktlinie → Produktfamilie →Produktvarianten [ABW15, FKK15, PBF+13, Rup88, UE12]

Kostenstruktur

Mit Hilfe der Kostenstruktur können die verschiedenen Kostenarten unterschieden werden, welche auch in dieser Arbeit verwendet werden. Die Kostenarten können hierbei zum Beispiel Materialkosten, Lohnkosten, Verwaltungskosten, Entwicklungskosten, Vertriebskosten, Investitionskosten und weitere sein. Bei den Kostenarten kann weiter in Gemein- & Einzelkosten, variable & fixe Kosten, sowie laufende & einmalige Kosten unterteilt werden [EKL+07].

Komplexitätskosten

Die stetig zunehmende Anforderung an die Vielfalt von Produkten führt zu einer Steigerung der Komplexitätskosten im Unternehmen. Daher werden in dieser Arbeit die produktvarianteninduzierten Kosten als Komplexitätskosten beschreiben. Diese Komplexitätskosten resultieren aus der internen Vielfalt der Produktstruktur. Komplexitätskosten sind in allen Kostenarten anteilig enthalten. Daher können Komplexitätskosten nicht direkt quantifiziert werden, sondern es kann nur eine Relation zwischen Produktstrukturkonzepten hergestellt werden. Dabei werden die Komplexitätskosten mithilfe der Kostendifferenz auf Grund der internen Vielfalt zwischen den Produktstrukturkonzepten dargestellt. [KG18, Sch05]

Restriktionsgerechte Entwicklung

Restriktionen beschreiben zwingende Vorgaben an Produkte, die bei der Produktentwicklung berücksichtigt werden müssen. Diese Restriktionen ergeben sich aus den Anforderungen, die vom Kunden oder Markt an ein Produkt gestellt werden oder aus zurückfließenden Anforderungen nachgelagerter Unternehmensbereiche resultieren. Darauf basierend meint restriktionsgerechte Entwicklung die Entwicklung unter Berücksichtigung von diesen Vorgaben. Wesentlich sollen durch die Beachtung all dieser Restriktionen Zeit und Kosten gespart werden. Gleichzeitig soll die Qualität der Produkte dadurch verbessert werden [Eve90b, Kol94, ML95, PBF+13, Rot94a].

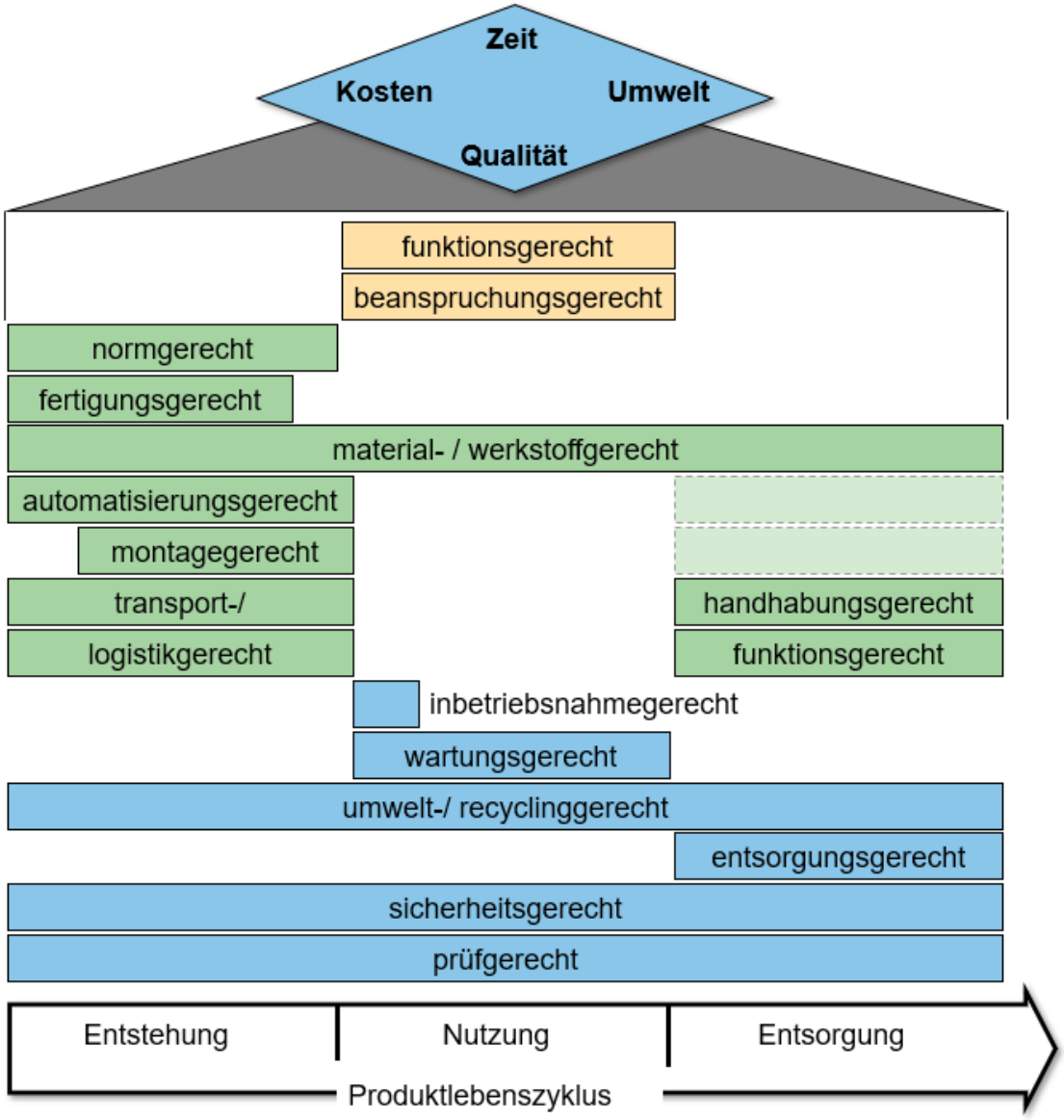


Abbildung 9: Übersicht über Restriktionen im Rahmen der Produktentwicklung [Eve90b]

Jede Produktentwicklung unterliegt Restriktionen. Daher spielt die restriktionsgerechte Entwicklung eine sehr wichtige Rolle. Die am häufigsten verwendeten konstruktiven

Restriktionen werden von Eversheim [Eve90b] zusammengefasst. Eine Erfassung von allen denkbaren Restriktionen ist nicht möglich und nicht sinnvoll, da in dem Produktlebenszyklus für jeden Prozess sich Restriktionen ableiten lassen. Entsprechend muss eine geeignete Detaillierung von Restriktionen stattfinden. In der Abbildung 9 sind bekannte Restriktionen dargestellt und den einzelnen Produktlebensphasen zugeordnet, auf die sie Auswirkungen haben. Zudem gibt es weitere Restriktionen, die sich überwiegend um Teilaspekte handeln. So kann zum Beispiel die schmiedegerechte Konstruktion als ein Teilaspekt der fertigungsgerechten Konstruktion zugeordnet werden [Eve90b].

Produktlebenszyklus

Neben der Modellierung der Produkteigenschaften stellt die geeignete Untergliederung des Produktlebenszyklus in Phasen und Prozesse eine Grundlage für die Methode zur restriktionsgerechten Entwicklung dar. Damit können die entsprechenden Restriktionen detailliert abgeleitet werden, die bei der Entwicklung zur Umsetzung der Produkteigenschaften verwendet werden. Bei der restriktionsgerechten Entwicklung muss der komplette Lebenszyklus betrachtet werden. Für eine gezielte und differenzierte Bewertung des Produktes müssen Abschnitte definiert werden, die gegeneinander abgegrenzt werden können. Nur dadurch ist eine eindeutige Zuordnung von Bewertungsgrößen hinsichtlich der einzelnen Restriktionen möglich.

Für die Erstellung des in dieser Arbeit gewählten Produktlebenszyklusmodells wurde das Generic Product Lifecycle Model [GP21] zu Grunde gelegt. Bei der Recherche wurde sich hierbei auf Produktlebenszyklusmodelle, die bei der Entwicklung mechanischer Produkte angewendet werden, fokussiert. [WHT15] stellt hierbei Aspekte zusammen, bei denen bei der Erstellung von Produktlebenszyklen zu achten ist und welche Informationen dabei eine Rolle spielen. Die in dieser Arbeit dargestellten Produktlebensphasen sind aus [PBF+13] entnommen, da dort auf die Entwicklung mechanischer Produkte fokussiert wird und die Besonderheiten und Herausforderungen des modularen Leichtbaus in der mechanischen Konstruktion liegen.

Produktlebensphasen

Die einzelnen Lebensphasen eines Produktes reichen von dem Innovationsmanagement, über die Produktentwicklung, die Produktion, die Nutzung bis zur Wiederverwendung bzw. Recycling des Produkts. Jede dieser Phasen beschreibt dabei eine Produktlebensphase. [PBF+13, VDI2220, Bran71]

Funktionale und nicht-funktionale Anforderungen

In [PB77] wurde bereits die funktionalen und nicht-funktionalen Anforderungen vorgestellt. Bei funktionalen Anforderungen existiert keine einheitliche Gliederung. Bei nichtfunktionalen Anforderungen können zum Beispiel die folgenden zwei Bereiche für die Gliederung angewendet werden [PL11]:

Ausführungsqualität (während des Betriebs beobachtbar)

- Korrektheit (Ergebnisse fehlerfrei)
- Benutzbarkeit (Nachvollzielbarkeit, Erlernbarkeit, Bedienbarkeit)
- Aussehen und Handhabung (Look and Feel)
- Zuverlässigkeit (Systemreife, Wiederherstellbarkeit, Fehlertoleranz)
- Anforderungen an Sicherheit (Informationssicherheit, Verfügbarkeit, Vertraulichkeit, Datenintegrität)
- Effizienz und Leistung (Wirtschaftlichkeit, Ressourcenbedarf, Antwortzeiten)

Weiterentwicklungs- und Evolutionsqualität (durch die statische Struktur des Systems verkörpert)

- Flexibilität (Unterstützung von Standards)
- Änderbarkeit und Wartbarkeit (Stabilität, Erweiterbarkeit, Prüfbarkeit, Analysierbarkeit)
- Betrieb und Umgebungsbedingungen
- Skalierbarkeit (Änderungen des Problemumfang bewältigen)
- Übertragbarkeit und Portierbarkeit (Austauschbarkeit, Konformität, Installierbarkeit, Anpassbarkeit)

Zusätzlich bilden auch weitere Randbedingungen an die Entwicklung wie z. B. Termine oder Kosten nicht-funktionale Anforderungen, die auch entscheidende Faktoren für den Erfolg einer Produktidee, -entwicklung und -fertigung sind.

2.2 Problemstellung

In diesem Abschnitt wird zuerst auf die Ziele der Modularisierung und des Leichtbaus eingegangen. Gleichzeitig werden die Zielkonflikte zwischen dem Leichtbau und der Modularisierung aufgezeigt und analysiert. Aus den dabei aufgezeigten Problemen, die der Entwicklung von modularen Leichtbauprodukten entgegenwirken, wird das Ziel dieser Arbeit abgeleitet.

2.2.1 Ziele der Modularisierung

Modularisierung beschreibt die geeignete Gliederung von Produkten mit dem Ziel, die Abhängigkeit zwischen den Modulen zu verringern bzw. die Schnittstellen zu standardisieren. Das Kernziel der Modularisierung besteht darin, eine hohe externe Vielfalt von Produkten mit einer möglichst kleinen internen Vielfalt zu erzeugen (siehe Abschnitt 26.3 Stand der Technik). Dadurch wird die Komplexität eines Produktes deutlich verringert

und die damit einhergehenden Kosten in allen Produktlebensphasen gesenkt [KG18]. Zusätzlich werden Kosten durch höhere Produktionsmengen gesenkt. Dieser Effekt wird als Skaleneffekt bezeichnet. In der Abbildung 10 werden die daraus ergebenen Vorteile von modularen Produkten aufgelistet, die nach den einzelnen Produktlebensphasen dargestellt sind.

Die Wiederverwendung von Modulen spart Entwicklungszeit und -aufwand. Gleichzeitig reduziert dies ebenfalls die Komplexität der Entwicklung eines einzelnen Bauteils. Modular Sourcing erlaubt, fertig entwickelte, gefertigte und geprüfte Zwischenprodukte mit hohem Funktionsumfang von Zuliefern zu beziehen [Sch05]. Dies reduziert den Beschaffungsaufwand, da deutlich weniger Lieferanten benötigt werden. Skaleneffekte in der eigenen Herstellung und Produktion reduzieren den Aufwand und durch die Möglichkeit der Vormontage von Modulen kann eine reduzierte Durchlaufzeit erzielt werden [Hal14]. Dabei muss allerdings der Aufwand und die Zeit für die Vormontage berücksichtigt werden. Produktvarianten können durch die Konfiguration von bereits vorproduzierten Modulen bereitgestellt werden. Dies trägt zum Erreichen einer Lieferzeitverkürzung bei. Der Tausch ganzer Module reduziert in der Phase der Nutzung die Zeit für Instandhaltung, wodurch die Verfügbarkeit eines Produktes erhöht wird. Nach der Nutzungsphase können Module gezielt nach ihren Anforderungen der Verwertung zugeführt oder entsorgt werden.

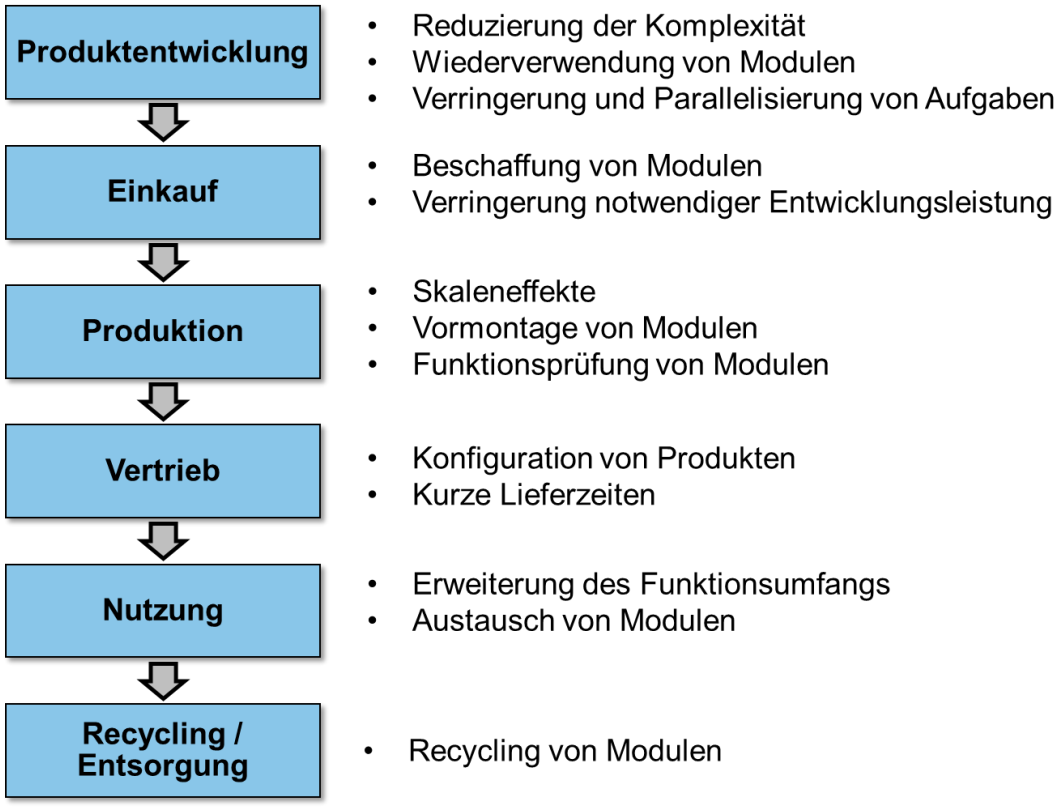


Abbildung 10: Vorteile modularer Produkte in die Produktlebensphasen [Ble11]

Neben diesen Vorteilen in den einzelnen Produktlebensphasen weisen modulare Produkte darüber hinaus mehrere positive Produkteigenschaften auf, die nachfolgend aufgeführt sind [Sal07, KG18]:

- Entkopplung: Eine starke Interaktion in den Modulen und eine geringe Interaktion zwischen den Modulen ermöglichen die Entkopplung der Module.
- Kommunale Verwendung: Module sowie Prozesse können in unterschiedlichen Produktvarianten wiederverwendet werden.
- Kombinierbarkeit: Die Bildung der Produkte oder Produktvarianten geschieht durch eine Kombination der Module.
- Schnittstellenstandardisierung: Zur technischen Umsetzung der Modularisierung sind standardisierte Schnittstellen nötig, die die Interaktion zwischen Modulen realisieren. Hierbei beschreibt die Interaktion den Stoff-, Energie und Informationsaustausch sowie die mögliche strukturelle Verbindung. Sie betrifft ein gegenseitiges Eingreifen in die jeweils anderen Eigenschaften des Produktes.
- Funktionsbindung: In einem abgeschlossenen Modul wird in der Regel eine Funktion bzw. eine Teilfunktion realisiert. Zudem können standardisierte Schnittstellen als ein Gestaltungsprinzip zur Realisierung der Funktionsbindung verwendet werden.

2.2.2 Ziele des Leichtbaus

Leichtbau ist zunächst die erklärte Absicht, das Gewicht eines Produktes zu reduzieren, ohne die Steifigkeit, die Tragfähigkeit oder andere Funktionen des Produktes zu reduzieren [Wie07]. Zur Realisierung des Leichtbaus können unterschiedliche Maßnahmen eingesetzt werden, wie z.B. die Realisierung von fortschrittlichen Bauweisen, der Einsatz leichter und hochfester Werkstoffe sowie neuer Herstellungstechnologien [Kle09]. Diese Maßnahmen helfen, mit Leichtbauprodukten eine maximale Gewichtsreduzierung zu erreichen. Dadurch ist es möglich, mit einem möglichst geringen Verbrauch von Ressourcen bei der Produktion und im Rahmen der Nutzung Produkte zu realisieren [Kle09]. Leichtbau bringt außer der Gewichtseinsparung noch weitere Vorteile mit, wie zum Beispiel Funktionsverbesserungen durch Funktionsintegration und neue Möglichkeiten des Designs.

Darüber hinaus bietet ein Leichtbauprodukt das Potenzial, die Produktleistung, wie beispielsweise die Dynamik und Steifigkeit von Komponenten bzw. Systemen zu erhöhen [Wie07]. Das Hauptziel bildet somit die gezielte Gewichtseinsparung, welche um die positive Veränderung von Produkteigenschaften erweitert wird.

2.2.3 Konflikt zwischen Modularisierung und Leichtbau

Aus der Kombination der beiden Bauweisen – der Modularisierung und des Leichtbaus – ergibt sich der Modulleichtbau. Der Modulleichtbau eröffnet über eine kombinierte Herangehensweise die Möglichkeit, strukturiert und methodisch modulare Produkte unter Leichtbauaspekten zu entwickeln. Gleichzeitig soll der Modulleichtbau die Vorteile der Modularisierung und dem Leichtbau vereinen [KG18]:

- Modulare Baustrukturen mit geringen Produktkosten
- Möglichst geringes Gewicht des Produktes

Mit modularen Bauweisen können insbesondere die Produktkosten durch Skaleneffekte reduziert werden [Half14]. Modularisierung bedeutet jedoch bezogen auf das Gewicht des Produktes [KG18]:

- Eine höhere Anzahl an Schnittstellen und damit konstruktive Schwachstellen, die dann zusätzliches Gewicht in das Produkt einbringen.
- Wiederverwendung der Module in unterschiedlichen Endprodukten, die jedoch zu einer Überdimensionierung auf Grund von unterschiedlichen Anforderungen führen.

Der Einsatz von Leichtbau führt wiederum häufig zu einer Erhöhung der Produktkosten [Kle09]:

- Einsatz von hochfesten und teureren Materialien
- Längere Entwicklungsdauer aufgrund von mehr Iterationsschleifen
- Anwendung komplexerer Fertigungsverfahren
- Komplexere Geometrien und dadurch steigende Bearbeitungskosten

Auf Grund der unterschiedlichen Anforderungen an die Module, werden diese häufig überdimensioniert. Dies führt wiederum zu zusätzlichem Gewicht. Gleichzeitig bringen die Schnittstellen, die zur Bildung der Module notwendig sind, auch zusätzliches Gewicht ein. Dies ist genau gegengesetzt zu den Zielen von Leichtbau. Leichtbau verwendet verschiedene Bauweisen, wie System-, Struktur- und Materialleichtbau, um das Ziel des Gewichtsminimums zu erreichen. Diese Prinzipien widersprechen jedoch ebenso einer modularen Bauweise [KSO+16]. Trotz der vielen widersprüchlichen Anforderungen zwischen beiden Bauweisen, müssen beide Bauweisen für kostengünstige und variantenreiche Leichtbauprodukte kombiniert werden. Zur Realisierung der Kombination beider Bauweisen wird im Folgenden eine detaillierte Problemanalyse bezüglich der Entwicklung modularer Leichtbauprodukte durchgeführt. Hierzu wird zuerst auf Leichtbauaspekte eingegangen und diese anschließend mit den Zielen der Modularisierung verglichen.

Leichtbauentwicklung stellt ein iteratives Herantasten an eine optimale Konstruktion mit dem optimal geringsten Gewicht dar [Ehr09, KGP12]. Für dieses Herantasten wird zunächst die Lastsituation analysiert und anschließend das Material und die Geometrie so konstruiert, dass die Anforderungen mit einer gewählten Produktsicherheit und einem optimal geringsten Gewicht erfüllt werden. Eine gute Leichtbaukonstruktion reift meist über mehrere Iterationsschleifen mit verschiedenen Konstruktionsstrategien wie z.B. Form-, Stoff- und Fertigungsleichtbau durch einen hohen Einsatz von Software wie z.B. CAD-FEM [Kle09]. Im Folgenden werden die Ursachen der Iterationen zur Entwicklung von Leichtbauprodukten erläutert.

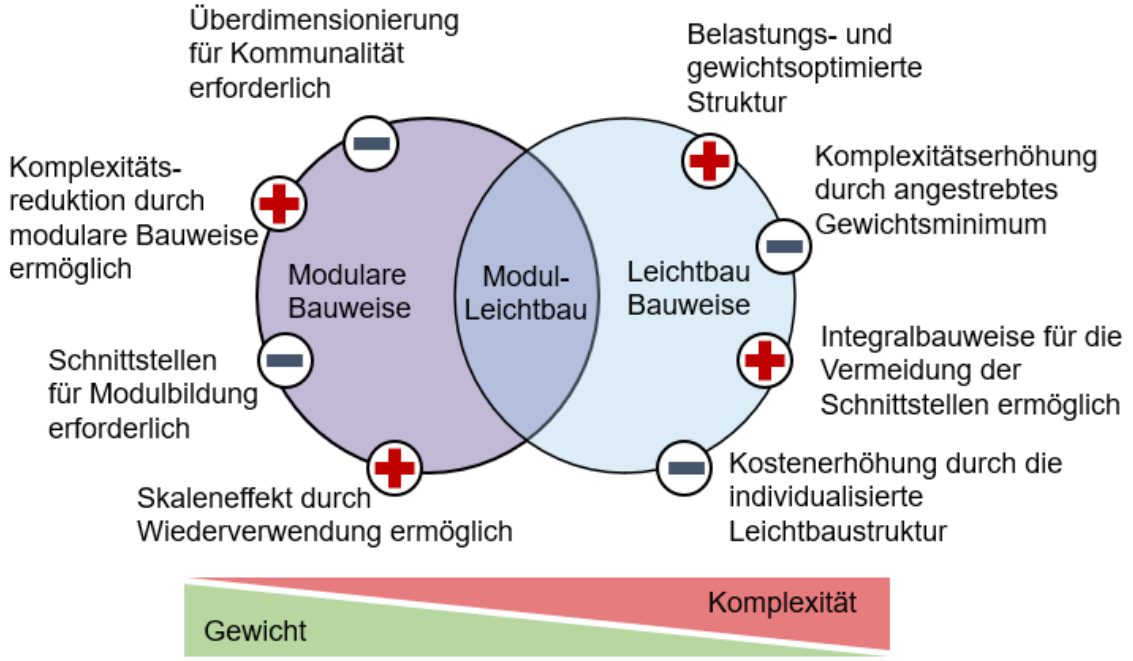


Abbildung 11: Konflikte zwischen Modularisierung und Leichtbau [KSO+16]

Hohe Sicherheitsanforderungen unter einer gewichtsminimierten Leichtbaustruktur: Leichtbau wird heutzutage meist in der Mobilitätsindustrie wie z.B. dem Automobilbau und der Raum- und Luftfahrt eingesetzt. Neben den hohen Anforderungen an die Funktionalität sind dort besonders strenge Sicherheitsanforderungen zu erfüllen. Somit müssen leichtbauoptimierte Bauteile die gleichen Sicherheitsanforderungen erfüllen wie vergleichbare Massivbauteile. Dies wird durch eine sorgfältige Konstruktion unter Berücksichtigung von z.B. Bruchfestigkeit, Steifigkeit, Nutzungsdauer und Zuverlässigkeit sichergestellt [Wie07]. Leichtbau wird dazu eingesetzt, die Sicherheitsreserven abzusichern, um mit einem minimalen Gewicht die hohen Anforderungen zu erfüllen. Dies macht eine aufwändige Berechnung erforderlich, bei der sich iterativ der Schadentoleranz und einer hinreichenden Resttragfähigkeit angenähert wird [DIN EN 12663]. Das Ziel ist

dabei mit sicheren Sicherheitsreserven mit einer Leichtbaustruktur die Materialeigenschaften auszuschöpfen [Kle09].

Hohe Anforderungen an innovative Lösungen von Leichtbauwerkstoffen: Die hohen Sicherheitsanforderungen führen bei der Werkstoffauswahl für Leichtbauprodukte ebenso zu einem aufwendigen Auswahlprozess. Ein idealer Leichtbauwerkstoff soll eine geringe Dichte, hohe statische und dynamische Grundfestigkeiten, ein hohes Elastizitätsmodul, sowie eine ausreichende Bruchzähigkeit besitzen. Bei natürlichen Werkstoffen ist solch eine Eigenschaftenkombination so nicht anzutreffen, so dass ein Kompromiss gefunden werden muss. Alternativ bieten innovative Werkstoffe, wie z.B. Sandwich-Materialien aus Aluminiumblech mit Faserkunststoffverbunden, die Möglichkeit, die gewünschten Materialeigenschaften zu erzielen. Die Entscheidung bezüglich der Materialauswahl wird in der Regel durch Berechnungen, Simulationen und Tests unterstützt. Zur Ausschöpfung der Materialeigenschaften ist ein iteratives Vorgehen erforderlich [Pla15]. Die Verwendung innovativer Leichtbaumaterialien benötigt zusätzlich detaillierte Werkstoffanalysen, da das Materialverhalten bei diesen von vielen Faktoren abhängig ist und häufig keine Erfahrungswerte existieren. Somit bedarf die Verwendung dieser Werkstoffe weiterer Optimierungsschleifen. [Pla15].

Technologische Einschränkungen unter einem optimalen Aufwand-Nutzen-Verhältnis: Neben den funktionalen Anforderungen der Produktentwicklung müssen ebenso wirtschaftliche Anforderungen beachtet werden. Die durch den Leichtbau erzeugt zusätzlichen Entwicklungs-, Herstellungs-, Bearbeitungs-, Wartungs- und Reparaturaufwände gehen erheblich in die Gesamtkosten ein [Wie07]. Nutzen und Aufwand müssen stets in einem für den Auftraggeber ausgewogenen Verhältnis zueinanderstehen, so dass der funktionale Mehrwert der Leichtbaumaßnahmen wirtschaftlich gerechtfertigt ist. Es gibt in der Regel einen zu realisierenden Leichtbaugrad, der durch den Kostenrahmen eingegrenzt ist [Kle09]. Insofern ist eine Zielsetzung des Leichtbaus, eine sinnvolle Relation zwischen Aufwand und Nutzen für die Gewichtseinsparungen zu erreichen. Allerdings ist der kostenmäßige Spielraum in der Praxis, insbesondere im Maschinen- und Automobilbranche, oft sehr eingeschränkt. Dieser geringe Spielraum schränkt wiederum den Einsatz von Leichtbautechnologien ein. Zudem können viele Kosten bzw. Leichtbauzusatzkosten, wie zum Beispiel die zusätzlich aufzuwenden Ingenieurkosten und Organisationskosten gegenüber, die erst im Nachhinein sicher bestimmt werden können [Kle09]. Daher bedarf die Abstimmung zwischen Kosten und Gewicht einer ständigen Optimierung, so dass die Amortisation des Mehraufwands des Leichtbaus genauer bestimmt werden kann. Dies entspricht einem iterativen Vorgehen.

Gegenseitige Beeinflussung der involvierten Faktoren zur Umsetzung von Leichtbau: Da die oben genannten Aspekte sich wiederum untereinander beeinflussen bzw. eingrenzen, wird dadurch die Optimierung der Leichtbaulösungen erschwert und Iterationsschleifen häufen sich. Die Leichtbaustruktur ist durch Werkstoffe, Fertigungsverfahren und Kostenbudget eingeschränkt. Wenn erkannt wird, dass während der Herstellung der entwickelten Leichtbaustruktur die kalkulierten Herstellungskosten überschritten

werden, müssen entweder diese zusätzlichen Kosten getragen werden oder die Konstruktion von dem Leichtbauprodukt umgestaltet werden. Wenn der spezifische Leichtbauwerkstoff ein Verfügbarkeitsproblem hat und somit die Produktionspläne verletzt werden, müssen alternative Werkstoffe ausgesucht und gegebenenfalls die ganze Produktstruktur angepasst werden. Darüber hinaus sind zusätzlich kundenspezifische und unternehmensstrategische Anforderungen vorhanden, wie zum Beispiel, dass die Beschaffungsstrategie die Produktstruktur unmittelbar beeinflussen kann. Das entspricht einer Mehrzieloptimierung, die mit der klassisch linearen Optimierung schwer umzusetzen ist. In diesem Fall können zwar spezielle Optimierungsstrategien wie zum Beispiel Evolutionsstrategien, die besonders für Multikriterien-Optimierung geeignet sind, verwendet werden [VBC+04, Vaj14]. Trotzdem ist dieser Vorgang iterativ durchzuführen. Diese Iterationen verzögern den Produktentwicklungszyklus, verhindern einen schnellen Markteintritt, binden mehr Kapital und Unternehmensressourcen, die wiederum zu einer Kostenerhöhung führen und die Wettbewerbsfähigkeit des Produktes reduzieren.

Der durch Leichtbau verursachte Mehraufwand führt somit zu einem zusätzlich stark iterativen Vorgehen in der Produktentwicklung [Ehr09]. Die genannten Ursachen für die Iterationen beim Leichtbau beziehen sich auf die Entwicklung einzelner Produkte bzw. Produktvarianten. In der Automobilindustrie und der Luft- und Raumfahrt wird jedoch in der Regel eine Modularisierungsstrategie angewandt. Die Produktentwicklung umfasst somit eine Produktfamilie und nicht nur einzelne Varianten. Die Modularisierung erzeugt jedoch zahlreiche Restriktionen für die Anwendung von Leichtbau [KG18]. Im Folgenden werden diese Restriktionen aufgelistet, die bei der Anwendung der Modularisierung in Kombination mit dem Leichtbau erfüllt werden müssen [Ble11].

Berücksichtigung der Restriktionen aus allen Produktlebensphasen: Das Ziel einer modularen Produktstrukturierung sind die einfache Konfiguration von Produktvarianten und zudem die Ausnutzung der durch Modularisierung realisierbaren Potenziale. Die Potenziale sind in allen Produktlebensphasen angesiedelt. Bei der Entwicklung von modularen Produkten bzw. Produktfamilien sind deswegen insbesondere alle Restriktionen bzw. Anforderungen aus allen Produktlebensphasen zu berücksichtigen. Das entspricht dem Integrated Design Engineering (IDE), dass die Fortentwicklung der Integrierten Produktentwicklung zu einem humanzentrierten und ganzheitlichen Modell für die Produktentwicklung bildet [Vaj14].

Berücksichtigung technisch-funktionaler und produktstrategischer Beziehungen: Technisch-funktionale und produktstrategische Beziehungen beeinflussen die Bildung von Modulen. In einer zu Methode zur Modularisierung müssen daher beide Aspekte ausreichend Berücksichtigung finden.

Berücksichtigung einer variantengerechten Produktgestaltung: Die variantengerechte Gestaltung von Komponenten ist die Grundlage einer erfolgreichen Produktstrukturierung [Fra02]. Eine klare Abgrenzung und Definition von Komponenten mit entsprechenden Funktionalitäten vereinfachen Produktstrukturierungsentscheidungen und damit

die Bildung von Modulen erheblich. Dadurch können mit einer möglichst geringen Konfiguration alle notwendigen Produktvarianten erstellt werden.

Die Entwicklung einer entsprechenden Produktstruktur erfordert die Berücksichtigung sowohl der technisch-funktionalen Kopplungen zwischen den Komponenten als auch die Berücksichtigung produktstrategischer Anforderungen. Zudem müssen die vielfältigen und teilweise widersprüchlichen Anforderungen der unterschiedlichen Produktlebensphasen während der Produktstrukturierung wahrgenommen werden. Die Entwicklung von modularen Produktfamilien ist eine entsprechend anspruchsvolle Aufgabe [KG18, Ble11] und erschwert gleichzeitig die Entwicklung von modularen Leichtbauprodukten. Dabei ist während der Entwicklung das Denken in Modulen sehr hilfreich. Das bedeutet, wenn das Denken in Modulen von Anfang an der Entwicklung vorgenommen wird, ergibt sich dann die Vereinfachung auch von selbst [Vaj20]. Trotzdem ist die Vereinfachung eine komplexe multi-kriteriale Optimierungsaufgabe, die mithilfe der sechs in Rahmen der IDE vorgegebenen Produkteigenschaften unterstützt wird [Vaj20, PVS18]. Zudem sind die von [Vaj20] zusammengefassten Parameter und Indikatoren sehr hilfreich für die Vereinfachung des Produktes.

Berücksichtigung der Konflikte zwischen der Modularisierung und dem Leichtbau: Darüber hinaus existieren noch zusätzliche Konflikte zwischen der Modularisierung und dem Leichtbau. Zum einen benötigen modulare Produktstrukturen zusätzliche Schnittstellen, um Modulkopplungen zu realisieren. Zum anderen sind Module meist überdimensioniert, damit sie die Anforderungen der unterschiedlichen Produktvarianten erfüllen. Werden Module in möglichst vielen Produktvarianten bzw. Produktfamilien übergreifend eingesetzt (Kommunalität), bieten diese modularen Produktstrukturen große ökonomische Potenziale. Diese hohe Kommunalität widerspricht jedoch einer zielgerichteten Auslegung des Produktes zur Gewichtsoptimierung. Für einen konsequenten Leichtbau wird jedoch versucht, gerade diese Überdimensionierung zu minimieren und die jeweiligen Einzelprodukte optimal auszulegen. Somit entsteht ein Konflikt zur Umsetzung eines modularen Leichtbauproduktes, der die Entwicklungsaufgabe erschwert, da während der Produktentwicklung eine optimale Lösung zwischen der Modularisierung und dem Leichtbau kompensiert werden muss. [Gum15] Die Modulauswahl unter Leichtbaugesichtspunkten ist somit umso komplexer und bedarf weiterer Iterationen im Rahmen der Produktentwicklung. Für solche hoch iterative Mehrzieloptimierung wird eine multi-kriteriale Optimierung, wie zum Beispiel das Evolutionsverfahren, benötigt [Vaj14]. Der von Gumpinger vorgestellte Modulleichtbau [Gum15] weist somit ein sehr stark ausgeprägt iteratives Vorgehen auf.

Daraus kann geschlussfolgert werden, dass die Entwicklung von modularen Leichtbauprodukten ein hoch iteratives Vorgehen ist. Die Anzahl der Iterationen zur Entwicklung der modularen Leichtbauprodukte, in der die Anforderungen sowohl aus der Modularisierung auch aus dem Leichtbau gleichzeitig berücksichtigt werden müssen, sind in der Regel deutlich mehr als die Anzahl der Iterationen nur zur Entwicklung von modularen Produkten oder Leichtbauprodukten. Daher verursacht in der Regel die Entwicklung der

modularen Leichtbauprodukte mehr Aufwand. Dieser Mehraufwand bindet viele Unternehmensressourcen wie zum Beispiel Entwicklungskräfte und verhindern einen schnellen Markteintritt. Dies verringert die Wettbewerbsfähigkeit und ein schnelles Time-to-Market wird in Zeiten kürzerer Innovationszyklen und Technologieentwicklungen immer wichtiger. Die Komplexität des Leichtbaus und die damit verbundenen Aufwandssteigerungen in der Produktentwicklung bilden ebenso wesentliche Hindernisse für eine weitere Verbreitung des Modulleichtbaus [KG18, Gum15]. Das stark iterative Vorgehen und die sich daraus ergebende komplexe und lange Produktentwicklung modularer Leichtbauprodukte stellen somit ein wesentliches Problem in der Produktentwicklung dar.

Das Ziel dieser Arbeit ist es, für eine weitere Verbreitung von Leichtbau beizutragen. Dazu muss die Wirtschaftlichkeit von Leichtbaumaßnahmen erhöht werden und Entwicklungszeiten verkürzt werden. Modulare Strukturen helfen dabei, die Wirtschaftlichkeit zu erhöhen und Entwicklungszeiten zu verkürzen. Die einfache Kombination aus Modularisierung und Leichtbau nach [Gum15] sorgt jedoch dafür, dass der Produktstrukturierungsprozess noch komplexer wird und mehr Iterationen für die Ermittlung der optimalen Produktstruktur erforderlich sind. In dieser Arbeit wird hierzu eine Methode entwickelt, um genau diese Produktstrukturierung zu vereinfachen und dadurch die Entwicklungszeiten von modularen Leichtbauprodukten zu verkürzen. Es zielt darauf, die Iterationen zu verringern und zu vereinfachen [Vaj14]. Daraus leiten sich die folgenden Forschungsfragen für diese Arbeit ab:

1. **Wie können zum Zeitpunkt der Produktstrukturierung bereits konstruktive Alternativen für Leichtbaukomponenten und modulare Komponenten generiert werden?**
2. **Wie kann der Nutzen von den alternativen Produkt- / Komponentenstrukturen im Rahmen der modularen Bauweise und der Leichtbaubauweise berechnet werden?**
3. **Wie kann der Erfüllungsgrad der Anforderungen zwischen bestehenden Modulen und individuell ausgelegten Leichtbaukomponenten gemessen werden, um eine genaue Auswahlentscheidung zu treffen?**
4. **Welche Restriktionen müssen bei der Entscheidung berücksichtigt werden?**

Aus diesen Forschungsfragen leitet sich das Ziel dieser Arbeit ab.

2.3 Ziel der Arbeit

Das Ziel dieser Arbeit ist es, modulare Leichtbauprodukte besser entwickeln zu können. Der iterative Charakter der Entwicklung modularer Leichtbauprodukte, der wegen der Kombination beider Bauweisen stark verschärft ist, wird als das wesentliche Problem identifiziert. Daher werden die verschärften Entwicklungsiterationen modularer Leicht-

bauprodukte als Ansatzpunkt zur Verbesserung des Entwicklungsvorgehens gewählt. Daraus ergibt sich den Kern des Ansatzes: den Entscheidungsprozess bei der Produktstrukturierung zu optimieren. Das ermöglicht eine schnelle und genaue Auswahlentscheidung zwischen bestehenden Modulen und individuell ausgelegten Leichtbaukomponenten zu treffen. Somit werden die Iterationen zur Entwicklung modularer Leichtbauprodukte verkürzt. Im Rahmen dieser Arbeit soll somit eine methodische Vorgehensweise entwickelt werden, mit der das Aufwand-Nutzen-Verhältnis und der Erfüllungsgrad der Anforderungen von den alternativen Lösungen bereits in der Phase der Produktstrukturierung quantitativ berechnet werden können, um die Produktentwickler ganzheitlich zu unterstützen.

Während der Entwicklung von modularen Leichtbauprodukten müssen sowohl die technisch-funktionalen als auch die unternehmensstrategischen Restriktionen aus allen Produktlebensphasen berücksichtigt werden. Diese Restriktionen sollen als Anforderungen bereits in den frühen Phasen der Produktentwicklung aufgenommen werden und bei der Entscheidung zur Produktstrukturierung berücksichtigt werden. Daher werden im Rahmen dieser Arbeit eine Zusammenstellung von den entsprechenden Restriktionen mit Hinsicht auf den Modulleichtbau erarbeitet. Da die meisten Gesamtkosten und Herstellkosten von Produkten durch konzeptionelle und strategische Entscheidungen bestimmt werden [Wie70, Vaj14]. Diese aus den Restriktionen ergebenden Anforderungen müssen dann im Sinne eines Frontloading der Konstruktionsentscheidungen bei der Produktstrukturierung betrachtet werden [Vaj14]. Daher ist das Ziel dieser Arbeit, ein bewusstes Entscheidungstreffen zwischen der Wirtschaftlichkeit durch die Modularisierung und der Gewichtsoptimierung durch den Einsatz von Leichtbaumaßnahmen zu ermöglichen. Gleichzeitig sollen die Synergiepotenziale zwischen der modularen Bauweise und der Leichtbauweise in allen Produktlebensphasen optimal ausgeschöpft werden.

2.4 Wissenschaftliche Herangehensweise

Das Vorgehen zur Erreichung der Zielsetzung richtet sich nach der Herangehensweise der Design Research Methodology (DRM) nach Blessing und Chakrabarti [BC09]. Die DRM bietet ein systematisches und zielgerichtetes Forschungsvorgehen, welches einfach nachzuvollziehen und anzuwenden ist. Gleichzeitig bildet das Vorgehen eine hoch logische Sachbearbeitungskette, die für diese Forschungsarbeit sehr geeignet ist. Das Vorgehen ist in Abbildung 11 dargestellt. In den einzelnen Phasen werden die wesentlichen Ergebnisse und die dafür geeigneten Hilfsmittel dargestellt. Das Vorgehen ist zwar sequenziell, aber die Rücksprünge zwischen den einzelnen Schritten sind auch möglich.

Das Hauptziel der ersten Phase „Klärung des Forschungsziels“ sind die Definition der Gesamtzielsetzung und die Ableitung der Forschungsfrage der Dissertationsschrift. Aufbauend auf einer Literaturrecherche werden Kriterien zur Bewertung der Individualisierung von Bauteilen und der Verwendung von Standardkomponenten ermittelt. Diese Kri-

terien bilden die Grundlage für eine tiefergehende Literaturrecherche zum Stand der Wissenschaft der Entwicklung von modularen Leichtbauprodukten und den damit verbundenen Besonderheiten bzw. Restriktionen in allen Produktlebensphasen.

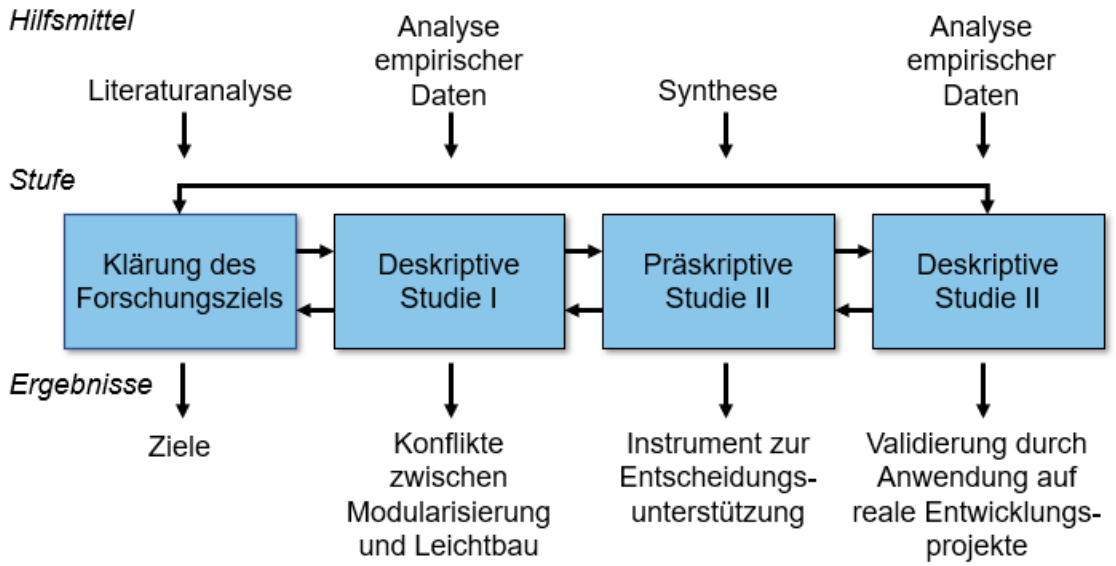


Abbildung 12: Auf diese Arbeit angepasstes Vorgehen nach der DRM [BC09]

Im Rahmen der ersten deskriptiven Studie werden die in der Methode zu berücksichtigenden Restriktionen herausgearbeitet. Insbesondere werden die Restriktionen hinsichtlich der Modularisierung und des Leichtbaus untersucht. Anschließend werden daraus mögliche Konflikte zwischen Modularisierung- und Leichtbauansätzen abgeleitet. Diese Studie dient dazu, Angriffspunkte für die Entwicklungsmethode dieser Arbeit herauszuarbeiten. Zu den einzelnen Konflikten werden entsprechende Werkzeuge zur Entscheidungsunterstützung entwickelt, um optimale Kompromisse zwischen beiden Bauweisen zu ermitteln. Alle Werkzeuge werden abschließend in einer Methode zusammengefasst.

Die entwickelte Methode wird im letzten Schritt, der Deskriptiven Studie II, validiert. Die Validierung findet durch die Anwendung auf ein reales Entwicklungsprojekt statt. Die Anwendung der Methode wird mit vorherigen Projekten ohne Anwendung der Methode verglichen und durch Interviews mit den Anwendungspartnern ausgewertet.

3 Stand der Forschung

Ziel dieser Arbeit ist eine Methode zur Verbesserung des Entwicklungsprozesses von modularen Leichtbauprodukten zu entwickeln. Es sollen im Rahmen der Produktstrukturierung bereits konstruktive Alternativen für Leichtbaukomponenten und modulare Komponenten ausgearbeitet werden. Gleichzeitig soll die Auswahlentscheidung zwischen den konstruktiven Alternativen unter der Berücksichtigung von Wirtschaftlichkeit bewusst getroffen werden. Dadurch wird die Entwicklung von modularen Leichtbauprodukten beschleunigt bzw. Iterationen verringert. In diesem Kapitel wird daher der aktuelle Stand der Forschung zu Entwicklungsansätzen von den drei Themenfeldern, also der Modularisierung, dem Leichtbau und dem Modulleichtbau, vorgestellt. Ausgehend von den aktuellen Veröffentlichungen in diesen Bereichen wird die Forschungslücke identifiziert und in Abschnitt 3.4 wiedergegeben.

3.1 Modularisierung

Es existieren zahlreiche Modularisierungsmethoden. In diesem Abschnitt werden die Modularisierungsmethoden in drei Sichten klassifiziert dargestellt.

- Die **technisch-funktionale Sicht** beinhaltet die Methoden, die sich an der technischen Funktionsweise orientieren. Mit diesen Methoden werden Produkte nach ihren funktionellen Eigenschaften modularisiert.
- Die **organisatorische und die prozessuale Sicht** bezeichnet die Methoden, die die Modularisierung nach der organisatorischen Struktur eines Unternehmens bzw. nach den Prozessen in den Produktlebensphasen vornehmen.
- Die **strategische Sicht** beschreibt die Methoden, die sich bei der Modularisierung an den mittel- und langfristigen Strategien eines Unternehmens und den Produktlebensphasen orientieren.

In dem nachfolgenden Abschnitt wird zuerst auf das generische Vorgehen der Modularisierung eingegangen. Anschließend werden bekannte Modularisierungsmethoden, die von unterschiedlichen Sichten geprägt sind, vorgestellt. Die Bewertung und Abgrenzung dieser Methoden geschehen in Abschnitt 3.4.

3.1.1 Generisches Vorgehen der Modularisierung

Es existieren verschiedene Ansätze zur Modularisierung einer Produktstruktur. Diese Methoden weisen verschiedenen Perspektiven und Zielsetzungen auf. Zudem werden unterschiedliche Werkzeuge eingesetzt. Die grundlegende Vorgehensweise lässt sich jedoch in allen Ansätzen wiederfinden.

Für die Beschreibung wird nachfolgend das Vorgehen nach [KG18] dargestellt. Die generische Modularisierung beginnt mit der „**Dekomposition der bestehenden Produktstruktur**“. Die bestehende Produktstruktur wird dabei aufgebrochen und restrukturiert. Dabei werden der Produktumfang und die geeignete Betrachtungsebene der Produktstruktur definiert. Eine Bearbeitung auf Einzelteilebene ist aufgrund der hohen Anzahl von Einzelteilen häufig zu aufwändig. Einzelteile werden somit vorab als Komponenten gruppiert und in der nachfolgenden Betrachtung als untrennbare Einheiten angesehen. Dann folgt der Schritt „**Analyse der Komponenten**“. In diesem Schritt geht es darum, die Eignung der Komponenten hinsichtlich einer Gruppierung in Module zu analysieren. Dabei wird eine iterative Dekomposition der Komponenten angewandt. Die sich daraus ergebenden Potenziale zur Modularisierung unterstützen im nächsten Schritt die eigentliche Modulbildung. Darauf basierend werden die Komponenten, die starke Ähnlichkeiten besitzen, in dem dritten Schritt „**Bildung der Module**“ zusammengesetzt. Bei der Bildung der Module kommt es häufig zu Widersprüchen bezüglich der Modulstruktur. In dem letzten Schritt wird deswegen die Realisierbarkeit der modularen Produktstruktur überprüft und die Produktstruktur eventuell umgestaltet. Das entspricht dem letzten Schritt „**Überführung in eine modulare Produktstruktur**“.

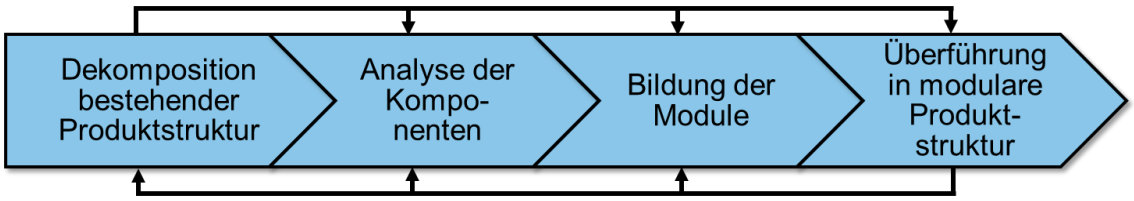


Abbildung 13: Generisches Vorgehen der Modularisierung nach [KG18]

3.1.2 Modularisierungsmethoden mit technisch-funktionaler Perspektive

Modularisierungsmethoden mit technisch-funktionaler Perspektive orientieren sich an der Bildung von Modulen, die die technische Funktionsweise eines Produktes verbessern [KG18]. Im Folgenden werden Modularisierungsmethoden mit der technisch-funktionalen Sicht vorgestellt.

Modular Design Methodology nach Heuristiken

Die Modularisierungsmethode von STONE orientiert sich nach der technisch-funktionalen Perspektive [Sto97]. Diese Methode integriert verschiedene Methoden, wie zum Beispiel das Quality Function Deployment [Aka04]. In dieser Methode werden unter anderem drei Heuristiken zur Ableitung der funktionalen Module eingesetzt. Die drei Heuristiken werden auf eine umsatzorientierte Funktionsstruktur von Produkten angewendet. Zuerst wird die erste Heuristik „dominanter Fluss“ verwendet. Dabei werden die Kundenanforderungen zuerst gewichtet (siehe Abbildung 14 links). Die einzelnen Umsatzflüsse (zum Beispiel der Stoffffluss oder der Energiefluss), die in der Funktionsstruktur

abgebildet sind, werden entsprechend ihrer Bedeutung für die Erfüllung der Kundenanforderungen und deren Gewichtung gewertet (siehe Abbildung 13 unten). Der am höchsten bewertete Fluss wird als dominanter Fluss bezeichnet. Gleichzeitig werden die Funktionen, die von den dominanten Flüssen durchflossen werden, zu einem Modul zusammengefasst (siehe Abbildung 14 rechts). Im zweiten Schritt wird die Heuristik „Verzweigungsfluss“ eingesetzt. Dabei werden die Funktionen zusammengefasst, die aus demselben Verzweigungspunkt kommen (siehe Abbildung 15 links). Im Anschluss wird die Heuristik „Umwandlung und Übertragung“ verwendet. Dabei werden Funktionen, die einen Fluss umwandeln, zusammengefasst (siehe Abbildung 15 rechts). Nach den drei Schritten werden verschiedene Module gebildet. Diese Module werden zu einer Gesamtlösung zusammengeführt. Die Auflösung der sich daraus ergebenden Widersprüche und Konflikte bilden die Grundlage für die folgende Konzeptentwicklung.

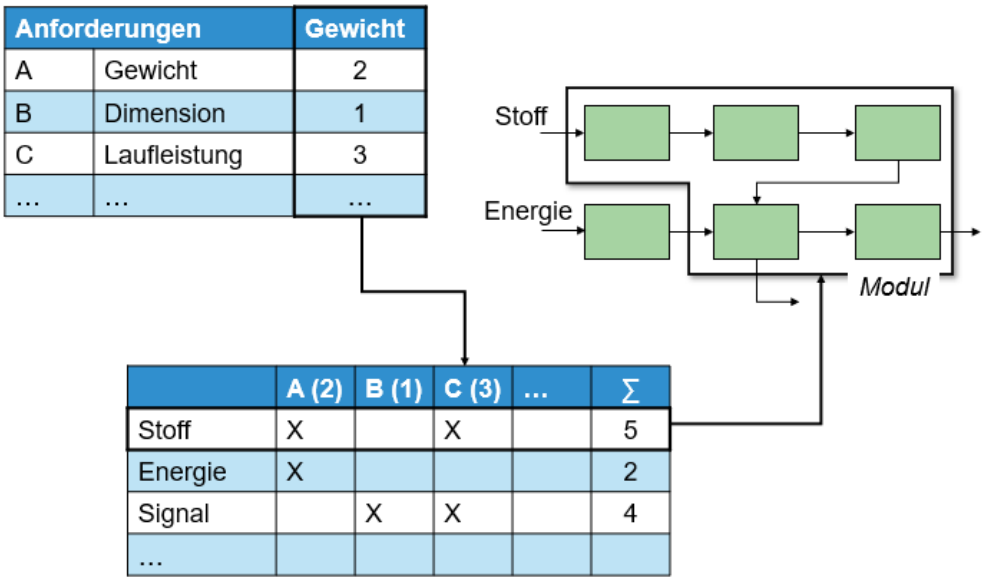


Abbildung 14: Ermittlung der Module nach der Heuristik „dominanter Fluss“ [Sto97]

Die Methode nach Stone mit klaren Heuristiken erleichtert ihre Anwendung und unterstützt eine reine funktionale Modularisierung, die auch ohne Produktgestalt durchführbar ist. Die reine technisch-funktionale Modularisierung schließt jedoch andere Modultreiber wie zum Beispiel strategische Anforderungen von Unternehmen aus. Darüber hinaus werden durch diese Methode teilweise widersprüchliche Vorschläge zur Modulbildung gegeben und die analytische Herangehensweise lässt sich nicht immer transparent kommunizieren.

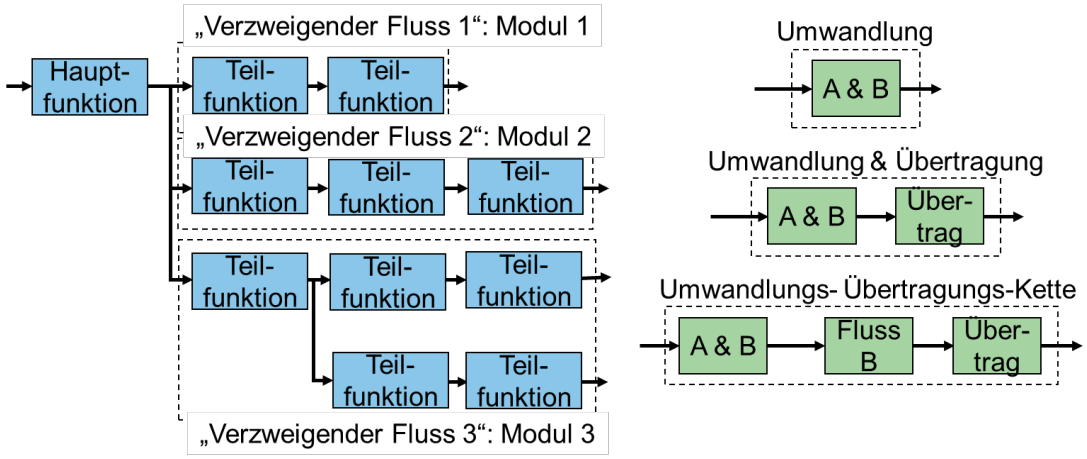


Abbildung 15: Ermittlung der Module nach den Heuristiken „Verzweigender Fluss“ und „Umwandlung und Übertragung“ [Sto97]

Erweiterung der Modular Design Methodology

Zamirowski und Otto erweiterten die von Stone entwickelte Modularisierungsmethode [ZO99]. Im Vergleich zu der Modular Design Methodology werden alle Produkte, die zu einer Familie gehören, in einer Funktionsstruktur zusammengefasst. Dabei ist zu beachten, dass in dieser Produktfamilie dieselben Modularisierungsmethode verwendet werden müssen, so dass diese beliebig miteinander verknüpft werden können. Zusätzlich zu den drei von Stone entwickelten funktionalen Heuristiken werden in dieser Methode zwei weitere variantenbezogene Heuristiken verwendet:

- Mit der Heuristik „Isolierung der Varianz“ werden die varianten Funktionen in Modulen isoliert.
- Die Heuristik „Funktionsstrukturmodifikation zur Reduzierung der Varianz“ führt zu einer Standardisierung der varianten Funktionen. Dadurch wird die Kommunalität der Produktfamilie erhöht.

Durch die Erweiterung der von Stone entwickelte Modular Design Methodology führt zu einem breiteren Einsatzbereich. Allerdings werden weiterhin keine produktstrategischen Anforderungen von diesen Methoden berücksichtigt.

Integration Analysis Methodology

Die Methode der Integration Analysis Methodology fokussiert sich auf die Untersuchung der Verbindungen bzw. der Schnittstellen zwischen Komponenten eines Produktes [PE94]. Integration Analysis Methodology bedeutet dabei eine Methode zur Untersuchung der Interaktion und Zusammenführung von Komponenten. Dabei wird die Design Structure Matrix (DSM) [Ste81] zur Ableitung der Module über die Schnittstellen von Komponenten verwendet. Die Schnittstellen unterscheiden sich in vier verschiedenen Arten: räumliche Position, Material, Energie und Information. Mit Hilfe der DSM werden alle Elemente hinsichtlich ihrer Schnittstellen untersucht. Die verschiedenen Arten von

Schnittstellen werden in einer Skala von -2 für schadhafte Beziehungen bis +2 für notwendige Beziehungen analysiert und bewertet. Daraus ergibt sich eine symmetrische DSM mit vier Einträgen jedes Elements (einer pro Schnittstellenart, siehe Abbildung 16).

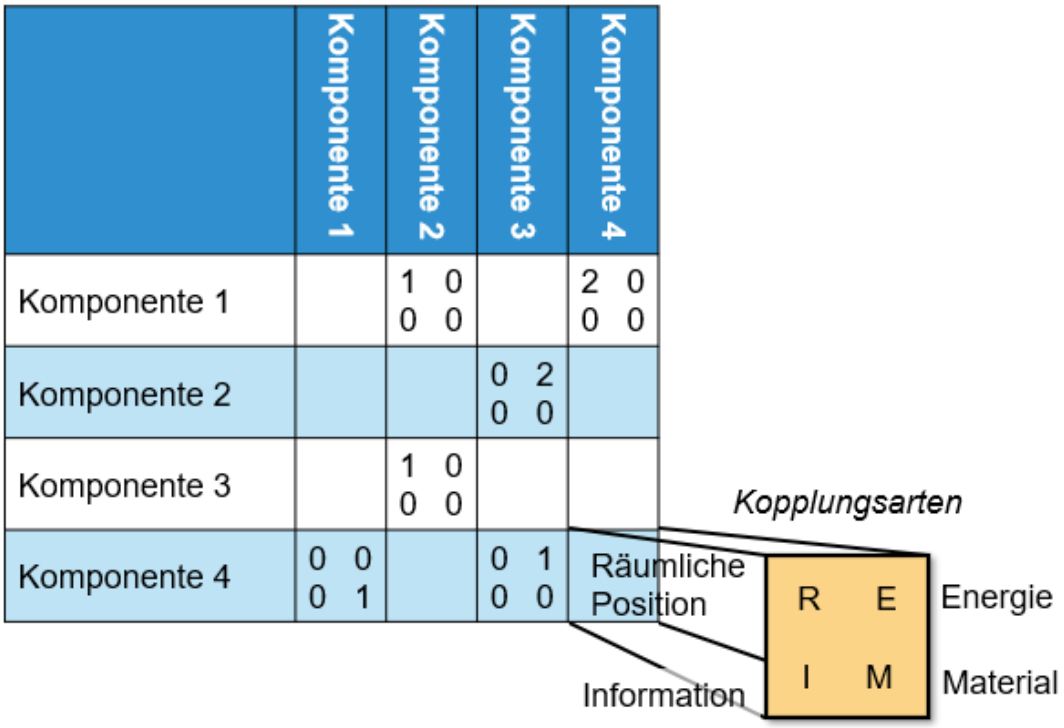


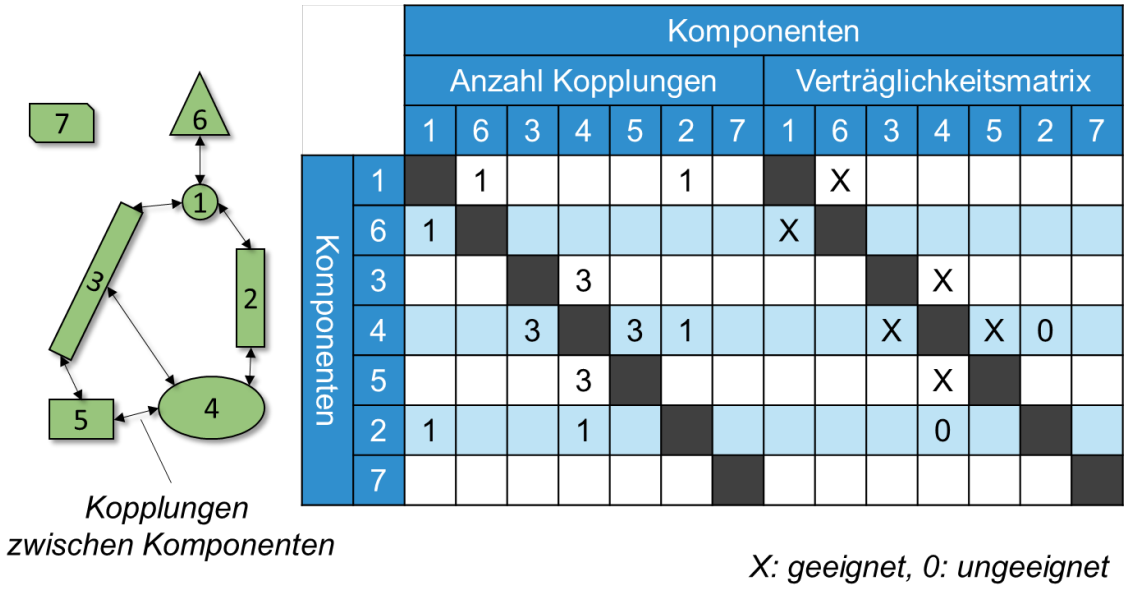
Abbildung 16: Anwendung der Integration Analysis Methodology [PE94]

Development of Modular Products

Ähnlich wie die Integration Analysis Methodology basiert die Development of Modular Products auf der DSM [HK98]. Dabei wird zusätzlich eine Darstellung von Komponenten und deren Verbindungen bzw. Kopplungen als Kopplungsgraphen verwendet. Diese werden in korrespondierenden Adjazenzmatrizen eingetragen. Das ermöglicht die Clusterung bzw. Modularisierung durch die Anwendung von Algorithmen mithilfe von Computern zu unterstützen. Dabei werden die Verbindungen bzw. die Kopplungen zwischen den Komponenten gewichtet. Je häufiger Kopplungen in Produktvarianten verwendet werden, desto höher werden sie gewichtet.

In der Abbildung 17 links wird ein Produktkonzept mit Komponenten und deren Verbindungen als Kopplungsgraph dargestellt. Die Kopplungen zwischen den Komponenten werden in einer Matrix zur Darstellung der Kopplungen eingetragen. Es wird hierbei gezählt, wie häufig sie in Produktvarianten verwendet werden (Abbildung 17 Mitte). Unerwünschte Kopplungen zwischen Komponenten des Produktes werden zunächst in der Verträglichkeitsmatrix aufgenommen (Abbildung 17 rechts). Daraus ergeben sich verschieden geclusterte Matrizen. Diese Matrizen zeigen die möglichen Modulkonzepte auf.

Das Verfahren ist für Modularisierungsaufgaben mit kleinem bis mittleren Umfang geeignet. Weitere Methoden, wie der Integration Analysis Methodology nach Pimmler und Eppinger [PE94] verfolgen alle das Verfahren der technischen Modularisierung mit Hilfe von Matrizen.



Komponenten	Anzahl Kopplungen 1	6	3	4	5	2	7	Verträglichkeitsmatrix 1	6	3	4	5	2	7
1		1				1			X					
6	1							X						
3				3							X			
4			3		3	1				X		X	0	
5				3							X			
2	1			1							0			
7														

Abbildung 17: Anwendung der DSM [HK98]

Design for Variety nach Martin/Ishii [Mar00]

Der Ansatz zur variantengerechten Produktgestaltung [MI02] wird verwendet, um die technischen Kopplungen zwischen den Komponenten und die geplanten Konfigurationen abzuschätzen. Daraus ergibt sich eine langfristig stabile Plattform. Für die Produktgestaltung stehen der Aufbau und die Struktur der Produkte im Fokus. Die Methode basiert hierbei im Wesentlichen auf zwei Schritte. Zuerst wird mittels Generational Variety Index (GVI) bestimmt, wie wahrscheinlich eine Änderung an einer Komponente ist. Im zweiten Schritt werden die Schnittstellen zwischen allen Komponenten mit Hilfe eines Coupling Index (CI) berechnet. Die Bewertung der Komponenten finden anschließend mit Hilfe der beiden Kennzahlen GVI und CI statt. Aus dieser Bewertung werden anschließend entsprechende Maßnahmen abgeleitet, die zur Standardisierung und Modularisierung von den Produkten dienen. Diese Maßnahmen bilden dabei im Wesentlichen eine Neugestaltung der Komponenten und eine Veränderung in den Beziehungen zwischen Funktionen und Komponenten.

Diese Methode fokussiert sich auf die Entwicklung einer stabilen Produktplattform. Konfigurationsmöglichkeiten von Produkten werden vorab mit Hilfe der Indizes Generational Variety Index (GVI) und Coupling Index (CI) berücksichtigt.

3.1.3 Modularisierungsmethoden mit organisatorischer und prozessualer Perspektive

Mit den Modularisierungsmethoden mit organisatorischer und prozessualer Perspektive werden solche Module gebildet, die die Prozesse in der Produktentstehung und -nutzung deutlich vereinfachen [KGP12]. Diese Methoden werden häufig für übersichtliche Strukturen umfangreicher und komplizierter Produktfamilien verwendet [KGP12]. Die daraus ergebenden Module sind in der Lage, mit den Organisationseinheiten und Ressourcen aller Produktlebensphasen zu interagieren. Daher ist es wichtig, beim Einsatz dieser Methoden die Interaktionen zwischen den Modulen und den jeweiligen Ressourcen und Organisationseinheiten in den Lebensphasen [Eri98, RK13, Ble11] besonders zu beachten. Damit können die Ressourcenbelastung und die Aufwände zur Produktstrukturierung reduziert werden [AHC15].

VDI 2221

Die VDI-Richtlinie 2221 zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme stellt eine allgemeine Vorgehensweise zur Entwicklung technischer Systeme dar. Bezogen auf die Erstellung modularer Produkte wird im Anschluss an die Anforderungsfestlegung die Funktionsstruktur ermittelt, worauf aufbauend Prinziplösungen für die Funktionen gefunden und anschließend in eine Baustruktur überführt werden. Somit werden anschließend realisierbare Module herausgearbeitet. Dadurch werden die zuvor entwickelten Prinziplösungen in Module aufzuteilen. Das Ziel ist, den Schwerpunkt der Konstruktionsaufgaben auszuarbeiten und gleichzeitig die nachfolgenden Entwicklungsaufgaben effizient aufzuteilen. Dafür gibt es verschiedene Kriterien bzw. Gesichtspunkte zur Aufteilung der Module. Zum Beispiel kann das Produkt bezogen auf die Produktlebensphasen in Montagemodule zur montagegerechten Produktgestaltung, Wartungsmodule für einen instandhaltungsgerechten Produktaufbau, Recycling-Module sowie Basis- und Variationsmodule zusammengesetzt werden [ARB+16]. Zusätzlich können weitere Methoden angewendet werden, wie Morphologie, Konstruktionsrichtlinien, Kreativitätstechniken. Dabei ist es zu erkennen, dass die VDI-Richtlinie 2221 die wesentliche Bedeutung der Modularisierung für die Produktentwicklung dargestellt hat. Allerdings fehlt bei der Richtlinie eine spezifisch an die Modularisierung ausgerichtete methodische Vorgehensweise.

Methoden zur Systembildung

Es gibt noch weitere Modularisierungsmethoden mit organisatorischer und prozessualer Perspektive, wie zum Beispiel die methodische Unterstützung der Systembildung nach Göpfert [Göp98]. Diese berücksichtigt gleichzeitig die Produkt- und Organisationsstruktur und zielt sich auf eine gemeinsame Modularisierung der Produktstruktur und Organisationsstruktur [Göp98]. Bei der technischen Modularisierung geht es hierbei um die Entwicklung funktional und physisch unabhängiger Module. Physische Unabhängigkeit bezieht sich auf die Gestaltung von leicht trennbaren Schnittstellen. Mit der technischen Modularisierung sollen anschließend aus den Modulen neue Produkte nach dem Baukas-

tensystem abgeleitet werden. Dadurch können Produktvarianten mit einem geringen Aufwand generiert werden, sofern sie sich in der Funktionalität unterscheiden. Die organisatorische Modularisierung zielt darauf ab, abgeschlossene Aufgabenumfänge zu schaffen. Dadurch können die Aufgaben weitestgehend unabhängig bearbeitet werden. Die technische und organisatorische Modularisierung beeinflussen sich gegenseitig, da jedes technische Modul einen Koordinationsaufwand zwischen verantwortlichen Organisationseinheiten verursacht. Die modulare Produktstruktur, die die Organisationsstruktur widerspiegelt, verringert diesen Aufwand. Die Abbildung 18 stellt die Produktarchitektur mit Organisationseinheiten dar.

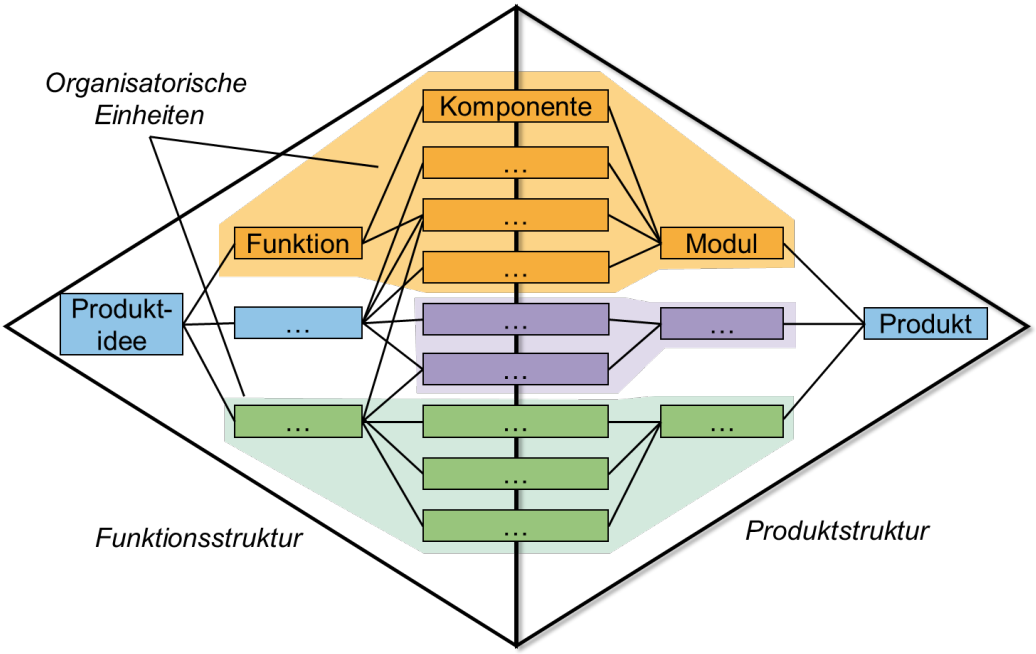


Abbildung 18: Produktarchitektur mit Organisationseinheiten [Göp98]

Im Folgenden wird die Vorgehensweise dieser Methode [Göp98] aufgelistet:

- **Definition der Prämissen** – Anforderungen, vorgegebene Schnittstellen und Baugruppen werden ermittelt und die involvierten Organisationen werden untersucht.
- **Bildung technischer Gestaltungsalternativen** – die aus Funktions- und Baustruktur bestehenden Produktarchitekturen werden entwickelt.
- **Bewertung und Auswahl einer Gestaltungsalternative** – mit Hilfe der Nutzwertanalyse wird eine Alternative ausgewählt.
- **Bildung organisatorischer Gestaltungsalternativen** – Organisationsstrukturen werden nach verschiedenen Produktarchitekturen nach Tätigkeitsumfängen ausgearbeitet.
- **Bewertung und Auswahl Gesamtlösung** – mit Hilfe der Nutzwertanalyse wird die Gesamtlösung auf Basis technischer und organisatorischer Bewertungskriterien ausgewählt.

Dabei werden die Schritte iterativ durchgeführt, um eine sukzessive Entwicklung von Produkt- und Organisationsstrukturen zu gewährleisten. Dadurch können funktional und physisch autonome Module generiert werden, mit denen der interne organisatorische Aufwand reduziert werden kann. Das spiegelt das Ziel dieser Methode wider, dass durch die Entwicklung der funktional und physisch möglichst unabhängigen Module die interne Produktvielfalt und die organisatorische Komplexität reduziert wird. Im Vergleich zu der allgemein VDI-Richtlinie 2221 wird der Fokus dieser Methode auf die gemeinsame Modularisierung nach der Funktions- und der Organisationsstruktur gelegt.

3.1.4 Produktstrategische und integrative Modularisierungsmethoden

Methoden der Modularisierung ermöglichen, Produktstrukturen auf Basis der mittel- und langfristigen strategischen Planung eines Unternehmens zu entwickeln. Dadurch sollen zum Beispiel zukünftig avisierte Technologien deutlich einfacher in bestehende Produktfamilien integriert werden können. Ein technologischer Wechsel kann dann zum Beispiel durch den Austausch des betroffenen Moduls erfolgen. Integrative Modularisierungsmethoden legen den Fokus auf die Integration der vielfältigen Modulwünsche unter Berücksichtigung aller Produktlebensphasen.

Modular Function Deployment (MFD)

Modular Function Deployment (MFD) [Eri98] ist ein durchgängiger Ansatz zur Bildung modularer Produkte. Die Vorgehensweise der MFD ähnelt dem Vorgehen zum Modularisieren von [PBF+13]. Jedoch fokussiert sich die MFD auf die Modularisierung mit systematisch produktstrategischen Aspekten. Der erste Schritt zur Anwendung von MFD ist die Klärung von Kundenanforderungen. Dazu wird ein angepasstes Quality Function Deployment (QFD) angewendet. Im nächsten Schritt werden die Funktionen eines Produktes definiert und für diese Funktionen technische Lösungen ausgewählt. Anschließend wird die Module Indication Matrix (MIM) angewendet. Die MIM dient zur Bewertung der technischen Umsetzung aller Teilfunktionen. Diese Bewertung findet unter Berücksichtigung bestimmter Kriterien (Modultreiber) statt. Die Definition der Modultreiber ist dabei von dem Unternehmen und dem zu entwickelnden Produkt abhängig. Anhand der Bewertung der MIM können anschließend Komponenten mit hohen Gemeinsamkeiten identifiziert werden, die sich als potenzielle Module eignen. Komponenten mit hohen Gemeinsamkeiten werden anschließend zusammengefasst und daraus die Module gebildet. Diese Module werden dann konstruiert und ausgestaltet. Bei den Modultreibern lassen sich produktstrategische Einflüsse abbilden.

Für die Festlegung der Modultreiber werden Unternehmensstudien, die mit Hilfe von Fragebögen erstellt wurden, herangezogen. Dadurch im Vergleich zu anderen Modularisierungsmethoden mit technisch-funktionaler Perspektive im Wesentlichen die Ziele aus allen Produktlebensphasen berücksichtigt. Die MFD bildet somit eine Methode, bei der die produktstrategische Sicht berücksichtigt wird. Allerdings ist die Bewertung der Teilfunk-

tionen zur Modulbildung auf Basis der Modultreiber in MFD subjektiv und liegt auf einem hohen Abstraktionslevel. Darüber hinaus werden in diesem Fall technisch-funktionale Kopplungen nicht berücksichtigt.

Structural Complexity Management

Das Structural Complexity Management (SCM) nach Lindemann [LMB09] verwendet Kopplungsmatrizen zur Analyse der technischen Verbindungen zwischen den Komponenten eines Produktes. Gleichzeitig ist das SCM in der Lage, bei der Analyse der Beziehungen zwischen den Komponenten eines Produktes verschiedene Domänen zu berücksichtigen. Dies Domäne decken einen sehr breiten Umfang, wie zum Beispiel Funktionen, Personen, Organisationen, Dokumente und Produktionsbedingungen ab. Daher müssen zuerst für die Modularisierung die Systemgrenzen und die wesentlichen Domänen definiert werden. Dabei werden die Domänen, wie zum Beispiel kundenrelevante Produkteigenschaften, nach den ausgewählten Komponenten und den entsprechenden Zielsetzungen des Projekts definiert. Dann werden die Strukturen des Produktes in einer gewichteten Matrix dargestellt. Dabei ist zu beachten, dass indirekte Beziehungen zwischen den Komponenten ebenfalls berücksichtigt werden. Indirekte Beziehungen bedeuten, dass zwischen zwei Komponenten eine Beziehung über eine dritte Komponente entsteht. Danach wird eine Clusteranalyse mit Hilfe einer DSM für die Modulbildung durchgeführt. Daraus ergeben sich die Ergebnisse der Modularisierung. Konfliktäre geometrischen Abhängigkeiten in diesen Ergebnissen werden zum Schluss untersucht und optimiert.

Das SCM berücksichtigt die Beziehungen zwischen den Produktkomponenten und gleichzeitig den Elementen aus anderen Domänen. Da die Domänen sehr umfangreich sein können, zum Beispiel Funktionen, Personen, Dokumente, Testaufwände, usw. umfassen können, ermöglicht das SCM eine sehr breite Anwendbarkeit. Zudem ist es möglich bei dieser Methode eine rechnergestützte Analyse einzusetzen. Das vereinfacht die Informationsaufnahme und Datenanalyse bei komplizierten Systemen. Allerdings besteht dabei die Gefahr, bei der Datenaufnahme Fehler nicht zu erkennen und die Modularisierungsergebnisse sind schwer nachzuvollziehen. Darüber hinaus fehlen bei dieser Methode produktstrategische Aspekte, die nicht in der Matrix integriert werden können.

3.2 Leichtbau

Der Leichtbau strebt nach einem möglichst geringen Gewicht des technischen Produktes. Bei der Erreichung eines möglichst geringen Gewichts dürfen in der Regel die Leichtbauteile nicht „unsicherer“ als vergleichbare Massivbauteile werden. Das fordert eine sehr genaue Auslegung bezogen auf die Steifigkeit, Bruchfestigkeit sowie Zuverlässigkeit und Nutzungsdauer [Kle09]. Dies ist in der Regel ein stark iteratives Optimierungsverfahren, bei denen Konstruktionen entwickelt, anschließend analysiert und getestet werden. Daher benötigt die Entwicklung von Leichtbauprodukten eine systematische Vorgehensweise, die nicht produktbezogen ist, sondern allgemeingültig ist. Da die Leichtbauprodukte nicht anders als andere technische Produkte sind, bedarf in diesem

Sinne der Leichtbau auch keine besondere Konstruktionslehre, sondern nur eine modifizierte Vorgehensweise, die die Leichtbautechnologien berücksichtigt [Fey90, Kle09]. Im Folgenden wird zuerst eine allgemeine Entwicklungsvorgehensweise von Klein [Kle09], die nach den leichtbaubezogenen Randbedingungen modifiziert ist, ausführlich vorgestellt. Weitere leichtbaubezogene Methoden, die für den Anwendungsbereich spezialisiert angepasst sind, werden anschließend beschrieben.

3.2.1 Entwicklungsmethode zum Leichtbau nach Klein [Kle09]

Die Entwicklung von Leichtbauprodukten ist von einem iterativen, mehrstufigen Prozess geprägt [Jor86]. Zur Reduzierung unnötiger Iterationsschleifen, ist es hilfreich, Erfahrungen frühzeitig in die Entwicklung einzubringen. Klein umfasst acht Hauptregeln für die leichtbaugerechte Konstruktion [Kle09], die in Tabelle 1 dargestellt sind.

Darauf basierend hat Klein eine grundlegende Vorgehensweise für die Entwicklung von Leichtbauprodukten ausgearbeitet, in der die acht Regeln systematisch einbezogen werden. Wie alle andere Entwicklungsaufgaben handelt es sich auch bei der Leichtbauentwicklung im Wesentlichen um eine Funktionserfüllung. Eine Hauptzielsetzung ist beim Leichtbau das Erreichen eines Gewichtsminimums, das durch weitere Randbedingungen wie zum Beispiel Sicherheit und Zuverlässigkeit, Herstellbarkeit, Montierbarkeit, usw. eingeschränkt wird. Das heißt, dass eine isolierte Aufgabe zur Gewichtsminimierung nicht existiert. Die Produktentwicklung gestaltet sich für den Leichtbau nicht grundlegend anders als für andere Produkte. Daher schlägt Klein vor, die allgemeine Vorgehensweise für die Entwicklung von Leichtbauprodukten anzuwenden und diese nur auf die Besonderheiten des Leichtbaus anzupassen (siehe Abschnitt 3.1.3). Er erweitert die Vorgehensweise nach der VDI-Richtlinie 2221 um Leichtbauaspekte. Dabei werden die Schritte der Prototypen-Fertigung, der Erprobung sowie zusätzlichen Einflüsse und besonderen Anforderungen an die Leichtbauproduktentwicklung aufgenommen. Die Vorgehensweise ist dabei in der nachfolgenden Abbildung 19 dargestellt.

Erste wesentliche Schritte sind Abgrenzung und Festlegung der Produktziele und des Gewichtsziels des Leichtbauprojekts. So können die Randbedingungen festgelegt und Anforderungen zum Beispiel von auftretenden Lasten bestimmt werden. Für eine Funktionsstruktur, die das Produktziel erfüllt, können unterschiedliche Lösungen und Lösungskombinationen gesucht werden. Unter Leichtbauaspekten werden Werkstofffamilien und mögliche Fertigungsverfahren zur Umsetzung einer favorisierten Wirkstruktur oder eines Wirkprinzips festgelegt. Mit diesen Informationen werden innerhalb der Vordimensionierung der Konzepte räumliche Kraftpfade gesucht, deren Umsetzung in Gestalt und Material sich möglichst gewichtsoptimal ins Gesamtsystem einfügen.

Tabelle 1: Regeln für leichtbaugerechtes Konstruieren nach [Kle09]

Nr.	Regel
1	*Kraftausgleich und direkte Krafteinleitung:* Einleitung der Kräfte in die Hauptträgerstruktur. Umleitungen und Umlenkungen führen zur Überdimensionierung und der Erhöhung des Eigengewichts
2	*Realisierung möglichst größter Widerstands- bzw. Flächenträgheitsmomente:* Umsetzung großer Flächenträgheitsmomente bei möglichst kleiner Fläche für biege-, torsions- und knickgefährdete Bauteile
3	*Feingliederung von Strukturen:* Versteifung von Flächentragwerken bei kleiner Querschnittsfläche durch eine aufgelockerte Bauweise
4	*Nutzung von natürlicher Stützwirkung durch Krümmung:* Biege-, Knick- und Beul-Steifigkeit von geraden Scheiben und Platten kann durch Vorkrümmung um ein Vielfaches erhöht werden
5	*Gezielte Versteifung von Konstruktionen in den Hauptbelastungsrichtungen:* Einbringen von Ortho- und Anisotropie kann die Steifigkeit eines Bauteils in bestimmten Vorzugsrichtungen anheben
6	*Bevorzugen des integrativen Prinzips:* Verwenden von so wenigen Einzelteilen wie möglich- Der hohe Integrationsgrad führt jedoch zu zusätzlichem Integrationsaufwand, zu Montageproblemen und zur Einsatzeinschränkung in der Praxis
7	*Einbringen von Hohlräumen:* Einbringen von „Erleichterungslöchern“ in gering belastete Zonen zur Reduzierung des Eigengewichts bei gleicher Steifigkeit
8	*Absolute Ausnutzung einer Konstruktion:* In Frage stellen überzogener Sicherheitsbegriffe unter Voraussetzung der Kenntnis über exakte Kräfte, Materialverhalten, genauer Berechnungsmethoden und optimierter Geometrien

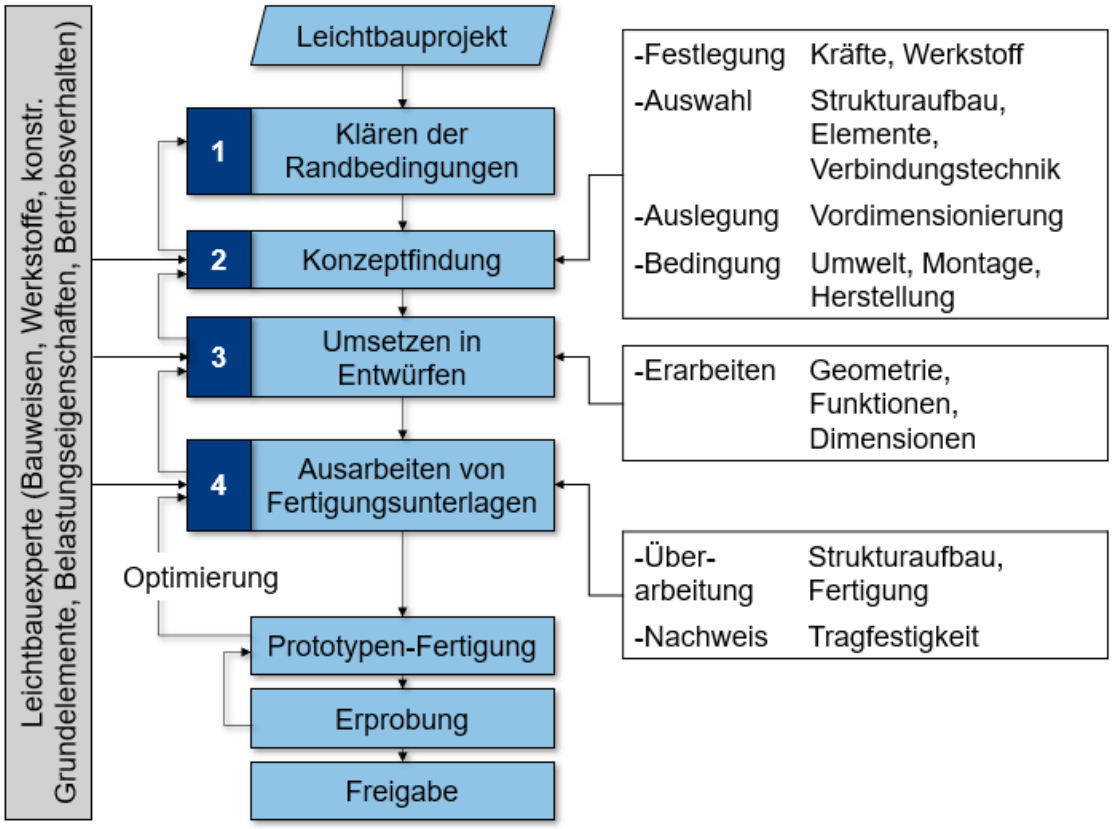


Abbildung 19: Leichtbaugerechte systematische Vorgehensweise nach Klein [Kle09]

Nach Bewertung und Auswahl der Konzepte werden in Entwürfen die Geometrie, die Funktionen und die Dimensionen genauer festgelegt. Prototypen können nach der Ausarbeitung von Fertigungsunterlagen gefertigt, erprobt und optimiert werden. Hier ist für den Leichtbau zusätzlicher Aufwand notwendig, um sich zugunsten der Gewichtsminimierung an die Grenzen der Materialfestigkeit heranzutasten und Sicherheitsfaktoren zu minimieren. Nach erfolgreicher Erprobung und Konformität kann eine Freigabe erfolgen. Die einzelnen Arbeitsschritte nach Klein finden sich auch bei anderen allgemeinen Entwicklungsvorgehensweisen, wie zum Beispiel der VDI-Richtlinie 2221. Im Vergleich zu der VDI-Richtlinie 2221 bringt Klein jedoch spezielles Leichtbauwissen in die einzelnen Arbeitsschritte ein. Neben Klein haben z.B. auch Feyerabend [Fey91] und Posner [Pos16] auch generelle Entwicklungsmethoden zur Anwendung auf Leichtbauprodukte modifiziert.

3.2.2 Andere Entwicklungsmethoden zum Leichtbau

Darüber hinaus existieren zahlreiche weitere Methoden zur Entwicklung von Leichtbauprodukten. Zum Beispiel schlagen Vielhaber und Luedeke vor, die VDI 2206 [VDI2206] anzupassen, um mechatronische Produkte unter Leichtbauaspekten zu entwickeln. Sie bringen dabei die Eigenheiten von Leichtbauprodukten zum Ausdruck und wie diese entwicklungsmethodisch berücksichtigt werden können [LV12a, LV12b].

Andere propagieren die Verwendung von allgemeinen Vorgehensmodellen und die Fokussierung auf bestimmte Werkzeuge, um Leichtbau im Entwicklungsprozess möglichst effektiv umzusetzen. Schmidt und Puri [SP01] haben zum Beispiel die Konzeptphase des Produktentwicklungsprozesses hinsichtlich der Berücksichtigung von Leichtbauaspekten analysiert. Dabei ist ihre Erkenntnis, dass eine allgemeine Vorgehensweise zur Entwicklung von Leichtbauprodukten nicht sinnvoll sei. Leichtbau stelle nur eine spezielle Herausforderung dar und bedarf somit nicht einer speziellen Herangehensweise [Sch03].

Ponn und Lindemann [PL11] schlagen ebenso wie Schmidt und Puri vor, bei der Entwicklung von Leichtbauprodukten die allgemeinen Produktentwicklungsmethoden zu verwenden. In ihrer Analyse wurden die einzelnen Schritte eines Leichtbauentwicklungsprozesses genauer untersucht und verschiedene Methoden für die einzelnen Phasen vorgeschlagen. Zum Beispiel kann zur Analyse des Produktgewichts eine Funktionsgewichtsanalyse verwendet werden. Eine weitere Empfehlung ist, Leichtbau bereits auf Anforderungs-, Wirk-, Funktions- und Gestaltebene zu berücksichtigen. Beispielsweise sollen auf Funktionsebene mit Hilfe der Funktionsgewichtsanalyse die Funktionen, aus den die größten Massen resultiert werden, identifiziert werden. Auf der Wirkebene kann bereits eine Bewertung der unterschiedlichen Wirkprinzipien nach ihrer Auswirkung auf das Produktgewicht untersucht werden. Auf Gestaltebene sollen Gestaltungsprinzipien des Leichtbaus angewendet werden, Leichtbau-Fertigungsverfahren berücksichtigt werden, Leichtbauwerkstoffe eingesetzt werden und computergestützte Berechnungs- und Simulationswerkzeuge angewendet werden. [PL11]

Ähnlich wie Pahl et al. [PBF+13] unterteilen Ellenrieder et al. [EGG+13] den Leichtbau hinsichtlich der Aspekte strategisch, taktisch und operativ. Der strategische Leichtbau dient der Zieldefinition. Der taktische Leichtbau dient der Berücksichtigung von Leichtbau bei der Planung. Der operative Leichtbau dient der Umsetzung von Leichtbau in der Gestaltung des Produkts. Sie betrachten hierbei ausschließlich die Automobilindustrie als Anwendungsfeld des Leichtbaus. Als Ergebnis präsentieren Ellenrieder et al. [EGG+13] eine Vorgehensweise, die ebenfalls auf einer allgemeinen Vorgehensweise basiert, als Leitfaden zur Umsetzung von Leichtbauprojekten.

Die Forschungsergebnisse zeigen, dass für die Leichtbauentwicklung allgemeine Entwicklungsmethoden geeignet sind. Die allgemeinen Entwicklungsmethoden wurden für verschiedene leichtbaubezogene Anwendungsbereiche und Projekte modifiziert. Dafür wurden entsprechende Werkzeuge zur effektiven Entwicklung des Leichtbaus entwickelt. Im Rahmen der Leichtbauentwicklung verursacht die hohe Anforderung an das Gewichtsminimum mit weiteren Nebenbedingungen, wie zum Beispiel der Herstellbarkeit und der Zuverlässigkeit, den wesentlichen Aufwand und verstärkt den iterativen Charakter des Entwicklungsprozesses. Insbesondere die Gestaltungsfreiheiten bei der Wahl der Komponenten macht dadurch häufige iterative Erprobungen notwendig. Es liegt somit ein großes Potenzial darin, die Auswahl der Produktstruktur zu optimieren.

3.3 Modulleichtbau

In der Regel ist eine kombinierte Herangehensweise aus der Modularisierung und dem Leichtbau erforderlich, um die Randbedingungen zu erfüllen und gleichzeitig Leichtbauprodukte wirtschaftlich erstellen zu können. Mit der Modularisierung sind jedoch zahlreiche Aspekte (zum Beispiel zusätzliche Schnittstellen, Überdimensionierung – siehe Abschnitt 2.2) verbunden, die einem konsequenten Leichtbau gegenüberstehen. Es müssen somit zusätzliche Kompromisse in den Konstruktionsentscheidungen gemacht werden. Nachfolgend werden drei Arbeiten vorgestellt, die sich der Kombination aus den beiden Bauweisen bzw. dem Modulleichtbau gewidmet haben.

3.3.1 Entwicklungsmethode zum Modulleichtbau nach Gumpinger

Gumpinger [Gum15] bietet ein methodisches Vorgehensschema zum Modulleichtbau. Diese Methode fokussiert sich auf bereits existierenden modularen Produktfamilien. Diese Methode zielt auf die Gewichtsoptimierung bei möglichst gleichem Modularisierungsgrad ab. Im Vergleich zu einem Vorgehen ohne methodische Unterstützung zur Gewichtsreduktion soll dies mit der Methode von Gumpinger effizienter erfolgen. Damit können die durch die Modularisierung gewonnenen Vorteile den Aufwand für den Leichtbau überkompensieren. Eine durchgängige Methode zur Gewichtsoptimierung für modulare Produktfamilien wird damit unterstützt. Im Folgenden wird diese Methode vorgestellt. Die generelle Vorgehensweise wird dabei in vier Phasen unterteilt, durch die iterativ die Produktfamilie erstellt werden soll. Die Phasen sind in der nachfolgenden Abbildung dargestellt.

In den Eingangsinformationen stehen unter anderem die Informationen von der modularen Produktstruktur zur Verfügung, die bereits durch die vorhergehende Modularisierung festgelegt wurde. Diese Informationen sind zum Beispiel die Konfiguration, die Schnittstellen oder auch Verkaufszahlen. Die Module wurden nach den Grundlagen des Leichtbaus konstruiert und weisen damit bereits einen gewissen Leichtbaugrad auf.

Zuerst wird in der Phase „Systemmodell erstellen“ die Grundlage für die folgenden Optimierungsschritte gebildet. Dabei werden die Informationen der Produktfamilie, die Randbedingungen und die Ziele wie Lastfälle und Zielmasse hinterlegt. Das Systemmodell hilft den Entwicklern bei der Systemanalyse. Damit werden die Leichtbaumaßnahmen bei der Planung, Bewertung und Durchführung unterstützt. Die Betrachtungsebenen sind Modulebene, Variantenebene und Produktfamilienebene. Durch diese Betrachtung wird die Gesamtheit des variantenübergreifenden Modulleichtbaus gewährleistet.

Anschließend wird die „Modulaufteilung und Schnittstellen“ überarbeitet. Dabei werden die aus Leichtbausicht unnötigen Schnittstellen identifiziert. Diese Schnittstellen werden unter Berücksichtigung der entsprechenden Kriterien der Modularisierung versucht einzusparen. Für die restlichen Schnittstellen, die zur Verbindung zwischen den Modulen

sind, werden die Schnittkräfte ermittelt. Diese Schnittstellen werden nach einer variantenübergreifenden Analyse dimensioniert.

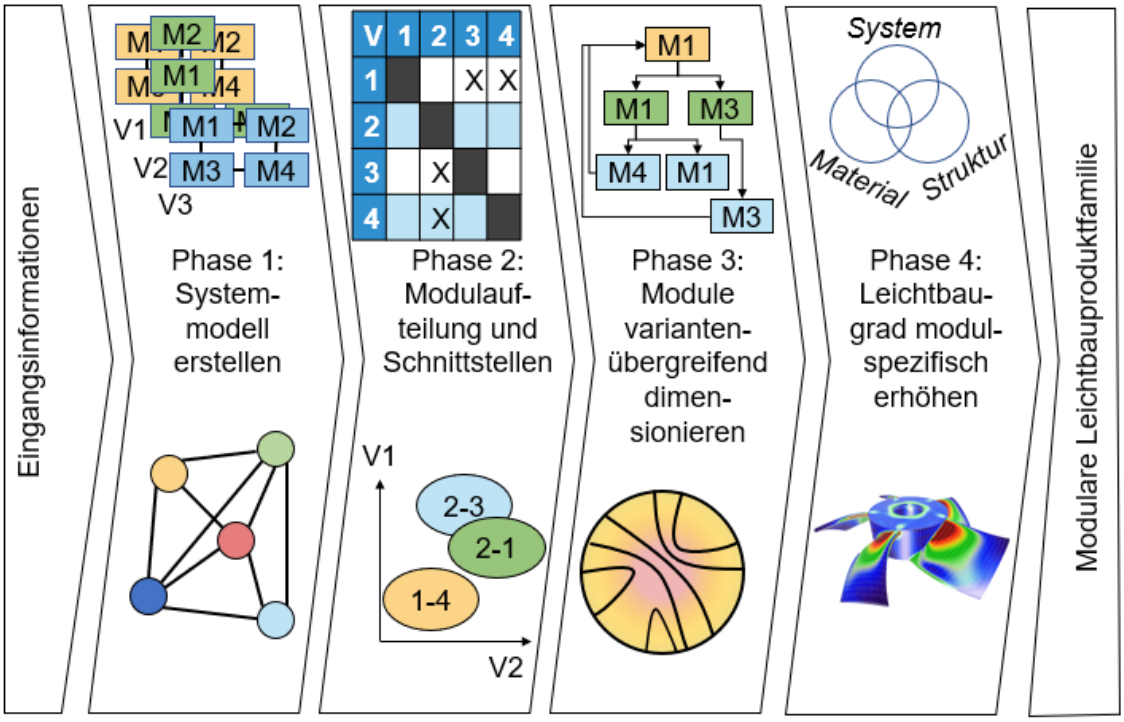


Abbildung 20: Modulleichtbau nach [Gum15]

In Phase drei werden die „Module variantenübergreifend dimensioniert“. Da die Module sich gegenseitig beeinflussen, werden für eine optimale Anpassung die variantenübergreifenden Kopplungen benötigt. Die Dimensionierung der Module wird mit verschiedenen Lastsituationen abgestimmt. Dabei soll der Leichtbaugrad der Module nicht verändert werden. Das heißt, dass auf die Reduktion der Lastanforderung an ein Modul eine Reduktion der Modulmasse folgt. Dadurch wird der Leichtbaugrad der gesamten modularen Produktfamilie erhöht.

Wenn die Anforderung an die Massenreduktion der gesamten Produktfamilie trotzdem nicht erfüllt werden kann, wird der Leichtbaugrad der einzelnen Module erhöht. Dabei legt der Fokus im Wesentlichen auf die gewichtssensitiven Module in der Produktfamilie, um den daraus ergebenden Aufwand zu verringern. Eine Sensitivitätsanalyse wird zur Identifizierung der gewichtssensitiven Module durchgeführt. Hierbei werden Maßnahmen zur Gewichtsreduktion abgeleitet.

Der Fokus der von Gumpinger [Gum15] entwickelten Methode liegt auf der Gewichtsminimierung unter Beibehaltung des Modularisierungsgrads einer modularen Produktfamilie. Basierend auf der Methode Design Structure Matrix (DSM) werden die Module und Schnittstellen analysiert, um unnötige Module und Schnittstellen zu entfernen bzw. zu kombinieren. Anschließend wird das Gewicht von Modulen und Schnittstellen varian-

tenübergreifend angepasst bzw. reduziert. Wird das Gewichtziel immer noch nicht erreicht, folgt eine modulspezifische Erhöhung des Leichtbaugrads. Dabei wird die Gewichtsoptimierung nur von der technischen Perspektive betrachtet. Der Aufwand zur Gewichtsoptimierung wird zwar verringert, aber der Ablauf der Gewichtsoptimierung entspricht immer dem von Leichtbau geprägten iterativen Herantasten. Jede Folgeiteration führt zu einer Aufwandssteigerung der Gewichtsreduktion. Gleichzeitig bleibt der stark iterative Charakter der Methode enthalten, dass für ein gutes Ergebnis sehr viele Optimierungsschleifen durchlaufen werden müssen. Je mehr Iterationen durchlaufen wurden, desto mehr Einschränkungen auf die Maßnahmen zur Gewichtsreduktion gibt es. Diese Methode zum Modulleichtbau von Gumpinger ist zudem nur für bestehende Produktfamilien anwendbar. Diese Aspekte hinsichtlich einer methodischen Verbesserung wurden als Kriterien in die Abgrenzungsmatrix in Abschnitt 3.4 mit aufgenommen.

3.3.2 Entwicklungsmethode zum Modulleichtbau nach Plaumann

Plaumann [Pla15] hat eine Methode zur Entwicklung von varianten Leichtbaustrukturen unter dynamischen Lasten konzipiert. Diese Methode bringt die Themenbereiche der Strukturdynamik, der modularen Produktstrukturierung und der Leichtbauauslegung unter stationären dynamischen Lasten zusammen. Sie führt die Anwendung von Strukturdynamik auf Modularisierung ein, um eine Leichtbau-Auslegung unter stationären dynamischen Lasten zu ermöglichen. Das Hauptproblem ist hierbei, dass aufgrund der Strukturauswahl eine Vielzahl an Optionen besteht, aber die Ermittlung der Auswirkungen aufgrund des Lastverhaltens sehr komplex ist. Gerade im Flugzeugbau erfordert die Auslegung für stationäre dynamische Lasten die Untersuchung zahlreicher Lastfälle. Eine vollständige und detaillierte dynamische Analyse ist hierfür notwendig. Daher hat Plaumann das methodische Vorgehen zur Unterstützung der Schwingungsauslegung für variantenreiche Leichtbaustrukturen entwickelt. Zur Reduzierung des Aufwands wird das Schwingverhalten der einzelnen Module auf das Schwingverhalten an den Modulschnittstellen und charakteristischen Punkten reduziert. Dafür wird eine rechnerische Modellsynthese durch Kombination der Module zu Produktvarianten mit einer Kopplung der Frequenzantwortfunktionen mit möglichst kurzer Rechenzeit für jede Variante erreicht [Pla15].

Dabei hat er diese Methode in einer praktischen Umsetzung der Schwingungsauslegung von variantem Kabineninterieur verwendet. Dafür wurden zahlreiche Versuchsreihen zur Bestimmung des Schwingverhaltens von sogenannten „Kabinenmonumenten“ und deren Substrukturen durchgeführt. Mit diesen Versuchsergebnissen wurde die Schwingungsauslegung des varianten Kabineninterieurs mit präzisen Simulationsmodellen unterstützt. Zudem wurden konkrete Empfehlungen aus der praktischen Umsetzung für die Anwendung von Leichtbaustrukturen in einer Schwingungsauslegung zusammengefasst. Modelle zur Beschreibung des Schwingverhaltens der Leichtbaumaterialien im Rahmen der praktischen Umsetzung wurden ebenso in dieser Arbeit dargestellt.

Die Methode von Plaumann nutzt eine modulare Produktstruktur, die mit dem PKT-Ansatz, der am Institut für Produktentwicklung und Konstruktionstechnik (PKT) der Technischen Universität Hamburg-Harburg (THUU) entwickelt wurde. Diese Methode ist spezialisiert für die Entwicklung modularen Leichtbauprodukten unter stationären dynamischen Lasten. Dafür werden präzise Berechnungsmodelle zur Erhöhung des Leichtbaugrads in einer gesamten Produktfamilie verwendet. Unnötige Überdimensionierungen, die aus Modellunsicherheiten und der nicht variantengerechten Auslegung resultieren, sollen dadurch reduziert werden. Zur weiteren Reduzierung des Aufwands werden nur ein Teil von Subsystemen statt der gesamten Produktfamilie modelliert, analysiert und untersucht. Diese Vereinfachung erfolgt, da die modulare Produktstruktur viele Produktvarianten durch Kombination weniger Module ermöglicht. Dadurch wird das Ziel vom Leichtbau mit möglichst geringem Aufwand auch für die gesamte Produktfamilie zur Gewichtsreduzierung unter stationären dynamischen Lasten erreicht. Die Methode läuft in drei Phasen ab (siehe Abbildung 21).

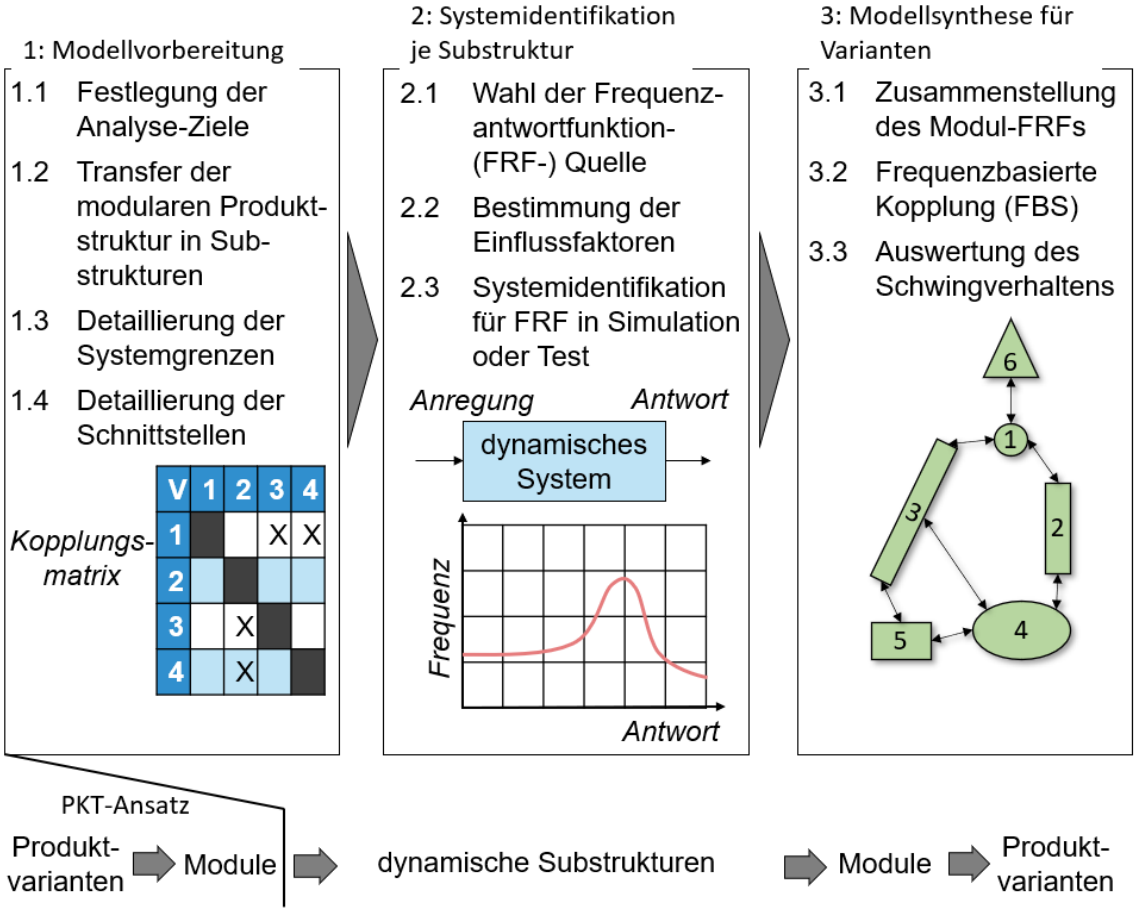


Abbildung 21: Modulleichtbau nach Plaumann [Pla15]

In der ersten Phase findet die „Modellvorbereitung“ statt. Zuerst werden die Analyseziele für die kommenden Untersuchungen des Schwingverhaltens der Produktvarianten einer Produktfamilie definiert. Dann erfolgt der „Transfer der Module in dynamischen Substrukturen“. Die zugrunde liegende modulare Produktstruktur wurde in diesem Schritt nur

auf einer Konzeptebene entwickelt und es stehen nicht genug Informationen für die Berechnung des Schwingverhaltens enthalten. Mit den dynamischen Substrukturen können weitere bestimmte Anforderungen an die Modularisierung abgeleitet werden. Zum Beispiel die Genauigkeit zur Auslegung der Zielgrößen an die Berechnung und Messtechnik. Diese Faktoren entscheiden unmittelbar über den zeitlichen und technischen Aufwand für die Auslegung. Die Genauigkeit der Auslegung und die technische Machbarkeit beeinflussen sich hierbei gegenseitig. Die dynamischen Substrukturen bilden auch die Grundlage für die weitere Detaillierung der Systemgrenzen und der Schnittstellen. Daraus ergeben sich die weitere Detaillierung mit den notwendigen Zusatzinformationen zur Berechnung der dynamischen Substrukturierung.

In der zweiten Phase findet die „Systemidentifikation je Substruktur“ statt. Zuerst wird ein Modell aus den Frequenzantwortfunktionen (FRF) der Substruktur aufgebaut. Die FRF vermeidet die sonst durch vereinfachte lineare Ersatzmodelle verursachten Fehlerquellen. Dann werden die relevanten Einflussfaktoren, wie zum Beispiel Material, Krafteinleitung und Anregungsniveau. Die folgenden Versuche und Teste der FRF in Simulationen erfolgen anhand dieser relevanten Einflussfaktoren. Dadurch können zahlreiche Versuchsläufe eingespart werden.

In der dritten Phase findet die „Modellsynthese für jede Variante“ statt. Dafür werden zuerst die benötigten Substrukturmodelle für jede Variante miteinander gekoppelt. Dadurch wird die modularen Produktstruktur abgebildet und das Schwingverhalten des Gesamtsystems berechnet. Dies wird für alle Varianten der Produktfamilie angewendet. Mit Hilfe der Berechnungsergebnisse können die Produktvariante mit Verbesserungspotenzialen identifiziert werden und anschließend ihre Geometrie optimiert oder ein anderes Material ausgewählt werden.

Die Methode von Plaumann fokussiert sich auf die Entwicklung von modularen Leichtbauprodukte unter stationären dynamischen Lasten. Dabei werden im Wesentlichen die FRF-Modelle zur Berechnung des Schwingverhaltens der Substrukturen verwendet. Dadurch werden die existierenden modularen Produktstrukturen leichtbaubezogen optimiert. Daher ist diese Methode ebenso wie die Methode von Gumpinger nur für existierende Produktstrukturen geeignet. Zudem ist die Methode von Plaumann keine durchgehende Entwicklungsmethode, die zum Beispiel bereits in der Konzeptphase zur Entwicklung von modularen Leichtbauprodukten anwendbar ist. Konfliktäre Anforderungen zwischen der modularen Bauweise und der Leichtbauweise werden hierbei ebenso nicht berücksichtigt.

3.4 Abgrenzung zum Stand der Forschung

Diese Arbeit zielt auf eine Reduzierung des Entwicklungsaufwands von modularen Leichtbauprodukten, wodurch der Entwicklungsvorgang beschleunigt wird. Dafür wird eine Methode entwickelt, die eine effiziente Entscheidungsfindung zur Auswahl der Produktstruktur unterstützt. Insbesondere soll hierbei die Abwägung zwischen der bereits

existierenden modularen Bauweise und der individuell auszulegenden Leichtbauweise vorgenommen werden. Bereits in Kapitel 2 wurde abgeleitet, dass diese Methode auf ein Frontloading der Konstruktionsentscheidungen basiert, um die Anforderungen und Restriktionen bereits in dem frühen Konstruktionsstadium berücksichtigen zu können. Dafür müssen mit einer ganzheitlichen Betrachtung die Anforderungen bzw. Restriktionen aus allen Produktlebensphasen vorab zusammengestellt werden.

Basierend auf diesen allgemeinen Anforderungen bzw. der Zielsetzung und den Forschungsfragen, die bereits im Kapitel 2 ausführlich beschrieben wurden, werden im Folgenden die konkreten Kriterien festgelegt, womit sich der eigene Beitrag von den existierenden Arbeiten abgrenzt. Im Vergleich zu den existierenden Arbeiten, die meistens nur ein Kriterium abdecken können, ist die in dieser Arbeit entwickelte Methode in der Lage, alle untenstehenden Kriterien zu umfassen.

Methode zur Entscheidungsfindung zwischen Modularisierung und Leichtbau

Das entspricht dem Ziel der in dieser Arbeit entwickelten Methode, eine Entscheidungsunterstützung zur Entwicklung modularer Leichtbauprodukte zur Verfügung zu stellen. Der Leichtbau muss effizient und abgestimmt mit der Modularisierung erfolgen. Dabei liegen die Entwicklungsentscheidungen zur Auswahl zwischen bereits bestehenden modularen Strukturen und individuell auszulegenden Leichtbaustrukturen in der Hauptbetrachtung dieser Arbeit. Dabei beinhalten die bereits bestehenden modularen Strukturen auch solche modulare Strukturen, die bereits für Leichtbau optimiert sind. Die Entscheidungen müssen unter Einbeziehung beider Bauweisen effizienter getroffen werden.

Quantifizierter Vergleich zwischen Modularisierung und Leichtbaumaßnahmen

Für eine optimale Entwicklung eines modularen Leichtbauproduktes sollen zunächst verschiedene Lösungsalternativen einer Komponente sowohl aus der modularen Bauweise als auch aus der Leichtbauweise verglichen werden. Dieser Vergleich soll mit Hilfe einer geeigneten Methode zugelassen werden. Es ist dabei essenziell quantifizierte Daten zur Bewertung von Lösungsalternativen heranzuziehen. Nur mit quantitativen Daten kann ermessen werden, inwieweit ein Konzept Vorteile gegenüber anderen Konzepten hat.

Zusammenfassung aller Anforderungen und Restriktionen

Das Kriterium entspricht der allgemeinen Anforderung an die ganzheitliche Betrachtung aller Produktlebensphasen (siehe Abschnitt 2.4), da die Restriktionen eigentlich aus den einzelnen Produktlebensphasen entstanden sind. Daraus ergibt sich ein Zielsystem aus den konfliktären Anforderungen. Durch das Aufstellen eines Zielsystems aus den konkurrierenden Anforderungen soll bereits in den frühen Phasen eine fundierte Entscheidungsbasis für die Auswahl der Produktstruktur und die unter Leichtbauaspekten zu optimierenden Bauteilen erstellt werden.

Anwendbar auf modulare Produktstrukturierung, Entwicklung des Leichtbaus, modulare Leichtbauproduktstrukturierung

Darüber hinaus werden die allgemeinen entwicklungsmethodischen Aspekte sowohl für den Leichtbau und die Modularisierung als auch für den Modulleichtbau hierbei als Kriterien aufgenommen. In dieser Arbeit liegt der Fokus auf der Optimierung der Entwicklungsmethoden des Modulleichtbaus, der die Aspekte der Modularisierung und des Leichtbaus kombiniert. Gleichzeitig wird der Anwendungsumfang als ein Kriterium hinzugefügt. Bereits vorhandene Methoden zur Entwicklung modularen Leichtbauprodukten konzentrieren sich ausschließlich auf bereits existierende modulare Produktfamilien. Demgegenüber ist die in dieser Arbeit entwickelte Methode sowohl für die bereits existierenden modularen Produktfamilien als auch für Neuentwicklungen geeignet. Diese Kriterien werden auf die in Abschnitt 3.1, 3.2 und 3.3 vorgestellten Forschungsarbeiten in der Abgrenzungsmatrix angewendet. Dadurch kann die Einordnung der eigenen Arbeit im Vergleich zu existierenden Arbeiten aufgezeigt werden.

Die Entwicklungsmethoden legen ihren Schwerpunkt auf eine durchgängige Vorgehensweise für eine spezifizierte Problemstellung. Dabei kann zwar die VDI-Richtlinie 2221 in diesen beiden Bereichen verwendet werden, jedoch bietet sie eine allgemeine Vorgehensweise, in der keine spezielle Werkzeuge für die Entwicklung des Modulleichtbaus zur Verfügung stehen. Daraus ergibt sich das Potenzial zur Optimierung der Modulleichtbau-Produktentwicklung mithilfe von geeigneten Werkzeugen.

Zur Identifikation relevanter Forschungserkenntnisse wurden zunächst die einschlägigen Lehrbücher für Produktentwicklung [PBF+13, Grä04, Vaj13, PL11] studiert. Auf Basis dieser Studie wurden Stichwörter für eine tiefergehende Recherche abgeleitet. Anschließend wurde eine systematische Literaturrecherche durchgeführt. Dafür wurden die Literaturdatenbanken IEEE Explore, Scopus, SpringerLink, Google Scholar, Web of Science und Design Society durchsucht.

Es wurden deutsche und englische Suchbegriffe sowie gebräuchliche Synonyme in die Suche einbezogen. Die Auswahl der Suchbegriffe erfolgte in Anlehnung an Literaturstudien aus den Bereichen Leichtbau, Modularisierung und Entwicklungsmethodik. Dabei wurde auf den Ergebnissen eigener Literaturanalysen [GY19a; GY19b; GY19c] aufgebaut.

Die Suchtreffer wurden anhand von Titel und Abstract für eine Detailbetrachtung ausgewählt. Darüber hinaus wurden aktuelle Konferenzbänder und Zeitschriftenartikel und die aktuellen Forschungsarbeiten von Forschenden in dem Bereich Entwicklungsmethodik und insbesondere Leichtbau und Modularisierung untersucht. Hierbei wurden vornehmlich Mitglieder von INCOSE und der WiGeP in die Recherche mit einbezogen.

Die referenzierte Literatur zur Entwicklung des Modulleichtbaus berücksichtigt zwar die Entscheidungsfindung zwischen der Modularisierung und des Leichtbaus, allerdings wird keine durchgängige Vorgehensweise zur Entscheidungsfindung beschrieben. Daraus

ergibt sich der **Neuheitsgrad** dieser Arbeit: bereits im frühen Konstruktionsstadium Entscheidungen zur Auswahl der Produktstruktur zwischen der modularen Bauweise und der Leichtbauweise zu treffen. Damit wird die Herausforderung der zahlreichen Entwicklungsiterationen des Modulleichtbaus bewältigt. Zudem werden die anderen beiden Kriterien „quantifizierter Vergleich der Produktstrukturen zwischen den beiden Bauweisen“ und „Berücksichtigung aller Anforderungen und Restriktionen zur Produktstrukturierung bei der Neuentwicklung der modularen Leichtbauprodukten“ von den referenzierten Arbeiten gar nicht betrachtet. Tabelle 1 zeigt die Abgrenzungsmatrix zur Einordnung der eigenen Arbeit.

Hierbei wurden die relevanten Entwicklungsansätze aus dem Leichtbau sowie einschlägige Arbeiten der Fachgesellschaft „WiGeP“ zugrunde gelegt und analysiert.

Die in dieser Arbeit entwickelte Methode ermöglicht die Wirtschaftlichkeit der einzelnen Alternativen von Produktstrukturen quantitativ zu bewerten. Dafür wird eine Methode zur Bewertung des Erfüllungsgrads der Anforderungen und Restriktionen der jeweiligen Alternativen von den Produktstrukturen entwickelt. Diese Methode ist auch in der Lage, im Vergleich zu anderen Methoden sowohl auf bereits existierende modulare Produktfamilien als auch für die Neuentwicklung modularer Leichtprodukte angewendet zu werden.

Tabelle 2: Abgrenzungsmatrix zwischen eigenem Vorhaben und existierenden Arbeiten

	[VDI2221, 19]	[Kipp 2012]	[Weiser2018]	[Ripperda 2019]	[Klein 2009]	[Posner 2016]	[Luedeke 2016]	[Plaumann 2015]	[Gumpinger 2015]	**Eigenes Vorhaben**
Anwendbar auf modulare Produktstrukturierung	○	●	●	●	–	–	–	–	–	●
Anwendbar auf Entwicklung des Leichtbaus	○	–	–	–	●	●	●	–	–	●
Anwendbar Neuentwicklung der modularen Leichtbauprodukt-strukturierung	○	–	–	–	–	–	–	○	○	●
Methode zur Entscheidungsfindung zwischen Modularisierung und Leichtbau	–	–	–	–	–	–	–	○	○	●
Quantifizierter Vergleich zwischen Modularisierung und Leichtbaumaßnahmen	–	–	–	–	–	–	–	–	–	●
Berücksichtigung aller Anforderungen und Restriktionen zur Produktstrukturierung bei der Neuentwicklung der modularen Leichtbauprodukten	–	–	–	–	–	–	–	–	–	●

Legende

Fett	Hauptabgrenzungskriterium
Normal	Beschreibungskriterium
–	Nicht behandelt
○	Nutzung existierender Ansätze, in Grundzügen behandelt
◐	Behandelt (teilweise), adaptiert, bzw. mit neuen Lösungen / Teil der Arbeit
●	Vollumfänglich behandelt (Alleinstellungsmerkmal) / Kern der Arbeit

4 Entscheidungsunterstützende Methode zur Strukturierung modularer Leichtbauprodukte

In diesem Kapitel wird die Methode zur Unterstützung der Produktstrukturierung modularer Leichtbauprodukte vorgestellt. Das Ziel der Methode ist die Modulleichtbau-Produktentwicklung zu vereinfachen und zu beschleunigen. Die Beschleunigung soll durch eine verbesserte Prognose in frühen Phasen der Entwicklung geschehen, wodurch Iterationen verringert werden. Als Angriffspunkt für die Methode wird hierbei auf die Analyse der Produktstruktur fokussiert. Die Fokussierung auf die Gestaltung der Produktstruktur erfolgt aus dem Grund, da die wesentlichen Produkteigenschaften und die Produktfunktionen, die Modulstruktur und die Produktvarianz hierbei festgelegt werden. Die Entscheidungen über die Produktstruktur haben einen direkten Einfluss auf die Kosten und die Effizienz des Produktentwicklungsprozesses. Gerade bei modularen Leichtbauprodukten spielt die Entscheidung über die Produktstruktur eine wesentliche Rolle.

Das Ziel des Leichtbaus ist es, sich den Sicherheitsgrenzen der verwendeten Materialien anzunähern. Gleichzeitig soll, wenn möglich, eine modulare Bauweise mit einem möglichst hohen Anteil an Standardbauteilen verwendet werden, um eine möglichst hohe Wirtschaftlichkeit sicher zu stellen. Dies bedeutet jedoch eine hohe Anzahl an Schnittstellen, die zur Verbindung der Standardteile dienen, damit eine möglichst häufige Wiederverwendung der Module sichergestellt ist. Diese Schnittstellen und die Standardmodule werden im Wesentlichen überdimensioniert, um die höchsten Anforderungen der jeweilig anzuwenden Produktvariant zu erfüllen. Dies geschieht aus dem Grund, dass sie in möglichst vielen Varianten verwendet werden können. Diese Überdimensionierung stellt aus Sicht des Leichtbaus eine unnötige Gewichtserhöhung dar und steht dem Ziel zur Gewichtsreduzierung durch Leichtbau entgegen. Diese konfliktären Anforderungen verursachen im Rahmen der Entwicklung des Modulleichtbaus zusätzlichen Aufwand, der sich in weiteren Entwicklungsiterationen bzw. iterativen Versuchen, Tests und Simulationen niederschlägt. Um den durch die Iterationen resultierenden Aufwand zu reduzieren, ist es besonders wichtig, die Entscheidung zwischen Modularisierung und Leichtbau auf Modulebene zu treffen. Diese Entscheidungen werden im Rahmen der Produktstrukturierung getroffen. Das Ziel ist es, diese Entscheidung möglichst weit nach vorne zu verlagern, um den Entwicklungsprozess entsprechend zu beschleunigen. Das entspricht dem Ansatz des Frontloadings, der als eine wesentliche Eigenschaft des IDE bezeichnet wird [Vaj14].

Das Frontloadings hat dabei den Grundansatz, dass ein Erkenntnisgewinn möglichst früh im Entwicklungsprozess durch eine vorgelagerte Validierung herbeigeführt wird. Die frühe Validierung dient dazu, möglichst frühzeitig die Umsetzbarkeit und die Funktionsfähigkeit eines Produktkonzepts zu überprüfen. Durch das Frontloading werden ohne eine komplette Ausgestaltung des Produktes Wissenslücken geschlossen und damit die zukünftige Funktionserfüllung gewährleistet. Damit wird der Aufwand zur Entwicklung des modularen Leichtbauproduktes in Grenzen gehalten. Diese Grundidee des Frontloadings wird für die in dieser Arbeit entwickelte Methode vorgenommen. Damit soll die in dieser

Arbeit entwickelte Methode Entscheidungen zu Produktstrukturen des modularen Leichtbauproduktes frühzeitig treffen können. Somit sind Konstrukteure in der Lage, direkt mit einer festgelegten Produktstruktur die Detaillierung der Produktgestaltung vorzunehmen.

Bei der Produktstrukturierung von Produktvarianten wird in der Regel auf vorhandene Komponenten (bzw. Module) zurückgegriffen, da es sich bei der Mehrzahl aller Produktentwicklungen um Varianten- oder Anpassungskonstruktionen handelt [Ever90b]. Je nach Neuheitsgrad des Produktes können einzelne Entwicklungsschritte entfallen oder nur in geringem Umfang erforderlich sein. Steht beispielsweise bei einer Getriebeentwicklung bereits fest, dass nur ein Stirnradgetriebe in Frage kommt, kann die existierende Produktstruktur unmittelbar für die Entwicklung verwendet werden. Modularisierung eignet sich hervorragend, solche Entwicklungsprojekte anzugehen. In bestehenden Produktfamilien kann durch die Komposition und vereinzelte Neuentwicklung von Modulen sehr einfach ein neues Produkt geschaffen werden. Eine komplett neue Produktentwicklung, bei der alle Konstruktionsschritte vollständig von Anfang an durchgeführt werden müssen, stellt deswegen heutzutage eher die Ausnahme dar. Leichtbauentwicklungen erfordern dabei aber eigentlich genau dies: eine komplett neue Herangehensweise an die Produktentwicklung, bei der jede existierende Konstruktion überdacht wird. Leichtbau strebt nach individuellen Konstruktionen, bei der jedes Mal anhand der Anforderungen neue Produktstrukturen definiert werden. Die Kombination der Modularisierung und des Leichtbaus ist somit eine sehr komplexe Aufgabe. Für die Kombination müssen zahlreiche Faktoren berücksichtigt werden: zum Beispiel die zur Verfügung stehende Entwicklungsdauer, die zur Verfügung stehenden Entwicklungskosten, die Kosten für Fertigung, Vertrieb, Entsorgung. Daher ist es im Wesentlichen die Kombination aus der Modularisierung und dem Leichtbau die Beantwortung der Frage, ob eine individuelle Lösung oder ein wiederverwendbares Modul genutzt werden kann. Daraus ergibt sich der Konflikt bei der Produktstrukturierung für den Modulleichtbau: soll ein existierendes Modul verwendet oder stattdessen ein individuelles Leichtbaumodul neu entwickelt werden.

In dem nachfolgenden Abschnitt 4.1 wird hierzu die Grundidee der Methode vorgestellt und dessen Einbindung im Produktentwicklungsprozess in Abschnitt 4.2 beschrieben. In den darauffolgenden Abschnitten 4.3 bis 4.7 werden die einzelnen Arbeitsschritte der Methode und die Herleitung beschrieben. In dem Abschnitt 4.3 werden die relevanten Eingangsinformationen zur Entwicklung modularer Leichtbauprodukte abgeleitet, die als Informationsbasis zur Modulaufteilung in Abschnitt 4.4 herangezogen werden. Danach werden in Abschnitt 4.5 vor allem die Restriktionen aus allen Produktlebensphasen bezüglich des Modulleichtbaus abgeleitet, die anschließend den jeweiligen Modulen zugeordnet werden. Darauf basierend wird für die alternativen Produktstrukturen eine Prognose über den Erfüllungsgrad der Anforderungen und Restriktionen abgeleitet. Im letzten Schritt der Methode geht es um die wirtschaftliche Bewertung der einzelnen alternativen Produktstrukturen und die Auswahl des besten Kompromisses mit den Perspektiven von Funktionalitäten und Wirtschaftlichkeit. Diese Auswahl wird in Abschnitt 4.7 detailliert beschrieben.

4.1 Grundidee der Methode

Die Methode zielt darauf ab, bereits bei der Bildung der Produktstruktur sich ergebende Modularisierungs- und Leichtbauvorteile miteinander zu vergleichen. Um einen solchen Vergleich ziehen zu können, müssen alle Auswirkungen von Konstruktionsentscheidungen frühzeitig bei der Bildung der Produktstruktur abgeschätzt werden. Daher basiert die grundlegende Idee zur Entwicklung der Methode auf der Überlegung, dass eine Produktstruktur oder einzelne Module hinsichtlich des Funktionserfüllungsgrads und der Wirtschaftlichkeit verglichen werden. Bei der Bewertung müssen sowohl die vorgegebenen Anforderungen als auch alle Restriktionen aus allen Produktlebensphasen berücksichtigt werden. Somit wird sichergestellt, dass alle Einflüsse berücksichtigt werden. Dadurch sind die Konstrukteure in der Lage, während des gesamten Konstruktionsprozesses durch ein gezieltes Vorgehen schneller und durch die Bewertungsergebnisse systematisch zu einer Gesamtlösung für das modulare Leichtbauprodukt zu gelangen.

Das Grundkonzept der Methode ist die Abschätzung der Auswirkung der Konstruktionsentscheidung über die Produktstrukturierung des Modulleichtbaus, bevor eine detaillierte Produkt- oder Modulgestaltung vorgenommen wurde. Das ermöglicht einen verkürzten iterativen Entwicklungsprozess für die Produktstrukturierung. Zum Beispiel wenn die Anforderungen von Kunden kurzfristig verändert wurden, ist es möglich, eine schnelle Anpassung vorzunehmen. So werden die Konstrukteure bei der Entscheidung über die modulare Leichtbauproduktstruktur unterstützt. Hierbei geht es im Wesentlichen um eine wirtschaftlich-funktionale Betrachtung. Da Konstrukteure in der Regel die Aufgabe haben, Entscheidungen nach betriebswirtschaftlichen Randbedingungen zu treffen, werden hierbei vor allem die ökonomisch relevanten Einflussgrößen berücksichtigt.

Die in dieser Arbeit entwickelte Vorgehensweise soll vor allem als ein methodischer Baustein in Entwicklungsmethoden, wie zum Beispiel die VDI-Richtlinie 2221, eingesetzt werden (siehe Abschnitt 4.2), um spezifische modulleichtbaubezogene Probleme zu lösen. Hierbei wird nachfolgend exemplarisch auf die Integration dieser Methode in der VDI-Richtlinie 2221 eingegangen (siehe Abschnitt 4.2). Die VDI-Richtlinie 2221 ist eine allgemeine Vorgehensweise zur Entwicklung technischer Systeme, so dass sie zur Entwicklung von modularen Leichtbauprodukten geeignet ist (siehe Kapitel 3). Im Folgenden wird zuerst die Vorgehensweise der in dieser Arbeit entwickelten Methode zur Entwicklung von modularen Leichtbauprodukten in Abbildung 22 dargestellt.

Der Ablaufprozess der Methode ist **iterativ**. Bei den einzelnen Arbeitsschritten kann beliebig vorgesprungen, zurückgesprungen oder diese übersprungen werden, bis eine zufriedenstellende Lösung zur Produktstruktur entwickelt wurde. Die Iterationen finden ausschließlich in den vier dargestellten Schritten statt und dabei wird noch keine detaillierte konstruktive Gestaltung entwickelt. Dadurch werden der Betrachtungsumfang und damit auch der Bearbeitungsaufwand der Methode sehr gering gehalten. Das ermöglicht einen kurzen und effektiven Iterationsprozess zur Produktstrukturierung. Das Ziel ist es,

bereits bei der Produktstrukturierung zu einer besseren Lösung zu kommen, so dass mögliche Iterationen bei der umfangreichen konstruktiven Gestaltung, die in der Regel viel Zeit benötigt, vermieden werden. Das führt dazu, dass die zahlreichen Alternativen der Produktstrukturen nicht konstruktiv umgesetzt werden müssen und sich dadurch die Entwicklungszeit erheblich verkürzt.

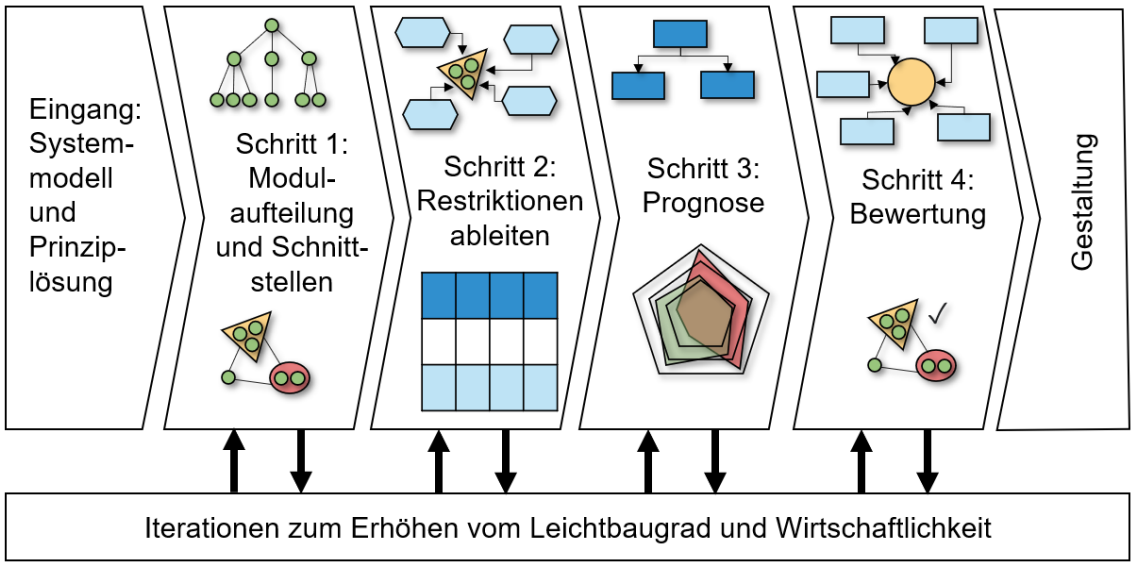


Abbildung 22: Vorgehen der entwickelten Methode

Die **Eingangsinformationen** schaffen den Rahmen für die folgenden Arbeitsschritte. Dabei werden unter anderem die von Kunden und vom Markt gestellten Anforderungen, Randbedingungen und Ziele wie Lastfälle, Zielmasse und Zielkosten hinterlegt. Mit diesen Eingangsinformationen wird ein Systemmodell erstellt. Das Systemmodell unterstützt Konstrukteure bei der Systemanalyse sowie bei der Planung, Bewertung und Durchführung der Konstruktionsmaßnahmen. Es erlaubt eine Betrachtung aus Modul-, Varianten- und Produktfamiliensicht, womit die Gesamtsicht für den variantenübergreifenden Modulleichtbau sichergestellt werden kann.

Darauf aufbauend werden die **Modulaufteilung und Schnittstellen** festgelegt. Die Modulaufteilung wird mit dem Ziel untersucht, die Skaleneffekte der Modularisierung auszuschöpfen und gleichzeitig in Abstimmung mit dem Leichtbauaspekt unnötiges Gewicht einzusparen. Hierbei werden im Vorfeld bereits vorhandene Module bzw. Standardmodule und Zukaufmodule für die Modulaufteilung berücksichtigt. Daraus ergeben sich mehrere alternativen Produktstrukturen, die aus der Zusammensetzung verschiedener Module resultieren. Das bedeutet, dass nicht nur eine Produktstruktur, sondern mehrere alternative Produktstrukturen betrachtet und untereinander verglichen werden. Dabei werden für alle Module unterschiedliche Gestaltszenarien erstellt. Die Gestaltszenarien der Module stellen eine Grobgestaltung bzw. ein Konzept der Module dar.

Danach werden die **Restriktionen** vom Gesamtsystem auf die einzelnen Module abgeleitet. Damit wird von Anfang an im Rahmen der Produktentwicklung eine gezielte Optimierung des Produktes bei gleichzeitiger Berücksichtigung der Restriktionen ermöglicht. Für die Ableitung der Restriktionen wurde eine Vorgehensweise im Rahmen des Modulleichtbaus entwickelt, die die allgemeinen Konstruktionsrichtlinien und die Hauptmerkmalliste von [PBF+13] als Grundlage verwendet. Hiermit wird eine Basis für die Ableitung der Restriktionen geschaffen. Die Konstruktionsrichtlinien geben in der Regel einen allgemeinen Überblick mit Tipps und Hinweisen für die Produktentwicklung. Mit der Hauptmerkmalliste können über Assoziationen Anforderungen abgeleitet werden. Dadurch können spezifische produktbezogene Eigenschaften in der frühen Phase der Produktentwicklung berücksichtigt werden. Somit werden die Anforderungen an die einzelnen Module vollständig identifiziert. Darauf basierend werden die funktionalen Anforderungen und die Restriktionen des Moduls ermittelt.

Im dritten Schritt wird eine **Prognose** über den Erfüllungsgrad der funktionalen Anforderungen und der Restriktionen, die im zweiten Schritt ermittelt wurden, gegeben. Im Folgenden wird die Herangehensweise der Prognose vorgestellt. Bereits im letzten Schritt wurden Gestaltszenarien mit entsprechenden Gestaltungskonzepten für jedes Modul abgeleitet. Im Rahmen der Prognose werden die Gestaltszenarien mit ihren Gestaltungskonzepten der Module untersucht, inwieweit sie die funktionalen Anforderungen erfüllen und ob sie alle Restriktionen einhalten können. Dadurch werden lediglich die Gestaltszenarien im Rahmen der Produktentwicklung weiterverfolgt, die sowohl die erforderlichen Funktionalitäten als auch die Restriktionen einhalten. So kann der Betrachtungsumfang während der Produktentwicklung deutlich begrenzt werden, um entsprechend den Entwicklungsaufwand zu reduzieren und dadurch Entwicklungszeit einzusparen.

Im letzten Schritt werden nach den Ergebnissen der Prognose die Realisierung der funktionalen Anforderungen mit Kosten bewertet. Damit kann ein Vergleich zwischen den Gestaltszenarien bzw. den einzelnen alternativen Modulen durchgeführt werden. Das ermöglicht die quantitative **Bewertung** zur Auswahl zwischen bestehenden modularen Strukturen und individuell ausgelegten Leichtbaustrukturen. Die grundlegende Idee liegt daran, dass die Entscheidung auf eine Auswahl zwischen zu erzielendem Gewicht und der Wirtschaftlichkeit des Produktes, also den erwarteten Produktkosten, heruntergebrochen werden kann. Das Gewicht bildet einen Aspekt der Anforderungen, der in Kosten unmittelbar verrechnet werden kann. Die anderen Anforderungen an die einzelnen alternativen Module werden auch in Kosten verrechnet. Dafür wird die Erfüllung der Anforderungen in Kosten verrechnet. Somit kann zwischen den einzelnen alternativen Modulen ein quantifizierter Vergleich stattfinden. Dadurch wird die Qualität der getroffenen Entwicklungsentscheidungen über die Produktstruktur in der frühen Entwicklungsphase erheblich verbessert. Gleichzeitig werden die Iterationen bei der anschließenden Gestaltung und Entwicklung des modularen Leichtbauproduktes stark reduziert. Zum einen sind durch die bereits definierte Produktstruktur weniger Iterationen erforderlich. Zum ande-

ren wurden die vorhandenen verwendbaren Module für die entsprechenden Produktstrukturen bereits festgelegt. Damit sind die Konstrukteure in der Lage, sich gezielt auf solche Module zu konzentrieren, die wirkliche Optimierungspotenziale bezogen auf den Leichtbau haben, ohne wirtschaftliche Nachteile für das Produkt zu verursachen.

Zusammenfassend werden mit dieser Methode bei der Entwicklung der modularen Leichtbauprodukte sowohl die Wirtschaftlichkeit als auch die Funktionalität berücksichtigt. Gleichzeitig bietet die Methode die Möglichkeit, die alternativen Produktstrukturen quantitativ zu bewerten. Somit werden die Iterationen bei der Entwicklung des modularen Leichtbauproduktes enorm reduziert. Diese Methode ist somit in der Lage, die folgenden beschriebenen Ziele von modularen Leichtbauprodukten zu realisieren.

- Komplexitätsreduktion

Eine hohe Komplexität des Gesamtsystems ist verbunden mit weiteren Aufwänden. Das vornehmliche Ziel der Produktentwicklung sollte sein, wenn möglich, Komplexitäten weitestgehend abzubauen. Die in dieser Arbeit entwickelte Methode nimmt die Modulaufteilung so vor, dass die Komplexität des Gesamtsystems reduziert wird. Die Entscheidung zwischen integraler Bauweise und Modulbauweise wird systematisch angegangen und dadurch auch klar definiert, wo Komplexität im Bauteil zulässig gemacht wird und wo auf standardisierte Lösungen zurückgegriffen wird.

- Schnittstellenreduktion

Im Rahmen der Modularisierung dienen Schnittstellen zur Verbindung der einzelnen Module. Jedoch stellen häufig Schnittstellen Schwachstellen in einer Produktstruktur dar und neigen daher häufig zur Überdimensionierung. Diese Überdimensionierung könnte wiederum zu einer Erhöhung des Raumbedarfs und des Gewichts führen. Also müssen aus Sicht des Leichtbaus bei der Entwicklung modularer Leichtbauprodukte, die nicht notwendigen Schnittstellen hinterfragt und gegebenenfalls in Abstimmung mit der Modularisierung eingespart werden. Zur Bewältigung dieses Zielkonflikts bezüglich der Schnittstellen muss ein Kompromiss gefunden werden. Diese Methode bietet die Möglichkeit, ein Produkt nur so weit zu modularisieren, wie es dem Vorteil dient.

- Dimensionierung der Module

Module werden in der Regel variantenübergreifend dimensioniert. Ein Modul wird auf unterschiedliche Lastsituationen abgestimmt. Um eine höhere Anwendbarkeit zu erreichen, wird das Modul häufig für die Produktvariante mit den höchsten Lastsituationen festgelegt. Das führt dann zu einer Überdimensionierung für andere Produktvarianten. Daher muss diese Methode bewerten können, ob die Module für entsprechende Produktvarianten überdimensioniert sind oder nicht. Das ist das Hauptauswahlkriterium, inwieweit ein Modul individuell neu entwickelt oder ein vorhandenes Modul gewählt werden soll. Wenn vorhandene Module überdimensioniert sind, eignen sich diese gut dafür, im Zuge von Gewichtsoptimieren diese Module individuell neu zu gestaltet zu werden.

- Gewichtsreduktion

Das Hauptziel der Methode ist eine wirtschaftliche Gewichtsreduktion ohne Einbußen der Gesamtleistungsfähigkeit des Bauteils bzw. des Gesamtsystems. Eine beliebige Erhöhung des Leichtbaugrads des Gesamtsystems führt häufig zu einer Erhöhung der Kosten. Durch diese Methode findet ein Abgleich mit einer klaren Zieldefinition statt, welcher Leichtbaugrad zu welchen Kosten angestrebt wird. Um den Aufwand gering zu halten, findet mit der Methode die Gewichtsoptimierung zuerst von gewichtssensitiven Modulen statt. Bewegte Module können zum Beispiel deutlich mehr von einer Gewichtsreduzierung profitieren, so dass der Gesamtleichtbaugrad und die Wirtschaftlichkeit des Gesamtsystems verbessert wird.

4.2 Einordnung im Entwicklungsprozess

Die in dieser Arbeit entwickelte Methode soll bei allen Entwicklungsprozessen des Modulleichtbaus einsetzbar sein und die Konstruktionsaufgabe so weit wie möglich unterstützen. Das heißt, dass während des Entwicklungsprozesses eine Unterstützung bereits bei der systematischen Erfassung der Produktanforderungen beginnen muss. Während der Auswahl konstruktiver Lösungen sollen Probleme und Aufwände erkannt werden. Zur Veranschaulichung wird die Einbindung der Methode in einem Entwicklungsprozess nach der VDI-Richtlinie 2221 [VDI2221] dargestellt. Die VDI-Richtlinie 2221 stellt dabei ein generelles Vorgehen für die Entwicklung technischer Systeme dar. Die genaue Einordnung in die VDI 2221 wird in Anhang A5 vorgenommen.

Die VDI 2221 beschreibt dabei im generellen mehrere Arbeitsschritte von der Planung eines technischen Produkts bis zu dessen Freigabe. In einem ersten Schritt werden dabei die Ziele an die Produktentwicklung definiert und anschließend der eigentliche Produktentwicklungsprozess definiert. Der Produktentwicklungsprozess enthält dann alle Aktivitäten, die zur Erreichung des Zieles der Produktentwicklung dienen. Diese Konkretisierung wird dabei Prozessgestaltung genannt. Die genaue Ausgestaltung des Produktentwicklungsprozesses hängt dabei stark von der Domäne ab, für die die Entwicklung vollzogen wird. Da die in dieser Arbeit entwickelte Methode nicht auf einzelne Domänen beschränkt ist und sich auch nicht auf einzelne Produktarten oder Branchen fokussiert wird, reicht es die allgemeinen Aktivitäten der Produktentwicklung zu betrachten. Im Allgemeinen werden nach der VDI 2221 und Pahl Beitz [PBF+13] die folgenden Entwicklungsschritte in der Entwicklung eines Produkts durchlaufen:

- Produktdefinition
- Konzeptentwicklung
- Gliedern in realisierbare Module
- Detailentwicklung
- Absicherung Herstellbarkeit

- Anlauf Serienproduktion
- Überprüfung Markterfolg

Die in dieser Arbeit entwickelte Methode zur Produktstrukturierung dient zur Gliederung des Produkts in realisierbare Module. Dieser Schritt soll entsprechend durch diese Methode unterstützt werde. Konkret schließt die Methode an die Erstellung von Lösungsprinzipien und deren Struktur an. Diese Informationen, die die Funktionen und die Lösungsprinzipen beschreiben, stellen hierbei die Ausgangssituation für die Verwendung der Methode dar. Die Herangehensweise an die „Gliederung in realisierbaren Modulen“ wird in den nachfolgenden Abschnitten 4.3 bis 4.7 beschrieben.

Durch die Methode ist es zudem möglich, die Aktivitäten der Produktentwicklung des Modulleichtbaus -unter anderem die Modulaufteilung- in einem kleinen Umfang iterativ sowie (teil-)parallelisiert zu durchlaufen. Zum Beispiel ist es möglich, die Entwicklung von mehreren alternativen Produktstrukturen parallel durch diese Methode durchlaufen zu lassen. Daher ist diese Methode für Simultaneous Engineering und Concurrent Engineering besonders geeignet. Konzepte des Simultaneous und des Concurrent Engineering konzentrieren sich auf das Parallelisieren von Aktivitäten im Produktentstehungsprozess [VR20, VOR20]. Beim Simultaneous Engineering werden unterschiedliche Aktivitäten -beispielsweise die Produktentwicklung und die Produktionssystementwicklung- parallel und überlappt ausgeführt. Demgegenüber steht Concurrent Engineering. Es geht um die parallele Bearbeitung einer umfangreichen Aufgabe – zum Beispiel innerhalb der Produktentwicklung- von mehreren Personen oder Gruppen. „Wichtigstes Kriterium für das Parallelisieren ist bei Simultaneous Engineering und Concurrent Engineering die Frage, wann die Ergebnisse des vorher begonnenen Arbeitsschritts soweit stabil sind, dass die statistische Wahrscheinlichkeit einer Änderung und die damit verbundenen Änderungskosten geringer sind als die Kosten, die durch zu spätes Weiterarbeiten verursacht werden“ [Vaj20, S.364]. Hierbei verbessert die parallelisierte Bearbeitung der Entwicklungsaktivitäten den Erfüllungsgrad der Anforderung dieser Arbeit, die Entwicklungsdauer des Modulleichtbaus zu verringern. Da hierbei nur ein Prozess aufgegriffen wird, wird auf diese Konzepte nachfolgend nicht weiter eingegangen. [VB98, VWB+14, Vaj20]

4.3 Erstellung des Systemmodells

Als Eingangsinformationen für die weiteren Arbeitsschritte der Methode dient das Systemmodell. Das Ziel des Systemmodells ist alle verfügbaren Informationen über das zu entwickelnde System in einem einzigen Modell zu erfassen [WLR+15]. Daraus ergibt sich eine systematische Erfassung der relevanten Daten, Beziehungen und Informationen für die Produktentwicklung. Das Systemmodell schafft eine vollständige Informationsbasis, die den Konstrukteuren das Verständnis für die Wechselwirkungen zwischen den Funktionen und einen Überblick über die Anforderungen und die Informationen über das Gesamtsystem gibt. Ein solch vollumfassendes Systemmodell ist jedoch auf Grund des Zeit- und Ressourcenaufwands praktisch nicht umsetzbar [HBF19]. In der Praxis wird

sich dabei auf eine begrenzte Anzahl unterschiedlicher Sichtweisen auf das Systemmodell beschränkt [GO22]. Dadurch sind diese mit einem vertretbaren Aufwand realisierbar und bieten zugleich die erforderliche Flexibilität. [GO22, S.53]

Die wissenschaftliche Grundlage des Systemmodells basiert dabei auf dem Ansatz der modellbasierten Produktentwicklung. Die Grundlage hierfür bilden unter anderem die Werke [Hub84, Rob75, Pat82]. Diese beschreiben die Grundlagen der Konstruktionslehre auf Basis der Systemtheorie. Ein System wird hierbei, als ein aus einer endlichen Menge von Elementen nach bestimmten Regeln geordnetes Ganzes definiert. Zwischen den Elementen existierten bestimmte Beziehungen. Systeme stehen dabei mit ihrer Umgebung über Input- und Output-Relationen in Beziehung. Diese Systeme werden dabei zuerst als „Black-Boxen“ definiert, welche zunehmend konkretisiert werden. Diese Grundauffassung wurde in zahlreichen weiteren Arbeiten weiter vertieft und münden unter anderem im der integrierten Produkterstellung [Ehr09] sowie dem Systems Engineering [NFI97] Aktuelle Werke, die tiefergehend auf die modellbasierte Produktentwicklung eingehen sind unter anderem [PBF+13, VDI2221].

Nach [Sta73] sind Modelle Abbilder von Systemen. Die Abbilder können durch unterschiedliche Mittel beschrieben werden: von textuellen und grafische über mathematischen bis hin zu realen sowie virtuellen und deren Mischung. Bei dem Systemmodell in dieser Arbeit soll ein Modell dabei helfen das Zielsystem des zu entwickelnden Produktes möglichst umfangreich zu beschreiben. Dafür müssen alle Eingangsgrößen in die Produktentwicklung aufgenommen werden und in das Modell abgeleitet werden. Die dabei verwendeten Methoden finden sich unter anderem bei [AM06].

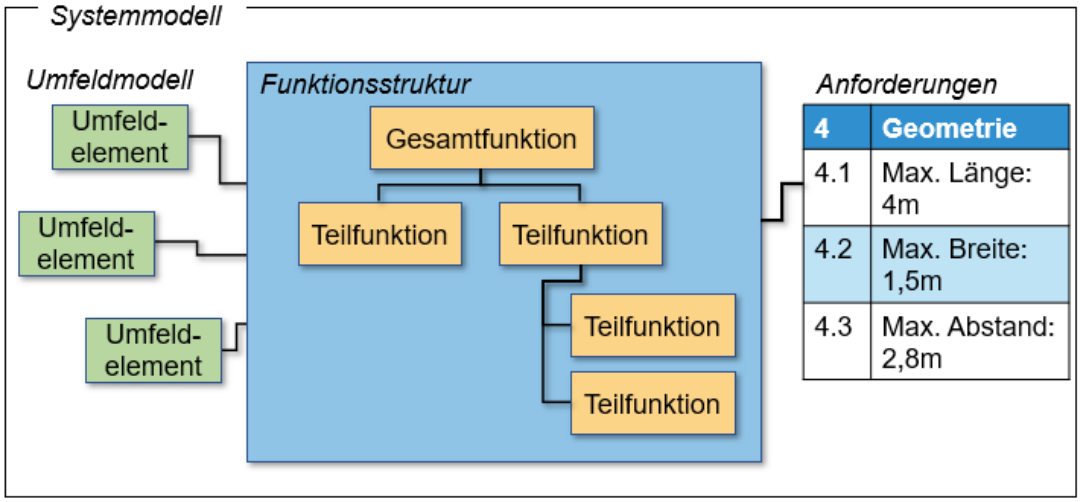


Abbildung 23: Aufbau des Systemmodells

Das Systemmodell enthält die Prinziplösungen für alle Funktionen des Produktes. Das Systemmodell umfasst die Anforderungen an das Produkt. Zudem sind Funktionen des Produktes und deren Struktur in dem Systemmodell abgebildet. Die Funktionen und die Erstellung der Anforderungsliste werden mithilfe des Umfeldsystems herausgearbeitet.

Das Umfeldsystem definiert die Systemgrenze und hilft dabei, die Wechselwirkungen zwischen dem System und der Umgebung zu analysieren. Die Systemelemente interagieren mit dem System, das zuerst als eine Black-Box betrachtet werden kann [Kai13]. Zum Beispiel können die Werkstatt und die Ladestation usw. als Umfeldelemente für das zu entwickelnde Fahrrad definiert werden. Ein Systemmodell ist beispielhaft in der Abbildung 23 dargestellt.

Es sind somit alle vom Kunden und Markt gestellten Anforderungen darin enthalten und zusätzlich alle Randbedingungen. Diese Randbedingungen sind z.B. Lastfälle, erwartete Kräfte und deren Angriffspunkte. In dem Systemmodell wird zudem noch die Funktionsstruktur dargestellt.

Aus Sicht der Modularisierung bestehen Anforderungen an eine klare Definition der einzelnen **Teilfunktionen bzw. der Gesamtfunktion** des Produktes und die sich daraus ergebenden **Lösungsprinzipien**. Neben rein technischen Funktionen, die z.B. durch physikalische oder mathematische Zusammenhänge als Gleichungen beschrieben werden, müssen in soziotechnischen Systemen noch weitere Arten von Funktionen betrachtet werden, wobei Ökonomie, Ökologie und Soziales gleichermaßen im Blickpunkt stehen. Dabei sollten neben den auf den Zweck des Produktes zielenden technischen Gebrauchsfunktionen -zum Beispiel Drehbewegung erzeugen- zusätzlich noch sogenannte Geltungsfunktionen -zum Beispiel Wertigkeit ausstrahlen- betrachtet werden [VDI2803]. Darüber sollten neben erwünschten Zweckfunktionen auch unerwünschte Störfunktionen -zum Beispiel Lärm verursachen- unterschieden werden, damit auch dafür Lösungen zu ihrer Vermeidung oder Minderung ermittelt werden können. Alle Arten von Funktionen können zusätzlich noch nach Haupt- und Nebenfunktionen unterschieden werden, um die Relevanz von einzelnen Funktionen hervorzuheben.

Als Unterstützung zur Ableitung der Funktionen kann zum Beispiel das Umfeldmodell eingesetzt werden. Das Umfeldmodell wird als eine Black-Box zur Analyse der Wechselwirkungen zwischen dem System und der Umgebung verwendet [Kai13]. Darüber hinaus können auch Vorgänger- und/ oder Wettbewerbsprodukte untersucht werden. Dies kann zum Beispiel mit Hilfe eines FAST-Diagramms (Funkionen-Analyse-System-Technik) geschehen [VDI11]. Zudem kann für die Untersuchung der technischen Funktionen die Quality-Function-Deployment (QFD) Methode eingesetzt werden [PBR13]. Die QFD stellt dabei sicher, dass der Fokus auf den Wünschen des Kunden liegt. Zudem hilft die QFD bei der Überprüfung der Erfüllung der Anforderungen und unterstützt die Produktentwicklung sehr umfangreich [PBR13].

Anschließend werden für die einzelnen Funktionen des Produktes Lösungsprinzipien gesucht und diese in Wirkstrukturen gebracht. Dafür werden die physikalischen Effekte, materialspezifische und geometrische Eigenschaften berücksichtigt. Die materialspezifischen Eigenschaften drücken dabei Anforderungen zur Art des Materials und Eigenschaften aus. Zudem wird eine allgemeine Vorstellung über die Eigenschaften des eingesetzten Materials definiert. Die geometrischen Eigenschaften setzen sich aus dem Wirkort, der

Wirkgeometrie sowie der Wirkbewegungen zusammen. Die Wirkgeometrie wird durch die Wirkoberfläche und das Wirkvolumen beschrieben. Die Wirkbewegungen können sich hinsichtlich Form, Richtung, Art, Betrag und Anzahl unterscheiden.

Dabei können verschiedene Methodenbausteine zur Ableitung der Lösungsprinzipien verwendet werden. Zur Unterstützung schlagen z.B. Pahl et al. [PBF+13] den Morphologischen Kasten [Zwi89] vor. Anhand der Lösungen im Morphologischen Kasten werden anschließend die Lösungsprinzipien und Wirkstrukturen abgeleitet, die die Anforderungen an das Produkt erfüllen müssen. Der morphologische Kasten dient der Kombination der Lösungen. Durch Flussbilder, Schaltpläne oder Strichbilder kann die Wirkstruktur dargestellt werden.

Tabelle 3: Anforderungen an das Systemmodell

	Modularisierung	Leichtbau	Übergreifende Themen
Anforderungen an den Inhalt des System-modells	• Definition der Funktions-struktur • Ableitung der Prinziplösun-gen	• Lastfälle und Lasten an den Schnittstellen • Geometrie der Elemente • Material der Elemente • Masse der Ele-mente	• Randbedin-gungen • Ziele • Konsistenz • Erweiterbarkeit • Keine redun-danten Infor-mationen

Aus der Sicht des Leichtbaus müssen die für den Leichtbau notwendigen Attribute in dem Systemmodell enthalten sein. Dies können zum Beispiel das Material, die Gestalt (Grobstruktur) und die Masse sein. Die Lastfälle und die daraus resultierenden Lasten an den Schnittstellen müssen ebenso im Systemmodell abgebildet werden.

An das Systemmodell ergeben sich übergreifende Anforderungen. Ziele und Randbedingungen müssen hinterlegt werden können. Das Systemmodell muss konsistent sein, konkurrierende Anforderungen sind abzustimmen. Redundante Informationen sind zu vermeiden. Das Systemmodell muss für problemspezifische Modellierungen flexibel und erweiterbar sein, im Laufe des Entwicklungsprozesses soll es die Gesamtsicht auf das Produkt gewährleisten und den aktuellen Stand der Informationen wiedergeben.

4.4 Modulaufteilung

Die Modulaufteilung geschieht hierbei unter den Gesichtspunkten der Optimierung des Leichtbaugrads. Dafür bildet das Systemmodell die Informationsgrundlage wie zum Beispiel Funktionsstrukturen sowie externe und interne Anforderungen. Im Folgenden wird die Modulaufteilung exemplarisch vorgestellt. Die hierbei vorgestellten Verfahren sind dabei nur auf Anpassungs-, Änderungs- und Variantenentwicklungen anwendbar. Die gesamte Methode ist dabei ausgelegt, dass es eine Auswahl zwischen existierenden oder standardmäßig beziehbaren Modulen und neu zu entwickelnden individuellen Modulen geben muss. Dies ist in der Regel bei den meisten Entwicklungsprojekten gegeben.

Es existieren zahlreiche Methoden zur Strukturierung von Produkten. Das Ziel aller Produktstrukturierungsmethoden ist hierbei, aus Komponenten Module zu bilden. Die Methoden haben hierbei einen unterschiedlichen Schwerpunkt. Schwerpunkte der Strukturierung können z.B. das Optimieren von Schnittstellen, die Funktionsintegration von Modulen oder die Berücksichtigung von produktstrategischen Zusammenhängen und von Kundenwünschen in der Produktarchitektur sein.

Das generelle Vorgehen zur Bildung von Modulen kann dabei vereinfacht durch die drei in der nachfolgenden Abbildung dargestellten Schritte beschrieben werden:

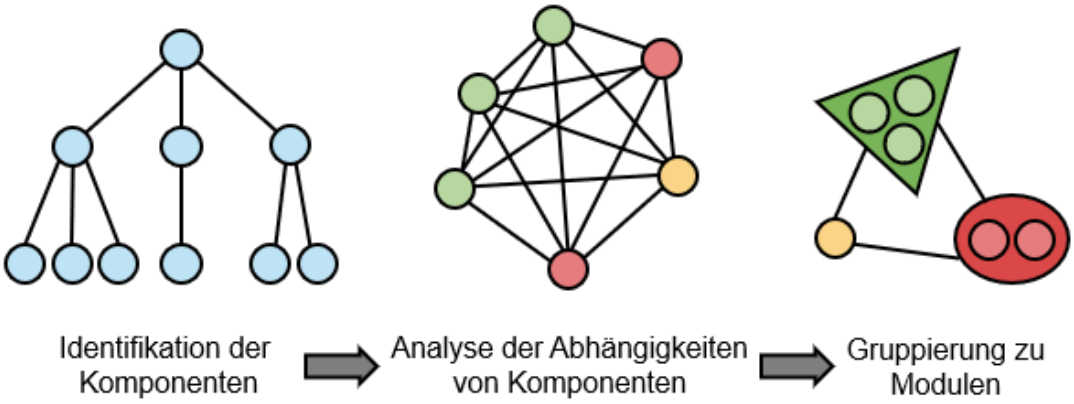


Abbildung 24: Vorgehen zur Modulaufteilung

1) **Identifikation von Komponenten**

Bei der Identifikation von Komponenten wird das Produkt zunächst in Einzelteile zerlegt. Diese Einzelteile werden in einem ersten Schritt zu abgeschlossenen logischen Strukturen zusammengefasst. Diese logischen Strukturen spiegeln die Komponenten mit einer vereinfacht abstrakten Darstellung wider, mit denen Module anschließend gebildet werden. Die Herausforderung bei der Identifikation der Komponenten ist, die richtige Granularität von den einzelnen Komponenten anzuwenden. Die Komponenten sollen abgeschlossene Einzelteile bilden, die eine Hilfestellung für die Modulbildung sind. Eine Komponente kann für einen Antrieb z.B. das gesamte Getriebe oder nur ein Zahnrad sein. Je nach

Aufgabenstellung kann beides die richtige Herangehensweise sein. Die Granularität ist dabei von dem Produkt, den Zielen der Entwicklung und den Unternehmenszielen abhängig.

2) **Analyse der Abhängigkeiten von Komponenten**
Im Anschluss an die Identifikation der Komponenten werden die Abhängigkeiten zwischen den Komponenten untersucht. Hierzu werden alle Interaktionen zwischen den Komponenten erfasst und bewertet. Die Bewertung drückt dabei die Stärke ihrer Beziehung zueinander aus. Dabei kann zum Beispiel die DSM zur Bewertung der Stärke ihrer Beziehungen eingesetzt werden. Bei mechanischen Schnittstellen werden zum Beispiel die mechanischen Interaktionen zwischen den Komponenten untersucht.

3) **Gruppierung zu Modulen**
Nach der Analyse der Abhängigkeiten von Komponenten werden die einzelnen Komponenten zu Modulen zusammengefasst. In diesem Schritt kann nach einem oder mehreren Dimensionen bzw. Kriterien, wie zum Beispiel Reduzierung mechanischer Schnittstellen oder eine Erhöhung der Funktionsintegration, die Struktur verbessert werden. Häufig werden Algorithmen eingesetzt, um diese Optimierung zu unterstützten.

Die Anwendung von Leichtbau auf die Modulbildung sorgt bereits dafür, dass die Integralbauweise vermehrt angewendet wird. Das führt dazu, dass in der Phase „Gruppierung zu Modulen“ Module zusammengefasst werden, um Schnittstellen aufzulösen und dadurch Gewicht zu sparen. Das spricht dem Prinzip der Modularisierung jedoch entgegen und profitiert nicht von Skaleneffekten. Daher muss hierfür im Rahmen von Modulleichtbau eine Abwägung zwischen wirtschaftlichen Vorteilen und funktionalen Vorteilen hinsichtlich der Integralbauweise bzw. des Gewichts getroffen werden. Bei den ersten beiden Schritten „Identifikation der Komponenten“ und „Analyse der Abhängigkeiten von Komponenten“ existieren keine Unterschiede zwischen Modulleichtbau und anderen Bauteilen.

Somit liegt der Angriffspunkt der Methode im letzten Schritt, also die „Gruppierung zu Modulen“. In diesem Schritt wird festgelegt, aus welchen Modulen das Produkt zusammengesetzt wird. Hierbei wird auch festgelegt, welche Standardbauteile oder bereits vorhandene Module dabei eingesetzt werden und welche Teile bzw. Module extra für das Produkt gefertigt werden müssen. Die vorhandenen Bauteile oder Standardbauteile können direkt übernommen und keine Leichtbauoptimierungen verfolgt werden. Demgegenüber konzentrieren sich die Konstrukteure komplett auf die Entwicklung der individuellen Leichtbauteile. Dabei können die vorhandenen Bauteile oder Standardbauteile mit Leichtbaumaßnahmen optimiert werden. Dieser Ansatz dient dazu, Leichtbau zielorientiert umzusetzen. Somit werden unnötige Iterationen bei der Entwicklung des modularen Leichtbauprodukts vermieden.

Aus der Modulaufteilung werden mehrere Alternativlösungen, die im Wesentlichen aus der Zusammensetzung von Standard-, Zukaufmodulen und individuell gefertigten Leichtmodulen bestehen, ermittelt. Diese Alternativen stellen die Basis für die Auswahl der

Produktstruktur dar. Darauf basierend findet eine Vorabauswahl, welche Produktstrukturen im Rahmen des Modulleichtbaus in Frage kommen, statt. Anschließend werden die ausgewählten Alternativen anhand der Einhaltung der Restriktionen und dem Erfüllungsgrad der Funktionalitäten überprüft, um die optimale Produktstruktur auszuwählen. Das geschieht in den Arbeitsschritten „Prognose“ und “Bewertung“, die in den nachfolgenden Abschnitten detailliert beschrieben werden.

Für die Modulaufteilung eignen sich prinzipiell alle Verfahren, die in Abschnitt 3.1 vorgestellt wurden. Nachfolgend werden zwei Herangehensweisen als Vorschläge für die Modulbildung präsentiert. Eine Herangehensweise eignet sich für eine komplette Neuproduktentwicklung. Im Gegensatz dazu ist die zweite Methode für eine Anpassungsentwicklung ausgelegt oder wenn bereits ein ähnliches Produkt entwickelt wurde.

Zunächst wird die Methode für die Modulbildung einer kompletten Neuentwicklung eines Produktes vorgestellt. Diese Methode basiert auf einer Kombination der drei Verfahren METUS [TGH08], Modular Function Deployment (MFD) [Eri98] und Design Structure Matrix (DSM) [Ste81]. METUS ist eine Methode zur Erstellung des Produktkonzeptes. Die drei Methoden werden nachfolgend ausführlich beschrieben. Diese Kombination zielt darauf ab, die Vorteile aller Verfahren miteinander zu kombinieren. Dabei ist zu beachten, dass die DSM sich lediglich bei bereits zugeordneten Modulen eignet. Sind die Module bereits weitestgehend bekannt, kann auch direkt mit der DSM gestartet werden. Dieses Vorgehen ist in der nachfolgenden Abbildung 25 verdeutlicht:

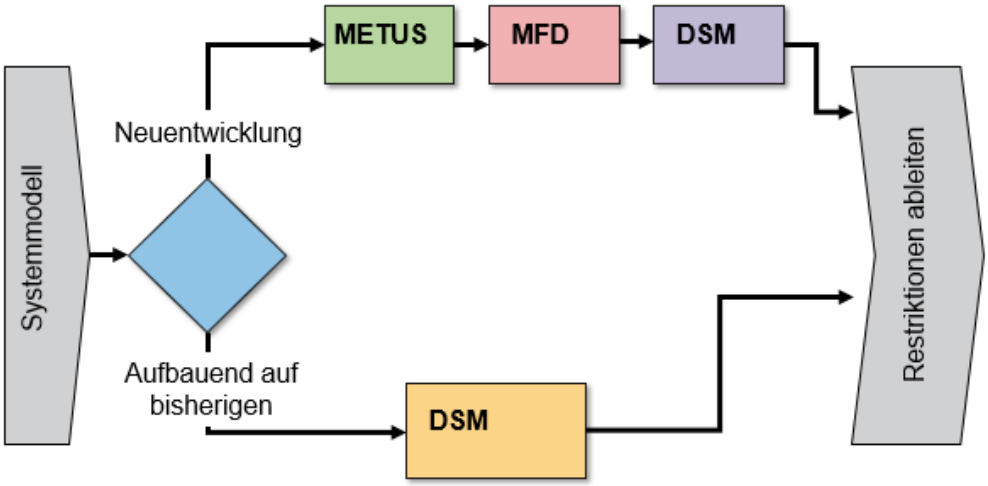


Abbildung 25: Anwendung von Methoden im Rahmen der Modulaufteilung

In der Kombination der drei Verfahren dient das Verfahren METUS dazu, Module zu identifizieren. Allerdings wird bei der Identifikation keine strategische Sicht berücksichtigt. Dafür wird anschließend MFD eingesetzt, so dass eine vollständige Untersuchung aller Einflussfaktoren auf die Modulaufteilung erfolgt. Insbesondere wird die Wirtschaftlichkeit bei der Modulaufteilung berücksichtigt, die ein bedeutendes Kriterium für die Entscheidungsunterstützung zur Auswahl zwischen den vorhandenen Modulen und den

individuellen Leichtbauteilen ist. Das anschließende Verfahren DSM ergänzt die funktionelle Sicht auf die Modulaufteilung und dient im letzten Schritt dazu, die Wechselwirkungen zwischen den Modulen zu optimieren.

Das Hauptziel der Methode **METUS** ist die Verbesserung der Funktionsintegration. Die Funktionsintegration drückt dabei aus, dass eine Funktion einem Modul eindeutig zuzuordnen ist. Voraussetzung für die Anwendung von METUS ist eine vollständige Funktionsstruktur, die die Hauptfunktionen und Unterfunktionen eines Produktes darstellt. Der Erfüllungsgrad von den Komponenten für die Unterfunktionen werden analysiert. Wenn eine Komponente bei der Erfüllung einer Funktion hoch bewertet ist, ist diese Komponente von dieser Funktion abhängig. Gleichzeitig wird diese Komponente für die Erfüllung dieser Funktion markiert.

Anschließend findet eine funktionale Gruppierung statt. Dafür werden alle Komponenten bzw. Bauteile zusammengefasst, die einen Synergieeffekt bei der Erfüllung einer bestimmten Funktion einbringen. Daraus ergeben sich die Funktionsmodule.

Allerdings ist die Bildung der Funktionsmodule nicht immer eindeutig, da eine Komponente bei der Erfüllung mehrerer Funktionen mitwirken kann. In diesem Fall muss eine Entscheidung darüber getroffen werden, zu welchem Modul diese Komponente zugeordnet werden soll. Wenn eine Komponente bei einer hohen Anzahl von Funktionen mitwirkt, kann dies dazu führen, dass diese Komponente weiter zerlegt werden muss, so dass die Komponenten zu den entsprechenden Funktionen eindeutig zugeordnet werden können.

Das Ergebnis dieser Methode ist eine Produktstruktur, die sich aus den Funktionsmodulen zusammensetzt. Die Funktionsmodule haben dabei eine eindeutige Verknüpfung von Funktionen zu den Modulen. Die Abbildung 26 veranschaulicht beispielhaft den METUS Ansatz, in der sich die Funktionsstruktur und Produktstruktur gegenüberstehen.

Anschließend wird diese Produktstruktur mit Hilfe des **Modular Function Deployment (MFD)** [Eri98] bewertet. Die MFD baut auf den verschiedenen Modultreibern auf (siehe Tabelle 4). Die Modultreiber werden durch mehrere Unternehmensstudien erhoben. Daher orientieren sich die Modultreiber mehr an einer produktstrategischen Sicht an den Zielen der verschiedenen Produktlebensphasen. Im Rahmen des Modulleichtbaus dient diese Methode insbesondere zur Identifikation der Standardkomponenten/-module, die unmittelbar in den neuen Produkten übernommen werden, und der individuellen Komponenten/-module, die für das neue Produkt individuell ausgelegt werden sollen. Die in der Tabelle 4 dargestellten Modultreiber sind generisch ausgewählt. Daher müssen für einen produkt- bzw. unternehmensspezifischen Einsatz hierbei noch Modultreiber ergänzt werden, z.B. solche, die sich aus der Unternehmensstrategie ergeben.

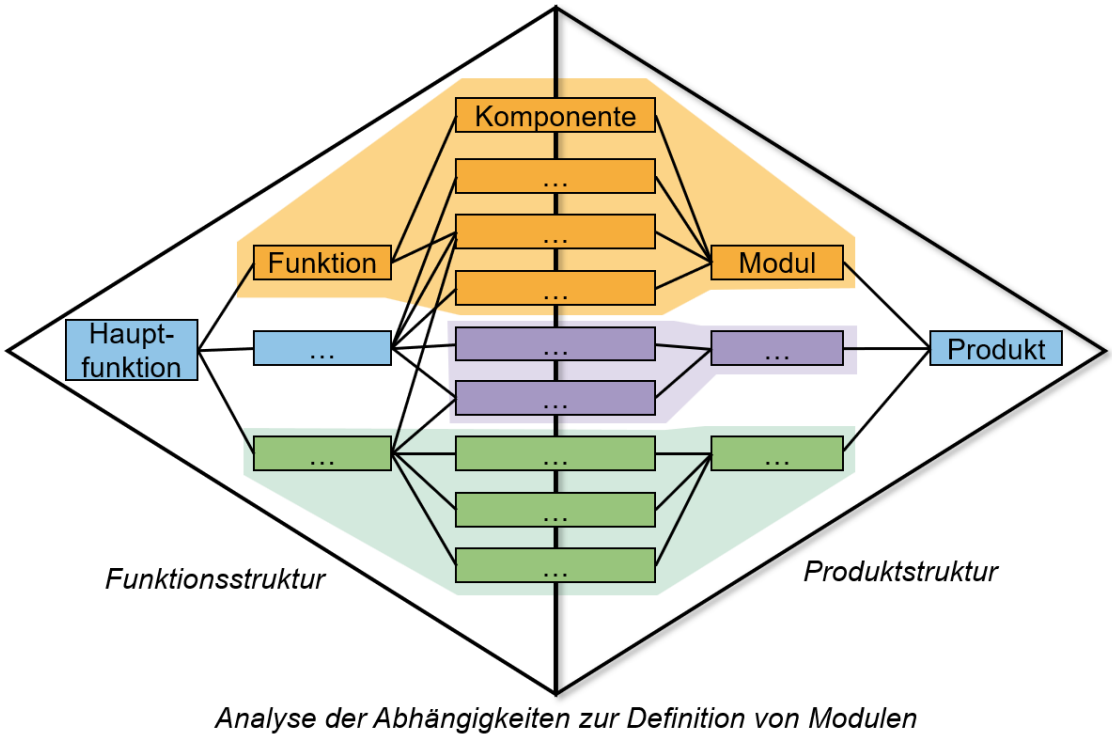


Abbildung 26: Veranschaulichung des METUS-Ansatzes [TG10]

Die einzelnen Komponenten mit ihren technischen Lösungen können anschließend anhand der gewählten Modultreiber bewertet werden. Die Bewertung findet durch die Vergabe von Punktzahlen statt. Es sind drei Stufen zur Bewertung der Relevanz des Modultreibers für eine Komponente vorgesehen: für schwache Treiber ein Wert von 1, für mittlere Treiber ein Wert von 3 und für starke Treiber ein Wert von 9. Dadurch soll die Gewichtung von starken Treibern bei der Summenbildung erhöht werden. Die Punktzahlen werden anhand der Relevanz des Modultreibers für eine Komponente vergeben. Die Punktzahlen zur Bewertung der technischen Lösung einer Komponente werden addiert. Das entspricht der Modular Indication Matrix (MIM) [Eri98]. Eine hohe Punktzahl drückt dabei eine hohe Relevanz aus. Andere Komponenten mit ähnlichen Bewertungsprofilen aber vergleichsweise geringerer Punktzahl werden zu demselben Modul zugeordnet. Das heißt, dass die Komponenten mit ähnlichem Bewertungsprofil in der Regel in einem Modul zusammengebracht werden sollen. Die Bewertungen werden durch Vertreter aus verschiedenen Organisationseinheiten mithilfe von Fragebögen durchgeführt. Beispielsweise werden Komponenten, die häufig gewartet werden müssen, für den Modultreiber „Service“ entsprechend hoch bewertet. Bezogen auf den „Service“ können dies zum Beispiel möglichst leicht austauschbare „Service“-Module sein.

Tabelle 4: generische Modultreiber nach der MFD [Eri98]

Produktlebens-phase	**Modultreiber**	**Erläuterung**
Produktentwick-lung und -gestal-tung	Carry-over	Einsatz von Modulen in mehrere Pro-duktgenerationen und/oder Produktfa-milien (langfristig)
	Technological evolution/ technology push	Mögliche Technologieänderungen we-gen neuen Entwicklungen oder stark veränderter Kundenanforderungen
	Planned design changes/ product planning	Mögliche oder geplante Produktände-rungen im Produktleben
Vertrieb/Konfi-guration	Technical specification	Entwicklung von Produktvarianten durch wenige, entkoppelte Module
	Styling	Styling-Module für zukünftige Ände-rung des Produktdesigns
Produktion	Common Unit	Wiederverwendung von Modulen, für geringere Aufwände und der Realisie-rung höherer Stückzahlen
	Process and/or organisa-tion reuse	Ähnliche oder gleiche Prozesse in der Produktion und angemessener Arbeits-umfang für eine Organisationseinheit
Qualität	Separate testing of func-tions	Frühere und einfachere Funktionstests von Modulen vor der Montage
Beschaffung	Black-Box Engineering	Zukauf von Modulen, wenige Zuliefe-rer und Beschaffungsschritte
After Sales	Service/Maintenance	Austausch defekter Module statt Repa-ratur
	Upgrading	Änderung oder Erweiterung der Funk-tionen von Modulen in der Nutzungs-phase
	Recycling	Vereinfachtes Recycling durch die Verwendung von gleichen oder ähnli-chen Materialien in Modulen

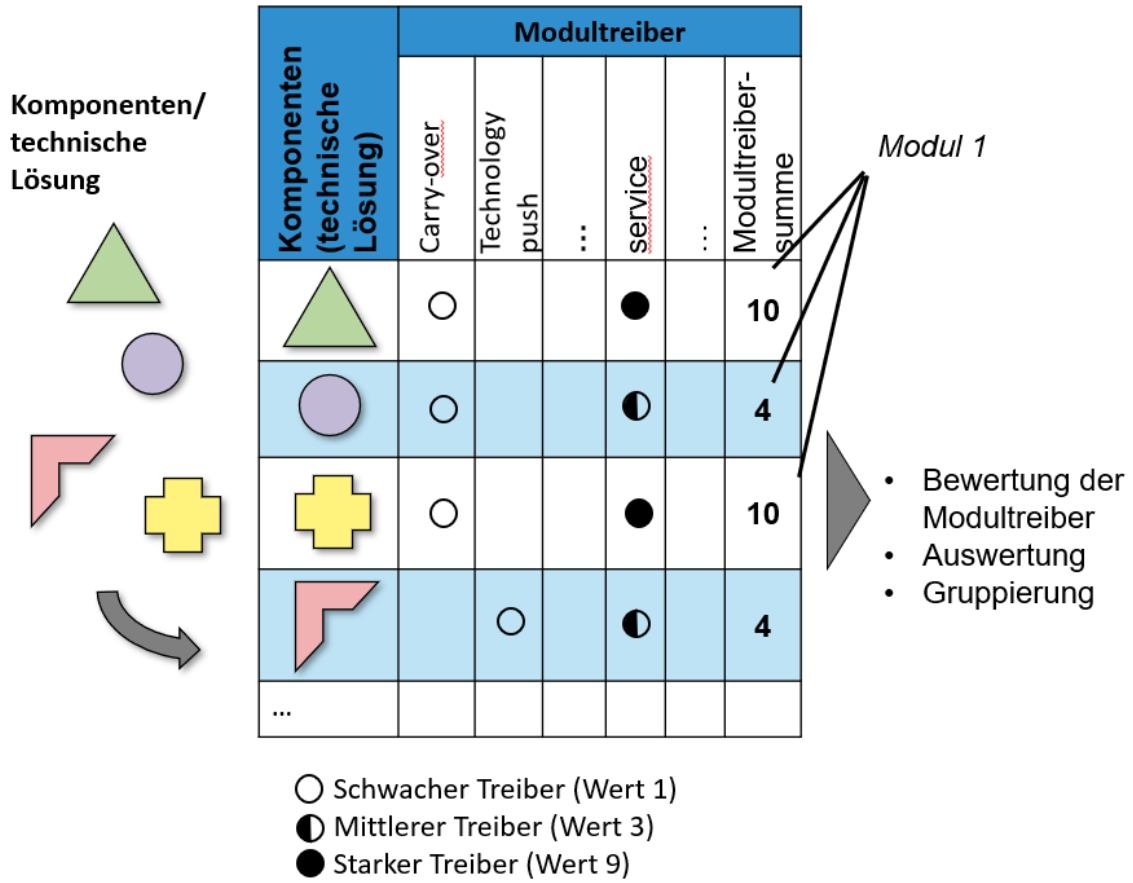


Abbildung 27: Exemplarische Anwendung von MFD

Die **Design Structure Matrix (DSM)** [Ste81] ist ebenso eine Methode zur Bildung von Modulen. Hierbei wird sich auf die technischen Interaktionen zwischen den Modulen fokussiert. Bei der Methode werden unterschiedliche technische Interkationen bewertet. Technische Interaktionen können zum Beispiel mechanische Verbindungen oder energetische Zusammenhänge, wie zum Beispiel der Austausch elektrischer Energie oder das Durchleiten von Flüssigkeiten sein. Anhand dieser Interaktionen wird versucht, die einzelnen Komponenten zu Modulen zu gruppieren. Die Komponenten werden mit Hilfe der DSM paarweise bewertet. Die einfachste Methode ist zum Beispiel die binäre DSM, in der nur die Existenz einer Beziehung bewertet wird. Dabei wird in der Regel eine 1 und X als Bewertungswerte in der Zelle eingesetzt (siehe Abbildung 30). Im Anschluss an die Bewertung werden die Komponenten in den einzelnen Modulen gruppiert. Die DSM kann noch ausführlicher die Bewertung der Interaktionen bzw. Kopplungen zwischen den Komponenten bezüglich der Position, der Energie, der Information und des Materials abbilden (siehe Abschnitt 3.1.2).

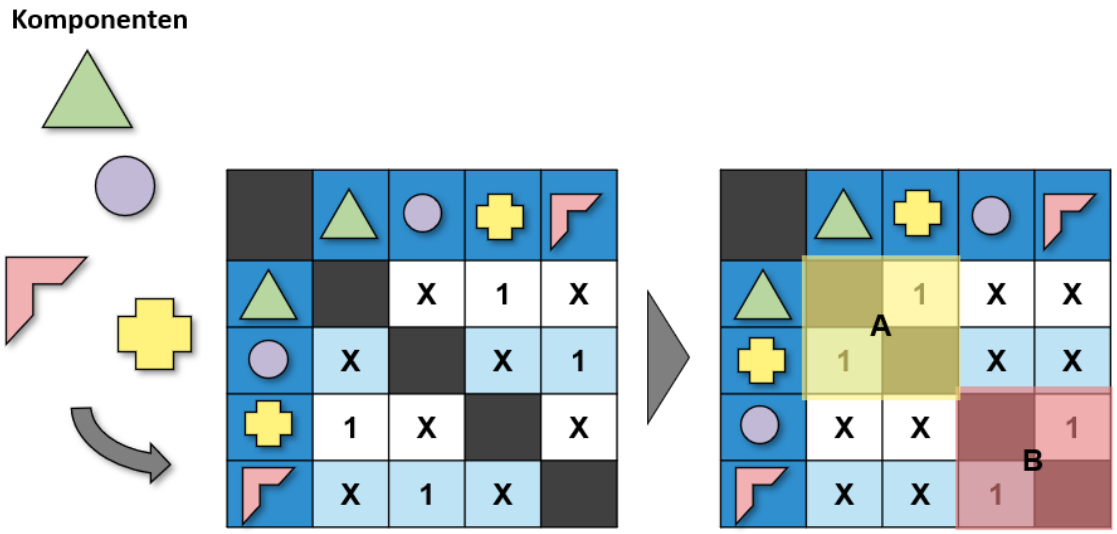


Abbildung 28: Analyse der Modulaufteilung mit Hilfe der DSM

Bisher wurde der gesamte Ablauf der Modulaufteilung, die auf den drei Methoden basiert, dargestellt. Daraus ergeben sich Alternativen von Produktstrukturen, die aus verschiedenen Modulalternativen bestehen. Die Modulalternativen und die aus ihrer Zusammensetzung bestehenden Alternativen der Produktstrukturen werden exemplarisch in der Abbildung 29 dargestellt.

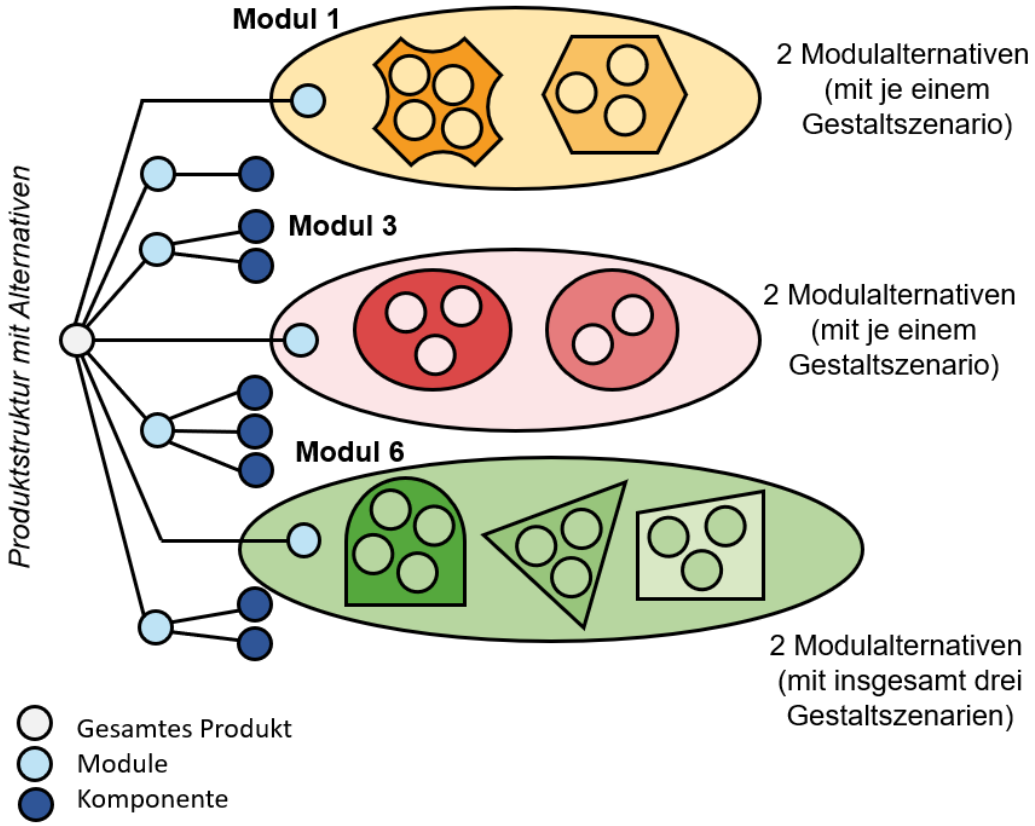


Abbildung 29: Produktstruktur mit Alternativen und unterschiedlichen Gestaltszenarien

Anschließend werden für jede Alternative von Modulen und Produktstrukturen Gestaltszenarien definiert. Die Regel bei der Szenarienentwicklung ist folgende: So viele wie nötig, um ausreichend viele Perspektiven zu schaffen und zukünftige Möglichkeiten abzudecken und gleichzeitig so wenige wie möglich, und die Produktstrukturierung handhabbar zu gestalten. Es hat sich gezeigt, dass vier Szenarien häufig die besten Gestaltungsformen abdecken (siehe Abbildung 30):

- Wirtschaftlichste Alternative: Wirtschaftlichkeit ist ein entscheidender Faktor für den Unternehmenserfolg.
- Leichteste Alternative: Im Rahmen des Modulleichtbaus ist das Gewicht eine entscheidende Funktion.
- Wahrscheinlichste Alternative: Anhand der Erfahrung der Entwicklungsingenieure prognostizierte Alternative, welche Kompromisse aus Wirtschaftlichkeit und Funktionalität einschließt.
- Weitere Alternativen für Betrachtungen: Neben der wahrscheinlichsten Alternative werden weitere Alternativen für die Betrachtung hinzugenommen, denen eine hohe Wahrscheinlichkeit zugeordnet wird, dass sie Verwendung in dem zu entwickelnden Produkt finden.

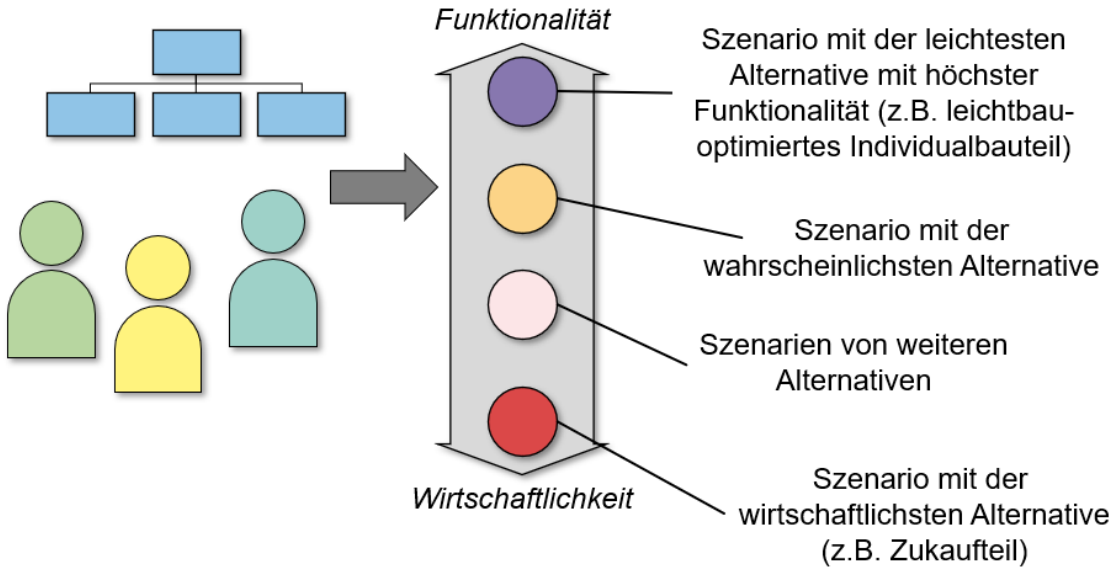


Abbildung 30: Grundsätze für die Erstellung der Gestaltszenarien

Anschließend wird ein Grobkonzept bzw. Gestaltungskonzept für jedes Gestaltszenario erstellt, womit Eigenschaften, wie zum Beispiel das angewandte Fertigungsverfahren, und die Grobgestalt festgelegt werden. Dabei ist zu beachten, dass die Grobkonzeption der Modulalternativen umfangreich gehalten wird und dies keiner Konstruktion im eigentlichen Sinne entspricht. Es zielt darauf ab, mit einem kleinen Aufwand den Erfüllungsgrad der Anforderungen der Modulalternativen bewerten zu können.

4.5 Restriktionen ableiten

Die Methode beginnt mit der Erstellung des Systemmodells, in dem die Anforderungsliste hinterlegt ist (siehe Abschnitt 4.3). Damit wird im zweiten Schritt die Modulaufteilung durchgeführt. Daraus wird eine Produktstruktur mit verschiedenen Alternativen der Module abgeleitet. Hierbei werden für jede Alternative der Module entsprechende Gestaltszenarien der Grobgestaltung definiert. Darauf basierend werden Grobkonzeptionen zu jedem Szenario entwickelt. Die Grobkonzepte bezüglich der Alternativen von Modulen werden anschließend analysiert und bewertet, um die optimale Lösung bzw. die Produktstruktur auszuwählen. Dafür wird in dieser Arbeit der Ansatz zur restriktionsgerechten Entwicklung angewendet [Eve90b]. Die Berücksichtigung der Restriktionen dient zur Bewertung der Grobkonzepte und dazu die Zeit und Kosten, die in den der Entwicklung nachgelagerter Phase des Produktlebenszyklus anfallen, zu reduzieren (siehe Kapitel 2). Daraus ergibt sich die Hauptaufgabe des dritten Arbeitsschritts der Methode: Die Restriktionen auf jedes Gestaltszenario abzuleiten. Im Folgenden wird der Prozessablauf dieses Schritts vorgestellt: Zuerst werden die Anforderungen an das Gesamtsystem, die vom Systemmodell bereitgestellt wurden, auf die Modulebene übertragen. Dann werden die Anforderungen auf der Modulebene durch eine Zuordnung von Konstruktionsrichtlinien und die Anwendung der Hauptmerkmalliste ergänzt (siehe Abschnitt 4.5.1 und 4.5.2). Diese Anforderungen werden abschließend in Restriktionen und funktionale Anforderungen klassifiziert. Die funktionalen Anforderungen und Restriktionen dienen als Kriterien zur Prognose der Modulgestaltung und Bewertung der Alternativen von Modulen.

1) Dekomponieren der Anforderungen auf die Modulebene
2) Vervollständigung der Anforderungen der Module mithilfe der Konstruktionsrichtlinien und der Hauptmerkmalliste
3) Entwicklung der Anforderungen in funktionalen Anforderungen und Restriktionen

Die Anforderungsliste an das Gesamtsystem ist bereits durch das Systemmodell gegeben. Diese Anforderungen an das Gesamtsystem werden zuerst auf die Modulebene dekomponiert. Das bedeutet, dass die einzelnen Anforderungen den entsprechenden Modulen zugeordnet werden müssen. Das wird in Abbildung 31 dargestellt. Anschließend werden die Anforderungen durch die Betrachtung der allgemeinen Konstruktionsrichtlinien und die Hauptmerkmalliste ergänzt. Die Hauptmerkmalliste bietet die Grundlage zur Berücksichtigung der spezifisch produktbezogenen Eigenschaften in der frühen Entwicklungsphase. Die Betrachtung der allgemeinen Konstruktionsrichtlinien, die in dem Abschnitt 4.5.1 ausführlich beschrieben werden, schafft einen Überblick über die Gerechtheit, wie zum Beispiel die Fertigung- oder die Montagegerechtheit. Die Gerechtheiten entsprechen den Restriktionen. Dabei dienen die Restriktionen im Rahmen der Entwicklung sowohl als Randbedingungen auch als Zwangsbedingungen, die die projektbezogenen Einflussgrößen im Sinne einer klar definierten, nicht überschreitbaren Begrenzung an die Konstruktion bezeichnen. Diese Restriktionen werden als Kriterien zur Bewertung der Modulalternativen im Arbeitsschritt „Prognose“ verwendet.

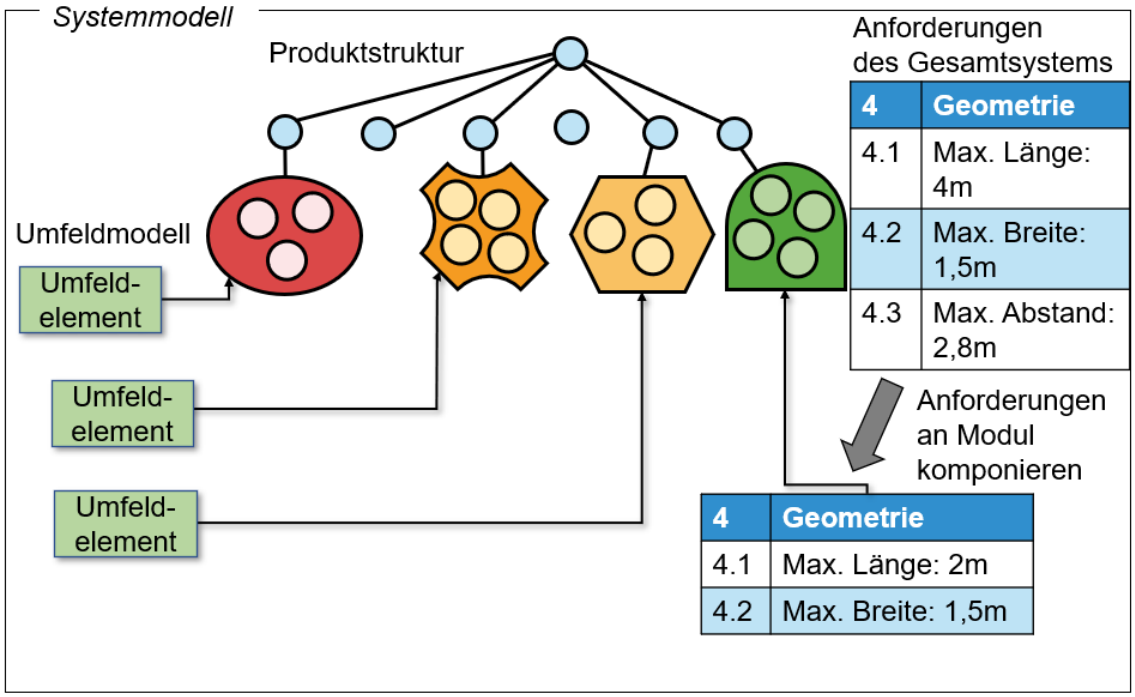


Abbildung 31: Übertragen der Anforderungen auf die Modulebene

Übertragung der Anforderungen auf die Modulebene

Durch das Herunterbrechen der produktspezifischen Anforderungen auf die Modulebene werden die Anforderungen an das Gesamtprodukt auf die einzelnen Module anteilig übertragen. Dadurch soll gewährleistet werden, dass durch die Erfüllung der Anforderungen von den Modulen die Anforderungen an das Gesamtsystem realisiert werden. Der Ansatz zur Auflösung der Anforderungen des Gesamtsystems auf Modulebenen führt dazu, dass ein komplexes Gesamtproblem in abtrennbare bzw. unabhängige Teilprobleme oder Teilaufgaben gegliedert wird. Diese Teilprobleme oder Teilaufgaben können anschließend gesondert betrachtet und losgelöst bearbeitet werden. Dabei ist zu beachten, dass die Schnittstellen und die Einflüsse zwischen den Teilsystemen auch berücksichtigt werden müssen. Die Einbindung in den Gesamtzusammenhang muss dabei stets berücksichtigt werden. Die Auflösung in Teilprobleme oder Teilaufgaben vereinfacht die Lösungsfindung erheblich. Dabei sind die Modulalternativen mit den entsprechenden Anforderungen aus dem Gesamtsystem das Ergebnis.

Das Herunterbrechen der Systemanforderungen auf die einzelnen Module geschieht durch das Dekomponieren der Systemanforderungen unter Berücksichtigung der Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Modulen. Manche Anforderungen lassen sich direkt auf einzelne Module bzw. Bauteile übertragen. Zum Beispiel kann die Leistung eines Fahrzeugs direkt dem Antrieb zugeordnet werden, welcher aus unterschiedlichen Modulen besteht. Bei dem Antrieb muss sich anschließend diese Leistung aus der Zusammenwirkung dieser Module ergeben. Allerdings gibt es noch manche Anforderungen, die Auswirkungen auf alle Module bzw. Bauteile haben. Zum Beispiel kann ein definierter

Verbrauch eines Fahrzeugs durch zahlreiche Maßnahmen erreicht werden und ist ein Zusammenspiel aus allen Bauteilen. Dabei haben zum Beispiel die Geometrie des Gesamtsystems, das Gewicht, die Antriebskomponenten und vieles mehr Auswirkungen auf den Verbrauch. Um die Anforderung an den Verbrauch des Fahrzeugs auf die Modulebene zu komponieren, muss vorher geprüft werden, was jedes einzelne Modul zur Erfüllung der Anforderung beitragen kann oder soll. Dieses Herunterbrechen und Übertragen der Anforderungen muss für jeden Eintrag der Anforderungsliste erfolgen.

Aus den einzelnen Modulen ergeben sich jedoch weitere Anforderungen, die sich nicht direkt aus dem Gesamtsystem ergeben. Diese können sich zum Beispiel aus den unternehmensinternen Voraussetzungen, wie den vorhandenen Fertigungsmitteln ergeben. Konkret kann dies etwa die maximal bearbeitbare Länge eines Bauteils sein, das das Unternehmen eigenständig fertigen kann. Solche Anforderungen müssen ebenso bereits bei der Produktstrukturierung ermittelt und auf der Modulebene berücksichtigt werden.

Vervollständigung der Anforderungen der Module

Im ersten Schritt wurden die produktbezogenen Anforderungen auf die Modulebene heruntergebrochen, so dass jede Modulalternative mit ihren entsprechenden produktspezifischen Anforderungen ausgestattet ist. Zudem werden die wesentlichen Produkteigenschaften bestimmt. Jedoch existieren noch zahlreiche Anforderungen und Restriktionen, die sich zum Beispiel durch die Wahl des Fertigungsverfahrens für verschiedene Alternativen ergeben. Die durch diese Restriktionen resultierenden Auswirkungen werden heutzutage meistens erst später bei der Produktionsvorbereitung ermittelt. Wenn diese Restriktionen nicht realisiert werden, muss im Entwicklungsprozess wieder zurückgesprungen werden. Dies verursacht zusätzliche Iterationsschleifen. Daher ist es für die Minimierung der nachträglichen Änderungen bzw. Iterationen in der Produktentwicklung des Modulleichtbaus notwendig, diese Anforderungen und Restriktionen bereits bei der Erstellung der Produktstruktur zu ermitteln. Diese Restriktionen ergänzen die Anforderungen der Module. Dabei werden für jedes Gestaltszenario die Anforderungen und Restriktionen identifiziert und ergänzt.

Diese Anforderungen und Restriktionen ergeben sich in der Regel aus den Anforderungen, die vom Kunden oder Markt an ein Produkt gestellt werden oder aus zurückfließenden Anforderungen nachgelagerter Unternehmensbereiche resultieren. Die in der Praxis bewährte Methode zum Ergänzen und Erweitern der Anforderungen ist das Arbeiten nach einer Leitlinie mit einer Hauptmerkmalliste [PBF+13]. Zudem hat sich im Rahmen der Produktentwicklung gezeigt, dass Konstruktionsrichtlinien (wie zum Beispiel die Beanspruchungsgerechte Produktentwicklung) ein ideales Mittel sind, um spätere Einflüsse sichtbar zu machen. Deswegen soll zusätzlich zu der Hauptmerkmalliste die Konstruktionsrichtlinien untersucht werden. Dies dient vor allem dazu, den gesamten Produktlebenszyklus bei der Produktentwicklung zu betrachten.

Somit ist die Herangehensweise zur Vervollständigung der Anforderungen der Module wie folgt: Zuerst sollen die Konstruktionsrichtlinien untersucht werden. Daraus wird sichergestellt, dass der gesamte Produktlebenszyklus betrachtet wird und die allgemeinen Restriktionen bezüglich der allgemeinen Gerechtheit des Produktlebenszyklus für den Modulleichtbau berücksichtigt werden [PBF+13] und [Ehr09]. Anschließend wird mit Hilfe der Hauptmerkmalliste analysiert, welche spezifischen, eigenschaftsbezogenen Anforderungen der Module bestehen. Hierbei liegt der Fokus vor allem darauf, dass die Anforderungen herausgesucht werden, die die Konstruktionsentscheidungen bei der Auswahl der Produktstruktur beeinflussen.

- Konstruktionsrichtlinien: Ermittlung der Restriktionen auf der Modulebene
- Hauptmerkmalliste: Ermittlung der eigenschaftsbezogenen spezifischen Anforderungen auf der Modulebene

4.5.1 Konstruktionsrichtlinie

Nachfolgend wird vorgestellt, wie die Restriktionen aus den Konstruktionsrichtlinien ermittelt werden. Dabei werden im Rahmen der Anwendung der Methode im ersten Schritt alle Konstruktionsrichtlinien untersucht, ob diese auf die zu erstellende Modulalternative anzuwenden sind. Im Wesentlichen sind die folgenden Richtlinien zu berücksichtigen:

- Beanspruchungsgerecht [unter anderem PBF+13, Ehr09]
- Fertigungsgerecht [unter anderem DIN8580, Fal00, Wil08, Weg07, RK59, Rot94a]
- Montagegerecht und Demontagegerecht [unter anderem BA92, Dah90, MO86, KR03, LW06, VDI999]
- Nutzungsgerecht [zum Beispiel Vaj14]
- Transportgerecht und Handhabungsgerecht [zum Beispiel VDI3237, LW06]
- Wartungsgerecht und Instandhaltungsgerecht [zum Beispiel DIN31051, VDI2246, Van91] sowie
- Umweltgerecht und Recyclinggerecht [unter anderem BL94, BES94, Ste88, VDI1089, VDI2243]

Aus den oben dargestellten allgemeinen Konstruktionsrichtlinien können die wesentlichen Restriktionen im Produktlebenszyklus abgeleitet werden. Es existieren jedoch weitere Richtlinien bzw. weitere Restriktionen, die im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter betrachtet werden. Eine Erfassung aller denkbaren Richtlinien und Restriktionen ist nicht möglich und nicht sinnvoll. Entsprechend muss eine geeignete Auswahl stattfinden. Die oben genannten bilden dabei Hinweise auf Richtlinien, welche besonders Berücksichtigung beim Modulleichtbau finden. Dies soll somit einen Überblick über die wesentlichen Richtlinien geben, die in jedem Fall Berücksichtigung finden sollten.

Bisher wurde ein Überblick über die wesentlichen konstruktiven Richtlinien für die restriktionsgerechte Produktentwicklung geschaffen, die in jedem Fall Berücksichtigung finden sollten. Das heißt, dass diese auch für den Modulleichtbau bzw. für die Modularisierung sowie den Leichtbau gültig sind. Zudem existieren weitere Restriktionen, die im Wesentlichen Teilaspekte beschreiben. So ist zum Beispiel die fügegerechte Konstruktion als ein Teilaspekt der fertigungsgerechten Konstruktion zu betrachten [PBF+13]. Allerdings sind diese Restriktionen stark von individuellen Anforderungen der Entwicklungsprojekte abhängig und können nicht für alle Entwicklungen vereinheitlicht bzw. generalisiert werden [PBF+13, Fra6].

Im Folgenden wird auf die oben aufgelisteten sieben Richtlinien eingegangen und eine Herangehensweise an die Ableitung von Anforderungen bzw. Restriktionen aus den Richtlinien vorgestellt. Zudem wird herausgestellt, auf welche Aspekte der Konstruktionsrichtlinien bei der Auswahl der Module im Rahmen des Modulleichtbaus Rücksicht genommen werden muss.

Die Zuordnung der Richtlinien zu den Modulen dient auch dazu, den Entwicklungsprozess deutlich zu beschleunigen. Weil wenn die Richtlinien bereits am Anfang herausgesucht und zugeordnet werden können, ist es wahrscheinlich, dass mögliche Konstruktionsfehler vermieden werden. Sie sollen den Entwickler dabei unterstützen, eine zielgerichtete Entwicklung vorzunehmen. Gleichzeitig dient die Zuordnung der Richtlinien zu den Modulen einer besseren Vorbereitung und Einschätzung der Gestaltszenarien.

Beanspruchungsgerechte Produktentwicklung

Die beanspruchungsgerechte Konstruktion zielt hauptsächlich darauf, dass jede Komponente mit einer Mindestlebensdauer ausgelegt wird und keine unvorhergesehenen Funktionsausfälle in der Nutzung passieren [PBF+13, Wec91]. In einschlägigen Normen, Richtlinien und Publikationen findet man zahlreiche Berechnungsalgorithmen zur beanspruchungsgerechten Auslegung von Bauteilen [zum Beispiel BK86, Czi89, Ehr09, Sch11, PBF+13]. Diese sind in der Regel nach Werkstoffen oder typischen Maschinenelementen wie Passfedern, Lagern oder Verzahnungen sortiert. Einen Überblick über Berechnungs- und Auslegungsalgorithmen zum Beispiel von Stählen bei wiederholter Beanspruchung bietet die VDI-Richtlinie 2227 [VDI2227].

Im Rahmen des Leichtbaus ist diese Richtlinie bei allen Modulen anzuwenden. Sie dient dazu, dass die zulässige Beanspruchung in allen Querschnitten nicht überschritten wird. Somit wird die Zielsetzung des Leichtbaus, also ein geringstes Gewicht unter höchster Ausnutzung, angestrebt [Kle09].

Fertigungsgerechte Produktentwicklung

Unter fertigungsgerechter Produktentwicklung sind gestalterische Maßnahmen am Produkt zu verstehen, die dazu dienen, eine möglichst einfache Fertigung und fertigungsgerechte Komponente und deren Montage zu ermöglichen. Für eine fertigungsgerechte Pro-

duktauslegung müssen frühzeitig die notwendigen Informationen über mögliche Fertigungstechnologien herangezogen werden. In der DIN8580 [DIN8580] werden zahlreiche Fertigungstechnologien beschrieben. Die fertigungsgerechte Produktentwicklung zielt unter anderem darauf ab,

- den Fertigungsprozess vereinfacht zu gestalten und die Fertigungsprozesse an die vorhandenen Möglichkeiten des Unternehmens anzupassen,
- die Prozesssicherheit zu erhöhen sowie
- den Automatisierungsgrad zu erhöhen, um die Produktion wirtschaftlich zu gestalten.

Im Bereich der fertigungsgerechten Konstruktion sind die Normen, Richtlinien und Nachschlagwerke besonders zahlreich. Das Deutsche Institut (DIN) für Normung, der Verein Deutscher Ingenieure (VDI) oder der Verband der Automobilindustrie (VDA) und der Verband des Deutschen Maschinen- und Anlagenbaus (VDMA) haben für einzelne Fertigungsverfahren Vorgehensweisen und Beispielkataloge erarbeitet, damit sich ein Werkstück möglichst ohne Komplikationen mit dem jeweiligen Verfahren herstellen lässt.

Diese Richtlinien sind insbesondere für den Modulleichtbau wichtig. Neben der Realisierbarkeit entscheidet die Anwendung der Richtlinien über die Wirtschaftlichkeit der Fertigung.

Montagegerechte Produktentwicklung

Im Montageprozess werden Einzelteile, Baugruppen und Module bis zum fertigen Produkt zusammengebaut [PBF+13]. Dabei ist eine Vielzahl unterschiedlicher Anforderungen an die Montageprozesse früh im Entwicklungsprozess zu betrachten. Unter einer montagegerechten Produktentwicklung wird auf eine optimierte Produktgestalt bzw. deren Aufbau angestrebt. Im Folgenden werden die Hauptziele der montagegerechten Produktentwicklung nach [Boo92, Eve03] aufgelistet:

- Reduzierung der Anzahl von Bauteilen (zum Beispiel durch Integralbauteile)
- Verringerung der Anzahl von Füge- bzw. Trennrichtungen,
- Begrenzung auf wenige Baugruppen, die die Produktvarianten unterscheiden,
- Standardisierung der Schnittstellen von Bauteilen,
- Bereitstellen von Positionier- und Justierhilfen sowie Sollbruchstellen,
- Verwendung standardisierter Vormontagebaugruppen.

Es sind Normen, Richtlinien und Nachschlagwerke mit Beispielkatalogen für die montage- und demontagegerechte Produktentwicklung zu finden, zum Beispiel [VDI2860, VDI3237, Kol94, PBF+13, VDI999, BES94, Ehr93, KR03, LW06]. Darüber hinaus stehen zahlreiche Methoden zur montage- und demontagegerechten Produktentwicklung zur Verfügung, zum Beispiel Design for Manufacture and Assembly (DFMA) nach

Boothroyd [Boo05], montagegerechte Produktgestaltung nach Bäßler [Bäß87], Konstruktionssystem zur Unterstützung der montagegerechten Produktgestaltung nach DAHL[Dah90]. Dabei findet die montagegerechte Produktgestaltung mit dem Aufbau der Produktstruktur statt. Dann folgt die Feingestaltung der Einzelteile. Abschließend werden eine Bewertung und eine Schwachstellenanalyse durchgeführt.

Eine belastungsoptimierte Gestalt, wie sie beim Leichtbau gefordert wird, steht den Zielen einer montagegerechten Entwicklung häufig entgegen. Zum Beispiel werden für eine einfache Montage häufig standardisierte Schnittstellen verwendet, die meistens überdimensioniert sind. Dahingegen lassen sich mit Hilfe modularer Bauweisen häufig Produkte einfach entwickeln, die einfach zu montieren sind. Im Rahmen des Modulleichtbaus ist insbesondere zu bewerten, ob das individuell gestaltete Bauteil zu längeren Montagezeiten und damit erhöhten Kosten und Aufwänden in der Montage führen kann.

Transport- und Handhabungsgerechte Produktentwicklung

Die transport- und handhabungsgerechte Produktentwicklung hat das Ziel, während verschiedener Produktlebensphasen Transport- und Handhabungsvorgänge zu vermeiden oder zu vereinfachen. Hierfür sind vor allem Montage und Demontage sowie Fertigung relevant. Die transport- und handhabungsgerechte Produktentwicklung fokussiert sich auf die Optimierung der Produkte hinsichtlich deren Handhabung und Transport in der Produktion und Nutzung. Zahlreiche Eigenschaften von Bauteilen haben Einfluss auf deren Verhalten bei der Handhabung. Das sind unter anderem Geometrie, Masse, Werkstoff und Oberflächenbeschaffenheit [PBF+13]. Zum Beispiel in [LW06] wird der Einfluss der Geometrie der Bauteile auf den Schwierigkeitsgrad der Handhabung dargestellt. Im Bereich der transport- und handhabungsgerechten Konstruktion sind bei Koller, Pahl/Beitz und in der VDI-Richtlinie 3237 [Kol94, PBF+13, VDI3237] Beispielsammlungen zu finden. Diese Richtlinien sind genauso gültig für den Modulleichtbau.

Wartungs- und Instandhaltungsgerechte Produktentwicklung

Der Istzustand entspricht nach einer bestimmten Zeit im Rahmen der Produktnutzung nicht mehr dem Sollzustand. Eine genaue Vorheraussage einer solchen Abweichung des Istzustands vom Sollzustand ist dabei häufig schwierig. Da ein einfacher Zugang zur Messung dieser Abweichungen meistens nicht gegeben ist. Das kann zu Betriebsstörungen und damit Gefährdungen führen. Das Erreichen der Schadengrenze muss durch die vorausschauende Instandhaltung vermieden werden [PBF+13]. Daraus ergibt sich der Aspekt der wartungs- und instandhaltungsgerechten Produktentwicklung. Ziel der entsprechenden Maßnahmen von der wartungs- und instandhaltungsgerechten Produktentwicklung ist es, die Nutzungsphase zu verlängern und eine eventuell erforderliche Reparatur zu vermeiden oder zu erleichtern. In der Literatur [VDI2246, DIN31054] und [Van91] sind grundsätzliche Maßnahmen zur Instandhaltung zu finden. DIN 31052 [DIN 31052] bietet die allgemeinen Wartungsanweisungen an. In [GNK11] wurde ein Konzept zur

Unterstützung im Produktentwicklungsprozess für ein Konzept zur instandhaltungsgerechten Produktentwicklung ausgearbeitet. Im Folgenden werden typische Maßnahmen für die Wartungs- und Instandhaltungsgerechtheit erläutert [Leb95]:

- Modulare Bauweise mit standardisierten Schnittstellen, um Austausch von defekten bzw. verschlissenen Komponenten zu vereinfachen,
- Schnelle Lokalisierung von defekten Komponenten bei Funktionsausfall.

Umwelt- und Recyclinggerechte Produktentwicklung

Die umwelt- und recyclinggerechte Produktentwicklung zielt darauf, dass die Rohstoffe im Sinne eines umweltverträglichen Verhaltens möglichst gespart und rückgeführt werden [PBF+13]. Nach der VDI-Richtlinie 2234 [VDI2234] entspricht das Recycling einem Teilaspekt der Entsorgung. Es beinhaltet die Wieder- und Weiterverwendung von Produkten oder Komponenten davon. Die Entsorgung umfasst die Beseitigung und Vernichtung. Im Weiteren wird deshalb ausschließlich die recyclinggerechte Konstruktion behandelt.

Die Hauptziele einer recyclinggerechten Produktentwicklung sind,

- die Verwendung von Herstellungsverfahren mit geringem Abfallaufkommen,
- eine lange Nutzungsphase vor allem durch Wartungs-, Instandhaltungs- oder Aufarbeitungsmaßnahmen und
- ein Reststoffkreislauf mit kleiner Menge der zu beseitigenden oder zu vernichtenden Komponenten bzw. Stoffen

Allgemeine Hinweise zur recyclinggerechten Entwicklung geben die VDI-Richtlinie 2243 und Brinkmann et al. [VDI2243, BES94]. Darüber hinaus gibt es eine Reihe von Umweltrichtlinien und –gesetzen [zum Beispiel AbG86, TAG90]. Ruhland [Ruh06] entwickelte eine Methode zur recyclinggerechten Automobilentwicklung. Ruhland hat dabei ein Prozessmodell entwickelt, bei dem mit Hilfe der Szenario-Technik in frühen Phasen der Entwicklung Recyclingziele abgeleitet werden. Für die späteren Entwicklungsphasen wurde ein Recycling-Problemlösezyklus entwickelt, mit dem die Zielerreichung sichergestellt werden soll. Darüber hinaus existiert umfangreiche Literatur im Rahmen der recyclinggerechten Produktentwicklung. Zum Beispiel entwickelte Wende ein Modell zur Bewertung und Optimierung der Recyclinggerechtheit [Wen91]. Dabei werden anhand der Richtlinie VDI2221 [VDI2221] für jede Phase recyclingbezogene Bewertungskriterien definiert. Neumann entwickelte ein Konzept zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit von Recyclingmaßnahmen [Neu93]. Basierend darauf wurde ein Ansatz von Boes [Boe00] entwickelt. Alle diese Bewertungskriterien zur Recyclinggerechtheit sollten auf alle Module angewendet werden.

4.5.2 Eigenschaftsbezogene spezifische Anforderungen

Die Hauptmerkmalliste dient als Leitlinie, um mit deren Hilfe durch Assoziationen zu weiteren Erkenntnissen zu den Anforderungen zu gelangen. Konkret sollen durch die Hauptmerkmalliste weitere Anforderungen an das Produkt ausgehend von den Hauptmerkmalen identifiziert werden [PBF+13]. Die Hauptmerkmale werden hierbei typischerweise in die Bereiche Konzept, Produktlebenszyklus und Organisation unterteilt. Diese Aspekte sollen den Entwicklern eine Orientierung geben. Sinnvoll ist es hierbei, diese nacheinander abzuarbeiten. Jedoch bietet Simultaneous Engineering die Möglichkeit, unterschiedliche Aktivitäten überlappt und parallel auszuführen [Vaj20]. Zwischen den einzelnen Hauptmerkmalen bestehen zwar Beziehungen (das Gewicht hat z.B. auch Auswirkungen auf die Transportfähigkeit), jedoch ist es sinnvoll, erst die Anforderungen an das Konzept abzuschließen, bevor Anforderungen des Produktlebenszyklus oder der Organisation ermittelt werden. Aus den Anforderungen des Produktlebenszyklus werden die Restriktionen an die Produktentwicklung ermittelt. In dem Bereich Organisation werden projekt- und unternehmensspezifische Anforderungen an das Entwicklungsprojekt zusammengefasst.

Tabelle 4: Hauptmerkmalliste

	Hauptmerkmal	Beispiele
Konzept	**Stoff**	• Ein- und Ausgangsprodukte • Rohstoffe • Hilfsstoffe …
	Energie	• Leistung • Verlust…
	Signal	• Ein- und Ausgangssignale • Signalformen …
	Geometrie	• Dimension • Bauraum …
	Mechanik	• *Gewicht* • *Lasten …*
	Elektrik / Elektronik	• *Nennspannung* • *Sicherung …*
	Software	• *Schnittstellen* • *Updates …*
	Sicherheit	• *Betriebssicherheit* • *Arbeitssicherheit …*
	Ergonomie	• *Bedienbarkeit* • *Haptik …*
	Industrial Design	• *Ästhetik* • *Design …*

	Hauptmerkmal	Beispiele
Produktlebensphasen	**Einkauf**	• *Lieferanten* • *Zukaufteile …*
	Fertigung	• *Bearbeitungsdauer* • *Qualität und Toleranzen* • *Einschränkungen durch Maschinenpark …*
	Kontrolle	• *Mess- und Prüfverfahren* • *Notwendige Prüfeinrichtungen …*
	Montage	• *Zusammenbau* • *Werkzeuge …*
	Instandhaltung	• *Reparaturen* • *Wartungsfreiheit* • *Inspektionen …*
	Recycling	• *Wiederverwendbarkeit* • *Aufbereitung* • *Entsorgung …*
	Transport	• *Transportgröße* • *Lieferzeiten …*
	Gebrauch	• *Verschleiß* • *Nutzbarkeit* • *Einsatzort …*
Organisation	**Planung**	• *Zielkosten* • *Indirekte Kosten* • *Werkzeugkosten …*
	Nachhaltigkeit	• *Öko-Bilanz …*
	Markt	• *Verkaufszahlen* • *Wettbewerber …*

Aus der Hauptmerkmalliste werden dann die Anforderungen abgeleitet. Hierzu wird jeder einzelne Punkt der Hauptmerkmalliste durchgegangen und daraus die Anforderungen für die Module abgeleitet. Im ersten Schritt werden Aussagen getätigt, die die Anforderungen an das Produkt ausdrücken. Dies geschieht aus allen Sichten. Sichten können hierbei zum Beispiel die Kundensicht oder die Sicht der Produktion oder des Entwicklers sein. Anschließend werden diese Aussagen weiter präzisiert, bis quantifizierbare Anforderungen daraus abgleitet wurden. Kramer [KK97] hat dies mit einem Beispiel wie folgt vorgeschlagen:

1. Stufe ist für Aussagen: –Einfache Wartung als der Kundenwunsch.

2. Stufe ist für die Vertiefung der Aussagen: – Kundenwunsch mit möglichen Inhalten erweitern. Zum Beispiel lange Wartungsintervalle realisieren und einfache Wartung ermöglichen. Arbeitsschritte einfach erlernbar planen.

3. Stufe ist für die Präzisierung der vertieften Aussagen: – Lange Wartungsintervalle realisieren: beispielsweise mindestens 5000 Betriebsstunden überstehen. Zahnräder müssen alle 8.000 Betriebsstunden geschmiert werden. – Einfache Wartung ermöglichen: Wartungsdeckel mit handbedienbaren Werkzeugen vorsehen. Einfache und direkte Zugänge zum Zahnrad schaffen. Übliches Schmierfett verwenden. – einfach erlernbare Arbeitsschritte: Arbeitsschritte zur Wartung separat in Bedienungsanleitung erklären. Hinweisschilder, wo die Wartungsdeckel sich befinden.

Das Ergebnis sind eigenschaftenbezogene spezifische Anforderungen, die im Rahmen der Hauptmerkmalliste abgeleitet wurden, bezüglich des zu entwickelnden Moduls. Bisher wurden alle Anforderungen an das Modul ermittelt. Dieser Vorgang muss für alle Produktvarianten durchgeführt werden. Dies ist erforderlich, da sich die Anforderungen der Gestaltszenarien voneinander unterscheiden. Ein gefrästes Bauteil hat andere Anforderungen an die Fertigung als ein gegossenes Bauteil.

Darauf basierend werden die Anforderungen bei jeder Modulalternative in funktionale und nicht-funktionale Anforderungen klassifiziert. Die nicht-funktionale Anforderungen können zum Beispiel nach der Gliederung in [PL11] erfolgen. Demgegenüber können die funktionalen Anforderungen, durch die der Zweck vom Produkt ermöglicht werden soll, festgelegt werden (siehe Abschnitt 2.1). Diese Klassifizierung ist zielführend, um die optimale Produktstruktur nach dem Erfüllungsgrad der Anforderungen auszuwählen. Ein Beispiel für eine funktionale Kundenanforderung an einen Pkw wäre der Wunsch nach einem möglichst geringen Verbrauch. Nicht-funktionale Anforderungen sind zum Beispiel Wünsche nach einer bestimmten Lackfarbe eines Pkws, die nicht als Funktionsbedarf für einen geplanten Einsatzzweck für zum Beispiel Polizei oder Feuerwehrfahrzeuge notwendig ist. Restriktionen entsprechen in der Regel nicht-funktionalen Anforderungen. Sie zielen nicht auf die primären Funktionalitäten eines Produktes und stellen in der Regel die Rahmenbedingungen bei der Produktentwicklung dar. Zum Beispiel muss bei der Entwicklung die fertigungsbedingte Restriktion der Größe eines Bauteils. [PBF+13]

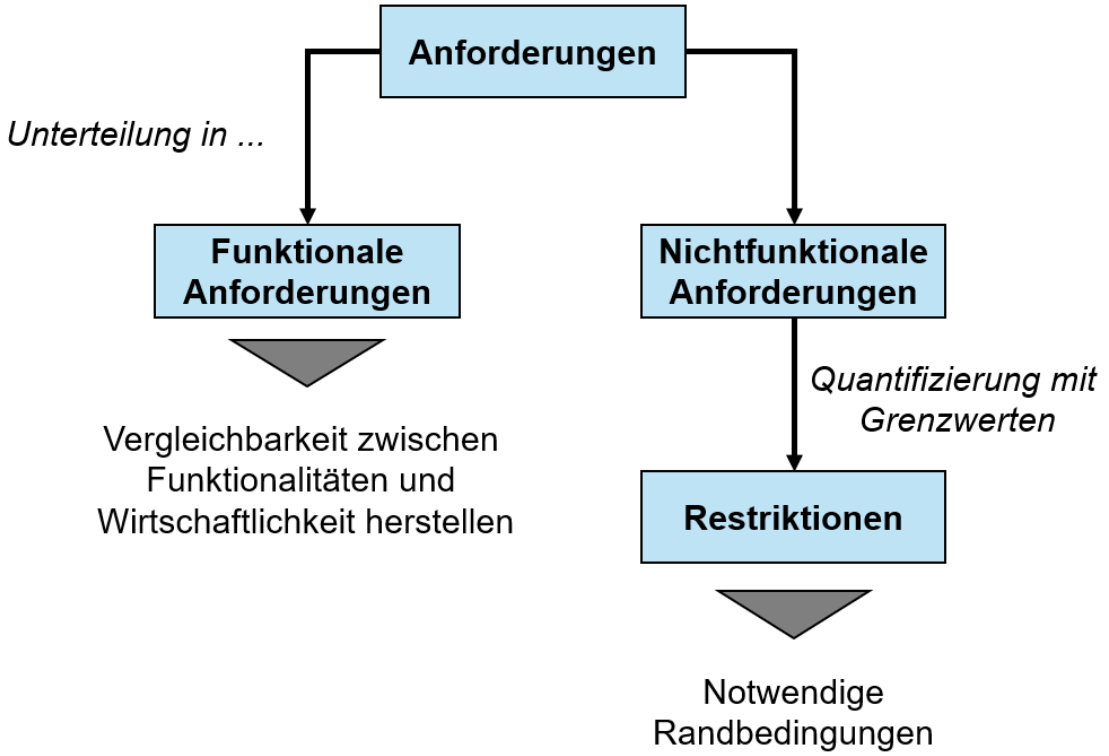


Abbildung 32: Klassifizierung von Anforderungen

4.5.3 Konfliktäre Anforderungen zwischen der Modularisierung und dem Leichtbau

Bisher wurde die allgemeine Vorgehensweise zur Ableitung der Anforderungen von Modulalternativen dargestellt. Im Folgenden wird diese Vorgehensweise auf den Modulleichtbau konkretisiert. Dabei werden anhand der konfliktären Anforderungen zwischen der Modularisierung und dem Leichtbau diese Vorgehensweise für den Modulleichtbau spezifiziert. Das heißt, dass die sensitiven Hauptmerkmale für Leichtbau zuerst ausgearbeitet werden. Dann wird bei der Konstruktionsentscheidung über die sensitiven Hauptmerkmale besonders auf die konfliktären Anforderungen geachtet. Dafür werden zuerst die Elemente der Hauptmerkmalliste untersucht, die für die Leichtbauproduktstrukturen entscheidend sind. Anschließend wird geschaut, inwieweit sich diese Modularisierungszielen konträr gegenüberstehen. Somit können die Anforderungen in den einzelnen Produktlebensphasen analysiert werden und daraus die konfliktären Restriktionen zwischen beiden Bauweisen abgeleitet werden. In der nachfolgenden Abbildung 33 werden die relevanten Nachweisarten für Leichtbaustrukturen illustriert. Daraus ergeben sich die zu betrachtenden Aspekte des Leichtbaus. Im Wesentlichen werden nur die Hauptmerkmale **Stoff, Geometrie und Mechanik** aus der Hauptmerkmalliste durch den Leichtbau beeinflusst. Daher muss bei Konstruktionsentscheidungen über die drei Hauptmerkmale besonders auf die konfliktären Anforderungen zwischen der Modularisierung und dem Leichtbau geachtet werden.

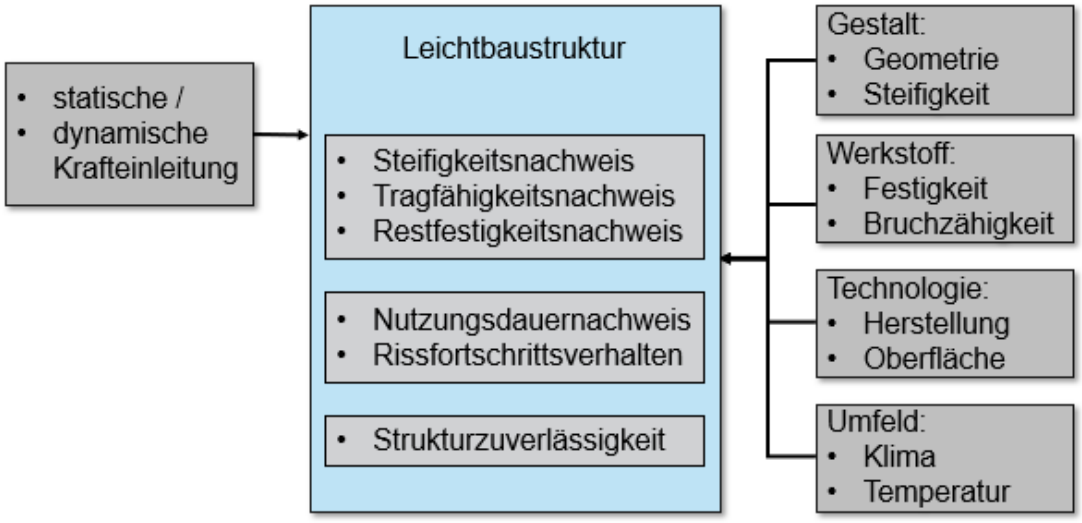


Abbildung 33: Nachweisarten für Leichtbaustrukturen nach [AUT92]

Die konfliktären Anforderungen ergeben sich aus den konfliktären Zielsetzungen zwischen der Modularisierung und dem Leichtbau. Diese wurden bereits in Abschnitt 2.2.3 dargestellt:

- Modulare Baustrukturen mit geringen Produktkosten
- Möglichst geringes Gewicht des Produktes

Das Ziel der Modularisierung ist somit eine hohe Wirtschaftlichkeit des Produktes. Es steht jedoch dem Leichtbau häufig durch eine höhere Anzahl an Schnittstellen und den sich daraus ergebenden konstruktiven Schwachstellen, die in zusätzlichem Gewicht resultieren, entgegen. Insbesondere wenn bei der Entwicklung keine sorgfältige und ganzheitliche Konzeption vorgenommen wurde. Zudem führt die Wiederverwendung der Module in unterschiedlichen Endprodukten häufig zu Unter- oder Überdimensionierungen [Gum15]. Dies widerspricht der Zielsetzung des Leichtbaus. Im Umkehrschluss führt der Einsatz vom Leichtbau wiederum häufig zu einer Erhöhung der Produktkosten [Kle09]:

- Einsatz von hochfesten und teureren Materialien
- Längere Entwicklungsdauer aufgrund von mehr Iterationsschleifen
- Anwendung komplexerer Fertigungsverfahren
- Komplexere Geometrien und dadurch steigende Bearbeitungskosten

Die konfliktären Zielsetzungen dienen zur Ableitung der Restriktionen des Modulleichtbaus. Mit den Restriktionen werden die einzelnen Modulalternativen bewertet. Hierbei muss geprüft werden, ob die Regeln zur Leichtbauoptimierung des Produktes zu einer Verringerung des Gewichts führen können, ohne dass die Wirtschaftlichkeit zu stark beeinträchtigt wird. Grundlage für die Leichtbauoptimierung bilden hierbei die Regeln zu einer leichtbaugerechten Konstruktion.

Tabelle 5: Regeln zur leichtbaugerechten Konstruktion [Kle09, S67]

Haupt-merkmale	Beispiele
1	*Direkte Krafteinleitung und Kraftausgleich:* Einleitung der Kräfte in die Hauptträgerstruktur. Umleitungen und Umlenkungen führen zur Überdimensionierung und zur Erhöhung des Eigengewichts
2	*Realisierung möglichst größer Flächenträgheits- bzw. Widerstandsmomente:* Umsetzung großer Flächenträgheitsmomente bei möglichst kleiner Fläche für biege-, torsions- und knickgefährdete Bauteile
3	*Feingliederung von Strukturen:* Versteifung von Flächentragwerken bei kleiner Querschnittsfläche durch eine aufgelockerte Bauweise
4	*Nutzung von natürlicher Stützwirkung durch Krümmung:* Biege-, Knick- und Beul-Steifigkeit von ebenen Scheiben und Platten kann durch Vorkrümmung um ein Vielfaches erhöht werden
5	*Gezielte Versteifung von Konstruktionen in den Hauptbelastungsrichtungen:* Einbringen von Ortho- und Anisotropie kann die Steifigkeit eines Bauteils in bestimmten Vorzugsrichtungen anheben

Daraus ist zu erkennen, dass all diese Aspekte auf eine Gestaltänderung oder die Verwendung anderer Materialien abzielen. Die Konflikte zwischen Modularisierung und Leichtbau resultieren somit vor allem in der Gestalt, dem verwendeten Material und den verwendeten Fertigungsverfahren. Diese drei Aspekte entscheiden darüber, ob ein bestehendes Modul oder eine neue, individuelle Leichtbaukonstruktion genutzt werden soll. Der Vorteil von Leichtbau ist dabei immer das geringere Gewicht, während die Vorteile von Modularisierung geringere Aufwände und geringere Produktkosten sind. Das geringere Gewicht beim Leichtbau ist jedoch nur selten ein Selbstzweck. In der Regel wird versucht, durch das geringere Gewicht einen weiteren funktionalen Nutzen aus der Gewichtsreduktion zu ziehen. Bei Fahrzeugen kann dies zum Beispiel der geringere Verbrauch sein oder eine bessere Fahrleistung. Bei Produktionsmaschinen kann z.B. durch

eine geringere zu bewegende Masse die Bearbeitungsgeschwindigkeit erhöht werden. Hinter der Gewichtsreduzierung steht somit ein funktionaler Nutzen für das Produkt.

Das Ziel der Modularisierung kann als eine Erhöhung der Wirtschaftlichkeit und eine Steigerung der Produktsicherheit durch bewährte Komponenten zusammengefasst werden. Der Kompromiss zwischen Modulen und individuellen Leichtbaukomponenten lässt sich somit auf einen Kompromiss zwischen Wirtschaftlichkeit und Funktionalität herunterbrechen. In den nachfolgenden Abschnitten wird genau dies versucht, in dem alle funktionalen Anforderungen auf eine Kennzahl verrechnet werden und diese mit der Wirtschaftlichkeit verglichen werden. Anschließend wird jedes Gestaltszenario mit einer Kennzahl belegt, woraus sich dann die Produktstruktur ableitet. In dem nachfolgenden Abschnitt wird dargestellt, wie für die einzelnen Szenarien die Erfüllung der Restriktionen und der Anforderungen geprüft wird. Werden alle Restriktionen erfüllt, findet der Vergleich zwischen der jeweiligen Wirtschaftlichkeit und Funktionalität aller Szenarien statt.

4.6 Prognose des Erfüllungsgrades

Mit Abschluss des letzten Arbeitsschrittes „Restriktionen ableiten“ erhält man eine Produktstruktur, bei der die Anforderungen den einzelnen Modulen bzw. den einzelnen Gestaltszenarien zugeordnet sind. Das wesentliche Vorgehen zur Auswahl der Produktstruktur basiert auf der Untersuchung, inwieweit die einzelnen Gestaltszenarien die Anforderungen erfüllen. Dabei wird zuerst für jedes Gestaltszenario untersucht, ob dieses die Restriktionen erfüllt. Die Aussage, bezogen auf die Restriktionen, ist in der Regel eindeutig, also das Ergebnis der Abschätzung ist entweder, dass alle Restriktionen eingehalten werden oder dass diese nicht durch das Gestaltszenario eingehalten werden können. Werden diese nicht eingehalten, wird dieses Gestaltszenario nicht weiterverfolgt und für die Entwicklung verworfen. Hierbei wird angenommen, dass alle Restriktionen nicht verletzbar sind.

Darüber hinaus wird für funktionale Anforderungen untersucht, inwieweit die Gestaltszenarien diese Anforderungen erfüllen. Dabei wird im Rahmen dieses Schritts eine Abschätzung gemacht, in welchem Maß das Gestaltszenario die Anforderung erfüllt. Bei der Anforderung nach einem möglichst geringen Bauteilgewicht muss zum Beispiel prognostiziert werden, wie schwer das zu entwickelnde Bauteil des Gestaltszenarios wird.

In diesem Abschnitt wird auf diese Prognose der Erfüllung der Anforderungen eingegangen. Die anschließende Bewertung und Vergleich mit der Wirtschaftlichkeit werden in dem nachfolgenden Abschnitt 4.7 beschrieben. Im Folgenden wird zuerst der Prozessablauf zur Prognose der Restriktionen und der funktionalen Anforderungen detailliert vorgestellt.

Prognose der Restriktionen

Die Restriktionen sind den Modulen bzw. Modulalternativen zugeordnet. Das heißt, dass, sobald die Modulalternative alle Restriktionen erfüllt, auch das Produkt die dabei abgeleiteten Restriktionen erfüllt. Gleichzeitig ist es möglich, die genaue Erfüllungssituation jeder Modulalternative zu betrachten: also wie viele und welche Restriktionen von welcher Modulalternative erfüllt wurde. Darüber hinaus gibt es jedoch noch Restriktionen, die sich nur durch das Zusammenwirken der einzelnen Module ergeben. Im Rahmen der Prognose soll im ersten Schritt das Gestaltszenario so weit verfeinert werden, dass eine Abschätzung darüber möglich ist, ob alle Restriktionen vom Gestaltszenario erfüllt werden. Anschließend werden im zweiten Schritt die übergeordneten Restriktionen an das Gesamtprodukt untersucht. Auch hierbei soll geklärt werden, ob die Restriktionen eingehalten werden oder nicht. Das wird dabei von Experten, in der Regel den Konstrukteuren selbst, und im Rahmen von Workshops basierend auf Ergebnissen von Simulationen und Berechnungen ermittelt. Diese dienen dazu, die Szenarien zu bewerten und auch die Schnittstellen und die Struktur in die Prognose mit einzubeziehen. Auf diese Analysen wird nachfolgend vertiefend eingegangen.

Die Ergebnisse zeigen, ob das Gestaltszenario die Restriktionen erfüllt oder nicht. Eine Restriktion kann dabei zum Beispiel die Dimensionen des Bauteils betreffen. Die Konstrukteure werten hierzu die Gestaltszenarien aus und verfeinern diese so weit, dass eine Abschätzung darüber möglich ist, ob die Restriktion eingehalten wird. Dieses Vorgehen ist in der nachfolgenden Abbildung dargestellt.

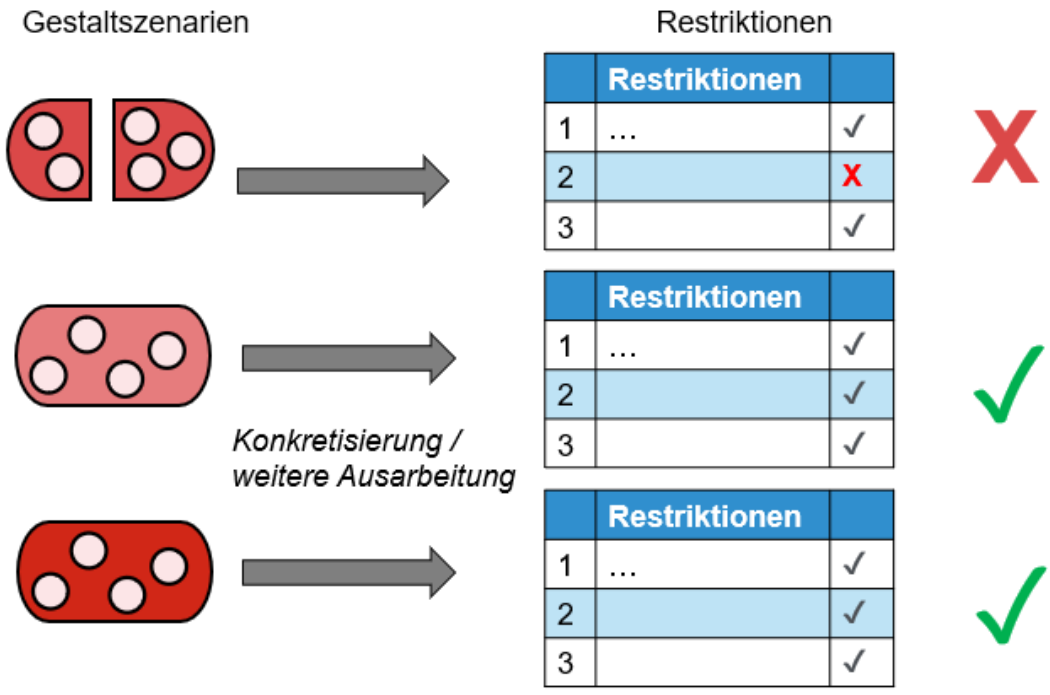


Abbildung 34: Prognose der Restriktionen der Gestaltszenarien

Prognose der funktionalen Anforderungen

Funktionale Anforderungen haben einen direkten Bezug zu dem Zweck des Produktes. Sie sind spezifisch für das zu entwickelnde Produkt. Mit funktionalen Anforderungen wird eine Aussage über zu erbringende Leistung oder eine zu erfüllende Eigenschaft eines Produktes, Systems oder Prozesses getätigt. Durch funktionale Anforderung wird dabei der Zweck des Produkts festgelegt, beispielsweise: „Das Fahrzeug soll einen möglichst geringen Verbrauch haben. Der darf dabei maximal 6l / 100km nach WLTP betragen." Mit dieser funktionalen Anforderung wird der Verbrauch des Fahrzeugs beschrieben. Jede Produkteigenschaft ist aber von zahlreichen Faktoren abhängig. Neben dem Wirkungsgrad des Antriebs, dem Gewicht vom Fahrzeug, dem Luftwiderstand ist der Verbrauch noch von zahlreichen weiteren Faktoren abhängig. Im Rahmen der Ableitung der Restriktionen wurden daraus Anforderungen an die Bauteile definiert. Diese Anforderungen können dabei zum Beispiel auf das Gewicht des Bauteils abzielen. Dabei wird im ersten Schritt für jedes Bauteil geprüft, inwieweit die funktionalen Anforderungen erfüllt werden. Anschließend werden die Anforderungen an das Gesamtsystem überprüft.

Dafür können zum Beispiel Workshops zur Bewertung des Erfüllungsgrads stattfinden, bei denen erfahrene Mitarbeiter aus verschiedenen Abteilungen beteiligt sein können. Dabei können die stark voneinander abhängigen Anforderungen zusammengefasst werden. Dadurch wird eine vereinfachte und überschaubare Darstellung der zu definierenden Produkteigenschaften geschaffen. Zum Beispiel können unter der Produkteigenschaft Geometrie-Anforderungen an Dimensionen, Bauraum und Anschluss zusammengefasst berücksichtigt werden. Die Hauptmerkmalliste kann dabei als Hilfsmittel zur Ermittlung der Abhängigkeiten der Anforderungen mit Produkteigenschaften verwendet werden. Nach der Ableitung und Gruppierung der Produkteigenschaften aus funktionalen Anforderungen werden die Werte des Erfüllungsgrads durch Anfrage und Diskussion in Workshops ausgearbeitet. Die Ausprägungen der Anforderungen sollen so weit wie möglich quantifiziert beschrieben werden, um eine eindeutige Beschreibung zu erreichen. Die Quantifizierung bedeutet, dass alle Angaben über die Anforderungen mit Hilfe von Einheiten wie Stückzahl, Anzahl, Losgrößen und Menge dargestellt werden. Wenn genaue Zahlenangaben nicht möglich sind, sind die Anforderungen mit einem Qualitätswert auszudrücken. Das heißt, dass alle Angaben müssen über die zulässigen Abweichungen und weitere Anforderungen wie zum Beispiel Korrosionsbeständigkeit beschrieben werden. Somit können alle funktionalen Anforderungen bzw. Produkteigenschaften eindeutig ausgelegt werden, um die anschließende Bewertung der Wirtschaftlichkeit vorzubereiten.

Analyse des Gesamtsystems

Bisher wurden die Restriktionen und die funktionalen Anforderungen für die einzelnen Module prognostiziert: Können sie von den Modulalternativen eingehalten bzw. erfüllt werden? Wenn ja, inwieweit werden auch die funktionalen Anforderungen von den Modulalternativen erfüllt werden? Die bisherige Prognose findet lediglich auf der Modulebene statt. In diesem Abschnitt wird die Prognose der Anforderungen auf der Ebene des

Gesamtsystems durchgeführt. Damit können solche Anforderungen des Gesamtsystems, die nur durch das Zusammenwirken aller Module realisiert werden können, berücksichtigt werden. Im Folgenden wird anhand des Beispiels eines Fahrzeuges der entsprechende Ablauf vorgestellt. Die wichtigsten Anforderungen an ein Fahrzeug sind zum Beispiel:

- Fahrleistung
- Verbrauch
- Transportvolumen
- Zuverlässigkeit
- Kosten

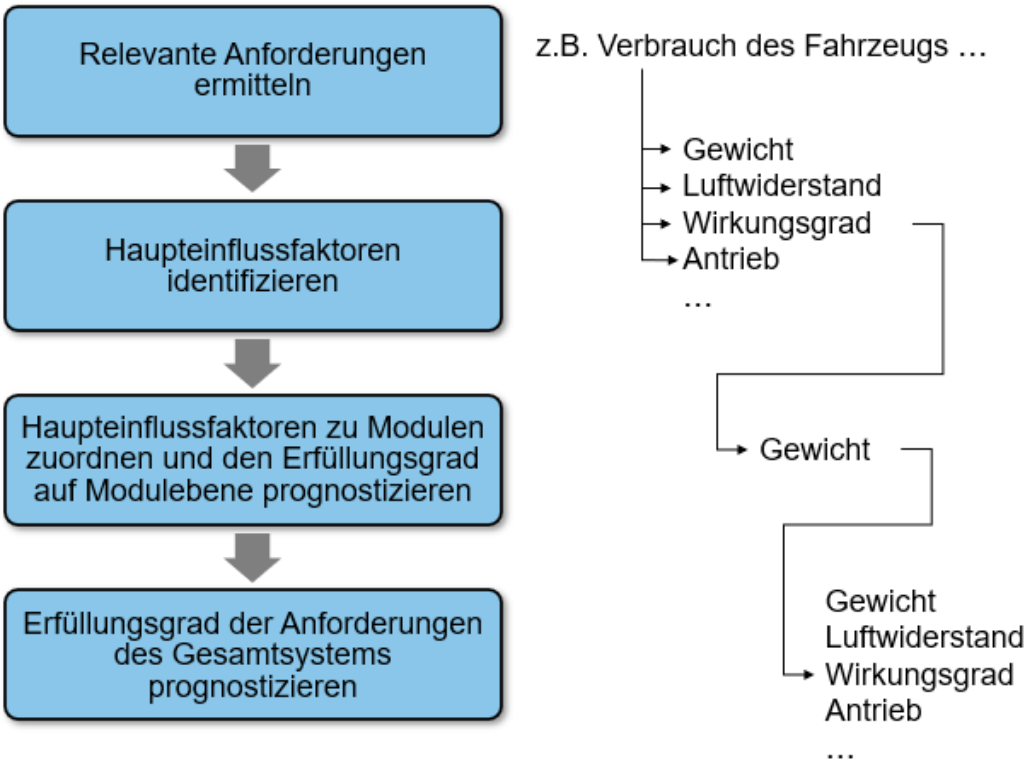


Abbildung 35: Prozessablauf zur Analyse des Zusammenwirkens aller Module auf das Gesamtsystem

Diese Anforderungen sind von einem Zusammenwirken mehrere Module bzw. Moduleigenschaften abhängig. Das Gewicht wirkt sich unmittelbar auf den Verbrauch aus. Das Gewicht eines Fahrzeugs ergibt sich aus der Zusammensetzung aller Modulgewichte. Neben dem Gewicht beeinflussen noch weitere Einflussgrößen den Verbrauch des Fahrzeugs. Dies ist zum Beispiel der Luftwiderstand oder der Wirkungsgrad des Antriebssystems. Es muss somit eine Analyse stattfinden, inwieweit das Gewicht der einzelnen Module den Verbrauch des Gesamtsystems beeinflusst. Hierbei muss eine zusätzliche Bewertung stattfinden. Zum Beispiel wird zusätzliches Gewicht von bewegten Massen für

den Verbrauch des Fahrzeugs kritischer als von unbewegten Massen gesehen. Daher ist es notwendig, eine modulspezifische Gewichtung der Anforderungen vorzunehmen. Da es sich noch im Frühstadium der Produktentwicklung befindet, ist eine solche Gewichtung nicht wirklich realisierbar. Daher ist es besonders wichtig, Experten aus allen Abteilungen mit ihren Erfahrungen oder durch Vergleich mit ähnlichen Produkten zusammen darüber diskutieren. Abschließend wird das Gewicht des Fahrzeugs für jede Alternative der Produktstruktur abgeschätzt.

In Abbildung 35 wird der entsprechende Prozessablauf dargestellt. Zuerst werden die relevanten Anforderungen des Gesamtsystems ermittelt. Anschließend müssen die Haupteinflussfaktoren der relevanten Anforderungen identifiziert werden. Diese Haupteinflussfaktoren sind projekt- und unternehmensabhängig und werden von Gesetzen, Vorschriften und Richtlinien usw. gebildet. Da sie in der Regel umfangreich und schwer überschaubar sind, werden sie in Unternehmen in Übersichtsdokumenten zusammengefasst [PBF+13]. Damit können unerfahrene Mitarbeitende diese Einflussfaktoren ableiten. Diese Haupteinflussfaktoren werden im Weiteren den entsprechenden Modulen zugeordnet, um ihren Erfüllungsgrad zu prognostizieren. Abschließend werden die Erfüllungsgrade aller Einflussfaktoren zusammengefasst. Diese Zusammenfassung aller Modulanforderungen zu einer Anforderung ist in der nachfolgenden Formel dargestellt. Wenn in diesem Prozessablauf noch nicht die erfolgreichen Ergebnisse erzielt werden, sind Rücksprüngen und Wiederholungen auch möglich.

$$A_{Ges} = \sum_{i=1}^{n} (r_n \cdot A_n)$$

A_{Ges}: Wert des Erfüllungsgrads der Alternative der Produktstruktur

r_n: Gewichtung der einzelnen Anforderung

A_n: Wert des Erfüllungsgrads der Modulalternative

$\mathrm{i} = 1 \ldots \mathrm{n}$: Anzahl der Module

Um einen quantitativen Vergleich zwischen den Alternativen der Produktstrukturen zu ermöglichen, werden alle Erfüllungsgrade der Anforderungen des Gesamtsystems bewertet und zusammenaddiert und in einer Kennzahl ermittelt.

Die Ermittlung des Erfüllungsgrads geschieht dabei durch eine Bewertung der Entwicklungsingenieure. Der Erfüllungsgrad muss hierbei in ein angemessenes Verhältnis gesetzt werden. Zum Beispiel hat eine Gewichtseinsparung von 100g bei einem Produkt mit 100kg eine deutlich kleinere Auswirkung als eine Gewichtseinsparung von 100g bei einem Produkt mit 20kg Gewicht. Es muss somit eine Normierung des Erfüllungsgrades stattfinden. Vorgeschlagen wird hierbei eine Skala mit 10 Schritten von 0 bis 1. Hierbei wäre 1 die volle Erfüllung der Anforderung und 0, dass die Anforderung überhaupt nicht erfüllt ist. Alle weiteren Schritte von 0,1 bis 0,9 stellen Kompromisse oder Defizite zu dem vollen Erfüllungsgrad dar. Bei funktionalen Anforderungen lassen sich diese in der

Regel einfach in ein Verhältnis setzen und somit einfach für die Entwicklungsingenieure bewerten. Beispielswiese kann bei der funktionalen Anforderung nach einem möglichst geringen Gewicht das abgeschätzte geringste Gewicht als volle Erfüllung der Anforderung und das Gewicht der wirtschaftlichsten, aber nicht leichtbauoptimierten Alternative des als gerade erfüllt angesehen werden und entsprechend mit dem Wert 0,1 versehen werden. Die verbleibenden Alternativen werden anschließend linear in das Verhältnis zwischen diesen beiden Alternativen gesetzt. Bei allen Werten, bei denen keine quantitative Abschätzung möglich ist, muss eine subjektive Bewertung durch die Entwicklungsingenieure vorgenommen werden. Die Erfüllung der Anforderung der einzelnen Alternativen müssen hierbei in ein Verhältnis gesetzt werden.

Jede Anforderung wird mit einem Gewichtungsfaktor versehen, um diese in ein Verhältnis zu setzen. Die Ermittlung des Gewichtungsfaktors r_n erfolgt nachfolgend mit der Methode des paarweisen Vergleichs. Dabei kann die Wichtigkeit von den relevanten Anforderungen über Skalenwerte miteinander verglichen werden (siehe Abbildung 38).

Relevante Anforderungen	Gewicht	Leistung	Luftwiderstand	Kapazität	Kurvenverhalten	…	Σ	%	
Gewicht		3	4	3	4		14	34	1.
Leistung	1		3	2	3		9	22	3.
Luftwiderstand	0	1		0	1		2	5	5.
Kapazität	1	3	4		4		11	27	2.
Kurvenverhalten	0	1	3	1			5	12	4.
…									
						Σ	41	100	

Skala: (unwichtig) 0 < Wichtigkeit < 4 (sehr wichtig)

Abbildung 36: Ermittlung der Gewichtungsfaktoren mit Hilfe des paarweisen Vergleichs

Das Ergebnis des paarweisen Vergleichs kann hierbei als Gewichtungsfaktor eingesetzt werden. Anschließend werden alle Erfüllungsgrade multipliziert mit dem Gewichtungsfaktor aufsummiert und man erhält dadurch eine Kennzahl, die den Erfüllungsgrad der Anforderungen der Alternative beschreibt. Diese Kennzahl bildet die Grundlage für den Vergleich und damit der Auswahl zwischen den Alternativen.

4.7 Bewertung

Bisher wurden die Erfüllungsgrade der Anforderungen sowohl auf der Modulebene als auch auf der Ebene des Gesamtsystems herausgearbeitet. In diesem Schritt werden die Erfüllungsgrade der Anforderungen des Gesamtsystems zusammengefasst und in einer Kennzahl ermittelt. Diese Kennzahl wird als der Entscheidungsfaktor betrachtet, der einen quantitativen Vergleich zwischen den einzelnen Alternativen der Produktstrukturen ermöglicht. Dabei muss der Entscheidungsfaktor in einen direkten Zusammenhang mit der Wirtschaftlichkeit des Produktes gesetzt werden. Die Wirtschaftlichkeit ist dabei der entscheidende Faktor bei der Auswahl eines Produktkonzepts (siehe Abschnitt 4.1).

Dabei wird das **Kosten-Nutzen-Verhältnis** als Entscheidungsgrundlage für die Auswahl der Produktstruktur identifiziert. Die nicht-funktionalen Anforderungen bzw. die Restriktionen wurden bereits in dem letzten Schritt prognostiziert und dienen als Grundlage für die Auswahl der Gestaltszenarien. In diesem Schritt folgt dann die Aufgabe, das Verhältnis zwischen den Kosten und den funktionellen Nutzen zu ermitteln. Somit weist jede Alternative der Produktstruktur ein entsprechendes Verhältnis auf, mit dem sie untereinander verglichen werden können. Dadurch wird die Entscheidung zur Auswahl der Produktstruktur getroffen.

Ermittlung der Kosten

Die Kosten eines Produktes lassen sich häufig durch die Selbstkosten eines Produktes ausdrücken. Aufgrund der sich heutzutage verändernden Geschäftsmodelle ist dies jedoch nicht mehr durchgängig der Fall. Zum Beispiel strebt ein Hersteller Geschäftsmodelle an, die auf eine Bezahlung der Nutzung oder Vermietung des Produktes abzielen, muss die Kalkulation anders erfolgen. Weil bei einem Vermietmodell auch die gesamte Nutzungsphase Teil der Produktkosten ist. Handelt es sich hierbei zum Beispiel um ein Fahrzeug, führt dies dazu, dass Nutzungskosten, also Verbrauch und Wartungskosten, sich voll in den Kosten für den Hersteller niederschlagen. Daher muss die Bewertung der Wirtschaftlichkeit bis zu dem Zeitpunkt des Besitzübergangs betrachtet werden. Nachfolgend erfolgt die Bewertung anhand des Besitzübergangs im Anschluss an die Produktion. Es müssen somit nur die Produktkosten betrachtet werden.

Zur Ermittlung der Kosten eines Produktes werden zuerst die Modulkosten der einzelnen Gestaltszenarien berechnet. Diese basiert auf der Berechnung der Selbstkosten, die exemplarisch in der nachfolgenden *Tabelle 6* dargestellt ist. Zuerst findet eine Bewertung der Entwicklungskosten statt. Dann werden die Materialkosten für jedes Gestaltszenario definiert. Anschließend werden die Produktionskosten abgeschätzt und die Vertriebs- und Verwaltungskosten als Aufschlag dazu gerechnet.

Tabelle 6: Berechnung der Selbstkosten

+ Entwicklungskosten		
+ Einzelmaterialkosten + Materialgemeinkosten	=	Materialkosten
+ Produktionskosten + Produktionsgemeinkosten + Sondereinzelkosten	=	Herstellkosten
+ Vertriebs- und Verwaltungskosten		
	=	**Selbstkosten**

Die **Materialkosten** werden hierbei, wie in der nachfolgenden Abbildung 37 dargestellt, bestimmt. Grundlage für die Abschätzung können hierbei bereits vorhandene Angebote und Bauteile sein. Obwohl die Gestaltszenarien nur Konzepte darstellen, müssen in diesem Schritt bereits die Grobkonzepte so weit verfeinert sein, dass eine Abschätzung über die Kosten möglich ist. Ist keine Abschätzung anhand von existierenden Informationen möglich, muss eine Bewertung der Gestalt vorgenommen werden und aus dem Gewicht und den Preisen für das Material eine Abschätzung vorgenommen werden.

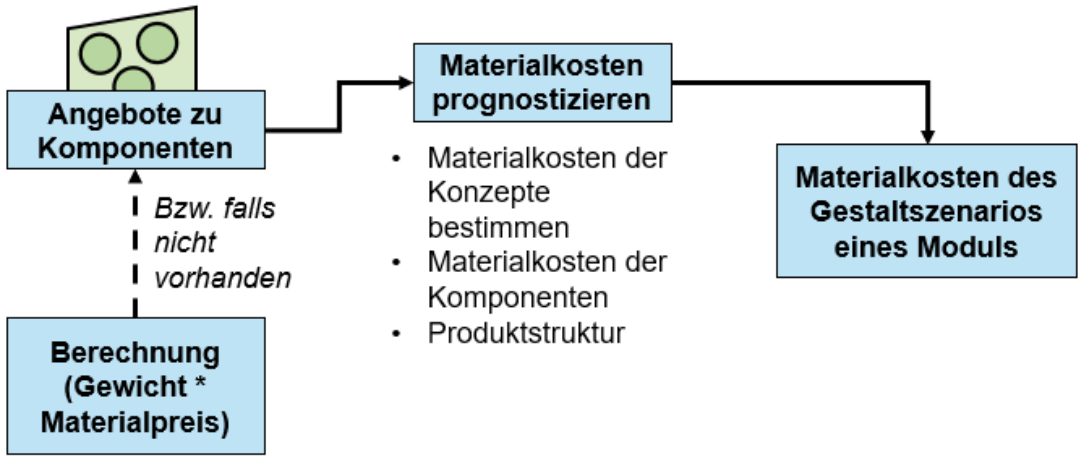


Abbildung 37: Ableitung der Materialkosten einzelner Gestaltszenarien

Das Verfahren zur Ermittlung der **Produktionskosten** ist simultan zu den Materialkosten. Wenn bereits ähnliche Module existieren, werden diese für die Abschätzung herangezogen. Ansonsten muss anhand des Aufwands des Produktionsprozesses eine Abschätzung über die Zeit und anschließend die Kosten des Produktionsprozesses über die Maschinen- und Mitarbeiterstunden vorgenommen werden.

Die **Entwicklungs-, Vertriebs- und Verwaltungskosten** können anschließend über einfache Zuschlagssätze abgeschätzt werden. Gerade bei den Entwicklungskosten empfiehlt

es sich jedoch, diese Zuschlagssätze dem verbundenen Aufwand anzupassen und mit einem zusätzlichen Faktor zu belegen. Gerade Leichtbaumodule bedürfen eines höheren Entwicklungsaufwands und sind entsprechend mit höheren Entwicklungskosten verbunden. Damit sind die Kosten für die einzelnen Module berechnet.

Ermittlung des Nutzens

Anschließend muss der funktionale Nutzen jedes Moduls ermittelt werden. Dies geschieht auf Basis der Anforderungserfüllung aus dem vorherigen Schritt „Prognose“. Hierbei wurde ein Wert der Anforderungserfüllung für jede Anforderung ermittelt (siehe Abschnitt 4.6). Dieser Wert kann anschließend mit der Wirtschaftlichkeit, also den Produktkosten, in einen direkten Zusammenhang gebracht werden. Durch die Herstellung der Vergleichbarkeit zwischen Wirtschaftlichkeit und Funktionalität kann somit mit Hilfe einer Kennzahl eine direkte Auswahl von Modulalternativen erfolgen. Das Ergebnis kann später zum Beispiel so interpretiert werden, dass ein kostenintensiveres Modul mit einer höheren Funktionalität einen höheren Nutzen für das Produkt bietet als ein vergleichbar kostengünstigeres Modul mit einer geringeren Funktionalität.

Es wird hierbei angenommen, dass der funktionale Nutzen auf dem Wert der relevanten Anforderungen basiert. Die relevanten Anforderungen wurden bereits im vorherigen Schritt „Prognose“ ermittelt. Diese Werte der Anforderungen werden anschließend mit Hilfe von Gewichtungsfaktoren (siehe unten) in einem zentralen Kennwert vereint. Daraus ergibt sich ein Kennwert des funktionalen Nutzens.

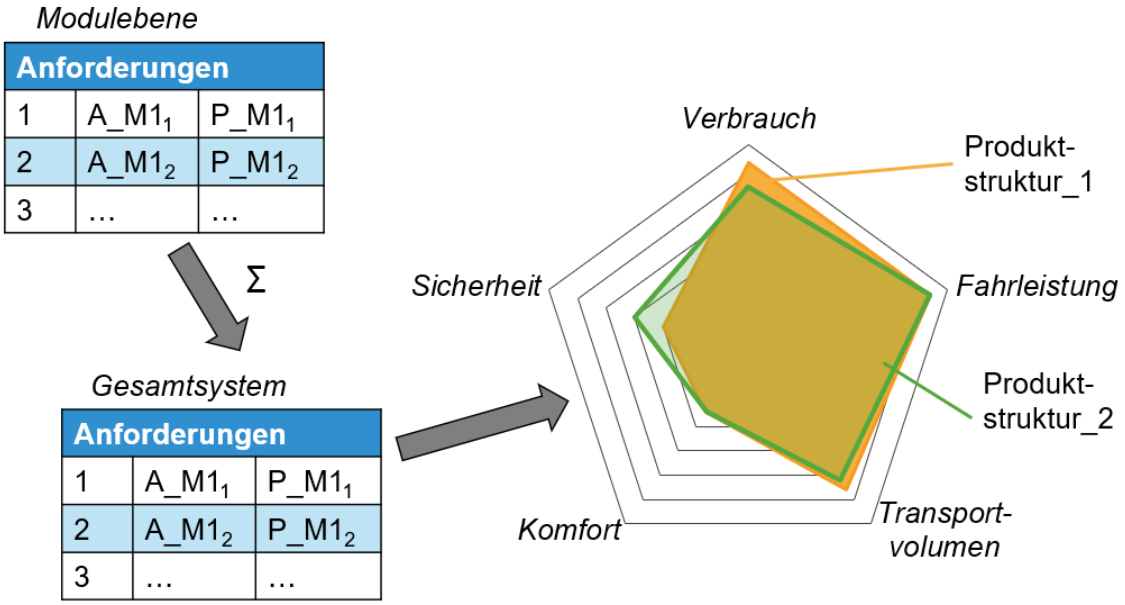


Abbildung 38: Darstellung der relevanten Anforderungen im Spinnennetzdiagramm

Es muss ein Verhältnis zwischen den Kosten und dem funktionellen Nutzen ermittelt werden. Jede Alternative der Produktstruktur weist ein entsprechendes Verhältnis auf, mit der sie untereinander verglichen werden können. Dadurch wird die Entscheidung zur

Auswahl der Produktstruktur getroffen. Die Erklärungen finden nachfolgend ausschließlich auf Grundlage der Selbstkosten statt.

Das Ergebnis der Prognose aus dem letzten Schritt der Methode bildet eine Produktstruktur mit Gestaltszenarien, bei der alle Anforderungen bewertet sind und bereits eine Auswahl stattgefunden hat, ob diese die Restriktionen erfüllen. Zudem wurden die Anforderungen für das Gesamtprodukt den relevanten Hauptmerkmalen zugeordnet.

Ermittlung des Kosten-Nutzen-Verhältnisses

Auf Basis der ermittelten Kosten und dem funktionalen Nutzen kann nun das Kosten-Nutzen-Verhältnis der einzelnen Alternativen der Produktstrukturen berechnet werden. Dabei führt der funktionale Nutzen zu finanziellen Nutzen. Der finanzielle Nutzen wird mit den Kosten für u.a. die Beschaffung und den Betrieb, also den Selbstkosten, in Relation gesetzt. Daraus ergibt sich die dimensionslose Kenngröße der „Wirtschaftlichkeit“ (siehe Formel).

$$\text{Wirtschaftlichkeit} = \frac{\text{finanzeller Nutzen}}{\text{Selbstkosten}}$$

Daraus ergibt sich der Kennwert als Entscheidungsfaktor, mit dem der Vergleich zwischen den einzelnen Alternativen der Produktstrukturen erfolgen kann. Hierbei werden die Module mit dem höchsten Kennwert ausgewählt.

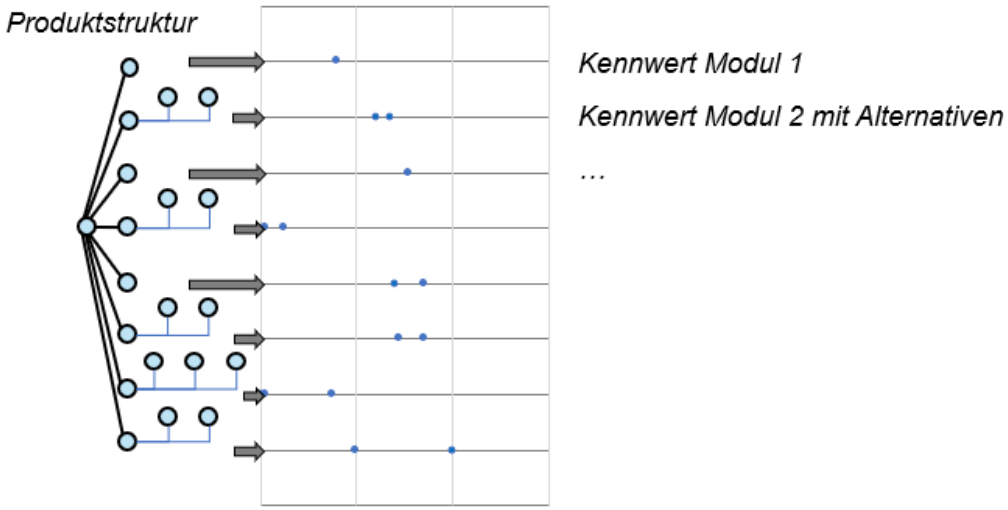


Abbildung 39: Produktstruktur mit bewerteter Alternativenauswahl

Das Ergebnis ist anschließend eine Produktstruktur mit festgelegten Gestaltszenarien bzw. Gestaltungskonzepten. Mit Hilfe der Gestaltszenarien wurde dabei bereits festgelegt, welche Modulalternativen verwendet werden. Dabei wird eindeutig gezeigt, welche Module individuell gestaltet und welche Module sich aus bereits existierenden Modulen oder Standardmodulen zusammensetzen. Die anschließende Gestaltung widmet sich in Weiteren den zu individualisierenden Modulen und die Standardmodule werden nicht

weiterbearbeitet. Die eindeutige Konzentration auf die individuellen Module führt zu einer zielgerichteten Entwicklung von modularen Leichtbauprodukten. Die frühe Festlegung der Produktstruktur bzw. den zu individuell optimierten Modulen ergänzt die Methoden zur Entwicklung des Leichtbaus, die in der Regel viel später stattfindet. Dadurch wird die Entwicklungszeit und –aufwand stark reduziert.

Maßnahmen zur leichtbaubezogenen Optimierung

Bezogen auf den Leichtbau kann durch die in dieser Arbeit entwickelte Methode strukturiert identifiziert werden, welche Module gewichtsoptimiert und damit individuell gefertigt werden sollen und welche Module Standardteile sein können. Die anschließende konstruktive Gestaltung der zu optimierenden Module findet dabei nach den Leichtbauprinzipien statt. Hierzu macht es Sinn, im Rahmen der Gestaltung die Einsatzfähigkeit von Leichtbaumaßnahmen bereits in einem frühen Gestaltungsstadium zu untersuchen. Konkret wird für die drei Leichtbauverfahren, also System-, Struktur- und Materialleichtbau, analysiert, welches Optimierungspotenzial sich die jeweilige Anwendung erlaubt.

Beim **Systemleichtbau** erfolgt keine Gewichtsminimierung einzelner Module, sondern die Minimierung des Gewichtes über mehrere Module hinweg, welche eine bestimmte Aufgabe erfüllen. Möglich wird hierbei eine Gewichtseinsparung durch Funktionsintegration.

Die Grundidee des **Strukturleichtbaus** ist es, die Bauteilstruktur so zu gestalteten, dass die Beanspruchungen an ein Bauteil möglichst gleichmäßig verteilt werden. Das Ziel ist somit, die Struktur des Bauteils mit dem Kraftfluss optimal abzustimmen. Dabei soll sich den Grenzwerten der eingesetzten Werkstoffe, wenn möglich, angenähert werden. Um eine solche Analyse durchzuführen, inwieweit Spannungen möglichst gleichmäßig durch ein Bauteil geleitet werden, muss eine FE-Simulation für das Bauteil erfolgen. Zeigt diese FE-Simulation ungleiche Verteilungen oder Spannungsspitzen, müssen diese durch eine Umgestaltung besser auf das Bauteil verteilt werden. Ziel ist es, eine möglichst gleiche Verteilung der Spannung in dem Bauteil zu erreichen, so dass die Materialkennwerte an möglichst vielen Stellen ausgereizt werden. Dabei muss natürlich die vorgegebene Sicherheit gewährleitet werden. Dadurch wird jedes Gramm des eingesetzten Materials dem Hauptzweck des Bauteils unterworfen.

Beim **Materialleichtbau** werden Gewichtseinsparungen durch den Einsatz von Materialien erzielt, die in Bezug auf die geforderten Anforderungen gewichtspezifisch bessere Eigenschaften aufweisen. Übliche Kennwerte sind dabei eine auf die Dichte bezogene Zugfestigkeit, Streckgrenze, Bruchzähigkeit oder E-Modul. Das Ziel vom Leichtbau muss sein, diese Kennwerte durch einen minimalen Einsatz des Materials auszureizen. Dabei ist zu beachten, dass die Sicherheit gegen Versagen gewährleistet werden muss. Die Erhöhung der Materialeffizienz bzw. der Wechsel zu Material mit besseren Eigenschaften ist bestimmt zur Verringerung des Gewichts. Dieses Vorgehen ist dabei in enger Relation zu dem Strukturleichtbau zu sehen. Auch hierbei gilt es, mit der FE-Simulation die Ausreizung der Kennwerte vorzunehmen.

5 Exemplarische Anwendung der Methode

Die Umsetzung der in dieser Arbeit entwickelten Methode erfolgt im Rahmen der Durchführung einer Fallstudie. Mit Hilfe der Fallstudie wird insbesondere überprüft, inwieweit die Methode, die in Abschnitt 2.3 formulierten Zielsetzungen realisiert werden.

Als Fallstudie dient hierbei die Anwendung der Methode auf die Entwicklung eines Portalroboters. Das Ziel der Entwicklung besteht darin, dabei die Funktionalität und Wirtschaftlichkeit des Roboters zu erhöhen. Die Steigerung der Funktionalität soll sich durch eine Gewichtssenkung und dadurch höheren Verfahrgeschwindigkeiten ergeben. Das heißt, dass durch die Gewichtssenkung diese Geschwindigkeitssteigerung ohne einen Tausch der Aktoren erfolgen soll. Der Portalroboter dient hierbei zur Be- und Entladung von Werkstücken für Dreh- und Fräszentren. Der Portalroboter wird dabei nicht einzeln vertrieben, sondern bildet eine Option in dem Produktprogramm des Herstellers der Dreh- und Fräszentren.

In Abschnitt 5.1 wird der Portalroboter und dessen Einsatz vorgestellt. In Abschnitt 5.2 wird die Anwendung der Methode im Rahmen der Produktentwicklung präsentiert. Hierbei werden die einzelnen Schritte und deren Ergebnisse näher erläutert. In Abschnitt 5.3 wird anschließend das Ergebnis des gesamten Entwicklungsprozesses, also die fertige Ausgestaltung des Portalroboters, vorgestellt. Die Validierung der Methode anhand dieser Umsetzung folgt anschließend in Kapitel 6. Basierend auf Interviews mit Ingenieuren in dem Unternehmen und anhand von Vergleichen mit vergangenen Entwicklungsprojekten erfolgt hierbei die Validierung.

5.1 Portalroboter

Der Portalroboter dient dazu, die Dreh- und Fräszentren mit Werkstücken von oben zu bestücken. Ein Portalroboter wird in zahlreichen Dreh- und Fräszentren des Herstellers angewendet. Der Großteil der bestellten Anlagen wird mit dem Portalroboter ausgeliefert. Ziel dieses Entwicklungsprojektes ist es, einen leistungsstärkeren und gleichzeitig kostengünstigeren Portalroboter in den Dreh- und Fräszentren einzusetzen.

Die Beladung des Werkstücks von oben gewährleistet die Zugänglichkeit für das Personal zur Maschine. Diese Zugänglichkeit ist wichtig für Wartungsvorgänge und Rüstvorgänge, aber auch für die Überwachung der Maschine. Da bei der Beladung von oben der Raum über der Maschine genutzt wird, muss zudem keine wertvolle Produktionsfläche für den Roboter bereitgestellt werden.

Der wesentliche Vorteil eines leichteren Roboters ist die geringere Massenträgheit durch das geringe Eigengewicht. Besonders bei hoch performanten und dynamischen Applikationen können auch im Anlagenbau durch den Leichtbau wesentliche Mehrwerte generiert werden. Durch den Leichtbau ist es möglich, mit den gleichen Aktoren größere Beschleunigungen bei gleichbleibender Präzision zu erreichen.

Der Portalroboter zur Be- und Entladung der Dreh- und Fräszentren ist dabei Teil einer Produktfamilie. Neben dem Unterscheidungsmerkmal der Traglast gibt es darüber hinaus Varianten für Dreh- und Fräsmodelle. Diese Varianten unterscheiden sich jedoch nur gering, wie zum Beispiel in den Stützen. Die Höhe und die Länge der Achsen lassen sich zudem bei den unterschiedlichen Varianten auf die jeweiligen Maschinen anpassen. Bezogen auf die mögliche Traglast wird der Portalroboter dabei in drei Größen eingesetzt:

- 20kg Traglast
- 100kg Traglast
- 250kg Traglast

Das grundlegende Prinzip ist, dass die Werkstücke von einer Beladezone in das Innere der Maschine transportiert werden. Von dort werden dann bearbeiteten Werkstücke wieder entnommen. Dieses Prinzip ist in der nachfolgenden Abbildung dargestellt.

Daraus ergibt sich eine Produktfamilie mit drei wesentlichen Unterscheidungsmerkmalen. In diesem Entwicklungsprojekt soll der Portalroboter bis 20kg Traglast optimiert werden. Nachfolgend wird zuerst auf das Lastenheft des zu optimierenden Portalroboters für das Entwicklungsprojekt eingegangen.

Da der Arbeitsraum des Portalroboter sich oberhalb der Werkzeugmaschine befindet, eignet sich dieser sehr gut zur Verkettung von Arbeitsabläufen, zum Beispiel beim Be- und Entladen, Palettieren, Handling oder Transferieren.

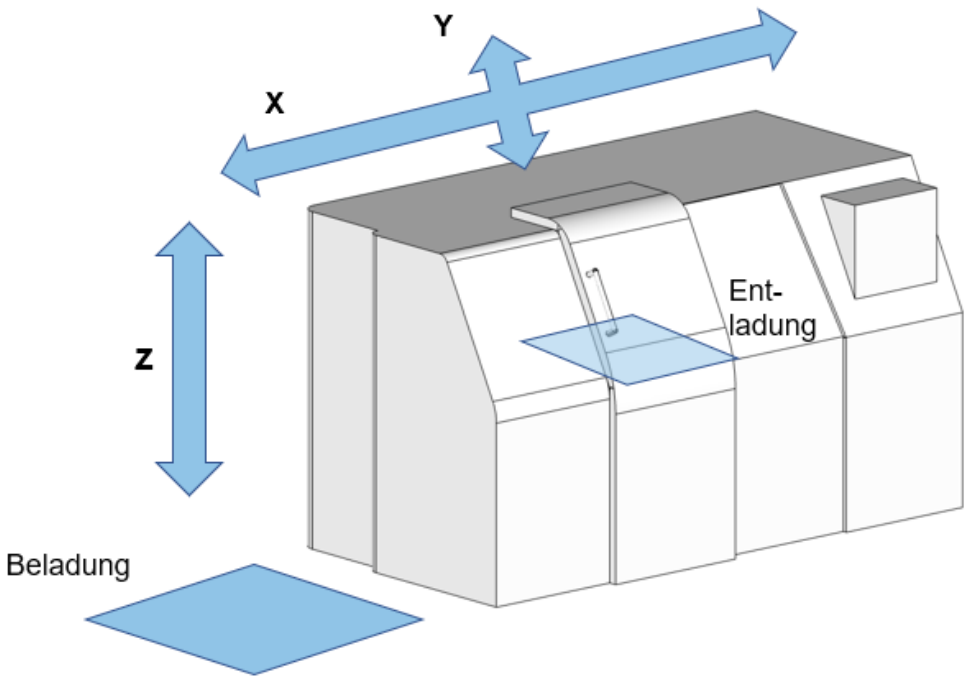


Abbildung 40: Prinzip des Portalroboters

Die Hauptziele des Entwicklungsprojektes sind die Optimierung des Gewichts und die Verbesserung der Wirtschaftlichkeit. Von der Gewichtsreduzierung sollen insbesondere die bewegten Massen profitieren und daher die Bewegungsgeschwindigkeit des Portalroboters verbessert werden. Darüber hinaus sollen bei gleichbleibenden oder verbesserten Leistungsdaten die Produktionskosten des optimierten Portalroboters um 10% günstiger werden.

Der Portalroboter mit 20kg Traglast wird dabei in der Regel bei den kleineren Werkzeugmaschinen eingesetzt. Im Folgenden wird die modulare Produktstruktur des Portalroboters dargelegt. Die Zeichnungen zu den Bauteilen sind im Anhang A2 hinzugefügt. Bisher wurde der Portalroboter in fünf Hauptmodule unterteilt:

- Modul 1: Stützträgermodul, das zum Tragen des gesamten Gewichts des Portalroboters dient. Dabei ist der Portalschlitten für die Horizontalbewegung auf der Hauptachse zuständig.
- Modul 2: Achsmodul für die X-Richtung, das einen Bewegungsbereich bis zu 4000mm erlaubt. Da der Bewegungsbereich sehr lang ist, wird für die Bewegung in X-Richtung die höchste Geschwindigkeit gefordert.
- Modul 3: Achsmodul für die Y-Richtung, das einen Bewegungsbereich bis zu 500 mm erlaubt. Hierbei liegen eine hohe Stabilität und Genauigkeit bei der Bewegung in Y-Richtung im Fokus.
- Modul 4: Achsmodul für die Z-Richtung, das eine Bewegung bis zu 1200 mm erlaubt.
- Modul 5: Greifermodul

Bei dem Entwicklungsprojekt des Portalroboters bleibt die Einsatzumgebung im Vergleich zu dem vorherigen normalen Einsatzfall unverändert. Das heißt, dass das Gewicht des Werkstücks unverändert bleibt. Daher bleiben die technischen Daten und damit auch die Anforderungen an den Portalroboter erhalten. Auch die Schnittstellen, also die Anbringung des Roboters, sind dadurch vorgegeben. Das bedeutet, dass auch die Abmaße der Träger-, Vertikal- und Hublänge unverändert bleiben. Das Ziel zur Erhöhung der Geschwindigkeit soll durch eine Gewichtsreduzierung erreicht werden. Dabei wurde ein Beispielszenario entwickelt, bei dem ein 20kg Werkstück von dem Entladepunkt in die Maschine geführt wird. Dieser Prozess soll um 2 Sekunden verkürzt werden. Zudem sollen die Produktkosten des Portalroboters reduziert werden. Der bisherige Portalroboter weist eine modulare Struktur auf, die auch für die Neuentwicklung übernommen werden soll. Das Entwicklungsprojekt soll allgemein basierend auf der existierenden modularen Produktstruktur des bisherigen Portalroboters bearbeitet werden. Die Entwicklung des Portalroboters ist somit ein Projekt im Rahmen des Modulleichtbaus.

Der bisherige Arbeitsraum des Portalroboters, der für die Neuentwicklung übernommen wird, ist in der nachfolgenden Abbildung dargestellt.

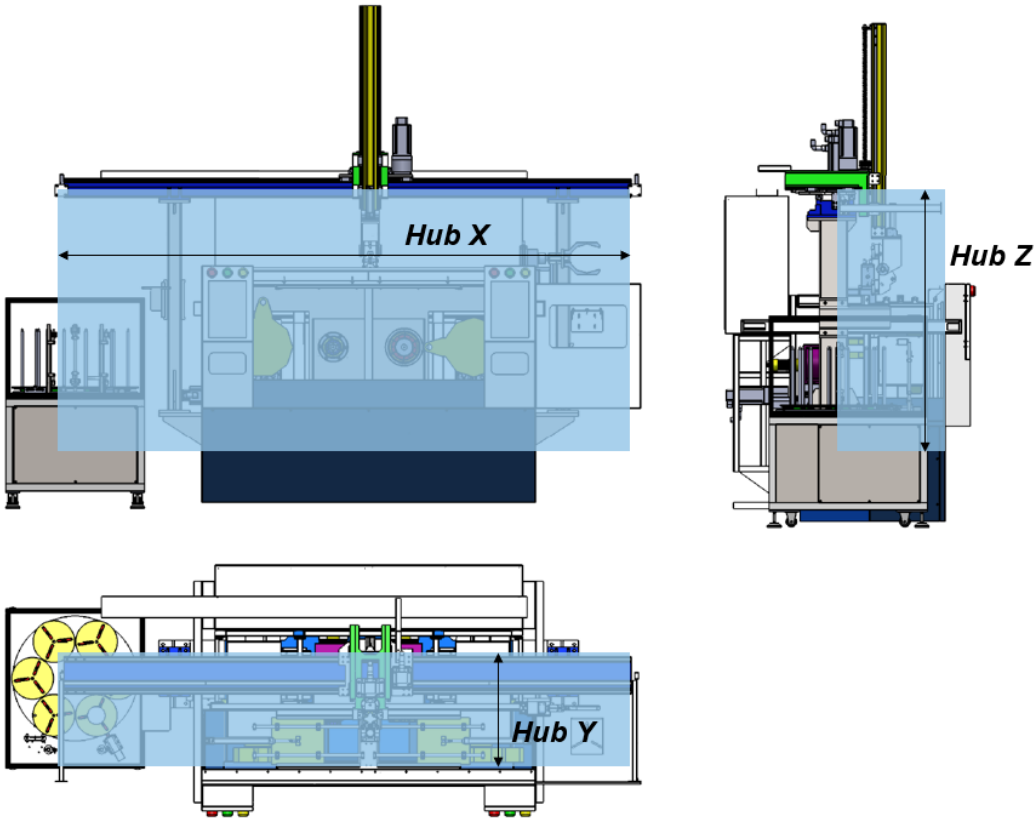


Abbildung 41: Arbeitsraum des Portalroboters (grau markiert)

Nachfolgend wurde ein Lastenheft für die Neuentwicklung ausgearbeitet:

- Das Optimierungsprojekt zielt auf die Senkung der Kosten in der Produktion des Portalroboters, Integration, Nutzung, Wartung und Pflege. Gleichzeitig sollen die Effizienz und Flexibilität des Portalroboters nachhaltig gesteigert werden. Dabei sollen die Kosten des Roboters um mindestens 10% gesenkt werden. Die Anforderungen an die Positionsgenauigkeit bleibt unverändert: Diese beträgt für die Wiederholgenauigkeit 0,03mm und die Absolutgenauigkeit 1mm.
- Die Antriebskomponenten sollen, wenn möglich, von dem bisherigen Roboter übernommen werden oder zumindest Standardteile bisheriger Lieferanten sein.
- Die Arbeitsräume des Portalroboters bleiben erhalten.

Die technischen Daten des Originalportalroboters werden im Folgenden vorgegeben. Zuerst wird hierbei auf die allgemeinen technischen Daten eingegangen.

Tabelle 7: Technische Daten des originalen Portalroboters

Nenn-Traglast	80 kg
Traglastbereich (abhängig von Hub A3)	<=20 kg
Positionswiederholgenauigkeit	± 0,3 mm
Absolutgenauigkeit	± 1 mm
Gewicht Grundhub A1 – A3 (ohne Ständer, ohne Last)	ca. 1.040 kg
Anzahl der Achsen	3

Bei den Zielgeschwindigkeiten ergeben sich unterschiedliche Anforderungen an die Achsen X, Y, Z. X hat auf Grund der Distanz, die hierbei zu überwinden ist, die größte Geschwindigkeitsanforderung. Gleichzeitig ist bei Bewegungen auf der X-Achse auch das gesamte Gewicht des Roboters zu bewegen. Bei den Geschwindigkeiten sind stets die Beschleunigung und die Verfahrgeschwindigkeit, also die maximale Geschwindigkeit, zu beachten. Die Verfahrgeschwindigkeit soll für das Gesamtsystem mindestens 100m/min betragen. Diese Anforderungen sind in der nachfolgenden Tabelle dargestellt.

Tabelle 8: Funktionale Anforderungen an die Geschwindigkeit des Portalroboters

Achse	Beschleunigung	Verfahrgeschwindigkeit
X	2,6 m/s²	
Y	3,0 m/s²	
Z	2,0 m/s²	
Gesamtsystem		>100m/min

Entsprechend ergeben sich auch für die drei Achsen unterschiedliche Anforderungen. Für das Gesamtmodell wird für die Anforderungen das meistverkaufte Drehzentrum als Anforderungsgeber genommen. Daraus lassen sich für den Portalroboter die folgenden Anforderungen an die Aufstellung des Portalroboters ableiten.

Basierend auf dem Lastenheft wurde die Entwicklung des Portalroboters durchgeführt. Diese Entwicklung wird in dem nachfolgenden Abschnitt dargestellt. Es ist zu beachten, dass alle verwendeten Daten vertraulich behandelt und entsprechend geändert und anonymisiert wurden.

Tabelle 9: Abmaße und Aufstellungsanforderungen

Größe	Modell Typ450
Basishöhe	1.750 mm
Maximalhöhe	3.000 mm
Höhen-Erweiterungsschritte	250 mm
Ständerabstand (max.)	5.000 mm
Tragarmüberstand (max.)	1.250 mm

5.2 Anwendung der Methode zur Unterstützung von Entwicklungsentscheidungen bei modularen Leichtbauprodukten

Der Entwicklungsprozess wurde im Wesentlichen von vier Personen durchgeführt: zwei Konstrukteuren, einem Elektroingenieur und einem Regelungstechniker. Der Regelungstechniker hat dabei anfangs das Projekt nur beratend unterstützt und erst bei der Gestaltung eigene Analysen beigetragen. Der Elektrokonstrukteur war ebenso weniger involviert und im Rahmen der Entwicklung für die Auslegung der Antriebe, die Auswahl der elektronischen Komponenten und die Entwicklung der Platine des Portalroboters zuständig. An den gemeinsamen Workshops waren alle vier Entwickler beteiligt.

Das Entwicklungsvorgehen hat sich hierbei an das Vorgehen der VDI-Richtlinie 2221 orientiert. Nachfolgend wird das grundlegende Schema der Entwicklungsvorgehensweise im Rahmen der Methode dargestellt. Da der Portalroboter bereits Teil des Produktportfolios ist und es sich um eine Anpassungskonstruktion eines Produktes handelt, wurden nicht alle Arbeitsschritte der VDI-Richtlinie 2221 gleichermaßen durchlaufen. Einzelne Arbeitsschritte wurden übersprungen bzw. nur in geringem Umfang durchgeführt. Die Herangehensweise ist in der Abbildung 42 verdeutlicht.

Die Zielsetzung der Entwicklung ist es, dass ein leistungsstärkerer modularer Portalroboter durch den Einsatz von Leichtbau entwickelt werden soll. Dabei soll durch Gewichtseinsparungen die Geschwindigkeit des Portalroboters erhöht werden, ohne dass die Positioniergenauigkeit verschlechtert wird. Die Prozessdauer für die Einführung eines Werkstücks mit 20kg von dem Entladepunkt in die Maschine soll um 2 Sekunden verkürzt werden. Zudem sollen die Kosten des Roboters um mindestens 10% gesenkt werden. Für das Projekt wurde eine Entwicklungszeit von 6 Monaten veranschlagt. Der Zeitpunkt der Fertigstellung ist dabei mit der Neuentwicklung eines Fräszentrums abgestimmt. Der Plan war, das neue Fräszentrum direkt mit dem neuen Portalroboter auszustatten und beide Anlagen gemeinsam zu vertreiben. Die Entwicklung wurde methodisch

durch die Einbringung des in dieser Arbeit entwickelten Instruments unterstützt. Dies geschah durch mehrere Workshops und Absprachen mit den Entwicklern. Die Umsetzung der Entwicklung erfolgte jedoch komplett eigenständig von dem Entwicklungsteam.

Die grundlegende Struktur des Portalroboters wird durch die Neuentwicklung nicht in Frage gestellt. Die ausgewählten Lösungsprinzipien werden somit nicht durch die Anpassungsentwicklung verändert. Ebenso bleibt die allgemeine Wirkstruktur des Portalroboters unverändert. Die eigentliche Entwicklung startet somit direkt mit der Gliederung in realisierbare Module und damit mit der Anwendung der Methode.

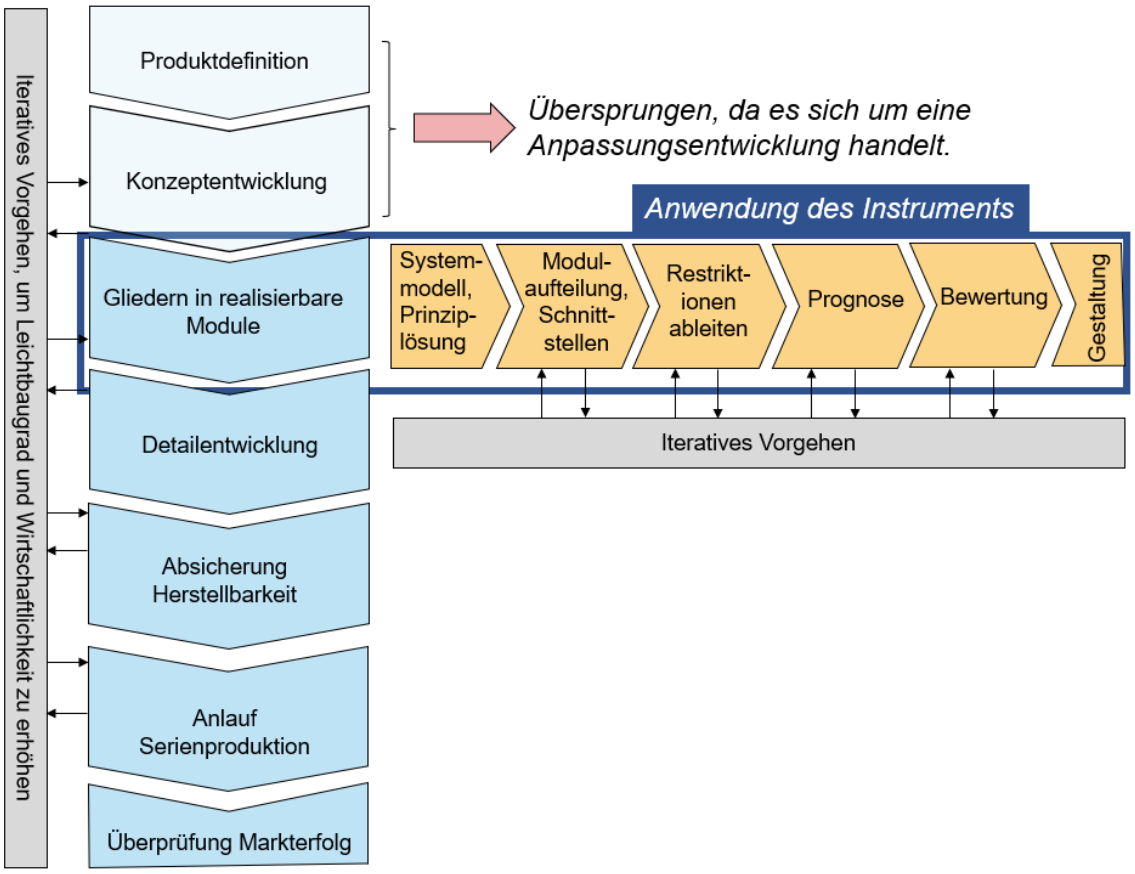


Abbildung 42: Vorgehen zur Entwicklung des Portalroboters auf Basis von [VDI 2221]

Dabei bietet die Methode eine Entscheidungsunterstützung zur Auswahl zwischen vorhandenen Modulen oder neu zu entwickelnden individuellen Leichtbaumodulen an. Nachfolgend wird auf das Vorgehen und die Ergebnisse der einzelnen Schritte eingegangen. Auf die Iterationsschritte während des Prozesses wird nicht vertiefend eingegangen.

5.2.1 Erstellen des Systemmodells

Das Systemmodell bildet ein Rahmenwerk, das die Informationsbasis für die weitere Modulaufteilung beinhaltet. Das Systemmodell wurde zu Beginn der Entwicklung in einem

Workshop mit den Konstrukteuren erstellt. In dem Systemmodell ist die Aufgabenstellung bezüglich der Optimierung des Portalroboters zusammengefasst. Teil von dem Systemmodell ist ein Umfeldmodell. Das System wird zunächst als Black Box betrachtet und mit Elementen des Umfelds, mit denen es interagiert bzw. von denen es beeinflusst wird, in Beziehung gesetzt. Das Hauptelement des Umfelds bildet das Fräs- bzw. Drehzentrum. Anschließend wurden Anwendungsszenarien mit den Konstrukteuren gemeinsam entwickelt. Diese Anwendungsszenarien dienen zur Unterstützung bei der Erstellung der Anforderungsliste. Darauf basierend wurden Anforderungen zur Optimierung des Portalroboters abgeleitet. Die Anforderungsliste wird ausführlich im Anhang A1 dargestellt. Dabei werden nur die Daten, die bei dem Portalroboter optimiert bzw. verändert werden sollen, in der Anforderungstabelle eingetragen. Zudem wurden die Daten des eigentlichen Projekts leicht verändert, um die Vertraulichkeit einzuhalten und keine Daten des Partnerunternehmens darzustellen.

Eine zusammengefasste Version des Systemmodells zu dem Portalroboter ist in der nachfolgenden Abbildung 43 verdeutlicht. Die Anforderungen werden hierin nur angedeutet, da die vollständige Liste in dem Anhang A1 hinterlegt ist. Die Funktionsstruktur und das Umfeldmodell sind verkürzt, jedoch mit allen wesentlichen Aspekten, dargestellt. Die Funktionsstruktur selbst wurde zuerst aus der bereits vorhanden Produktstruktur abgeleitet und mit der ergänzten Anforderungsliste überarbeitet.

Die Prinziplösungen für die einzelnen Funktionen sind dabei im Wesentlichen vorgegeben und werden grundlegend nicht mehr verändert. Einzig die Wahl des Antriebs wurde von den Konstrukteuren in Frage gestellt. In dem alten Modell des Portalroboters wurden Zahnriemen und Spindelantriebe verwendet. Als Alternative zu den Zahnriemen und Spindelantrieben wurden Linearmotoren für die X- und Y-Achse vorgeschlagen. Linearmotoren haben hohe Beschleunigungen, eine sehr gute Präzision, Dynamik und Wiederholgenauigkeit. Linearmotoren eignen sich deswegen hervorragend für den hier dargestellten Einsatz. In der Z-Achse kann der Linearmotor auf Grund der fehlenden Selbsthemmung jedoch nicht eingesetzt werden. Für die X- und Y-Achse wird er aber als Alternative zu den bisherigen Lösungsprinzipien betrachtet.

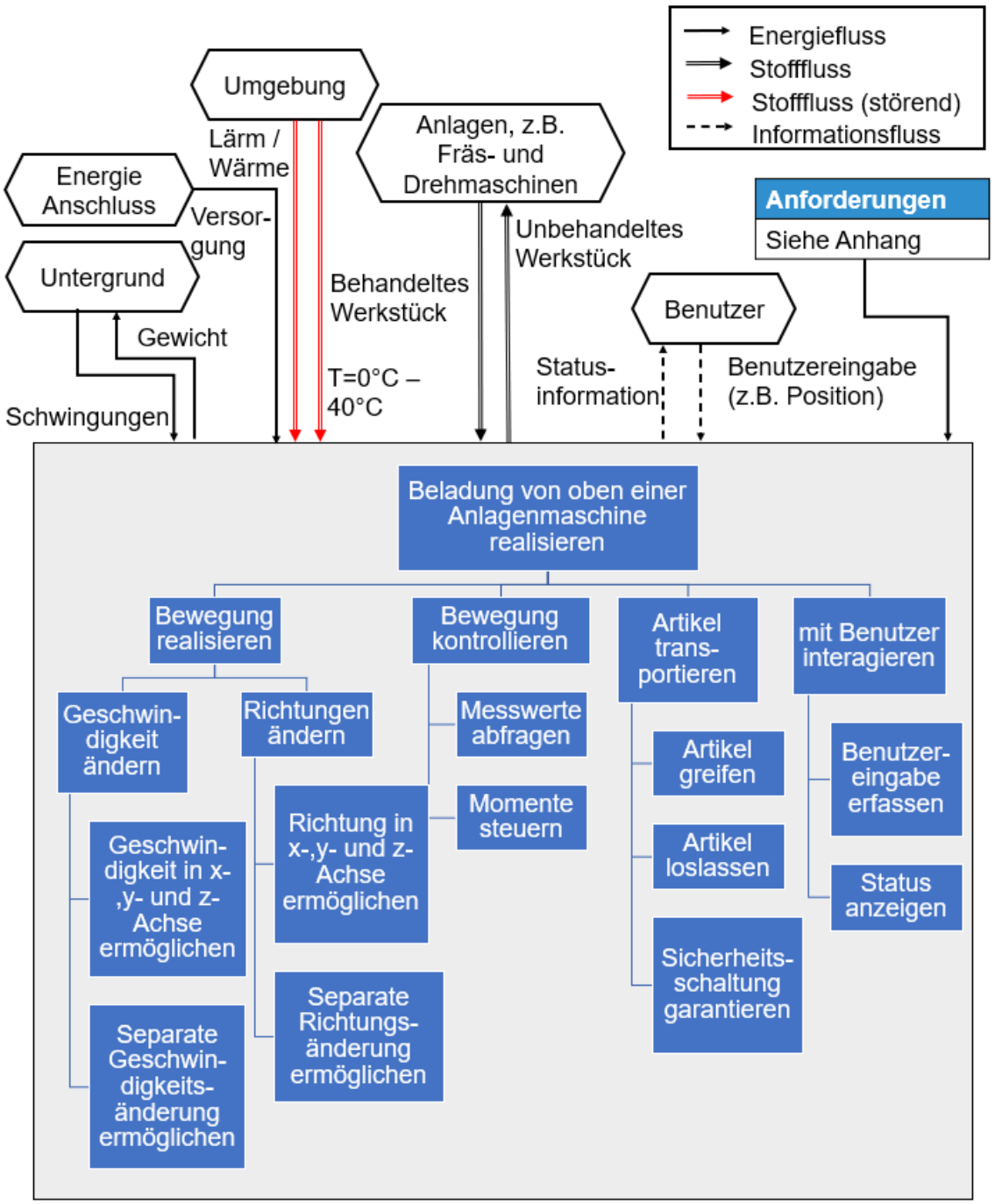


Abbildung 43: Systemmodell des Portalroboters

5.2.2 Modulaufteilung

Mit dem Systemmodell des zu optimierenden Portalroboters wird die Modulaufteilung in diesem Abschnitt vorgenommen. Da die bisherige Aufteilung der Portalroboter bereits bekannt ist, konnte die Komponentenauswahl mitsamt der Funktionsstruktur und Prinziplösungen schnell durchgeführt werden. Als Grundlage wurde der bisherige Portalroboter genommen, der in seine Einzelteile zerlegt wurde. Daraus wurden die Komponenten

abgeleitet. In der nachfolgenden Tabelle werden die wesentlichen Komponenten mit ihren entsprechenden Funktionen dargestellt.

Tabelle 10: Komponenten des Portalroboters

Komponente	Funktion
Greifersystem	Greifen des Werkstücks
Betriebssystem des Greifers	Steuerung des Greifers
Befestigungsbauteil für Greifer	Befestigung der Komponenten des Greifers
Schienensystem vom Roboter für die Bewegung in der x-Richtung	Führung der Bewegung in x-Richtung
Stützträger	Stützen des Auslegers
Befestigungsbauteil für Antriebssystem in x-Richtung	Befestigung der Komponenten des Antriebssystems in x-Richtung
Antriebssystem für die Bewegung in x-Richtung	Erzeugung der Bewegung in x-Richtung
Schienensystem vom Roboter für die Bewegung in der y-Richtung	Ausführungsschiene in y-Richtung
Befestigungsbauteil für Antriebssystem in y-Richtung	Befestigung der Komponenten des Antriebssystems in y-Richtung
Antriebssystem für die Bewegung in y-Richtung	Erzeugung der Bewegung in y-Richtung
Befestigungsbauteil für Antriebssystem in z-Richtung	Befestigung der Komponenten des Antriebssystems in z-Richtung
Schienensystem vom Roboter für die Bewegung in der z-Richtung	Ausführungsschiene in z-Richtung
Antriebssystem für die Bewegung in z-Richtung	Erzeugung der Bewegung in z-Richtung

Anschließend wird die Modulaufteilung des Portalroboters im Workshop durchgeführt. Da es sich hierbei nicht um eine komplette Neuentwicklung handelt, wurde bei der Modulaufteilung direkt mit der DSM angefangen.

Bei der DSM werden die Komponenten in Zeilen und Spalten eingetragen. Danach werden die Verbindungen zwischen den einzelnen Komponenten von den Ingenieuren im

Workshop bearbeitet und eingetragen. Als einzige Alternative in der Produktstruktur wurde hierbei eine Zusammenfassung aus Betriebsmodul in z-Richtung und dem Greifermodul gesehen. Es ergeben sich somit 5 Module, die zusammen die mechanischen Komponenten des Portalroboters bilden.

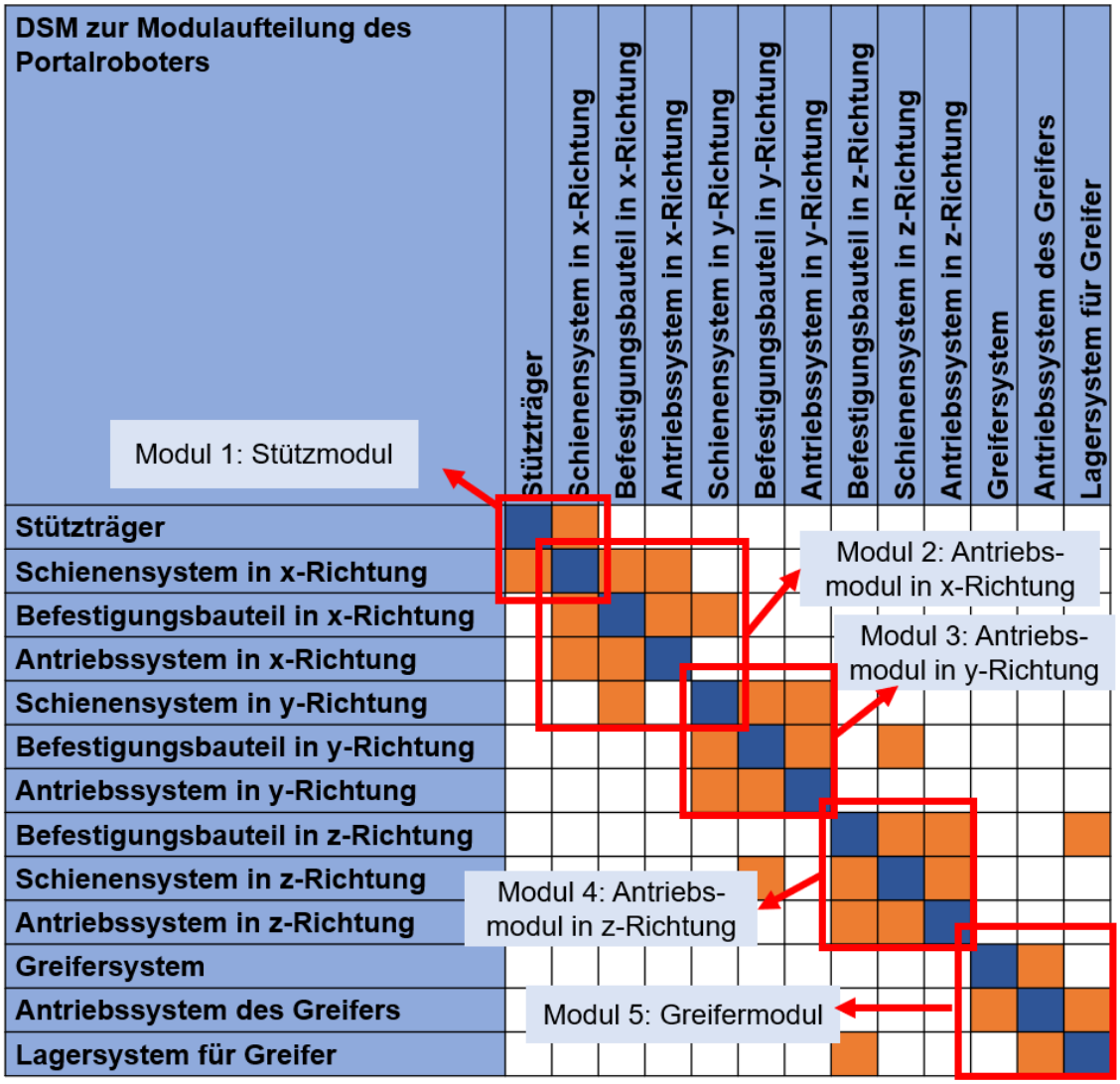


Abbildung 44: Darstellung der Ergebnisse zur Modulaufteilung mit DSM

Das Stützmodul hat dabei wenig Auswirkungen auf die Eigenschaften des Portalroboters. Modul 3 wird komplett zugekauft. Um den Entwicklungsaufwand zu minimieren, haben die Konstrukteure aufgrund ihrer Erfahrung bereits früh entschieden, dass hier für das zugekaufte Modul keine Neugestaltung oder Anpassungskonstruktion stattfinden soll. Also sind bei beiden Modulen wenige Gestaltungsspielräume gegeben. Deswegen wird auf diese im Folgenden nicht weiter eingegangen. Die Alternativen für die Module 2, 4 und 5 mitsamt Gestaltszenarien sind in der nachfolgenden Tabelle 11 dargestellt.

Tabelle 11: Modulalternativen und Gestaltszenarien der Module 2 und 4

Nr.	Modul	Gestaltszenario
2.1a	Stahlstruktur	Motor mit Getriebe + Zahnstange mit Ritzel + Schiebreglersystem
2.1b	Stahlstruktur	Linearmotor
2.2a	Aluminiumstruktur	Motor mit Getriebe + Zahnstange mit Ritzel + Schiebreglersystem
2.2b	Aluminiumstruktur	Linearmotor
4.1a	Stahlstruktur	Motor mit Getriebe + Schiebreglersystem
4.1b	Stahlstruktur	Linearmotor
4.2a	Aluminiumstruktur	Motor mit Getriebe + Schiebreglersystem
4.2b	Aluminiumstruktur	Linearmotor
4.3	Greifer funktionsintegriert in z-Achse	
5	Greifer separat über Kupplung angeschlossen	

Die einzelnen Module sind in der nachfolgenden Abbildung 45 dargestellt. Hier sind auch die Modulalternativen und die verschiedenen Gestaltszenarien dargestellt. Die Entwicklung konzentriert sich somit auf eine Neugestaltung der Module 2, 4 und 5. Hier steht zunächst die Entscheidung an, ob eine Neuentwicklung dieser Bauteile erfolgt oder ob auf das bestehende Modul zurückgegriffen werden soll. Zudem stellt sich bei dem funktionsintegrierten Modul aus 4 und 5 die Frage, ob eine Eigenentwicklung bzw. eine Anpassung oder ein Zukaufteil eingesetzt wird. Die Übersicht zeigt bereits, dass sich die Modul- und Szenarienauswahl auf wenige Aspekte reduzieren lassen. Die Anwendung der Methode hilft somit, den Entwicklungsfokus auf die zu optimierenden Module zu legen.

Als Gestaltszenarien wurden im Wesentlichen nur eine wirtschaftlichere und eine funktionalere Konstruktion für die Betrachtung herangezogen. Aufgrund der Kenntnisse des Konstruktionsteams wurde dabei eine Vorabauswahl der Gestaltszenarien für die Module 2, 4 und 5 getroffen und nicht noch mehr Szenarien definiert. Weitere Szenarien wurden somit bereits im Rahmen des Workshops ausgeschlossen, so dass eine zielgerichtete Auswahl stattfinden kann.

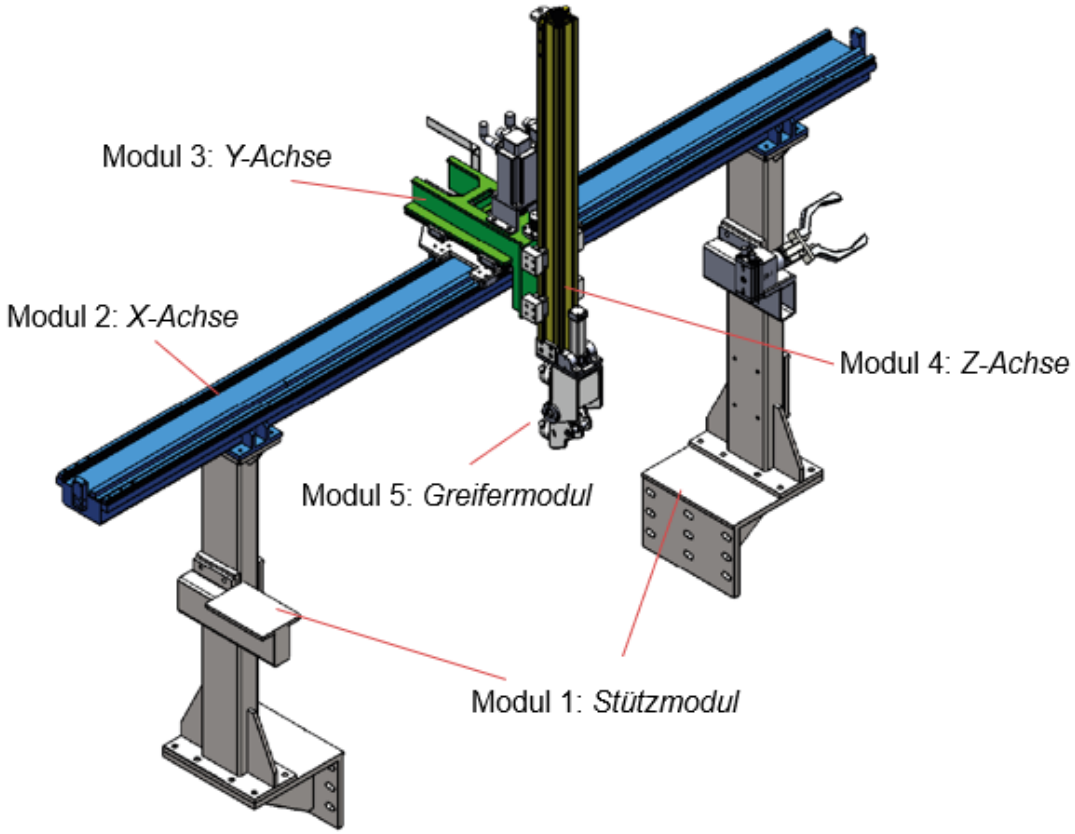


Abbildung 45: Module des Portalroboters

5.2.3 Restriktionen

In dem nächsten Schritt werden nun die Anforderungen für die einzelnen Module auf der Modulebene ermittelt. Diese Anforderungen werden anschließend in Restriktionen und funktionale Anforderungen an die einzelnen Module und das Gesamtsystem aufgeteilt. Die Herangehensweise ist dabei wie folgt:

1. Anforderungen an das Gesamtsystem auf Modulebene herunterbrechen
2. Konstruktionsrichtlinien auf die Module anwenden
3. Weitere Anforderungen über Assoziationen mit Hilfe von Hauptmerkmalliste identifizieren
4. Aufteilung in funktionale Anforderungen und Restriktionen mit entsprechender Quantifizierung

Im ersten Schritt werden alle relevanten Anforderungen an das Gesamtprodukt herausgearbeitet und dem Modul zugeordnet. Dies muss unter Berücksichtigung der Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Modulen geschehen. Das Ergebnis des gesamten Ablaufs sind Anforderungslisten mit Restriktionen, funktionalen Anforderungen und weiteren Informationen zu jedem Modul und dem Gesamtsystem. Das Ergebnis dieses Vorgehens ist

ausschnittsweise für das Modul 2 in der nachfolgenden Tabelle 12 dargestellt. Es gibt hierbei keine Unterschiede zwischen den einzelnen Szenarien, da sich weder die eingesetzten Fertigungsverfahren noch äußere Parameter durch die unterschiedlichen Gestaltszenarien wesentlich unterscheiden. Einzig beim Einsatz eines Zahnradantriebs ergeben sich weitere Anforderungen an den Zahnradantrieb.

Tabelle 12: Ausschnitt aus den Anforderungen an das Gesamtsystem

Nr.	Anforderung (A) / Restriktion (R)	Wert
1	A: Gewicht	<30kg
2	R: Hub	4m
3	R: Ausmaße X	<4,3m
4	R: Ausmaße Y	<40cm
5	R: Ausmaße Z	<80cm
6	A: Verfahrgeschwindigkeit	100m/min
7	A: Beschleunigung	3m/s²
8	Wirtschaftlichkeitsanforderung: Herstellkosten	<120€
	…	

5.2.4 Prognose

Im Rahmen der Prognose werden die einzelnen Szenarien so weit ausgearbeitet, dass eine Abschätzung über die Erfüllung von Anforderungen und Restriktionen getroffen werden kann. Die Prognose wird nachfolgend beispielhaft für die relevantesten Entscheidungskriterien erstellt. Die relevantesten Entscheidungskriterien wurden hierbei von den Konstrukteuren bestimmt.

Die Restriktionen sind im Grunde alle gleichermaßen relevant, da eine Nichterfüllung dazu führt, dass das Gestaltszenario verworfen wird. Dennoch bilden die Traglast und Positioniergenauigkeit die signifikantesten Produkteigenschaften, die unbedingt durch die Konstruktion des Portalroboters erreicht werden müssen. Bei den funktionalen Anforderungen ist die Dynamik das entscheidende Kriterium. Die Dynamik wird wesentlich durch das Gewicht der bewegten Komponenten beeinflusst, weswegen dieses zusätzlich mit aufgenommen wurde.

Tabelle 13: Ableitung der relevantesten Anforderungen und Restriktionen

Restriktion	Traglast	*<20kg*
	Positionswiederholgenauigkeit	< ± 0,3 mm
	Absolutgenauigkeit	< ± 1 mm
Funktionale Anforderung	Verfahrgeschwindigkeit	*>100m/min*
	Beschleunigung	*>3m/s²*
	Gewicht Modul Y	*<30kg*
	Gewicht Modul Z	*<40kg*

Die Restriktionen gelten hierbei für das Gesamtsystem bzw. alle Module. Die funktionalen Anforderungen können direkt den Modulen X, Y und Z zugeordnet werden. Die Verfahrgeschwindigkeit und die Beschleunigung gelten dabei für alle Module. Das Gewicht der Module Y und Z ist bereits direkt vorgegeben. Für das Modul 4 wurden vier Gestaltszenarien und zudem eine Modulalternative ausgearbeitet. Die Modulalternative beinhaltete eine Funktionsintegration des Greifers in die Schiene. Eine Restriktion hierbei war, dass alle mechanischen Teile in Eigenfertigung erstellt werden sollen. Dies konnte konstruktiv bei der funktionsintegrierten Lösung aus Greifer und dem Modul wegen der Einschränkung der Fertigungsmöglichkeiten nicht erfolgen, weswegen die funktionsintegrierte Lösung wieder verworfen wurde. Daraus ergeben sich für das Modul 4 insgesamt vier unterschiedliche Gestaltszenarien, die in der Abbildung 48 dargestellt sind.

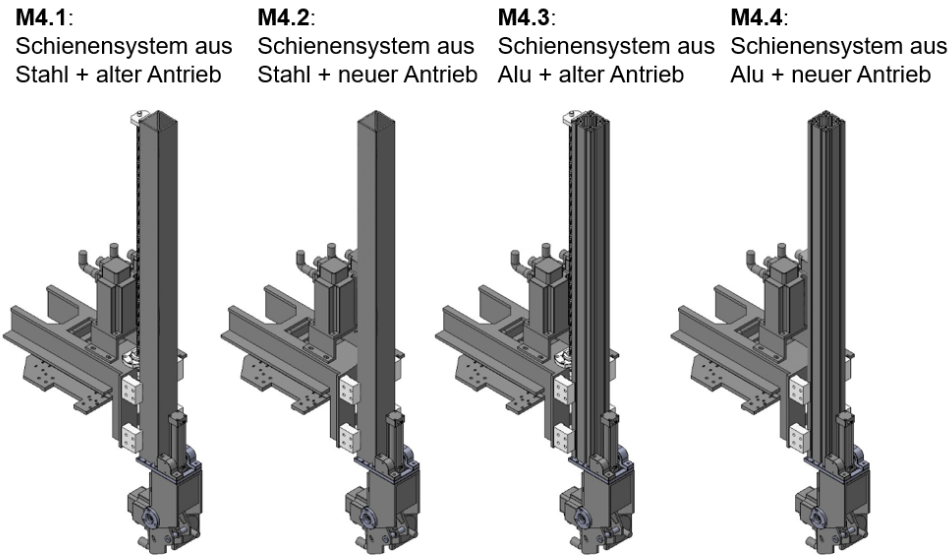


Abbildung 46: Alternative Gestaltszenarien für das Modul 4

Für die vier Gestaltszenarien wurden anschließend Abschätzungen zur Erfüllung der funktionalen Anforderungen durchgeführt. Das Ergebnis dieser Abschätzung geht aus der nachfolgenden Tabelle hervor.

Tabelle 14: Prognose der Anforderungserfüllung der Gestaltszenarien

	Gestaltszenarien				
	Anforderung	**1**	**2**	**3**	**4**
Verfahrgeschwindigkeit	>100m/min	110	125	120	130
Beschleunigung	*>3m/s²*	3,5	4	3,8	4,2
Gewicht	*<40kg*	35	35	25	25

Da die Zusammenhänge eindeutig sind und die Komponenten unabhängig voneinander betrachtet werden können, wurde keine Zusammenfassung auf Gesamtsystemebene vorgenommen.

5.2.5 Bewertung

Auf Basis von Tabelle 14 findet anschließend die Bewertung der unterschiedlichen Gestaltszenarien statt. Zuerst werden hierzu die Produktkosten ermittelt. Dafür wurden die einzelnen Kosten für die jeweiligen Module abgeschätzt. Diese Abschätzung muss dabei für jede Alternative erfolgen. Diese Abschätzung ist in der Tabelle 15 für die Module 2 und 4 dargestellt.

Tabelle 15: Berechnung der Selbstkosten für die Alternativen der Module 2 und 4

Modul	Einzelkosten Material	Einzelkosten Produktion	Einzelkosten Sonder-entwicklung	Selbstkos-ten
2.1a	53 €	*22* €	2 €	78 €
2.1b	58 €	*24* €	2 €	86 €
2.2a	55 €	*10* €	2 €	69 €
2.2b	**42** €	***13*** €	**6** €	**62** €
4.1a	30 €	*9* €	7 €	48 €
4.1b	38 €	*14* €	4 €	57 €
4.2a	**29** €	***13*** €	**3** €	**46** €
4.2b	31 €	*14* €	4 €	53 €

Anschließend müssen die Anforderungen in den Kennwert „Nutzen“ zusammengefasst werden. Als einzige verbleibende Anforderungen sind dies die Verfahrgeschwindigkeit und die Beschleunigung. Die Gewichte der Module Y und Z schlagen sich in der Beschleunigung und der Verfahrgeschwindigkeit nieder und werden nicht extra in die Betrachtung mit aufgenommen. Die Verteilung zwischen der Geschwindigkeit und Beschleunigung wurde hierbei bereits berücksichtigt.

Anschließend wurde eine Abschätzung der Werte für die auszuwählenden Module vorgenommen. Die Werte werden hierbei von den Selbstkosten subtrahiert. Daraus ergeben sich für die auszuwählenden Module die folgenden Kennwerte:

Tabelle 16: Verrechnung des Kennwerts auf die Module 2 und 4

Modul	Nutzen- Kennwert	Selbstkosten- Kennwert
2.1a	0,07	0,94
2.1b	0,11	1,00
2.2a	0,10	0,79
2.2b	0,17	0,64
4.1a	0,04	0,58
4.1b	0,10	0,64
4.2a	0,07	0,53
4.2b	0,13	0,71

Daraus ergibt sich, dass die Module 2.2b und 4.2b ausgewählt wurden, was zu einer Kostensenkung von 29% gegenüber den alten Modulen führt, bei einer erheblich verbesserten Anforderungserfüllung. Das Ergebnis hat die Anforderung an die Kostensenkung von mindestens 10% somit erfüllt bzw. sogar übertroffen. Diese wird in der Tabelle 17 auch mit dem alten System verglichen.

Die Auswertung zeigt, dass die Abschätzung darauf schließen lässt, dass unter verringerten Kosten eine Steigerung der Funktionalität des Portalroboters möglich ist. Mit Hilfe der in dieser Arbeit entwickelte Methode wurde in kurzer Zeit eine Produktstruktur und eine Entwicklungsrichtung für den Portalroboter festgelegt, die sehr zielorientiert zu der Optimierung von zwei Modulen führt und bei zwei weiteren Modulen auf eine bestehende Lösung zurückgreift. Die Anwendung der Methode wurde im Rahmen von sechs halbtages-Online-Workshops umgesetzt. Dabei dienten drei Workshops dazu, das Systemmodell und die Anforderungen an den Portalroboter zu ermitteln. Der gesamte Entwicklungsablauf ist innerhalb von drei Wochen abgewickelt. Innerhalb der drei ersten Wochen

des Projektes wurde somit festgelegt, in welchen Modulen Optimierungsschritte vorgenommen werden sollen. Im Rahmen des nachfolgenden Abschnitts wird auf die Ergebnisse des Entwicklungsprojektes eingegangen: wie wurde die nachfolgende Entwicklung ausgeführt und welchen Nutzen die Methode hierbei hatte.

Tabelle 17: Projektergebnisse, bzw. -kennzahlen zur Entwicklung des Portalroboters

Projektkennzahl	Ziel	Lösung Gesamtsystem
Projektkosten	95.000	55.000
Projektdauer	6 Monate	2 Monate
Projektaufwand in Monaten	11,4	3,7
Projekterfüllungsgrad	100%	121%
Erfüllung Anforderungen / Restriktionen	100%	100%

5.3 Ergebnis

Die anschließende Entwicklung ist innerhalb von zwei Monaten und damit vier Monate vor dem anvisierten Abschluss fertig gestellt worden. Der dabei entstandene Roboter ist in der Abbildung 47 dargestellt.

Die schnelle Entwicklungszeit ist auf die Fokussierung auf zwei Module zurückzuführen. Die zu verändernden Variablen waren weinige, da durch die beibehaltenen Module bereits Schnittstellen und auch viele Randbedingungen an die Entwicklung geklärt waren. Zudem ist die zweimonatige Entwicklungszeit auch auf Verzögerungen bei der Beschaffung von Komponenten zurückzuführen. Ohne diese Verzögerungen hätte eine Fertigstellung noch früher stattfinden können, da die Tätigkeit der Ingenieure bereits nach 3 Wochen weitestgehend abgeschlossen war. Im Wesentlichen wurden die Module 2 und 4, also die X- und die Z-Achse neugestaltet. Diese sind in der Abbildung 48 dargestellt.

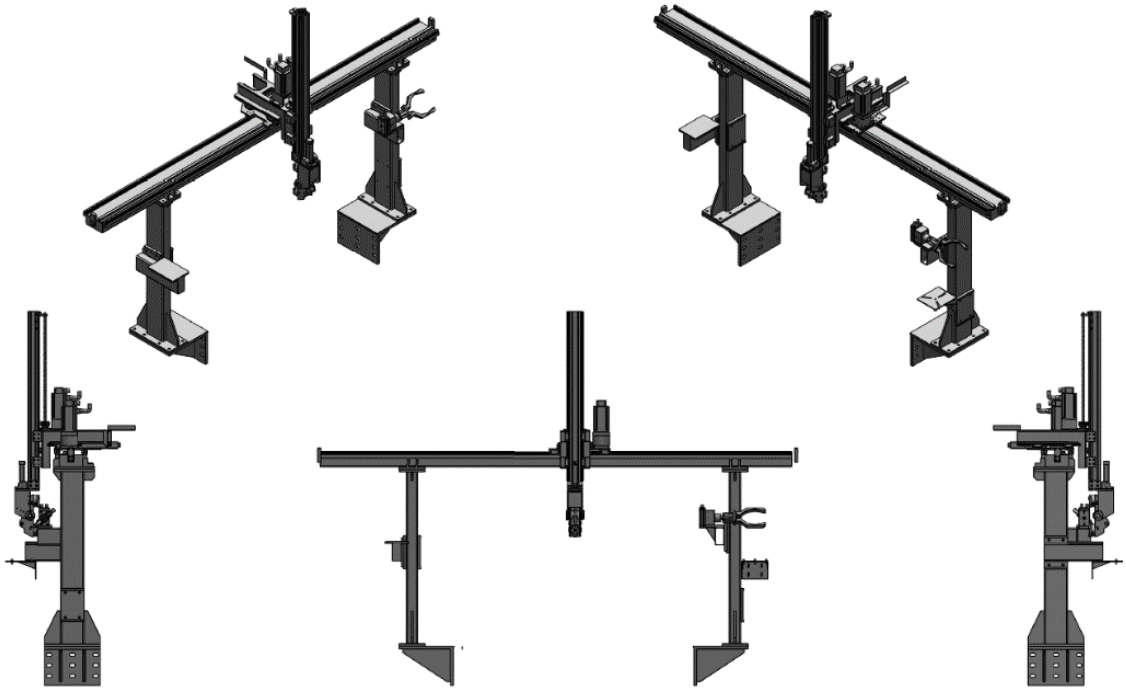


Abbildung 47: Darstellung des fertigen Portalroboters

Die Ergebnisse der Entwicklung haben dabei die Ziele an das Entwicklungsprojekt weit übertroffen (siehe Tabelle 18). In Simulationen konnten die in der nachfolgenden Tabelle 18 dargestellten Ergebnisse für den Portalroboter erreicht werden.

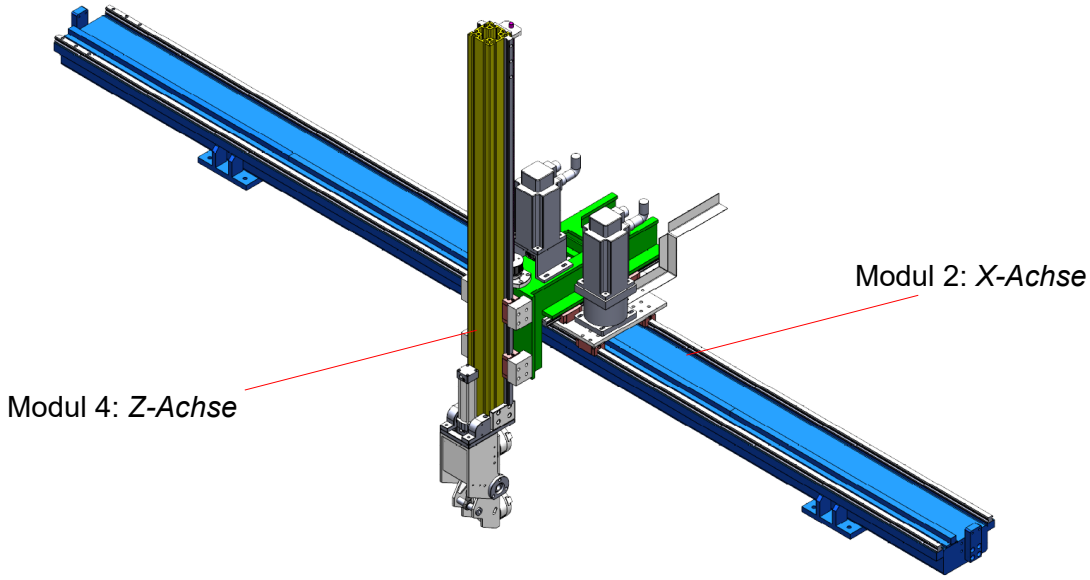


Abbildung 48: Hauptentwicklungsmodule des Portalroboters

Tabelle 18: Zielerreichung des Gesamtsystems

Anforderung	Ziel	Lösung Gesamtsystem
Traglast	20kg	✓
Positioniergenauigkeit	< ± 0,3 mm	± 0,07mm
Wiederholgenauigkeit	< ± 1 mm	± 0,6 mm
Verfahrgeschwindigkeit	>100m/min	135m/min
Beschleunigung	>3m/s²	4,3m/s²
Gewicht Modul Y	<30kg	26kg
Gewicht Modul Z	<40kg	34kg
Produktionskosten	<80% vom Vorgängermodell	78%

Der simulierte Bewegungsvorgang eines Werkstücks von 20kg Gewicht, der um 2 Sekunden verringert werden sollte, wurde dabei um 4,2 Sekunden verkürzt. Zudem konnten die Produktkosten um 22% gesenkt werden. Dadurch konnten die Hauptziele an das Entwicklungsprojekt erreicht bzw. sogar übertroffen werden.

Das Entwicklungsprojekt hat somit gezeigt, dass vom Ergebnis her die Einbindung der Methode zu einem sehr guten Resultat geführt hat. Zusätzlich wurde im Zuge der Fallstudie eine laufende Validierung durchgeführt. Dabei wurde die laufend der Projektfortschritt überwacht und die Ingenieure befragt, um die Wertigkeit der Methode als Unterstützungstool abzusichern.

6 Validierung

Im Kapitel 5 wurde die Implementierung der Methode zur Unterstützung von Entwicklungsentscheidungen bei modularen Leichtbauprodukten anhand des Entwicklungsprojekts eines Portalroboters vorgestellt. Die Ergebnisse der Produktentwicklung haben dabei die Erwartungen an den Portalroboter übertroffen. Das Projekt konnte in einem Drittel der veranschlagten Zeit mit sehr guten Ergebnissen realisiert werden. Die Prozessdauer hat sich um 4,2 Sekunden verkürzt und die Produktkosten um 22% gesenkt. Nachfolgend wird die Validierung dieser Methode vorgestellt. Die Validierung der Methode, die speziell auf den Modulleichtbau zugeschnitten ist, wird basierend auf mehrere Interviews durchgeführt. An den Interviews sind die Entwicklungsingenieure des Portalroboters, die bereits zahlreiche ähnliche Entwicklungsprojekte mit einem vergleichbaren Umfang bearbeitet haben, beteiligt. Bevor die Validierung bzw. die Ergebnisse der Interviews präsentiert werden, wird zunächst auf die in der Einleitung dieser Arbeit dargestellte Problemstellung eingegangen. Darauf basierend werden die Aufgabenstellung und die daraus resultierenden Erfolgsfaktoren für die Methode abgeleitet, die Bestandteil der Validierungsfragen der Interviews sind. Basierend darauf sind die Prüfungshypothesen für die Validierung abgeleitet worden.

6.1 Prüfungshypothese

In der Problemanalyse dieser Arbeit wurde die Problemstellung herausgearbeitet: Die Kombination aus Modularisierung und Leichtbau sorgt dafür, dass der Produktstrukturierungsprozess noch komplexer wird und mehr Iterationen für die Ermittlung der optimalen Produktstruktur erforderlich sind. Die Problemanalyse hat aufgezeigt, dass für eine ökonomische Entwicklung modularer Leichtbauprodukte eine geeignete Methode zur Reduzierung der Entwicklungsiterationen erforderlich ist. Auf Grundlage einer ausführlichen Literaturrecherche wurde in Kapitel 3 nachgewiesen, dass keine der bestehenden Methoden diesen Anforderungen gerecht wird. Dementsprechend wird eine neue Methode benötigt. Auf Grundlage dieser Problemstellung wurden die Forschungsfragen (siehe Kapitel 3) hergeleitet. Das Ziel war es, eine Methode zu entwickeln, mit der modulare Leichtbauprodukte schneller entwickelt werden können. Um zu überprüfen, ob die Methode die Entwicklung des modularen Leichtbauproduktes gemäß den gestellten Anforderungen unterstützt, werden die folgenden Prüfungshypothesen aufgestellt. Diese Prüfungshypothesen werden in den Interviews zur Bewertung des Erfolgs der Methode untersucht.

1) Die Methode deckt die in Kapitel 3.4 ermittelten Kriterien ab, die als Handlungsschwerpunkte zur Reduzierung der Iterationen zur Entwicklung modularer Leichtbauprodukte vorgenommen werden:

    - Anwendbar auf modulare Leichtbauproduktstrukturierung
    - Quantifizierter Vergleich zwischen der Modularisierung und Leichtbaumaßnahmen

- Frontloading von Konstruktionsentscheidungen

2) Die Effizienz der Produktentwicklung wird bei der Anwendung der Methode eindeutig verbessert.

3) Der ökonomische Aspekt des modularen Leichtbauprodukts kann bereits am Anfang für die Entwicklung berücksichtigt werden.

4) Die Vorgehensweise der Methode ist leicht nachvollziehbar und wird durch Methoden, Werkzeuge und Visualisierungen anwenderfreundlich unterstützt.

Im Rahmen der Interviews mit den Ingenieuren des Projekts gilt es, Antworten auf diese vier Prüfungshypothesen zu generieren. Entsprechend wurden Fragen formuliert, dass durch den Einsatz der Methode eine signifikante Verbesserung hinsichtlich dieser Aspekte erzielt wird. Zusätzlich wird die Fallstudie mit anderen Entwicklungsprojekten des Unternehmens verglichen. Durch diesen Vergleich sollen die Vorteile der Methode hervorgehoben werden.

6.2 Darstellung der Validierungsergebnisse

Für die Validierung wurden mit den vier erfahrenen Ingenieuren, die das Projekt zur Implementierung der Methode durchgeführt haben, Interviews geführt. Die vier erfahrenen Ingenieure haben bereits mehrere ähnliche Entwicklungsprojekte durchgeführt, die sowohl vom Umfang als auch von der Zielsetzung bzw. der Anforderung her vergleichbar sind. Im Folgenden werden zuerst ähnliche Entwicklungsprojekte des Unternehmens, die mit dem Fallbeispiel dieser Arbeit verglichen werden, kurz vorgestellt. Danach wird der Aufbau des Interviews mit den Entwicklungsingenieuren vorgestellt. Aus diesen Interviews werden die Validierungsergebnisse der Methode abgeleitet.

Zur Validierung der in dieser Arbeit entwickelten Methode wurden alle vergangenen Entwicklungsprojekte des Unternehmens mit der Entwicklung des Portalroboters verglichen. Hierzu wurde u.a. der Durchschnitt der Entwicklungsdauer und die Bearbeitungskosten und die Ergebnisgüte der anderen Entwicklungsprojekte als Vergleichskriterium herangezogen. Da andere Entwicklungsprojekte nur begrenzt vergleichbar mit der Entwicklung des Portalroboters sind, wurden zudem drei Entwicklungsprojekte mit ähnlichen Aufgabenstellungen herausgesucht. Für diese drei Entwicklungsprojekte wird ein qualitativer Vergleich vorgenommen. Dabei wird das Entwicklungsprojekt zur Gewichtsoptimierung des Portalroboters als das Referenzprojekt genommen. Bei den anderen drei Entwicklungsprojekten geht es um die Gewichtsoptimierung von verschiedenen Drehmaschinen. Die Zielsetzung der Entwicklungsprojekte war die gleiche wie bei diesem Projekt: Die Erhöhung der Leistung der Maschinen bei einer gleichzeitigen Verringerung der Produktkosten durch Gewichtseinsparungen. Die drei Entwicklungsprojekte und ihre Ergebnisse sind tabellarisch in dem Anhang A3 zusammenfassend dargestellt. Dabei wird sich im Rahmen des Modulleichtbaus lediglich auf die Entwicklung der mechanischen Bauteile

konzentriert. In der Abbildung 49 ist der Vergleich zwischen der Entwicklung des Portalroboters und anderen durchschnittlichen Projekten dargestellt.

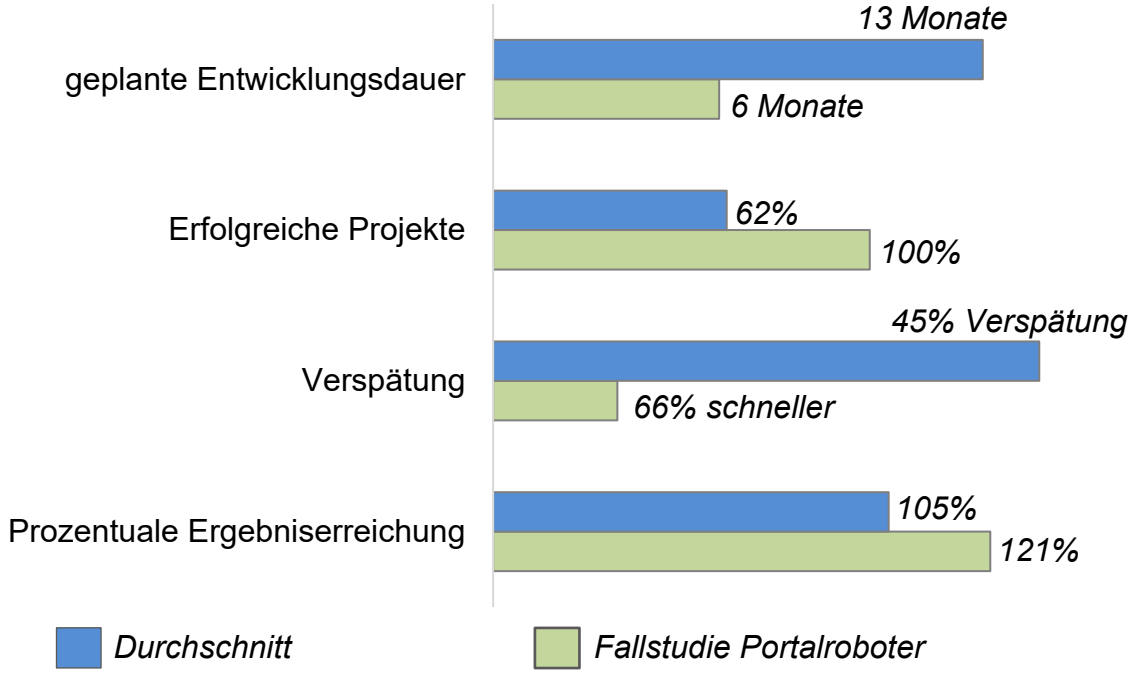


Abbildung 49: Vergleich der Portalroboterentwicklung in anderen Projekten

Der Vergleich zeigt, dass mit dem Projekt wesentlich bessere Ergebnisse als bei anderen Entwicklungsprojekten erzielt wurden. Darüber lässt sich jedoch keine generelle Aussage zu der Methode ableiten. Diese sollen zeigen, dass durch die Methode eine Verbesserung des Entwicklungsprojektes hinsichtlich der in Abschnitt 6.1 genannten Aspekte erfolgte.

Die Interviews zur Validierung wurden nach Abschluss des Gesamtprojekts vorgenommen. Die Interviewbögen sind in dem Anhang A4 hinterlegt. Die Interviewbögen dienen jedoch mehr als Gesprächsleitfaden. Die Ergebnisse der Interviews sollen qualitativ bewertet werden. Das Interview ist hierbei in vier Blöcke aufgeteilt:

- Gesamteindruck
- Durchführbarkeit
- Struktur
- Ergebnisse

Die Ergebnisse der vier Bögen der Abschlussfragen werden in der nachfolgenden Abbildung 50 dargestellt.

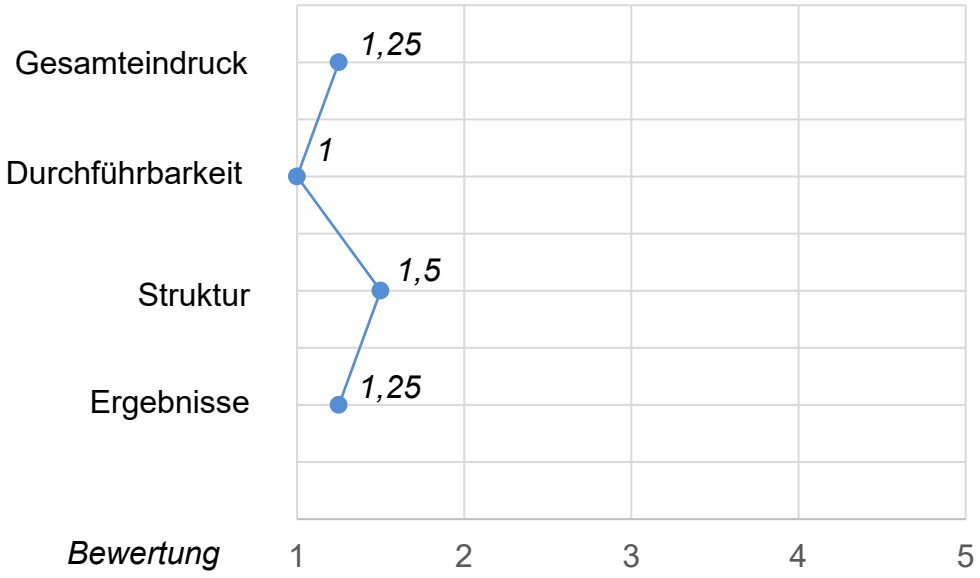


Abbildung 50: Bewertung der Methode durch die Ingenieure

Trotz der geringen Teilnehmerzahl war die Rückmeldung eindeutig, dass die zielführende Herangehensweise bereits zu einer Fokussierung der Entwicklungsaufgabe geführt hat, wodurch das Projekt deutlich schneller und effektiver bearbeitet werden konnte. Alle Teilnehmer gingen davon aus, dass eine Verwendung der Methode in allen Projekten zu ähnlich positiven Effekten führt. Insbesondere bei Leichtbau sei es wichtig, die Übersicht über die Entwicklungsaufgabe zu bewahren, weswegen diese Strukturableitung eine sehr gute Unterstützung bei der Entwicklung geben würde.

6.3 Auswertung der Validierungsergebnisse

Die in Abschnitt 6.1 aufgestellten Hypothesen werden mit den Validierungsergebnissen aus den Interviews in diesem Abschnitt überprüft. Dabei fließen die Rückmeldungen von den vier Fachexperten des Herstellers des Portalroboters ein.

Hypothese 1: Handlungsschwerpunkte zur Verringerung der Entwicklungsiterationen

In dem Implementierungsbeispiel wird die Methode für die Funktions- bzw. Gewichtsoptimierung des modularen Portalroboters durchgeführt. In der Methode geht es im Wesentlichen um eine effiziente Entscheidungsunterstützung zwischen der Modularisierung und dem Leichtbau. Dafür wird durch das Frontloading der Konstruktionsentscheidung und der frühen Berücksichtigung der Restriktionen aus dem gesamten Produktlebenszyklus eine Informationsbasis geschaffen. Das ermöglicht eine vollständige Einbeziehung aller relevanten Faktoren beim Vergleich der Vorteile zwischen standardisierten Modulen

und individuellen Leichtbauteilen. Daraus kann ein quantitativer Vergleich gezogen werden, womit genaue Entscheidungen zwischen der modularen Bauweise und der Leichtbauweise getroffen werden können.

Hypothese 2: Gewichtsziel effizient erreichen

Die Kernaktivität der Methode „Modulaufteilung“ geschieht unter den Gesichtspunkten der Optimierung des Leichtbaugrads im Rahmen einer modularen Baustruktur. Daraus ergibt sich das Ziel, das Gewicht des modularen Produktes effizient zu reduzieren. Durch das Frontloading der Konstruktionsentscheidungen bezüglich der Produktstruktur wird die Gesamtsicht zur Abstimmung der Anforderungen, insbesondere der konfliktären Anforderungen zwischen der Modularisierung und dem Leichtbau, ermöglicht. Dadurch werden die Iterationsschleifen zur Gewichtsreduktion bei der Entwicklung eines modularen Produktes reduziert. Dies senkt den Aufwand und erhöht die Effizienz in der Entwicklung, wodurch das Gewichtsziel effizienter erreicht wird.

Hypothese 3: Wirtschaftliches Ziel realisieren

Die Gewichtsreduzierung erhöht den Leichtbaugrad. Demgegenüber wird eine Reduktion des Modularisierungsgrads herbeigeführt. Das bedeutet, dass die wirtschaftlichen Vorteile durch die modulare Produktstruktur wie zum Beispiel die Skaleneffekte nicht zu 100% ausgeschöpft werden können. Darüber hinaus bringen die Leichtbaukomponenten bzw. –module meistens erst in der Nutzungsphase wirtschaftliche Vorteile, wovon Hersteller nicht direkt profitieren können. Daher stellt die Herausforderung der ökonomischen Entwicklung von modularen Leichtbauprodukten immer die größte Hürde zur Verwendung des Modulleichtbaus dar. Bei dieser Methode wird eine ökonomische Bewertung der Produktstruktur vorgenommen, womit der wirtschaftliche Vorteil bei modularen Leichtbauprodukten genau bemessen werden kann. Dadurch sind die Entwickler in der Lage, das wirtschaftliche Ziel mit Hilfe der Methode zu realisieren.

Hypothese 4: leicht nachvollziehbare und anwendungsfreundliche Vorgehensweise der Methode

Die anderen Entwicklungsprojekte wurden bisher ohne methodische Begleitung für den Modulleichtbau durchgeführt. Nach den klassischen Entwicklungsmethoden wie zum Beispiel VDI-Richtlinie 2221 resultiert die Leichtbauentwicklung in zahlreichen Iterationen. Der Hauptgrund liegt daran, dass die Zielkonflikte zwischen der Modularisierung und des Leichtbaus in verschiedenen Entwicklungsphasen nach und nach auftauchen. Sobald ein Faktor nicht berücksichtigt wurde, müssen alle anderen Faktoren neu überprüft und berechnet werden. Mit dem in dieser Arbeit vorgestelltem, systematischen Vorgehen wird versucht, die Klärung der Informationen methodisch gestützt nach vorne zu verlagern. Daraus ergibt sich ein Überblick mit transparenten Informationen. Dies ist die Basis für die Entwickler, bereits zu Beginn des Projekts bessere Entwicklungsentscheidungen zu treffen. Anhand dieser Ergebnisse kann darauf geschlossen werden, dass die Methode

leicht nachvollziehbar ist und durch die Werkzeuge und Vorgehensweise der Methode eine gute Anwenderfreundlichkeit gegeben ist.

Aus diesen Validierungsergebnissen lässt sich ableiten, dass mit der in dieser Arbeit entwickelten Methode entscheidende Vorteile bei der Entwicklung modularer Leichtbauprodukte erzielt werden. Die Ergebnisse dieser Befragungen spiegeln wider, dass die Ergebnisse der Fallstudie auch auf andere ähnliche Projekte übertragbar sind und dass die Entwickler die Vorteile der Methode auf andere Produkte übertragen können. Dies wird durch die Untersuchung mit Hilfe der vier Prüfungshypothesen noch einmal bestätigt. Die Aufgabenstellung konnte demzufolge mit dieser Methode erfolgreich bearbeitet werden.

Es ist zu erwähnen, dass diese Methode in einem sehr frühen Konstruktionsstadium sich auf die Auswahl der möglichen Alternativen von Produktstrukturen fokussiert. Daher könnte es sein, dass der Aufwand für solche Entwicklungsprojekte mit einem höheren Anteil an Einzelteile in der frühen Phase schnell zunimmt. Dabei ist es notwendig, durch entsprechende Software die Entwicklung bzw. Modellierung der Produktstruktur zu unterstützen, zum Beispiel Computer Aided Design (CAD) und Product Data Management (PDM).

7 Schlussbetrachtung und Ausblick

Zu Beginn dieser Arbeit wurde die kritische Lage von Rohstoffen und der Ressourcenbedarf vorgestellt. Hinsichtlich der Verknappung der Ressourcen wird die Leichtbauweise als eine der wichtigsten Lösungen angesehen. Insbesondere spielt der Leichtbau in der Nutzungsphase eine entscheidende Rolle. Dabei streben Leichtbauprodukte nach einer Minimierung des Gewichts. Das fordert häufig die Individualisierung, die jedoch zu höheren Aufwänden und verlängerten Entwicklungszeiten führt. Modularisierungsstrategien helfen dabei Kosten zu reduzieren und damit die Wettbewerbsfähigkeit auf Produktebene zu sichern. Die modulare Bauweise ermöglicht eine flexible und konfigurierbare Produktentwicklung. Daher wird die Entwicklung von modularen Leichtbauprodukten angestrebt, die die Vorteile beider Ansätze kombiniert. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde daher eine Methode zur Unterstützung der Konstruktionsentscheidung bei modularen Leichtbauprodukten entwickelt.

In der Problemstellung werden die Einschränkungen von den Modularisierungsmaßnahmen bei der Leichtbauanwendung aufgezeigt. Modulare Produktstrukturen führen zu standardisierten Komponenten bzw. Modulen, wodurch Skaleneffekte ermöglicht werden. Dadurch sind die Bauteile bzw. Module und Schnittstellen meistens überdimensioniert. Das widerspricht genau dem Leichtbauprinzip, also die Bestrebung nach einem minimalen Baugewicht unter höchster Ausnutzung. Aus diesen konfliktären Zielsetzungen entsteht die Herausforderung zur Kombination beider Ansätze. Der wesentliche Aspekt in der Kombination liegt darin, bewusste Auswahlentscheidungen zwischen bestehenden Modulen und der individuellen Entwicklung neuer Leichtbaukomponenten optimal zu treffen. Daher zielt diese Arbeit darauf ab, eine methodische Vorgehensweise zu entwickeln, die eine effiziente Entscheidungsfindung zur Auswahl der Produktstruktur zwischen der Modularisierung und dem Leichtbau unterstützt.

Dafür wurde eine Recherche über Entwicklungsmethoden von der Modularisierung, dem Leichtbau und dem Modulleichtbau durchgeführt. Darauf basierend wurde die Abgrenzungsmatrix zwischen eigenem Vorhaben und existierenden Arbeiten aufgestellt, die die Forschungslücke eindeutig darstellt. Die Zielsetzung dieser Arbeit stimmt mit dieser Forschungslücke überein. Gleichzeitig wird der Forschungsbedarf der Methode aufgezeigt, der einem quantitativen Vergleich zwischen beiden Bauweisen und dem Frontloading von Konstruktionsentscheidungen hinsichtlich der Produktstruktur entspricht.

Weiterhin wird ein methodisches Vorgehen entwickelt, das aus vier Schritten besteht. Als Grundlage für die Bearbeitung werden notwendige Informationen und Zusammenhänge in einem Systemmodell zusammengefasst. Diese Informationen werden als Basis des ersten Arbeitsschrittes der Modulaufteilung verwendet. Für die Modulaufteilung werden mehrere Lösungsalternativen, die nachfolgend analysiert und bewertet werden, ausgearbeitet. Dafür müssen alle Restriktionen und Anforderungen in dem nächsten Schritt identifiziert werden. Die Anforderungen werden zuerst zu den einzelnen Modulen der Alter-

nativlösungen zugeordnet. Anschließend wird mit Hilfe von verschiedenen Gestaltszenarien der Erfüllungsgrad der Alternativlösungen bewertet. In dem letzten Schritt wird der wirtschaftliche Aspekt bei der Entscheidungsfindungen berücksichtigt. Dabei werden alle Faktoren, wie zum Beispiel Material, Entwicklungsaufwand, Produktionsaufwand, usw. in Kosten umgerechnet. Darauf basierend wird eine Optimierung der Produktstruktur auf Produktebene durchgeführt. Daraus ergibt sich eine optimale Lösung der Produktstruktur bezogen auf den Modulleichtbau, die anschließend weiterbearbeitet wird und entsprechend zu einer detailliert konstruktiven Gestaltung führt. Bei diesem Vorgehen kann es zwar weiterhin zu Iterationen kommen, der Umfang der Iterationen ist aber deutlich eingeschränkter. Dadurch wurde die Entwicklungsdauer bei der exemplarischen Anwendung von geplanten sechs Monaten auf zwei Monaten verkürzt. Dadurch wird die Effizienz der Entwicklung von modularen Leichtbauprodukte enorm verbessert.

Die Methode wurde an einem Anwendungsbeispiel zur Entwicklung eines Portalroboters eingesetzt. Ziel des Entwicklungsprojekts war die Steigerung der Leistung des Portalroboters bei gleichzeitiger Reduktion der Kosten. Der vorhandene Portalroboter besteht aus mehreren Modulen. Es sollte dabei durch die Gewichtsreduzierung die Geschwindigkeit der Arbeitsläufe verbessert werden. Gleichzeitig müssen die Herstellkosten ohne Verletzung der technischen Anforderungen reduziert werden. Das Entwicklungsprojekt wurde von vier erfahrenen Ingenieuren mit der in dieser Arbeit entwickelten Methode erfolgreich bearbeitet.

Anschließend wurde die Methode durch Interviews mit den vier erfahrenen Ingenieuren validiert. Dabei wird das Projekt zur Optimierung des Portalroboters als Referenzprojekt genommen. Darüber hinaus wurden drei weitere Entwicklungsprojekte, die sowohl vom Umfang als auch von der Zielsetzung mit dem Referenzprojekt vergleichbar sind, zur Validierung der Methode herangezogen. Durch die Ergebnisse der Interviews wurde festgestellt, dass die in dieser Arbeit entwickelte Methode eine systematische Unterstützung für die Entwicklungsentscheidungen zwischen Standardmodulen und individuellen Leichtbaukomponenten liefert. Dadurch konnte nachgewiesen werden, dass die Entwicklung von modularen Leichtbauprodukten unter Anwendung der Methode effizienter durchgeführt werden kann.

Weiterer Forschungsbedarf zur Unterstützung der Entwicklung von modularen Leichtbauprodukten besteht insbesondere bei der konstruktiven Gestaltung von einzelnen Modulen bzw. Bauteilen. Vor allem soll im Rahmen des Leichtbaus der Entwicklungsprozess effizienter gestaltet werden. Dafür sollen Werkzeuge oder Tools zur Unterstützung der Gestaltung von Leichtbaustrukturen entwickelt werden. Zum Beispiel sollen die dynamischen Belastungen in Simulation exakter bestimmt werden können. Dadurch kann die Entwicklungszeit enorm reduziert werden. Gleichzeitig könnt die Sicherheitsfaktoren der Leichtbauproduktstruktur weiter reduziert werden, so dass das Gewicht des Produktes weiter optimiert wird. Von [Pla15] wurde bereits eine Methode zur Auslegung der Leichtbaustrukturen unter dynamischen Lasten vorgestellt, die weiter detailliert werden könnte.

Die Anwendung von Frontloading in der Entwicklung durch entsprechende Tests und Simulationen kann zudem auch im Rahmen der Gestaltung weiter vorangetrieben werden.

Die in dieser Arbeit entwickelte Methode wurde hierbei lediglich für die Entwicklung von modularen Leichtbauprodukten auf mechanische Aspekte angewendet. Für die Anwendung auf weitere Domänen müsste eine entsprechende Anpassung erfolgen. Ein erster Beitrag zur Erfassung der Anforderungen an die Entwicklung mechatronischer Systeme und Modulleichtbau wurde bereits von [GY19a] bearbeitet. Die interdisziplinäre Entwicklung von mechatronischen Systemen verstärkt die Notwendigkeit von Trade-Offs zwischen dem Leichtbau und der Modularisierung, da die Definition der Baustruktur unmittelbaren Einfluss auf alle involvierten Disziplinen hat.

Diese Methode bildet einen umfassenden Ansatz zur frühzeitigen Auswahl der Produktstruktur des Modulleichtbaus. Es wurden nicht nur die Anforderungen, sondern auch die Restriktionen aus dem gesamten Produktlebenszyklus am Anfang der Entwicklung frühzeitig berücksichtigt. Darüber hinaus wird der wirtschaftliche Aspekt für die Produktgestaltung des Modulleichtbaus in dieser Arbeit berücksichtigt. Somit ist die Methode in der Lage, die Effizienz der Entwicklung modularer Leichtbauprodukte zu verbessern.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Kostenfestlegung und –verursachung in der Konstruktion [nach Bron68] 3
Abbildung 2: Handlungsfeld Produktentstehung nach [Grä15, S. 168] 5
Abbildung 3: Aufbau der Arbeit..... 6
Abbildung 4: Einsatz von Leichtbau und damit verbundene Kosten [Kle09]..... 7
Abbildung 5: Vor- und Nachteile einer modularen Produktstruktur in gesamten Produktlebensphasen [KG18]..... 9
Abbildung 6: Zustände komplexer Systeme [Ulr95]..... 10
Abbildung 7: Aufteilung von Produkten - Baugruppen – Komponenten nach [Sch05] 11
Abbildung 8: Produktprogramm→ Produktlinie→ Produktfamilie→Produktvarianten [ABW15, FKK15, PBF+13, Rup88, UE12]..... 12
Abbildung 9: Übersicht über Restriktionen im Rahmen der Produktentwicklung [Eve90b] 13
Abbildung 10: Vorteile modularer Produkte in die Produktlebensphasen [Ble11]..... 16
Abbildung 11: Konflikte zwischen Modularisierung und Leichtbau [KSO+16] 19
Abbildung 12: Auf diese Arbeit angepasstes Vorgehen nach der DRM [BC09]..... 25
Abbildung 13: Generisches Vorgehen der Modularisierung nach [KG18]..... 27
Abbildung 14: Ermittlung der Module nach der Heuristik „dominanter Fluss“ [Sto97] 28
Abbildung 15: Ermittlung der Module nach den Heuristiken „Verzweigender Fluss“ und „Umwandlung und Übertragung“ [Sto97]..... 29
Abbildung 16: Anwendung der Integration Analysis Methodology [PE94]..... 30
Abbildung 17: Anwendung der DSM [HK98] 31
Abbildung 18: Produktarchitektur mit Organisationseinheiten [Göp98] 33
Abbildung 19: Leichtbaugerechte systematische Vorgehensweise nach Klein [Kle09] 38
Abbildung 20: Modulleichtbau nach [Gum15] 41
Abbildung 21: Modulleichtbau nach Plaumann [Pla15] 43
Abbildung 22: Vorgehen der entwickelten Methode 52
Abbildung 23: Aufbau des Systemmodells 57
Abbildung 24: Vorgehen zur Modulaufteilung 60
Abbildung 25: Anwendung von Methoden im Rahmen der Modulaufteilung..... 62
Abbildung 26: Veranschaulichung des METUS-Ansatzes [TG10] 64
Abbildung 27: Exemplarische Anwendung von MFD 66
Abbildung 28: Analyse der Modulaufteilung mit Hilfe der DSM 67
Abbildung 29: Produktstruktur mit Alternativen und unterschiedlichen Gestaltszenarien 67
Abbildung 30: Grundsätze für die Erstellung der Gestaltszenarien 68
Abbildung 31: Übertragen der Anforderungen auf die Modulebene 70
Abbildung 32: Klassifizierung von Anforderungen 80
Abbildung 33: Nachweisarten für Leichtbaustrukturen nach [AUT92]..... 81
Abbildung 34: Prognose der Restriktionen der Gestaltszenarien..... 84

Abbildung 35: Prozessablauf zur Analyse des Zusammenwirkens aller Module auf das Gesamtsystem 86
Abbildung 36: Ermittlung der Gewichtungsfaktoren mit Hilfe des paarweisen Vergleichs 88
Abbildung 37: Ableitung der Materialkosten einzelner Gestaltszenarien 90
Abbildung 38: Darstellung der relevanten Anforderungen im Spinnennetzdiagramm .. 91
Abbildung 39: Produktstruktur mit bewerteter Alternativenauswahl 92
Abbildung 40: Prinzip des Portalroboters 95
Abbildung 41: Arbeitsraum des Portalroboters (grau markiert) 97
Abbildung 42: Vorgehen zur Entwicklung des Portalroboters auf Basis von [VDI 2221] 100
Abbildung 43: Systemmodell des Portalroboters 102
Abbildung 44: Darstellung der Ergebnisse zur Modulaufteilung mit DSM 104
Abbildung 45: Module des Portalroboters 106
Abbildung 46: Alternative Gestaltszenarien für das Modul 4 108
Abbildung 47: Darstellung des fertigen Portalroboters 112
Abbildung 48: Hauptentwicklungsmodule des Portalroboters 112
Abbildung 49: Vergleich der Portalroboterentwicklung in anderen Projekten 116
Abbildung 50: Bewertung der Methode durch die Ingenieure 117

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Regeln für leichtbaugerechtes Konstruieren nach [Kle09] 37
Tabelle 2: Abgrenzungsmatrix zwischen eigenem Vorhaben und existierenden Arbeiten 48
Tabelle 3: Anforderungen an das Systemmodell 59
Tabelle 4: Hauptmerkmalliste 77
Tabelle 5: Regeln zur leichtbaugerechten Konstruktion [Kle09, S67] 82
Tabelle 6: Berechnung der Selbstkosten 90
Tabelle 7: Technische Daten des originalen Portalroboters 98
Tabelle 8: Funktionale Anforderungen an die Geschwindigkeit des Portalroboters 98
Tabelle 9: Abmaße und Aufstellungsanforderungen 99
Tabelle 10: Komponenten des Portalroboters 103
Tabelle 11: Modulalternativen und Gestaltszenarien der Module 2 und 4 105
Tabelle 12: Ausschnitt aus den Anforderungen an das Gesamtsystem 107
Tabelle 13: Ableitung der relevantesten Anforderungen und Restriktionen 108
Tabelle 14: Prognose der Anforderungserfüllung der Gestaltszenarien 109
Tabelle 15: Berechnung der Selbstkosten für die Alternativen der Module 2 und 4 ... 109
Tabelle 16: Verrechnung des Kennwerts auf die Module 2 und 4 110
Tabelle 17: Projektergebnisse, bzw. -kennzahlen zur Entwicklung des Portalroboters 111
Tabelle 18: Zielerreichung des Gesamtsystems 113

Literaturverzeichnis

[AB11] Albers, A.; Burkardt, N.: „Systemleichtbau: ganzheitliche Gewichtsreduzierung“. In: Handbuch Leichtbau: Methoden, Werkstoffe, Fertigung. Hrsg. Hennig, F., Moeller, E., Carl Hanser Verlag, München, 2011, S. 115–132.

[ABG06] Aberdeen Group: „The Mechatronics System Design Benchmark Report“. Aberdeen Group, Inc., Boston, 2006.

[AbG86] N.N.: „Gesetz über die Vermeidung und Entsorgung von Abfällen“. BGB1.I, Bonn, 1986.

[ABW15] Albers, A., Bursac, N., Wintergerst, E.: „Produktgenerationsentwicklung – Bedeutung und Herausforderungen aus einer entwicklungsmethodischen Perspektive“. In Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung. Hrsg. Roth. Fraunhofer Verlag, Stuttgart, 2015.

[Ada98] Adam, D.: „Komplexitätsmanagement“. Wiesbaden: Springer Gabler, 1998.

[AHC15] Andreasen, M.M., Hansen, C.T., Cash, P.: “Conceptual design”. Springer International Publishing, Cham, Schweiz, 2015.

[Aka04] Akao, Y.: “Quality function deployment – Integrating customer requirments into product design”. Verlag Moderne Industrie, Landsberg, 2004.

[AM06] Albers, A.; Meboldt, M.: A new approach in product development, based on Systems Engineering and systematic problem solving, AEDS Workshop, Pilsen, 2006.

[ARB+16] Albers, A., Reiss, N., Bursac, N., Richter, T.: “iPeM – Integrated Product Engineering Model in Context of Product Generation Engineering”. In 26th CIRP Design Conference, Procedia CIRP 50, 2016, S 100–105.

[ATU92] Autorenkollektiv: „Handbuch Struktur-Berechnung (HSB)“. Industrie Ausschuss -Struktur-Berechnungsunterlagen, 1992.

[BA92] Boothroyd, G., Alting, L.: “Design for Assembly and Disassembly”. Annals of the CIRP Vol. 41/2/1992, S.625 – 636.

[Bäß87] Bäßler, R.: „Integration der montagegerechten Produktgestaltung in den Konstruktionsprozess“. Dissertation, TU Stuttgart, 1987.

[BC09] Blessing, L.T.M., Chakrabarti, A.: “DRM, a Design Research Methodology”. Springer-Verlag London, 2009.

[BES94] Brinkmann, T., Ehrenstein, G.W., Steinhilper, R.: „Umwelt- und recydlinggerechte Produktentwicklung. Anforderungen – Werkstoffauswahl – Gestaltung – Praxisbeispiele“. WEKA-Verlag, Augsburg, 1994.

[BK86] Beitz, W., Küttner, K.H.: „Dubbel. Taschenbuch für Maschinenbau“. Axel Springer Verlag, Berlin. 1986.

[BL94] Baumann, M., Leber, M.: „Recyclinggerechte Konstruktion von Elektro- un dElektronikgeräten“. In Verwertung von Elektro- und Elektronikgeräten. Materialien 3. Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen, Essen, 1994.

[Ble11] Blees, C.: „Eine Methode zur Entwicklung modularer Produktfamilien“. Dissertation, Technische Universität Hamburg-Harburg. TuTech Verlag, Hamburg, 2011.

[Boe00] Boes, J.: „Analyse und Bewertung komplexer Industrieprodukte hinsichtlich der Anforderungen der recyclinggerechten Konstruktion am Beispiel Automobil“. VDI Berichte 1570. Fellbach, 2000.

[Boo05] Boothroyd, G.: “Assembly Automation and Product Design”. Taylor & Francis Bundesministerium für Bildung und Forschung (10/2004) Innovationen für eine ressourceneffiziente Produktion, 2005.

[Boo92] Boothroyd, G.: “Assembly automation and product design”. Marcel Dekker, New York, 1992.

[Bra71] Brankamp, K.: „Planung und Entwicklung neuer Produkte“. De Gruyter Verlag, Berlin, 1971.

[Bro68] Bronner, A.: „Wertanalyse als integrierte Rationalisierung“. wt – Zeitschrift für industrielle Fertigung 58, 1968, S. 16–21.

[Czi89] Czichos, H.: „Hütte: Die Grundlagen der Ingenieurwissenschaften“. Axel Springer Verlag, Berlin. 1989.

[Dah90] Dahl, B.: “Entwicklung eines Konstruktionssystems zur Unterstützung der montagegerechten Produktgestaltung”. Dissertation, RWTH Aachen, 1990.

[DGO01] Dahmus J.B., Gonzalez-Zugasti J.P., Otto K.N.: “Modular product architecture”. 2001. Des Stud 22:409–424.

[DIN199T1] Begriffe. Technische Produktdokumentation: CAD-Modelle, Zeichnungen und Stücklisten. Beuth, Berlin, 2002.

[DIN31051] DIN 31051: „Instandhaltung – Begriffe und Maßnahmen“. Beuth-Verlag, Berlin, 1985.

[DIN31052] DIN 31052: „Instandhaltung; Inhalt und Aufbau von Instandhaltungsanleitungen“. Beuth, Berlin, 1981.

[DIN31054] DIN 31054: „Instandhaltung; Grundsätze zur Festlegung von Zeiten und zum Aufbau von Zeitsystemen“. Beuth, Berlin, 1987.

[DIN8580] DIN 8580: „Fertigungsverfahren – Begriffe, Einteilung“. Beuth-Verlag, Berlin, 2003.

[DIN EN 12633] DIN EN 12663: „Bahnanwendungen - Festigkeitsanforderungen an Wagenkästen von Schienenfahrzeugen - Teil 1: Lokomotiven und Personenfahrzeuge (und alternatives Verfahren für Güterwagen)“. Deutsche Fassung EN 12663-1:2010+A1:2014, 2015.

[EB19] Eiselt, A.; Bindick, F.: „Empirische Analyse von Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten am Beispiel der europäischen Automobilindustrie“. Praxis der Internationalen Rechnungslegung, Jg. 5, S. 72-77, 2009

[EGG+13] Ellenrieder, G., Gänsicke, T., Goede, M., Herrmann, G.: „Die Leichtbau-Strategien“. In Leichtbau in der Fahrzeugtechnik. Hrsg. Friedrich, H.E.. Wiesbaden: Springer-Vieweg, 2013, S. 43-118.

[Ehr09] Ehrlenspiel, K.: „Integrierte Produktentwicklung: Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit“. 4th ed.. Hanser, München, 2009.

[Ehr93] Ehrlenspiel, K.: „Industrieprobleme in Entwicklung und Konstruktion sowie Folgerungen gemäß einer Umfrage“. Konstruktion 45, 1993, S. 389–396.

[EKL+07] Ehrlenspiel, K., Kiewert, A., Lindemann, U., Mörtl, M.: „Kostengünstig Entwickeln und Konstruieren – Kostenmanagement bei der integrierten Produktentwicklung“. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2007.

[Eri98] Erixon, G.: “Modular function deployment – a method for product modularization”. Dissertation, The Royal Institute of Technology, Stockholm, 1998.

[Eve03] Eversheim, W.: „Innovationsmanagement für technische Produkte“. Springer, Berlin, 2003.

[Eve90b] Eversheim, W.: „Organisation in der Produktionstechnik – Band 2: Konstitution“. VDI – Verlag, Düsseldorf, 1990.

[Fal00] Fallböhmer, M.: „Generieren alternativer Technologieketten in frühen Phasen der Produktentwicklung“. Dissertation, RWTH Aachen. Shaker, Aachen, 2000.

[Fey90] Feyerabend, F.: „Methodische Gewichtsreduzierung – am Beispiel von Industrierobotern“. Dissertation, Universität - GH – Paderborn, 1990.

[Fey91] Feyerabend, F.: „Wertanalyse Gewicht – Methodische Gewichtsreduzierung - am Beispiel von Industrierobotern“. In Verein Deutscher Ingenieure: Fortschrittberichte der VDI Zeitschriften, Reihe 1, Nr. 201. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1991.

[FKK15] Förg, A., Karrer-Müller, E., Kreimeyer, M.: „Produktarchitektur“. In Handbuch Produktentwicklung. Hrsg. Lindemann, U.. Hanser, München, 2015, S 99–109.

[Fra02] Franke, H-J.: „Variantenmanagement in der Einzel – und Kleinserienfertigung – Mit 33 Tabellen“. Hanser Verlag, München, Wien, 2002.

[Fra16] Franke, T., Fiebig, S., Sellschopp, J., Vietor, T.: „Neue Leichtbaupotentiale durch Integration der Herstellrestriktionen in die Topologieoptimierung am Beispiel Gießen“. Symposium hybrider Leichtbau 2016, 18 - 19. Mai 2016.

[GNK11] Grosser, H., Neumann, S., Kuhn, D.: „Instandhaltungsgerechtes Konstruieren: Digitale Unterstützungspotenziale des Produktentwicklungsprozesses“. ZWF Zeitschrift für Wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 106(12):979-983, 2011.

[GO22] Gräßler, I., Oleff, C.: „Systems Engineering - Verstehen und industriell umsetzen“. Verlag: Springer Berlin Heidelberg, 2022. ISBN: 978-3-662-64516-1. https://doi.org/10.1007/978-3-662-64517-8

[Göp98] Göpfert, J.: „Modulare Produktentwicklung – Zur gemeinsamen Gestaltung von Technik und Organisation“. Dissertation, Ludwig Maximilian Universität München, 1998.

[GP21] Gräßler, I., Pottebaum, J.: „Generic Product Lifecycle Model: A Holistic and Adaptable Approach for Multi-Disciplinary Product–Service Systems”. In Systems. Appl. Sci. 2021, 11, 4516. https://doi.org/10.3390/app11104516

[Grä04] Gräßler, I.: „Kundenindividuelle Massenproduktion- Entwicklung, Vorbereitung der Herstellung, Veränderungsmanagement“. Springer Verlag, Berlin, 2004.

[Grä15] Gräßler, I.: „Umsetzungsorientierte Synthese mechatronischer Referenzmodelle – Implementation-oriented synthesis of mechatronic reference models.” In: Bertram, T.; Corves, B.; Janschek, K. (Hrsg.): Fachtagung Mechatronik 2015. Technische Universität Dresden, Dresden, 2015; S. 167–172.

[GS07] Gaul, L.; Schmidt, A.:„Experimental Determination and Modeling of Material Damping", VDI Berichte, Nr.2003, 2007, S.17 - 40.

[Gum15] Gumpinger, T.: „Modulleichtbau – Methodische Unterstützung des Leichtbaus modularer Produktfamilien“. Dissertation, TU Hamburg-Harburg. Tu Tech Verlag, Hamburg, 2015.

[GY18] Gräßler, I., Yang, X.J.: „Bedeutung des Komplexitätsmanagements für die Verbreitung von Leichtbau in Unternehmen zur Unterstützung einer nachhaltigen Produktentstehung“. In Wissenschaft im Angesicht "Großer gesellschaftlicher Herausforderungen" - Das Beispiel der Forschung an hybriden

Leichtbaumaterialien. Hrsg. Riegraf, B., Berscheid, A.L.. Kapitel: 1.3, S. 51-70. transcript Verlag, 2018.

[GY19a] Gräßler, I., Yang, X.J.: „Entwicklung mechatronischer Systeme und Modulleichtbau: Anforderungen am Beispiel von Unmanned Aerial Vehicles (UAVs)“. In Fachtagung Mechatronik 2019 Paderborn. Hrsg. Bertram, T., Corves, B., Gräßler, I., Jansen, K.. S. 167-172, 27. - 28.

[GY19b] Gräßler, I., Yang, X.J.: “Product life cycle cost approach for modular lightweight design”. In Procedia CIRP - Proceedings of the 29th CIRP Design Conference. Póvoa de Varzim, 8. - 10. Mai 2019 CIRP. Hrsg. Putnik, G. D.. Band 84, S. 1048-1053.

[GY19c] Gräßler, I., Yang, X.: “A holistic approach of complexity assessment for the development of product variants of mechatronic products and their supply chain networks”. In Proceedings of the 8th IFAC Symposium on Mechatronic Systems (Mechatronics 2019), S. 748-753, 4. Jan. - 6. Sep. 2019.

[Hal14] Halfmann, N.: „Montagegerechtes Produktstrukturieren im Kontext einer Lebensphasenmodularisierung“. Dissertation. TuTech Verlag, Hamburg, 2014.

[Har13] Hartmann, S.: „Ein Beitrag zur frühzeitigen Abschätzung der Produktkomplexität und zur Definition einfacher Produkte“. Dissertation. Reihe „Integrierte Produktentwicklung, Band 18“, Hrsg. Vajna, S., 2013.

[HBF19] Hick, H., Bajzek, M., Faustmann, C.: “Definition of a system model for model-based development”. In SN Appl. Sci. 1, 1074, 2019. https://doi.org/10.1007/s42452-019-1069-0

[HK98] Huang, C-C., Kusiak, A.: “Modularity in design of products and systems”. IEEE Trans Syst Man Cybern A 28:66–77, 1998.

[Hub84] Hubka, V.: Theorie technischer Systeme – Grundlagen einer wissenschaftlichen Konstruktionslehre. 2. Aufl., Springer, Heidelberg, 1984.

[Jor86] Jorden, W.: „Beanspruchungsgerechtes Konstruieren“. Vorlesungsmanuskript, GHPaderborn, 1986.

[Kai13] Kaiser, L.: „Rahmenwerk zur Modellierung einer plausiblen Systemstruktur mechatronischer Systeme“. Dissertation, Universität Paderborn, 2013.

[KG18] Krause, D., Gebhardt, N.: „Methodische Entwicklung modularer Produktfamilien: Hohe Produktvielfalt Beherrschbar Entwickeln“. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, 2018.

[KGP12] Krause, D., Gumpinger, T., Plaumann, B.: „Leichtbau“. In Handbuch Konstruktion, Hrsg. Steinhilper, R., Rieg, F.. Carl Hanser Verlag, München, 2012, S. 465–484.

[Kip08] Kipp, T.: „Methodische Unterstützung der variantengerechten Produktgestaltung“. Dissertation, Technische Universität Hamburg-Harburg, 2008.

[KK08] Kipp, T., Krause, D.: „Design for variety – efficient support for design engineers”. In Proceedings of the 10th international design conference design 2008. Hrsg. : Marjanović D. et al.. Dubrovnik, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, University of Zagreb The Design Society, Glasgow, S 425–432.

[KK97] Kramer, F., Kramer, M.: „Bausteine der Unternehmensführung“. 2. Auflage. Berlin, Heidel-berg, New York: Springer, 1997.

[KKB12] Krause, D., Kipp, T., Blees, C.: „Modulare Produktstrukturierung“. In Handbuch Konstruktion. Hrsg. Rieg, F., Steinhilper, R.. Hanser-Verlag, München, S 657–678.

[Kle09] Klein, B.: „Leichtbau – Konstruktion: Berechnungsgrundlagen und Gestaltung“. 8. Auflage. Vieweg + Teubner Verlag, 2009.

[Kol94] Koller, R.: „Konstruktionslehre für den Maschinenbau. Grundlagen zur Neu- und Weiterentwicklung technischer Produkte“. Axel Springer Verlag, Berlin u.a., 1994.

[Kor15] Kornwachs, K.: Philosophie für Ingenieure. München: Carl Hanser Verlag, 2015

[KR03] Konold, P., Reger, H.: „Praxis der Montagetechnik. Produktdesign, Planung, Systemgestaltung“. 2. Auflage. Vieweg, Wiesbaden, 2003.

[KSO+16] Krause, D., Seemann, R., Oltmann, J., Rasmussen, O.: „Produktvalidierung von Leichtbaustrukturen für die Flugzeugkabine“. Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress, 2016.

[Leb95] Leber, M.: „Entwicklung einer Methode zur restriktionsgerechten Produktgestaltung auf der Basis von Ressourcenverbräuchen“. Dissertation. Verlag Shaker, 1995.

[LMB09] Lindemann, U., Maurer, M., Braun, T.: “Structural complexity management – an approach for the field of product design“. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2009.

[LV12a] Luedeke, T.; Vielhaber, M.: “Lightweight mechatronic design: An integrated approach”. In 12th Inter-national Design Conference 2012 (DESIGN 2012). Hrsg. Anderasen, M. M., Birkhofer, H., Lindemann, U., Culley, S., Marjonovic, D.. Dubrovnik, 2012, S. 999-1008.

[LV12b] Luedeke, T.; Vielhaber, M.: “Towards a Process Model for the Development of Light, Mechatronic Products”. In Proceedings of Norddesign 2012. Hrsg.

Kyvsgaard Hansen, P., Rasmussen, J., Jörgensen, K., Tollestrup, C.. Aalborg, 2012, S. 394-401.

[LW06] Lotter, B., Wiendahl, H.P.: „Montage in der industriellen Produktion“. Ein Handbuch für die Praxis. Springer, 2006.

[MI02] Martin, M., Ishii, K.: “Design for variety: Developing standardized and modularized product platform architectures”. Res Eng Des 13:213–235, 2002.

[ML97] Meyer, M.H., Lehnerd, AP.: The power of product platforms – Building value and cost leadership. Free Press, New York, 1997.

[MO86] Miyakawa, S., Ohashi, T.: „The Hitachi Assemblability Method (AEM)“. In The International Conference on Product Design for Assembly. Troy Conferences, Rochester, Michigan, 1986.

[Neu93] Neumann, U.: „Ein Beitrag zum Thema Kunststoff-Recycling“. Institutsmitteilung Nr. 18, 1993.

[NFI97] Negele, H.; Fricke, E; Igenbergs, E.: ZOPH – A Systemic Approach to the Modeling of Product Development Systems. In: 7th International INCOSE Symposium, Los Angeles, 1997, S. 773–780.

[OHN-ol] Umweltschonend und abmahngefährdet – Online Quelle Abgerufen am 11.10.2021: https://www.onlinehaendler-news.de/e-recht/abmahnungen/132092-umweltschonend-und-abmahngefaehrdet.

[ORF-ol] Rohstoffabbau seit 1970 mehr als verdreifacht – Online Quelle Abgerufen am 11.10.2021: https://science.orf.at/v2/stories/2786814/.

[Pat82] Patzak, G.: Systemtechnik - Planung komplexer innovativer Systeme. Grundlagen, Methoden, Techniken. Springer, Berlin, 1982.

[PB77] Pahl, G., Beitz, W.: „Konstruktionlehre: Handbuch für Studium und Praxis“. Springer Berlin, Heidelberg, 1977.

[PBF+13] Pahl, G., Beitz, W., Feldhusen, J., Grote, K.-H.: „Pahl/Beitz Konstruktionslehre: Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung“. 9. Auflage. Springer Verlag, 2021.

[PBR13] Posner, B., Binz, H., Roth, D.: „Grundlagen zur Berücksichtigung von Design for X bei Funktionsstrukturen am Beispiel des Design for Lightweight“. In Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung 2013. Hrsg. Spath, D., Bertsche, B., Binz, H.. Stuttgart, 2013, S. 1-10.

[PE94] Pimmler, T.U., Eppinger, S.D.: “Integration analysis of product decompositions”. In ASME Conference on Design Theory and Methodology. Minneapolis, 1994, S 343–351.

[PL11] Ponn, J., Lindemann, U.: „Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte – Systematisch von Anforderungen zu Konzepten und Gestaltlösungen“. 2. Auflage. Berlin, Heidel-berg: Springer-Verlag, 2011.

[Pla15] Plaumann. B.: „Systemanalyse und –synthese für die Auslegung varianter Leichtbaustrukturen unter dynamischen Lasten“. Dissertation. Technische Universität Hamburg – Harburg, 2015.

[Pos16] Posner, B.: „Methodik zum leichtbaugerechten Konzipieren“. Dissertation, Institut für Konstuktionstechnik und Technisches Design, Universität Stuttgart, 2016.

[PVS18] Pilz, F., Vajna, S., Schabacker, M.: „Bewertbarkeit unscharfer Mengen am Beispiel der Eigenschaft Produkteinfachheit“. In Proceedings of the 29th Design for X-Symposium, 2018.

[Rap99] Rapp, T.: „Produktstrukturierung – Komplexitätsmanagement durch modulare Produktstrukturen und -plattformen“. Deutscher Universitäts- Verlag Gabler, Wiesbaden, 1999.

[Rin17] Rinker, C.: „Wertrelevanz von Forschungs- und Entwicklungskosten – Eine empirische Untersuchung börsennotierter Unternehmen in Deutschland“. Springer Fachmedien, Wiesbaden GmbH, 2017.

[Rip19] Ripperda, S.: „methodische Unterstützung zur kostenbasierten Auswahl modularer Produktstrukturen“. Dissertation. Springer Vieweg, 2019.

[RK59] Rögnitz, H., Köhler, G.: „Fertigungsgerechtes Gestalten im Mauschinen- und Gerätebau“. Teubner-Verlag, Stuttgart, 1959.

[RK13] Ripperda, S., Krause, D.: “An assessment of methodical approaches to support the development of modular product families”. In Proceedings of the 19th international conference on engineering design (ICED13). Hrsg. Lindemann U., Venkataraman, S et al.. Lightning Source Inc., La Vergne, 2013.

[Rop75] Ropohl, G. H.: Systemtechnik - Grundlagen und Anwendung. Carl Hanser Verlag, München, 1975.

[Rot94a] Roth, K.: „Konstruieren mit Konstruktionskatalogen. Band I: Konstruktionslehre“. Springer- Verlag, Berlin u.a., 1994.

[RU98] Roberstson, D., Ulrich, K.: „Planning for product platforms“. Sloan Manage Rev 39: 19 – 32, 1998.

[Ruh06] Ruhland, K.: „Methoden und Werkzeuge zur recyclinggerechten Automobilentwicklung“. Dissertation, Universität Kaiserslautern, 2006.

[Rup88] Rupp, M.A.: „Produkt-, Markt-Strategien – Handbuch zur marktsicheren Produkt- und Sortimentsplanung in Klein- und Mittelunternehmungen der Investitionsgüterindustrie“. Verlag Industrielle Organisation, Zürich, 1988.

[Sal07] Salvador, F.: „Toward a product system modularity construct – literature review and reconceptualization“. IEEE Trans Eng Manag 54:219 – 240, 2007.

[Sch03] Schmidt, W.: „Methodische Entwicklung innovativer Leichtbau-produkte“. In Fortschrittberichte der VDI Zeitschriften, Reihe 1, Nr. 369. Hrsg. Verein Deutscher Ingenieure. Düsseldorf: VDI Verlag, 2003.

[Sch05] Schuh, G.: „Produktkomplexität managen: Strategien – Methoden – Tools“. München und Wien: Carl Hanser Verlag, 2005.

[Sch11] Scharnowski, E.B.: „Gestalt und Deformation: Elementare Tragwerke und Rechengrößen aus Natur, Technik und Design“. 2011.

[SP01] Schmit, W., Puri, W.: „Betrachtungen zur Konzeptphase im Konstruktionsprozess von Leichtbauteilen“. In DFX 2001: Proceedings of the 12th Symposium on Design for X. Hrsg. Meerkamm, H.. Erlangen, 2001, S. 21-28.

[Sta73] Stachowiak, H.: Allgemeine Modelltheorie. Berlin u. a.: Springer-Verlag, 1973

[Ste81] Steward, D.V.: “The design structure system – A method for managing the design of complex systems”. IEEE Trans Eng Manag EM-28:71–74, 1981.

[Ste88] Steinhilper, R.: „Produktrecycling im Maschinenbau“. Dissertation, TU Stuttgart, 1988.

[Sto97] Stone, R.B.: “Toward a theory of modular design”. Dissertation. The University of Texas at Austin Suh NP. The principles of design. Oxford University Press, New York, 1997.

[TAG90] N.N.: „2. Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetzt. TA Abfall“. GMBI, Bonn, 1990.

[TG10] Tretow, G.; Göppert, J.: Systems-Engineering in der frühen Phase der Produktentwicklung. CAD-CAM Report 4/2010, S.58-61.

[TGH08] Tretow, G.; Göppert, J.; Heese, C.: In sieben Schritten systematisch entwickeln. CADCAM Report 8/2008, Hoppenstedt Publishing, S. 772–778.

[UE12] Ulrich, K.T., Eppinger SD.: „Product design and development”. McGraw-Hill Irwin, New York, 2012.

[Ulr95] Ulrich, K.: „The role of product architecture in the manufacturing firm“. In Research Policy, 1995, S. 419 – 440.

[UMB-ol] Treibhausgas – Emissionen in Deutschland - Online Quelle Abgerufen am 11.10.2021: https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgas-emissionen-in-deutschland#emissionsentwicklung.

[Vaj14] Vajna, S.: “Integrated Design Engineering: Ein interdisziplinäres Modell für die ganzheitliche Produktentwicklung ”. Springer Vieweg, 2014.

[Vaj20] Vajna, S.: “Integrated Design Engineering: Interdisciplinary and Holistic Product Development”. 2. Auflage. Springer Vieweg, 2020.

[VBC+04] Vajna, S., Bercsey, T., Clement, St., Jordan, A., Mack, P.: „Autogenetische Konstruktionstheorie – Ein Beitrag für eine erweiterte Konstruktionstheorie“. Konstruktion 56, 71–78, 2004.

[Van91] Van der Mooren A.L.: „Instandhaltungsgerechtes Konstruieren und Projektieren“. Konstruktionsbücher, Bd. 37. Springer, Berlin, 1991.

[VB98] Vajna, S., Burchardt, C.: “Dynamic development structures of integrated product development”. Journal of Engineering Design, 1998, S.3 – 5.

[VDI1089] VDI-Berechte 1089: „Recyclinggerechte Produktentwicklung – Aspekte, Strategien, Konstruktionspraxis.“ VDI-Verlag, Düsseldorf, 1993.

[VDI11] VDI – Gesellschaft Produkt- und Prozessgestaltung: „Wertanalyse – das Tool im Value Management“. 6. Auflage. Berlin: Springer-Verlag, 2011.

[VDI2206] VDI-Richtlinie 2206: „Entwicklung cyber-physischer mechatronischer Systeme (CPMS)“. Düsseldorf, VDI-Verlag, 2020.

[VDI2220] VDI-Richtlinie 2220: „Produktplanung – Ablauf, Begriffe und Organisation“. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1980.

[VDI2221] VDI-Richtlinie 2221: “ Entwicklung technischer Produkte und Systeme - Gestaltung individueller Produktentwicklungsprozesse” Beuth Verlag, Berlin, 2019.

[VDI2227] VDI-Richtlinie 2227: „Festigkeit bei wiederholter Beanspruchung; Zeit- und Dauerfestigkeit metallischer Werkstoffe, insbesondere von Stählen“. VDI-Verlag, 1999.

[VDI2234] VDI-Richtlinie 2234: „Wirtschaftliche Grundlagen für den Konstrukteur“. Düsseldorf, VDI, 1990.

[VDI2235] VDI-Richtlinie 2235: „Wirtschaftliche Entscheidungen beim Konstruieren – Methoden und Hilfen“. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1987.

[VDI2243] VDI-Richtlinie 2243: „Recyclingorientierte Produktentwicklung“. VDI-Verlag, Düsseldorf, 2002.

[VDI2246] VDI-Richtlinie 2246, B1.1: „Konstruieren instandhaltungsgerechter technischer Erzeugnisse – Grundlagen“. Bl. 2 (Entwurf): Anforderungskatalog. VDI-Verlag, Düsseldorf, 2001.

[VDI2803] VDI-Richtlinie 2803 Blatt1: „Funktionsanalyse – Grundlagen und Methode“. VDI-Verlag, Düsseldorf, 2019.

[VDI2860] VDI-Richtlinie 2860: „Montage- und Handhabungstechnik, Handhabungsfunktionen, Hndhabungseinrichtungen; Begriffe, Definitionen, Symbole“. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1990.

[VDI3237] VDI-Richtlinie 3237, Bl.1 und Bl.2: „Fertigungsgerechte Werkstückgestaltung im Hinblick auf automatisches zubringen, Fertigen und Montieren“. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1967 und 1973.

[VDI999] VDI-Berichte 999: „Montage und Demontage – Aspekte erfolgreicher Produktkonstruktion“. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1992.

[VOR20] Vajna, S., Ottosson, S., Tothkötter, S.: „Correction to: Integration of Processes and Organizations“. In Integrated Design Engineering. Hrsg. Vajna S.. Springer Vieweg, 2020.

[VR20] Vajna, S., Rothkötter, S.: „Produkte entwickeln mit IDE“. Springer Vieweg, 2020.

[VWB+14] Vajna, S. (Hrsg.): Integrated Design Engineering – Ein interdisziplinäres Modell für die ganzheitliche Produktentwicklung. Springer Vieweg Berlin Heidelberg 2014.

[Wec91] Weck, M.: „Werkzeugmaschinen, Fertigungssysteme – Band 2: Konstruktion und Berechnung“. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1991.

[Weg07] Wegner, H.: „Ein System zum fertigungstechnologischen Wissensmanagement“. Dissertation, RWTH Aachen. Shaker, Aachen, 2007.

[Wen91] Wende, A.: „Konzept für ein recyclingorientiertes Produktmodell“. In Recycling – eine Herausforderung für den Konstrukteur, Tagung Bad Soben 1991. VDI-Verlag, VDI-Berichte 906, 1991.

[WHT15] Wellsandt, S., Hribernik, K., Thoben, K.-D.: “Sources and Characteristics of Information about Product Use”. In Procedia CIRP Volume 36, 2015, S. 242-247

[Wie70] Wiendahl, H-P.: „Funktionsbetrachtungen technischer Gebilde - Ein Hilfsmittel zur Auftragsabwicklung in der Maschinenindustrie“. Dissertation, RWTH Aachen, 1970.

[Wie07] Wiedemann, J.:“Leichtbau Elemente und Konstruktion“. 3. Auflage. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007.

[Wil08] Willms, H.: „Methodisches System zur Auslegung von kostenoptimalen und prozessstabilen Fertigungsverkettungen“. Dissertation, RWTH Aachen, 2008.

[Wil17] Wildemann, H.: „Komplexitätsmanagement – Leitfaden Komplexitätsmanagement in Vertrieb, Beschaffung, Produktentwicklung und Produktion“. 110. Auflage. München: TCW, 2017.

[Wil98] Wildemann, H.: „Komplexitätsmanagement durch Prozess- und Produktgestaltung“. In Komplexitätsmanagement. Hrsg. Adam, D., Wiesbaden: Springer Gabler, 1998, S. 47 – 68.

[WLR+15] Weilkiens, T., Lamm, J., Roth, S., Walker, M.: „Model-Based System Architecture” John Wiley & Sons, Inc, 2015. ISBN 9781119051930.

[YBG17] Yang, X.J., Berscheidt, A.L., Gräßler, I.: „Untersuchung der Interdisziplinarität im Leichtbau zur Erreichung einer nachhaltigen Wertschöpfungskette“. In Sustainability Management for Industries 7: Transformationen - Neue Wege zu industrieller Nachhaltigkeit. S. 31-42, Mai 2017.

[ZO99] Zamirowski, E., Otto, K.: “Identifying product portfolio architecture modularity using function and variety heuristics”. ASME Design Engineering Technical Conference, 1999.

[Zwi89] Zwicky, F.: „Entdecken – Erfinden – Forschen im morphologischen Weltbild“. München, 1966.

Anhang

Inhaltsverzeichnis Seite

A1 Anforderungen an den Portalroboter 1

A2 Portalroboter 3

A3 Projekte 5

A4 Interviewbögen 8

A5 Einordnung in VDI 2221 11

A6 Verzeichnis betreuter Studienarbeiten 14

A1 Anforderungen an den Portalroboter

Ergänzung der Anforderungsliste für den Portalroboter

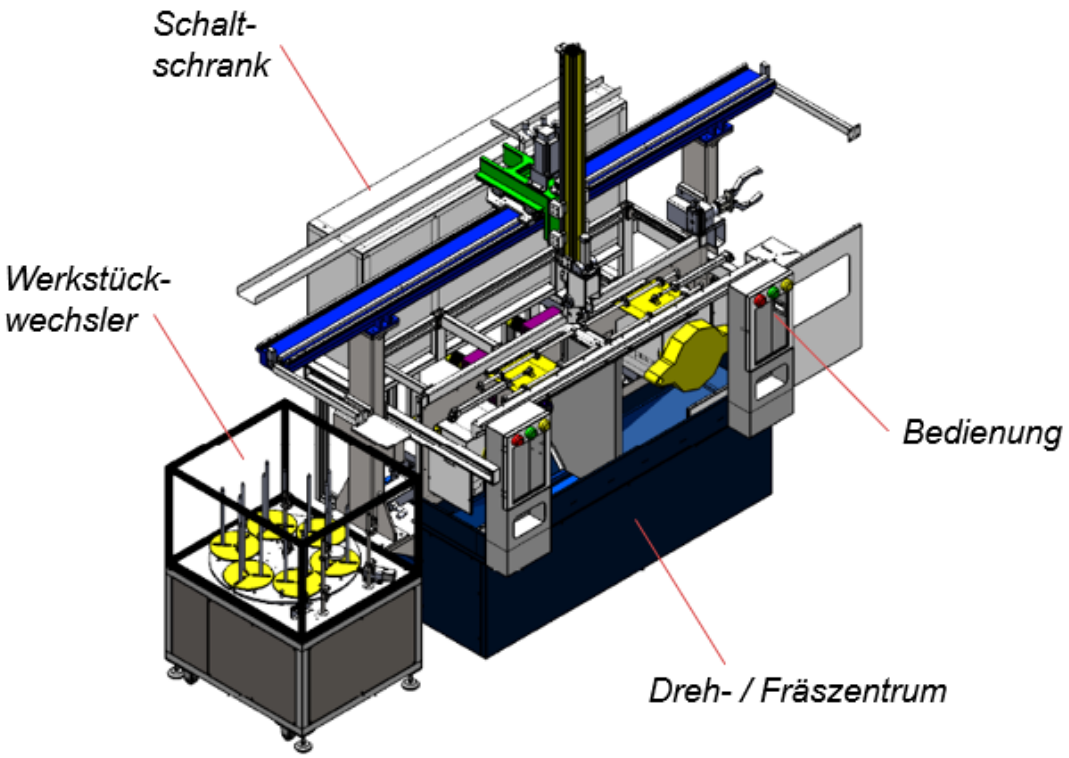
Nr.	F/W	Anforderung	Wert/Daten			
			Min.	Soll	Ideal	Maßeinheit
1		Geometrie				
1.1	F	Abmessungen der Ständer		bleibt		
	F	Basishöhe		1750		mm
	F	Maximalhöhe		3000		mm
	F	Höhen-Erweiterungsschritte		250		mm
	F	Ständerabstand (max.)			5000	mm
	F	Tragarmüberstand (max.)			1250	mm
1.2	F	Arbeitsraum	0,75		225	m³
1.3		Hübe				
1.3.1	F	Grundhub A1		1500		mm
1.3.2	F	Grundhub A2		500		mm
1.3.3	F	Grundhub A3		100		mm
1.3.4	F	Maximalhub A1		45000		mm
1.3.5	F	Maximalhub A2		2000		mm
1.3.6	F	Maximalhub A3		250		mm
2		Gewicht				
2.1	F	Gewicht Grundhub A1-A3 (ohne Ständer, ohne Last)		<=580		kg
2.2		Mehrgewicht je Erweiterung der Hübe				
2.2.1	F	Mehrgewicht je Erweiterung A1		160		kg
2.2.2	F	Mehrgewicht je Erweiterung A2		24		kg
2.2.3	F	Mehrgewicht je Erweiterung A3		12		kg
3		Kinematik				
3.1	F	Bewerungsart und –richtung		bleibt		
3.2		Geschwindigkeit				
3.2.1	F	Geschwindigkeit A1		>=2,6		m/s
3.2.2	F	Geschwindigkeit A2		>=2,0		m/s
3.2.3	F	Geschwindigkeit A3		>=2,0		m/s
4	F	Kräfte und Moment		bleibt		
5		Energie				

Nr.	F/W	Anforderung	Wert/Daten			
			Min.	Soll	Ideal	Maßeinheit
5.1	F	Energieart		bleibt		
5.2		Leistung				
	F	Nenn-Traglast		20		kg
	F	Traglastbereich (abhängig von Hub A3)			55 bis 127	kg
6		Nutzung				
	F	Einsatzort		Produktionsfirmen		
	F	Austauschbarkeit		Alle Module austauschbar		
7	F	Sicherheit/ Schutzmaßnahmen		bleibt (nach RL 2006/42/EG)		
8		Fertigung				
8.1	F	Toleranzen		bleibt		
9	F	Montage/ Demontage		bleibt (nach RL 2006/42/EG)		
	F	Art der Montage		manuell		
10		Instandhaltung		bleibt		
11		Kontrolle		bleibt		
		Mess- und Prüfmöglichkeiten		bleibt		
12		Kommunikation		bleibt		
13		Recycling		bleibt		
14		Kosten				
	F	zulässige Herstellkosten		<=15.000		€
15		Termine				
	F	Ende der Entwicklung/ Konstruktion		Ab dem Projektstart 6 Monate		

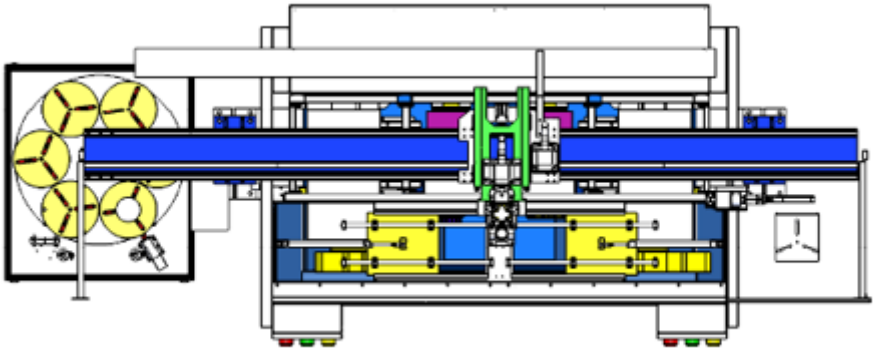
A2 Portalroboter

Der Portalroboter mitsamt Dreh-/ Fräszentrum und Verbindungsstellen ist in den nachfolgenden Darstellungen abgebildet.

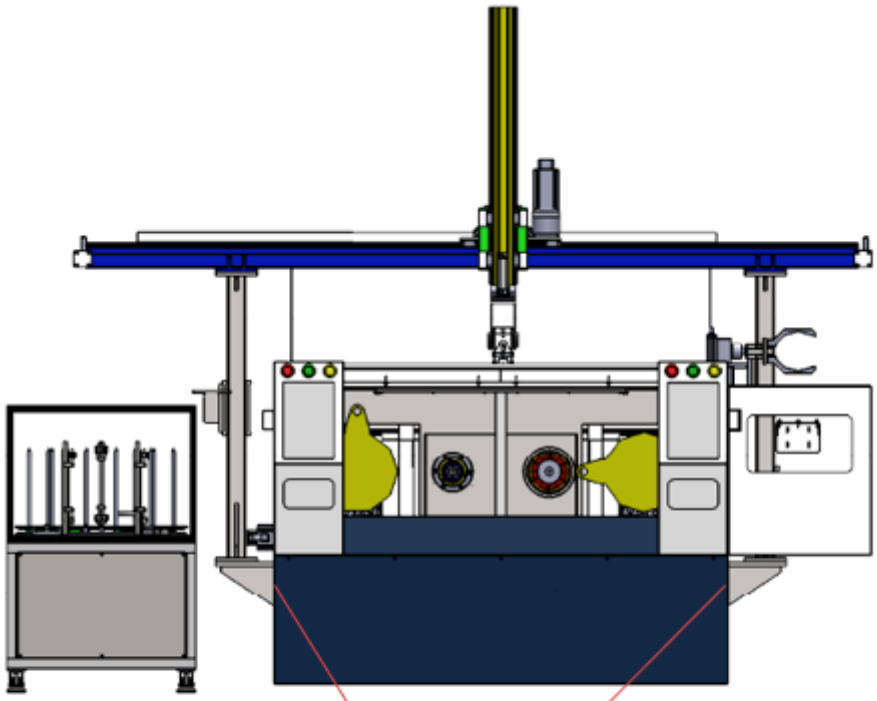
Isometrische Ansicht:



Draufsicht:

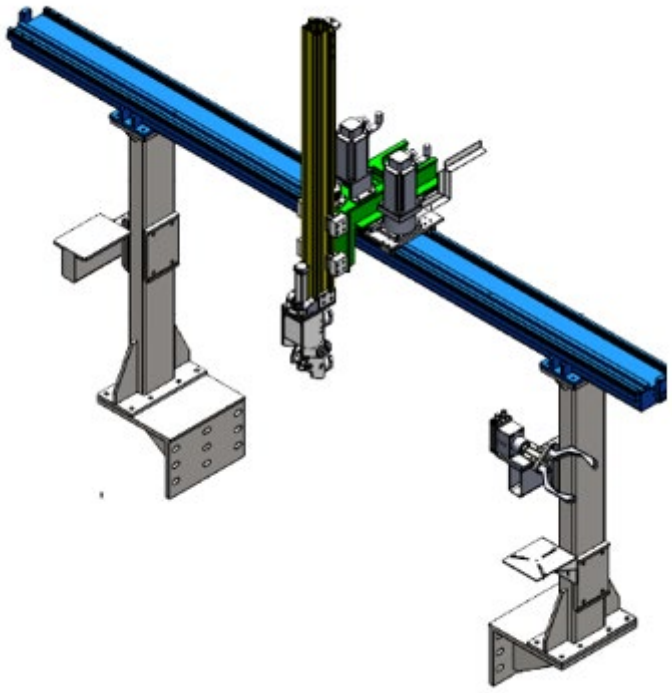


Vorderansicht:



Anbringung des Portalroboters

Isometrische Ansicht Portalroboter:



A3 Projekte

Referenzprojekt 1:

Referenzentwicklungs-projekt	Optimierung des Portalroboters
Inhalt des Projekts	Das ist ein Entwicklungsprojekt zur Optimierung eines bereits existierenden Portalroboters, der eine modulare Produktstruktur aufweist. Der Portalroboter sollte auf andere Maschinen übertragen werden können. Hierfür mussten zahlreiche Einstellungen angepasst werden. Dabei dürfen alle anderen technischen Anforderungen nicht verletzt werden.
Zielsetzung	Erreichung einer Übertragbarkeit des Portalrobotermodells auf andere Maschinentypen.
Team	Fünf Ingenieure: Vier Konstrukteure und ein Elektrokonstrukteur
Angewendete Entwicklungsmethoden	Stage-Gate Prozess
Angewendete Tools und Werkzeuge	Solid Works, FEM
Entwicklungszeit	Geplante Entwicklungszeit: 18 Wochen Reale Entwicklungszeit: 31 Wochen
Die Realität	Es wurden alle Anforderungen aufgenommen und anschließend geschaut, wie der Portalroboter sich ohne große Veränderungen auf andere Maschinentypen übertragen ließe. Die Verbindungsstellen an den anderen Maschinentypen waren bereits vorgegeben. Im Rahmen der Entwicklung sind immer neue Erkenntnisse aufgekommen, welche zu einer Verzögerung der Entwicklung geführt haben.

Referenzprojekt 2:

Entwicklungsprojekt A	Optimierung einer Drehmaschine
Inhalt des Projekts	Die Drehmaschine ist geeignet zur Bearbeitung großer Bauteile. Die Drehmaschine weist dabei eine modulare Bauweise auf. Im Rahmend des Entwicklungsprojekts wurde die

	Erhöhung der Leistung bzw. der Bearbeitungsgeschwindigkeit von der Drehmaschine gefordert. Gleichzeitig müssen die Herstellungskosten reduziert werden. Ziel war es durch eine Gewichtsreduzierung keinen leistungsstärkeren Antrieb einsetzen zu müssen und so bei gleichbleibender Präzision höhere Geschwindigkeiten bei einer verbesserten Wirtschaftlichkeit zu erreichen.
Zielsetzung	Die Senkung der Masse der Drehmaschine zur Erhöhung der Bearbeitungsgeschwindigkeit der Drehmaschine bei gleichzeitiger Verbesserung der Wirtschaftlichkeit
Team	Sieben Ingenieure: Fünf Konstrukteuren, ein Elektrokonstrukteur und ein Regelungstechniker
Angewendete Entwicklungsmethoden	Stage-Gate-Prozess
Angewendete Tools und Werkzeuge	Solid Works, FEM
Entwicklungszeit	Geplante Entwicklungszeit: 16 Wochen Reale Entwicklungszeit: 25 Wochen
Die Realität	Für die Gewichtsoptimierung wurden alle Module nach dem Potenzial zur Gewichtsreduzierung untersucht, wie zum Beispiel das Modul der Hauptachsen, das Modul des Manipulators oder das Modul des Werkzeughalters. Es wurden mehrere Iterationen durchgeführt, was im Endeffekt sehr viel Zeit gekostet hat. Dabei musste für jeden Versuch eine detaillierte konstruktive Gestaltung ausgeführt werden. Das verursacht lange Iterationsschleifen. Die Produktionsgenauigkeit der Drehmaschine ist dabei stark von der Arbeitsumgebung, die bei verschiedenen Unternehmen sehr unterschiedlich ist, abhängig. Zum Beispiel beeinflussen die Temperatur, die Luftfeuchtigkeit und die Qualität der Kühlmittel stark die Positioniergenauigkeit. Daher musste zusätzlich bei jedem Versuch die Prototypen in Probelauf beobachtet werden. In diesem Fall wurde zwar am Ende das Modul des Werkzeughalters für die Gewichtsoptimierung bzw. Leistungsoptimierung ausgewählt, aber die Entwicklungszeit und die Entwicklungskosten waren deutlich über den angegebenen Werten.

Referenzprojekt 3:

Entwicklungsprojekt B	Optimierung eines Fräszentrums
Inhalt des Projekts	Ein kleines Modell eines Fräszentrums sollte ähnlich wie bei dem Referenzprojekt 2 angepasst werden. Es sollte eine Erhöhung der Leistung bzw. der Bearbeitungsgeschwindigkeit stattfinden, bei gleichzeitiger Reduzierung der Herstellungskosten und ohne Anpassung des Antriebssystems. Der Vorteil hierbei ist, dass das Antriebssystem in großen Stückzahlen gekauft wird und entsprechend günstig ist. Das verhindert Konzepte, in denen leistungsstärkere Antriebsystems angewendet werden. Die Leistungssteigerung soll daher durch eine Gewichtsoptimierung erfolgen. Gleichzeitig müssen die Herstellungskosten im Vergleich zu der bereits vorhandenen Variante reduziert werden, wobei das nicht auf die Kosten der technischen Anforderungen geschehen soll.
Zielsetzung	Die Senkung der Masse des Fräszentrums zur Erhöhung der Bearbeitungsgeschwindigkeit der Drehmaschine bei gleichzeitiger Verbesserung der Wirtschaftlichkeit
Team	Sechs Ingenieure: Fünf Konstrukteuren, ein Elektrokonstrukteur
Angewendete Methoden	Stage-Gate-Prozess
Angewendete Tools und Werkzeuge	Solid Works
Entwicklungszeit	Geplante Entwicklungszeit: 17 Wochen Reale Entwicklungszeit: 35 Wochen
Die Realität	Für die Gewichtsoptimierung wurden alle Module nach dem Potenzial zur Gewichtsreduzierung untersucht, wie zum Beispiel das Modul der Hauptachsen, das Modul des Manipulators oder das Modul des Werkzeughalters. Es wurde mehrere Iterationen durchgeführt, was im Endeffekt sehr viel Zeit gekostet hat. In diesem Fall wurde zwar am Ende das Modul der Hauptachse für die Gewichtsoptimierung bzw. Leistungsoptimierung ausgewählt, aber die Entwicklungszeit und die Entwicklungskosten waren deutlich über den anvisierten Werten.

A4 Interviewbögen

Gesamteindruck der Methode					
	Stimme voll zu	Stimme eher zu	Stimme eher nicht zu	Stimme überhaupt nicht zu	Keine Angabe
Mein Gesamteindruck der Methode ist positiv	☐	☐	☐	☐	☐

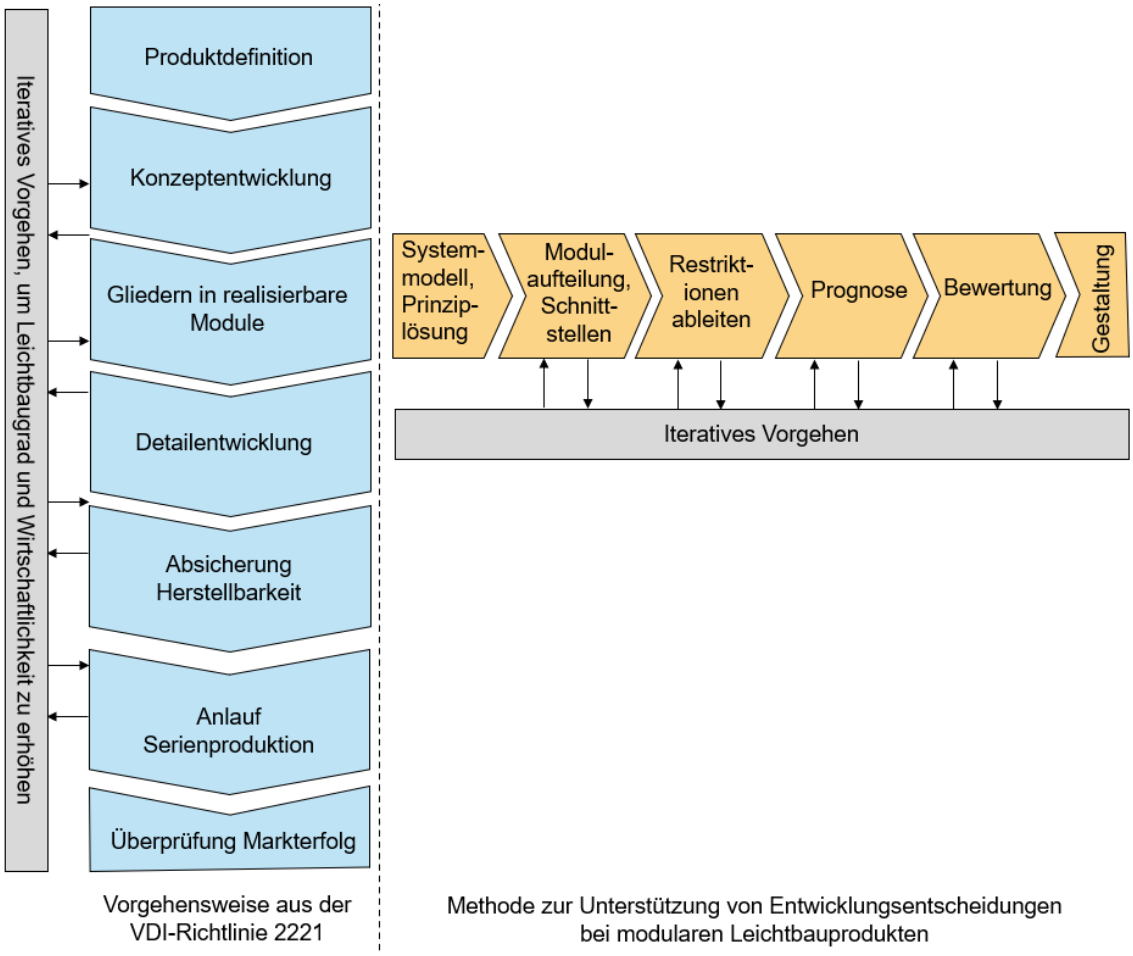
Durchführbarkeit der Methode					
	Stimme voll zu	Stimme eher zu	Stimme eher nicht zu	Stimme überhaupt nicht zu	Keine Angabe
Die Anwendung der Methode ist einfach und kann ohne große Einarbeitung erfolgen	☐	☐	☐	☐	☐
Ich kann die Methode selbstständig anwenden	☐	☐	☐	☐	☐
Die Angabe der notwendigen Daten fällt mir leicht	☐	☐	☐	☐	☐
Der Aufwand zur Anwendung der Methode ist dem daraus entstehenden Nutzen angemessen	☐	☐	☐	☐	☐
Die Anwendung der Methode stellt keine zusätzliche Aufgabe dar, sondern unterstützt mich bei der Entwicklung	☐	☐	☐	☐	☐
Die Durchführbarkeit der Methode bewerte ich als gut	☐	☐	☐	☐	☐

Struktur der Methode					
	Stimme voll zu	Stimme eher zu	Stimme eher nicht zu	Stimme über-haupt nicht zu	Keine An-gabe
Die Methode weist eine strukturierte Vorgehensweise auf.	☐	☐	☐	☐	☐
Die Methode hilft mir systematischer an die Entwicklung heranzugehen	☐	☐	☐	☐	☐
Die Methode unterstützt dabei systematisch Modulleichtbau anzuwenden	☐	☐	☐	☐	☐
Die Struktur der Methode bewerte ich als gut	☐	☐	☐	☐	☐

Ergebnisse der Methode					
	Stimme voll zu	Stimme eher zu	Stimme eher nicht zu	Stimme über-haupt nicht zu	Keine An-gabe
Die Entscheidungsgrundlage für Konstruktionsentscheidungen wird durch die Anwendung der Methode verbessert	☐	☐	☐	☐	☐
Die Methode beschleunigt das Entwicklungsvorgehen	☐	☐	☐	☐	☐
Im Rahmen der Methode wird ausreichend auf die Berücksichtigung von Modulen eingegangen	☐	☐	☐	☐	☐
Die Methode führt zu einer Verbesserung der Wirtschaftlichkeit des Entwicklungsvorgangs	☐	☐	☐	☐	☐
Die Methode führt zu einer Verbesserung der Wirtschaftlichkeit des entstehenden Produkts	☐	☐	☐	☐	☐
Durch die Methode können die Leichtbauziele besser erreicht werden	☐	☐	☐	☐	☐
Die Methode schafft mehr Transparenz bezüglich Entwicklungsentscheidungen	☐	☐	☐	☐	☐
Die Ergebnisse der Methode bewerte ich als gut	☐	☐	☐	☐	☐

A5 Einordnung in VDI 2221

In diesem Anhang wird die konkrete Einordnung in das generelle Entwicklungsvorgehen der VDI-Richtlinie 2221 beschrieben. Neben der Beschreibung der Prozessgestaltung für die Produktentwicklung, sind in der VDI 2221 generelle Schritte zur Erstellung von technischen Produkten enthalten. Diese generellen Schritte bilden die Grundlage für die nachfolgende Einordnung. Die VDI 2221 enthält hierbei sieben Arbeitsschritte. Im Folgenden werden die sieben Schritte kurz vorgestellt. Darauf basierend wird die Einordung der in dieser Arbeit entwickelten Methode zur Entscheidungsunterstützung der Entwicklung von modularen Leichtbauprodukten beschrieben.



Einordnung der Methode in den Entwicklungsprozess nach VDI-Richtlinie 2221

Zuerst wird der Entwicklungsauftrag beschrieben. Der Entwicklungsauftrag beinhaltet Informationen, die für den nächsten Arbeitsschritt für die Erklärung der Aufgabenstellung relevant sind. Zudem werden die Informationen von der Problemstellung beschrieben. In dem ersten Schritt Produktdefinition werden Informationen über die Anforderungen der Aufgabe zusammengetragen und am Ende wird eine Anforderungsliste als Ergebnis dieses Arbeitsschritts erstellt. Dabei werden bestehende Bedingungen und die Bewertung für

die Lösungserfüllung definiert. Gleichzeitig werden technisch-wirtschaftliche Konsequenzen festgelegt. Sind alle Anforderungen geklärt, werden die Funktionen des Produktes definiert.

Anschließend findet im zweiten Arbeitsschritt die Konzeptentwicklung statt. Hierbei werden zuerst Funktionen definiert, die das Produkt zu erfüllen hat. Für die festgelegten Funktionen folgt das Suchen nach Lösungsprinzipien. Die Lösungsprinzipien wer-den zuerst für die wesentlichen Teilfunktionen gesucht. Dafür müssen vorab die entsprechenden Effekte -wie zum Beispiel physikalische Effekte - festgelegt werden. Diese Effekte müssen durch strukturelle Festlegungen realisiert werden, die als Wirkstruktur dargestellt werden können. Ergebnisse dieses Arbeitsschritts sind prinzipielle Lösungen, die die einzelnen Funktionen oder die ganze Funktionsstruktur des zu entwickelnden Produktes erfüllen. In der Regel ergeben sich daraus mehrere alternative Konzepte, die alle die zuvor definierten Anforderungen erfüllen. Für die weitere Entwicklung müssen diese alternativen Konzepte bewertet und die vielversprechendsten Lösungskonzepte ausgewählt werden. Eine Detaillierung aller Alternativen ist aus zeitlichen und finanziellen Gründen meist nicht realistisch, insbesondere für die von hohen Iterationen geprägte Entwicklung des Modulleichtbaus.

Anschließend folgt der vierte Schritt Gliederung des Produktes in Module. Die in dem vorherigen Arbeitsschritt festgelegten Lösungskonzepte werden in zu realisierende Module gegliedert. Die Gliederung des Produktes in Module legt die Basis für den nächsten Schritt der Gestaltung und Konkretisierung der Konzepte auf Bauteilebene. Die wesentliche Basis sind die modulare Struktur und die Verknüpfungen der Module bzw. der Schnittstellen. In diesem Schritt wird die in dieser Arbeit entwickelte Methode eingesetzt, um die sich ergebende Produktstruktur deutlich zu verbessern.

Im fünften Arbeitsschritt Detailentwicklung findet der aufwändigste Teil der Produktentwicklung, die Gestaltung und konkrete Festlegung der Module, statt. Im Rahmen der Detaillierung geht es unter anderem um die Festlegung der Geometrie und der Werkstoffe. Arbeitsergebnisse sind Vorentwürfe für die maßgebenden Module. Danach werden die vorentworfenen Module integriert und die strukturellen Festlegungen werden weiterbearbeitet. Daraus ergibt sich der Gesamtentwurf. Der Gesamtentwurf enthält dabei alle wesentlichen Festlegungen, die zur Realisierung des Produktes notwendig sind, zum Beispiel die Geometrie und die Werkstoffe.

In dem Arbeitsschritt Absicherung der Herstellbarkeit geht es unter anderem um die fertigungs- und montagegerechte Festlegung einer Lösung. Anschließend startet die Produktion und damit ist der Entwicklungsprozess abgeschlossen und es findet nur eine Überprüfung statt, ob die Ziele an die Produktentwicklung eingehalten wurden.

Bisher wurden die sieben Arbeitsschritte der VDI-Richtlinie 2221 vorgestellt. Es zeigt sich klar, wo die in dieser Arbeit entwickelte Methode zur Produktstrukturierung in dem Entwicklungsprozess zugeordnet werden soll. Zum einen ist die Produktstrukturierung

Teil der VDI-Richtlinie 2221 und schließt an die Suche nach Lösungsprinzipien und deren Struktur an. Zum anderen stehen bis dahin genügend Informationen, wie zum Beispiel die für die erforderten Funktionen festgelegten Lösungsprinzipien und deren Strukturen für die Produktstrukturierung zur Verfügung. Diese Informationen, die die Funktionen und die Lösungsprinzipen beschreiben, stellen hierbei die Ausgangssituation für die Verwendung der Methode dar.

A6 Verzeichnis betreuter Studienarbeiten

In Ergänzung zu meinem Antrag auf Zulassung zur Promotion in der Fakultät für Maschinenbau der Universität Paderborn erkläre ich gemäß §11 der Promotionsordnung und unter Beachtung der Regelung zur Zitation studentischer Arbeiten:

Die von mir vorgelegte Dissertation habe ich selbstständig verfasst, und ich habe keine anderen als die dort angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt. Es sind keine Inhalte studentischen Ursprungs (studentische Arbeiten) in dieser Dissertation enthalten.

Das Heinz Nixdorf Institut – Interdisziplinäres Forschungszentrum für Informatik und Technik

Das Heinz Nixdorf Institut ist ein Forschungszentrum der Universität Paderborn. Es entstand 1987 aus der Initiative und mit Förderung von Heinz Nixdorf. Damit wollte er Ingenieurwissenschaften und Informatik zusammenführen, um wesentliche Impulse für neue Produkte und Dienstleistungen zu erzeugen. Dies schließt auch die Wechselwirkungen mit dem gesellschaftlichen Umfeld ein.

Die Forschungsarbeit orientiert sich an dem Programm „Dynamik, Mobilität, Vernetzung: Eine neue Schule des Entwurfs der technischen Systeme von morgen“. In der Lehre engagiert sich das Heinz Nixdorf Institut in Studiengängen der Informatik, der Ingenieurwissenschaften und der Wirtschaftswissenschaften.

Heute wirken am Heinz Nixdorf Institut acht Professoren mit insgesamt 130 Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern. Pro Jahr promovieren hier etwa 15 Nachwuchswissenschaftlerinnen und Nachwuchswissenschaftler.

Heinz Nixdorf Institute – Interdisciplinary Research Centre for Computer Science and Technology

The Heinz Nixdorf Institute is a research centre within the Paderborn University. It was founded in 1987 initiated and supported by Heinz Nixdorf. By doing so he wanted to create a symbiosis of computer science and engineering in order to provide critical impetus for new products and services. This includes interactions with the social environment.

Our research is aligned with the program “Dynamics, Mobility, Integration: Enroute to the technical systems of tomorrow.” In training and education the Heinz Nixdorf Institute is involved in many programs of study at the Paderborn University. The superior goal in education and training is to communicate competencies that are critical in tomorrows economy.

Today eight Professors and 130 researchers work at the Heinz Nixdorf Institute. Per year approximately 15 young researchers receive a doctorate.

Zuletzt erschienene Bände der Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts

Bd. 390 GAUSEMEIER, J. (Hrsg.): Vorausschau und Technologieplanung. 15. Symposium für Vorausschau und Technologieplanung, Heinz Nixdorf Institut, 21. und 22. November 2019, Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften, Berlin, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 390, Paderborn, 2019 – ISBN 978-3-947647-09-5

Bd. 391 SCHIERBAUM, A.: Systematik zur Ableitung bedarfsgerechter Systems Engineering Leitfäden im Maschinenbau. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 391, Paderborn, 2019 – ISBN 978-3-947647-10-1

Bd. 392 PAI, A.: Computationally Efficient Modelling and Precision Position and Force Control of SMA Actuators. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 392, Paderborn, 2019 – ISBN 978-3-947647-11-8

Bd. 393 ECHTERFELD, J.: Systematik zur Digitalisierung von Produktprogrammen. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 393, Paderborn, 2020 – ISBN 978-3-947647-12-5

Bd. 394 LOCHBICHLER, M.: Systematische Wahl einer Modellierungstiefe im Entwurfsprozess mechatronischer Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 394, Paderborn, 2020 – ISBN 978-3-947647-13-2

Bd. 395 LUKEI, M.: Systematik zur integrativen Entwicklung von mechatronischen Produkten und deren Prüfmittel. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 395, Paderborn, 2020 – ISBN 978-3-947647-14-9

Bd. 396 KOHLSTEDT, A.: Modellbasierte Synthese einer hybriden Kraft-/Positionsregelung für einen Fahrzeugachsprüfstand mit hydraulischem Hexapod. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 396, Paderborn, 2021 – ISBN 978-3-947647-15-6

Bd. 397 DREWEL, M.: Systematik zum Einstieg in die Plattformökonomie. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 397, Paderborn, 2021 – ISBN 978-3-947647-16-3

Bd. 398 FRANK, M.: Systematik zur Planung des organisationalen Wandels zum Smart Service-Anbieter. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 398, Paderborn, 2021 – ISBN 978-3-947647-17-0

Bd. 399 KOLDEWEY, C.: Systematik zur Entwicklung von Smart Service-Strategien im produzierenden Gewerbe. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 399, Paderborn, 2021 – ISBN 978-3-947647-18-7

Bd. 400 GAUSEMEIER, J. (Hrsg.): Vorausschau und Technologieplanung. 16. Symposium für Vorausschau und Technologieplanung, Heinz Nixdorf Institut, 2. und 3. Dezember 2021, Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften, Berlin, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 400, Paderborn, 2021 – ISBN 978-3-947647-19-4

Bd. 401 BRETZ, L.: Rahmenwerk zur Planung und Einführung von Systems Engineering und Model-Based Systems Engineering. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 401, Paderborn, 2021 – ISBN 978-3-947647-20-0

Bd. 402 WU, L.: Ultrabreitbandige Sampler in SiGe-BiCMOS-Technologie für Analog-Digital-Wandler mit zeitversetzter Abtastung**.** Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 402, Paderborn, 2021 – ISBN 978-3-947647-21-7

Bd. 403 HILLEBRAND, M.: Entwicklungssystematik zur Integration von Eigenschaften der Selbstheilung in Intelligente Technische Systeme. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 403, Paderborn, 2021 – ISBN 978-3-947647-22-4

Bezugsadresse:
Heinz Nixdorf Institut
Universität Paderborn
Fürstenallee 11
33102 Paderborn

Zuletzt erschienene Bände der Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts

Bd. 404 OLMA, S.: Systemtheorie von Hardware-in-the-Loop-Simulationen mit Anwendung auf einem Fahrzeugachsprüfstand mit parallelkinematischem Lastsimulator. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 404, Paderborn, 2022 – ISBN 978-3-947647-23-1

Bd. 405 FECHTELPETER, C.: Rahmenwerk zur Gestaltung des Technologietransfers in mittelständisch geprägten Innovationsclustern. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 405, Paderborn, 2022 – ISBN 978-3-947647-24-8

Bd. 406 OLEFF, C.: Proaktives Management von Anforderungsänderungen in der Entwicklung komplexer technischer Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 406, Paderborn, 2022 – ISBN 978-3-947647-25-5

Bd. 407 JAVED, A. R.: Mixed-Signal Baseband Circuit Design for High Data Rate Wireless Communication in Bulk CMOS and SiGe BiCMOS Technologies. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 407, Paderborn, 2022 – ISBN 978-3-947647-26-2

Bd. 408 DUMITRESCU, R, KOLDEWEY, C.: Datengestützte Projektplanung. Fachbuch. Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 408, Paderborn, 2022 – ISBN 978-3-947647-27-9

Bd. 409 PÖHLER, A.: Automatisierte dezentrale Produktionssteuerung für cyber-physische Produktionssysteme mit digitaler Repräsentation der Beschäftigten. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 409, Paderborn, 2022 – ISBN 978-3-947647-28-6

Bd. 410 RÜDDENKLAU, N.: Hardware-in-the-Loop-Simulation von HD-Scheinwerfer-Steuergeräten zur Entwicklung von Lichtfunktionen in virtuellen Nachtfahrten. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 410, Paderborn, 2023 – ISBN 978-3-947647-29-3

Bd. 411 BIEMELT, P.: Entwurf und Analyse modellprädiktiver Regelungsansätze zur Steigerung des Immersionsempfindens in interaktiven Fahrsimulationen. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 411, Paderborn, 2023 – ISBN 978-3-947647-30-9

Bd. 412 HAAKE, C.-J., MEYER AUF DER HEIDE, F., PLATZNER, M., WACHSMUTH, H., WEHRHEIM, H. (Eds..): On-The-Fly Computing - Individualized IT-Services in dynamic markets, Collaborative Research Centre 901 (2011 - 2023), Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 412, Paderborn, 2023 – ISBN 978-3-947647-31-6

Bd. 413 DUMITRESCU, R.; HÖLZLE, K. (Hrsg.): Vorausschau und Technologieplanung. 17. Symposium für Vorausschau und Technologieplanung, Heinz Nixdorf Institut, 14./15. September 2023, Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften, Berlin, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 413, Paderborn, 2023 – ISBN 978-3-947647-32-3

Bd. 414 ABUGHANNAM, S.: Low-power Direct-detection Wake-up Receiver at 2.44 GHz for Wireless Sensor Networks. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 414, Paderborn, 2024 – ISBN 978-3-947647-33-0

Bd. 415 REINHOLD, J.: Systematik zur musterbasierten Transformation von Wertschöpfungssystemen für Smart Services. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 415, Paderborn, 2024 – ISBN 978-3-947647-34-7

Bezugsadresse:
Heinz Nixdorf Institut
Universität Paderborn
Fürstenallee 11
33102 Paderborn

Modulleichtbau, also die Kombination aus Modularisierung und Leichtbau, ermöglicht es, wirtschaftlich Leichtbaustrukturen zu realisieren. Dadurch eröffnen sich für den Leichtbau zahlreiche Anwendungsfelder. Die Umsetzung des Modulleichtbaus ist jedoch sehr komplex, da es in der Anwendung zahlreiche Konflikte gibt, für die Kompromisse gefunden werden müssen. Dies führt zu aufwändigen und hoch iterativen Entwicklungsvorgängen. Insbesondere Änderungen in der Produktstruktur sorgen für langwierige Änderungsprozesse. Die in dieser Arbeit entwickelte Methode dient dazu, die Ermittlung der Produktstruktur beim Modulleichtbau zu optimieren. Konstruktionsentscheidungen werden hierzu bereits früh im Entwicklungsprozess geklärt und Auswirkungen auf die spätere Gestaltung anhand von Szenarien abgeschätzt. Hierbei werden alle Anforderungen und Restriktionen des gesamten Entwicklungsprozesses berücksichtigt. Das Ziel ist es, bereits früh Entscheidungen über die Ausgestaltung der Module zu treffen, also zum Beispiel, ob diese leichtbauoptimiert entwickelt werden oder ob Zukaufteile verwendet werden sollten. Diese Methode sieht hierbei ein Vorgehen in vier Phasen vor – von der Modulaufteilung über die Ableitung der Restriktionen bis zur Prognose und Bewertung der Module.

Durch die in dieser Arbeit entwickelte Methode erhalten die Entwickler sowohl einen klaren Entwicklungsfokus als auch die Konflikte, die sonst zu Iterationen geführt hätten, werden bereits früh im Entwicklungsprozess geklärt. Die Wirksamkeit der Methode konnte im Rahmen eines Fallbeispiels nachgewiesen werden.