



Institut für Konstruktionstechnik  
und Technisches Design  
Universität Stuttgart  
Prof. Dr.-Ing. H. Binz

Benedikt Posner

**Methodik zum leichtbaugerechten  
Konzipieren**

Bericht Nr. 656



# **Methodik zum leichtbaugerechten Konzipieren**

Von der Fakultät Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik der  
Universität Stuttgart  
zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)  
genehmigte Abhandlung

von  
Dipl.-Ing. Benedikt Posner  
geboren in Spaichingen

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. Hansgeorg Binz

Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Albert Albers

Tag der mündlichen Prüfung: 22.09.2016

Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design  
Universität Stuttgart

2016

D 93

ISBN-10: 3-922823-96-3

ISBN-13: 978-3-922823-96-4

## **Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design**

Prof. Dr.-Ing. Hansgeorg Binz

Universität Stuttgart

Pfaffenwaldring 9

D-70569 Stuttgart

Telefon +49 (0)711 685-66055

Telefax: +49 (0)711 685-66219

E-Mail: [mail@iktd.uni-stuttgart.de](mailto:mail@iktd.uni-stuttgart.de)

*„Our greatest weakness lies in giving up. The most certain way to succeed is always to try just one more time.“*  
*(Thomas Alva Edison)*

Für meine Eltern Dipl.-Ing. Jürgen Posner und Michaela Posner, meine Familie  
sowie meine Lebensgefährtin Sabine Butsch.



## **Vorwort**

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit am Institut für Konstruktions-technik und Technisches Design (IKTD) der Universität Stuttgart unter der Leitung von Herrn Prof. Dr.-Ing. Hansgeorg Binz. Die Arbeit ist zum Teil das Ergebnis des von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten Projekts „Entwicklung einer Methode zum funktions- und massegerechten Konstruieren“. Mein Dank gilt deshalb der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die Finanzierung und Unterstützung des Projekts.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Hansgeorg Binz danke ich für die Betreuung der vorliegenden Arbeit, die von ihm ermöglichte Freiheit in der Forschung und die sehr vertrauensvolle Zusammenarbeit. Zudem danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Albert Albers für die Durchsicht der vorliegenden Arbeit und die Übernahme des Mitberichts.

Für die fachlichen Diskussionen während der Bearbeitung der Themenstellung, die tolle Zusammenarbeit und schöne Zeit am Institut danke ich besonders meinen Kollegen und guten Freunden Herrn Dr.-Ing. Mathias Messerle und Herrn Dr.-Ing. Martin Kratzer sowie meinem Gruppenleiter Herrn Dipl.-Ing. Daniel Roth, die zudem mit großer Sorgfalt die Arbeit korrekturgelesen haben. Auch an meine weiteren Kollegen in der Arbeitsgruppe „Methodische Produktentwicklung“ und am Institut richte ich meinen Dank für die gemeinsame Zeit.

Ganz besonders dankbar bin ich meiner Lebensgefährtin Sabine Butsch, die mich ausnahmslos unterstützt und die stets meinen persönlichen Ausgleich darstellt. Sie ist für die Erreichung all meiner Ziele außerordentlich wichtig.

Der größte Dank gilt meinen Eltern Michaela Posner und Dipl.-Ing. Jürgen Posner, der schon früh meine Begeisterung für Technik geweckt hat. Beide prägen durch ihr Vorbild mein Handeln und bestärken mich bedingungslos auf meinem Weg.

Stuttgart, Oktober 2016

Benedikt Posner



## Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis .....	I
Abkürzungsverzeichnis .....	VI
Abstract .....	IX
1 Einleitung .....	1
1.1 Motivation für Leichtbau .....	1
1.2 Problemstellung .....	3
1.3 Zielsetzung, Abgrenzung und Struktur der Arbeit .....	6
2 Stand der Leichtbau-Produktentwicklung .....	9
2.1 Definition des Begriffs Leichtbau .....	10
2.2 Leichtbau und Kosten .....	11
2.3 Leichtbau-Strategien .....	13
2.4 Leichtbau-Prinzipien .....	15
2.5 Bauweisen im Leichtbau .....	17
2.6 Produktentwicklungsprozesse und Methoden der Leichtbau- Produktentwicklung .....	19
2.6.1 Produktentwicklungsprozesse in der Leichtbau- Produktentwicklung .....	19
2.6.2 Ansätze zum Transfer der Wertanalyse auf die Anwendung im Leichtbau .....	23
2.6.2.1 Wertanalyse (Kosten) .....	23
2.6.2.2 Wertanalyse Gewicht .....	24
2.6.3 Contact & Channel <sup>2</sup> - Approach zur Anwendung in der Analyse im Leichtbau .....	26
2.6.4 Denkwerkzeuge nach der Natur .....	29
2.6.5 Weitere Methoden für spezielle Anwendungsfälle der Leichtbau- Produktentwicklung .....	32
2.7 Massenverteilungs- und trägheitsmomentengerechtes Konstruieren .....	32
2.8 Zusammenfassung .....	33
3 Methodische Produktentwicklung in der Konzeptphase .....	35
3.1 Produktentwicklungsprozess .....	36
3.2 Konzipieren .....	43
3.2.1 Funktionsebene .....	45
3.2.2 Wirkebene .....	46
3.2.3 Struktur- und Gestaltebene .....	47
3.2.4 Bewertung und Auswahl in der Konzeptphase .....	48

---

3.3	Einordnung der Leichtbau-Produktentwicklung in das Design for X / Design to X .....	49
3.4	Zusammenfassung .....	50
4	Konkretisierung der Zielsetzung und Vorgehen.....	51
4.1	Analyse des Stands der Forschung .....	51
4.1.1	Erkenntnislücken in den Leichtbau-Strategien .....	51
4.1.2	Anforderungen an eine Vorgehensweise zum leichtbaugerechten Konzipieren .....	53
4.1.3	Lücken in den Vorgehensweisen der methodischen Produktentwicklung .....	54
4.2	Konkretisierung der Zielsetzung.....	57
4.3	Forschungsfragen und weiteres Vorgehen .....	58
5	Entwicklung einer Methodik für das leichtbaugerechte Konzipieren .....	61
5.1	Methoden-Baukasten zum systematischen leichtbaugerechten Entwickeln .....	61
5.2	Leichtbau-Zielentwicklung und -Potenzialanalyse: Funktionsmassenanalyse .....	64
5.2.1	Transfer des Arbeitsplans.....	65
5.2.2	Schritte 0 bis 2: Projekt vorbereiten, definieren und planen .....	66
5.2.3	Schritt 3: Umfassende Daten über das Objekt sammeln .....	66
5.2.4	Schritt 4: Funktionen und Massen analysieren, Detailziele formulieren .....	67
5.2.4.1	Bestimmen der Wichtigkeit der Anforderungen.....	67
5.2.4.2	Analyse der Funktionen des Vorgänger- oder Wettbewerbsprodukts .....	68
5.2.4.3	Korrelieren der Anforderungen und Funktionen - Funktionsmassenzielbestimmung .....	69
5.2.4.4	Vorauswahl .....	70
5.2.4.5	Korrelieren der Bauteile bzw. Baugruppen mit den Funktionen: Funktionsmassenbestimmung.....	71
5.2.4.6	Korrelieren der Funktionen mit den Bauteilen bzw. Baugruppen: Bauteil- / Baugruppenmassenzielbestimmung .....	72
5.2.4.7	Identifizieren des Optimierungspotenzials und Optimierungsrankings .....	73
5.2.5	Schritt 5: Sammeln und Finden von Lösungsideen .....	76
5.2.6	Schritte 6 und 7: Lösungsideen bewerten und ganzheitliche Vorschläge entwickeln.....	77

---

5.2.7	Schritte 8 und 9: Präsentieren der Vorschläge, Entscheidung erwirken, Vorschläge / Entscheidung realisieren.....	77
5.2.8	Masseabhängigkeit einiger Wirkprinzipien .....	77
5.2.9	Kombinieren der Funktionsmassenanalyse und der Wertanalyse...	78
5.2.10	Zusammenfassung.....	78
5.3	Grundsätze der systematischen Leichtbau-Lösungsentwicklung .....	80
5.4	Leichtbau-Lösungsentwicklung auf Funktionsebene .....	81
5.4.1	Informationsgehalt der Funktionsstrukturen .....	82
5.4.2	Freiheitsgrade und Möglichkeiten der Variation der Funktionsstruktur.....	83
5.4.3	Leichtbau-Strategien und deren Anwendung auf die Funktionsstruktur.....	85
5.4.4	Steigerung des Leichtbaupotenzials durch Funktionsstrukturvariation .....	86
5.4.5	Kriterien für das Leichtbaupotenzial von Funktionsstrukturen .....	88
5.4.6	Vorgehen zur Entwicklung von Funktionsstrukturen mit dem Ziel der Steigerung des Leichtbaupotenzials .....	89
5.4.7	Zusammenfassung.....	94
5.5	Leichtbau-Lösungsentwicklung auf Wirkebene.....	94
5.5.1	Darstellung und Variation von Wirkstrukturen .....	95
5.5.2	Vorgehen zur Entwicklung von Wirkstrukturen mit dem Ziel der Steigerung des Leichtbaupotenzials .....	97
5.5.3	Variation von Wirkprinzipien und Wirkstrukturen.....	100
5.5.4	Reduzierung von Wirkprinzipien und Wirkstrukturen.....	102
5.5.5	Zusammenfassung.....	104
5.6	Leichtbau-Lösungsentwicklung auf Gestaltebene.....	104
5.6.1	Leichtbau-Strategien implementiert in den Contact & Channel <sup>2</sup> - Approach.....	105
5.6.2	Leichtbau-Prinzipien implementiert in das Contact & Channel - Model .....	107
5.6.3	Weiterentwicklung des C&C <sup>2</sup> -A zu den Leichtbau-Denkwerkzeugen (Fokus Gestaltebene) .....	110
5.6.4	Zusammenfassung.....	113
5.7	Leichtbau-Lösungsentwicklung auf Strukturebene .....	113
5.7.1	Zugstützstrukturen, Druckstützstrukturen und Wirkflächenpaare ..	115
5.7.2	Sequenzanalyse.....	116
5.7.3	Zug- und Druckkegel im begrenzten Bauraum.....	117

---

5.7.4	Zusammenfassung der wichtigsten Regeln .....	120
5.7.5	Anwendungsbereiche und Einschränkungen .....	122
5.7.6	Zusammenfassung .....	123
5.8	Leichtbaupotenzialbewertung abstrakter Lösungen .....	123
5.8.1	Bewertung von Lösungen auf verschiedenen Abstraktionsebenen der Konzeptphase .....	124
5.8.2	Implementierung der Funktionsmassenanalyse in den Produktentwicklungsprozess .....	125
5.8.3	Systematische Unterstützung der Bewertung des Leichtbaupotenzials in der Konzeptphase: Funktionsmasseneinschätzung .....	127
5.8.3.1	Schritt 0: Entscheidung über die Notwendigkeit der Lösungsauswahl .....	127
5.8.3.2	Schritt 1: Identifizieren der zu vergleichenden und relevanten Lösungen und deren Teillösungen .....	128
5.8.3.3	Schritt 2: Identifizieren der Produkte mit vergleichbaren Teilfunktionen oder Wirkprinzipien .....	129
5.8.3.4	Schritt 3: Identifizieren der zu den Teilfunktionen oder zum Wirkprinzip beitragenden Komponenten .....	129
5.8.3.5	Schritt 4: Korrelieren der Komponenten und Teilfunktionen oder Wirkprinzipien .....	130
5.8.3.6	Schritt 5: Berechnen der Masse auf Basis der Funktionsstruktur, des Wirkprinzips oder der Wirkstruktur .....	131
5.8.3.7	Schritt 6: Interpretieren der Untersuchungsergebnisse ....	132
5.8.4	Zusammenfassung .....	133
5.9	Zusammenfassung .....	134
6	Evaluation der Methodik .....	137
6.1	Aufbau und Systematik der Evaluation .....	137
6.2	Anwendung bei der Daimler AG, Geschäftsfeld Daimler Trucks .....	139
6.2.1	Anwendung und Evaluation des Baukastens und der Methoden- Module .....	140
6.2.2	Feedback der Anwender .....	141
6.2.3	Diskussion der Ergebnisse .....	143
6.3	Anwendung bei der HEDELIUS Maschinenfabrik GmbH .....	144
6.3.1	Anwendung und Evaluation des Baukastens und der Methoden- Module .....	145
6.3.2	Feedback der Anwender .....	145

---

6.3.3	Diskussion der Ergebnisse des Projekts .....	147
6.4	Anwendung bei der ANDREAS STIHL AG & Co. KG .....	148
6.4.1	Anwendung und Evaluation des Baukastens und der Methoden- Module im Rahmen einer studentischen Arbeit in Abteilung A.....	149
6.4.2	Anwendung und Evaluation des Baukastens und der Methoden- Module im Rahmen einer studentischen Arbeit in Abteilung B.....	149
6.5	Anwendung im Rahmen des VDI-Leichtbau-Industrieseminars.....	150
6.5.1	Anwendung und Evaluation des Baukastens und der Methoden- Module .....	151
6.5.2	Feedback der Anwender .....	151
6.5.3	Diskussion der Ergebnisse des Projekts .....	154
6.6	Zusammenfassung und Fazit der Evaluation.....	154
7	Zusammenfassung.....	157
8	Ausblick.....	159
	Literaturverzeichnis .....	161
	Anhang .....	171
A.1	Gestellte Evaluationsfragen .....	171
A.2	Evaluationsfragebogen .....	172
A.3	Evaluationsfragebogen für die VDI-Leichtbau-Seminare.....	173

## Abkürzungsverzeichnis

### Abkürzungen

A	Ausarbeiten
AAF	Allgemein anwendbare Funktionen
AAK	Algorithmisches Auswahlverfahren zur Konstruktion mit Katalogen
Al	Aluminium
C&C-A	Contact & Channel - Approach (dt. Elementmodell)
C&C-A <sup>2</sup>	Contact & Channel - Approach <sup>2</sup> (dt. Elementmodell)
C&C-M	Contact & Channel - Model (dt. Elementmodell)
CC&M-M	Contact, Channel & Motions – Model
DfX	Design for X (dt. x-gerechtes Konstruieren)
DIN	Deutsches Institut für Normung e. V.
DRM	Design Research Methodology
DS I	Descriptive Study I (Klärungsphase des Stands der Forschung)
DS II	Descriptive Study II (Evaluationsphase)
DSS	Druckstützstruktur
DtX	Design to X (dt. x-gerechtes Konstruieren)
E	Entwerfen
EN	Europäische Norm
FAST	Funktionen-Analyse-System-Technik
FEM	Finite Elemente Methode
FL	Flüsse (der Funktionsstruktur)
FLM	Funktions-Leichtbau-Modul
FMA	Funktionsmassenanalyse
FME	Funktionsmasseneinschätzung
FMEM	Funktionsmasseneinschätzungs-Modul

---

FS	Funktionsstruktur
GF	Gesamtfunktion (der Funktionsstruktur)
GLM	Gestalt-Leichtbau-Modul
HU	Hauptumsatz (der Funktionsstruktur)
IPA	Fraunhofer Institut für Produktionstechnik und Automatisierung
iPeM	integriertes Produktentstehungsmodell
K	Konzipieren
LBDW	Leichtbau-Denkwerkzeuge
LSS	Leitstützstruktur
MKM	Münchener Produktkonkretisierungsmodell
MR	Metaregel
MVM	Münchener Vorgehensmodell
P	Planen
PS	Prescriptive Study (Entwicklungsphase der eigenen Lösung)
QFD	Quality-Function-Deployment
RC	Research Clarification (Forschungsplanungsphase)
SKO	Soft Kill Option (Topologieoptimierungsansatz)
SLM	Struktur-Leichtbau-Modul
St	Stahl
TF	Teilfunktion (der Funktionsstruktur)
VDI	Verein Deutscher Ingenieure e. V.
WB	Wirkbewegung
WF	Wirkfläche
WFP	Wirkflächenpaar
WLM	Wirk-Leichtbau-Modul
WP	Wirkprinzip
ZSS	Zugstützstruktur

**Formelzeichen**

<b>Symbol</b>	<b>Einheit</b>	<b>Erläuterung</b>
F	N	Kraft (aufgebrachte Kraft)
F <sub>r</sub>	N	Reaktionskraft
M	Nm	Moment (Drehmoment)
M <sub>r</sub>	Nm	Reaktionsmoment
N	N	Normalkraft
p	N/mm <sup>2</sup>	Druck
Q	N	Querkraft
R <sub>m</sub>	N/mm <sup>2</sup>	Streckgrenze
ρ	g/mm <sup>3</sup>	Dichte

## Abstract

Mass has a great influence on the value of products from different industries. For example, by reducing a product's mass, energy consumption and thus CO<sub>2</sub> emissions can be reduced, as in the case of automobiles, for example. Furthermore, mass optimisation leads to better dynamic properties of different products which are moved or contain moving elements, such as tooling machines, vehicles or robots. In addition, every gram less in weight reduces the load on the product user, as seen in the example of hand tools such as chain saws.

In literature on lightweight design, there are different lightweight strategies, for example conditional, shape, manufacturing, material or conceptual lightweight design. Most of these strategies, e.g. conceptual lightweight design, are not methodically supported. Most product properties are defined in the conceptual stage, therefore designers have a great influence on the mass of the product in this stage. Due to the fact that there is no method which assists designers in developing systematically lightweight products regarding all steps of the conceptual stage, the great lightweight design potential of this stage is not exploited.

A methodology will be developed in this thesis in order to support designers in exploiting mass potential. With the intention of making this methodology applicable to each company-specific product development process, the methodology will be developed as a method kit for lightweight product development in the conceptual stage. Different foci of various company-specific product development processes can thus be considered by using different method modules of the method kit.

As a first step for developing lightweight products, aims regarding the mass of a new product and potential for reducing the mass of existing products have to be identified. The approach of the "Value Analysis" is therefore transferred to the application for mass instead of costs. The resulting method, called the "Function Mass Analysis" (FMA), supports designers in analysing the requirements, functions, the importance of the functions and the mass which is needed in order to fulfil those functions.

All levels of detail within the conceptual stage (according to VDI 2221), in which solutions are described or developed, are addressed by the method modules in order to support the development of lightweight design solutions. The development of these method modules is based on the idea of varying the solutions in a target-oriented manner with the aim of obtaining solutions with a higher lightweight design potential.

Method modules for the function, working principle, shape and structural level are developed during this process. Furthermore, the solutions with higher potential are identified and the ones which have a higher lightweight potential are selected.

Due to the fact that there is no information about the volume and density of each part of the product on the level of function and working principle, it is not possible to calculate the mass of different solutions. The method module, called the “Functions Mass Estimation” (FME), is therefore developed based on the idea of the FMA. The FME supports designers in systematically structuring solutions and their sub-solutions. Furthermore, the mass of these sub-solutions is estimated using existing sub-solutions. This facilitates the comparison of the lightweight potential of different solutions as early as the level of functions and working principles.

Another method module, called the “Shape Lightweight Module”, is based on the “Contact and Channel<sup>2</sup> - Approach”, the lightweight strategies and lightweight principles. It supports designers in analysing the backgrounds of existing products and their functional behaviour, as well as guiding designers in systematically varying the existing solutions and finding new ones.

An additional method module is based on the ideas of the “Contact and Channel<sup>2</sup> - Approach”. Besides this, it is based on and describes a further development of the ideas of the “Thinking Tools after Nature”, which are simple rules for a bionic approach to support the development of lightweight structures. Thus the “Structural Lightweight Module” arose, which aids designers in analysing and visualising existing structures, developing new structures as well as discussing solutions with simple visualisation elements without the need for computational support.

All method modules together represent the lightweight design method kit for the conceptual stage. These modules are applied to real industrial products in different projects commissioned by customers and partners from industry. The results of the projects - as well as the feedback from the designers in industry who applied the method modules - are very positive. The developed method modules thus offer support to designers in developing lightweight products and exploiting the great freedom of the conceptual stage with the aim of developing systematically lightweight products.

# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation für Leichtbau

Um im internationalen Wettbewerb zu bestehen, müssen Unternehmen ihre Produkte bezüglich der Produktkosten, der Produktqualität und der Produktentwicklungszeit wettbewerbsfähig ausrichten [LINDEMANN09, S. 14]. Die gezielte Beeinflussung und Beherrschung dieser drei Faktoren soll den Unternehmen langfristig den Erfolg sichern. Der Ressourcenverbrauch der Weltbevölkerung nimmt immer schneller zu [ALLIANZ09, S. 3], wobei seit einigen Jahren in der Gesellschaft ein Umdenken stattfindet. Es wird der Gesellschaft immer mehr bewusst, dass sämtliche Ressourcen endlich und die Folgen menschlichen Handelns, auch beispielsweise auf das weltweite Klima, weitreichend sind [PONN11, S. 182, 280]. Dieses Umdenken zeigt sich bereits in politischen Entscheidungen, die mit großem Einfluss auf den Markt verbunden sind. Allen voran muss die Automobilbranche bis zum Jahr 2015 einen Grenzwert von 120 g und bis zum Jahr 2020 einen Grenzwert von 95 g CO<sub>2</sub>-Ausstoß pro gefahrenem Kilometer im Durchschnitt pro Fahrzeug über die Fahrzeugflotte des Herstellers erreichen [UMWELTBUNDESAMT10, S. 11]. Wer diese Ziele nicht erreicht, wird mit Abgabesätzen wegen Emissionsüberschreitung belegt [UMWELTBUNDESAMT10, S. 47 ff.], welche sich letztendlich auf die Produktkosten negativ auswirken können. Zusätzlich sollen bis im Jahr 2020 eine Million Elektrofahrzeuge allein auf Deutschlands Straßen unterwegs sein [NPE14, S. 3; SPIEGEL15; FAZ15]. Die aktuell größte Herausforderung bei diesen Elektrofahrzeugen ist der Energiespeicher, der sowohl preislich als auch die Energiedichte pro Volumen betreffend, noch nicht so weit ausgereift ist, dass er im Vergleich zur Verbrennungstechnik wettbewerbsfähig wäre [NPE14, S. 20; S. 57 f.].

Leichtbau wird bei diesen Herausforderungen als ein wesentlicher Faktor betrachtet, da weniger Masse, die bewegt werden muss, weniger Energieaufwand und damit weniger CO<sub>2</sub>-Ausstoß zur Folge hat [FRIEDRICH13A, S. V]. Außerdem kann idealerweise die zusätzliche Masse, die bei Elektrofahrzeugen durch die Energiespeicher verursacht wird, durch Leichtbau am restlichen Fahrzeug kompensiert werden [FRIEDRICH13A, S. V; NPE14, S. 21].

Einen weiteren Effekt des Leichtbaus stellt die Einsparung von Ressourcen dar [PONN11, S. 211]. So ist es das Ziel im Leichtbau, Produkte unter Beibehaltung von Steifigkeit, Festigkeit und weiteren gewünschten Funktionen mit möglichst geringem

Aufwand an Masse zu realisieren [WIEDEMANN07, S. 1 f.]. Damit können Material und gegebenenfalls auch Produktkosten durch das eingesparte Material reduziert werden [PONN11, S. 209]. Des Weiteren führt dieses eingesparte Material wiederum dazu, dass während der Nutzungsphase des Produkts weniger Energie, beispielsweise für dessen Fortbewegung [NIEMANN05, S. 166, PONN11, S. 209], benötigt wird. Dies hat wiederum Kosteneinsparungen für den Kunden in der Produktnutzungsphase zur Folge. Außerdem muss beachtet werden, dass die Produkte selbst transportiert werden müssen. Dabei verursacht ein leichteres Produkt weniger Aufwand und Kosten beim Transport [PONN11, S. 209], z. B. zu dessen Einsatzort oder während verschiedener Schritte der Produktherstellung. Beispiele hierfür sind etwas weniger offensichtliche Produkte wie Brücken, Baugerüste oder mobile Hochwasserschutzanlagen. Alternativ kann bei gleichem Energieverbrauch mehr Nutzlast transportiert werden, so beispielsweise bei Leichtbau im Bereich der Nutzfahrzeuge [NIEMANN05, S. 166]. Die Effizienzsteigerung der Produkte stellt jedoch nicht nur einen Kostenvorteil für den Kunden, sondern auch eine höhere Produktqualität dar, wie z. B. ein besseres Masse-Leistungs-Verhältnis oder ein besseres Handling von motorisierten Handgeräten.

Leichtbau wird im Transport und Personentransport seit vielen Jahren betrieben. Leyer [LEYER70, S. 5 f.] betont, dass das Fahrrad eines der ersten und am weitesten optimierten Leichtbau-Produkte ist. Außerdem stellen die Luft- und Raumfahrt [FEYERABEND91, S. 1; DEGISCHER09, S. XII] und der Rennsport in sämtlichen Ausprägungen [FRIEDRICH13B, S. 3] die Vorreiter im Bereich Leichtbau dar. Im Rennsport spielen vor allem kürzere Beschleunigungszeiten und weitere dynamische Vorteile eine große Rolle, die für die Produktqualität, was in diesem Fall beispielsweise die Wettbewerbsfähigkeit des Rennfahrzeugs ist, in diesem Bereich maßgeblich sind. Leichtbau beschränkt sich jedoch nicht auf diese Branchen, sondern hält Einzug in unterschiedlichste Branchen [DEGISCHER09, S. XII; KLEIN13, S. 2; LEYER70]. Kürzere Beschleunigungszeiten spielen beispielsweise bei Industrierobotern [FEYERABEND91, S. 2] oder bei Werkzeugmaschinen [KLEIN13, S. 1, PONN11, S. 210 ff.] eine erhebliche Rolle, da diese mit der Steigerung der Produktivität und damit mit der Senkung der Produktkosten gleichzusetzen sind. Nicht nur bei maschinell bewegten Produkten, Baugruppen oder Bauteilen ist Leichtbau relevant, sondern auch bei Produkten, die der Produktnutzer selbst bewegen muss [PONN11, S. 209]. Durch Leichtbau kann hierbei eine Belastungsreduktion auf den Nutzer, damit verbunden eine langsamere Ermüdung, eine höhere Produktivität des Nutzers über einen längeren Zeitraum, in dem der Nutzer konzentriert

mit dem Produkt arbeiten kann, erreicht werden. Dies spielt beispielsweise bei handgetragenen und bedienten Werkzeugen, wie einer Heckenschere oder einer Motorsäge, eine Rolle. Ein weiteres Beispiel stellen medizinische Instrumente und Geräte dar, bei denen ermüdungsbedingte Fehler besonders schwerwiegende Folgen haben können.

Um Leichtbau und damit die diskutierten Ziele in der Produktentwicklung umzusetzen, wird eine systematische Vorgehensweise benötigt, die die Entwickler von Leichtbau-Produkten unterstützt und damit deren Produktqualität sichert [ALBERS11A, S. 7; FEYERABEND91, S. 1; PONN11, S. 211]. Wird Leichtbau erst zu spät im Produktentwicklungsprozess berücksichtigt, so kann dies nach Abschluss der Produktentwicklung zu der Feststellung führen, dass das Produkt zu schwer oder schwerer als die Wettbewerbsprodukte ist. Damit verliert das Produkt an Wettbewerbsfähigkeit oder weitere Entwicklungsprozessiterationen werden benötigt, um das Produkt leichter zu machen [PONN11, S.209]. Dies hat negative Folgen sowohl für die Produktqualität, die Produktkosten als auch auf die Entwicklungszeit. Aus diesem Grund wird nachfolgend untersucht, welche Unterstützung die Entwickler für das systematische Entwickeln von Leichtbau-Produkten benötigen.

## 1.2 Problemstellung

Ponn und Lindemann [PONN11, S. 211] halten fest, dass es nicht ausreichend ist, die im Leichtbau verwendeten Leichtbau-Prinzipien und -Strategien anzuwenden, die vor allem auf die Gestaltung des Produkts und die Auswahl dessen Werkstoffe abzielen. Vielmehr muss Leichtbau auf allen Ebenen der Produktentwicklung und im gesamten Produktentwicklungsprozess berücksichtigt werden. Werden nicht bereits zu Beginn der Produktentwicklung Massenziele erarbeitet, der Leichtbau auf Anforderungs-, Funktions-, Wirk-, Struktur- und Gestaltebene berücksichtigt, so kann das Produkt am Ende der Produktentwicklung zu schwer sein. [PONN11, S. 211] Auch Schmidt und Puri [SCHMIDT01, S. 21 ff.] heben die Wichtigkeit der Berücksichtigung von Leichtbau in der gesamten Konzeptphase hervor. Hauck [HAUCK06, S. 2 f.] betont die großen Freiheitsgrade der Konzeptentwicklung und die geringen Kosten für Konstruktionsänderungen in dieser Phase und weist auf das daraus resultierende Leichtbaupotenzial hin. Sowohl Ponn und Lindemann [PONN11, S. 209 ff.] als auch Schmidt und Puri [SCHMIDT01] zeigen Möglichkeiten und Potenziale für den Leichtbau auf den verschiedenen Ebenen der Konzeptphase auf, sie bieten jedoch keine durchgängige methodische Unterstüt-

zung dafür an. Da die Konzeptphase im Fokus der Arbeit steht, wird diese nachfolgend definiert.

**Definition Konzeptphase/Konzipieren:** *Der Begriff Konzeptphase bzw. die dazugehörige Tätigkeit des Konzipierens wird in dieser Arbeit im Sinne der Definition von Pahl et al. [PAHL07, S. 195 f.] genutzt. Damit startet diese Phase bzw. Tätigkeit im Anschluss an das Klären der Aufgabenstellung. Die Phase umfasst das Abstrahieren der Aufgabenstellung auf die wesentlichen Probleme, das Aufstellen von Funktionsstrukturen, die Suche nach geeigneten Wirkprinzipien und deren Kombination zur Wirkstruktur, eine grobe Gestaltung und Festlegung des Werkstoffs, um die resultierende prinzipielle Lösung festzulegen und bewertbar zu machen. [PAHL07, S. 195 f.]*

Außerdem stehen die Potenziale für den Leichtbau auf den verschiedenen Ebenen der Konzeptphase in dieser Arbeit im Fokus. In der Literatur wird keine allgemein anerkannte Definition des Begriffs „Leichtbaupotenzial“ beschrieben. Daher wird nachfolgend der Begriff so definiert, wie er in dieser Arbeit gebraucht wird.

**Definition Leichtbaupotenzial:** *Das „Leichtbaupotenzial“ einer Lösung für ein technisches Produkt auf Funktions-, Wirk-, Gestalt- oder Strukturebene ist die Wahrscheinlichkeit dafür, dass diese Lösung unter Ausnutzung verschiedener anderer Faktoren zu einem masseärmeren Produkt als eine bezüglich der Anforderungen vergleichbare Lösung führt. Dabei wird unter anderen Faktoren z. B. eine im Produktentwicklungsprozess nachfolgende Werkstoffauswahl für diese Lösung verstanden.*

Auch Klein [KLEIN13, S. 10 f.] weist darauf hin, dass die systematische Berücksichtigung von Leichtbau über den gesamten Produktentwicklungsprozess notwendig ist. Wie auch Feyerabend [FEYERABEND91, S. 30 f.] sieht er dabei nicht die Notwendigkeit für einen völlig neuen Produktentwicklungsprozess, jedoch muss das Vorgehen der bestehenden Produktentwicklungsprozesse modifiziert werden, um die Gegebenheiten des Leichtbaus zu berücksichtigen. Außerdem hebt er die Konzeptphase als besonders wichtig hervor, da ein gutes Konzept die Voraussetzung für eine innovative Problemlösung darstellt. [KLEIN13, S. 10 f.] Methodische Unterstützung kann das Finden guter Lösungen planbar, flexibel, optimierbar und nachprüfbar machen [PAHL07, S. 9]. Jedoch wird die Konzeptphase nicht durchgängig methodisch mit dem Ziel der Entwicklung von Leichtbau-Produkten unterstützt.

Um Leichtbau in der Konzeptphase systematisch berücksichtigen zu können, müssen im ersten Schritt der Konzeptphase die Anforderungen hinterfragt und daraus die geforderten Anforderungen sowie deren Wichtigkeit für den Kunden abgeleitet werden.

Danach werden in der Konzeptphase die Funktionen für das Produkt festgelegt. Durch Integration von zusätzlichen Funktionen, wie beispielsweise die Integration weiterer Elektromotoren für die Sitzverstellung im Pkw, wird zusätzliche Masse in das Produkt eingebracht. Dies geschieht teilweise ohne ein Gegenüberstellen des Kundennutzens, um bewusst eine Entscheidung für oder gegen diese zusätzlichen Funktionen und deren Masse zu treffen.

Funktionsintegration wird von vielen Autoren als eine der wichtigsten Lösungen für Leichtbau vorgeschlagen (unter anderen [ALBERS11c, S. 127; ELLENRIEDER13, S. 69; KLEIN13, S. 3; SOBEK07, S. 74]). Bei der Festlegung der Funktionen und deren Strukturen wird jedoch weder Leichtbau noch Funktionsintegration berücksichtigt. Funktionen können meist durch unterschiedliche Wirkprinzipien realisiert werden, so kann beispielsweise das Wandeln von rotatorischer in translatorische Bewegung bei Zügen mithilfe des Wirkprinzips Rad-Schiene-System oder alternativ mithilfe des Wirkprinzips der Magnet-Schwebe-Technik umgesetzt werden [PONN11, S. 216 f.]. Letzteres Wirkprinzip verursacht in real umgesetzten Lösungen nur die Hälfte der Masse pro Sitzplatz [SCHACH06, S. 150]. Jedoch werden alternative Lösungen auf Funktions- und Wirkebene unter Berücksichtigung von Leichtbau nicht in Betracht gezogen und damit unbewusst ausgeschlossen. Damit wird in der Praxis oft nur ein beschränkter Lösungsraum berücksichtigt und gegebenenfalls bessere Lösungen werden übersehen [KLEIN13, S. 11]. Eine weitere Schwierigkeit des Leichtbaus auf diesen abstrakten Ebenen der Produktmodellierung und Lösungssuche liegt darin, dass einer Funktion oder einem Wirkprinzip noch keine Masse zugewiesen werden kann. Die Masse eines Produkts ist erst nach Festlegung des Werkstoffs bzw. dessen Dichte und des Volumens jedes einzelnen Bauteils definiert [PONN11, S. 212]. Wie am Beispiel der Magnet-Schwebe-Bahn erläutert, haben die Entscheidungen jedoch erheblichen Einfluss auf die Masse, die aufgebracht werden muss, um diese Funktionen und Wirkprinzipien im Produkt umzusetzen. Die Auswahl der Lösung mit dem größeren Leichtbaupotenzial ist damit schwierig. Durch die Wirkstruktur wird zudem ein Großteil der Produktgrobstruktur festgelegt. Eine Berücksichtigung von kraftflussgerechten Strukturen wird jedoch meist erst bei der Ausgestaltung in der Entwurfsphase berücksichtigt [PONN11, S. 201]. Im Leichtbau werden nach der Konzeptphase umfangreiche Berechnungen (siehe bspw. [KLEIN13, S. 74 ff.; WIEDEMANN07, S. 22 ff.]) auch mittels aufwändiger Topologieoptimierungs- und FEM-Softwareunterstützung durchgeführt. Mattheck [MATTHECK10] schlägt einfache Regeln für ein leichtbaugerechtes Entwickeln von Strukturen auf

einem wenig detaillierten Niveau, ohne den Bedarf von umfangreichen Informationen über das Produkt vor, die er aus der Bionik ableitete. Diese würden es erlauben, auch schon in der Konzeptphase grobe Strukturen auf abstraktem Niveau leichtbaugerecht zu entwickeln. Diese Regeln finden unter anderem aufgrund von fehlender Berücksichtigung von Bauraumbeschränkungen und der Beschränkung auf rein statische Probleme im Maschinenbau wenig Anwendung. Im Leichtbau wird oft der Werkstoff von zu schweren Bauteilen substituiert. Eine Methode, die Lösungen abstrahiert und eine systematische Variation unterstützt, könnte Entwicklern helfen, sich von bestehenden Lösungen zu lösen und eine Vielfalt an alternativen Lösungen zu betrachten.

Es zeigt sich durch die aufgeführten Ansätze und Lücken, dass eine methodische Unterstützung für das leichtbaugerechte Konzipieren fehlt. Da die Konstrukteure jedoch in der Konzeptphase großen Einfluss auf die Eigenschaften des Produkts haben [KRAUSE07, S. 99], bleibt das daraus resultierende große Leichtbaupotenzial der Konzeptphase ungenutzt. Hieraus werden im Folgenden die Zielsetzung und die Struktur der Arbeit abgeleitet.

### **1.3 Zielsetzung, Abgrenzung und Struktur der Arbeit**

Aus der Problemstellung des Abschnitts 1.2 resultiert das Ziel, eine Methodik zu entwickeln, die basierend auf und ergänzend zu bestehenden Produktentwicklungsprozessen Konstrukteure dabei unterstützt, Produkte leichtbaugerecht zu konzipieren und damit das Leichtbaupotenzial der Konzeptphase nutzbar zu machen.

Die vorliegende Arbeit basiert auf der Design Research Methodology (DRM) nach Blessing und Chakrabarti [BLESSING09]. Die Struktur der Arbeit gliedert sich nach den Phasen der Methode, die vier Schritte umfasst. Im ersten Schritt, der Research Clarification (RC), werden die Problemstellung und die Forschungsfragen geklärt (Kapitel 1). Im zweiten Schritt, der Descriptive Study I (DS I), wird der Stand der Forschung durch Analyse der Literatur aufgezeigt (Kapitel 2, 3 und 4). Folgende Leitfragen sind darin zu beantworten (Kapitel 2 und 3):

- Welche Methoden und Ansätze stellen den Stand der Forschung in der Leichtbau-Produktentwicklung dar?
- Welche Methoden stellen den für den Leichtbau relevanten Stand der Forschung der Produktentwicklung mit dem Fokus auf der Konzeptphase dar, welche Abstraktionsebenen der Lösungen und Methoden, diese Lösungen zu entwickeln, werden für die Konzeptphase vorgeschlagen?

Diese beiden Fragen stellen zum einen die Leichtbau- und zum anderen die Produktentwicklungssicht dieser Arbeit dar. Folgende Leitfrage soll diese beiden Sichten miteinander vereinen und in Kapitel 4 beantwortet werden:

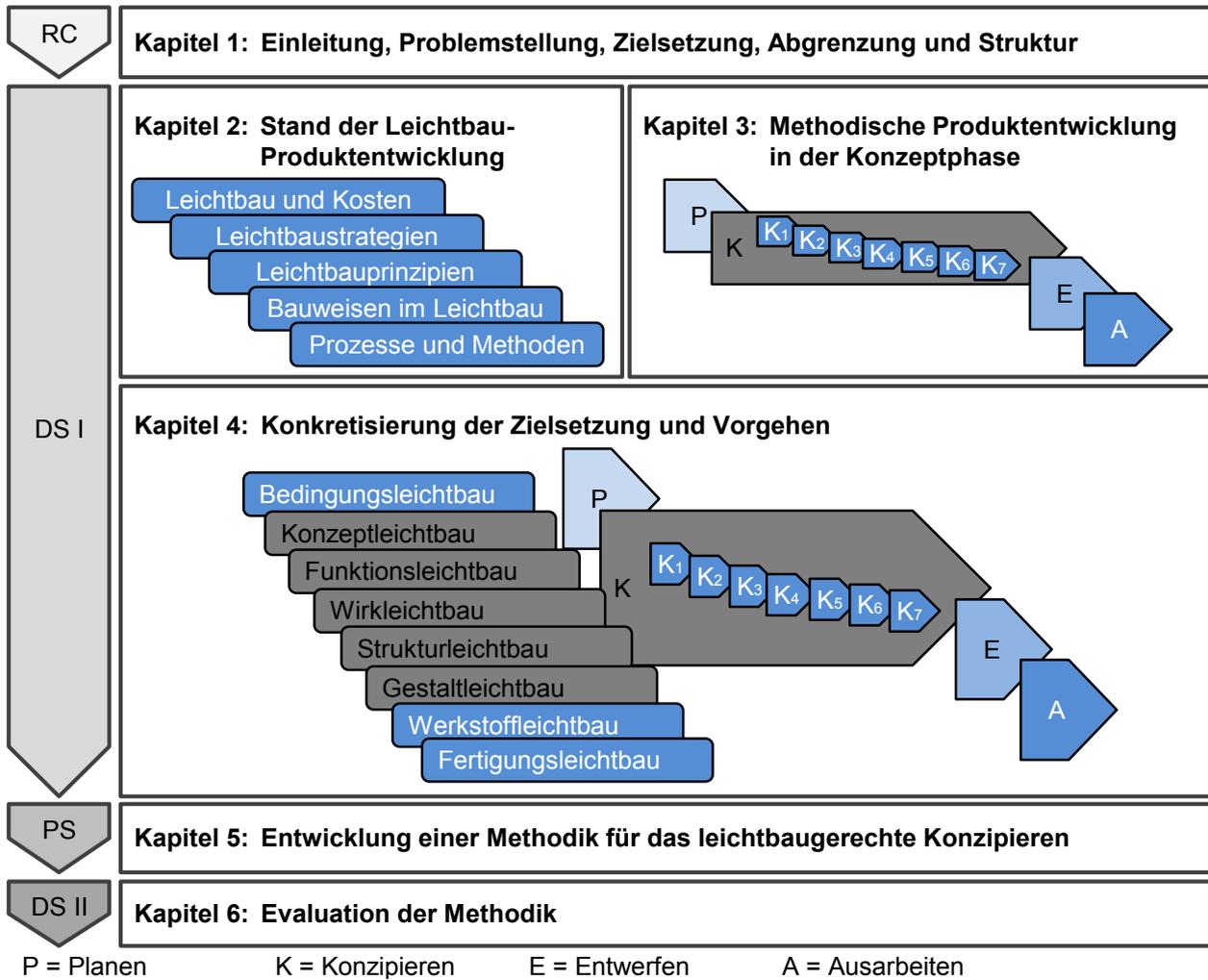
- Wie können die Methoden und Ansätze der Leichtbau-Produktentwicklung in den Stand der Forschung der methodischen Produktentwicklung eingebunden werden und welche Lücken ergeben sich aus dieser Zuordnung?

Die Prescriptive Study (PS) stellt den dritten Schritt der DRM dar, in dem die Ergebnisse der Forschung, in dieser Arbeit die methodische Unterstützung, erarbeitet werden (Kapitel 5). Darin wird die wesentliche Forschungsfrage, die auch die Ziele dieser Arbeit darstellt, beantwortet:

- Wie können Konstrukteure bei der systematischen Entwicklung von Leichtbau-Produkten bereits in der Konzeptphase unterstützt und wie kann damit das Leichtbaupotenzial dieser Phase nutzbar gemacht werden?

Im letzten Schritt, der Descriptive Study II (DS II) werden die entwickelten Ergebnisse evaluiert, um den wissenschaftlichen Anforderungen und denjenigen aus der industriellen Praxis zu entsprechen (Kapitel 6), siehe Bild 1.1. Dieser Schritt stellt die Zielerreichungskontrolle der Arbeit dar. Weiteres Forschungspotenzial leitet sich daraus ab.

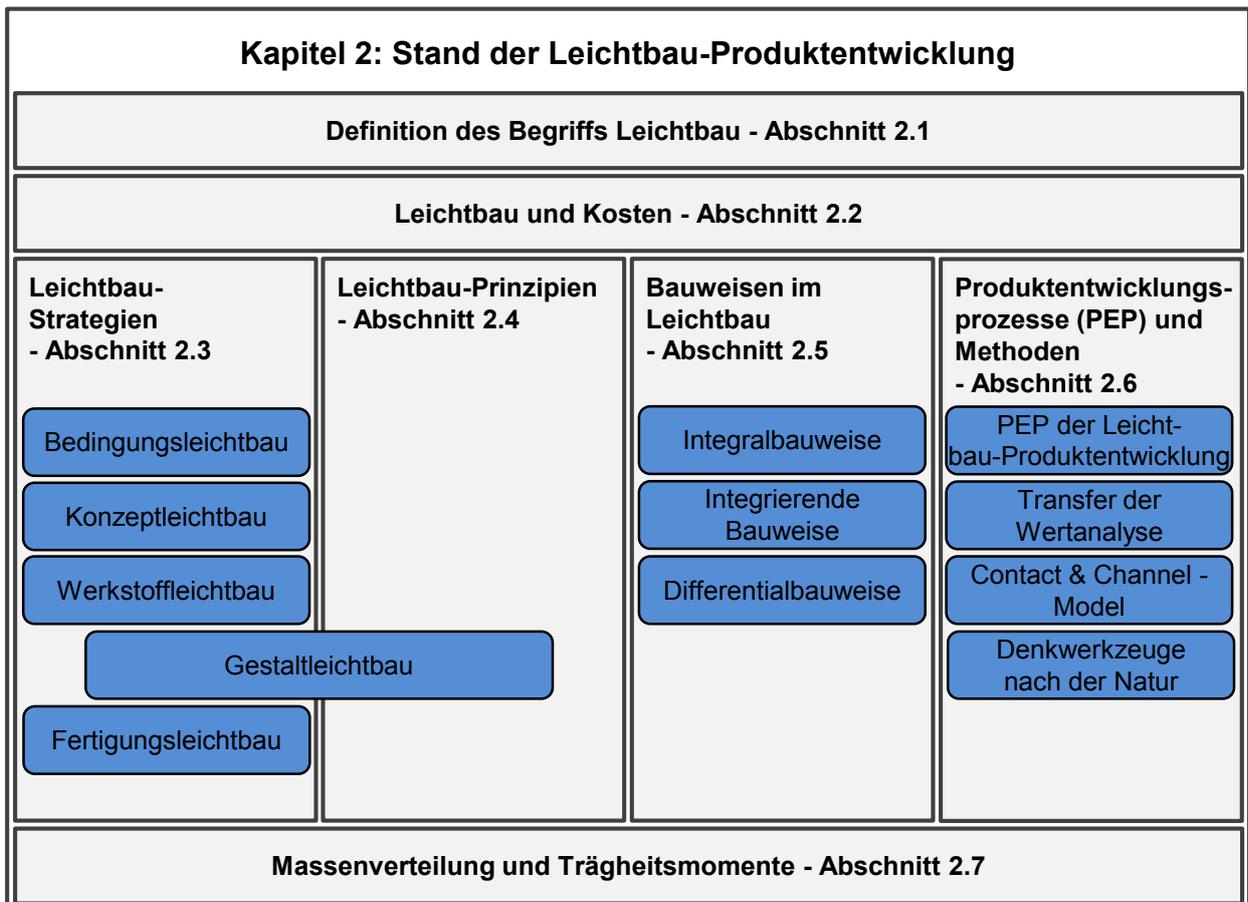
Die Zielsetzung der Arbeit muss zu anderen Zielsetzungen abgegrenzt werden. Bei einigen Produkten, wie beispielsweise bei Industrierobotern, spielt die absolute Masse, die das Gesamtprodukt besitzt und auf dem Hallenboden der Fertigungshalle lastet, eine untergeordnete Rolle. Wichtiger ist dabei die Massenverteilung bzw. das Massenträgheitsmoment, das maßgeblich durch die Massen, die beispielsweise am weitesten von den Rotationsachsen des Roboters entfernt sind, verursacht werden. In dieser Arbeit liegt dieser Aspekt jedoch nicht im Fokus und wird nur ansatzweise betrachtet. Dieser Erweiterungsansatz bietet in vielen Aspekten aufbauend auf der vorliegenden Arbeit weiteres Forschungspotenzial.



**Bild 1.1:** Struktur der vorliegenden Arbeit

## 2 Stand der Leichtbau-Produktentwicklung

In diesem Kapitel wird der Stand der Technik und Forschung des Leichtbaus aus Sicht der Produktentwicklung dargestellt, wie Bild 2.1 als Überblick zeigt. Dazu werden mit der Definition des Begriffs Leichtbau (Abschnitt 2.1) und der Diskussion des Kostenaspekts im Leichtbau (Abschnitt 2.2) Grundlagen gelegt. Danach werden die verschiedenen Leichtbau-Strategien (Abschnitt 2.3), wie beispielsweise der Bedingungs- oder Konzeptleichtbau, vorgestellt. Die Leichtbau-Strategien stellen zusammen mit den Leichtbau-Prinzipien (Abschnitt 2.4) und den Bauweisen (Abschnitt 2.5), wie beispielsweise der Integralbauweise, den Inhalt der Leichtbau-Produktentwicklung dar [ELLENRIEDER13, S. 45]. Diese werden nachfolgend um Produktentwicklungsprozesse und Methoden (Abschnitt 2.6) ergänzt, die im Leichtbau angewendet werden können, wie beispielsweise Produktentwicklungsprozesse der Leichtbau-Produktentwicklung oder der Ansatz, die Wertanalyse im Leichtbau einzusetzen. In Abschnitt 2.7 werden die Aspekte der Massenverteilung und der Trägheitsmomente kurz diskutiert.



**Bild 2.1:** Aufbau des Stands der Leichtbau-Produktentwicklung

## 2.1 Definition des Begriffs Leichtbau

Leichtbau ist nicht eindeutig und scharf von anderen Teildisziplinen der Konstruktions-technik abzugrenzen. Die Grundsätze des Konstruierens optimaler Kräftepfade sind auf Maxwell [MAXWELL69] und Michell [MICHELL04] zurückzuführen und können als ein Grundstein des Leichtbaus bezeichnet werden. [WIEDEMANN07, S. 1] Darüber hinaus gibt es Werke, die Leichtbau entweder als erklärtes Ziel haben (z. B. [DEGISCHER09; FRIEDRICH13A; HENNING11; KLEIN13; WIEDEMANN07]) oder andere Ziele darstellen, wie beispielsweise das Konstruieren und Berechnen von Verbindungen, die jedoch für das Ziel des Leichtbaus ebenfalls wesentlich sind (z. B. [MATTHECK10; NIEMANN05; Ponn11]).

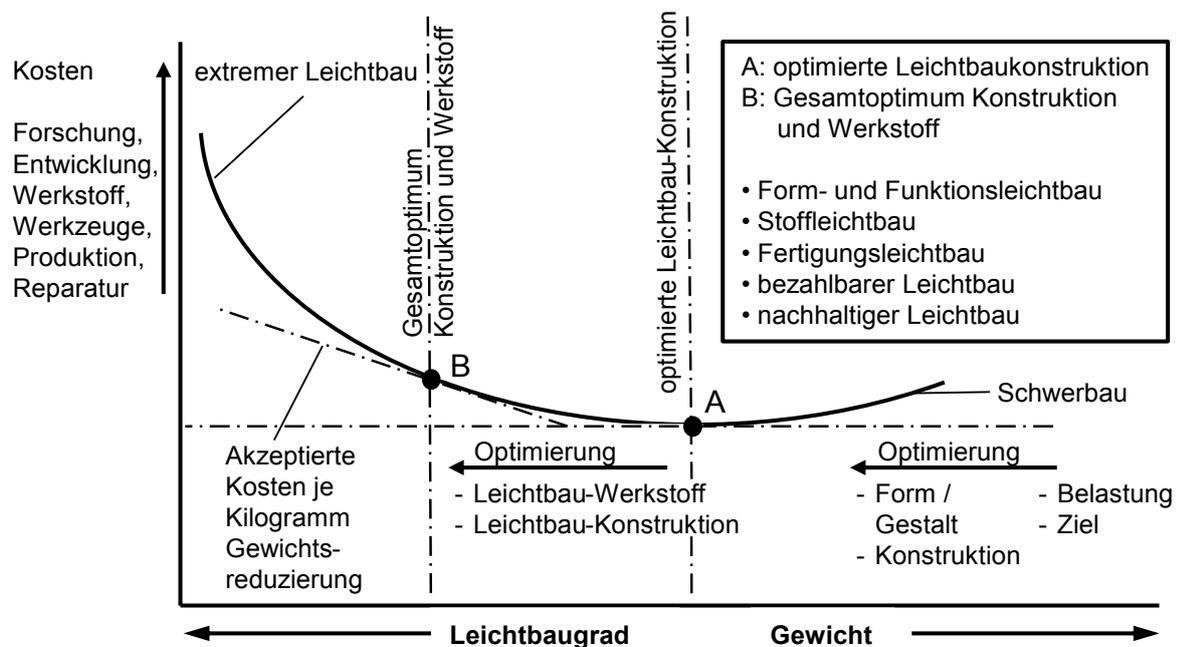
Klein [KLEIN13, S. 1 f.] versteht unter Leichtbau eine interdisziplinäre Ingenieurwissenschaft mit der Entwicklungsstrategie unter „gegebenen Randbedingungen eine Struktur mit minimalem Eigengewicht sowie bestimmter Lebensdauer und Zuverlässigkeit zu realisieren“. Wiedemann [WIEDEMANN07, S. 1 f.] beschränkt seine Definition von Leichtbau nicht auf die Struktur einer Konstruktion, sondern umfasst weitere Funktionen dieser, die daher dieser Arbeit zugrunde gelegt wird. Er stellt fest, Leichtbau ist die „Absichtserklärung“ [WIEDEMANN07, S. 1], das Gewicht einer Konstruktion aus funktionalen oder ökonomischen Gründen unter Beibehaltung von Steifigkeit, Festigkeit und anderer Funktionen zu reduzieren oder die Steifigkeit, Festigkeit und Funktion unter Beibehaltung des Gewichts zu steigern [WIEDEMANN07, S. 1 f.]. Henning und Moeller [HENNING11, S. V, S. 4] bauen auf diesen Definitionen auf und fordern einen ganzheitlichen Ansatz unter Berücksichtigung von Methoden, Werkstoffen und Produktion, um Leichtbau effizient umzusetzen. Friedrich und Krishnamoorthy [FRIEDRICH13B, S. 1 f.] sehen den Leichtbau als „Dialog“ unter der ganzheitlichen Betrachtung von Werkstoffen, Fertigungstechniken und Konstruktionen. Leyer [LEYER70, S. 1] sieht im Gegensatz z. B. zu Klein [KLEIN13, S. 1] Leichtbau nicht als „besondere Disziplin“ an, sondern als die konsequente Anwendung der bekannten Ingenieurwissenschaften. Auch Feyerabend [FEYERABEND91, S. 1 f.] sieht Leichtbau nicht als eigenes Wissensgebiet sondern als „Synthese aus verschiedenen Teilerkenntnissen“, die aus verschiedenen Fachrichtungen herausgelöst werden. Er stellt außerdem fest, dass Leichtbau oft nicht das Ziel einer Gewichtsreduzierung, sondern das Ziel einer Massenreduzierung verfolgt, da die Erdbeschleunigung als einziger Faktor der Errechnung des Gewichts aus der Masse unveränderlich sei [FEYERABEND91, S. 29]. Daher wird in dieser Arbeit ausschließlich die Masse, deren Reduzierung und Optimierung diskutiert. Das Gewicht

bzw. die Gewichtskraft wird nicht zugrunde gelegt, da diese nach DIN 1305 [DIN 1305 1988] eine Einschränkung darstellt und von der speziellen sowie ortsabhängigen Beschleunigung der Erdanziehung abhängt. Die Ausnahme in der vorliegenden Arbeit stellt die Nennung des Gewichts durch Autoren des Stands der Technik dar, die den Begriff Gewicht anstatt Masse verwenden.

## 2.2 Leichtbau und Kosten

Auch im Leichtbau müssen Kosten und Nutzen in einem solchen Verhältnis zueinander stehen, dass die Kosten für Leichtbau-Maßnahmen lohnend erscheinen. Klein [KLEIN13, S. 3] stellt hierfür ein Gewichts- und Kostenmodell auf, das das Gewicht bzw. die Masse und den Leichtbaugrad den Kosten gegenüberstellt, wie Bild 2.2 zeigt. [KLEIN13, S. 3]

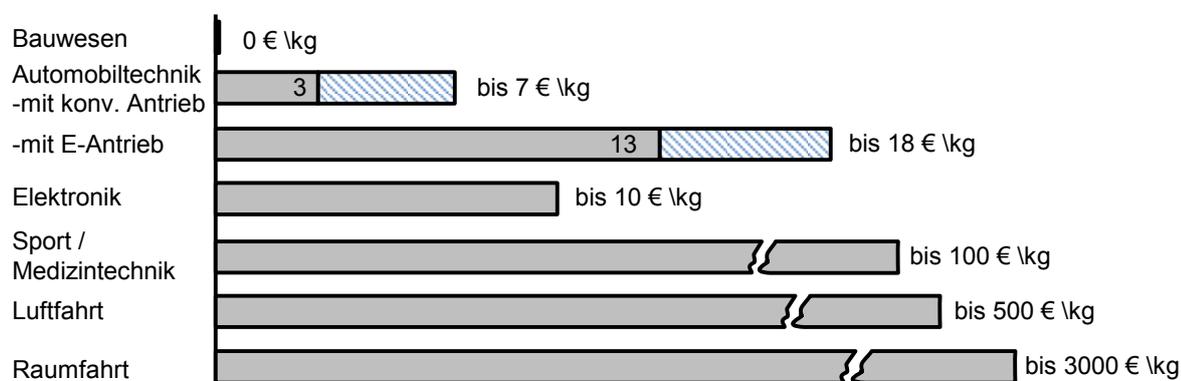
Das Gewicht fällt dabei mit steigendem Leichtbaugrad. Jedoch steigen die Kosten auch näherungsweise exponentiell mit steigendem Leichtbaugrad. Im Bereich des höchsten Leichtbaugrads befindet sich der extreme Leichtbau. Aber auch nach einem gewissen Kostenminimum steigen die Kosten wieder mit steigendem Gewicht im Bereich des Schwerbaus an. Der Bereich um das Kostenminimum ist für die Leichtbau-Produktentwicklung besonders interessant, da hierbei leichte und kostengünstige Produkte entwickelt werden können.



**Bild 2.2:** Zusammenhang von Gewicht, Leichtbaugrad und Kosten [KLEIN13, S. 4]

Der Zusammenhang zwischen Gewicht bzw. Masse und Kosten ist für unterschiedliche Branchen unterschiedlich. Es wird ein Quotient für zulässige Mehrkosten pro einge-

spartem Kilogramm Masse für unterschiedliche Branchen definiert. Durch diese akzeptierten Mehrkosten je Kilogramm Gewichtsreduzierung ergibt sich ein Gesamtoptimum (Punkt B in Bild 2.2) bei einem höheren Leichtbaugrad als beim Kostenminimum (Punkt A in Bild 2.2). Wie in Bild 2.3 gezeigt, fällt dieser Quotient für verschiedene Produkte und für verschiedene Stückzahlen unterschiedlich aus. Außerdem kann der Quotient innerhalb eines Produkts für verschiedene Bereiche unterschiedlich ausfallen. So kann eine Masseneinsparung in einem Bereich, der nicht nur für die Gesamtmasse, sondern z. B. auch für den Schwerpunkt positive Auswirkungen hat, größere Mehrkosten gegenüber einem Bereich rechtfertigen, in dem die Massenreduktion den Schwerpunkt eher negativ beeinflusst. [KOPP11, S. 68]



**Bild 2.3:** Zulässige Mehrkosten für Leichtbau-Maßnahmen pro eingespartem Kilogramm Masse pro Produkt [KLEIN13, S. 9]

Auch sekundäre Massenreduktionspotenziale können ausgenutzt werden. Beispielsweise können das Fahrwerk oder die Bremsen eines leichteren Kraftfahrzeugs durch die geringere Belastung angepasst und ebenfalls leichter ausgeführt werden [KOPP11, S. 68]. Diese sekundären Massenreduktionspotenziale sind bei den Kosten mit zu berücksichtigen.

Generell gilt, dass die Kosten auch im Leichtbau eines der wichtigsten Kriterien sind, die bei der Auswahl der Lösung berücksichtigt werden müssen. Je nach Anwendungsfall können für Masseneinsparungen gewisse Mehrkosten gerechtfertigt werden, siehe Bild 2.3. Dabei wird in Abhängigkeit von den Bedingungen, die dem Produkt zugrunde liegen, zwischen Zweckleichtbau, Sparleichtbau und Umwelt- oder Ökoleichtbau unterschieden (siehe Abschnitt 2.3). Diese Leichtbauarten haben unterschiedliche Bedingungen und Ziele. Das Klären, Hinterfragen und Festlegen dieser Bedingungen kann der Leichtbau-Strategie des Bedingungsleichtbaus zugewiesen werden. Neben dieser Leichtbau-Strategie existieren noch weitere Strategien, die im folgenden Abschnitt vor- und gegenübergestellt werden. [KLEIN13, S. 3 ff.]

## 2.3 Leichtbau-Strategien

In der Literatur des Leichtbaus werden verschiedene Leichtbau-Strategien beschrieben. Diese Strategien werden außerdem von verschiedenen Autoren unterschiedlich bezeichnet. Kopp et al. [KOPP11, S. 62] ordnen die Strategien den Überbegriffen Bedingungsleichtbau, Konzeptleichtbau, Werkstoffleichtbau, Fertigungsleichtbau und Formleichtbau zu. Diese Zuordnung erweiternd, sind den übergeordneten Begriffen in Tabelle 2.1 weitere synonyme Begriffe oder untergeordnete Strategien zugewiesen. Nachfolgend wird statt des Begriffs Formleichtbau der Überbegriff des Gestaltleichtbaus verwendet. Die Gestalt resultiert dabei aus der Struktur und der dazugehörigen Form (vgl. [ASHBY05, S. 19; HALDENWANGER97, S. 8; KOPP13, S. 63]).

Überbegriff der Leichtbau-Strategie	Zugeordnete Leichtbau-Strategien	Quelle
<b>Bedingungsleichtbau</b> [ELLENRIEDER13, S. 71 ff.; HALDENWANGER97, S. 8; KOPP11, S. 63; NIEMANN05, S. 168; SCHMIDT03, S. 43]	Umfeldleichtbau	[HALDENWANGER97, S. 8; KOPP11, S. 63]
	Zweckleichtbau	[KOPP11, S. 63; WIEDEMANN07, S. 2]
	Sparleichtbau	[KOPP11, S. 63; SCHMIDT03, S. 10; WIEDEMANN07, S. 2]
	Umwelt- oder Öko-leichtbau	[HALDENWANGER97, S. 8; KOPP11, S. 63; SCHMIDT03, S. 10; WIEDEMANN07, S. 2]
<b>Konzeptleichtbau</b> [ELLENRIEDER13, S. 68 ff.; KOPP11, S. 63; HALDENWANGER97, S. 8]	Systemleichtbau	[DRECHSLER07, S. 11; HALDENWANGER97, S. 8; KOPP11, S. 63; SOBEK07, S. 74]
	Funktionsleichtbau	[KLEIN13, S. 3; KOPP11, S. 63; SCHMIDT03, S. 10]
	Modulleichtbau	[KOPP11, S. 63]
<b>Werkstoffleichtbau</b> DRECHSLER07, S. 8; KOPP11, S. 63]	Stoffleichtbau	[ELLENRIEDER13, S. 52 ff.; HALDENWANGER97, S. 8; KLEIN13, S. 3; KOPP11, S. 63; NIEMANN05, S. 169 f.; SOBEK07, S. 8;]
	Verbundleichtbau	[HALDENWANGER97, S. 8; KOPP11, S. 63]
	Materialleichtbau	[DRECHSLER07, S. 8; SOBEK07, S. 71]
<b>Fertigungsleichtbau</b> [DRECHSLER07, S. 10; ELLENRIEDER13, S. 58 ff.; KLEIN13, S. 3; KOPP11, S. 63]	Fertigungs- und Verbindungstechnik im Leichtbau	[HENNING11, S. 744; SCHMIDT03, S. 31]
<b>Gestaltleichtbau</b> [DRECHSLER07, S. 9; KOPP11, S. 63]	Formleichtbau	[ELLENRIEDER13, S. 64 ff.; HALDENWANGER97, S. 8; KLEIN13, S. 3; KOPP11, S. 63; NIEMANN05, S. 177 ff.]
	Strukturleichtbau	[KOPP11, S. 63; SOBEK07, S. 73]

**Tabelle 2.1:** Übersicht der Leichtbau-Strategien und deren Bezeichnungen

Der Bedingungsleichtbau, der auch als Umfeldleichtbau bezeichnet wird, hinterfragt zu große Sicherheiten der Bauteile und die den Anforderungen zugrundeliegenden Lastfälle. Ziel ist es hierbei, die Lastfälle so realistisch wie möglich darzustellen und durch eine Reduzierung der zu großen Sicherheiten eine Massenreduzierung zu erreichen

[NIEMANN05, S. 166 ff.]. Durch das Weglassen der nicht notwendigen Anforderungen ergibt sich weiteres Massenreduktionspotenzial [KOPP11, S. 63 f.].

Dem Bedingungsleichtbau wird der Zweck-, Spar-, Umwelt- oder Ökoleichtbau zugeordnet, da sich die Notwendigkeit dieser Strategien aus dem Lastenheft beziehungsweise aus der Anforderungsliste und den darin festgehaltenen Rahmenbedingungen ableiten lässt. [KOPP11, S. 64] Im Zweckleichtbau werden Masseneinsparungen zur Erfüllung der Funktion notwendig. [WIEDEMANN07, S. 2] Der Sparleichtbau verfolgt das Ziel, durch Leichtbau Kosten einzusparen [KLEIN13, S. 3]. Außerdem soll im Umwelt- oder Ökoleichtbau die Umweltverträglichkeit des Produkts durch Leichtbau verbessert werden, wie z. B. eine Kraftstoffverbrauchsreduktion durch eine Massenreduktion eines PKW. [KOPP11, S. 64]

Im Systemleichtbau, der auch als Konzept-, Funktions- oder Modulleichtbau bezeichnet wird, steht die Massenreduzierung des Gesamtsystems über der der Teilsysteme. Das bedeutet, dass die einzelnen Teilsysteme und -funktionen so abgestimmt und umgesetzt werden, dass trotz einer möglichen Massenerhöhung einzelner Teilsysteme, das Gesamtsystem eine Massenreduzierung erfährt. [KOPP11, S. 64 f.] Albers et al. [ALBERS11C, S. 117 ff.] stellen den Systemleichtbau als übergeordnet über die anderen Strategien dar und halten fest, dass die anderen Strategien zur Umsetzung des Systemleichtbaus beitragen. Die Strategie des Systemleichtbaus kann daher sowohl als übergeordnet [FISCHER08, S. 7] als auch der Konzeptphase, in der die Ansätze des Systemleichtbaus verfolgt und die wichtigsten Eigenschaften des Systems festgelegt werden, zugehörig betrachtet werden.

Durch die Strategie des Werkstoffleichtbaus, der auch als Stoff- oder Materialleichtbau [KOPP11, S. 63] bezeichnet wird, werden Werkstoffe durch spezifisch leichtere Werkstoffe, mit für den Anwendungsfall besser geeigneten Eigenschaften, ersetzt [KLEIN13, S. 3; NIEMANN05, S. 166]. Zur Auswahl des passenden Werkstoffs werden bereits erprobte Vorgehensweisen vorgeschlagen [ASHBY05]. Da immer mehr Verbundwerkstoffe im Werkstoffleichtbau Anwendung finden [KOPP11, S. 66], wird die Strategie auch als Verbundleichtbau bezeichnet. Um die größtmögliche Massenreduktion durch den Werkstoffleichtbau zu erreichen, muss außerdem die Fertigung und die Gestaltung sowie deren Wechselwirkungen mit dem Werkstoff betrachtet werden [KOPP11, S. 65].

Ziel des Fertigungsleichtbaus ist es, Fertigungstechnologien so auszureizen, dass die Bauteile mit einem Minimum an Masse und einem Maximum an Funktionsintegration realisiert werden. Der Fertigungsleichtbau ist dabei eng mit dem Gestalt- und Werk-

stoffleichtbau verknüpft [KOPP11, S. 67], da die Form und der Werkstoff maßgeblich die Fertigungsverfahren bestimmen und sich wechselseitig beeinflussen. Auch die Verbindungstechnik im Leichtbau wird dem Fertigungsleichtbau zugeordnet [DEGISCHER09, S. 173 ff.; KOPP11, S. 67]. Dabei sollen die Einzelteile mit so wenig zusätzlicher Masse wie möglich verbunden werden.

Der Gestaltleichtbau, der auch als Form- oder Strukturleichtbau bezeichnet wird, zielt darauf ab, eine Bauteil-, Baugruppen- oder Produktgestalt und deren Massenverteilung so anzupassen, dass sie den Anforderungen, die an sie gestellt werden, mit minimalem Massenaufwand gerecht wird [KOPP11, S. 66 f.]. Um dies zu erreichen, werden sowohl Konstruktionsrichtlinien bzw. -prinzipien [KLEIN13, S. 66 ff.; NIEMANN05, S. 184 ff.] als auch Berechnungs- und Optimierungsverfahren [ALBERS11B, S. 77 ff.; KLEIN13, S. 74 ff.; WIEDEMANN07, S. 22 ff.], wie z. B. Topologieoptimierungsverfahren, eingesetzt. Der Gestaltleichtbau wird sowohl durch den Konzept- und Stoffleichtbau, da diese die Rahmenbedingungen für die Form beeinflussen, als auch durch die Wahl der Bauweise beeinflusst. Die Wahl einer Integral- oder Differentialbauweise beeinflusst beispielsweise die Struktur und den Aufbau der Bauteile. [KLEIN13, S. 1, 17 ff.] Des Weiteren muss die Fertigbarkeit und damit der Fertigungsleichtbau bei der Gestaltung beachtet werden [KOPP11, S. 66 f.].

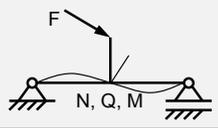
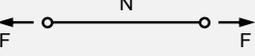
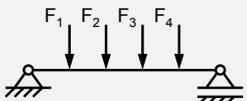
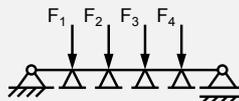
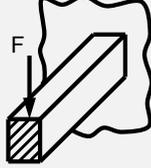
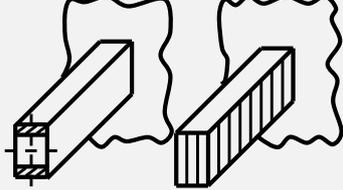
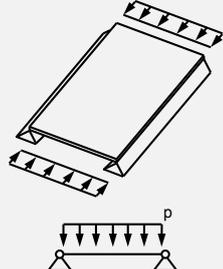
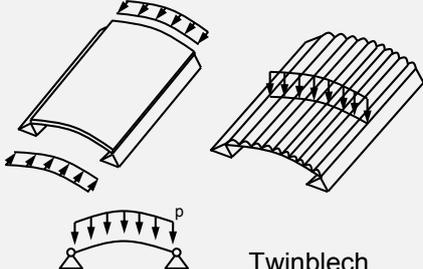
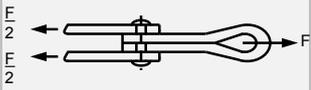
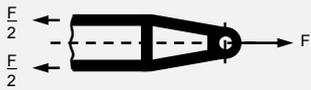
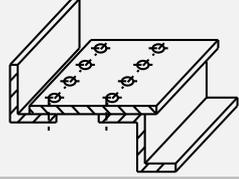
Als eine Schnittstelle zwischen Gestalt-, Form- und Strukturleichtbau lässt sich die Bionik in die Leichtbau-Strategien einordnen. Wobei die Bionik nicht als Leichtbau-Strategie bezeichnet wird, da sie allgemein die Lösungssuche in und die Übertragung von Lösungen aus der Natur beschreibt [ZHAO10, S. 1]. Durch die Betrachtung von lebenden Organismen können Ideen für Lösungen in der Technik angestoßen werden. Basierend auf der Betrachtung des Wachstums von unterschiedlichen Strukturen der Natur, wie z. B. dem Knochenwachstum, sind verschiedene Optimierungsmethoden entstanden. Einige dieser Methoden sind rechnergestützt umgesetzt, wie z. B. die Soft Kill Option (SKO) Methode, andere sind auch ohne Rechnerunterstützung anwendbar, wie z. B. die Denkwerkzeuge nach der Natur [MATTHECK10].

Für den Gestaltleichtbau werden außerdem einfache Konstruktionsregeln, die sogenannten Leichtbau-Prinzipien, vorgeschlagen, die nachfolgend vorgestellt werden.

## 2.4 Leichtbau-Prinzipien

In der Literatur werden verschiedene Gestaltungsregeln beschrieben, wie z. B. für das guss- oder schweißgerechte Konstruieren (z. B. [PAHL07, S. 455 ff.]). Die konstruktiven

Leichtbau-Prinzipien stellen Erfahrungswissen aus dem Leichtbau dar. Eine frühzeitige Berücksichtigung dieser Regeln unterstützt die Leichtbau-Gestaltung. Klein [KLEIN13, S. 66 ff.] beschreibt diese Prinzipien in Form von Regeln, die mithilfe von Skizzen visualisiert werden. Einige ausgewählte Beispiele werden in Tabelle 2.2 gezeigt.

Regel-Nr.	Ungünstig	Besser	Hinweise
1			<ul style="list-style-type: none"> <li>• direkte Einleitung der Kraft in die Haupttragstruktur</li> </ul>
			<ul style="list-style-type: none"> <li>• keine Umleitung von Kräften</li> </ul>
			<ul style="list-style-type: none"> <li>• möglichst direkte Unterstützung von Kräften</li> </ul>
2			<ul style="list-style-type: none"> <li>• möglichst Hohlprofile bevorzugen</li> </ul>
3			<ul style="list-style-type: none"> <li>• den Lasten entgegengesetzte Krümmungen wirken Durchbiegungen entgegen und stabilisieren gegen Durchschlag</li> </ul>
4			<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reduzierung von Einzelteilen und somit Vermeidung von Verbindungsaufwand</li> </ul>
			<ul style="list-style-type: none"> <li>• Einstückigkeit durch Strangpresstechnik</li> </ul>

F = Kraft, N = Normalkraft, Q = Querkraft, M = Moment, p = Druck

**Tabelle 2.2:** Gestaltungsprinzipien im Leichtbau [KLEIN13, S. 66 ff.]

### 1. Regel: Möglichst direkte Kräfteinleitung und Kraftausgleich

Eine möglichst direkte Einleitung der Kräfte in die Haupttragstruktur, möglichst ohne Umleitungen und Umlenkungen ist anzustreben. Symmetrien sollen für den Kraftausgleich genutzt werden. Geschlossene und segmentierte Profile sind zu bevorzugen. [KLEIN13, S. 67]

## **2. Regel: Realisierung eines möglichst großen Flächenträgheits- bzw. Widerstandsmoments**

Im Fall von biege-, torsions- und knickgefährdeten Bauteilen soll möglichst viel Material aus der Mitte der Bauteile in die äußeren hoch belasteten Zonen verlagert werden. Diese Entwicklung führt vom Vollquerschnitt über den Hohlquerschnitt zum Sandwichbalken. [KLEIN13, S. 68]

## **3. Regel: Nutzung der natürlichen Stützwirkung durch Krümmung**

Das Flächenträgheitsmoment von Scheiben und Platten kann durch Vorkrümmung gesteigert und damit deren Biege-, Knick- und Beulsteifigkeit erhöht werden. [KLEIN13, S. 70]

## **4. Regel: Bevorzugen des integrativen Prinzips**

Es sollen so wenige Einzelteile wie möglich verwendet und dabei auch Verbindungselemente eingespart werden. [KLEIN13, S. 72]

Ergänzend zu diesen Leichtbau-Prinzipien oder -regeln schlagen auch andere Autoren, wie beispielsweise Schürmann [SCHÜRMAN07, S. 612 ff.] weitere Prinzipien vor, die jedoch weitestgehend denen von Klein [KLEIN13, S. 66 ff.] entsprechen. Eine Vollständigkeit ist schon daher nicht möglich, da einige in den Unternehmen entwickelte und oft anwendungsspezifische Prinzipien und Regeln nicht veröffentlicht sind. Einige der vorgestellten Regeln, wie beispielsweise die Reduzierung von Einzelteilen, haben auch Einfluss auf die Bauweise des Produkts. Die verschiedenen Bauweisen werden im folgenden Abschnitt betrachtet.

## **2.5 Bauweisen im Leichtbau**

Im Leichtbau werden verschiedene Bauweisen von der Differenzial- bis zur Integralbauweise eingesetzt. Nach Ellenrieder et al. [ELLENRIEDER13, S. 43] wird die Wahl der Bauweise der Strategie des Konzeptleichtbaus zugeordnet.

In der Differenzialbauweise werden alle Einzelteile additiv verbunden. Sie wird oft in Form einer Blechkonstruktion umgesetzt. Die Einzelteile können dabei relativ einfach gestaltet werden [KOPP11, S. 3]. Die zusätzliche Masse der notwendigen Verbindungselemente wirkt dem Leichtbauziel entgegen, jedoch können durch diese Bauweise unterschiedliche Werkstoffe kombiniert werden. [KLEIN13, S. 17 f.; WIEDEMANM07, S. 7]

Die Integralbauweise bildet den Gegensatz zur Differenzialbauweise und hat das Ziel der Einstückigkeit [KLEIN13, S. 18; KOPP11, S. 3; WIEDEMANM07, S. 8]. Durch die Ge-

wichtersparnis, die vor allem aus der Reduktion der notwendigen Verbindungselemente resultiert, bietet diese Bauweise Potenzial für den Leichtbau. Nachteilig kann es sein, dass meist alle Funktionen, bedingt durch die Einstückigkeit, durch das gleiche Material realisiert werden müssen. Außerdem entstehen bei dieser Bauweise Nachteile bezüglich der Werkstoff- und Werkzeugkosten sowie des schlechten Schädigungs- und Reparaturverhaltens. [KLEIN13, S. 18]

Wegen des Schädigungs- und Reparaturverhaltens, der Austauschbarkeit und der Rezyklierbarkeit wird bei der integrierenden Bauweise zwar eine Integration angestrebt, diese aber zweckmäßig begrenzt. Dadurch können Vorteile bezüglich der Addition wie auch der Integration lokal ausgenutzt werden. [KLEIN13, S. 19]

Die Verbundbauweise stellt einen Spezialfall der hochintegrativen Bauweisen dar. Beispiele für den Verbundleichtbau sind die Sandwich- und die Faserverbundkonstruktionen. Die Kraffteinleitungs- und Fügestellen müssen werkstoffgerecht ausgeführt werden. Der Hauptvorteil der Bauweise ist, dass das passende Material an der jeweiligen Stelle eingesetzt werden kann. [KLEIN13, S. 19 f.; WIEDEMANN07, S. 8]

Bei Vollwand- und Schalensystemen sind die Funktionen Tragen und Verkleiden verknüpft. Vollwandsysteme sind aus Blechwänden und massiven Einzelgurten aufgebaute Konstruktionen. Dabei wird die Tragfunktion so verteilt, dass die Bleche vorwiegend Schubflüsse und die Gurte konzentrierte Einzelkräfte aus der Biegung der Struktur aufnehmen. Die feingliedrigere Schalenkonstruktion wird mit Stringern und Spanten aus dünnwandigen Profilen gestützt. Die Profile tragen Schub- und Normalkraftflüsse. Diese Kraftflüsse werden von den Profilen in die Blechverkleidung geleitet. [KLEIN13, S. 21 f.]

Bei der Modulbauweise wird zwischen enger vernetzten Nachbarbauteilen, die ein Modul bilden, und weniger eng vernetzten Nachbarbauteilen, die durch Schnittstellen abgegrenzt werden können, unterschieden. Die gezielte Verkettung und Integration von Funktionen und Teilfunktionen führt zur Modulbauweise. [KOPP11, S. 71 f.]

Die Hybridbauweise ergibt sich aus der Kombination unterschiedlicher Werkstoffe auf Bauteilebene und stellt damit einen Spezialfall der Materialmischbauweise dar. Dabei entsteht der Materialverbund allein durch urformende Fertigung eines Leichtmetallwerkstoffs mit einer weiteren Werkstoffkomponente. Die Bauweise des Multi-Material-Designs stellt die Weiterentwicklung der anderen Bauweisen dar, in der für jedes Bauteil der passende Werkstoff eingesetzt wird. Dabei werden die Eigenschaften verschiedener Werkstoffe und deren Ergänzung ausgenutzt. Dadurch wird ein hohes

Leichtbaupotenzial erreicht, jedoch können Nachteile bezüglich Fertigungsaufwand, Mehrkosten, eingeschränkter Schadensbeurteilungs- und Reparaturmöglichkeiten auftreten. [KOPP11, S. 73 f.]

Zur Umsetzung der hier vorgestellten Bauweisen werden nachfolgend die Methoden und Produktentwicklungsprozesse der Leichtbau-Produktentwicklung analysiert.

## **2.6 Produktentwicklungsprozesse und Methoden der Leichtbau-Produktentwicklung**

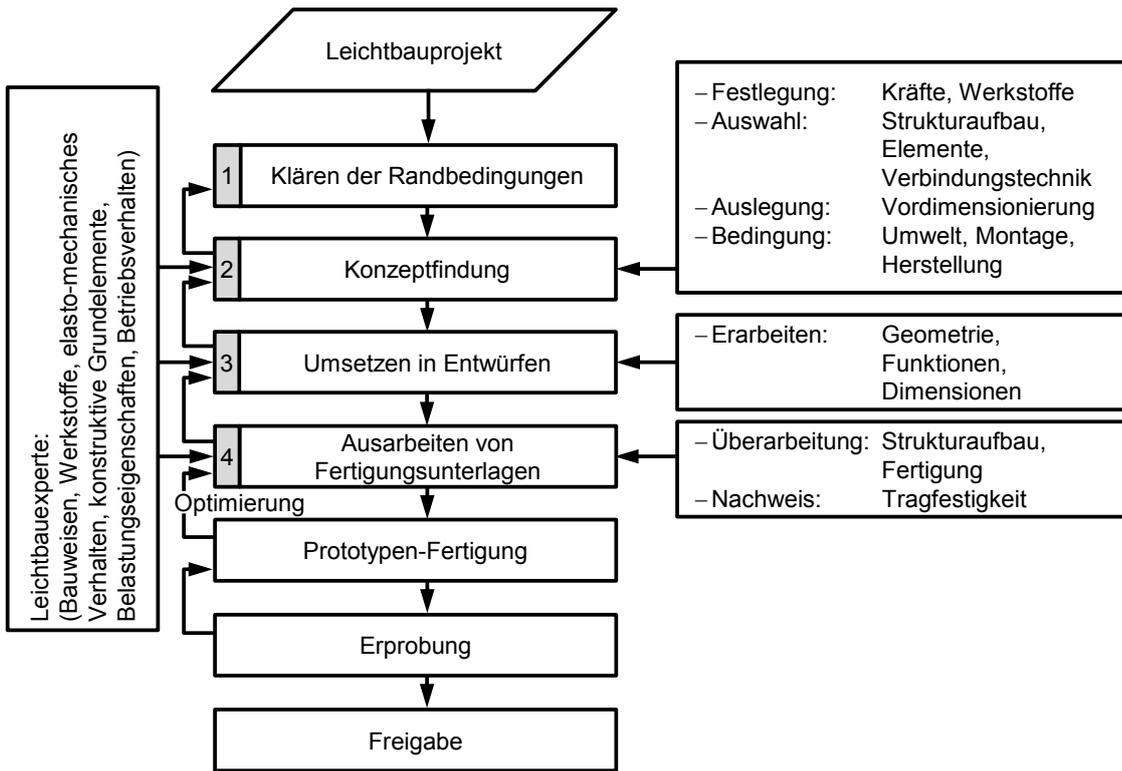
Im Leichtbau, wie auch in der klassischen Produktentwicklung, ist die Funktionserfüllung das oberste Ziel der Produktentwicklung. Hierbei ist jedoch die wichtigste Nebenbedingung, ein Massenminimum zu erreichen. Auch weitere Kriterien, wie z. B. die Sicherheit, Zuverlässigkeit, Herstellbarkeit, und alle anderen Forderungen, die der Kunde an das Produkt stellt, müssen berücksichtigt und erfüllt werden. [KLEIN13, S. 10]

Es kommt im Leichtbau kein spezieller, sondern der allgemeine Produktentwicklungsprozess der Produktentwicklung, z. B. nach VDI 2221 [VDI 2221 1993], zum Einsatz [KLEIN13, S. 10]. Dieser wird nur um einige besondere Gegebenheiten des Leichtbaus ergänzt [FEYERABEND91, S. 30 f.; KLEIN13, S. 10 f.].

**Definition des Produktentwicklungsprozesses:** *In der vorliegenden Arbeit wird unter dem „Produktentwicklungsprozess“ ein methodisches Vorgehen verstanden, welches Arbeitsschritte für die Entwicklung eines technischen Produkts umfasst. Dabei sind zu dieser Entwicklung die Neukonstruktion, die Varianten- und die Anpassungskonstruktion hinzuzurechnen.* (vgl. [LINDEMANN09, S. 16])

### **2.6.1 Produktentwicklungsprozesse in der Leichtbau-Produktentwicklung**

Klein [KLEIN13, S. 11] sieht die ideale Kombination aus theoretischen Grundlagen und praktischer Erfahrung als Erfolgsrezept für ein „gutes Ergebnis“ in der Leichtbau-Entwicklung. Außerdem müssen mehrere Schleifen zur Optimierung der Lösung durch Prototypenherstellung und Testprozeduren durchgeführt werden. Er schlägt daher die Vorgehensweise nach VDI 2221 [VDI 2221 1993] ergänzt durch die Schritte der Prototypen-Fertigung und Erprobung sowie das Einwirken eines Leichtbauexperten vor, wie Bild 2.4 zeigt. [KLEIN13, S. 11 f.]



**Bild 2.4:** Vorgehensweise des leichtbaugerechten Konstruierens [KLEIN13, S. 12]

Auch andere Autoren verweisen auf allgemeine Vorgehensweisen der Produktentwicklung, die in der Leichtbau-Produktentwicklung Anwendung finden. Beispiele hierfür sind der Produktentwicklungsprozess nach VDI 2221 [VDI 2221 1993] bzw. der dazu ähnliche, jedoch detailliertere Produktentwicklungsprozess nach Pahl et al. [KLEIN13, S. 12 f.; ALBERS11A, S. 10 f.], das V-Modell in der Mechatronik-Entwicklung nach VDI 2206 [ALBERS11A, S. 10 f.; LUEDEKE12A; LUEDEKE12B], die Vorgehensweise nach Gausemeier [GAUSEMEIER13, S. 14] oder das integrierte Produktentstehungs-Modell iPeM [ALBERS16]. Dabei werden die Vorgehensweisen jedoch mit der Ausnahme von Luedeke und Vielhaber [LUEDEKE12A; LUEDEKE12B] nicht weiter auf den Leichtbau angepasst oder für diesen detailliert.

Luedeke und Vielhaber schlagen eine Anpassung des Prozesses nach VDI 2206 [VDI 2206 2004] vor, um mechatronische Produkte unter Leichtbau-Aspekten zu entwickeln. Der Fokus liegt dabei auf mechatronischen Produkten und den dafür notwendigen Entwicklungsprozessen. Ausschließlich in zwei Beiträgen schlagen sie einen Prozess für die Leichtbau-Entwicklung in der Konzeptphase [LUEDEKE14A; LUEDEKE14B] vor. Dieser fasst die Veröffentlichungen [POSNER13A; POSNER13B; POSNER14A] nochmals zusammen, die in Kapitel 5 dieser Arbeit präsentiert werden.

Schmidt und Puri [SCHMIDT01] untersuchen die Konzeptphase im Produktentwicklungsprozess bezüglich einer systematischen Berücksichtigung von Leichtbau. Jedoch

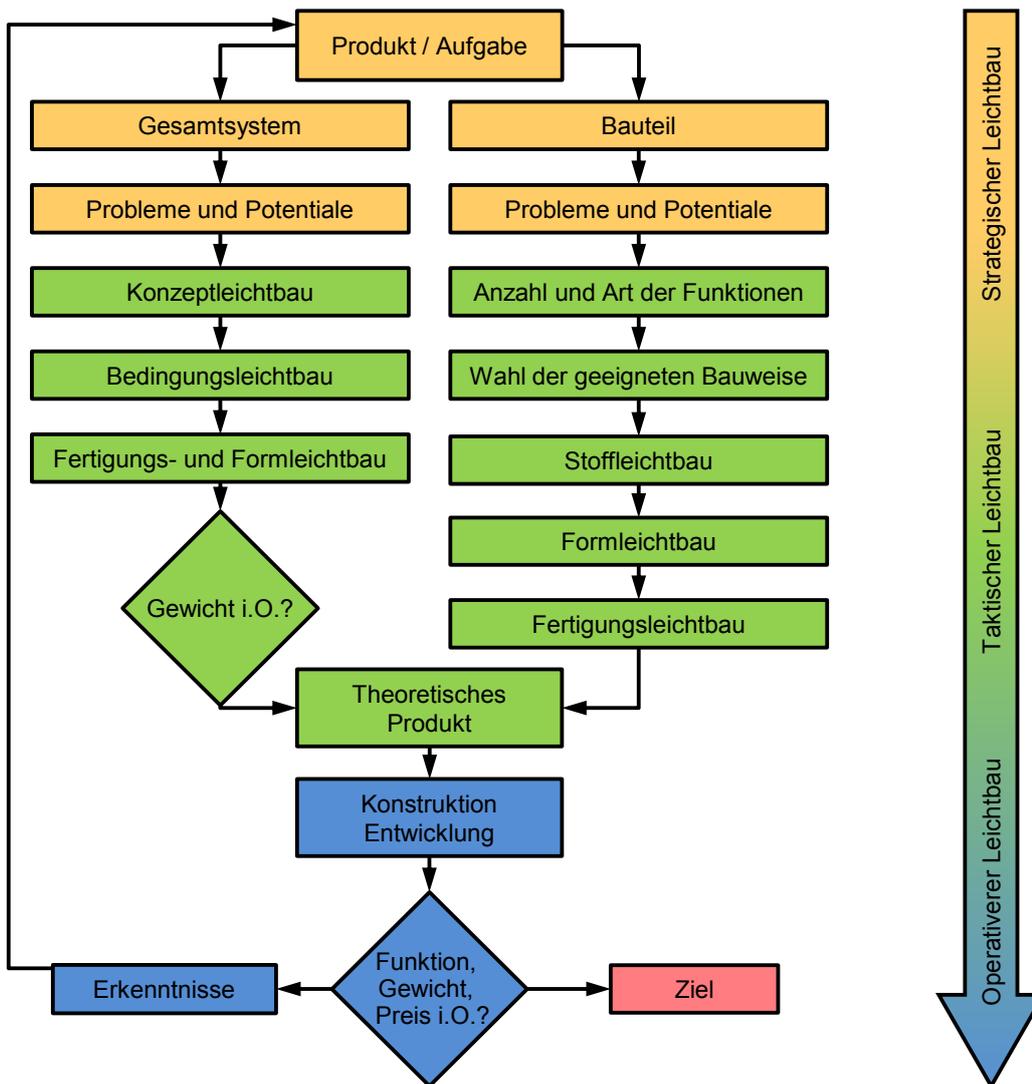
stellen sie fest, dass es keine Vorgehensweise zur systematischen Umsetzung von Leichtbau geben kann, da Leichtbau immer eine spezielle ingenieurmäßige Herausforderung darstellt [SCHMIDT03, S. 38].

Auch Ponn und Lindemann [PONN11, S. 209 ff.] empfehlen die Verwendung eines allgemeinen Produktentwicklungsprozesses. Sie betrachten die einzelnen Schritte eines solchen Prozesses genauer und schlagen die Analyse des Produktgewichts mittels der Funktionsgewichtsanalyse vor. Die Funktionsgewichtsanalyse entspricht der Wertanalyse Gewicht, die im Folgenden Abschnitt 2.6.2 näher beschrieben wird. Sie stellt den Transfer der Wertanalyse von der Anwendung auf Kosten auf die Anwendung auf Masse dar. Außerdem empfehlen sie die Berücksichtigung von Leichtbau auf Anforderungs-, Funktions-, Wirk- und Gestaltebene. Auf Funktionsebene sollen dafür mithilfe der Funktionsgewichtsanalyse die Funktionen identifiziert werden, die die größte Masse verursachen. Auf Wirkebene muss berücksichtigt werden, dass unterschiedliche Wirkprinzipien zu unterschiedlich massenintensiven Lösungen führen können und dass zur Lösungssuche Methoden der allgemeinen Lösungssuche der Produktentwicklung angewendet werden können. Für das Baumodell bzw. auf Gestalt-ebene wird die Anwendung von Gestaltungsprinzipien, der Einsatz von Leichtbauwerkstoffen, neuer Fertigungsverfahren, computergestützter Berechnungs- und Simulationswerkzeuge sowie die Wahl der passenden Bauweise vorgeschlagen. [PONN11, S. 209 ff.]

Ellenrieder et al. [ELLENRIEDER13, S. 51 f.] unterteilen den Leichtbau in den strategischen Leichtbau, in dem die Zielfindung stattfindet, den taktischen Leichtbau, den sie der Planungsphase zuordnen und den operativen Leichtbau, der sich diesem anschließt. Sie beschränken sich in ihrer Betrachtung vollständig auf die Fahrzeugtechnik. Außerdem schlagen Ellenrieder et al. [ELLENRIEDER13, S. 51 f.] eine Vorgehensstrategie als Leitfaden vor, siehe Bild 2.5.

Dieser Leitfaden wird jedoch weder hergeleitet noch begründet und nur kurz beschrieben. In diesem Leitfaden wird zwischen dem Vorgehen für das Gesamtsystem und für ein Bauteil unterschieden. Wird das Gesamtsystem optimiert, so werden für dieses die Probleme und Potenziale analysiert und daraufhin die einzelnen Leichtbau-Strategien angewendet. Danach werden die Einzelteile auf deren Probleme und Potenziale hin untersucht. Nach Festlegung der Funktionen und der Bauweisen der Bauteile werden der Stoff-, Form- und Fertigungsleichtbau angewendet. Außerdem müssen alle Maßnahmen bezüglich Kosten und Umsetzungsrisiken bewertet werden. Ideen die nicht

weiterverfolgt werden, sollen für spätere Konstruktionen dokumentiert werden. Das resultierende theoretische Produkt wird möglichst früh als Prototyp umgesetzt. Nach Überprüfung der Zielerreichung bezüglich Funktion, Preis und Gewicht muss das Risiko einer Gewichtszunahme in der weiteren Entwicklung abgeschätzt werden. Wird dabei eine zu große Gewichtszunahme vermutet, so soll schon vorab die Konstruktion weiter bezüglich Leichtbau optimiert werden. [ELLENRIEDER13, S. 52]



**Bild 2.5:** Vorgehensstrategie für den Leichtbau [ELLENRIEDER13, S. 51]

Als Methode zur Kostenoptimierung wird die Wertanalyse als Werkzeug des Value Managements erfolgreich in der Praxis eingesetzt. Um den Erfolg der Methode für den Leichtbau nutzbar zu machen, werden diese und deren Transfer auf die Anwendung im Leichtbau nachfolgend näher betrachtet.

## **2.6.2 Ansätze zum Transfer der Wertanalyse auf die Anwendung im Leichtbau**

Verschiedene Autoren [FEYERABEND91, S. 21 ff.; PONN11, S. 214] heben die Wichtigkeit der Entwicklung von Leichtbauzielen in den frühen Phasen der Produktentwicklung hervor und schlagen dafür den Transfer des Ansatzes der Wertanalyse vor. Die Wertanalyse ist eine Methode für das kostengerechte Konstruieren und wird im nachfolgenden Abschnitt kurz erläutert, bevor darauf aufbauend deren Transfer auf die Anwendung im Leichtbau vorgestellt wird.

### **2.6.2.1 Wertanalyse (Kosten)**

Die Wertanalyse ist eine Methodik, die auf einem Wert- und Funktionenansatz basiert, und die Steigerung des Werts zum Ziel hat. Dabei wird der Wert als Gegenüberstellung der Befriedigung von Bedürfnissen und dem Einsatz der Ressourcen bzw. deren Quotient definiert [VDI 2800 2010, S. 8]. Aus der Wertanalyse hat sich das Value Management als Managementstil entwickelt [DIN EN 12973 2002, S. 3]. VDI 2800 [VDI 2800 2010] und DIN EN 1325 [DIN EN 1325 1996] beschreiben die Begriffe des Value Managements und der Wertanalyse als wichtigste Methode des Value Managements. Die Wertanalyse hat bei ihrer Anwendung auf die Produktentwicklung zwei übergeordnete Ziele. Zum einen dient sie dazu, dass Produkte und/oder Dienstleistungen so bereitgestellt werden, dass sie den Kunden- und Nutzerwünschen entsprechen. Zum anderen unterstützt sie die Anwender dabei, den Ressourceneinsatz der Organisation und/oder der Nutzer zu optimieren. [DIN EN 12973 2002, S. 10] Das Wertanalyzesystem umfasst neben der menschlichen Dynamik, unter der beispielsweise Teamarbeit und Kommunikation verstanden werden, den Managementstil, die Methoden und die Werkzeuge. Außerdem sind interne und externe Umfeldfaktoren, wie z. B. Gesetzes- und Verwaltungsvorgaben, und deren Einflüsse und Auswirkungen zu berücksichtigen. [VDI 2800 2010, S. 11]

Die Wertanalyse verfolgt einen funktionsorientierten Ansatz, der keine Fixierung und Beschränkung auf bestehende Lösungen, sondern die bewusste Suche nach Alternativen unterstützt [VDI 2800 2010, S. 11 f.]. Die Methodik der Wertanalyse basiert auf einem Wertanalysearbeitsplan, siehe Tabelle 2.3. Er besteht aus verschiedenen Teilschritten, die alle durchlaufen werden müssen. Die Intensität der Bearbeitung der einzelnen Schritte wird vom Wertanalyseteam an die Ziele und Rahmenbedingungen angepasst. [VDI 2800 2010, S. 19] Verschiedene methodische Hilfsmittel unterstützen die Schritte des Wertanalysearbeitsplans.

	Grundschritte	Teilschritte
0	Projektplanungsphase	Projekt vorbereiten
1		Projekt definieren (endgültig)
2		Projektorganisation planen (Aufbau- und Ablauforganisation)
3	Analysephase	Umfassende Daten über das Objekt sammeln
4		Funktionen und Kosten analysieren Detailziele formulieren
5	Entwicklungsphase	Lösungsideen sammeln und entwickeln
6	Entscheidung der Realisierung	Lösungsideen bewerten
7		Ganzheitliche Vorschläge entwickeln, Lösung auswählen
8		Vorschläge präsentieren, Entscheidung erwirken
9	Realisierungsphase	Vorschläge, Entscheidung realisieren

**Tabelle 2.3:** Wertanalysearbeitsplan [VDI 2800 2010, S. 20]

Basierend auf dieser kurzen Zusammenfassung der aktuellen Wertanalyse-Methodik wird im folgenden Abschnitt der Transfer dieses Ansatzes auf die Anwendung im Leichtbau vorgestellt.

### 2.6.2.2 Wertanalyse Gewicht

Feyerabend [FEYERABEND91, S. 28 ff.] präsentiert den Ansatz, die Wertanalyse von ihrer Anwendung im Rahmen der Kosten auf die Anwendung im Hinblick auf das Gewicht zu übertragen. Dadurch soll in Leichtbauprojekten die Masse bestehender Produkte reduziert werden. Broderick [BRODERICK92, S. 64] fügt einen Ausgleichsfaktor zur Wertdefinition der Wertanalyse hinzu, der als Kosten pro Kilogramm definiert ist und mit dem Produktgewicht multipliziert wird. Dadurch wird das Gewicht des Produkts indirekt berücksichtigt.

Posner et al. [POSNER12A; POSNER12B] stellen die Anforderungen dar, die eine Methode für das Konstruieren unter Berücksichtigung von Funktion und Masse erfüllen muss. Basierend auf diesen Anforderungen werden unterschiedliche Ansätze bewertet, beispielsweise die von Feyerabend [FEYERABEND91] und Broderick [BRODERICK92], und aufgezeigt, dass die Beschreibungen dieser Methodentransfers unvollständig sowie deren Unterstützungsumfänge für das leichtbaugerechte entwickeln zu gering sind. Als weiteres Ergebnis der Bewertung des Stands der Technik halten sie fest, dass die Wertanalyse als Basis für die weitere Entwicklung einer Methode zum funktions- und massegerechten Konstruieren und der Entwicklung von Massezielen dienen kann. Außerdem wird eine Rahmenstruktur für eine solche Methode entwickelt, die als Funktionsmassenanalyse (FMA) bezeichnet wird.

Der Ansatz von Feyerabend [FEYERABEND91] basiert im Gegensatz zu dem von Posner et al. [POSNER12A] auf einer älteren Version der Wertanalyse mit sechs Schritten [DIN 69910 1987] und nicht auf der weiterentwickelten Variante der Wertanalyse mit zehn Schritten [VDI 2800 2010]. Außer der detaillierteren Beschreibung der Wertanalyse ist sie auch so beschrieben, dass sie auf ein erweitertes Objektfeld anwendbar ist. Das bedeutet, sie ist unabhängig von der Anwendung auf die Kostenoptimierung beschrieben. [VDI11, S. 35]

Ponn und Lindemann [PONN08, S. 195 f.] schlagen den Transfer des Target Costings auf Masse vor und nennen diese Methode Funktionsgewichtsanalyse. Für die Analyse des Optimierungspotenzials wird in der Funktionsgewichtsanalyse eine Reihenfolge der Funktionen nach dem Gewicht, das für deren Erfüllung in Wettbewerbs- oder Vorgängerprodukten aufgewendet wird, verwendet. Die Funktionsgewichtsanalyse nach Ponn und Lindemann [PONN08, S. 195 f.] schlägt außerdem vor, dass nach der Reihenfolge der Wichtigkeit der Funktionen eine Soll-Rangfolge zur Optimierung für die Funktionen abgeleitet werden kann.

Posner [POSNER10, S. 92 ff.] schlägt vor, dass neben der Masse als Optimierungskriterium, wie von Feyerabend [FEYERABEND91, S. 28 ff.] vorgeschlagen, auch noch weitere Optimierungskriterien bei der Anwendung der Wertanalyse denkbar sind. Daher wird eine Verallgemeinerung der Wertanalyse aufgezeigt. Außerdem wird eine Erweiterung bei der Zieldetaillierung der Funktionsgewichtsanalyse vorgeschlagen, bei der die Massenverteilung bei Wettbewerbsprodukten mit berücksichtigt wird. Für die Berücksichtigung der Massenverteilung bei der Gewichtsoptimierung wird ein Ansatz vorgeschlagen, wie das dreidimensionale, räumliche Problem der Massenverteilungsoptimierung auf ein zweidimensionales oder gar eindimensionales Problem reduziert werden kann. Außerdem wird aufgezeigt, dass bei der Massenoptimierung auch das Trägheitsmoment betrachtet werden muss. Bei der Durchführung der Wertanalyse auf Kosten kann nach Posner [POSNER10] auch parallel eine Wertanalyse zur Massenoptimierung durchgeführt werden. Ein Vorteil ist hierbei, dass einige Schritte identisch sind und damit nur geringer Mehraufwand entsteht. [POSNER10]

Posner et al. [POSNER12A] schlagen die Funktionsmassenanalyse als systematisch von der Wertanalyse und dem Target Costing abgeleitete sowie auf den Vorarbeiten und Ansätzen [FEYERABEND91; PONN08; PONN11; POSNER10] aufbauende Methode zum funktions- und massegerechten Konstruieren vor. Sie verknüpfen den Transfer des Target Costings, basierend auf den Ideen anderer Autoren [PONN08; PONN11;

POSNER10], und den Transfer der Wertanalyse, basierend auf der Idee nach Feyerabend [FEYERABEND91]. Der Transfer basiert jedoch auf dem aktuellen Stand der Wertanalyse mit zehn Schritten [VDI 2800 2010]. Außerdem wird vorgeschlagen, den systematischen Transfer aller Schritte des aktuellen Stands der Wertanalyse inklusive dem Target Costing durchzuführen.

Posner et al. [POSNER13A] operationalisieren und erweitern alle Schritte der Funktionsmassenanalyse [POSNER12A], die im Abschnitt 5.2 präsentiert werden. Auch Albers et al. [ALBERS13] greifen die Ansätze der Funktionsgewichtsanalyse nach Ponn und Lindemann [PONN08] und die der entsprechenden Schritte der Funktionsmassenanalyse nach Posner et al. [POSNER12A] auf und nennen diese Methode „Target Weighing“. Sie wenden die Methode erfolgreich auf ein Klimagerät und in einem umfassenden Projekt zur Entwicklung eines elektrischen Energiespeichers an und passen diese auf die projektspezifischen Rahmenbedingungen an [ALBERS13, S. 7 f.; WAGNER15].

Da die weiterentwickelte Beschreibung der Wertanalyse nach VDI 2800 [VDI 2800 2010] die Anwendung der Methode auf weitere Anwendungsfälle und damit nicht nur die Anwendung auf Kosten unterstützt, wird auf eine weitere verallgemeinerte Beschreibung verzichtet.

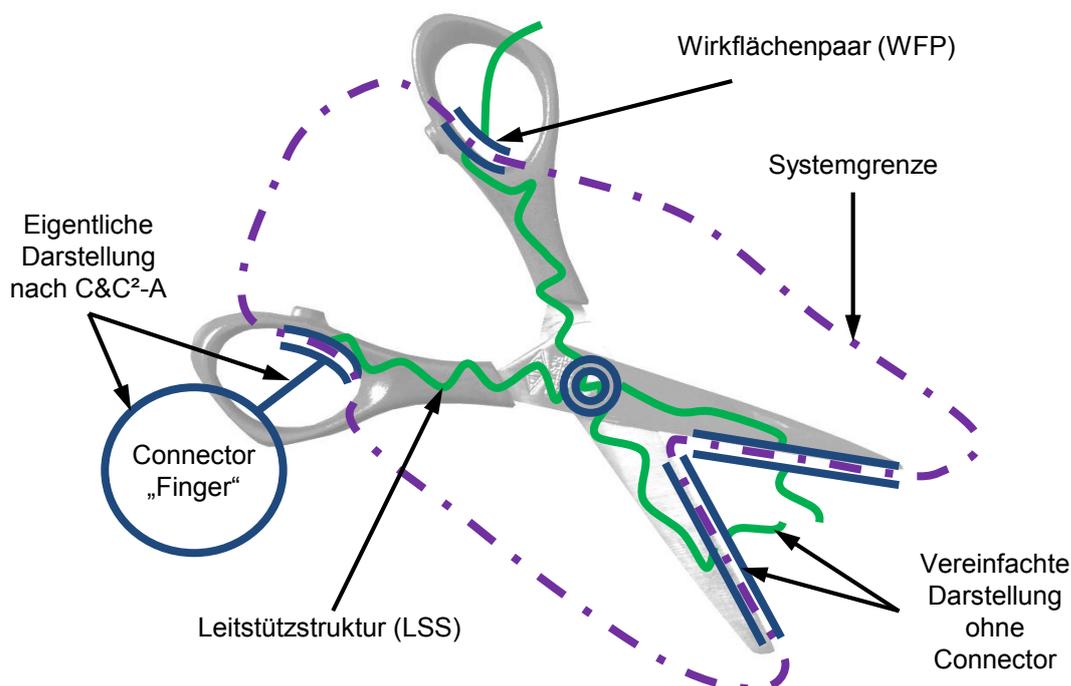
In den letzten beiden Abschnitten wurden Ansätze zum Transfer der Wertanalyse auf die Anwendung im Leichtbau diskutiert. Als weitere Methode zur Analyse von bestehenden Produkten wird nachfolgend der Contact and Channel<sup>2</sup> - Approach vorgestellt.

### **2.6.3 Contact & Channel<sup>2</sup> - Approach zur Anwendung in der Analyse im Leichtbau**

Der Contact & Channel<sup>2</sup> -Approach (C&C<sup>2</sup>-A [ALBERS14, S. 151 ff.] als Weiterentwicklung des Contact & Channel - Approach, C&C-A [MATTHIESEN11, S. 8 ff.]) stellt eine Methode und das Contact & Channel - Model (C&C-M als Weiterentwicklung des Elementmodells [MATTHIESEN02, S. 48 ff.]) das dazugehörige Modell dar, welche die Verbindung zwischen Funktion und Gestalt von Bauteilen, Baugruppen sowie Produkten herstellen [MATTHIESEN02]. Technische Systeme werden durch das Modell mithilfe von Wirkflächenpaaren (WFP), Leitstützstrukturen (LSS) und Connectoren [ALINK10, S. 182 ff.] beschrieben, die zusammen das Wirknetz beschreiben [ALBERS14, S. 160]. Wirkflächenpaare bestehen aus zwei in Kontakt stehenden Wirkflächen (WF). Die Wirkflächenpaare sind untereinander durch Leitstützstrukturen verbunden. [ALBERS05, S. 2 ff.] Leitstützstrukturen sind Volumina, welche die Energie im Bauteil leiten, um die

Funktion des technischen Systems zu erfüllen [ALBERS05, S. 2 ff.], siehe Bild 2.6. Die Systemgrenze verläuft dabei immer durch ein Wirkflächenpaar. Die Connectoren bilden dabei die Verbindung zur Umgebung und deren Wechselwirkung sowie deren Eigenschaften ab [ALBERS14, S. 160]. Zur Vereinfachung wird in dieser Arbeit der Connector nicht gesondert beschrieben, sondern an der Systemgrenze eine anschließende Wirkfläche und eine Leitstützstruktur dargestellt, die diese Funktion des Connectors symbolisieren sollen. Wo die Systemgrenze und die Systemumgebung eine untergeordnete Rolle spielen, werden auch diese zur Vereinfachung nicht dargestellt. Dies ist z. B. bei der Darstellung von einzelnen Wirkprinzipien der Fall, die verglichen oder entwickelt werden sollen.

Strukturen, welche nicht aktiv an der Erfüllung der Funktion beteiligt sind, werden Reststrukturen genannt [MATTHIESEN02, S. 51]. Albers et al. [ALBERS05, S. 5 ff.] zeigen außerdem die Beschreibung weiterer Eigenschaften der WFP und LSS, wie beispielsweise die Richtung der wirkenden Kräfte oder des Aggregatzustands der Materialien, mithilfe von Symbolen auf.



**Bild 2.6:** Elemente des Contact & Channel – Model [POSNER12c, S. 514]

Die Methode des C&C²-A besteht zum einen aus einem Analyseprozess, in dem das technische System durch Wirkflächenpaare, Leitstützstrukturen und Connectoren beschrieben wird. Dieser Analyseprozess ist aus vier Schritten aufgebaut. Der erste Schritt ist die Definition des betrachteten Gesamtsystems sowie dessen Systemgrenze. Der zweite Schritt besteht darin, den Ort der Funktionserfüllung zu ermitteln. Im dritten

Schritt wird das Kammvorgehen angewendet. Das bedeutet, dass die Teile des technischen Systems detailliert betrachtet werden, bei denen dies zur Lösungssuche notwendig ist. Der letzte Schritt im Analyseprozess beinhaltet das Sequenzmodell für die Beschreibung dynamischer Systeme. Dabei werden die wichtigsten zeitlich aufeinanderfolgenden Zustände einzeln betrachtet. Die Zerlegung eines bewegten Systems in eine Sequenz von statischen Zuständen hilft dabei, die Komplexität des Problems zu erfassen und zu reduzieren. [ALBERS09, S. 4] Zum anderen beinhaltet die Methode einen Syntheseprozess, in dem systematisch nach Lösungen gesucht wird. Die Synthesephase besteht aus vier Meta-Regeln (MR): Hinzufügen von WFP und LSS (MR1), Entfernen von WFP und LSS (MR2), Ändern von Eigenschaften von WFP (MR3) und von LSS (MR4) [ALBERS05, S. 8]. Dieses Vorgehen wird in den folgenden Kapiteln genutzt. Ergänzend schlagen Albers und Wintergerst [ALBERS14, S. 151 ff.] Richtlinien vor, die sie in Vorbereitung, Klären der Problemstellung, Ziel Festlegung und Festlegung der Gestaltung einteilen.

Albers und Burkardt [ALBERS11c, S. 122] stellen fest, dass die Anwendung der Analysephase des Contact & Channel – Model bzw. des Contact & Channel<sup>2</sup> - Approach im Leichtbau den Aufbau eines umfassenden Systemverständnisses unterstützt, welches für den Leichtbau wichtig ist. Es wird jedoch nicht aufgezeigt, wie der C&C<sup>2</sup>-A genutzt werden kann, um systematisch Leichtbau-Lösungen zu entwickeln. [POSNER12c, S. 514] Auch Otnad definiert die Reduktion von Reststrukturen als ein Ziel des Leichtbaus [OTTNAD09, S. 9 f.]. Die Anwendung der verschiedenen Leichtbauansätze, wie z. B. der Einsatz eines Leichtbau-Werkstoffs, stellt hohe Ansprüche an das Verständnis des Konstrukteurs für die Wirkzusammenhänge innerhalb des Produkts sowie zwischen dem Produkt und der Umgebung. Der Contact & Channel<sup>2</sup> - Approach ist eine Methode, um diese Wirkzusammenhänge bei bestehenden Produkten zu analysieren [ALBERS11c, S. 122].

Ohmer [OHMER08, S. 83 ff.] beschreibt darüber hinaus verschiedene Gerechtheiten mithilfe des C&C-M, wie z. B. Verschleißgerechtheit, Korrosionsgerechtheit. Lemburg [LEMBURG09, S. 94 ff.] gibt an, dass durch die Anwendung des C&C-M und die Variation von Art, Form, Lage, Anzahl und Größe der WFP und LSS neue Lösungen gefunden werden können. Sie berücksichtigen jedoch keine Anwendung des C&C-M bzw. C&C<sup>2</sup>-A zur Erreichung von Leichtbauzielen.

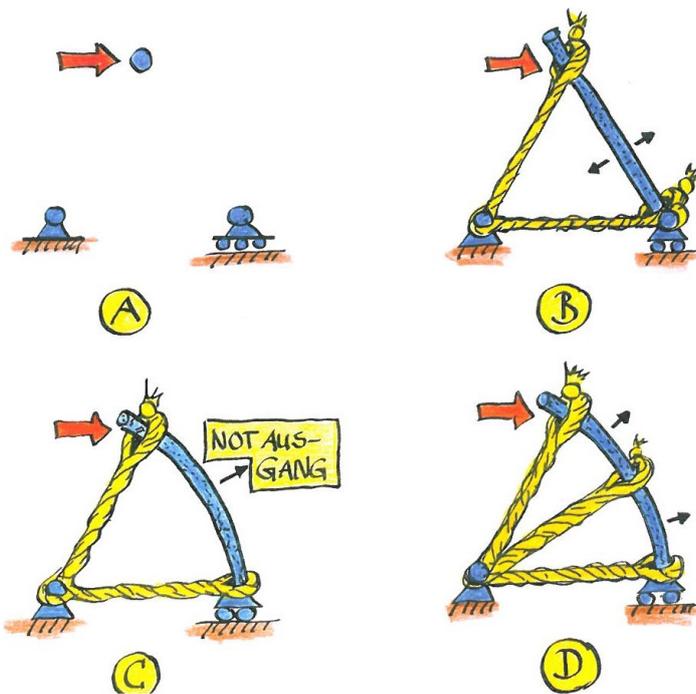
Um Strukturen, die z. B. mithilfe des C&C<sup>2</sup>-A analysiert wurden, kraftfluss- und damit leichtbaugerechter entwickeln zu können, werden nachfolgend die Denkwerkzeuge nach der Natur betrachtet.

### **2.6.4 Denkwerkzeuge nach der Natur**

Um Gestaltleichtbau in die Praxis umzusetzen, werden in der Literatur Berechnungsmethoden für Leichtbau-Strukturen vorgestellt [ALBERS11B, S. 77 ff.; KLEIN13, S. 74 ff.; WIEDEMANN07, S. 22 ff.]. Es fehlen jedoch in der frühen Konzeptphase oft Informationen über Rahmenbedingungen, wie z. B. genaue Belastungen, die notwendig sind, um diese Berechnungen durchzuführen. Da diese Berechnungen außerdem komplex und zeitaufwändig sind, wurden Softwareprodukte entwickelt, um deren Aufwand zu reduzieren. Es existiert auch Software, welche Lösungen für die Massenverteilung innerhalb der Struktur in Abhängigkeit von den wirkenden Kräften vorschlägt, bei denen das Material möglichst gleichmäßig belastet und damit ausgenutzt wird. Allerdings ist trotz Softwareunterstützung ein großes Maß an Wissen und Zeit notwendig, um an derartigen Strukturen eine Analyse und Synthese vorzunehmen [MATTHECK10, S. 1]. Zudem existieren, wie beispielsweise von Mattheck [MATTHECK10] vorgeschlagen, einige bionische Leichtbauansätze, welche in der Natur nach ähnlichen Lösungen für technische Probleme suchen [MATTHECK10].

Mattheck [MATTHECK10, S. 127] schlägt einfache Regeln zur Entwicklung von Leichtbau-Strukturen vor, die er aus der Beobachtung des Wachstums von Bäumen ableitet. Der Kerngedanke dabei ist es, in Druckstäben und Zugseilen zu denken. Der erste Schritt (Schritt A) des Schemas zur Entwicklung von Leichtbau-Strukturen basierend auf Seilen besteht darin, die angreifende Last sowie die Auflagerbedingungen zu definieren, siehe Bild 2.7.

Im nächsten Schritt (Schritt B) soll eine Struktur entstehen, welche die Lasten aufnehmen und diese in die Auflager einleiten kann. Dazu werden ausschließlich Zugseile und Druckstäbe verwendet. Im dritten Schritt (Schritt C) werden die knickgefährdeten Druckstäbe vorgekrümmt und ihnen somit eine bevorzugte Knickrichtung vorgegeben, d. h. ein Druckbogen entsteht. Der letzte Schritt (Schritt D) dient dazu, das Knicken der Druckstäbe mittels Zugseilen zu blockieren. [MATTHECK10, S. 127]



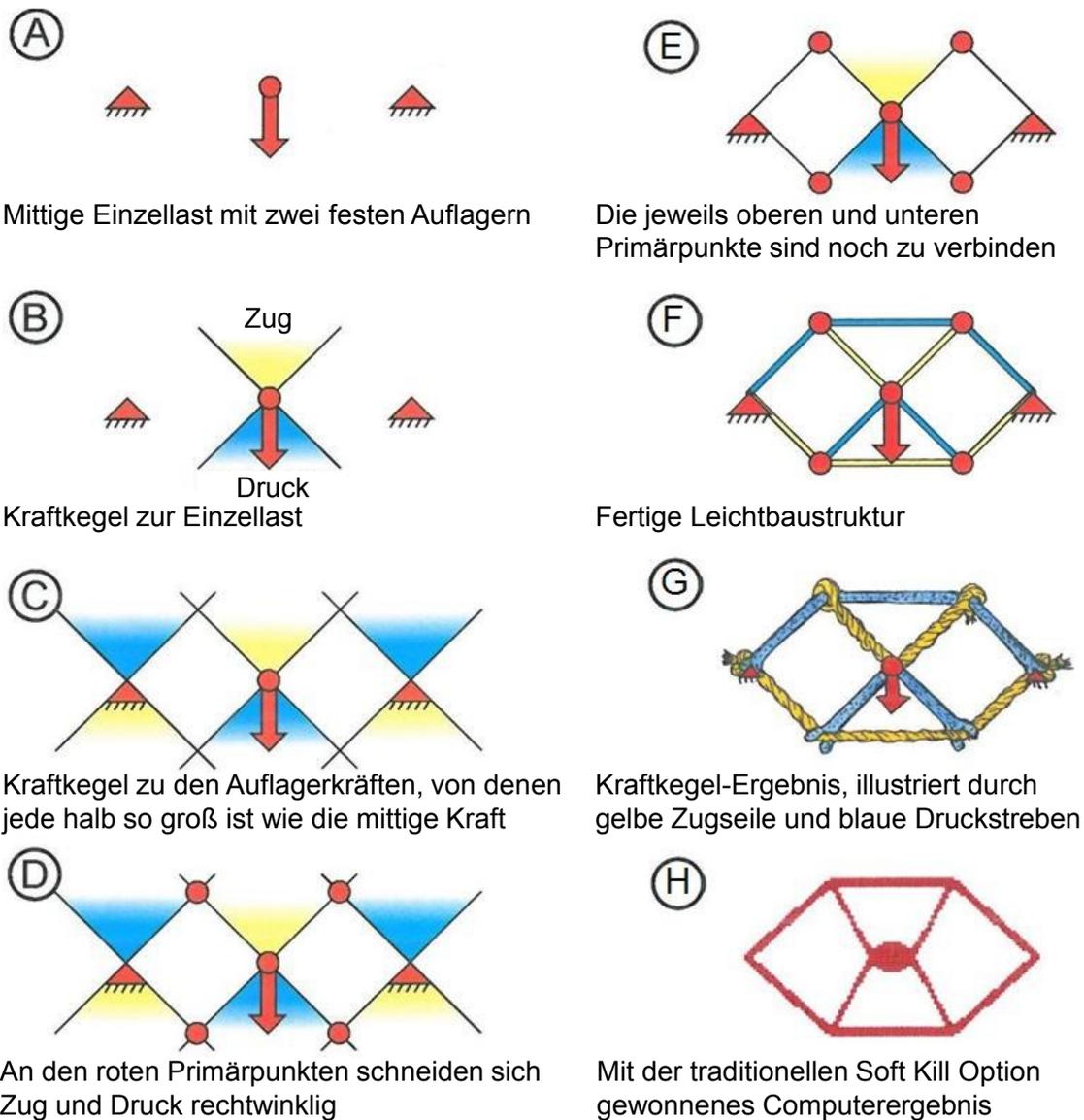
**Bild 2.7:** Schema für die Entwicklung von Leichtbau-Strukturen basierend auf Seilen  
[MATTHECK10, S. 127]

Mit der Kraftkegelmethode schlägt Mattheck [MATTHECK10, S. 138 f.] eine weitere Methode vor, welche auf der Hypothese basiert, dass eine Einzelkraft einen  $90^\circ$ -Druckkegel vor sich herschiebt und einen  $90^\circ$ -Zugkegel hinter sich herzieht. Der Großteil der Kraftübertragung läuft innerhalb dieser Kraftkegel ab. Durch Entwicklung von Strukturen entlang dieser Kegel können Leichtbau-Strukturen entwickelt werden, siehe Bild 2.8.

Im ersten Schritt der Vorgehensweise (Schritt A) werden Kräfte und Lager analysiert, siehe Bild 2.8. In Schritt B werden die Kraftkegel an den Lasten eingezeichnet. Der dritte Schritt (Schritt C) beinhaltet, dass Kraftkegel an den Auflagerkräften dargestellt werden. Die sogenannten Primärpunkte, in denen Zug- und Druckspannungen sich in rechten Winkeln schneiden, werden in Schritt D markiert. Als nächstes werden die Lager, die Lasten und die Primärpunkte miteinander verbunden, um daraus eine Leichtbau-Struktur zu entwickeln, siehe Schritte E und F. [MATTHECK10, S. 138 f.]

Zudem weist Mattheck [MATTHECK10, S. 138 ff.] darauf hin, dass diese einfachen Methoden zu Ergebnissen führen, welche denen mithilfe von rechnerunterstützter Topologieoptimierung entwickelten Strukturen sehr ähneln. Dabei ist jedoch zu beachten, dass je nach Randbedingungen, die der Topologieoptimierungssoftware vorgegeben werden, wie z. B. minimale Wandstärken, oft unterschiedliche Lösungsvorschläge resultieren. Mattheck stellt daher bei den Vergleichen zwischen den Strukturen, die

mithilfe seiner Methoden entwickelt wurden, und den Strukturen, die mithilfe von Topologieoptimierungssoftware entwickelt wurden, fest, dass ähnliche Strukturen gefunden werden konnten. Jedoch führen nicht jede Rahmenbedingungen zu genau dieser Lösung. [MATTHECK10, S. 138 f.] Bild 2.8 zeigt beispielhaft das Ergebnis der Kraftkegelmethode (Schritt G), während darunter (Schritt H) die Struktur zu sehen ist, welche mittels einer Topologieoptimierung erstellt wurde.



**Bild 2.8:** Vorgehensweise der Kraftkegelmethode [MATTHECK10, S. 138 f.]

Es existieren in der Literatur weitere Methoden für spezielle Anwendungsfälle des Leichtbaus, die nachfolgend diskutiert werden.

### **2.6.5 Weitere Methoden für spezielle Anwendungsfälle der Leichtbau-Produktentwicklung**

Verschiedene Autoren bieten für spezielle Anwendungsfälle im Leichtbau Methoden an, wie z. B. für das fasergerechte Konstruieren von Bauteilen [SCHÜRMAN07, S. 619 ff.]. Ein weiterer solcher Fall ist die Bewertung von Strukturen auf deren Potenzial hin, mit einem faserverstärkten Werkstoff umgesetzt zu werden [KLEIN14, S. 1093 ff.]. Außerdem wird eine methodische Unterstützung der Berücksichtigung von Leichtbau bei der Entwicklung modular-aufgebaute Produkte angeboten [GUMPINGER09, S. 6-201]. Darüber hinaus werden verschiedene methodische Ansätze beschrieben, die oft allgemein gültig sind, jedoch dem Ziel des Leichtbaus zugeordnet werden können, wie z. B. die methodische Werkstoffauswahl [ASHBY05] oder die Unterstützung der Funktionsintegration [ZIEBART12]. Diese Unterstützung setzt jedoch entweder erst nach der Konzeptphase an, betrachtet nur einzelne Teilaspekte des Leichtbaus oder stellt keine systematische Vorgehensweise oder gar einen Methoden-Baukasten für das leichtbaugerechte Entwickeln dar. Schmidt [SCHMIDT03] schlägt ein Konzept für einen systematischen Leichtbau-Innovationstransfer vor, der eine Datenbank für Leichtbau-Lösungen darstellt [SCHMIDT03, S. 115 ff.]. Darin können jedoch nur Lösungen gefunden werden, die zuvor bereits vom jeweiligen Unternehmen entwickelt wurden. Außerdem ist der Transfer der Lösungen schwierig, da Leichtbau-Lösungen immer für den individuellen Anwendungsfall und dessen Rahmenbedingungen entwickelt werden oder zumindest passen müssen. Eine umfangreiche Lösungssammlung zeigt er jedoch nicht auf und sieht ebenfalls die Notwendigkeit für eine durchgängige methodische Unterstützung der Leichtbau-Produktentwicklung [SCHMIDT03, S. 72 ff.]. Gänsicke und Sandiano [GÄNSICKE15, S. 42 ff.] stellen Bewertungskriterien, wie z. B. die Masse, Dichte, Streckgrenze, für die Bewertung des Leichtbaupotenzials bestehender Lösungen auf, gehen jedoch nicht über herkömmliche Bewertungskriterien für Lösungsideen hinaus und verwenden ausschließlich bestehende Bewertungsmethoden, wie beispielsweise die Dominanzmatrix (vgl. [PAHL07, S. 177 f.]).

### **2.7 Massenverteilungs- und trägheitsmomentengerechtes Konstruieren**

Neben der Funktion und der Masse müssen bei vielen Produkten im Leichtbau auch die Massenverteilung und Trägheitsmomente berücksichtigt werden. So spielt die Gesamtmasse eines Montageroboters in der Fertigung eine untergeordnete Rolle. Dies

liegt daran, dass der Roboter zwar den Hallenboden belastet und mindestens einmalig zum Aufstellungsort transportiert werden muss, jedoch in der Nutzungsphase des Roboters das Trägheitsmoment seiner bewegten Elemente, bezogen auf beispielsweise die Drehachsen, und damit die Massenverteilung innerhalb des Roboters eine wesentlich größere Rolle spielt. Durch eine verbesserte Massenverteilung oder eine Massenreduktion an beispielsweise weit von den Drehachsen entfernten Elementen, können das Trägheitsmoment und damit die Beschleunigungszeiten oder der benötigte Energieaufwand reduziert werden.

Ponn und Lindemann [PONN11, S. 209] stellen diese Wichtigkeit der Massenverteilung fest, schlagen jedoch kein Vorgehen zur Berücksichtigung dieser Aspekte vor. Auch Posner et al. [POSNER12A, S. 1075] stellen Anforderungen an die Berücksichtigung der Aspekte Massenverteilung und Massenträgheitsmoment fest. Posner [POSNER10] zeigt einen ersten Ansatz auf, wie das dreidimensionale Problem der Massenverteilung und des daraus resultierenden Trägheitsmoments auf ein zwei- oder eindimensionales Problem reduziert und dies während der Wertanalyse berücksichtigt werden kann. Das massenverteilungs- und trägheitsmomentengerechte Konstruieren wird jedoch aktuell nicht systematisch unterstützt.

## **2.8 Zusammenfassung**

In diesem Kapitel wurden zunächst die Grundlagen des Leichtbaus näher betrachtet. Die Basis des aktuellen Stands der Literatur des Leichtbaus in der Produktentwicklung stellen die Leichtbau-Strategien und die Leichtbau-Prinzipien bzw. -regeln, die wiederum der Strategie des Gestaltleichtbaus zugeordnet werden können, dar. Auch die Bauweisen können der Strategie des Gestaltleichtbaus zugeordnet werden.

Es werden außerdem verschiedene Methoden zur Unterstützung der Leichtbau-Produktentwicklung angeboten. Wie jedoch auf Funktions-, Wirk- und Gestaltebene systematisch, schrittweise und mit leichtbauspezifischen Methoden unterstützt, das von Ponn und Lindemann [PONN11] erkannte Leichtbaupotenzial der frühen Phasen nutzbar gemacht werden kann, wird nicht beschrieben.

Ellenrieder schlägt einen Prozess für die Anwendung der Leichtbau-Strategien vor, wie die Schritte seines Leitfadens [ELLENRIEDER13, S. 52] ausgeführt werden, wird aber nicht weiter beschrieben.

Ponn und Lindemann [PONN08, S. 195 f.] schlagen den Transfer des Target Costings auf Masse vor und nennen diese Methode Funktionsgewichtsanalyse, berücksichtigen

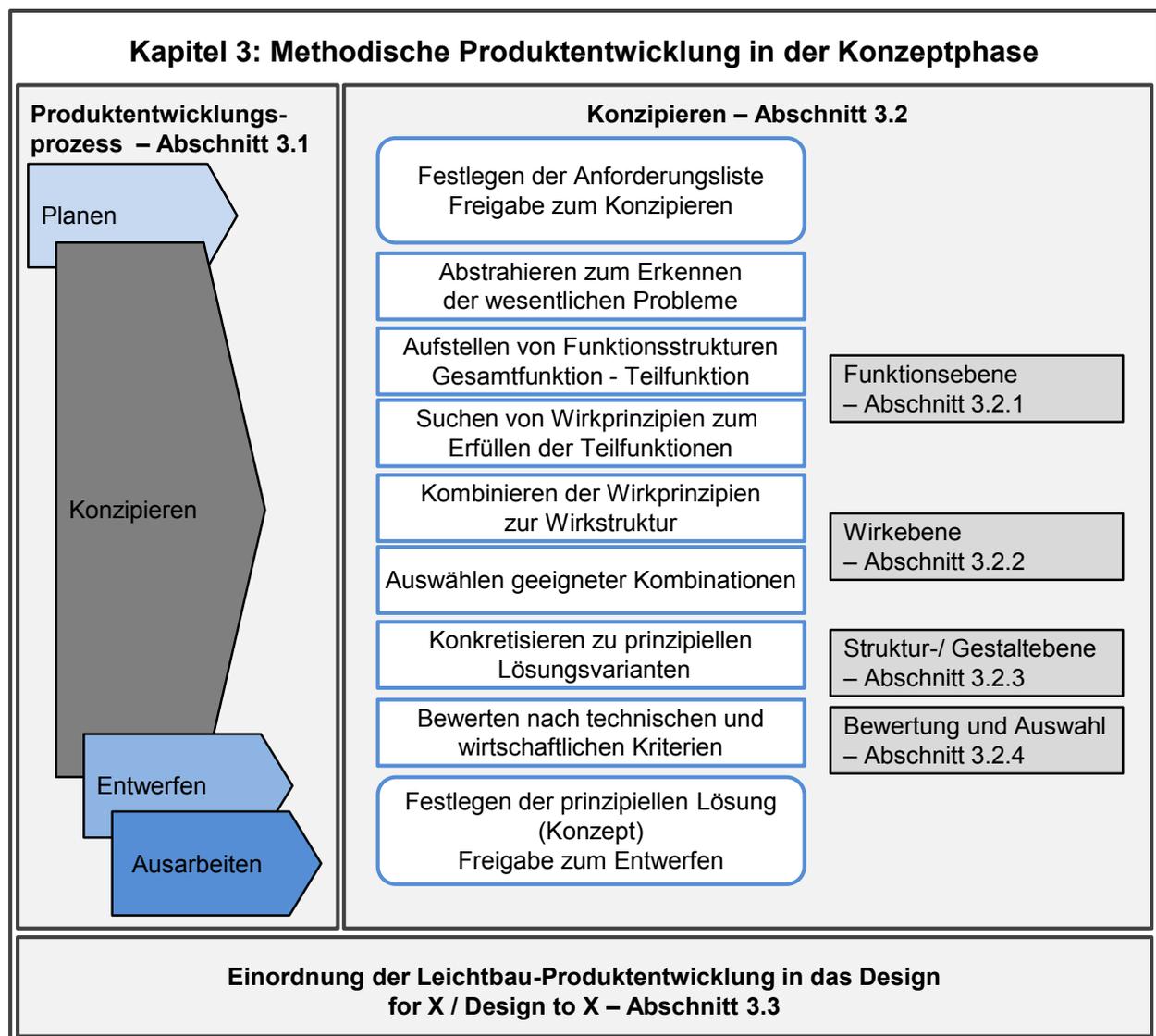
dabei jedoch die umfangreicheren Vorarbeiten von Feyerabend nicht [FEYERABEND91]. Feyerabend [FEYERABEND91] operationalisiert die Entwicklung von Massenzielen und die Analyse von Optimierungspotenzialen unter Bezug auf gegebene Funktionen nicht. Außerdem wird der Transfer des Target Costing, das ein Schwerpunkt der weiterentwickelten Wertanalyse ist [VDI 2800 2010], nicht berücksichtigt. Die Gewichte, die zur Erfüllung der Funktionen benötigt werden, sollen hierfür, entsprechend den Kosten im Target Costing, bestimmt werden. Es wird jedoch nicht im Detail aufgezeigt, wie das Vorgehen für die Bestimmung der Gewichte abläuft oder angepasst werden muss. Eine direkte Analyse und Gegenüberstellung der Wichtigkeit der Funktionen und der für ihre Erfüllung aufgewendeten Massen wird nicht beschrieben. Außerdem werden keine Handlungsempfehlungen bezüglich der Synthese oder Optimierung der Produkte abgeleitet. Es werden auch keine konkreten Gewichts- bzw. Massenziele entwickelt oder Funktionen hinterfragt. Außerdem wird für die Funktionsgewichtsanalyse nach Ponn und Lindemann [PONN08, S. 195 f.; PONN11, S. 213] keine Evaluation aufgezeigt.

Die Anwendbarkeit der Denkwerkzeuge Matthecks [MATTHECK10] ist beschränkt auf statische Probleme. Dynamische Fälle können nicht berücksichtigt werden. Außerdem wird die Optimierung von bereits bestehenden Strukturen nicht unterstützt. Des Weiteren ist die Methode nicht in der Lage, auf Beschränkungen im Bauraum einzugehen.

Bereits vor der systematischen Bewertung der Vorgehensweisen des Stands der Leichtbau-Produktentwicklung, die in Kapitel 4 folgt, lässt sich feststellen, dass keine durchgängige Methodik angeboten wird, die die systematische Leichtbau-Produktentwicklung über die gesamte Konzeptphase beschreibt. Außerdem bieten die bestehenden Methodenansätze weiteres Entwicklungspotenzial. Da die Unterstützung der Konzeptphase das Ziel der vorliegenden Arbeit darstellt, wird nachfolgend die methodische Produktentwicklung auch losgelöst vom Leichtbau betrachtet, um eine Basis für eine Weiterentwicklung zur systematischen Berücksichtigung von Leichtbau in dieser Phase zu schaffen.

### 3 Methodische Produktentwicklung in der Konzeptphase

Das Ziel dieser Arbeit ist es, eine Methodik zum leichtbaugerechten Konzipieren zu entwickeln. Dazu werden zunächst verschiedene Produktentwicklungsprozesse verglichen und darauf aufbauend der weiterzuverfolgende Prozess ausgewählt (Abschnitt 3.1). Die Konzeptphase mit ihren Ebenen des Lösungsraums, Modellen und Methoden, die Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit sind, wird genauer dargestellt (Abschnitt 3.2), siehe Bild 3.1. Dabei wird auf die Funktions-, Wirk-, Struktur- und Gestaltebene eingegangen. Außerdem wird die Bewertung und Auswahl von Lösungen näher betrachtet. Das Design for X als x-gerechtes Entwickeln oder Konstruieren wird vorgestellt und das leichtbaugerechte Entwickeln (Design for Lightweight) darin eingeordnet (Abschnitt 3.3).



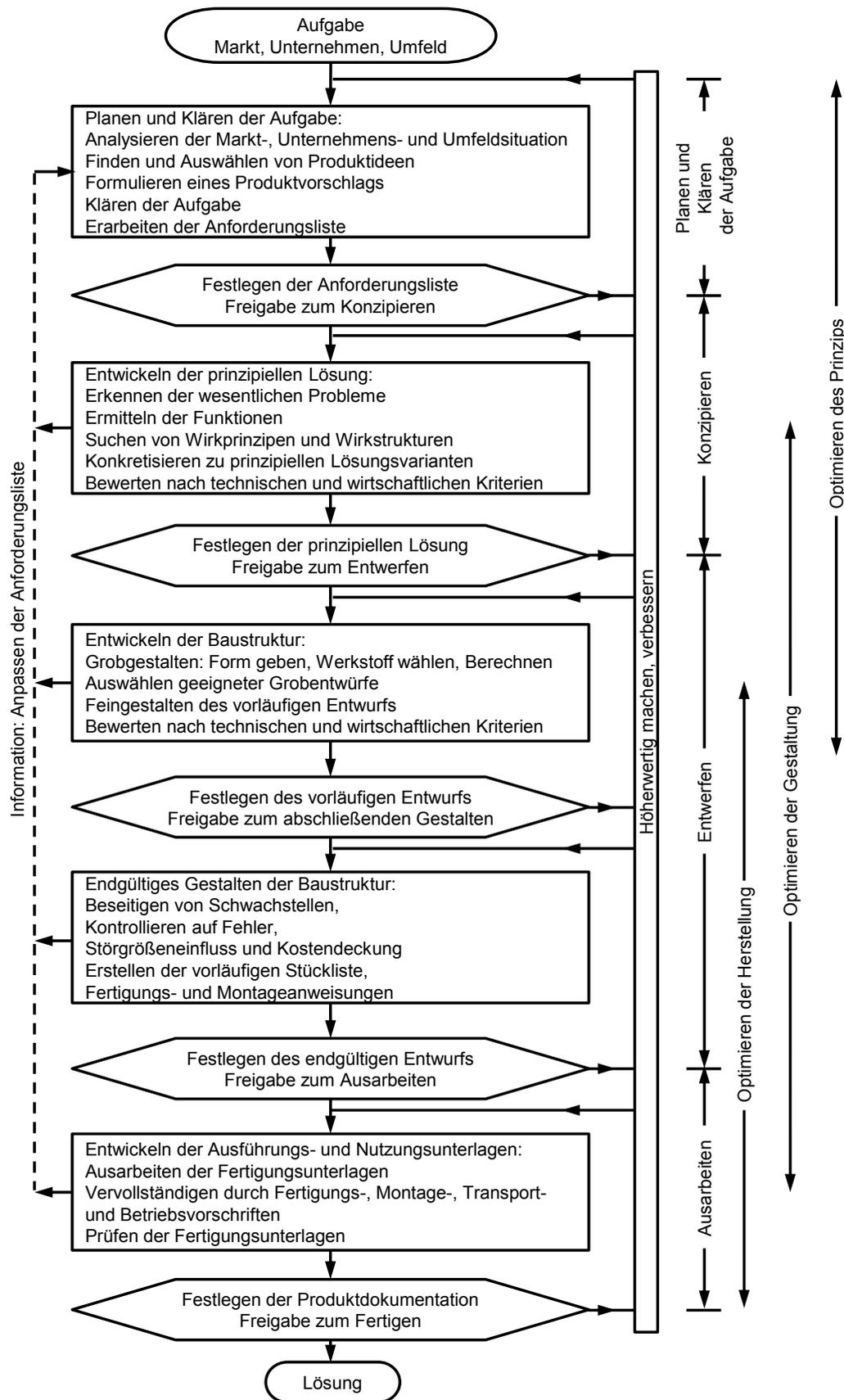
**Bild 3.1:** Aufbau der methodischen Produktentwicklung in der Konzeptphase

### 3.1 Produktentwicklungsprozess

In der Literatur werden verschiedene Produktentwicklungsprozesse vorgeschlagen. Die VDI 2221 [VDI 2221 1993] und VDI 2222 [VDI 2222 1997] wurden unter Zusammenwirken verschiedener Autoren aus der Produktentwicklung erstellt und zeigen damit die Gemeinsamkeiten der verschiedenen Produktentwicklungsprozesse auf [PAHL07, S. 28]. Der Produktentwicklungsprozess nach VDI 2221 ist branchen- sowie produktunabhängig und damit allgemein anwendbar [PAHL07, S. 193]. Das Vorgehen teilt sich in sieben Arbeitsabschnitte, die situationsabhängig nur teilweise oder mehrmals iterativ durchlaufen werden. Im ersten Arbeitsabschnitt werden die Anforderungen geklärt. Das Ergebnis ist die Anforderungsliste, die auch die folgenden Arbeitsabschnitte stets begleitet und dabei aktualisiert wird. In Arbeitsabschnitt zwei werden die Gesamtfunktion und die für deren Erfüllung notwendigen Teilfunktionen ermittelt. Daraus resultieren eine oder mehrere Funktionsstrukturen als Basis für die weitere Lösungssuche. Darauf aufbauend werden Lösungsprinzipien für die Teilfunktionen im dritten Arbeitsabschnitt gesucht. Die strukturelle Festlegung physikalischer, chemischer oder anderer Effekte bildet das Lösungsprinzip. Die Lösungsprinzipien werden zu Wirkstrukturen verknüpft, aus denen eine oder mehrere als prinzipielle Lösung ausgewählt werden und das Ergebnis des Abschnitts darstellen. Im vierten Arbeitsabschnitt wird die prinzipielle Lösung in eine modulare Struktur aufgegliedert, um realisierbare Module zu erhalten. Diese können dann auch in parallelen Konstruktionslinien auf Baugruppen und Einzelteilebene getrennt voneinander bearbeitet werden. Darauf basierend werden im fünften Arbeitsabschnitt die maßgebenden Module grobgestaltet. Diese Grobgestaltung wird so weit betrieben, bis ein Erkennen und Auswählen eines Optimums möglich ist. Diese ausgewählten Vorentwürfe werden im sechsten Arbeitsabschnitt feingestaltet und um noch nicht gestaltete Elemente ergänzt. Außerdem werden alle Elemente zum Gesamtentwurf verknüpft. Im siebten und letzten Arbeitsabschnitt werden die Ausführungs- und Nutzungsangaben zur fertigungstechnischen Realisierung ausgearbeitet. Daraus resultiert die vollständige Produktdokumentation. [VDI 2221 1993, S. 9 ff.]

Pahl et al. [PAHL07, S. 193 ff.] passen den allgemeinen Produktentwicklungsprozess nach VDI 2221 [VDI 2221 1993] an die Erfordernisse des Maschinenbaus an und detaillieren diesen, siehe Bild 3.2. Dabei teilen sie den Prozess in die vier Phasen Planen und Klären der Aufgabe, Konzipieren, Entwerfen sowie Ausarbeiten ein, wobei eine scharfe Trennung nicht immer möglich ist. Die Einteilung in die Phasen hilft dabei, den Prozess zu strukturieren [PAHL07, S. 194]. Die Vorgehensweise muss problemorien-

tiert, beispielsweise durch möglichst enge Iterationsschleifen angepasst werden [PAHL07, S. 195].



**Bild 3.2:** Produktentwicklungsprozess nach Pahl et al. [PAHL07, S. 198]

In der ersten Phase nach Pahl et al. [PAHL07, S. 193 ff.] wird das Produkt geplant und die Aufgabenstellung geklärt. Aus der Informationsbeschaffung über Anforderungen, Bedingungen und deren Bedeutungen resultiert die Anforderungsliste als Ergebnis dieser Phase. Die zweite Phase, das Konzipieren, basiert auf der Anforderungsliste als Ergebnis der ersten Phase. Dabei wird zunächst das wesentliche Problem aus der Anforderungsliste identifiziert. Es werden Funktionsstrukturen aufgestellt und geeignete Wirkprinzipien gesucht. Diese werden zu Wirkstrukturen kombiniert und stellen damit die prinzipielle Lösung dar. [PAHL07, S. 195 ff.] In der Fassung des Werks von Pahl et al. von 2007 [PAHL07] wird eine ausführliche Vorgehensweise für die Konzeptphase dargestellt, die in der Version vom Jahr 2013 [FELDHUSEN13C] nicht mehr aufgezeigt wird. Der Produktentwicklungsprozess nach Pahl et al. als solcher hat sich jedoch nicht verändert [FELDHUSEN13A, S. 17]. Daher wird im Folgenden hauptsächlich auf die Quelle [PAHL07] referenziert. Das Entwerfen stellt die dritte Phase dar. Darin wird ausgehend von der Wirkstruktur bzw. der prinzipiellen Lösung gestalterisch die Baustruktur der Lösung entwickelt. Durch Bewertung der Lösungsvarianten und gegebenenfalls Kombination der besten Teillösungen wird ein endgültiger Gesamtentwurf festgelegt. [PAHL07, S. 196 f.] Das Ausarbeiten stellt die letzte Phase des Produktentwicklungsprozesses nach Pahl et al. [PAHL07] dar. Dabei werden alle Vorschriften, wie z. B. bezüglich Form, Einzelteile oder Werkstoff, für die Baustruktur des technischen Gebildes umfassend vervollständigt. Außerdem werden Unterlagen für die Herstellung, wie beispielsweise die zeichnerischen Unterlagen, erstellt. [PAHL07, S. 197]

Nachfolgend werden Unterschiede der Produktentwicklungsprozesse nach Pahl et al. [PAHL07] und VDI 2221 [VDI 2221 1993] zu weiteren Vorgehensweisen betrachtet. Damit sollen die Produktentwicklungsprozesse verglichen und derjenige ausgewählt werden, der die Basis für die zu entwickelnde Unterstützung darstellen soll, siehe Tabelle 3.1.

Roth [ROTH00, S. 24 ff.] beschreibt einen Ablaufplan zum Algorithmischen Auswahlverfahren zur Konstruktion mit Katalogen (AAK). Dieser ist in die Phasen Aufgabenformulierungsphase, Funktionelle, Prinzipielle und Gestaltende Phase unterteilt [ROTH00, S. 33 ff.]. In diesen Phasen gibt es sieben Arbeitsabschnitte und siebzehn produktdarstellende Modelle, die teilweise individuell und aufgabenspezifisch unterschiedlich verknüpft werden können [ROTH00, S. 34]. Außerdem teilt sich die gestaltende Phase noch in die geometrisch-stoffliche und die herstellungstechnische Gestaltung auf. Das Vorgehen stützt sich in allen Phasen auf Kataloge. Die vier Pha-

sen lassen sich weitestgehend den Phasen der Vorgehensweise nach Pahl et al. [PAHL07] zuordnen [ROTH00, S. 44 ff.]. Den wesentlichsten Unterschied der Vorgehensweise nach Roth [ROTH00] stellt dessen Schwerpunkt der Nutzung von Konstruktionskatalogen zur Lösungssuche dar. Roth [ROTH00, S. 42] sieht seine Vorgehensweise ebenso wie die Vorgehensweise nach Pahl et al. [PAHL07] durch die Vorgehensweise nach VDI 2221 [VDI 2221 1993] abbildbar.

Koller [KOLLER98] schlägt ein ähnliches Vorgehen vor. Er nennt grundlegende Tätigkeiten, die in jedem Vorgehensmodell der Produktentwicklung enthalten sein müssen [KOLLER98, S. 92 f.]. Diese Schritte decken sich bis auf Unterschiede in den Bezeichnungen weitestgehend mit denen der VDI 2221 [VDI 2221 1993] und damit auch mit denen nach Pahl et al. [PAHL07]. Koller [KOLLER98, S. 122 ff.] unterscheidet jedoch zwischen der Effektstruktur, in der die Effekte zur Erfüllung der Funktionen festgelegt werden, und der Effekträgerstruktur, in der festgelegt wird, wie der Effekt realisiert wird, z. B. mit welchem Werkstoff oder in welchem Raum dies geschieht [KOLLER98, S. 127]. Auch Koller bietet ähnlich zu Roth [ROTH00] Konstruktionskataloge als Unterstützung des Entwicklers an, wie z. B. einen Prinzipkatalog, in dem für Funktionen Effekte und Prinzipskizzen für deren Erfüllung aufgezeigt werden [KOLLER98, S. 555 ff.]. Rodenacker [RODENACKER70] vergleicht die Arbeit des Entwicklers mit der eines Physikers [CLAUSSEN98, S. 35]. Er beschreibt das Vorgehen des Entwicklers als umgekehrten Prozess des Physikers, der die Natur mit abstrakten Gesetzen beschreiben will, wohingegen der Entwickler aus abstrakten Forderungen reale Produkte entwickelt [CLAUSSEN98, S. 35]. Rodenacker beschreibt das Vorgehen des Entwicklers von der Funktion über die Physik zur Konstruktion [CLAUSSEN98, S. 37]. Dabei trennt er nicht, wie beispielsweise Pahl et al. [PAHL07], zwischen einem Aufgabenklären und der Entwicklung von Funktionen und deren Strukturen. Folglich ist eine Trennung zwischen einer Planungs- und Aufgabenklärungsphase und einer Konzeptphase nicht eindeutig möglich. Die drei Schritte des Vorgehensmodells nach Rodenacker [RODENACKER70, S. 38 ff.] können der Konzeptphase nach Pahl et al. [PAHL07] oder VDI 2221 [VDI 2221 1993] zugeordnet werden. Der dritte Schritt umfasst zusätzlich die Entwurfs- und Ausarbeitungsphase [RODENACKER70, S. 38 ff.].

Ponn und Lindemann [PONN11, S. 29 ff.] schlagen das problemlösungsorientierte Münchener Vorgehensmodell (MVM) mit den sieben Schritten Ziel planen, Ziel analysieren, Problem strukturieren, Lösungsideen ermitteln, Eigenschaften ermitteln, Entscheidungen herbeiführen und Zielerreichung absichern vor. Sie beschreiben diese Schritte als

eng vernetzt und nicht immer „sauber“ voneinander abgrenzbar. Sie schlagen diese Schritte zur Anwendung in Kombination mit dem produktmodellorientierte Münchener Produktkonkretisierungsmodell (MKM) vor. Dieses Modell ist den Vorgehensmodellen der VDI 2221 [VDI 2221 1993] und Pahl et al. [PAHL07] wiederum ähnlich. Das Modell umfasst den Anforderungsraum, Lösungsraum, die Funktionsebene, Wirkebene und Bauebene. Der Anforderungsraum ist hierbei parallel zum Lösungsraum, der die Funktions-, Wirk- und Bauebene umfasst. [PONN11, S. 26 ff.] Diesen Ebenen und Räumen können die Arbeitsabschnitte nach VDI 2221 [VDI 2221 1993] und die Phasen nach Pahl et al. [PAHL07] zugeordnet werden.

Auch Ehrlenspiel und Meerkamm [EHRENSPIEL13, S. 39] beschreiben ein Modell zur Beschreibung von technischen Systemen über die Funktion, Physik und Gestalt. Die Unterebenen dieses Pyramidenmodells entsprechen wieder im Wesentlichen den Zwischenergebnissen, die nach den Arbeitsabschnitten nach VDI 2221 [VDI 2221 1993] und den Phasen nach Pahl et al. [PAHL07] entstehen. Bezüglich der Grundtätigkeiten, die zu den Ergebnissen auf den verschiedenen Ebenen führen, verweisen sie auf die sieben Schritte der VDI 2221 [VDI 2221 1993] und die vier Phasen entsprechend Pahl et al. [PAHL07]. Sie betonen aber die Notwendigkeit, diese flexibel an die jeweiligen Randbedingungen anpassen zu müssen [EHRENSPIEL13, S. 258 ff.]. Trotz des an der Vorgehensweise der Systemtechnik orientierten Vorgehenszyklus, sind die Grundtätigkeiten daher ähnlich, wie die der VDI 2221 [VDI 2221 1993].

Über diese Vorgehensweisen hinaus, stellt die VDI 2206 [VDI 2206 2009] ein Vorgehen basierend auf dem Vorgehen nach VDI 2221 [VDI 2221 1993] und Pahl et al. [PAHL07] dar, das die Entwicklung von mechatronischen Produkten unter Berücksichtigung des Zusammenwirkens von verschiedenen Disziplinen unterstützt. Das Vorgehen besteht aus drei Elementen. Das V-Modell beschreibt auf der Makroebene die logische Abfolge der Teilschritte bezüglich zeitlicher Abfolge und Abstraktionsgrad. Ein serienreifes Produkt kann ein mehrfaches Durchlaufen des V-Modells erfordern. Auf der Mikroebene kann ein allgemeiner Problemlösungszyklus angewendet werden. Außerdem werden Prozessbausteine definiert, die für die wiederkehrenden Arbeitsschritte genutzt werden können. Diese Prozessbausteine sind der Systementwurf, der in seinen Unterarbeitsschritten denen der Konzeptphase nach Pahl et al. [PAHL07] entspricht, die Modellbildung und Modellanalyse sowie die Eigenschaftsabsicherung, die begleitend zu den anderen Arbeitsschritten verlaufen, der domänenspezifische Entwurf und die Systemintegration. [VDI 2206 2009]

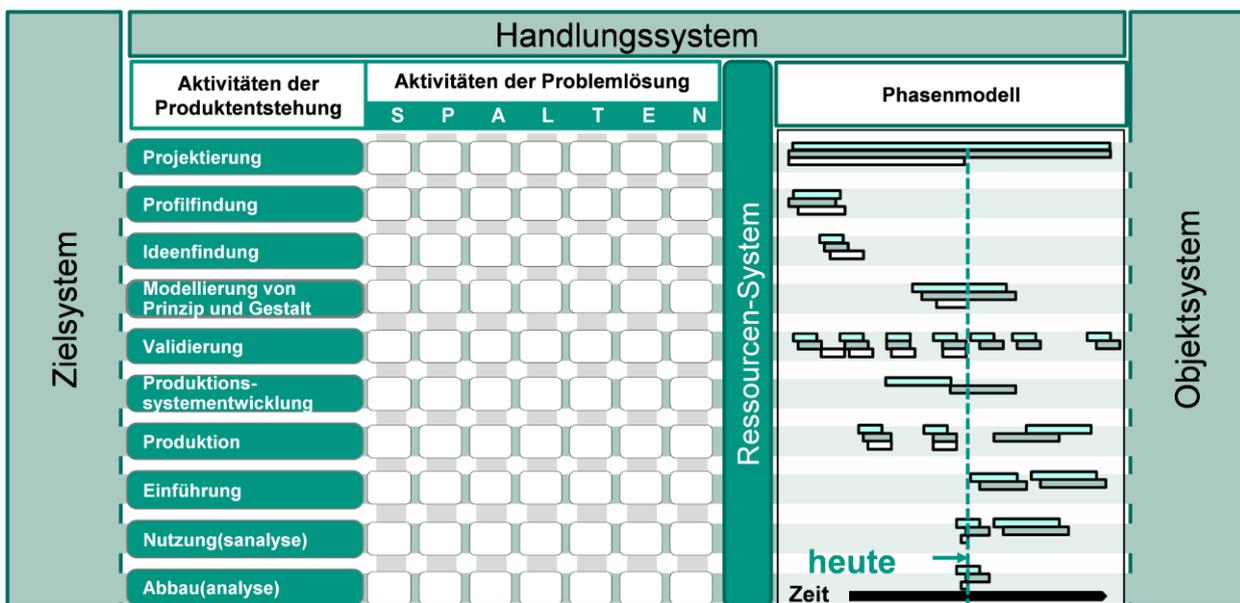
<b>VDI 2221 / VDI 2222</b> [VDI 2221 1993]	Klären und Präzisieren der Aufgabenstellung	Ermitteln von Funktionen und deren Strukturen	Suchen nach Lösungsprinzipien und deren Strukturen	Gliedern in Module	Gestalten maßgebender Module	Gestalten des gesamten Produkts	Ausarbeiten der Ausführungs- und Nutzungsangaben
<b>Pahl / Beitz</b> [PAHL07]	Planen und Klären der Aufgabe	Konzipieren		Entwerfen			Ausarbeiten
<b>Roth</b> [ROTH00]	Aufgabenformulierungsphase	Funktionelle Phase	Prinzipielle Phase	Gestaltende Phase	Geometrisch-Stoffliche Gestaltung		Herstellungstechnische Gestaltung
<b>Koller</b> [KOLLER98]	Aufgabenstellung erarbeiten	Funktions-synthese	Effektsynthese	Effekträger-synthese	Gestaltsynthese / Entwurf		Oberflächen-synthese Erproben, Untersuchen
<b>Rodenacker</b> [Rodenacker91]	Funktion		Physik	Konstruktion			
<b>Lindemann / Ponn</b> [PONN11]	Anforderungsraum	Funktions-ebene		Wirkebene			Bauebene
<b>VDI 2206</b> [VDI 2006 1997]	Systementwurf		Domänen-spezifischer Entwurf				Systemintegration

**Tabelle 3.1:** Vergleich von verschiedenen Produktentwicklungsprozessen

Die hier diskutierten Produktentwicklungsprozesse lassen sich darüber hinaus den Prozessen der Produktentstehung zuordnen, beispielsweise nach Gausemeier et al. [GAUSEMEIER13, S. 14].

Das integrierte Produktentstehungsmodell (iPeM) [ALBERS11A, S. 16 ff., ALBERS16, S. 1 ff.] stellt ein generisches Modell zur Modellierung von Produktentstehungsprozessen dar, siehe Bild 3.3. Danach ist die Produktentstehung die Transformation des Zielsystems (Ziele und Rahmenbedingungen) in ein Objektsystem (materielle und

immaterielle Erzeugnisse inkl. Produkt selbst) durch ein Handlungssystem (Aktivitäten unter Einsatz von Ressourcen, wie z. B. Mitarbeiter, Material). Die Aktivitäten werden in Form einer Matrix dargestellt und sind nicht als sequentieller Prozess zu verstehen, siehe Bild 3.3. Auf der Vertikalen sind die Aktivitäten der Produktentstehung und auf der Horizontalen die Aktivitäten der Problemlösung des „SPALTEN-Prozesses“ aufgetragen. „SPALTEN“ steht dabei als Akronym für Situationsanalyse (S), Problemeingrenzung (P), Alternative Lösungen suchen (A), Lösungsauswahl (L), Tragweitenanalyse (T), Entscheiden und Umsetzen (E) und Nachbearbeiten und Lernen (N). In diese Matrix sind Methoden und Werkzeuge integriert. Im Phasenmodell werden projektspezifische Inhalte, d. h. Aktivitäten, im zeitlichen Bezug dargestellt. Damit lassen sich individuelle, projektspezifische Prozesse durch die Aktivitäten abbilden. [ALBERS16]



**Bild 3.3:** Integriertes Produktentstehungsmodell (iPeM) [ALBERS15A, S. 7]

Damit wird in der Definition des integrierten Produktentstehungsmodells (iPeM) nach Albers et al. [ALBERS16; ALBERS11A, S. 16 ff.] die Notwendigkeit für ein angepasstes Vorgehen und kein starres befolgen der Schritte der Produktentwicklungs- sowie Produktentstehungsprozesse in der dort aufgezeigten Reihenfolge betont. Daraus lässt sich ableiten, dass die Vorgehensweisen als Prozessmodelle betrachtet werden müssen, aus denen dann für die jeweiligen Bedingungen ein passender Prozess abgeleitet werden muss.

**Definition des Prozessmodells:** *In der vorliegenden Arbeit wird unter einem „Prozessmodell“ eine generalisierte, generische Abbildung des realen*

*Produktentwicklungsprozesses verstanden. Das Prozessmodell ist aus Gründen des generischen Ansatzes dabei derart flexibel, sodass es für unterschiedliche Unternehmen (z. B. im Maschinen- und Anlagenbau) und für unterschiedliche Anwendungen (d. h. in der Neu-, Varianten- und Anpassungskonstruktion) als Vorlage dient. Diese Adaption auf den realen Anwendungsfall ist notwendig, um den Produktentwicklungsprozess den jeweiligen Rahmenbedingungen, in denen er Anwendung finden soll, anzupassen.*

Dies wird durch das integrierte Produktentstehungsmodell [ALBERS11A, S. 16 ff.] verdeutlicht, das zwischen dem Ziel- und dem Objektsystem die flexibel zu durchlaufenden Entwicklungsschritte und Phasen vorsieht, die sich an denen der anderen Produktentwicklungsmodelle orientieren [ALBERS11A, S. 16 ff.]. Dies wird auch schon von Pahl et al. gefordert [PAHL07, S. 189].

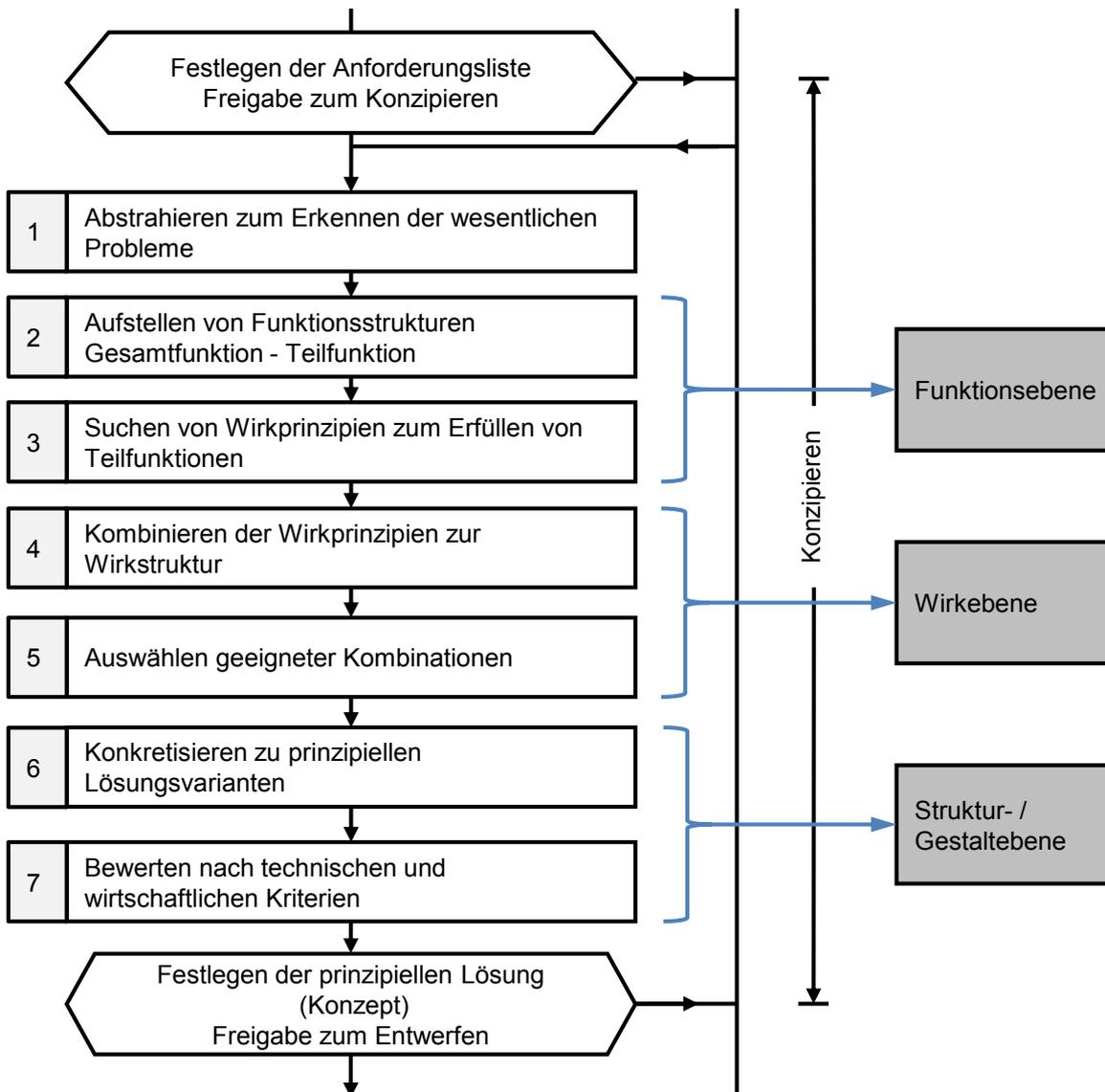
Die Analysen der unterschiedlichen Prozesse zeigen viele Ähnlichkeiten zwischen den einzelnen Vorgehensweisen bzw. Produktentwicklungsprozessen auf. Aufgrund dieser Ähnlichkeiten der verschiedenen Ansätze mit den Produktentwicklungsprozessen nach Pahl et al. [PAHL07] und der VDI 2221 [VDI 2221 1993] werden diese als Basis für die Entwicklung der Unterstützung genutzt. Da das Vorgehensmodell nach Pahl et al. [PAHL07] die umfangreicher beschriebene und für den Maschinenbau angepasste Vorgehensweise im Vergleich zur VDI 2221 [VDI 2221 1993] darstellt, obwohl sie in weniger Schritte als die VDI 2221 [VDI 2221 1993] gegliedert ist, wird dieser Prozess als Grundlage für die vorliegende Arbeit genutzt. In Schritten, in denen die VDI 2221 die detailliertere Unterstützung darstellt, wird auf diese zurückgegriffen. Damit soll auf dem Erfolg des Vorgehensmodells nach Pahl et al. [PAHL07] ergänzt durch die VDI 2221 [VDI 2221 1993] aufgebaut werden, obwohl weitere auch internationale Modelle von Produktentwicklungsprozessen existieren, wie z. B. nach Suh [SUH01].

Über die Unterschiede und Ergänzungen des Produktentwicklungsprozesses verschiedener Autoren hinaus wird die Phase des Konzipierens nachfolgend detaillierter dargestellt. Auch die Konzeptphase wird um Ansätze verschiedener Autoren ergänzt.

## **3.2 Konzipieren**

Pahl et al. [PAHL07] beschreiben die Konzeptphase ausführlich, wie in Bild 3.4 links gezeigt. Sie heben die Wichtigkeit der Konzeptphase hervor, da die nachfolgende Entwurfs- oder Ausarbeitungsphase grundlegende Mängel eines Lösungsprinzips nicht

ausgleichen kann [PAHL07, S. 196]. Die beschriebenen Schritte entsprechen denen der VDI 2221 [VDI 2221 1993].



**Bild 3.4:** Schritte des Konzipierens [PAHL07, S. 232] und Ebenen der Auswahl von Lösungen [POSNER14A, S. 354]

Die Konzeptphase basiert auf der Anforderungsliste, welche in der vorherigen Phase, der Planungsphase, erstellt wird. Der erste Schritt der Konzeptphase ist die Abstraktion des Problems, um das wesentliche Problem herauszuarbeiten. Als nächstes wird die Funktionsstruktur entwickelt, welche mit der Gesamtfunktion beginnt und mit dem Herunterbrechen in Teilfunktionen endet. Da verschiedene Kombinationen von Teilfunktionen möglich sind, um die Gesamtfunktion zu erfüllen, können meist mehrere Funktionsstrukturen entwickelt werden. Im dritten Schritt werden Wirkprinzipien zur Erfüllung der Teilfunktionen gesucht. Oft existieren mehrere Wirkprinzipien, die für die Erfüllung einer Teilfunktion genutzt werden können. Im vierten Schritt werden dann die

Wirkprinzipien miteinander zu Wirkstrukturen kombiniert, um alle Teilfunktionen und damit die Gesamtfunktion des Produkts zu erfüllen. Zur Unterstützung schlagen Pahl et al. [PAHL07] den Morphologischen Kasten vor, in dem die Teilfunktionen in den Zeilen und die Wirkprinzipien in den Spalten dargestellt werden. Im Morphologischen Kasten werden die Lösungen kombiniert. Dabei sind wiederum mehr als eine Kombination der Wirkprinzipien und mehr als eine Wirkstruktur möglich. Im fünften Schritt werden die bevorzugten Kombinationen ausgewählt. Danach werden die Lösungsvarianten weiter detailliert, um die Bewertung im letzten Schritt der Konzeptphase zu ermöglichen. [PAHL07]

Nachfolgend werden die Ebenen näher betrachtet, in denen Lösungsalternativen gefunden werden können, siehe Bild 3.4 rechts. Diese Ebenen sind die Funktions-, die Wirk- und die Struktur- bzw. Gestaltebene, in der die Lösungen zu bewertbaren Lösungen konkretisiert werden und die nach Ponn und Lindemann [PONN11, S. 33] als Bauebene bezeichnet wird. Darüber hinaus müssen immer dann Lösungen ausgewählt werden, wenn mehr Lösungen bestehen, als weiterverfolgt werden können [PAHL07, S. 162]. Wie diese Bewertung in der Konzeptphase auf verschiedenen Abstraktionsebenen durchgeführt wird, ist ebenfalls Inhalt der nachfolgenden Abschnitte.

### 3.2.1 Funktionsebene

Der gewollte Zusammenhang zwischen Eingangs- und Ausgangsgrößen eines Systems wird als Funktion bezeichnet. Die Eingangsgrößen werden durch die Funktion in die Ausgangsgrößen mit dem Ziel überführt, eine Aufgabe zu erfüllen. Die Funktion gibt damit die Eigenschaftsänderungen der Systemgrößen an. Die Beschreibung von Funktionen kann auf unterschiedlichen Abstraktionsniveaus ausgeführt werden. Nach Pahl et al. [PAHL07, S. 247 f.] können jedoch alle Funktionen auf fünf allgemein anwendbare Funktionen (AAF) zurückgeführt bzw. in diese zerlegt werden. Zusätzlich sind noch die Umkehrungen bzw. Negationen dieser fünf Funktionen zu berücksichtigen. Diese elementaren, allgemein anwendbaren Funktionen beeinflussen jeweils eines der fünf Merkmale: Art, Größe, Anzahl, Ort und Zeit, wie Tabelle 3.2 zeigt. [PAHL07, S. 242 ff.]

Merkmal	Art	Größe	Anzahl	Ort	Zeit
Allgemein anwendbare Funktion	Wandeln	Ändern	Verknüpfen	Leiten	Speichern

**Tabelle 3.2:** Allgemein anwendbare Funktionen [PAHL07, S. 48]

Die Funktionsstruktur besteht aus der Verknüpfung der Teilfunktionen zur Erfüllung der Gesamtfunktion. Es muss dabei beachtet werden, dass einige Teilfunktionen vor der

Ausführung anderer Teilfunktionen erfüllt sein müssen. Dies stellt Restriktionen bei der Erstellung der Funktionsstruktur dar. Das Aufgliedern und Strukturieren der Gesamtfunktion in Teilfunktionen führt dazu, dass die Lösungssuche vereinfacht wird. Die Suche nach Lösungen für die Erfüllung der weniger komplexen Teilfunktionen ist wesentlich einfacher als die Suche nach einer Lösung, die die komplexere Gesamtfunktion erfüllt. [PAHL07, S. 243 f.] Neben der in dieser Arbeit betrachteten umsatzorientierten Funktionsstruktur wird noch zwischen der relationsorientierten Funktionsstruktur, bei der zwischen schädlichen und nützlichen Funktionen unterschieden wird, und der nutzerorientierten Projektion, bei der zwischen Gebrauchs- und Geltungsfunktionen unterschieden wird, differenziert [PONN11, S. 66].

Nachdem basierend auf der Anforderungsliste das wesentliche Problem mittels Abstraktion beschrieben wurde, wird darauf aufbauend die Funktionsstruktur entwickelt. Der Hauptumsatz, die Nebenumsätze sowie die Ein- und Ausgangszustände werden bestimmt. Die Gesamtfunktion wird so festgelegt, dass sie das wesentliche Problem löst und die Eigenschaftsänderungen der Hauptumsätze bewirkt. Die Gesamtfunktion wird danach in Teilfunktionen aufgegliedert. Daraus wird eine Minimalfunktionsstruktur aufgestellt, die anschließend variiert wird, um alternative Lösungen zu finden [VDI 2221 1993, S. 18].

Pahl et al. [PAHL07, S. 253] schlagen für die Variation der Funktionsstruktur das Zerlegen, Zusammenfassen, Ändern der Reihenfolge und Ändern der Schaltungsart (Reihenschaltung, Parallelschaltung, Brückenschaltung) von Teilfunktionen vor. Außerdem kann das Verlegen der Systemgrenze zur systematischen Variation genutzt werden [PAHL07, S. 253]. Ponn und Lindemann [PONN11, S. 78] nennen das Weglassen, Hinzufügen, Vertauschen, in Reihe Schalten, parallel Schalten, in Kreis Schalten, Zusammenfassen und Aufteilen von Teilfunktionen, um die Funktionsstrukturen zu variieren. Auch Roth [ROTH00, S. 81 ff.] beschreibt die Variation der Erstellung und Variation der Funktionsstrukturen umfangreich, dies deckt sich aber mit den Ansätzen nach Pahl et al. [PAHL07]. Danach wird die vorläufig günstigste Funktionsstruktur für das weitere Vorgehen festgelegt [VDI 2221 1993, S. 18].

### **3.2.2 Wirkebene**

Zur Erfüllung der Funktionen beinhalten die Wirkstrukturen physikalische Effekte, materialspezifische und geometrische Eigenschaften. Es ist auch möglich, dass eine Wirkstruktur mehrere physikalische Effekte benötigt, um eine Funktion zu erfüllen. Die

materialspezifischen Eigenschaften beinhalten eine generelle Vorstellung zur Art des Materials. Dies bedeutet, dass die Haupteigenschaften des Materials identifiziert werden müssen, wie z. B. fest, flüssig oder gasförmig. [PAHL07, S. 53 f., S. 255 f.]

Die geometrischen Eigenschaften werden über den Wirkort, die Wirkgeometrie und die Wirkbewegungen beschrieben. Die Wirkgeometrie wird durch die Gestaltung der Wirkoberfläche oder des Wirkvolumens beschrieben, welche unter Berücksichtigung und Ermittlung der Art, Form, Position, Größe und Anzahl variiert werden können. Die Wirkbewegungen werden über die Eigenschaften Art, Form, Richtung, Betrag und Anzahl definiert. Des Weiteren kann durch die Änderung dieser Eigenschaften das Wirkprinzip variiert werden. Die Kombination aller Wirkprinzipien, welche zur Erfüllung aller Funktionen im Produkt beitragen, wird Wirkstruktur genannt. Folglich beschreibt die Wirkstruktur das Zusammenspiel der Wirkprinzipien basierend auf der Funktionsstruktur. Die Wirkstrukturen können durch Schaltpläne, Flussbilder oder Strichbilder dargestellt werden. [PAHL07, S. 53 ff.]

Auch auf der Wirkebene schlagen Pahl et al. [PAHL07, S. 258] eine Variation von physikalischem Effekt sowie geometrischen und stofflichen Merkmalen vor. Köckerling [KÖCKERLING03] schlägt eine Methode zur Entwicklung und Optimierung der Wirkstruktur mechatronischer Produkte vor.

### **3.2.3 Struktur- und Gestaltebene**

Zum Abschluss der Festlegung der Lösung auf der Wirkebene werden die bevorzugten Wirkstrukturen ausgewählt und zu Lösungsvarianten weiter detailliert. Die Detaillierung ist notwendig, um die Lösungsvarianten im letzten Schritt der Konzeptphase bezüglich technischer und wirtschaftlicher Kriterien bewerten zu können. [PAHL07, S. 265 ff.] Es wird jedoch nicht beschrieben, wie diese Detaillierung durchgeführt oder unterstützt werden kann. Die Festlegung und die grobe Gestaltung dieser Struktur, die aus der Wirkstruktur resultiert, legen jedoch wichtige Eigenschaften des Produkts fest. Aufgrund des Übergangs von der Struktur in die Gestalt des Produkts wird diese Ebene in der vorliegenden Arbeit als Struktur- und Gestaltebene bezeichnet und sowohl die Konkretisierung der Struktur als auch der Gestalt betrachtet. Vor allem für den Leichtbau ist die kraftflussgerechte Gestaltung von besonderer Bedeutung. Weder Pahl et al. [PAHL07], noch andere Autoren geben eine Unterstützung dafür an, diese Strukturen auf diesem hohen Abstraktionsgrad schon unter Berücksichtigung von Gerechtheiten, wie z. B. der Leichtbau-Gerechtigkeit, zu entwickeln.

### 3.2.4 Bewertung und Auswahl in der Konzeptphase

Das Vorgehen in der Konzeptphase nach Pahl et al. [PAHL07, S. 231 ff.] berücksichtigt verschiedene Abstraktionsebenen, wie z. B. die Funktions- oder Wirkebene, in welchen mehrere unterschiedliche Lösungen möglich sind. Wie zu Beginn des Abschnitts 3.2 diskutiert, ist die Entwicklung von mehreren Lösungen auf Funktions-, Wirk- und Struktur- / Gestaltebene nach Bild 3.4 möglich. Daher kann die Anzahl an möglichen Lösungen stark anwachsen und somit können nicht alle Lösungen untersucht, bewertet und weiterverfolgt werden [HELLER13, S. 154; ROTH00, S. 50]. Das bedeutet, dass am Ende dieser Schritte eine Bewertung und Auswahl erforderlich ist, wenn zu viele Lösungen existieren, um weiterverfolgt zu werden [PAHL07, S. 162]. In der Literatur gibt es verschiedene Methoden zur Bewertung und Auswahl von Lösungen. Pahl et al. [PAHL07] schlagen zum Beispiel die systematische Auswahlliste, die auf dem Ansatz basiert, ungeeignete Lösungen auszuschließen und bessere zu bevorzugen, oder die technische und wirtschaftliche Bewertung vor. Birkhofer [BIRKHOFER80, S. 124 ff.] schlägt das Ausschließen widersprüchlicher und mit der Aufgabenstellung unverträglicher Varianten vor. Außerdem empfiehlt er die Bewertung von Varianten auf Teilaufgabenstrukturebene durch Vorgriff auf Eigenschaften potenzieller Lösungen. Dies bedeutet, dass wichtige Teillösungen konkretisiert werden, um deren Eigenschaften bewerten und für eine Auswahl nutzen zu können.

Köckerling [KÖCKERLING03, S. 65 ff.] setzt in seinem Vorgehen zur Entwicklung und Optimierung der Wirkstruktur mechatronischer Produkte den Schwerpunkt, im Gegensatz zu dem Vorgehen von Pahl et al. [PAHL07], auf die Untersuchung und Bewertung der Verträglichkeiten und gegenseitigen Einflüsse der Teillösungen bzw. Wirkprinzipien. Er baut damit auf der Verträglichkeitsmatrix nach Birkhofer [BIRKHOFER80] auf. Ponn und Lindemann [PONN11, S. 119 ff.] schlagen darüber hinaus eine Reduktionsstrategie in Anlehnung an Birkhofer [BIRKHOFER80] vor. Diese umfasst das Priorisieren und Anordnen von Teilfunktionen nach ihrer Wichtigkeit, das Zurückstellen weniger lösungsbestimmender Teilfunktionen, das Anordnen von Teillösungen nach Eignung, das Zurückstellen von weniger geeigneten Lösungen für die erste Kombination, das Zusammenfassen von Lösungen der gleichen Klassen (z. B. der gleichen Energieart) und das Priorisieren von Lösungen der gleichen Klasse für eine erste Kombination.

Neben dem Vorgehen zur Bewertung und Auswahl stellen jedoch immer Informationen über die Teillösungen die Basis für eine Bewertung und Auswahl dar. Konstruktionskataloge, wie z. B. von Roth [ROTH00], können als Informationsquellen für bereits

bekannte Teillösungen genutzt werden. Dabei ist jedoch zu beachten, dass die Randbedingungen, in denen ein Wirkprinzip zum Einsatz kommt, wie beispielsweise eine geforderte Effektgröße, kontextabhängig sind und großen Einfluss auf die Eignung eines Prinzips haben. [PONN11, S. 106]

### **3.3 Einordnung der Leichtbau-Produktentwicklung in das Design for X / Design to X**

Die Literatur der Produktentwicklung schlägt zahlreiche Gerechtheiten vor, wie z. B. die Recyclinggerechtheit oder Montagegerechtheit [HUANG96; MEERKAMM94; PAHL07; PONN11; HOLT09]. Sowohl im Englischen als auch im Deutschen haben sich dafür die Begriffe Design for X (DfX) und Design to X (DtX) durchgesetzt. Diese Gerechtheiten sind beispielsweise als Gestaltungsrichtlinien umgesetzt [PAHL07, S. 393 ff.]. Das „X“ steht dabei für verschiedene Sichtweisen der Methoden auf einzelne Eigenschaften, Merkmale oder Gruppen dieser Eigenschaften oder Merkmale [HOLT09, S. 123]. Verschiedene Autoren, wie beispielsweise Meerkamm [MEERKAMM94, S. 194 ff.; MEERKAMM05, S. 306 ff.], Hein [HEIN94, S. 145 ff.], Weber [WEBER05, S. 9 ff.; WEBER07, S. 85 ff.], Huang [HUANG96, S. 1 ff.], Ehrlenspiel [EHRLENSPIEL13, S. 287 ff., S. 353 ff.] sowie Ponn und Lindemann [PONN11, S. 29 f., S. 181 ff.] definieren und strukturieren diesen Methodenbereich unterschiedlich und geben auch unterschiedliche Ziele und Überblicke dafür an. Die Methoden zur Unterstützung des DfX / DtX können nach Holt [HOLT09, S. 127 f.] in vier Gruppen eingeteilt werden: Qualitative Richtlinien, Metriken (um die Produktqualität bezüglich des zu erfüllenden Kriteriums zu messen), Methoden (die die Ausarbeitung verschiedener Ausführungsmöglichkeiten und prinzipieller Lösungsansätze in der zu betrachtenden DfX-Lebensphase unterstützen) und Methoden der Rechnerunterstützung (die rechnergestützt die drei anderen Ansätze umsetzen). Ziele der DfX / DtX-Unterstützung sind beispielsweise durch Einsparung von Verbesserungsiterationen bezüglich der jeweiligen Eigenschaft oder des jeweiligen Merkmals auch Entwicklungszeit und -kosten einzusparen. Außerdem soll für die Wichtigkeit der jeweiligen Eigenschaft oder des jeweiligen Merkmals sensibilisiert werden. Diese Gerechtheiten werden aber meist erst in der Entwurfs- oder Ausarbeitungsphase des Produktentwicklungsprozesses berücksichtigt [POSNER13B, S. 2]. Eine Berücksichtigung der Leichtbau-Gerechtheit wird nicht unterstützt.

Aus diesen Gerechtheiten heraus hat sich auch eine Schnittmenge aus Leichtbautechnik und allgemeiner Konstruktionsmethodik entwickelt, die die Massengerechtheit bzw.

Leichtbaugerechtheit (Design for Lightweight) zum Ziel hat. Diese Schnittmengen aus Konstruktionsmethodik und Leichtbaugerechtheit werden im nachfolgenden Kapitel analysiert.

### **3.4 Zusammenfassung**

In diesem Kapitel wurden verschiedene Produktentwicklungsprozesse und Gemeinsamkeiten sowie Unterschiede dieser Prozesse vorgestellt. Aufgrund der identifizierten großen Gemeinsamkeiten mit anderen Prozessen wurde der Produktentwicklungsprozess nach Pahl et al. [PAHL07] als Basis für die vorliegende Arbeit ausgewählt.

Die Konzeptphase, die den Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit darstellt, und deren Abstraktionsebenen (Funktions-, Wirk-, Struktur- und Gestaltebene) sowie die Bewertung und Auswahl dieser Lösungen auf den verschiedenen Konkretisierungsebenen wurden näher betrachtet. Wie die Methoden dieser Ebenen zielgerichtet in der Leichtbau-Produktentwicklung eingesetzt werden können, ist nicht berücksichtigt. So stellt sich für den Leichtbau die Frage, wie die günstigste Funktionsstruktur aus der Lösungsvielfalt der Funktionsstrukturen ausgewählt und welche Kriterien hierfür verwendet werden können. Hierfür wird keine Lösung angegeben oder unterstützt. Mit welchem Vorgehen die Funktionsstrukturen gezielt variiert werden können, um das Potenzial der Lösungen bezüglich einer Gerechtheit, wie z. B. der Leichtbaugerechtheit, gesteigert werden kann, wird ebenfalls in der Literatur nicht behandelt. Auch auf der Wirkebene schlagen Pahl et al. [PAHL07, S. 258] eine Variation von physikalischem Effekt sowie geometrischen und stofflichen Merkmalen vor, ohne diese näher zu beschreiben oder zu unterstützen. Köckerling [KÖCKERLING03] schlägt eine Methode zur Entwicklung und Optimierung der Wirkstruktur mechatronischer Produkte vor. Die Variation der Wirkstruktur wird dabei jedoch nicht gezielt unterstützt. Um Lösungen nach ihrem Leichtbaupotenzial bewerten zu können, müssen unabhängig von der gewählten Bewertungsmethode die Informationen darüber gegeben sein, wie viel Masse zur Erfüllung der verschiedenen Funktionen benötigt wird. Es gibt keine methodische Unterstützung, um diese Informationen zu erarbeiten und dadurch die Auswahl vorzubereiten.

Wie in Abschnitt 2.3 bereits festgehalten, können alle Leichtbauansätze den Leichtbau-Strategien zugeordnet werden. Daher werden nachfolgend diese Leichtbau-Strategien dem Produktentwicklungsprozess nach Pahl et al. [PAHL07] zugeordnet, um weitere Erkenntnislücken im Stand der Technik zu analysieren.

## **4 Konkretisierung der Zielsetzung und Vorgehen**

In diesem Kapitel wird zunächst der Stand der Forschung analysiert, um Erkenntnislücken und den Forschungsbedarf herauszuarbeiten (siehe Abschnitt 4.1). Darauf aufbauend wird in Abschnitt 4.2 die Zielsetzung konkretisiert und die in Abschnitt 4.3 beschriebenen Forschungsfragen sowie das weitere Vorgehen der Arbeit zur Erreichung der Zielsetzung dargestellt.

### **4.1 Analyse des Stands der Forschung**

Zur Analyse der Erkenntnislücken und des Forschungsbedarfs werden in Abschnitt 4.1.1 die Leichtbau-Strategien dem Produktentwicklungsprozess zugeordnet. Nach Klärung der zu adressierenden Strategien werden in Abschnitt 4.1.2 Anforderungen ermittelt, die an eine Vorgehensweise für das leichtbaugerechte Konzipieren gestellt werden müssen. Anhand dieser Anforderungen werden die im Stand der Forschung beschriebene Unterstützung für das leichtbaugerechte Entwickeln bewertet und damit die Forschungslücken geklärt.

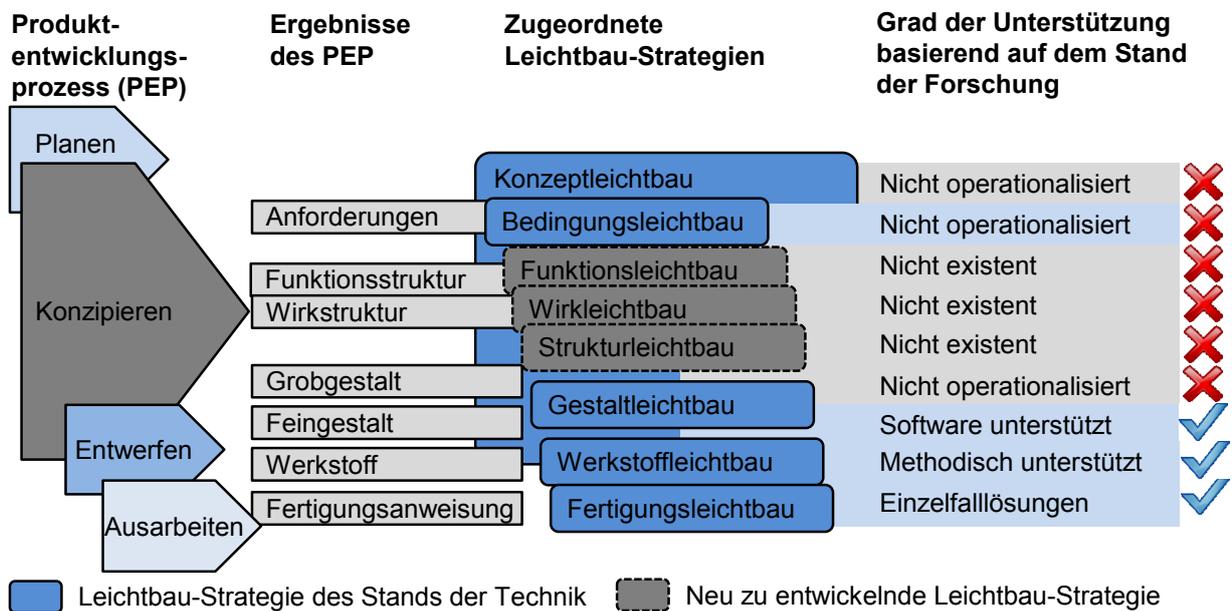
#### **4.1.1 Erkenntnislücken in den Leichtbau-Strategien**

In Bild 4.1 sind dem Produktentwicklungsprozess (erste Spalte) und dessen Ergebnissen (zweite Spalte) die Leichtbau-Strategien so zugeordnet, wie diese Strategien die jeweiligen Prozessschritte und deren Ergebnisse beeinflussen (dritte Spalte), basierend auf den Erkenntnissen aus Kapitel 2.3. Außerdem ist diesen Strategien jeweils eine Einschätzung des Autors dieser Arbeit zugeordnet (vierte Spalte), inwiefern deren Umsetzung basierend auf dem Stand der Forschung unterstützt wird. Zunächst werden nachfolgend die Zuordnung und Einschätzung die Leichtbau-Strategien des Stands der Technik diskutiert.

Der Bedingungsleichtbau kann der Planungsphase und dem Übergang zur Konzeptphase zugeordnet werden, da bei dieser Strategie Rahmenbedingungen und Anforderungen hinterfragt werden, die in diesen Phasen erarbeitet und festgelegt werden. Der Bedingungsleichtbau wird über die begriffliche Beschreibung hinaus nicht durch eine methodische Unterstützung operationalisiert.

Wie in Abschnitt 2.3 beschrieben, kann der Konzept- oder auch Systemleichtbau als übergeordnete Leichtbau-Strategie betrachtet werden. Somit könnte der Systemleichtbau allen Phasen des Produktentwicklungsprozesses zugeordnet werden. Da in der Konzeptphase die wesentlichen Eigenschaften des Systems und deren Umsetzung in

Funktionen, Wirkprinzipien und Strukturen festgelegt werden, beschreibt der Begriff Konzeptleichtbau, der synonym für Systemleichtbau verwendet wird [KOPP11, S. 63], das Ziel dieser Strategie besser. Der Konzeptleichtbau kann damit durch seine Inhalte der Bezeichnung entsprechend der Konzeptphase zugeordnet werden. In Bild 4.1 ist diese Zuordnung dargestellt. Verschiedene Autoren definieren den Begriff des Konzeptleichtbaus und heben dessen Bedeutung hervor [DRECHSLER07, S. 11; HALDENWANGER97, S. 8; KOPP11, S. 63; SOBEK07, S. 74]. Es fehlt jedoch eine Handlungsanweisung und damit die Operationalisierung der Strategie, die Entwickler dabei unterstützt, wie diese Strategie angewendet und umgesetzt werden kann.



**Bild 4.1:** Zuordnung der Leichtbau-Strategien zum Produktentwicklungsprozess und Lücken in den Leichtbau-Strategien

Die grobe Gestaltung der Baugruppen und des Produkts wird bereits durch Festlegung einer Wirkstruktur und durch eine Konkretisierung der Lösung, um diese bewertbar zu machen, in der Konzeptphase durchgeführt [PAHL07, S. 265 ff.]. Die Feingestaltung der Formen der Bauteile findet jedoch erst in der Entwurfsphase statt. Verschiedene Autoren, wie z. B. Klein [KLEIN13] und Wiedemann [WIEDEMANN07], geben umfangreiche Berechnungsmöglichkeiten für Leichtbau-Strukturen des Gestaltleichtbaus an. Darüber hinaus wird dem Gestaltleichtbau, auch als Formleichtbau bezeichnet, die Topologieoptimierung, die mit Software, wie z. B. TOSCA [DASSAULT15] oder SKO [SACHS15] unterstützt wird, zugeordnet. Diese Unterstützung kann ebenfalls der Feingestaltung zugewiesen werden. Die Entwicklung einer ersten Produktgrobstruktur oder Produktgrobgestalt, bei der Rechnerunterstützung aufgrund der mangelnden Informationen

dieses frühen Lösungsstadiums kaum möglich ist, wird nicht unterstützt. Des Weiteren werden von Klein [KLEIN13] Gestaltungsprinzipien bzw. Gestaltungsrichtlinien für das leichtbaugerechte Gestalten vorgeschlagen. Es wird jedoch keine Unterstützung angeboten, wann welche dieser Regeln eingesetzt werden soll.

Die Strategie des Werkstoffleichtbaus wird in Bild 4.1 der Entwurfsphase zugeteilt. Dabei ist jedoch zu beachten, dass die Annahme einer Werkstoffart bzw. Werkstoffkategorie meist bereits in der Konzeptphase notwendig ist, da diese Werkstoffgrobfestlegung durch das Wirkprinzip und/oder durch die daraus resultierende Größenordnung der Kräfte bedingt wird [PAHL07, S. 195 f.]. Außerdem ist bei der Festlegung der Grobgestalt die Werkstoffart (z. B. Stahl oder kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff) zu berücksichtigen und diesem entsprechend gerecht zu konstruieren. Die endgültige Werkstoffauswahl wird erst in der Entwurfsphase getroffen [PAHL07, S. 305]. Für die Werkstoffauswahl unter Leichtbaugesichtspunkten bietet Ashby [ASHBY05, S. 79 ff.] bereits eine Methodik an. Das Vorgehen umfasst auch die systematische Auswahl der Fertigungsverfahren. Damit wird diese Strategie in Bild 4.1 als methodisch unterstützt bewertet. In der Literatur werden individuelle Lösungen für den Fertigungsleichtbau sowohl für die Fertigungsverfahren als auch für die Verbindungstechniken aufgezeigt [HENNING11].

Auf Ebene der Funktionsstruktur, Wirkstruktur und Struktur wird keine methodische Unterstützung für das leichtbaugerechte Entwickeln angeboten. In diesen Schritten werden jedoch umfangreiche Eigenschaften des Produkts festgelegt und damit auch Entscheidungen getroffen, die wesentlich die spätere Masse des Produkts beeinflussen. Daher sind in Bild 4.1 auf diesen Ebenen die neuen Strategiebegriffe Funktions-, Wirk- und Strukturleichtbau ergänzt. Es besteht folglich eine Lücke im Stand der Forschung im Bereich des leichtbaugerechten Entwickelns in der durchgängigen methodischen Unterstützung zur systematischen Leichtbau-Produktentwicklung in der Konzeptphase. Deshalb und weil Konzept- und Bedingungsleichtbau nicht methodisch unterstützt werden, wird in der vorliegenden Arbeit eine Methodik für diese frühen Phasen entwickelt.

#### **4.1.2 Anforderungen an eine Vorgehensweise zum leichtbaugerechten Konzipieren**

Um eine zielorientierte Entwicklung durchführen zu können, schlagen verschiedene Autoren vor, zunächst das Ziel der Entwicklung in Form von Anforderungen zu klären

[PAHL07; PONN11]. Dieser Schritt wird in diesem Abschnitt für die Entwicklung der Methodik, die in dieser Arbeit das gewünschte Ergebnis darstellt, durchgeführt.

Aus der Zielsetzung der Arbeit lässt sich ableiten, dass es das übergeordnete Ziel ist, die Leichtbau-Entwicklung und dabei speziell die Konzeptphase der Leichtbau-Produktentwicklung methodisch zu unterstützen. Daraus leiten sich die Anforderungen A1 und A2 ab, siehe Tabelle 4.1. Aus der durchgängigen Betrachtung der Konzeptphase unter Leichtbaugesichtspunkten lassen sich basierend auf den Ansätzen von Ponn und Lindemann [PONN11, S. 209 ff.] die Anforderungen A3 bis A9 ableiten. Diese beschreiben die Berücksichtigung von Leichtbau auf allen Abstraktionsebenen der Konzeptphase. Damit soll die Erkenntnislücke in den Leichtbau-Strategien, die im vorherigen Abschnitt beschrieben wurde, durch die zu entwickelnde Vorgehensweise geschlossen werden. Durch diese Anforderungen wird die Entwicklung von Leichtbau-Lösungen gefordert, jedoch muss aus der daraus gegebenenfalls resultierenden Lösungsvielfalt auch eine Selektion der Lösungen, die weiterverfolgt werden sollen, stattfinden. Da auf diesem Abstraktionsgrad jedoch keinerlei Informationen über das Leichtbaupotenzial der Lösungen vorliegen, muss auch diese Potenzial-Bewertung unterstützt werden. Daraus resultiert Anforderung A10.

Anforderung	Beschreibung
A1	Unterstützung der Leichtbau-Entwicklung
A2	Unterstützung der durchgängigen Berücksichtigung von Leichtbau in der Konzeptphase
A3	Unterstützung der Analyse von Anforderungen, Funktionen, deren Wichtigkeit, der dafür aufgewendeten Masse und des Leichtbaupotenzials
A4	Unterstützung der Entwicklung einer Leichtbau-Lösungsvielfalt auf allen Abstraktionsebenen der Konzeptphase
A5	Unterstützung der Leichtbau-Lösungsentwicklung auf Funktionsebene
A6	Unterstützung der Leichtbau-Lösungsentwicklung auf Wirkebene
A7	Unterstützung der Leichtbau-Lösungsentwicklung auf Strukturebene
A8	Unterstützung der Leichtbau-Lösungsentwicklung auf Gestaltebene
A9	Unterstützung bei der Analyse bestehender Lösungen auf Gestaltebene
A10	Unterstützung der Bewertung abstrakter Lösungen (auf Funktions- und Wirkebene) bezüglich deren Leichtbaupotenzials

**Tabelle 4.1:** Anforderungen an eine Methodik zum leichtbaugerechten Konzipieren

#### 4.1.3 Lücken in den Vorgehensweisen der methodischen Produktentwicklung

Anhand der in Abschnitt 4.1.2 definierten Anforderungen wird die methodische Unterstützung, die im Stand der Forschung in den Kapiteln 2 und 3 beschrieben wurden, bewertet. Tabelle 4.2 stellt die Ergebnisse der Bewertung dar. Die Einschätzungen der Bewertung basieren auf den Recherchen und Analysen der Literatur des Stands der

Forschung. Dabei werden nur die Anforderungen als erfüllt bewertet, für die eine vollständige und systematische Unterstützung der Entwickler gegeben und ausführlich beschrieben ist.

Die Vorgehensweisen des Stands der Forschung zeigen, dass es verschiedene Methoden und Ansätze gibt, um die Leichtbau-Entwicklung zu unterstützen. Jedoch existiert keine Methode, die eine durchgängige Berücksichtigung von Leichtbau bereits in der Konzeptphase unterstützt (siehe Anforderung A2). Die Wertanalyse Gewicht stellt den Ansatz dar, die Wertanalyse auf die Massenreduktion anstatt der Kostenreduktion anzuwenden. Da diese jedoch weder ein vollständig operationalisiertes Vorgehen darstellt, noch den Ansatz des Target Costings der Wertanalyse berücksichtigt, stellt dies Potenzial für eine Weiterentwicklung dar. Auf der Abstraktionsebene der Funktions- oder Wirkstruktur werden Leichtbauaspekte nicht berücksichtigt (siehe Anforderungen A5 und A6). Auf dieser Produktkonkretisierungsebene werden bereits wesentliche Eigenschaften des Produkts festgelegt. Damit werden auch wesentliche Entscheidungen bezüglich der später benötigten Masse getroffen, um diese Funktionen und Wirkprinzipien umzusetzen. Durch die fehlende Berücksichtigung von Leichtbau bleibt hierbei Leichtbaupotenzial ungenutzt.

Mittels umfangreicher Berechnungsverfahren [KLEIN13, S. 74 ff.; WIEDEMANN07, S. 22 ff.] und rechnergestützter Topologieoptimierung [ALBERS11B, S. 77 ff.] kann die leichtbaugerechte Gestaltung, wie z. B. minimale Querschnitte, für Bauteile berechnet werden. Diese Berechnungen sind jedoch zeit- und kostenintensiv. Außerdem werden für sie umfangreiche Informationen, wie beispielsweise Kräfte, benötigt, die in der Konzeptphase oft nicht bekannt sind. Die Denkwerkzeuge nach der Natur [MATTHECK10] stellen einfache Regeln zum kraftflussgerechten Konstruieren dar. Diese Regeln sind auf rein statische Fälle beschränkt und berücksichtigen keine Bauraumbeschränkungen. Daher bieten diese Methoden Weiterentwicklungspotenzial, um die Entwicklung von leichtbaugerechten Strukturen bereits auf dem hohen Abstraktionsgrad der Konzeptphase direkt aufbauend auf den Wirkstrukturen unterstützen zu können.

Des Weiteren wird die Entwicklung von Leichtbau-Lösungen auf Gestaltebene durch die Leichtbau-Prinzipien, die Topologieoptimierungssoftware und die Denkwerkzeuge nach der Natur unter vorhergenannten Einschränkungen unterstützt. Jedoch unterstützt keine Methode, wann und welche Leichtbau-Prinzipien angewendet oder welche Strukturen mithilfe von Topologieoptimierungssoftware entwickelt werden sollen.

Anforderungen		Methoden													
		Wertanalyse [VDI 2800 2010]	Wertanalyse Gewicht [FEYERABEND91]	Funktionsstruktur [PAHL07]	Wirkstruktur [PAHL07]	Leichtbau-Prinzipien [KLEIN13]	Topologieoptimierung [MATTHECK10]	Produktentwicklungsprozesse nach Pahl et al. [PAHL07]	Produktentwicklungsprozess nach Klein [KLEIN13]	Vorgehensstrategie nach Friedrich [FRIEDRICH13]	Contact & Channel <sup>2</sup> – Approach [ALBERS16]	Denkwerkzeuge nach der Natur [MATTHECK10]	Gewichtsoptimierte Produkte nach Ponn und Lindemann [PONN11]	Grad der Erfüllung durch die geeignetste Methode	
A1	Unterstützung der Leichtbau-Entwicklung	■	◐	○	○	◐	◐	○	◐	◐	◐	◐	◐	◐	◐
A2	Unterstützung der durchgängigen Berücksichtigung von Leichtbau in der Konzeptphase	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
A3	Unterstützung der Analyse von Anforderungen, Funktionen, deren Wichtigkeit, der aufgewendeten Masse und des Leichtbaupotenzials	◐	◐	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	◐
A4	Unterstützung der Entwicklung einer Leichtbau-Lösungsvielfalt auf allen Abstraktionsebenen der Konzeptphase	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
A5	Unterstützung der Leichtbau-Lösungsentwicklung auf Funktionsebene	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
A6	Unterstützung der Leichtbau-Lösungsentwicklung auf Wirkebene	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
A7	Unterstützung der Leichtbau-Lösungsentwicklung auf Strukturebene	■	■	■	■	◐	◐	■	■	■	■	■	◐	■	◐
A8	Unterstützung der Leichtbau-Lösungsentwicklung auf Gestaltebene	■	■	■	■	◐	◐	■	■	■	■	◐	■	◐	■
A9	Unterstützung bei der Analyse bestehender Lösungen auf Gestaltebene	■	■	■	■	■	■	■	■	■	◐	■	■	■	◐
A10	Unterstützung der Bewertung abstrakter Lösungen (auf Funktions- und Wirkebene) bezüglich deren Leichtbaupotenzials	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Beitrag der Methode zum leichtbaugerechten Entwickeln		◐	◐	■	■	◐	◐	■	◐	◐	◐	◐	◐	◐	◐

■ = Anforderung nicht erfüllt    ◐ = Anforderung teilweise erfüllt

**Tabelle 4.2:** Bewertung des Stands der Forschung anhand der Anforderungen an eine Vorgehensweise zum leichtbaugerechten Konzipieren

Der Contact & Channel<sup>2</sup> - Approach [ABLERS16; MATTHIESEN02] unterstützt die Analyse von bestehenden Produkten und deren Gestalt. Wie darauf aufbauend die Synthesephase des Contact & Channel<sup>2</sup> - Approach angepasst und genutzt werden kann, um Leichtbau-Lösungen zu entwickeln, wird nicht beschrieben.

Dies zeigt, dass keine Methode die Entwicklung einer Leichtbau-Lösungsvielfalt, weder auf einer noch auf allen Ebenen der Konzeptphase, vollständig unterstützt (siehe Anforderungen A4 bis A8). Aufbauend auf der Lösungsvielfalt kann die am besten passende Leichtbau-Lösung für den jeweiligen Fall ausgewählt werden. Hierfür besteht jedoch keine Methode, die die Bewertung und Selektion dieser abstrakten Lösungen (auf Funktions- und Wirkebene) bezüglich deren Leichtbaupotenzials unterstützt (siehe Anforderung A10).

Aus diesen im Stand der Forschung der Leichtbau-Produktentwicklung identifizierten Lücken soll im nachfolgenden Abschnitt die Zielsetzung der Arbeit abgeleitet werden.

## **4.2 Konkretisierung der Zielsetzung**

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, eine Methodik zu entwickeln, die die in Abschnitt 4.1.3 identifizierten Lücken der Vorgehensweisen der methodischen Produktentwicklung schließt, die Anforderungen aus Abschnitt 4.1.2 erfüllt und die Operationalisierung der in Abschnitt 4.1.1 beschriebenen Leichtbau-Strategien für die Konzeptphase darstellt.

Daraus leitet sich das Ziel ab, eine Methodik zu entwickeln, die Leichtbau in der Konzeptphase durchgängig berücksichtigt. Außerdem muss die Methodik die Analyse von Anforderungen, Funktionen, deren Wichtigkeit, der dafür aufgewendeten Masse und des Leichtbaupotenzials unterstützen. Des Weiteren muss Konstrukteuren die Entwicklung einer Leichtbau-Lösungsvielfalt auf allen Ebenen der Konzeptphase, die Analyse und Abstraktion bestehender Lösungen auf Gestaltebene und die Bewertung abstrakter Lösungen (auf Funktions- und Wirkebene) bezüglich deren Leichtbaupotenzials mithilfe der Methodik möglich sein. Die Methodik soll als Methoden-Baukasten konzipiert werden, damit dieser den vorliegenden Rahmenbedingungen des Anwendungsfalls angepasst werden kann, wie beispielsweise dem individuellen Produktentwicklungsprozess des jeweiligen Unternehmens.

Als Zusammenfassung der Zielsetzung und als Antwort auf die Forschungsfrage, siehe Abschnitt 1.3, wird folgende Hypothese aufgestellt:

*Durch Entwicklung eines Methoden-Baukastens zum leichtbaugerechten Konzipieren basierend auf dem Transfer der Wertanalyse, der Erweiterung und Anpassung der Methoden auf allen Ebenen der Konzeptphase zur systematischen Analyse und der Variation sowie Auswahl der Lösungen unter Leichtbau-Aspekten, werden Konstrukteure bei der systematischen Entwicklung von Leichtbau-Lösungen in der Konzeptphase unterstützt und das Leichtbaupotenzial dieser Phase nutzbar gemacht.*

Um dieses Ziel zu erreichen und die Hypothese belegen zu können, werden nachfolgend Forschungsfragen zu den einzelnen Teilelementen des zu entwickelnden Methoden-Baukastens abgeleitet.

### **4.3 Forschungsfragen und weiteres Vorgehen**

Um die in Kapitel 1 beschriebene übergeordnete Forschungsfrage nach einer Methodik zum leichtbaugerechten Konzipieren zu beantworten, wird die Arbeit, wie in Bild 4.2 dargestellt, aufgebaut.

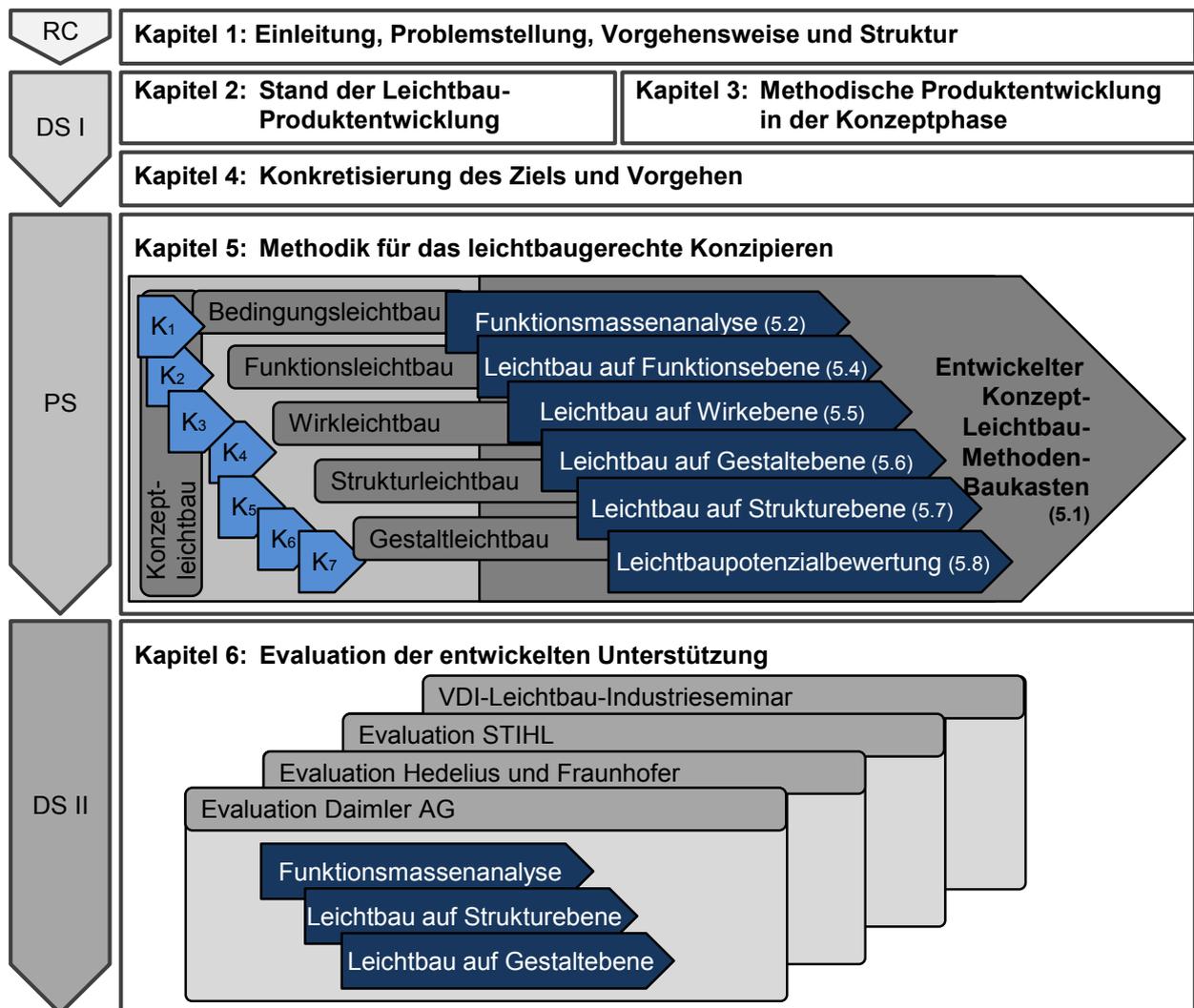
Nach der Beschreibung des Stands der Forschung in den Kapiteln 2 und 3 konnte die Zielsetzung der Arbeit in Kapitel 4 konkretisiert werden. Die übergeordnete Forschungsfrage lässt sich in folgende untergeordnete Forschungsfragen unterteilen. Diese sind in Kapitel 5 zu beantworten:

- *Welche Rahmenvorgehensweise unterstützt das leichtbaugerechte Entwickeln und ist so flexibel, dass sie den jeweiligen Randbedingungen, wie z. B. dem individuellen Produktentwicklungsprozess des jeweiligen Unternehmens, angepasst werden kann? (Abschnitt 5.1)*
- *Wie können Produkte auf die Kundenanforderungen ausgerichtet und Leichtbaupotenziale bestehender Produkte, deren Funktionen, die Wichtigkeit der Funktionen für den Kundennutzen und die Massen, die zur Funktionserfüllung aufgebracht werden, analysiert werden? (Abschnitt 5.2)*
- *Welche grundsätzlichen Ansätze können genutzt werden, um die Entwicklung von Leichtbau-Lösungen zu unterstützen? (Abschnitt 5.3)*
- *Wie kann das Leichtbaupotenzial von Produkten bereits auf Ebene der Funktionen und Funktionsstrukturen gesteigert werden? (Abschnitt 5.4)*
- *Wie kann das Leichtbaupotenzial von Produkten bereits auf Ebene der Wirkprinzipien und -strukturen gesteigert werden? (Abschnitt 5.5)*
- *Wie werden Konstrukteure bei der systematischen Abstraktion und Variation von bestehenden Lösungen und damit beim Loslösen von bisherigen Lösungen un-*

terstützt, um dadurch Leichtbau-Lösungen auf Gestaltebene zu entwickeln? (Abschnitt 5.6)

- Wie werden Leichtbau-Strukturen mit einfachen Hilfsmitteln bereits aufbauend auf Wirkflächenpaar- und Leitstützstruktur-Beschreibung bzw. ausgehend von der Wirkstruktur leichtbaugerecht entwickelt? (Abschnitt 5.7)
- Wie wird das Leichtbaupotenzial von Lösungen auf abstraktem Niveau, wie auf Funktions- und Wirkebene, abgeschätzt und damit die Auswahl von Lösungen mit größerem Leichtbaupotenzial unterstützt? (Abschnitt 5.8)

In Kapitel 6 wird der entwickelte Methoden-Baukasten zum leichtbaugerechten Entwickeln in verschiedenen Anwendungsprojekten evaluiert. Die Arbeit wird durch eine Zusammenfassung (Kapitel 7) und einen Ausblick (Kapitel 8) abgeschlossen.



(x.x) = Abschnitt x.x

**Bild 4.2:** Struktur und weitere Vorgehensweise der vorliegenden Arbeit



## 5 Entwicklung einer Methodik für das leichtbaugerechte Konzipieren

In diesem Kapitel wird die Methodik vorgestellt, die in dieser Arbeit entwickelt wird, um die Lücke im Stand der Forschung schließen zu können. Die Vorgehensweise soll Entwickler und Konstrukteure beim leichtbaugerechten Konzipieren unterstützen. Es werden sowohl bestehende Leichtbau-Strategien, wie beispielsweise der Gestaltleichtbau, als auch die neuen und ebenfalls im Folgenden präsentierten Strategien des Funktions-, Wirk- und Strukturleichtbaus systematisch angewendet. Außerdem sollen der Gestaltleichtbau und die Bewertung von Lösungen auf abstraktem Niveau unterstützt werden. Dazu wird in Abschnitt 5.1 der Methoden-Baukasten vorgestellt. Dieser besteht aus einzelnen Methoden-Modulen.

**Definition des Methoden-Baukastens und der Methoden-Module:** *In der vorliegenden Arbeit besteht der „Methoden-Baukasten“ aus einzelnen „Methoden-Modulen“. Ein Methoden-Modul korrespondiert dabei mit einer oder mehreren Phasen im Produktentwicklungsprozess. Das Methoden-Modul stellt allgemein ein Set aus gleichartigen, zeitlich hintereinander durchzuführenden Methoden dar. Bei der Anwendung des Methoden-Baukastens innerhalb eines unternehmens- und anwendungsspezifischen Produktentwicklungsprozesses werden einzelne Methoden-Module ausgewählt. Diese Anwendung der Methoden-Module stellt einen Unterstützungsprozess dar.*

Das erste Modul dient der Leichtbau-Zielentwicklung und -Potenzialanalyse (Abschnitt 5.2). Nachfolgend werden die Grundsätze der systematischen Leichtbau-Lösungsentwicklung vorgestellt, auf denen die weiteren Methoden-Module basieren (Abschnitt 5.3). Diese Methoden-Module unterstützen die Leichtbau-Lösungsentwicklung auf Funktionsebene (Abschnitt 5.4), Wirkebene (Abschnitt 5.5), Strukturebene (Abschnitt 5.6) und Gestaltebene (Abschnitt 5.7). In Abschnitt 5.8 wird das letzte Methoden-Modul zur Leichtbaupotenzialbewertung vorgestellt.

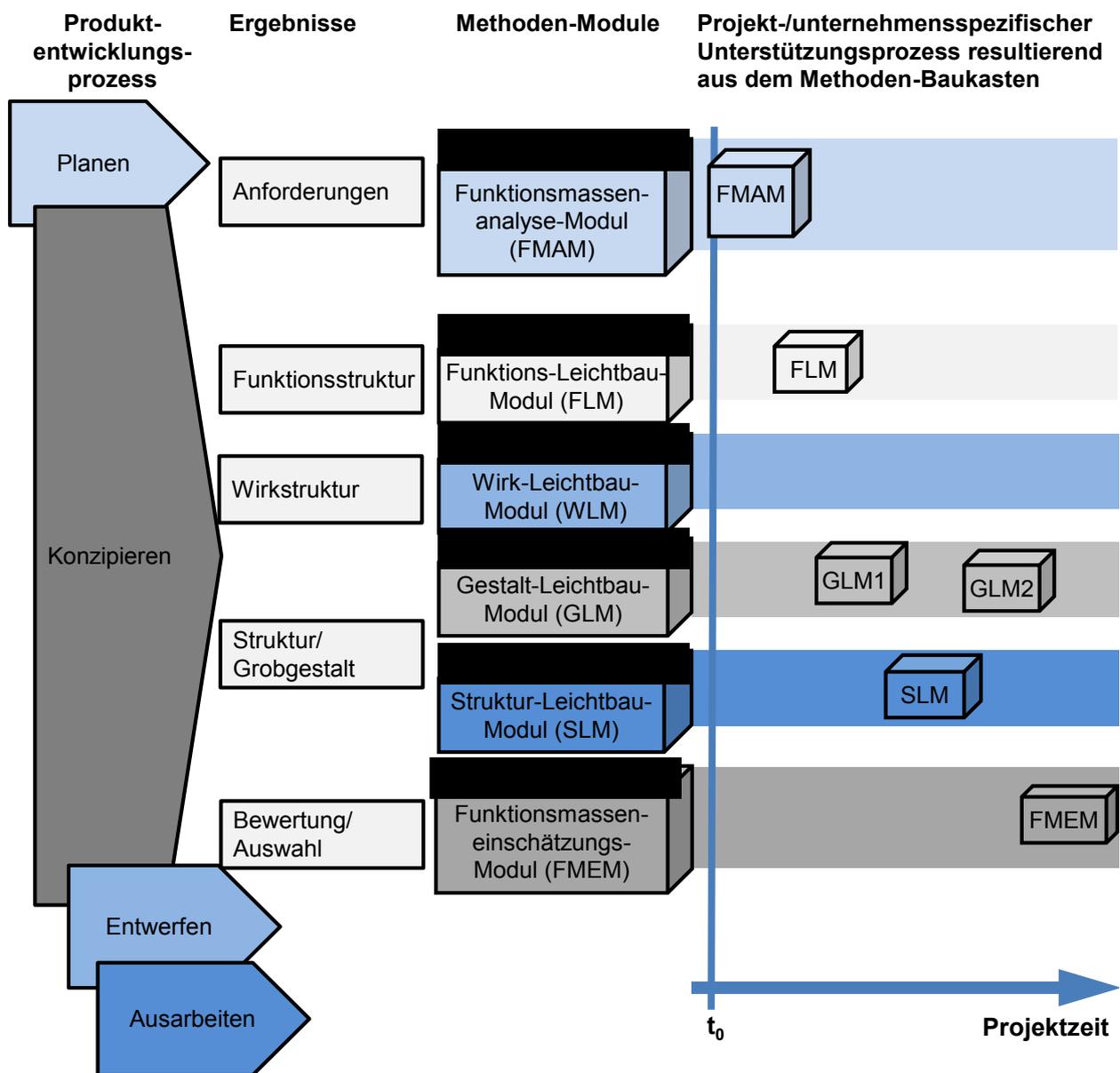
### 5.1 Methoden-Baukasten zum systematischen leichtbaugerechten Entwickeln

Für diesen Abschnitt stellt sich, wie in Abschnitt 4.3 beschrieben, die Forschungsfrage: *Welche Rahmenvorgehensweise unterstützt das leichtbaugerechte Entwickeln und ist so flexibel, dass es den jeweiligen Randbedingungen, wie z. B. dem individuellen Produktentwicklungsprozess des jeweiligen Unternehmens, angepasst werden kann? Wie*

in Abschnitt 3.1 diskutiert, existieren verschiedene Modelle für Produktentwicklungsprozesse, die aber große Ähnlichkeiten aufweisen. Beim Produktentwicklungsprozess nach Pahl et al. [PAHL07] handelt es sich um ein generisches Prozessmodell. Dieses Prozessmodell ermöglicht es, je nach Anwendungsszenario einen geeigneten und passenden realen Produktentwicklungsprozess abzuleiten. So werden in einzelnen Branchen nicht alle Schritte der Konzeptphase durchlaufen. In der Luftfahrt beispielsweise wird bei der Linienflugzeugentwicklung nicht immer das Wirkprinzip der Flügel oder Triebwerke hinterfragt. Der Schwerpunkt der Entwicklung liegt auf der Auslegung und damit auf der Entwurfsphase. Darüber hinaus sind die meisten Konstruktionen Anpassungskonstruktionen [FELDHUSEN13B, S. 293], bei denen nicht in jedem Fall die Funktionsstruktur, Wirkstruktur und die Gestalt im Ganzen angepasst werden. Diese Varianz in der Entwicklung kann über die Anpassbarkeit des Produktentwicklungsprozessmodells berücksichtigt werden. Das integrierte Produktentstehungsmodell (iPeM) hebt diese Notwendigkeit besonders hervor [ALBERS16]. Der Prozess ist folglich immer auf die jeweilige Situation anzupassen.

Aufbauend auf den Betrachtungen von Klein [KLEIN13, S. 10 ff.] ist für den Leichtbau kein neuer Leichtbau-Produktentwicklungsprozess notwendig. Vielmehr ist es ausreichend, in bestehenden und erfolgreichen Prozessen den Aspekt des Leichtbaus systematisch zu berücksichtigen. Aus diesem Grund nutzt die hier vorgestellte Methodik den Produktentwicklungsprozess nach Pahl et al. [PAHL07] und ergänzt dessen Phasen und Schritte um die Unterstützung durch leichtbauspezifische Methoden-Module. Die Methoden-Module könnten jedoch auch jedem anderen Produktentwicklungs- oder Produktentstehungsprozess zugeordnet werden, wie z. B. dem iPeM. In Modell des iPeM würden die Methoden-Module der Aktivitäten zugewiesen werden und damit ein projektspezifisches Phasenmodell abgebildet werden. Damit kann diese Flexibilität in der Leichtbau-Methodik genutzt werden. Dem Entwickler ist es damit möglich, das passende Methoden-Modul zu nutzen, um Leichtbau systematisch und unterstützt bei seiner Entwicklung zu berücksichtigen. Es lässt sich somit für den unternehmens-, projekt- und situationsspezifischen Produktentwicklungsprozess ein Unterstützungsprozess aus den Methoden-Modulen ableiten, der die systematische Berücksichtigung von Leichtbau während der Konzeptphase unterstützt. Die Summe dieser Methoden-Module, die im Folgenden entwickelt werden, wird als Methoden-Baukasten für das leichtbaugerechte Konzipieren bezeichnet.

In Bild 5.1 (links) ist der Produktentwicklungsprozess nach Pahl et al. [PAHL07] abgebildet. Außerdem sind dessen Phasen die wesentlichen Ergebnisse, von der Anforderungsliste bis hin zur Festlegung der Grobgestalt und einer Werkstoffart zugeordnet. Diesen Ergebnissen werden die Methoden-Module zugewiesen. Die Methoden-Module werden in den folgenden Unterkapiteln in der Reihenfolge entwickelt und diskutiert, in der diese den Schritten der Konzeptphase zugeordnet sind. Auf der rechten Seite in Bild 5.1 ist symbolisch dargestellt, wie aus dem Methoden-Baukasten vergleichbar zur Idee des iPeM [ALBERS16] ein projektspezifischer Unterstützungsprozess in einer zeitlichen Abfolge abgebildet werden kann.



**Bild 5.1:** Zuordnung der zu entwickelnden Methoden-Module zum Produktentwicklungsprozess und Abbildung eines projektspezifischen Unterstützungsprozesses (vgl. [PAHL07, S. 232])

## 5.2 Leichtbau-Zielentwicklung und -Potenzialanalyse: Funktionsmassenanalyse

Ponn und Lindemann [PONN11, S. 209 ff.] stellen fest, dass Massenziele, die ein zu entwickelndes Produkt einhalten soll, schon in den frühen Phasen der Produktentwicklung festgelegt werden müssen. Werden diese nicht vorab definiert, kann das Produkt nach abgeschlossener Entwicklung zu viel Masse besitzen und damit beispielsweise einen zu hohen Energieverbrauch aufweisen [PONN11, S. 212]. Die frühe Definition der Massenziele fokussiert den Aufwand, der für die leichtbaugerechte Entwicklung des Produkts aufgewendet wird, auf diese Ziele. Diese Zielsetzung muss folglich schon bei der Festlegung von Anforderungen bzw. bei der Übersetzung der Anforderungen in die Funktionen des Produkts erfolgen.

Für die Erfüllung beinahe jeder Funktion wird Masse in das Produkt eingebracht. Funktionen, die für den Kunden nicht wichtig sind, steigern ausschließlich die Produktmasse, nicht aber den Produktwert für den Kunden. Die Konstrukteure müssen, ohne zu wissen, welche Masse zur Erfüllung einer Funktion notwendig ist, entscheiden, welche Funktionen durch das Produkt realisiert werden. Hätten die Konstrukteure Informationen über die Wichtigkeit der Funktionen und die Masse, die zu deren Umsetzung benötigt wird, könnten sie gegebenenfalls sogar mit ihren Kunden abstimmen, ob die Funktion so wichtig ist, dass die zusätzliche Masse im Produkt akzeptiert wird. Dies erfordert eine Methode, die die Produktentwickler beim Aufstellen von Zielen bezüglich der Masse, der Bestimmung der Wichtigkeit der Funktionen und der zur Funktionserfüllung benötigten Masse unterstützt.

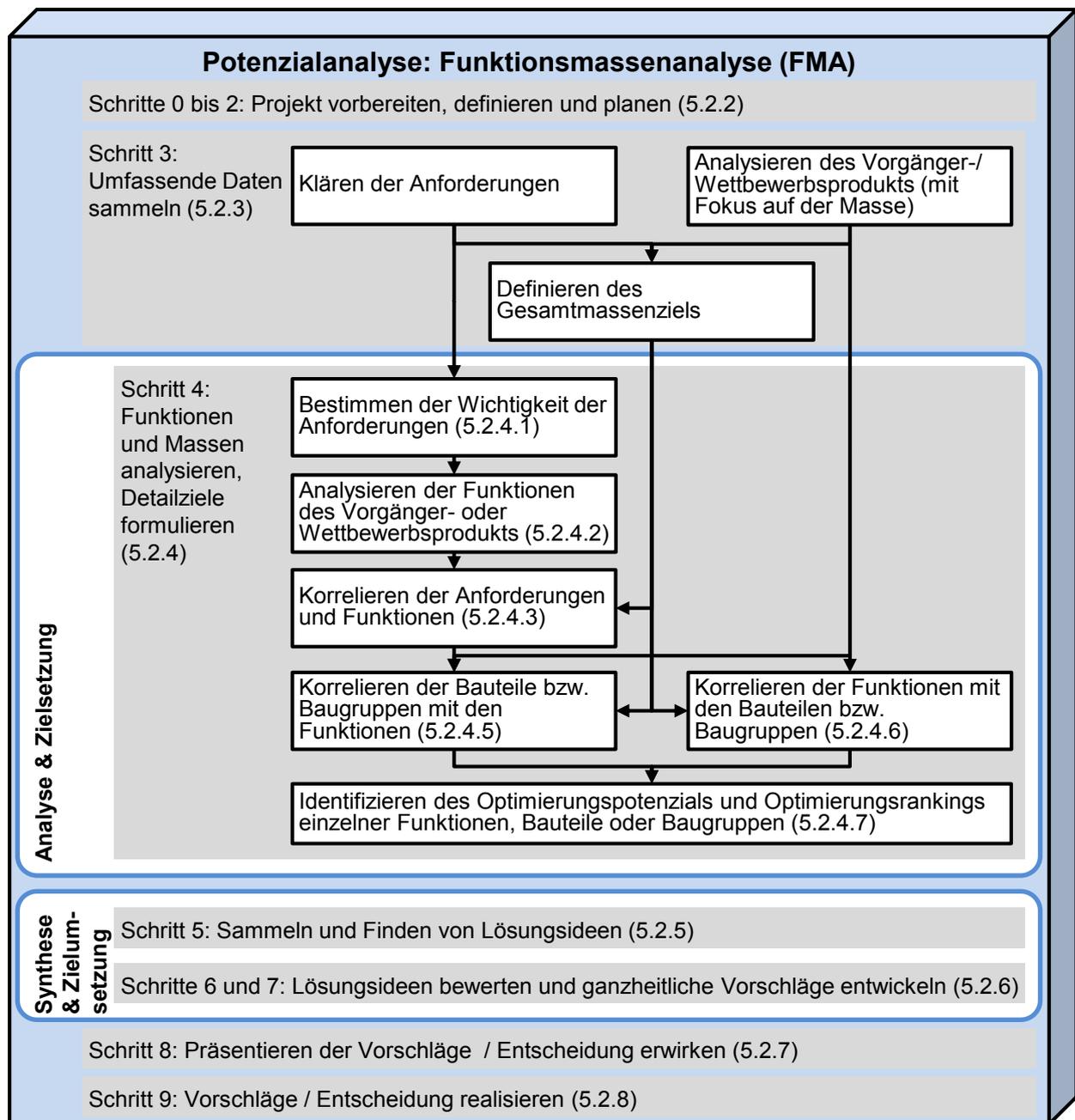
Es stellt sich daher, wie in Abschnitt 4.3 beschrieben, für diesen Abschnitt die Forschungsfrage: *Wie können Produkte auf die Kundenanforderungen ausgerichtet und Leichtbaupotenziale bestehender Produkte, deren Funktionen, die Wichtigkeit der Funktionen für den Kundennutzen und die Massen, die zur Funktionserfüllung aufgebracht werden, analysiert werden?*

Um diese Forschungsfrage zu beantworten, wird im Folgenden das erste Methoden-Modul zur Festlegung von Leichtbau-Zielen und zur Analyse von Leichtbaupotenzialen entwickelt, das als Funktionsmassenanalyse-Modul (FMA-Modul) bezeichnet wird und auf den Veröffentlichungen von Posner et al. [POSNER12A; POSNER13A; POSNER14D] basiert. Die Methode baut auf den Ansätzen von Feyerabend [FEYERABEND91] auf. Für die Modulanwendung wird vorausgesetzt, dass bereits Vorgänger- oder Wettbewerbs-

produkte oder wenigstens ähnliche Produkte bestehen. Ist dies nicht der Fall, so muss eine erste Funktionsstruktur für das neu zu entwickelnde Produkt aufgestellt werden und basierend darauf mittels der Funktionsmasseneinschätzung, die im Abschnitt 5.8 vorgestellt wird, eine Massenabschätzung, gegebenenfalls auch für mehrere mögliche Funktionsstrukturen, vorgenommen werden.

### 5.2.1 Transfer des Arbeitsplans

Bild 5.2 zeigt den Ablaufplan der Funktionsmassenanalyse, der auf dem Arbeitsplan der Wertanalyse [VDI 2800 2010] basiert.



(x.x.x) Schritt wird in Abschnitt x.x.x näher beschrieben

**Bild 5.2:** Funktionsmassenanalyse-Modul (FMA)

Nachfolgend werden die einzelnen Schritte, die dazugehörige methodische Unterstützung und deren Transfer von der Anwendung auf Masse anstatt auf Kosten diskutiert.

### **5.2.2 Schritte 0 bis 2: Projekt vorbereiten, definieren und planen**

Die ersten Schritte der Wertanalyse, das Vorbereiten, Definieren und Planen des Projekts, können entsprechend der Wertanalyse [VDI 2800 2010] umgesetzt werden.

Im nullten Schritt der FMA wird das Projekt vorbereitet. Es muss geklärt werden, ob das Problem durch die Anwendung der FMA gelöst werden kann. Das Projekt und dessen Rahmenbedingungen müssen definiert werden, um einen reibungslosen Ablauf und zuverlässige Resultate zu gewährleisten (Schritt 1). Im Arbeitsschritt 2 der Projektplanung muss das Wertanalyseteam zusammengestellt, ein Zeitplan aufgestellt und die Infrastruktur für die Teamkommunikation und -treffen festgelegt werden. Danach kann die inhaltliche Arbeit beginnen. [VDI 2800 2010, S. 20 ff.]

### **5.2.3 Schritt 3: Umfassende Daten über das Objekt sammeln**

Während dieses Arbeitsschritts werden Daten über Wettbewerber, den Stand der Technik vergleichbarer Produkte und von Wettbewerbsprodukten analysiert [VDI 2800 2010]. Die Gesamtmasse, deren Verteilung, die Funktionen und Funktionsstrukturen der Wettbewerbs- oder Vorgängerprodukte müssen analysiert werden. Ebenfalls in diesem Schritt muss ein Benchmark der Massen der Wettbewerbsprodukte gemacht werden, um ein Gesamtmassenziel für das Produkt zu erarbeiten. [POSNER13B, S. 4] Dieses Massenziel wird zunächst auf einer wenig detaillierten Ebene erarbeitet. Außerdem können hierbei Massenverteilungs- und Trägheitsmomentziele berücksichtigt werden, die in dieser Arbeit jedoch nicht im Fokus stehen.

Des Weiteren werden die Anforderungen, die das Produkt darüber hinaus erfüllen muss, mit dem Kunden diskutiert und geklärt. Aus Sicht des Leichtbaus sollen Wünsche, die nicht erfüllt werden müssen, identifiziert werden. Außerdem werden alle Anforderungen kritisch hinterfragt, um zu klären, ob sie erfüllt werden müssen oder nicht. [POSNER13B, S. 4]

Nachfolgend werden die Unterpunkte dieses Arbeitsschritts anhand eines fiktiven Beispiels einer Luftpumpe mit zwei Zylindern aufgezeigt, wie in Bild 5.3 dargestellt, um dadurch ein besseres Verständnis für die Methode zu erreichen. Ausgehend von der Analyse der Luftpumpe ist das Ziel des Beispielprojekts, eine Luftpumpe zu entwickeln, die mobil nutzbar ist. Das bedeutet, dass sie der Kunde an seinem Fahrrad befestigen

und mitnehmen kann. Für diese Anwendung soll die Masse der Pumpe verglichen mit der stationären Pumpe um 40 % reduziert werden. Außerdem werden einige Beispiele für Kundenanforderung identifiziert. Diese sind „Luft pumpen“, „geringe Betätigungskraft“, „kurze Pumpdauer“ und „Druck anzeigen“. [POSNER13B, S. 4 f.]

In der Literatur der Wertanalyse existiert keine eindeutige Trennung zwischen den Kundenfunktionen und den Anforderungen der Kunden. In der Funktionsmassenanalyse werden die wichtigsten Anforderungen berücksichtigt. Darunter werden auch die Anforderungen verstanden, die in der Literatur der Wertanalyse als „nutzerbezogene Funktionen“ bezeichnet werden (vgl. [VDI 2800 2010]). Nachfolgend wird daher der Begriff Anforderung, für die vom Kunden gewünschten Funktionen und Anforderungen, und der Begriff Funktion, für die technischen Funktionen, die für die Anforderungserfüllung benötigt werden, verwendet.



**Bild 5.3:** Beispiel Luftpumpe [POSNER13B, S. 5]

#### **5.2.4 Schritt 4: Funktionen und Massen analysieren, Detailziele formulieren**

In diesem Schritt treten die größten Unterschiede zwischen der Anwendung der Wertanalyse auf die Kosten- im Vergleich zur Massenoptimierung auf. Deshalb müssen dieser Schritt und dessen Unterpunkte genauer untersucht und weiterentwickelt werden.

##### **5.2.4.1 Bestimmen der Wichtigkeit der Anforderungen**

Das Ziel, das mit dem Produkt erreicht werden soll, ist es, die Anforderungen der Kunden zu erfüllen. Diese Anforderungen müssen durch die Funktionen des Produkts erfüllt und im Gespräch mit den Kunden geklärt werden. Anforderungen und die zu ihrer Erfüllung notwendigen technischen Funktionen können für den Kunden von unterschiedlicher Wichtigkeit sein. Daher müssen die Anforderungen gewichtet werden, um die für den Kunden besonders wichtigen Funktionen zu identifizieren. Darüber hinaus müssen die Funktionen, die dem Kunden weniger oder nicht wichtig sind, identifiziert werden, da diese Einsparpotenzial bezüglich der Masse darstellen. Als methodische

Unterstützung für diese Gewichtung kann beispielsweise eine Dominanzmatrix [PAHL07, S. 177 f.] als Unterstützung zur Erzielung objektiverer Ergebnisse genutzt werden, wie in Tabelle 5.1 gezeigt. [POSNER13B, S. 5] Dabei wird zeilenweise eine „2“ eingetragen, wenn die Funktion in dieser Zeile wichtiger ist als die in der jeweiligen Spalte, eine „1“ bei gleicher Wichtigkeit der Funktionen und eine „0“, wenn die Funktion in der Zeile weniger wichtig als die in der jeweiligen Spalte ist.

Dabei ist es entscheidend, sich auf die wichtigsten Anforderungen zu konzentrieren, da sonst der Aufwand zu groß wird. Außerdem müssen die Anforderungen ungefähr dem gleichen Detaillierungsniveau entsprechen und Redundanzen vermieden werden. Die so erarbeitete Anforderungsgewichtung ist der normierte Faktor, der sich aus der Punktzahl der jeweiligen Funktion geteilt durch alle vergebenen Punkte aller Funktionen errechnet und Auskunft über die Bedeutung der Kundenanforderung gibt. [POSNER13B, S. 5]

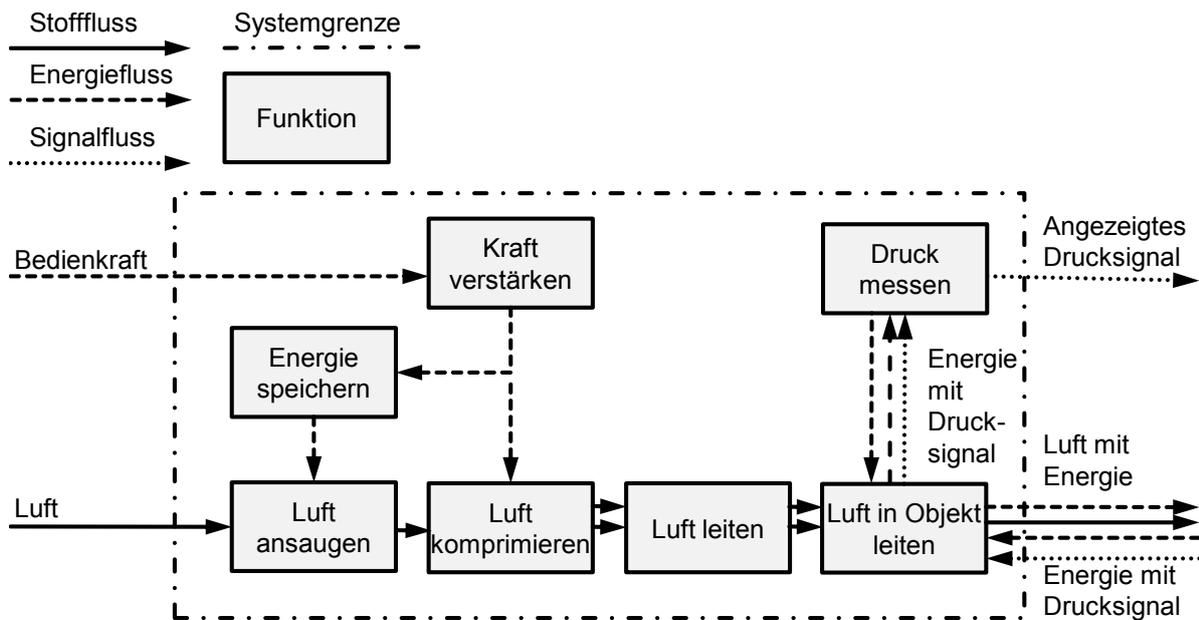
	Luft pumpen	Geringe Betätigungskraft	Kurze Pumpdauer	Druck anzeigen	Gesamt	Anforderungsgewichtung
Luft pumpen	1	2	2	2	7	7/16=0,44
Geringe Betätigungskraft	0	1	1	2	4	4/16=0,25
Kurze Pumpdauer	0	1	1	2	4	4/16=0,25
Druck anzeigen	0	0	0	1	1	1/16=0,06

**Tabelle 5.1:** Binärer Vergleich der Kundenanforderung [POSNER13B, S. 5]

#### 5.2.4.2 Analyse der Funktionen des Vorgänger- oder Wettbewerbsprodukts

Wenn Vorgänger- oder Wettbewerbsprodukte existieren, so können deren technische Funktionen untersucht werden. Dies kann, wie von der Wertanalyse vorgeschlagen, mithilfe eines FAST-Diagramms (Funktionen-Analyse-System-Technik) durchgeführt werden [VDI11, S. 40], oder die Funktionen können durch die Erstellung einer Funktionsstruktur beispielsweise nach Pahl et al. [PAHL07, S. 242 ff.] analysiert werden. Der Vorteil dieser Funktionsstruktur verglichen mit einem im Kontext der Wertanalyse vorgeschlagenen FAST-Diagramm [VDI 2800 2010] ist, dass diese die Vollständigkeit der Funktionen besser unterstützt und das Zusammenwirken der Funktionen genauer berücksichtigt. Wenn keine ähnlichen Produkte existieren, muss eine neue Funktionsstruktur für ein erstes Produktkonzept entwickelt werden. Basierend auf dieser kann dann die Funktionsmasseneinschätzung, die auf der Funktionsmassenanalyse basiert und in Abschnitt 5.8.3 vorgestellt wird, genutzt werden. Bezogen auf das Beispiel bedeutet das, dass die Funktionsstruktur der stationär eingesetzten Pumpe analysiert und dargestellt werden muss, wie in Bild 5.4 gezeigt. [POSNER13B, S. 5] Über die System-

grenze der Funktionsstruktur treten die Bedienkraft sowie die Luft ein und es treten das angezeigte Drucksignal sowie die Luft verknüpft mit Energie aus. Dabei wird jedoch auch Energie und ein Drucksignal zurück in das System eintreten, ohne das kein Drucksignal angezeigt werden könnte. Innerhalb des Systems befinden sich die Funktionen Kraft verstärken, Energie speichern, Luft ansaugen, Luft komprimieren, Luft leiten, Luft in Objekt leiten und Druck messen.



**Bild 5.4:** Funktionsstruktur der stationären Luftpumpe [POSNER13B, S. 6]

### 5.2.4.3 Korrelieren der Anforderungen und Funktionen - Funktionsmassenzielbestimmung

Um zu untersuchen, welche technischen Funktionen die Kundenanforderungen erfüllen, kann eine abgewandelte Form der Quality-Function-Deployment (QFD) Methode genutzt werden. Diese unterstützt die Erfüllung der Anforderungen und stellt sicher, dass der Fokus auf dem liegt, was der Kunde wünscht und fordert. [POSNER13B, S. 6]

In Tabelle 5.2 werden die technischen Funktionen in den ersten Zeilen und die Kundenanforderungen in der zweiten Spalte aufgeführt. Die Mitglieder des Projektteams bestimmen den Grad, in dem jede Funktion zur Erfüllung der jeweiligen Anforderung beiträgt. Dieser Wert wird in Prozent angegeben und ergibt in Summe zeilenweise 100 %. Wird dieser prozentuale Faktor mit der Anforderungsgewichtung multipliziert (Ergebnis aus Schritt 5.2.4.1) und für jede Kundenanforderung aufsummiert, ergibt sich ein Faktor, der Auskunft über die Wichtigkeit der Funktion gibt. [POSNER13B, S. 6]

		Technische Funktionen							
		Anforderungs- gewichtung	Kraft verstärken	Energie speichern	Luft kompri- mieren	Luft ansaugen	Luft leiten	Luft in Objekt leiten	Druck messen
Kundenanforderung	Luft pumpen	0.44			45%	45%		10%	
	Geringe Bedienkraft	0.25	70%	30%					
	Kurze Pumpdauer	0.25	30%		30%	30%	10%		
	Druck anzeigen	0.06							100%
	<b>Funktions- gewichtung</b>		<b>25 %</b>	<b>8 %</b>	<b>27 %</b>	<b>27 %</b>	<b>3 %</b>	<b>4 %</b>	<b>6 %</b>
	<b>Funktions- massenziel [in g]</b>	<b>749</b>	<b>187</b>	<b>56</b>	<b>204</b>	<b>204</b>	<b>18</b>	<b>33</b>	<b>47</b>

**Tabelle 5.2:** Korrelation zwischen Kundenanforderungen und technischen Funktionen  
[POSNER13B, S. 6]

Im vorliegenden Fall der Luftpumpe soll die Masse der neuen Luftpumpe 40 % geringer als die Masse der betrachteten zweizylindrigen Luftpumpe sein. Wird die Masse des Wettbewerbsprodukts von 1249 g um 40 % reduziert, ergibt sich für das neue Produkt ein Gesamtmassenziel von 749 g. Wird das Gesamtmassenziel mit der Funktionsgewichtung der jeweiligen Funktion multipliziert, erhalten die Konstrukteure das Zielgewicht dieser Funktion, siehe Tabelle 5.2 (letzte Zeile). [POSNER13B, S. 6] In dieser und den nachfolgenden Tabellen werden gerundete Werte dargestellt, wobei die Ergebnisse mit wesentlich genaueren Werten berechnet wurden. Wie das Massenziel der Tabelle interpretiert werden kann, ist nachfolgend beschrieben.

#### 5.2.4.4 Vorauswahl

Wird die Methode für ein komplexes Produkt eingesetzt, können Bauteile vorausgewählt werden, um den Aufwand für die Methodenanwendung zu minimieren. Hierfür kann, wie von Feyerabend [FEYERABEND91, S. 36 f.] vorgeschlagen, die ABC-Analyse genutzt werden, bei der die Bauteile je nach Masse in drei Kategorien eingeteilt werden. Ein mögliches Problem dieser Vorauswahl ist, dass nicht alle Teile betrachtet werden. Dies kann die Ergebnisse gegebenenfalls negativ beeinflussen. Der Detaillierungsgrad der Untersuchung kann durch die Betrachtung von Baugruppen statt Bauteilen ebenfalls angepasst werden. Durch dieses alternative Vorgehen zur ABC-Analyse kann das Problem, nicht alle Bauteile zu berücksichtigen, vermieden werden. [POSNER13B, S. 7]

Dabei ist zu beachten, dass der Detaillierungsgrad der verglichenen Bauteile oder Baugruppen ähnlich ist und nicht beispielsweise eine Baugruppe einer einzelnen Verschraubung mit einer Baugruppe eines Motors verglichen wird. Die Vergleichbarkeit der Detaillierungsebene ist bei der Bauteil- / Baugruppenbetrachtung ebenso zu beachten, wie bei der Anforderungs- oder Funktionsbetrachtung und hat auch hierbei erheblichen Einfluss auf die Aussagekraft der Ergebnisse der Methodenanwendung.

Da das Beispiel der Luftpumpe wenig komplex ist, bedarf es hier keiner Vorauswahl der Bauteile oder Betrachtung von Baugruppen.

**5.2.4.5 Korrelieren der Bauteile bzw. Baugruppen mit den Funktionen: Funktionsmassenbestimmung**

In diesem Schritt soll die Masse der Bauteile des Wettbewerbs- oder Vorgängerprodukts bestimmt werden. Die Mitglieder des Projektteams müssen abschätzen, welches Bauteil welchen Prozentsatz zur Erfüllung welcher Funktion beiträgt (siehe Tabelle 5.3). Durch die Korrelation der Bauteile mit den technischen Funktionen wird auch die Masse der Bauteile mit den Funktionen in Verbindung gebracht. Jede Funktion wird hierbei mit der Masse korreliert, die im Produkt verbaut ist, um die Funktion zu erfüllen. Als Ergebnis daraus erkennen die Projektteammitglieder, welche Masse in der vorliegenden Lösung benötigt wird, um die Funktionen umzusetzen. [POSNER13B, S. 7]

		Technische Funktionen							
		Masse [in g]	Kraft verstärken	Energie speichern	Luft komprimieren	Luft ansaugen	Luft leiten	Luft in Objekt leiten	Druck messen
Bauteile	Schlauch	49					100 %		
	Pumpzylinder	392			50 %	50 %			
	Grundgestell	238	60 %	40 %					
	Verbindungsstück	46					50 %		50 %
	Pedalhebel	345	60 %	40 %					
	Druckmesser	21							100 %
	Zylinderfußachse	91	60 %	40 %					
	Zylinderkopfachse	28	60 %	40 %					
	Feder	30		100 %					
	Adapter	9							100 %
	<b>Funktionsmasse [in g]</b>	<b>1249</b>	<b>421</b>	<b>311</b>	<b>196</b>	<b>196</b>	<b>95</b>	<b>9</b>	<b>21</b>
	<b>Funktionsmassenziel [in g]</b>	<b>749</b>	<b>187</b>	<b>56</b>	<b>204</b>	<b>204</b>	<b>19</b>	<b>33</b>	<b>47</b>

**Tabelle 5.3:** Funktionsmassen- und Funktionsmassenzielle [POSNER13B, S. 7]

Tabelle 5.3 zeigt dieses Vorgehen am betrachteten Beispiel. In der zweiten Spalte stehen die Bauteile des Produkts und in der dritten Spalte sind deren Massen aufgeführt. In der zweiten Zeile sind die technischen Funktionen des Produkts aufgelistet. Das Projektteam bestimmt zu welchem Grad die einzelnen Bauteile zur Erfüllung der jeweiligen Funktion beitragen. Die Werte werden in Prozent angegeben und summieren sich zeilenweise zu 100 %. Dieser Faktor wird mit der Masse des Bauteils multipliziert und für jede Funktion aufaddiert, wodurch sich, wie in Tabelle 5.3 in der vorletzten Zeile gezeigt, die Funktionsmasse ergibt. Das bedeutet, dass die betrachtete Funktion diese Funktionsmasse für ihre Umsetzung im betrachteten Produkt verursacht. [POSNER13B, S. 7] Außerdem ist in der letzten Zeile der Tabelle 5.3 das Funktionsmassenziel aus Tabelle 5.2 der Funktionsmasse gegenübergestellt. Wie dieses Ergebnis genutzt werden kann, um Optimierungspotenziale aufzuzeigen, wird in Abschnitt 5.2.4.7 dargestellt.

### 5.2.4.6 Korrelieren der Funktionen mit den Bauteilen bzw. Baugruppen: Bauteil- / Baugruppenmassenzielbestimmung

Neben den erhaltenen Funktionsmassen und Funktionsmassenzielen sind die Bauteilmassen des Vorgänger- oder Wettbewerbsprodukts bereits bekannt. Darüber hinaus lassen sich die Bauteilmassenziele analysieren. In Tabelle 5.4 wird bestimmt, zu wie viel Prozent eine technische Funktion von den jeweiligen Bauteilen erfüllt wird. Die prozentualen Beträge ergeben dann spaltenweise für jede Funktion in Summe 100 %.

		Technische Funktionen							Bauteilmasse [in g]	Bauteilmassenziel [in g]
		Kraft verstärken	Energie speichern	Luft komprimieren	Luft ansaugen	Luft leiten	Luft in Objekt leiten	Druck messen		
Funktionsgewichtung		0,25	0,08	0,27	0,27	0,03	0,04	0,06		
Bauteile	Schlauch			x	x	95 %			49	18
	Pumpzylinder			100 %	100 %				392	408
	Grundgestell	40 %	15 %						238	83
	Verbindungsstück					5 %		5 %	46	1
	Pedalhebel	50 %	5 %						345	96
	Druckmesser						x	95 %	21	47
	Zylinderfußachse	5 %	5 %						91	12
	Zylinderkopfachse	5 %	5 %						28	12
	Feder		70 %						30	39
	Adapter						100 %		9	33
<b>Summe</b>		<b>100 %</b>	<b>100 %</b>	<b>100 %</b>	<b>100 %</b>	<b>100 %</b>	<b>100 %</b>	<b>100 %</b>	<b>1249</b>	<b>749</b>

Tabelle 5.4: Bauteilmassen- und Bauteilmassenziele

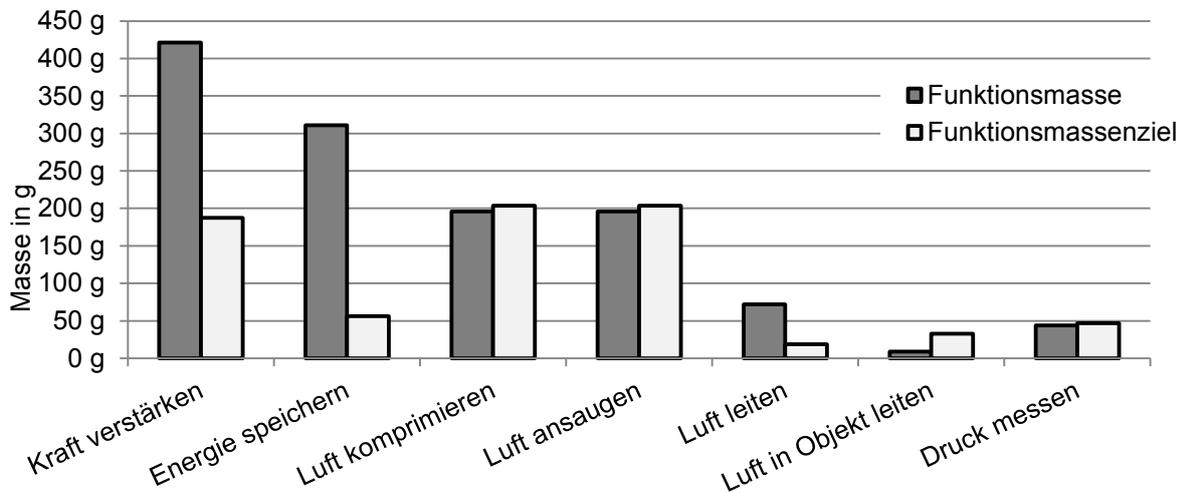
Die ermittelten Beträge werden zeilenweise für jedes Bauteil mit dem zugehörigen Funktionsgewicht multipliziert und anschließend aufsummiert. Die Multiplikation dieses Teilergebnisses mit dem Gesamtmassenziel der mobilen Luftpumpe (749 g) ergibt das Bauteilmassenziel des entsprechenden Bauteils. Ein Bauteilmassenziel gibt an, wie viel das Bauteil unter Berücksichtigung der Bedeutung der zugehörigen Funktionen wiegen sollte. Dies ist ein Maß dafür, in welchem Umfang das Bauteil zur Erfüllung der Anforderungen unter Berücksichtigung der Wichtigkeit der jeweiligen Anforderungen für den Kunden beiträgt.

#### **5.2.4.7 Identifizieren des Optimierungspotenzials und Optimierungsrankings**

Die Funktionsmassenziele wurden in Abschnitt 5.2.4.3, die Funktionsmasse in Abschnitt 5.2.4.5 und die Bauteilmassen sowie die Bauteilmassenziele in Abschnitt 5.2.4.6 bestimmt. In diesem Schritt müssen die Ergebnisse zur Identifikation des Optimierungspotenzials interpretiert werden. Dazu wird die Interpretation analog zur Wertanalyse durchgeführt. Generell können bei dieser Potenzialuntersuchung sowohl die Funktionen als auch die Bauteile bzw. Baugruppen betrachtet werden. Beide Betrachtungen können ergänzend genutzt werden, wobei die abstraktere Funktionsbetrachtung das Loslösen von den bestehenden Ergebnissen und die Konzentration auf die vom Kunden gewünschten Funktionen unterstützt und daher empfohlen wird. Bei der Betrachtung der Bauteilebene wird nachfolgend der Begriff „Bauteil“ verwendet und nicht die Alternative der Baugruppenbetrachtung berücksichtigt, da diese in der nachfolgenden Analyse keine Unterschiede aufweist.

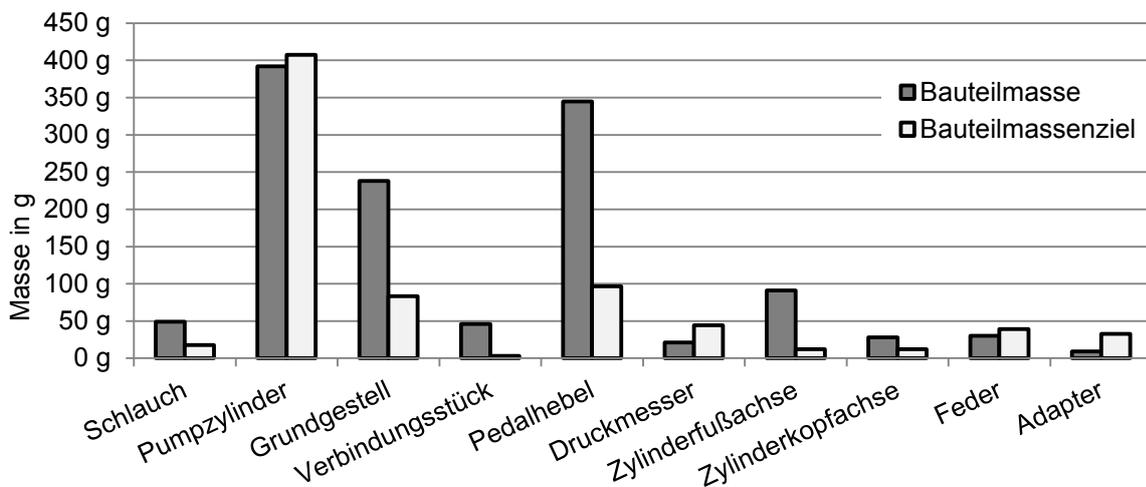
Zunächst bieten die Funktionen bzw. Bauteile das größte Massenoptimierungspotenzial, die den größten Anteil der Masse verursachen. Darüber hinaus werden die Missverhältnisse zwischen Wichtigkeit der Funktion bzw. des Bauteils für die Anforderungserfüllung und der dafür aufgebrauchten Masse analysiert. Benötigt eine Funktion bzw. Bauteil zu ihrer Umsetzung viel Masse, ist für den Kunden aber nicht so bedeutend, müssen die Konstrukteure handeln und das Missverhältnis verbessern. Je größer die Differenz zwischen dem Funktions- bzw. Bauteilmassenziel und der Funktions- bzw. Bauteilmasse ist, desto größer ist gemäß der Idee der Wertanalyse das Optimierungspotenzial. Wenn das Funktions- bzw. Bauteilmassenziel viel höher ist als die Funktions- bzw. Bauteilmasse, wurde eine wichtige Funktion bzw. ein wichtiges Bauteil massearm umgesetzt. [POSNER13B, S. 7] Dies stellt den angestrebten Fall mit dem geringsten Optimierungspotenzial und der geringsten Optimierungspriorität dar.

Bild 5.5 zeigt am Beispiel der Luftpumpe, dass bei den Funktionen „Kraft verstärken“ und „Energie speichern“ der größte Anteil an Masse zu deren Erfüllung aufgebracht wird. Außerdem tritt bei diesen beiden und der Funktion „Luft leiten“ eine große Differenz zwischen dem Funktionsmassenziel und der Funktionsmasse auf. Dies führt zu der Empfehlung, dass diese Funktionen entweder weggelassen oder mit weniger Masse umgesetzt werden müssen. Die Funktionsmasse der Funktionen „Luft komprimieren“, „Luft ansaugen“ und „Druck messen“ liegen unterhalb des Funktionsmassenziels. Dies bedeutet, dass diese Funktionen verglichen mit anderen eine geringere Optimierungspriorität besitzen. (vgl. [POSNER13B, S. 8])



**Bild 5.5:** Vergleich der Funktionsmassen und der Funktionsziele [POSNER13B, S. 8]

Beim Vergleich der Bauteilmassen mit den Bauteilmassenzielen, siehe Bild 5.6, ist ebenfalls ein Optimierungspotenzial erkennbar.



**Bild 5.6:** Vergleich der Bauteilmassen und Bauteilmassenzielle



### **5.2.5 Schritt 5: Sammeln und Finden von Lösungsideen**

In diesem Schritt werden die Analyseergebnisse der Interpretation im vorherigen Abschnitt zur Umsetzung der Optimierungen herangezogen. Die Ergebnisse der vorangegangenen Schritte sind die Grundlage für eine systematische Entscheidung des Projektteams darüber, welche Funktionen weggelassen und welche Funktionen mit weniger Masse umgesetzt werden sollen. Um Ideen zu erzeugen, können Kreativitätsmethoden, beispielsweise nach Pahl et al. [PAHL07] eingesetzt werden. [POSNER13B, S. 8 f.] Außerdem können die Methoden-Module, die in den nächsten Abschnitten beschrieben werden, zur Leichtbaulösungsentwicklung genutzt werden. Im Folgenden werden die Lösungen für die Funktionen des Luftpumpenbeispiels diskutiert.

#### **Funktionen „Kraft verstärken“, „Energie speichern“ und „Luft leiten“**

Die Untersuchung des Optimierungspotenzials zeigt, dass es bei diesen Funktionen eine große Abweichung zwischen der Wichtigkeit der Funktionen und der zu ihrer Umsetzung benötigten Massen gibt. Deshalb muss das Projektteam abwägen, ob die Funktionen weggelassen werden können oder nicht. Im Fall der angestrebten tragbaren Pumpe ist ein Weglassen dieser Funktionen möglich, siehe Bild 5.8. [POSNER13B, S. 9]

#### **Funktionen „Luft komprimieren“ und „Luft ansaugen“**

Die Funktionsmassenziele für die Funktionen „Luft komprimieren“ und „Luft ansaugen“ sind höher als die Massen, die zur Umsetzung der Funktionen notwendig sind. Deshalb werden diese Funktionen weiterhin auf die gleiche Art realisiert. Dies bedeutet aber nicht, dass bezogen auf diese Funktionen kein Leichtbau betrieben werden kann. Auch bei diesen Funktionen können weitere Leichtbau-Maßnahmen angewendet werden, zum Beispiel ist eine Werkstoffsubstitution denkbar. [POSNER13B, S. 9]

#### **Funktionen „Luft in Objekt leiten“ und „Druck messen“**

Die Funktionen „Luft in Objekt leiten“ und „Druck messen“ erfüllen die Massenziele und können beibehalten werden. Die Optimierungspotenzialanalyse der vorangegangenen Schritte zeigt, welche Masse zur Umsetzung der Funktionen nötig ist. Auf dieser Basis kann das Projektteam die Funktionen mit dem Kunden diskutieren. So ist zum Beispiel die Funktion „Druck messen“ vielleicht nicht für jede Anwendung des neuen Produkts notwendig. Das Projektteam kann hier entscheiden, ob die Funktion umgesetzt werden soll oder ob das Produkt ohne diese Funktion und somit ohne die zur Umsetzung der Funktion nötige Masse realisiert werden soll. [POSNER13B, S. 9]

Eine mögliche Lösung, basierend auf den entwickelten Ansätzen, wäre eine Luftpumpe ohne Kraftverstärkung, ohne Energiespeicher, Schlauch und Druckmesser, wie in Bild 5.8 gezeigt. Dies wäre ein einfaches und verglichen zur stationären Pumpe masseseames Beispiel einer tragbaren Luftpumpe. In den folgenden Schritten 6 bis 9 wird kein Bezug mehr auf das Beispiel der Luftpumpe genommen, da diese Schritte identisch zu dem Vorgehen der Wertanalyse [VDI11] verlaufen und bereits Anwendung in zahlreichen Industrieprojekten fanden. [POSNER13B, S. 9]



**Bild 5.8:** Mögliche Lösung für die portable Pumpe [POSNER13B, S. 9]

### **5.2.6 Schritte 6 und 7: Lösungsideen bewerten und ganzheitliche Vorschläge entwickeln**

In diesen Schritten werden die vorher identifizierten Ideen kombiniert und weiterentwickelt. Darauf aufbauend werden die Ideen anhand der Anforderungen, die sie erfüllen müssen, bewertet. Arbeitspläne zur Umsetzung der Ideen werden erarbeitet. Die Lösungsideen werden zu ganzheitlichen Lösungsvorschlägen weiterentwickelt und dann beispielsweise nach ihren Vor- und Nachteilen, den notwendigen Investitionen und den Risiken bewertet. ([POSNER13B, S. 9] nach [VDI11])

### **5.2.7 Schritte 8 und 9: Präsentieren der Vorschläge, Entscheidung erwirken, Vorschläge / Entscheidung realisieren**

In diesem Schritt werden die vorgeschlagenen Lösungen präsentiert und Ablaufpläne zu ihrer Umsetzung ausgearbeitet. Die Entscheidungsgrundlage für die Entscheidungsträger wird vorbereitet. Es müssen nach der Entscheidung alle am Projekt beteiligten Personen über die Entscheidungen der Entscheidungsträger und das weitere Vorgehen informiert werden. Die tatsächlichen Ergebnisse müssen mit den Vorhersagen verglichen und die erzielten Ergebnisse kommuniziert werden. [VDI 2800 2010, S. 20 ff.]

### **5.2.8 Masseabhängigkeit einiger Wirkprinzipien**

Rapp [RAPP09, S. 39 ff.] kritisiert am Ansatz der Wertanalyse bei der Anwendung auf Masse, dass es Funktionen gibt, wie die eines Schwungrads, für die die Qualität ihrer Funktionserfüllung mit der Masse steigt, die für ihre Funktionserfüllung aufgebracht

wird. Jedoch steckt hinter dem Beispiel des Schwungrads ein Wirkprinzip. Das heißt, es gibt Wirkprinzipien, für die diese Überlegung gelten kann. Im Fall des Schwungrads kann jedoch bei geringerer Masse mit erhöhter Drehzahl ebenfalls gleich viel Energie gespeichert und damit die gleiche Qualität an Funktionserfüllung erreicht werden. Des Weiteren wäre ein Wechsel eines solchen masseabhängigen Wirkprinzips denkbar, indem z. B. die Energie über eine Feder, einen Akkumulator, einen Brennstoff, ein komprimiertes Gas oder ähnliches gespeichert wird. Ein weiteres Beispiel für die Überlegungen von Rapp [RAPP09, S. 39 ff.] könnte ein Schirmständer sein. Je schwerer dieser ist, desto weniger läuft er Gefahr, umzukippen. So kann mit größerer Masse im Bodenbereich des Ständers dessen Standsicherheit und damit eine seiner Hauptfunktionalitäten verbessert werden. Jedoch ist auch hierbei ein Wechsel des Wirkprinzips denkbar, indem der Ständer auf dem Boden verschraubt und damit die Masse zur Steigerung der Standsicherheit überflüssig wird. Es ist damit eine Optimierung der Masse trotz des zunächst masseabhängigen Lösungsprinzips denkbar. Dies widerspricht folglich nicht dem Ansatz der Funktionsmassenanalyse.

### **5.2.9 Kombinieren der Funktionsmassenanalyse und der Wertanalyse**

Da die Kosten bei Leichtbau-Konstruktionen, wie auch bei jeder anderen Konstruktion, immer ein entscheidender Faktor sind, kann eine parallele Anwendung der Wertanalyse auf Kosten und Masse zweckmäßig sein. Im Anschluss an die Funktionsmassenanalyse werden zwar Lösungen entwickelt, die auch bezüglich des Bewertungskriteriums „Kosten“ bewertet werden. Jedoch können durch die Anwendung der Wertanalyse zeitgleich zur Verfolgung von Massenzielen auch Kostenziele bereits in der Analysephase identifiziert und verfolgt werden. Da die Funktionsmassenanalyse sich von der Wertanalyse ableitet, sind viele Schritte identisch. Dadurch wird der Mehraufwand der doppelten Anwendung der Wertanalyse auf Kosten und Masse reduziert und es können Synergien genutzt werden.

### **5.2.10 Zusammenfassung**

Die vorgestellte Methode zeigt, wie die Wertanalyse bezüglich der Massenoptimierung statt der Kostenoptimierung eingesetzt werden kann. Mit der übertragenen Wertanalyse, die als Funktionsmassenanalyse (FMA) bezeichnet wird, können die Projektmitglieder bestehende Produkte analysieren und diese Analyse dazu verwenden, leichtbaugerechte Produkte zu entwickeln. Die Methode unterstützt die Entwickler dabei, die Wichtigkeit von Funktionen für den Kunden und die Masse, die zur Umset-

zung der Funktion benötigt wird, zu analysieren. Basierend auf diesen Informationen können die Projektmitglieder ihre Produkte an die Bedürfnisse der Kunden anpassen. Funktionen, die zu ihrer Erfüllung große Masse benötigen oder für den Kunden eher unwichtig sind, können weggelassen werden. Dieses Weglassen von weniger wichtigen Funktionen eröffnet dem Leichtbau neue Möglichkeiten. Diese Analyse kann zusätzlich auch auf Bauteil- und Baugruppenebene durchgeführt werden. Die Vorteile der Funktionsmassenanalyse, wie die Nutzung eines interdisziplinären Teams für das Projekt, die Entwicklung eines allgemeinen Verständnisses für das Produkt, die Untersuchung der Wichtigkeit von Funktionen und die Visualisierung der Ressourcen, die für die Umsetzung der Funktion benötigt werden, werden integriert, um an den Erfolg der Wertanalyse anzuschließen. (nach [POSNER13B, S. 10])

Die Methode wurde anhand erster exemplarischer Erprobungen entwickelt. Die Projektmitglieder, die die Wertanalyse oder die Funktionsmassenanalyse durchführen, haben großen subjektiven Einfluss auf die Methodenanwendung. Außerdem sind einige Schritte wenig präzise, wie beispielsweise der Abgleich von Kundenanforderungen mit Funktionen. Trotzdem belegen zahlreiche erfolgreiche Einsätze der Wertanalyse in der Industrie den Erfolg der Wertanalyse, von der die Idee und die Arbeitsschritte der Funktionsmassenanalyse abgeleitet sind. Dies ist ein Indiz dafür, dass die Funktionsmassenanalyse ebenfalls in der Praxis funktionieren kann, trotz der Abhängigkeit von den subjektiven Einflüssen der Nutzer. [POSNER13B, S. 10] Die Anwendung der Funktionsmassenanalyse in der Praxis wird in der Evaluation in Kapitel 6 vorgestellt und analysiert.

Die Funktionsmassenanalyse kann, wie die Wertanalyse nach VDI 2800 [VDI 2800 2010], sowohl als alleinstehendes Projekt mit den Schritten 0 bis 9 durchlaufen werden oder als Methoden-Modul im Methoden-Baukasten zum leichtbaugerechten Konzipieren genutzt werden. Dabei werden die Schritte 3 und 4 als Methoden-Modul, nachfolgend als Funktionsmassenanalyse-Modul bezeichnet, durchgeführt. Um die Ausnutzung der mittels der Funktionsmassenanalyse gefundenen Leichtbaupotenziale zu unterstützen, können die nachfolgend beschriebenen Methoden-Module zur Leichtbau-Lösungssuche angewendet werden. Zur Erarbeitung dieser Methoden-Module werden zunächst im folgenden Abschnitt Grundsätze zur systematischen Leichtbau-Lösungsentwicklung untersucht.

### 5.3 Grundsätze der systematischen Leichtbau-Lösungsentwicklung

In den nachfolgenden Abschnitten sollen Methoden-Module für die Entwicklung von Leichtbau-Lösungen erarbeitet werden. Um diese Methoden-Module systematisch entwickeln zu können, werden in diesem Abschnitt grundsätzliche Ansätze aufgestellt, die für die systematische Leichtbau-Lösungsentwicklung gelten. Es stellt sich daher, wie in Abschnitt 4.3 vorgestellt, die Forschungsfrage: *Welche grundsätzlichen Ansätze können genutzt werden, um die Entwicklung von Leichtbau-Lösungen zu unterstützen?*

Verschiedene Autoren (bspw. [HÖHNE83, S. 29 ff.; LINDEMANN09, S. 28, 230; NIEMANN05, S. 7; PAHL07, S. 78; PONN11, S. 25]) schlagen vor, Lösungen systematisch zu variieren, um eine Lösungsvielfalt zu erhalten und daraus die am besten geeignete Lösung für den jeweiligen Fall auswählen zu können. Dabei soll nicht eine möglichst große Anzahl an Lösungen das Ziel sein, sondern die gezielte Variation, um geeignete Alternativlösungen zu finden [PONN11, S. 25]. Dieses Vorgehen der Beschreibung einer ersten Lösung, der Variation dieser Lösung und der anschließenden Bewertung und Auswahl der weiterzuverfolgenden Lösungen, wird der nachfolgend entwickelten Methodik zugrunde gelegt werden.

Lösungen können, wie in Abschnitt 3.2 erörtert, auf verschiedenen Abstraktionsebenen, wie z. B. auf Funktions- oder Wirkebene, beschrieben werden. Durch diese Abstraktion werden Informationen weggelassen, die für die jeweilige Betrachtung nicht notwendig sind. Es können daher nur Informationen variiert werden, die auf dem jeweiligen Abstraktionsniveau auch beschrieben sind.

Der Contact & Channel<sup>2</sup> - Approach [ALBERS16] umfasst ein Modell und eine Methode zur funktionalen Abstraktion und Beschreibung eines Bauteils, einer Baugruppe oder eines Produkts auf Gestaltebene, vgl. Abschnitt 2.6.3. Diese Methode schlägt zur Lösungssuche ebenfalls die Variation des abstrakten Modells vor. Da dieses Modell aus Wirkflächenpaaren und Leitstützstrukturen besteht, kann eine vollständige Variation des Modells durch Hinzufügen, Entfernen dieser und Ändern derer Eigenschaften erzielt werden. Dieser Ansatz der Modellvariation zur Unterstützung der vollständigen Variation der Lösungen mit den Metaregeln Hinzufügen, Entfernen und Ändern von Eigenschaften der Modellelemente wird für die Entwicklung der weiteren Methoden-Module auf verschiedenen Ebenen der Lösungsbeschreibung genutzt.

Der Schritt des Entfernens von Elementen und damit verbunden des Zusammenfassens dieser Elemente entsprechen dem Ansatz der Reduktion auf das für den

Kundennutzen Wesentliche. Auch das Ändern von Eigenschaften kann beispielsweise der Variation von Werkstoffen und damit der weit verbreiteten Leichtbau-Strategie des Werkstoffleichtbaus zugeordnet werden. Beim Hinzufügen von Elementen ist zu berücksichtigen, dass diese zusätzlichen Elemente zu mehr Masse führen können, da sie selbst Masse besitzen, es sei denn sie stellen beispielsweise Software-Elemente dar. Daher muss das Hinzufügen von Elementen dazu führen, dass entweder andere Elemente leichter ausgeführt werden können oder die hinzugefügten Elemente schwerere Elemente ersetzen und diese schwereren Elemente daher entfernt werden können.

Werden diese drei Schritte der Variation systematisch durchgeführt, so kann auf abstrakter Ebene auch das Hinterfragen und Loslösen von bekannten Lösungen systematisch unterstützt werden. Dabei müssen jedoch zum einen diese abstrakten Lösungen wieder in reale Lösungen übersetzt bzw. interpretiert werden und zum anderen die gefundenen Lösungen soweit reduziert werden, dass sie eine weiterverfolgbare Anzahl an Lösungen darstellen. Die Anzahl der weiterverfolgbaren Lösungen hängt wiederum von verschiedenen Einflussfaktoren ab, wie beispielsweise der verfügbaren Kapazität der Entwickler.

Auf die Variation muss demnach eine Bewertung und Auswahl oder zumindest Vorauswahl der Lösungen folgen. Dies ist auf abstrakter Ebene bezüglich des Leichtbaupotenzials der Lösungen nicht immer möglich, da die Masse eines Produkts oder einer Lösung erst dann feststeht, wenn das Volumen, die Dichte und damit der Werkstoff jedes einzelnen Bauteils bekannt sind. In den folgenden Kapiteln wird daher immer nach Möglichkeiten gesucht, Anhaltspunkte zu finden, die eine Abschätzung des Leichtbaupotenzials verschiedener Lösungen bereits auf einem abstrakten Niveau ermöglichen.

Diese hier vorgestellten allgemeinen Überlegungen zur Variation von abstrakten Lösungen auf unterschiedlichen Ebenen, deren Auswahl und Bewertung, dienen im Folgenden zur Erarbeitung von Methoden-Modulen zur Entwicklung von Leichtbau-Lösungen auf verschiedenen Ebenen der Lösungsbeschreibung in der Konzeptphase.

## **5.4 Leichtbau-Lösungsentwicklung auf Funktionsebene**

Die erste Abstraktionsebene nach der Festlegung der Anforderungen, in der Lösungen entwickelt und beschrieben werden, ist die Funktionsebene, siehe Bild 5.1. Daher werden in diesem Abschnitt die Grundsätze der systematischen Leichtbau-Lösungsentwicklung aus Abschnitt 5.3 auf die Ebene der Funktionsstrukturen ange-

wendet. Dieses Methoden-Modul des Methoden-Baukastens wird als Funktions-Leichtbau-Modul (FLM) bezeichnet.

Die Schwierigkeit der Berücksichtigung von DfX / DtX-Kriterien, wie z. B. dem Leichtbau, in den frühen Phasen liegt darin, dass in diesen Phasen die Lösungen auf einem hohen Abstraktionsgrad beschrieben werden, z. B. auf der Ebene der Funktionsstrukturen. Auf dieser Abstraktionsebene liegen nur wenige Informationen über die Eigenschaften der Lösungen und keinerlei Informationen über die Masse der Lösungen vor. [POSNER13A, S. 1 f.] Es stellt sich für diesen Abschnitt daher die folgende Forschungsfrage: *Wie kann das Leichtbaupotenzial von Produkten bereits auf Ebene der Funktionen und Funktionsstrukturen gesteigert werden?*

Um dieses Problem der fehlenden Anwendbarkeit des leichtbaugerechten Entwickelns zu lösen, werden in diesem Abschnitt zunächst der Informationsgehalt (Abschnitt 5.4.1), die Freiheitsgrade des Modells der Funktionsstruktur (Abschnitt 5.4.2) und Variationsmöglichkeiten dessen untersucht und erweitert. Außerdem werden die bestehenden Leichtbau-Strategien dahingehend untersucht, ob sie auf die Funktionsstruktur angewendet werden können (Abschnitt 5.4.3). Des Weiteren werden eine systematische Variation (Abschnitt 5.4.4) und Möglichkeiten der Auswahl der passenden Funktionsstruktur (Abschnitt 5.4.5) vorgeschlagen, um das Leichtbaupotenzial der Funktionsstruktur nutzbar zu machen. Diese Variation und Reduktion werden in ein Vorgehen zur Steigerung des Leichtbaupotenzials von Funktionsstrukturen integriert (Abschnitt 5.4.6). Die nachfolgenden Abschnitte basieren auf der Veröffentlichung von Posner et al. [POSNER13A].

#### **5.4.1 Informationsgehalt der Funktionsstrukturen**

Um den Informationsgehalt der Funktionsstrukturen zu analysieren, werden die Elemente der Funktionsstruktur einzeln betrachtet und auf ihre beinhalteten Informationen hin untersucht. Für diese Untersuchung werden die Merkmale Art, Größe, Anzahl, Ort und Zeit genutzt, siehe Tabelle 5.5 erste Zeile. [POSNER13A, S. 3] Nach Pahl et al. [PAHL07, S. 47 f.] lassen sich die elementaren Teilfunktionen auf fünf allgemein anwendbare Funktionen und deren Umkehrung zurückführen. Durch diese Funktionen lassen sich die Merkmale von einer bestimmten Eingangsgröße in eine Ausgangsgröße überführen. Welche Funktion welches Merkmal beeinflusst, zeigt Tabelle 3.2 auf S. 45. Das Element „Teilfunktion“ der Funktionsstruktur kann bezüglich dessen Art zu einer der fünf allgemein anwendbaren Funktionen zugeordnet werden, wie Tabelle 5.5 zeigt.

Da für die Umsetzung der Teilfunktionen in diesem Schritt der Konzeptphase noch keine Lösung festgelegt wurde, können für die Teilfunktionen keine quantitativen Größen, wie z. B. die Masse, definiert werden. Der Ort der Teilfunktion ist nur qualitativ über das Zusammenwirken mit anderen Teilfunktionen bekannt. Auch die zeitlichen Abläufe sind in der Funktionsstruktur qualitativ durch die Verknüpfung der Teilfunktionen durch „Flüsse“ dargestellt. [POSNER13A, S. 3]

Die drei Umsatz- bzw. Flussarten Stoff-, Energie- und Signalfluss sind weitere Bestandteile der umsatzorientierten Funktionsstruktur. In der Funktionsstruktur sind keine Informationen über die Größen, jedoch über die Anzahl der Flüsse vorhanden. Die Flüsse verlaufen entweder zwischen zwei Teilfunktionen oder zwischen einer Teilfunktion und dem Ein- oder Ausgang des Systems zur Umgebung. Damit sind ihr Ort und ihre zeitliche Abfolge qualitativ, aber nicht quantitativ bestimmt. Die Systemgrenze bildet das dritte Element der Funktionsstruktur. Sie grenzt das System zur Systemumgebung und damit zu nicht näher betrachteten Funktionen ab. Sie enthält damit qualitative Informationen über den Ort und die Zeit der Funktionserfüllung, wie in Tabelle 5.5 beschrieben. [POSNER13A, S. 3] Diese Elemente werden im nächsten Abschnitt auf deren Freiheitsgrade und Möglichkeiten der Variation hin untersucht.

	Art	Größe	Anzahl	Ort	Zeit
Teilfunktion	Ändern, Wandeln, Leiten, Verknüpfen, Speichern	-	Quantitativ	Qualitativ	Qualitativ
Fluss	Stoff, Energie, Signal	-	Quantitativ	Qualitativ	Qualitativ
Systemgrenze	-	-	Quantitativ	Qualitativ	Qualitativ

**Tabelle 5.5:** Informationen der Elemente der Funktionsstruktur [POSNER13A, S. 3]

#### 5.4.2 Freiheitsgrade und Möglichkeiten der Variation der Funktionsstruktur

Bei der Erstellung der Funktionsstruktur werden mit jeder Detaillierung und damit Konkretisierung der Funktionsstruktur implizit Lösungsmöglichkeiten ausgeschlossen und andere fokussiert. Eine vollständig lösungsneutrale Beschreibung ist nicht möglich. Je detaillierter die Funktionsstruktur dargestellt wird, desto mehr Lösungen werden ausgeschlossen. Wenn ein Konstrukteur beispielsweise Flüsse einer Funktionsstruktur bereits als elektrische Energieflüsse bezeichnet, stellt er sich möglicherweise schon ein elektrisches oder mechatronisches Produkt vor. Dies kann er entsprechend in der Beschreibung der Funktionsstruktur vermerken. Durch diese Einschränkung werden jedoch schon weitere Lösungsmöglichkeiten ausgeschlossen. Eine Variation dieser Konkretisierung, wie z. B. die Bezeichnung der Flüsse als elektrische Energieflüsse, kann dabei unterstützen, sich von dieser vorausgesetzten und meist unbewusst ent-

schiedenen Lösungseinschränkung zu lösen. Dazu müssen folglich alle zusätzlichen Informationen in der Funktionsstruktur variiert werden. [POSNER13A, S. 4 f.]

Tabelle 5.6 fasst auf der linken Seite die beiden Ansätze zur Variation von Funktionsstrukturen nach Pahl et al. [PAHL07, S. 254] und Ponn und Lindemann [PONN11, S. 77 f.] zusammen und stellt diese gegenüber. Durch diese Ansätze werden nur die Funktionen und die Systemgrenze variiert. Eine Variation der Flüsse wird nicht vorgeschlagen. Diese Variation der Flüsse kann jedoch auch Auswirkungen auf die Funktionen haben. So kann beispielsweise der Wechsel von einem Stofffluss auf einen Energiefluss zu der Idee führen, dass die Funktion „Stoff leiten“ durch die Funktion „Energie leiten“ ersetzt werden kann und damit beispielsweise eine Kraftstoffleitung durch ein elektrisches Kabel ersetzt wird. [POSNER13A, S. 4]

Ansätze aus der Literatur zur Variation von Funktionsstrukturen		Systematisch hergeleitete Variationsmöglichkeiten	
Nach Pahl et al. [PAHL07]	Nach Ponn und Lindemann [PONN11]	Generelle Variationsmöglichkeiten	Spezielle Variationsmöglichkeiten
<b>Funktionen</b>		<b>Funktionen</b>	
Zerlegen ←	Aufteilen	<i>Neue hinzufügen</i>	Aufteilen
			Hinzufügen
Zusammenlegen ↔	Zusammenfassen	<i>Bestehende entfernen</i>	Zusammenfassen
			Weglassen
Ändern der Reihenfolge ←	Vertauschen	<i>Bestehende ändern</i>	Ändern der Reihenfolge
Ändern der Schaltungsart ←	Reihenschaltung		Ändern der Schaltungsart
	Parallelschaltung		Ändern der Funktionsart / Ersetzen
	Kreisschaltung	<b>Flüsse</b>	
	Hinzufügen	<i>Neue hinzufügen</i>	Aufteilen
			Hinzufügen
	Weglassen	<i>Bestehende entfernen</i>	Zusammenfassen
			Weglassen
		<i>Bestehende ändern</i>	Ändern der Fluss Art
<b>Systemgrenze</b>		<b>Systemgrenze</b>	
Verlegen der Systemgrenze	-	<i>Bestehende ändern</i>	Weitere Funktionen mit einschließen
			Funktionen aus System ausgrenzen

**Tabelle 5.6:** Variation von Funktionsstrukturen [POSNER13A, S. 4]

Grundsätzlich können, wie in Abschnitt 5.3 beschrieben, basierend auf den Ansätzen des Contact & Channel – Models [ALBERS05] zur vollständigen Variation Elemente hinzugefügt, entfernt oder dessen Eigenschaften geändert werden. Diese Schritte unterstützen eine vollständige Variation eines Modells. Dieser Variationsansatz wird

auf die Elemente der Funktionsstruktur (Teilfunktionen, Flüsse und Systemgrenze) angewendet, um alle Möglichkeiten einer Variation auszuschöpfen. Dabei sind nicht alle Variationsmöglichkeiten zielführend, beispielsweise ein Hinzufügen oder Entfernen von Systemgrenzen, von der eine vorhanden sein muss, ist nicht zweckmäßig.

Dieses Vorgehen und die Zuordnung der bereits vorgeschlagenen Variationsschritte führen zu den Möglichkeiten der Variation auf der rechten Seite der Tabelle 5.6, die alle Variationen der Funktionsstruktur abdecken. Der Vergleich dieser Variationsmöglichkeiten mit den Elementen und deren Merkmale aus Tabelle 5.5 zeigt, dass alle Merkmale (Art, Anzahl, Ort und Zeit), die in der Funktionsstruktur adressiert werden, variiert werden können. Die Variation der Art der Teilfunktionen ist auf die fünf allgemein anwendbaren Funktionen und deren Negationen beschränkt und die Variation der Art der Flüsse ist auf die Ausführungen Stoff, Energie und Signal begrenzt. [POSNER13A, S. 3] Nachfolgend wird immer von den fünf allgemein anwendbaren Funktionen ausgegangen, deren Negation wird nicht explizit erwähnt, da das Vorgehen für die negierten Funktionen gleich ist, wie das für die allgemein anwendbaren Funktionen.

### **5.4.3 Leichtbau-Strategien und deren Anwendung auf die Funktionsstruktur**

Die Literatur schlägt verschiedene Leichtbau-Strategien vor. Um dieses Wissen auf der Ebene der Funktionsstruktur zu nutzen, muss untersucht werden, ob diese Strategien schon bei der Entwicklung der Funktionsstruktur berücksichtigt werden können. Da die Funktionsstruktur keine Informationen über den Werkstoff, die Form oder die Fertigung einer Lösung enthält, können die Strategien des Werkstoff-, Form- und Fertigungsleichtbaus, wie auch die Leichtbau-Prinzipien und Bauweisen im Leichtbau nicht angewendet werden. Durch das Hinterfragen der Teilfunktionen, Flüsse und der Systemgrenze, die in der Funktionsstruktur festgelegt sind, kann die Strategie des Bedingungsleichtbaus verfolgt werden. Dabei wird geklärt, ob das betrachtete System diese Funktionen erfüllen muss oder ob im Einzelfall Funktionen aus dem betrachteten und damit leichtbaurelevanten System ausgelagert werden können. Um damit den Ansatz des Bedingungsleichtbaus für die Steigerung des Leichtbaupotenzials der Funktionsstruktur nutzbar zu machen, wird dieser den Variationsmöglichkeiten zugeordnet. Im Fall des Bedingungsleichtbaus wird durch die Änderung der Systemgrenze hinterfragt, welche Funktionen für das leichtbaurelevante System betrachtet werden sollen, wie in Tabelle 5.7 gezeigt. Das Festlegen der Gesamt- und Teilfunktionen, der Systemgrenze, der Flüsse und die Variation dieser, um das Leichtbaupotenzial zu

steigern, kann dem Konzept- bzw. Systemleichtbau zugewiesen werden. [POSNER13A, S. 5] Da für den Konzept- bzw. Systemleichtbau keine anwendbare Vorgehensweise existiert, kann diese nicht weiterführend auf die Funktionsstruktur angewendet werden.

Im folgenden Abschnitt werden die weiteren Freiheitsgrade und Möglichkeiten der Variation der Funktionsstruktur im Detail untersucht, um weitere Ansätze für die Steigerung des Leichtbaupotenzials von Funktionsstrukturen zu entwickeln.

#### 5.4.4 Steigerung des Leichtbaupotenzials durch Funktionsstrukturvariation

Unterschiedliche Varianten von Funktionsstrukturen können zu unterschiedlichen Lösungen und damit zu unterschiedlichen Produktmassen führen. Um Funktionsstrukturen gezielt zu variieren und damit deren Leichtbaupotenzial zu steigern, muss untersucht werden, welchen Einfluss die Variationsmöglichkeiten haben, die in Tabelle 5.6 vorgestellt wurden. Dies wird in Tabelle 5.7 gezeigt.

Systematisch hergeleitete Variationsmöglichkeiten		Verfolgbarer Leichtbauansatz
Generelle Variationsmöglichkeiten	Variationsmöglichkeiten auf Funktionsebene	
<b>Funktionen</b>		
<i>Neue hinzufügen</i>	Aufteilen	Reduzieren anderer TF durch Hinzufügen neuer TF
	Hinzufügen	
<i>Bestehende entfernen</i>	Zusammenfassen	Funktionsintegration
	Weglassen	Funktionselimination
<i>Bestehende ändern</i>	Ändern der Reihenfolge	Um Funktionsintegration zu ermöglichen
	Ändern der Schaltungsart	
	Ändern der Funktionsart / Ersetzen	Lösen von in der FS indirekt vorhandenen Wirkprinzipien z. B. Mechatronik Leichtbau
<b>Flüsse</b>		
<i>Neue hinzufügen</i>	Aufteilen	
<i>Bestehende entfernen</i>	Zusammenfassen	Flussintegration
<i>Bestehende ändern</i>	Ändern der Fluss Art	Lösen von in der FS indirekt vorhandenen Wirkprinzipien, z. B. Mechatronik-Leichtbau
<b>Systemgrenze</b>		
<i>Neue hinzufügen</i>	-	
<i>Bestehende entfernen</i>	-	
<i>Bestehende ändern</i>	Weitere Funktionen mit einschließen	
	Funktionen aus System ausgrenzen	Bedingungsleichtbau / Systemleichtbau
TF = Teilfunktion, FS = Funktionsstruktur		

**Tabelle 5.7:** Variation von Funktionsstrukturen zur Steigerung des Leichtbaupotenzials

[POSNER13A, S. 6]

Da die Produktmasse erst durch das Festlegen des Volumens und des Werkstoffs bzw. der Dichte jedes Bauteils definiert ist, kann die gleiche Funktionsstruktur oder die gleiche Variante einer Funktionsstruktur durch die unterschiedliche Umsetzung, z. B. durch Wirkprinzipien, Gestalt und Werkstoff, zu unterschiedlich schweren Produkten führen. Die Variation kann jedoch die Entwicklung neuer Leichtbaulösungen unterstützen. [POSNER13A, S. 5 ff.]

Die ersten Variationsmöglichkeiten der Funktionsstruktur nach Tabelle 5.7 stellen das Aufteilen und Hinzufügen von Funktionen dar. Da ein Hinzufügen von Funktionen meist zusätzliche Masse im System verursacht, weil fast jede Funktion für deren Erfüllung Masse benötigt, führt diese Variation in den meisten Fällen zu einer Verschlechterung des Leichtbaupotenzials. Eine aufgeteilte und damit dezentrale Funktionserfüllung kann jedoch zu einer Steigerung des Leichtbaupotenzials beitragen, wenn dadurch beispielsweise das Leiten von Stoff und/oder Energie reduziert werden kann. Beispielsweise können dezentrale Elektromotoren dort verbaut werden, wo die mechanische Energie im Produkt auch benötigt wird. Eine Übertragung mechanischer Energie, beispielsweise über Wellen, kann eingespart werden. [POSNER13A, S. 5 ff.]

Durch die Variation des Zusammenfassens von Funktionen kann die Funktionsintegration als Leichtbauansatz unterstützt und dadurch das Leichtbaupotenzial gesteigert werden. Die Anordnung von Funktionen in räumlicher Nähe und das „Clustern“ von ähnlichen oder zusammengehörenden Funktionen können als Vorbereitung für die Funktionsintegration in der weiteren Konzeptphase dienen. Funktionen, die nicht unbedingt gefordert oder notwendig sind, können weggelassen, deren Masse eingespart und damit das Produkt auf den gewollten Kundennutzen ausgerichtet werden.

Durch die Änderung der Schaltungsart und Reihenfolge von Funktionen kann nicht direkt das Leichtbaupotenzial der Funktionsstruktur gesteigert werden, da keine Funktionen eingespart werden können. Führt eine solche Änderung jedoch beispielsweise zur Integration von Funktionen, kann diese Variation eine Steigerung des Potenzials darstellen. Werden Funktionen ersetzt, so führt dies zur Steigerung des Leichtbaupotenzials, wenn die neu eingesetzten Funktionen ein größeres Leichtbaupotenzial besitzen. Wird die Funktionsstruktur detailliert und konkretisiert, so sind in dieser schon implizit Wirkprinzipien vorgegeben. Es kann eine Kombination an Funktionen, die ein chemisch-mechanisches Wirkprinzip voraussetzen, wie z. B. die Funktionen „chemische in elektrische Energie wandeln“ und „Drehmoment ändern“ ersetzt werden. Die Teilfunktion „elektrische in mechanische Energie wandeln“ kann diese Funktionen, wie

es in einigen Fällen beispielsweise mit einem passenden Elektromotor mit entsprechender Drehmomentkennlinie möglich ist, ersetzen. Damit wird in einzelnen Fällen, die gesondert untersucht werden müssen, die Funktion „Drehmoment ändern“ eingespart.

Dieser spezielle Ansatz kann dem Mechatronik-Leichtbau zugeordnet werden. Ziel ist es dabei insbesondere elektrische, optische und pneumatische Lösungen zu bevorzugen. Die Betrachtung der Leichtbauansätze auf dem hohen Abstraktionsniveau der Funktionsstruktur kann die Entwicklung radikal neuer Leichtbau-Lösungen unterstützen. Diese Unterstützung kann auch durch die Variation durch Zusammenfassen, Aufteilen und Ändern von Flüssen gegeben werden. Alle zusätzlichen Informationen, die die Funktionsstruktur umfasst, wie beispielsweise die Einschränkung auf elektrische Energieflüsse, müssen ebenfalls variiert werden, um keine Lösung mit größerem Leichtbaupotenzial im Voraus und unbewusst auszuschließen. [POSNER13A, S. 5 ff.]

Im Gegensatz zum Integrieren von Teilfunktionen in das leichtbaukritische System kann das Ausgrenzen zur Steigerung des Leichtbaupotenzials führen, da fast jede Funktion für deren Erfüllung Masse benötigt. Diese Überlegung kann dazu führen, dass bei einigen Produkten Teilfunktionen aus dem leichtbaukritischen Bereich in einen weniger massekritischen Bereich ausgelagert werden können. Ein Beispiel hierfür ist das Gedankenexperiment nach Schach et al. [SCHACH06, S. 150], bei dem durch das Auslagern von Teilfunktionen in die Schiene von einer herkömmlichen Lokomotive mit Rad-Schiene-System auf eine Magnetschwebbahn geschlossen werden kann. Dabei wird ein Teil der Funktionen vom massekritischen System Lokomotive in das weniger massekritische System der Schiene ausgelagert. Auch der Übergang vom dieselgetriebenen Schienenfahrzeug zum elektrisch angetriebenen Fahrzeug mit Oberleitung kann zu einer Reduzierung der Masse führen [HOFFMANN12], die im Produkt mitgeführt werden muss, da das Speichern der Energie nicht mehr im mitgeführten Kraftstoff, sondern außerhalb des bewegten Systems realisiert wird. [POSNER13A, S. 5 ff.]

#### **5.4.5 Kriterien für das Leichtbaupotenzial von Funktionsstrukturen**

Die Funktionsstruktur enthält keine Informationen über die Masse, die für die Umsetzung dieser Funktionen benötigt wird. Aus diesem Grund können keine Kriterien für die Bewertung der Masse, die durch die Realisierung verschiedener Varianten von Funktionsstrukturen verursacht wird, aufgestellt werden. Dennoch können einige Kriterien zur

Steigerung des Leichtbaupotenzials von Funktionsstrukturvarianten relativ zu anderen Varianten erörtert werden. [POSNER13A, S. 7]

Das Ziel ist es, die Gesamtfunktion mit möglichst wenigen Teilfunktionen realisieren zu können, da fast jede zusätzliche Funktion auch zusätzliche Masse bedeutet. Um verschiedene Varianten einer Funktionsstruktur miteinander vergleichen zu können, müssen diese Funktionsstrukturen auf der gleichen Detaillierungsebene beschrieben werden. Dabei muss beispielsweise auch die Teilfunktion „Leiten“, die beinahe für jede Verbindung zweier Teilfunktionen benötigt wird, bei den zu vergleichenden Varianten gleich berücksichtigt werden, da diese sonst nicht vergleichbar wären und damit die Abschätzung der Leichtbaupotenziale verfälscht werden würden. [POSNER13A, S. 7]

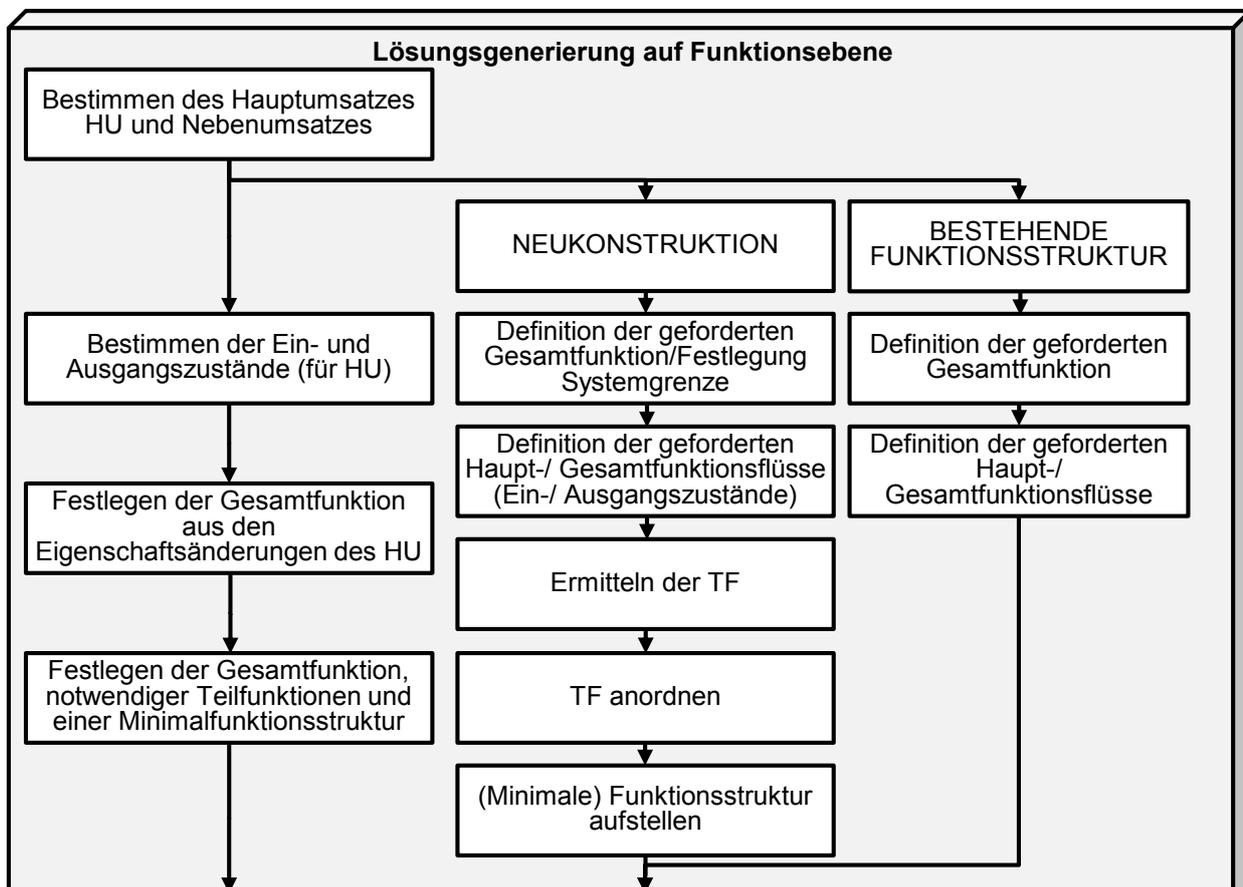
Wie bereits in Abschnitt 3.2.1 beschrieben, werden die Merkmale Art, Größe und Anzahl, d. h. die Eigenschaften des Umsatzes, durch die Funktionen „Wandeln“, „Ändern“ und „Verknüpfen“ direkt beeinflusst. Die Funktionen „Leiten“ und „Speichern“ ändern den Ort und die Zeit des Umsatzes, während die Art, Größe und Anzahl unbeeinflusst bleiben. Es ist daher zu prüfen, ob durch Änderung der Anordnung und Variation der Teilfunktionen, vor allem die Teilfunktionen „Leiten“ und „Speichern“ eingespart oder ausgelagert werden können. Unter der Voraussetzung, dass Material bzw. Stoff immer Masse besitzt, verursacht dieses auch immer direkt Masse im Produkt. Außerdem wird nachfolgend angenommen, dass Energie und Signal an sich keine Masse besitzen. Des Weiteren wird vorausgesetzt, dass Energie und Signal im Produkt indirekt durch deren Träger oder Leiter Masse verursachen, da Signale ausschließlich in Zusammenhang mit Energie oder Stoff auftreten und übermittelt werden können (vgl. [ROTH00, S. 18 ff.]). Daraus lässt sich ableiten, dass die Entwicklung einer Lösungsvielfalt, beispielsweise mit dem Ziel, Stoff- durch Energieflüsse zu ersetzen, zur Steigerung des Leichtbaupotenzials führen kann. Damit können beispielsweise Ideen für mechatronische, elektrische, elektronische, magnetische oder optische Lösungen unterstützt werden. [POSNER13A, S. 7]

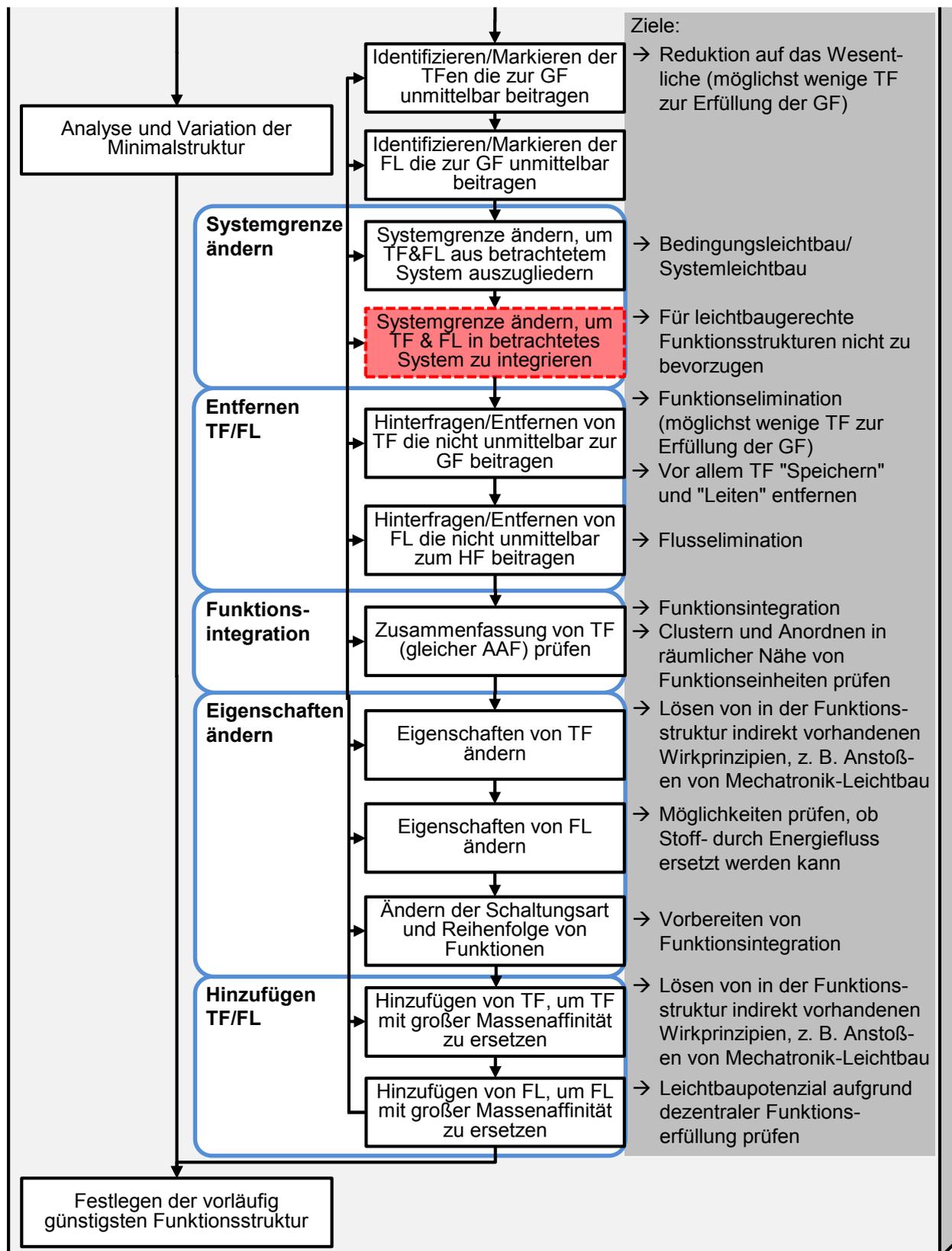
#### **5.4.6 Vorgehen zur Entwicklung von Funktionsstrukturen mit dem Ziel der Steigerung des Leichtbaupotenzials**

Zur Steigerung des Leichtbaupotenzials von Funktionsstrukturen sind prinzipiell zwei Wege denkbar. Zunächst kann der Konstrukteur beispielsweise aufgrund seiner Erfahrung direkt eine Funktionsstruktur aufstellen, die ein großes Leichtbaupotenzial besitzt. Selbst unter der Voraussetzung, dass der Konstrukteur viel Erfahrung besitzt, ist dies

schwer und nicht systematisch unterstützt möglich. Den zweiten Weg stellt das Aufstellen einer ersten Funktionsstruktur, deren möglichst vielseitige Variation und die Reduktion der Lösungsvielfalt unter Berücksichtigung derer Leichtbaupotenzials dar. Für die Variation können die Variationsmöglichkeiten aus Tabelle 5.7 genutzt werden. Die Kriterien aus dem letzten Abschnitt können eine Reduktion der Lösungsvielfalt unter Berücksichtigung des Leichtbaupotenzials der Funktionsstrukturen zwar unterstützen, es kann jedoch keine eindeutige Entscheidung für die Funktionsstruktur gefällt werden, die unabhängig von ihrer Umsetzung zum leichtesten Produkt führt. Dadurch müssen unter Umständen mehrere Funktionsstrukturen weiterverfolgt werden, die den Kriterien nach ein größeres Leichtbaupotenzial aufweisen. [POSNER13A, S. 7 ff.]

Der zweite Weg zur Entwicklung einer Funktionsstruktur mit gesteigertem Leichtbaupotenzial ist in Bild 5.9 dargestellt. Auf der linken Seite des Bilds ist die Vorgehensweise zur Entwicklung einer Funktionsstruktur nach VDI 2221 [VDI 2221 1993, S. 18] aufgezeigt. Rechts davon ist das vorgeschlagene Vorgehen zur Erstellung, Variation und Reduktion der Lösungsvielfalt der Funktionsstruktur dargestellt, um das Leichtbaupotenzial bei der Entwicklung von Funktionsstrukturen nutzbar zu machen. Dabei ist in der Mitte von Bild 5.9 das Vorgehen für Neukonstruktionen und rechts das Vorgehen für bestehende Funktionsstrukturen abgebildet.





HU Hauptumsatz      TF Teilfunktionen       Für leichtbaugerechte Funktionsstruktur nicht zu bevorzugen  
 GF Gesamtfunktion      FL Flüsse  
 AAF Allgemein anwendbare Funktion

**Bild 5.9:** Funktions-Leichtbau-Modul (vgl. [POSNER13A, S. 8])

Nachfolgend soll die Vorgehensweise anhand eines Beispiels in Auszügen betrachtet werden, um die Anwendung zu verdeutlichen. In dieser Anwendung wurde das Methoden-Modul durch Entwickler auf eine bestehende Werkzeugmaschinentür unter Moderation des Autors dieser Arbeit angewendet. Dabei handelt es sich um eine Maschinenschutztür eines Metallbearbeitungszentrums, die in der meistverkauften Variante manuell bedient wird und eine Masse von 134 kg aufweist, siehe Bild 5.10.

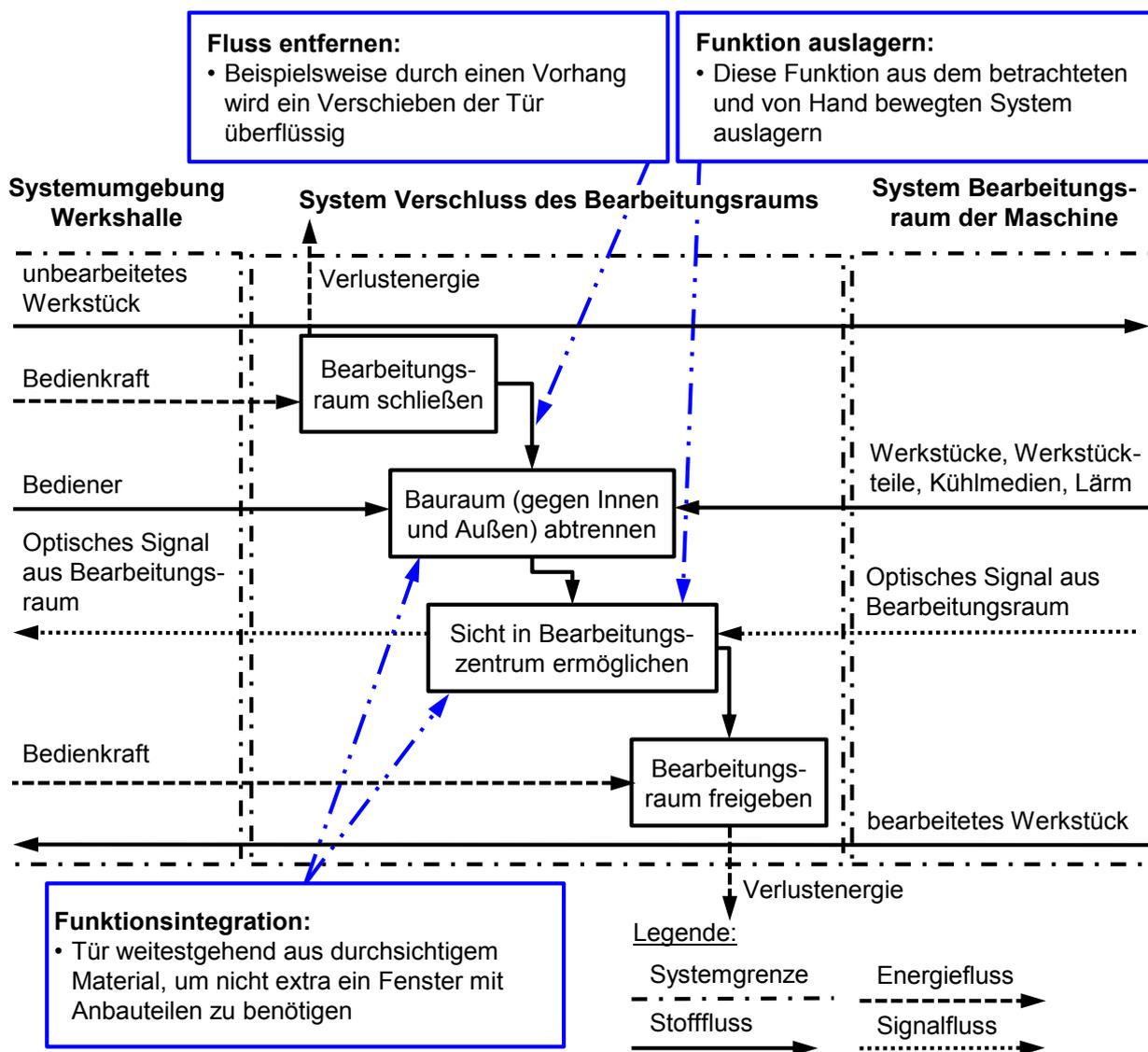


**Bild 5.10:** Bearbeitungszentrum T7 1600 der HEDELIUS Maschinenfabrik GmbH

Im Projekt wurde zunächst eine Funktionsstruktur für die Tür des Bearbeitungszentrums aufgestellt, wie in Bild 5.11 gezeigt. Danach wurden, wie in der Vorgehensweise aus Bild 5.9 gefordert, die Funktionen „Bearbeitungsraum schließen“, „Bauraum abtrennen“ und „Bearbeitungsraum freigeben“ sowie die Stoffflüsse des Bedieners, der Werkzeuge, Werkstücke, Kühlmedien und des Lärms als unmittelbar zur Gesamtfunktion beitragend identifiziert und markiert. Mithilfe des Variationsschritts „Funktionen entfernen“ ist die Idee entstanden, dass die Funktion „Sicht in Bearbeitungsraum ermöglichen“ aus dem hier betrachteten höchstmasserelevanten System ausgelagert werden kann. Das Fenster ist in der Tür nicht zwangsweise notwendig und kann beispielsweise in den stillstehenden sowie nicht zu bewegendem Teil der Maschinenschutzbehaltung verlagert werden. Alternativ könnte auch durch einen zusätzlichen Wirkprinzipwechsel ein Kamerasystem im Bearbeitungsraum installiert werden, damit wäre eine ortsunabhängige Überwachung per Onlineübertragung möglich. Diese Idee könnte im Rahmen der Industrie 4.0 für zusätzliche Funktionen genutzt werden.

Durch den Variationsansatz „Flüsse entfernen“ entstand als weiteres Beispiel die Idee, die Tür durch einen Lamellenvorhang zu ersetzen, durch den der Bediener hindurchgreifen kann. Dieser könnte eventuell leichter verschoben werden als die Maschinenschutztür. Der Ansatz der Vorgehensweise Funktionen zusammenzufassen, führte

dazu, dass die Idee entstand, die Funktionen „Bauraum abtrennen“ und „Sicht in Bearbeitungszentrum ermöglichen“ zusammenzufassen. Dadurch soll nicht ein Fenster in die Tür eingesetzt werden, sondern die Tür soll anstatt aus nicht durchsichtigem Stahl aus dem durchsichtigen Kunststoff, der bisher ausschließlich für das Fenster genutzt wurde, ausgeführt werden. Dadurch übernimmt die Tür ohne die Notwendigkeit weiterer Bauteile zusätzlich die Funktion „Sicht in Bearbeitungszentrum ermöglichen“. Diese Einsparung von Bauteilen, der Einsatz des gegenüber der bisherigen Stahltür leichteren Materials und der Einsatz von Kunststoffen in weniger belasteten Bereichen konnten den Kunden des Entwicklungsauftrags überzeugen. Die Lösung wird aufgrund des geringen Mehraufwands bezüglich der Fertigung, der hohen Masseneinsparung von über 36 % [POSNER2015A] und dem gestiegenen Kundennutzen durch den besseren Einblick in den Bearbeitungsraum vom Kunden umgesetzt.



**Bild 5.11:** Leichtbau-Lösungen entwickelt auf Funktionsebene [POSNER2015A, S. 10]

### **5.4.7 Zusammenfassung**

In Abschnitt 5.4 wurden die Elemente der Funktionsstruktur untersucht und Möglichkeiten für eine Variation von Funktionsstrukturen zur Steigerung deren Leichtbaupotenzials aufgezeigt. Die Konstrukteure werden dabei unterstützt, Leichtbau schon beim Aufstellen von Funktionsstrukturen systematisch zu berücksichtigen. Die entwickelte Vorgehensweise hilft, potenziell leichtere Lösungen nicht vorzeitig auszuschließen und eine vielseitige Lösungsvielfalt zu berücksichtigen. Eine frühe Fixierung auf bestimmte Lösungen, die beispielsweise bestimmte Wirkprinzipien implizieren, wird vermieden. Der Konstrukteur wird bei der Ideenfindung für neue leichtbaugerechte Lösungen unterstützt. Die ideale Lösung unter Leichtbau-Gesichtspunkten kann jedoch nicht eindeutig identifiziert werden, da diese von der Umsetzung der Funktionen durch die Wirkstruktur, die Gestaltung und die Werkstoffauswahl abhängt. Es können jedoch einige Leichtbauansätze für die Entwicklung von Funktionsstrukturen aufgezeigt und Kriterien, die Konstrukteure bei der Entwicklung von Funktionsstrukturen für leichtbaugerechte Produkte berücksichtigen sollten, trotz des hohen Abstraktionsgrads der Funktionsstrukturen, aufgezeigt werden. Durch die Vorgehensweise wird das Bewusstsein für den Einfluss auf die spätere Produktmasse durch das Festlegen von Teilfunktionen für diese frühe Phase der Produktentwicklung gefördert. Damit kann die Verfolgung von Massenzielen sowie die Steigerung des Leichtbaupotenzials erreicht werden. Die Auswahl von Lösungen auf der abstrakten Ebene der Funktionsstruktur unter Berücksichtigung des Leichtbaupotenzials kann außerdem mithilfe des Ansatzes der Wertanalyse unterstützt werden. Dieser Ansatz wird in Abschnitt 5.8 ausgeführt. Nachfolgend wird hierzu die Entwicklung von Leichtbau-Lösungen auf Wirkebene untersucht.

## **5.5 Leichtbau-Lösungsentwicklung auf Wirkebene**

Auch die Wirkstruktur hat einen Einfluss auf die Masse eines Produkts, da die Umsetzung verschiedener Wirkstrukturen zu Produkten mit unterschiedlicher Masse führt. Deshalb haben die Suche nach Wirkstrukturen, die Auswahl und Kombination von Wirkprinzipien und die Auswahl von Wirkstrukturen einen großen Einfluss auf die Masse, welche benötigt wird, um die Funktion eines Produkts zu erfüllen. Eine Magnetschwebbahn beispielsweise weist im Vergleich zu einem Zug mit Rad-Schiene-Antriebsprinzip ungefähr die Hälfte der Masse pro Sitzplatz auf [SCHACH06,

S. 150]. Das Ziel dieses Abschnitts ist es, die Ausnutzung des Leichtbaupotenzials bei der Entwicklung von Wirkstrukturen zu unterstützen. [POSNER14C, S. 1]

Derzeit existiert keine Methode, die die Entwicklung von Wirkstrukturen unter Berücksichtigung des Leichtbaupotenzials unterstützt. Deshalb ist die Forschungsfrage des Abschnitts die Folgende: *Wie kann das Leichtbaupotenzial von Produkten bereits auf Ebene der Wirkprinzipien und -strukturen gesteigert werden?* Um diese Frage zu beantworten, werden der Informationsgehalt und die Variationsmöglichkeiten von Wirkprinzipien und -strukturen untersucht (Abschnitt 5.5.1). Darauf aufbauend wird eine Vorgehensweise zur systematischen Entwicklung von Wirkprinzipien und Wirkstrukturen unter Berücksichtigung von Leichtbauaspekten erarbeitet (Abschnitt 5.5.2). Durch die Entwicklung einer Lösungsvielfalt (Abschnitt 5.5.3) kann die Lösungsvariante mit dem höchsten Leichtbaupotenzial ausgewählt und weiterverfolgt werden. Auch die Reduzierung von Lösungen mit Fokus auf deren Leichtbaupotenzial wird vorgestellt (Abschnitt 5.5.4), um eine handhabbare und weiter verfolgbare Anzahl an Wirkstrukturen zu erhalten. Es wird ein Methoden-Modul entwickelt, das die Wahrscheinlichkeit erhöht, Wirkprinzipien zu finden und Wirkstrukturen zu entwickeln, die ein hohes Leichtbaupotenzial aufweisen. Dieses Methoden-Modul des Methoden-Baukastens wird als Wirk-Leichtbau-Modul (WLM) bezeichnet. Die nachfolgenden Abschnitte basieren auf der Veröffentlichung von Posner et al. [POSNER14C].

### **5.5.1 Darstellung und Variation von Wirkstrukturen**

Eine Funktion wird durch Anwendung eines physikalischen Effekts am Wirkort durch die Wirkgeometrie erfüllt. Diese Wirkgeometrie wird durch die Wirkflächen und Wirkbewegung erzwungen [PAHL07, S. 53]. Das Contact & Channel - Model basiert ebenfalls auf den Wirkflächen, die über die Leitstützstrukturen verbunden werden. Darüber hinaus bietet es jedoch auch eine Vorgehensweise für die systematische Analyse von Funktions-Gestalt-Zusammenhängen und für die Synthese zur Entwicklung von Konstruktionslösungen an. Diese wird nachfolgend verwendet.

Der Ansatz dieses Abschnitts ist es, den C&C<sup>2</sup>-A zu erweitern, um alle Informationen von Wirkprinzipien und Wirkstrukturen damit zu beschreiben. Darauf aufbauend wird die systematische Variation in der Synthesephase des C&C<sup>2</sup>-A so angepasst, dass Wirkprinzipien variiert werden können. Das Ziel ist es, eine Vielzahl an Leichtbau-Lösungen zu entwickeln, um daraus eine Lösung mit höherem Leichtbaupotenzial auswählen zu können. (vgl. [POSNER14C, S. 4])

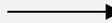
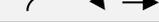
Tabelle 5.8 zeigt den Aufbau und die Bestandteile der Wirkstrukturen und die Merkmale der Wirkprinzipien (Spalten 1 und 2), welche im Abschnitt 3.2.2 vorgestellt wurden. Des Weiteren werden die Elemente und Merkmale der Darstellung des erweiterten C&C<sup>2</sup>-A aufgezeigt, welches nachfolgend als Contact, Channel & Motions - Model (CC&M-M) bezeichnet wird. Mit den Darstellungselementen des C&C<sup>2</sup>-A, den WFP und LSS, können alle geometrischen Merkmale der Wirkprinzipien abgebildet werden. Auch die stofflichen Merkmale der Wirkprinzipien können durch Nutzung der Symbole des C&C<sup>2</sup>-A, z. B. zur Darstellung der Werkstoffart, beschrieben werden. Der physikalische Effekt wird durch Kombination aller Elemente des Wirkprinzips dargestellt, hierzu gehören auch die geometrischen und materialspezifischen Eigenschaften [PAHL07, S. 54]. Des Weiteren können alle Wirkstrukturen, welche durch Kombination der Wirkprinzipien und deren Anordnung aufgebaut sind, durch Nutzung des C&C<sup>2</sup>-A beschrieben werden. [POSNER14C, S. 4]

1	2	3	4	5			
				Hinzufügen	Entfernen	Ändern	
<b>Aufbau und Bestandteile der Wirkstrukturen (WS)</b>	<b>Merkmale der Wirkprinzipien (WP)</b>	<b>Elemente der Darstellung der WP</b>	<b>Merkmale der Elemente der Darstellung der WP</b>				
Anordnung der Wirkprinzipien						X	
Wirkprinzipien	Physikalischer Effekt	Alle Elemente		X	X	X	
	Geometrische Merkmale	Wirkflächenpaare (WFP)	Art				X
			Form				X
			Lage				X
			Größe				X
			Anzahl	X	X		
		Leitstützstrukturen (LSS)	Art				X
			Form				X
			Lage				X
			Größe				X
			Anzahl	X	X		
	Wirkbewegungen (WB)	Art				X	
		Form				X	
		Richtung				X	
		Betrag				X	
		Anzahl	X	X			
	Stoffliche Merkmale	Symbole, die die Eigenschaften der WFP / LSS beschreiben	Fest, flüssig, gasförmig, starr, nachgiebig, elastisch, plastisch...		X	X	X

**Tabelle 5.8:** Variation von Wirkprinzipien und Wirkstrukturen [POSNER14C, S. 5]

Ausschließlich die Wirkbewegungen können nicht mit den WFP und LSS abgebildet werden. Die Bewegung ist bereits durch die WFP und deren Gestalt sowie Anzahl eingeschränkt, die Zwangsbedingungen für die Bewegung zur Folge haben. Außerdem können dynamische Systeme durch die Nutzung des Sequenzmodells beschrieben werden, indem mehrere Zustände einer Sequenz dargestellt werden.

Jedoch ermöglicht die Einführung eines weiteren Elements und dessen Implementierung in das CC&M-M, wie in Tabelle 5.8 ergänzt, eine genaue Beschreibung der Wirkbewegungen (WB) und eine systematische sowie vollständige Variation der Wirkprinzipien und deren Elemente. Nach Pahl et al. [PAHL07, S. 53] wird eine Wirkbewegung durch Art, Form, Richtung, Betrag und Anzahl beschrieben. Diese Eigenschaften werden nachfolgend durch die Darstellung eines Pfeils qualitativ beschrieben. Tabelle 5.9 zeigt die Merkmale der Wirkbewegungen, deren Ausprägungen und eine mögliche Visualisierung dafür. [POSNER14C, S. 4]

1	2	3	4
	Merkmale der Wirkbewegungen	Merkmalausprägungen von Wirkbewegungen	
Wirkbewegung (WB)	Art	Translation	Rotation
			
	Form	Gleichförmig	Ungleichförmig
			
	Richtung	Nach rechts	Nach links
			
	Betrag	Niedrige Geschwindigkeit	Hohe Geschwindigkeit
			
	Anzahl	Eine	Zwei
			

**Tabelle 5.9:** Beschreibung der Wirkbewegungen [POSNER14C, S. 5]

Darauf aufbauend können die Wirkprinzipien durch Hinzufügen, Entfernen und Ändern von Eigenschaften von WFP, LSS und WB systematisch und vollständig variiert werden. Außerdem ermöglichen diese Schritte die Variation der Wirkstrukturen und ihrer Eigenschaften, wie in Spalte 5 in Tabelle 5.8 dargestellt ist. Auf dem CC&M-M aufbauend wird im nachfolgenden Abschnitt eine Vorgehensweise zur Entwicklung von Wirkstrukturen mit dem Fokus der Steigerung des Leichtbaupotenzials erarbeitet.

### 5.5.2 Vorgehen zur Entwicklung von Wirkstrukturen mit dem Ziel der Steigerung des Leichtbaupotenzials

Bild 5.12 zeigt auf der linken Seite den Prozess zur Entwicklung von Wirkstrukturen entsprechend der VDI 2221 [VDI 2221 1993, S. 18]. In der Mitte wird ein erweiterter

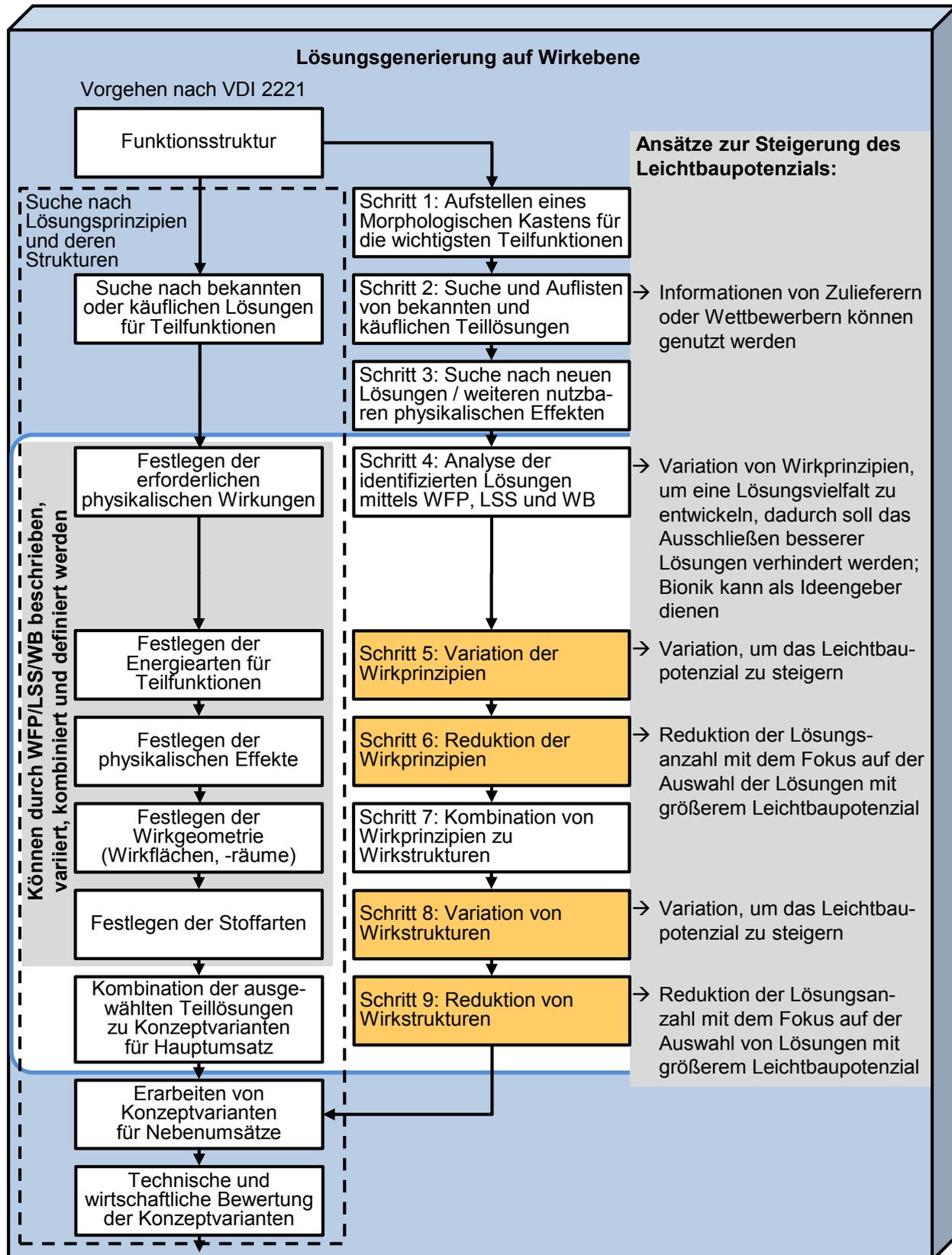
Prozess zur systematischen Entwicklung von Wirkstrukturen mit dem Fokus auf der Steigerung des Leichtbaupotenzials aufgezeigt. Diese Schritte werden im Folgenden detailliert und anhand eines Beispiels für einen Saughäcksler diskutiert. [POSNER14C, S. 5 f.]

Die weiterentwickelte Vorgehensweise baut auf der bereits entwickelten Funktionsstruktur auf, siehe Bild 5.12. Im ersten Schritt wird ein Morphologischer Kasten für die wichtigsten Teilfunktionen erstellt. Im zweiten Schritt suchen die Konstrukteure nach vorhandenen Lösungen und nach Lösungen, welche von Zulieferern bezogen werden können. Im dritten Schritt suchen die Konstrukteure nach neuen Lösungen. Auch neue physikalische Effekte sollen daraufhin überprüft werden, ob damit eine Teilfunktion erfüllt werden kann. Intuitive Methoden können beim Suchen und Finden von Lösungen unterstützen, wie z. B. die Methoden des Brainstormings, Methode 635 oder die Gale-riemethode (vgl. [PAHL07, S. 255 ff.]). Die Lösungen können durch eine einfache Skizze dargestellt werden [PAHL07, S. 255]. Die ersten drei Schritte der erweiterten Vorgehensweise detaillieren den Prozess nach VDI 2221 [VDI 2221 1993, S. 18].

In den nächsten Schritten der VDI 2221 werden alle Aspekte, die physikalischen Effekte, die Wirkgeometrie und das Material, der Wirkprinzipien ermittelt. Wie in Abschnitt 5.5.1 gezeigt, können diese Aspekte mithilfe von WFP, LSS und WB beschrieben werden. Der Vorteil der Beschreibung mithilfe dieser Elemente ist, dass diese systematisch variiert werden können. Folglich unterstützt der vierte Schritt im neuen Prozess die Analyse der ermittelten Lösungen, welche zu einem besseren Verständnis der Lösungen führt und die Grundlage für die Variation der Lösungen im fünften Schritt ist.

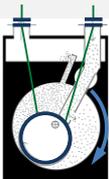
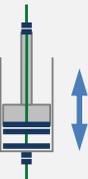
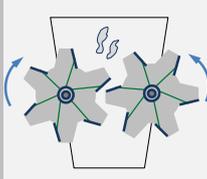
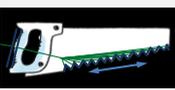
Durch die begrenzten Ressourcen, wie z. B. die begrenzte Zeit, die der Entwickler zur Verfügung hat, können nicht immer alle Lösungen und möglichen Kombinationen weiterverfolgt werden. Daher wird im sechsten Schritt eine Reduktion der Wirkprinzipien unter Berücksichtigung deren Leichtbaupotenzials vorgeschlagen. Damit kann die Variation von Lösungen zur Auswahl der Prinzipien mit dem höchsten Leichtbaupotenzial genutzt werden. Im siebten Schritt werden die Wirkprinzipien miteinander kombiniert und damit Wirkstrukturen entwickelt. Danach können die Wirkstrukturen entsprechend dem Vorgehen, das bei den Wirkprinzipien angewendet wird, im achten Schritt nochmals variiert werden. Darauf aufbauend wird die Anzahl der Varianten der entwickelten Wirkstrukturen unter Berücksichtigung deren Leichtbaupotenzials reduziert, um diejenigen mit dem höchsten Leichtbaupotenzial weiterzuverfolgen.

[POSNER14C, S. 6 f.] In den Abschnitten 5.5.3 und 5.5.4 werden die Schritte 5, 6, 7 und 8 weiter detailliert.



**Bild 5.12:** Wirk-Leichtbau-Modul [POSNER14C, S. 6]

Für das Beispiel eines Saughäckslers werden die Ergebnisse des Vorgehens in Tabelle 5.10 auszugsweise gezeigt. Auf der linken Seite sind, wie im ersten Schritt des Prozesses vorgeschlagen, die wichtigsten Teilfunktionen eines Saughäckslers aufgliedert. Die ersten Lösungen aus den Schritten 2 und 3 sind für die jeweiligen Teilfunktionen dargestellt. Zusätzlich werden die entwickelten Lösungen mithilfe der Elemente WFP, LSS und WB analysiert, wie ebenfalls in Tabelle 5.10 gezeigt wird. [POSNER14C, S. 7] Die Schritte 5 und 8 zur Lösungsvariation sowie 6 und 9 zur Lösungsreduzierung und deren Anwendung auf das Beispiel sind in den nachfolgenden Abschnitten detailliert, da diese die wesentlichen Erweiterungen zur Vorgehensweise der VDI 2221 [VDI 2221 1993, S. 18] darstellen.

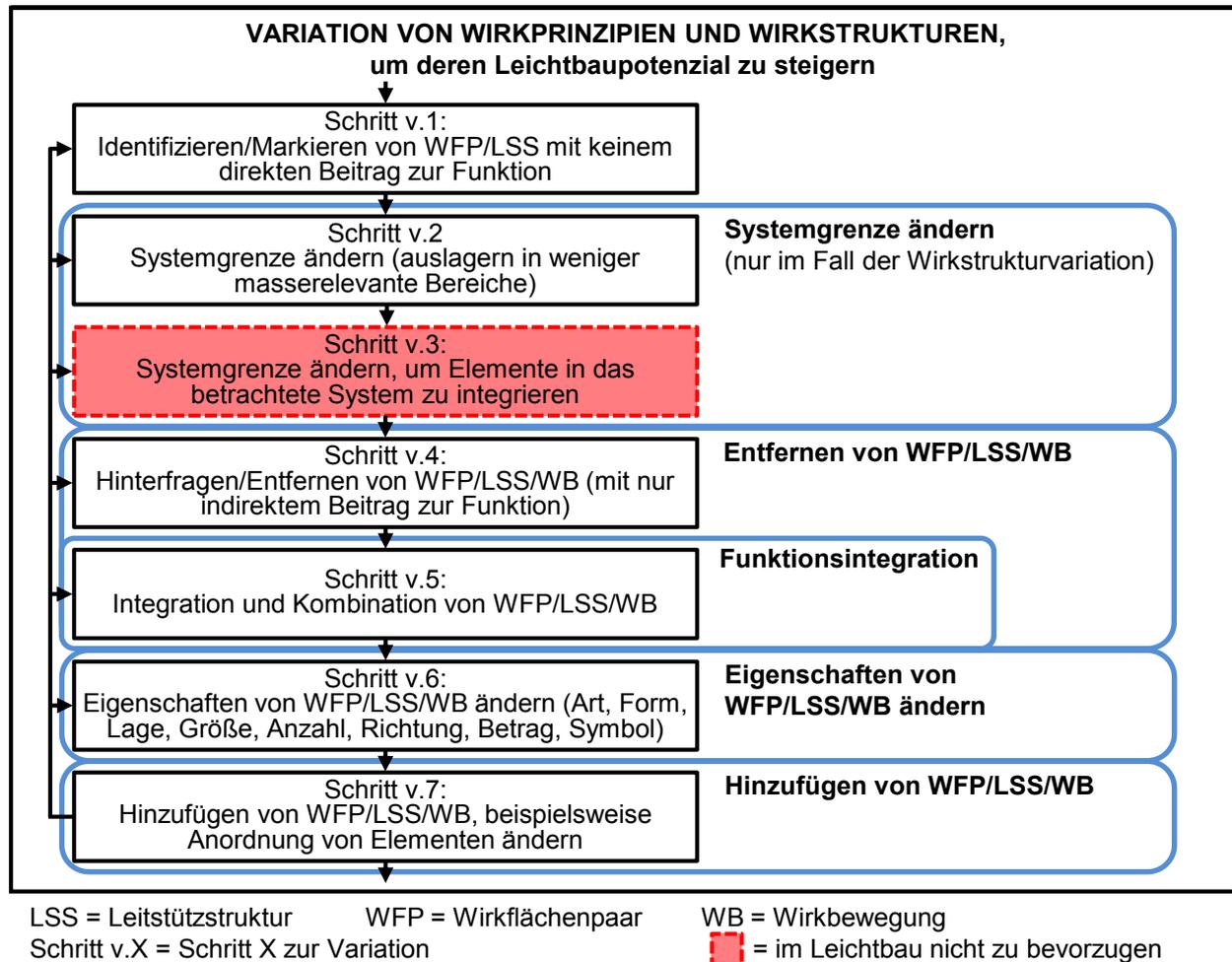
Teilfunktion	Teillösung 1	Teillösung 2	Teillösung 3	Teillösung 4
<b>Unterdruck erzeugen</b>	WP 7: Vakuumpumpe 	<b>Priorisieren &amp; Kombinieren</b>	WP 9: Zylinder 	
<b>Feststoffe zerkleinern</b>	WP 12: Schneiden 	WP 13: Mahlen 	WP 14: Sägen 	WP 15: Rotierendes Messer <div style="background-color: red; color: white; text-align: center; padding: 5px;"> <b>Priorisieren &amp; Kombinieren</b> </div>
...	...	...	...	...
WP = Wirkprinzip				

**Tabelle 5.10:** Morphologischer Kasten eines Saughäckslers [POSNER14C, S. 10]

### 5.5.3 Variation von Wirkprinzipien und Wirkstrukturen

In diesem Abschnitt werden der fünfte und achte Schritt des Prozesses für die Entwicklung von Wirkstrukturen mit dem Fokus auf der Steigerung des Leichtbaupotenzials detailliert und an einem Beispiel diskutiert. Bild 5.13 zeigt die Teilschritte der Variation. Die Variation basiert auf den drei Meta-Regeln des C&C<sup>2</sup>-A, welche das Hinzufügen, Entfernen oder das Ändern von Eigenschaften von Elementen umfassen. Neben den WFP und LSS ist es auch möglich, dass die WB und die Systemgrenze variiert werden.

[POSNER14C, S. 7] Diese Schritte unterstützen die Entwicklung von Lösungsvarianten, um darauf aufbauend die passende Lösung für den jeweiligen Fall auszuwählen.



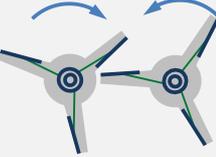
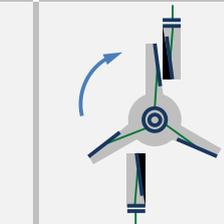
**Bild 5.13:** Variation von Wirkprinzipien und Wirkstrukturen (Teilschritte 5 und 8)

[POSNER14C, S. 7]

Um zu zeigen, wie der Prozess die Lösungsfindung unterstützt, wird dies an einem Wirkprinzip veranschaulicht, welches eine der wichtigsten Teilfunktionen des Saughäckslers betrifft. Dies ist die Teilfunktion „Feststoffe zerkleinern“, wie in Tabelle 5.11 gezeigt. In der zweiten Spalte dieser Tabelle ist die erste Lösung in Form eines Wirkprinzips dargestellt, welches das Zerkleinern mit einer Schere symbolisiert. [POSNER14C, S. 7]

Wie Bild 5.13 zeigt, sind die Teilschritte der Variation flexibel und iterativ. Deshalb können Konstrukteure von der ersten zur zweiten Lösung in Tabelle 5.11 über den vierten oder sechsten Schritt der Variation gelangen. Um zum Beispiel von der Lösung 3 zur Lösung 4 zu kommen, ist der Ansatz der, dass das zweite Messer sich nicht relativ zum anderen Messer bewegen muss. Diese Lösung kann über die Schritte 4 und 7 der Variation angestoßen werden. Der wichtigste Aspekt bei der Nutzung der

Variation ist, dass der Konstrukteur eine Lösungsvielfalt entwickelt, darauf aufbauend die am besten passende Lösung auswählt und sich nicht auf die erste Lösung fixiert. Die entwickelten Lösungen werden in einem Morphologischen Kasten dargestellt, um die Kombination der Wirkstrukturvarianten zu unterstützen. [POSNER14C, S. 8]

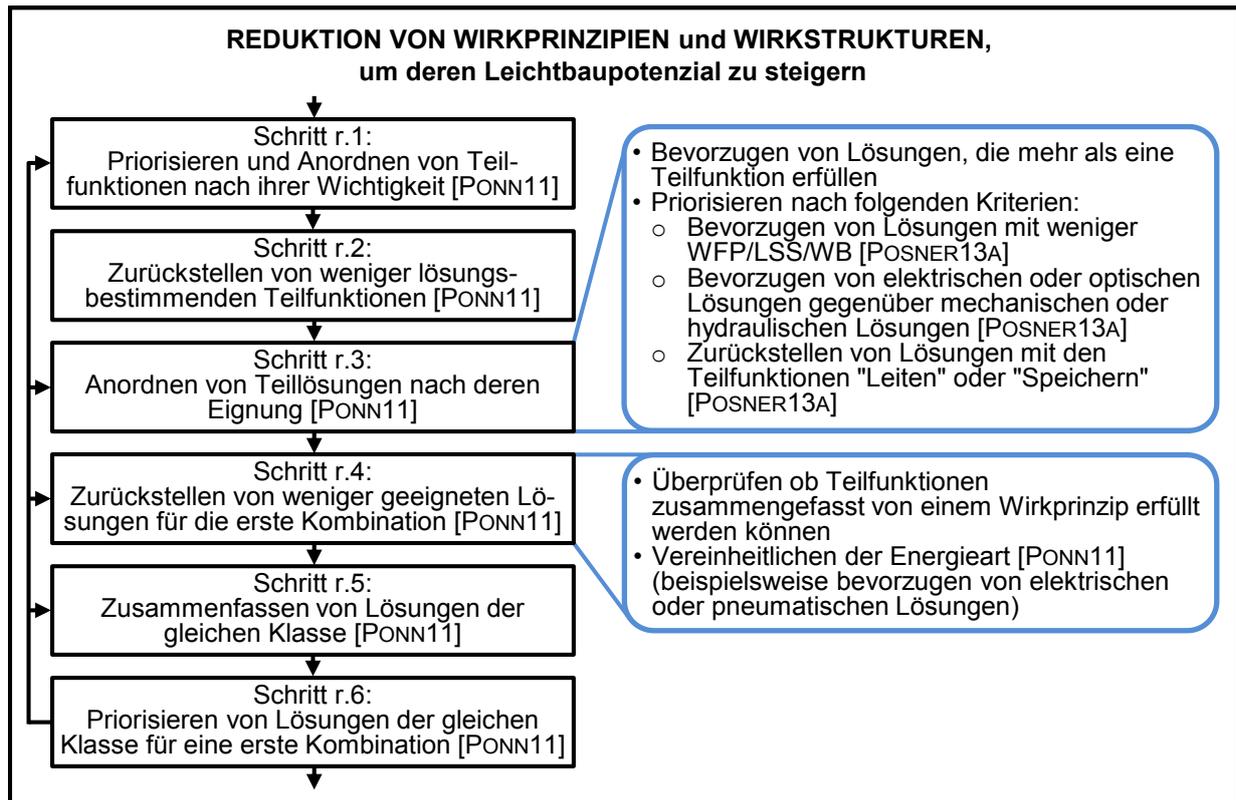
Teil-funktionen	Lösung 1	Lösung 2	Lösung 3	Lösung 4	Lösung 5
Feststoffe schneiden	 Schere	 2 rotierende Messer	 2 koaxial rotierende Messer	 1 rotierendes, 1 feststehendes Messer	<b>Priorisieren</b>
Schritte der Variation	-	v.4 (Entfernen einer Richtung der WB); v.6 (Ändern der WB)	v.5 (Zusammenfassen von WFP); v.7 (Anordnung ändern von WFP)	v.4 (Entfernen von Wirkbewegungen); v.7 (Anordnung ändern)	v.4 (Entfernen von WFP und LSS des feststehenden Messers)

**Tabelle 5.11:** Variation eines ersten Wirkprinzips [POSNER14C, S. 8]

Die Variation wird in diesem Abschnitt an einem Wirkprinzip diskutiert, jedoch ist die Wirkstruktur nur eine Kombination von Wirkprinzipien. Der Prozess kann daher auch auf die Entwicklung von Wirkstrukturvarianten angewendet werden. [POSNER14C, S. 8]

### 5.5.4 Reduzierung von Wirkprinzipien und Wirkstrukturen

Nach der Entwicklung von Lösungsvarianten muss eine Auswahl stattfinden, um zum einen auszuwählen, welche Lösung zur Kombination von Wirkprinzipien zu Wirkstrukturen verwendet werden sollen (Schritt 6 in Bild 5.12) und zum anderen, welche Wirkstrukturen weiterverfolgt werden (Schritt 9 in Bild 5.12). Ponn et al. [PONN11, S. 120] stellen eine Methode mit sechs Schritten zur Reduktion von Wirkprinzipien auf, welche in der linken Hälfte in Bild 5.14 dargestellt sind. Diese Schritte (Reduktionsschritte r.1-r.6) schlagen eine Priorisierung der einzelnen Wirkprinzipien im Morphologischen Kasten vor. Um Lösungen nach ihrem Leichtbaupotenzial zu priorisieren, müssen Kriterien gefunden werden, welche dies ermöglichen. Es wurden bereits Kriterien für die Priorisierung von Funktionsstrukturen unter Berücksichtigung des Leichtbaupotenzials in Abschnitt 5.4.5 vorgestellt. Diese werden im Folgenden übertragen, implementiert und erweitert, wie in Bild 5.14 gezeigt. Auch eine Dominanzmatrix [PAHL07, S. 177 f.] kann genutzt werden, um den Vergleich von zwei Lösungen bezüglich dieser Kriterien zu unterstützen. (vgl. [POSNER14C, S. 8])



**Bild 5.14:** Reduktion von Wirkprinzipien und Wirkstrukturen (Teilschritte 6 und 9)  
[POSNER14A S. 9]

Diese Kriterien wurden für das Beispiel des Saughäckslers genutzt, welches im Nachfolgenden anhand der Unterfunktion „Feststoffe zerkleinern“ diskutiert wird. Da eine Lösung mit wenigen WFP / LSS / WB zu bevorzugen ist, wird die fünfte Lösung aus Tabelle 5.11 ausgewählt. Um Lösungen zu bevorzugen, bei welchen mehr als eine Teilfunktion von einem Wirkprinzip erfüllt werden kann, wird die Lösung „rotierendes Messer“ (Teilfunktion „Feststoffe zerkleinern“) mit der Lösung „Turbinenrad“ (Teilfunktion „Vakuum erzeugen“) zu einem Wirkprinzip kombiniert, um beide Teilfunktionen zu erfüllen, siehe Tabelle 5.10.

Die Beschreibung der beiden Wirkprinzipien durch die WFP / LSS / WB ist ähnlich und die Wirkbewegungen sind identisch. Diese Übereinstimmungen unterstützen den Konstrukteur dabei zu erkennen, dass diese kombiniert werden können. Das bedeutet, dass zusätzlich zu den Kriterien des Reduzierungsprozesses, die abstrahierende Visualisierung mithilfe der WFP / LSS / WB die Funktionsintegration unterstützt. Der Reduzierungsprozess und die Kriterien können auf alle oder nur einzelne Teilfunktionen angewendet werden, um eine Priorisierung der Wirkprinzipien zu erhalten und um diese zu kombinieren. Weiterhin können die entwickelten Kriterien zur Priorisierung der

Wirkstrukturen genutzt werden. Damit können auch die Wirkstrukturvarianten reduziert werden, um eine Anzahl an Wirkstrukturen zu erhalten, welche mit den beschränkten Ressourcen der Konstrukteure weiterverfolgt werden können. [POSNER14C, S. 8 f.]

### **5.5.5 Zusammenfassung**

Grundsätzlich gibt es, wie auf der Funktionsebene, auch auf der Wirkebene zwei Möglichkeiten, um Wirkstrukturen mit dem Fokus auf ein gesteigertes Leichtbaupotenzial zu entwickeln. Die erste ist, dass die Konstrukteure aus ihrer Erfahrung heraus eine solche Wirkstruktur entwickeln. Dies ist jedoch nicht methodisch unterstützt umzusetzen. Als zweite Möglichkeit werden gezielt leichtbaugerechte Varianten entwickelt und daraus diejenige ausgewählt, die das größte Leichtbaupotenzial bietet. In diesem Zusammenhang wurde ein systematischer Prozess vorgestellt, um möglichst leichtbaugerechte Varianten von Wirkprinzipien und Lösungen für Wirkstrukturen zu entwickeln. Außerdem wurde ein Prozess zur Reduzierung der Anzahl der Lösungen aufgezeigt. Die Kriterien zur Reduzierung der Lösungsvielfalt basieren auf vorhandenen Kriterien zur Reduzierung von Funktionsstrukturen unter Berücksichtigung deren Leichtbaupotenzials, siehe Abschnitt 5.4.5. Anhand der Kriterien kann die leichteste Lösung jedoch nicht eindeutig identifiziert werden. Die Masse der Lösungen kann nicht vor der Festlegung der genauen Gestalt und des Werkstoffs aller Bauteile der Lösung bestimmt werden. Die Wirkstruktur, aus der sich das leichteste Produkt ergibt, kann damit nicht eindeutig identifiziert werden. Der vorgestellte Prozess unterstützt jedoch die Auswahl der Lösung mit dem größten Leichtbaupotenzial relativ zu anderen Lösungen. Zudem erhöht der Prozess das Bewusstsein der Konstrukteure dafür, dass die Entscheidungen während der Entwicklung von Wirkstrukturen großen Einfluss auf die Produktmasse haben. Außerdem können Leichtbauansätze, wie die Funktionsintegration, durch dieses Methoden-Modul bereits bei der Wirkstrukturentwicklung und damit, wie bei der Funktionsstrukturentwicklung, in der Konzeptphase unterstützt werden. [POSNER14C, S. 9]

Als nächste Ebene der Lösungsbeschreibung in der Konzeptphase wird nachfolgend die Gestaltebene betrachtet.

## **5.6 Leichtbau-Lösungsentwicklung auf Gestaltebene**

Obwohl verschiedene Leichtbau-Strategien in der Literatur vorgeschlagen werden, besteht die Frage, wie und wann diese Ansätze systematisch und der Situation angepasst angewendet werden sollen. Varianten- oder Anpassungskonstruktionen machen

den größten Anteil der Konstruktionsaufgaben in der Praxis aus [FELDHUSEN13B, S. 293]. In diesen Fällen müssen Entwickler Bauteile, Baugruppen oder ganze Produkte analysieren, die sie unter Berücksichtigung von Leichtbau-Aspekten optimieren oder weiterentwickeln sollen. Nach der Analyse des Produkts müssen Entwickler die passende Leichtbau-Strategie oder das Leichtbau-Prinzip auswählen und anwenden. Dafür muss die Leichtbau-Strategie oder das Leichtbau-Prinzip für das jeweilige Problem interpretiert werden, um Leichtbau-Lösungen zu entwickeln. [POSNER12C, S. 512]

Albers und Burkardt [ALBERS11C, S. 122] schlagen für die Analyse von Produkten die Anwendung des Contact & Channel<sup>2</sup> - Approach (C&C<sup>2</sup>-A) vor, da dieses den Entwickler unterstützt, ein umfassendes Problemverständnis zu erarbeiten. Jedoch besteht weder eine Methode, welche die Auswahl der passenden Leichtbau-Strategie, noch eine Methode, die die systematische Entwicklung von Leichtbau-Lösungen unterstützt. [POSNER12C, S. 512] Um das Potenzial des C&C<sup>2</sup>-A ausnutzen und damit die Lücke in der methodischen Unterstützung schließen zu können, wird die folgende Forschungsfrage verfolgt: *Wie werden Konstrukteure bei der systematischen Abstraktion und Variation von bestehenden Lösungen und damit beim Loslösen von bisherigen Lösungen unterstützt, um dadurch Leichtbau-Lösungen auf Gestaltebene zu entwickeln?* Das Ziel des nachfolgenden Abschnitts ist es, diese Forschungsfrage zu beantworten. Dazu werden verschiedene Leichtbau-Prinzipien und -strategien (vgl. Abschnitt 2.3 und 2.4) mittels C&C<sup>2</sup>-A beschrieben, wie in der vom Autor dieser Arbeit betreuten studentischen Arbeit von Frey [FREY11, S. 47 ff.] teilweise ausgeführt. Darauf aufbauend werden diese in die Vorgehensweise des C&C<sup>2</sup>-A implementiert. Damit wird die Vorgehensweise erweitert und für die Leichtbau-Entwicklung anwendbar gemacht.

Dieses Modul des Methoden-Baukastens wird als Gestalt-Leichtbau-Modul (GLM) bezeichnet. In dieser Arbeit wird die Gestalt als Kombination aus Form und Struktur verstanden, wie in Abschnitt 2.3 diskutiert.

### **5.6.1 Leichtbau-Strategien implementiert in den Contact & Channel<sup>2</sup> - Approach**

In diesem Abschnitt wird die Implementierung und Bedeutung der Leichtbau-Strategien aus Abschnitt 2.3 innerhalb des C&C<sup>2</sup>-A (vgl. [FREY11, S. 47 ff.; POSNER12C]) betrachtet.

### **Konzeptleichtbau**

Der fraktale Charakter des C&C<sup>2</sup>-A kann für den Konzept- bzw. Systemleichtbau genutzt werden. Der C&C<sup>2</sup>-A unterstützt die Analyse und die Anpassung von technischen Systemen. Dies ermöglicht die Betrachtung von Konzept- und Systemzusammenhängen. Es kann außerdem zwischen Detaillierungen und dem Gesamtsystem gewechselt werden [MATTHIESEN02, S. 56]. [POSNER12C, S. 514; vgl. FREY11, S. 59 ff.]

Ein Ansatz des Konzeptleichtbaus ist die Funktionsintegration. Diese hat das Ziel Funktionen so zu integrieren, dass ein Minimum an Material- und Verbindungstechnikaufwand erreicht wird. Damit zielt die Funktionsintegration auf die Reduktion von Leitstützstrukturen (LSS) und Wirkflächenpaaren (WFP) ab. Um dies zu erreichen, müssen Funktionen zusammengefasst und durch die übrigen LSS und WFP erfüllt werden. Der C&C<sup>2</sup>-A unterstützt dies durch die Metaregel 2 (MR2) (vgl. Abschnitt 2.6.3). [POSNER12C, S. 514; vgl. FREY11, S. 59 ff.]

### **Werkstoffleichtbau**

Durch die MR3 und MR4 (vgl. Abschnitt 2.6.3) werden die Eigenschaften von LSS und WFP geändert. Dadurch umfasst diese Metaregeln den Werkstoffleichtbau, welcher diesen Werkstoffwechsel unterstützt und dadurch die Modifikation der Eigenschaften der LSS und WFP ändert. Um dies umzusetzen, müssen die wichtigsten Materialeigenschaften, wie die Dichte, die Streckgrenze und der E-Modul, als Eigenschaften im C&C<sup>2</sup>-A beispielsweise als Symbole beschrieben werden. [POSNER12C, S. 514; vgl. FREY11, S. 59 ff.]

### **Gestaltleichtbau**

Der Gestaltleichtbau umfasst nach der Aufteilung der Gestalt in Form und Struktur den Form- und Strukturleichtbau. Der Gestaltleichtbau beinhaltet verschiedene Ansätze, um ein leichteres Produkt zu erhalten, wie beispielsweise den Ansatz, Biegebelastungen zu vermeiden und durch Zug- und Druckbelastungen zu ersetzen. Dies wird durch das Hinzufügen von bestimmten LSS und WFP in verschiedenen Fällen umgesetzt. Es können dafür Ansätze des Gestaltleichtbaus in den C&C<sup>2</sup>-A integriert werden. [POSNER12C, S. 514; vgl. FREY11, S. 59 ff.] Dies wird in den folgenden Abschnitten anhand der Übertragung der Leichtbau-Prinzipien aufgezeigt. Da jedoch kraftfluss- und damit leichtbaugerechte Strukturen erheblichen Einfluss auf die Masse eines Produkts haben, wird die systematisch leichtbaugerechte Entwicklung dieser in Abschnitt 5.7 ausführlicher betrachtet.

### **Bedingungsleichtbau**

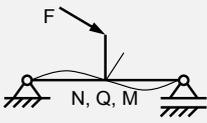
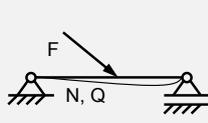
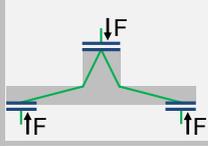
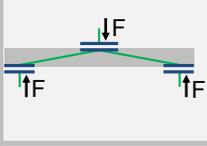
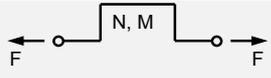
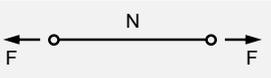
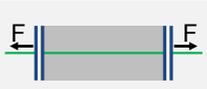
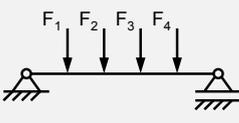
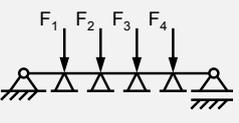
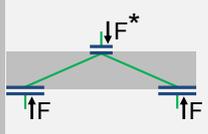
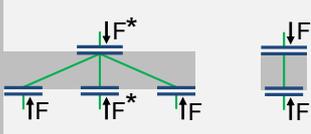
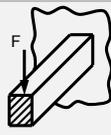
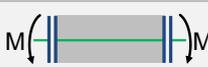
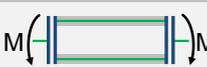
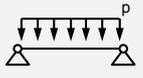
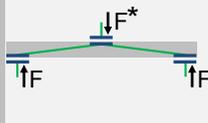
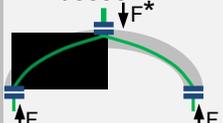
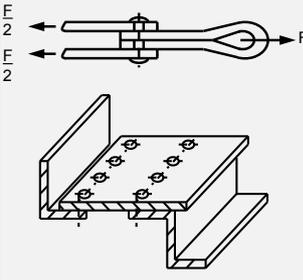
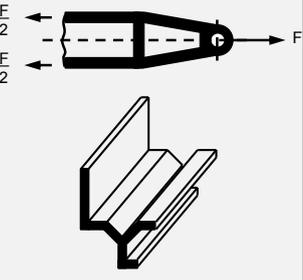
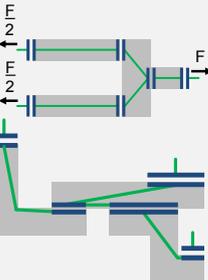
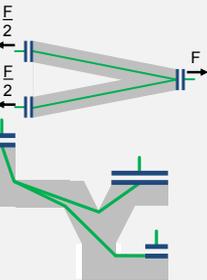
Der Bedingungsleichtbau wird in der Vorgehensweise des C&C<sup>2</sup>-A durch die Erweiterung der Systemgrenze berücksichtigt, da diese Strategie die Analyse der Rahmenbedingungen nutzt, um die Masse des Produkts zu optimieren. Ein Beispiel hierfür ist die Reduzierung von unnötigen oder überzogenen Anforderungen. Da nur die Produkteigenschaften innerhalb der Systemgrenze im C&C<sup>2</sup>-A geändert werden können, muss die Vorgehensweise um eine fünfte Metaregel erweitert werden, die die Erweiterung der Systemgrenze unterstützt. Diese Metaregel umfasst eine Erweiterung der Systemgrenze um Bereiche, welche Einfluss auf die zu ändernden Eigenschaften innerhalb des betrachteten Systems haben. Dadurch können LSS und WFP geändert werden, um bessere Einflussgrößen, Parameter oder Rahmenbedingungen zu erhalten, wie beispielsweise bessere Verbindungsstellen für das betrachtete System. [FREY11, S. 71 f.; POSNER12C, S. 515]

### **Fertigungsleichtbau**

Der Fertigungsleichtbau, der bereits in Abschnitt 2.3 dahingehend kritisch diskutiert wurde, da er kaum auf dem abstrakten Niveau der Konzeptphase berücksichtigt werden kann, kann daher auch nicht in der Vorgehensweise des C&C<sup>2</sup>-A berücksichtigt werden. Im Rahmen dieser Strategie können jedoch durch die Berücksichtigung neuer Fertigungsmöglichkeiten neue Gestaltungsmöglichkeiten für das Produkt gefunden werden.

#### **5.6.2 Leichtbau-Prinzipien implementiert in das Contact & Channel - Model**

Nach der Implementierung der Leichtbau-Strategien wird nachfolgend die Implementierung der Leichtbau-Prinzipien aus Abschnitt 2.4 in den C&C<sup>2</sup>-A vorgestellt [FREY11, S. 47 ff.; POSNER12C, S. 515]. Bei den Leichtbau-Prinzipien ist im Gegensatz zu den Leichtbau-Strategien eine Vollständigkeit jedoch nicht möglich, wie in Abschnitt 2.4 diskutiert. Nachfolgend werden daher nur sechs anschauliche Beispiele für den Regeltransfer vorgestellt. Tabelle 5.12 zeigt diese Beispiele für die Leichtbau-Prinzipien nach Klein [KLEIN13, S. 66 ff.] in den Spalten 2 und 3 sowie deren Beschreibung im C&C<sup>2</sup>-A in den Spalten 4 und 5, welche nachfolgend detaillierter betrachtet werden. [POSNER12C, S. 515; vgl. FREY11, S. 47 ff.]

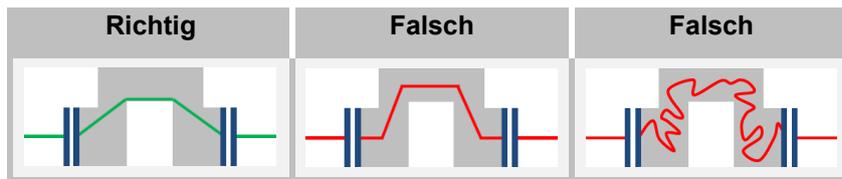
1	2	3	4	5
Beschreibung nach Klein [KLEIN13, S. 66 ff.]		Beschreibung mittels C&C <sup>2</sup> -A		
	ungünstig	besser	ungünstig	besser
1				
2				
3				
4				
5				
6				

F = aufgebrachte Kraft, N = Normalkraft, Q = Querkraft, M = Moment, p = Druck  
 \* Aufgrund der Einfachheit auf eine resultierende Ersatzkraft reduziert, Vorgehen ist übertragbar

**Tabelle 5.12:** Leichtbau-Prinzipien beschrieben im C&C<sup>2</sup>-A (vgl. [FREY11, S. 49 ff.; POSNER12C, S. 515])

### Direkte Kraftleitung und Kraftausgleich

Wie die Regeln 1 und 2 (siehe Tabelle 5.12) fordern, sollen Kräfte direkt in die Hauptstruktur eingeleitet und dürfen nicht umgelenkt werden. Um dies in den C&C<sup>2</sup>-A zu übertragen, müssen die LSS gekürzt werden. Wegen der fehlenden Definition der Länge der LSS im C&C<sup>2</sup>-A ist dies nicht möglich. Die LSS sollen in dieser erweiterten Definition eher einen qualitativen Verlauf der Kräfte beschreiben, um die Entwickler bei der Bauteilverbesserung zu unterstützen. Um dies zu erreichen, werden die LSS derart festgelegt, dass sie in den Flächenschwerpunkten der Wirkflächen beginnen und enden, wie in Tabelle 5.13 gezeigt. Zwischen diesen beiden Punkten verlaufen die LSS so, dass sie dem kürzesten Weg durch das Material folgen.



**Tabelle 5.13:** Definition des Verlaufs der Leitstützstrukturen [FREY11, S. 48; POSNER12C, S. 516]

Mit dieser qualitativen Definition des Verlaufs und damit der indirekten Festlegung der Länge der LSS, ist es möglich, die Regeln 1 und 2 aus Tabelle 5.12 anzuwenden. Diese Definition des Verlaufs der LSS entspricht nicht in jedem Fall exakt dem Verlauf der Kräfte innerhalb des Bauteils, jedoch soll sie zur Unterstützung des Konstrukteurs beitragen. [POSNER12C, S. 516; vgl. FREY11, S. 47 ff.]

Eine weitere Regel bezüglich des kraftflussgerechten Konstruierens ist, dass die Kräfte möglichst direkt abgestützt werden müssen, wie beispielsweise durch ein Lager, siehe Tabelle 5.12, Regel 3. Übertragen in den C&C<sup>2</sup>-A bedeutet dies, dass jede Kraft direkt und mit dem kürzesten Verlauf abgestützt werden muss, wie beispielsweise durch ein WFP und eine LSS. [POSNER12C, S. 516; vgl. FREY11, S. 47 ff.]

### **Realisieren eines großen Widerstandsmoments**

Regel 4 in Tabelle 5.12 zeigt ein weiteres Konstruktionsprinzip. Dieses sagt aus, dass hohle Querschnitte bevorzugt werden sollen, um ein hohes Widerstandsmoment zu erreichen, sofern ein Biege- oder Torsionsmoment auftritt [KLEIN13, S. 68 f.]. Im Rahmen des C&C<sup>2</sup>-A bedeutet das, dass die LSS aufgeteilt werden müssen, um diese weiter von der Nullfaser zu entfernen. [POSNER12C, S. 516; vgl. FREY11, S. 47 ff.]

### **Nutzen der natürlichen Stützwirkung durch Krümmung**

Die Biege- und Knicksteifigkeit von Platten oder Panelen kann gesteigert werden, indem diese Strukturen gewölbt werden [KLEIN13, S. 70]. Dies wird durch Regel 5 in Tabelle 5.12 gezeigt. Diese Regel übertragen in den C&C<sup>2</sup>-A kann folgendermaßen formuliert werden: Wenn die Biege- oder Beulsteifigkeit des Bauteils kritisch ist, sollten die LSS gewölbt werden. [POSNER12C, S. 516; vgl. FREY11, S. 47 ff.]

### **Bevorzugen des integrativen Prinzips**

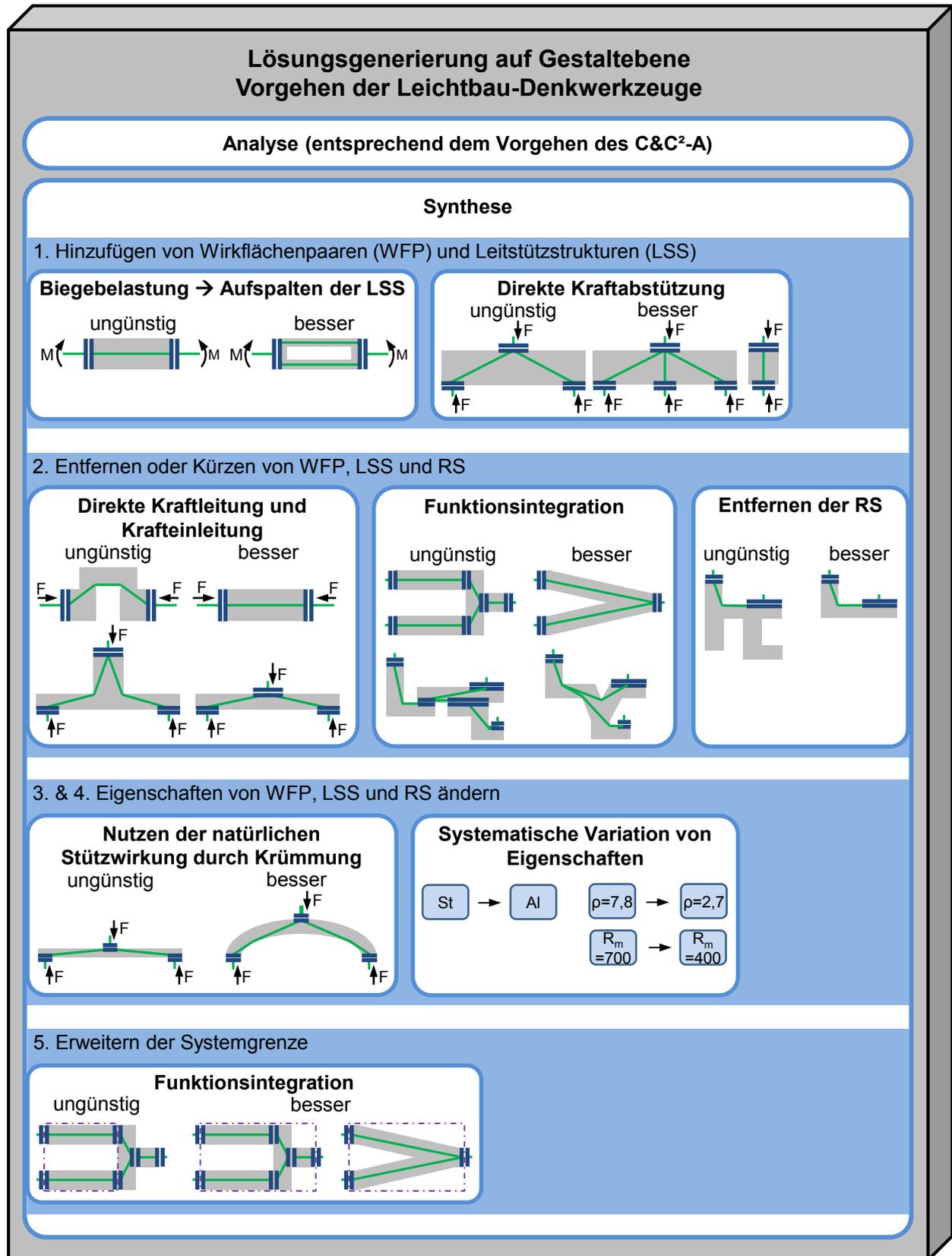
Die Reduktion der Verbindungsstellen reduziert den Massen-, Montage- und Verbindungsaufwand (Tabelle 5.12, Regel 6) [KLEIN13, S. 72]. MR3 und MR4 des C&C<sup>2</sup>-A unterstützen die systematische Umsetzung des integrativen Prinzips. Durch diese Regel werden die WFP und LSS hinterfragt, reduziert und damit das integrative Prinzip unterstützt. [POSNER12C, S. 516; vgl. FREY11, S. 47 ff.]

Wie von Otnad [OTTNAD09, S. 10] bereits erwähnt, ist ein Ziel des Leichtbaus die Reststrukturen zu reduzieren. Dafür können die Regeln um den Hinweis „Reststrukturen entfernen“ erweitert werden. [POSNER12C, S. 515; vgl. FREY11, S. 47 ff.]

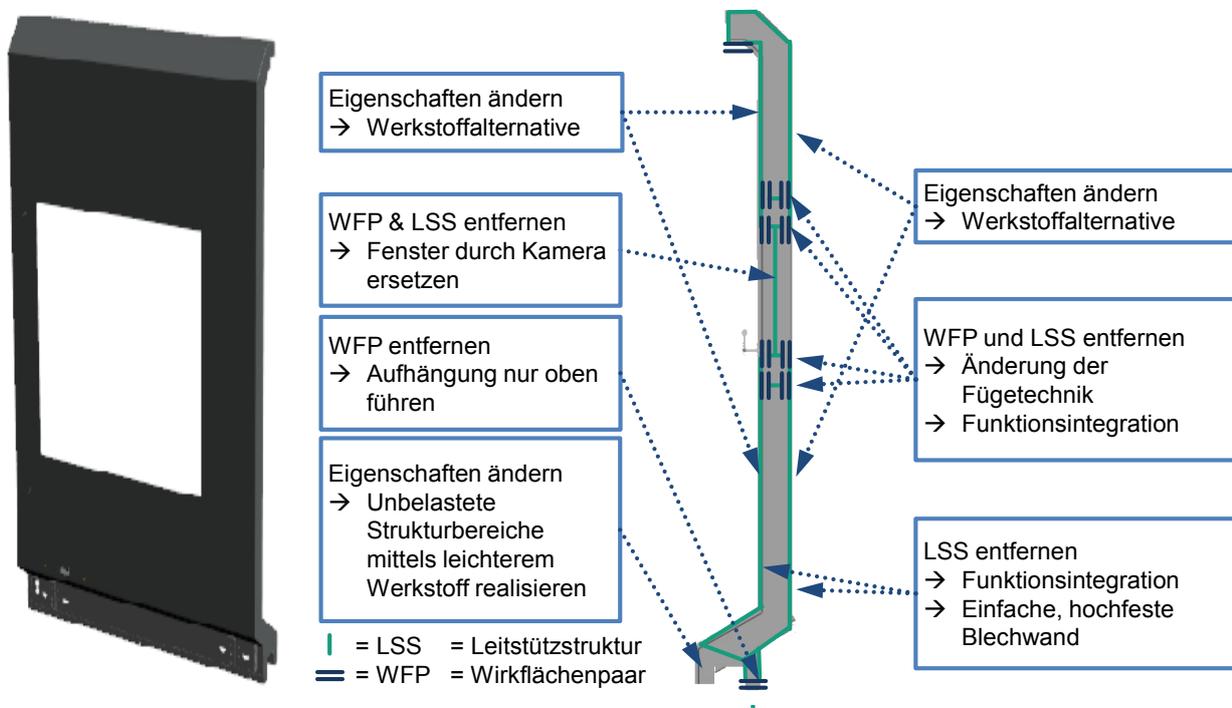
### **5.6.3 Weiterentwicklung des C&C<sup>2</sup>-A zu den Leichtbau-Denkwerkzeugen (Fokus Gestaltebene)**

Die mittels C&C<sup>2</sup>-A beschriebenen Regeln aus dem letzten Abschnitt werden in die Vorgehensweise des C&C<sup>2</sup>-A integriert, siehe Bild 5.15. Die Prinzipien sind dabei den passenden Metaregeln zugeordnet. Dadurch erhalten die Entwickler eine systematische Vorgehensweise, mit deren Hilfe sie Produkte bezüglich des Leichtbaus verbessern können. Die Vorgehensweise besteht aus der Analyse des C&C<sup>2</sup>-A, welches die Entwickler bei der Erarbeitung eines umfassenden Produktverständnisses unterstützt. Die Synthesephase der Vorgehensweise unterstützt Konstrukteure bei der systematischen Entwicklung von Leichtbau-Lösungen. Die beinhalteten Leichtbau-Prinzipien sollen den Konstrukteuren bei der Anwendung der Syntheseschritte, mit dem Ziel Leichtbau-Lösungen zu entwickeln, helfen. Diese weiterentwickelte Vorgehensweise wird im Folgenden als Leichtbau-Denkwerkzeuge (LBDW) bezeichnet, die bei der Anwendung als Modul auf der Gestaltebene das Gestalt-Leichtbau-Modul (GLM) darstellen. [POSNER12C, S. 516]

Nachfolgend soll die Vorgehensweise anhand eines Beispiels betrachtet werden, um die Anwendbarkeit der Methode zu verdeutlichen. Die Vorgehensweise der Leichtbau-Denkwerkzeuge wurde genutzt, um Leichtbau-Lösungen für die Maschinenschutztür eines Bearbeitungszentrums zu entwickeln, wie bereits in Abschnitt 5.4.6 beschrieben und in Bild 5.10 gezeigt. Diese Anwendung wurde innerhalb des Evaluationsprojekts in Kooperation mit der HEDELIUS Maschinenfabrik GmbH durchgeführt. Das Ziel der Massenoptimierung ist es, die manuell bediente Maschinenschutztür leichter zu gestalten, um den Maschinenbediener zu entlasten und den Öffnungs- und Schließvorgang zu beschleunigen [POSNER15A].



Zunächst müssen die zu betrachtenden Ansichten und Schnitte der Baugruppe identifiziert werden. Bild 5.16 zeigt sowohl ein dreidimensionales Modell links als auch einen Schnitt durch die Maschinenschutztür rechts. Diese Schnittansicht wird mittels der Elemente WFP und LSS analysiert, wie ebenfalls in Bild 5.16 dargestellt.



**Bild 5.16:** Anwendung der Leichtbau-Denkwerkzeuge auf eine Maschinenschutztür  
[POSNER15A, S. 10]

Darauf aufbauend wurden in einem Team von drei Entwicklern die Schritte der Vorgehensweise der Leichtbau-Denkwerkzeuge nach Bild 5.15 angewendet. Dabei entstanden Leichtbau-Ideen, wie beispielsweise: Der Einsatz alternativer Werkstoffe für die Wände der Tür, das Ersetzen des Fensters durch eine im Arbeitsraum angebrachte Kamera, die Reduktion der Aufhängung und Führung der Tür auf die obere Führungsschiene, die Ausführung von Türverkleidungselementen als Kunststoffbauteile, die Verwendung alternativer Verbindungstechniken, wie das Kleben, die Ausführung der doppelten Blechwand als einfache Blechwand und die Vergrößerung der Sichtscheibe, um die Fläche doppelter Stahlbleche zu reduzieren, wie Bild 5.16 zeigt. (vgl. [POSNER15A; POSNER 15B]) Basierend auf dieser Lösungsvielfalt wurde vom Maschinenhersteller die Lösung ausgewählt, bei der die wesentliche Neuheit darin besteht, dass die Sichtscheibe um ca. 74 % größer ausgeführt und damit die Fläche der doppelten Stahlblechwand reduziert werden konnte. Durch diese Maßnahme und dem Einsatz von Kunststoffen in weniger belasteten Bereichen konnte die Masse der Maschinenschutztür um über 36 % verringert werden. (vgl. [POSNER15A])

#### **5.6.4 Zusammenfassung**

Das C&C<sup>2</sup>-A wurde als Basis für die Entwicklung einer Methode zum Entwickeln von Leichtbau-Lösungen ausgewählt, da es Konstrukteure bei der Entwicklung einer Lösungsvielfalt außerhalb des Bereichs der Leichtbau-Lösungen unterstützt. Durch die entstandene Vorgehensweise der Leichtbau-Denkwerkzeuge werden Konstrukteure angeleitet, systematisch und nicht zufällig Lösungen zu finden. Das Entwickeln einer Lösungsvielzahl erlaubt es den Konstrukteuren, die am besten passende Lösung auszuwählen. Dadurch wird vor allem unerfahrenen Konstrukteuren ein Weg zur systematischen Suche nach Leichtbau-Lösungen und erfahrenen Konstrukteuren ein Weg zum Loslösen von bestehenden Lösungen aufgezeigt. [POSNER12C, S. 518] Die Übertragung von Leichtbau-Prinzipien und Leichtbau-Strategien in das C&C<sup>2</sup>-A wurde an einigen Beispielen gezeigt.

Die implementierten Prinzipien und Strategien sollen Konstrukteuren in ihrem kreativen Prozess der Entwicklung von Leichtbau-Lösungen helfen. Außerdem müssen die entwickelten Lösungen bezüglich aller Kriterien und Anforderungen, die diese erfüllen müssen, bewertet werden. Verschiedene Lösungen können auch kombiniert werden. Es ist jedoch immer notwendig, die Leichtbau-Lösungen, die mithilfe der Leichtbau-Denkwerkzeuge entwickelt wurden, in reale Lösungen zu übersetzen und zu interpretieren. (vgl. [POSNER12C, S. 518])

Die Leichtbau-Denkwerkzeuge können, wie in Abschnitt 5.5 beschrieben, auch auf der Wirkebene angewendet werden und bilden damit die Verbindung zwischen der Wirk- und der Gestaltebene (vgl. [PAHL13, S. 342]). Darüber hinaus stellen sie, wie im nachfolgenden Abschnitt 5.7 gezeigt wird, die Verbindung zur Strukturentwicklung bzw. Strukturoptimierung dar.

### **5.7 Leichtbau-Lösungsentwicklung auf Strukturebene**

Sowohl in den Wirkstrukturen als auch auf der abstrakten Ebene der Wirkflächenpaare und Leitstützstrukturen des C&C<sup>2</sup>-A, des CC&M-M und der Leichtbau-Denkwerkzeuge sind bereits Informationen über den Kraftverlauf innerhalb der Bauteil- und Baugruppenstruktur vorhanden und damit wesentliche Elemente der Struktur und des Kraftflusses des Produkts festgelegt. Auf diesem hohen Abstraktionsgrad der Strukturen, denen bei Neukonstruktionen noch keine vollständige Gestalt und Form zugewiesen sind und deren Gestalt und Form bei bestehenden Produkten hinterfragt werden soll, besteht keinerlei Unterstützung bei der Berücksichtigung von Leichtbau-

aspekten. Die computerunterstützte Topologieoptimierung kann auf diesem abstrakten Niveau nicht angewendet werden. Daher stellt sich die Forschungsfrage: *Wie werden Leichtbau-Strukturen mit einfachen Hilfsmitteln bereits aufbauend auf Wirkflächenpaar- und Leitstützstruktur-Beschreibung bzw. ausgehend von der Wirkstruktur leichtbaugerecht entwickelt?*

Mattheck [MATTHECK10] präsentiert einfache Methoden, um Leichtbau-Strukturen basierend auf seinen Beobachtungen vom Baumwachstum zu entwickeln. Diese Methoden können bereits bei der Lösungssuche auf abstraktem, wenig konkretem und detailliertem Niveau verwendet werden. Es wird dadurch bereits in der Konzeptphase möglich, Konstruktionen hinsichtlich Leichtbauaspekten zu entwickeln. Hierzu sind keine rechnergestützten Methoden notwendig. Mit dem Ansatz der Denkwerkzeuge nach der Natur ist es nur möglich, statische Probleme zu betrachten. Dies bedeutet, dass nur bewegungsfreie Bauteile und Lasten berücksichtigt werden können. Jedoch umfassen die meisten Konstruktionen im Maschinenbau bewegte Bauteile. Daher muss das Verfahren weiterentwickelt werden, um den Konstrukteur auch bei der Lösung dynamischer Probleme zu unterstützen. Des Weiteren wird die Analyse von bereits vorhandenen Strukturen nicht unterstützt. Besonders im Leichtbau muss analysiert werden, ob vorhandene Elemente für die Erfüllung der Funktion notwendig sind oder ob sie weggelassen werden können. Außerdem kann die Methode ausschließlich auf einzelne Bauteile und nicht auf Baugruppen oder das gesamte Produkt angewendet werden. Die Denkwerkzeuge nach der Natur liefern keine Möglichkeit der Visualisierung, um ein System schnell zu beschreiben. Der Einsatz einer einfach und schnell verwendbaren Visualisierungsmethode könnte die Entwicklung und Diskussion von verschiedenen Lösungsvarianten unterstützen.

Die Anwendung der Denkwerkzeuge resultiert häufig in einer komplizierten und ausgedehnten Konstruktion. Jedoch gibt es im Maschinenbau meistens einen begrenzten Bauraum, den es einzuhalten gilt, da die Bauteile in ein Produkt integriert werden müssen. Aktuell existiert eine Differenz zwischen den ausgedehnten Konstruktionen, welche aus den Denkwerkzeugen resultieren und dem vorgegebenen, maximalen Bauraum, wie Siegle [SIEGLE15, S. 72 ff.] zeigt. Daher sind die Denkwerkzeuge nach der Natur trotz ihrer Unterstützungsmöglichkeiten bei der Suche nach Leichtbau-Lösungen nicht einfach und systematisch auf Problemstellungen aus dem Maschinenbau anwendbar. [POSNER14B, S. 795 f.]

Das Contact & Channel - Model, wie von Albers et al. [ALBERS03] vorgeschlagen, unterstützt die systematische Analyse von bereits bestehenden Konstruktionen sowie von komplexen Lagern und aufwändigen Tragstrukturen. Des Weiteren ermöglicht das Modell die Analyse von dynamischen Systemen, indem die Bewegungszustände oder Sequenzen der Reihe nach statisch betrachtet werden. Das Contact & Channel – Model wurde im vorherigen Abschnitt bereits in Bezug auf den Leichtbau zu den Leichtbau-Denkwerkzeugen weiterentwickelt. Es lassen sich damit jedoch keine Leichtbau-Strukturen, wie in den Denkwerkzeugen nach der Natur beschrieben, generieren. Daher ist es das Ziel dieses Abschnitts, den Ansatz der Denkwerkzeuge nach der Natur [MATTHECK10] mit den Leichtbau-Denkwerkzeugen aus Abschnitt 5.6 und damit mit dem Contact & Channel – Model [MATTHIESEN02] zu kombinieren. Es wird eine Methode bzw. ein Methoden-Modul erarbeitet, welches das Entwickeln von Leichtbau-Strukturen mit einfachen Mitteln sowie geringem Aufwand ermöglicht. Dieses Methoden-Modul wird nachfolgend als Struktur-Leichtbau-Modul (SLM) bezeichnet und stellt eine Erweiterung der Leichtbau-Denkwerkzeuge dar. [POSNER14B, S. 796]

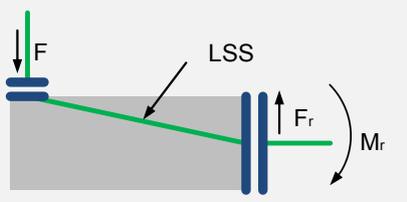
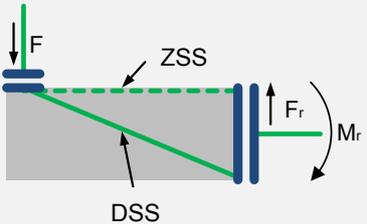
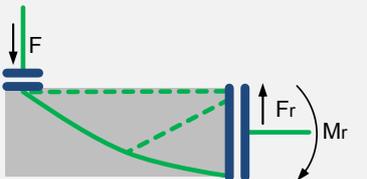
Nachfolgend wird zunächst in Abschnitt 5.7.1 die Unterscheidung zwischen Zug- und Druckstrukturelementen im Rahmen der Leichtbau-Denkwerkzeuge eingeführt. Danach wird die Sequenzanalyse zur Entwicklung von Strukturen mit bewegten Elementen genutzt, siehe Abschnitt 5.7.2. Um die Ansätze nach Mattheck [MATTHECK10] im Fall von beschränkten Bauräumen zu nutzen, werden dessen Ansätze in Abschnitt 5.7.3 ergänzt. Die kombinierte Anwendung der beiden Ansätze zur Strukturentwicklung nach Mattheck [MATTHECK10] werden in Abschnitt 5.7.4 diskutiert.

### **5.7.1 Zugstützstrukturen, Druckstützstrukturen und Wirkflächenpaare**

Um verschiedene Arten von Leitstützstrukturen zu unterscheiden, wird in Tabelle 5.14 eine einfache Möglichkeit vorgeschlagen, diese in Zugstützstrukturen (ZSS) und Druckstützstrukturen (DSS) zu unterteilen. Die Darstellung der verschiedenen Strukturen ist die Grundlage für die Diskussion verschiedener Lösungen in der Synthesephase von Leichtbau-Strukturen. Des Weiteren ermöglicht sie die Ansätze nach Mattheck [MATTHECK10] auf eine Konstruktion anzuwenden, welche mithilfe des Contact & Channel - Models zuvor analysiert wurde.

Im Folgenden wird anhand eines Biegebalkens, welcher auf der linken Seite mit einer Kraft belastet und auf der rechten Seite fest eingespannt ist, das Vorgehen erklärt. Tabelle 5.14 beschreibt das Schema zur Entwicklung von Leichtbau-Strukturen basie-

rend auf Zugseilen und Druckstäben [MATTHECK10, S. 127], wie in Bild 2.7 aufgezeigt, unter Verwendung der Leichtbau-Denkwerkzeuge, siehe Schritt A und B sowie Schritt C und D.

Beschreibung im C&C <sup>2</sup> -A	Beschreibung kombiniert mit den Denkwerkzeugen
	<p>Schritte A und B</p>  <p>Schritte C und D</p> 
<p>LSS = Leitstützstruktur, ZSS = Zugstützstruktur, DSS = Druckstützstruktur, F = aufgebrachte Kraft, Fr = Reaktionskraft, Mr = Reaktionsmoment</p>	

**Tabelle 5.14:** Beschreibung von Zug- und Druckstützstrukturen [POSNER14B, S. 800]

In den Schritten A und B wird eine Struktur erstellt, um die oberhalb des Balkens eingeleitete Kraft abzustützen. Die Anordnung ist aus einer ZSS, dargestellt mittels einer gestrichelten Linie, und einer DSS, dargestellt mittels einer durchgezogenen Linie, aufgebaut. Auf der rechten Seite des Balkens sind Reaktionskraft und -moment eingezeichnet, welche aus der Wechselwirkung des Systems mit der Lagerung resultieren. In den Schritten C und D wurde die DSS vorgekrümmt und der daraus entstehende Druckbogen von einer zusätzlichen ZSS abgestützt, vergleiche Schritte C und D in Bild 2.7. [POSNER14B, S. 799]

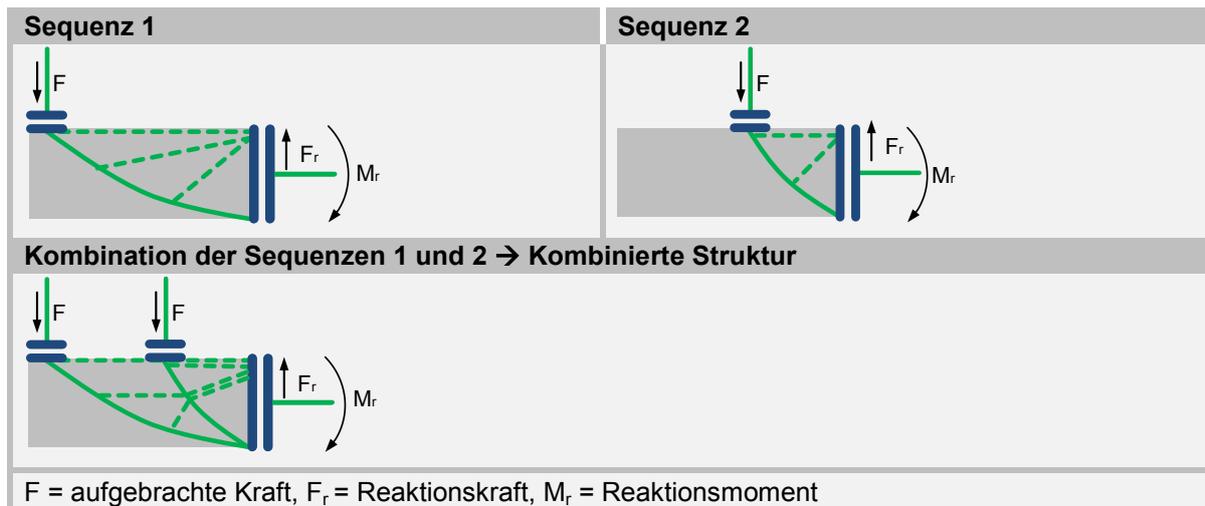
### 5.7.2 Sequenzanalyse

Da Konstruktionen meist einer über die Zeit veränderlichen Belastung ausgesetzt sind, schlägt das Contact & Channel - Model die Sequenzanalyse vor. Bei der Sequenzanalyse werden verschiedene Belastungszustände analysiert und damit als quasistatisch beschrieben und modelliert, wie beispielhaft in der ersten Zeile in Tabelle 5.15 abgebildet. Mithilfe der Methoden nach Mattheck [MATTHECK10, S. 127] kann für jede dieser quasistatischen Belastungen eine Tragstruktur erstellt werden. [POSNER14B, S. 800]

Um eine Tragstruktur zu entwickeln, die für die verschiedenen Belastungen aller Zustände geeignet ist, werden alle für die einzelnen Belastungen entwickelten Strukturen überlagert, wie in der zweiten Zeile in Tabelle 5.15 dargestellt. Dabei müssen die wich-

tigsten Zustände und angreifenden Kräfte erkannt werden, da die entwickelte Struktur auf diese betrachteten Belastungen spezialisiert wird. [POSNER14B, S. 800] Wird ein kritischer Belastungsfall nicht berücksichtigt, kann dies zum Versagen führen.

Zum Abschluss soll die vorgeschlagene Struktur unter Berücksichtigung der Herstellbarkeit analysiert und angepasst werden. Das Ziel ist es, einen Kompromiss zwischen der entwickelten Leichtbau-Struktur, deren Feingliederung und deren Herstellbarkeit zu finden. [POSNER14B, S. 800]

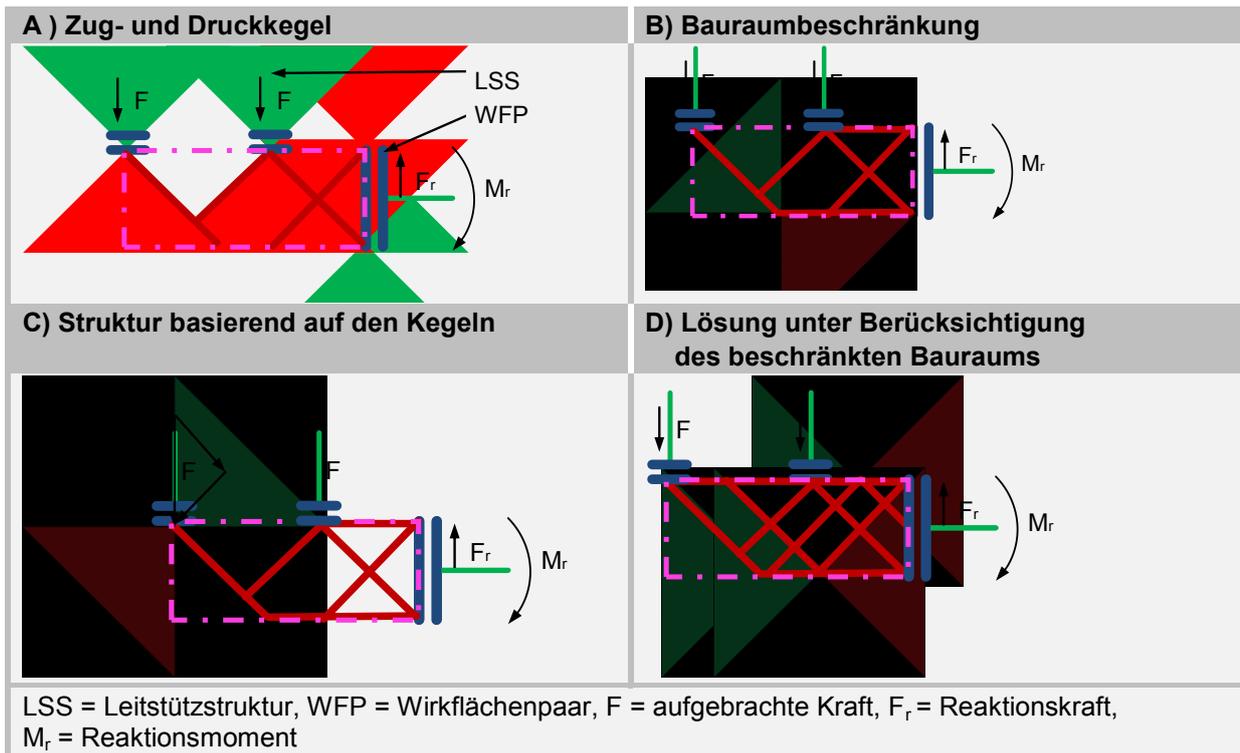


**Tabelle 5.15:** Sequenzen und ihre Kombination [POSNER14B, S. 800]

### 5.7.3 Zug- und Druckkegel im begrenzten Bauraum

In Schritt A in Tabelle 5.16 ist ein Beispiel aufgeführt, bei dem zwei Kräfte am oberen Ende des Bauraums sowie die Reaktionskräfte und Reaktionsmomente der Einspannung am rechten Ende des Bauraums (durch Strich-Punkt-Linie gekennzeichnet) angreifen. Die Kraftkegel wurden entsprechend der Kraftkegelmethode dargestellt, vergleiche Bild 2.8. In Schritt A wurden die Tragstrukturen innerhalb der Kraftkegel eingezeichnet. Diese Strukturen sind jedoch in ihrer Ausdehnung durch den Bauraum begrenzt und somit von der Systemgrenze unterbrochen. Aus diesem Grund resultiert im vorliegenden Fall noch keine in sich geschlossene und verbundene Struktur. Da die Strukturelemente darauf ausgelegt sind, entweder reine Druck- oder reine Zugspannungen zu übertragen, bildet sich am Ende eines ausgebildeten Strukturelements auch wieder eine Druck- oder eine Zugbelastung aus. Folglich kann, wie beispielhaft in Schritt B der Tabelle 5.16 dargestellt, ein weiterer Kraftkegel an das Ende der Elemente eingezeichnet werden. Die weiteren Strukturen müssen in Richtung der Einspannung aufgebaut werden. Die Kraft, welche am linken Ende der Konstruktion angreift, würde zunächst von einer einzelnen Druckstruktur aufgenommen und weiter-

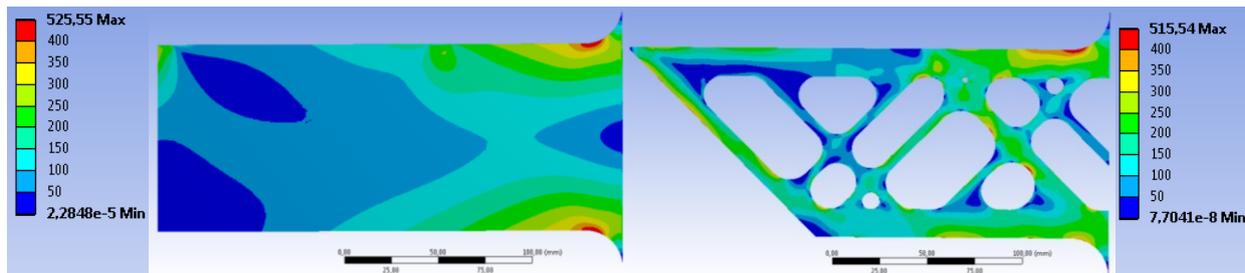
geleitet. Diese Druckstruktur wäre einer Biegebelastung ausgesetzt, wenn die Konstruktion so belassen werden würde. Durch Zerlegen der angreifenden Kraft entstehen eine Komponente entlang der Druckstruktur, die keine Biegebelastung ausübt, und eine Komponente orthogonal dazu. Um den orthogonalen Anteil der Kraft aufzunehmen, wird ein weiterer Kraftkegel eingezeichnet, dargestellt in Schritt C von Tabelle 5.16. Somit kann eine weitere Struktur abgeleitet werden, die diese Komponente der Kraft abstützen kann.



**Tabelle 5.16:** Leichtbau-Struktur-Entwicklung unter Bauraumberücksichtigung  
 [POSNER14B, S. 802]

Am Ende jedes Strukturelements kann ein Kraftkegel eingezeichnet werden und somit ein Pfad für die Kraftübertragung, von der Kräfteinleitung bis zur Einspannung, aufgebaut werden. Des Weiteren ist es möglich, an jedes Strukturelement, welches aufgrund seiner Länge anfällig gegen Knicken ist, zusätzliche Kraftkegel einzuzeichnen. Daraus können weitere, unterstützende Strukturelemente abgeleitet werden, siehe Schritt D in Tabelle 5.16. Somit ist es möglich, eine Leichtbaukonstruktion basierend auf den Ideen von Mattheck [MATTHECK10, S. 138 f.], mit zusätzlicher Betrachtung des maximalen Bauraums, zu realisieren. Darüber hinaus muss anschließend als letzter Schritt die Analyse der Herstellbarkeit und gegebenenfalls Vereinfachungen der Struktur folgen. (vgl. [POSNER14B, S. 801]) Dabei können beispielsweise eng beieinander liegende Strukturen zusammengefasst werden, wenn dies die Fertigbarkeit verbessert.

Die entwickelte Konstruktion wurde exemplarisch, mithilfe der Finite-Elemente-Methode nachgerechnet (siehe [POSNER14B, S. 802 f.]). Der Vergleich mit einer massiven Konstruktion, welche den kompletten Bauraum ausfüllt, wird in Bild 5.17 gezeigt. Im Versuch wurde die Dicke der beiden Strukturen so angepasst, dass ähnliche maximale Spannungen auftreten, um eine Vergleichbarkeit zu erreichen. Die mithilfe der Methode entwickelte Struktur hat eine um 25 % geringere Masse.



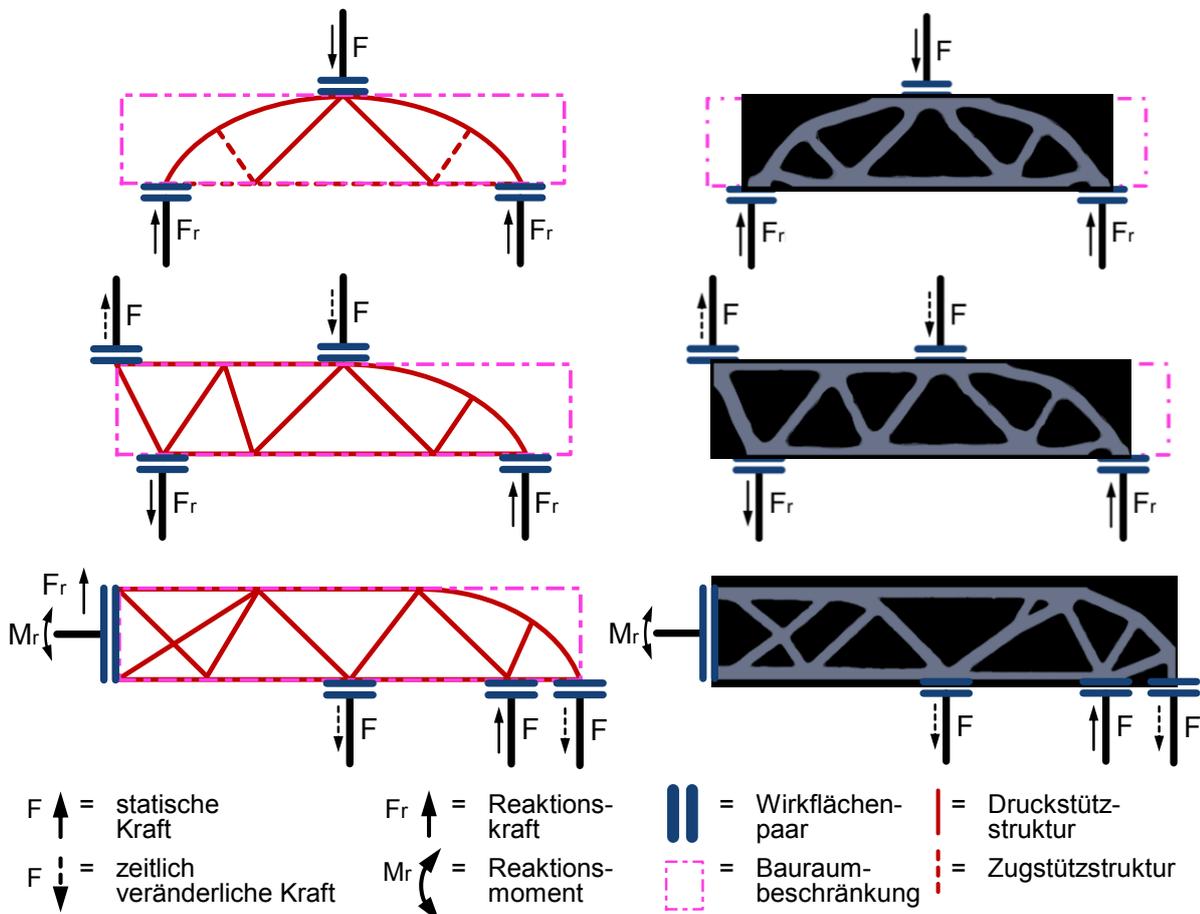
**Bild 5.17:** Vollmaterial-Struktur (links) und mit der Unterstützung entwickelte Struktur (recht) - von Mises Spannung in MPa [POSNER14B, S. 802]

Die mit der vorgestellten Methode entwickelte Leichtbaukonstruktion ist angepasst an die eingeleiteten Kräfte und hat daher keine Spannungsüberhöhungen im Bereich der Krafteinleitung. Zudem ist der Werkstoff in dieser Konstruktion ausgeglichener belastet. Daraus erfolgt eine bessere Werkstoffausnutzung, was zu einem geringeren Materialaufwand und gleichzeitig zu einem geringeren Gewicht der Konstruktion führt. Die Übergänge zwischen den Strukturelementen müssen abgerundet werden, um Kerbwirkung zu vermeiden, wie ebenfalls im Beispiel gezeigt. [POSNER14B, S. 801]

In der studentischen Arbeit [SIEGLE15], die vom Autor der vorliegenden Arbeit betreut wurde, werden verschiedene Fälle unter Berücksichtigung verschiedener Lagerungen und Belastungen für die Strukturentwicklung definiert. Für diese Fälle sind zunächst Struktur-Lösungen mithilfe der Leichtbau-Denkwerkzeuge entwickelt worden. Danach wurden Struktur-Lösungen mithilfe einer Topologieoptimierungssoftware berechnet. Einige dieser Ergebnisse sind in Bild 5.18 gegenübergestellt. Sie weisen zahlreiche Übereinstimmungen auf. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass die Ergebnisse der Topologieoptimierungssoftware von verschiedenen Randbedingungen, wie z. B. der minimal zulässigen Wandstärke, abhängen. In Abhängigkeit von diesen Randbedingungen lassen sich besser oder schlechter übereinstimmende Lösungen finden.

Die Erweiterung zur Bauraumbeschränkung und der Überlagerung von zeitlich veränderlichen Belastungen mittels der Sequenzanalyse lassen sich jedoch durch erste

Berechnungen belegen. Ein vollständiger Nachweis, dass die Lösungen in allen denkbaren Fällen übereinstimmen, ist hier nicht möglich.



**Bild 5.18:** Vergleich von Struktur-Lösungen (links Ergebnisse der Leichtbau-Denkwerkzeuge und rechts der Topologieoptimierungssoftware) [SIEGLE15, S. 73, S. 75, S. 78]

#### 5.7.4 Zusammenfassung der wichtigsten Regeln

Die vorgestellte Weiterentwicklung der Denkwerkzeuge nach Mattheck [MATTHECK10] und die Verknüpfung mit dem C&C<sup>2</sup>-A wird als Erweiterung der Leichtbau-Denkwerkzeuge, die in Abschnitt 5.6 bereits vorgestellt wurden, genutzt. Diese erweiterten Regeln stellen das Struktur-Leichtbau-Modul des Methoden-Baukastens zur Lösungsgenerierung auf Strukturebene dar. In den letzten beiden Abschnitten wurde die Weiterentwicklung zweier Methoden nach Mattheck [MATTHECK10, S. 127, S. 138 f.] vorgestellt. Beide Methoden sind nicht widersprüchlich, sondern können ergänzend verwendet werden. Beispielhaft zeigt der Vergleich der beiden Konstruktionen, welche aus den letzten beiden Unterabschnitten resultieren, dass die Ergebnisse ähnlich sind.

Der wesentliche Ansatz von beiden Methoden ist das Denken in Zug- und Druckstrukturen. Biegebelastungen müssen ebenfalls in Zug- und Druckkräfte überführt werden. Kräfte sollen nach Möglichkeit in rechtwinklige Zug- und Druckkegel eingeleitet werden. Strukturelemente zur Übertragung von Druckkräften können vorgekrümmt werden, um ihnen eine bevorzugte Knickrichtung zu geben und diese dann mit einer Zugstruktur zu blockieren. Kräfte müssen grundsätzlich von mindestens zwei Strukturelementen abgestützt werden. Ausgenommen davon ist eine solche Belastung, die von einer einzigen, der Krafttrichtung entgegengesetzten Zugstruktur aufgenommen werden kann. Die Sequenzanalyse kann im Fall von bewegten Systemen oder über die Zeit veränderlichen Belastungen den Konstrukteur bei der Beschreibung und bei der Anwendung der Methode unterstützen. Bei einer Begrenzung des Bauraums verursachen die unterbrochenen Strukturelemente an ihren Enden eine Zug- oder Druckkraft, dort kann wiederum die Kraftkegelmethode angesetzt werden, um somit eine Leichtbau-Lösung zu finden. Tragstrukturen können nahezu ohne Begrenzung detailliert und verfeinert werden, jedoch muss die Detaillierung mit dem Problem der Herstellbarkeit dieser komplexer werdenden Strukturen abgewogen werden. Mithilfe des C&C<sup>2</sup>-A können bereits existierende Konstruktionen analysiert und mit neuen, mittels der Leichtbau-Denkwerkzeuge entwickelten Konstruktionen, verglichen werden. Bei neu entwickelten Konstruktionen führt das Abwägen der Vorteile der Strukturen gegenüber dem Fertigungsaufwand zu der Entscheidung, welche Konstruktion weiterverfolgt wird. Des Weiteren können die Schritte der Synthesephase des Contact & Channel - Modells bzw. der Leichtbau-Denkwerkzeuge dazu genutzt werden, den Bauraum der Konstruktion sowie die Eigenschaften der Systemgrenze zu verändern. Die weiterentwickelte Visualisierung von Zug- und Druckstützstrukturen ermöglicht es dem Konstrukteur, die Kraftübertragung innerhalb des Systems besser zu veranschaulichen. Darüber hinaus wird die Grundlage zur Diskussion der verschiedenen Varianten der Leichtbau-Strukturen und zur anschließenden Entscheidungsfindung gelegt. Die vorgestellte Methode basiert auf der Reduktion von dreidimensionalen auf zweidimensionale Probleme. Die dritte Dimension ist ebenfalls zu berücksichtigen, beispielsweise indem mehrere Ebenen der Konstruktion analysiert werden. [POSNER14B, S. 803] Für weiterführende Betrachtungen von dreidimensionalen oder komplexeren Anwendungsfällen sei auf Posner et al. [POSNER15B] verwiesen.

### **5.7.5 Anwendungsbereiche und Einschränkungen**

Die Leichtbau Denkwerkzeuge können in der Lehre zur Erläuterung der Entwicklung von Leichtbau-Strukturen mithilfe von einfachen Methoden und Regeln verwendet werden. Die Methode ist nicht in der Lage, softwaregestützte Topologieoptimierung sowie herkömmliche Rechenmethoden zu ersetzen. Diese müssen im weiteren Verlauf des Produktentwicklungsprozesses eingesetzt werden. Die grobe Entwicklung von Leichtbau-Strukturen bereits zu Beginn der Produktentwicklung sowie die anschließende detaillierte Berechnung mit rechnergestützten Methoden können sich gegenseitig ergänzen.

Die Leichtbau-Denkwerkzeuge sollen dem Konstrukteur dabei helfen, das große Leichtbaupotenzial resultierend aus der großen Freiheit in den frühen Entwicklungsphasen zu nutzen. Die Leichtbau-Denkwerkzeuge wurden unter anderem mithilfe der Sequenzanalyse des C&C<sup>2</sup>-A weiterentwickelt. Dabei ist es wichtig, die bedeutendsten Zustände des betrachteten Systems und die angreifenden Kräfte zu analysieren, da die daraus resultierende Konstruktion speziell diese Lasten ertragen kann. Wenn die falschen oder zu wenige Zustände berücksichtigt werden, besteht die Möglichkeit, dass bei anderen Zuständen die angreifende Last nicht von der Struktur getragen werden kann. Dies führt zu einer ungeeigneten Lösung des Problems. Außerdem sind die vorgestellten Ansätze auf Zustände beschränkt, die als quasistatisch betrachtet werden können. Für hochdynamische Systeme müssen weitere Untersuchungen bezüglich der Zuverlässigkeit und Leistungsfähigkeit der Methode durchgeführt werden. Da die Strukturen im Leichtbau nicht konservativ dimensioniert werden dürfen, müssen speziell die Krafteinleitungspunkte näher betrachtet werden. Wenn der Bereich der Krafteinleitung beispielsweise durch Kerben geschwächt ist, kann die Konstruktion an diesen Schwachstellen versagen. Die hier vorgestellten Konstruktionen stellen keine idealen Leichtbau-Lösungen dar, jedoch sollen die vorgestellten Regeln und Methoden den Konstrukteur bei der Lösungsfindung in Hinblick auf Leichtbau und bessere Kraftverläufe unterstützen. [POSNER14B, S. 803 f.] Darüber hinaus helfen die vorgestellten Regeln dabei, Ergebnisse der softwareunterstützten Topologieoptimierung zu verstehen und auf Plausibilität hin zu prüfen.

Die Richtigkeit, Zuverlässigkeit und Leistungsfähigkeit der Denkwerkzeuge nach der Natur und des Elementmodells gilt als Voraussetzung für diesen Abschnitt und wird hier ausschließlich anhand von Beispielrechnungen diskutiert. Für ausführliche Herleitungen und Belege der Ansätze von Mattheck sei auf die Originalquellen [MATTHECK06;

MATTHECK10; MATTHECK11] verwiesen. Eine umfangreichere Diskussion und Berechnung der Erweiterungen der Denkwerkzeuge nach der Natur ist in der vom Autor dieser Arbeit betreuten studentischen Arbeit [SIEGLE15] zu finden.

### 5.7.6 Zusammenfassung

Die vorgestellten Leichtbau-Denkwerkzeuge basieren auf Weiterentwicklungen der Denkwerkzeuge nach der Natur sowie der Kombination mit dem Contact & Channel - Model. Die Leichtbau-Denkwerkzeuge sollen den Konstrukteur bei der Entwicklung von Leichtbau-Konstruktionen unterstützen. Die präsentierte Methode unterstützt bereits in der Konzeptphase (bspw. nach [PAHL07, S. 231 f.]) eine schnelle und einfache Entwicklung von Leichtbaukonstruktionen, indem die Ideen der Denkwerkzeuge nach der Natur [MATTHECK10] besser auf die Problemstellungen im Maschinenbau anwendbar gemacht wurden. Komplexere Konstruktionen können ebenfalls ohne aufwändige, rechnergestützte Berechnungen entwickelt, visualisiert und diskutiert werden.

Die Anwendbarkeit der Methode wurde an einfachen Beispielen dargestellt. Die Betrachtung komplexerer sowie nicht so weit vereinfachter Wirkflächenpaare und dreidimensionaler Problemstellungen, bei denen nicht sofort die wichtigste Ebene für die Optimierung erkannt werden kann, stellen neben anderen Aspekten weiteren Forschungsbedarf dar. Ansätze zur Lösung dieser Probleme werden in [POSNER15B] diskutiert.

Nachdem in den letzten Abschnitten auf verschiedenen Abstraktionsebenen diskutiert wurde, wie eine Lösungsvielfalt entwickelt werden kann, wird nachfolgend ein Methoden-Modul vorgestellt, das die Auswahl dieser Lösungen unterstützt.

## 5.8 Leichtbaupotenzialbewertung abstrakter Lösungen

In der Konzeptphase werden oft viele Lösungsvarianten konzipiert, welche nicht alle weiterverfolgt werden können [HELLER13, S. 153 ff.]. Diese Variantenvielfalt kann als Basis zur Auswahl der Lösungen mit dem höchsten Leichtbaupotenzial genutzt werden. Das Problem zur Auswahl der geeigneten Funktionsstruktur, des Wirkprinzips oder der Wirkstruktur mit dem höchsten Leichtbaupotenzial ist die fehlende Information über die Masse, welche benötigt wird, um die jeweilige Lösung umzusetzen.

Die Funktionsmassenanalyse, siehe Abschnitt 5.2, ist eine Methode, welche die Entwicklung der Massenziele und die Analyse des Leichtbaupotenzials von Funktionen unterstützt. Jedoch umfasst sie nicht die Auswahl, welches Wirkprinzip beispielsweise

das höhere Leichtbaupotenzial im Vergleich zu einem anderen hat. Die Forschungsfrage, die damit beantwortet werden muss, ist demnach die Folgende: *Wie wird das Leichtbaupotenzial von Lösungen auf abstraktem Niveau, wie auf Funktions- und Wirkstrukturebene, abgeschätzt und damit die Auswahl von Lösungen mit größerem Leichtbaupotenzial unterstützt?*

Zur Beantwortung dieser Forschungsfrage werden nachfolgend zunächst in Abschnitt 5.8.1 die Abstraktionsebenen der Konzeptphase diskutiert, auf denen Lösungen entwickelt werden. Danach wird die Nutzung des Ansatzes der Funktionsmassenanalyse zur Bewertung abstrakter Lösungen innerhalb des Produktentwicklungsprozesses vorgestellt, siehe Abschnitt 5.8.2. Die Schritte der Anwendung dieses Vorgehens werden in Abschnitt 5.8.3 detailliert. Das daraus resultierende Modul des Methoden-Baukastens wird als Funktionsmasseneinschätzungs-Modul (FMEM) bezeichnet.

### **5.8.1 Bewertung von Lösungen auf verschiedenen Abstraktionsebenen der Konzeptphase**

Wie in den Abschnitten 3.2.4 und 4.1.3 bereits diskutiert sowie in Bild 3.4 gezeigt, gibt es vier mögliche Schritte, in denen eine Auswahl an Lösungen notwendig sein kann. Ob eine Auswahl notwendig ist oder nicht, hängt von der vorhandenen Anzahl an erfolgsversprechenden Ergebnissen im jeweiligen Schritt ab. Wenn mehr Ergebnisse vorhanden sind, als aufgrund der begrenzten Ressourcen weiterverfolgt werden können, muss eine Bewertung und Auswahl stattfinden. Um dies unter Berücksichtigung des Leichtbaupotenzials der Lösungen auszuführen, muss zunächst der Informationsgehalt der verschiedenen Abstraktionsebenen der Lösungen in der Konzeptphase analysiert werden.

Die Funktionsstruktur beinhaltet keine Informationen zur Geometrie und zum Material. Somit sind auch keine Informationen zum Volumen und zur Dichte sowie keine Information zur Masse vorhanden, welche eingesetzt wird, um die Teillösungen zu erfüllen.

Auf Ebene der Wirkprinzipien werden Informationen zum physikalischen Effekt sowie zu einigen geometrischen und materialspezifischen Eigenschaften gegeben. Die geometrischen Informationen sind jedoch auf eine grobe Struktur der Wirkprinzipien begrenzt. Die materialspezifischen Informationen beinhalten nicht den exakten Werkstoff, welcher eingesetzt wird, um das Wirkprinzip zu realisieren. Die genaue Werkstoffauswahl folgt erst in der Entwurfsphase. Daher sind keine Informationen zum Volumen und zur Dichte des Materials der Lösung auf der Ebene der Wirkprinzipien

bekannt. Auf dieser Ebene sind nur Informationen zu den Wirkflächenpaaren und deren Verbindung vorhanden.

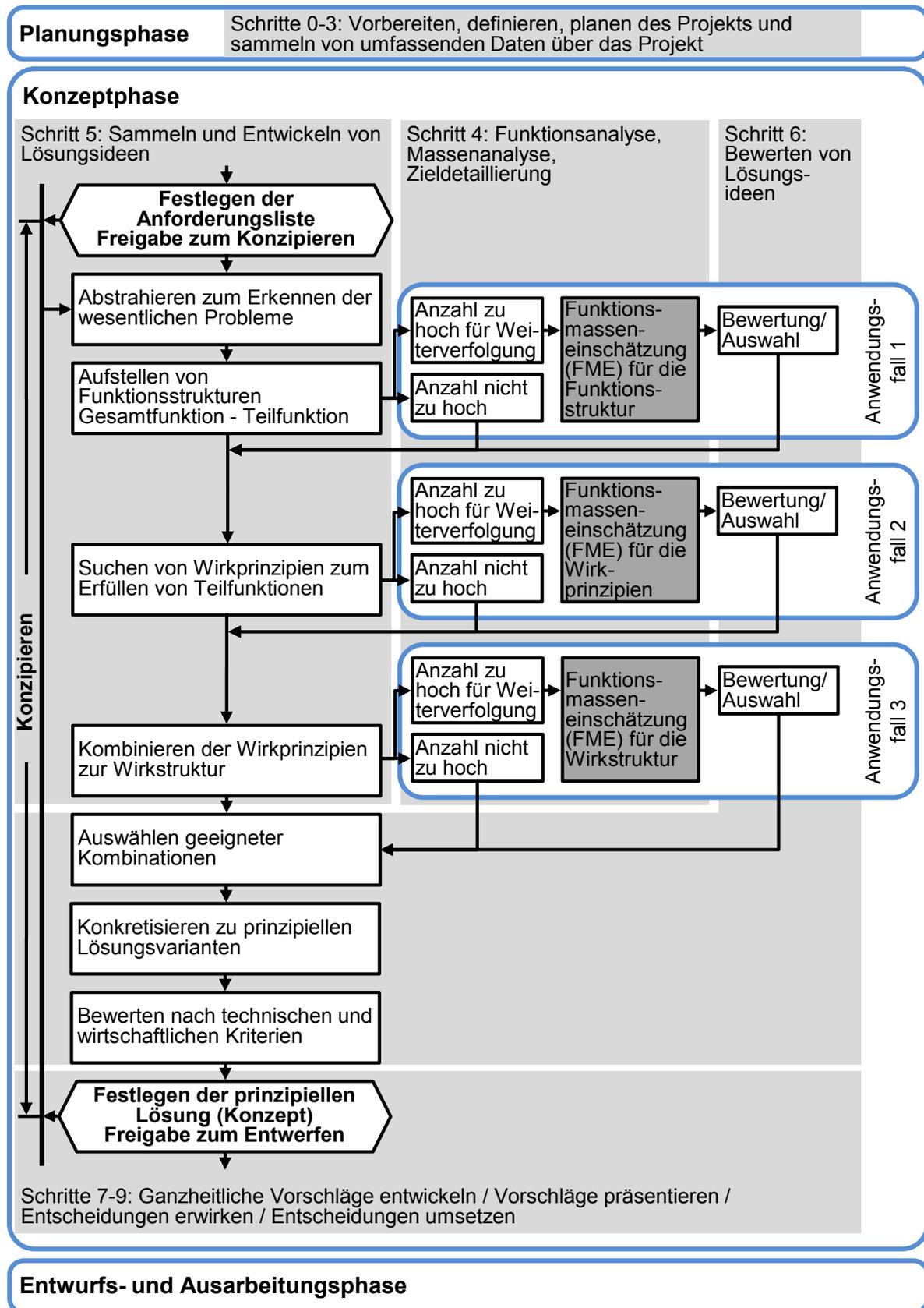
Durch Kombinieren der Wirkprinzipien und dadurch der Funktionsstruktur mit den Wirkprinzipien entsteht die Wirkstruktur. Die Wirkstruktur beinhaltet nur ergänzende Informationen zur Anordnung und den Interaktionen der Wirkprinzipien. Selbst im Schritt zur Entwicklung von Wirkstrukturen ist keine Information über das Material, dessen Dichte und Volumen bekannt, welches für die Umsetzung der Wirkstrukturen benötigt wird. Damit ist keine Information über die Masse gegeben, welche benötigt wird, um die Wirkstruktur im Produkt zu implementieren.

Um eine Bewertung der Wirkstruktur zu ermöglichen, schlagen Pahl et al. [PAHL07, S. 265 ff.] eine Detaillierung der Wirkstrukturen vor. Der detailliertere Zustand der Lösung wird von ihnen „Prinziplösung“ genannt, jedoch wird dies nicht weiter definiert. Die Abstraktionsebene der Prinziplösung kann grobe Informationen zum Volumen der Komponenten, zum Material und der Dichte des Materials enthalten. Diese Informationen können zur Abschätzung der Masse der verschiedenen Lösungen genutzt werden. Dies bedeutet, dass speziell auf den Abstraktionsebenen der Funktionsstruktur, des Wirkprinzips und der Wirkstruktur Informationen zum Leichtbaupotenzial gewonnen werden können, um eine Auswahl bezüglich der Leichtbauaspekte zu ermöglichen. Im Folgenden wird ein Weg zur Lösung dieses Problems und der Gewinnung dieser Informationen aufgezeigt. [POSNER14A, S. 356]

### **5.8.2 Implementierung der Funktionsmassenanalyse in den Produktentwicklungsprozess**

Die Funktionsmassenanalyse (FMA) erlaubt es, die Funktionsstruktur um Informationen über die Masse zu ergänzen, welche benötigt wird, um die Funktionen in vorhandenen Produkten zu erfüllen, siehe Abschnitt 5.2. Diese Idee wird im nachfolgenden Abschnitt genutzt, um Informationen über die für die Umsetzung im Produkt notwendige Masse nicht nur von Funktionen, sondern auch von unterschiedlichen Funktionsstrukturen, Teilfunktionen, Wirkprinzipien und Wirkstrukturen zu gewinnen.

Bild 5.19 zeigt die Schritte der FMA zugeordnet zu den Phasen des Produktentwicklungsprozesses nach Pahl et al. [PAHL07, S. 232]. Es zeigt außerdem die Schritte, in denen eine Entscheidung notwendig ist, ob eine Bewertung und Auswahl der Lösungen stattfinden muss oder nicht. Wenn mehr Lösungen vorhanden sind, als weiterverfolgt werden können, muss eine Auswahl getroffen werden.



**Bild 5.19:** Die Funktionsmasseneinschätzung zugeordnet zum Produktentwicklungsprozess und der Funktionsmassenanalyse [POSNER14A, S. 357]

Nach der Entscheidung, ob eine Lösungsauswahl getroffen werden muss, kann mit der eigentlichen Bewertung und Auswahl fortgefahren werden. Anschließend an die Auswahl der weiterzuverfolgenden Lösungen kann mit dem nächsten Schritt des Produktentwicklungsprozesses fortgefahren werden. Diese Zwischenauswahl muss der betreffenden Situation, der Anzahl der Lösungen und den vorhandenen Ressourcen des Konstrukteurs angepasst werden.

Die drei Anwendungsfälle, in denen eine Bewertung und Auswahl notwendig sein kann, und die Idee der Implementierung der FMA als Bewertungsvorbereitung werden in Bild 5.19 gezeigt. [POSNER14A, S. 356]

Dieses Vorgehen erlaubt die Berücksichtigung der FMA in verschiedenen Situationen der Konzeptphase des Produktentwicklungsprozesses. Es implementiert verschiedene Iterationen in den Schritten 4, 5 und 6 des Prozesses der FMA. Der Bewertungsvorbereitungsschritt, hier Funktionsmasseneinschätzung (FME) genannt, unterstützt die Bewertung des Leichtbaupotenzials bereits von der Abstraktionsebene der Lösungen in der Konzeptphase an. Wie die Idee der FMA im Detail zu nutzen ist, um die FME anzuwenden, wird im nachfolgenden Abschnitt gezeigt. [POSNER14A, S. 356 f.]

### **5.8.3 Systematische Unterstützung der Bewertung des Leichtbaupotenzials in der Konzeptphase: Funktionsmasseneinschätzung**

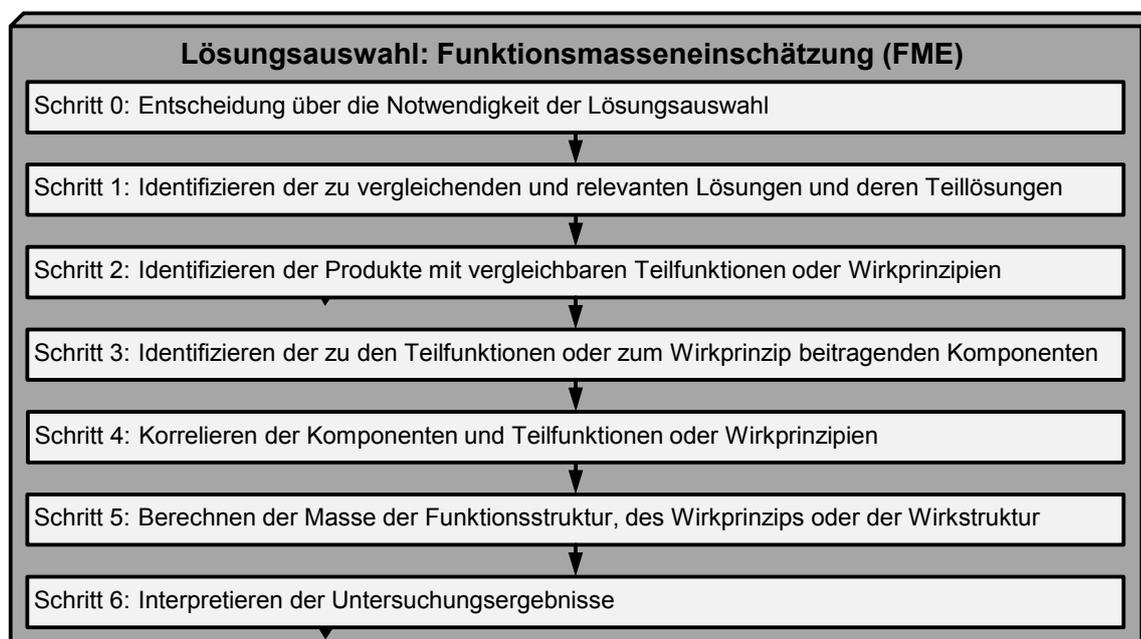
Das Vorgehen der Funktionsmassenanalyse umfasst die Schritte 0 bis 6, wie in Bild 5.20 gezeigt. Diese Schritte des zugehörigen Funktionsmasseneinschätzungs-Moduls werden nachfolgend vorgestellt.

#### **5.8.3.1 Schritt 0: Entscheidung über die Notwendigkeit der Lösungsauswahl**

Wenn mehr Lösungen vorhanden sind, als weiterverfolgt werden können, kann in einem von den drei oben erwähnten Anwendungsfällen der Konzeptphase die FME zur Vorbereitung der Auswahl der Lösungen bezüglich des Leichtbaupotenzials genutzt werden. Dies muss in Schritt 0 der FME entschieden werden. [POSNER14A, S. 357]

In den nachfolgenden Abschnitten wird zum besseren Verständnis der beschriebene Prozess anhand eines einfachen Beispiels einer Heckenschere betrachtet. Es wird angenommen, dass das Unternehmen bereits eine Heckenschere mit Verbrennungsmotor auf dem Markt anbietet und deren Funktionsstruktur bekannt ist. Bei der Suche nach verschiedenen Wirkprinzipien für die Teilfunktionen erarbeiten die Konstrukteure die Idee, eine kabelbetriebene elektrische (nachfolgend elektrische oder Elektro-

heckenschere genannt) oder akkubetriebene Heckenschere zu entwickeln. Die Konstrukteure nehmen ebenfalls an, dass die Masse des Produkts ein wichtiger Erfolgsfaktor für das Produkt ist, da weniger Masse eine geringere physische Belastung für den Nutzer bedeutet. In der Konzeptphase müssen die Konstrukteure nach der Entwicklung der Ideen für die verschiedenen Wirkprinzipien entscheiden, welche Wirkprinzipien und somit welche Variante der Heckenschere weiterverfolgt werden soll, da angenommen wird, dass sie nur eine Lösung aufgrund der begrenzten Ressourcen, weiterverfolgen können. Um dies zu entscheiden wird die FME genutzt, um die Auswahl unter Berücksichtigung des Leichtbaupotenzials zu unterstützen. Diese Anwendung der FME zum Vergleich unterschiedlicher Wirkprinzipien entspricht dem zweiten Anwendungsfall von Bild 5.19. [POSNER14A, S. 357 f.]



**Bild 5.20:** Funktionsmasseneinschätzungs-Modul (vgl. [POSNER14A, S. 358])

### 5.8.3.2 Schritt 1: Identifizieren der zu vergleichenden und relevanten Lösungen und deren Teillösungen

Zunächst müssen die Lösungsvarianten, wie zum Beispiel die Funktionsstrukturen, Teilfunktionen, Wirkprinzipien und Wirkstrukturen, welche miteinander verglichen werden sollen, identifiziert werden. [POSNER14A, S. 358]

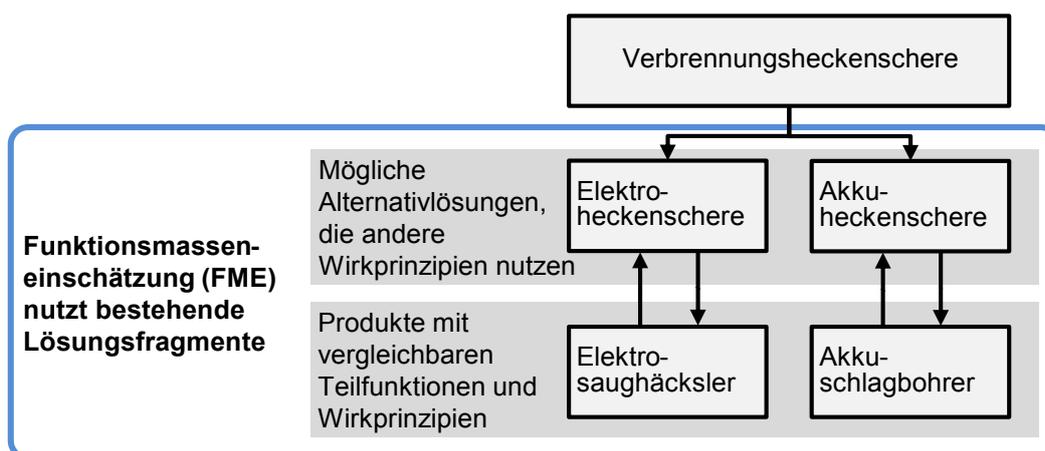
Der Fokus im Beispielfall der Heckenschere liegt auf den Teilfunktionen „Energie speichern“, „Energie wandeln“ und „Vibration dämpfen“. Außerdem werden die dazugehörigen Wirkprinzipien (WP) der analysierten Lösungen („WP Kraftstofftank“, „WP Verbrennungsmotor“, „WP Federung“ sowie „WP Elektromotor“ und „WP Batterie“)

untersucht, um alle Alternativen einer elektrischen oder akkubetriebenen Heckenschere zu berücksichtigen. [POSNER14A, S. 358]

### 5.8.3.3 Schritt 2: Identifizieren der Produkte mit vergleichbaren Teilfunktionen oder Wirkprinzipien

Für diese Lösungsvarianten müssen Produkte mit mindestens einer gleichen Teilfunktion oder einem gleichen Wirkprinzip gefunden werden. Der Vorteil der FME im Vergleich zur FMA ist, dass nicht ein ganzes gleiches Produkt, sondern nur eine ähnliche Umsetzung einer einzelnen Teilfunktion oder eines Wirkprinzips gefunden werden muss. [POSNER14A, S. 358]

Am Beispiel der Heckenschere haben die Konstrukteure zunächst einen Saughäcksler analysiert, der bereits auf dem Markt ist. Bei der Analyse, mit Unterstützung der FME, wurde versucht, das Leichtbaupotenzial einer möglichen elektrischen und akkubetriebenen Heckenschere abzuschätzen, siehe Bild 5.21. Die Saughäcksler mit Elektro- und Verbrennungsmotor wurden hinsichtlich ihrer Wirkprinzipien für die Teilfunktionen „Energie wandeln“ und „Schwingungen dämpfen“ analysiert. Da jedoch im Elektro-saughäcksler kein Wirkprinzip für die Teilfunktion „Energie speichern“ vorhanden ist, muss ein Produkt gefunden werden, welches dieses Wirkprinzip auf eine ähnliche Art erfüllt. Um dies zu erreichen, wird eine Akkus Schlagbohrmaschine analysiert. [POSNER14A, S. 358]



**Bild 5.21:** Identifizierte Produkte für die FME [POSNER14A, S. 359]

### 5.8.3.4 Schritt 3: Identifizieren der zu den Teilfunktionen oder zum Wirkprinzip beitragenden Komponenten

Im dritten Schritt werden die Produktkomponenten identifiziert, die zur Erfüllung der betrachteten Teilfunktion oder zum Wirkprinzip beitragen. Wie am Beispiel für die He-

ckenshere mit Verbrennungsmotor in Tabelle 5.17, linke Spalte gezeigt, werden in diesem Schritt die Komponenten, welche zur Erfüllung der betrachteten Teilfunktionen oder Wirkprinzipien beitragen, auf der linken Seite der Tabelle aufgelistet. Dieser Vorgang wird ebenfalls für die anderen zu analysierenden Produkte und ihre Komponenten ausgeführt. [POSNER14A, S. 359]

### 5.8.3.5 Schritt 4: Korrelieren der Komponenten und Teilfunktionen oder Wirkprinzipien

Der Beitrag jeder Komponente zur Erfüllung des Wirkprinzips oder der Teilfunktion muss im nächsten Schritt quantifiziert werden, indem die Komponenten mit den Teilfunktionen oder Wirkprinzipien korreliert werden. Am Ende muss die Menge der benötigten Masse, um die betrachtete Teilfunktion oder das Wirkprinzip zu erfüllen, berechnet werden. Dieser Prozess muss für jede mögliche Lösung und Teillösung, welche die Konstrukteure untersuchen wollen, ausgeführt werden. [POSNER14A, S. 359] Im vierten Schritt muss daher jeweils eine Tabelle für jedes analysierte Produkt erstellt werden (siehe Tabelle 5.17).

Teilfunktion (TF)			Energie speichern		Energie wandeln		...
Wirkprinzip (WP)			WP Treibstofftank		WP Verbrennungsmotor		...
Komponente	Anzahl	Gesamtmasse	Beitrag	Massenanteil	Beitrag	Massenanteil	...
Treibstofftank Teil 1	1	226 g	100 %	226 g			...
Schrauben für den Tank	4	20 g	100 %	20 g			
Treibstoff	1	380 g	100 %	380 g			...
Verbrennungsmotor	1	1423 g			100 %	1423 g	...
Feder	4	14 g					...
Motorverkleidung	1	255 g		Σ	100 %	255 g	...
Motorgehäuse	1	392 g			70 %	274 g	...
...	...	...	...		...	...	...
Gesamtmasse		5932 g		626 g		2881 g	...

**Tabelle 5.17:** Zuordnung der Bauteile zu den Teilfunktionen / Wirkprinzipien

[POSNER14A, S. 359]

In diesen Tabellen muss der Konstrukteur den prozentualen Anteil einer Komponente abschätzen, mit der sie zur Erfüllung der verschiedenen Wirkprinzipien oder Teilfunktionen beiträgt. Durch Multiplizieren dieses prozentualen Anteils mit der Masse der Komponente und durch Aufsummieren dieser Massenanteile für alle Komponenten, kann die benötigte Masse zur Erfüllung der Teilfunktion oder des Wirkprinzips berechnet werden, wie am Beispiel in Tabelle 5.17 gezeigt wird. [POSNER14A, S. 359]

**5.8.3.6 Schritt 5: Berechnen der Masse auf Basis der Funktionsstruktur, des Wirkprinzips oder der Wirkstruktur**

Wenn Funktions- oder Wirkstrukturen untersucht werden sollen, müssen die Ergebnisse für die verschiedenen Teilfunktionen und Wirkprinzipien miteinander kombiniert werden, um ein Ergebnis für die gesamte Struktur zu erhalten. Die Ergebnisse der verschiedenen Lösungen können zur systematischen Bewertung genutzt werden, um die Entscheidung bezüglich der Lösung, welche die Konstrukteure weiterverfolgen sollen, zu unterstützen. [POSNER14A, S. 360]

Am Beispiel der Entwicklung der Heckenschere müssen die Ergebnisse der einzelnen Wirkprinzipien der verschiedenen analysierten Produkte aufsummiert werden. Diese Summe ergibt die Masse für die alternativen Lösungen, der elektrischen und akkubetriebenen Heckenschere, siehe Tabelle 5.18. [POSNER14A, S. 360]

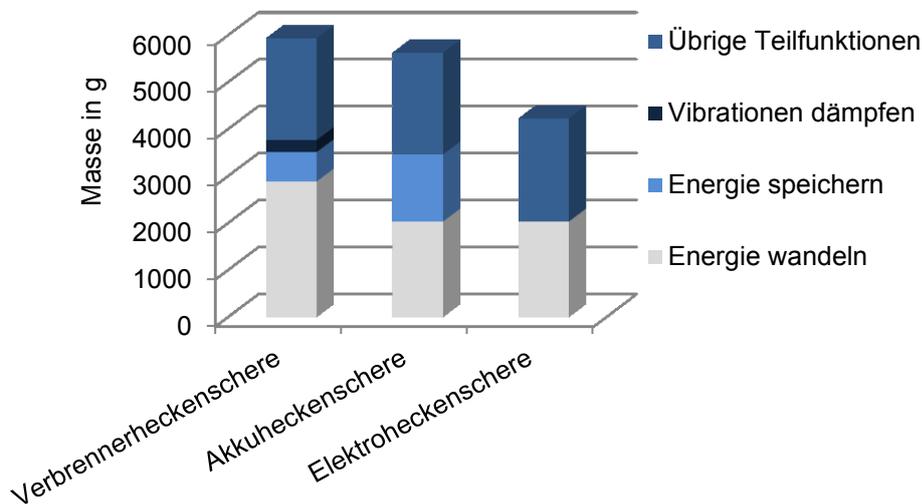
Produktart	Teilfunktion				Masse von WP 1. bis 3.	Gesamtmasse	Leichtbaupotenzial verglichen mit Verbrennerheckenschere
	Energie speichern	Energie wandeln	Vibrationen dämpfen	Restliche Teilfunktionen			
Verbrennerheckenschere	1. WP: Treibstofftank	2. WP: Verbrennungsmotor	3. WP: Federung	Restliche WP	3766 g	5932 g	
	626 g	2881 g	259 g	2166 g			
Elektro-saughäcksler	-	2. WP: Elektromotor	-	Restliche WP	2029 g	4578 g	
	-	2029 g	-	2549 g			
Akkuschlagbohrer	1. WP: Akku	-	-	-	-	-	
<b>Funktionsmasseneinschätzung</b>							
Akkusheckenschere	1. WP: Akku	2. WP: Elektromotor	3. WP: -	Restliche WP	= 3456 g	5622 g	Mehr als 310 g
	1427 g	2029 g	-	2166 g			
Elektroheckenschere	1. WP: -	2. WP: Elektromotor	3. WP: -	Restliche WP	= 2029 g	4195 g	Ungefähr 1740 g
	-	2029 g	-	2166 g			

**Tabelle 5.18:** Ergebnisse der FME [POSNER14A, S. 360]

Die Massen der „restlichen Teilfunktionen“ der Heckenschere mit Verbrennungsmotor, werden in der elektrischen und kabellosen Heckenschere als gleich angenommen. Dadurch kann eine Aussage über die gesamte Masse der Lösungsvarianten getroffen werden. [POSNER14A, S. 360]

### 5.8.3.7 Schritt 6: Interpretieren der Untersuchungsergebnisse

Die Interpretation der untersuchten Ergebnisse bildet die Basis für die Bewertung und Auswahl. Die Ergebnisse der FME sind in Tabelle 5.18 gezeigt. Die Massen für die drei betrachteten Lösungsvarianten sind in Bild 5.22 dargestellt.



**Bild 5.22:** Masse der verschiedenen Lösungen [POSNER14A, S. 361]

Die Ergebnisse zeigen, dass die Masse der Verbrennungsmotoren der Heckenschere und des Saughäckslers nahezu identisch sind, trotz Berücksichtigung der Tatsache, dass deren Konstruktion unterschiedlich ist und dass die Masse unterschiedlicher Komponenten berücksichtigt werden müssen, da diese zum Motorenwirkprinzip beitragen.

Die FME unterstützt dabei, das Wirkprinzip „Akku“ nicht mit der Komponente Akku gleichzustellen. Sie zeigt stattdessen auf, dass weitere Komponenten existieren, welche zu diesem Wirkprinzip gehören und dieses ermöglichen, wie beispielsweise die Komponenten zur Befestigung, die Arretierung oder die Verkabelung des Akkus. Es wird ebenfalls gezeigt, dass die Akkuheckenschere ein Leichtbaupotenzial gegenüber der Heckenschere mit Verbrennungsmotor besitzt. Dies ist am Massenreduktionspotenzial von mehr als 310 Gramm zu sehen. Ein Grund dafür ist, dass bei Nutzung eines Elektromotors die Teilfunktion zur Dämpfungsreduktion eines Verbrennungsmotors entfallen kann.

Der nächste Schritt wäre die Untersuchung verschiedener 36-Volt-Motoren, welche den Anforderungen entsprechen. Es ist offensichtlich, dass die elektrische Version der Heckenschere ein großes Leichtbaupotenzial bietet (ca. 1740 g). Dies liegt an der Teilfunktion „Energie speichern“, welche nicht in das Produkt implementiert werden

muss. Dies ist keine Lösung für alle Anwendungsfälle. Ein professioneller Nutzer kann zum Beispiel nicht eine Kabelverbindung durch einen ganzen öffentlichen Park führen. Jedoch kann dies im Fall eines „Freizeitgärtners“ mit einem kleinen Grundstück eine geeignete Lösung sein, welche bezüglich der zu bewegenden Masse und der reduzierten physischen Belastung vorteilhaft ist. [POSNER14A, S. 360 f.]

Basierend auf diesen Ergebnissen muss die weitere Bewertung und Auswahl durchgeführt werden. Beispielsweise kann dies in Anlehnung an die Methoden nach Pahl et al. [PAHL07] ausgeführt werden, wie die Nutzung der systematischen Auswahlliste oder der technischen und wirtschaftlichen Bewertung. Dafür müssen alle Anforderungen, welche auf diesem hohen Abstraktionsgrad der Lösungen bewertet werden können, für die Bewertung und Auswahl berücksichtigt werden. [POSNER14A, S. 361]

#### **5.8.4 Zusammenfassung**

Albers et al. [ALBERS15B, S. 4 ff.] heben in ihrem Modell zur Produktgenerationentwicklung hervor, dass in der industriellen Praxis kaum Neuentwicklungen eines gesamten Produkts entstehen. Hauptsächlich werden Teilsysteme durch (Wirk-)Prinzipvariation der Teilfunktion, Gestaltvariation des Wirkprinzips oder als Übernahmevariation neu entwickelt. Unter der Übernahmevariation wird dabei die Übernahme bestehender Teillösungen von Referenzprodukten verstanden, die dann bezüglich der Anforderungen, die sich durch die Systemintegration ergeben, angepasst werden. [ALBERS15B]

Daraus lässt sich ableiten, dass in den meisten Fällen in der Praxis und in allen Fällen der Produktgenerationentwicklung bereits Lösungen für die Umsetzung von einzelnen Wirkprinzipien oder Teilfunktionen des neu zu entwickelnden Produkts existieren. Dabei ist es mittels der FME sowohl möglich, eine Umsetzung einer gleichen Teilfunktion durch ein im Referenzprodukt (Vorgänger- oder Wettbewerberprodukt) ähnliches Wirkprinzip oder eine Umsetzung eines gleichen Wirkprinzips durch eine im Referenzprodukt ähnliche Gestalt zu analysieren. Entsprechend der Idee der Produktgenerationentwicklung [ALBERS15B] werden in der Funktionsmasseneinschätzung (FME) Produkte in Teillösungen aufgegliedert und geprüft, welche Funktionsgruppen schon in Vorgänger- oder Wettbewerberprodukten umgesetzt sind und welche wirklich neu sind. Für die übernommenen Teillösungen kann die Masse mittels der FME bestimmt werden. Die FME lässt sich somit als Methode in der Produktgenerationentwicklung einsetzen.

Durch Nutzung der Ergebnisse der Analyse der Teillösungen und durch Zusammen setzen der Teillösungen, um die betrachtete Funktions- oder Wirkstruktur zu erstellen, wird die Bewertung unter Berücksichtigung der Masse und somit die Bewertung des Leichtbaupotenzials verschiedener Lösungen möglich. Damit müssen nur Teile der Lösungen in anderen Produkten implementiert sein. Selbst wenn nicht alle Teillösungen in anderen Produkten umgesetzt sind, kann die Bewertung für die anderen Teillösungen die Entwickler bei ihrer Entscheidung unterstützen.

Darüber hinaus wird Anwendung dieses Methoden-Moduls das Entwickeln eines tiefen Verständnisses bezüglich der Zusammenhänge und des Zusammenwirkens innerhalb des Produkts unter Berücksichtigung der Teilfunktionen, Wirkprinzipien und deren Lösungsvarianten unterstützt werden. Die Methode umfasst außerdem das Ermitteln von Teilfunktionen oder Wirkprinzipien, welche im Fall von bestimmten Wirkprinzipien für andere Teilfunktionen weggelassen werden können. Die Idee zur Analyse von ähnlichen Produkten mit ähnlichen Lösungen ist nicht neu, jedoch hilft die FME den Konstrukteuren, diese Analyse systematisch durchzuführen und strukturierte sowie nachvollziehbare Ergebnisse zu erzielen, die miteinander verglichen werden können. Um zuverlässige Ergebnisse zu erhalten, ist es wichtig, dass die Eigenschaften der untersuchten ähnlichen Produkte genau miteinander verglichen werden.

Zudem sind die Ergebnisse dieses Vorgehens lediglich qualitativ einzuschätzen, dies bedeutet am Beispiel der Heckenschere, dass die Masse durch die Auswahl der Akku-Lösung nicht um genau 310 g reduziert werden kann. Die Masse eines Produkts kann nicht ermittelt werden, bevor das genaue Material mit der Dichte und die genaue Gestalt sowie das Volumen der Komponenten definiert wurden. Trotzdem hat die Konzeptphase ein großes Leichtbaupotenzial, weil die Konstrukteure große Freiheiten haben und die meisten Eigenschaften eines Produkts in dieser Phase festlegen. [POSNER14A, S. 361 f.] Die FME hilft Konstrukteuren dieses große Potenzial für die Ziele des Leichtbaus zu nutzen, indem sie die Analyse und Auswahl von verschiedenen Lösungen bereits auf Funktions- und Wirkebene methodisch unterstützt.

## **5.9 Zusammenfassung**

In Kapitel 5 wurde ein Methoden-Baukasten zum leichtbaugerechten Konzipieren entwickelt. Dieser Methoden-Baukasten ist dem Produktentwicklungsprozess nach Pahl et al. [PAHL07] zugeordnet. Damit können die Methoden-Module jedem unternehmensspezifischen Produktentwicklungsprozess, der durch das Prozessmodell nach

Pahl et al. [PAHL07] abgebildet werden kann, unterstützt werden. Die Methoden-Module können ohne Software-Unterstützung mithilfe einfacher Hilfsmittel umgesetzt werden. Außerdem können die Methoden-Module in Workshops in einer Gruppe von Entwicklungsingenieuren durchgeführt und dadurch Leichtbau-Lösungen entwickelt werden. Diese Anwendung der Methoden-Module im Rahmen verschiedener Anwendungsprojekte in Kooperation mit der Industrie sind der Inhalt des nachfolgenden Kapitels.



## 6 Evaluation der Methodik

In diesem Kapitel wird der in Kapitel 5 entwickelte Methoden-Baukasten für das leichtbaugerechte Konzipieren evaluiert. Mithilfe der Evaluation soll aufgezeigt werden, ob die Methodik den gewünschten Mehrwert bietet und wo noch Potenzial für eine Weiterentwicklung besteht. Dazu werden zunächst der Aufbau und die Systematik der Evaluation in Abschnitt 6.1 vorgestellt. Die Evaluation wurde in Form verschiedener Projekte durchgeführt, die in den Abschnitten 6.2 bis 6.5 beschrieben sind. Abschließend werden die Evaluationsergebnisse in Abschnitt 6.6 zusammengefasst.

### 6.1 Aufbau und Systematik der Evaluation

Die Evaluation basiert, wie in Kapitel 1 bereits beschrieben, auf der Design Research Methodology (DRM) nach Blessing und Chakrabarti [BLESSING09]. Diese unterteilt die Evaluation in die Support Evaluation, Application Evaluation und Success Evaluation. In der Support Evaluation soll überprüft werden, ob die entwickelte Methodik den Anforderungen entspricht, die Konsistenz und die Vollständigkeit gegeben sind und ob die Methodik prinzipiell funktioniert, wie gewollt. Durch die Application Evaluation werden die Fragen nach der Anwendbarkeit und Tauglichkeit der Methodik gestellt und durch die Success Evaluation die Nützlichkeit der Methodik bewertet. [BLESSING09, S. 184 f.]

In Kapitel 4 wurden in Tabelle 4.1 die Anforderungen an den zu entwickelnden Methoden-Baukasten festgelegt. Aus den drei Evaluationstypen der DRM ergeben sich weitere Anforderungen, beispielsweise an die Konsistenz und Vollständigkeit der entwickelten methodischen Unterstützung. Diese wurden als ergänzende Anforderungen in Tabelle 6.1 formuliert. Außerdem wurden diese Anforderungen um weitere ergänzt, die sich aus den zu beeinflussenden Schlüsselfaktoren und den Diskussionen mit Entwicklern aus Wissenschaft und Industrie ergaben. Dabei sind die Schlüsselfaktoren die Faktoren nach DRM, die im Fall dieser Arbeit durch das jeweilige Methoden-Modul beeinflusst werden sollen. Aus den Anforderungen aus Tabelle 4.1 und Tabelle 6.1 wurden die Fragen abgeleitet, siehe Evaluationsfragebogen in Anhang A.1, die in der Evaluation beantwortet werden müssen.

Basierend auf den drei Typen der Evaluation und den in Kapitel 5 entwickelten Methoden-Modulen wurde der in Tabelle 6.2 dargestellte Evaluationsplan erstellt. Mithilfe des Evaluationsplans soll überprüft werden, ob die Anforderungen aus den Kapiteln 1, 4 und 6 erfüllt wurden.

Anforderung	Beschreibung
A11	Konsistenz und Vollständigkeit
A12	Steigerung der Anzahl und Qualität der Leichtbau-Lösungen
A13	Unterstützung der Massenreduktion oder der Steigerung von Funktion, Nutzen oder weiterer Produkteigenschaften (wie z. B. Steifigkeit) bei gleicher Produktmasse
A14	Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit der Produkte
A15	Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse
A16	Unterstützung von unerfahrenen Entwicklern
A17	Mehrwert gegenüber Stand der Forschung der Leichtbau-Methodik
A18	Anpassbarkeit an den jeweils vorliegenden Produktentwicklungsprozess

**Tabelle 6.1:** Ergänzende Anforderungen an eine Vorgehensweise zum leichtbaugerechten Konzipieren (vervollständigt Anforderungen aus Tabelle 4.1)

Der Evaluationsplan in Tabelle 6.2 zeigt, dass die meisten Methoden-Module weitestgehend evaluiert werden konnten. Die Support Evaluation soll die Entwicklung der Methodik unterstützen und wird daher begleitend zu dieser durchgeführt. In der vorliegenden Arbeit wurden Diskussionen und Vorträge auf nationalen und internationalen Konferenzen, verschiedene Diskussionen und Vorträge in der Industrie sowie studentische Arbeiten und ein „Probelauf“ eines neu erarbeiteten VDI-Seminars mit Studierenden für die Support Evaluation genutzt.

Die Support Evaluation mit den damit verbundenen Diskussionen und Vorträgen konnte für alle Module vollständig genutzt werden. Auch die Application Evaluation und Success Evaluation konnten für alle Methoden-Module bis auf die Wirkebene und die Funktionsmasseneinschätzung vollständig durchgeführt werden. Diese Unterschiede bezüglich des Umfangs der durchgeführten Evaluation der einzelnen Module basieren darauf, dass je nach Projektsituation die jeweils passenden Module aus dem Baukasten ausgewählt werden können und müssen. In den meisten Projekten wird von bestehenden Produkten ausgegangen. Damit besteht oft nicht die Freiheit und/oder Bereitschaft, Wirkprinzipien zu hinterfragen. Daher sind diese Module, die sich mit der Suche und Auswahl alternativer Wirkprinzipien beschäftigen, am wenigsten umfangreich evaluiert worden. Andere Module, wie beispielsweise die Funktionsmassenanalyse, die zur Analyse des Produkts und damit zur Entwicklung eines Grundverständnisses beiträgt, fanden in jedem Projekt Anwendung, da dieses Grundverständnis die Basis für eine erfolgreiche Entwicklung von Leichtbau-Lösungen darstellt.

Methoden-Modul	Schlüsselfaktoren	Support Evaluation	Application Evaluation	Success Evaluation
Funktionsmassenanalyse	Güte der Entwicklung von Massenzielen	Feedback aus Konferenzvorträgen und -diskussionen sowie aus der Vorstellung und Diskussion mit verschiedenen Industriepartnern, Erprobung in verschiedenen studentischen Arbeiten und im Leichtbau-Seminar für Studierende	Daimler Trucks (6.2), HEDELIUS (6.3), STIHL (6.4), VDI-Seminar (6.5)	Daimler Trucks (6.2), HEDELIUS (6.3), VDI-Seminar (6.5)
Funktionsebene	Anzahl und Qualität der Leichtbauideen auf Funktionsebene		HEDELIUS (6.3), STIHL (6.4), VDI-Seminar (6.5)	HEDELIUS/IPA, VDI-Seminar
Wirkebene	Anzahl und Qualität der Leichtbauideen auf Wirkebene		STIHL (6.4), VDI-Seminar (6.5)	
Gestalt-ebene	Anzahl und Qualität der Leichtbauideen auf Gestaltebene		Daimler Trucks (6.2), HEDELIUS (6.3), VDI-Seminar (6.5), STIHL (6.4)	Daimler Trucks (6.2), HEDELIUS (6.3), VDI-Seminar (6.5)
Struktur-ebene	Anzahl und Qualität der Leichtbauideen auf Strukturebene		Daimler Trucks (6.2), VDI-Seminar (6.5), Berechnungen (Topologie / FEM)	Daimler Trucks (6.2), VDI-Seminar (6.5)
Funktionsmasseneinschätzung	Vergleichbarkeit von Massenpotenzialen bei abstrakten Lösungen		STIHL (6.4), VDI-Seminar (6.5)	
Leichtbau-Methoden-Baukasten	Durchgängige Berücksichtigung von Leichtbau in der Konzeptphase		Daimler Trucks (6.2), HEDELIUS (6.3), STIHL (6.4), VDI-Seminar (6.5)	Daimler Trucks (6.2), HEDELIUS (6.3), STIHL (6.4), VDI-Seminar (6.5)

Legende: Vollständig evaluiert Teilweise evaluiert Nicht evaluiert  
(x.x) = Abschnitt x.x

**Tabelle 6.2:** Evaluationsplan

In den folgenden Abschnitten wird aufgezeigt, welche Methoden-Module in welchem Evaluationsprojekt zur Anwendung kamen und welche Rückschlüsse daraus für die Evaluation gewonnen werden konnten.

## 6.2 Anwendung bei der Daimler AG, Geschäftsfeld Daimler Trucks

Daimler Trucks stellt eines der fünf Geschäftsfelder der Daimler AG und den größten weltweit aufgestellten Hersteller von Lastkraftwagen über 6 t dar [DAIMLER15]. Die Anwendung des in Kapitel 5 vorgestellten Methoden-Baukastens wurde im Projekt als Beratungsdienstleistung von der Abteilung „Advanced Engineering Trucks“ von Daimler Trucks beauftragt und unter Moderation sowie Vorbereitung durch den Autor dieser Arbeit angewendet. Zunächst wurden in dem Beratungsprojekt mit Daimler Trucks die Produktsituation und die Freiheitsgrade einer Produktweiterentwicklung in der Vorentwicklungsabteilung analysiert. Basierend auf dieser Analyse wurden die Module Funktionsmassenanalyse und die Leichtbau-Denkwerkzeuge auf Struktur- und Gestalt-

ebene für die Anwendung ausgewählt. Diese wurden auf das aktuelle Produkt angewendet, welches weiterentwickelt werden sollte. Die Funktions- und Wirkebene wurden durch die Rahmenbedingungen eingeschränkt, so dass deren Anwendung vom Kunden nicht gewünscht wurde. Die Ergebnisse, die aus der Anwendung der Funktionsmassenanalyse und der Leichtbau-Denkwerkzeuge im ersten Projektabschnitt entstanden sind, wurden von den Entscheidungsträgern von Daimler-Trucks sehr positiv bewertet. Aufgrund dessen wurden im anschließend beauftragten zweiten Projektabschnitt für eine weitere Baugruppe des Fahrzeugs Leichtbau-Lösungen mittels der Leichtbau-Denkwerkzeuge entwickelt.

### **6.2.1 Anwendung und Evaluation des Baukastens und der Methoden-Module**

Die Funktionsmassenanalyse wurde auf das gesamte Fahrzeugheck einer Zugmaschine angewendet. Dabei wurden folgende Schritte durch das Entwicklungsteam von Daimler-Trucks unter Moderation des Autors dieser Arbeit durchgeführt:

- Analyse der Anforderungen
- Definition des Gesamtmassenziels
- Gewichtung der Kundenanforderungen
- Analyse der Funktionen und Aufstellen der Funktionsstruktur
- Analyse der Massen der Bauteile und Baugruppen des bestehenden Produkts
- Bestimmung von Funktionsmassen und Funktionsmassenzielen
- Bestimmung von Bauteilmassen und Bauteilmassenzielen
- Visualisierung und Diskussion der Ergebnisse

Basierend auf dieser Analyse wurde von Daimler Trucks festgelegt, dass bestehende Funktionsstrukturen und Wirkprinzipien an sich nicht verändert werden dürfen. Jedoch wurde als weiteres Ziel die Leichtbau-Optimierung der Strukturen und der Gestalt der betrachteten Baugruppe sowie deren Einzelteile festgelegt. Um dieses Ziel zu erreichen, wurden die Leichtbau-Denkwerkzeuge angewendet und dadurch zunächst die Hauptkraftflüsse im bestehenden Produkt geklärt. Im nächsten Schritt wurde mithilfe der Leichtbau-Denkwerkzeuge analysiert, wie ein verbesserter Kraftfluss aussehen könnte. Darauf aufbauend wurde der verbesserte Kraftfluss mit dem bestehenden verglichen. Dieser Vergleich ergab einige Übereinstimmungen, die belegten, dass der bisherige Kraftfluss im Produkt schon an vielen Stellen eine gute Lösung darstellt. An anderen Stellen konnte jedoch noch Leichtbaupotenzial an überdimensionierten Strukturen, die nicht wesentlich durch den Hauptkraftfluss belastet sind, identifiziert werden.

Außerdem wurde mithilfe der Leichtbau-Denkwerkzeuge die Gestalt gezielt variiert, um Leichtbauansätze zu identifizieren. Dabei konnte eine Vielzahl an Leichtbau-Lösungen auf Konzeptebene entwickelt werden, die für die weitere Entwicklung des Produkts genutzt werden. Dies stellt das wesentliche Ergebnis und den wesentlichen Mehrwert des ersten Projektabschnitts für Daimler Trucks dar. Leider können aufgrund der notwendigen Geheimhaltung hier keine konstruktiven Details gezeigt werden.

Der identifizierte, kaum belastete und überdimensionierte Strukturbereich wurde im zweiten Projektabschnitt mithilfe der Leichtbau-Denkwerkzeuge weiterentwickelt. Dabei wurden im Wesentlichen drei Gesamtkonzepte für diese Baugruppe erstellt. Diese wurden durch Institutsmitarbeiter unter Anleitung des Autors dieser Arbeit in Zeichnungen detailliert. Bei diesen Lösungen führten vor allem eine kompaktere Bauart sowie eine umfangreiche Funktions-integration zu Leichtbau-Konzepten. Einzelne Lösungsansätze der drei Konzepte konnten kombiniert werden, wodurch weitere Lösungen entstanden sind. Für die Lösungen aus den beiden Projektabschnitten wird eine Schutzrechtsanmeldung eingereicht.

### **6.2.2 Feedback der Anwender**

Im Projekt mit Daimler Trucks wendeten vier Entwicklungsingenieure, darunter auch ein Teamleiter, die Schritte der ausgewählten Methoden-Module unter Moderation des Autors dieser Arbeit an. Diese Anwender wurden mithilfe des Evaluationsfragebogens (Anhang A.2) zu den angewendeten Methoden-Modulen und dem Methoden-Baukasten befragt. Außerdem wurden dem Abteilungsleiter die Ergebnisse aller Schritte präsentiert. Das Feedback der Anwender ist in Tabelle 6.3 zusammengefasst und den Methoden-Modulen, dem gesamten Methoden-Baukasten oder einem allgemeinen Feedback zur gesamten Methodik zugeordnet. Die Zusammenfassung wurde von den Probanden hinsichtlich der inhaltlichen Korrektheit geprüft und freigegeben.

Neben der Anwendung der Methoden durch die Mitarbeiter von Daimler Trucks wurde die Anwendung der Leichtbau-Denkwerkzeuge parallel auch durch Mitarbeiter des Instituts durchgeführt. Es zeigte sich dabei, dass auch bei der Anwendung der Methoden durch Entwickler, die mit dem weiterzuentwickelnden Produkt nicht vertraut waren, Lösungen entstanden sind, die vom Kunden als positiv bewertet wurden und sogar Bestandteil der Schutzrechtsanmeldung sind.

Methoden-Modul	Evaluationsergebnis
Funktionsmassenanalyse	Die angewendete Methode konnte bei der Analyse von Anforderungen, Funktionen, deren Wichtigkeit und der dafür aufgewendeten Masse unterstützen. Dies stellt eine neue Herangehensweise dar. Aufgrund der unterschiedlichen Kundenanforderungen ist diese Herangehensweise in diesem Zusammenhang nicht „einhundertprozentig“ für das Produkt des Projekts passend. Jedoch ist diese Analyse hilfreich in Bezug auf die Leichtbau-Entwicklung und es konnten durch diese Leichtbaupotenziale aufgezeigt werden.
Lösungsgenerierung auf Gestaltenebene	Die Leichtbau-Denkwerkzeuge konnten bei der Variation der Gestalt unterstützen. Diese ungewohnte, abstrakte Herangehensweise führte zu vielen neuen Ideen, die bei der bisher meist bauteilfokussierten Vorgehensweise nicht entstanden sind. Es wurden durch die Methodenanwendung umfassende Lösungsansätze gefunden. Durch das Aufzeigen von Wirkflächenpaaren und Leitstützstrukturen wurde die Variation der Gestalt unterstützt. Es konnten dadurch neue Lösungen gefunden werden, von denen drei „gute“ Varianten weiter ausgearbeitet wurden. Der wichtigste Aspekt der Unterstützung liegt darin, dass durch die Methode das „Selbstverständliche einmal anders dargestellt wird“ und daraus etwas „völlig anderes erkannt werden kann, das sonst gar nicht erkennbar ist“. Es können dadurch „völlig neue Lösungen“ entwickelt werden. Durch die Methode kann auf abstrakter Ebene „die Funktion bewusst gemacht werden“ und dies wird als wichtig erachtet. Diese abstrakte Betrachtung ist „sehr gut“. Es wird dadurch „nicht immer gleich in Bauteilen, Rippen, Radien und Gussteilen gedacht“. Die Methode wird von den Anwendern auf jeden Fall weitergenutzt.
Lösungsgenerierung auf Strukturebene	Es konnten Leichtbau-Lösungen auf Strukturebene gefunden werden, die aber nicht weiter detailliert wurden. Darüber hinaus konnten die Entwicklung von leichtbaugerechten Strukturen und ein besseres Verständnis für die Lasteinleitung, Kraftverteilung und Kraftverläufe unterstützt werden. Auf abstrakter Ebene können mithilfe der Methode bereits Kraftverläufe erkannt werden.
Leichtbau-Methoden-Baukasten	Die Methoden sind konsistent und vollständig. Vor allem die Qualität der Leichtbau-Lösungen kann durch die „nicht bauteilfokussierte Herangehensweise“ gesteigert werden. Es wurde eine „hohe Qualitätssteigerung der Leichtbauansätze / -lösungen erreicht“. Die Methoden können die durchgängige Berücksichtigung von Leichtbau in der Konzeptphase unterstützen. Wobei die Funktionsmassenanalyse dabei den „Einstieg in die Leichtbau-Lösungsentwicklung darstellt“. Durch die Methode konnte die Produktmasse gesenkt werden. Das Potenzial der entwickelten Lösungen ist „groß“, diese müssen noch weiter ausgearbeitet werden, um sagen zu können, wie viel Masse genau reduziert werden konnte. Durch die Anwendung der Methoden können leichtbaugerechtere Produkte entwickelt werden und daraus ist eine Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit der Produkte zu erwarten. Dies hängt jedoch von weiteren Anforderungen des Produkts ab. Die Methoden machen die Ergebnisse nachvollziehbar und auch unerfahrene Entwickler können zu „100 % unterstützt“ werden. Auch bei Konzepten mit weniger Freiheiten und einem geringeren Freiraum bei der Lösungssuche können die Methoden bei der Lösungssuche unterstützen.
Allgemeines Feedback	Es sind keine leichtbauspezifischen Methoden bekannt, die zu ähnlichen Ergebnissen geführt hätten. Die Leichtbau-Denkwerkzeuge auf Struktur- und Gestaltenebene werden „in Zukunft auf jeden Fall weitergenutzt, da diese besonders nützlich sind“. Diese sind daher „sehr geeignet“, da in den meisten Fällen eine bestehende Konstruktion zu verändern ist und nicht von einem „weißen Blatt Papier“ gestartet wird. Es bestehen keine Wünsche nach einer darüber hinausgehenden Unterstützung. „Diese Methoden sind nicht nur für das Projektteam, sondern für die gesamte Abteilung interessant und sollten möglichst allen vorgestellt und gezeigt werden“. Auch die weiteren Methoden-Module sind interessant. Alle Erwartungen an das Projekt und die Methodenanwendung wurden „vollständig erfüllt“.

**Tabelle 6.3:** Evaluationsergebnisse durch die Anwender von Daimler Trucks

### 6.2.3 Diskussion der Ergebnisse

Die Evaluation bei Daimler Trucks ergab positive Ergebnisse. Die einzige Einschränkung ist, dass die Funktionsmassenanalyse für den vorliegenden Fall als nicht „einhundertprozentig passend“ erachtet wurde. Dies lag aber zum einen daran, dass aus zeitlichen Gründen an der Anwendung dieses Methoden-Moduls leider nicht alle Personen des Projekts beteiligt waren, zum anderen daran, dass im zweiten Projektabschnitt auch die Auswahl der weiter zu betrachtenden Baugruppe auf der Analyse mittels der Leichtbau-Denkwerkzeuge und der Entscheidung von Daimler Trucks basierte. Die Auswahl der Baugruppe durch Daimler Trucks war damit begründet, dass diese Baugruppe nach eigenen Angaben noch nicht intensiv betrachtet wurde. Somit wurden nicht die Funktionen und Baugruppen weiterentwickelt, die das größte Leichtbaupotenzial entsprechend der Funktionsmassenanalyse aufwiesen. Dadurch wurde im Projekt die Durchgängigkeit der methodischen Unterstützung an diesem Punkt verfälscht. Außerdem war die Anwendung der Methode aufgrund der unterschiedlichen Kunden des Produkts erschwert. Dabei war die Schwierigkeit, einen Kunden zu identifizieren, der den häufigsten Nutzungsfall abbildet und der somit als Basisfall genutzt werden kann. Eine Betrachtung mehrerer Varianten für unterschiedliche Kunden konnte im Umfang des Projekts nicht durchgeführt werden, würde jedoch einen nächsten Schritt darstellen. Die Vorteile einer systematischen Analyse von Anforderungen, Funktionen, deren Wichtigkeit und der dafür aufgewendeten Masse, und dem daraus resultierenden Grundverständnis für die Zusammenhänge dieser Aspekte sowie für die Leichtbaupotenziale wurden von den Anwendern bestätigt.

Die Methoden-Module zur Entwicklung von Leichtbau-Strukturen und zur Entwicklung von Leichtbau-Lösungen auf Gestalteebene wurden angewendet und als zweckmäßig erachtet. Dabei lag der Schwerpunkt auf der Entwicklung von Leichtbau-Lösungen auf Gestalteebene. Dieses Methoden-Modul wurde als „besonders hilfreich“ eingeschätzt, und es konnten damit zahlreiche qualitativ hochwertige Leichtbau-Lösungen entwickelt werden. Die Anwender planen dieses Methoden-Modul weiterzuverwenden.

Darüber hinaus wurde der Methoden-Baukasten als hilfreich, vollständig und konsistent für die durchgängige Berücksichtigung von Leichtbau und die Entwicklung von nachvollziehbaren sowie neuen Leichtbau-Lösungen bereits in der Konzeptphase bewertet. Alle Erwartungen an das Projekt und die Methodenanwendung wurden vollständig erfüllt. Von den Anwendern werden eine weitere Kooperation zur Erlernung und Erprobung der weiteren Methoden-Module und eine Ausbreitung dieses Wissens auf weitere

Kollegen ihrer Abteilung gewünscht und vorgeschlagen. Nach Diskussion aller Ergebnisse mit dem Abteilungsleiter bewertete auch dieser die Ergebnisse als „sehr gut“ und leitete eine Erfindungsmeldung bezüglich der Ergebnisse ein. Außerdem wurde eine zweitägige Schulung beauftragt und durchgeführt, bei der auch die weiteren Methoden-Module dem Projektteam sowie weiteren Mitarbeitern vorgestellt und in Übungen gelehrt wurden. Aufgrund des Feedbacks und der mehrfachen Weiterbeauftragung wird die Methoden-Evaluation in diesem Projekt bei Daimler Trucks als sehr erfolgreich bewertet.

### **6.3 Anwendung bei der HEDELIUS Maschinenfabrik GmbH**

Die HEDELIUS Maschinenfabrik GmbH ist ein mittelständisches Unternehmen, dessen Kernkompetenz in der Serienfertigung von Bearbeitungszentren liegt. Diese Bearbeitungszentren sind mit einem Schutzgehäuse und einer Schutztür verschlossen, um den Maschinenbediener vor Schmutz, Lärm, Spänen, sich lösenden Werkstücken oder Werkstückbruchteilen zu schützen. Die meistverkaufte Lösung dieser Schutztür wird manuell bedient. Das Gewicht der Schutztür hat dabei direkten Einfluss auf die Ermüdung des Maschinenbedieners sowie die Zeit, die dieser für das Öffnen und Schließen benötigt und die nicht direkt zur Wertschöpfung beiträgt. HEDELIUS beauftragte das Fraunhofer Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA) daher damit, Leichtbau-Lösungen für diese Schutztür zu entwickeln. Ein Entwicklungsteam der Abteilung Leichtbautechnologien des IPA entwickelte zunächst Lösungen, diese Schutztür leichter zu gestalten, ohne dabei spezielle Leichtbau-Methodik einzusetzen. Das Team des IPA wollte jedoch noch weitere Lösungen entwickeln. Daher wurde ein Projekt gestartet, in dem zwei Entwicklungsingenieure des IPA unter Moderation des Autors der vorliegenden Arbeit und mittels des in Kapitel 5 vorgestellten Methoden-Baukastens weitere Leichtbau-Lösungen systematisch entwickelten. In diesem Projekt fanden sowohl die Funktionsmassenanalyse als auch die Methoden-Module zur Entwicklung von Leichtbau-Lösungen auf Funktions- und Gestaltebene Anwendung. Das Methoden-Modul der Lösungsgenerierung auf Wirkebene wurde nur teilweise genutzt. Dies wird nachfolgend noch näher diskutiert. Die Methoden wurden auf das aktuelle Produkt angewendet, welches weiterentwickelt werden sollte. Die entwickelten Ergebnisse wurden vom Fraunhofer IPA dem Kunden HEDELIUS vorgestellt.

### **6.3.1 Anwendung und Evaluation des Baukastens und der Methoden-Module**

Zunächst wurde die Schutztür mittels der Funktionsmassenanalyse mit dem Ziel analysiert, die Masse der Tür um 50 % zu reduzieren. Dabei wurden vor allem die Funktion der „Abtrennung des Innenraums zum Außenraum“ als auch die Funktion zur „Ermöglichung der Sicht in den Bearbeitungsraum“ als zu schwer im Verhältnis zu deren Beitrag zur Kundenanforderungserfüllung erachtet. Darauf aufbauend wurden Leichtbau-Lösungen auf Funktionsebene vor allem für diese beiden Funktionen gesucht. Die Idee, eine Kamera im Innenraum der Maschine anzubringen, anstatt die Funktion Sicht in den Bearbeitungsraum in Form eines Fensters in der Tür zu ermöglichen, wurde entwickelt. Diese Kamera könnte dann ein Bild zum einen auf das ohnehin vorhandene Display zur Maschinenbedienung und zum anderen zur Onlineüberwachung senden. Für die beiden als kritisch identifizierten Funktionen wurden auch Leichtbau-Lösungen auf Wirkebene gesucht. Dabei entstand beispielsweise die Idee, statt einer verschiebbaren Tür einen feststehenden Lamellenvorhang zu entwickeln. Dieser muss nicht vom Maschinenbediener verschoben werden, sondern der Maschinenbediener muss nur durch diesen hindurchgreifen. Das Methoden-Modul der Entwicklung von Leichtbau-Lösungen auf Wirkebene wurde nicht vollständig angewendet. Deshalb wird hierzu auch kein Feedback aufgeführt. Auf Gestaltebene wurde das gesamte Methoden-Modul der Leichtbau-Denkwerkzeuge eingesetzt. Dabei sind weitere Leichtbau-Lösungen entstanden, wie beispielsweise verschiedenste Werkstoffsubstitutionen oder das Entfernen von unnötigen Elementen, die nicht unmittelbar zur geforderten Funktion beitragen. Hierbei konnten Bauteilbereiche mit geringem Krafftfluss durch Abdeckungen aus leichten Werkstoffen, wie beispielsweise Kunststoffen, ersetzt werden.

Es wurden folglich aus der Anwendung des Methoden-Baukastens viele Lösungen entwickelt, die der HEDELIUS Maschinenfabrik GmbH vorgestellt wurden. HEDELIUS wählte aus diesen Lösungen die Idee, das Fenster durch ein größeres zu ersetzen, für die Weiterentwicklung des Projekts aus. Dadurch konnte ein großer Anteil der Türfläche, die durch eine doppelte Blechwand realisiert wird, ersetzt werden. Dies führte zu einer Massenreduktion von ca. 36 % bei annähernder Kostenneutralität und geringem konstruktivem Aufwand [POSNER15A].

### **6.3.2 Feedback der Anwender**

Die beiden Mitarbeiter des Fraunhofer IPA, die die Methoden angewendet, die Ergebnisse HEDELIUS vorgestellt und mit HEDELIUS diskutiert haben, beantworteten den

Evaluationsfragebogen. Das Feedback dieser Anwender ist in Tabelle 6.4 zusammengefasst und den Methoden-Modulen, dem Methoden-Baukasten oder einem allgemeinen Feedback zur gesamten Methodik zugeordnet. Die Zusammenfassung wurde ebenfalls durch die Methodenanwender geprüft und freigegeben.

Methoden-Modul	Evaluationsergebnis
Funktionsmassenanalyse	Die angewendete Methode konnte bei der Analyse von Anforderungen, Funktionen, deren Wichtigkeit und der dafür aufgewendeten Massen unterstützen. Das Vorgehen der Leichtbau-Entwicklung wurde durch die Methode „wesentlich strukturierter“. Die Methodenanwender erhalten durch die Methode „die Sicherheit, dass keine wichtigen Aspekte vergessen wurden“. Es werden alle Aspekte systematisch betrachtet und „es wird nicht nur nach Bauchgefühl vorgegangen“. Dies hilft bei der „Fokussierung auf das Wesentliche“ und beim „Setzen der Schwerpunkte“. Die Massenziele unterstützen die frühe Berücksichtigung von Masse im Produktentwicklungsprozess. Durch die Methode entstand „eine Art Massen-Budget für jedes Bauteil“. Vor diesem Projekt wurden bereits Projekte durchgeführt, bei denen versucht wurde, „jedes Bauteil leichter zu machen, am Ende war jedoch das Gesamtprodukt zu schwer“. Der Unterschied zwischen Ist- und Soll-Massen der Methode ist ein „Warnsignal“. Die Methode stellt eine gute Visualisierung der aufgebrachten Massen und der Wichtigkeit der Funktionen dar. Diese Visualisierung ist nützlich, um diese dem Kunden zu kommunizieren. Die bildliche Visualisierung ist „klarer“ als eine textuelle Erklärung. Es wurden auch Lösungen für die identifizierten Schwerpunkte gefunden, wie z. B. ein Kamerasystem als Alternative zum Fenster. Eine Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit des Produkts ist durch die Methodenanwendung zu erwarten. Die Kosten der Lösungen müssen selbstverständlich noch geprüft werden. Oft ist es jedoch schwer, „neue Ideen umzusetzen und den Kunden von diesen zu überzeugen“.
Lösungsgenerierung auf Funktionsebene	Die Methode konnte bei der Variation der Funktionsstruktur unterstützen, weil die Leichtbauideen vor der Anwendung der Methode ausschließlich darauf beschränkt waren, das Material zu hinterfragen. Konzeptionelle Änderungen wurden vor der Methodenanwendung nicht entwickelt. Auf Funktionsebene können mithilfe der Methode alle Elemente des Modells hinterfragt werden, um dadurch neue Ideen zu entwickeln. Ohne diesen Schritt „wird grundlegend die alte Lösung beibehalten“. Es wurden durch die Methode neue und auch „ganz andere Lösungen“ gefunden. Die entwickelten Ideen, wie beispielsweise das Kamerasystem, scheinen „visionär“. Diese Idee bietet beispielsweise auch in Hinblick auf die Industrie 4.0 Potenzial und Neuheitsgrad.
Lösungsgenerierung auf Gestalt-ebene	Die Methode konnte bei der Variation der Gestalt unterstützen. Das Vorgehen wurde vor allem durch die systematische Betrachtung „aller Möglichkeiten strukturierter und sicherer“. Es wurden auch auf dieser Ebene neue Lösungen gefunden, die bei der vorherigen Lösungssuche ohne Methodenunterstützung nicht gefunden wurden. Ein Beispiel hierfür sind Kunststoffabdeckungen ähnlich derer, die am Kraftfahrzeug in niedriger belasteten Bereichen eingesetzt werden. Diese Lösungen führten zu einem leichteren Produkt. Es wird angenommen, dass die Wettbewerbsfähigkeit des Produkts durch die Methodenanwendung gesteigert werden konnte. Vor allem durch die Kombination verschiedener gefundener Lösungen konnte die Wettbewerbsfähigkeit des Produkts durch die Methodenanwendung gesteigert werden. Dies ist auf Gestalt-ebene „leichter abzuschätzen“, da diese Lösungen „konkreter“ sind als auf Funktionsebene.
Leichtbau-Methoden-Baukasten	Es konnte ein leichtbaugerechteres Produkt durch die Anwendung der Methoden erreicht werden. Die Ergebnisse wurden durch die Methoden besser nachvollziehbar. Gerade unerfahrene Entwickler können unterstützt werden, „da diese gar nicht wissen, wo sie ansetzen oder eben auch zielführend ansetzen sollen“. Die Methoden können aber auch zu „völlig neuen Lösungen anregen“.
Allgemeines Feedback	Es sind keine Methoden bekannt, die zu vergleichbaren Lösungen geführt hätten. Es sind ausschließlich die „herkömmlichen Konstruktionsmethoden“, aber keine

	<p>anderen vergleichbaren Leichtbau-Methoden bekannt. Auch zukünftig wird die Vorgehensweise bei ähnlichen Problemen angewendet werden. Die Funktionsmassenanalyse ist „sehr wichtig“, da „erkennbar wird, was die Funktionen dem Kunden nutzen, was es an Gewicht kostet und andersherum betrachtet, darf eine wichtige Funktion auch ein gewisses Gewicht besitzen und auch das wird durch die Methode ersichtlich“. Beispielsweise sind die Gegengewichte eines Krans für die Funktion wichtig, durch die Methode wird „erkennbar“, dass diese auch ein bestimmtes Gewicht besitzen dürfen. Die Funktionsmassenanalyse, die Methode zur Variation auf Funktionsebene und die Leichtbau-Denkwerkzeuge werden zukünftig weiterhin angewendet. Jedoch sind die Leichtbau-Denkwerkzeuge ohne Moderator eventuell „schwerer anwendbar“. Die Methoden helfen, um Schritte, die „normalerweise durch Bauchgefühl gemacht werden“, strukturieren und dokumentieren zu können. Außerdem ist die Analyse und Variation der Funktionsstruktur „sehr wichtig“, um neue Ideen zu entwickeln. „Ohne diese Methode ist es schwer, wirklich neue Ideen zu generieren“. Ohne Moderation der Methoden ist die Anwendung „schwierig“, dabei könnten vielleicht eine Checkliste oder weitere Beispiele helfen, um diese auch ohne Moderation anwenden zu können. Das Aufstellen einer neuen Funktionsstruktur ist „schwierig“. Das Variieren von bestehenden Funktionsstrukturen ist hingegen „einfacher“.</p>
--	---

**Tabelle 6.4:** Evaluationsergebnisse durch die Anwender des Fraunhofer IPA

### 6.3.3 Diskussion der Ergebnisse des Projekts

Auch die Evaluation mit HEDELIUS und dem Fraunhofer IPA ergab positive Ergebnisse. Dabei wird besonders der Charakter des Strukturierens durch methodisches Vorgehen und das systematische Entwickeln sowie Betrachten einer möglichst vollständigen Lösungsvielfalt und den wirklich neuen daraus resultierenden Lösungen als sehr wichtig erachtet. Die Funktionsmassenanalyse und auch die Lösungsentwicklung auf Funktionsebene wurden in diesem Projekt, verglichen mit dem Projekt bei Daimler Trucks, als besonderer Mehrwert hervorgehoben. Dies ist ein Indiz dafür, dass abhängig vom Projekt mit den unterschiedlichen Methoden-Modulen auch unterschiedliche Schwerpunkte adressiert werden können. Als weiterer positiver Aspekt der Funktionsmassenanalyse wurde bewertet, dass das Ergebnis der Methode nicht darauf hinweist, dass die Masse aller Bauteile um einen festen Prozentsatz reduziert werden soll. Vielmehr wird durch die Methode deutlich, dass die Masse immer in Zusammenhang mit dem Beitrag zur Kundenanforderungserfüllung und der Funktionserfüllung zu betrachten ist. Insbesondere auf Funktionsebene wurden Lösungen entwickelt, die von den Methoden-Anwendern als besonders neu eingeschätzt wurden. Diese neuen Ideen wurden jedoch auch vom Kunden HEDELIUS als zu revolutionär erachtet und daher nicht umgesetzt, obwohl diese Lösung eine Fernüberwachung des Prozesses beispielsweise im Rahmen der Industrie 4.0 ermöglichen oder unterstützen würde. Dies ist ein Indiz dafür, dass durch diese Methoden auch neue Lösungen entwickelt werden können. Ob das jeweilige Unternehmen diese dann auch umzusetzen wagt, muss danach jedoch geprüft werden. Auch auf Gestaltebene konnten Lösungen entwickelt

werden. Beispielsweise konnte die Scheibe vergrößert und damit die Fläche reduziert werden, die als doppelte Blechwand ausgeführt wurde. Dadurch konnte die Tür wesentlich leichter ausgeführt werden. Diese Lösung wurde von HEDELIUS umgesetzt. Die Ideen auf Gestaltebene sind aufgrund der geringeren Freiheitsgrade auf dieser Ebene im Vergleich zur Funktionsebene meist mit geringeren Änderungen verbunden und dadurch nach Aussage von HEDELIUS auch einfacher dem Kunden zu kommunizieren.

Von den Methodenanwendern wurde die Sorge geäußert, dass eine Anwendung der Methoden ohne Moderator eventuell schwierig sein könnte und dass Checklisten oder weitere Beispiele dabei helfen könnten. Diese Vorgehensweisen und Checklisten wurden in Kapitel 5 bereits vorgestellt. Diese Inhalte wurden den Anwendern im Projekt jedoch nur so ausführlich erklärt, wie dies für die Anwendung notwendig war. Da ein Moderator vor Ort war, bestand keine Notwendigkeit diese ausführlichen Informationen noch ergänzend zur Verfügung zu stellen. Diese wurden beispielsweise im Rahmen des VDI-Leichtbau-Seminars umfangreich erprobt. Insbesondere das Aufstellen von Funktionsstrukturen stellt den Anwender vor Herausforderungen. Möglicherweise ist dies auch ein Grund dafür, dass die Funktionsstruktur im Gegensatz zu anderen Methoden nur beschränkten Einzug in die Industrie gehalten hat. Da jedoch Funktionsstrukturen für in der Praxis gängige Methoden, wie beispielsweise die Wertanalyse, die Basis darstellen, wird dies im Rahmen dieser Arbeit auch als Grundlage vorausgesetzt. Die geäußerten Bedenken zeigen jedoch auf, dass die verständliche und anwenderfreundliche Beschreibung der Methoden eine wichtige Grundlage für die weitere Anwendung der Methoden darstellt.

Als wesentliches Fazit ist hervorzuheben, dass die Anwendung der Methoden zum beabsichtigten Ziel der Massenreduktion des Produkts beigetragen hat und auch die Anwender die Methoden ausnahmslos wieder verwenden wollen. Die Evaluation in diesem Projekt wird daher als erfolgreich bewertet.

#### **6.4 Anwendung bei der ANDREAS STIHL AG & Co. KG**

Die ANDREAS STIHL AG & Co. KG ist Weltmarktführer bei Motorsägen und Hersteller von innovativen motorgetriebenen Geräten [STIHL15]. Im Rahmen zweier studentischer Arbeiten, die bei der ANDREAS STIHL AG & Co. KG durchgeführt wurden, konnten einige Elemente des Methoden-Baukastens aus Kapitel 5 durch Studenten in Zusammenarbeit mit Mitarbeitern der ANDREAS STIHL AG & Co. KG angewendet

werden. Die erste studentische Arbeit in Abteilung A beschäftigte sich dabei mit der Neuentwicklung eines Geräts [HONOLD14]. Im Rahmen der zweiten Arbeit in Abteilung B wurde eine bestehende Baugruppe analysiert, um diese anschließend weiterzuentwickeln und leichter zu gestalten [WEBER15]. Die Anwendung der Methoden wurde im Gegensatz zu den anderen Evaluationsprojekten ausschließlich durch die Studierenden oder Mitarbeiter des Unternehmens durchgeführt. Dabei nutzten die studentischen Autoren in Diskussionen und kleineren Workshops die Mitarbeit verschiedener Entwickler der jeweiligen Abteilung.

#### **6.4.1 Anwendung und Evaluation des Baukastens und der Methoden-Module im Rahmen einer studentischen Arbeit in Abteilung A**

Bei der Gerätereueentwicklung wurde sowohl die Funktionsmassenanalyse als auch die Leichtbau-Ideengenerierung auf Funktionsebene genutzt. Die Funktionsmassenanalyse wurde dabei auf ein Produkt angewendet, das dem zu entwickelnden Produkt ähnlich ist, um die Entwicklung eines umfassenden Produktverständnisses zu unterstützen und Leichtbaupotenziale zu identifizieren. Mittels der gezielten Variation der Funktionsstruktur, wie in Kapitel 5.4 vorgestellt, konnten dann zahlreiche Leichtbau-Konzepte entwickelt werden.

Die Funktionsmassenanalyse konnte den Anwender bei der Entwicklung eines Grundverständnisses bezüglich der Kundennutzen-, Funktions- und Massenzusammenhänge im Produkt unterstützen. Es konnten darauf aufbauend durch die Lösungssuche auf der abstrakten Ebene der Funktionsstrukturen viele völlig neue Lösungen gefunden werden. Die Methoden werden als flexibel anwendbar empfunden und mussten für die Anwendung nicht weiter angepasst werden. Der Anwender stellte fest, dass die Ansätze der Methoden in seine Denkweise übergingen. Auch nach Abschluss der Anwendung der Methode hinterfragte er weiterhin Bauteile und Funktionen bezüglich deren Kundennutzen und deren verursachten Masse. Es sind durch die Methodenanwendung Leichtbau-Konzepte mit erheblichen Masseneinsparungen entstanden, die weiterverfolgt werden. [HONOLD14]

#### **6.4.2 Anwendung und Evaluation des Baukastens und der Methoden-Module im Rahmen einer studentischen Arbeit in Abteilung B**

Bei der Analyse und Weiterentwicklung einer Baugruppe eines handgeführten Geräts wurden die Funktionsmassenanalyse und die Funktionsmasseneinschätzung sowie die Methoden-Module zur Lösungsentwicklung auf Funktions-, Wirk- und Gestaltebene

angewendet. Die Methoden wurden durch den Studenten teilweise mit Unterstützung durch zwei weitere Entwickler oder durch Mitarbeiter des Marketings, bei der Bewertung der Anforderungen aus Kundensicht, unterstützt. Auch in diesem Projekt zeigte sich, dass die systematische Vorgehensweise der Funktionsmassenanalyse die Entwicklung des Produktverständnisses und die Strukturierung der Arbeitsergebnisse unterstützt. Des Weiteren konnte die Funktionsmassenanalyse bei der Analyse von Anforderungen, Funktionen, deren Wichtigkeit und die für deren Erfüllung aufgewendete Masse helfen. Es zeigte sich außerdem, dass die Funktionsmasseneinschätzung den Vergleich und das Herausarbeiten von Unterschieden verschiedener Produktvarianten, die damit in diesem Projekt ausführlich analysiert wurden, verbessert. Trotz des subjektiven Einflusses der verschiedenen Anwender der Funktionsmassenanalyse und Funktionsmasseneinschätzung führten die Abweichungen in der Einschätzung nicht zu wesentlichen Unterschieden in den Ergebnissen der Methoden. Mithilfe der Methoden konnte die Ausrichtung des Produkts auf den Kundennutzen verbessert werden. Insgesamt wurde die Funktionsmassenanalyse als hilfreich für die Leichtbau-Produktentwicklung bewertet. Darüber hinaus konnte mit den Methoden-Modulen auf Funktions-, Wirk- und Gestaltebene eine Lösungsvielfalt entwickelt und die Nachvollziehbarkeit der Lösungssuche verbessert werden. Auch der Anwender in diesem Projekt will die Methoden weiterhin verwenden. [WEBER15]

## **6.5 Anwendung im Rahmen des VDI-Leichtbau-Industrieseminars**

Aufbauend auf dem Methoden-Baukasten zum leichtbaugerechten Konzipieren wurde ein Seminar zur „systematischen Leichtbau-Produktentwicklung“ erarbeitet, siehe Posner et al. [POSNER14D]. Dieses Seminar wird entweder zwei- oder dreitägig über den Verein Deutscher Ingenieure e. V. angeboten. Wichtigster Bestandteil ist der in dieser Arbeit vorgestellte Methoden-Baukasten, der zunächst im Seminar präsentiert und dann in vier Übungen weiter vertieft wird. Dabei bekommen die Seminarteilnehmer alle Methoden-Module aufgezeigt und wenden dann vier Methoden-Module in Übungen selbst an. Die Seminarteilnehmer können sich dabei in ca. 6 Arbeitsstunden intensiv mit den Methoden beschäftigen. Dementsprechend aussagekräftig ist auch deren Feedback einzuordnen. Dabei ist jedoch zu beachten, dass die Anwendungsfälle in den Übungen zwar fiktiv, jedoch realitätsnah gehalten sind. Dies wird unter anderem dadurch erreicht, dass Übungen basierend auf der Nachstellung anderer realer Industrieevaluationsprojekte erstellt wurden. Ein Übungsbeispiel ist eine Tür einer

Straßenbahn, die mittels der Leichtbau-Denkwerkzeuge bezüglich Leichtbauaspekten verbessert werden muss. Dieses Beispiel ist an das Evaluationsprojekt bei der HEDELIUS Maschinenfabrik GmbH angelehnt. Einzige Ausnahme stellt das Beispiel der Funktionsmassenanalyse dar, da der Anwendungsaufwand eines komplexen Produkts für eine einzelne Übung zu umfangreich wäre.

Die Schwerpunkte der Übungen des Leichtbau-Seminars liegen auf jeweils einer Übung zur Funktionsmassenanalyse und einer zur Entwicklung von Leichtbau-Lösungen auf Funktionsebene. Den weiteren Schwerpunkt stellt die Entwicklung von Leichtbau-Lösungen mithilfe der Leichtbau-Denkwerkzeuge dar. Die Leichtbau-Denkwerkzeuge werden im Seminar mit jeweils einer Übung auf Struktur- und auf Gestaltebene vertieft.

### **6.5.1 Anwendung und Evaluation des Baukastens und der Methoden-Module**

Im Seminar werden den Teilnehmern zunächst alle Methoden-Module ausführlich vorgestellt. Dazu werden Beispiele eingesetzt, um das Verständnis der Methoden-Anwendung zu unterstützen. Die Funktionsmassenanalyse wird moderiert durch den Autor dieser Arbeit und durch die Teilnehmer anhand einer Fahrradluftpumpe angewendet, siehe Abschnitt 5.2. Die Entwicklung von Leichtbau-Lösungen auf Funktionsstrukturebene wird am Beispiel eines Saughäckslers durch die Seminarteilnehmer erprobt, siehe Abschnitt 5.4. Die Leichtbau-Denkwerkzeuge werden zur Entwicklung einer kraftflussgerechteren und damit leichtbaugerechteren Tragstruktur eines Portalhubwagens genutzt. Außerdem werden die Leichtbau-Denkwerkzeuge auf Gestaltebene zur Entwicklung von Leichtbau-Lösungen und einer leichtbaugerechteren Gestalt für eine Straßenbahntür eingesetzt. Dabei konnten die Seminarteilnehmer mithilfe der Methoden-Module zahlreiche Lösungskonzepte entwickeln.

### **6.5.2 Feedback der Anwender**

Aufbauend auf der Vorstellung der Methoden-Module und den dazugehörigen Übungen wurden die Seminarteilnehmer unter Verwendung des Evaluationsfragebogens (siehe Anhang A.2) zu den Methoden-Modulen und dem Methoden-Baukasten befragt. Außerdem wurde nach ergänzendem Feedback gefragt. Im ersten Durchlauf des Leichtbau-Seminars wendeten vier Teilnehmer, im zweiten Durchlauf elf Teilnehmer die Methoden an. Das Feedback dieser Anwender ist, bis auf das fehlende Feedback eines Anwenders, in Tabelle 6.5 zusammengefasst.

Methoden-Modul	Evaluationsergebnis
Funktionsmassenanalyse	Die angewendete Methode konnte bei der Analyse von Anforderungen, Funktionen, deren Wichtigkeit und der dafür aufgewendeten Masse unterstützen. Diese Aspekte werden durch die Anwendung der Methode „eindeutiger verständlich“. Die Methode zeigt einen „interessanten, objektiven Bezug“ zwischen Masse und Anforderungen auf. Durch den Fokus auf die benötigten Funktionen, die einfache Anwendbarkeit, die Übersichtlichkeit, die Transparenz und den resultierenden abstrahierten Überblick ist die Methode „besonders hilfreich“. Die Methode kann vor allem bei der Betrachtung ganzer Systeme unterstützen. Die Methode ist „einfach und effektiv“. Die Methode wurde über das Seminar hinaus von einem Teilnehmer auf den Anwendungsfall von Fahrzeugantriebssträngen angewendet. Für solche komplexen Produkte muss die Analyse auf die Betrachtungsebene von Baugruppen vereinfacht werden. Obwohl die Methode „einfach“ ist, ist die Anwendung auf Antriebsstränge „nicht ganz trivial“. Die Methode kann dabei unterstützen herauszufinden, wo Einsparpotenzial vorhanden ist oder gesucht werden muss. Die Methode hilft, das gesamte Leichtbaupotenzial des Produkts auszuschöpfen. Die Methode ist „sehr gut“ geeignet, um aufzuzeigen, wo Gewicht einzusparen ist. Sie stellt ein „gutes Werkzeug“ dar und wird im nächsten Projekt angewendet werden.
Lösungsgenerierung auf Funktionsebene	Es wurden durch diese Methode neue Leichtbau-Lösungen gefunden, wie beispielsweise ein externer Akku oder ein kabelgebundenes System. Es war „sehr hilfreich“, die Schritte der Funktionsanalyse vor der Funktionsmassenanalyse anzuwenden, weil dies die Reduktion der Komplexität durch die Systematisierung der Funktionen in Blöcken erlaubt. Durch die Methode konnten neue Lösungen erarbeitet werden, wie am Beispiel des Saughäckslers den Akku separat als Rucksack zu verwenden, das Saugrohr separat zu handhaben oder ein netzbetriebenes Gerät mit Kabel zu entwickeln. Sowohl die Integration bzw. das Zusammenfassen als auch die Auslagerung von Funktionen kann betrachtet werden. Durch die Variation wurden neue Lösungen entwickelt.
Lösungsgenerierung auf Wirkungsebene	Die Methode kann die Variation der Wirkprinzipien und -strukturen unterstützen. Sie kann zum Erlebnis einer „völlig neuen Sichtweise auf bekannte Strukturen“ führen. Für einfache Beispiele ist die Methode „sehr interessant“. Wobei sie auch „nicht banale Lösungen“ aufzeigen kann. Die Methode ist hilfreich, da sie die „intensive Auseinandersetzung“ mit Wirkstrukturen fördert, obwohl sie „abstrakt“ ist.
Lösungsgenerierung auf Gestaltungsebene	Die Variation der Gestalt konnte unterstützt werden. Durch diese Methode konnten einige Elemente weggelassen werden. Es wurden neue Leichtbau-Lösungen gefunden, wie z. B. eine Blechkonstruktion, eine schaumverstärkte Konstruktion, das Entfernen einer Rahmenstruktur, das Ausschäumen von Elementen, das Clinchen als Alternative zum Verschrauben, eine Scheibe direkt auf Schaum zu kleben, das Substituieren von Werkstoffen. Diese Methode „erschien effektiv“. Es war „interessant“, diese Methode am Beispiel auszuprobieren, um aufzuzeigen, dass es auch in diesem Fall „funktioniert“. Die Methode erschien „teilweise abstrakt“, sie wird jedoch im nächsten Projekt angewendet, die Unterstützung war am Beispiel „bedingt gegeben“. Die Methode hilft beim Hinterfragen von Lösungen und „motiviert“, zukünftig bei Baugruppen o. ä. zu hinterfragen, ob Wirkflächen nicht reduziert werden können (Bauteilintegration).
Lösungsgenerierung auf Strukturebene	Das mittels der Methode entwickelte Modell bzw. die entwickelte Struktur und die Ergebnisse der FEM bzw. Topologieoptimierung waren „aufschlussreich“ und lieferten ähnliche Ergebnisse. Durch die Methode konnte die Entwicklung einer leichtbaugerechteren Struktur unterstützt werden, da durch die Druckstäbe und Zugseile Biegebelastungen vermieden wurden. Die Effektivität der Methode war „überraschend“. Dieses Modul ist „extrem nützlich“, um eine „schnelle Abschätzung für eine Gestalt zu machen“. Die Methode bietet ein „einfaches Denkschema“ und ist „schnell anwendbar“. Die Methode ist „hilfreich“, allerdings ist sie für komplexe Strukturen „wahrscheinlich schwer umzusetzen“, da sie „zeitintensiv“ ist. In der Übung wurden „schnelle und deutliche Erkenntnisse und Lösungsansätze“ generiert. Die Denkwerkzeuge stellen „einfache Hilfsmittel zur effektiven Erstellung einer Leichtbau-Struktur“ dar. Dieses Methoden-Modul war „besonders interessant“ und wird weiterhin angewendet. „Intuitiv“ können bei

	einfachen Strukturen vergleichbare Lösungen entstehen, jedoch „fehlt dabei die Methode und ohne Methode entstehen nur Zufallsprodukte“.
Funktionsmas- seneinschätzung	Es können Rückschlüsse und Informationen über die Masse einzelner Lösungsmöglichkeiten gewonnen werden. Die Vorgehensweise „schienschlüssig“, dies muss jedoch in der Praxis noch getestet werden. Dieses Methoden-Modul war „effektiv, einfach zu verstehen, abstrakt und hochinteressant“. Die Definition der Funktionsstruktur bleibt aufgrund ihrer großen Subjektivität ein entscheidender Schritt der Analyse. Das Modul unterstützt „einfach und schnell“ eine Abschätzung der zu erwartenden Masse bei „wahrscheinlich überschaubarem Aufwand“. Das Balkendiagramm veranschaulicht gut die Zusammensetzung der Massen. Die Methode ist gut, um einen Überblick zu bekommen. Es ist „definitiv möglich Rückschlüsse über die Masse einzelner Lösungsmöglichkeiten zu gewinnen“.
Leichtbau- Methoden- Baukasten	<p>Die Methoden erscheinen konsistent und vollständig. Dies müsste jedoch in der Praxis noch getestet werden. Die Anzahl und Qualität der Leichtbau-Lösungen kann durch die Anwendung der Methoden „sehr gut gesteigert“ werden und es kann die durchgängige Berücksichtigung von Leichtbau in der Konzeptphase unterstützt werden. Die Methoden „decken neue Ideen auf“. Sie stellen „gute Hilfsmittel und Werkzeuge“ dar. Einzelne Lösungsvorschläge erscheinen jedoch „zu trivial“, oft werden diese durch „K. O. Anforderungen“ sofort ausgeschlossen. Außerdem können und müssen die einzelnen Methoden auch angepasst und mit anderen Werkzeugen kombiniert werden, wenn komplexere Produkte entwickelt werden müssen. Intuition bleibt jedoch ein entscheidender Faktor bei den Verbesserungen.</p> <p>Die Methoden machen die Ergebnisse besser nachvollziehbar und unerfahrene Entwickler können, eine Methodenschulung vorausgesetzt, „mit Sicherheit unterstützt“ werden. Die Beispiele können als „Leitbild“ dienen. Die Methoden benötigen jedoch immer noch „großes Wissen und Expertise“ bezüglich des Produkts und der Leichtbau-Produktentwicklung.</p> <p>Die Dokumentation entsteht durch das Durchführen der Methoden und die Ergebnisse werden reproduzierbar. Durch die Nachvollziehbarkeit der Methoden kann auch gegenüber anderen Entwicklern oder dem Kunden „besser argumentiert“ werden. Die Methoden sind „sehr gut strukturiert und leicht zu verstehen“. Es war „einfach, die Zusammenhänge zwischen den Methoden zu erkennen“. Die Methoden „scheinen großes Potenzial zu haben“. Daten von Wettbewerbern nutzen zu können und diese in den Produktentwicklungsprozess systematisch integrieren zu können, ist „sehr gut“.</p> <p>Durch die Methode unterstützt, können leichtbaugerechte Produkte entwickelt werden. Bei entsprechendem Anwendungsfall kann durch das leichtbaugerechtere Produkt durch die Methodenanwendung die Wettbewerbsfähigkeit der Produkte gesteigert werden</p>
Allgemeines Feedback	<p>Es sind keine leichtbauspezifischen Methoden bekannt, die zu ähnlichen Ergebnissen geführt hätten.</p> <p>Alle Methoden-Module werden von allen Anwendern mit einer Ausnahme zukünftig je nach Schwerpunkt und zeitlichem Rahmen eingesetzt und weiterverwendet. Ein Teilnehmer hat bereits einzelne Methoden für seine Arbeit genutzt und plant diese und weitere Methoden-Module zukünftig einzusetzen. Die Methoden des Methoden-Baukastens werden als „gut“ bis „sehr gut“ bewertet. Die Methoden sind „sehr hilfreich für neue Denkansätze“.</p> <p>Selbst wenn die Methode nicht zu neuen, besseren oder umfangreicheren Ideen führen würde, unterstützt sie die Dokumentierbarkeit und Plausibilisierung gegenüber dem Kunden. Auch die Plausibilitätsprüfung von Topologieoptimierungsergebnissen kann durch die Methode unterstützt werden.</p> <p>Eine Unterstützung bei Problemen bei der zukünftigen Anwendung der Methoden wird gewünscht.</p>

**Tabelle 6.5:** Evaluationsergebnisse durch die Anwender des Leichtbau-Seminars

### **6.5.3 Diskussion der Ergebnisse des Projekts**

Die Vorstellung, Diskussion und Anwendung des Methoden-Baukastens innerhalb des Leichtbau-Seminars ergab entsprechend den anderen Anwendungsprojekten ebenfalls ein positives Evaluationsergebnis. Vor allem zeigte sich jedoch der Mehrwert der Methoden darin, dass alle Teilnehmer in den Übungen die Methoden anwenden und damit zahlreiche Leichtbau-Lösungen entwickeln konnten. Die Teilnehmer waren sich bis auf eine Ausnahme außerdem darin einig, dass sie verschiedene Methoden-Module in ihrer alltäglichen Entwicklungsarbeit einsetzen wollen. Dabei wurden die Funktionsmassenanalyse und die Leichtbau-Denkwerkzeuge besonders hervorgehoben und es wurde betont, dass die Teilnehmer planen, vor allem diese Methoden-Module in Zukunft einzusetzen. Dies kann daran liegen, dass der Schwerpunkt der Übungen eben auf diesen beiden Methoden-Modulen lag.

Während der Vorstellung und Anwendung der Methoden-Module wurden zahlreiche Fragen gestellt, die die Methoden und deren Anwendung in der Tiefe so detailliert hinterfragten, dass dies zeigt, dass die Methoden-Module und deren Anwendung von den meisten Seminarteilnehmer verstanden wurden.

Auch die kritischen Anmerkungen deckten sich mit den vorherigen Evaluationsprojekten. Vor allem der teilweise größere Aufwand bei der Anwendung einzelner Methoden-Module wurde von einigen Teilnehmern kritisch angemerkt. Außerdem wurden einzelne Methoden als theoretisch kritisiert. Bei dieser Kritik wurde eine Evaluation in der Industrie gefordert. Diese Evaluation wurde mit den Projekten in den Abschnitten 6.2, 6.3 und 6.4 für die meisten Methoden-Module durchgeführt, wie bereits in Abschnitt 6.1 diskutiert.

Vor der Durchführung des Leichtbau-Industrieseminars in Kooperation mit dem Verein Deutscher Ingenieure wurde zuvor ein Probedurchgang des Seminars mit fünf Studierenden als Seminarteilnehmer durchgeführt. Auch diese bewerteten die Methoden durchweg positiv und setzen sich das Ziel, diese bei gegebenen Anlässen selbst zu nutzen und anzuwenden.

## **6.6 Zusammenfassung und Fazit der Evaluation**

Der Methoden-Baukasten zum leichtbaugerechten Konzipieren wurde in verschiedenen Industrieprojekten und in einem Leichtbau-Seminar erprobt. Dabei wurden einige Methoden-Module von Entwicklern in Projekten von Daimler Trucks und HEDELIUS an realen Produkten angewendet. Des Weiteren wurden Methoden-Module von Studenten

teilweise in Zusammenarbeit mit Entwicklern aus der Industrie auf Produkte von STIHL angewendet. Außerdem haben 15 Entwickler aus der Industrie im Leichtbau-Seminar intensiv an fiktiven Beispielen einige Methoden-Module selbständig angewendet.

Basierend auf diesen Evaluationsprojekten wurde vor allem der Aufwand der Anwendung der Methoden von einigen Entwicklern kritisch angemerkt. Außerdem wurde im Leichtbau-Seminar angemerkt, dass die Methoden theoretisch wären. Damit wurde die Praxistauglichkeit in Frage gestellt. Diese Kritik wurde in den Projekten, in denen die Anwendung auf Produkte in der Praxis erprobt wurde, nicht aufgeführt.

Positiv zeigt sich aus der Evaluation, dass beinahe alle Entwickler, die an der Evaluation teilnahmen, die Methoden-Module weiterhin einsetzen wollen. In den Projekten, in denen die Methoden-Module auf Produkte aus der Praxis angewendet worden sind, wurden in allen Fällen Lösungen entwickelt, die als „sehr gut“ bewertet wurden. Vor allem im Projekt in Kooperation mit Daimler Trucks äußerten sich die Entwickler überzeugt davon, dass die Methoden die Leichtbau-Entwicklung unterstützen können. Dies wurde dadurch belegt, dass sowohl eine zweite Beauftragung und Durchführung der Methoden-Anwendung auf eine weitere Baugruppe als auch die Beauftragung und Durchführung eines Inhouseseminars dem zuerst beauftragten Projekt folgten.

Aus der Evaluation lässt sich außerdem Potenzial für die Weiterentwicklung der Methoden-Module vor allem in der Reduktion des Aufwands der Methoden-Anwendung und der noch umfassenderen Erprobung der Methoden in der Praxis ableiten. Es wurden bereits weitere Projekte durch Mitarbeiter des Instituts für Konstruktionstechnik und Technisches Design, in denen der Methoden-Baukasten als Dienstleistung für Industriepartner angewendet wurde, durchgeführt. Außerdem wird auch zukünftig Feedback aus dem jährlich angebotenen Leichtbau-Seminar aufgenommen. Vor allem aber ist es das Ziel, zusätzliche Anwendungsbeispiele aus diesen Projekten zu generieren, die die Anwendbarkeit und den Nutzen der Methoden-Module belegen. Leider unterliegen diese Entwicklungsergebnisse aus den Industrieprojekten der Geheimhaltung und können damit nur eingeschränkt für diesen Zweck genutzt werden.

Aus den Evaluationsergebnissen lässt sich schließen, dass die Anforderungen aus Tabelle 4.1 und Tabelle 6.1 durch den entwickelten Methoden-Baukasten erfüllt werden. Ausschließlich die Anforderungen A 6 und A 10, die sich auf die weniger umfangreich evaluierten Methoden-Module der Wirkebene und der Funktionsmasseneinschätzung beziehen, konnten nicht vollständig evaluiert werden.

Die Support Evaluation konnte zur Entwicklung aller Methoden-Module erfolgreich eingesetzt werden. Die Application Evaluation mit der Frage nach der Anwendbarkeit des Methoden-Baukastens und der gewünschten Beeinflussung der Schlüsselfaktoren, wie in Tabelle 6.2 beschrieben, ist erfüllt. Dies führte auch dazu, dass die Success Evaluation für den Methoden-Baukasten mit Ausnahme dieser beiden Methoden-Module als erfüllt angesehen wird. Vor allem die positiven Ergebnisse aus den Industrieprojekten mit Daimler Trucks und HEDELIUS führen dazu, dass die Frage der Success Evaluation nach der erfolgreichen Beeinflussung der Situation und Vorgehensweise durch den Methoden-Baukasten als erfüllt bewertet wird.

Die Forschungsfrage konnte mit dem Methoden-Baukasten beantwortet, die Erfüllung der Anforderungen und Ziele mit der Evaluation bestätigt sowie die Hypothese belegt werden. Es wurde eine Methodik zur Unterstützung von Konstrukteuren bei der systematischen Entwicklung von Leichtbau-Produkten in der Konzeptphase und damit das nutzbar Machen des großen Leichtbaupotenzials dieser Phase entwickelt.

## 7 Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurde ein Methoden-Baukasten erarbeitet, um Leichtbaupotenziale zu analysieren und bereits in der Konzeptphase Leichtbau-Lösungen zu entwickeln.

Aus der Leichtbau-Produktentwicklung sind verschiedene Leichtbau-Strategien bekannt, wie z. B. der Werkstoffleichtbau. Durch eine Zuordnung dieser Strategien zum generischen Produktentwicklungsprozess nach Pahl et al. [PAHL07] ergeben sich Lücken in der Methodik der Leichtbau-Produktentwicklung. Leichtbau wird in der von verschiedenen Autoren als wesentlich hervorgehobenen Konzeptphase [HAUCK06, S. 2 f.; KLEIN13, S. 10 f.; SCHMIDT01, S. 21 ff.] kaum methodisch unterstützt.

Der in der vorliegenden Arbeit entwickelte Methoden-Baukasten zum leichtbaugerechten Konzipieren schließt diese Lücke. Dieser kann durch seinen modularen Aufbau den unterschiedlichen Schwerpunkten der unternehmens- und projektspezifischen Produktentwicklungsprozesse angepasst werden.

Die Funktionsmassenanalyse stellt das erste Methoden-Modul des Methoden-Baukastens dar. Mit ihr kann der Konstrukteur systematisch ein umfassendes Grundverständnis für die Funktionszusammenhänge und die im Produkt verbauten Massen entwickeln. Dabei werden zum einen die Wichtigkeit der Funktionen für die Erfüllung der Kundenanforderungen analysiert und zum anderen die Massen untersucht, die für die Umsetzung der Funktionen aufgebracht werden. Daraus lassen sich Massenziele sowie Leichtbaupotenziale ableiten. Anschließend wird mit dem resultierenden Wissen das Produkt auf das für den Kunde Wesentliche reduziert.

Um die identifizierten Leichtbau-Potenziale auszuschöpfen, müssen Leichtbau-Lösungen gefunden werden. Die vorliegende Arbeit setzt dabei den Fokus auf alle Abstraktionsebenen der Konzeptphase, d. h. Funktions-, Wirk- und Gestaltebene. Die für die Erarbeitung dieser Lösungen entstandenen Methoden-Module basieren auf Grundsätzen zur systematischen Leichtbau-Lösungsentwicklung, diese wurden aufgestellt. Die Idee dieser Grundsätze ist es, zunächst den Informationsgehalt des Modells zu analysieren, das in der jeweiligen Abstraktionsebene der Lösungsbeschreibung eingesetzt wird. Ein Beispiel eines solchen Modells ist die Funktionsstruktur. Danach werden die Variationsmöglichkeiten erweitert. Dies geschieht basierend auf dem Ansatz, den das Contact & Channel - Model [ALBERS03] zur Lösungsvariation vorschlägt. Daraufhin werden die Variationsmöglichkeiten überprüft, ob sie für die Entwicklung

einer Leichtbau-Lösung zweckmäßig sind. Dies ist beispielsweise der Fall, wenn sie das Umsetzen einer bestimmten Leichtbau-Strategie begünstigen. Um aus der entstandenen Lösungsvielfalt diejenigen mit einem größeren Leichtbaupotenzial auszuwählen, wird in der vorliegenden Arbeit ein zielführendes Vorgehen präsentiert. Die resultierenden Methoden werden in den sogenannten Funktions-, Wirk- und Gestalt-Leichtbau-Modulen beschrieben.

Besonders auf Gestaltebene ist es wichtig, Lösungen abstrahieren zu können, um sich nicht auf diese zu fixieren. Das Gestalt-Leichtbau-Modul, welches auch als Leichtbau-Denkwerkzeuge bezeichnet wird, unterstützt dies. Außerdem umfasst dieses Methoden-Modul eine schrittweise Variation und eine vollständige, systematische Entwicklung von Leichtbau-Lösungen.

Aus der Erweiterung der Leichtbau-Denkwerkzeuge unter Nutzung der bionischen Methoden von Mattheck [MATTHECK10] entstand das Struktur-Leichtbau-Modul. Dieses hilft Konstrukteuren bereits ab der abstrakten Ebene der Wirkstruktur bei der Entwicklung von Strukturen unter Leichtbauaspekten. Die einfachen Regeln des Modells können bereits auf abstraktem Niveau für die Leichtbau-Strukturentwicklung angewendet werden. Die Regeln nach Mattheck [MATTHECK10] wurden dabei beispielsweise zur Berücksichtigung von Bauraumbeschränkungen und bewegten Bauteilen ergänzt.

Eine Herausforderung des Leichtbaus beim Konzipieren ist es außerdem, dass die Masse von verschiedenen Funktionsstrukturen, Wirkprinzipien und Wirkstrukturen erst nach Festlegung des Volumens jedes Bauteils sowie des Werkstoffs bzw. dessen Dichte bekannt ist. Die Funktionsmasseneinschätzung, als weiteres Methoden-Modul, dient der Abschätzung des Leichtbau-Potenzials verschiedener Lösungen auf dem abstrakten Niveau der Funktions- und Wirkebene. Dazu werden systematisch Lösungen in Teillösungen zerlegt sowie andere Produkte mit teilweise ähnlicher Umsetzung dieser Teillösung analysiert. Basierend darauf kann eine Aussage über das Leichtbaupotenzial der abstrakten Lösungen getroffen und diese bezüglich Leichtbaukriterien ausgewählt werden.

Der Methoden-Baukasten wurde in verschiedenen Industrieprojekten angewendet. Die resultierenden Evaluationsergebnisse waren ausnahmslos positiv. Als besonderer Vorteil zeigte sich, dass die Methoden-Module ohne weitere Softwareimplementierung mit einfachen Hilfsmitteln und in moderierten Workshops mit Entwicklern angewendet wurden. Dadurch konnten systematisch Leichtbau-Lösungen mittels des Methoden-Baukastens entwickelt werden.

## 8 Ausblick

Die Evaluation ergab, dass das Wirk-Leichtbau-Modul und das Funktionsmasseneinschätzungs-Modul trotz der umfangreichen Evaluation des Methoden-Baukastens noch nicht umfassend evaluiert werden konnten. Diese Methoden-Module wurden in den durchgeführten Evaluationsprojekten zu wenig umfangreich angewendet, da andere Methoden-Module unter den jeweils vorherrschenden Rahmenbedingungen zweckmäßiger eingesetzt werden konnten. Eine Erprobung dieser Module stellt damit ein weitergehendes Untersuchungspotenzial dar.

Das Gestalt-Leichtbau-Modul bzw. die Leichtbau-Denkwerkzeuge beinhalten die Beschreibung von Leichtbau-Prinzipien mittels des Contact & Channel - Model. Da diese Prinzipien zum Teil anwendungsspezifisch sind und Unternehmen auch eigene für sich definiert haben, wurden nur beispielhaft einige Prinzipien in dieser Arbeit beschrieben. Zusätzliche Prinzipien müssen daher für den jeweiligen Anwendungsfall mit dem Modell beschrieben und in die Vorgehensweise aufgenommen werden. Die Durchführung anschließender Forschungsarbeiten wäre hierfür zweckmäßig.

Die Forschungsarbeiten von Mattheck [MATTHECK10] wurden ergänzt. Die Funktionalität dieser Erweiterung wurde innerhalb dieser Arbeit anhand von Beispielberechnungen mittels der Finite-Elemente-Methode und Topologieoptimierungssoftware aufgezeigt. Die rechnerische Validierung dieser Ansätze wie auch die Anwendung dieser Ansätze auf komplexere Problemstellungen, wie beispielsweise dreidimensionale Probleme und komplexere Wirkflächen, stellen ein zusätzliches Forschungspotenzial dar. Posner et al. [POSNER15B] zeigen hieran anknüpfende Ansätze auf. Außerdem kann die Gültigkeit sowie eine eventuelle Erweiterung der Methode für Problemstellungen mit hochdynamischen Bewegungen und Einflüssen untersucht werden. Dabei sollten auch die Einbindung sowie der Einsatz von softwareunterstützten Finite-Elemente-Berechnungen, Topologieoptimierung und Mehrkörpersimulation im Produktentwicklungsprozess vertieft werden. Dies schafft außerdem den Übergang zur Feingestaltung, die unter anderem die Querschnittsbestimmung der Strukturelemente umfasst.

Letztlich könnte die Erweiterung der Methoden-Module als Basis für die Betrachtung von Multi-Material-Design oder von fasergerechtem Konstruieren untersucht werden.



## Literaturverzeichnis

- ACHLEITNER12 ACHLEITNER, T.: *Weiterentwicklung der Wertanalyse Gewicht*. Stuttgart, Universität Stuttgart, Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design, Bachelorarbeit, 2012.
- ALBERS03 ALBERS, A., MATTHIESEN, S.; OHMER, M.: An innovative new basic model in design methodology for analysis and synthesis of technical systems. In: NORELL, M.; ANDERSSON, S.; JOHANNESSON, H. (Hrsg.): *Proceedings of the 14th International Conference on Engineering Design (ICED'03)*, Stockholm, 2003, S. 147-148.
- ALBERS05 ALBERS, A., BURKARDT, N., OHMER, M.: Approaches for the synthesis of technical systems within the Contact & Channel Model. In: SAMUEL, A.; LEWIS, W. (Hrsg.): *Proceedings of the 15th International Conference on Engineering Design (ICED'05)*, Melbourne, 2005, S. 1-11.
- ALBERS09 ALBERS, A.; BRAUN, A.; CLARKSON, P. J.; ENKLER, H.-G.; WYNN, D. C.: Contact and Channel Modeling to Support Early Design of Technical Systems. In: NORELL, M.; GRIMHEDEN, M.; LEIFER, L. SKOGSTAD, P.; LINDEMANN, U. (Hrsg.): *Proceedings of the 17th International Conference on Engineering Design (ICED'09)*, Stanford, 2009, S. 61-72.
- ALBERS11A ALBERS, A.; BRAUN, A.: Der Prozess der Produktentwicklung. In: HENNING, F.; MOELLER, E. (Hrsg.): *Handbuch-Leichtbau - Methoden, Werkstoffe, Fertigung*. München, Wien: Carl Hanser Verlag, 2011, S. 1-31.
- ALBERS11B ALBERS, A.; MAJIC, N.; SCHMID, A.: Virtuelle Produktentwicklung. In: HENNING, F.; MOELLER, E. (Hrsg.): *Handbuch-Leichtbau – Methoden, Werkstoffe, Fertigung*. München, Wien: Carl Hanser Verlag, 2011, S. 77-114.
- ALBERS11C ALBERS, A.; BURKARDT, N.: Systemleichtbau – ganzheitliche Gewichtsreduzierung. In: HENNING, F.; MOELLER, E. (Hrsg.): *Handbuch-Leichtbau – Methoden, Werkstoffe, Fertigung*. München, Wien: Carl Hanser Verlag, 2011, S. 115-132.
- ALBERS13 ALBERS, A.; WAGNER, D.; RUCKPAUL, A.; BURKARDT, N.; MATTHIESEN, S.: Target Weighing – A new approach for conceptual lightweight design in early phases of complex systems development. In: LINDEMANN, U.; VENKATARAMAN, S.; KIM, Y. S.; LEE, S. W. (Hrsg.): *Proceedings of the 19th International Conference on Engineering Design (ICED'13)*, Seoul, 2013, S. 301-310.
- ALBERS14 ALBERS, A.; WINTERGERST, E.: The Contact and Channel Approach (C&C<sup>2</sup>-A): relating a system's physical structure to its functionality. In: CHAKRABARTI, A.; BLESSING, L. T. M.: *An Anthology of Theories and Models of Design*. London: Springer, 2014, S. 151-171.

- ALBERS15A ALBERS, A.; MATGROS, K.; BEHRENDT, M.; JETZINGER, H.: Das Pull-Prinzip der Validierung - Ein Referenzmodell zur effizienten Integration von Validierungsaktivitäten in der Produktentstehungsprozess. In: *Konstruktion* (06-2015), S. 74-81.
- ALBERS15B ALBERS, A.; BURSAC, N.; WINTERGERST, E.: Produktgenerationsentwicklung – Bedeutung und Herausforderungen aus einer entwicklungsmethodischen Perspektive. In: Binz, H. ; Bertsche, B. ; Bauer, W. ; Roth, D. (Hrsg.): *Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung 2015*. Stuttgart, 2015, S. 1-10.
- ALBERS16 ALBERS, A.; REISS, N.; BURSAC, N.; RICHTER, T.: iPeM - integrated Product engineering Model in context of Product Generation Engineering. In: Wang, L.: *Procedia 26th CIRP Design Conference*. Stockholm: Elsevier, 2016, S. 1-6.
- ALINK10 ALINK, T.: *Bedeutung, Darstellung und Formulierung von Funktion für das Lösen von Gestaltungsproblemen mit dem C&C-Ansatz*, Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie, Dissertation, 2010.
- ALLIANZ09 ALLIANZ GLOBAL INVESTORS: *Megatrend: Knappe Ressourcen, 6. Auflage*. [http://www.lebensart.at/images/doku/20120313\\_megatrend\\_knapperessourcen.pdf](http://www.lebensart.at/images/doku/20120313_megatrend_knapperessourcen.pdf), 2010. Aktualisierungsdatum: 10.09.2015.
- ASHBY05 ASHBY, M.: *Material selection in mechanical design*. Amsterdam: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005.
- BIRKHOFFER80 BIRKHOFFER, H.: Analyse und Synthese der Funktionen technischer Produkte. In: VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (Hrsg.): *Fortschrittberichte der VDI Zeitschriften, Reihe 1, Nr. 70*. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1980.
- BLESSING09 BLESSING, L.; CHAKRABARTI, A.: *DRM, a Design Research Methodology*. Dordrecht: Springer-Verlag, 2009.
- BRODERICK92 BRODERICK, R.: The application of value analysis to some Ariane 5 launcher sub-systems. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G, Journal of Aerospace Engineering* (1992), Nr. 206, S. 63-70.
- CLAUSSEN98 CLAUSSEN, U.; RODENACKER, W. G.: *Maschinensystematik und Konstruktionsmethodik*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 1998.
- DAIMLER15 DAIMLER AG: <http://www.daimler.com/unternehmen/geschaeftsfelder/daimler-trucks>. Aktualisierungsdatum: 15.09.2015.
- DASSAULT15 DASSAULT SYSTEMS: Tosca. <http://www.3ds.com/products-services/simulia/>. Aktualisierungsdatum: 06.09.2015.
- DEGISCHER09 DEGISCHER, H. P., LÜFTL, S. (Hrsg.): *Leichtbau, Prinzipien, Werkstoffauswahl und Fertigungsvarianten*. Weinheim: Wiley-VCH-Verlag, 2009.
- DIN EN 12973 2002 DIN EN 12973: *Value Management*. Berlin: Beuth-Verlag, 2002.
- DIN EN 1325 1996 DIN EN 1325: *Value Management, Wertanalyse, Funktionenanalyse - Wörterbuch*. Berlin: Beuth, 1996.

- DIN 1305 1988      DIN 1305: *Masse, Wägewert, Kraft, Gewichtskraft, Gewicht, Last*. Berlin: Beuth, 1988.
- DIN 69910 1987      DIN 69910: *Wertanalyse*. Berlin: Beuth, 1987.
- DRECHSLER07      DRECHSLER, K.: Leichtbau - Entwicklung, Bedeutung und Disziplinen. In: Universität Stuttgart: *Leichtbau, Themenheft Forschung* (2007), Nr. 3, S. 70-82.
- EHRENSPIEL13      EHRENSPIEL, K.; MEERKAMM, H.: *Integrierte Produktentwicklung – Denkläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit, 5. Auflage*. München, Wien: Carl Hanser Verlag, 2013.
- ELLENRIEDER13      ELLENRIEDER, G.; GÄNSICKE, T.; GOEDE, M.; HERRMANN, G.: Die Leichtbau-Strategien. In: FRIEDRICH, H. E. (Hrsg.): *Leichtbau in der Fahrzeugtechnik*. Wiesbaden: Springer-Vieweg, 2013, S. 43-118.
- FAZ15      FRANKFURTER ALLGEMEINE ZEITUNG: Eine Million Elektroautos bis 2020 - Merkel hält an Absatzziel fest.  
<http://www.faz.net/aktuell/wirtschaft/wirtschaftspolitik/eine-million-elektroautos-bis-2020-merkel-haelt-an-absatzziel-fest-12196498.html>. Aktualisierungsdatum: 27.05.2013.
- FELDHUSEN13A      FELDHUSEN, J.; GROTE, K.-H.: Der Produktentwicklungsprozess (PEP). In: FELDHUSEN, J.; GROTE, K.-H. (Hrsg.): *Pahl / Beitz – Konstruktionslehre – Methoden und Anwendungen erfolgreicher Produktentwicklung, 8. Auflage*. Berlin, Heidelberg: Springer-Vieweg-Verlag, 2013, S. 11-24.
- FELDHUSEN13B      FELDHUSEN, J.; GROTE, K.-H.: Produktplanung. In: FELDHUSEN, J.; GROTE, K.-H. (Hrsg.): *Pahl / Beitz – Konstruktionslehre – Methoden und Anwendungen erfolgreicher Produktentwicklung, 8. Auflage*. Berlin, Heidelberg: Springer-Vieweg-Verlag, 2013, S. 292-319.
- FELDHUSEN13C      FELDHUSEN, J.; GROTE, K.-H. (Hrsg.): *Pahl / Beitz – Konstruktionslehre – Methoden und Anwendungen erfolgreicher Produktentwicklung, 8. Auflage*. Berlin, Heidelberg: Springer-Vieweg-Verlag, 2013.
- FEYERABEND91      FEYERABEND, F.: *Wertanalyse Gewicht – Methodische Gewichtsreduzierung - am Beispiel von Industrierobotern*. In: VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (Hrsg.): *Fortschrittberichte der VDI Zeitschriften, Reihe 1, Nr. 201*. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1991.
- FISCHER08      FISCHER, J. O.: *Kostenbewusstes Konstruieren*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2008.
- FREY11      FREY, B.: *Nutzung des Contact & Channel – Model für das leichtbaugerechte Konstruieren*. Stuttgart, Universität Stuttgart, Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design, Bachelorarbeit, 2011.
- FRIEDRICH13A      FRIEDRICH, H. E. (Hrsg.): *Leichtbau in der Fahrzeugtechnik*. Wiesbaden: Springer-Vieweg, 2013.
- FRIEDRICH13B      FRIEDRICH, H. E., KRISHNAMOORTHY, S. K.: Leichtbau als Treiber von Innovationen. In: Friedrich, H. E. (Hrsg.): *Leichtbau in der Fahrzeugtechnik*. Wiesbaden: Springer-Vieweg, 2013, S. 1-30.

- GÄNSICKE15 GÄNSICKE, T.; SANDIANO, J. F.: Systematische Bewertung von Leichtbaupotenzialen in der Fahrzeugentwicklung. In: *Light-weight-Design* (2015), Nr. 2, S. 42-46.
- GAUSEMEIER13 GAUSEMEIER, J.: *Strategische Planung und integrative Entwicklung der technischen Systeme von morgen*. Paderborn: Schöningh, 2014.
- GUMPINGER09 GUMPINGER, T.; JONAS, H.; KRAUSE, D.: New approach for light-weight design: From differential design to integration of function. In: NORELL, M.; GRIMHEDEN, M.; LEIFER, L. SKOGSTAD, P.; LINDEMANN, U. (Hrsg.): *Proceedings of the 17th International Conference on Engineering Design (ICED'09)*, Stanford, 2009, S. 201-210.
- HALDENWANGER97 HALDENWANGER, H. G.: *Zum Einsatz alternativer Werkstoffe und Verfahren im konzeptionellen Leichtbau von PKW-Rohkarosserien*. Dresden, Technische Universität Dresden, Dissertation, 1997.
- HAUCK06 HAUCK, C.: Beitrag zur methodischen, rechnergestützten Konzeption und Prinziplösungsmodellierung flächiger Leichtbaukomponenten. In: VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (Hrsg.): *Fortschrittberichte der VDI Zeitschriften, Reihe 1, Nr. 393*. Düsseldorf: VDI-Verlag, 2006.
- HEIN94 HEIN, L.: Design Methodology in Practice. In: *Journal of Engineering Design* 5 (1994), Nr. 2, S. 145-163.
- HELLER13 HELLER, J. E.; GÜNTHER, B.; FELDHUSEN, J.: Das Dilemma der Morphologischen Analyse - Ansätze zur effizienten Lösungskombination. In: BRÖKEL, K., FELDHUSEN, J., GROTE, K.-H., RIEG, F., STELZER, R. (Hrsg.): *11. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik 2013*. Aachen: Shaker-Verlag, 2013, S. 153-168.
- HENNING11 HENNING, F.; MOELLER, E. (Hrsg.): *Handbuch-Leichtbau – Methoden, Werkstoffe, Fertigung*. München, Wien: Carl Hanser Verlag, 2011.
- HOFFMANN12 HOFFMANN, K.: *Untersuchung der Möglichkeiten und Potenziale für leichtbaugerechte Funktions- und Wirkstrukturen*. Stuttgart, Universität Stuttgart, Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design, Bachelorarbeit, 2012.
- HÖHNE83 HÖHNE, G.: *Struktursynthese und Variationstechnik beim Konstruieren*. Ilmenau, Technische Hochschule Ilmenau, 1983.
- HOLT09 HOLT, R.; BARNES, C.: Towards an integrated approach to „Design for X“: an agenda for decision-based DfX research. In: *Research in Engineering Design*, Nr. 21, 2009, S. 123-136.
- HONOLD14 HONOLD, C.: *Entwicklung einer innovativen Baumsäge*. Stuttgart, Universität Stuttgart, Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design, Masterarbeit, 2014.
- HUANG96 HUANG, G. Q.: Introduction. In: Huang, G. Q. (Hrsg.): *Design for X: concurrent engineering imperatives*. London: Chapman & Hall, 1996, S. 1-17.

- KLEIN07 KLEIN, B.: *Leichtbau-Konstruktion, Berechnungsgrundlagen und Gestaltung, 7. Auflage*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner-Verlag, 2007.
- KLEIN13 KLEIN, B.: *Leichtbau-Konstruktion, Berechnungsgrundlagen und Gestaltung, 10. Auflage*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner-Verlag, 2013.
- KLEIN14 KLEIN, D.; WITZGALL, C., WARTZACK, S.: A novel approach for the evaluation of composite suitability of lightweight structures at early design stages. In: ANDREASEN, M. M.; BIRKHOFFER, H.; LINDEMANN, U.; CULLEY, S.; MARJANOVIC, D. (Hrsg.): *12th International Design Conference 2012 (DESIGN 2012)*. Dubrovnik, 2012, S. 1071-1080.
- KOECKERLING03 KÖCKERLING, M.: *Methodische Entwicklung und Optimierung der Wirkstruktur mechatronischer Produkte*. Paderborn, Universität Paderborn, 2003.
- KOLLER98 KOLLER, R.: *Konstruktionslehre für den Maschinenbau - Grundlagen zur Neu- und Weiterentwicklung technischer Produkte mit Beispielen, 4. Auflage*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 1998.
- KOPP11 KOPP, G., BURKARDT, N.; MAJIC, N.: Leichtbau-Strategien und Bauweisen. In: HENNING, F.; MOELLER, E. (Hrsg.): *Handbuch-Leichtbau – Methoden, Werkstoffe, Fertigung*. München, Wien: Carl Hanser Verlag, 2011, S. 57-76.
- KRAUSE07 KRAUSE, F. L.; FRANKE, H. J.; GAUSEMEIER, J.: *Innovationspotenziale in der Produktentwicklung*. München: Carl Hanser Verlag, 2007.
- LEMBURG09 LEMBURG, J. P.: *Methodik der schrittweisen Gestaltsynthese*. Aachen, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule, Dissertation, 2009.
- LEYER70 LEYER, A.: *Wesen und Wert des Leichtbaues*. Basel, Stuttgart: Birkhäuser-Verlag, 1970.
- LINDEMANN09 LINDEMANN, U.: *Methodische Entwicklung technischer Produkte, Methoden flexibel und situationsgerecht anwenden, 3. Auflage*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2009.
- LUEDEKE12A LUEDEKE, T.; VIELHABER, M.: Lightweight mechatronic design: An integrated approach. In: ANDREASEN, M. M.; BIRKHOFFER, H.; LINDEMANN, U.; CULLEY, S.; MARJANOVIC, D. (Hrsg.): *12th International Design Conference 2012 (DESIGN 2012)*. Dubrovnik, 2012, S. 999-1008.
- LUEDEKE12B LUEDEKE, T.; VIELHABER, M.: Towards a Process Model for the Development of Light, Mechatronic Products. In: KYVSGAARD HANSEN, P.; RASMUSSEN, J.; JÖRGENSEN, K.; TOLLESTRUP, C. (Hrsg.): *Proceedings of Norddesign 2012*. Aalborg, 2012, S. 394-401.

- LUEDKE14A LUEDEKE, T.; BONERTZ, R.; VIELHABER, M.: Gewichtsoptimierung in den frühen Phasen der Entwicklung - Anforderungen, Funktionen, Wirkprinzipien. In: BRÖKEL, K.; FELDHUSEN, J.; GROTE, K.-H., RIEG, F.; STELZER, R.: *12. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik 2014*. Bayreuth, 2014, S. 407-416.
- LUEDKE14B LUEDEKE, T.; VIELHABER, M.: Weight Optimization Approach for Conceptual Design – Requirements, Functions, Working Principles. In: LAAKSO, M.; EKMAN, K. (Hrsg.): *Proceedings of NordDesign 2014*. Aalto, 2014, S. 805-814.
- MATTHECK06 MATTHECK, C.: *Verborgene Gestaltungsgesetze der Natur - Optimalformen ohne Computer, 1. Auflage*. Karlsruhe: Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, 2006.
- MATTHECK10 MATTHECK, C.: *Denkwerkzeuge nach der Natur*. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie - Campus Nord, 2010.
- MATTHECK11 MATTHECK, C.: *Thinking Tools after Nature*. Karlsruhe: Karlsruhe Institute of Technology, 2011.
- MATTHIESEN02 MATTHIESEN, S.: *Ein Beitrag zur Basisdefinition des Elementmodells "Wirkflächenpaare & Leitstützstrukturen" zum Zusammenhang von Funktion und Gestalt technischer Systeme*. Karlsruhe, Technische Universität Karlsruhe, 2002.
- MATTHIESEN11 MATTHIESEN, S.: Seven years of product development in industry – experiences and requirements for supporting engineering design with 'Thinking Tools'. In: CULLEY, S. J.; HICKS, B. J.; MCALOONE, T. C.; HOWARD, T. J.; CLARKSON J. (Hrsg.): *Proceedings of the 18<sup>th</sup> International Conference on Engineering Design (ICED'11)*, Kopenhagen, 2011, S. 1-10.
- MATTHIESEN12 MATTHIESEN, S.; RUCKPAUL, A.: New insights on the Contact & Channel-Approach – Modelling of systems with several logical states. In: ANDREASEN, M. M.; BIRKHOFFER, H.; LINDEMANN, U.; CULLEY, S.; MARJANOVIC, D. (Hrsg.): *12th International Design Conference 2012 (DESIGN 2012)*. Dubrovnik, 2012, S. 1-10.
- MAXWELL1869 MAXWELL, C.: *Scientific Papers II*. Cambridge: Cambridge University Press, 1869, S. 175.
- MEERKAMM05 MEERKAMM, H.; KOCH, M.: Design for X. In: CLARKSON, J.; ECKERT, C.: *Design process improvement*. London: Springer, 2005, S. 306-363.
- MEERKAMM94 MEERKAMM, H.: Design for X – A Core Area of Design Methodology. In: *Journal of Engineering Design* 5, Nr. 2, Carfax, 1994, S. 145-163.
- MICHELL1904 MICHELL, A. G. M.: The limits of economy of material in frame structures. In: *Philosophical Magazine Series* 6, Nr. 8, 1904, S. 589-597.
- NIEMANN05 NIEMANN, G.; WINTER, H.; HÖHN, B.-R.: *Maschinenelemente*. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 2005.
- NPE14 NATIONALE PLATTFORM ELEKTROMOBILITÄT: Fortschrittsbericht 2014 - Bilanz der Marktvorbereitung. Berlin: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, 2014.

- OHMER08 OHMER, M.: *Ein Beitrag zur Synthese technischer Systeme auf Basis des Contact & Channel Model C&CM*. Karlsruhe, Technische Universität Karlsruhe, Dissertation, 2008.
- OTTNAD09 OTTNAD, J.: *Topologieoptimierung von Bauteilen in dynamischen und geregelten Systemen*, Karlsruhe, Technische Universität Karlsruhe, Dissertation, 2009.
- PAHL07 PAHL, G.; BEITZ, W.; FELDHUSEN, J.; GROTE, K.-H.: *Pahl / Beitz - Konstruktionslehre - Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung, 7. Auflage*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2007.
- PAHL13 PAHL, G.; BEITZ, W.; FELDHUSEN, J.; GROTE, K.-H.: Erstellung eines Konzepts für das Produkt. In: FELDHUSEN, J.; GROTE, K.-H. (Hrsg.): *Pahl / Beitz – Konstruktionslehre – Methoden und Anwendungen erfolgreicher Produktentwicklung, 8. Auflage*. Berlin, Heidelberg: Springer-Vieweg-Verlag, 2013, S. 341-380.
- PONN08 PONN, J.; LINDEMANN, U.: *Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte – Optimierte Produkte – systematisch von Anforderungen zu Konzepten*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2008.
- PONN11 PONN, J. & LINDEMANN, U.: *Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte – Systematisch von Anforderungen zu Konzepten und Gestaltlösungen, 2. Auflage*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2011.
- POSNER10 POSNER, B.: *Analyse und Weiterentwicklung einer Methode zum funktions- und massegerechten Konzipieren und Entwerfen*. Stuttgart, Universität Stuttgart, Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design, Diplomarbeit, 2010.
- POSNER12A POSNER, B. ; KELLER, A. ; BINZ, H. ; ROTH, D.: Holistic lightweight design for function and mass: A framework for the Function Mass Analysis. In: ANDREASEN, M. M.; BIRKHOFFER, H.; LINDEMANN, U.; CULLEY, S.; MARJANOVIC, D. (Hrsg.): *12th International Design Conference 2012 (DESIGN 2012)*. Dubrovnik, 2012, S. 1071-1080.
- POSNER12B POSNER, B. ; KELLER, A. ; BINZ, H. ; ROTH, D.: Anforderungen an eine Methode zum leichtbaugerechten Konstruieren. In: STELZER, R.; GROTE, K.-H.; BRÖKEL, K.; RIEG, F.; FELDHUSEN, J. (Hrsg.): *Entwerfen Entwickeln Erleben – Methoden und Werkzeuge in der Produktentwicklung*. Dresden, 2012, S. 537-548.
- POSNER12C POSNER, B.; BINZ, H.; ROTH, D.: Using the Contact & Channel – Model for the methodical development of lightweight solutions. In: KYVSGAARD HANSEN, P.; RASMUSSEN, J.; JÖRGENSEN, K.; TOLLESTRUP, C (Hrsg.): *Proceedings of Norddesign 2012*. Aalborg, 2012, S. 512-519.
- POSNER13A POSNER, B. ; BINZ, H. ; ROTH, D.: Operationalisation of the Value Analysis for Design for Lightweight: The Function Mass Analysis. In: LINDEMANN, U.; VENKATARAMAN, S.; KIM, Y. S.; LEE, S. W. (Hrsg.): *The 19th International Conference on Engineering Design 2013 (ICED13)*. Seoul, 2013, S. 1-10.

- POSNER13B POSNER, B.; BINZ, H.; ROTH, D.: Grundlagen zur Berücksichtigung von Design for X bei Funktionsstrukturen am Beispiel des Design for Lightweight. In: SPATH, D.; BERTSCHE, B.; BINZ, H. (Hrsg.): *Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung 2013*. Stuttgart, 2013, S. 1-10.
- POSNER14A POSNER, B.; BINZ, H.; ROTH, D.: Supporting Lightweight Design Potential Assessment in the Conceptual Stage. In: MARJANOVIC, D.; STORGA, M.; PAVKOVIC, N.; BOJCETIC, N. (Hrsg.): *Proceedings of the DESIGN 2014 – 13th International Design Conference*. Dubrovnik, 2014, S. 353-362.
- POSNER14B POSNER, B.; BINZ, H.; ROTH, D.: Supporting the development of lightweight design structures with simple methods in early phases. In: LAAKSO, M.; EKMAN, K. (Hrsg.): *Proceedings of NordDesign 2014*. Aalto, 2014, S. 793-804.
- POSNER14C POSNER, B.; BINZ, H.; ROTH, D.: Development of Working Structures with a focus on Lightweight Design. In: SCHARF, P.; WEBER, C. (Hrsg.): *Proceedings of the 58th IWK, Ilmenau Scientific Colloquium, Shaping the Future by Engineering*. Ilmenau, 2014, S. 1-11.
- POSNER14D POSNER, B.; BINZ, H.; ROTH, D.: *Systematische Leichtbau-Produktentwicklung*. Stuttgart, Universität Stuttgart, Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design, Seminarunterlagen, 2014.
- POSNER15A POSNER, B.; BINZ, H.; ROTH, D.; GONZALEZ VILA, N.; BURKHARDT, J.: Entwicklung von Leichtbau-Lösungen im Maschinenschutz. In: *Newsletter Wissenschaftliche Gesellschaft für Produktentwicklung WiGeP (2015)*, Nr. 1, S. 10-11.
- POSNER15B POSNER, B.; BINZ, H.; ROTH, D.: Extension of the Lightweight Design Thinking Tools for the application on more complex problems. In: WEBER, C.; HUSUNG, S.; CASCINI, G.; CANTAMESSA, M.; MARJANOVIC, D.; BORDEGONI, M.; GRAZIOSI, S.; MONTAGNA, F.; ROTINI, F.; VENKATARAMAN, S. (Hrsg.): *Proceedings of the 20th International Conference on Engineering Design 2015 (ICED15)*. Mailand, 2015, S. 1-10.
- RAPP09 RAPP, S.: *Vom Kostenmanagement zum Gewichtsmanagement - Ein Methodentransfer*. Stuttgart, Universität Stuttgart, Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design, Studienarbeit, 2009.
- RODENACKER70 RODENACKER, W. G.: *Methodisches Konstruieren*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1970.
- ROTH00 ROTH, K.: *Konstruieren mit Konstruktionskatalogen – Band I Konstruktionslehre, 3. Aufl.* Berlin: Springer-Verlag, 2000.
- SACHS15 SACHS ENGINEERING: *Optimieren der Konstruktion nach dem Vorbild der Natur*. <http://www.sachs-engineering.com/de/leichtbau-optimierung.html>. Aktualisierungsdatum: 11.09.2015.
- SCHACH06 SCHACH, R. ; JEHL, P.; NAUMANN, R.: *Transrapid und Rad-Schiene-Hochgeschwindigkeitsbahn*. Berlin: Springer-Verlag, 2006.

- SCHMIDT01 SCHMIDT, W.; PURI, W.: Betrachtungen zur Konzeptphase im Konstruktionsprozess von Leichtbauteilen. In: MEERKAMM, H. (Hrsg.): *DFX 2001: Proceedings of the 12th Symposium on Design for X*. Erlangen, 2001, S. 21-28.
- SCHMIDT03 Schmidt, W.: Methodische Entwicklung innovativer Leichtbauprodukte. In: VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (Hrsg.): *Fortschrittberichte der VDI Zeitschriften*, Reihe 1, Nr. 369. Düsseldorf: VDI Verlag, 2003.
- SCHÜRMANNO7 SCHÜRMANNO, H.: *Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden*, 2. Auflage. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 2007.
- SIEGLE15 SIEGLE, D.: *Vergleich eines einfachen Strukturoptimierungsansatzes mit rechnerunterstützter Topologieoptimierung*. Stuttgart, Universität Stuttgart, Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design, Bachelorarbeit, 2015.
- SOBEK07 SOBEK, W.: Entwerfen im Leichtbau. In: UNIVERSITÄT STUTTGART: *Leichtbau, Themenheft Forschung*, Nr. 3, Stuttgart, 2007, S. 70-82.
- SPIEGEL15 SPIEGEL ONLINE: <http://www.spiegel.de/wirtschaft/soziales/elektroautos-regierung-haelt-an-millionen-ziel-bis-2020-fest-a-858936.html>. Aktualisierungsdatum: 23.08.2015.
- STIHL15 STIHL AG: Das Unternehmen STIHL – Wegweisend seit über 85 Jahren. <http://www.STIHL.de/wir-ueber-uns.aspx>. Aktualisierungsdatum: 11.09.2015.
- SUH01 SUH, N. P.: *Axiomatic design: Advances and applications*. New York: Oxford University Press, 2001.
- UMWELTBUNDESAMT10 UMWELTBUNDESAMT: *CO<sub>2</sub> –Emissionsminderung im Verkehr in Deutschland, Sackstandsbericht des Umweltbundesamtes*. [http://www.umweltbundesamt.de/uba-info-medien/mysql\\_medien.php?anfrage=Kennnummer&Suchwort=3773](http://www.umweltbundesamt.de/uba-info-medien/mysql_medien.php?anfrage=Kennnummer&Suchwort=3773). Aktualisierungsdatum: 11.09.2015.
- VDI 2206 2004 VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE: *VDI 2206: Entwicklung mechatronischer Systeme*. Berlin: Beuth-Verlag, 2004.
- VDI 2221 1993 VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE: *VDI 2221: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte*. Berlin: Beuth-Verlag, 1993.
- VDI 2222 1997 VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE: *VDI 2222 Blatt 1: Konstruktionsmethodik - Methodisches Entwickeln von Lösungsprinzipien*. Berlin: Beuth-Verlag, 1997.
- VDI 2800 2010 VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE: *VDI 2800 Blatt 1: Wertanalyse*. Berlin: Beuth-Verlag, 2010.
- VDI 2800 2006 VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE: *VDI 2800 Blatt 1: Wertanalyse*. Berlin: Beuth-Verlag, 2006.
- VDI11 VDI-GESELLSCHAFT PRODUKT- UND PROZESSGESTALTUNG: *Wertanalyse – das Tool im Value Management*, 6. Auflage. Berlin: Springer-Verlag, 2011.

- WAGNER15      WAGNER, D.: Methodengestützte Entwicklung eines elektrischen Energiespeichers zur Erschließung von Leichtbaupotenzialen als Beitrag zur Produktgenerationsentwicklung. In: ALBERS, A. (Hrsg.): *IPEK Forschungsberichte, Band 89*. Institut für Produktentwicklung, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe, 2015.
- WEBER05      WEBER, C.: CPM / PDD - An Extended Theoretical Approach to Modelling Products and Product Development Processes. In: BLEY, H.; JANSEN, H.; KRAUSE, F.-L.; SHPITALNI, M. (Hrsg.): *Proceedings of the 2nd German-Israeli Symposium on Advances in Methods and Systems of Development of Products and Processes*. Stuttgart: Fraunhofer-IRB-Verlag, 2005, S. 159-179.
- WEBER07      WEBER, C.: Looking at “DfX” and “Product Maturity” from the Perspective of a New Approach to Modelling Product and Product Development Processes. In: Krause, F.-L. (Hrsg.): *Proceedings of the 17th CIRP Design Conference in cooperation with Berliner Kreis*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2007, S. 85-104.
- WEBER15      WEBER, C.: *Konzeptionelle Untersuchung einer gewichtsoptimierten Anwerfvorrichtung für handgehaltene Arbeitsgeräte*. Stuttgart, Universität Stuttgart, Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design, Masterarbeit, 2015.
- WIEDEMANN07      WIEDEMANN, J.: *Leichtbau, 3. Auflage*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2007.
- ZHAO10      ZHAO, L.; JIANFENG, M.; TING, W.; XING, D.: Lightweight Design of Mechanical Structures based on Structural Bionic Methodology. In: *Journal of Bionic Engineering (2010)*, Nr. 7, S. 224-231.
- ZIEBART12      ZIEBART, J. R.: *Ein konstruktionsmethodischer Ansatz zur Funktionsintegration*. Braunschweig, Technische Universität Carolo-Wilhelmina, Dissertation, 2012.

## Anhang

### A.1 Gestellte Evaluationsfragen

In Tabelle A.1 sind die Fragen des Evaluationsfragebogens aus Anhang A.2 den verschiedenen Evaluationsprojekten zugeordnet. Dabei wurden in den verschiedenen Projekten, wie in Kapitel 6.1 beschrieben, je nach Anwendungsfall unterschiedliche Methoden-Module angewendet. Basierend darauf wurden die entsprechenden Fragen ausgewählt.

Frage	Daimler Trucks (Kapitel 6.2)	HEDELIUS (Kapitel 6.3)	STIHL (Kapitel 6.4)	VDI-Seminar (Kapitel 6.5)
I. / 1.	X	X	X	X
I. / 2.	X	X	X	X
I. / 3.	X	X	X	(X)
I. / 4.	X	X	X	
I. / 5.	X	X	X	
II. / 6.		X	X	
II. / 7.		X	X	X
II. / 8.		X	X	
II. / 9.		X	X	
III. / 10.		X	X	X
III. / 11.		X	X	
III. / 12.		X	X	
III. / 13.		X	X	
IV. / 14.	X	X		X
IV. / 15.	X	X		
IV. / 16.	X	X		
V. / 17.	X	X	X	X
V. / 18.	X	X	X	X
V. / 19.	X	X	X	
V. / 20.	X	X	X	
VI. / 21.			X	X
VI. / 22.			X	
VI. / 23.			X	
VI. / 24.			X	
VII. / 25.	X	X	X	X
VII. / 26.	X	X	X	X
VII. / 27.	X	X	X	X
VII. / 28.	X	X	X	X
VII. / 29.	X	X	X	X
VII. / 30.	X	X	X	X
VII. / 31.	X	X	X	X
VII. / 32.	X	X	X	X
VII. / 33.	X	X	X	
VIII. / 34.	X	X	X	X
VIII. / 35.	X	X	X	X
VIII. / 36.	X	X	X	X
VIII. / 37.	X	X	X	X

X = Frage wurde gestellt (X) = Frage wurde in abgewandelter Form gestellt

**Tabelle A.1:** Gestellte Evaluationsfragen

## A.2 Evaluationsfragebogen

Die folgende Aufzählung enthält die Fragen des Evaluationsfragebogens. Dieser wurde zur Evaluation des entwickelten Methoden-Baukastens in den in Kapitel 6 beschriebenen Projekten, wie in Anhang A.1 beschrieben, jeweils auszugsweise genutzt.

### I. Potenzialanalyse: Funktionsmassenanalyse

1. Konnte die angewendete Methode bei der Analyse von Anforderungen, Funktionen, deren Wichtigkeit und der dafür aufgewendeten Massen unterstützen?
2. War die Analyse hilfreich in Bezug auf die Leichtbau-Entwicklung?
3. Unterstützt die Analyse die frühe Berücksichtigung von Masse im Produktentwicklungsprozess?
4. Konnten Lösungen für die mittels der Analyse identifizierten Potenziale gefunden werden?
5. Ist durch die Anwendung der Analyse eine Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit des Produkts zu erwarten?

### II. Lösungsgenerierung I: Funktionsebene

6. Konnte die Methode bei der Variation der Funktionsstrukturen unterstützen?
7. Wurden durch die Variation neue Lösungen gefunden und wenn ja, welche?
8. Führten die hierbei gefundenen Lösungen zu einem leichtbaugerechterem Produkt?
9. Ist durch die hierbei gefundenen Lösungen ein wettbewerbsfähigeres Produkt zu erwarten?

### III. Lösungsgenerierung II: Wirkebene

10. Konnte die Methode bei der Variation der Wirkstrukturen unterstützen?
11. Wurden durch die Variation neue Lösungen gefunden und wenn ja, welche?
12. Führten die hierbei gefundenen Lösungen zu einem leichtbaugerechterem Produkt?
13. Ist durch die hierbei gefundenen Lösungen ein wettbewerbsfähigeres Produkt zu erwarten?

### IV. Lösungsgenerierung III: Strukturebene

14. Konnte die Entwicklung einer Struktur unterstützt werden?
15. Führten die hierbei gefundenen Lösungen zu einem leichtbaugerechterem Produkt?
16. Ist durch die hierbei gefundenen Lösungen ein wettbewerbsfähigeres Produkt zu erwarten?

### V. Lösungsgenerierung IV: Gestaltebene

17. Konnte die Methode bei der Variation der Gestalt unterstützen?
18. Wurden durch die Variation neue Lösungen gefunden und wenn ja, welche?
19. Führten die hierbei gefundenen Lösungen zu einem leichtbaugerechterem Produkt?
20. Ist durch die hierbei gefundenen Lösungen ein wettbewerbsfähigeres Produkt zu erwarten?

**VI. Lösungsauswahl: Funktionsmasseneinschätzung**

21. Konnten Rückschlüsse und Informationen über die Masse einzelner Lösungsmöglichkeiten durch die Unterstützung der Methode gewonnen werden?
22. Konnte die Lösungsauswahl unterstützt werden und wenn ja, welche Lösungen wurden gefunden?
23. Konnten Lösungen mit größerem Leichtbaupotenzial identifiziert werden?
24. Ist durch die unterstützten Entscheidungen eine Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit des Produkts zu erwarten?

**VII. Leichtbau-Methoden-Baukasten zum Konzipieren**

25. Sind die vorgestellten Methoden konsistent und vollständig?
26. Kann durch die Methoden die Qualität der Leichtbau-Lösungen gesteigert werden?
27. Können die Methoden die durchgängige Berücksichtigung von Leichtbau in der Konzeptphase unterstützen?
28. Kann / konnte durch die Methoden die Masse von Produkten gesenkt oder bei gleicher Masse die Funktion, der Nutzen oder weitere Produkteigenschaften (wie z. B. die Steifigkeit) gesteigert werden?
29. Konnte ein leichtbaugerechteres Produkt durch die Anwendung der Methoden erreicht werden bzw. ist dies zu erwarten?
30. Ist eine Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit der Produkte zu erwarten?
31. Machen die Methoden die Ergebnisse nachvollziehbar?
32. Können die Methoden unerfahrene Entwickler unterstützen?
33. Können die Methoden zu neuen Lösungen anregen?

**VIII. Allgemeine Fragen zur Methodik**

34. Kennen Sie leichtbauspezifische Methoden die zu ähnlichen Ergebnissen geführt hätten?
35. Würden Sie auch zukünftig bei ähnlichen Problemen Teile der Vorgehensweise anwenden?
36. Für wie nützlich halten Sie die Vorgehensweise oder Teile davon?
37. Welche zusätzliche Unterstützung würden Sie sich wünschen?

**A.3 Evaluationsfragebogen für die VDI-Leichtbau-Seminare**

Die folgende Aufzählung enthält die Fragen des Evaluationsfragebogens, der zur Evaluations im Rahmen des VDI-Seminars eingesetzt wurde, wie in Anhang A.1 beschrieben.

---

**I. Potenzialanalyse: Funktionsmassenanalyse**

1. Konnte die angewendete Methode bei der Analyse von Anforderungen, Funktionen, deren Wichtigkeit und der dafür aufgewendeten Massen unterstützen?

---

---

2. Ist die Analyse hilfreich in Bezug auf die Leichtbau-Entwicklung?

---

---

**II. Lösungsgenerierung I: Funktionsebene**

3. Wurden durch die Variation neue Lösungen gefunden und wenn ja, welche (bitte nennen Sie eine beispielhaft)?

---

---

**III. Lösungsgenerierung II: Wirkebene**

4. Kann die Methode bei der Variation der Wirkprinzipien und -strukturen unterstützen?

---

---

**IV. Lösungsgenerierung III: Strukturebene**

5. Konnte die Entwicklung einer leichtbaugerechten Struktur unterstützt werden (in der beispielsweise Biegebelastungen vermieden wurden)?

---

---

**V. Lösungsgenerierung IV: Gestaltebene**

6. Konnte die Methode bei der Variation der Gestalt unterstützen?

---

---

7. Wurden durch die Variation neue Lösungen gefunden und wenn ja, welche?

---

---

**VI. Lösungsauswahl: Funktionsmasseneinschätzung**

8. Können Rückschlüsse und Informationen über die Masse einzelner Lösungsmöglichkeiten mit Hilfe der Methode gewonnen werden?

---

---

**VII. Leichtbau-Methodenbaukasten zum Konzipieren**

9. Sind die vorgestellten Methoden konsistent und vollständig?

---

---

10. Kann durch die Methoden die Anzahl und Qualität der Leichtbau-Lösungen gesteigert werden?

---

---

11. Können die Methoden die durchgängige Berücksichtigung von Leichtbau in der Konzeptphase unterstützen?

---

---

12. Kann/konnte durch die Methoden die Masse von Produkten gesenkt oder bei gleicher Masse die Funktion, der Nutzen oder weitere Produkteigenschaften (wie z. B. die Steifigkeit) gesteigert werden?

---

---

13. Können leichtbaugerechtere Produkte durch die Anwendung der Methoden erreicht werden bzw. ist dies zu erwarten?

---

---

14. Ist durch die Methoden eine Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit der Produkte zu erwarten?

---

---

15. Machen die Methoden die Ergebnisse nachvollziehbar?

---

---

16. Können die Methoden unerfahrene Entwickler unterstützen?

---

---

**VIII. Allgemeine Fragen zur Methodik**

17. Kennen Sie leichtbauspezifische Methoden die zu ähnlichen Ergebnissen geführt hätten?

---

---

18. Würden Sie auch zukünftig bei ähnlichen Problemen Teile der Vorgehensweise anwenden und wenn ja, welche Methoden würden Sie anwenden?

---

---

19. Für wie nützlich halten Sie die Vorgehensweise oder Teile davon?

---

---

20. Welche zusätzliche Unterstützung würden Sie sich wünschen?

---

---



## Lebenslauf

Benedikt Posner

\* 23.02.1985, Spaichingen

Staatsangehörigkeit: deutsch

### Ausbildung:

Schulausbildung: 08/91 - 07/95 Rupert-Mayer-Schule Spaichingen

08/95 - 06/04 Gymnasium Spaichingen

Wehrdienst: 07/04 - 03/05 Gebirgsjäger, Berchtesgaden

Studium: 10/05 - 09/10 Universität Stuttgart, Maschinenwesen, Diplom

(Hauptfächer: Konstruktionstechnik und Fabrikbetrieb)

### Berufserfahrung:

10/10 – 09/15      Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Konstruktionstechnik  
und Technisches Design (IKTD), Universität Stuttgart

10/15 - jetzt      Entwicklungsingenieur bei der ANDREAS STIHL AG & Co. KG im  
Bereich Innovation und Vorentwicklung Motorgeräte





ISBN-13: 978-3-922823-96-4