

Beitrag zur gewichtsoptimierten Entwicklung mechatronischer Produkte

Dissertation
zur Erlangung des Grades
des Doktors der Ingenieurwissenschaften
der Naturwissenschaftlich-Technischen Fakultät II
- Physik und Mechatronik -
an der Universität des Saarlandes

eingereicht von
Tobias Frederik Lüdeke

Saarbrücken

2016

Tag des Kolloquiums:	24.06.2016
Dekan:	Prof. Dr.-Ing. Georg Frey
Vorsitzender des Prüfungsausschusses:	Prof. Dr.-Ing. Georg Frey
1. Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Michael Vielhaber
2. Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Hans-Georg Herrmann
Akademischer Mitarbeiter:	Dr.-Ing. Lutwin Klein

Kurzzusammenfassung

Umweltaspekte werden immer wichtiger bei der Entwicklung technischer Produkte und treten dabei in Konkurrenz zu den Kundenansprüchen (Produktqualität und -funktionalität) und Marktansprüchen (Entwicklungszeit und -kosten). Als ein vielversprechender Ansatz zur Gestaltung nachhaltiger Produkte wird dabei die Gewichtsoptimierung angesehen. Daneben halten mechatronische Produkte Einzug in die Bereiche des klassischen Maschinenbaus und tragen zur Erweiterung und Verbesserung der Funktionalität bestehender Systeme bei. Mechatronische Produkte bieten Raum für Innovationen und die Realisierung hoher Qualitätsstandards. Eine zunehmende Mechatronisierung steht auf den ersten Blick oft mit einer Gewichtserhöhung in Zusammenhang. Diese Arbeit beschreibt eine Methodik für die gewichtsoptimierte Entwicklung mechatronischer Systeme. Basierend auf einer Analyse von Gewichtsoptimierungsmethoden wird ein Handlungsbedarf abgeleitet, der Gewichtsoptimierung und Mechatronik synergetisch betrachtet.

Der Syntheseteil der Arbeit stellt ein Rahmenwerk für eine Entwicklungsmethodik vor, aus dem die einzelnen Sichtweisen der Methodik systematisch abgeleitet werden. Im Vordergrund der Betrachtungen stehen dabei vor allem die Beschreibung der Prozessmodellierung sowie geeigneter Methoden für Gewichtsoptimierungen, insbesondere auch für die Ermittlung sekundärer Gewichtseinsparpotenziale. Abschließend werden die vorgestellten Prozesse und ausgewählte Methoden an einem Entwicklungsprojekt validiert.

Abstract

The consideration of environmental aspects becomes more and more important during product development beside market requirements (development time and cost) and customer requirements (product quality and performance). Lightweight design and weight optimization can be seen as a promising approach to the creation of sustainable products.

The integration of mechatronic concepts and systems into the classical mechanical areas offers the possibility to add and to improve the functionality of existing systems. Moreover, mechatronic products provide innovative solutions and realize a high standard of quality.

This dissertation derives a methodology for the weight-optimized development of mechatronic systems. An analysis of weight optimization methods is conducted and provides a need for action which synergistically considers weight optimization and mechatronics.

The synthesis part of this work introduces a framework which systematically derives the single perspectives of the methodology. The description of the process modelling and appropriate methods for weight optimization, in particular for secondary optimization potentials, is especially focused on. Finally, the presented processes and methods are validated through an example.

Danksagung

Die vorliegende Arbeit ist während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Konstruktionstechnik an der Universität des Saarlandes von November 2010 bis März 2015 entstanden.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Michael Vielhaber für das entgegengebrachte Vertrauen, die während der täglichen Arbeiten gewährten Freiheiten sowie die Unterstützung und die konstruktiven Gespräche bei der Umsetzung meiner Ideen.

Desweiteren möchte ich mich bei Prof. Dr.-Ing. Hans-Georg Herrmann vom Fraunhofer-Institut für Zerstörungsfreie Prüfung in Saarbrücken bzw. vom Lehrstuhl für Leichtbausysteme an der Universität des Saarlandes für die Übernahme des Koreferates sowie zahlreiche Diskussionen während der Erstellung der Arbeit bedanken.

Ein herausragender Dank gebührt all meinen Kollegen am Lehrstuhl für Konstruktionstechnik für die sehr gute Zusammenarbeit in Forschung und Lehre sowie für zahlreiche Diskussionen, ob fachlich oder fachfremd. Besonders bedanken möchte ich mich bei meinen Bürokollegen Dr.-Ing. Fabio Dohr, Dipl.-Ing. Jonas Hauptenthal, Dipl.-Ing. Pascal Stoffels sowie Dipl.-Ing. Manuel Thomas für die stets freundschaftliche und kameradschaftliche Atmosphäre. Weiterhin nicht zu vergessen sind Dipl.-Ing. (FH) Germano Porta und Dipl.-Volksw. Uta Wilhelm sowie die zahlreichen studentischen Mitarbeiter. Besonders bedanken möchte ich mich auch bei Herrn Romano Bonertz M. Sc., Herrn Niklas König B. Sc., Herrn Philip Meiser B. Sc. sowie Herrn Sebastian Scheid M. Sc., die mit ihren studentischen Abschlussarbeiten einen wesentlichen Beitrag zum Gelingen dieser Dissertation geleistet haben.

Diese Arbeit wäre sicherlich nicht möglich gewesen ohne die Unterstützung meiner Familie und meinen Freunden, die mir stets mit Rat und Tat zur Seite gestanden und den Rücken frei gehalten haben. Vor allem möchte ich meinen Eltern Bernd und Sigrid besonderen Dank aussprechen, da ich ohne ihre persönliche und finanzielle Unterstützung nie dorthin gekommen wäre, wo ich jetzt bin.

Zu guter Letzt gilt mein größter Dank meiner Frau Jessica, auf die ich mich stets verlassen konnte und die immer für mich da war trotz der Anfertigung ihrer eigenen Dissertation und der zeitweisen räumlichen Trennung. Ihr möchte ich diese Arbeit widmen.

I Inhaltsverzeichnis

Kurzzusammenfassung	III
Abstract.....	I
Danksagung	III
I Inhaltsverzeichnis.....	I
II Abbildungsverzeichnis.....	V
III Tabellenverzeichnis.....	IX
IV Symbol- und Formelverzeichnis	XI
V Abkürzungsverzeichnis	XIII
1 Einleitung.....	1
1.1 Problemstellung und Hintergrund.....	1
1.2 Fokus und Ziel der Arbeit.....	5
1.2.1 Abgrenzung und Hauptziel	5
1.2.2 Forschungsfragen	6
1.3 Vorgehen und Aufbau der Arbeit	7
1.3.1 Forschungsvorgehen	7
1.3.2 Aufbau der Arbeit	7
2 Vorbetrachtungen und Begriffsklärungen	11
2.1 Produktentwicklung und Produktmodellierung.....	11
2.1.1 Produktentwicklung.....	11
2.1.2 Produktmodellierung und Produktkonkretisierung	13
2.2 Design for X.....	16
2.2.1 Definition des Begriffs „Design for X“.....	16
2.2.2 Begriffsdefinition „X-orientiertes Entwickeln“	18
2.3 Mechatronik.....	19
2.3.1 Definition des Begriffs „Mechatronik“	19
2.3.2 Das mechatronische System.....	21
2.3.3 Erfolgspotenziale von mechatronischen Systemen	22

2.4	Leichtbau	23
2.4.1	Begriffsdefinition „Leichtbau“	24
2.4.2	Begriffsdefinition „Gewichtsoptimierung“	25
2.5	Systems Engineering.....	25
2.5.1	Definition der Begriffs „Systems Engineering“ und „Systemtechnik“	26
2.5.2	Grundbegriffe und Merkmale von Systemen.....	28
2.5.3	Systemdenken und Systembetrachtung	30
2.5.4	Vorgehensmodell	31
3	Stand der Wissenschaft und Technik.....	33
3.1	Mechatronische Produktentwicklung	33
3.1.1	Mechatronischer Entwicklungsprozess.....	33
3.1.2	Spezifische Methoden bei der Entwicklung mechatronischer Produkte.....	40
3.2	X-gerechtes und X-orientiertes Entwickeln und Konstruieren.....	40
3.2.1	Allgemeine Grundlagen des X-orientierten Entwickelns	41
3.2.2	Überblick über die wichtigsten Richtlinien für X-Kriterien	41
3.2.3	X-Kriterien im Entwicklungsprozess	42
3.2.4	Komplexität und Strukturierung des X-orientierten Entwickelns.....	43
3.2.5	Entscheidungsfindung bei multiplen X-Kriterien	45
3.3	Gewichtsoptimierung technischer Produkte	46
3.3.1	Allgemeine Grundlagen des Leichtbaus.....	46
3.3.2	Leichtbau aus konstruktionsmethodischer Sicht	54
3.3.3	Leichtbau aus mechatronischer und systemtechnischer Sicht.....	66
3.3.4	Primäre und sekundäre Gewichtseinsparpotenziale	68
3.3.5	Beurteilung der Leichtbaustrategien und Leichtbaumethoden.....	72
4	Defizite der bestehenden Ansätze und Ableitung eines Handlungsbedarfs	77
4.1	Defizite bei der mechatronischen Produktentwicklung.....	77
4.2	Defizite bei der Gewichtsoptimierung technischer Produkte.....	77
4.3	Defizite beim X-orientierten Entwickeln	78
4.4	Nutzenpotenziale durch Synergien	79
4.4.1	Mechatronik und Leichtbau	79

4.4.2	Leichtbau, Systemtechnik, mechatronisches Entwickeln und X-orientiertes Entwickeln	80
4.5	Handlungsbedarf und Schärfung der Forschungsfragen	81
5	Methodik zur Entwicklung gewichtsoptimierter, mechatronischer Produkte	85
5.1	Herleitung der Methodik, Gesamtkonzept und Rahmenwerk	85
5.1.1	Herleitung der Methodik	85
5.1.2	Gesamtkonzept und Rahmenwerk	85
5.2	Anforderungen an eine integrierende Methodik	88
5.3	Prozessmodellierung	89
5.3.1	Allgemeines Vorgehensmodell	89
5.3.2	Vorgehensmodell für die Entwicklung gewichtsoptimierter, mechatronischer Produkte	90
5.3.3	Detaillierte Beschreibung der Phasen des Vorgehensmodells	94
5.3.4	Analysepunkte	100
5.4	Systemverständnis als Grundlage der Produktmodellierung	104
5.5	Gewichtsoptimierungsstrategien	105
5.5.1	Zuordnung von Leichtbaustrategien zu den Entwicklungsphasen	105
5.5.2	Systemleichtbau	106
5.6	Gewichtsoptimierungsmethoden	107
5.6.1	Gewichtsoptimierungsmethoden in frühen Entwicklungsphasen	108
5.6.2	Sekundäre Gewichtsoptimierungsmethoden in späten Phasen	118
5.7	Gewichtseigenschaften während des Entwicklungsprozesses	138
5.7.1	Gewichtseigenschaften	138
5.7.2	Gewichtsrelevanz	139
5.8	Technologien und Wissen	141
5.8.1	Allgemeine Struktur von Konstruktionskatalogen	142
5.8.2	Konstruktionskatalog mit mechatronischen Leichtbaulösungen	143
5.8.3	Integration von Konstruktionskatalogen in den Entwicklungsprozess	147
5.9	Werkzeuge und Tools	149
5.9.1	Software-Tool zur Bestimmung sekundärer Effekte	149
5.9.2	Software-Tool zur Unterstützung bei der Gewichtsoptimierung in den frühen Entwicklungsphasen	151

5.9.3	Software-Tool für einen Konstruktionskatalog	152
5.9.4	Software-Tool zur Unterstützung des Gesamtprozesses	153
5.10	Zusammenfassung	154
6	Evaluierung und Validierung der Methodik	157
6.1	Ausgangssituation und Produkt	157
6.2	Anwendung der Methoden für Gewichtsoptimierung in frühen Entwicklungsphasen	158
6.2.1	Produktplanungsphase	159
6.2.2	Konzeptphase	164
6.2.3	Weitere Entwicklungsschritte	169
6.3	Anwendung der Methoden für sekundäre Gewichtsoptimierung	169
6.4	Diskussion der Ergebnisse	171
7	Zusammenfassung und Ausblick	173
7.1	Zusammenfassung	173
7.2	Beantwortung der Forschungsfragen	175
7.3	Fazit und Ausblick	178
8	Literaturverzeichnis	181
A	Anhang	199
A.1	Validierung der Methodik – Frühe Gewichtseinsparmethoden	199
A.2	Validierung der Methodik – Methoden zur sekundären Gewichtseinsparung	201

II Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: Fächerstrategie der deutschen Automobilindustrie [VDA11]	2
Abbildung 1.2: Magisches Viereck der Produktentwicklung	3
Abbildung 1.3: Entwicklung der Fahrzeuggewichte am Beispiel VW Passat (ähnlich zu [LuSV13], teilweise [Goed07]).....	4
Abbildung 1.4: Aufbau der Arbeit	8
Abbildung 2.1: Produktentstehung.....	12
Abbildung 2.2: Münchener Produktkonkretisierungsmodell (nach [Lind09], [PoLi11]).....	14
Abbildung 2.3: Beschreibung von Analyse und Synthese nach [WeWe00].....	14
Abbildung 2.4: Beziehungen zwischen Merkmalen und Eigenschaften im CPM-Ansatz (nach [Webe07])	15
Abbildung 2.5: Mechatronik - Integration verschiedener Disziplinen [Iser08].....	21
Abbildung 2.6: Grundstruktur eines mechatronischen Systems nach [VDI2206] und [Wall95] ..	22
Abbildung 2.7: Grundstruktur eines mechatronischen Systems [Rodd12]	22
Abbildung 2.8: Grundbegriffe des Systemdenkens [HWFV12]	28
Abbildung 2.9: Systemhierarchie nach [Patz82]	29
Abbildung 2.10: Systemtypen (siehe [HWFV12] nach [UIPr95]und [Band07]).....	30
Abbildung 3.1: V-Modell als Makrozyklus der mechatronischen Produktentwicklung nach VDI 2206 [VDI2206]	36
Abbildung 3.2: Tätigkeiten beim Systementwurf (links) und der Systemintegration (rechts) nach [VDI2206]	37
Abbildung 3.3: 3-Ebenen-Vorgehensmodell nach Bender [Bend05]	38
Abbildung 3.4: W-Modell für die Entwicklung adaptronischer Systeme (nach [NaAn10], [NaAn11], [NaAn13])	40
Abbildung 3.5: DfX-Matrix nach [Andr05].....	44
Abbildung 3.6: Darstellung von DfX und X-Systemen mit Produktmodellierung ([Webe07], [Koeh09])	45
Abbildung 3.7: Zusammenhänge im Leichtbau [EGGH13].....	47
Abbildung 3.8: Zusammenhang zwischen Kosten und Gewicht eines Systems (nach [EGGH13], [Klei13], [WWW3]).....	49

Abbildung 3.9: In der Industrie akzeptable Mehrkosten pro eingespartem Gewicht (nach [EGGH13], [Klei09]).....	50
Abbildung 3.10: Leichtbau aus konstruktionsmethodischer Sicht	54
Abbildung 3.11: Leichtbaustrategien und vorgeschlagener Ablauf während des Entwicklungsprozess [KoBM11]	54
Abbildung 3.12: Zuordnung von Leichtbaustrategien zu den Entwicklungsphasen (teilweise nach [ScPM01], [LuVi12b])	55
Abbildung 3.13: Systematische Vorgehensweise des leichtbaugerechten Konstruierens nach [Klei13].....	56
Abbildung 3.14: Leichtbauentwicklungsprozess, Leichtbauwissen und Berechnungswerkzeuge nach [Krau12]	57
Abbildung 3.15: Vorgehen bei der Wertanalyse Gewicht (nach [Feye91b])	58
Abbildung 3.16: Ablauf einer ganzheitlichen Anwendungsstrategie [EGGH13].....	59
Abbildung 3.17: Analyseschritte bei der Entwicklung innovativer Leichtbauprodukte [Schm04].....	60
Abbildung 3.18: Diagramm zur Identifizierung von schwach vernetzten, gewichtsintensiven Anforderungen [MMFM09]	61
Abbildung 3.19: Tunnel-Effekt der Gewichtsdaten während der Entwicklung (nach [DaVG05], [DaVG06])	65
Abbildung 3.20: Leichtbau aus mechatronischer und systemtechnischer Sicht	66
Abbildung 3.21: Überführung zu einem mechatronischen Leichtbausystem [Gran12].....	66
Abbildung 3.22: Evolution der Systemmasse bei komplexen Produkten [Weck06]	68
Abbildung 3.23: Primäre und sekundäre Gewichtseinsparpotenziale	68
Abbildung 3.24: Ausgangssystem (1), Primärmaßnahme (2), Sekundärmaßnahme 1. Ordnung (3), Sekundärmaßnahme 2. Ordnung (4)	70
Abbildung 5.1: Zuordnung der Methodik zum Entwicklungsprozess, basierend auf [UIEp08]	85
Abbildung 5.2: Rahmenwerk und Gesamtkonzept der Methodik [LuVi14b]	86
Abbildung 5.3: Prozessmodellierung	89
Abbildung 5.4: Allgemeines Vorgehensmodell für die Entwicklung technischer Produkte [DoSV13]	90
Abbildung 5.5: Vereinfachte Darstellung des Vorgehensmodells	92
Abbildung 5.6: Makrophasen des Prozessmodells	95
Abbildung 5.7: Mikrophasen des Prozessmodells	97

Abbildung 5.8: Zuordnung von Leichtbaustrategien zu den Phasen des V-Modells nach VDI 2206 [LuVi12b].....	105
Abbildung 5.9: Gewichtsoptimierungsmethoden während der Produktenwicklung.....	107
Abbildung 5.10: Detailliertes Vorgehen in frühen Entwicklungsphasen nach [LuBV14a] und [LuBV14b].....	109
Abbildung 5.11: Bestimmung der Funktionsgewichtsziele (analog zu [PoBR13b])	114
Abbildung 5.12: Bestimmung von Funktionsgewichten (analog zu [PoLi11], [PoBR13b])	115
Abbildung 5.13: Vergleich von Funktionsgewichten mit Funktionsgewichtszielen.....	115
Abbildung 5.14: Morphologischer Kasten mit zweidimensionaler Gewichtsrangfolge	117
Abbildung 5.15: Grundbaustein mit Gewichtsanteilen und Gewichtseinflussfaktoren	120
Abbildung 5.16: Vertikale Anordnung der Systemstruktur.....	122
Abbildung 5.17: Horizontale Anordnung der Systemstruktur nach Gewicht und Funktion.....	123
Abbildung 5.18: Vergleich der Pfeilarten (blau: Gewichtsanteile, rot: Gewichtseinflussfaktoren)	123
Abbildung 5.19: Gruppen als Set von abhängigen Subsystemen	124
Abbildung 5.20: Vergleich der Pfeilarten	125
Abbildung 5.21: Bedeutung der horizontal gerichteten Pfeilarten	126
Abbildung 5.22: Detaillierte Vorgehensweise beim Durchlaufen einer Systemstruktur.....	131
Abbildung 5.23: System in hierarchischer Struktur (links) und in Matrixdarstellung (rechts) ...	133
Abbildung 5.24: Vollständige Matrix-Darstellung mit Gewichtsanteile und Gewichtseinflussfaktoren	133
Abbildung 5.25: Systemstruktur mit mehreren Ausgängen	134
Abbildung 5.26: Zielkonflikte und Zirkelschlüsse bei komplexen Systemen (oben: Ausgangssituation, mittig: Optimierungsweg 1, unten: Optimierungsweg 2) .	135
Abbildung 5.27: Erkennungsmöglichkeiten von sekundären Gewichtseinparpotenzialen während der Konzeptphase.....	137
Abbildung 5.28: Gewichtsrelevanzwerte im Entwicklungsprozess.....	141
Abbildung 5.29: Das System der Kataloge (nach [VDI2222])	142
Abbildung 5.30: Aufbau und Prozedur des Zugriffs des Konstruktionskatalogs (vgl. [LuSV14])	145
Abbildung 5.31: Beispielhafter Aufbau des Konstruktionskataloges.....	146
Abbildung 5.32: Integration von Konstruktionskatalogen im Entwicklungsprozess (hier: erstes V-Modell aus dem allgemeinen Prozessmodell aus Abbildung 5.5).....	148

Abbildung 5.33: Vorteile beim Einsatz von Konstruktionskatalogen (ähnlich zu [LuSV14])	149
Abbildung 5.34: Systemstruktur im Software-Tool	150
Abbildung 5.35: Darstellung von primären Maßnahmen und resultierenden Sekundäreffekten	150
Abbildung 5.36: Sensitivitätsanalyse im Software-Tool, Werte berechnet nach Formel (5.20)	151
Abbildung 5.37: Software-Tool zur Unterstützung der Gewichtsoptimierung in frühen Phasen	152
Abbildung 5.38: Software-Unterstützung beim Zugriff auf den Konstruktionskatalog.....	153
Abbildung 5.39: Software-Tool zur Unterstützung des Gesamtprozesses	154
Abbildung 6.1: BionX P250DX als Nachrüstset im nicht-eingebauten (links) und eingebauten Zustand (rechts) [Bion13]	157
Abbildung 6.2: Systembetrachtung des Validierungsbeispiels.....	159
Abbildung 6.3: Klassifizierung der Anforderungen nach Vernetzung und Gewichtsbeeinflussung	162
Abbildung 6.4: Evaluierung der Kundenanforderungen (paarweiser Vergleich)	163
Abbildung 6.5: grobe Funktionsstruktur des Validierungsbeispiels	165
Abbildung 6.6: Festlegung von Funktionsgewichtsziele	165
Abbildung 6.7: Bestimmung der Funktionsgewichte.....	166
Abbildung 6.8: Vergleich Funktionsgewichtsziele mit Funktionsgewichten des Validierungsbeispiels	166
Abbildung 6.9: Suche nach physikalischen Effekten und Vorauswahl der Wirkprinzipien	167
Abbildung 6.10: Bestimmung der Gewichtsrelevanz der einzelnen Wirkprinzipien und der Wirkstruktur	168
Abbildung 6.11: Detaillierte Funktionsstruktur	169
Abbildung 6.12: Beispielsystemhierarchie für die Anwendung des Sekundäransatzes (ähnlich zu [Meis14]).....	170
Abbildung A.1: Variation 1 der Funktionsstruktur des Validierungsbeispiels	201
Abbildung A.2: Variation 2 der Funktionsstruktur des Validierungsbeispiels	201

III Tabellenverzeichnis

Tabelle 3.1: Beispiele für das "X" beim X-orientierten Entwicklen (nach [Lind07])	42
Tabelle 3.2: Überblick Leichtbaustrategien	50
Tabelle 3.3: Leichtbaustrategien und Bewertung	73
Tabelle 3.4: Leichtbaumethoden und Beurteilung	75
Tabelle 5.1: Übersicht über Makro-Analysepunkte	102
Tabelle 5.2: Übersicht über Mikro-Analysepunkte (ähnlich zu [LuVi13b])	103
Tabelle 5.3: Subsysteme mit mehreren Gewichtseinflussfaktoren	134
Tabelle 6.1: Anforderungsliste mit gewichtsintensiven Anforderungen	161
Tabelle A.1: Domain-Mapping-Matrix (binär) des BionX Nachrüstset	199
Tabelle A.2: Domain-Mapping-Matrix (Gewicht) des BionX Nachrüstset	199
Tabelle A.3: transponierte Domain-Mapping-Matrix (binär) des BionX Nachrüstset	200
Tabelle A.4: Design Structure Matrix (binär) des BionX Nachrüstset	200
Tabelle A.5: Design Structure Matrix (Gewicht) des BionX Nachrüstset	200

IV Symbol- und Formelverzeichnis

a	Beschleunigung
A	Luftwiderstandsfläche
c_W	Luftwiderstandsbeiwert
e_i	Massenfaktor
$F_{Beschleunigung}$	Beschleunigungskraft
F_{Luft}	Luftwiderstandskraft
f_R	Rollwiderstandsbeiwert
F_{Roll}	Rollwiderstandskraft
$F_{Steigung}$	Steigungswiderstandskraft
$F_{Widerstand}$	Gesamtfahrzeugwiderstand
$G(x)$	Gewicht einer Subsystemgruppe
G_F	Gewichtsrelevanzwert einer Funktionsstruktur
G_L	Gewichtsrelevanzwert einer Wirkstruktur
G_{L_i}	Gewichtsrelevanzwert eines Wirkprinzips
g_{L_i}	Gewichtsrangfolge eines Wirkprinzips
G_P	Gewichtsrelevanz einer Baustruktur
G_R	Gewichtsrelevanzwert der Anforderungen
$I_{n+1,n}^m$	Gewichtseinflussfaktor auf Systemebene m von System n zu System n+1
i_{CF}	Wertigkeit einer Kundenfunktion
i_{TF}	Wertigkeit einer technischen Funktion
$k(x)$	Anzahl der beteiligten Subsysteme an Subsystemgruppe x
m	Systemebene m
n	Subsystem n
n_F	Anzahl der Funktionen
n_{GF}	Anzahl der Gesamtflüsse
n_{LP}	Anzahl der „lazy parts“
n_{MF}	Anzahl der Materialflüsse
n_R	Anzahl der Anforderungen
n_{R^*}	Anzahl der schwach vernetzten, gewichtintensiven Anforderungen

P_n^m	Primäre Gewichtsänderung an System n in Systemebene m
P_x	Matrix bestehend aus Properties
R_n^m	Gewichtsanteil des Systems n auf Systemebene m
S^0	Sekundäre Gewichtsänderung am Gesamtsystem
S^m	Sekundäre Gewichtsänderung auf Systemebene m
$S_{G(x)}^m$	Sekundäre Gewichtsänderung der Gruppe G(x) auf Systemebene m
S_n^m	Sekundäre Gewichtsänderung am System n auf Systemebene m
T_n^m	Gewichtsanteil des Systems n auf Systemebene m am Gesamtsystem
v	Geschwindigkeit
W_F	Funktionsgewicht
W_L	Wirkgewicht
W^0	Gewicht des Gesamtsystems
W^{0*}	Verändertes Gewicht des Gesamtsystems
W^{m*}	Verändertes Gewicht auf Systemebene m
$W_{G(x)}^{m*}$	Gewicht der Subsystemgruppe G(x) auf Systemebene m
W_n^m	Gewicht des Systems n auf Subsystemebene m
W_n^{m*}	Verändertes Gewicht des Systems n auf Subsystemebene m
α	Steigungswinkel
ΔW^0	Gewichtsunterschied des Gesamtsystems
ΔW^m	Gewichtsunterschied auf Systemebene m
$\Delta W_{G(x)}^{m*}$	Gewichtsunterschied der Subsystemgruppe G(x) auf Systemebene m
ΔW_n^m	Gewichtsunterschied des Systems n auf Systemebene m
ρ_L	Luftdichte

V Abkürzungsverzeichnis

CAD	Computer-Aided Design
CFK	Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff
C_i	Characteristics
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
CPM	Chararacteristics-Properties Modeling
DfX	Design for X
DIN	Deutsches Institut für Normung
DM	Datenmanagement
DRM	Design Research Methodology
DSM	Design Structure Matrix / Dependency Structure Matrix
EC _j	External Conditions
EN	Europäische Norm
FGL	Formgedächtnislegierung
HoQ	House of Quality
ISO	International Organization for Standardization
KomD	Detaillierungsphase der Komponenten
KomK	Konzeptionierungsphase der Komponenten
NASA	North American Space Agency
PDD	Property-Driven Development
P_j	Properties
PR _j	Required Properties
PwC	Price Waterhouse Cooper
P_x	Matrix bestehend aus Properties
QfD	Quality Function Deployment
RFLP	Requirements – Functional – Logical – Physical
SE	Systems Engineering
SSD	Detaillierungsphase der Subsysteme
SSI	Integrationsphase der Konzepte der Subsysteme
SSI ²	Integrationsphase der Detaillierung der Subsysteme

SSK	Konzeptionierungsphase der Komponenten
SysD	Detaillierungsphase des Systems
SysI	Integrationsphase des Konzeptes des Systems
SysI ²	Integrationsphase der Detaillierung des Systems
SysK	Konzeptionierungsphase des Systems
SysML	Systems Modeling Language
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VW	Volkswagen AG

1 Einleitung

Kapitel 1 beschreibt eine kurze Einführung in die Problemstellung und den thematischen Hintergrund. Basierend darauf wird die Arbeit abgegrenzt und die Hauptziele und die initialen Forschungsfragen formuliert. Abschließend werden das Forschungsvorgehen sowie der Aufbau der Arbeit dargelegt.

1.1 Problemstellung und Hintergrund

Die zunehmende Globalisierung konfrontiert die produzierenden Unternehmen mit steigendem Preisdruck, verkürzter Entwicklungszeit und der Einhaltung erhöhter Produktqualität [Aber06]. Zusätzlich dazu gewinnt der Begriff der Nachhaltigkeit und der Ressourcenschonung immer mehr an Bedeutung. Neben der Veränderung der Marktsituation halten mechatronische Systeme und Produkte Einzug in die Bereiche des klassischen Maschinenbaus und tragen zur Erweiterung und Verbesserung der Funktionalität bestehender Systeme bei. Mechatronische Produkte bieten die Möglichkeiten für Innovationen und die Realisierung hoher Qualitätsstandards, was die Kundenbedürfnisse befriedigt.

Am Beispiel des Automobils wird sowohl die fortschreitende Mechatronisierung (elektronische Fahrhilfen, Sicherheitssysteme, Komfortsysteme, ...) als auch der immer stärker werdende Gedanke der Nachhaltigkeit (Verbrauchs- und Emissionsreduzierung) deutlich. Einerseits scheinen sich diese beiden Trends zu widersprechen, wenn die auch aufgrund neuer mechatronischer Funktionalitäten stetig schwerer werdenden Fahrzeuge ins Auge gefasst werden, andererseits kann auch ein symbiotisches Zusammenwirken der Mechatronisierung und des Nachhaltigkeitsbewusstseins beobachtet werden, so z. B. alternative Antriebskonzepte, X-by-Wire-Konzepte, adaptronische Systeme. Mechatronik und mechatronische Systeme werden sogar als eine der wichtigsten Lösungen angesehen, um die Nachhaltigkeit zu sichern (siehe [Moeh09], [MoSt10], [Crai08]).

Mechatronische Produkte, im Allgemeinen ein synergetisches und symbiotisches Zusammenwirken der klassischen Ingenieursdisziplinen Maschinenbau, Elektrotechnik/Elektronik und Informationstechnologie, bieten Unternehmen herausragende Möglichkeiten für Innovationen. Der Anteil der mechatronischen Produkte an der Gesamtproduktpalette steigt stetig an. Einer McKinsey-Studie zufolge [ADL05], [Hert07] und [MoSt10] ist der Anteil der elektronischen Bau-

teile in einem Fahrzeug von 1995 bis 2015 von 20% auf circa 40% gestiegen. Der Anteil elektronischer Bauteile an den Herstellkosten im Automobil lag laut einer Umfrage von PwC Ende 2013 bei circa 30% und soll bis 2030 auf 50% anwachsen [WWW1]. Grund dafür sind laut Experten die zunehmende Elektrifizierung und Hybridisierung der Fahrzeuge und 80% der Innovationen in der Automobilindustrie.

Hier lässt sich der Kreis schließen zum Thema der Nachhaltigkeit, wie an der Fächerstrategie zu einer umweltschonenden Mobilität des Verbandes deutscher Automobilhersteller in Abbildung 1.1 zu erkennen ist. Die drei mittelfristigen Strategien Einsparen, Ergänzen und Ersetzen werden durch die beiden langfristig angelegten Konzepte der Car-2-X-Kommunikation und durch neue Mobilitätsideen ergänzt.

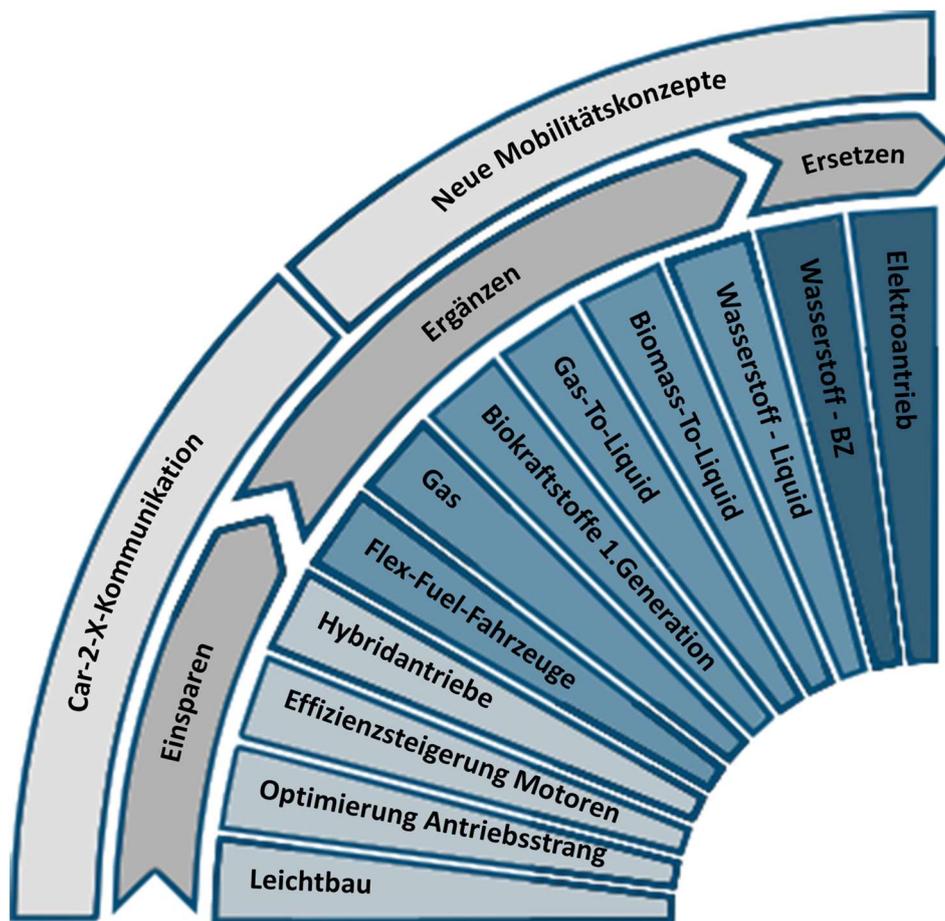


Abbildung 1.1: Fächerstrategie der deutschen Automobilindustrie [VDA11]

Die Nachhaltigkeit allgemein ist in der heutigen Zeit eines der meistgenannten Schlagwörter, wenn die Begriffe Treibhaus-Emissionen, Primärenergiequellen und Klimawandel erwähnt werden. Die zunehmenden Emissionen und das schrumpfende Vorkommen von Erdöl und Erdgas beeinflussen seit geraumer Zeit die weltweite Umweltpolitik. Auf politischer Ebene wurden 1992 auf der Weltklimakonferenz in Rio erstmals festgeschriebene Richtlinien und Prinzipien

etabliert, um eine Nachhaltigkeit zu gewährleisten. So sollen der Primärenergieverbrauch bis 2020 auf 76% sinken, die Rohstoffproduktivität auf 200% steigen und die Treibhausgasemissionen auf 60% vermindert werden, bezogen auf einen 100%-Wert aus dem Jahre 1990. [Stat14]

Im Bereich der Produktentwicklung und Produktentstehung gestaltet sich die Verankerung der Nachhaltigkeit schwierig und stellt viele Unternehmen vor große Herausforderungen, was häufig zu Ungunsten der Entstehungskosten und der Entwicklungszeit führt. Dabei sollen sowohl die Produkte nachhaltig sein als auch die Entstehungsprozesse. Zwar sind einige internationale Richtlinien für eine umweltgerechte Produktentwicklung eingeführt worden, z. B. ISO 14062 [ISO14062] etc., die Umsetzung gestaltet sich allerdings noch schwierig. Das vordringliche Ziel sollte es daher sein, das „magische Dreieck“ der Produktentwicklung ([Enge06], [EKL07]) bestehend aus Kosten, Zeit und Qualität um den Begriff der Nachhaltigkeit zu ergänzen. Somit entsteht das „magische Viereck“ der Produktentwicklung.

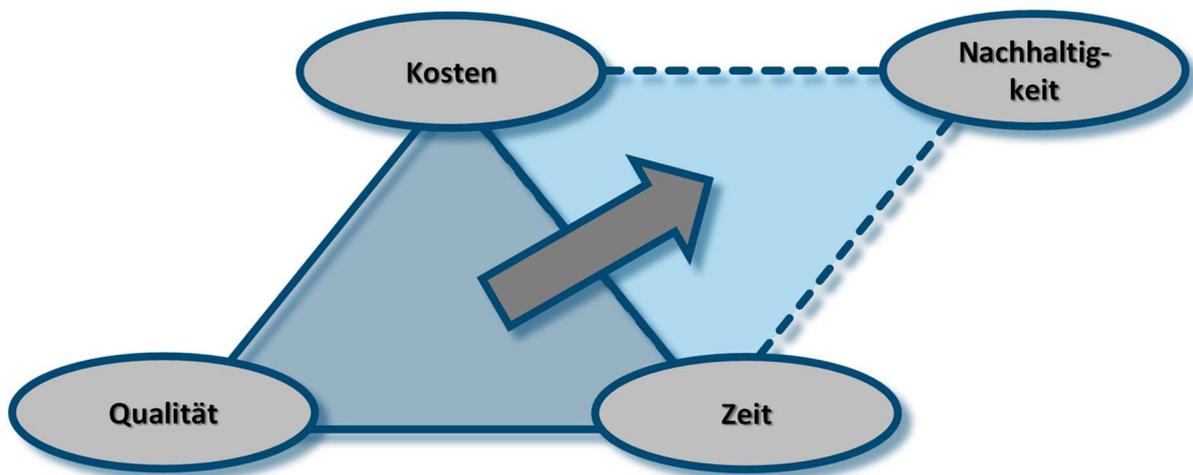


Abbildung 1.2: Magisches Viereck der Produktentwicklung

Als ein wesentlicher Bestandteil der Nachhaltigkeitsstrategie werden in der innovationstreibenden Automobilindustrie als auch in anderen Industriezweigen Leichtbaubestrebungen angesehen. Damit sollen der Primärenergieverbrauch und die CO₂-Emissionen der Fahrzeuge reduziert werden, was durch die europäische Gesetzeslage mit einem Grenzwert von 95g CO₂/km pro Fahrzeug im Jahre 2020 für alle Neuwagen verpflichtend wird [WWW2].

Anhand der Fahrwiderstandsgleichung [LLRB14]

$$F_{Widerstand} = F_{Roll} + F_{Luft} + F_{Steigung} + F_{Beschleunigung} \quad (1.1)$$

und aufgeschlüsselt nach den Einzelwiderständen

$$F_{Widerstand} = f_R \cdot m \cdot g \cdot \cos \alpha + c_w \cdot A \cdot \frac{\rho_L}{2} \cdot v^2 + m \cdot g \cdot \sin \alpha + e_i \cdot m \cdot a \quad (1.2)$$

ist es offensichtlich, dass ein Verändern des Gesamtfahrzeuggewichtesⁱ direkt zu einer Verringerung der Widerstandskraft führt. Indirekt erschließt sich daraus eine Reduktion von Energiekosten für den Betrieb und von Emissionen sowie eine Erhöhung der Dynamik [Krau12]. Desweiteren kann durch Leichtbaumaßnahmen der schonende Einsatz von Material und Ressourcen ermöglicht werden. Nach Schätzungen von [Klei09] können Einsparungen bis zu 0,5 Liter/100 km an Treibstoff und circa 10 g CO₂/km bei einer Verringerung des Fahrzeuggewichtes von 100 kg erzielt werden.

Der Widerspruch zwischen oftmals gewichtstreibender Mechatronisierung und der Gewichts-optimierung von technischen Produkten scheint auf den ersten Blick offensichtlich, wenn z. B. die Gewichtsentwicklung eines VW Passat über die verschiedenen Baureihen von 1973 bis heute betrachtet wird (Abbildung 1.3).

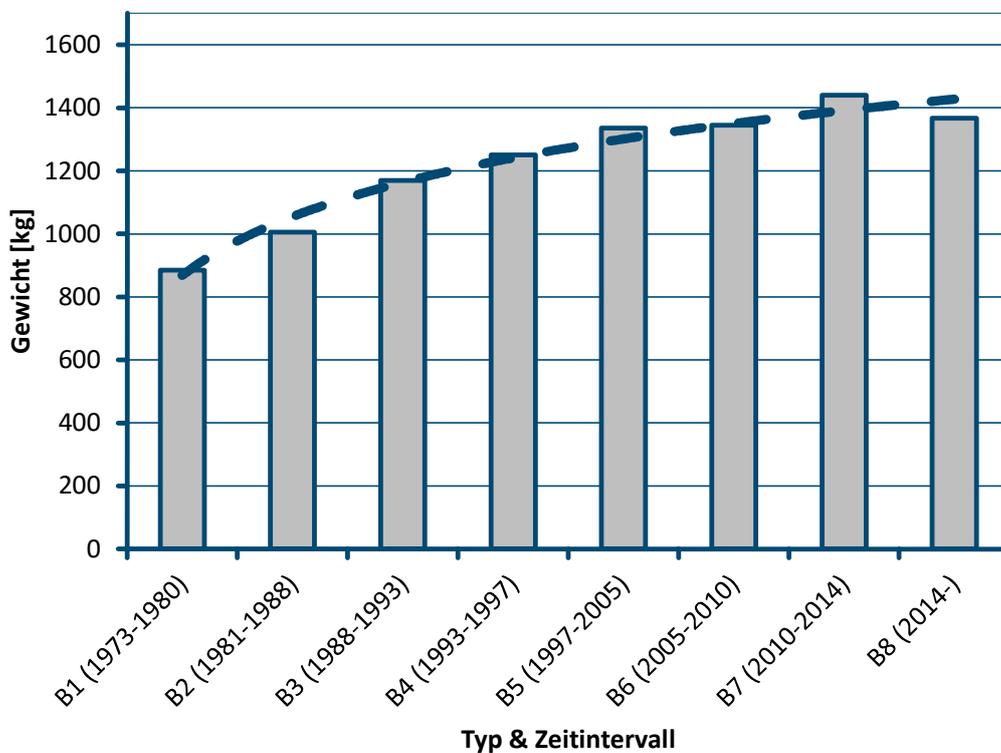


Abbildung 1.3: Entwicklung der Fahrzeuggewichte am Beispiel VW Passat (ähnlich zu [LuSV13], teilweise [Goed07])

Bis Baureihe B7 ist das Fahrzeuggewicht stetig angestiegen, verursacht durch Vergrößerung und Mechatronisierung des Fahrzeuges. Gründe dafür sind vor allem die Erhöhung der Sicherheits-

ⁱ Im Zusammenhang dieser Arbeit werden die Begriffe „Gewicht“ und „Masse“ entsprechend dem üblichen Sprachgebrauch gleichgesetzt.

vorkehrungen, des Komforts und der Fahrdynamik. Gleichzeitig sind Gewichtsreduzierungsstrategien angewandt worden. Darunter fallen z. B. konstruktive und konzeptionelle Optimierungen, verbesserte Materialien oder neue Fertigungstechnologien. Allerdings konnte die Gewichtseinsparung nie die Gewichtserhöhung ausgleichen, d.h. die Fahrzeuge sind stetig in ihrem Gewicht gewachsen. Es bleibt aber zu bedenken, dass ohne Gewichtsoptimierungsmaßnahmen, z. B. neue Materialien, neue Karosseriekonzepte etc., das Fahrzeuggewicht um einen wesentlichen Beitrag höher wäre. Wird allerdings nur die Leichtbaugüte der Karosseriestruktur (Verhältnis zwischen Karosseriemasse, Torsionssteifigkeit und Aufstandsfläche [Schi14], [TeGo11]) berücksichtigt, kann festgestellt werden, dass diese sich stetig um einen immensen Betrag zum Vorgängermodell verbessert hat.

Erst die Entwicklung der Baureihe B8 des VW Passat ermöglicht die Umkehr von der Gewichtspirale. Erstmals kann das Gewicht im Vergleich zu einem Vorgängermodell verringert werden. Ebenso deutlich wird die Gewichtssteigerung am Beispiel der Mercedes-Benz E-Klasse, die seit 1948 180% an Gewicht zugelegt hat [Karb13].

Zusammengefasst stellt sich das Problem wie folgt dar: Leichtbau und Gewichtsoptimierung im Sinne einer Nachhaltigkeitsstrategie werden trotz der herausragenden Potenziale mechatronischer Produkte bei der Entwicklung dieser nicht systematisch betrachtet.

1.2 Fokus und Ziel der Arbeit

1.2.1 Abgrenzung und Hauptziel

Das Hauptziel der Arbeit leitet sich aus zwei verschiedenen Handlungsfeldern ab: einerseits das Verlangen nach gewichtsoptimierten Produkten als Teil einer Strategie für Nachhaltigkeit und nachhaltige Produkte, andererseits aus dem Innovationstreiben und der Multidisziplinarität mechatronischer Produkte.

Aktuelle und zurückliegende Forschungsaktivitäten im Bereich der Gewichtsoptimierung und des Leichtbaus konzentrierten sich bisher eher auf die Entwicklungen neuer Technologien in der Materialauswahl und Strukturauslegung. Die methodische Integration von Leichtbauaspekten in Produktentwicklungsprozesse stand dabei nicht im Vordergrund und wurde nur am Rande erwähnt. In der Mechatronik-Forschung stehen viele Prozesse und Methoden zur Verfügung, allerdings fehlt häufig deren Anwendbarkeit auf spezielle Hauptzielrichtungen (Design for X),

was auch auf die hohe Komplexität des Entwicklungsprozesses zurückzuführen ist, da die ganzheitliche domänenübergreifende Beurteilung von Lösungen zeit-/kostenintensiv und kompliziert ist [KrFG07].

Das Hauptziel der Arbeit ist die Bereitstellung einer Methodik, die zu einer Gewichtsoptimierung – als ein wesentlicher Bestandteil der Nachhaltigkeitsbestrebungen und ein Beispiel einer Ausrichtung auf Hauptzielrichtungen im Entwicklungsprozess – bei der Entwicklung mechatronischer Produkte führt.

Dabei scheint es sinnvoll, das Hauptziel in prozessbezogene Aspekte zur Beschreibung aller für den Entwicklungsprozess relevanten Punkte und in produkt- bzw. technologiebezogene Aspekte zur Darstellung der aus mechatronischen bzw. leichten Produkten stammenden Potenziale zu unterteilen. Der Fokus liegt prozesseitig auf der Betrachtung von Gewichtskriterien durchgängig über den gesamten Produktentwicklungsprozess, also von Anforderungen bis zum Endprodukt, und produktseitig auf einer Optimierung des mechatronischen Gesamtsystems. Die Methodik stützt sich dabei auf bekannte Methoden und Strategien aus dem Leichtbau und der Mechatronik, erhebt aber nicht den Anspruch, neue Technologien, z. B. neue Materialien oder mechatronische Systeme bereitzustellen, sondern vorhandene und neu entwickelte methodisch in einen adaptierten mechatronischen Entwicklungsprozess zu integrieren.

1.2.2 Forschungsfragen

Auf Basis dieser Abgrenzung und Festlegung des Hauptziels der Arbeit kann eine erste übergeordnete Fragestellung erarbeitet werden. Die übergeordnete Forschungsfrage lautet basierend auf der Motivation dieser Arbeit:

F0. *Wie können die Aspekte der Mechatronik und die Prinzipien des Leichtbaus systematisch in Form einer Methodik und von Methoden während der Produktentwicklung synergetisch genutzt werden?*

Zur Beantwortung der Hauptforschungsfrage ist eine Aufteilung in prozessbezogene und produktbezogene Aspekte, wie vorher beschrieben, sinnvoll. Durch die Zweiteilung der Problemstellung ergeben sich prozesseitig folgende Fragen:

F1. *Wie können im Rahmen dieser Arbeit Gewichtsaspekte in den mechatronischen Produktentwicklungsprozess integriert werden?*

F2. *Welche Bedeutung kommt im Rahmen dieser Arbeit den traditionellen Leichtbaustrategien und den Methoden der mechatronischen Produktentwicklung zu?*

Die produktseitigen Forschungsfragen lauten:

- F3.** *Wie kann ein mechatronisches System ganzheitlich betrachtet gewichtsoptimiert ausgelegt werden?*
- F4.** *Wie können (bereits vorhandene, technologisch bewährte) mechatronische Konzepte zur Gewichtsoptimierung eines Produktes beitragen?*

1.3 Vorgehen und Aufbau der Arbeit

1.3.1 Forschungsvorgehen

Das Vorgehen der vorliegenden Arbeit ist an die Design Research Methodology von Blessing und Chakrabarti [BlCh09] angelehnt. Die Methodik schlägt ein Vorgehen in vier Schritten vor. Ausgehend von der Klärung der Hauptforschungsfragen und des Fokus des Forschungsvorhabens in der Phase „*Research Clarification*“ erfolgt in der „*Descriptive Study I*“ die Beschreibung der aktuellen Situation im Stand der Technik und Wissenschaft, die Klärung der Defizite und die Herausstellung der zu verbessernden Faktoren. Die „*Prescriptive Study*“ beschreibt die Entwicklung und die Dokumentation des Ansatzes zur Abhilfe der vorher identifizierten Faktoren. Die „*Descriptive Study II*“ dient der Untersuchung und Evaluierung des erarbeiteten Ansatzes und gibt weitere Hinweise auf eine Verbesserung des erarbeiteten Ansatzes.

1.3.2 Aufbau der Arbeit

Die Arbeit ist entsprechend Abbildung 1.4 in sieben Kapitel gegliedert:

Das Einleitungskapitel stellt die Ausgangssituation sowie die Motivation der Arbeit vor. Ausgehend davon werden Zielsetzung und Fokus beschrieben. Darüber hinaus wird das Forschungsvorgehen nach der DRM-Methode formuliert und die Forschungsfragen, die während dieser Arbeit beantwortet werden sollen, gestellt. Kapitel 1 repräsentiert zum großen Teil die Phase „*Research Clarification*“ der DRM-Methodik.

Ausgehend von den Forschungsfragen werden in den Kapiteln 2 und 3 (nach DRM „*Descriptive Study I*“) einige Vorbetrachtungen sowie Begriffsklärungen sowie die Themen des Standes der Technik in den Gebieten „Mechatronischer Produktentwicklungsprozess“, „Gewichtsoptimierung technischer Produkte“ und „X-gerechtes/-orientiertes Entwickeln und Konstruieren“ dargestellt. Der Betrachtungsrahmen leitet sich dabei aus dem Titel der Arbeit und den Forschungsfragen ab. Der mechatronische Produktentwicklungsprozess bildet die Grundlage der zu entwickelnden Methodik dieser, wobei die Methoden der Gewichtsoptimierung und die Einbindung

allgemeiner und spezifischer Entwicklungsziele in einen Entwicklungsprozess technischer Produkte zusätzlich dargestellt werden.

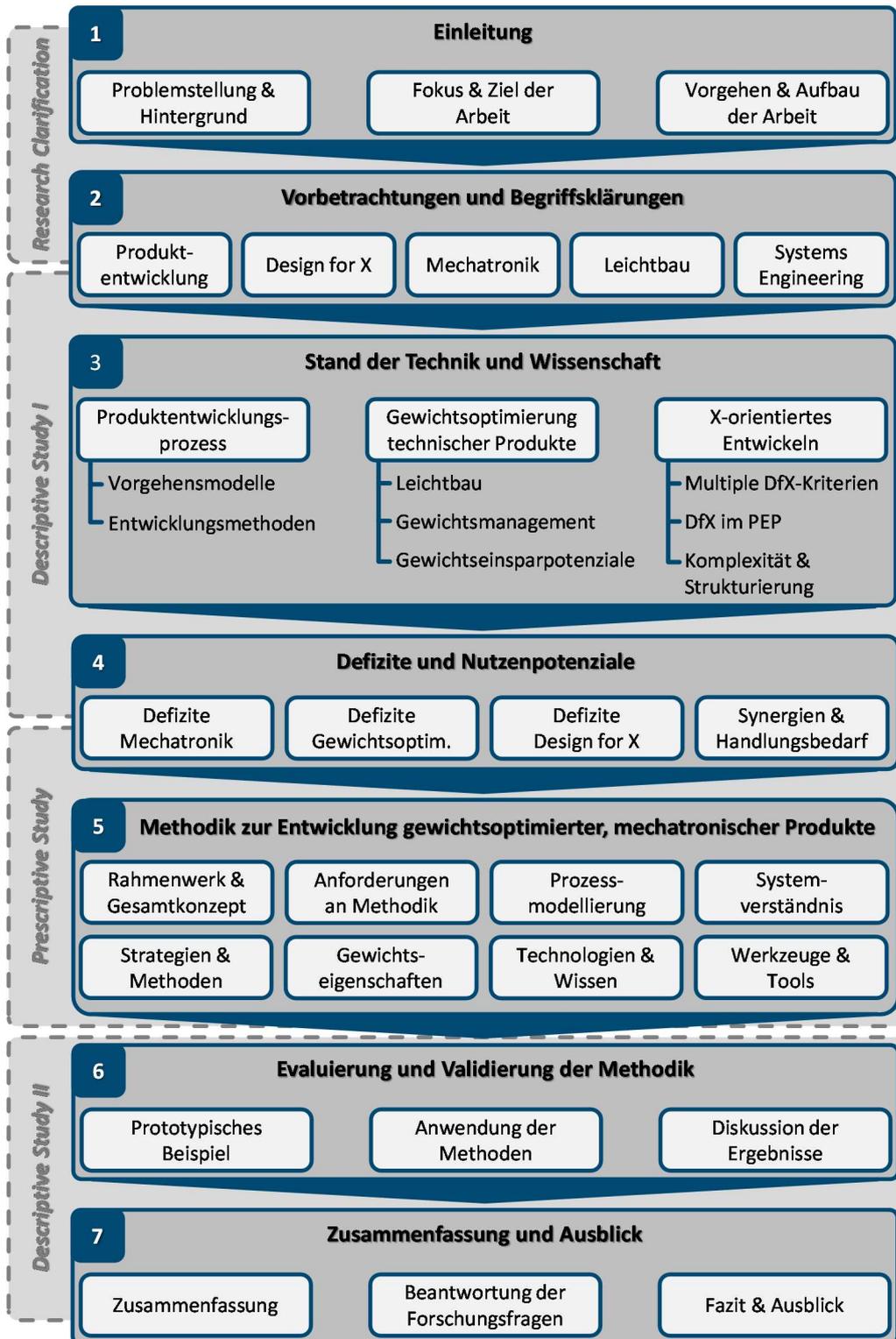


Abbildung 1.4: Aufbau der Arbeit

Kapitel 4 fasst die Erkenntnisse aus den Analysen der drei oben genannten Grundlagenthemen zusammen und stellt neben Synergien und Nutzenpotenziale in einer gemeinsamen Betrachtung dieser Themen – was einer Schärfung der Forschungsfragen und Forschungshypothesen

entspricht – die Anforderungen an eine integrierte Methodik vor. Dieses Kapitel kann als Übergang von der deskriptiven Phase zur präskriptiven Phase nach DRM gesehen werden. In Kapitel 5 als präskriptiver Anteil dieser Arbeit wird der Ansatz für die Methodik zur Entwicklung gewichtsoptimierter, mechatronischer Produkte präsentiert. Das Gesamtrahmenwerk adressiert vor allem die Themen „Prozesse und Vorgehensmodelle“, „Methoden und Werkzeuge“, „Systemverständnis“ sowie „Technologien“. Der zweite deskriptive Teil dieser Arbeit beschäftigt sich in Kapitel 6 mit der Evaluierung und Validierung des im vorangegangenen Kapitel vorgestellten Ansatzes. Basierend auf einem prototypischen Beispiel (Elektroantrieb eines Fahrrades) wird die Methodik angewandt. Das Kapitel schließt mit einer Diskussion der Ergebnisse. Die Arbeit schließt in Kapitel 7 mit einer Zusammenfassung und der Beantwortung der Forschungsfragen. Desweiteren werden die durch die Diskussion und die Evaluierung der Methodik kenntlich gemachten Limitationen der Methodik angegeben sowie ein Ausblick auf ein weiteres Forschungsvorgehen gegeben.

2 Vorbetrachtungen und Begriffsklärungen

Nachdem Kapitel 1 die Problemstellung und die Motivation der vorliegenden Arbeit darlegt, beschreibt Kapitel 2 allgemein Vorbetrachtungen und Begriffsklärungen für die in dieser Arbeit relevanten Gebiete. Wie bereits im vorangegangenen Kapitel deutlich wird, ist die integrierte Betrachtung von Gewichtskriterien als ein Teil einer Nachhaltigkeitsstrategie im mechatronischen Entwicklungsprozess sehr vielschichtig. Dabei kommen vor allem Produktentstehungsprozesse, Design for X als Betrachtungsmöglichkeit von Hauptzielrichtungen, Mechatronik und Systems Engineering als übergeordnete Philosophie sowie das Gebiet des Leichtbaus in Betracht.

2.1 Produktentwicklung und Produktmodellierung

Die Ideen aus Produktentwicklung und Produktmodellierung bilden die Basis für die Erstellung einer Methodik. Im Weiteren wird daher der Begriff Produktentwicklung im Rahmen dieser Arbeit definiert sowie zwei Produktmodellierungsansätze, die für die Erarbeitung der Methodik von Bedeutung sind, vorgestellt.

2.1.1 Produktentwicklung

Die Produktentwicklung ist nach [Ehr109] ein Bestandteil der Produkterstellung bzw. Produktentstehung, die den Gesamtprozess beschreibt, bis ein Produkt in die Nutzungsphase eintritt. Also steht die Produktentstehung am Anfang jedes Produktlebenszyklus (vgl. Abbildung 2.1).

„Produkterstellung [analog dazu Produktentstehung] ist der gesamte Prozess, der abläuft, bis ein Produkt genutzt wird [...] die Phase der Entwicklung und Konstruktion [ist] Kern einer Produkterstellung [...]“ [Ehr109]

Nach [VDI2221] ist die Entwicklung ein „zweckgerichtetes Auswerten und Anwenden von Forschungsergebnissen und Erfahrungen“, wohingegen die Konstruktion die „Gesamtheit aller Tätigkeiten, mit denen – ausgehend von einer Aufgabenstellung – die zur Herstellung und Nutzung eines Produktes notwendigen Informationen erarbeitet werden und in der Festlegung der Produktdokumentation enden“ beschreibt. Im Rahmen dieser Arbeit werden die Begriffe wie nach der Auffassung von Ehrlenspiel synonym betrachtet.

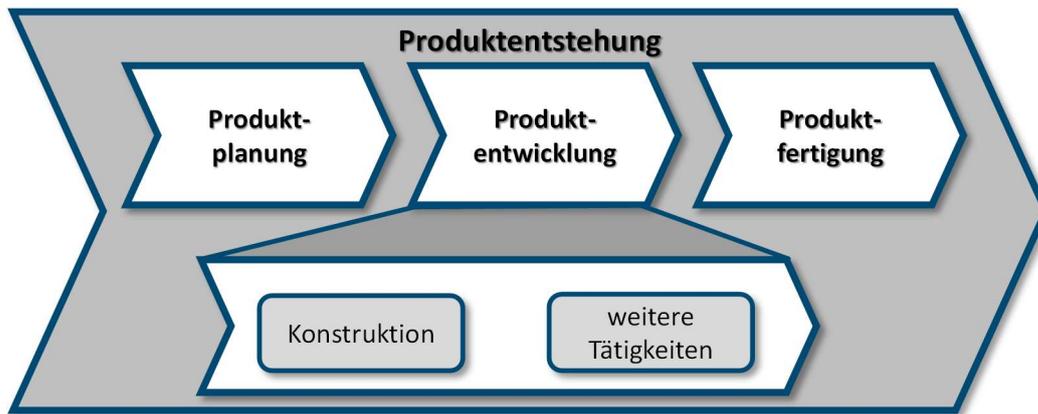


Abbildung 2.1: Produktentstehung

Die vorliegende Arbeit adressiert vor allem eine Produktentwicklungsmethodik oder Konstruktionsmethodik für gewichtsoptimierte, mechatronische Produkte. Eine (Konstruktions-)Methodik wird nach [PBF07] definiert als „ein geplantes Vorgehen mit konkreten Handlungsanweisungen zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme“, nach [VDI2223] als „ein planmäßiges Vorgehen unter Einschluss mehrerer Methoden, Arbeitsmittel (Hilfsmittel) und Instrumente. Ein Prozess ist nach [Este08] eine logische Abfolge von Tätigkeiten ohne Beschreibung der Ausführung („geplantes Vorgehen“), der durch Methoden, die die Ausführung der Tätigkeiten beschreiben, unterstützt wird („mit konkreten Handlungsanweisungen“). Werkzeuge dienen dagegen zur Effizienzsteigerung der Tätigkeiten. Somit vereint eine Methodik Prozesse und die dazugehörigen Methoden und Werkzeuge [Este08]. Dieses Begriffsverständnis wird im Rahmen dieser Arbeit angewandt.

Geschichtlich gesehen sind die Produktentwicklungsmethodiken von der mechanischen Seite her geprägt. Die ersten Ansätze gehen bis in die 1850er Jahre zurück. Es bildeten sich dabei bis in die heutige Zeit zwei Grundüberzeugungen auf: die pluralistische und die szientistische Konstruktionsmethodik [Heym05]. Zu den pluralistischen Ansätzen werden die Praktiker (Riedler, Ernst, Rauh), die pragmatischen Methodiker (Redtenbacher, Ehrlenspiel), die kritischen Methodiker und die flexiblen Methodiker (Kesselring, Pahl, Beitz) gezählt, die in den verschiedenen Abstufungen die künstlerischen Konstruktionstätigkeiten mit wissenschaftlichen Methoden unterstützen. Die Szientisten (Hansen, Rodenacker, Roth, Hubka) sehen Konstruktionstätigkeiten allein durch wissenschaftliche Methoden möglich.

2.1.2 Produktmodellierung und Produktkonkretisierung

Die meisten Produktentwicklungsmethodiken beschreiben einen Entwicklungsprozess, bei dem das zu entwickelnde System verschiedene Produktreifegrade durchläuft. Dabei werden die Eigenschaften des Systems immer detaillierter, je weiter der Entwicklungsprozess fortgeschritten ist. Die Produktmodellierung dient dazu, die Komplexität eines Produktes mithilfe einer Systembetrachtung zu beherrschen. Nach [GAPW93] ist ein Produktmodell ein formales Abbild realer oder geplanter Produkteigenschaften. Auf den Entwicklungsprozess übertragen ist ein Produktmodell nichts anderes als die Bereitstellung von Produktinformationen aus Ergebnissen von Arbeitsschritten in Form technischer Dokumente, so z. B. die Anforderungsliste, ein Funktionsmodell, ein Wirkmodell oder ein physikalischer Prototyp. Somit kann der Entwicklungsprozess als Vorgehensweise oder Navigation durch den Modellraum angesehen werden. Allgemein wird der Modellraum durch drei Dimensionen beschrieben: Der Konkretisierungsgrad legt die Ordnung der entstehenden Ergebnisse des Entwicklungsprozesses fest, der Zerlegungsgrad beschreibt die Aufteilung eines Gesamtproblems in Teilprobleme und der Variationsgrad ordnet die zu einem gewissen Zeitpunkt betrachtete Menge an Lösungsalternativen. [PoLi11]

In der Literatur sind eine Vielzahl von Konkretisierungsmodellen bekannt, z. B. die Produktkonkretisierung nach [Rode91], die Produktkonkretisierung nach [PBFG07], das Pyramidenmodell nach [Ehr109] oder der Modellraum des Konstruierens nach [Rude98] u.v.m. Diese Arbeit verwendet die Abstraktionsebenen des Münchener Produktkonkretisierungsmodells nach [Lind09] (siehe Abbildung 2.2). Darüber hinaus wird sich in dieser Arbeit auf die Begrifflichkeiten der CPM-Theorie von Weber (siehe dazu [WeWe00], [WeWe01], [Webe05], [Webe07]) bezogen, hier insbesondere die Unterscheidung zwischen Eigenschaften und Merkmale.

2.1.2.1 Münchener Produktkonkretisierungsmodell

Das Münchener Produktkonkretisierungsmodell orientiert sich an den bereits vorgestellten Modellen, ordnet aber die verschiedenen Abstraktionsebenen verschiedenen Komponenten zu: die Anforderungen werden im Anforderungsraum, Funktionen, Wirkprinzipien und physikalische Gestalt im Lösungsraum dargestellt. Dabei dient der Konkretisierungsgrad der Modelle als Orientierung im Entwicklungsprozess („vom Abstrakten zum Konkreten“). Mit dem Münchener Produktkonkretisierungsmodell wird die Wichtigkeit der Anforderungen in den Vordergrund gestellt. Dabei werden die Anforderungen nicht mehr auf einem höheren Abstraktionslevel als die Funktionen eines Produktes angesehen, sondern über den gesamten Entwicklungsprozess erweitert und spezifiziert. Dafür ist eine durchgängige Verifikation und Absicherung der Produktmodelle auf

den unterschiedlichen Abstraktionsebenen (Anforderungsmodell, Funktionsmodell, Wirkmodell und Baummodell) notwendig [PoLi11].

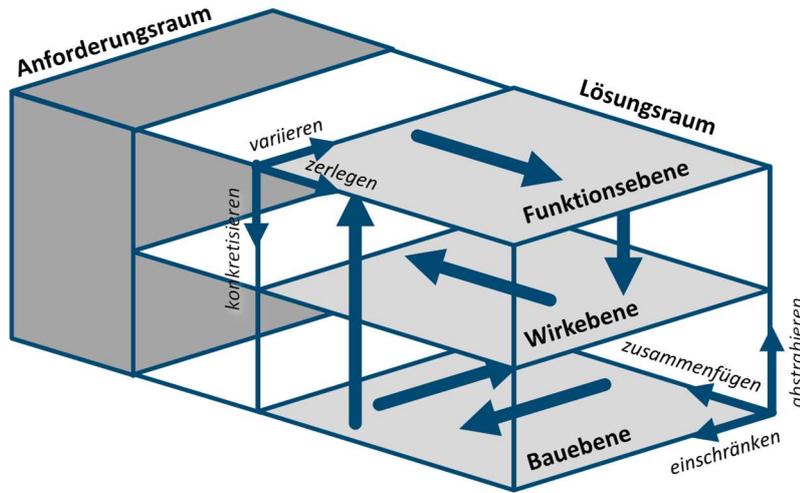


Abbildung 2.2: Münchener Produktkonkretisierungsmodell (nach [Lind09], [PoLi11])

2.1.2.2 Produktmodellierung mit Hilfe des CPM-/PDD-Ansatzes nach Weber

Die Produktmodellierungstheorie nach Weber ([WeWe00], [WeWe01], [Webe05], [Webe07]) basiert auf den Begriffen der Merkmale (*characteristics*) und Eigenschaften (*properties*). Merkmale beschreiben das Produkt und können direkt beeinflusst werden, wohingegen Eigenschaften das Verhalten des Produktes beschreiben und daher nur indirekt über die Merkmale beeinflusst werden können.

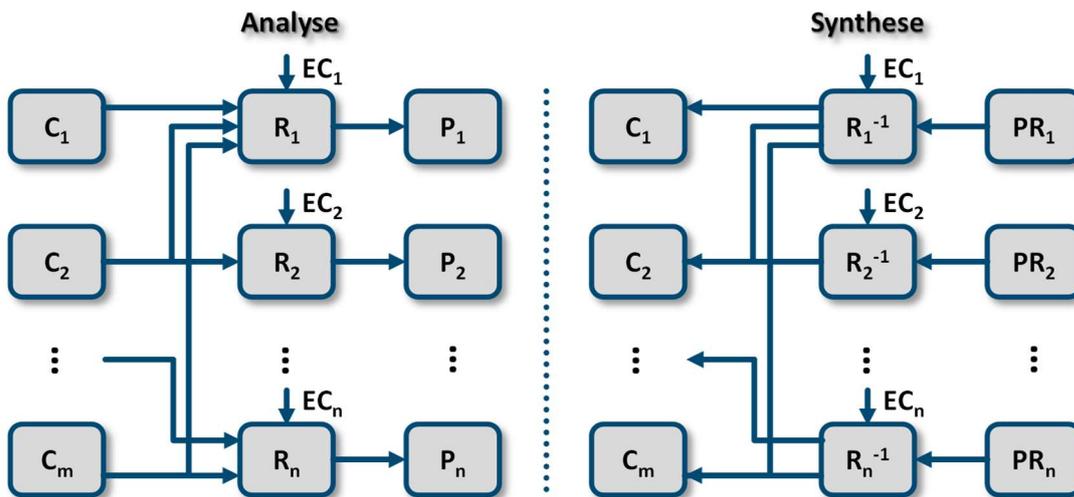


Abbildung 2.3: Beschreibung von Analyse und Synthese nach [WeWe00]

Auf der Basis der gegebenen Begrifflichkeiten beschreiben die Tätigkeiten, um von Merkmale zu Eigenschaften zu gelangen und umgekehrt, die Analyse- und Syntheseschritte eines Produktentwicklungsprozesses. Die Abhängigkeiten unter den Merkmalen werden durch die dependencies

dargestellt. Darüberhinaus beeinflussen äußere Bedingungen (*external conditions*) die Beziehungen zwischen Merkmalen und Eigenschaften.

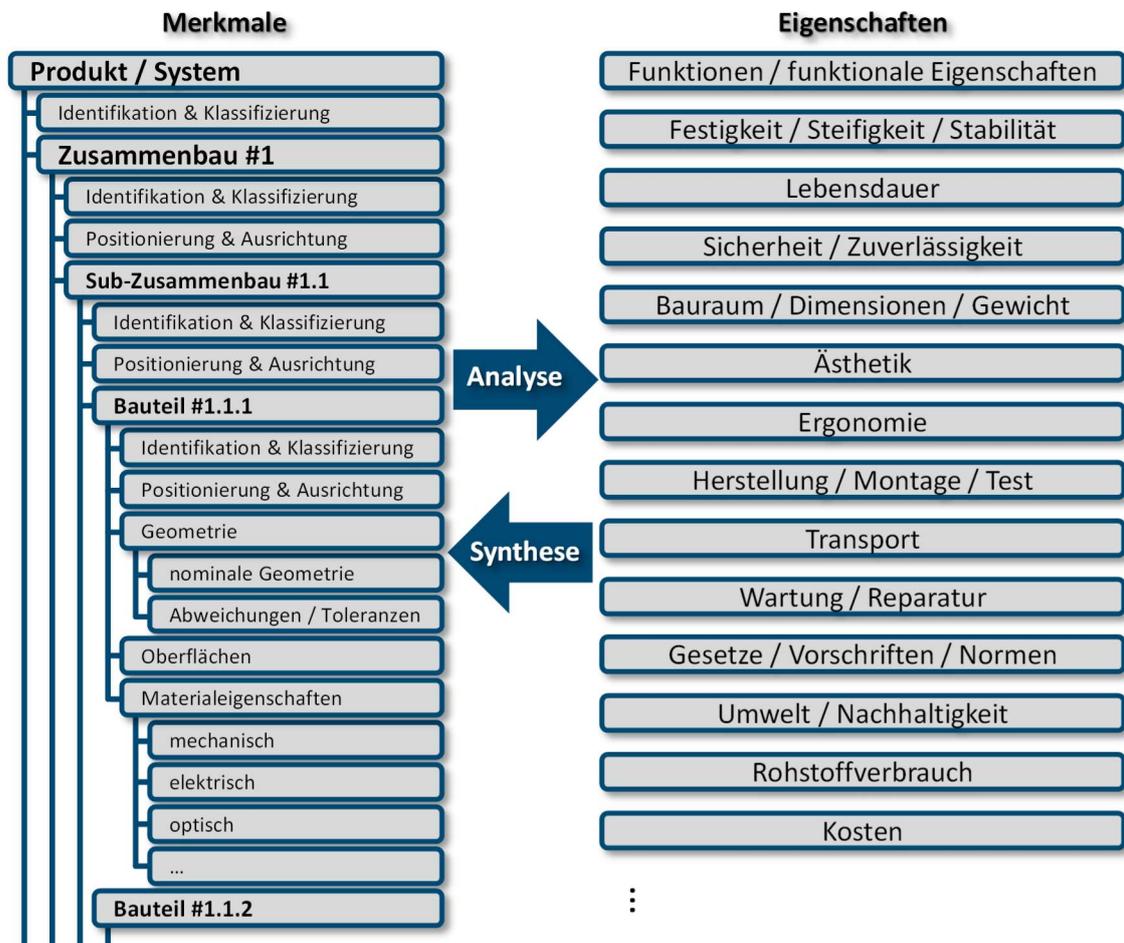


Abbildung 2.4: Beziehungen zwischen Merkmalen und Eigenschaften im CPM-Ansatz (nach [Webe07])

Die Merkmale und Eigenschaften stehen durch bestimmte Beziehungen (*relations*) in Verbindung. Eigenschaften können durch eine Analyse aus Merkmalen gewonnen werden, diese wiederum aus den Eigenschaften synthetisiert werden.

Der Ablauf des Produktentwicklungsprozesses nach PDD-Methode startet mit einem Synthesekreislauf, bei dem einige geforderte Eigenschaften mithilfe von Merkmalen über die inversen Beziehungen modelliert werden. Anschließend dienen diese festgelegten Merkmale dazu, die wirklichen Ist-Eigenschaften zu bestimmen. Der Abgleich und die anschließende Bewertung gibt Aufschluss über Abweichungen zwischen Soll- und Ist-Eigenschaften wieder. Diese Abweichungen bilden die Grundlage für die Anpassung der Merkmale im nächsten Prozessschritt.

Hauptzielrichtungen (Design for X-Kriterien) werden in der CPM-/PDD-Theorie durch sogenannte X-Systeme integriert. Durch die steigende Anzahl an festgelegten Produktmerkmalen und Pro-

dukteigenschaften im Prozess (siehe [Webe07]) – das entspricht einer Steigerung des Produktreifegrades – müssen diese X-Kriterien mehrmals über den Produktentwicklungsprozess mit unterschiedlichen Vorgehensweisen betrachtet werden.

2.2 Design for X

Design for X ist ein in der Wissenschaft weitläufig bekannter Begriff, der ein sehr komplexes Themengebiet umfasst. So stellt das X einen Platzhalter dar, der einerseits eine Phase des Produktlebenszyklus oder andererseits eine Eigenschaft des Produktes widerspiegelt, so z. B. fertigungsgerechtes oder leichtbaugerechtes Entwickeln. Auf dieser unterschiedlichen Grundlage ist die Diskussion unausweichlich, ob „Design for X“ der richtige Begriff für beide Ziele ist, wie die folgenden Definitionen auch zeigen werden. Im Rahmen dieser Arbeit ist Design for X ein wesentlicher Aspekt, um der Einbindung der Gewichtsoptimierung in den Entwicklungsprozess gerecht zu werden.

2.2.1 Definition des Begriffs „Design for X“

Für den Begriff „Design for X“ sind in der Literatur eine Vielzahl von Definitionen zu finden. Im Folgenden werden davon die wichtigsten erläutert. Desweiteren werden die oft synonym verwendeten Begriffe „Design for X“, „Design of X“ und „Design to X“ beschrieben, die im Rahmen der Arbeit allerdings unterschiedliche Bedeutungen aufweisen.

Hubka und Eder beschreiben DfX als ein Wissensspeicher, in dem festgelegt wird, wie Eigenschaften technischer Produkte konstruktiv zu erreichen sind.

„DfX ist ein Wissenssystem, in dem die Erkenntnisse, wie einzelne Eigenschaften technischer Systeme beim Konstruieren zu erreichen sind, in geeigneter Form gesammelt und geordnet werden.“ [HuEd96]

Im Gegensatz dazu stellt DfX für Huang lediglich Entscheidungstätigkeiten dar.

„[DfX is ...] making decisions in product development related to products, processes and plants.“ [Huan96]

Ehrlenspiel und Vielhaber sehen eine Unterscheidung zwischen Design to X und Design for X vor, wobei Design to X eher zielgerichteter auf allgemeine Ziele ausgerichtet ist, wohingegen Design for X eher spezifische Ziele anvisiert.

„Design to ist zielgerichteter, mehr quantitativ: z. B. „Design to a Cost Target“; Design for wird mehr allgemein benutzt; z. B. „Design for Disposal“ [...] die ins Einzelne gehende Behandlung des Konstruierens für Hauptforderungen (“Design to X”) [...] Gestaltungsrichtlinien („Design for X“) [...]“ [Ehr109]

„“Design to” and “design for” as terms used for design principles are not consistently distinguished between, sometimes even understood as more or less synonyms [...] “design to” will be applied for general targets or focal aspects of the design process (e.g., cost or quality), whereas “design for” will be used for (side) effects or follow-up processes to be suited by the design process (e.g., assembly or recycling). The former may therefore be of a more general character and influence a wider range of design process steps through primarily proactive measures, whereas the latter delivers more specific guidelines, often applied reactively and over a limited range of process steps around the embodiment design phase.“ [Viel11]

Andreasen und Hehenberger sehen ebenfalls eine Unterscheidung zwischen funktions- und zielorientierten Regeln, verzichtet aber auf eine Begriffsunterscheidung.

„DFX umfasst sowohl funktionsorientierte Regeln, z. B. fertigungsgerechtes Konstruieren, als auch Regeln, die auf Zielkriterien ausgerichtet sind, beispielsweise kostengerechtes Konstruieren.“ [Andr05]

„Design for X where X indicates product life phases like production and service or universal virtues like cost and quality [...]“ [AnMo97]

„Unter dem Begriff Design for X (DFX) werden Methoden und Werkzeuge verstanden, mit denen der Entwickler/Konstrukteur während des Produktentwicklungsprozesses spezifische Eigenschaften (z. B. Qualität, Kosten, Regelbarkeit, usw.) und Lebensphasen des Produktes (z. B. Fertigung, Montage, Wiederverwertung) beeinflussen und überprüfen kann. Das „X“ repräsentiert in diesem Sinne ein spezifisches Bewertungskriterium.“ [HeNZ05]

Bauer sieht in Design for X einen Denkansatz, der Methoden, Strategien und Methoden ganzheitlich für die Lösung einer Entwicklungsaufgabe betrachtet.

„[...] im Bereich der Produktentwicklung setzt sich mehr und mehr die Auffassung durch, dass Entwicklungsaufgaben künftig nur ganzheitlich, also unter gleichzeitiger Berücksichtigung verschiedenster Aspekte, zu lösen sind. Methoden, Strategien und

Werkzeuge, die von diesem Denkansatz inspiriert sind, werden allgemein mit dem Begriff „Design for X (DfX)“ in Verbindung gebracht.“ [Baue03]

Es ist ersichtlich aus den oben genannten Definitionen, dass eher allgemein gehaltene Definitionen für „Design for X“ (z. B. [Baue03], [AnMo97], [Andr05], [HuEd96]) als die Gesamtheit aller Anstrengungen angesehen werden, eine richtige Entscheidung unter bestimmten Vorgaben während des Produktentwicklungsprozesses zu treffen. Dagegen unterscheiden die Definitionen von [Viel11] und [Ehr09] „Design for X“ und „Design to X“, da die Maßnahmen zur Erreichung von bestimmten Zielen andere Granularitäten aufweisen. Design for X nimmt Bezug auf Merkmale eines Produktes zur Gestaltung eines Folgeprozesses, ohne sich auf eine Endeigenschaft des Produktes zu beziehen, wobei nicht auszuschließen ist, dass durch die getroffenen Entscheidungen eine Endeigenschaft beeinflusst wird. Dagegen bezieht sich Design to X auf eine zu erreichende Zieleigenschaft eines Produktes.

2.2.2 Begriffsdefinition „X-orientiertes Entwickeln“

Auf Basis der oben gezeigten und teilweise unterschiedlichen Auffassung von Design for X und zur Vermeidung von Unklarheiten scheint es sinnvoll, eigene Begriffe für den Kontext dieser Arbeit zu definieren. Dabei beschreiben Design for X und Design to X die unterschiedlichen Vorgehensweisen und Zielrichtungen.

„Design for X beschreibt die reaktive, methodische Unterstützung bei Entwicklung eines Produktes auf eine Eigenschaft – bestimmt durch ein Set von Merkmalen – hin, die nötig ist, um einen Folgeprozess im Produktlebenszyklus erfolgreich zu gestalten.“ [LuVi14b]

„Design to X beschreibt die proaktive, methodische Unterstützung bei Entwicklung eines Produktes auf eine Zieleigenschaft hin.“ [LuVi14b]

Zusätzlich wird folgender noch etwas weitergehender Begriff definiert, um Verwechslungen mit dem ursprünglichen Design for X-Begriff, der alle X-Zielrichtungen miteinbezieht, auszuschließen:

„Das X-orientierte Entwickeln bezeichnet die Sammlung aller [relevanten] Design for X- und Design to X-Kriterien.“ [LuVi14b]

2.3 Mechatronik

Der klassische Maschinenbau hat sich im Laufe der letzten beiden Jahrzehnte in Richtung der Mechatronik entwickelt. Grund dafür sind immer stärker werdende und vielfältige Kundenanforderungen sowie die Verkürzung der Produktlebenszyklen, wodurch eine Reduzierung der Entwicklungszeit erzwungen wird. Mit der Entwicklung mechatronischer Produkte geht eine hohe Innovationsrate einher, die den gestiegenen Anforderungen Rechnung tragen kann [HeNZ05].

2.3.1 Definition des Begriffs „Mechatronik“

Der Begriff „Mechatronics“ wurde erstmals 1969 von Ko Kikuchi, dem Präsidenten des japanischen Industrieunternehmens Yaskawa Electronic Corporation, geprägt. Damals wurde unter dem Begriff die elektronische Funktionserweiterung mechanischer Bauteile verstanden. Aus diesem Zusammenhang heraus ist auch das Kofferwort „Mechatronics“ als Kombination aus „Mechanics“ und „Electronics“ entstanden. 1972 wurde der Begriff „Mechatronics“ von der japanischen Patentorganisation als Marke geschützt.

„The word, mechatronics, is composed of “mecha” from mechanism and the “tronics” from electronics. In other words, technologies and developed products will be incorporating electronics more and more into mechanisms, intimately and organically, and making it impossible to tell where one ends and the other begins.” [Bish08]

Die erste deutschsprachige Definition des Begriffs „Mechatronik“ von Schweitzer stellt eine Weiterentwicklung der Technologie und damit des Begriffs dar, wobei alle Komponenten der klassischen Disziplinen, die entweder funktional oder räumlich vernetzt sind, als Mechatronik bezeichnet werden.

„Mechatronik ist ein interdisziplinäres Gebiet der Ingenieurwissenschaften, das auf den klassischen Disziplinen Maschinenbau, Elektrotechnik und Informatik aufbaut. Ein typisches mechatronisches System nimmt Signale auf, verarbeitet sie und gibt Signale aus, die es z. B. in Kräfte und Bewegungen umsetzt.“ [Schw89]

Die Japaner Harashima, Tomizuka und Fukuda erweitern die Definition um die integrierte Betrachtungsweise des Entwurfs und die Fertigung mechatronischer Produkte.

„[Mechatronics is] ... the synergetic integration of mechanical engineering with electronic and intelligent computer control in the design and manufacturing of industrial products and processes.“ [HaTF96]

Van Brussel stellt bei seiner Definition die domänenübergreifende Sichtweise bei der Entwicklung mechatronischer Systeme heraus.

„Mechatronics encompasses the knowledge base of and the technologies required for the flexible generation controlled motion.“ [Brus96]

„[Mechatronics needs]...a synergetic crossfertilization between the different engineering disciplines involved: mechanical engineering, control engineering, microelectronics and computer science. This is exactly what mechatronics is aiming at; it is a concurrent-engineering view on machine design.“ [Brus96]

Tomizuka beschreibt Mechatronik als die Integration von IT mit physikalischen Systemen sowie als den schwierigen Entscheidungsprozess während der Entwicklung und der Herstellung.

„The synergetic integration of physical systems with information technology (IT) and complex-decision making in the design, manufacture and operation of industrial products and processes.“ [Tomi02]

Die VDI-Richtlinie 2206 aus dem Jahre 2004 greift die Definition [HaTF96] von auf und geht in die Richtung der Prozessgestaltung in der Art, dass Mechatronik das Zusammenwirken der drei Einzeldisziplinen während des Entwurfs und der Herstellung beschreibt.

„Mechatronik bezeichnet das synergetische Zusammenwirken der Fachdisziplinen Maschinenbau, Elektrotechnik und Informationstechnik beim Entwurf und der Herstellung industrieller Erzeugnisse sowie bei der Prozessgestaltung.“ [VDI2206]

Die Begriffsklärung von Isermann beschreibt die Mechatronik als ein interdisziplinäres Gebiet, ohne auf weitere Einzelheiten aus Produkt- bzw. Prozesssicht einzugehen.

„[...] dass Mechatronik (im engeren Sinne) ein interdisziplinäres Gebiet ist, bei dem folgende Disziplinen zusammenwirken [...]: mechanische Systeme [...], elektronische Systeme [...], Informationstechnik [...].“ [Iser08]

Als Ergebnis dieser ganzen Definitionen und verschiedenen Sichtweisen kann weitestgehend übereinstimmend der interdisziplinäre Charakter der Mechatronik bestätigt werden. So wird Mechatronik als das synergetische Zusammenwirken der drei klassischen Ingenieurwissenschaften Maschinenbau, Elektrotechnik und Informationstechnik angesehen.

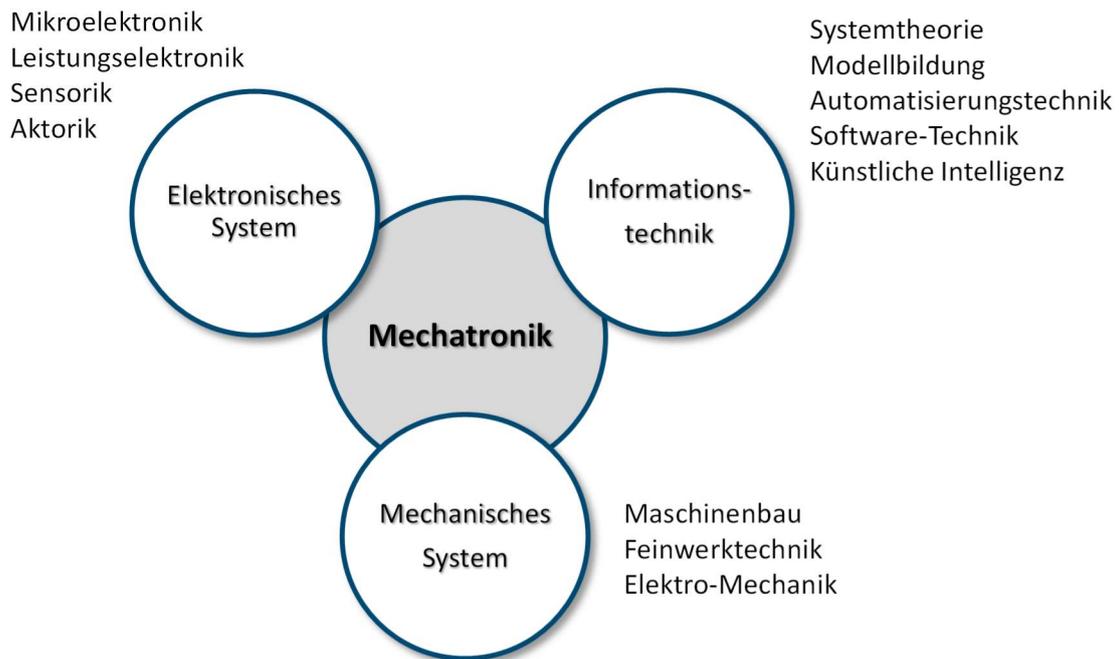


Abbildung 2.5: Mechatronik - Integration verschiedener Disziplinen [Iser08]

2.3.2 Das mechatronische System

Der allgemeine Aufbau eines mechatronischen Systems ist in Abbildung 2.6 dargestellt [VDI2206]. Es besteht grundsätzlich aus einem Grundsystem, welchem normalerweise eine mechanische, elektromechanische, hydraulische oder pneumatische Struktur bzw. eine Kombination aus den genannten zu Grunde liegt. Der Baustein der Informationsverarbeitung beeinflusst die Zustandsgrößen des Grundsystems in der gewünschten Weise („Regelkreis“).

Die Verbindung zwischen Grundsystem und Informationsverarbeitung erfolgt über Sensoren, die die Zustandsgrößen des Grundsystems messen und als Eingangsgrößen der Informationsverarbeitung dienen, und Aktoren, die die Einwirkungen von der Informationsverarbeitung auf das Grundsystem veranlassen. Zusätzlich können andere Informationsverarbeitungseinheiten über ein Kommunikationssystem bzw. der Mensch über eine Mensch-Maschine-Schnittstelle verbunden sein.

Ähnlich zu der Struktur des mechatronischen Systems nach [VDI2206] und [Wall95] gestaltet sich die Struktur für mechatronische Systeme nach Roddeck [Rodd12] (siehe Abbildung 2.7). Eine mechanische Struktur stellt hier ebenfalls die Basis dar, darüber hinaus dient ein Digitalrechner zur Verarbeitung der Sensordaten und zur Weitergabe der Aktordaten. Diese werden an Getriebe und Führungen weitergegeben, die Kräfte oder Bewegungen ausführen.

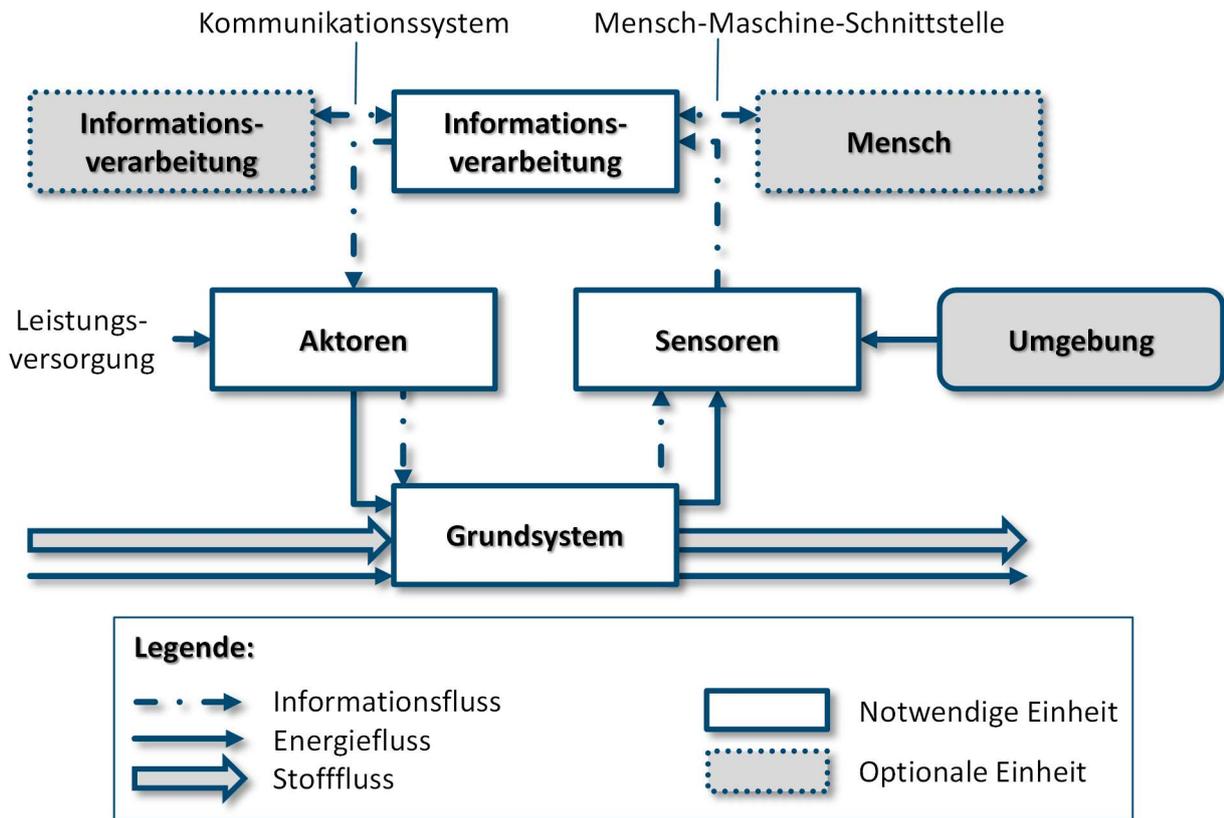


Abbildung 2.6: Grundstruktur eines mechatronischen Systems nach [VDI2206] und [Wall95]

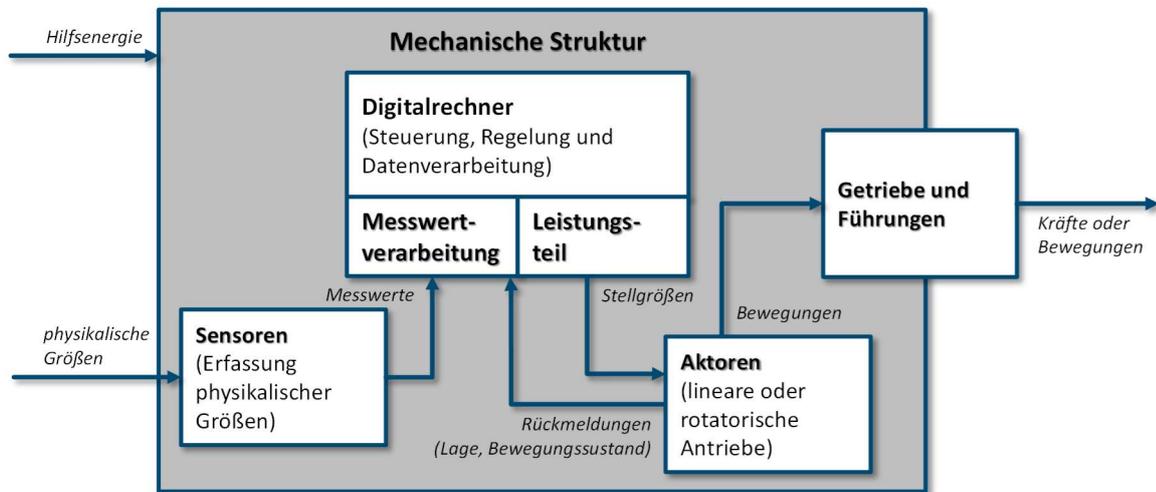


Abbildung 2.7: Grundstruktur eines mechatronischen Systems [Rodd12]

2.3.3 Erfolgspotenziale von mechatronischen Systemen

Aus dem synergetischen Zusammenwirken der Einzeldisziplinen ergeben sich folgende Erfolgspotenziale für mechatronische Systeme ([Jend03], [Moeh04], [Moeh09], [MoSt10]):

- Funktions- und Verhaltensverbesserung technischer Systeme
- Reduzierung von Baugröße, Gewicht und Kosten
- Neue Funktionen und Anwendungen

- Intelligente, selbstoptimierende Systeme
- Verbesserung der Lebensdauer und Zuverlässigkeit
- Verbesserung des Kosten-/Nutzenverhältnisses
- Erhöhung der Intelligenz dezentral oder vor Ort
- Reduzierung des Energiebedarfs
- Verbesserung der Ergonomie und der Mensch-Maschine-Interaktionen
- Holistischer und interdisziplinärer Blick auf das Gesamtsystem

Die Erreichung der Potenziale ist allerdings nur möglich, wenn die Komponenten und Bestandteile von mechatronischen Systemen funktional oder räumlich integriert werden [Moeh04]. Eine funktionale Integration von mechanischen mit elektrischen Komponenten wird mittels einer Stoff-, Energie- oder Signal-Verbindung realisiert. Die Komponenten können räumlich getrennt sein. Die räumliche Integration stellt eine bauliche Einheit im Sinne einer gemeinsamen Gestalt aus mechanischen und elektrischen Komponenten dar.

2.4 Leichtbau

Der Leichtbau fand seinen Beginn verstärkt am Ende des 19. und Anfang des 20. Jahrhunderts im Bereich des motorisierten Verkehrs mit der Entwicklung von Eisenbahn, Automobil und Flugzeug. Sogar Leonardo da Vinci kann durch seine Entwicklungen und Erfindungen im 16. Jahrhundert schon als Leichtbaupionier angesehen werden.

In der heutigen Zeit dient der Leichtbau eher für eine Effizienzsteigerung und die Reduzierung von Emissionen als früher, als Geschwindigkeit vor allem auch im Rennsport der Hauptgrund für das Treffen von Leichtbaumaßnahmen war. Besonders technologisch auf Werkstoffebene und Struktur unterscheiden sich die Fortbewegungsmittel der heutigen Zeit von denen aus der Vergangenheit. So halten Multi-Material-Design, Space-Frame-Strukturen sowie der Einsatz von neuen und weiterentwickelten Werkstoffen (z. B. ultrahochfeste Stähle, Carbon, ...) Einzug.

Technisch betrachtet spielt das Gewicht eine erhebliche Rolle bei der Energiegesamtbilanz von Fahrzeugen und Flugzeugen. So sind bei Fahrzeugen Rollwiderstand, Steigungswiderstand und Beschleunigung direkt von der Masse abhängig, bei Flugzeugen sind Schubkraft und Gewichtskraft masseabhängig. Somit können bei Verminderung des Gewichts die wesentlichen Einflussgrößen verbessert werden.

2.4.1 Begriffsdefinition „Leichtbau“

Wie auch die oben genannten Begriffe „Mechatronik“, „Systems Engineering“ und „Design for X“ existieren in der Wissenschaft viele verschiedene Definitionen des Begriffs „Leichtbau“, von denen im Folgenden einige vorgestellt wird.

Ehrlenspiel und andere verstehen unter Leichtbau lediglich eine Gewichtsminderung eines Produktes, ohne weiter zu spezifizieren, welche weiteren Aspekte und Kriterien beachtet werden müssen.

„[Leichtbau ist] die Gewichtsminderung einer Konstruktion.“ [Ehrl09]

„Leichtbau ist ein umfassendes Konstruktionsprinzip, welches das Ziel verfolgt, das Gewicht bzw. die Masse von technischen Produkten zu reduzieren.“ [DeLu09]

„Ultraleichtbau bedeutet: Das dem jeweiligen Stand der Technik erreichbare Optimum ausnutzen.“ [Hert80]

„[Leichtbau ist eine] Konstruktionstechnik, die unter integrativer Nutzung aller konstruktiven, werkstoff- und fertigungstechnischen Mittel bei einer Gesamtstruktur und bei deren Elementen die Masse reduziert und die Gebrauchsgüte erhöht.“ [WWW3]

Sobek erweitert seine Definition um den Aspekt der Ökologie.

„Leichtbau ist die Suche nach den Grenzen. Das Entwerfen der leichtestmöglichen Konstruktionen ist das Herantasten an das physikalisch und das technisch Machbare. Leichtbau ist bei vielen anspruchsvollen Konstruktionen nicht nur eine Grundvoraussetzung für deren Realisierbarkeit; er bedeutet in der Regel auch eine markante Ersparnis an eingesetzter Masse und Energie und hat somit klare ökologische Auswirkungen.“ [Sobe07]

Wiedemann, Klein und Schmidt sehen Leichtbau als eine Kombination aus verschiedenen Faktoren an: Neben einer Gewichtsminimierung müssen sowohl funktionale, ökonomische und ökologische Aspekte zu einer optimalen Gesamtlösung vereint werden.

„Leichtbau ist [...] eine Absichtserklärung aus funktionalen oder ökonomischen Gründen das Gewicht zu reduzieren oder zu minimieren, ohne die Tragfähigkeit, die Steifigkeit oder andere Funktionen der Konstruktion zu schmälern oder [...] die Tragfunktionen ohne Gewichtszunahme zu verbessern.“ [Wied06]

„[Leichtbau ist eine] Symbiose von wirtschaftlicher Gesamtlösung durch optimalen Werkstoffeinsatz und angepasste Bauweise bei bestmöglicher Ressourcenschonung.“
[Klei09]

„[...] versteht Leichtbau als die Anwendung von Strategien, Methoden und Werkzeugen zur Auswahl der Bauweise, Gestaltung und Werkstoffwahl mit dem Ziel der Massenreduktion von Produkten unter der Berücksichtigung der unterschiedlich gewichteten Kriterien Kosten, Funktion, Ökonomie und Ökologie.“ [Schm04]

2.4.2 Begriffsdefinition „Gewichtsoptimierung“

Aufgrund der sehr verschiedenartigen Definitionen bezüglich ihres Anwendungsgebietes, ihrer Philosophie und der Begriffsgranularität wird sich in der vorliegenden Arbeit nicht auf eine bestimmte Definition für den Begriff „Leichtbau“ festgelegt, sondern der Begriff „Gewichtsoptimierung“ etabliert, der den Begriff „Leichtbau“ als solches als Grundlage nimmt und erweitert. Der Begriff „Gewichtsoptimierung“ wird wie folgt definiert:

„Die Gewichtsoptimierung eines technischen Produktes ist (als Bestandteil des X-orientierten Entwickelns) eine systematisch-methodische Vorgehensweise während des Entwicklungsprozesses mit dem Ziel, das Produkt als Gesamtoptimum aus Gewichtskriterien (z. B. Gewicht, Gewichtsverteilung, Schwerpunktlage, ...), Funktionalität, Kosten und Qualität zu realisieren.“

Somit steht nicht die reine Gewichtsreduzierung im Vordergrund, sondern neben allen anderen vom Gewicht direkt beeinflussten Produkteigenschaften werden auch wirtschaftliche, funktionelle und Qualitätsaspekte in Betracht gezogen. Durch den Bezug auf ein Gesamtoptimum liegt nahe, dass eine systemische Ansicht auf das zu untersuchende Produkt notwendig ist.

2.5 Systems Engineering

Der Begriff des Systems Engineering wurde erstmals in den 1940er Jahren in den Bell Laboratories im Bereich der Telefonie benutzt. Nach dem Zweiten Weltkrieg wurde aufgrund der Bestrebungen der NASA in der Raumfahrt der Begriff aufgegriffen und stetig bis heute vor allem in militärischen Programmen weiterentwickelt. In den letzten Jahren hat das Systems Engineering auch in Industrieunternehmen Einzug gehalten, um die interdisziplinären und immer komplexer werdenden Neuentwicklungen aufgrund der stärkeren Kundenanforderungen bewältigen zu

können. Aus der Literatur sind einige Definitionen des Begriffs bekannt, die im Großen und Ganzen dieselbe Aussage vertreten.

Im Rahmen dieser Arbeit dient das Systems Engineering vor allem dazu, die Grundbegriffe zu definieren und die Wichtigkeit des Systemdenkens und der Systemgestaltung herauszustellen. Gerade in Bezug auf Leichtbau und Gewichtsoptimierung spielt der Systemgedanke eine wichtige Rolle, da – wie die Definitionen des Leichtbaus zeigen – einerseits nicht nur technische, sondern auch ökologische und ökonomische Probleme betrachtet werden sollen und andererseits dies immer zum Optimum des Gesamtsystems führen soll.

2.5.1 Definition der Begriffs „Systems Engineering“ und „Systemtechnik“

Wie die folgenden Definitionen des Begriffs zeigen, bezieht sich das Systems Engineering nicht nur auf technische Aspekte, sondern inkludiert auch Sozial- und Projektmanagementaspekte. Kossiakoff sieht das Systems Engineering als Leitfaden für die Ingenieurstätigkeiten in komplexen Systemen.

„The function of Systems Engineering is to guide the engineering of complex systems.“
[KSSB11]

Haskins sieht im Systems Engineering einen interdisziplinären Ansatz zur Realisierung erfolgreicher Systeme.

„Systems Engineering is an interdisciplinary approach and means to enable the realization of successful systems.“ [Hask06]

Die Federal Aviation Administration bezeichnet das Systems Engineering als eine Disziplin, die die Entwicklung eines Ganzen unter der Berücksichtigung von sozialen als auch technischen Kriterien als Hauptaufgabe hat.

„SE is a discipline that concentrates on the design and application of the whole (system) as distinct from the parts. It involves looking at a problem in its entirety, taking into account all the facets and all the variables and relating the social to the technical aspect.“ [FAA06]

Eisner definiert das Systems Engineering als einen iterativen Prozess zur Entwicklung von realen Systemen, die die gesamten Anforderungen erfüllen.

„Systems Engineering is an iterative process of top-down synthesis, development, and operation of a real-world system that satisfies, in a near optimal manner, the full range of requirements for the system.“ [Eisn02]

Die umfassendste Beschreibung liefert Kaffenberger mit einem interdisziplinären Ansatz, der Methoden zur Realisierung von Systemen bereitstellt, auf die Kundenbedürfnisse ausgerichtet ist und eine ganzheitliche Lösung in den Vordergrund stellt.

„Systems Engineering stellt einen interdisziplinären Ansatz dar und stellt die Methoden und Prozesse für die Realisierung von erfolgreichen Systemen zur Verfügung. Es ist auf die frühzeitige Klärung der Kundenbedürfnisse und der erforderlichen Funktionalität ausgerichtet und fordert die Dokumentation sämtlicher Anforderungen, bevor mit dem Entwurf und der Validierung eine ganzheitliche Lösung erarbeitet wird [...] Systems-Engineering berücksichtigt gleichermaßen die geschäftlichen und technischen Anforderungen mit dem Ziel der Erzeugung eines Qualitätsprodukts, das auf die Nutzerbedürfnisse zugeschnitten ist.“ [KaSW12]

Aus den vorangegangenen Definitionen wird klar, dass Systems Engineering „mehr“ ist als bestimmte Disziplinen aus der Technik. Oftmals wird es der Mechatronik-Entwicklung oder der Software-Entwicklung gleichgesetzt. Allerdings kann das Systems Engineering eher als eine Philosophie angesehen werden, bei der gewisse Einzelheiten aus technischen Einzeldisziplinen integriert und angewandt werden, so vor allem Vorgehensmodelle und Methoden.

Darüberhinaus bleibt festzustellen, dass das Systems Engineering neben den rein technischen Aspekten auch gesellschaftliche und „Management“-Aspekte fokussiert [MoSt10]. Damit liegt die Betrachtung nicht mehr nur auf die Entstehung eines Produktes, sondern auf den Gesamtlebenszyklus eines Produktes ausgedehnt. Durch das System Engineering werden somit auch Menschen und ihr Umfeld in Betracht gezogen. Die Mechatronik als interdisziplinäres Gebiet kann als Teil des Systems Engineering aufgefasst werden. Zusätzlich zum multidisziplinären, technischen Ansatz der Mechatronik betrachtet das Systems Engineering noch Aspekte des Projektmanagements, des sozialen Umfelds und des Produktlebenszyklus. Die Mechatronik-Entwicklung als solches unterscheidet sich also nicht im Groben vom Systems Engineering, da die Strategien, Methoden und Techniken für komplexe Produkte aus dem Systems Engineering kommen und angepasst werden [MoSt10]. Die verschiedenen Sichtweisen der beiden Gebiete stellen also die Unterschiede dar. Als Beispiel für Methoden aus der Systemtechnik, die in die mechatronische Entwicklung einfließen, seien hierbei das Entwicklungsvorgehen nach Top-Down-Prinzip (V-Modell

linker Ast), der allgemeine Problemlösungszyklus oder die Modellbildung mit systemtechnischen IT-Werkzeugen genannt (z. B. SysML).

2.5.2 Grundbegriffe und Merkmale von Systemen

Unter einem System wird im Rahmen des Systems Engineering nach [KaSW12] „eine Gruppe von interagierenden Elementen, die so organisiert sind, dass sie eine oder mehrere vorgegebene Aufgaben erfüllen“, verstanden. Dabei ist ein Element Teil eines Systems, das implementierbar ist zur Erfüllung der jeweiligen Aufgabe, wobei die Elemente untereinander wieder durch Beziehungen verbunden sind [HWFV12]. Ein System wird mit der Systemgrenze mehr oder weniger willkürlich von seinem Umfeld abgegrenzt.

Systeme selbst können unterschieden werden in Umfeldsysteme, also Systeme außerhalb der Systemgrenze mit Wirkung auf das betrachtete System, Übersysteme, wobei mehrere Systeme zu einem System zusammengefasst werden, und Untersysteme, wobei ein System in zahlreiche Systeme aufgegliedert wird.

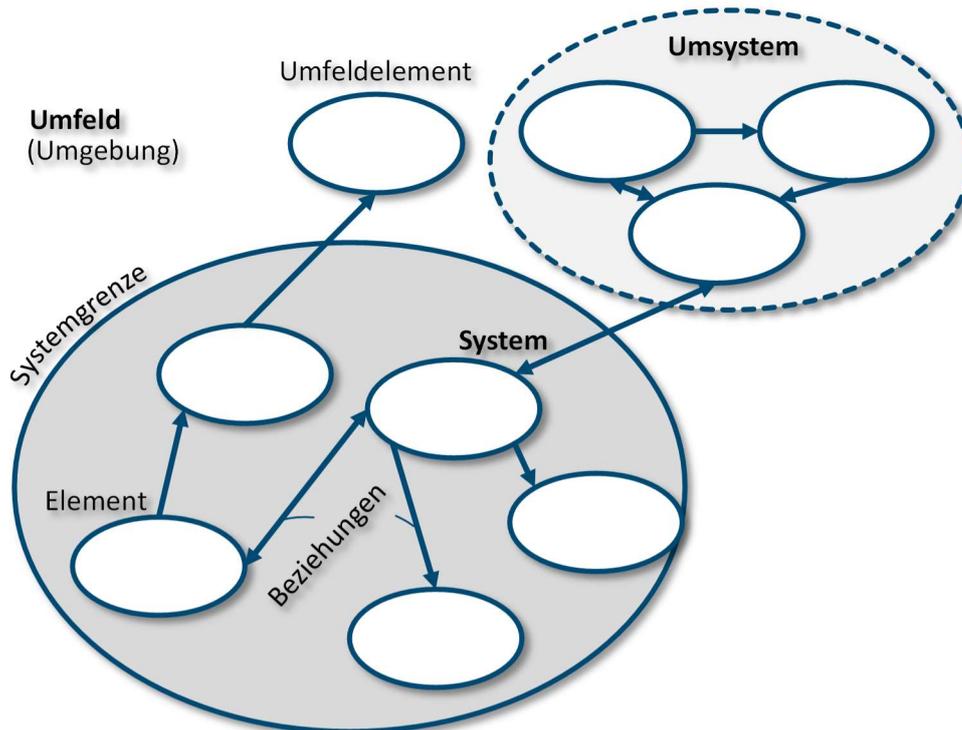


Abbildung 2.8: Grundbegriffe des Systemdenkens [HWFV12]

Die Ordnung von Elemente und Beziehungen zueinander werden als die Struktur eines Systems betrachtet. Der Systemaufbau wird hierarchisch bezeichnet, wenn das System über mehrere Schritte untergliedert wird, wie in zu Abbildung 2.9 erkennen ist. [HWFV12]

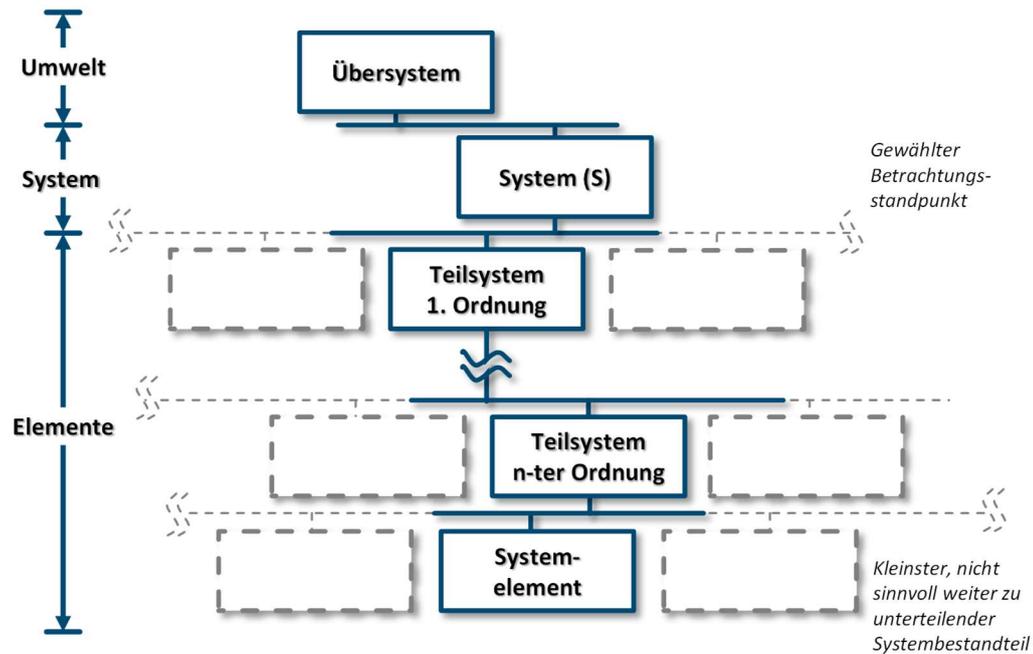


Abbildung 2.9: Systemhierarchie nach [Patz82]

Ausgehend von der Systemstruktur bzw. der Systemhierarchie spielt die Komplexität eines Systems eine Rolle bei der Entwicklung und Verwendung dieses System. Die Systemtypen gemäß ihrer Komplexität werden einerseits nach ihrer Dynamik und Veränderbarkeit sowie andererseits nach Vielfalt, Vielzahl und Größe der Systemelemente unterschieden.

Ein einfaches System besteht aus wenigen Elementen, wobei feste Beziehungen existieren, die eine geringe Beziehungsintensität aufweisen.

Das dynamische, komplizierte System unterscheidet sich vom einfachen System durch die Veränderbarkeit der Elementbeziehungen, die oft zeitlich nichtlineare Interaktion, Stärke und Struktur charakterisiert werden können.

Das massiv, vernetzte System zeichnet sich durch die hohe Anzahl und Arten an Elementen und statisch miteinander verbundene Beziehungen aus.

Im Gegensatz dazu entspricht das komplexe System einer Mischung aus dem dynamischen, komplizierten und dem massiv vernetzten, komplizierten System. Dabei gibt es eine hohe Anzahl an verschiedenartigen Elementen, deren Verbindungen untereinander dynamisch sind. Als Folge daraus entstehen systemweite Wechselwirkungen zwischen einzelnen Systemelementen.

[HWFV12]

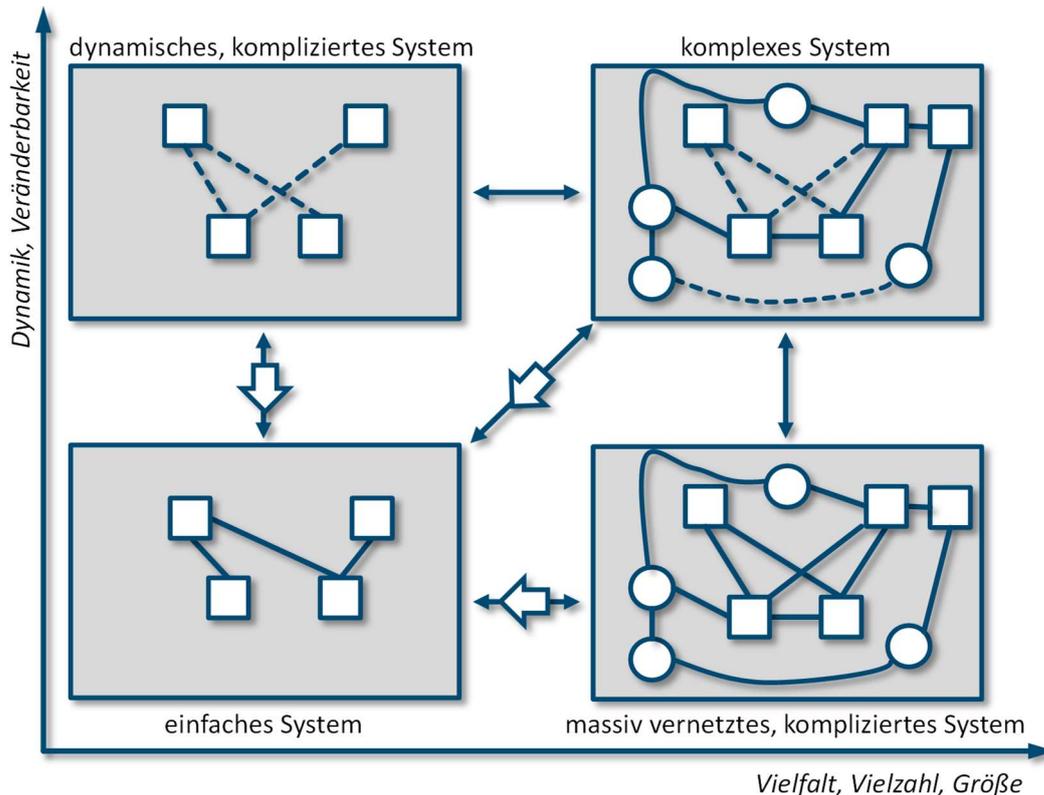


Abbildung 2.10: Systemtypen (siehe [HWFV12] nach [UIPr95] und [Band07])

2.5.3 Systemdenken und Systembetrachtung

Das Systemdenken spielt neben dem Vorgehensmodell die wesentliche Rolle bei der Umsetzung der Systems Engineering Philosophie. Es kann in drei Bestandteile untergliedert werden [HWFV12]: Beschreibung komplexer Gesamtheiten und Zusammenhänge, modellhafte Ansätze zur Veranschaulichung komplexer Erscheinungen sowie das gesamtheitliche Denken. [KaSW12] und [Hask06] bestätigen diese Ansicht und stellt weiterhin fest, dass mit dem Systemdenken eine besondere Sicht auf die Wirklichkeit dargestellt wird, die die Wahrnehmung von Ganzheiten und Wechselwirkungen zwischen deren Elementen verbessert.

Systeme können auf unterschiedliche Weisen betrachtet werden, wobei als Grundlage Systemmodelle dienen, die die komplexen Zusammenhänge in einem System darstellen. Beispiele für Systemmodelle sind Funktionsmodell, Anforderungsmodell, Verhaltensmodell oder Strukturmodelle [EiRZ14]. Die umfeld-/umgebungsbezogene Betrachtungsweise stützt sich auf die Berücksichtigung der Systemumgebung, ohne direkt das eigentliche System zu berücksichtigen. Das System selbst wird als Black Box definiert. Bei der wirkungsorientierten Betrachtung spielen die Auswirkungen des Systems auf seine Umgebung eine Rolle, die durch die Einwirkungen auf das System und sein Verhalten erzeugt werden (z. B. Funktionsmodell). Der strukturelle Aufbau und die

inneren Zusammenhänge eines Systems werden mithilfe der strukturorientierten Sichtweise dargestellt. Häufig werden dazu Graphen (z. B. Hierarchiemodell) oder Matrizen (z. B. Design Structure Matrix) verwendet. [HWFV12]

2.5.4 Vorgehensmodell

Der zweite Hauptbestandteil des Systems Engineering stellt ein Vorgehensmodell dar, das eine Reihe von Vorgehensempfehlungen und Richtlinien bereitstellt. Den Vorgehensmodellen des Systems Engineering zugrunde liegen vier Grundprinzipien, die kombiniert betrachtet werden müssen [HWFV12].

- Top-Down-Vorgehen
- Variantenbildung
- Projektphasen als Makro-Logik
- Problemlösung als Mikro-Logik

Diesen vier Grundprinzipien folgen verschiedene Vorgehensmodelle des Systems Engineering. Eine Übersicht dazu findet sich in [EiRZ14].

3 Stand der Wissenschaft und Technik

Im folgenden Kapitel werden relevante Vorarbeiten und Beiträge analysiert, die in Zusammenhang mit einer gewichtsoptimierten Entwicklung mechatronischer Produkte stehen. Dafür werden vor allem die folgenden Einzelthemen betrachtet:

- *Mechatronische Produktentwicklung (Kapitel 3.1)*
- *X-gerechtes und X-orientiertes Entwickeln und Konstruieren (Kapitel 3.2)*
- *Gewichtsoptimierung technischer Produkte (Kapitel 3.3)*

Daher wird im folgenden Kapitel zu jeden dieser genannten Bereiche eine ausführliche Literaturanalyse des Standes der Technik dargestellt. Im Hinblick auf das Ziel dieser Arbeit werden nur die wesentlichen Merkmale der Teilgebiete dargelegt. Für eine umfassende Beschreibung der Einzelgebiete wird auf die Fachliteratur verwiesen.

Ausgehend von diesen Betrachtungen und Analysen werden im nächsten Kapitel die Defizite und Potenziale der Einzelthemen aufgeführt, die die in Kapitel 1.2.2 dargelegten Forschungsfragen und somit den Fokus dieser Arbeit weiter schärfen sollen.

3.1 Mechatronische Produktentwicklung

Die mechatronische Produktentwicklung unterscheidet sich von den traditionellen Entwicklungsprozessen aus Mechanik, Elektronik und Software durch ihren integrativen Ansatz, bei dem die Einzeldisziplinen nicht mehr alleinstehend, sondern synergetisch betrachtet werden müssen. Allgemein zeichnen sich mechatronische Entwicklungsprozesse durch hohe Heterogenität, Multidisziplinarität und damit erhöhte Komplexität aus. Allgemein wird bei der Entwicklung mit wechselndem Detaillierungs- und Konkretisierungsgrad zur frühzeitigen Identifizierung von Wechselwirkungen innerhalb des mechatronischen Systems vorgegangen (siehe vor allem [LuVi12b], [Moeh04], [VDI2206]).

3.1.1 Mechatronischer Entwicklungsprozess

Die Mechatronik stellt faszinierende Erfolgspotenziale und Möglichkeiten zum Vorantreiben von Innovationen und Produktverbesserung zur Verfügung. Aufgrund der Einbeziehung der verschiedenen Wissensdomänen Maschinenbau, Elektrotechnik und IT existieren spezifische und heterogene Begriffe, Erfahrungen, Vorgehensweisen sowie Methoden. Daher sind eigenständige Entwicklungsmethodiken in Mechatronik erst in den letzten 20 Jahren entstanden.

3.1.1.1 Anforderungen an den mechatronischen Entwicklungsprozess

An den mechatronischen Entwicklungsprozess werden aufgrund von Heterogenität und Komplexität, die aus der Integration der drei beteiligten Domänen entstehen, zahlreiche Anforderungen gestellt [Moeh04].

Die Komplexität rührt von der hohen Anzahl vieler vernetzter Elemente aus den verschiedenen Disziplinen her, ein mechatronisches System ist also hochkomplex (vgl. Abbildung 2.10). Das führt zu vier hauptsächlichen Anforderungen aufgrund der Komplexität [Moeh04]:

- Ein Vorgehen mit wechselndem Detaillierungs- und Konkretisierungsgrad während der Entwicklung ist unabdingbar, da Wechselwirkungen innerhalb des Systems so früh wie möglich berücksichtigt werden müssen. Mit zunehmender Kenntnis der Systemeigenschaften kann das Gesamtsystemverhalten modelliert werden, was ein Wechselspiel zwischen domänenspezifischer einerseits und integrierter Betrachtung andererseits erfordert.
- Methoden zur Strukturierung und Hierarchisierung sind anzuwenden, um geeignete Strukturen zur Komplexitätsverringerung innerhalb des mechatronischen Systems zu realisieren.
- Eine frühe Modellbildung und Simulation ermöglicht eine Bestimmung des Systemverhaltens bereits in frühen Entwicklungsphasen.
- Eine integrierte Eigenschaftsabsicherung ist fortlaufend durchzuführen.

Lösungen für mechatronische Systeme bestehen aus Teillösungen der unterschiedlichen Disziplinen und sind daher sehr heterogen geprägt. Das Ziel ist die synergetische Nutzung der domänenübergreifenden Zusammenarbeit mit der Absicht, ein Gesamtoptimum zu erreichen [Moeh04]:

- Eine domänenübergreifende Zusammenarbeit ermöglicht eine integrative Erarbeitung von mechatronischen Lösungen.
- Eine domänenübergreifende Spezifikation ist notwendig, um den Entwicklungsfortschritt beschreiben zu können.
- Die Partitionierung dient zur Aufteilung der Systemfunktionen in Wirkprinzipien und Lösungselemente der involvierten Wissensdomänen zur Erreichung eines Gesamtoptimums. Es soll trotz der Heterogenität ein Minimum an Entwürfen und besonders Iterationen erreicht werden.

- Ein durchgängige und domänenübergreifende Modell- und Werkzeugintegration sichert die Qualität und Zeitersparnis bei der Entwicklung mechatronischer Produkte.

3.1.1.2 Vorgehensmodelle bei der Entwicklung mechatronischer Produkte

Bekannte Vorgehensmodelle aus der Entwicklungsmethodik sind unter bestimmten Aspekten und Rahmenbedingungen erstellt worden. Daher werden unterschiedliche Zielrichtungen und Probleme angesprochen, die sich in unterschiedlich ausgestalteten Sichtweisen, Prozessschritten und Reihenfolgen der Schritte widerspiegeln, wie an einem Überblick der Prozessmodelle z. B. in [EiRZ14] erkennbar.

Im Folgenden werden die Prozessmodelle für mechatronische Produkte weitergehend erläutert, die von Relevanz für die vorliegende Arbeit sind. Dazu zählt vor allen Dingen das Vorgehensmodell nach [VDI2206] aufgrund der Akzeptanz in der Wissenschaft und der guten Abbildung des Systementwurfs sowie davon abgeleitete Modelle wie das 3-Ebenen-Vorgehensmodell nach Bender [Bend05], das sich durch die Betrachtung verschiedener Systemebenen auszeichnet, und das W-Modell nach Nattermann/Anderl ([NaAn10], [NaAn11], [NaAn13]), das sich durch einen Zwischenschritt der virtuellen Systemintegration besonders hervorhebt.

Vorgehensmodell nach VDI 2206

Die VDI-Richtlinie 2206 [VDI2206] als bekanntestes Vorgehensmodell der Mechatronik-Entwicklung [EiRZ14] kann als Zusammenführung der bestehenden domänenspezifischen Entwicklungsmethodiken für mechatronische Systeme angesehen werden. Das ganzheitliche Vorgehen bei der Entwicklung mechatronischer Produkte nach VDI 2206 hat sich aus dem V-Modell aus der Software-Entwicklung [Vers94] entwickelt und handelt von der domänenübergreifenden Entwicklung mechatronischer Produkte. Es stellt besonders im Bereich des Systementwurfs die Vorgehensweisen, Methoden und die dazugehörigen Werkzeuge in den Fokus und basiert im Wesentlichen auf drei Elementen: einem Makrozyklus in Form eines V-Modells, der allgemeinen Problemlösung auf Mikroebene und vordefinierten Prozessbausteinen, die die Bearbeitung wiederkehrender Arbeitsschritte ermöglichen. Trotz dieser drei festgelegten Elemente stellt das V-Modell ein recht flexibles Vorgehen im Vergleich zu den althergebrachten Prozessmodellen aus dem Maschinenbau und der Elektrotechnik dar.

Das grundsätzliche und generische Vorgehen auf Makro-Ebene wird durch das V-Modell (siehe Abbildung 3.1) angegeben, welches die Reihenfolge der wesentlichen Teilschritte logisch wiedergibt: Systementwurf mit Entwicklung eines Gesamtkonzeptes, Detaillierung in den spezifischen

Entwurfsdomänen, Zusammenführung der Lösungen der Einzeldomänen in der Systemintegration sowie die Eigenschaftsabsicherung. Es kann durchaus vorkommen, dass die zeitliche Abfolge der Abarbeitung der Teilschritte nicht mit der logischen Reihenfolge aufgrund von Minimierung von Entwicklungsrisiken für kritische Teilsysteme übereinstimmt.

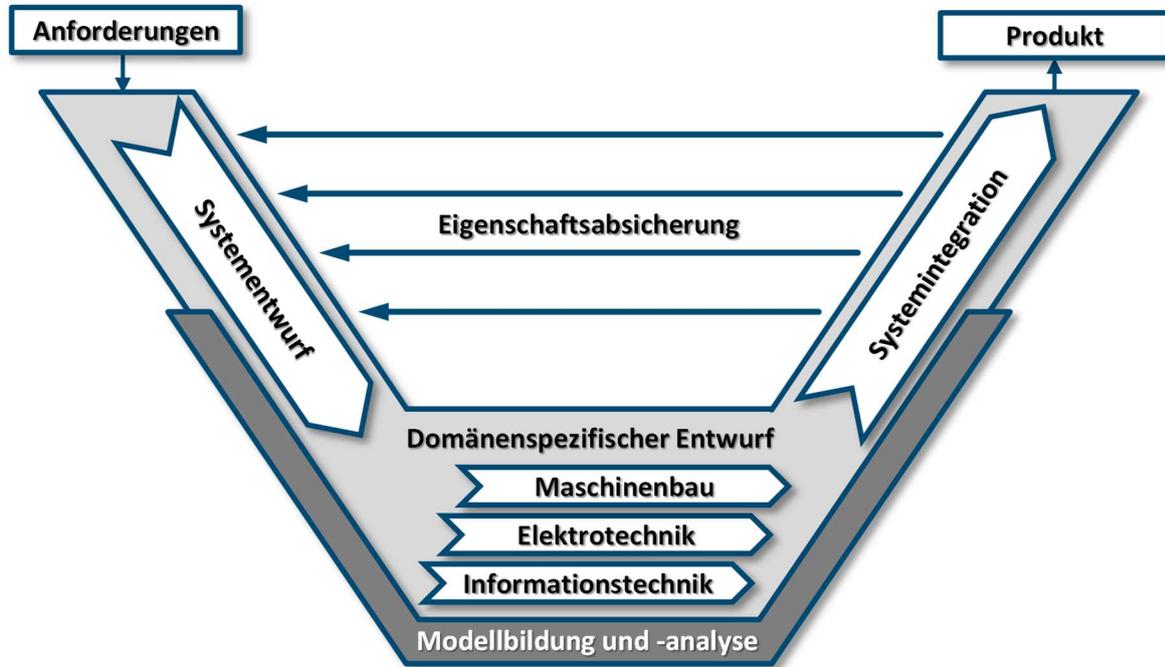


Abbildung 3.1: V-Modell als Makrozyklus der mechatronischen Produktentwicklung nach VDI 2206 [VDI2206]

Das Ergebnis eines jeden durchlaufenen Makrozyklus mit dem typischen Top-Down-/Bottom-Up-Vorgehen ist eine Konkretisierung des zu realisierenden Produktes. Somit erhöht sich der Produktreifegrad mit jedem Durchlauf, z. B. Labormuster, Funktionsmuster, Vorserie. Ein mehrmaliges Durchlaufen des V-Modells ist erforderlich zur Entwicklung eines komplexen mechatronischen Produktes [VDI2206].

Der allgemeine Problemlösungszyklus ([HWFV12], [Moeh04]) stellt das grundsätzliche Vorgehen bei der Lösung von Problemen dar, indem nach einer Situationsanalyse neue Lösungen generiert und ausgewählt werden, bevor weitere Schritte geplant werden.

Die Prozessbausteine im V-Modell detaillieren die Abläufe während der Hauptphasen. Die Tätigkeiten im *Systementwurf* sind in Abbildung 3.2 dargestellt. So erfolgt – immer mit Hinblick auf die Gesamtsystemsicht – nach dem Erstellen der Anforderungsliste ein Systementwurf, wobei ähnlich der VDI-Richtlinie 2221 [VDI2221] die Probleme abstrahiert, Funktionen modelliert, Wirkprinzipien gesucht und Lösung ausgewählt. Anschließend wird anhand der System-Baustruktur das domänenübergreifende Lösungskonzept bewertet und ausgewählt.

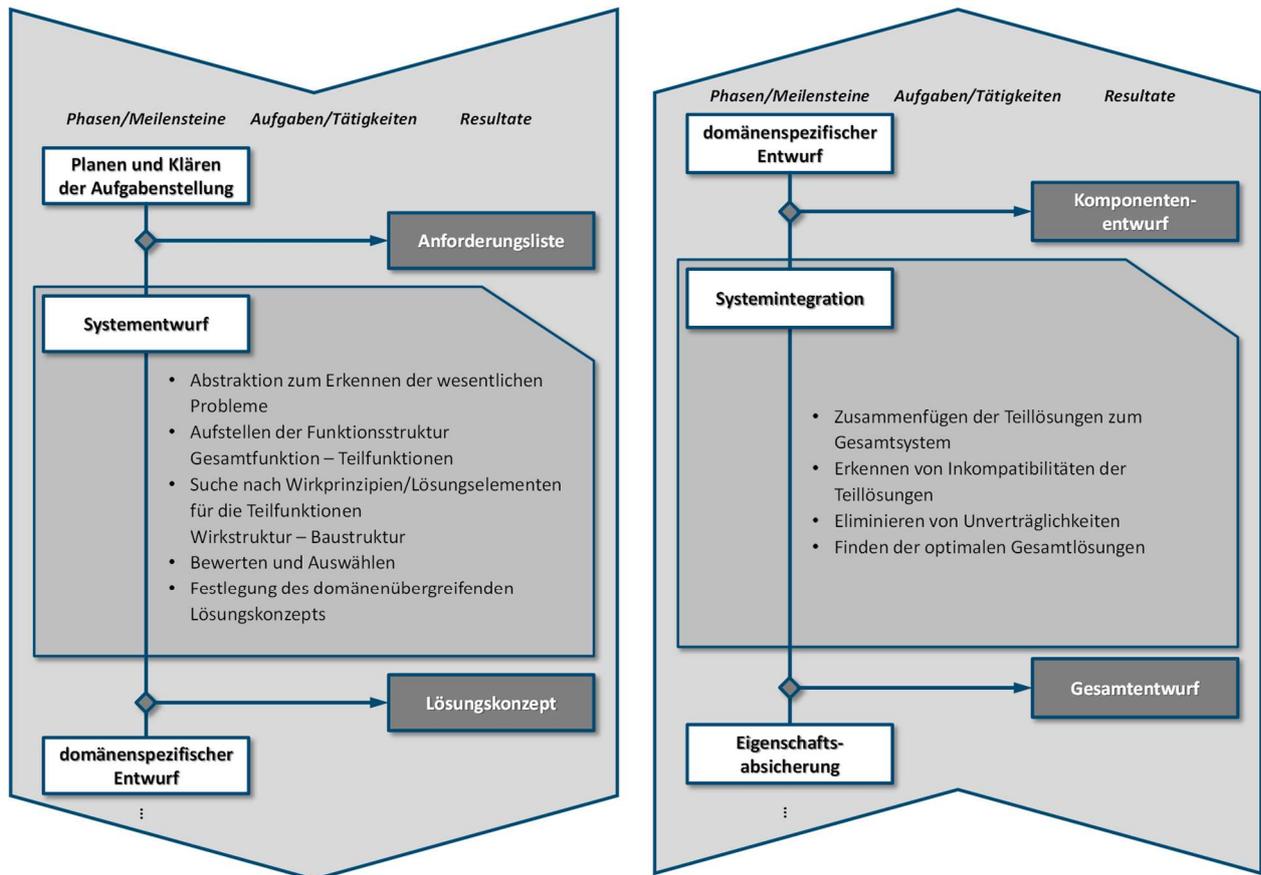


Abbildung 3.2: Tätigkeiten beim Systementwurf (links) und der Systemintegration (rechts) nach [VDI2206]

Basierend auf der domänenübergreifenden Systemlösung erfolgt die Detaillierung und Ausarbeitung der Einzeldomänen in der Phase des *domänenspezifischen Entwurfs* mit den allseits bekannten spezifischen Prozeduren und Methoden. Die Teillösungen der Einzeldisziplinen werden im Schritt der *Systemintegration* (siehe Abbildung 3.2) zusammengeführt und auf Inkompatibilitäten überprüft. Durch das Eliminieren von Unverträglichkeiten wird eine optimierte Gesamtlösung geschaffen, die dann im Rahmen der Eigenschaftsabsicherung mit dem Systemkonzept aus dem linken Ast des V-Modells verglichen wird.

Neben der *Eigenschaftsabsicherung* am Ende eines jeden Durchlaufs durch den Makrozyklus im Vorgehensmodell erfolgt eine ständige Analyse der Eigenschaften in den Mikrozyklen, also dem allgemeinen Problemlösungszyklus. Wie allerdings diese Analysen ablaufen, ist nicht näher beschrieben.

Der Makrozyklus wird durchgehend von Tätigkeiten der *Modellbildung und -analyse* begleitet, wobei deutlich wird, dass bei der Entwicklung mechatronischer Systeme eine Computerunterstützung zwingend erforderlich ist.

3-Ebenen-Vorgehensmodell nach Bender

Das Vorgehensmodell nach [Bend05] basiert in der Grundstruktur auf dem V-Modell, wie es aus der VDI-Richtlinie 2206 [VDI2206] bekannt ist. Das 3-Ebenen-Vorgehensmodell berücksichtigt ein optimiertes Vorgehen bei der qualitätsorientierten Entwicklung mechatronischer Produkte, wobei der Fokus im Speziellen auf Embedded Systems liegt. Zur Beherrschung der Komplexität ist das Vorgehen in drei Ebenen eingeteilt: System-, Subsystem- und Komponenten-Ebene.

Das Modell repräsentiert die drei Disziplinen Software, Hardware und Mechanik und berücksichtigt damit den multidisziplinären Charakter der Mechatronik-Entwicklung. Durch die drei parallel verlaufenden Handlungsstränge ist es durchaus möglich, bereits bekannte Prozeduren für die Einzeldomänen in einem gemeinsamen Vorgehen einzugliedern.

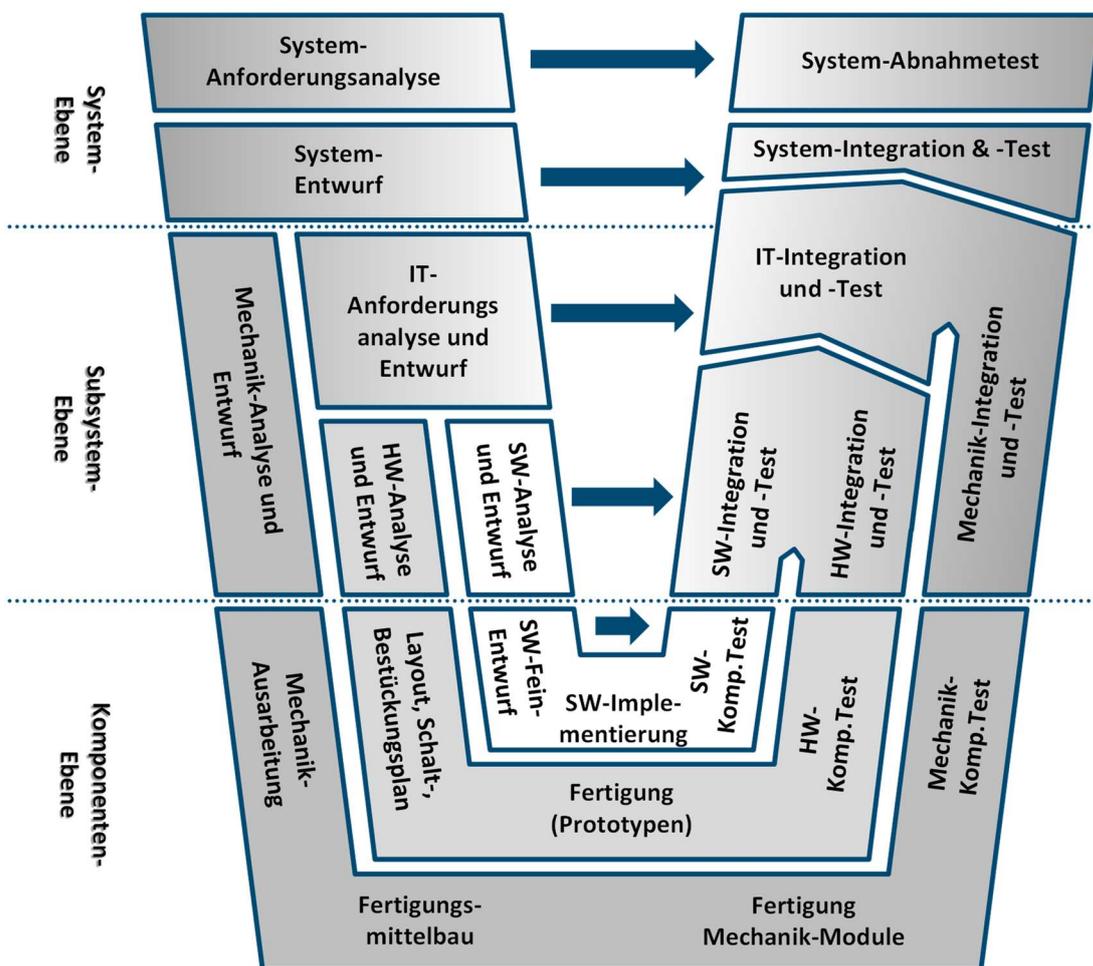


Abbildung 3.3: 3-Ebenen-Vorgehensmodell nach Bender [Bend05]

Der linke Ast des Vorgehensmodells beschreibt Entwicklungstätigkeiten der beteiligten Einzeldomänen, wohingegen der rechte Ast domänenspezifische und -übergreifende Analysetätigkeiten darstellt.

Im ersten Schritt erfolgen auf Systemebene eine Anforderungsbeschreibung und die Erstellung eines systemübergreifenden Gesamtentwurfs, der die Hauptfunktionen und die Abhängigkeiten untereinander fokussiert. Es entsteht somit eine logische Systemarchitektur. Auf Basis der dadurch entstandenen Funktionen und derer Schnittstellen erfolgt beim Übergang zur Subsystem-Ebene die Partitionierung des Gesamtsystems [ScZu03]. Dabei bestehen die Subsysteme aus Funktionsblöcken und stehen miteinander in Verbindung. Die Partitionierungstätigkeiten sollten derart ausgeführt werden, dass keine zu starken Vernetzungen zwischen Subsystemen bzw. Komponenten entstehen, da bei Steigerung der Komplexität eines Systems eine größere Fehleranfälligkeit und somit eine Erhöhung von Entwicklungskosten und -zeit einhergehen [HWFV12].

Auf Subsystem-Ebene werden die zu den Disziplinen zugeordneten Anforderungen erneut analysiert und durch die Detaillierung der zugehörigen Funktionen ein disziplinspezifischer Entwurf erstellt. Durch die autonome Bearbeitung der mechanischen Disziplin und der gemeinsamen Betrachtung von Hardware und Software entsteht eine technische Systemarchitektur [ScZu03].

Die unterste Ebene ist die eigentliche Umsetzung des Produktes. Die Einteilung der Subsysteme erfolgt in domänenspezifische Komponenten, die unabhängig voneinander entwickelt und detailliert werden können. Die Komponenten-Ebene bildet den Übergang von linkem Ast zu rechtem Ast des Vorgehensmodells, also dem Übergang von Entwicklungs- zu Prüftätigkeiten, wobei allerdings die zu testenden Fälle schon im linken Ast definiert werden. Nach einem disziplinabhängigen Komponententest erfolgt eine Integration in die spezifischen Subsysteme, die anschließend auf Systemebene zum Gesamtsystem zusammengeschlossen werden. Der Entwicklungsprozess wird mit einer Gesamtsystem-Analyse beendet.

W-Modell nach Nattermann/Anderl

Eine Weiterentwicklung der Vorgehensmodelle aus der VDI-Richtlinie 2206 [VDI2206] und dem 3-Ebenen-Vorgehensmodell bildet das W-Modell nach Nattermann und Anderl (siehe [NaAn10], [NaAn11], [NaAn13]), das auf die Entwicklung adaptronischer Systeme abzielt. Die W-Form wird durch einen Zwischenschritt verantwortet, der eine Systemintegration vor der endgültigen Detaillierung der beteiligten Domänen beinhaltet (Abbildung 3.4).

Die Entwicklungsschritte aus dem V-Modell werden übernommen und ergänzt. Systementwurf und Systemintegration bleiben unberührt. Die domänenspezifische Entwicklung wird dagegen in spezifische Lösungs- und Abhängigkeitsanalyse sowie detaillierte Ausarbeitung unterteilt. Zwischen den beiden Phasen auf Komponenten-Ebene erfolgt eine virtuelle Systemintegration mit

vorhandenen Modellen unterschiedlicher Abstraktionsebene. Die domänenspezifischen Lösungen im Gesamtsystem-Kontext werden abgesichert, ohne auf eine vollständige Systemintegration zugreifen zu müssen. Im Hinblick auf Gewichtsoptimierung ist eine solche vorläufige, nicht vollständige Systemintegration hilfreich zur Abschätzung der Auswirkungen von gewichtsoptimierten Komponenten oder Subsystemen auf das Gesamtsystem.

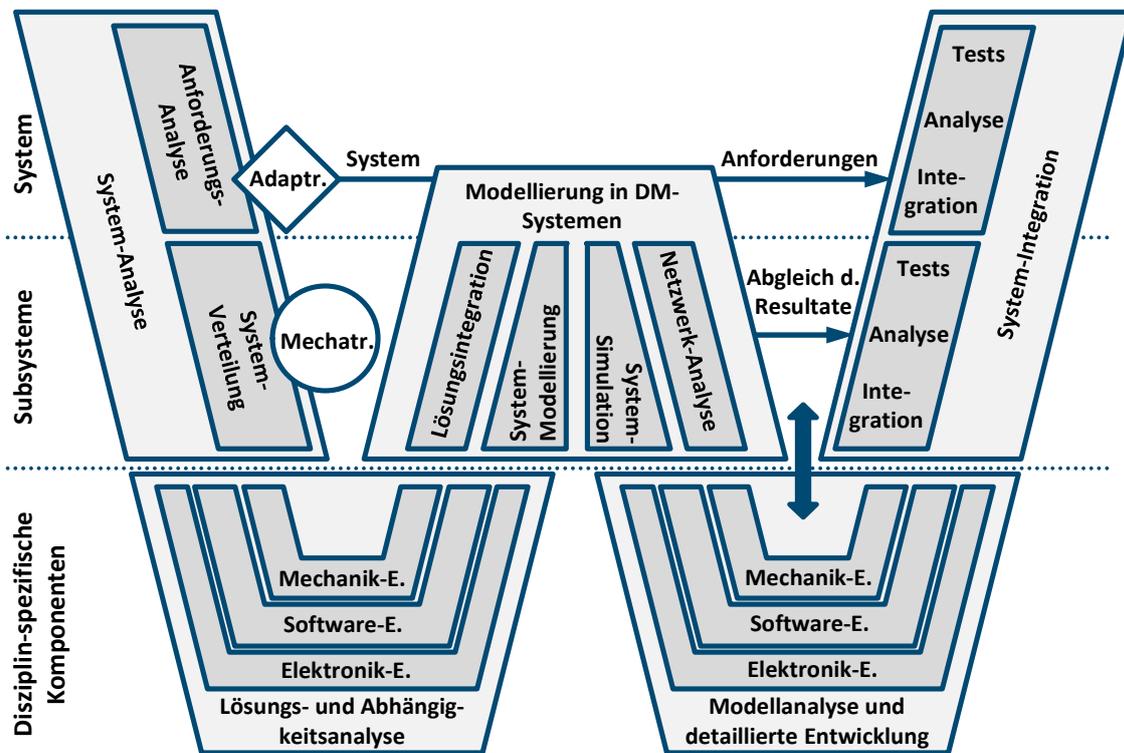


Abbildung 3.4: W-Modell für die Entwicklung adaptiver Systeme (nach [NaAn10], [NaAn11], [NaAn13])

3.1.2 Spezifische Methoden bei der Entwicklung mechatronischer Produkte

Die Mechatronik erfordert neben den allgemein bekannten Methoden während der Entwicklung (ein Überblick bietet [SaVe92]) spezifische Methoden aufgrund der Anforderungen aus Heterogenität und Komplexität, auf die schon in Kapitel 3.1.1.1 näher eingegangen wurde. Vor allem sind dabei Methoden zur Strukturierung und Modularisierung, Methoden der Sicherheitstechnik, Modellbildungsmethoden und Spezifikationstechniken zu erwähnen.

3.2 X-gerechtes und X-orientiertes Entwickeln und Konstruieren

Im Rahmen dieser Arbeit ist das X-orientierte Entwickeln ein wesentlicher Aspekt, um die Einbindungen von Zielkriterien (hier: Gewichtskriterien) in den Entwicklungsprozess systematisch durchzuführen.

Aufbauend auf einer Literaturrecherche werden folgende Forschungsbereiche näher betrachtet:

- Allgemeine Grundlagen des X-orientierten Entwickelns (Kapitel 3.2.1)
- Überblick über die wichtigsten Richtlinien für X-Kriterien (Kapitel 3.2.2)
- X-Kriterien im Entwicklungsprozess (Kapitel 3.2.3)
- Komplexität und Strukturierung des X-orientierten Entwickelns (Kapitel 3.2.4)
- Entscheidungsfindung bei multiplen X-Kriterien (Kapitel 3.2.5)

3.2.1 Allgemeine Grundlagen des X-orientierten Entwickelns

Über den gesamten Produktentstehungsprozess und sogar Produktlebenszyklus sind Produkte ständig gewissen Restriktionen ausgesetzt, z. B. durch Gesetze, Kundenanforderungen oder Fertigungsverfahren [MWBK12]. Dafür stellt die Konstruktionsmethodik zahlreiche Gestaltungsrichtlinien bereit, die allgemein unter dem Begriff Design for X zusammengefasst werden. Um allerdings Unklarheiten bezüglich der Begriffsauffassung zu vermeiden, wird – wie in Kapitel 2.2.2 beschrieben – der Oberbegriff X-orientiertes Entwickeln verwendet, da Design for X und Design to X unterschiedliche Aspekte des Entstehungsprozesses und des Produktes widerspiegeln. In der industriellen Praxis ist der Begriff „Design for X“ (bzw. „X-orientiertes Entwickeln“) noch wenig verbreitet, obwohl schon die meisten Entwicklungs- und Konstruktionsprozesse auf X-Kriterien eingehen. Dagegen hat sich der Begriff „Frontloading“ verbreitet [MWBK12]. Dabei bezeichnet Frontloading die Verschiebung der Entwicklungsleistungen durch eine Verschiebung der Problemidentifikation und -lösung hin zu früheren Phasen des Entwicklungsprozesses [ThFu00].

3.2.2 Überblick über die wichtigsten Richtlinien für X-Kriterien

Die meisten Gestaltungsrichtlinien und Methoden des X-orientierten Entwickelns sind auf das Erfahrungswissen einiger Entwicklungsingenieure zurückzuführen und adressieren die späten Phasen des Entwicklungsprozesses. Eine Übersicht (siehe Tabelle 3.1) von [Lind07] zeigt eine Vielzahl von X-Kriterien, wobei kein Anspruch auf Vollständigkeit erhoben wird.

Darüber hinaus werden fünf Schritte in [Lind07] angegeben, mit denen zukünftig entstehende und schon bestehende X-Kriterien angepasst werden sollen:

- X-Prozesse sollten situationsabhängig sein.
- X-Prozesse sollten flexibel einsetzbar und anpassbar an wechselnde Situationen sein.
- X-Prozesse sollten die Wechselwirkungen innerhalb bestimmter Domänen berücksichtigen.
- X-Prozesse sollten Abhängigkeiten zwischen Elementen aus unterschiedlichen Domänen betrachten.

- X-Prozesse sollten vor allem die frühen Entwicklungsphasen unterstützen, d.h. sogenanntes „Front-Loading“.

Tabelle 3.1: Beispiele für das "X" beim X-orientierten Entwickeln (nach [Lind07])

Zugänglichkeit	Lieferzeit	Zuverlässigkeit	Mitarbeiterqualifikation
Ästhetik	Demontage	Logistik	Qualität
Montage	Vertrieb	Langlebigkeit	Recycling
Automation	Emissionen	Wartungsfreundlichkeit	Ressourcen
Verfügbarkeit	Energieverbrauch	Fertigung	Robustheit
Baubarkeit	Umwelt	Fehlgebrauch	Sicherheit
Tauglichkeit	Ergonomie	Überwachung	Service
Reinigung	Erfahrung	Risiko	Größe
Komfort	Fehlertoleranz	Durchführbarkeit	Toleranzen
Unternehmensziele	Globalisierung	Durchführungskosten	Varianten
Mitbewerber	Innovation	Durchführungsfehler	Nutzbarkeit
Komplexität	Just-In-Time	Betrieb	Erweiterungsfähigkeit
Unternehmensidentität	Wissen	Überlastung	Testing
Kosten	Gesetze	Leistung	Gewicht
Kunde	Lebenszykluskosten	Produktion	...

3.2.3 X-Kriterien im Entwicklungsprozess

Die Hauptzielsetzungen eines Entwicklungsprozesses werden oftmals mehrmalig über den gesamten Prozess betrachtet und bedürfen deshalb jeweils Entscheidungstätigkeiten. Dieses Vorgehen ist unabhängig, ob die Kriterien nach Design for X oder Design to X angewandt werden. So werden Kriterien in frühen Entwicklungsphasen berücksichtigt, sind aber in späteren Phasen beim Ausarbeiten der Produktgestalt erneut zu fokussieren und gegebenenfalls anzupassen [PoLi11].

Generell lässt sich festhalten, dass eine große Anzahl von gegenseitig sich beeinflussenden X-Kriterien während des Entwicklungsprozess berücksichtigt werden muss, wobei diese Komplexität erschwerte Randbedingungen nach sich zieht [Lind07]. Als Folge daraus stehen diese Kriterien häufig in einem Zielkonflikt, mit dem oftmals eine schwierige Entscheidungsfindung und daher eine Kompromisslösung einhergehen. Neben dem Erfüllen der Funktion als Hauptanforderung muss besonders die frühe Phase des Entwicklungsprozesses beachtet werden, da bekannter Weise circa zwei Drittel der Produkteigenschaften schon festgelegt werden. Allerdings zielen auch bekannte Entwicklungsmethodiken, z. B. wie die VDI 2221 [VDI2221], bei X-Kriterien oft nur auf die späten Phasen, also Entwurfs- und Ausarbeitungsphase, ab [WeWe01]. Dabei werden die

Aktivitäten eher intuitiv ausgeführt und durch wenig formalisierte Methoden und Regelwerke unterstützt. Gerade dort liegt der Schwerpunkt des X-orientierten Entwickelns.

Allgemein lässt sich festhalten, dass eine Berücksichtigung der zahlreichen Einschränkungen in einem Entwicklungsprozess durch die Anwendung von Methoden und Werkzeugen des X-orientierten Entwickelns möglich ist [Wart01]. Dabei ist ein sinnvolles Miteinbeziehen von Analyse- und Syntheseschritten notwendig. Es wird festgestellt, dass Design for X-Methoden und Tools zwar in der Praxis wichtig sind und angewandt werden, sie allerdings in Entwicklungsmethodiken schlecht integriert bzw. integrierbar sind, da die geforderten Eigenschaften nicht simpel in einer Funktionsstruktur oder einer Wirkstruktur beschrieben werden können. [Webe07], [Webe12] Beispielhaft wird in [PoLi11] an verschiedenen Hauptzielrichtungen des Design to X („Sicherheit und Zuverlässigkeit“, „Gewicht“, „Nachhaltigkeit“) und Design for X („Montage“, „Variantenvielfalt“) gezeigt, dass es durchaus möglich ist, die X-Kriterien in frühen Phasen zu berücksichtigen. Dabei steht aber jeweils ein X-Kriterium für sich allein, ohne in einen Zielkonflikt mit anderen X-Kriterien zu treten.

3.2.4 Komplexität und Strukturierung des X-orientierten Entwickelns

Eine Beherrschung des komplexen Gebietes des X-orientierten Entwickelns kann mithilfe einer Strukturierung der verschiedenen X-Kriterien gehandhabt werden. In der Literatur sind dazu einige Ordnungsansätze zu finden.

Die prozessorientierte Strukturierungsmethode (siehe [Rude98], [MWBK12], [Baue03]) sortiert die X-Kriterien nach ihrem Auftreten im Produktlebenszyklus. Dabei lassen sich die Kriterien, die sich auf Produkteigenschaften beziehen (Design to X) nur schwer abbilden, wohingegen Design for X-Kriterien gut darstellbar sind, da sich die Einordnung an der Unternehmensorganisation orientiert (z. B. Fertigung, Montage, Vertrieb etc.).

Eine hierarchische Ordnung nach [Meer99] erleichtert die Kenntnis von Beziehungen zwischen X-Kriterien unterschiedlicher Detaillierungsgrade (z. B. „Design for Production“ und „Design for Milling“). Dabei wird klar, dass die Berücksichtigung eines X-orientierten Aspekts automatisch eine Vielzahl weiterer Aspekte zur Folge hat. Die hierarchische Strukturierung bildet die Gesamtkomplexität des X-orientierten Entwickelns am besten ab.

Die Design for X-Matrix nach [Andr05] ordnet universelle Kriterien (Design to X-Kriterien) den Phasen des Produktlebenszyklus zu (vergleiche dazu Abbildung 3.5). Damit soll sichergestellt werden, welche Lebensphasen speziell bei einem bestimmten universellen Kriterium berücksichtigt werden müssen.

	Entsorgung	Service	Anwendung	Vertrieb	Montage	Verarbeitung	Einkauf
Kosten		●				●	
Zeit					◐	◐	
Qualität				●			
Flexibilität		◐	◐		◐		
Produktivität			●	◐			
Risiko		◐					
Umwelteffekte	●		●	◐		◐	

Abbildung 3.5: DfX-Matrix nach [Andr05]

Weber [Webe07] und Köhler [Koeh09] differenzieren beim X-orientierten Entwickeln zwischen vier Fällen, die sich auf die CPM/PDD-Methodik von Weber stützen (nach [Webe05], [Webe12]). Siehe dazu auch Abbildung 3.6:

- Analytisches Design for X: Die Eigenschaften eines Produktes (*properties P_j*) werden aus gegebenen Merkmalen (*characteristics C_i*) bestimmt, wobei die externen Bedingungen (*external conditions EC_j*) auf Grundlage des X-Systems (*properties matrix P_x*) beachtet werden müssen. Dies entspricht einem Befolgen der Richtlinien top-down.
- Synthetisches Design for X: Die geforderten Solleigenschaften des Produktes (*required properties PR_j*) legen unter Beachtung der externen Bedingungen (*external conditions EC_j*) auf Grundlage des X-Systems (*properties matrix P_x*) die Merkmale (*characteristics C_i*) fest. Dies entspricht einem Erstellen von neuen Design for X-Kriterien bottom-up.
- Analytisches Design of X: Eigenschaften und äußere Bedingungen werden gleichzeitig aus den vorhandenen Merkmalen des Produktes abgeleitet. Daraus werden dann die Soll-Eigenschaften des X-Systems realisiert, die durch dessen Merkmale gekennzeichnet sind.
- Synthetisches Design of X: Die simultane Bestimmung der Merkmale und der äußeren Bedingungen des Produktes aus den geforderten Eigenschaften erlauben eine Festlegung der Soll-Eigenschaften des X-Systems aus dessen Merkmalen.

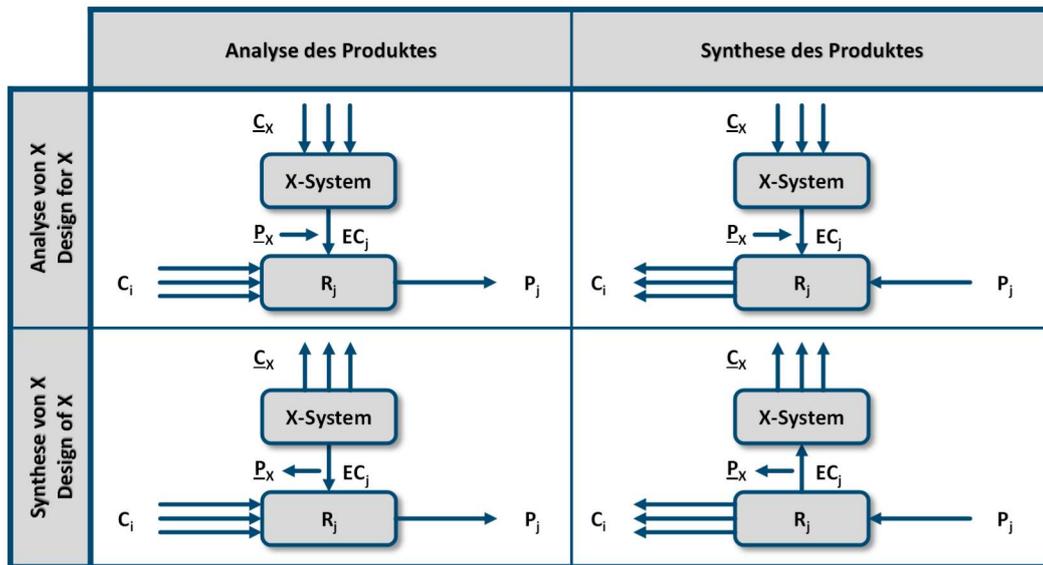


Abbildung 3.6: Darstellung von DfX und X-Systemen mit Produktmodellierung ([Webe07], [Koeh09])

3.2.5 Entscheidungsfindung bei multiplen X-Kriterien

Es wird deutlich, dass das Gebiet des X-orientierten Konstruierens die Beherrschung einer großen Wissenssammlung erfordert, um die erwünschten Produkteigenschaften, die zueinander in Wechselwirkungen stehen und damit Zielkonflikte auslösen, zu erzielen [MWBK12].

Die Abbildung einer bestimmten Produkteigenschaft kann mit Hilfe einer Methode aus der X-orientierten Entwicklung recht simpel erreicht werden. Wie aber schon weiter oben beschrieben, muss ein Produkt vielen anderen Anforderungen oft widersprüchlicher Natur gerecht werden. Eine zu starke Fokussierung auf ein Teilziel (z. B. Fertigungsgerechtigkeit) hat zur Folge, dass andere Aspekte (z. B. Service- oder Montagegerechtigkeit) nur unzureichend betrachtet werden, was zu einem unausgewogenen Endprodukt führen kann.

In der Literatur sind einige Ansätze vorhanden, die die Entscheidungsfindung bei mehreren gleichzeitig auftretenden X-Kriterien beschreiben. Nach [AnMo97] gibt es die Möglichkeit, drei verschiedene Klassen zu unterscheiden:

Einerseits existiert der Ansatz der „Meta-Methodology“ von [WaRD96], der den Einfluss von Produktmerkmalen auf eine bestimmte Produktlebensphase bereitstellt, wobei dem Entwickler oder dem Konstrukteur eine Rangfolge von X-Kriterien vorgegeben wird, an der ersichtlich ist, welches X-Kriterium den größten Einfluss auf die aktuelle Konstruktionsaufgabe besitzt.

Andererseits propagieren die prädiktiven Ansätze, z. B. nach [Wart01], Entscheidungen durch die Auswirkungen von Merkmalsausprägungen in Hinblick auf die relevanten Produkteigenschaften herbeizuführen.

Außerdem gibt es zahlreiche Ansätze der multikriteriellen Entscheidungsfindungstheorien, die das Problem der multiplen X-Kriterien mit Entscheidungsproblemen beheben. Die multikriteriellen Entscheidungsfindungstheorien lassen sich selbst weiter unterteilen: mathematische (präskriptive) Ansätze, anwendungsorientierte (deskriptive) Ansätze, Multiple Attribute Decision Making, Multiple Objective Decision Making, apriorische Methoden, aposteriorische Methoden, interaktive Verfahren, nutzentheoretische Modelle, Outranking-Verfahren, Pareto-Optimierung u.v.m. Auf die einzelnen Verfahren wird nicht näher eingegangen, da die Entscheidungsfindung bei mehreren simultan auftretenden X-Kriterien nur von geringer Relevanz für diese Arbeit ist. Eine ausführliche Übersicht bietet [Baue09] an, der darüber hinaus einen Ansatz ([Baue03], [Baue05]) und ein Werkzeug zur multikriteriellen Entscheidung entwickelt hat [Baue07].

3.3 Gewichtsoptimierung technischer Produkte

Dieses Kapitel analysiert relevante Vorarbeiten, die in Verbindung mit der Gewichtsoptimierung technischer Produkte stehen. Aufbauend auf einer Literaturrecherche werden folgende Forschungsbereiche näher betrachtet:

- Allgemeine Grundlagen des Leichtbaus (Kapitel 3.3.1)
- Leichtbau aus konstruktionsmethodischer Sicht (Kapitel 3.3.2)
- Leichtbau aus systemtechnischer Sicht (Kapitel 3.3.3)
- Primäre und sekundäre Gewichtseinsparpotenziale (Kapitel 3.3.4)

Dabei ist festzuhalten, dass in der Literatur unter dem Begriff der Gewichtsoptimierung der „klassische Leichtbau“ verstanden wird, aber in Bezug auf diese Arbeit allerdings viel weiter umrissen wird, wie in den späteren Kapiteln erläutert wird. Die Definition des Begriffs „Gewichtsoptimierung“ wurde schon in Kapitel 2.4.2 festgelegt.

3.3.1 Allgemeine Grundlagen des Leichtbaus

Die Fachliteratur bietet ein sehr großes Spektrum über Leichtbaumöglichkeiten und -ansätze. Dabei führen unterschiedliche Benennungen und Namen trotz ähnlicher bzw. gleicher Inhalte zu einer Begriffsdiversität der Leichtbauansätze. Aufgrund der ganzheitlichen Betrachtung der Gewichtsoptimierungsproblematik ist ein exaktes Wissen über die Struktur der Einzelmethoden als auch deren Zusammenhänge untereinander von großer Bedeutung. Dabei werden die Begriffe Leichtbaustrategie, Leichtbauweise und Leichtbauprinzip am häufigsten genannt, wobei oftmals keine eindeutige Erläuterung der Zusammenhänge untereinander erfolgt [EGGH13].

Die grundsätzlichen Zusammenhänge im Leichtbau können wie in Abbildung 3.7 [EGGH13] beschrieben werden, wobei die Leichtbauökonomie – d.h. der Zusammenhang zwischen Kostenaufwand und Gewichtseinsparung – ausschlaggebend für Strategie, Prinzip und Bauweise ist.

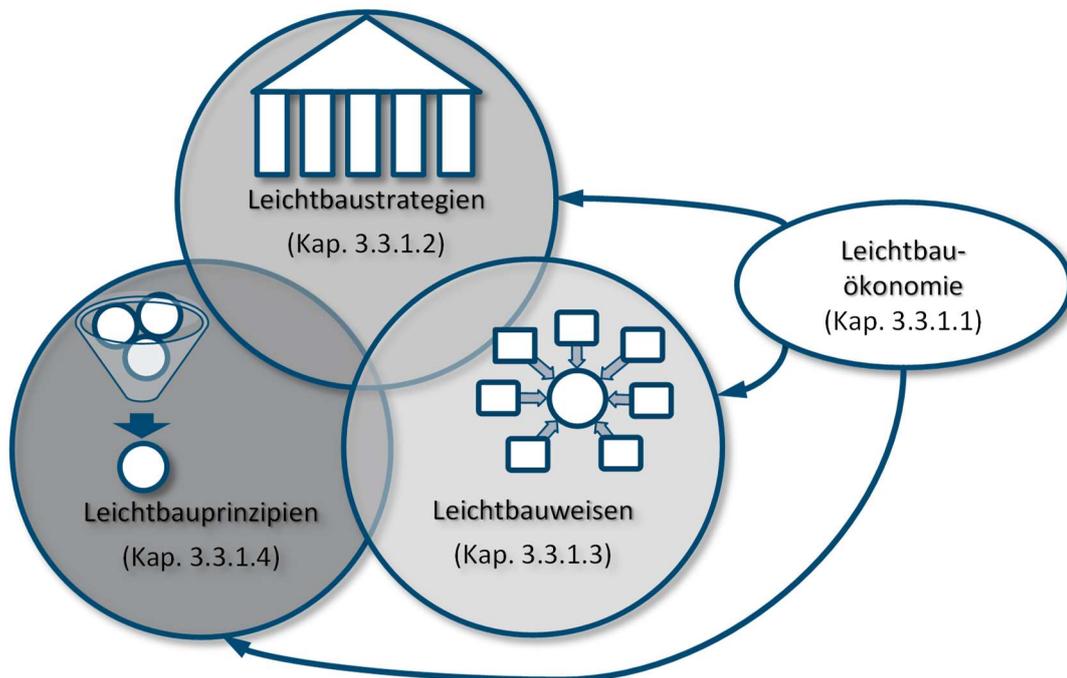


Abbildung 3.7: Zusammenhänge im Leichtbau [EGGH13]

Die Ziele des Leichtbaus (in Abbildung 3.7 auch als Leichtbauökonomie bezeichnet) bestimmen die Anwendung der Leichtbaustrategien, Leichtbauweisen und Leichtbauprinzipien, die im Allgemeinen die gleiche Problematik ansprechen, diese aber auf verschiedene Weise versuchen zu lösen. Darüber hinaus ist für den Erfolg einer Leichtbaumaßnahme entscheidend, wann im Entwicklungsprozess sie angewandt wird.

3.3.1.1 Leichtbauziele

Der Leichtbau kann aufgrund seines Einflusses auf Kosten oder die Systemfunktionalität in drei verschiedene Kategorien unterteilt werden ([KoBM11], [Krau12], [Schm04], [Wied06]), die im Folgenden aufgelistet werden. In [EGGH13] wird der Begriff Leichtbauökonomie verwendet, um einen wirtschaftlichen Aspekt für eine Ergreifung einer Leichtbaumaßnahme zu berücksichtigen. Zusätzlich wird zu den anderen Leichtbauzielen die Kategorie Ultraleichtbau eingeführt. Allgemein wird davon ausgegangen, dass die Gewichtseinsparung durch physikalische Randbedingungen festgelegt ist und immer mit Kosten einhergeht [EGGH13]. Die vier Kategorien sind in Abbildung 3.8 in einem Diagramm eingezeichnet, in dem der exponentielle Verlauf zwischen Kosten und Gewichtseinsparung dargestellt ist.

Zweckleichtbau / Funktionsleichtbau

Der Zweck- bzw. Funktionsleichtbau zielt auf eine Gewichtsreduktion zur Realisierung bestimmter Funktionen ab [Krau12]. Gerade bei hohen Massenbeschleunigungen oder sehr großen Ausmaßen ist es wichtig, die geforderte Systemfunktionalität zu realisieren und beherrschen zu können ([Krau12], [Schm04], [Wied06]). Dabei ist die Gewichtsreduzierung wichtiger als die verursachten Kosten. Die Gewichtsoptimierung ist beim Zweckleichtbau immer notwendig und zweckmäßig zur Erfüllung der Gesamtfunktionalität anzusehen [KoBM11].

Sparleichtbau

Das Hauptziel des Sparleichtbaus ist das Erzielen einer direkten Kostenreduktion durch eine Gewichtseinsparung ([Krau12], [Schm04], [Wied06]). Diese Gewichtsreduktion kann durch eine Abmagerung der Struktur, eine verbesserte Ausnutzung der Struktur oder das funktions- und belastungsgerechte Gestalten der Struktur sowie durch Einsparungen in der Fertigung erzielt werden. Darüber hinaus kann durch Verkürzung von Prozessketten in der Fertigung oder durch die Integration von Funktionen in die betrachtete Leichtbaustruktur die Höhe der Herstellkosten beschränkt werden [KoBM11].

Ökoleichtbau / Umweltleichtbau

Der Ökoleichtbau basiert auf definierten Anforderungen aus Ökologie und Ökonomie [KoBM11] und verfolgt eine indirekte Kosteneinsparung durch Einsparungen in der Nutzungsphase des Systems ([Krau12], [Schm04], [Wied06]). Insgesamt ergibt sich also die Kosteneinsparung durch verringerte Betriebskosten trotz erhöhter Kosten und gesteigertem Aufwand bei der Herstellung oder der Verwendung eines alternativen Werkstoffs. Zu beachten ist dabei der Einfluss der Gewichtsoptimierungsmaßnahme auf das Gesamtgewicht des betrachteten Systems.

Ultraleichtbau

Der Ultraleichtbau ist die extreme Form des Zweckleichtbaus. Hierbei wird die leichteste Variante ohne Rücksicht auf die verursachten Kosten gewählt [EGGH13].

Zusammenhang zwischen Gewicht und Kosten

In [Klei13] wird festgestellt, dass Leichtbaumaßnahmen oft mit hohen Kosten verbunden sind. Die entstehenden Kosten sind abhängig von den Anwendungsbereichen und beschreiben daher die Wahl des Leichtbauziels bzw. der Leichtbauökonomie, wie in Abbildung 3.8 dargestellt. Der exponentielle Verlauf der Kosten-Gewichtseinsparung-Kurve zeigt, dass die Kosten für Leichtbaumaßnahmen je größer sind, je höher die entsprechende Gewichtseinsparung ist.

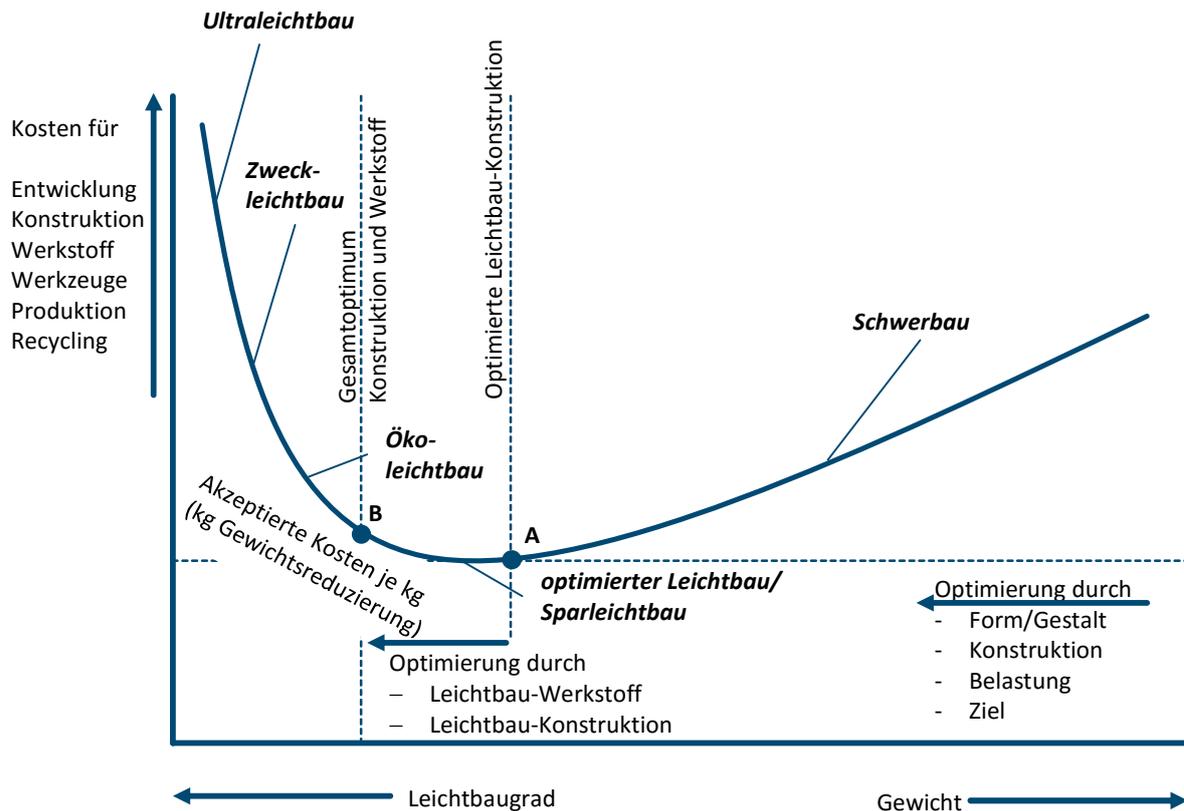


Abbildung 3.8: Zusammenhang zwischen Kosten und Gewicht eines Systems (nach [EGGH13], [Klei13], [WWW3])

Dabei wird deutlich, dass zusätzlich zur Gewichtseinsparung noch eine Gewichtszunahme („Schwerbau“) betrachtet wird, die aufgrund des höheren Materialeinsatzes höhere Kosten nach sich zieht. Eine optimierte Leichtbau-Konstruktion (Punkt „A“), welche das theoretische Minimum als wirtschaftliche Vernunftlösung angesehen wird, wird durch die Optimierung des Systems in Form und Gestalt, in der Konstruktion, bei der Belastung sowie des Leichtbauziels möglich, wohingegen das Gesamtoptimum der Konstruktion und des Werkstoffes (Punkt „B“) durch weitere Verbesserungen beim Werkstoff und bei der Leichtbau-Konstruktion zu erreichen sind. Es wird vorgeschlagen, verschiedene Leichtbaustrategien zu verwenden.

In Bezug auf das Anwendungsgebiet von Leichtbaumaßnahmen unterscheidet sich das Verhältnis zwischen Kosten pro eingespartes Kilogramm deutlich. So sind in der Automobilindustrie mit großer Stückzahl (mehrere 10.000 Produkte) zwischen 5-20€ pro eingespartes Kilogramm akzeptabel (je nach Antriebsart), in der Luftfahrt bei mittlerer Stückzahl (10-50 Produkte) werden ca. 500€/kg und in der Raumfahrt bei einer Stückzahl von 1-2 mehrere Tausend € pro Kilogramm akzeptiert ([EGGH13], [Klei09]).

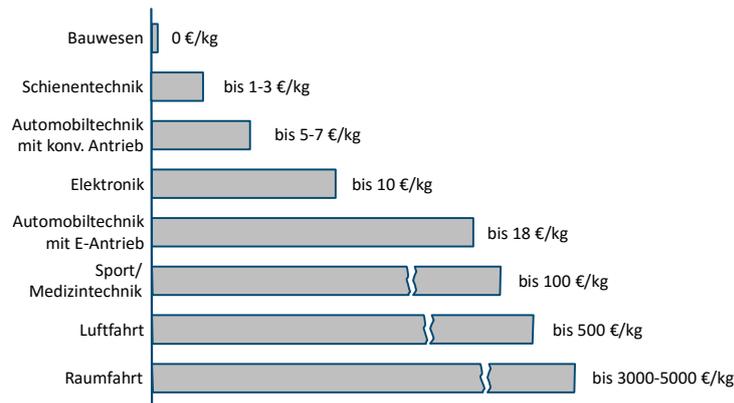


Abbildung 3.9: In der Industrie akzeptable Mehrkosten pro eingespartem Gewicht (nach [EGGH13], [Klei09])

3.3.1.2 Leichtbaustrategien

In der Literatur ist eine Vielzahl unterschiedlicher Leichtbau-Strategien vorhanden. Die am häufigsten genannten Leichtbaustrategien werden in Tabelle 3.2 dargestellt und im folgenden Text ausführlich beschrieben (siehe [DeLu09], [Drec07], [EGGH13], [Hald97], [Klei13], [KnWe88], [KoBM11], [Sobe07]). Um eine klare Begriffsklärung anzubieten, werden die Strategien in dieser Arbeit entsprechend der ersten Spalte verwendet. Die Entsprechungen aus der Literatur sind dahinter aufgeführt. Es bleibt anzumerken, dass der hier in dieser Arbeit verwendete Begriff des Systemleichtbaus viel weiter gefasst wird als in [Drec07] bzw. [Sobe07].

Tabelle 3.2: Überblick Leichtbaustrategien

	Drechsler	Ellenrieder	Haldenwanger	Klein	Knauer	Kopp	Sobek	Degischer
Formleichtbau	Gestalt-	Form-	Form-	Form-	Gestalt-	Form-	Struktur-	Form-
Materialleichtbau	Werkstoff-	Stoff-	Stoff-	Stoff-	Stoff-	Stoff-	Material-	Stofflicher
Fertigungsleichtbau	Fertigungs-	Fertigungs-		Fertigungs-		Fertigungs-		Fertigungs-
Systemleichtbau	System-						System-	
Konzeptleichtbau		Konzept-	Konzept-					
Bedingungsleichtbau		Bedingungs-	Bedingungs-		Bedingungs-	Bedingungs-		
								Konstruktions-
								Funktions-
			Modul-					
			Kompensations-					
			Verbund-					

Fertigungsleichtbau

Der Fertigungsleichtbau umfasst alle Maßnahmen während des Produktionsprozesses – Herstellung, Fertigung und Montage –, die eine Gewichtsoptimierung nach sich ziehen ([EGGH13], [KoBM11]). Drechsler [Drec07] sieht in der Fertigungstechnik die Möglichkeit, das theoretische Leichtbaupotenzial der eingesetzten Werkstoffe unter der Prämisse einer kostengünstigen und

automatisierbaren Fertigung bestens zu nutzen und möglichst große Gestaltungsfreiheiten zu bieten. Als Beispiel gibt er die Herstellung hochintegraler und endkonturnaher Bauteile mit wenigen Nachbearbeitungs- und Montageschritten. Darüberhinaus bleibt festzuhalten, dass der Fertigungsleichtbau nie vollständig alleinstehend angewandt werden kann, sondern in engen Zusammenhang mit Stoff- und Formleichtbau steht [KoBM11], was besonders deutlich wird, wenn die unterschiedlichen Leichtbauweisen mit Differenzial- und Integralstrukturen betrachtet werden.

Materialleichtbau, Stoffleichtbau, Werkstoffleichtbau

Der Begriff des Materialleichtbaus (oft auch Stoffleichtbau oder Werkstoffleichtbau genannt) beschreibt die Substitution des verwendeten Werkstoffs mit einem leichteren Material unter Berücksichtigung von Kosten und Fertigungsmöglichkeiten mit dem Ziel der Gewichtseinsparung [EGGH13]. Dabei muss immer berücksichtigt werden, dass die gestellten Anforderungen an die Leichtbaustruktur vollständig erfüllt werden. Zum Teil werden mit einer Umstellung auf einen neuen Werkstoff innovative Weiterentwicklungen der Technologie der Herstellungs- und Fertigungsverfahren notwendig [KoBM11].

Bedingungsleichtbau

Der Bedingungsleichtbau beschreibt das kritische Hinterfragen der Anforderungen und Bedingungen an die Leichtbaustruktur, wobei die Anforderungen aus der Gesellschaft, der Politik und Gesetzgebung sowie dem Markt und den Kunden rühren. Dadurch entstehen neue Leichtbaupotenziale für das betrachtete System: einerseits ist durch eine „konsequente Streichung“ nicht notwendiger Anforderungen, die das System direkt beeinflussen, eine Gewichtseinsparung möglich, andererseits kann dadurch weitere „Design-Freiheit“ erreicht werden, was zur Folge hat, weitere Leichtbaustrategien anzuwenden und zusätzliches Gewicht zu sparen. [KoBM11]

Form-/Strukturleichtbau

Der Form- bzw. Strukturleichtbau hat die Aufgabe, die Kräftepfade einer Struktur so anzupassen, dass sich für das vorgegebene Belastungskollektiv ein möglichst geringes Eigengewicht der Konstruktion bei Einhaltung aller gegebenen Rahmenbedingungen ergibt ([EGGH13], [Krau12]).

Konzeptleichtbau

Der Konzeptleichtbau beschreibt die systematische Betrachtung von bestimmten Einzelteilen, Baugruppen oder Gesamtsystem. Durch die Gewichtsoptimierung dieser und Anpassung an das Teil- bzw. Gesamtsystem kann das Gewicht des Systems gesenkt werden. [KoBM11] bezeichnet

diese Strategie auch als Systemleichtbau. In dieser Arbeit wird allerdings unter Systemleichtbau etwas anderes verstanden (vgl. die entsprechenden späteren Kapitel).

Systemleichtbau

[AlBu11] definieren den Systemleichtbau als eine Methode zur ganzheitlichen Gewichtsreduzierung von technischen Systemen, wobei ein technisches System eine Einheit darstellt, die von der Umgebung abgegrenzt ist und deren inneren Elemente zueinander in gewissen Beziehungen stehen. Die ganzheitliche Gewichtsoptimierung stellt dabei sowohl eine material- als auch eine produktübergreifende Methode dar, ohne die Beziehungen und Wechselwirkungen innerhalb des Systems sowie allgemeine Randbedingungen wie Wirtschaftlichkeit außer Acht zu lassen.

Sobek [Sobe07] beschreibt den Systemleichtbau als ein Prinzip zur Vereinigung von lasttragenden Funktionen in einem Bauteil mit anderen, z. B. raumabschließenden, speichernden oder dämmenden. Dadurch werden die lasttragenden Bauteile zu Stellen von Multifunktionalität.

Ähnlich zu den Definitionen von [Sobe07] und [Drec07] kann der Begriff des Funktionsleichtbaus, der von [DeLu09] geprägt wird, aufgefasst werden.

3.3.1.3 Leichtbauweisen

Bei der konstruktiven Ausführung von Leichtbaulösungen können verschiedene Bauweisen definiert werden. Allgemein wird zwischen folgenden Bauweisen unterschieden: Integralbauweise, Differentialbauweise, integrierende Bauweise, Modulbauweise sowie Verbundbauweise ([Klei09], [KoBM11], [Krau12], [Wied06]).

Die Leichtbauweisen selbst können nicht eindeutig einer bestimmten Leichtbaustrategie zugeordnet werden. Sie repräsentieren oftmals mehrere Leichtbaustrategien.

Differentialbauweise

Die Differentialbauweise zeichnet sich dadurch aus, dass Funktionen durch einzelne Bauteile separiert realisiert werden und die Gesamtfunktion durch das Fügen der Einzelbauteile erreicht wird [Krau12]. Die Vorteile für die Differentialbauweise liegen in der unterschiedlichen und damit optimalen Werkstoffwahl für die Einzelbauteile sowie in der relativ einfachen Fertigung aufgrund des Einsatzes von Halbzeugen. Darüberhinaus sind im Falle eines Schadens eines einzelnen Bauteils oftmals nur Reparaturen am betroffenen Bauteil notwendig [KoBM11]. Nachteilig sind allerdings die hohe Anzahl an Schnittstellen, die eine Gewichtserhöhung verursachen können und Angriffspunkte für Kontaktkorrosion darstellen, sowie der dadurch begründbare erhöhte Montageaufwand.

Integralbauweise

Im Vergleich zur Differentialbauweise hat die Integralbauweise die Intention, die Funktionen zu integrieren und möglichst durch ein Bauteil zu realisieren ([KoBM11], [Krau12]). Oft werden Funktionen auch durch die Formgebung des Bauteils erzeugt [Klei13]. Vorteilhaft sind durch die Schnittstelleneinsparung eine Gewichtsreduktion sowie im geringeren Füge- und Montageaufwand. Allerdings stehen dem erhöhte Anforderungen an den Werkstoff, eine erhöhte Versagenswahrscheinlichkeit sowie eine aufwändigere Fertigung und höhere Werkzeugkosten gegenüber.

Integrierende Bauweise

Die integrierende Bauweise vereint die Vorteile der beiden vorgenannten Bauweisen. Dabei spielt eine gezielte und systematische Definition von Schnittstellen zwischen Bauteilen, d.h. die Integration wird auf ein vernünftiges Maß begrenzt, eine große Rolle. Durch die Teilintegration können sowohl Versagensauftreten und Korrosion eingeschränkt, aber gleichzeitig optimale Werkstoffauswahl sowie eine gute Austauschbarkeit defekter Stellen gewährleistet werden ([Klei09], [Krau12]).

Modulbauweise

Module sind durch die starke Vernetzung innerhalb eines Bereiches und schwache Vernetzung zu Nachbarmodulen gekennzeichnet. Die Abgrenzung zu Nachbarmodulen erfolgt über eindeutige Schnittstellen. Durch eine geeignete Wahl an Schnittstellen und damit einer Verbindung von Modulen zu einer Gesamtstruktur erfolgt eine Verkettung von Funktionen und Teilfunktionen. Durch die modulare Denkweise und die Erhöhung der Gleichteilstrategie können Entwicklungs- und Herstellungskosten eingespart werden. [KoBM11]

Verbundbauweise

Die Verbundbauweise kombiniert Werkstoffe, die spezifisch sind für verschiedene Bauteile, um eine optimale Steifigkeit und hohe Tragfähigkeit mit gleichzeitiger Gewichtseinsparung zu realisieren [Krau12].

3.3.1.4 Leichtbauprinzipien

[Klei13] stellt einen guten Überblick über die gängigen Leichtbauprinzipien dar. Diese können in Grundsätzen mit Design for X-Richtlinien, hier zum leichtbaugerechten Konstruieren, gleichgesetzt werden. Beispiele für konstruktive Prinzipien sind eine möglichst direkte Krafteinwirkung, die Erzielung hoher Flächenträgheitsmomente oder eine gezielte Versteifung von Strukturen.

3.3.2 Leichtbau aus konstruktionsmethodischer Sicht

Dieses Unterkapitel legt Einzelmethoden und Prozesse der Gewichtsoptimierung in konstruktionsmethodischer Hinsicht dar. Das heißt, es werden Methoden vorgestellt, die Einfluss auf den Produktentwicklungsprozess nehmen und dabei den Entwickler und Konstrukteur unterstützen. Alle technologischen Methoden zur Gewichtsoptimierung (z. B. Werkstoffwahl, Multi-Material-Design, Fertigungstechnologien, Strukturauslegungen usw.) sind der entsprechenden Fachliteratur zu entnehmen, z. B. [Klei13], [Krau12], [Wied06], [GSRK09].

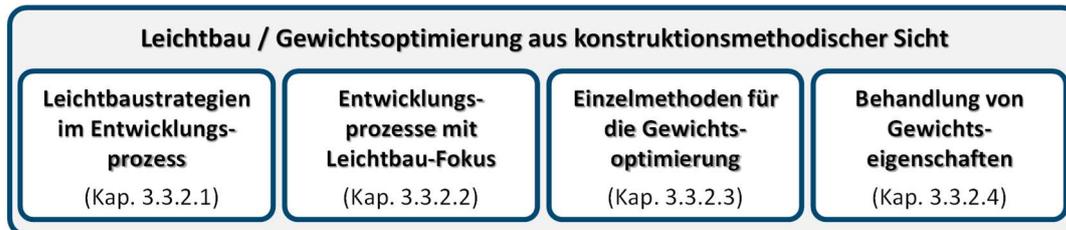


Abbildung 3.10: Leichtbau aus konstruktionsmethodischer Sicht

3.3.2.1 Einordnung von Leichtbaustrategien zu den Entwicklungsphasen

Ausgehend vom Bedingungsleichtbau, der hauptsächlich die Anforderungen an das zu optimierende System stellt und damit als Ausgangspunkt für die weiteren Leichtbaustrategien dient, werden die in Abbildung 3.11 genannten übrigen vier Strategien angewendet. Diese werden bzw. sollen während des Entwicklungsprozesses in einigen Iterationsschleifen durchlaufen werden. Sie beziehen sich sowohl auf einzelne Bauteile, Subsysteme oder das gesamte zu betrachtende Leichtbausystem. [KoBM11]

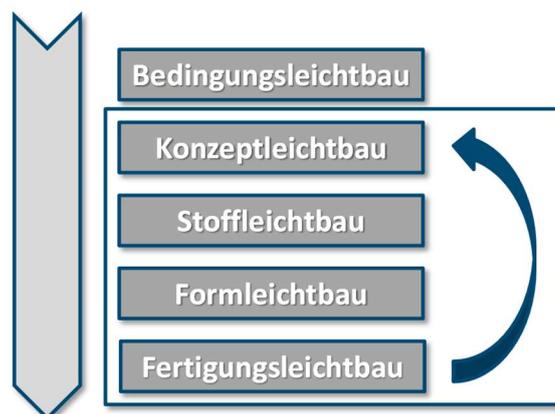


Abbildung 3.11: Leichtbaustrategien und vorgeschlagener Ablauf während des Entwicklungsprozess [KoBM11]

[ScPM01] ordnet bekannte Leichtbaustrategien dem traditionellen Entwicklungsprozess mit den Phasen „Planen“ – „Konzipieren“ – „Entwerfen“ – „Ausarbeiten“ [PBF07] zu. Abbildung 3.12 fasst diese Einteilung auf und ergänzt diese mit den oben genannten Leichtbaustrategien.

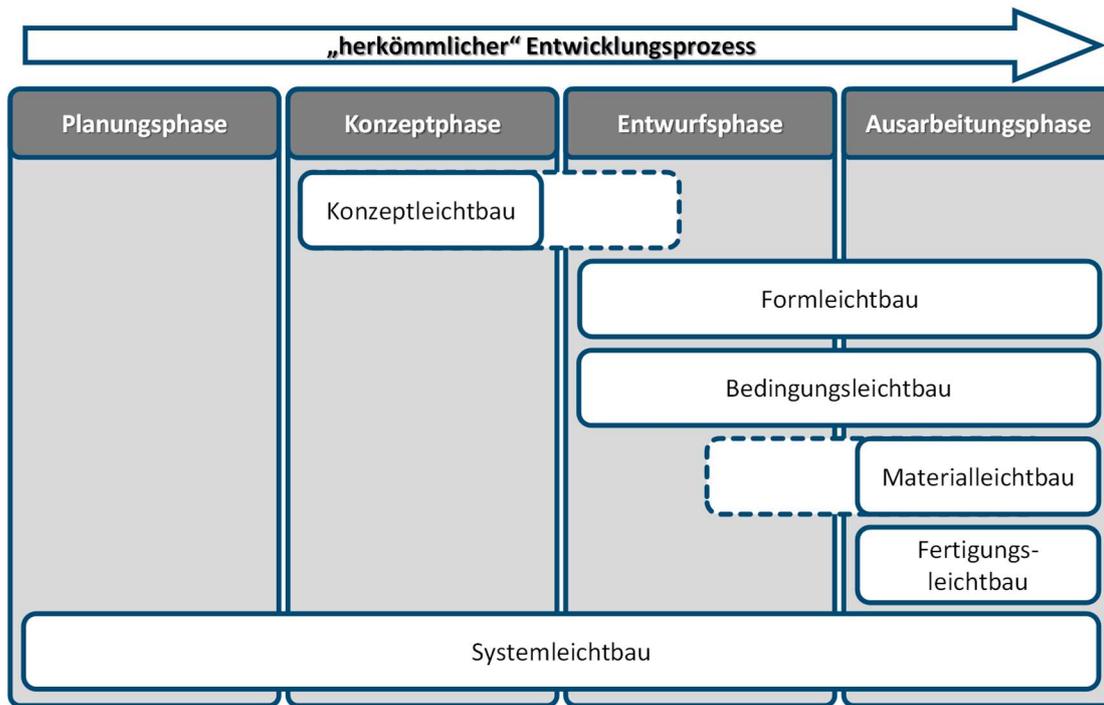


Abbildung 3.12: Zuordnung von Leichtbaustrategien zu den Entwicklungsphasen (teilweise nach [ScPM01], [LuVi12b])

Dabei erstreckt sich der Systemleichtbau über den ganzen Entwicklungsprozess. Damit bleibt diese Strategie die einzige, die nicht speziell auf eine Phase beschränkt bleibt. Alle anderen Strategien sind zeitlich begrenzt, wobei auffällig ist, dass die frühen Phasen vor dem Festlegen des Konzeptes stark vernachlässigt werden und vor allem die späten Phasen des Entwerfens und des Ausarbeitens unterstützt werden. Der Konzeptleichtbau sollte auf die Entwurfsphase ausgeweitet werden, da gerade dort oftmals Rückschlüsse über das genaue Systemverhalten erzielt werden und unter Umständen das Systemkonzept überarbeitet werden muss. Ebenso sollte der Materialleichtbau bereits in Entwurfs-, nicht sogar schon früher in der Konzeptphase, berücksichtigt werden, gerade wenn Funktionen im Material integriert werden, z. B. aktive Materialien, oder die Konstruktion stark vom Materialverhalten abhängig ist, z. B. Faserverbundwerkstoffe.

3.3.2.2 Entwicklungsprozesse mit Leichtbau-Fokus

Vorgehen nach Wohlers

Nach Wohlers [Wohl05] ist die Leichtbauoptimierung aus der mathematischen Sicht gesehen eigentlich keine Optimierung, da die Lösung nur durch „ingenieurmäßiges Vorgehen“ gesucht und gefunden wird. Damit ist gemeint, dass die Auswahl der Leichtbaustrategie, der Bauweise, des Prinzips oder die Materialauswahl lediglich auf Erfahrungswissen, Literaturangaben und neuartigen Ideen aufbaut. Eine Systematik ist dabei nicht zu erkennen.

Vorgehen nach Klein

[Klei09] stellt fest, dass es keiner besonderen Konstruktionslehre für Leichtbauprojekte bedarf, sondern lediglich eine Anpassung der Vorgehensweise, die die besonderen Aspekte von Leichtbautechnologien berücksichtigt. Den Grund dafür sieht er Hauptziel einer technischen Aufgabenstellung – der vollständigen Funktionserfüllung – mit der starken Nebenbedingung der Gewichtsminimierung. Aus einer Vielzahl von Leichtbauprojekten konnte eine ungefähre Zeitaufteilung von 30% für die konstruktive Arbeit (Konzipieren, Entwerfen Ausarbeiten), 40% für Auslegungsaufgaben (Dimensionierung, Optimierung), 20% für die experimentelle Absicherung durch Prototypen und Tests sowie 10% für eine Überarbeitung des Konzeptes und des Entwurfs beobachtet werden. Es bleibt auch hier festzustellen, dass der Fokus der Leichtbauaufgabe in den späten Entwicklungsphasen festgesetzt ist.

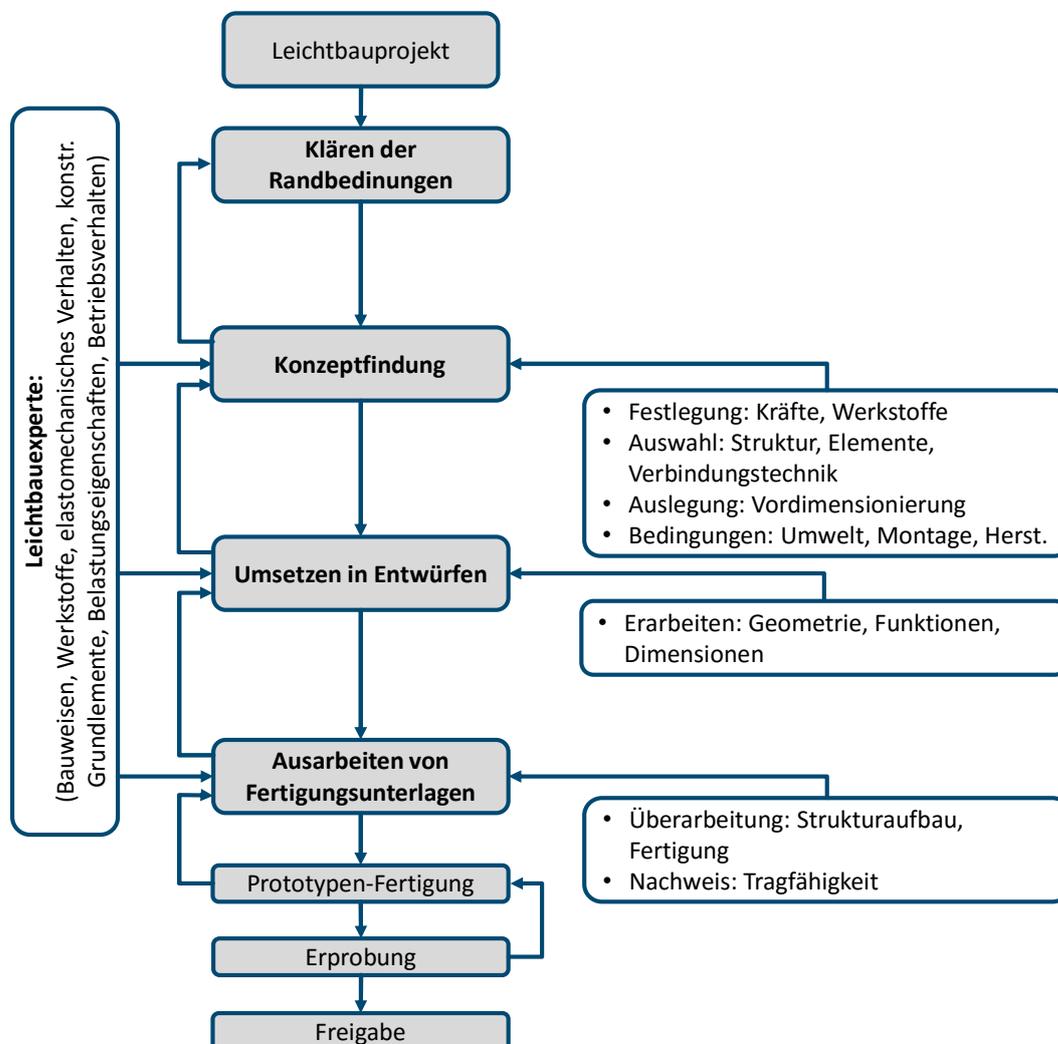


Abbildung 3.13: Systematische Vorgehensweise des leichtbaugerechten Konstruierens nach [Klei13]

Der Ablauf des Konstruktionsprozesses (siehe Abbildung 3.13) entspricht in den Hauptphasen dem bekannten Vorgehensmodell nach der VDI-Richtlinie 2221 [VDI2221]. Zusätzlich werden

spezifische Iterations- und Optimierungsschritte integriert, wobei das Erstellen von Festigkeitsnachweisen und die Überarbeitung des Strukturaufbaus und der Fertigungsunterlagen den Hauptteil der Optimierungsprozedur darstellen. Daneben kommt ein sogenannter Leichtbauexperte zum Tragen, der mit seiner Erfahrung, also implizitem Wissen [Kall15], den Konstruktionsprozess lenkt, indem er Leichtbauweisen, Werkstoffe oder Leichtbauprinzipien angepasst an die Aufgabenstellung vorgibt.

Es bleibt allerdings hier festzuhalten, dass auch hier die Maßnahmen der Gewichtsoptimierung erst spät im Entwicklungsprozess zum Tragen kommen.

Vorgehen nach Krause

[Krau12] erläutert, dass eine Umgestaltung des Konstruktionsprozesses durch die Integration des Leichtbaus in die Produktentwicklung notwendig wird, da in alle Entwicklungsphasen der Leitgedanke der Gewichtsminimierung berücksichtigt werden muss. Daher erfordert die Leichtbau-Integration ein umfangreiches Spezialwissen, eine Anpassung und Erweiterung des Entwicklungsprozesses sowie die Bereitstellung von Methoden und Werkzeugen zur Unterstützung des Entwicklers bzw. Konstrukteurs.

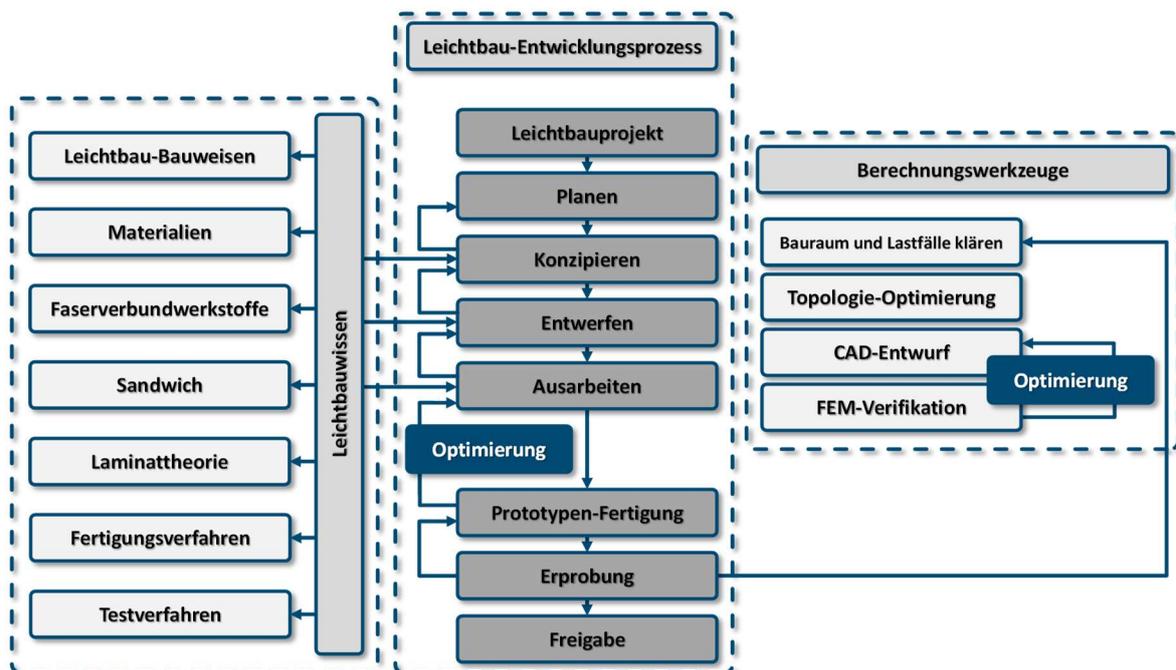


Abbildung 3.14: Leichtbauentwicklungsprozess, Leichtbauwissen und Berechnungswerkzeuge nach [Krau12]

Diese drei Anforderungen integriert er ähnlich zu Abbildung 3.13 von Klein [Klei13] in den allgemein gehaltenen Konstruktionsablauf der VDI-Richtlinie 2221 [VDI2221]. Zusätzlich spezifiziert er in Abbildung 3.14 die drei gestellten Anforderungen und nötige Iterations- bzw. Optimierungsschleifen. Allerdings werden keine genauen Handlungsanweisungen gerade für die Behandlung

des Leichtbaugedankens in der Planungs- und Konzeptphase besonders bei Anforderungs-, Funktions- und Lösungsstrukturen gegeben, was allerdings von ihm vorher durch die Berücksichtigung des Leichtbaugedankens in allen Entwicklungsphasen gefordert wird.

Vorgehen und Methodensammlung nach Feyerabend

Die Vorgehensmethode nach Feyerabend (siehe [FeKl89], [Feye91a], [Feye91b]) orientiert sich an der Wertanalyse nach DIN 69910 [DIN69910], die besagt, dass „das systematisch analytische Durchdringen von Funktionsstrukturen mit dem Ziel einer abgestimmten Beeinflussung von Elementen in Richtung einer Wertsteigerung“ geht. Er formuliert mit seiner Wertanalyse Gewicht die Wertsteigerung durch die Gewichtsreduzierung und Verbesserung in Hinblick von Trägheitsmomenten und Gewichtsverteilung eines Produktes anstelle durch die Kostenreduzierung der allgemeinen Wertanalyse. Die methodische Vorgehensweise ist daher an die Wertanalyse angelehnt und partiell adaptiert worden (siehe Abbildung 3.15).

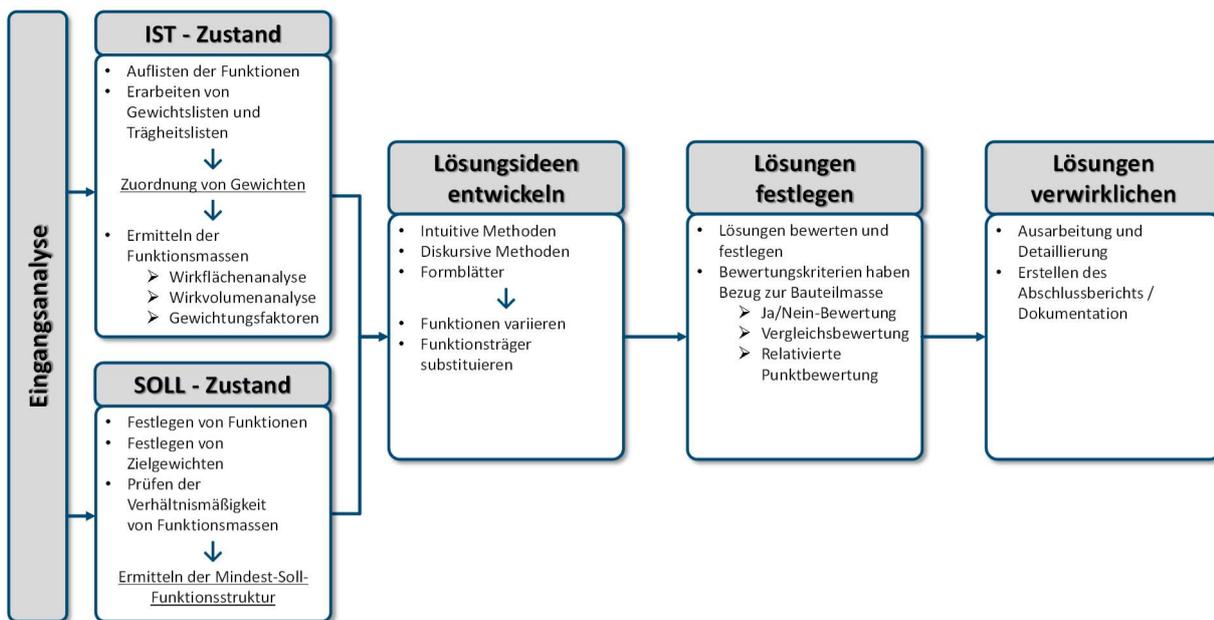


Abbildung 3.15: Vorgehen bei der Wertanalyse Gewicht (nach [Feye91b])

Der Ausgangspunkt ist durch eine Eingangsanalyse gegeben, die alle notwendigen Informationen zum Projektablauf, Optimierungsumfang (Gesamtsystem, Teilsystem, Bauteil) und Randbedingungen bereitstellt. Die IST-Analyse ordnet den zu untersuchenden Funktionen Gewichte zu (Funktionsgewichte, die auch später in den Ansätzen von Ponn [PoLi11] und Posner [PoBR13b] Anwendung finden), die dann mit den in der SOLL-Analyse ermittelten Zielgewichten verglichen werden. Die nachfolgenden Schritte unterscheiden sich nur unwesentlich von denen der Wertanalyse nach [DIN69910]. Methodische Hilfsmittel, z. B. ABC-Analyse, Bewertungsverfahren

oder Kreativitätstechniken, bei den unterschiedlichen Prozessschritten der Wertanalyse Gewicht unterstützen durch Hilfs- und Formblätter den Konstrukteur und Entwickler.

Vorgehen nach Ellenrieder

Die Integration von Leichtbau in den Entwicklungsprozess am Beispiel des Automobils wird in der Abhandlung von Ellenrieder et al. [EGGH13] dargelegt. Hierbei wird der Entwicklungsprozess in drei Phasen eingeteilt: der strategische Leichtbau bei der Zielfindung, der taktische Leichtbau während der Planungsphase und anschließend der operative Leichtbau bei der Ausführung und Umsetzung (siehe Abbildung 3.16).

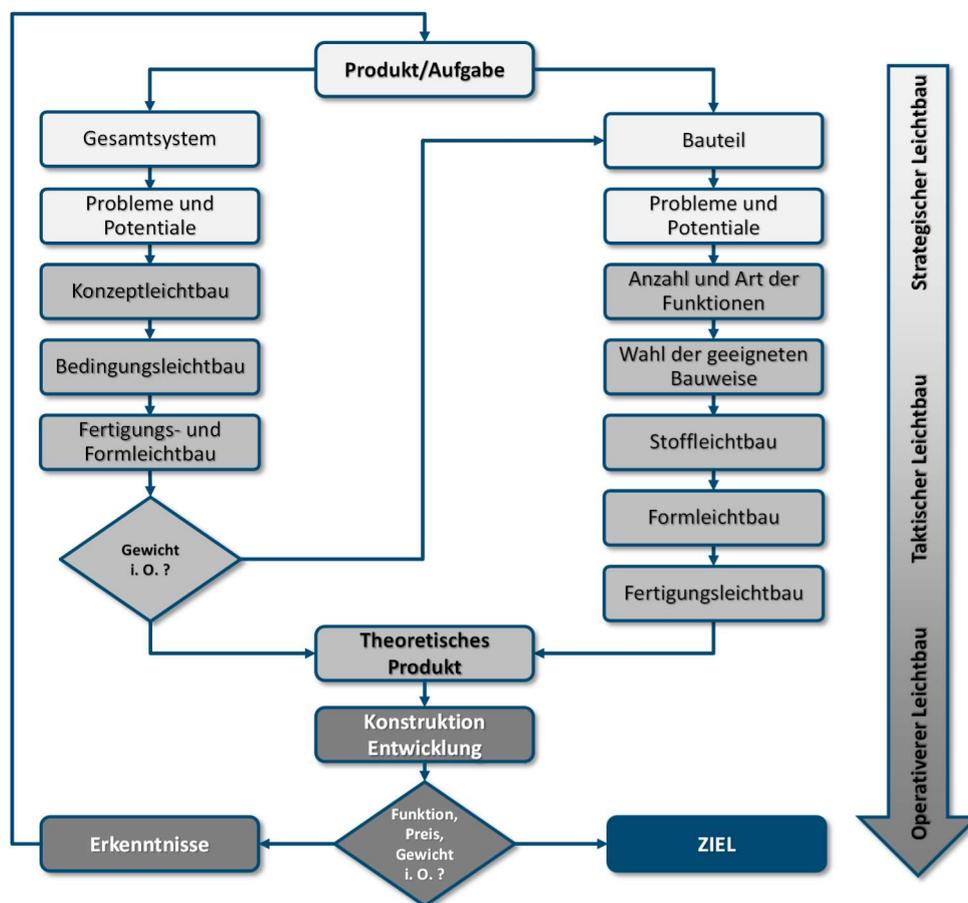


Abbildung 3.16: Ablauf einer ganzheitlichen Anwendungsstrategie [EGGH13]

Desweiteren wird bei der Anwendungsstrategie danach unterschieden, ob das Gesamtsystem oder nur einzelne Bauteile zur Leichtbaubetrachtung hinzugezogen werden. Je nach Fokus werden unterschiedliche Leichtbaustrategien verfolgt, wobei bei der Betrachtung des Gesamtsystems immer eine Bauteilverbesserung ausgeführt werden muss. Bei beiden Wegen wird zuerst eine Festlegung von Problemen und Potenziale verlangt, aus denen sich unterschiedliche Möglichkeiten ergeben können. Es wird allerdings nicht beschrieben, wie Probleme und Potenziale

im Detail bestimmt werden. Bei Berücksichtigung des Gesamtsystems kommen vorwiegend Konzept- und Bedingungsleichtbaustrategien zum Einsatz mit einer anschließenden Entscheidung, ob das zu diesem Zeitpunkt festgelegte Gewichtsziel erreicht ist. Bei Nichteinhaltung wird direkt in die Bauteiloptimierung übergegangen, ohne auf Systemkonzeptebene eine Entwicklungsiteration durchzuführen. Den Bauteilen werden die geforderten Funktionen zugewiesen, woran sich die Wahl der Bauweise anschließt und schließlich mit den Stoff-, Form- und Fertigungsleichtbaustrategien optimiert. Das Gesamtsystem und die Einzelteile bzw. Baugruppen ergeben ein theoretisches Produkt, das mit einem Prototyp abgesichert werden soll zur Überprüfung von Funktionen, Kosten und Gewicht. Liefert der Test des Prototyps Erkenntnisse, die das Produkt verbessern können, wird eine Makro-Iteration zurück zur strategischen Leichtbauphase vorgenommen.

Vorgehen nach Schmidt

Das Vorgehen nach Schmidt [Schm04] besteht aus Einzelschritten, die nicht isoliert anzusehen sind, sondern in einen Produktentwicklungsprozess eingebunden werden müssen. Generell werden die Einzelschritte in Analyse- und Syntheseschritte eingeteilt (siehe Abbildung 3.17).

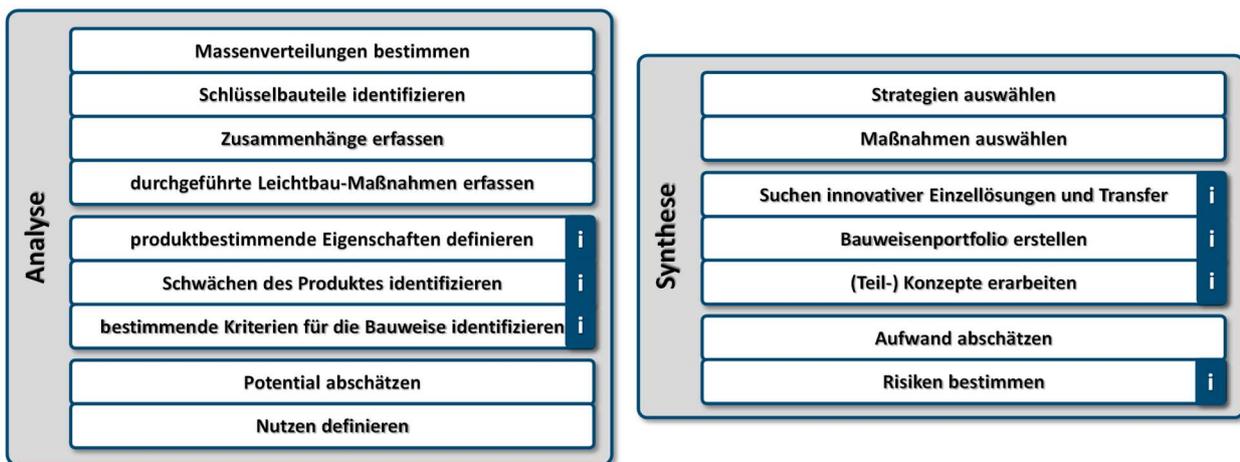


Abbildung 3.17: Analyseschritte bei der Entwicklung innovativer Leichtbauprodukte [Schm04]

Bei der Durchführung der Einzelschritte werden bekannte Methoden, auch aus anderen Bereichen, angewandt, wobei oft Vorgängerprodukte als Vergleich dienen. Massenverteilungen können z. B. aus CAD-Modellen ermittelt werden, Schlüsselbauteile aus ABC-Analysen oder Zusammenhänge aus Ursache-Wirkungs-Diagrammen.

3.3.2.3 Einzelmethode als Beitrag zur methodischen Gewichtsoptimierung

Im Folgenden werden die Einzelmethode zur methodischen Gewichtsoptimierung näher beschrieben, die von weiterer Relevanz für die vorliegende Arbeit sind.

Methode der gewichtsintensiven Anforderungen nach McLellan

Der Ansatz von McLellan (siehe [McLe10], [MMFM09]) gibt eine Vorgehensweise bei der Bestimmung von Anforderungen vor, die gewichtskritisch sind. Diese müssen dann gesondert betrachtet werden. Damit greift dieser Ansatz schon in den sehr frühen Phasen der Entwicklung ein, wo nach dem Paradoxon der Konstruktion [Ehr109] die größte Einflussmöglichkeit besteht. Das Vorgehen wird in mehrere Schritte unterteilt: zuerst werden die Anforderungen aus der Anforderungsliste in Beziehung zu Komponenten (entweder eines Vorgängerproduktes oder eines ersten Prototyps) mittels einer Domain Mapping Matrix gesetzt. Dabei kann jeder Anforderung ein Wert zugewiesen werden, der ausdrückt, welches Gewicht von diesen Anforderungen beeinflusst wird. Desweiteren wird das durchschnittliche Gewicht pro Komponente bestimmt. Der zweite Prozessschritt sieht die Verknüpfung der Anforderungen zu den anderen Anforderungen mithilfe einer Design Structure Matrix vor. Abschließend kann die Anzahl von Verknüpfungen einer Anforderung gegen das durchschnittliche Gewicht einer Komponente aufgetragen werden. Als Ergebnis können die Anforderungen klassifiziert werden einerseits nach dem Grad ihrer Vernetzung, andererseits nach dem Gewicht, das sie beeinflussen. Besonderes Augenmerk sollte im Sinne einer Leichtbauoptimierung auf die Anforderungen gelegt werden, die nicht stark vernetzt sind und einen hohen Gewichtseinfluss besitzen (siehe Abbildung 3.18).

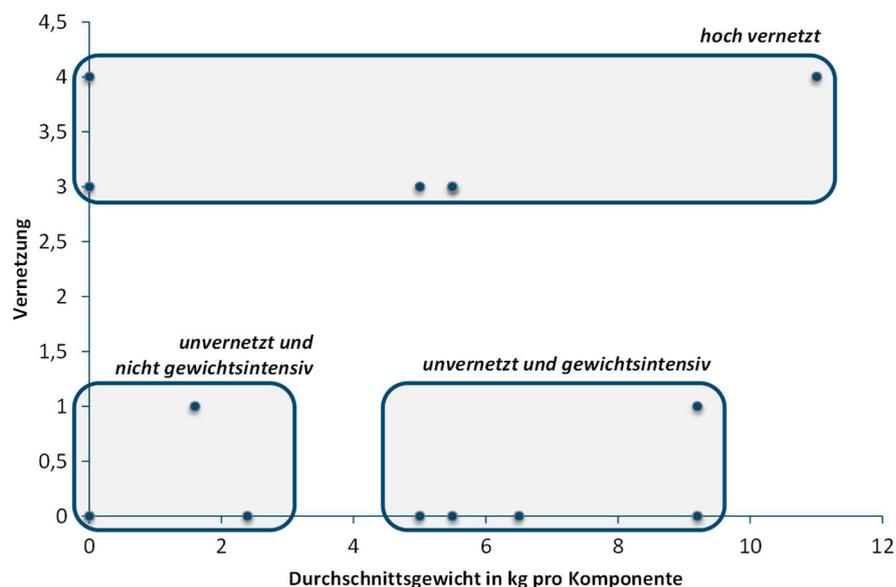


Abbildung 3.18: Diagramm zur Identifizierung von schwach vernetzten, gewichtsintensiven Anforderungen
[MMFM09]

Methode der „trägen Komponenten“ nach Namouz

Ähnlich zum Ansatz von McLellan ermittelt Namouz [Namo10] allerdings auf Bauteilebene Komponenten, die zwar Gewicht beitragen, aber keinen großen Einfluss auf die Gesamtfunktionalität

des Gesamtsystems aufweisen. Hier sind z. B. Bauteile, die nur für die Fertigung notwendig sind oder die keiner direkten funktionalen Anforderung entsprechen. Diese sogenannten „lazy parts“ werden dadurch ermittelt, dass die Bauteile nach Indikationschecklisten bewertet werden und schließlich nach ihren Einsparpotenzialen abgeschätzt werden.

Methodensammlung nach Ponn

Ponn stellt in seiner Abhandlung [PoLi11] Methoden für eine Gewichtsoptimierung entlang des gesamten Entwicklungsprozesses bereit. In der Phase der Produktplanung wird eine genaue Analyse der Anforderungen gefordert, um mögliche Zielkonflikte schon früh identifizieren zu können. Zur Bestimmung des Zielgewichts des zu entwickelnden Systems werden Benchmarking [Fahr02] und ABC-Analysen vorgeschlagen.

Zur Berücksichtigung des Gewichts auf Funktionenebene werden analog zur Funktionskostenanalyse im Target Costing ([Stoe99], [Niss06], [Seid06]) die Gewichtsanteile zur Erfüllung von Teilfunktionen ermittelt. Die Abschätzung gestaltet sich schwierig und sollte nur von erfahrenen Ingenieuren durchgeführt werden. Die Funktionsmassenanalyse bestimmt Funktionsgewichte durch den Vergleich von Bauteilen und Komponenten von Vorgängerprodukten mit den zu erfüllenden Funktionen des Produktes. Somit erfolgt schon früh im Entwicklungsprozess eine Priorisierung der Funktionen nach Gewichten.

Auf der Wirkebene werden Abschätzungen für das Produktgewicht zu den einzelnen Wirkprinzipien getroffen. Allerdings ist es wie auf Funktionsebene schwierig, genaue Angaben zu machen, da z. B. noch nicht festgelegt, welches Material für die Erfüllung eines Wirkprinzips eingesetzt wird. Es muss auch festgehalten werden, dass die Kombination aus den Wirkprinzipien mit dem jeweils geringsten Gewicht pro Funktionserfüllung zu einer plausiblen Prinziplösung führen.

Auf Bauteilebene kommen die „klassischen“ Leichtbauprinzipien zum Einsatz, wie z. B. bestimmte Gestaltungsprinzipien, Einsatz neuer Werkstoffe und Fertigungsverfahren oder Strukturoptimierung durch Berechnungen.

Methoden von Posner und Wagner nach dem Vorbild der Wertanalyse

Die Methodensammlung von Posner (siehe [PKBR12a], [PKBR12b], [PoBR13a], [PoBR13b], [PoBR14a], [PoBR14b]) beschreibt ein Rahmenwerk für eine Funktionsmassenanalyse, die in den Grundzügen auf der Wertanalyse (siehe [DIN EN12973], [DIN69910], [VDI2800]) sowie der Wertanalyse Gewicht von Feyerabend [Feye91b] basiert. Dabei werden Funktionen und Gewicht als Entwicklungsziel angegeben. Der Konstrukteur soll mithilfe der Methode sowohl bei der Funk-

tionserfüllung als auch bei Einhaltung des Gewichtsziels auch in den frühen Phasen der Produktentwicklung unterstützt werden. So wird zum Beispiel ein Hilfsmittel angegeben zur Berücksichtigung von Gewichtskriterien bei der Erstellung der Funktionsstruktur. Dieses Vorgehen erfolgt zweistufig: Zuerst werden aufbauend auf dem Vorgehen beim Erstellen der Funktionsstrukturen nach VDI 2221 [VDI2221] zusätzliche Schritte eingefügt, die durch Variation der Funktionsstruktur (Hinzufügen, Entfernen, Integrieren und Ändern von Funktionen oder die Systemgrenze ändern) das Leichtbaupotenzial erhöhen sollen [PoBR13a]. Im zweiten Schritt werden den Funktionen sogenannte Funktionsgewichtsziele zugeordnet, die aus einem Vergleich zwischen kundenorientierten und technischen Funktionen sowie dem Gesamtgewichtsziel ermittelt werden, das vorher festgelegt wird [PoBR13b]. Darüber hinaus werden in der Funktionsgewichtsanalyse sogenannten Funktionsgewichte gemäß [PoLi11] festgelegt, wobei Bauteile und Komponenten aus Vorgängerprodukten mit den schon genannten technischen Funktionen verglichen werden. Eine Betrachtung von Funktionsgewichten und zugehörigen Funktionsgewichtszielen führt zu neuen Optimierungspotenzialen bei Nichteinhalten der festgelegten Ziele für jede einzelne Funktion. Ein weiteres Hilfsmittel stellt die Funktionsmassenabschätzung dar [PoBR14a], die verschiedene, schon vorhandene Lösungskonzepte aufgrund ihrer Funktionsgewichte miteinander vergleicht und damit eine Entscheidungsgrundlage liefern kann. Auf der Abstraktionsebene der Wirkprinzipien und der prinzipiellen Lösung wird in [PoBR13b] mit Hilfe der Reduktionsstrategien von Birkhofer [Birk80] der Lösungsraum mit Fokus auf dem Leichtpotenzial beschränkt, um eine einfachere Lösungsauswahl treffen zu können.

Albers und Wagner [AWRH13] zielen ebenfalls auf ein leichtbauorientiertes Funktionskonzept ab, mit deren Hilfe sie Gewichte und Funktionen zuordnen können. Grundlage dieses Ansatzes ist ähnlich zu der Methodensammlung von Posner das Verfahren der Wertanalyse und zusätzlich des Target Costing. Durch die Beschreibung der Gewichtsignifikanz von Funktionen werden Leichtbaupotenziale offeriert, ohne im Detail einzelne Systemkomponenten zu betrachten. Darüberhinaus wird eine systematische Vorgehensweise zur Bestimmung von Gewichtszielen dargelegt. Durch die Überführung der Target Costing-Methode zur Target Weighing-Methode werden jeder Systemkomponente Funktionsgewichte zugewiesen. Mit der entstehenden Funktion-Gewicht-Matrix kann eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt werden, welche generierte Konzeptidee in Bezug auf Kosten, Gewicht und Volumen am besten geeignet ist.

Leichtbau-Methode für modulare Produkte nach Gumpinger

Die Methode für leichtbaugerechte, modulare Produkte (siehe [GuJK09], [GuKr08], [GuKr11a], [GuKr11b]) basiert auf der Umsetzung der Funktionsintegration nach [Roth00a] und entwickelt diesen Ansatz weiter für modulare Produkte, wobei eine Gewichtsoptimierung durch eine Reduzierung der Teilezahl realisiert werden kann. Es wird ein Vorgehen vorgeschlagen, bei dem in einem „Pre-Processing“-Schritt die Modulvarianten definiert werden und in einem Optimierungsschritt die Überdimensionierung reduziert und damit die Gewichtsoptimierung vorangetrieben wird. Dabei muss immer ein Kompromiss zwischen Schnittstellen und Einsparpotenzialen getroffen werden, was mithilfe einer Visualisierung unterstützt wird ([GJPK11], [GuKr11b]). Dabei können Produktmodule identifiziert werden, die besonders sensitiv in Bezug auf eine Gewichtsreduzierung einer Produktfamilie sind. Dadurch können Schneeball-Effekte durch weitere Einsparungen an anderen Modulen erzielt werden.

Zusammenfassung der Einzelmethoden

Wie aus der oben gezeigten Analyse hervorgeht, sind zwar schon heute zahlreiche Einzelmethoden oder Methodensammlungen für unterschiedliche Produktkonkretisierungsebenen bekannt, z. B. die Bestimmung gewichtsrelevanter Anforderungen, die Funktionsmassenanalyse oder die Abschätzung der Gewichte eines Wirkprinzips. Es fehlt allerdings ein durchgehender Leitfaden bzw. ein ganzheitliches Vorgehen, das diese Methoden miteinander integriert und synergetisch verbinden kann.

3.3.2.4 Behandlung von Gewichtseigenschaften während des Entwicklungsprozesses

Ansatz nach Dahm

Die Methodik hinter dem entworfenen IT-Tool von [DaVG05] und [DaVG06] verfolgt die Behandlung der Gewichtseigenschaften bzw. -daten über den kompletten Entwicklungsprozess. Dabei können die Gewichtseigenschaften später im Prozess immer genau dargestellt werden und das Gesamtgewicht zum Gewichtsziel hin eingegrenzt werden. Dieser sogenannte Tunnel-Effekt (siehe Abbildung 3.19) ermöglicht eine frühzeitige Prognose der Gewichtseigenschaften und somit eine rechtzeitige Identifizierung von Gewichtstreibern. Dadurch können Konstruktions- und Konzeptfehler frühzeitig erkannt werden.

Auf Basis von Grunddaten werden in den ersten Phasen die Gewichtseigenschaften abgeschätzt, z. B. anhand von Vorgängerprodukten. Durch die fortschreitende Entwicklungsarbeit können bei der Erstellung von CAD-Modellen die Gewichtseigenschaften berechnet werden, bevor sie bei

der Fertigung der Prototypen mit Wiegen nachgewiesen werden können. Vorteil dieser Methode ist vor allem die Identifizierung von Risiken und Potenzialen relativ früh im Entwicklungsprozess und das durchgehende Management der Gewichtseigenschaften über den gesamten Entwicklungsprozess.

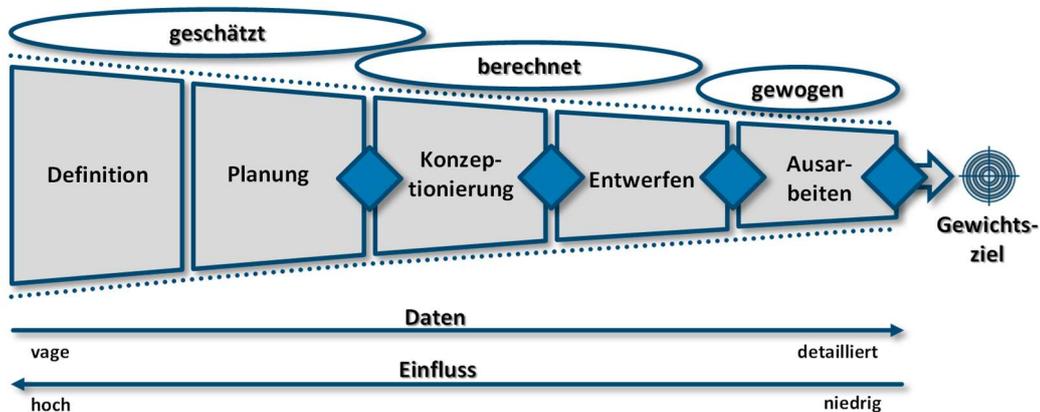


Abbildung 3.19: Tunnel-Effekt der Gewichtsdaten während der Entwicklung (nach [DaVG05], [DaVG06])

Ansatz des Gewichtsmanagements nach Kreis & Blankenburg

Das Gewichtsmanagement stellt nach [KrBl14] eine Möglichkeit dar, mithilfe von Werkzeugen und Methoden entlang des Produktentstehungsprozesses bei der Entscheidungsfindung beim Treffen von Leichtbaumaßnahmen zu unterstützen. Dabei hilft vor allem eine transparente Prognose des Gewichtes, um Zielkonflikte in der Konzeptphase gegeneinander abzustimmen, da bekannterweise das Gewicht ein Einfluss auf viele Produkteigenschaften hat. Eine bekannte Methode ist dabei die Szenarientechnik, bei der Daten von Vorgänger- bzw. Konkurrenzprodukten zum Vergleich herangezogen werden. Abgeleitet davon kann ein Effizienzmaß einer Leichtbaumaßnahme hinsichtlich Kosten, eingespartem Gewicht und Beeinflussung anderer Produkteigenschaften angegeben werden, wenn verschiedene Zielerreichungspfade durchlaufen werden. Neben dem Einsatz der Szenarientechnik in der Konzeptphase wird in der Entwicklungsphase als Gewichtsmanagementmethode ein Regelkreis verwendet, der die fortlaufende Aktualisierung des Gewichtes kontrolliert, das Treffen von Leichtbaumaßnahmen und damit Entscheidungen steuert sowie systematisch weitere Leichtbaupotenziale identifiziert. Mithilfe von Verwiegungen an Prototypen unterschiedlichsten Reifegrades werden die prognostizierten Gewichte und die Verwiegeergebnisse bestimmt, die dann zu Zertifizierungsgewichten für Gesetzgeber und Unternehmensabteilungen abgeleitet werden.

3.3.3 Leichtbau aus mechatronischer und systemtechnischer Sicht

Dieses Unterkapitel beleuchtet ähnlich zum dem vorhergehenden Abschnitt den Leichtbau bzw. die Gewichtsoptimierung aus mechatronischer bzw. systemtechnischer Sicht. Dabei stehen nicht Entwicklungsprozesse oder -methoden im Vordergrund, sondern wie ein mechatronisches Leichtbausystem aus Sicht der Systemtechnik zu verstehen ist.

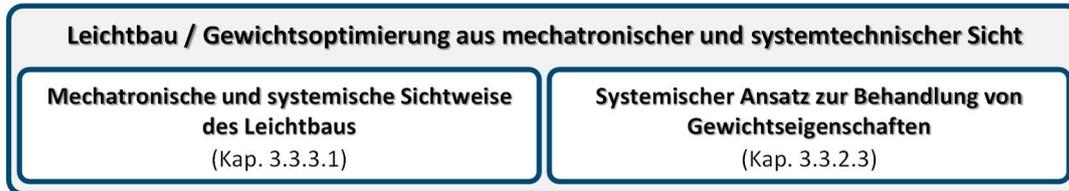


Abbildung 3.20: Leichtbau aus mechatronischer und systemtechnischer Sicht

3.3.3.1 Mechatronische und systemische Sichtweise des Leichtbaus

Die Abhandlung von [Gran12] beschreibt eine systemtechnische Analyse des Leichtbaus sowie die Behandlung von Mechatronik und Leichtbau in einem System. Grundsätzlich wird festgestellt, dass durch den Einsatz von Mechatronik im weitesten Sinne ein Gesamtsystem mit gleicher Systemfunktionalität, aber reduziertem Gesamtgewicht erzielt werden kann. Zur Schaffung von Leichtbaupotenzialen werden mithilfe von Funktionsverlagerungen ein mechatronisches System in ein mechatronisches Leichtbausystem (indirekte Überführung) oder ein rein mechanisches System in ein mechatronisches Leichtbausystem (direkte Überführung) durchgeführt.

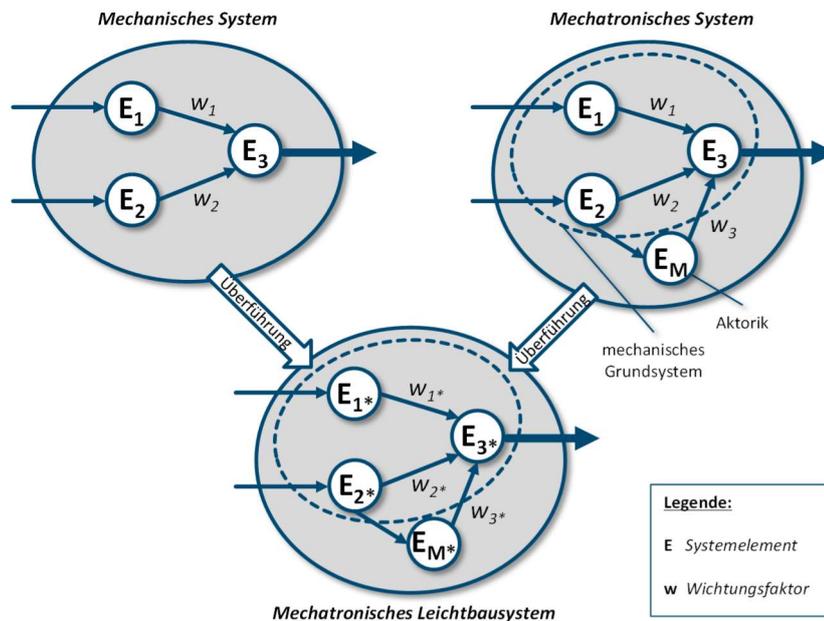


Abbildung 3.21: Überführung zu einem mechatronischen Leichtbausystem [Gran12]

Dabei müssen in Bezug auf das mechatronische System (siehe Abbildung 2.6) notwendige Bedingungen erfüllt sein: die Aktorik muss zur Systemfunktion beitragen, die Systemzustände müssen

mit der Sensorik erfasst werden können, die Systemfunktion ist durch ein mechanisches System bestimmt sowie die Systemfunktionen eine Funktion des Gewichts. Durch die Funktionsverlagerung und damit der Verlagerung der Wichtungsfaktoren kann das System indirekt oder direkt überführt werden, wobei das Funktionsgewicht für jedes Element kleiner oder gleich als im ursprünglichen System sein muss. Somit werden Funktionsumfänge von Teilsystem/Elementen mit großem Funktionsgewicht auf mechatronische Teilsysteme mit kleinem Funktionsgewicht überführt und der eigentliche Funktionsverlust durch den Einsatz der zusätzlichen Mechatronik ausgeglichen.

3.3.3.2 Systemischer Ansatz zur Behandlung von Gewichtseigenschaften

Der Systemansatz von de Weck [Weck06] beschreibt das sogenannte „*mass budget management*“ in den frühen Phasen der Entwicklung, insbesondere für neue komplexe Fahrzeuge und Produkte. Im Gegensatz zu herkömmlichen Gewichtsbudgetmanagement-Ansätzen mit hierarchisch dekomponierten System, bei den das Gewicht top-down zu den Subsystemen und Komponenten vererbt wird, werden Interaktionen und Beziehungen auf der Subsystem-Ebene in den Fokus gestellt, da nicht gesichert ist, wie sich eine Gewichtsoptimierung in einem System auf parallele Subsysteme auswirken. Daher muss die Unsicherheit bei der Zuweisung der Gewichte zu den Subsystemen im frühen Entwicklungsstadium genauso intensiv betrachtet werden wie die systematischen Methoden für die Systemdekomposition und das Zuweisen der Gewichte zu den individuellen Subsystemen. Bei der Konzepterstellung werden die Gewichtstreiber des Systems bestimmt und darauf aufbauend das Gesamtsystemgewicht abgeschätzt, beides abgeleitet aus den Anforderungen an das zu entwickelnde System. Hilfreich hierbei ist der Vergleich der Hauptfunktionsanforderungen mit den Hauptsystemvariablen. Die Gewichtszuweisung aus dem Gesamtsystemgewicht zu den Subsystemen und Komponenten wird durch Maßnahmen unterstützt, die das Systems Engineering bereitstellt, z. B. das Nachverfolgen des Gesamtgewichtes (siehe Abbildung 3.22), die Gewichtszuweisung an Subsysteme, das Ableiten der Gewichtssensitivität sowie eine systematische Vorgehensweise. Darüberhinaus wird das integrierte Systemmodell entwickelt, das sowohl Hauptfunktionen als auch Gesamtsystemgewicht als Funktion der Entwicklungsvariablen auf System-Ebene ansieht. Schwachpunkte bei diesem Ansatz ist die Auswirkung von Modulkonzepten auf das Systemgewicht, die Folgen von Gewichtseinsparungen auf die Lebenszykluskosten sowie das Behandeln von Gewichtssteigerungen bei Änderungskonstruktionen.

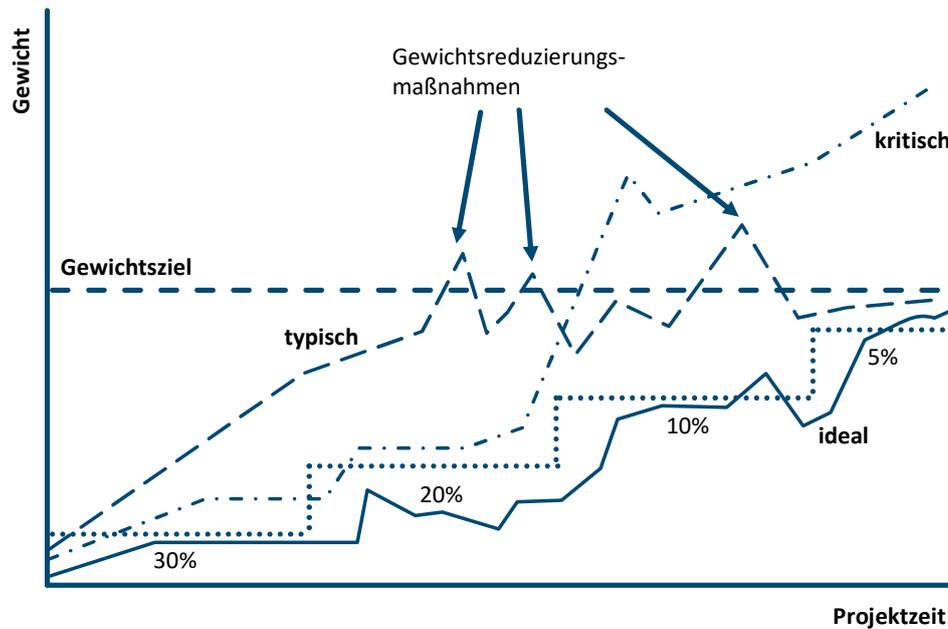


Abbildung 3.22: Evolution der Systemmasse bei komplexen Produkten [Weck06]

3.3.4 Primäre und sekundäre Gewichtseinsparpotenziale

Gewichtseinsparungen werden meist durch die oben genannten und beschriebenen Leichtbaustراتيجien erreicht. Die Maßnahmen zur Gewichtsreduzierung setzen meist auf der physischen Ebene des Produktes an und werden meist zu späten Zeitpunkten bei einzelnen Teilen des Gesamtsystems angewendet. Ursache ist oft die schlechte Abschätzung der Auswirkungen durch eine Leichtbaumaßnahme. Darüber hinaus gestaltet sich die Einbindung dieser in den Produktentwicklungsprozess oft schwierig. [FiKR07]

Das Konzept der primären und sekundären Gewichtseinsparpotenzial bietet die Möglichkeit, die Auswirkungen einer Gewichtseinsparung sowohl auf primäre als auch auf sekundäre und postsekundäre Weise momentan noch eher empirisch als analytisch zu beschreiben.



Abbildung 3.23: Primäre und sekundäre Gewichtseinsparpotenziale

3.3.4.1 Primäre Gewichtseinsparpotenziale

Unter primären Gewichtseinsparpotenziale werden laut [EGBU10] und [EGGL11b] alle möglichen Gewichtseinsparungen für eine bestimmte Komponente bzw. gewisses System verstanden, die

durch eine direkte Anwendung einer Leichtbaumaßnahme (z. B. Substitution des Materials, neue Fertigungstechnologien, Strukturverbesserungen) entstehen.

3.3.4.2 Sekundäre Einsparpotenziale

Aufbauend auf der Anwendung von primären Leichtbaumaßnahmen entstehen sekundäre Effekte, die sogenannten sekundären Einsparpotenziale, an Komponenten/System, die das System mit der primären Maßnahme umgeben bzw. mit diesem in Verbindung stehen ([EGBU10] und [EGGL11b]). In ähnlicher Weise definieren Kopp et al. die sekundäre Gewichtseinsparung als Einsparungen einer Struktur, die sich auf andere Strukturen auswirken [KoBM11]. Einer sekundären Gewichtseinsparung bedarf es immer eine Primärmaßnahme zur Gewichtsoptimierung. Somit sind sekundäre Gewichtseinsparungen Einsparungen als Folge der Überdimensionierung der Systemstruktur, die um eine primär verbesserte Komponente liegt. Diese umliegende Systemstruktur kann dadurch auch in Bezug auf Gewicht optimiert werden.

Da eine sekundäre Einsparmaßnahme wiederum selbst als eine Primärmaßnahme angesehen werden kann, entstehen weitere Sekundäreinsparpotenziale (siehe Abbildung 3.24). Somit kann eine Primäreinsparmaßnahme weitere Einsparpotenziale unterschiedlicher Ordnung freigeben. Es bleibt festzustellen, dass die Art der Leichtbaumaßnahme für eine Primäreinsparung nicht relevant ist.

Wie leicht zu verstehen ist, ermöglicht die Betrachtung von sekundären Gewichtseinsparpotenzialen innerhalb technischer Systeme ein weitaus größeres Gewichtsoptimierungspotenzial des Gesamtsystems als die Fokussierung allein auf Primäreinsparungen. Zur Identifikation der Sekundärpotenziale bedarf es eines besseren Verständnisses des Gesamtsystems, also der Systemstruktur, um die Wechselwirkungen – wie beeinflusst ein Subsystem ein anderes Subsystem – darstellen zu können. Erst dadurch kann das vollständige sekundäre Gewichtseinsparpotenzial angegeben werden. Hindernisse dabei sind allerdings die Datenerhebung und damit die Bestimmung der Wechselwirkungen in Bezug auf Gewichtskriterien.

Das gemittelte, empirisch ermittelte Verhältnis von sekundären zu primären Gewichtseinsparungen in der Automobilindustrie [EGBU10] entspricht ungefähr 0,5 und 0,58, wobei der Minimalwert bei 0,16 und der Maximalwert bei 1,0 liegen. Das bedeutet also, dass bei Einsparungen eines Kilogramms durch eine direkte Leichtbaumaßnahme durch nachrangige Maßnahmen weitere 580 Gramm eingespart werden können. Schon 1960 stellte Hertel [Hert80] fest, dass beim Flugzeugbau durch den Gewichtsvergrößerungsfaktor ε (in den meisten Fällen ist $\varepsilon=4$) auch direkt

der Gewichtsverkleinerungsfaktor vorgegeben wird, der die Auswirkung einer Gewichtseinsparung auf das Gesamtsystem beschreibt.

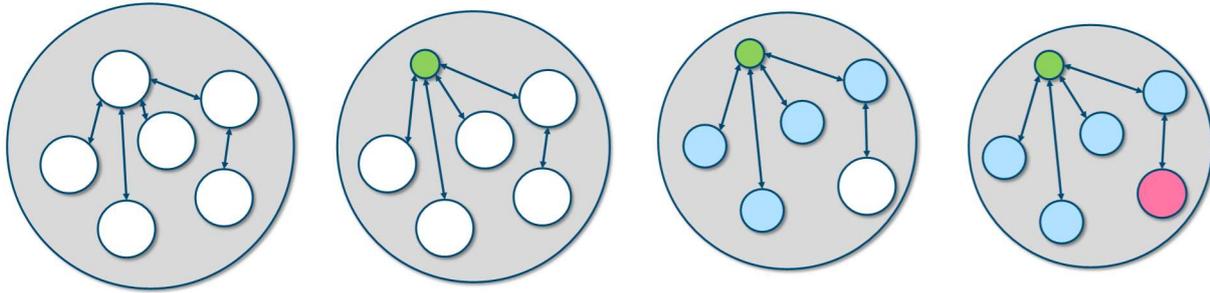


Abbildung 3.24: Ausgangssystem (1), Primärmaßnahme (2), Sekundärmaßnahme 1. Ordnung (3), Sekundärmaßnahme 2. Ordnung (4)

3.3.4.3 Methoden zur Bestimmung sekundärer Gewichtseinsparpotenziale

Top-Down-Ansatz nach Alonso/Bjelkengren

Die traditionelle empirische Abschätzung von sekundären Gewichtseinsparungen wird durch den Ansatz von Alonso [ALBR12] und Bjelkengren [Bjel08] zu einer analytischen Beschreibung weiterentwickelt, wobei zusätzlich die Unsicherheit bei der Abschätzung und die Wichtigkeit von Expertenklassifikation von Daten auf Komponentenebene zur Behandlung von gewichtsunabhängigen Effekten quantifiziert und die obere Grenze dieser Methode charakterisiert wird. Dabei fokussiert der Top-Down-Ansatz die frühen Phasen der Produktentwicklung und zielt auf die Bestimmung der Änderungen der Subsystemgewichte aufgrund einer Änderung beim Gesamtsystemgewicht, d.h. wie groß ist das Sekundärpotenzial im Subsystem im Verhältnis zur Primäreinsparung auf oberster Systemebene. Dabei ist jedes Komponenten- bzw. Subsystemgewicht als Funktion des Gesamtsystemgewichts dargestellt, wobei allerdings die Komponenten als gewichtsabhängig oder gewichtsunabhängig deklariert werden. Hierbei bezeichnet gewichtsunabhängig, dass das Gewicht des betrachteten Subsystems/Komponente nicht direkt beeinflusst wird bei der Änderung des Gesamtsystemgewichts. Durch die mathematische Beschreibung und die analytische Berechnung werden diese Gewichtsabhängigkeiten der Subsysteme ermittelt. Diese Abschätzung wird mit Hilfe von den sogenannten Gewichtszerlegungskoeffizienten beschrieben, die nach Ansicht von Bjelkengren [Bjel08] ein besseres Verständnis der Subsystem-Gewichtsabhängigkeiten ermöglichen und somit detailliert über mögliche sekundäre Einsparpotenziale Auskunft geben können.

Top-Down-Ansatz nach Eckstein et al.

Der Ansatz von Eckstein et al. ([EGBU10], [EGGL11a], [EGGL11b]) beschreibt die empirische und analytische Bestimmung von sekundären Gewichtseinsparpotenzialen am Beispielen von Automobilen. Dabei wird das Gesamtsystem in Subsysteme strukturiert, um die Komponenten und Subsysteme identifizieren zu können, die für die sekundäre Gewichtseinsparung relevant sind. Am Beispiel des Automobils werden die Komponenten mit sekundärem Einsparpotenzial anhand von vordefinierten Auswahlkriterien bestimmt (in diesem Falle Bauteilgröße, Kraft und Trägheitskräfte). Anschließend ist eine analytische bzw. empirische Ermittlung von Beziehungen zwischen erwünschter Komponenten und der Gesamtsystemmasse nötig. Finite-Elemente-Analysen unterstützen das Ergebnis der Gewichtsreduktion beim Gesamtfahrzeug.

Ganzheitlicher Ansatz nach Trautwein

Der ganzheitlich ausgelegte Ansatz von Trautwein et al. [TrHR11] ist ebenfalls im Automobil-Sektor entstanden. Dabei wird das vollständige sekundäre Gewichtseinsparpotenzial erreicht, wenn der Dimensionierungsrahmen festgelegt wird, bevor die Entwicklung jedes Einzelteils fertiggestellt ist oder eine Zulieferer-Anfrage gestellt wird. Das Ziel stellt hier die Aufwandsminimierung von primären Einsparmaßnahmen dar unter der Prämisse, dass so viele sekundäre Gewichtseinspareffekte wie möglich erzeugt werden. Der Ansatz startet mit der Bestimmung des strategischen Gewichtsziels und einer ersten Abschätzung der sekundär entstehenden Gewichtseinsparungen. Der dafür benötigte primäre Einsparungsimpuls durch eine Leichtbaumaßnahme wird daraus abgeleitet. Entsprechend dieses Wertes werden die benötigten Gewichte zu den Komponenten und Subsysteme alloziert und diese daraufhin endgültig dimensioniert.

Zusammenfassung

Alle Ansätze und Methoden aus der Literatur für sekundäre Gewichtseinsparungen verfolgen dasselbe Ziel: die Potenzialabschätzung von sekundären Optimierungsmaßnahmen auf empirische oder analytische Weise. Da allerdings zum großen Teil nur der physische Teil eines Systems, Subsystems oder Komponente betrachtet und somit die anderen Abstraktionsebenen (Anforderungen, Funktionen, Lösungsprinzipien) außer Acht gelassen werden, treten einige Unzulänglichkeiten bei der ganzheitlichen Betrachtung dieser sekundären Gewichtsverbesserung über den gesamten Entwicklungsprozess auf. Vor allem sind in den frühen Phasen die Gewichtseigenschaften schwer zu ermitteln.

3.3.5 Beurteilung der Leichtbaustrategien und Leichtbaumethoden

Die vorgestellten Leichtbaustrategien und -methoden werden im Folgenden nach gewissen Kriterien beurteilt, um eine bessere Aussagekraft über ihren besseren Nutzen und ihr Gewichtsoptimierungspotenzial treffen zu können.

3.3.5.1 Leichtbaustrategien

Die oben genannten Leichtbaustrategien werden zur besseren Beurteilung und zum direkten Vergleich einer Bewertung nach folgenden Kriterien unterzogen:

- Einsatzmöglichkeit bzw. Einsatzzeitpunkt im Entwicklungsprozess: Dabei wird analysiert, ob die Strategien in den frühen (vor der Konzeptfestlegung) oder in den späten Entwicklungsphasen (nach der Konzeptfestlegung) einsetzbar sind.
- Anwendung auf unterschiedliche Systemstruktur-Ebenen: Die Leichtbaustrategien werden hinsichtlich ihrer Anwendung auf die verschiedenen Systemebenen (Komponenten, Teilsystem, Gesamtsystem) untersucht.
- Industrielle Anwendung in Unternehmen: Die Verbreitung in industrielle Unternehmen (z. B. Automobil- oder Luftfahrtindustrie) wird festgelegt.
- Anwendbarkeit für mechatronische Produkte bzw. für sekundäre Gewichtseinsparung: Aufgrund der Problembeschreibung wird die Einsetzbarkeit der verschiedenen Leichtbaustrategien auf mechatronische Produkte und die Möglichkeit, sekundäre Einsparmöglichkeiten zu generieren, untersucht.
- Allgemeines Leichtbaupotenzial: Das allgemeine Leichtbaupotenzial beschreibt die Gesamtheit der vorherigen Kriterien.

Aus der Analyse der Leichtbaustrategien auf den vorangegangenen Seiten kann folgende Tabelle generiert werden, die die Eignung der Leichtbaustrategien für die vorgenannten Kategorien darstellt.

Aus Tabelle 3.3 wird ersichtlich, dass vor allem dem Systemleichtbau das größte Leichtbaupotenzial zugemessen wird. Das lässt sich damit begründen, dass der Einsatz in frühen Phasen, die Anwendbarkeit auf das Gesamtsystem und damit die Möglichkeit zur Gewichtsoptimierung für mechatronische Systeme und durch sekundäre Einsparungen mit dieser Strategie im Großen und Ganzen abgebildet werden kann. Darüberhinaus spielt der Konzeptleichtbau eine wesentliche Rolle. Ebenso wie der Systemleichtbau werden vor allem die frühen Phasen der Entwicklung fokussiert, wo verschiedene Konzept generiert werden. Deutlich wird der hohe Anteil der industriellen Anwendbarkeit von Fertigungs-, Form- und Materialleichtbau, die zum größten Teil erst in

der Ausarbeitungsphase des Entwicklungsprozess zum Tragen kommen und sich nicht auf Gesamtsysteme beziehen, da Form und Material immer auf Komponentenebene festgelegt wird. Bei der Gewichtsoptimierung von mechatronischen Systemen kommen diese Strategien größtenteils für das mechanische Grundsystem in Frage.

Tabelle 3.3: Leichtbaustrategien und Bewertung

	Einsatz im Entwicklungsprozess		Anwendung			Anwendung in Unternehmen	Anwendbarkeit für		Leichtbaupotenzial
	frühe Phasen	späte Phasen	Komponenten	Teilsystem	Gesamtsystem		Mechatronik	sekundäre Einsparung	
Bedingungsleichtbau									
Konzeptleichtbau									
Fertigungsleichtbau									
Formleichtbau									
Materialleichtbau									
Systemleichtbau									

Legende: nicht erfüllt wenig erfüllt teilweise erfüllt größtenteils erfüllt voll erfüllt

3.3.5.2 Leichtbaumethoden

Analog zu der Beurteilung der Leichtbaustrategien werden die vorgestellten Leichtbaumethoden nach den folgenden Kriterien beurteilt (siehe Tabelle 3.4):

- Einsatzmöglichkeit bzw. Einsatzzeitpunkt im Entwicklungsprozess: Dabei wird analysiert, ob die Strategien in den frühen (vor der Konzeptfestlegung) oder in den späten Entwicklungsphasen (nach der Konzeptfestlegung) einsetzbar sind.
- Anwendung auf unterschiedliche Abstraktionsebenen: Die Leichtbaumethoden werden hinsichtlich ihrer Anwendung auf verschiedenen Abstraktionsebenen (Anforderungen (R), Funktionen (F), Wirkprinzipien (L), physikalische Baustruktur (P)) untersucht.
- Anwendung auf unterschiedliche Systemstruktur-Ebenen: Die Leichtbaumethoden werden hinsichtlich ihrer Anwendung auf die verschiedenen Systemebenen (Komponenten, Teilsystem, Gesamtsystem) untersucht.
- Kompatibilität: Die Möglichkeit der Anwendung einer Methode im Zusammenhang mit den anderen Methoden, z. B. Kombination von Methoden oder Nutzen von Ergebnissen einer Methode zum Anwenden einer anderen Methode, wird geprüft.

- Zuordnung zu Leichtbaustrategien: Die vorgestellten Methoden, die definierte Handlungsanweisungen enthalten, können den Leichtbaustrategien, die eine gewisse Zielgerichtetheit vorgegeben, zugeordnet werden.
- Optimierungspotenzial: Das Gesamtoptimierungspotenzial beschreibt die durch die Anwendung der Methoden Einsparmöglichkeiten.

Wie aus dem Vergleich der Leichtbaumethoden bzw. Methodensammlung in Tabelle 3.4 zu erkennen ist, beziehen sich die meisten untersuchten Methoden für Gewichtsoptimierung technischer Systeme auf späten Entwicklungsphasen und speziell auf das Abstraktionslevel der physikalischen Struktur, also auf vorhandene virtuelle oder reelle Prototypen, bei denen das Gewicht und die dazugehörigen Eigenschaften wie z. B. Gewichtsverteilung sehr genau bestimmt werden können. Methoden in den ganz frühen Phasen sind bis auf die Ausnahme der Berücksichtigung von Gewichtskriterien bei den Anforderungen von McLellan [McLe10] nicht vorhanden. Einige Methoden (Feyerabend, Posner, Ponn, Wagner) beziehen sich auf die Abstraktionsebene der Funktionen und Wirkprinzipien, wo die größte Möglichkeit besteht, die Gewichtskriterien zu beeinflussen.

Die Anwendung der Leichtbaumethoden auf verschiedenen Abstraktionsebenen (Anforderungen, Funktionen, Wirkprinzipien, physikalische Struktur) zeigt eine deutliche Häufung der Methoden beim Einsatz auf physikalischer Bauebene. Einzelmethode beziehen die abstrakteren Methoden zwar mit ein, sind aber dann nur auf diese beschränkt, ohne mehrere Abstraktionslevels gleichzeitig zu betrachten.

Die Einordnung der Leichtbaumethoden zu den verschiedenen Systemebenen zeigt, dass durchaus alle Systemebenen angesprochen werden, aber der Großteil allerdings entweder nur oberste Systemebene oder nur Komponentenebene betrachtet. Ein alle Ebenen übergreifende Methode bzw. Methodensammlung kann im Systemansatz von Granzow oder in den Methodensammlungen von Ponn und Posner gesehen werden.

Die Verträglichkeit von Leichtbaumethoden untereinander ist teilweise gegeben. So können Erkenntnisse aus früh im Entwicklungsprozess eingesetzten Methoden, z. B. McLellan [McLe10], als Ausgangspunkt für Methoden dienen, die z. B. Funktionen oder Wirkprinzipien ansprechen.

Das allgemeine Optimierungspotenzial ist vor allem bei den Methoden am höchsten, die einerseits besonders früh im Prozess angewandt werden, z. B. McLellan [McLe10] oder Ponn [PoLi11], oder die mehrere Abstraktions-/Systemebenen ansprechen, z. B. Feyerabend, Granzow, Ponn, Posner.

Tabelle 3.4: Leichtbaumethoden und Beurteilung

	Einsatz im Entwicklungsprozess		Anwendung auf Abstraktionsebene				Anwendung auf Systemebene			Leichtbau-potenzial
	frühe Phasen	späte Phasen	R	F	L	P	Kompo-nenten	Teil-system	Gesamt-system	
Alonso										
Dahm										
de Weck										
Eckstein										
Feyerabend										
Granzow										
Gumpinger										
Kreis										
McLellan										
Namouz										
Ponn										
Posner										
Trautwein										
Wagner										

Legende:



nicht erfüllt



wenig erfüllt



teilweise erfüllt



größtenteils erfüllt



voll erfüllt

4 Defizite der bestehenden Ansätze und Ableitung eines Handlungsbedarfs

Basierend aus den Analysen des Standes der Technik aus Kapitel 3 werden in diesem Abschnitt die Defizite aus den verschiedenen Themenbereichen noch einmal zusammengefasst sowie gemeinsame Nutzenpotenziale identifiziert. Mit der Ableitung des Handlungsbedarfs werden die Forschungsfragen weiter geschärft.

4.1 Defizite bei der mechatronischen Produktentwicklung

Trotz der Multidisziplinarität bei der Mechatronik-Entwicklung sind viele Methoden noch sehr domänenspezifisch geprägt. Daher treten bei der domänenspezifischen Entwicklung in den Bereichen Mechanik, Elektronik und Software häufiger Probleme auf, da eine domänenübergreifende Kommunikation nicht oder nur unzureichend gegeben ist. Das kann auf das Fehlen mechatronisch orientierter Methoden zurückgeführt werden. Weiterhin wird in [Dohr14] festgestellt, dass allgemein ein Optimierungsbedarf bei der Analyse von Produkteigenschaften während der Produktentwicklung, der Integration von Analysen und Simulation in den Entwicklungsprozess sowie die Behandlung von Analyseergebnissen und die Förderung von Mikro-Iterationen besteht. Bezogen auf die Analyse der mechatronischen Vorgehensmodelle in Kapitel 3.1.1.2 bleibt festzustellen, dass eine Integration von gewissen X-Kriterien als Zieleigenschaften nur spärlich behandelt wird. Darüberhinaus ist der Umgang mit X-Kriterien bezüglich einer Analyse bzw. eines Monitorings während des Entwicklungsprozess nicht unterstützt.

4.2 Defizite bei der Gewichtsoptimierung technischer Produkte

Bei der Fahrzeugentwicklung werde vieles separat entwickelt, anstatt das Auto in seiner Gesamtheit zu betrachten, stellt [Mein08] fest. Das untermauert die Aussagen des Standes der Technik – bezogen auf die Entwicklung technischer Produkte, unabhängig vom Spezialfall der Fahrzeugentwicklung – dass erst eine ganzheitliche und systemische Betrachtung eines Gesamtsystems zu einer optimalen Lösung, hier in Bezug auf Gewichtskriterien, führt.

Auch der Leichtbaupionier Klein [Klei13] sieht die immer extrem werdenden Forderungen für einen "Leichtbauer" als problematisch an. So muss dieser sich mit allen technologischen Strömungen und Innovationen auseinandersetzen und diese so nutzen, dass er sie problemspezifisch zu einem Systemleichtbau adaptieren kann. Dieser Systemleichtbau bezeichnet eine systematische Gewichtsoptimierung eines Gesamtsystems.

Abgesehen vom Systemdenken sind, wie im obigen Kapitel festgestellt wurde, Methoden und Strategien nur unzureichend, sporadisch und teilweise unsystematisch ("mal hier, mal da") im Produktentwicklungsprozess verankert (siehe dazu die Beurteilung der Leichtbaustrategien aus Tabelle 3.3 und Beurteilung der Leichtbaumethoden aus Tabelle 3.4). So sind die meisten bekannten Methoden in den späten Phasen des Entwicklungsprozesses anwendbar, werden aber nur lokal für einzelne Teilsysteme oder Komponenten eingesetzt, ohne dabei Bezug auf das Gesamtsystem zu nehmen. Viele der Methoden spezialisieren sich vorwiegend auf späte Entwicklungsphasen, wenn das Konzept festgelegt ist und erste physikalische oder virtuelle Prototypen existieren. Der Einsatz von Methoden und Strategien in frühen Phasen der Produktentwicklung ist nur spärlich vorhanden, obwohl gerade dort die größte Einflussmöglichkeit auf Produkteigenschaften bestehen (siehe "Paradoxon der Konstruktion" [Ehr109]). Somit ist die heutige Entwicklung gewichtsoptimierter Produkte den kommenden Herausforderungen der Nachhaltigkeit und der Innovation nicht mehr gewachsen.

[Krau12] stellt fest, dass daher eine Umgewichtung der Prioritäten im Konstruktionsprozess nötig sei, da der Leitgedanke der Gewichtsminimierung in alle Phasen (der Entwicklung) integriert werden müsse. Aus diesem Grund müsse der Entwicklungsprozess (von der Produktidee) bis hin zu den Validierungsversuchen angepasst und erweitert werden, wobei dem Konstrukteur (und Entwickler) geeignete Berechnungswerkzeuge und Methoden zur Verfügung gestellt werden müssten, da gerade der Leichtbau vom Konstrukteur spezielles und besonders umfangreiches Wissen erfordere.

Weiterhin bleibt festzustellen, dass der Kostenfaktor im Moment der treibende Faktor bei der Leichtbauentwicklung ist. So werden oftmals innovative, gewichtsoptimierte Lösungen abgelehnt und auf bekannte, althergebrachte Leichtbaulösungen zurückgegriffen.

4.3 Defizite beim X-orientierten Entwickeln

Problematisch scheint beim X-orientierten Entwickeln die ganzheitliche Integration der X-Kriterien einerseits aufgrund fehlender oder nicht ausgereifter Methoden für einzelne Prozessschritte besonders in frühen Entwicklungsphasen (z. B. Kosten, Gewicht, Qualität), andererseits besonders durch das gleichzeitige Betrachten mehrerer X-Kriterien während der Entwicklung. Die simultane Berücksichtigung von X-Kriterien zieht erschwerte Bedingungen nach sich, da die X-Kriterien sich oft sehr komplex zueinander verhalten und beeinflussen.

Diese Zielkonflikte erfordern eine sehr schwierige Entscheidungsfindung, die oft eher eine Kompromisslösung zugunsten eines bestimmten X-Kriteriums hervorbringt (z. B. Kosten als eines der wichtigsten X-Kriterien).

Darüberhinaus werden X-Kriterien auch bei bekannten Entwicklungsmethodiken (z. B. VDI 2221) oft nur in späten Entwicklungsphasen angewandt [WeWe01]. Sie werden zwar in frühen Phasen berücksichtigt, aber dann erst wieder in den späten Phasen wieder aufgegriffen [PoLi11]. Die Durchgängigkeit ist damit nicht gegeben.

Die schlechte Integration von X-Kriterien in Entwicklungsprozesse kann mit einer nicht einfachen Abbildung dieser Kriterien in abstrakte, methodische Strukturen, z. B. Funktions- oder Wirkstrukturen, begründet werden [Webe07a, Webe12]. Oftmals fehlen dafür einfach die Methoden und Tools, die besonders für die Praxis wichtig sind, worunter die Akzeptanz des X-orientierten Entwickelns in der Praxis leidet.

4.4 Nutzenpotenziale durch Synergien

Aus den in Kapitel 3 vorgestellten Analyseergebnisse aus Literatur und Forschung der Einzelthemen können Synergien und Nutzenpotenziale identifiziert werden, die im Folgenden vorgestellt werden.

4.4.1 Mechatronik und Leichtbau

Die Mechatronik eröffnet durch ihren innovativen Charakter weitreichende neue Lösungen, die in [Moeh04] beschrieben werden. Dazu zählt auch vor allem durch den Einsatz von mechatronischen Lösungen die Reduzierung von Gewicht, Baugröße und Bauraum technischer Systeme, was einen direkten Bezug zum Leichtbau bzw. zur Gewichtsoptimierung herstellt.

Aufbauend auf dieser Aussage werden in [LuVi12a] die durch die gemeinsame Betrachtung von Mechatronik und Leichtbau erzeugten Potenziale in drei Kategorien unterteilt: technisch, ökonomisch und ökologisch, wobei die ökonomische und ökologische Kategorie verstärkt durch die Gewichtsoptimierung geprägt ist.

Die technischen Potenziale sind vor allem der Funktionalität und dem Verhalten der technischen Systeme zuzuordnen. So kann die Dynamik (bewegter und unbewegter) Massen durch eine Gewichtsreduktion oder eine geänderte Gewichtsverteilung sowie das Ersetzen von mechanischen durch gewichtsoptimierte mechatronische Komponenten, die zusätzlich weitere Funktionen übernehmen können, erheblich gesteigert werden. Diese Tatsache eröffnet neue Anwendungsfelder, vor allem bei besonders kleinen und empfindlichen System z. B. aus der Medizintechnik

oder bei sehr großen Systemen, z. B. aus der Luft- und Raumfahrt. Darüberhinaus sind überaus innovative Lösungen für technische Problemstellungen mit der Kombination aus Mechatronik und Leichtbau in Zukunft zu erwarten.

Wirtschaftliche Potenziale entstehen vor allem durch die Senkung der Treibstoff-, Energie- und Rohstoffkosten. Desweiteren können die Ausgaben für Transport und Lagerung bei leichteren Produkten verringert werden. Allerdings ist zu betrachten, dass unter Umständen bei der Herstellung von mechatronischen (Leichtbau-)Produkten Material-, Fertigungs- und Montagekosten aufgrund der Komplexität und neuer Technologien wesentlich höher sein können als bei konventionellen Produkten.

Analog dazu führen mechatronische Leichtbauprodukte zu einem allgemein geringerem Energie- und Ressourcenverbrauch. Dadurch können immer strenger werdende Gesetze und Richtlinien aus der Politik eingehalten werden, was im Endeffekt zu nachhaltigeren und umweltfreundlicheren Produkten führt. Methoden des Life Cycle Assessments beschreiben systematisch die Umweltauswirkungen eines technischen Produktes während des gesamten Lebenszyklus, angefangen von der Rohstoffgewinnung bis zur Entsorgung. Vermeintlich „umweltbewusste“ Produkte sind zwar während ihrer Nutzung klimaneutral, benötigen aber während Herstellung und Recycling einen enormen Energieaufwand und erhalten daher eine schlechte Ökobilanz, z. B. Photovoltaik-Anlagen.

Die Funktionsverlagerung auf mechatronische Elemente stellt nach [Gran12] die Möglichkeit dar, Leichtbaupotenziale zu identifizieren. Ein mechatronisches Leichtbausystem ergibt sich durch eine indirekte Überführung (Funktionsverlagerung in einem mechatronischen System) oder durch eine direkte Überführung eines mechanischen Systems durch die Integration mechatronischer Konzepte. Bedingungen sind für eine Überführung eine vorhandene Aktorik und Sensorik, die einen Systembeitrag leisten, ein mechanisches Grundsystem sowie die Darstellung der Masse als Systemfunktion.

Zusammenfassend betrachtet kann daher eine Gewichtsoptimierung mechatronischer Systeme auf zwei unterschiedliche Arten angegangen werden: einerseits die Optimierung bestehender mechatronischer Systeme oder die Optimierung mechanischer Systeme durch die Einbindung mechatronischer Konzepte.

4.4.2 Leichtbau, Systemtechnik, mechatronisches Entwickeln und X-orientiertes Entwickeln

Die Systemtechnik wird in der Abhandlung von [EnWe00] als Möglichkeit gesehen, in der Konzeptphase eine Verbindung zwischen frühzeitig festgelegten Funktionsgrößen eines Systems

(z. B. Drehmoment, Leistung, etc.), Konstruktionsgrößen (z. B. geometrische Abmaße) und anderen Größen, die das System bestimmen (z. B. Kosten, Gewicht, ...), herzustellen. Dabei beschreibt das „System eine Ganzheit, die Beziehung zwischen bestimmten Attributen aufweist (funktionaler Aspekt), die aus miteinander verknüpften Teilen besteht (struktureller Aspekt), die wiederum Systeme sind und die auf bestimmtem Rang von der Umgebung abgegrenzt ist (hierarchischer Aspekt)“. Zur Ausschöpfung der Potenziale für eine Gewichtsoptimierung ist daher die Systemtechnik miteinzubeziehen, da sowohl funktionale, strukturelle und hierarchische Aspekte berücksichtigt werden müssen.

[Gran12] unterscheidet in einem Systemansatz zwischen Wirkeigenschaften, die die Funktionen repräsentieren, und weitere Eigenschaften, die das System beschreiben. Jedes Teilsystem ist mit einer Masse beaufschlagt und leistet einen Beitrag zur Gesamtfunktion des Systems. Die Teilsysteme, die zu einer bestimmten Systemfunktionalität beitragen, sind alle durch ihre Massen beschrieben. Die Summe der Massen ergibt daher eine Funktionsmasse zu dieser bestimmten Systemfunktionalität. Da Teilsysteme unterschiedliche Funktionen erfüllen, ist die Summe der Funktionsmassen größer als die Systemmasse. Das Ziel ist also immer die Optimierung der Funktionsmasse bei gleichbleibender Systemfunktionalität. Dieses Ziel ist durch eine Funktionsverlagerung von Systemen mit hohem Gewichtsanteil zu Systemen mit kleinerem Gewichtsanteil möglich. Funktional und strukturell betrachtet werden also Funktionalitäten verlagert.

Die Einbindung der funktionalen Verlagerung als der Ausgangspunkt für die Identifizierung von Gewichtsoptimierungspotenzialen ist daher beim X-orientierten Entwickeln unabdingbar und unbedingt zu berücksichtigen. Da die funktionalen Aspekte beim Entwickeln technischer Systeme – unabhängig davon, ob mechatronisches System oder nicht – früh während des Produktentwicklungsprozesses betrachtet und sogar zum großen Teil festgelegt werden, muss gerade in diesen frühen Phasen ein besonderes Augenmerk auf die X-Kriterien gelegt werden.

4.5 Handlungsbedarf und Schärfung der Forschungsfragen

Aufgrund der in den vorangegangenen Kapiteln erfolgten Recherchen und Analysen wird der Handlungsbedarf abgeleitet:

1. Zahlreiche Leichtbau- bzw. Gewichtsoptimierungsmethoden und -strategien sind bekannt, werden aber unsystematisch eingesetzt und sind meist nur für die späten Phasen im Entwicklungsprozess geeignet. Ungenutzte Potenziale sind die Folge. Ein Gesamtkonstrukt, das Gewichtsoptimierungsmethoden durchgängig und schon in früh im Entwicklungsprozess bereitstellt, fehlt und muss entwickelt werden.

2. Die Produkteigenschaften, die durch X-Kriterien bestimmt werden, sind besonders in frühen Phasen schlecht im Entwicklungsprozess nachzuvollziehen und zu bestimmen. Analysemethoden, die auch Zielkonflikte zwischen verschiedenen X-Kriterien betrachten, müssen erstellt werden.
3. Einflüsse von Änderungen der Produkteigenschaften auf andere Produkteigenschaften können zwar mit bekannten Methoden top-down betrachtet werden, für eine bottom-up Betrachtung sind keine Methoden vorhanden. Eine geeignete Methode für ein kombiniertes Vorgehen kann die systematische bzw. systemische Beschreibung sekundärer Änderungen und damit möglichen Potenzialen bieten.
4. Aufgrund ihres innovativen Charakters sind mechatronische Systeme durchaus geeignet, gerade im Hinblick auf Gewichtsoptimierung Synergien und Potenziale freizugeben. Ein expliziter Wissensspeicher ist nicht vorhanden und muss entwickelt werden.

Basierend auf dem Handlungsbedarf werden die folgenden Forschungsfragen mit Hinblick auf die Ergebnisse dieser Analyse werden die weiteren Kapitel fokussiert. Dabei wird wie bei den initialen Forschungsfragen aus Kapitel 1.2.2 eine Zweiteilung der Fragestellung vorgenommen:

F1-a. *Wie gestaltet sich der allgemeine Prozess zur Berücksichtigung von Gewichtseigenschaften bei der Entwicklung mechatronischer Produkte?*

F1-b. *Wie werden die Gewichtseigenschaften während der Entwicklung kontrolliert, überwacht und angepasst?*

F1-c. *In welcher Weise kann bereits in frühen Phasen Einfluss auf das Gewicht des späteren Produktes genommen werden?*

F2-a. *Welche Bedeutung kommt den traditionellen Leichtbaustrategien und den Methoden der (mechatronischen) Produktentwicklung zu?*

F2-b. *Wie müssen diese Strategien und Methoden angepasst werden?*

F3-a. *In welcher Weise spielen Gewichtsänderungen innerhalb des Produktes während der Entwicklung eine Rolle? Wie können diese repräsentiert werden?*

F3-b. *Welchen Beitrag können die Systemtechnik und das Systems Engineering leisten?*

F4-a. *Wie können (bereits vorhandene, technologisch bewährte) mechatronische Konzepte zur Gewichtsoptimierung eines Produktes beitragen? Welche Anforderungen müssen mechatronische Konzepte erfüllen, um zur Gewichtsoptimierung beitragen zu können?*

F4-b. *Wo im Prozess können diese Konzepte eingesetzt werden?*

F4-c. *Wie können mechatronische Konzepte dem Konstrukteur/Entwickler zur Verfügung gestellt werden? Welche Arten der Wissensspeicherung sind sinnvoll?*

5 Methodik zur Entwicklung gewichtsoptimierter, mechatronischer Produkte

Im folgenden Kapitel wird eine Entwicklungsmethodik vorgestellt, die die vorher beschriebenen Defizite und Synergien adressiert und die Forschungsfragen aus Kapitel 4.5 beantworten soll. Die Entwicklungsmethodik beschreibt als Beispiel für eine X-orientierte Entwicklung die Gewichtsoptimierung von mechatronischen Produkten. Auf Basis eines Rahmenwerkes und eines Gesamtkonzeptes der Methodik, welche in Kapitel 5.1 definiert werden, und der eben vorgestellten Defizite und Synergien werden zunächst in Kapitel 5.2 Anforderungen an die zu entwickelnde Methodik abgeleitet. Die Beschreibung und Herleitung der Einzelemente der Methodik erfolgt in den Kapiteln 5.3 bis 5.9.

5.1 Herleitung der Methodik, Gesamtkonzept und Rahmenwerk

5.1.1 Herleitung der Methodik

Die Methodik basiert auf dem im Folgenden vorgestellten Rahmenwerk. Prozessseitig orientiert sie sich auf den in Kapitel 3.1.1.2 vorgestellten Prozessmodellen. Die festgestellten Defizite und die daraus abgeleiteten Handlungsbedarfe werden analysiert und in ein adaptiertes Prozessmodell eingearbeitet. Die im Rahmenwerk festgelegten Sichtweisen werden daraufhin systematisch eingearbeitet.

5.1.2 Gesamtkonzept und Rahmenwerk

Die Methodik kann zum Produktentwicklungsprozess, z. B. nach [UIEp08], in der Art zugeordnet werden, dass alle Entwicklungsphasen von der Produktplanung und Anforderungsdefinition bis hin zum Produktionsanlauf berücksichtigt und abgedeckt werden. Abbildung 5.1 beschreibt die Zuordnung der Methodik zum Entwicklungsprozess.



Abbildung 5.1: Zuordnung der Methodik zum Entwicklungsprozess, basierend auf [UIEp08]

Ausgangspunkt ist hierbei schon die Produktplanung, wo Anforderungen gesammelt werden, z. B. aus dem Lasten- bzw. Pflichtenheft oder verschiedenen Analysen (z. B. Patent-, Markt-, Produkt-, Technologieanalyse, etc.), und diese bereits nach Gewichtskriterien sortiert und behandelt

werden. Über die weiteren Entwicklungsphasen stellt die Methodik verschiedene Methoden für ein gewichtsorientiertes Entwickeln mechatronischer Produkte bereit. Die Eingangsgröße aus der Produktentwicklung und gleichzeitig Ausgangsgröße der Methodik ist eine fertige Produktdokumentation.

Die Grundlage der Methodik bildet ein Rahmenwerk, das das Gesamtkonzept umschreibt. Dieses Gesamtkonzept wurde bereits in [LuVi14b] vorgestellt, basierend auf den Darstellungen aus [LuVi12a], [LuVi12b], [LuVi13a] und [LuVi13b] und adaptiert aus [ViBC10]. Wie Abbildung 5.2 zeigt, repräsentieren dabei der Entwicklungsprozess und damit verbundene Prozessmodelle das Rückgrat der Methodik. Um den Prozess ordnen sich verschiedene Sichtweisen analog zu [BuMV07] an, die in die Prozesse eingebunden werden und damit für einen erfolgreichen Entwicklungsprozess unerlässlich sind.

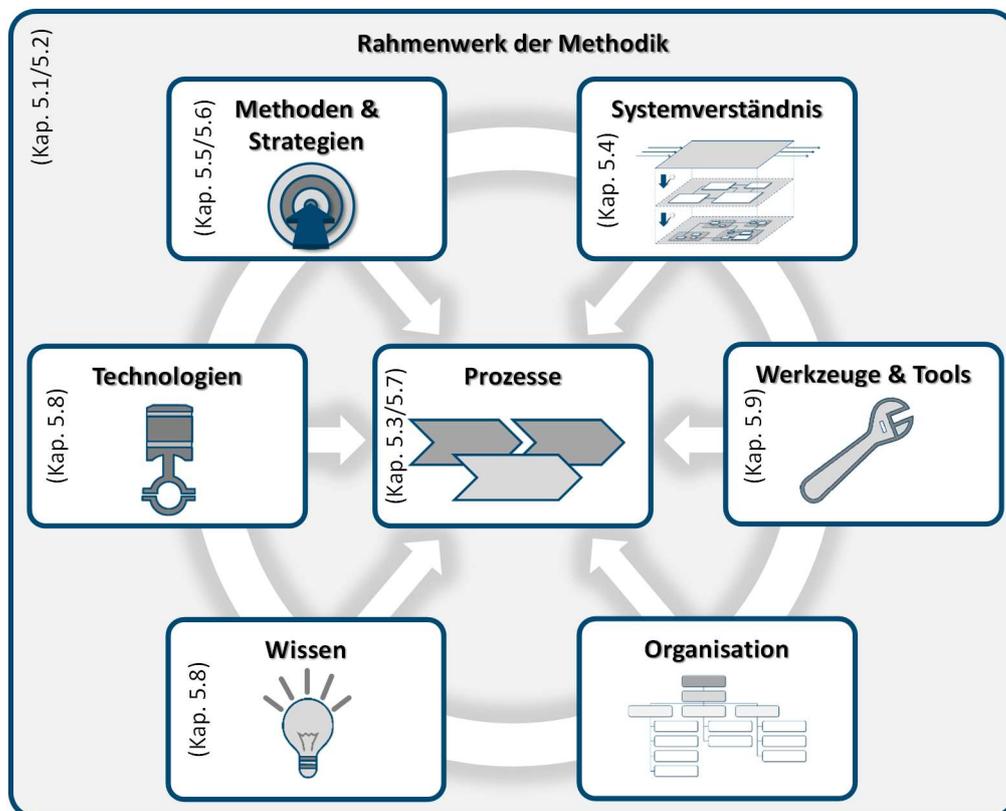


Abbildung 5.2: Rahmenwerk und Gesamtkonzept der Methodik [LuVi14b]

Das Rahmenwerk aus Abbildung 5.2 beinhaltet demnach sieben verschiedene Sichten.

- **Prozesse:** Der zentrale Bestandteil dieser Methodik und damit Grundlage stellt der Baustein „Prozesse“ dar. Er beschreibt die Abfolge der Entwicklungstätigkeiten in verschiedenen Makro- und Mikrozyklen sowie verschiedenen Analysetätigkeiten. Auf dem Entwicklungsprozess basieren alle anderen aufgeführten Bausteine.

- **Methoden und Strategien:** Die Strategien geben während des Entwicklungsprozesses eine gewisse Zielrichtung bei der Auswahl der Methoden vor, die die Handlungsanweisungen für die einzelnen Prozessschritte (Entwicklungs- und Analysetätigkeiten) vorgeben. Strategien und Methoden unterstützen die Entwickler bei unterschiedlichsten Problemstellungen.
- **Systemverständnis:** Der Baustein „Systemverständnis“ soll berücksichtigen, dass die Optimierung des Gesamtsystems immer das Hauptziel des Entwicklungsprozesses ist. Darüberhinaus ermöglicht eine möglichst genaue Systemkenntnis die Berücksichtigung weiterer Optimierungspotenziale. Aufbauend auf dem Systemverständnis ist die Erstellung geeigneter Systemmodelle, angepasst an das jeweilige Entwicklungsziel, sinnvoll.
- **Werkzeuge und Tools:** Die Anwendung von Methoden und Strategien ist teilweise nicht einfach ohne weitere technische oder computergestützte Unterstützung möglich aufgrund der Komplexität einerseits des zu entwickelnden System, andererseits der Methoden selbst.
- **Technologien:** Die Sicht der Technologien vereint in dieser Arbeit mechatronische Konzepte und Lösungen, die einen Anteil oder Beitrag zu einer Gewichtsoptimierung leisten können.
- **Wissen:** Der Wissensaspekt spielt daher eine Rolle, da sowohl die Methoden und Strategien als auch die oben genannten Technologien dem Entwickler zum geeigneten Entwicklungszeitpunkt schnell und einfach zur Verfügung gestellt werden müssen.
- **Organisation:** Verantwortlichkeiten, besonders im Hinblick auf Entscheidungen während des Entwicklungsprozesses, müssen betrachtet werden, um die Koordination der Tätigkeiten und Entscheidungen bewerkstelligen zu können.

Im Rahmen dieser Arbeit fällt der Fokus einerseits auf die zentrale Sicht der Prozesse sowie andererseits auf die unterstützende Sicht Methoden und Strategien. Die anderen Aspekte werden nur teilweise angeschnitten, um die zentralen Bestandteile zu unterstützen. Eine isolierte Betrachtung ist nicht sinnvoll und meistens auch nicht möglich. Die umfassende Bearbeitung und Konzentration auf alle Ansichten ist eine längerfristige Tätigkeit, die auf der hier vorgestellten Arbeit basieren kann.

Prägend für die Methodik sind darüberhinaus zwei verschiedene Perspektiven, die unterschiedliche Perspektiven auf die Methodik beschreiben. Diese ergeben sich aus dem Handlungsbedarf, wo einerseits der Prozess andererseits das Produkt adressiert wird:

- Prozesssicht (Gewichtsoptimierung mechatronischer Produkte)
- Produkt-/Technologiesicht (Gewichtsoptimierung durch mechatronische Produkte)

5.2 Anforderungen an eine integrierende Methodik

In [LuVi12a] und [LuVi14b] sind bereits grundlegende Anforderungen für die Erstellung einer integrierenden Methodik für die Entwicklung gewichtsoptimierter, mechatronischer Produkte bestimmt worden. Diese und weitere Anforderungen werden im Rahmen dieser Abhandlung, abgeleitet aus dem Handlungsbedarf und den Forschungsfragen, ergänzt und betrachtet.

- Berücksichtigung des komplexen Charakters der Gewichtsoptimierung
- Frontloading von Gewichtsoptimierungsansätzen in frühe Entwicklungsphasen
- Ständige Kontrolle und Überwachung des Zielmerkmals bzw. der Zieleigenschaft über den ganzen Produktentwicklungsprozess mithilfe eines Vergleichswertes
- Bereitstellung von an die Analysen angepasste Kontroll- und Bestimmungsmethoden
- Reduzierung von Makrozyklen und damit Erhöhung von Mikrozyklen zur schnelleren Erhöhung der Produktreife
- Berücksichtigung der Komplexität, Heterogenität und Interdisziplinarität der Mechatronik
- Illustration von Systemabhängigkeiten zur Bestimmung von Eigenschaftsänderungen
- Illustration von weiteren Gewichtseinsparpotenzialen
- Einbinden von vorhandenen mechatronischen Lösungen in die Methodik

Der Prozess der Entwicklung mechatronischer Produkte, die gewichtsoptimiert sind, erfordert ein geändertes Vorgehen im Vergleich zu der herkömmlichen Entwicklung mechatronischer Produkt, um effektiv die Gewichtsoptimierung durchführen zu können.

Der komplexe Charakter der Gewichtsoptimierung, hier vor allem die Möglichkeit, das Gewicht über alle Entwicklungsphasen und alle Systemebenen zu beeinflussen, erfordert ein generelles Verschieben von Gewichtsoptimierungsmethoden in die frühen Phasen der Entwicklung. Die bekannten Leichtbaumethoden und -strategien werden zum größten Teil spät im Entwicklungsprozess angesprochen. Darüberhinaus ist es erstrebenswert, Methoden für den ganzen Entwicklungsprozess zu entwickeln. Damit einher geht die ständige Analyse der Gewichtseigenschaften, um geeignete Entscheidungen treffen zu können. Diese Analysen erfordern geeignete Kontroll- und Bestimmungsmethoden und ermöglichen eine Etablierung vieler Mikro-Zyklen anstatt eines Makro-Zyklus, um die Produktreife schneller zu erreichen ([DoVi12], [DoVi13]).

Zusätzlich zum komplexen Charakter der Gewichtsoptimierung ist die Berücksichtigung der Komplexität, Heterogenität und Interdisziplinarität der Mechatronik und von mechatronischen Systemen unerlässlich, was eine Illustration und Fokussierung von Systemabhängigkeiten erforderlich macht, gerade um eine Änderung von Eigenschaften nachvollziehen zu können. Wie schon in den vorangegangenen Kapiteln beschrieben, sind bekannte mechatronische Systeme und Konzepte durchaus in der Lage, eine Gewichtsoptimierung zu bewirken oder zu unterstützen. Diese Einbindung ist in der Methodik abzubilden, die darüberhinaus weitere Einsparpotenziale während der Entwicklung anbieten soll.

5.3 Prozessmodellierung

Wie bereits im Rahmenwerk aus Abbildung 5.2 deutlich wird, kommt den Prozessen innerhalb der Gesamtmethodik eine zentrale Bedeutung zu. Zunächst werden die mögliche Zuordnung und damit der Einsatz von bekannten Leichtbaustrategien zum mechatronischen Entwicklungsprozess nach VDI 2206 sowie ein allgemeines Vorgehensmodell für die Entwicklung technischer Produkte erläutert. Diese beiden Vorgehensmodelle bestimmen im Wesentlichen das Prozessmodell für die Entwicklung gewichtsoptimierter, mechatronischer Produkte, welches daran anschließend detailliert vorgestellt wird. Das hier vorgestellte Prozessmodell beruht auf den vom Autor veröffentlichten Abhandlungen ([LuVi12b], [LuVi13a], [LuVi13b], [LuVi14b]).

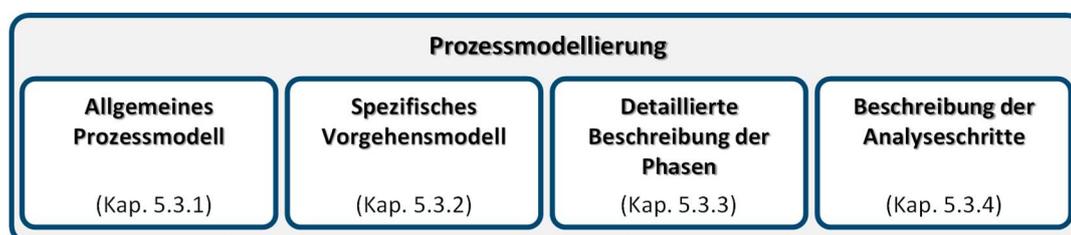


Abbildung 5.3: Prozessmodellierung

5.3.1 Allgemeines Vorgehensmodell

Entwicklungsprozesse folgen im Allgemeinen unternehmensspezifischen oder generischen Vorgehensweisen (z. B. [VDI2206], [VDI2221]). Dabei spielen gerade Modellierung und Simulation eine eher untergeordnete Rolle, obwohl gerade diese für eine effiziente und effektive Produktentwicklung wichtig sind. Daher wird in [DoSV13] ein Vorgehensmodell vorgestellt, das die Analyseaktivitäten beim Modellieren und Simulieren zentral neben die Entwicklungsaktivitäten positioniert (siehe Abbildung 5.4).

Analog zu der Entwicklung mechatronischer Produkte mit den Phasen der Systemkonzeptionie-

rung, der Domänen-/Komponentenentwicklung sowie der Systemintegration als Entwicklungstätigkeiten (linker Strang) werden entsprechende Verifikations- und Validierungsaktivitäten (rechter Strang) etabliert, in denen die Entwicklungsergebnisse analysiert werden. Erst nach einer Analysephase kann in die nächste Entwicklungsphase übergegangen werden, vorausgesetzt die geforderten Eigenschaften, die über das Anforderungsmanagement verwaltet werden, werden erfüllt.

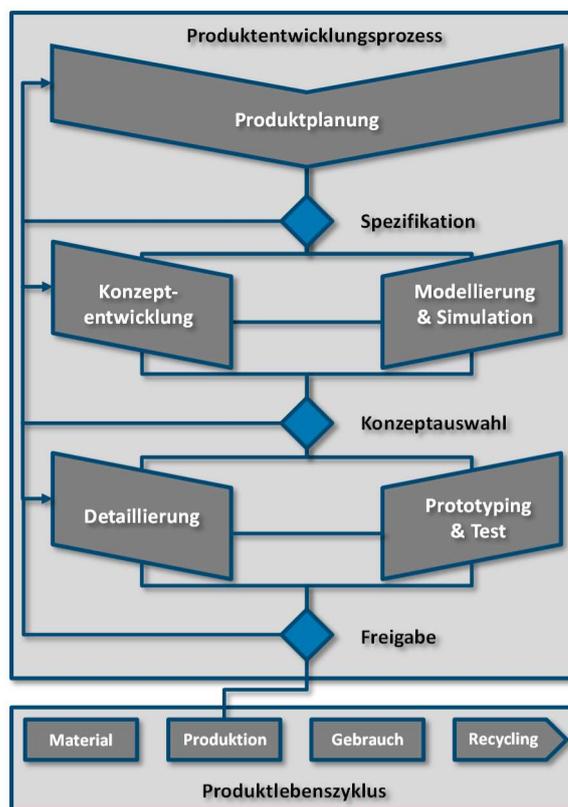


Abbildung 5.4: Allgemeines Vorgehensmodell für die Entwicklung technischer Produkte [DoSV13]

Die Entscheidungspunkte zwischen den Hauptphasen dienen zum Abgleich der Produkteigenschaften mit den Anforderungen und sind als Startpunkt von möglichen (Makro-)Iterationen anzusehen.

5.3.2 Vorgehensmodell für die Entwicklung gewichtsoptimierter, mechatronischer Produkte

Das Vorgehensmodell für die Entwicklung gewichtsoptimierter, mechatronischer Produkte muss wie im Handlungsbedarf bzw. im Rahmenwerk festgelegt zwei Perspektiven widerspiegeln: die Gewichtsoptimierung mechatronischer Produkte (Prozesssicht) sowie die Gewichtsoptimierung technischer Produkte durch die Anwendung mechatronischer Konzepte (Produktsicht).

5.3.2.1 Vereinfachte Darstellung des Vorgehensmodells

Das Prozessmodell für die Entwicklung gewichtsoptimierter, mechatronischer Produkte ist in Abbildung 5.5 dargestellt, das teilweise bereits in [LuVi13b] und [LuVi14b] vorgestellt worden ist. Im Grundsätzlichen orientiert sich das Prozessmodell in den beiden V-Modellen am allgemeinen Vorgehensmodell (siehe Abbildung 5.4), weist aber im Detail eine angepasste Struktur auf. Dabei baut das Modell auf Makro-Ebene auf den Elementen aus der Mechatronik-Entwicklung und des Systems Engineering auf. Es wird durch fünf Hauptphasen und drei Hauptentscheidungspunkte gekennzeichnet. Dabei laufen jeweils die Stränge der Konzeptentwicklungⁱⁱ (Synthese) sowie Modellierung und Simulation (Analyse) bzw. die Detaillierung (Synthese) sowie Prototyping und Testing (Analyse) parallel ab, wobei ein regelmäßiger Austausch und Abgleich zwischen geforderten und erreichten Produkteigenschaften, die durch die Produktmerkmale gekennzeichnet sind, stattfindetⁱⁱⁱ. Den Startpunkt bildet die Produktplanung. Zwischen den einzelnen Hauptphasen sind Hauptanalysepunkte vorgesehen, die den Abschluss der jeweiligen Hauptphasen und damit wichtige Entscheidungspunkte darstellen (vgl. auch im Stage-Gate-Prozess das *design freeze* [Coop90]). Diese Entscheidungspunkte (Spezifikation nach der Produktplanung, Konzeptauswahl nach der Konzeptionierung sowie Produktionsfreigabe nach der Detaillierung) sind außerdem der Ausgangspunkt für aufwendige Makro-Iterationen, die aber möglichst aufgrund des hohen Kosten- und Zeitaufwandes zu vermeiden oder wenigsten weniger oft zu durchlaufen sind [Ehr109]. In den Hauptphasen selbst sind zwei Mikro-V-Modelle beschrieben, die wiederum durch die Mikro-Analysepunkte voneinander abgetrennt sind. Somit finden zu bevorzugende Mikro-Iteration zwischen den Phasen innerhalb der V-Modelle statt. Dabei sollen die V-Modelle das systemorientierte Vorgehen (von Gesamtsystem über Teilsysteme bis hin zu Komponenten und umgekehrt) repräsentieren. Allerdings ist hier darauf zu achten, dass zwar ähnlich zur VDI-Richtlinie 2206 die Schritte der Systemkonzeptionierung, Domänenentwurf und Systemintegration angeordnet sind, aber nicht unbedingt auf Domänenebene partitioniert werden muss, da bei der Gewichtsoptimierung immer das Gesamtsystem im Vordergrund steht und damit als Optimierungsziel anzusehen ist. Daher ist es oft sinnvoll, auch domänenübergreifende Lösungskonzepte auf Teilsystem- und Komponentenebene in Bezug auf eine Gewichtsoptimierung zu berücksichtigen.

ⁱⁱ Konzept bedeutet im Zusammenhang des vorgestellten Prozessmodells, dass mit den bis zu diesem Zeitpunkt des Entwicklungsprozesses erarbeiteten Produktmerkmalen das Gesamtverhalten des Produktes durch die Produkteigenschaften recht genau abgebildet werden kann. Nach Pahl/Beitz [PBF07] bedeutet das also, dass die prinzipielle Lösung in einem geringen Detaillierungsgrad das Gesamtverhalten des Systems beschreibt.

ⁱⁱⁱ Der Fokus liegt in dieser Arbeit auf den Entwicklungsaktivitäten des Konzeptionierens und Detaillierens sowie der Analyse- und Entscheidungspunkte. Die Phasen der Modellierung & Simulation sowie des Prototypings werden nicht gesondert betrachtet.

Dadurch können die Mikro-V-Zyklen verkürzt werden, weil teilweise domänenspezifische Aktivitäten nicht mehr erforderlich sind.

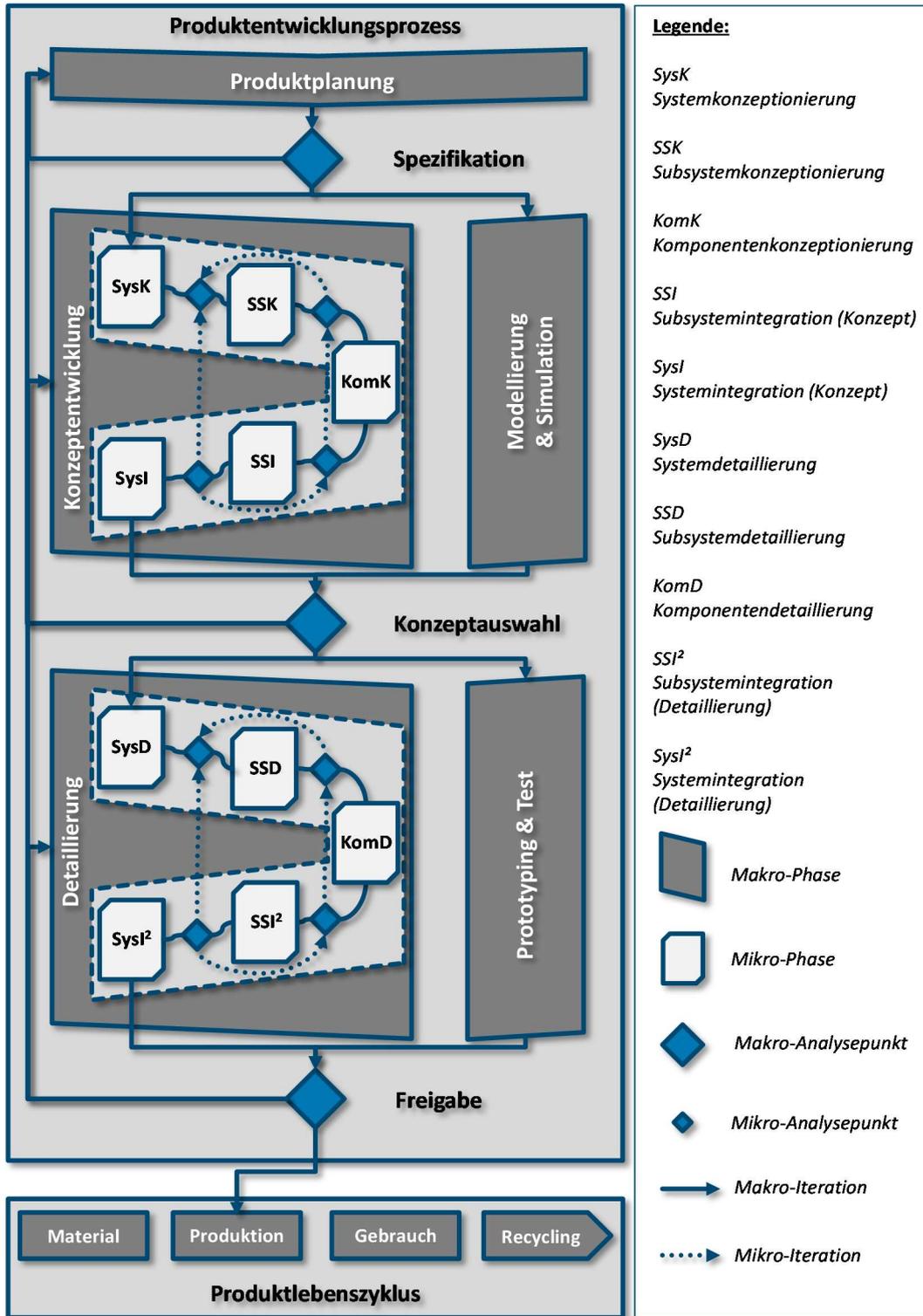


Abbildung 5.5: Vereinfachte Darstellung des Vorgehensmodells

Die Aufteilung des Prozessvorgehens in zwei Mikro-V-Modelle ist nötig, da eine zwischenzeitliche „vorläufige“ Systemintegration des Konzeptes (ähnlich zum W-Modell aus Abbildung 3.4) auf-

grund des Systemdenkens, besonders bei Anwendung des Systemleichtbaus, bei der ganzheitlichen Gewichtsoptimierung erforderlich ist. Eine vorläufige, nicht vollständige Systemintegration erlaubt es, die Auswirkungen bei Gewichtsänderungen in einem niedrigen Systemlevel, z. B. Komponentenebene, auf die zugehörigen höheren Systemebenen darzustellen und zu beschreiben. Das Vorgehen kann ähnlich zum in Kapitel 3.1.1.2 vorgestellten W-Modell (siehe [NaAn10], [NaAn11], [NaAn13]) angesehen werden, wo erste Domänenlösungen geringen Detaillierungsgrades durch Integration im Gesamtsystem-Kontext abgesichert, allerdings ohne auf eine vollständige Systemintegration zurückzugreifen. Übertragen auf das hier vorgestellte Prozessmodell erfolgt im Integrationschritt des ersten V-Modells eine grobe Ermittlung des Systemverhaltens bei ersten Komponenten-Lösungen mit geringer Detailstufe, wohingegen im zweiten V-Modell die fertiggestellten Komponenten-Lösungen (also mit höchster Detailstufe) zum endgültigen Gesamtsystem hochintegriert werden. Bereits in [LuVi12b] wurde auf eine frühzeitige, teilweise Systemintegration eingegangen, um die Interaktionen (in diesem Falle Gewichtsänderungen und Gewichtsbeziehungen zwischen Komponenten und Subsystemen) im Gesamtsystemzusammenhang zu bestimmen und abzusichern. Erst nach erfolgreicher initialer Systemintegration erfolgt eine detaillierte Ausarbeitung der Komponenten und Domänen, worauf eine finale Systemintegration durchgeführt werden kann.

5.3.2.2 Systemhierarchie

Nach [ShAC07] und [HWFV12] kann jedes System hierarchisch gegliedert werden. Jedes System setzt sich aus Subsystemen und Komponenten zusammen, wobei diese wiederum aus Subsystemen oder Komponenten aufgebaut werden können. Generell enden die verschiedenen Äste der Systemhierarchie nicht auf einer Systemebene. Jedes Ende eines Hierarchieastes wird mit Komponenten abgeschlossen, die nicht mehr unterteilt werden können. Im Gegensatz dazu wird in der VDI-Richtlinie 2206 [VDI2206] zwar eine Aufteilung in System- und Domänenebene angegeben, diese berücksichtigt allerdings nicht, dass mechatronische Systeme aus mehreren Subsystemen bestehen können. Im vorgestellten Prozessmodell wird zwar die aus der Mechatronik-Entwicklung bekannte V-Modell-Darstellung verwendet, dazu werden allerdings zusätzlich verschiedene Subsystemebenen durch die Einführung weiterer Prozessschritte während Systemkonzeptionierung und Systemintegration berücksichtigt. Der Block der Subsysteme kann dabei mehrere Subsystemebenen darstellen.

5.3.2.3 Sekundäre Eigenschaftsänderungen

Konstruktionsänderungen während der Produktentwicklung treten zu ca. 50% unerwartet auf, da Probleme und Fehler Auslöser dieser Änderungen sind [CISE01]. Diese Änderungen innerhalb des zu entwickelnden Systems erfordern daher auch Änderungen an anderen Subsystemen. Mit Hilfe von Änderungsmanagementmethoden können Risiken in Bereichen der Kosten, Gewicht oder Funktionalität erkannt und bewertet werden. Bei unzureichender Kontrolle von Änderungen treten negative Effekte besonders bei Projektzeit und -umfang auf [SWRK11].

Werden dagegen Methoden und Strategien entwickelt, die die Änderungen an einem Teilsystem zu Potenzialen an anderen Teilsystem ermöglichen, sind bewusste Änderungen und das damit ermöglichte Sekundärpotenzial sinnvoll und gewinnbringend.

Im Rahmen dieser Arbeit wird eine Methode zur Berücksichtigung von sekundären Eigenschaftsänderungen, im Speziellen von Gewichtsänderungen, vorgestellt. Diese Methode stellt immer die Optimierung des Gesamtsystems in den Vordergrund und vereint ein kombiniertes Top-Down- und Bottom-Up-Vorgehen, d. h. Gewichtsänderungen können sowohl von System- auf Komponentenebene als auch umgekehrt von Komponenten- auf Systemebene bestimmt werden.

5.3.3 Detaillierte Beschreibung der Phasen des Vorgehensmodells

Wie oben schon beschrieben, werden im Prozessmodell für die gewichtsoptimierte Entwicklung mechatronischer Produkte Makro- und Mikro-Phasen unterschieden, die im Nachfolgenden eingehend erläutert werden.

5.3.3.1 Makro-Phasen

Die Makro-Phasen Produktplanung, Konzepterstellung, Detaillierung, Modellierung und Simulation sowie Prototyping und Test sind aus dem allgemeinen Prozessmodell (siehe Abbildung 5.4) abgeleitet. Die Produktplanung stellt den Startpunkt des Entwicklungsprozesses dar, wohingegen nachfolgend Konzepterstellung und Modellierung und Simulation bzw. Detaillierung und Prototyping und Test jeweils parallel ablaufen, was einen ständigen Abgleich und Analyse der zu bestimmenden Produkteigenschaften begünstigt.

In der vorliegenden Arbeit wird hierbei genauer auf die Entwicklungsaktivitäten in der Produktplanung, Konzepterstellung und Detaillierung eingegangen. Die Absicherung der Produkteigenschaften, also deren Verifikation und Validierung, in den Phasen Modellierung und Simulation

bzw. Prototyping und Test stehen nicht im Fokus und bieten Spielraum für weitere Forschungsarbeiten. Die zentrale Rolle liegt eindeutig bei den Aktivitäten zur Erreichung von Produkteigenschaften, die ein gewichtsoptimiertes Produkt beschreiben.

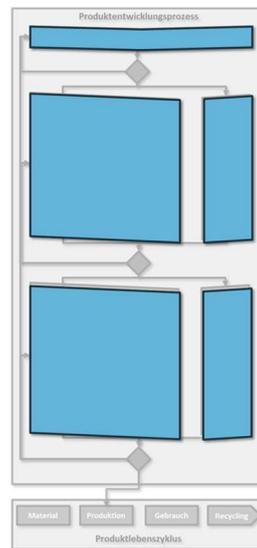


Abbildung 5.6: Makrophasen des Prozessmodells

Produktplanung

Die Produktplanungsphase hat als vorrangige Aufgabe, einen detaillierten Zielwert für die Gewichtseigenschaften des zu entwickelnden Produkts festzulegen, der am Ende des Entwicklungsprozesses zu erreichen ist. Die Bestimmung dieser Zielwerte basiert auf der Analyse von Konkurrenz- oder Vorgängerprodukten, Patenten und neuen Technologien sowie Benchmarking. Neben der Festlegung des Gewichtsziels werden für den Entwicklungsprozess der Umfang und der Zeitpunkt der verschiedenen Meilensteine (Makro- und Mikro-Analysepunkte) zum Monitoring und Nachverfolgen der Gewichtseigenschaften spezifiziert. Hervorgehend aus den verschiedenartigen Analysen kann eine Anforderungsliste erstellt werden, in der darüberhinaus gewichtsrelevante bzw. gewichtskritische Anforderungen und damit entstehende Zielkonflikte zwischen verschiedenen Anforderungen bestimmt werden können.

Konzepterstellung

Die Phase der Konzepterstellung erfolgt allgemein nach dem bekannten Vorgehen in der VDI-Richtlinie 2206 [VDI2206], wird allerdings angepasst in der Art, dass Mikro-Analysepunkte, Mikro-Phasen sowie eine andere Auffassung der Systemdekomposition mit einer Einteilung in verschiedene Systemebenen nach dem Vorbild der Product Breakdown Structure [ShAC07], wie in Kapitel 5.3.2.2 beschrieben, berücksichtigt werden. Das Ergebnis der Konzeptentwicklungsphase ist ein Gesamtkonzept für das gesamte System inklusive Konzepte für Subsysteme und Komponenten

und deren Interaktion. Diese Konzepte werden im Entwicklungsschritt der Detaillierung weiter spezifiziert.

Vom Gesichtspunkt der Gewichtsoptimierung aus gesehen ist vor allem die Anwendung der Strategien des Systemleichtbaus und des Konzeptleichtbaus vorzusehen. Aufgrund des geringen Detaillierungsgrades der gefundenen Lösungen spielt vor allem die Interaktion zwischen verschiedenen Teilsystemen eine wichtige Rolle bei der Betrachtung einer Gewichtsoptimierung, wohingegen die spezifischeren Strategien des Materialleichtbaus, Fertigungsleichtbaus u. a. erst in der Detaillierung Anwendung finden. Es steht also die konzeptionelle und systemorientierte Optimierung der Subsysteme und Komponenten in Bezug auf das Gesamtsystem im Vordergrund. So ist es z. B. sinnvoll, die Wirkung einer unterschiedlichen Systemdekomposition oder Systemintegration auf die Gewichtseigenschaften des Gesamtsystems zu untersuchen und dabei die für das Gesamtsystem optimale Lösung zu bestimmen.

Detaillierung

Die Entwicklungsaktivitäten in der Detaillierungsphase beschreiben die Umsetzung und Implementierung der Konzeptlösung aus dem Schritt der Konzepterstellung zu einem realen, physikalischen „Endprodukt“ (siehe [PBF07], [FeGr13], [VDI2206]). Analog zu dieser Phase lässt sich das bekannte V-Vorgehen aus der Mechatronik- und Systementwicklung wiederfinden, wobei hier ebenfalls die Unterteilung in Systemebenen sowie die Einführung von Mikro-Phasen und Mikro-Analysepunkte erfolgt. Startpunkt ist das Gesamtsystemkonzept inklusive der Konzepte der Teilsysteme und Konzepte, die durch die spezifischen Methoden der Ausarbeitung und Detaillierung detailliert werden.

Leichtbautechnisch betrachtet können aufgrund des höheren Detaillierungsgrades die eher klassischen Leichtbaustrategien wie z. B. Materialleichtbau, Fertigungsleichtbau oder Strukturleichtbau angewendet werden. Die Verwendung dieser Leichtbaustrategien erklärt auch ein zweites V-Vorgehen: einerseits ist es bezüglich Zeit- und Kostenaufwand günstiger, Leichtbaustrategien top-down anzuwenden (also von Gesamtsystem zu Komponenten), da direkt alle Wechselwirkungen der Systemelemente ersichtlich sind. Bei einer Anwendung bottom-up müssen zuerst alle Systembeziehungen auf den entsprechenden Systemebenen abgearbeitet werden, bevor das Gesamtsystem im Fokus steht, von dem wiederum top-down vorgegangen werden muss. Andererseits können Leichtbaustrategien (in den meisten Fällen) nie alleine angewandt werden, wie schon in Kapitel 3.3 erläutert worden ist. So erfordert z. B. eine Änderung des Materials oftmals eine Änderung der Struktur, die sich wiederum auf ein (Teil-)Konzept auswirken kann. Dadurch

sind wiederum mehrere Analyse-/Synthese- und Integrationschritte nötig, die allerdings als Mikrozyklen ausgeführt werden sollen. Das Gesamtkonzept ist aufgrund der großen Einflussnahme auf Produkteigenschaften in den frühen Entwicklungsphasen schon festgelegt und sollte daher nicht mehr verändert werden.

Modellierung und Simulation / Prototyping und Test

Die Phase der Modellierung und Simulation beschreibt im Allgemeinen die Analyse- und Validierungsaktivitäten zu den Entwicklungstätigkeiten aus der Konzeptentwicklung.

In Prototypentests werden durch Analysetätigkeiten die Entwicklungsergebnisse aus der Phase der Detaillierung überprüft.

Im Rahmen dieser Abhandlung wird nicht weiter im Detail auf diese Phasen eingegangen.

5.3.3.2 Mikro-Phasen

Die Mikro-Phasen innerhalb der Makro-Phasen Konzepterstellung und Detaillierung unterscheiden sich in zwei Aspekten: das Auftreten in einer bestimmten Makro-Phase und der Fokus auf eine bestimmte Systemebene.

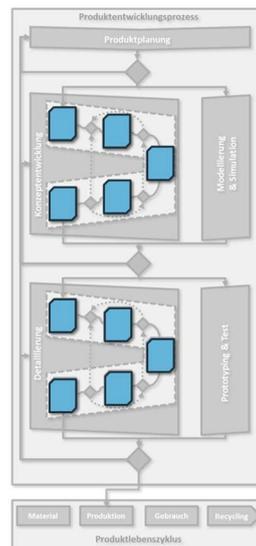


Abbildung 5.7: Mikrophasen des Prozessmodells

Vorarbeiten zu den einzelnen Mikro-Phasen wurden vom Autor dieser Arbeit bereits in [LuVi12b], [LuVi13a] und [LuVi13b] vorgestellt. Spezifische Methoden für die frühen Phasen (insbesondere Konzeptionierung von Anforderungen bis Wirkprinzipien) sind bereits in [LuBV14a] und [LuBV14b] präsentiert worden und werden in Kapitel 5.6.1 gesondert erläutert.

Systemkonzeptionierung

Das Ergebnis aus der ersten Makro-Phase, der Produktplanung, ist die Eingangsgröße für die Makro-Phase des Konzipierens und damit auch deren erste Mikro-Phase der Systemkonzeptionierung. Grundsätzlich orientiert sich die Systemkonzeptionierung am Vorgehen der VDI-Richtlinie 2206 [VDI2206], wobei zu den einzelnen Schritten während dieser Mikrophasen verschiedene Leichtbaustrategien sowie Methoden zugeordnet werden können. Hierbei wird deutlich, dass auch innerhalb dieser Mikrophasen erneut Analysepunkte auftreten. Diese sichern die Ergebnisse auf den verschiedenen Abstraktionsebenen (Anforderungen, Funktionen, Wirkprinzipien, Baustruktur) ab. Die Systemkonzeptionierung stellt als Ergebnis ein Konzept für das Gesamtsystem bereit und ist somit die wichtigste Phase im gesamten Prozess, obwohl der Grad der Detaillierung des Konzeptes eher gering ist.

Ausgehend von den Erkenntnissen aus der Produktplanungsphase erfolgt analog zum Vorgehen der VDI-Richtlinie 2206 [VDI2206] durch eine Abstraktion des Gesamtproblems die Etablierung der Produktfunktion, die aufgrund der Komplexität, besonders bei mechatronischen Produkten, in Teilfunktionen sinnvoll aufgeteilt werden soll. Diese Funktionsmodellierung erfolgt meist in einer Funktionsstruktur, die die Verbindungen zwischen den Funktionen durch Material-, Energie- und Informationsflüsse koppelt [PBFG07]. Weitere Methoden der Funktionsmodellierung sind der Fachliteratur zu entnehmen (ein Überblick bietet z. B. [EiGB13]). Diesen einzelnen Funktionen, die die Gesamtfunktion widerspiegeln, werden durch die Suche von Wirkprinzipien entsprechende Lösungskonzepte zugewiesen. Zum Vergleich der verschiedenen Konzepte können weitere Detaillierungen in verschiedene Richtungen notwendig sein.

Die ausführliche Beschreibung der bei der Systemkonzeptionierung benutzten und für die Gewichtsoptimierung adaptierten Methoden und deren Einordnung zum Gesamtzusammenhang wird später in Kapitel 5.6.1 ausgeführt und diskutiert.

Subsystemkonzeptionierung

Ausgehend von der Dekomposition des Gesamtsystems in Subsysteme sind die Gesamtanforderungen analog den Teilsystemen zuzuordnen. Prinzipiell erfolgt die Vorgehensweise beim Entwickeln entsprechend den Schritten aus der Systemkonzeptionierung mit dem Unterschied, dass die Systemgrenzen enger gefasst sind und somit detailliertere Funktionen betrachtet werden können. Der Schritt der Subsystemkonzeptionierung kann je nach Komplexität eines Subsystems mehrfach wiederholt werden, so dass verschiedene Subsystemebenen betrachtet werden müs-

sen, die das Gesamtmodell dementsprechend erweitern. Generell können analog zu der Systemkonzeptionierung dieselben Methoden angewandt werden zur Berücksichtigung von Gewichtskriterien und zur Optimierung derer. Die Ausführungen dieser Methoden sind Kapitel 5.6.1 zu entnehmen.

Komponentenkonzeptionierung

Die Ebene der Komponentenkonzeptionierung ist erreicht, wenn ein Subsystem bzw. dessen Funktion nicht mehr weiter unterteilt werden kann. Es ist allerdings zu beachten, dass je nach Komplexität eines Subsystems die Komponentenkonzeptionierung unterschiedliche Systemlevel in Bezug auf die Durchnummerierung besitzt. Im Gegensatz zur gängigen Vorgehensweise bei der Mechatronik-Entwicklung werden die Komponenten hier nicht unabhängig voneinander in die verschiedenen Domänen unterteilt, da eine Gewichtsoptimierung nicht speziell abhängig von den involvierten Domänen ist, sondern immer im Gesamtzusammenhang aller Domänen zu verstehen ist. Deshalb ist ein ständiger Austausch der Domänen auf Komponentenebene unabdingbar. Die Entwicklung in den Domänen selbst folgt den bekannten und etablierten Entwicklungsmethoden, die speziell auf die Domänen zugeschnitten sind. Durch den ständigen Abgleich innerhalb der Domänen können sekundäre Auswirkungen einer getroffenen Gewichtsoptimierungsmaßnahme in einer bestimmten Domäne direkt eingebracht werden. Zum Beispiel kann die Datenmenge der Informationsverarbeitung eine Verringerung der benötigten elektronischen Bauelemente einer elektronischen Schaltung eines mechatronischen Produktes nach sich ziehen, was wiederum dazu führen kann, dass der mechanische Aufbau der Schaltplatine ebenfalls verkleinert werden kann, was im Endeffekt zu einer möglichen Gewichtsverbesserung führen kann. Eine Komponente beschreibt also die für das Gesamtsystem beste Lösung, zusammengesetzt aus den verschiedenen Domänenlösungen, in Bezug auf die gewünschte Optimierung einer Eigenschaft, in diesem Falle der Gewichtsoptimierung.

Integration des Subsystem-Konzeptes

Mit der Integration der verschiedenen Komponentenlösungen zum dazugehörigen Subsystem können weitere Verbindungen und Abhängigkeiten zu den anderen Subsystemen gleichen Systemlevels identifiziert werden, wobei weitere sekundäre Gewichtsänderungen beschrieben werden können. Das Integrationsvorgehen orientiert sich an der VDI-Richtlinie 2206 [VDI2206], wo im ersten Schritt die Ergebnisse auf Komponentenebene zu den zugehörigen Subsystemen zusammengeschlossen werden. Je nach Anzahl der Subsystemebenen ist eine Integration auf die nächsthöhere Stufe notwendig. Im Zuge der Integration werden Unverträglichkeiten zwischen

Komponenten oder Subsystemen identifiziert und behoben. Im schlimmsten Fall ist eine Iteration auf Makroebene zu dem entsprechenden Konzeptionierungsschritt notwendig. Durch die frühe Eigenschaftsabsicherung in der Konzeptionierungsphase sollte dieser Schritt allerdings nur vollzogen werden, wenn durch eine Mikroiteration keine Anpassung auf der tieferen Systemebene mehr möglich ist.

Integration des System-Konzeptes

Der letzte Integrationsschritt beschreibt die Zusammensetzung des Gesamtsystems durch die dazugehörigen Subsysteme der nachfolgenden Systemebene. Alle sekundären Gewichtsänderungen aus den darunterliegenden Systemebenen zusammengenommen beschreiben durch die Integration der Subsysteme das nach Gewichtskriterien am besten geeignete Gesamtsystem.

Das Systemkonzept als Ergebnis dieser Entwicklungsphase beschreibt ein Lösungskonzept aus geschätzten und berechneten gewichtsabhängigen Kriterien, denen jeweils in den vorangegangenen Schritten besondere Beachtung zugemessen wurde.

Entwicklungsschritte des zweiten V-Zyklus

Das festgelegte Konzept als Ergebnis des ersten V-Zyklus im Prozessmodell stellt den Startpunkt für den zweiten Zyklus dar. Dementsprechend erfolgt eine erneute Betrachtung auf System-, Subsystem- und Komponentenebene, jeweils als Syntheseschritte von Systemebene zu Komponentenebene (Systemdetaillierung, Subsystemdetaillierung, Komponentendetaillierung) und umgekehrt als Integrationsschritte (detaillierte Subsystemintegration, detaillierte Systemintegration). Die Schritte und die angewandten Methoden erfolgen analog zu denen des ersten V-Zyklus, der Unterschied besteht im Reifegrad der zu untersuchenden Produkteigenschaften. Der Reifegrad wird dadurch erhöht, dass in der Konzeptphase unberücksichtigte Produktmerkmale und Parameter betrachtet werden. Nach [WeWD03] sind alle Entwicklungsphasen durch die Anzahl der betrachteten Produktmerkmale gekennzeichnet. In [Dohr14] wird festgestellt, dass bei einer Kenntnis von zu ändernden Merkmalen für die Änderung einer Produkteigenschaft identifiziert werden kann, in welche Phase eine notwendige Iteration erfolgen muss.

5.3.4 Analysepunkte

Die Analyseschritte auf Makro- und Mikro-Ebene sind durch ihre Verteilung über den gesamten Entwicklungsprozess wichtig, um die Zielmerkmale und Zieleigenschaften ständig zu kontrollieren, zu überwachen und gegebenenfalls Maßnahmen einzuleiten. Sie dienen dem ständigen Abgleich und sind daher von besonderer Bedeutung.

Die Analysepunkte unterscheiden sich dabei wie folgt: (siehe [LuVi13b], [LuVi14b]):

- Art des Analysepunktes: Makro-Analysepunkt nach Makro-Phasen als Voraussetzung für eine Makro-Iteration oder Mikro-Analysepunkte nach Mikro-Phasen als Voraussetzung für eine Mikro-Iteration
- Anwendungszeitpunkt der Analyse: Zeitpunkt während des Entwicklungsprozesses
- Art der Analyse: Abhängig vom Entwicklungsfortschritt, den damit bestimmten Gewichtsmerkmalen und Gewichtseigenschaften und somit dem Reifegrad des Produktes sind verschiedene Arten von Analysen anzuwenden. Für jede Analyseart (z. B. Abschätzungen, Vorhersagen, Berechnungen, Wiegen u.v.m.) sind ausreichend bekannte Methoden bekannt.
- Gegenstand der Analyse: Dabei ergibt sich der zu untersuchende Datensatz aus den Ergebnissen des gerade bearbeiteten Prozessschrittes, z. B. Anforderungen, Funktionsstruktur, Baustruktur, Prototypen etc.
- Systemebene: Die Analyse kann auf verschiedenen Systemhierarchiestufen durchgeführt werden, z. B. Gesamtsystem, Subsystem, Komponenten
- Ergebnis der Analyse: Entscheidend für den weiteren Verlauf und Erfolg des Produktentwicklungsprozesses ist das Resultat der Analyse und vor allem die Qualität und Interpretation dessen. Neben den analysierten Gewichtseigenschaften spielen auch Gewichtsabhängigkeiten innerhalb des Systems eine wichtige Rolle.

5.3.4.1 Makro-Analysepunkte

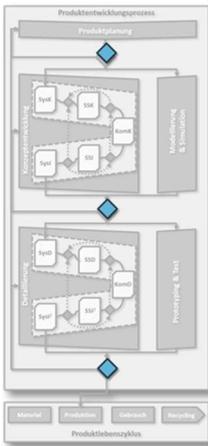
Die Analyse- und Entscheidungspunkte zwischen den Makro-Phasen beschreiben, wie schon oben beschrieben, design freezes. Grundlage der Analyse und damit der Entscheidungen ist je nach Makro-Phase unterschiedlich. Prinzipiell bilden diese Analysepunkt die Gates aus dem Stage-Gate-Konzept nach Cooper [Coop90]. Im Allgemeinen ist ein einmaliges Durchlaufen jedes Makro-Analysepunktes einzuhalten und die notwendigen Iterationen auf Mikroiterationen zu beschränken, um eine schnellere Produktreife zu erreichen, d. h. die Entwicklungszeit zu verkürzen.

Spezifikation

Der Makro-Analysepunkt „Spezifikation“ stellt das Ende der Phase der Produktplanung dar. Auf der Grundlage der Analyse von Patenten, Technologien sowie Konkurrenz- und Vorgängerprodukten ist das Gesamtgewichtsziel durch Schätzung festgelegt worden sowie Abhängigkeiten der Anforderungen untereinander bestimmt worden.

Diese Ergebnisse dienen zur Entscheidung, ob die nächste Entwicklungsphase beginnt oder eine Iteration eingeleitet werden muss. Diese Makroiteration hat ein erneutes Durchlaufen der gesamten Produktplanung zur Folge, wo weitere Produkt- oder Marktanalysen zu einer genaueren Darstellung der Anforderungen durchgeführt werden.

Tabelle 5.1: Übersicht über Makro-Analysepunkte



Makro-Phase	Makro-Analysepunkt	Art der Analyse	Gegenstand der Analyse	Ergebnis der Analyse
Produktplanung	Spezifikation	Schätzung	Konkurrenz- und Vorgängerprodukte, Patente	Festlegung des Gewichtsziels, Abhängigkeiten der Anforderungen
Konzeptentwicklung	Konzeptauswahl	(überschlägige) Berechnung	funktionale, prinzipielle oder frühe physikalische Struktur auf Systemebene	Abhängigkeiten von verschiedenen Strukturen, sekundäre Einsparungen
Detaillierung	Freigabe	Berechnung & Wiegen	physikalische Struktur	Abhängigkeiten von verschiedenen Strukturen, sekundäre Einsparungen

Konzeptauswahl

Der Entscheidungspunkt der Konzeptauswahl basiert auf den Ergebnissen des Durchlaufens des ersten V-Modells und bildet den Übergang von der Konzeptionierung zur Detaillierungsphase. Analysiert werden hier die im Konzept festgelegten Eigenschaften im Vergleich zu den erwünschten Eigenschaften nach dem Vorbild des CPM-Modells nach Weber [WeWe00]. Entsprechen die zu diesem Zeitpunkt der Entwicklung vorhandenen Eigenschaften, die im Groben das Gesamtsystemverhalten beschreiben, den Anforderungen, kann zur Phase der Detaillierung (zweites V-Modell) übergegangen werden. Die vorhandenen Eigenschaften werden in Funktions- bzw. Wirkstruktur sowie einer ersten Baustruktur festgehalten und können bereits durch die Kenntnis der groben physikalischen Effekte überschlägig berechnet und abgeschätzt werden.

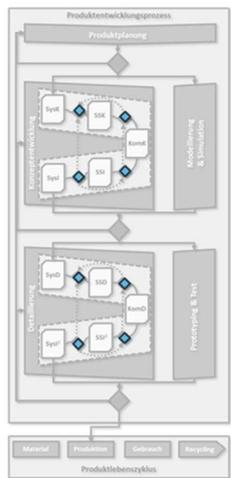
Freigabe

Durch die Detaillierung des Konzeptes im zweiten V-Modell des Prozessmodells aus Abbildung 5.5 können die vorher untersuchten Eigenschaften des technischen Produktes genauer spezifiziert und durch weitere Eigenschaften ergänzt werden, sodass der Reifegrad der Lösung steigt. Die Analyse dieser „reiferen“ Eigenschaften, die vorwiegend in der physikalischen Struktur festgelegt sind, erlaubt durch Berechnung und physikalische Messung (z. B. Wiegen) eine exakte Bestimmung und einen Vergleich mit den gewünschten, geforderten Eigenschaften.

5.3.4.2 Mikro-Analysepunkte

Die Mikro-Analysepunkte sind im Gegensatz zu den Makro-Analysepunkten innerhalb der Makro-Phasen und zwischen den Mikro-Phasen angeordnet. Sie sind Ausgangspunkt für zu bevorzugende Mikro-Iterationen [Dohr14].

Tabelle 5.2: Übersicht über Mikro-Analysepunkte (ähnlich zu [LuVi13b])



Makro-Phase	Mikro-Phase	Art der Analyse	Gegenstand der Analyse	Systemebene	Ergebnis der Analyse
Produktplanung	Definition	Schätzung	Konkurrenz-/Vorgängerprodukte, Patente	System	Festlegen Gewichtsziel & Analysepunkte
	Aufgabenklärung	Schätzung	Anforderungen	System	Abhängigkeiten der Anforderungen
Konzeptentwicklung	Systemkonzeptionierung	Schätzung	funktionale und prinzipielle Struktur	System	Abh. versch. Strukturen, sekundäre Einsparungen
	Subsystemkonzeptionierung	Schätzung	funktionale und prinzipielle Struktur	Subsystem	Abh. versch. Strukturen, sekundäre Einsparungen
	Komponentenkonzeptionierung	Schätzung & (überschlägige) Berechnung	frühe physikalische Struktur	Komponente	primäre & sekundäre Einsparungen
	Integration des Subsystemkonzepts	Schätzung & (überschlägige) Berechnung	funktionale, prinzipielle/ frühe physikal. Struktur	Subsystem	Abh. versch. Strukturen, sekundäre Einsparungen
	Integration des Systemkonzepts	Schätzung & (überschlägige) Berechnung	funktionale, prinzipielle/ frühe physikal. Struktur	System	Abh. versch. Strukturen, sekundäre Einsparungen
Detaillierung	Systemdetaillierung	Schätzung & (überschlägige) Berechnung	physikalische Struktur	System	Abh. versch. Strukturen, sekundäre Einsparungen
	Subsystemdetaillierung	Schätzung & (überschlägige) Berechnung	physikalische Struktur	Subsystem	Abh. versch. Strukturen, sekundäre Einsparungen
	Komponentendetaillierung	Berechnung	physikalische Struktur	Komponenten	primäre & sekundäre Einsparungen
	Integration der Subsystemdetaillierung	Berechnung	physikalische Struktur	Subsystem	Abh. versch. Strukturen, sekundäre Einsparungen
	Integration der Systemdetaillierung	Berechnung & Wiegen	physikalische Struktur	System	Abh. versch. Strukturen, sekundäre Einsparungen

Die Mikro-Analysepunkte ermöglichen eine schnellere und effizientere Beurteilung von Ergebnissen aus Entwicklungsschritten. Durch die jeweilige Überprüfung der Eigenschaften aus den

entsprechenden Mikro-Phasen auf den verschiedenen Systemebenen können Abhängigkeiten zwischen den Eigenschaften bestimmt werden, was letztendlich die Möglichkeit bietet, sekundäre Optimierungswege zu identifizieren.

Tabelle 5.2 zeigt einen Überblick über die verschiedenen Mikro-Analysepunkte inklusive einer Zuordnung zu der entsprechenden Makro- bzw. Mikro-Entwicklungsphase.

5.4 Systemverständnis als Grundlage der Produktmodellierung

Das Systemverständnis beschreibt im Allgemeinen die innere Struktur eines technischen Systems in einer gewissen Ausprägung, d. h. die Genauigkeit bzw. Tiefe, wie die Beziehungen zwischen den einzelnen Subsystemen aufgebaut sind. Wird also durch eine genauere Analyse oder bessere Beschreibung dieser inneren Struktur diese Genauigkeit erhöht, wird das Systemverständnis gesteigert. Dieses Systemverständnis dient als Grundlage für die Produktmodellierung, die das Verhalten und die Eigenschaften eines Produktes abbildet. Ist ein hohes Systemverständnis vorhanden, können Verhalten und Produkteigenschaften wesentlich besser modelliert und vorhergesagt werden.

In Bezug auf eine Gewichtsoptimierung sind bei hohem Systemverständnis vor allem das Verhalten basierend auf einer Gewichtsoptimierung (z. B. höhere Dynamik, weniger Verbrauch, gesteigertes Gewicht-Nutzen-Verhältnis) und die Produkteigenschaften selbst (Gewicht, Gewichtsverteilung, Schwerpunktlage, ...) besser zu beschreiben und vorherzusagen.

Durch ein hohes Systemverständnis, also eine genaue Kenntnis der inneren Beziehungen eines Systems, was gleichbedeutend mit den Abhängigkeiten von Produkteigenschaften untereinander ist, kann die Änderung des Systemverhaltens bereits durch eine geringe Anzahl an Eigenschaftsänderungen begünstigt werden. Diese Eigenschaftsänderungen werden durch Merkmalsänderungen, analog zum CPM-Konzept nach [WeWe00], herbeigeführt. Somit beschreibt die Genauigkeit der Beziehungen (relations) die Güte des Systemverständnisses. Sind diese Beziehungen genau beschrieben, ist es möglich, synthetisch aus gewünschten Anforderungen Merkmale zu generieren, die wiederum analytisch betrachtet die Produkteigenschaften erzeugen. Darüberhinaus müssen die Abhängigkeiten der Merkmale (dependencies) untereinander betrachtet werden. Bei Veränderung eines Merkmals zur Änderung einer Produkteigenschaft werden weitere Merkmale, die nicht unbedingt zu der zu ändernden Produkteigenschaft beitragen, involviert und bewirken die Änderung anderer Produkteigenschaften. Bei hohem Systemverständnis sind diese Abhängigkeiten bekannt. Somit kann ein Merkmal indirekt eine „Stellschraube“ für mehrere Produkteigenschaften sein, was zu sekundären Effekten (positiv oder negativ) führen kann.

5.5 Gewichtsoptimierungsstrategien

Allgemein geben Strategien im Unterschied zu Methoden die generelle Zielrichtung vor. Die Zuordnung von Leichtbaustrategien zu den Entwicklungsphasen stellt dabei einen wichtigen Ausgangspunkt dar, für die Entwicklungsphase und die gewählte Strategie entsprechende Maßnahmen zu erstellen oder anzupassen.

5.5.1 Zuordnung von Leichtbaustrategien zu den Entwicklungsphasen

In [ScPu00] und [ScPM01] erfolgt die Zuordnung von Leichtbaustrategien zu den Phasen des traditionellen Entwicklungsprozesses, z. B. nach [VDI2221] oder [PFBG07]. Hierbei kann festgestellt werden, dass besonders die späten Phasen der Produktentwicklung (Entwerfen und Ausarbeiten) durch die Leichtbaustrategien Struktur-, Material- und Fertigungsleichtbau unterstützt werden. Im Gegensatz dazu kann nur die Konzeptleichtbaustrategie den frühen Phasen mit Aufgabenklärung und Konzepterstellung zugewiesen werden, was eine Unterberücksichtigung der frühen Entwicklungsphasen zur Folge hat.

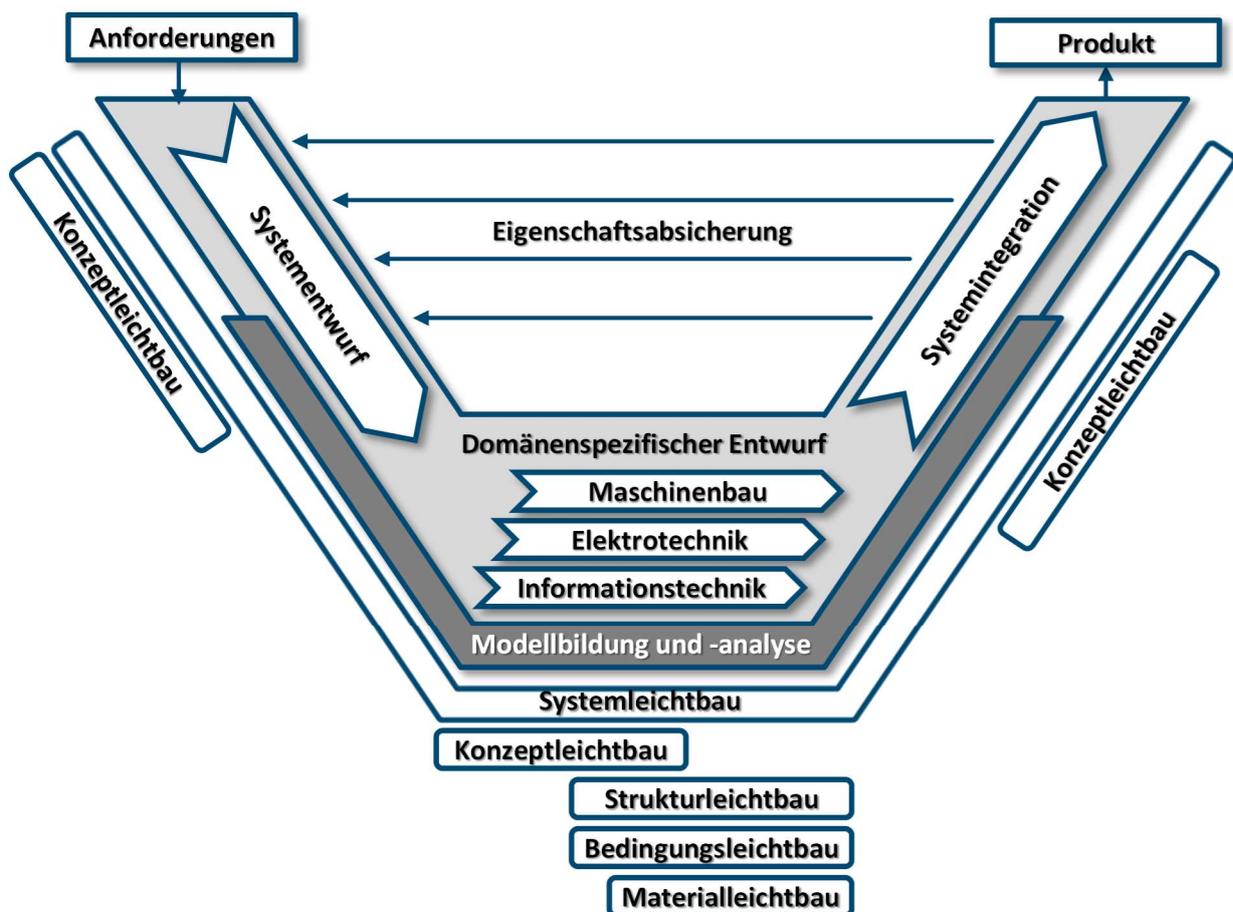


Abbildung 5.8: Zuordnung von Leichtbaustrategien zu den Phasen des V-Modells nach VDI 2206 [LuVi12b]

Aufgrund des mechatronischen Charakters des zu entwickelnden Prozessmodells wurde bereits in [LuVi12b] eine Zuordnung von Leichtbaumaßnahmen zum Prozessmodell für mechatronische Produkte nach [VDI2206] vorgestellt, welches als Basis für das Zuordnungsschema in der vorliegenden Arbeit dient (siehe Abbildung 5.8).

Zusätzlich zu den bekannten Leichtbaustrategien tritt die bei [ScPu00] und [ScPM01] nicht berücksichtigte Strategie des Systemleichtbaus in Erscheinung, welche in Tabelle 3.3 als für diese Arbeit essentielle Strategie identifiziert wurde. Der Systemleichtbau umfasst dabei alle Entwicklungsschritte von Anforderungen bis zum fertigen Produkt, sie steht sozusagen immer in Hintergrund und koordiniert die übrigen Leichtbaustrategien und -maßnahmen. Die Gewichtsoptimierung jedes einzelnen Teilsystems und besonders die Interaktion der Teilsysteme untereinander werden hierbei neben dem Hauptziel der Gewichtsoptimierung des Gesamtsystems fokussiert. Durch detaillierte sowie konkrete Handlungsanweisungen in den Leichtbaustrategien des Struktur-, Material- und Fertigungsleichtbaus eignen sich diese vor allem in der Phase der domänenspezifischen Ausdetaillierung. Neben dem Systemleichtbau spielt vor allem der Konzeptleichtbau, der dem Entwicklungsprozess an verschiedenen Stellen zugewiesen werden kann, eine wichtige Rolle. Das Konzept im Allgemeinen ist signifikant verantwortlich für das weitere Entwicklungsvorgehen. Daher scheint es sinnvoll, den Konzeptleichtbau sowohl bei der Konzeptionierung des Gesamtsystems als auch bei der einzelnen Domänen sowie bei Integration des Gesamtsystems zu betrachten.

5.5.2 Systemleichtbau

Der Systemleichtbau als solches stellt die ganzheitliche und systematische Optimierung des Gesamtsystems über den gesamten Entwicklungsprozess dar. Somit kann der Systemleichtbau als systematisch in Bezug auf die Anwendung der Methoden, als systemisch in Bezug auf das Gesamtsystem angesehen und wie folgt definiert werden:

Der Systemleichtbau bezeichnet eine Strategie, bei der Leichtbaustrategien und Methoden der Gewichtsoptimierung systematisch und systemisch über den gesamten Entwicklungsprozess koordiniert werden zur Erreichung eines Gesamtoptimums des zu betrachtenden Systems.

Gemäß der Definition stellt der Systemleichtbau also eine übergeordnete Strategie dar, von der alle traditionellen Leichtbaustrategien abhängig sind. Er vereint weiterhin neben den Gewichts-optimierungsmethoden auch Methoden zur Produktmodellierung, von der die Güte des Systemverständnisses abhängig ist.

5.6 Gewichtsoptimierungsmethoden

Die in dieser Arbeit entwickelten Gewichtsoptimierungsmethoden werden in dieser Arbeit unterschieden nach ihrem Einsatz während der Produktentwicklung, wie aus Abbildung 5.9 ersichtlich wird.

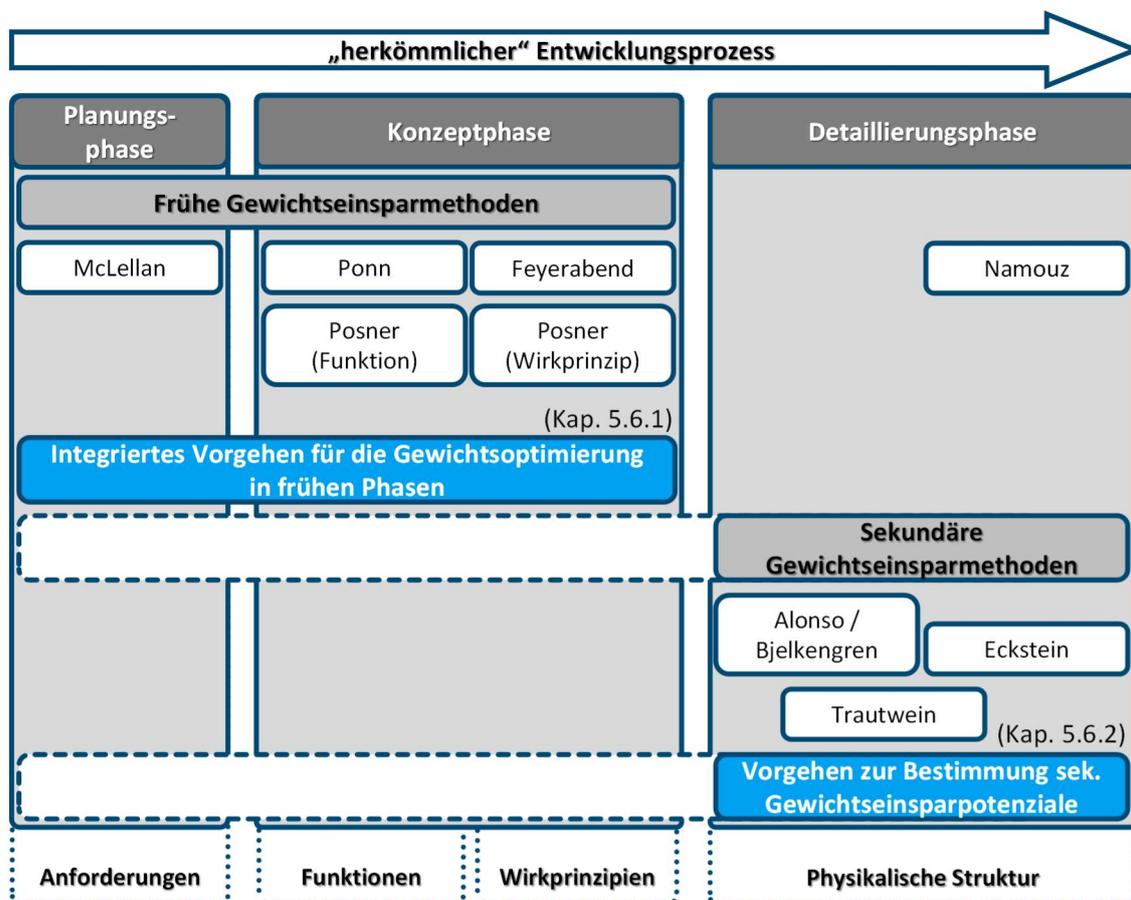


Abbildung 5.9: Gewichtsoptimierungsmethoden während der Produktentwicklung

Die Methoden für eine Gewichtsoptimierung in frühen Phasen der Produktentwicklung können dabei vor allem den Phasen der Aufgabenklärung und der Konzeptionierung zugeordnet werden, wohingegen die Methode der sekundären Gewichtsoptimierung (vorerst) die weniger abstrakten Phasen des Entwerfens und Ausarbeitens fokussieren.

5.6.1 Gewichtsoptimierungsmethoden in frühen Entwicklungsphasen

In Kapitel 3.3.2.3 wurde bereits festgestellt, dass viele Einzelmethoden für eine Gewichtsoptimierungen von technischen Produkten existieren: die Wertanalyse Gewicht nach Feyerabend ([FeKl89], [Feye91a], [Feye91b]), die Methode zur Identifikation gewichtsrelevanter Anforderungen nach McLellan ([McLe10], [MMFM09]) sowie die „Lazy Part Indication“-Methode nach Namouz [Namo10] auf dem Abstraktionslevel der Anforderungen; die Funktionsmassenanalyse nach Posner ([PoBR13a], [PoBR13b]) sowie die Funktionsgewichtsanalyse nach Ponn [PoLi11] auf der Abstraktionsebene der Funktionen; diverse Gewichtseinsparmethoden auf der Bauebene. Auffällig hierbei ist, dass allerdings wenige Methoden (z. B. [PoBR14b]), die Wirkprinzipien und resultierende Wirkstruktur berücksichtigen, sowie keine integrierte Vorgehensmethode identifiziert werden kann.

Die im Folgenden vorgestellte Vorgehensweise basiert auf einigen Vorarbeiten des Autors (siehe [LuVi13a], [LuBV14a] und [LuBV14b]) und integriert die bekannten und oben genannten Methoden zu einem abgeschlossenen Vorgehen für die Makro-Phasen der Konzeptionierung auf System-, Subsystem- und Komponentenebene und offeriert darüberhinaus Methoden zur Gewichtsoptimierung bzw. zur Berücksichtigung von Gewichtskriterien auf der Abstraktionsebene der Wirkprinzipien. Grundsätzlich können die Methoden auf jeder Systemebene für sich selbst angewandt bzw. detailliert aus den vorhergehenden Entwicklungsaktivitäten übernommen werden.

5.6.1.1 Allgemeines Vorgehen

Ein allgemeines Vorgehen für den Umgang mit Gewichtskriterien in frühen Phasen zur Gewichtsoptimierung ist in Abbildung 5.10 dargestellt (nach [LuBV14a] und [LuBV14b]).

Grundsätzlich orientiert sich der Prozess an den Phasen der Systemkonzeptionierung nach [VDI2206] – in dieser Phase ist das Vorgehen einzuordnen – sowie an [PBF07] und [VDI2221], wobei einige Schritte aus den vorgestellten Methoden übernommen und angepasst worden sind. Beim präsentierten Vorgehen werden vor allem die Anforderungen, Funktionen und Wirkprinzipien fokussiert, auf die die „klassischen“ Leichtbaustrategien nur schwer anzuwenden sind. Wie aus Abbildung 5.10 zu entnehmen ist, wird dabei die Abstraktionsebene der Funktionen aufgeteilt. Funktionsebene I befasst sich mit rein technischen Funktionen, Funktionsebene II schließt Gewichtsaspekte und Kundenanforderungen mit ein. Die Analyse- und Entscheidungspunkte des Prozesses können als „Nano-Analysepunkte“ aufgefasst werden, d.h. sie stellen Analysen innerhalb der Mikro-Phasen dar. Sie dienen als Vergleichspunkte für Entwicklungsergebnisse, z. B. Vergleich zwischen zwei verschiedenen Funktionsstrukturen.

Die Schritte der verschiedenen Abstraktionsebenen werden im Folgenden detailliert beschrieben.

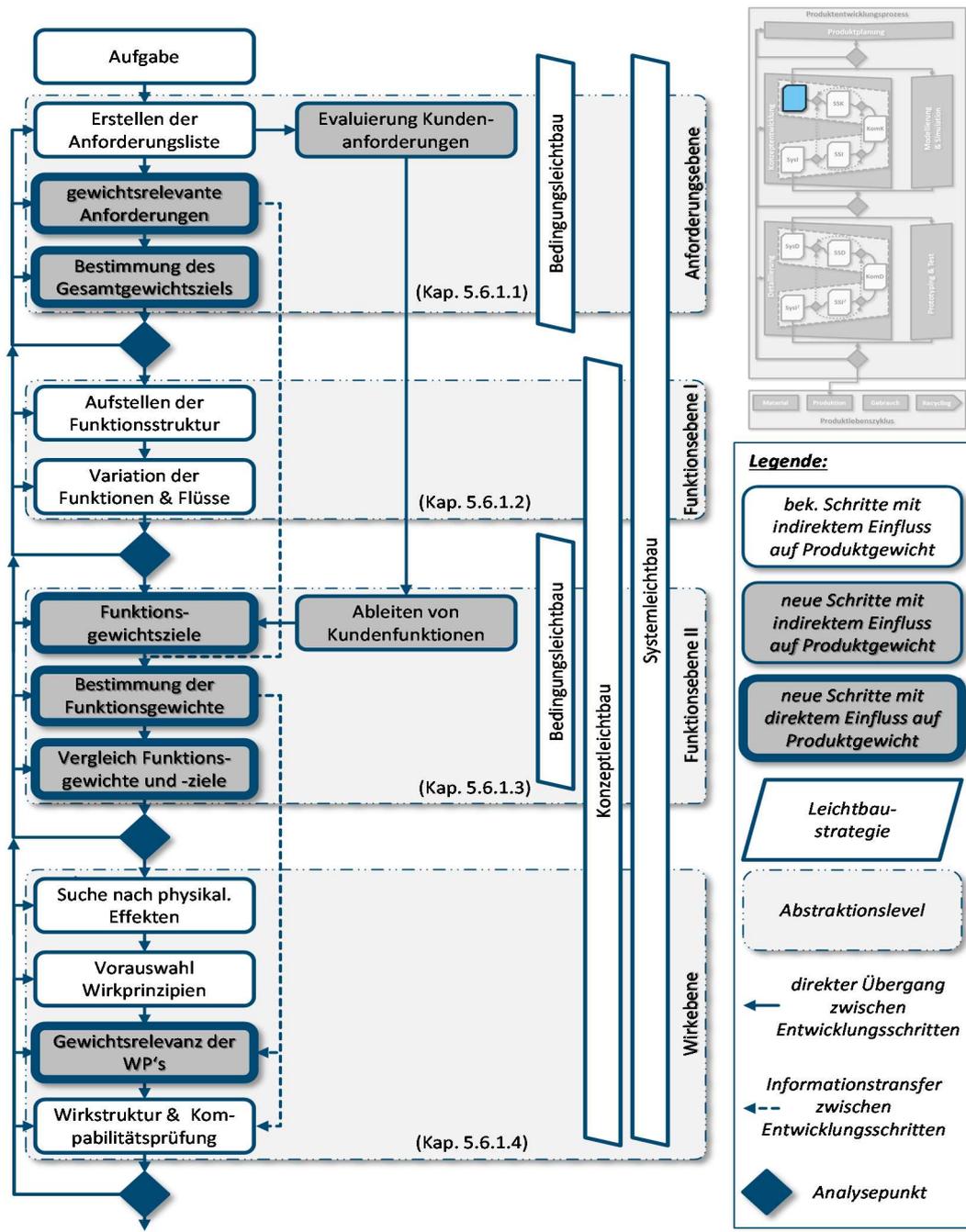


Abbildung 5.10: Detailliertes Vorgehen in frühen Entwicklungsphasen nach [LuBV14a] und [LuBV14b]

5.6.1.2 Anforderungsebene

Das Behandeln der Anforderungen nach Gewichtskriterien zieht das Abarbeiten von Bedingungs- und Systemleichtbau nach sich. Neben dem bekannten Aufstellen der Anforderungsliste (mit

technischen Anforderungen) aus Kundenwünschen werden zusätzlich Kundenanforderungen abgeleitet, die später zum Tragen kommen. Darüberhinaus werden gewichtsrelevante Anforderungen identifiziert und herausgestellt sowie das Gesamtgewichtsziel festgelegt.

Erstellen der Anforderungsliste

Die Anforderungsliste wird durch Zusammentragen aller für die Entwicklungsaufgabe relevanten Informationen erstellt und strukturiert, z. B. nach [VDI2221] oder [PBF07].

Bestimmung gewichtsrelevanter Anforderungen

Die Bestimmung gewichtsrelevanter Anforderungen basiert auf der Anforderungsliste, die von Lasten- und Pflichtenheft des Auftraggebers und Kunden abgeleitet wird. Dabei ist es wichtig, explizite quantitative Angaben (z. B. „Gewicht kleiner als 20 kg“) zu ermitteln und die Abhängigkeiten der verschiedenen Anforderungen untereinander zu bestimmen. Dadurch können mögliche Zielkonflikte bereits im Anfangsstadium geklärt werden. Gewichtsrelevante Anforderungen sind herauszustellen, um mögliche Gewichtseinflüsse für die späteren Entwicklungsschritte deutlich zu machen. Oftmals sind in konventionellen Anforderungslisten Gewichtsangaben und Leichtbaupotenziale versteckt oder implizit angegeben. Darüberhinaus dient die Methode der gewichtsintensiven Anforderungen von McLellan [McLe10] dazu, besonders gewichtsrelevante und von anderen Anforderungen mehr oder weniger unabhängige Anforderungen herauszustellen, da diese besonders hohes Potenzial bergen, Gewicht einzusparen.

Evaluierung der Kundenanforderungen

Die Evaluierung der Kundenanforderungen erfolgt mithilfe von bekannten Vergleichsverfahren, z. B. einem paarweisen Vergleich. Dabei soll eine Wichtigkeitsrangfolge der Kundenanforderungen festgelegt werden. Die Ergebnisse der Kundenbefragung werden zu einem späteren Zeitpunkt während Funktionsebene II zum Vergleich der technischen mit den Kundenfunktionen benötigt.

Bestimmung des Gesamtgewichtsziels

Ein entscheidender Baustein für das Überwachen und Nachverfolgen des Gewichtes und der gewichtsabhängigen Eigenschaften ist die Festlegung des Gesamtgewichtsziels als erster Anhaltspunkt für die weiteren Entwicklungsschritte. Ausgehend von diesem Ziel erfolgt die Entwicklung in der Art, dass sich bei steigendem Produktreifegrad das bestimmte Gesamtgewicht diesem Gesamtgewichtsziel annähert. Typischerweise nähert sich das Gesamtgewicht mit wachsender Pro-

duktreife dem Ziel „von unten“ (siehe dazu [Weck06]), idealerweise ohne das Ziel zu überschreiten. Ein typischer Verlauf ist das kurzzeitige Überschreiten des Gesamtziels und das darin anschließende Einleiten von Leichtbaumaßnahmen zum Einhalten der Grenze.

5.6.1.3 Funktionsebene I

Funktionsebene I vereint bekannte Methoden in einem neuen Kontext und unter anderen Bedingungen. Es scheint sinnvoll, Funktionen in Betracht zu ziehen, wenn das zukünftige Produktgewicht beeinflusst werden soll. Gerade in dieser frühen Entwicklungsphase besteht trotz wenigen und ungenauen Daten und Informationen die größte Möglichkeit, spätere Produkteigenschaften zu prägen. Durch die Auswahl von bestimmten Funktionen wird zudem der Lösungsraum eingeschränkt. Daher ist es wichtig, gerade die für in diesem Falle gewichtsrelevanten Funktionen herauszufiltern und gesondert zu betrachten. Vor allem der Konzeptleichtbau unterstützt dabei das Vorgehen, da durch die Funktionen das grundlegende Konzept vorbestimmt wird.

Aufstellen der Funktionsstruktur

Die Funktionsstruktur wird nach bekannten Methoden, z. B. [VDI2221], [VDI2222] oder [PBF07], erstellt und wird entweder von bestehenden Produkte bzw. technischen Lösungen abgeleitet oder für ein neues, zu entwickelndes Produkt oder auf eine neue Art und Weise entwickelt. Dabei scheint die flussorientierte Ansicht die sich am besten eignende Perspektive zu sein, da drei verschiedene Arten von Flüssen betrachtet werden: der Signalfluss, der Stofffluss sowie der Energiefluss [PBF07]. Darüberhinaus ist die Verwendung allgemeiner Subfunktionen anstatt individueller Subfunktionen (z. B. „verbinde Stoff mit Stoff“ anstelle von „verbinde X mit Y“) zu bevorzugen, allerdings nur derer, die auch signifikant zur Gesamtfunktion beitragen.

Variation der Funktionen und Flüsse

Als erste Möglichkeit, die rudimentäre Funktionsstruktur deren und Funktionen zu optimieren, auch im Sinne einer Gewichts Betrachtung („mehr Funktionen verursachen mehr Gewicht“ [PoBR13a]), bieten sich verschiedene Variationsansätze an. Besonders der konzeptionelle Leichtbau spielt dabei eine entscheidende Rolle und kann daher in der Art interpretiert werden, dass konzeptionelle Änderungen und damit einhergehend Änderungen an Funktionen und Funktionsstruktur neue Lösungsmöglichkeiten verursachen können, die Potenzial für Leichtbau- und Gewichtsoptimierungsmethoden freigeben. Dabei sind folgende Variationsmöglichkeiten aus zwei Gruppen (Funktionsvariation und Flussvariation) in Betracht zu ziehen, die in [PoLi11], [PBF07] und [PoBR13a] ausführlich und ähnlich dargestellt werden.

Die Funktionsvariation bietet dabei verschiedene Ansatzmöglichkeiten an:

- Ersetzen: Eine Funktion wird durch eine andere Funktion substituiert, die geeigneter für die Problemstellung ist und daher eventuell weniger Gewicht verursachen kann. Diese Funktionssubstitution kann darüberhinaus eine Änderung der Art der Flüsse verantworten, was wiederum zum Vorteil einer Gewichtsänderung führen kann.
- Integrieren: Mehrere Funktionen werden auch bezüglich oder gerade wegen neuartigen Technologien (z. B. neue mechatronische Lösungen) zu einer einzigen Funktion zusammengefasst, die weniger Gewicht verursacht.
- Trennen: Der Gegensatz zur Funktionszusammenfassung scheint das Gewichtsoptimierungspotenzial zu verschlechtern, da mehr Funktionen generiert werden. Allerdings kann eine Aufteilung in mehrere Funktionen ein Vorteil sein, wenn dadurch vor allem der Stofffluss verringert werden kann. Darüberhinaus ist eine dezentrale Funktionsverteilung durchaus mit höherem Gewichtsoptimierungspotenzial versehen, wenn dadurch die Einzelfunktionen jeweils für sich gesehen verbessert werden können, so z. B. modulare Funktionen (siehe dazu die Ausführungen von [GuKr11a]) oder „Achsmotoren“.
- Ausklammern: Die Variation der Funktionen in dem Maße, dass sie aus dem zu betrachtenden, zu optimierenden technischen System ausgegrenzt werden, trifft vor allem auf die elementaren Subfunktionen „Fließen“ und „Speichern“ [PBF07] zu. Diese können lediglich in Raum und Zeit verändert werden, jedoch nicht in ihrer Art, Größe und Anzahl [PoBR13a]. Somit kommen sie für eine Steigerung des Gewichtsoptimierungspotenzial nicht in Frage.
- Eliminieren: Das Vernachlässigen von Funktionen ergibt nur dann Sinn, wenn diese Funktionen zwar zur Erfüllung der Gesamtfunktion benötigt werden, aber nicht direkt zu ihr beitragen.

Im Gegensatz dazu scheint bei der Variation der Flüsse eine Bevorzugung von Energieflüssen vorteilhafter gegenüber Stoffflüssen. Stoffflüsse sind direkt mit Gewicht behaftet („es wird Material bewegt“), Energieflüsse dagegen nur indirekt („nur das Übertragungsmedium erzeugt Gewicht“). Bei der Anwendung der Variationsmöglichkeiten ist nie allein die Anwendung einer einzigen zielführend, viel mehr eine Anwendung verschiedener Variationen. So kann z. B. das Trennen von Funktionen wiederum eine Integration von Funktionen in einer anderen Weise bewirken. Bei der Variation ist immer auf eine Optimierung nach Gewichtsaspekten zu achten.

Nach [PoLi11] ist die Anzahl der Funktionen in der Funktionsstruktur ausschlaggebend als Kriterium für ein gewichtsoptimiertes System: Sind wenige Funktionen mit einem hohen Anteil an der Gesamtfunktion vorhanden, kann das System als „leichter“ betrachtet werden. Es gilt der Grundsatz: „Weniger Funktionen verursachen weniger Gewicht“. Darüberhinaus sind Energie- und Signalflüsse gegenüber Stoffflüssen zu bevorzugen, da Stoffflüssen in direktem Zusammenhang mit Gewicht stehen.

Der Ansatz der Gewichtsoptimierung mechatronischer Systeme erfolgt in genau diese Richtung: Durch den Einsatz mechatronischer Konzepte erfolgt in der Regel eine Funktionsintegration, d. h. eine Verringerung der Funktionsanzahl, sowie die Wandlung von Stoffflüssen in andersartige Flüsse. Zum Beispiel werden Kräfte nicht mehr direkt mechanisch übertragen, sondern mit Sensor-Aktor-System auf mechatronischer Basis gearbeitet.

5.6.1.4 Funktionsebene II

Neben der rein technischen Betrachtung der Funktionen und dem Aufstellen der Funktionsstruktur in Funktionsebene I bietet Funktionsebene II einen direkten Bezug zwischen Funktionen und gewichtsrelevanten Kriterien. Neben dem für Funktionen wichtigen Konzeptleichtbau kommt vor allem der Bedingungsleichtbau zum Tragen, da Kunden- und Gewichtsanforderungen miteinander verglichen werden.

Ableiten von Kundenfunktionen

Das Ableiten der Kundenfunktionen aus den Kundenanforderungen erfolgt aufgrund des später zu Rate zu ziehenden Vergleichs zwischen technischen und Kundenfunktionen. Mit der Beurteilung der Anforderungen aus der Anforderungsebene ist es möglich, eine Funktionswichtigkeitsrangfolge bezüglich des Erfüllungsgrades der Gesamtfunktion zu erstellen.

Bestimmung der Funktionsgewichtsziele

Der Vergleich zwischen technischen Funktionen und Kundenfunktion ergibt die Bestimmung von sogenannten Funktionsgewichtszielen (analog zu [PoBR13b]). Mithilfe eines angepassten House of Quality erfolgt der Vergleich zwischen den vorher nach Wichtigkeit geordneten Kundenfunktionen bzw. -anforderungen (siehe Evaluierung der Kundenanforderungen). Dabei erfolgt eine Bestimmung der Anteile der Beiträge der Kundenfunktionen zur Erfüllung einer jeden technischen Funktion, z. B. trägt Kundenfunktion 1 zu 10% zur technischen Funktion 1, 30% zur technischen Funktion 3 sowie 60% zur technischen Funktion 4 bei (siehe Abbildung 5.11).

Durch eine Summation der Anteile der Kundenfunktionen an den technischen Funktionen, die mit der Wichtigkeit der Kundenfunktionen multipliziert werden, ergibt sich die Wichtigkeit der technischen Funktionen. Das bedeutet, dass die Wichtigkeit der technischen Funktionen mit dem Beitrag zur Gesamtfunktion und damit dem Beitrag zum Gesamtgewicht gleichzusetzen ist. Somit kann jeder technischen Funktion ein Gewichtsanteil zugeordnet werden.

Wertigkeit der Kundenfunktionen		Wertigkeit der technischen Funktionen						
	Nr.	i_{CF}	1	2	3	4	5	Nr.
	1	0,1	0,1		0,3	0,6		Erfüllungsgrad (0...1)
	2	0,3		0,4	0,4		0,2	
	3	0,4	0,05	0,3		0,65		
	4	0,2		0,65			0,35	
			0,03	0,37	0,15	0,32	0,13	i_{TF}
Funktionsgewichtsziel			18g	222g	90g	192g	78g	600g

Abbildung 5.11: Bestimmung der Funktionsgewichtsziele (analog zu [PoBR13b])

Bestimmung der Funktionsgewichte

Analog zu der Bestimmung der Funktionsgewichtsziele erfolgt die Bestimmung der Funktionsgewichte, wobei allerdings anstatt der Kundenfunktionen Komponenten und Bauteile von ähnlichen Vorgängerprodukten mit den technischen Funktionen verglichen werden. Hintergrund hierfür ist die Verbesserung dieser Vorgängerprodukte bezüglich den Gewichtseigenschaften. Der Vergleich wird in der Art durchgeführt, dass der Anteil der technischen Funktionen an einer Komponente ermittelt wird. Ebenso ergibt sich ähnlich den Rechenschritten aus der Bestimmung der Funktionsgewichtsziele durch die Summation der Anteile der Bauteile, multipliziert mit ihrem Bauteilgewicht, ein jeder technischen Funktion zugeordnetes Gewicht, dem Funktionsgewicht.

Vergleich von Funktionsgewichten und Funktionsgewichtszielen

Durch den Vergleich der technischen Funktionen mit den Kundenfunktionen auf der einen Seite und den Bauteilgewichten auf der anderen Seite ist es möglich, die daraus entstehenden Funkti-

onsgewichtsziele und die Funktionsgewichte gegeneinander abzuwägen. Dadurch kann das Optimierungspotenzial jeder technischen Funktion bestimmt werden. Es wird unterschieden, ob das Gewichtsziel einer technischen Funktion mit ihrem zugehörigen Funktionsgewicht unterschritten oder überschritten wird (siehe Abbildung 5.13).

Gewicht der Komponenten		Wertigkeit der technischen Funktionen						
		Nr.	Gew.	1	2	3	4	5	Nr.
1	250	0,7		0,3				Erfüllungsgrad (0...1)
2	173		0,5	0,2			0,3	
3	109		0,5	0,2	0,3			
4	85	0,3		0,1	0,4	0,1		
Funktionsgewicht		200,5	141	139,9	66,7	68,9	617	

Abbildung 5.12: Bestimmung von Funktionsgewichten (analog zu [PoLi11], [PoBR13b])

Technische Funktion	1	2	3	4	5	ges.
i_{TF}	0,03	0,37	0,15	0,32	0,13	1
Funktionsgewichtsziel	18	222	90	192	78	600
Funktionsgewicht	200,5	141	139,9	66,7	68,9	617
Differenz	+182	-81	+49,9	-125	-9,1	-
Ziel erreicht?	nein	ja	nein	ja	ja	-
i_{TF} *Differenz	5,48	-	7,49	-	-	-

Abbildung 5.13: Vergleich von Funktionsgewichten mit Funktionsgewichtszielen

5.6.1.5 Wirkebene

Durch die Vorfestlegung des Gesamtkonzeptes durch die Funktionsstruktur dient die Behandlung von Gewichtskriterien auf Wirkebene dazu, diese Funktionsstruktur und die in den vorherigen

Schritten ermittelten Funktionen und deren Funktionsgewichten durch das Suchen von prinzipiellen Lösungen genauer zu spezifizieren, besonders im hier relevanten Fall der gewichtsrelevanten Systemeigenschaften.

Suche nach physikalischen Effekten

Die Suche nach physikalischen Effekten ist der erste Schritt für die oben bestimmten Funktionen Lösungsfelder ausfindig zu machen. Dabei wird nach den weit bekannten Methoden (z. B. [PBF07], [PoLi11], [FeGr13]) vorgegangen. Birgt die Suche Probleme mit sich, dass kein physikalisches Prinzip eindeutig zugeordnet werden kann, ist es vorteilhaft, die entsprechend zugehörige Funktion in elementare, abstraktere Subfunktionen zu überführen [PBF07], denen eindeutig ein physikalisches Lösungsprinzip zugeordnet werden kann. Die Einordnung und Charakterisierung dieser Prinzipien nach physikalischen, geometrischen und materialbasierten Kriterien erleichtert das Erstellen von verschiedenen Lösungsalternativen, die wiederum methodisch behandelt werden können, z. B. Lösungskombination mit einem Morphologischen Kasten [FeGr13].

Vorauswahl der Wirkprinzipien

Zur effektiveren Lösungssuche werden die gefundenen physikalischen Effekte nach bestimmten Charakteristika (z. B. Effektintensivität, Realisierungsmöglichkeiten, ...) geordnet. Damit wird zwar der Lösungsraum eingeschränkt, die Suche nach einem Lösungskonzept allerdings vereinfacht. Hier können z. B. Lösungskataloge (vgl. dazu [Roth00a], [Roth00b]) hilfreich sein, die viele verschiedenartige Möglichkeiten bieten, geeignete Lösungen auszusuchen. Ein solcher Lösungskatalog, speziell auf mechatronische Lösungen mit Gewichtseinsparpotenzial zugeschnitten, wird später in dieser Arbeit vorgestellt.

Bestimmung der Gewichtsrelevanz der Wirkprinzipien

Die vorausgewählten Wirkprinzipien werden in diesem Schritt nach ihrer Gewichtsabhängigkeit angeordnet. Dazu ist wie bei der Funktionsauswahl der Vergleich mit einem Vorgängerprodukt notwendig. Dabei wird dem für eine bestimmte Funktion im Vorgängerprodukt benutzte Wirkprinzip der Gewichtswert 100% zugeschrieben. Die anderen ermittelten Wirkprinzipien, die ebenfalls die entsprechende Funktion realisieren können, werden entsprechend ihres möglichen Realisierungsgewichtes um den Vergleichswert angeordnet. Die Realisierungsgewichte werden dabei aus gemittelten Werte von Vorgängerprodukten und aus der Erfahrung der beteiligten Ingenieure ermittelt. Damit ergibt sich eine Gewichtsrangfolge der Wirkprinzipien, ähnlich zu der in einem der oben genannten Schritte Wichtigkeitsrangfolge der Funktionen.

Entsprechend dieser Werte kann der Morphologische Kasten in der Art angepasst werden, dass jeder Funktion eine Gewichtsranfolge und jedem Wirkprinzip-Set eine Gewichtsranfolge zugeordnet werden kann (vgl. dazu Abbildung 5.14).

	technische Funktionen	Funktions-wichtigkeit	Gewichtsranfolge II					Wirkprinzip
			I.1	I.2	I.3	I.4	I.5	
Gewichtsranfolge I	2	0,37	0,87	0,95	1,00	1,04	1,10	Wirkgewicht
	4	0,32	1,00	1,04				Wirkprinzip
								Wirkgewicht
	3	0,15	0,96	1,00	1,04	1,08		Wirkprinzip
								Wirkgewicht
5	0,13	0,94	1,00	1,02			Wirkprinzip	
							Wirkgewicht	
1	0,03	0,89	0,92	0,98	1,00	1,05	Wirkprinzip	
							Wirkgewicht	

„Wirkgewicht“ der prinzipiellen Lösung

$$W_{L,\text{grün}} = 0,37 \cdot 1,00 + 0,32 \cdot 1,00 + 0,15 \cdot 1,00 + 0,13 \cdot 1,00 + 0,03 \cdot 1,00 = 1,00$$

$$W_{L,\text{rot}} = 0,37 \cdot 1,04 + 0,32 \cdot 1,00 + 0,15 \cdot 1,00 + 0,13 \cdot 1,02 + 0,03 \cdot 0,89 = 1,01$$

$$W_{L,\text{blau}} = 0,37 \cdot 0,87 + 0,32 \cdot 1,04 + 0,15 \cdot 1,04 + 0,13 \cdot 1,00 + 0,03 \cdot 0,92 = 0,97$$

Abbildung 5.14: Morphologischer Kasten mit zweidimensionaler Gewichtsranfolge

Aufstellen der Wirkstruktur mit Kompatibilitätsprüfung

Die Kombination der Wirkprinzipien für die einzelnen Funktionen ergibt die Wirkstruktur und damit eine prinzipielle Lösung. Dabei ist es wichtig und entscheidend, dass für eine prinzipielle Lösung alle Wirkprinzipien kompatibel zueinander sein müssen [PBF07]. Dafür müssen gewisse Kriterien beachtet werden, z. B. geometrisch kompatibel, energetisch kompatibel oder stoffkompatibel. Zu jeder ermittelten Lösung, die aus kompatiblen Wirkprinzipien besteht, kann ein Gesamtgewichtsrelevanzwert festgelegt werden. Er wird ermittelt, indem für jede Lösung im Morphologischen Kasten zeilenweise der Relevanzwert der Wirkprinzipien mit dem Relevanzwert der Funktion multipliziert wird und durch Summation den Gesamrelevanzwert ergibt. Durch den

Vergleich der Gesamtgewichtsrelevanzwerte der ermittelten Lösungen kann die für die Gewichtseigenschaften optimalste Gesamtlösung ermittelt werden. Die gewichtsoptimierte Gesamtlösung ist dabei wichtiger als eine Kombination aus den Wirkprinzipien mit den geringsten Gewichtsrelevanzwerten, deren Kombination zu einer Gesamtlösung aufgrund von Inkompatibilitäten allerdings meistens nicht möglich ist.

Am Beispiel aus Abbildung 5.14 ist zu erkennen, dass Lösung „blau“ mit einem Gesamtgewichtsrelevanzwert von 0,97 besser für eine Gewichtsoptimierung geeignet ist als die Referenzlösung des Vorgängerproduktes (Lösung „grün“) und eine zweite prinzipielle Lösung „rot“ mit einer Gesamtgewichtsrelevanz von 1,01. Dabei ist auch anzumerken, dass Lösung „blau“ nicht ausschließlich aus den Wirkprinzipien mit den besten Gewichtsrelevanzwerten aufwartet.

5.6.1.6 Zusammenfassung

Das hier vorgestellte Vorgehen für Gewichtsoptimierung in frühen Phasen vereint bereits bekannte Methoden (z. B. [PoLi11], [PKBR12a], [PKBR12b], [PoBR13a], [PoBR13b], [PoBR14a], [PoBR14b], [McLe10]) und neu entwickelte Methoden (z. B. im Bereich der Wirkstrukturen). Damit kann bereits in frühen, abstrakten Phasen eine Aussage über den Gewichtseinfluss getroffen werden. Hierbei werden Anforderungen, Funktionen und Wirkprinzipien Gewichtswerte zugeordnet, die auch bei Entscheidungspunkten zu Rate gezogen werden können. Durch die Verschiebung von Gewichtsoptimierungsaktivitäten in diese frühen, abstrakten Phasen (Frontloading) werden Gewichtskriterien über den gesamten Entwicklungsprozess berücksichtigt.

5.6.2 Sekundäre Gewichtsoptimierungsmethoden in späten Phasen

Als die Methode für Gewichtsoptimierung in späten Phasen, also für Phasen nach Bestimmung eines Gesamtkonzeptes, werden die sekundären Optimierungsmaßnahmen angesehen. Diese basieren auf den Methoden aus den traditionellen Leichtbaustrategien (Form-, Fertigungs-, Materialleichtbau) und vereinen diese zur Identifikation von sekundären Einsparpotenzialen. Dabei ist es unerheblich, welche Methode aus den Leichtbaustrategien an primärer Stelle angewandt wird.

Aus dem Stand der Technik zu sekundären Gewichtseinsparpotenzialen (siehe Kapitel 3.3.4) wird deutlich, dass die Ansätze zur sekundären Gewichtseinsparung zum großen Teil ein Top-Down-Vorgehen vorschlagen, d.h. aus einer Gesamtgewichtseinsparung die Verteilung der Gewichte und die damit entstehenden Potenziale auf Subsysteme bzw. Komponenten verfolgen. Dabei wird vor allem das System auf Bauebene nach [Lind09] fokussiert.

Die im Folgenden beschriebene Methode zielt auf die Bestimmung von sekundären Gewichtseinsparpotenzialen auf physikalischer Ebene hin und schlägt ein abwechselndes Top-Down-/ Bottom-Up-Vorgehen vor. Die weiteren Abstraktionsebenen (Anforderungen, Funktionen, Wirkprinzipien) werden hier nicht detailliert betrachtet, allerdings wird der Ansatz so gestaltet, dass eine spätere Einbindung berücksichtigt werden kann.

Methodisch ermöglicht das Einbringen von Querverbindungen zur Beschreibung von Gewichtsabhängigkeiten zwischen Teilsystemen und innerhalb des Gesamtsystems zusammen mit einem strukturierten Netzwerkansatz, einer mathematischen Beschreibung sowie einem Ablaufdiagramm beim Durchlaufen der Systemstruktur die Bestimmung von sekundären Gewichtsänderungen, die auf primären Maßnahmen ruhen, sowie zur Identifikation von besonders gewichtsensiblen Komponenten/Subsystemen zur Optimierung des Systemgesamtwichts.

Vorarbeiten und Teile der hier vorgestellten Methode wurden bereits in [LuVi14a], [LuMV14] sowie [Meis14] veröffentlicht.

5.6.2.1 Voraussetzungen und Annahmen

Der Ansatz basiert auf einigen Voraussetzungen und Annahmen. Die Anwendung der Methode erfolgt auf ein vorhandenes System auf Baustrukturebene, d.h. die Dekomposition, also die Aufteilung des Gesamtsystems in Teilsysteme, ist bekannt. Das ist möglich durch eine detaillierte Analyse des vorliegenden Produktes. Somit sind auch die Beziehungen zwischen Teilsystemen in Hinblick auf ihr Gewicht ermittelbar.

Desweiteren wird davon ausgegangen, dass die Beziehungen zwischen den Teilsystemen unveränderlich und zeitlich konstant bleiben. Ein wichtiger Aspekt bei der Erstellung des Ansatzes stellt die Abgeschlossenheit einer Ebene dar. Das bedeutet, dass keine direkte Beeinflussung von Subsystemen einer bestimmten Systemebene auf Subsysteme einer anderen Hierarchieebene besteht. Es können nur Beeinflussungen zwischen Subsystemen gleicher Hierarchiestufe existieren. Eine indirekte Beeinflussung von Teilsystemen unterschiedlicher Hierarchieebene kann allerdings über die zugehörigen übergeordneten bzw. untergeordneten Subsysteme erfolgen.

5.6.2.2 Systemstruktur und Grundbaustein

Die Systemstruktur wird mit Hilfe eines Grundbausteins und einer vorgeschriebenen hierarchisch vertikalen (zwischen Systemebenen) und horizontalen (innerhalb der Systemebenen) Verbindung als ein Netzwerk dargestellt (siehe [LuVi14a], [LuMV14]).

Abbildung des Systems in der Systemstruktur

Die Systemstruktur wird in einem Netzwerkansatz dargestellt. Zur Darstellung der Beziehungen zwischen den verschiedenen Subsystemen, einerseits hierarchisch gesehen vertikal (zwischen den Hierarchieebenen), andererseits horizontal (innerhalb der Hierarchieebenen), kann jedes Subsystem mithilfe des in Abbildung 5.15 dargestellten Grundbausteins beschrieben werden.

Der Grundbaustein des Subsystems m,n – n -tes Subsystem der Systemebene m – hat ein aktuelles Gewicht W_n^m , welches zum Gesamtsystemgewicht in der Relation T_n^m steht. Dadurch ist jederzeit ein Rückschluss auf das Gesamtsystemgewicht möglich, was besonders bei der Bewertung von durchgeführten oder geplanten Gewichtseinsparmaßnahmen primärer oder sekundärer Art von Nutzen sein kann.

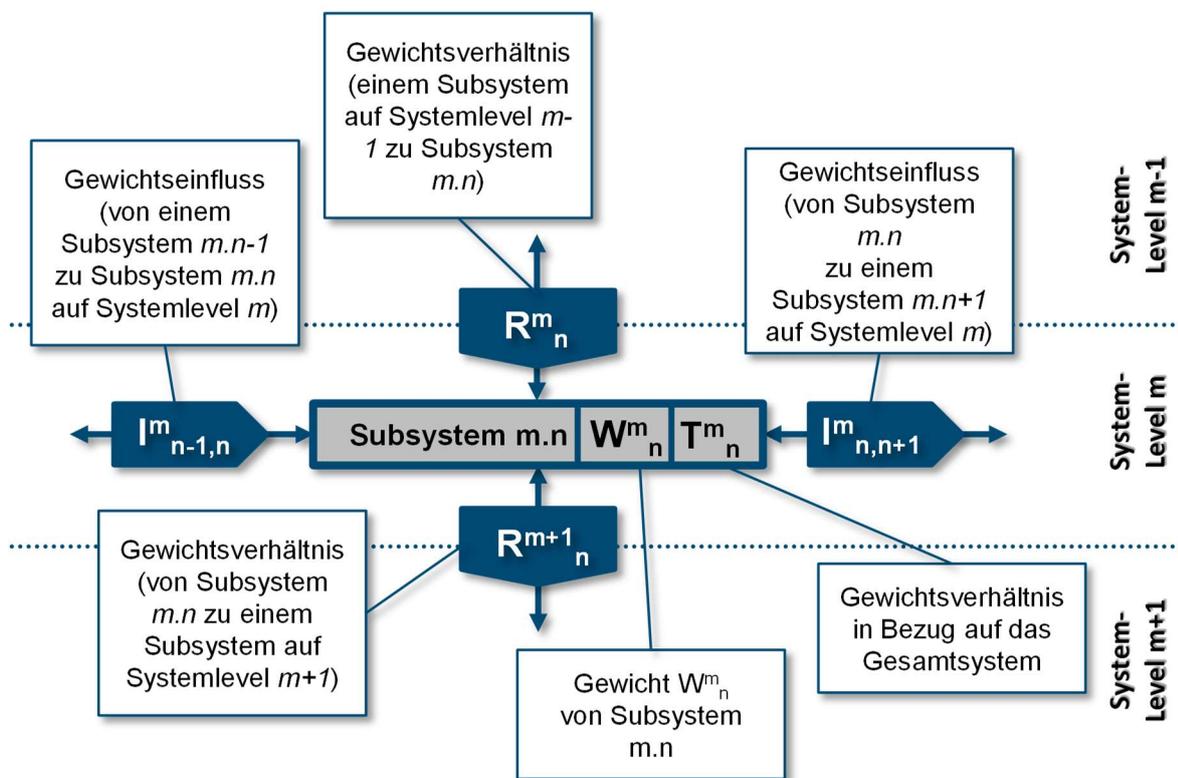


Abbildung 5.15: Grundbaustein mit Gewichtsanteilen und Gewichtseinflussfaktoren

Der vertikale Pfeil mit dem Gewichtsanteil R_n^m (Anteil des Subsystems m,n am Gewicht des entsprechenden übergeordneten Subsystems) sowie der Pfeil mit dem Gewichtsanteil R_n^{m+1} , welches den Anteil eines Subsystems einer untergeordneten Systemhierarchieebene am Subsystem m,n beschreibt, behandeln die prozentualen Verteilungen des Gewichts innerhalb des betrachteten Systems. Der horizontale Pfeil mit dem sogenannten Gewichtseinflussfaktor $I_{n-1,n}^m$ beschreibt die Gewichtsbeeinflussung des Teilsystems $(m,n-1)$ auf das Subsystem (m,n) , der Ge-

wichtseinflussfaktor $I_{n,n+1}^m$ die Gewichtsabhängigkeit des Subsystems $(m,n+1)$ vom Ausgangssystem (m,n) . Das bedeutet, dass das Gewicht des Subsystems (m,n) von einer Gewichtsänderung des Subsystems $(m,n-1)$ beeinflusst wird und diese dann an Teilsystem $(m,n+1)$ weitergibt.

Im Rahmen dieser Arbeit wird – wie oben schon beschrieben – von zeitlich unveränderlichen Gewichtseinflussfaktoren ausgegangen. Dies geht aus einer Analyse des Gesamtsystems bezüglich allgemeiner Änderungsfortpflanzung in technischen Systemen, siehe hierzu z. B. [CISE01], hervor. Es sei allerdings angemerkt, dass davon ausgegangen wird, dass in der realen Anwendung die Gewichtseinflussfaktoren nicht konstant sind, sondern sich je nach Gewichtsänderung bzw. Gesamtgewicht unterschiedliche Werte einnehmen können.

Die Gewichtseinflussfaktoren ermöglichen zusammen mit den Gewichtsanteilen den Aufbau eines Netzwerkes zur Bestimmung von Gewichtsänderungen und vor allem zur Optimierung des Gesamtsystemgewichts durch sekundäre Einsparungen.

Vertikale Systemhierarchie

Die hierarchische Anordnung und Dekomposition eines Systems erfolgt wie bei der Product Breakdown Structure [ShAC07] nach dem Top-Down-Prinzip (siehe Abbildung 5.16). Danach erfolgt die Einteilung des Systems (Systemebene $m=0$) in verschiedene Subsysteme (Systemebene $m=1$), die wiederum in weitere Subsysteme der Systemebene $m=2$ aufgeteilt werden können. Die Dekomposition erfolgt bis zu der Ebene, bei der die Subsysteme nicht mehr weiter unterteilt werden können bzw. bei der es nicht mehr nötig ist, die Subsysteme weiter zu detaillieren. Es bleibt weiterhin festzustellen, dass die verschiedenen Hierarchieäste nicht auf der gleichen Ebene enden müssen. Diese nicht mehr unterteilbaren bzw. unterteilten Teilsysteme stellen die Ausgangspunkte von primären Gewichtseinsparmaßnahmen dar und sind besonders bei der mathematischen Beschreibung der sekundären Gewichtseinsparungen von größerer Bedeutung. Die nicht mehr unterteilten Subsysteme werden in diesem Zusammenhang auch als Komponenten bezeichnet.

Die Nummerierung der Subsysteme erfolgt nicht einfach durchlaufend, sondern verfolgt die Absicht, mithilfe der Indizes die genaue Identifikation des Teilsystems innerhalb des Gesamtsystems zu ermöglichen. Jedes Subsystem kann daher seinem vertikal hierarchisch übergeordneten Subsystem zugeordnet werden (vgl. dazu Abbildung 5.16). Der untere Index eines Subsystems erhöht sich mit zunehmender Systemebene gleichermaßen. So ist Subsystem $(2,1.1)$ auf Systemebene

$m=2$ als erstes Subsystem angesiedelt und kann als „Kind“ von Subsystem $(1,1)$ angesehen werden. Die Anzahl der Stellen des unteren Index sind gleich der Anzahl des oberen Index, also der Systemebene.

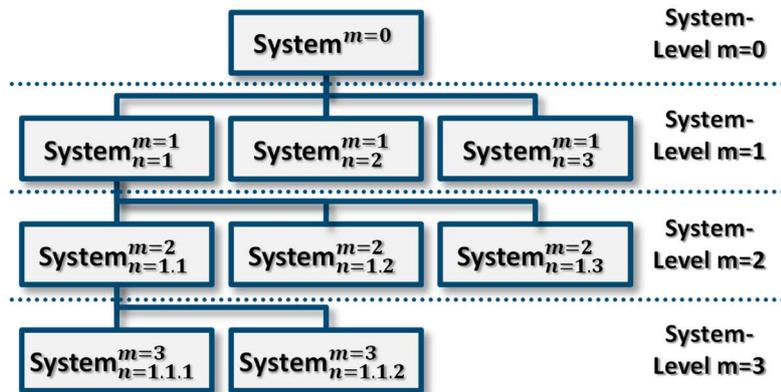


Abbildung 5.16: Vertikale Anordnung der Systemstruktur

Horizontale Systemhierarchie

Die horizontale Anordnung der Teilsysteme innerhalb einer Systemebene dient zur klareren Verdeutlichung der (Gewichts-)Abhängigkeiten und zur Komplexitätsbeherrschung im Sinne einer mathematischen Beschreibung. Dabei werden alle Subsysteme einer Gruppe, d.h. alle Subsysteme, die von einem Subsystem einer übergeordneten Systemebene vererbt sind, entsprechend ihres Gewichts bzw. dem Beitrag zum Gesamtgewicht absteigend angeordnet. Durch eine Änderung eines Subsystemgewichts innerhalb einer Gruppe kann einerseits ein mögliches Änderungspotenzial freigegeben werden oder andererseits muss eine zwingende Änderung an verbundenen Subsystemen der Gruppe durchgeführt, z. B. durch Funktionsverlagerung etc., werden. Grundlage der Überlegung von möglichen oder sogar zwingenden Änderungsmaßnahmen ist die Tatsache, dass größere Gewichte auch größere Kräfte hervorrufen. So ein Versagen oder ein Ausfall bezüglich ihrer Funktionen von verbundenen Subsystemen ist möglich, wenn das Gewicht durch eine zwingende Änderung verringert werden soll. Daher ist oft eine alleinige Anordnung nach Gewichtskriterien nicht aussagekräftig genug, da die Funktionalität eingeschränkt werden kann. Neben der Anordnung der Subsysteme nach Gewicht können die Subsysteme einer Teilsystemgruppe entsprechend ihres Beitrages zur Funktionalität gereiht werden. Abbildung 5.17 macht die hierarchisch horizontale Anordnung nach Gewicht und Funktion deutlich, wobei die Fläche der Kreise für das Gewicht jedes einzelnen Teilsystems beschreibt.

Zur Bestimmung der Wichtigkeitsreihenfolge als Kompromiss aus Gewicht und Funktion erfolgt zunächst eine einfache und leicht nachvollziehbare Anordnung nach Gewicht. Eine Analyse der

Funktionswichtigkeit der entsprechenden Teilsysteme führt im optimalen Fall zu einer identischen Reihenfolge, was die These „mehr Funktionalität erfordert mehr Gewicht“ bekräftigt. Allerdings kann gerade auch bei mechatronischen Systemen eine höhere Funktionalität durch geringeres Gewicht realisiert werden. Dementsprechend ergibt sich eine Reihenfolge als Mischung aus Gewichts- und Funktionswichtigkeit.

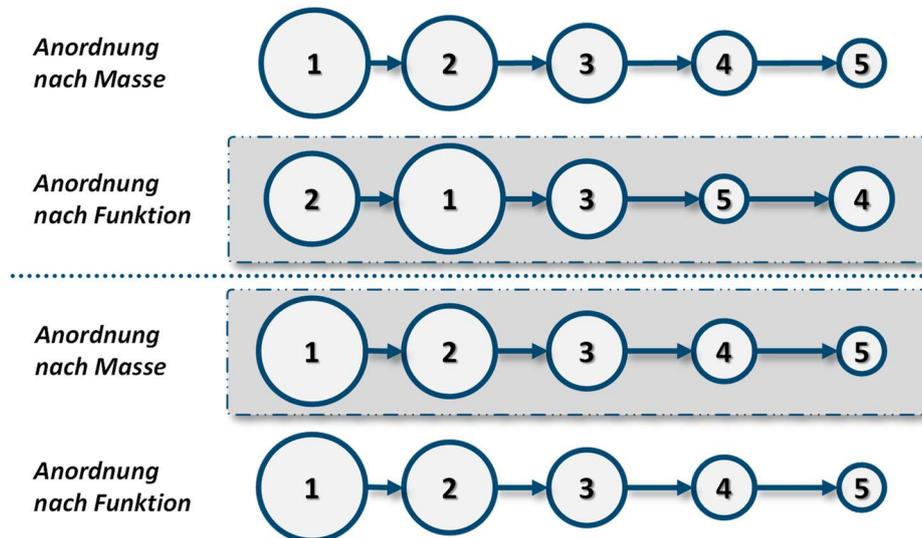


Abbildung 5.17: Horizontale Anordnung der Systemstruktur nach Gewicht und Funktion

Beschreibung der Gewichtsanteile, Gewichtseinflussfaktoren und derer Zusammenhänge

Als einer der bedeutendsten Bestandteile des Systemnetzwerkes sind die Gewichtseinflussfaktoren I_n^m zwischen den Teilsystemen innerhalb einer Systemebene anzusehen, die dadurch die Träger der sekundären Gewichtseinsparungen darstellen. Die Gewichtsanteile $R_{x_1, x_2, \dots, x_n}^m$ hingegen geben die Verteilung des Gewichts eines übergeordneten Subsystems auf seine abhängigen Systeme an (siehe hierzu Abbildung 5.18).

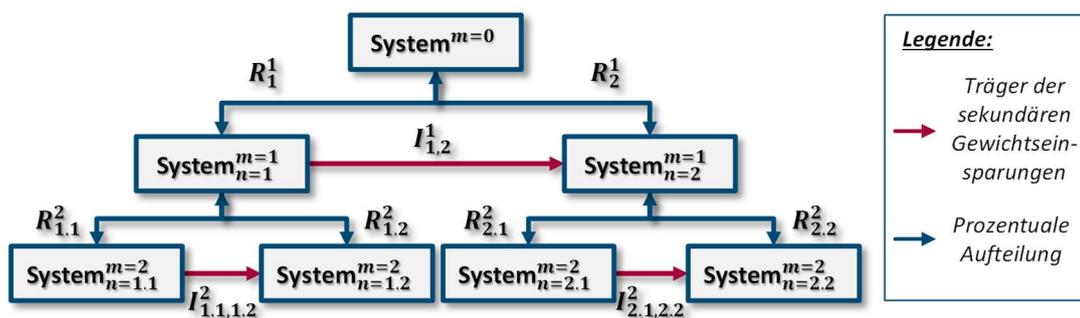


Abbildung 5.18: Vergleich der Pfeilarten (blau: Gewichtsanteile, rot: Gewichtseinflussfaktoren)

Sekundäre Gewichtseinsparungen erster Ordnung (vgl. dazu Abbildung 3.24) treten daher immer nur in der Ebene auf, in der die primären Maßnahmen eingeleitet wurden. Mittels der bekannten Gewichtsanteile werden diese dann auf eine übergeordnete Systemebene übertragen. Auf dieser

werden mithilfe der dortigen Gewichtseinflussfaktoren weitere sekundäre Einsparpotenziale freigegeben. Diese Abgeschlossenheit der Subsysteme (Abbildung 5.19), die alle gleichzeitig abhängig von einem bestimmten Subsystem niedriger Ordnung sind und damit eine Subsystemgruppe bilden, bedeutet, dass niemals eine sekundäre Gewichtseinsparung auf eine Subsystemgruppe desgleichen System-Levels möglich ist. Die Übertragung von sekundären Änderungen erfolgt daher immer auf die zugehörigen Teilsysteme aus der übergeordneten Ebene, die wiederum durch Gewichtseinflussfaktoren miteinander in Beziehung stehen.

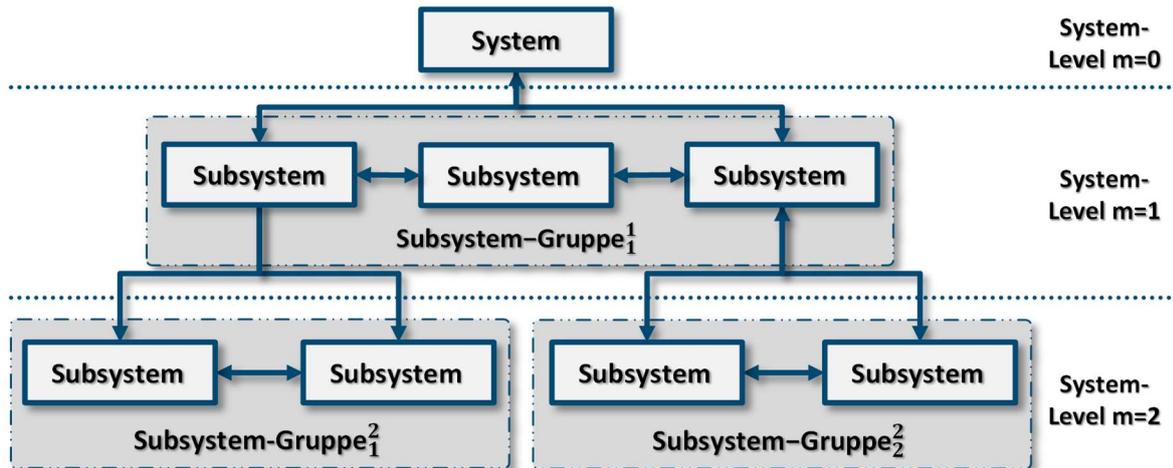


Abbildung 5.19: Gruppen als Set von abhängigen Subsystemen

Somit wird alleine schon aufgrund der Produktmodellierung mithilfe der Systemgruppen deutlich, dass ein alternierendes Bottom-Up-/Top-Down-Vorgehen vonnöten ist beim Durchlaufen der Netzwerkstruktur und damit der Bestimmung von sekundären Gewichtsänderungen.

Wie schon vorher beschrieben, entstehen durch die Wichtigkeitsrangfolge aus Funktionalität und Gewicht mögliche oder auch zwingende sekundäre Gewichtsänderungen, hervorgerufen durch eine primäre Einsparmaßnahme. Zur Visualisierung der verschiedenen Subsystemverbindungen innerhalb des Systemnetzwerkes (hierarchisch vertikal über verschiedene Systemebenen hinweg oder hierarchisch horizontal innerhalb von Systemebenen) werden Pfeile eingeführt, die die unterschiedlichen Fälle (zwingend oder möglich) und Gewichtsanteile sowie Gewichtseinflussfaktoren darstellen (Abbildung 5.20). Vertikale Pfeile zwischen Systemebenen repräsentieren die Gewichtsanteile R_n^m , die in beiden Richtungen, also vom übergeordneten System zum zugehörigen untergeordneten und umgekehrt, durchlaufen werden können. Das entspricht der Darstellung von Gewichtsanteilen.

Die Bedeutung der horizontalen Pfeile, der Darstellung der Gewichtseinflussfaktoren, gestaltet sich vielseitiger. Da von zwischen möglichen und zwingenden Gewichtsänderungen auszugehen

ist, gibt es sowohl unidirektionale als auch bidirektionale Pfeile. Desweiteren muss das Vorzeichen des Gewichtseinflussfaktors miteinbezogen werden. Abbildung 5.21 stellt die verschiedenen Möglichkeiten dar.

Pfeil	Erläuterung
	vertikaler Pfeil, kann in beide Richtungen durchlaufen werden
	horizontaler Pfeil, der nur mögliche, aber keine zwingenden Gewichtsreduktionen aufzeigt
	horizontaler Pfeil, der von links nach rechts eine mögliche Gewichtseinsparung anzeigt und der von rechts nach links eine zwingende Gewichtseinsparung verursacht
	

Abbildung 5.20: Vergleich der Pfeilarten

Der unidirektional gerichtete Pfeil von einem Subsystem mit höherer Gewichtswichtigkeit zu einem Subsystem mit niedriger Wichtigkeit und positivem Gewichtseinflussfaktor beschreibt eine mögliche, aber nicht zwingende Gewichtsänderung: Eine Gewichtserhöhung/-abnahme am ersten Subsystem ermöglicht eine Gewichtserhöhung/-abnahme am zweiten Subsystem mit dem Anteil aus dem Gewichtseinflussfaktor. D. h. eine 20% Gewichtseinsparung kann eine Gewichtseinsparung von 10% am zweiten Teilsystem bei einem Gewichtseinflussfaktor 0,5 ermöglichen. Dieser Pfeil bedeutet aber dementsprechend auch, dass eine Gewichtsänderung an einem niedrig gewerteten Subsystem eine Gewichtsänderung mit Gewichtseinflussfaktor am höher gestuften Subsystem zwingend macht. Bei negativem Gewichtseinflussfaktor (eine Gewichtszunahme eines Subsystems erzwingt eine Gewichtsabnahme eines anderen Subsystems oder umgekehrt) sind die Verbindungen immer als zwingende Änderung aufzufassen. Das ist damit zu begründen, dass eine Gewichtszunahme nur zur Gewährleistung einer Teilfunktion im betrachteten System erfolgen darf. So erfordert eine Reduktion des Gewichts eines Subsystems eine Erhöhung des Gewichts des nachfolgenden Subsystems, wobei eine Zunahme des Gewichts des ersten Subsystems nur eine mögliche Gewichtseinsparung beim zweiten Teilsystem zur Folge hat. Wird allerdings das Gewicht beim nachfolgenden Subsystem verringert, muss das Gewicht beim voranstehenden Subsystem erhöht werden aufgrund des negativen Gewichtseinflussfaktors. Im Gegensatz dazu stellt der bidirektionale Pfeil bei positivem Gewichtseinflussfaktor eine mögliche, aber nicht zwingende Gewichtsänderung zwischen zwei Systemen dar, unabhängig davon,

welches mit der primären Gewichtsänderung beaufschlagt wird. Ein negativer Gewichtseinflussfaktor wird in diesem Falle nicht betrachtet, da es keine sinnvolle Kombination darstellt.

Pfeil	Gewichtseinflussfaktor	Subsystem 1	Subsystem 2
→	$I_n^m > 0$	Gewichtsreduktion	mögliche Gewichtsreduktion
		Gewichtszunahme	mögliche Gewichtsreduktion
		zwingende Gewichtsreduktion	Gewichtsreduktion
		zwingende Gewichtsreduktion	Gewichtszunahme
→	$I_n^m < 0$	Gewichtsreduktion	zwingende Gewichtszunahme
		Gewichtszunahme	mögliche Gewichtsreduktion
		zwingende Gewichtsreduktion	Gewichtszunahme
		mögliche Gewichtszunahme	Gewichtsreduktion
↔	$I_n^m > 0$	Gewichtsreduktion	mögliche Gewichtsreduktion
		Gewichtszunahme	mögliche Gewichtsreduktion
		mögliche Gewichtsreduktion	Gewichtsreduktion
		mögliche Gewichtsreduktion	Gewichtszunahme
	$I_n^m < 0$	nicht sinnvoll!	

Abbildung 5.21: Bedeutung der horizontal gerichteten Pfeilarten

Im Allgemeinen sind Gewichtszunahmen, ausgelöst durch Gewichtseinsparungen an anderer Stelle, bei Subsystemen zu vermeiden, was allerdings wegen der Funktionalität nicht immer zu vermeiden ist. Für das Gesamtsystem ist immer eine Gewichtsverbesserung zu erstreben. Außerdem wird deutlich, dass, wie weiter oben schon beschrieben, eine Wichtigkeitsrangfolge aus Gewicht und Funktion unerlässlich ist. Daraus ergeben sich die unterschiedlichen Verbindungstypen, die einen strikten Aufbau des Netzwerkes und damit eine einfache mathematische Beschreibung ermöglichen.

5.6.2.3 Mathematische Beschreibung und Ermitteln sekundärer Effekte auf physikalischer Ebene

Die Basis für die mathematische Beschreibung liegt in der vorher beschriebenen Systemstruktur und den damit verbundenen Verbindungstypen. Die Berechnung von Gewichtsänderung gründet dabei auf den spezifizierten Gewichtsanteilen und Gewichtseinflussfaktoren.

Das allgemeine Vorgehen bei der Berechnung von sekundären Einsparungen als Auswirkungen von primären Maßnahmen in Bezug auf das Gesamtsystem erfolgt zunächst durch eine Betrachtung von Einzelgewichten und der damit zusammenhängenden Subsystemgruppen. Die Subsystemgruppen ermöglichen eine Darstellung von Gewichtsänderungen auf der entsprechenden Systemebene, die durch die Bottom-Up-Vorgehensweise die sekundären Gewichtseinsparungen des Gesamtsystems offenbaren. Durch einen weiteren Top-Down-Schritt werden alle Gewichtsänderungen an den vorher nicht berücksichtigten Teilsysteme bestimmt. Dadurch sind Rückschlüsse auf das allgemeine Verhalten im Gesamtsystem möglich.

Betrachtung von Einzelgewichten der Subsysteme

Die Betrachtung der Einzelgewichte setzt an der Primärmaßnahme zur Gewichtsoptimierung an. Diese primäre Änderung wird z. B. durch eine Konstruktionsänderung oder durch ein Gewichtseinsparziel des Gesamtsystems nötig. Die Identifizierung der Eignung eines Subsystems für eine maximale Gewichtseinsparung im Gesamtsystem wird später in Kapitel 5.6.2.5 bei der Gewichtssensitivitätsanalyse beschrieben. Zu bevorzugen sind allerdings Primärmaßnahmen an Subsystemen mit dem größten Gewicht innerhalb einer Subsystemgruppe.

Eine primäre Gewichtseinsparmaßnahme $P_{1.1\dots 1}^m$ an einem Subsystem $(m, 1.1\dots 1)$ bewirkt eine Gewichtsersparnis $\Delta W_{1.1\dots 1}^m$, was zu einem neuen Gewicht von $W_{1.1\dots 1}^m$ führt. Somit ergibt sich für das Gewicht $W_{1.1\dots 1}^{m*}$ eines Systems auf der m -ten Systemebene nach dem Einleiten einer primären Leichtbaumaßnahme mit einem Einsparpotenzial $P_{1.1\dots 1}^m$ aus dem ursprünglichen Gewicht $W_{1.1\dots 1}^m$ zu:

$$W_{1.1\dots 1}^{m*} = W_{1.1\dots 1}^m (1 + P_{1.1\dots 1}^m) \quad (5.1)$$

wobei die Gewichtseinsparung $\Delta W_{1.1\dots 1}^m$ definiert ist als:

$$\Delta W_{1.1\dots 1}^m = W_{1.1\dots 1}^{m*} - W_{1.1\dots 1}^m = W_{1.1\dots 1}^m (1 + P_{1.1\dots 1}^m) - W_{1.1\dots 1}^m = W_{1.1\dots 1}^m P_{1.1\dots 1}^m \quad (5.2)$$

Ausgehend von diesem primären Einsparpotenzial in Subsystem $m,1.1\dots 1$ ergeben sich für die Subsysteme der gleichen Systemgruppe über die vorher bestimmten horizontalen Gewichtseinflussfaktoren die sekundären Einsparpotenziale zu:

$$S_{1.1\dots n}^m = P_{1.1\dots 1}^m \cdot \prod_{i=1}^{n-1} I_{1.1\dots i,1.1\dots(i+1)}^m \quad (5.3)$$

So gilt zum Beispiel für Subsystem $(m,1.1\dots 2)$:

$$S_{1.1\dots 2}^m = P_{1.1\dots 1}^m \cdot I_{1.1\dots 1,1.1\dots 2}^m \quad (5.4)$$

Das ursprüngliche Gewicht der Subsysteme resultiert aus den vertikalen Gewichtseinflussfaktoren und dem Gewicht des Systems $(m,1.1\dots 1)$, an dem die Leichtbaumaßnahme durchgeführt wird:

$$\frac{W_{1.1\dots n}^m}{W_{1.1\dots 1}^m} = \frac{R_{1.1\dots n}^m}{R_{1.1\dots 1}^m} \rightarrow W_{1.1\dots n}^m = \frac{R_{1.1\dots n}^m}{R_{1.1\dots 1}^m} \cdot W_{1.1\dots 1}^m \quad (5.5)$$

Das veränderte Gewicht ausgehend von der Primärmaßnahme wird mit den Formeln (5.3) und (5.5) wie folgt bestimmt:

$$\begin{aligned} W_{1.1\dots n}^{m*} &= W_{1.1\dots n}^m (1 + S_{1.1\dots n}^m) \\ &= \frac{R_{1.1\dots n}^m}{R_{1.1\dots 1}^m} \cdot W_{1.1\dots 1}^m \cdot (1 + P_{1.1\dots 1}^m \cdot \prod_{i=1}^{n-1} I_{1.1\dots i,1.1\dots(i+1)}^m) \end{aligned} \quad (5.6)$$

Die sekundäre Gewichtseinsparung für jedes Subsystem der zugehörigen Gruppe ergibt sich zu:

$$\Delta W_{1.1\dots n}^m = W_{1.1\dots n}^{m*} - W_{1.1\dots n}^m = \frac{R_{1.1\dots n}^m}{R_{1.1\dots 1}^m} \cdot W_{1.1\dots 1}^m \cdot P_{1.1\dots 1}^m \cdot \prod_{i=1}^{n-1} I_{1.1\dots i,1.1\dots(i+1)}^m \quad (5.7)$$

Betrachtung der Gewichte in einer Subsystemgruppe

Anhand der Bestimmung der Einzelgewichte einer Subsystemgruppe können die Gewichte der einzelnen Subsystemgruppen bestimmt werden, indem die jeweiligen Gewichte der zugehörigen Subsysteme summiert werden.

$$W_{G1}^{m*} = \sum_{i=1}^n W_{1.1\dots i}^{m*} = \frac{W_{1.1\dots 1}^m}{R_{1.1\dots 1}^m} \sum_{i=1}^n R_{1.1\dots i}^m (1 + P_{1.1\dots 1}^m \cdot \prod_{j=1}^{i-1} I_{1.1\dots j,1.1\dots(j+1)}^m) \quad (5.8)$$

$$\Delta W_{G1}^m = \sum_{i=1}^n \Delta W_{1.1\dots i}^m = \frac{W_{1.1\dots 1}^m}{R_{1.1\dots 1}^m} \cdot P_{1.1\dots 1}^m \cdot \sum_{i=1}^n R_{1.1\dots n}^m \cdot \prod_{j=1}^{i-1} I_{1.1\dots j, 1.1\dots (j+1)}^m \quad (5.9)$$

Die gesamte sekundäre Gewichtseinsparpotenzial in der Subsystemgruppe $G(1)$ mit Subsystemen der Anzahl $k(1)$ mit der primär eingeleiteten Maßnahme ergibt sich zu:

$$S_{G(1)}^m = R_{1.1\dots 1}^m \cdot P_{1.1\dots 1}^m + \sum_{i=2}^{k(1)} R_{1.1\dots i}^m S_{1.1\dots i}^m \quad (5.10)$$

Die sekundären Auswirkungen in den anderen Subsystemgruppen derselben Systemebene berechnen sich dadurch, dass die Gewichtseinsparung aus der speziellen Subsystemgruppe mit der primären Maßnahme als Einsparung auf Systemebene angesehen wird und auf die zugehörigen Teilsysteme mithilfe der Gewichtsanteile verteilt wird. Dementsprechend ergeben sich für alle anderen Subsystemgruppen mit $k(x)$ beteiligten Subsystemen die Gewichte zu:

$$W_{G(x)}^m * = \sum_{i=1}^{k(x)} W_{1.1\dots i}^m * = \frac{W_{1.1\dots 1}^m}{R_{1.1\dots 1}^m} \sum_{i=1}^{k(x)} R_{1.1\dots i}^m (1 + S_{1.1\dots 1}^m \cdot \prod_{j=1}^{i-1} I_{1.1\dots j, 1.1\dots (j+1)}^m) \quad (5.11)$$

$$\Delta W_{G(x)}^m = \sum_{i=1}^{k(x)} \Delta W_{1.1\dots i}^m = \frac{W_{1.1\dots 1}^m}{R_{1.1\dots 1}^m} \cdot S_{1.1\dots 1}^m \cdot \sum_{i=1}^{k(x)} R_{1.1\dots n}^m \cdot \prod_{j=1}^{n-1} I_{1.1\dots j, 1.1\dots (j+1)}^m \quad (5.12)$$

Das gesamte sekundäre Gewichtseinsparpotenzial in der Subsystemgruppe mit $k(x)$ Subsystemen ohne die primär eingeleitete Maßnahme ergibt sich zu:

$$S_{G(x)}^m = \sum_{i=1}^{k(x)} R_{1.1\dots i}^m S_{1.1\dots i}^m \quad (5.13)$$

Betrachtung der Gewichte auf einer Subsystemebene

Das gesamte Gewichtseinsparpotenzial auf einer bestimmten Subsystemebene m lässt sich durch die Summation aller Einsparungen von p beteiligten Subsystemgruppen mit $k(p)$ Subsystemen bestimmen.

$$\begin{aligned}
S^m &= \sum_{i=1}^p S_{G(i)}^m = S_{G(1)}^m + \sum_{i=2}^p S_{G(i)}^m \\
&= R_{1.1\dots 1}^m \cdot P_{1.1\dots 1}^m + \sum_{j=2}^{k(1)} R_{1.1\dots j}^m S_{1.1\dots j}^m + \sum_{i=2}^p \sum_{l=1}^{k(i)} R_{1.1\dots l}^m S_{1.1\dots l}^m
\end{aligned} \tag{5.14}$$

Dementsprechend ergibt sich für das geänderte Gewicht auf der Systemebene m folgender Ausdruck mithilfe von Formel (5.11):

$$W^{m*} = \sum_{i=1}^p W_{G(i)}^{m+1*} = \frac{W_{1.1\dots 1}^{m+1}}{R_{1.1\dots 1}^{m+1}} \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^{k(p)} R_{1.1\dots j}^{m+1} (1 + S_{1.1\dots 1}^{m+1} \cdot \prod_{l=1}^{j-1} I_{1.1\dots l, 1.1\dots (l+1)}^{m+1}) \tag{5.15}$$

Die Gesamtgewichtseinsparung auf dieser Systemebene lautet daher mithilfe von Formel (5.12):

$$\Delta W^m = \sum_{i=1}^p \Delta W_{G(i)}^{m+1} = \frac{W_{1.1\dots 1}^{m+1}}{R_{1.1\dots 1}^{m+1}} \cdot S_{1.1\dots 1}^{m+1} \cdot \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^{k(p)} R_{1.1\dots j}^{m+1} \cdot \prod_{l=1}^{j-1} I_{1.1\dots l, 1.1\dots (l+1)}^{m+1} \tag{5.16}$$

Betrachtung des Gesamtsystemgewichtes

Durch die Übertragung der vorangegangenen Formeln auf die Systemebene 0 (Gesamtsystem) ergibt sich für das Gesamteinsparpotenzial mit p Subsystemgruppen auf Systemebene 1, die jeweils k(p) Subsysteme aus Ebene 2 besitzen:

$$S^0 = \sum_{i=1}^p S_{G(i)}^1 = \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^{k(i)} R_{1.1\dots j}^1 S_{1.1\dots j}^1 \tag{5.17}$$

Das neue Gesamtsystemgewicht lautet:

$$W^{0*} = \sum_{i=1}^p W_{G(i)}^{1*} = \frac{W_{1.1\dots 1}^1}{R_{1.1\dots 1}^1} \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^{k(p)} R_{1.1\dots j}^1 (1 + S_{1.1\dots 1}^1 \cdot \prod_{l=1}^{j-1} I_{1.1\dots l, 1.1\dots (l+1)}^1) \tag{5.18}$$

mit der Gesamtgewichtseinsparung von:

$$\Delta W^0 = \sum_{i=1}^p \Delta W_{G(i)}^1 = \frac{W_{1.1\dots 1}^1}{R_{1.1\dots 1}^1} \cdot S_{1.1\dots 1}^1 \cdot \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^{k(p)} R_{1.1\dots j}^1 \cdot \prod_{l=1}^{j-1} I_{1.1\dots l, 1.1\dots (l+1)}^1 \tag{5.19}$$

Wie an den oben vorgestellten Formeln (5.1) bis (5.19) zu erkennen ist, sind sowohl Gesamtsystemgewicht als auch alle anderen Gewichte innerhalb des System wesentlich von den Gewichtsanteilen, aber viel mehr noch von den eingeleiteten Primärmaßnahmen und den Gewichtsein-

flussfaktoren zwischen Teilsystemen einer Systemgruppe abhängig. Somit ist es für eine bestmögliche Lösung bezüglich eines Gesamtgewichtes sehr wichtig, die richtigen Primärmaßnahmen, die zusätzlich weitere Faktoren wie Kosten, Zeit, Herstellbarkeit usw. berücksichtigen müssen, während des Entwicklungsprozesses einzuleiten. Die Ermittlung bestmöglich geeigneter Subsysteme und die Einbindung dieser Methode in den Produktentwicklungsprozess werden in den Kapiteln 5.6.2.5 und 5.6.2.7 näher erläutert.

5.6.2.4 Durchlaufen der Systemstruktur

Durch die mathematische Beschreibung jedes einzelnen Subsystemgewichtes und der Gruppengewichte ist es wichtig, ein systematisches Durchlaufen (Abbildung 5.22) durch die gesamte Systemstruktur festzulegen. Wie in Kapitel 5.6.2.3 schon beschrieben, erfolgt zunächst die Bestimmung der Einsparpotenziale und Gewichte in der Subsystemgruppe, bei der die primären Maßnahmen eingeleitet wurde. Die berechneten Werte dieser Gruppe werden auf die nächsthöhere Systemebene übertragen und dort gegebenenfalls horizontal mit den dortigen jeweiligen Gewichtseinflussfaktoren verrechnet.

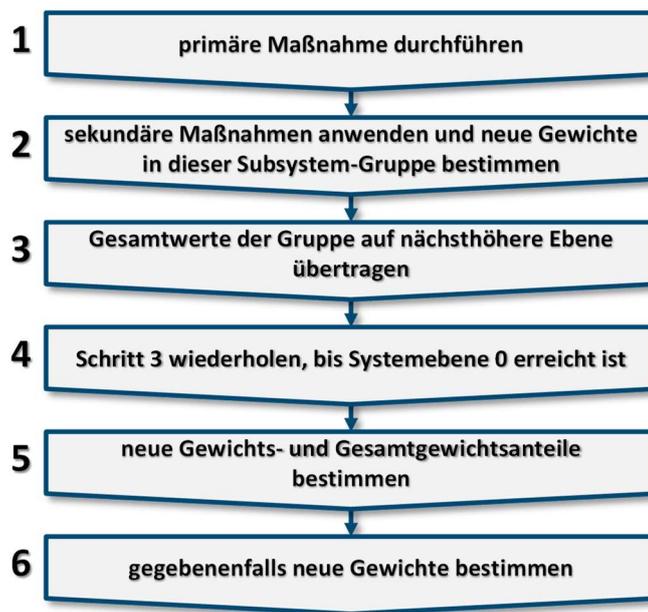


Abbildung 5.22: Detaillierte Vorgehensweise beim Durchlaufen einer Systemstruktur

Diese Vorgehensweise wird so lange durchgeführt, bis die Gesamtsystemebene erreicht ist. Daraufhin werden alle bisher nicht beteiligten Subsysteme und Subsystemgruppen berücksichtigt, indem alle Gewichtsanteile und die daraus resultierenden Gewichte neu berechnet werden. Gerade bei der Gewichtsänderung von höherrangigen Subsystemen müssen die davon ausgehenden Gewichtsanteile, also die prozentuale Gewichtsverteilung, zu den abhängigen Subsystemen

neu bestimmt werden. Die daraus entstehenden neuen Subsystemgewichte werden in diesem Zusammenhang als indirekte sekundäre Gewichtseinsparung angesehen, da diese nicht unmittelbar durch die sekundären Einsparungen betroffen sind.

5.6.2.5 Gewichtssensitivitätsanalyse

Allgemein dienen Sensitivitätsanalysen dazu, den Einfluss bestimmter Parameter und deren Unsicherheiten auf das Gesamtsystemverhalten und dessen Gesamtunsicherheit zu bestimmen [HJSS06]. In dieser Arbeit wird eine Sensitivitätsanalyse dazu verwendet, die Eignung von Subsystemen bezüglich einer Gesamtgewichtseinsparnis auf Systemebene zu ermitteln.

Die Gewichtssensitivität eines Subsystems bezieht sich auf eine beaufschlagte primäre Gewichtseinsparung, wobei die direkten und indirekten sekundären Gewichtsänderungen miteinfließen und zu einer Gesamtgewichtseinsparnis des Systems führen. Bei der Bestimmung kann auf zwei verschiedene Weisen vorgegangen werden: einerseits wird eine bestimmte Gesamtgewichtseinsparnis für das System vorgegeben, wobei vorwiegend top-down-Schritte verwendet werden, andererseits kann eine maximale Gesamtgewichtseinsparnis ermittelt werden, indem bottom-up jeweils alle für Primärmaßnahmen einsetzbaren Teilsysteme bzw. Komponenten freigesetzten Sekundärpotenziale errechnet werden.

Allgemein kann die Gewichtssensitivität $s_{x1.x2...xn}^m$ für ein beliebiges Subsystem $x1.x2 \dots xn$ auf Systemebene n als dimensionsloses Verhältnis zwischen der Gesamtersparnis und der beaufschlagten Primärsparnis für dieses Subsystem aufgefasst werden:

$$s_{x1.x2...xn}^m = \frac{S^0}{P_{x1.x2...xn}^m} = \frac{\Delta W^0}{\Delta W_{x1.x2...xn}^m} \quad (5.20)$$

Je höher dabei der Wert $s_{x1.x2...xn}^m$ ist, desto besser ist das zugehörige Teilsystem geeignet, eine maximale Gewichtseinsparnis zu ermöglichen. An der Formel (5.20) wird darüberhinaus deutlich, dass der Wert der Sensitivität gesteigert werden kann, wenn bei gleichbleibender Gesamtersparnis die Primärmaßnahme wenig Aufwand erfordert bzw. bei gleichbleibender Primärsparnis eine große Gesamtgewichtseinsparnis erzielt wird.

5.6.2.6 Komplexere Systeme

Die oben vorgestellten Formeln und Vorgehensweise können für Systeme angewendet werden, deren Systemstruktur einfach hierarchisch darstellbar ist (siehe Abbildung 5.16). Bei komplexeren Systemen ist eine Abgeschlossenheit zwischen Subsystemgruppen sowie die Begrenzung auf eine horizontale Beeinflussung nicht mehr gegeben.

Matrixdarstellung zur einfachen Übersicht

Zum besseren Verständnis und der Übersichtlichkeit halber scheint es sinnvoll, die Systemstruktur in einer Matrix, ähnlich dem Design Structure Matrix Konzept (z. B. [Stew81], [EpBr12]), abzubilden. Wie in Abbildung 5.23 an einem Beispiel zu erkennen ist, kann die Matrix für das links hierarchisch dargestellte System recht einfach hergeleitet werden, wobei die Matrix in Darstellung für die erste Systemebene lediglich eine 2x2-Matrix aufgrund zweier vorhandener Subsystemgruppen darstellt. Auf zweiter Ebene können die Subsystemgruppen weiter aufgespalten werden. Die Diagonaleinträge der Matrizen sind immer jeweils 1, die anderen Einträge repräsentieren die Gewichtseinflussfaktoren (von Zeile auf Spalte gelesen).

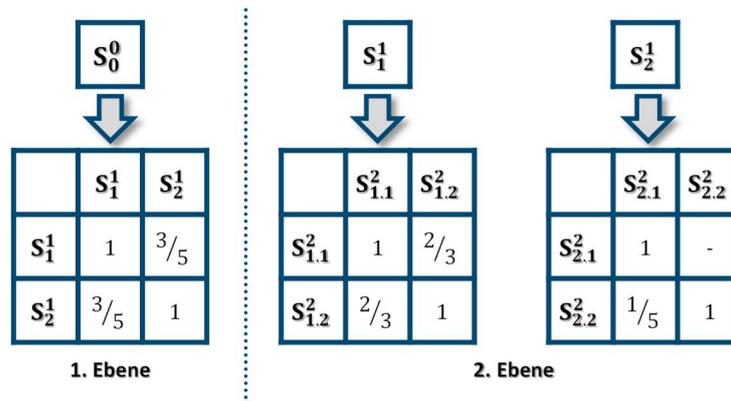


Abbildung 5.23: System in hierarchischer Struktur (links) und in Matrixdarstellung (rechts)

Allgemein ergibt sich für eine $k \cdot k$ Einzelmatrix (der Subsystemgruppen) bei k zugehörigen Subsysteme. Die Gesamtmatrix hingegen hängt von der betrachteten Systemebene und der Anzahl jeweiligen Subsysteme ab.

	S_1^1	$S_{1,1}^2$	$S_{1,2}^2$	S_2^1	$S_{2,1}^2$	$S_{2,2}^2$
S_1^1	1	$5/9$	$4/9$	$3/5$	-	-
$S_{1,1}^2$	$5/9$	1	$2/3$	-	-	-
$S_{1,2}^2$	$4/9$	$2/3$	1	-	-	-
S_2^1	$3/5$	-	-	1	$2/3$	$1/3$
$S_{2,1}^2$	-	-	-	$2/3$	1	-
$S_{2,2}^2$	-	-	-	$1/3$	$1/5$	1

Abbildung 5.24: Vollständige Matrix-Darstellung mit Gewichtsanteile und Gewichtseinflussfaktoren

Werden die dargestellten Subsystemgruppen mit den Gewichtseinflussfaktoren und den vom Gesamtsystem verantwortlichen Gewichtsanteilen (in grau dargestellt) zusammengefasst, kann

diese Matrix erstellt werden, die alle Faktoren beschreibt (siehe Abbildung 5.24). Die mit „-“ gekennzeichneten Felder können dabei als Gewichtseinflussfaktoren zwischen Subsystemen unterschiedlicher Subsystemgruppen und Systemebene verwendet werden. Die Vorgehensweise beim Berechnen der Gewichtsänderung der Systemstruktur bleibt von der Matrix-Darstellung unberührt.

Handeln bei mehreren Ausgängen

Eine weitere Eigenschaft komplexerer, realitätsnaher Systeme stellt die unbeschränkte Anzahl von horizontalen Querverbindungen, also der Gewichtseinflussfaktoren, dar. Beispielhaft ist ein solches System in Abbildung 5.25 abgebildet. So kann ein Subsystem mehrere Ausgänge haben, z. B. Subsystem 1, oder mehrere Eingänge, z. B. Subsystem 4.

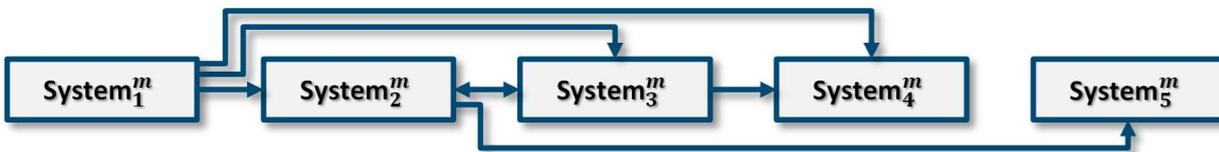


Abbildung 5.25: Systemstruktur mit mehreren Ausgängen

Die Anzahl der Eingänge charakterisiert das Subsystem, wohingegen die Anzahl der Ausgänge irrelevant für die Berechnung der Gewichtsänderungen im Gesamtzusammenhang ist. Der Grad eines Subsystems gibt die Anzahl der Eingänge, also die auf dieses Subsystem wirkenden Gewichtseinflussfaktoren, an, vgl. dazu Tabelle 5.3.

Tabelle 5.3: Subsysteme mit mehreren Gewichtseinflussfaktoren

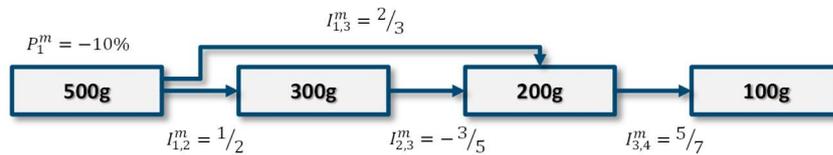
Grad des Subsystems	mathematische Beschreibung	graphische Darstellung
0	$S_n^m = P_n^m$ oder $S_n^m = 0$	
1	$S_n^m = \left(S_1^m \prod_{i=1}^{n-1} I_{i,i+1}^m \right)$	
2	$S_n^m = \sum_{j=1}^2 \left(S_1^m \prod_{i=1}^{n-1} I_{i,i+1}^m \right)_j$	
3	$S_n^m = \sum_{j=1}^3 \left(S_1^m \prod_{i=1}^{n-1} I_{i,i+1}^m \right)_j$	
...

Durch die Möglichkeit, Teilsystemen mehrere Eingänge zuzuordnen, ist die Vorgehensweise bei der Berechnung, nicht mehr einfach darstellbar, da mehrere Optimierungswege möglich sind.

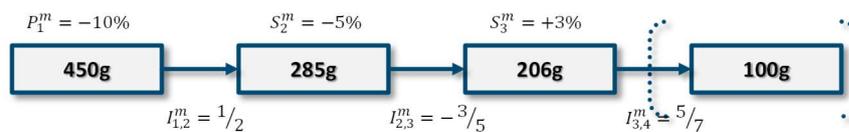
Vergleichsmöglichkeiten beim Durchlaufen verschiedener Optimierungswege

Wie oben beschrieben, ist bei der Darstellung mit mehreren Eingängen eines Subsystems der Berechnungsvorgang anzupassen. Durch mehrere Optimierungswege ergeben sich Zirkelschlüsse sowie Zielkonflikte, wie beispielhaft Abbildung 5.26 zeigt.

Ausgangssituation:



Weg 1:



Weg 2:

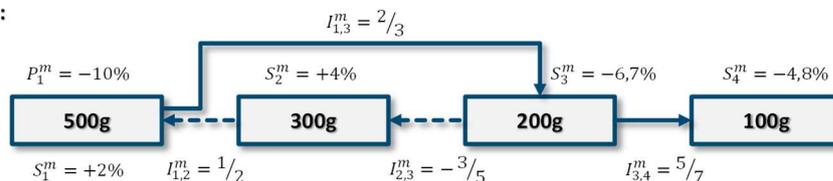


Abbildung 5.26: Zielkonflikte und Zirkelschlüsse bei komplexen Systemen (oben: Ausgangssituation, mittig: Optimierungsweg 1, unten: Optimierungsweg 2)

Wie schon aus obiger Abbildung ersichtlich ist, gestaltet sich die Definition der verschiedenen Optimierungswege durch die Konvention, dass das Subsystem mit mehreren Eingängen (hier Subsystem 3) in jedem Optimierungsweg nur einen der angedachten Eingänge bekommt und desweiteren die Pfeilarten zu den übrigen Subsystemen bestimmt. Durch diese Szenariotechnik ([GaSW07], [ScLD09]) können die jeweiligen sekundären Einsparungen ermittelt werden. Das Szenario mit der größeren Einsparung ist für den weiteren Berechnungsvorgang auszuwählen. Generell ist die Szenariotechnik wie folgt aufgebaut: eingehende Analyse der Einflussfaktoren und der Schlüsselfaktoren, Prognostik bei unterschiedlichen Schlüsselfaktoren, Bildung des Szenarios mit Ermittlung der Zukunftsbilder. Übertragen auf den Ansatz der sekundären Gewichtsoptimierung in dieser Arbeit beschreibt die Analyse die vollständige Bestimmung der Gewichtseinflussfaktoren und des technischen Systems, die Prognostik durchläuft die unterschiedlichen Wege bei der Berücksichtigung der Gewichtseinflussfaktoren als Schlüsselfaktoren und ermittelt darauf aufbauend die mögliche Gesamtgewichtsänderung des Systems.

Zeitlich veränderliche Gewichtseinflussfaktoren

Bisher sind bei der Anwendung der Methoden der sekundären Gewichtseinsparung nur zeitlich konstante Gewichtseinflussfaktoren betrachtet worden. In der Realität kann es allerdings vorkommen, dass diese Gewichtseinflussfaktoren über die Zeit variieren. Ursächlich dafür ist z. B. das unterschiedliche Verhalten des Systems zu bestimmten Zeiten t , was dadurch begründet werden kann, dass nicht jede Funktion zu jeder Zeit zur Gesamtfunktion beiträgt.

Grundsätzlich hat diese zeitliche Veränderbarkeit keinen Einfluss auf die Berechnungsmethoden und -schritte. Sinnvoll ist es aber, das System für verschiedene Zeitpunkte t zu berechnen, um einen Überblick über den Gesamtsystemwert zu gewährleisten. So kann mit diesen Werten zu diskreten Zeiten ein Gesamtsystemverhalten beschrieben werden.

5.6.2.7 Einordnung im Entwicklungsprozess

Die Bestimmung von sekundären Gewichtseinsparpotenzialen soll während des gesamten Entwicklungsprozesses auf der Abstraktionsebene der Baustruktur erfolgen. In dieser Abhandlung liegt der Fokus auf den späten Phasen. Dabei ist zu unterscheiden, dass im Bereich der Systemanalyse bzw. Systemdekomposition (vom Gesamtsystem bis zu den Komponenten) eher Anzeichen und Rückschlüsse auf primäre Maßnahmen zu erkennen und zu ziehen sind. Sekundäre Einsparungen werden erst bei der Integration von Primärmaßnahmen, die ja bekannterweise zum größten Teil an Komponenten durchgeführt werden, in einen Systemzusammenhang erkennbar (siehe Abbildung 5.27).

Allerdings ermöglichen dann diese Sekundärpotenziale mögliche Rückschlüsse auf System- bzw. Subsystemkonzept, so dass ein Rückspringen zum Top-Down-Bereich und damit eine Änderung des System-/Subsystem-Konzepts möglich sind. Desweiteren können unmittelbar vorangegangene Entwicklungsschritte neu überdacht werden.

Dieses Vorgehen spiegelt im Allgemeinen den Prozess bei der Berechnung der sekundären Einsparpotenziale wider. Das abwechselnde Top-Down-/Bottom-Up-Vorgehen ermöglicht die Betrachtung von Auswirkungen von primären Maßnahmen auf Komponenten/Subsysteme desselben Systemlevels, der übergeordneten sowie untergeordneten Systemlevel.

Durchgehend begleitet wird dieser Prozess durch die Mikro-Analyse- und Entscheidungspunkte, die einerseits zur Bestimmung von sekundären Auswirkungen als auch andererseits als fester Punkt zur Entscheidung für das Einleiten weiterer Maßnahmen dienen.

X-Kriterien ein erhebliches Problem dar. Der vorgestellte Ansatz der sekundären Gewichtsänderungen kann dadurch auf mehrere X-Kriterien erweitert werden, indem nicht nur noch eindimensionale Werte betrachtet werden, sondern mehrdimensionale Werte in Vektor- und Matrixform berücksichtigt werden. Dadurch kann die sekundäre Gesamtänderung bei mehreren zu betrachtenden X-Kriterien bestimmt werden.

5.6.2.10 Zusammenfassung

Der vorgestellte mathematische Ansatz zur Bestimmung sekundärer Gewichtsänderungen zeigt großes Potenzial für eine systematische und systemische Gewichtsoptimierung. Durch das abwechselnde Top-Down-/Bottom-Up-Vorgehen werden sowohl Analyse- als auch Syntheseschritte systematisch betrachtet. Systemisch erfolgt durch die Einführung der Gewichtsanteile und der Gewichtseinflussfaktoren eine Betrachtung des Gesamtsystems über alle Systemebenen. Der Ansatz dient als Grundstein für eine Ausweitung auf andere Abstraktionsebenen sowie für die Berücksichtigung weiterer X-Kriterien.

5.7 Gewichtseigenschaften während des Entwicklungsprozesses

5.7.1 Gewichtseigenschaften

Wie in den vorhergehenden Kapiteln schon erläutert, ist eine durchgängige Betrachtung von Gewichtseigenschaften während des Entwicklungsprozesses sinnvoll, um alle Potenziale für eine Gewichtsoptimierung ausschöpfen zu können. Der Tunnel-Effekt, wie er bereits in Abbildung 3.19 abgebildet ist, bezeichnet die Entwicklung der Gewichtseigenschaften über den Entwicklungsprozess, beginnend mit einem sehr vagen Datenstand (Schätzung der gewichtsrelevanten Eigenschaften aus der Erfahrung oder von Vorgängerprodukten) bis hin zu einem sehr detaillierten Datenstatus (exaktes Messen, z. B. Wiegen des Produktes oder Bestimmen des Schwerpunktes auf Gleichgewichtswaagen). Dabei nähern sich die gewichtsrelevanten Werte (Gewicht, Schwerpunkt, ...) im Laufe der Entwicklung immer mehr dem in der Definitionsphase gesetzten Zielwert an. Umgekehrt proportional verhält sich dabei die Möglichkeit der Einflussnahme, wo gerade in den frühen Phasen des Entwicklungsprozesses eine signifikante Einflussmöglichkeit auf alle gewichtsrelevanten Produkteigenschaften besteht.

5.7.2 Gewichtsrelevanz

Aufgrund der unterschiedlichen Bestimmung von gewichtsrelevanten Eigenschaften in den verschiedenen Entwicklungsphasen (z. B. Schätzen, Berechnen, Wiegen, etc.) und der damit verbundenen unterschiedlichen Eigenschaftsart (vgl. Abbildung 3.19) ist eine Angabe einer einzigen Kennzahl für die Ausschöpfung der Optimierungspotenziale nicht möglich.

Es wird daher ein Gewichtsrelevanzwert für jede Abstraktionsebene festgelegt, die unabhängig von bestimmten Gewichtswerten (wie Gesamtgewicht oder Schwerpunktlage) sind. Genutzt werden dabei die im Laufe des oben beschriebenen Entwicklungsprozesses bestimmten Werte, die indirekt Einfluss auf die gewichtsrelevanten Eigenschaften des zu entwickelnden Produkts besitzen. Somit können verschiedene Lösungen für eine Entwicklungsaufgabe, die für jede Abstraktionsebene erarbeitet werden, miteinander verglichen werden.

5.7.2.1 Gewichtsrelevanz der Anforderungen

Basierend auf der Abhandlung von McLellan [McLe10] wird ein Gewichtsrelevanzwert auf der Abstraktionsebene der Anforderungen wie folgt definiert:

Der Gewichtsrelevanzwert der Anforderungen ergibt sich dem Zusammenhang zwischen der Anzahl der schwach vernetzten, gewichtsintensiven Anforderungen und der Gesamtanzahl der Anforderungen.

$$G_R = \frac{n_{R^*}}{n_R} \quad (5.21)$$

Das bedeutet, dass je höher das Verhältnis aus gewichtsintensiven, schwach vernetzten Anforderungen zur Gesamtanzahl der Anforderungen ist, desto einfacher kann eine Gewichtsoptimierung im späteren Entwicklungsprozess erfolgen.

5.7.2.2 Gewichtsrelevanz von Funktionen

Der Gewichtsrelevanzwert auf Funktionsebene wird aus der Gesamtanzahl der (realisierbaren) Funktionen, die nötig sind zur Erfüllung der Gesamtfunktion, und dem Anteil an Stoffflüssen am Gesamtumsatz abgeleitet.

Der Gewichtsrelevanzwert der Funktionsstruktur ergibt sich aus der benötigten Anzahl der (realisierbaren) Funktionen zur Erfüllung der Gesamtfunktion und dem Anteil an Stoffflüssen am Gesamtumsatz.

$$G_F = \frac{1}{n_F} \cdot \left(1 - \frac{n_{MF}}{n_{Flow}} \right) \quad (5.22)$$

Entsprechend der Formel und der Definition kann eine Funktionsstruktur als stärker gewichtsrelevant, also als gewichtsoptimierter angesehen werden, wenn sowohl Anzahl der zur Erfüllung der Gesamtfunktion benötigten Funktionen als auch Anteil des Stoffflusses am Gesamtumsatz gering ist.

5.7.2.3 Gewichtsrelevanz von Wirkprinzipien und der prinzipiellen Lösung

Wie in Kapitel 5.6.1 beschrieben, erfolgt eine Auswahl von Wirkprinzipien bzw. einer prinzipiellen Lösung nach dem Gewichtsrelevanzwert für Wirkstrukturen, der sich aus der technischen Funktionswichtigkeit (siehe dazu Kapitel 5.6.1.4) und der Gewichtsrangfolge der Wirkprinzipien ergibt.

Der Gewichtsrelevanzwert für eine Wirkstruktur ergibt sich aus dem Umkehrwert der Summe der Gewichtsrelevanzwerte für jedes ausgewählte Wirkprinzip.

$$G_L = \frac{1}{\sum_i G_{L,i}} \quad (5.23)$$

Hier gilt für den Gewichtsrelevanzwert für ein einzelnes ausgewähltes Wirkprinzip:

$$G_{L,i} = i_{TF,i} \cdot g_{L,i} \quad (5.24)$$

Eine Wirkstruktur kann im Vergleich zu einer anderen Wirkstruktur somit also als besser bezüglich einer Gewichtsoptimierung angesehen werden, wenn die Kombination aus den ausgewählten Wirkprinzipien zu einer Wirkstruktur bei hoher technischer Funktionswichtigkeit ein geringes Realisierungsgewicht aufweist.

5.7.2.4 Gewichtsrelevanz auf physikalischer Ebene

Die Gewichtsrelevanz auf der Baustrukturebene setzt sich einerseits aus der von [Namo10] entwickelten Methode der trägen Komponenten und der in Kapitel 5.6.2.5 vorgestellten Methode der sekundären Einsparungen zusammen.

Die Gewichtsrelevanz einer Baustruktur ergibt sich aus dem Zusammenhang zwischen der Anzahl der trägen Komponenten und dem Anteil der Gesamtgewichtseinsparnis durch sekundäre Effekte am Gesamtgewicht eines technischen Systems.

Somit ist eine Baustruktur mit wenigen trägen Komponenten und hohem Sekundäreffekt besser für eine Gewichtsoptimierung geeignet.

$$G_P = \frac{1}{n_{LP}} \cdot \frac{\Delta W^0}{W^0} \quad (5.25)$$

5.7.2.5 Gesamtgewichtsrelevanz

Die Zusammenfassung der vorgenannten Gewichtsrelevanzwerte auf allen Abstraktionsebenen zu einem Gesamtgewichtsrelevanzwert führt zu keinem sinnvollen und plausiblen Ergebnis. Vielmehr sollen die Werte dazu dienen, auf den unterschiedlichen Abstraktionsebenen Vergleiche durchführen zu können, um unterschiedliche Ergebnisse miteinander vergleichen zu können. Letztendlich sollen diese Werte nur als Hinweis darauf verstanden werden, welche Gewichts Optimierungspotenziale durch unterschiedlich abstrakte Maßnahmen freigegeben können. Abbildung 5.28 zeigt die Zuordnung der Gewichtsrelevanzwerte zu den Phasen im Entwicklungsprozess.

5.7.2.6 Gewichtsrelevanzwerte in Hinblick auf mechatronische Systeme

Werden die eben vorgestellten Gewichtsrelevanzwerte im Zusammenhang mit mechatronischen Systemen betrachtet, kann folgendes festgestellt werden: Vor allem der Gewichtsrelevanzwert für Funktionen kann bei mechatronischen Systemen um ein Vielfaches höher liegen als bei mechanischen Systemen aufgrund der möglichen geringeren Anzahl an benötigten Funktionen bei gleichbleibender Funktionalität. Darüberhinaus ist der Anteil an Materialflüssen in mechatronischen Systemen generell geringer als in mechanischen Systemen.

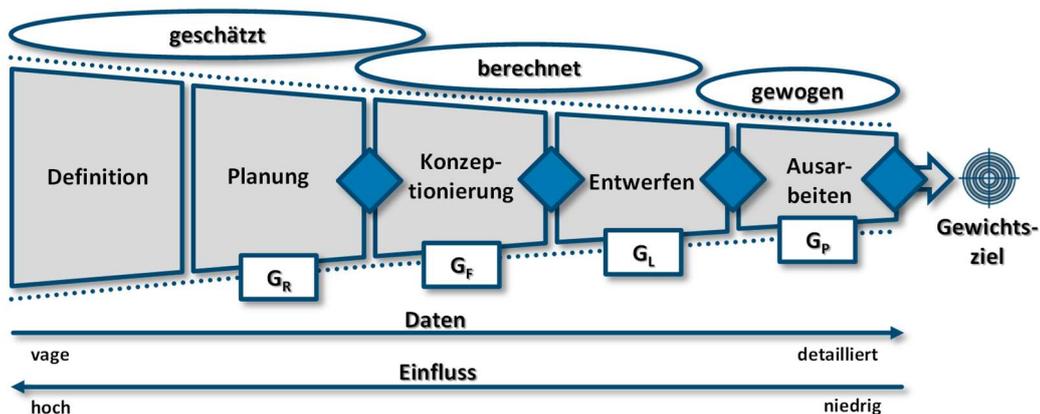


Abbildung 5.28: Gewichtsrelevanzwerte im Entwicklungsprozess

5.8 Technologien und Wissen

Als zweite Sichtweise der Methodik für die Gewichtsoptimierung mechatronischer Produkte wird die Gewichtsoptimierung durch den Einsatz mechatronischer Konzepte und Lösungen angesehen. Hierbei wird in dieser Abhandlung ein Konstruktionskatalog vorgestellt, der als expliziter

Wissenspeicher mit mechatronischen Konzepten und Technologien, die geeignet für eine Gewichtsoptimierung in einem technischen System sind, dienen soll.

5.8.1 Allgemeine Struktur von Konstruktionskatalogen

Konstruktionskataloge sind in der Produktentwicklung weit verbreitet und gerade beim methodischen Konstruieren erforderlich [VDI2222]. Sie stellen eine Quelle von Wissen und Informationen dar, die die Ingenieure bei Entwicklungstätigkeiten, vor allem der Beschaffung von Wissen, unterstützen sollen.

Je nach Anwendungsgebiet werden sie in Objekt-, Operations- und Lösungskataloge unterteilt (siehe [VDI2222], [Roth00a], [Roth00b]). Objektkataloge beschreiben, unabhängig von der Konstruktionsaufgabe, allgemeinen Sachverhalte mit physikalischen, geometrischen, technologischen und stofflichen Inhalten. Operationskataloge geben Regeln für Verfahren und Verfahrensschritte an, die im Rahmen des methodischen Konstruierens von großem Interesse sind. Im Gegensatz dazu ordnen Lösungskataloge bestimmten Funktionen und Aufgaben Lösungen zu.

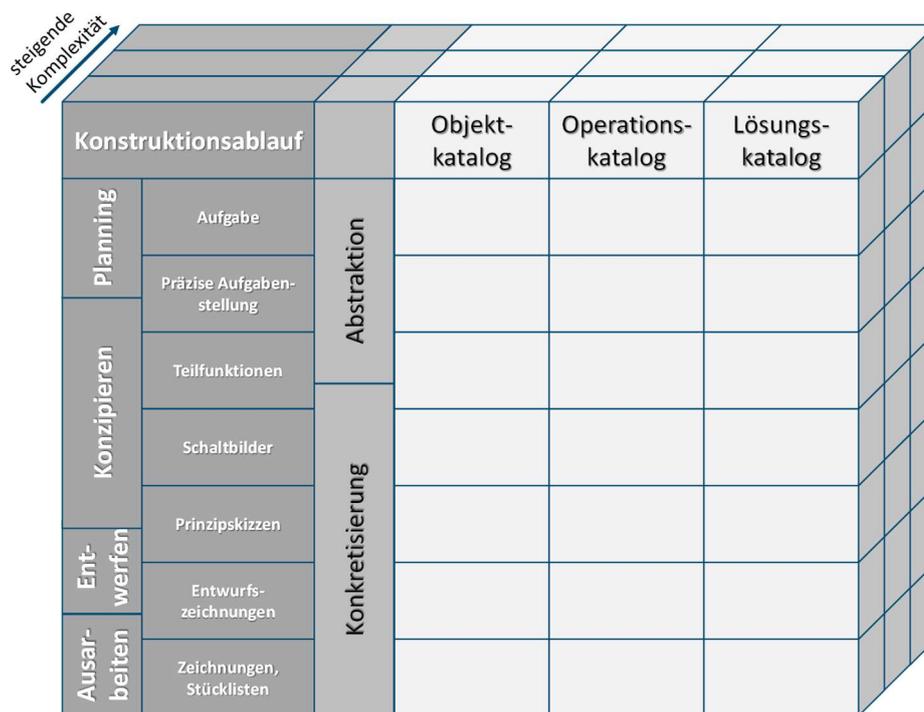


Abbildung 5.29: Das System der Kataloge (nach [VDI2222])

Die VDI-Richtlinie 2222 [VDI2222] beschreibt Konstruktionskataloge als dreidimensionales System, das aus drei verschiedenen Aspekten besteht: Gliederung nach Komplexität und Abstraktion, Gliederung nach Konstruktionsphase und Gliederung nach Konstruktionsaufgabe, wie auch Abbildung 5.29 verdeutlicht.

Ein Konstruktionskatalog ist nach [Roth00b] in vier Abschnitte unterteilt: Strukturteil, Hauptteil, Zugriffsteil sowie Anmerkungen und Anhang. Die ersten drei Abschnitte dienen vor allem dazu, gezielt eine Lösung zu finden, wohingegen der Anmerkungssteil die Lösungen genauestens spezifiziert. Diese Spezifikation ist wichtig für die Anpassung der gefundenen Lösung an das Entwicklungsproblem.

Diese Tabellen erlauben einen genauen Zugriff zu den Inhalten, die Lösungen auf unterschiedlichen Abstraktionsebenen für das Konstruktionsproblem, was immer Startpunkt für die Anwendung eines Konstruktionskataloges ist, darstellen. Im Vergleich zu anderen Wissensspeichern bieten Konstruktionskataloge den Vorteil, dass sie bekannte und geprüfte Lösungen bereitstellen. Aufgrund der Bereitstellung von Lösungen auf verschiedenen Abstraktionsebenen beinhalten Konstruktionskataloge physikalische Effekte, Wirkprinzipien, prinzipielle Lösungen und Komponenten wie z. B. Maschinenelemente und Standardkomponenten.

In Bezug auf den Konstruktionsprozess wird in [PBF07] festgestellt, dass Konstruktionskataloge einen schnellen, problemorientierten Zugriff zu gesammelten Daten, einem Spektrum an möglichen Lösungen, ein größtmögliche Anzahl an interdisziplinären Anwendungen und Informationen für konventionelle Entwicklungsvorgänge und rechnergestützte Methode ermöglichen.

5.8.2 Konstruktionskatalog mit mechatronischen Leichtbaulösungen

Wie oben beschrieben, stellen Konstruktionskataloge eine Möglichkeit dar, bereits bekannte Lösungen für technische Probleme bereit zu stellen und damit als Wissensspeicher zu dienen. Leichtbau allgemein als Konstruktionsphilosophie kann als impliziter Wissensspeicher angesehen werden, der durch einen Analyse-/Syntheseschritt die Leichtbaustrategien und -methoden in einen expliziten, zugänglichen expliziten Wissensspeicher überführt werden kann.

5.8.2.1 Aufbau des Konstruktionskataloges

Der hier vorgestellte Katalog auf Grundlage von [LuSV13] und [LuSV14] ist ein Lösungskatalog, der mechatronische Konzepte, die für eine Gewichtsoptimierung geeignet sind, dem Entwickler bzw. Konstrukteur während des Entwicklungsprozesses zur Verfügung stellt. Dabei werden Lösungen vorgeschlagen, die die Abstraktionsebenen der Funktionen, Wirkprinzipien und der Baustruktur betreffen.

Ausgehend von einer Problemstellung oder einer Aufgabenstellung – wobei die entsprechende Funktion durch mechatronische Konzepte mit Gewichtsoptimierungspotenzial erfüllt werden soll – erfolgt eine schrittweise Detaillierung innerhalb des Kataloges. Der Katalog stellt also einen

Ansatz für die Strukturierung und Charakterisierung mechatronischer Konzepte mit dem Fokus der Gewichtsoptimierung dar. Es bleibt festzuhalten, dass der Katalog keinen Anspruch auf Vollständigkeit vertritt. Er dient vielmehr als Unterstützung bei der Lösungssuche und muss ständig aktualisiert werden.

Analog zu [Roth00b] ist der Katalog wie folgt aufgebaut (siehe dazu Abbildung 5.30):

- **Strukturteil:** Der Strukturteil hat die Aufgabe einer konsistenten Unterteilung des Kataloginhalts. Hier erfolgt einerseits eine Auswahl, ob eine Neukonstruktion oder eine Änderungskonstruktion angestrebt wird, und andererseits, welche Abstraktionsebene des Entwicklungsprozesses angesprochen wird (Funktions-, Prinzip- oder Bauebene).
- **Hauptteil:** Der Hauptteil stellt die generellen Lösungen zusammen, die unterteilt werden können in die Art der Einbindung der mechatronischen Lösungskonzepte (z. B. Addition eines mechatronischen Konzeptes, Substitution durch ein mechatronisches Konzept, ...), der Typ der Gewichtsoptimierung (umliegende Komponenten, Komponente selbst, ...) und in die allgemeinen mechatronischen Funktionen und Konzepte.
- **Zugriffsteil:** Aufbauend auf der Klassifizierung der beiden oben genannten Katalogteile werden im Zugriffsteil die Lösungssets (z. B. mechatronische Funktion, mechatronische Einheit, mechatronische Baugruppe, ...) und anschließend die expliziten Lösungen und ihre Anwendungsmöglichkeiten bereitgestellt.
- **Anmerkungsteil:** Der Anmerkungsteil spezifiziert die ausgewählten Lösungen nach gewissen, festgelegten Kriterien. Hierbei sind vor allem die Schnittstellen zu anderen Komponenten oder Baugruppen, die Versorgung der neuen Lösungen (z. B. Energiebereitstellung, Datenverarbeitung, ...), der entscheidende Wert der Gewichtsverbesserung sowie damit einhergehende Zielkonflikte (z. B. Kosten, Funktionalität, Performance, ...).

Im Allgemeinen ist die Auswahl einer mechatronischen Lösung durch den Vergleich der im Anmerkungsteil gegebenen Werte und Aspekte zu treffen. Entscheidend und ausschlaggebend hier ist vor allem die Berücksichtigung der Zielkonflikte, die mit einer Gewichtsverbesserung einhergehen. Daher ist zusätzlich eine Kosten-Nutzen-Analyse oder – bei Vernachlässigung von Kosten – Funktionalität-Nutzen-Analyse zur Auswahl der bestmöglichen Lösung durchzuführen. Darüberhinaus ist gerade bei mechatronischen Konzepten das Integrationspotenzial in das übergeordnete System nicht zu vernachlässigen, da die Einbindung oft eine Neu- oder Umkonzeptionierung des Systems erfordert.

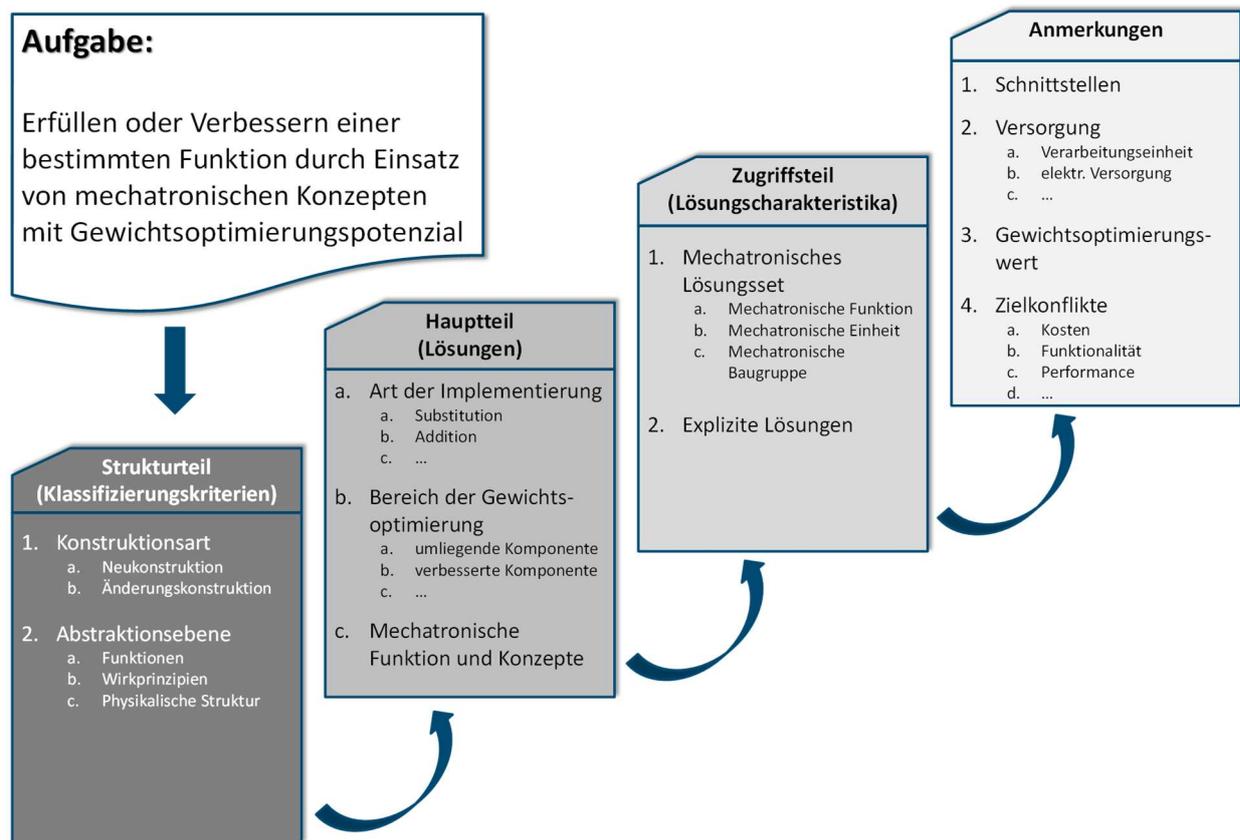


Abbildung 5.30: Aufbau und Prozedur des Zugriffs des Konstruktionskataloges (vgl. [LuSV14])

5.8.2.2 Vorgehensweise bei der Erstellung des Konstruktionskataloges

Die Vorgehensweise bei der Erstellung des Konstruktionskataloges für mechatronische Konzepte, die für eine Gewichtsoptimierung (Gewichtsreduzierung, -verteilung, Änderung der Schwerpunktlage) geeignet sind, erfolgt meist auf der Grundlage von neu gefundenen Lösungen, die im Zugriffsteil gespeichert werden und mit Lösungscharakteristika beschrieben werden können. Aufbauend darauf muss die Lösungen einerseits abstrahiert werden, um Struktur- und Hauptteil befüllen zu können, und andererseits detailliert werden, um die Anmerkungen möglichst ausführlich beschreiben zu können.

Beispielhaft sind in [LuSV13] sowie [LuSV14] mehrere Lösungen aufgeführt, die den Prozess der Befüllung des Konstruktionskataloges beschreiben. Das Beispiel einer Formgedächtnislegierung soll diesen Prozess verdeutlichen: Die FGL für die Bewegung und den Verschleißmechanismus eines Tankdeckels [LaCz11] kann durch die Integration mehrerer Funktionen ein Gewicht von 90% verglichen mit einem herkömmlichen Mechanismus einsparen. Somit stellt die FGL eine explizite Lösung im Zugriffsteil dar, die ihre mögliche Gewichtsersparnis im Anmerkungsteil beschreibt. Ausgehend davon erfolgt eine Beschreibung der expliziten Lösung (FGL besteht aus einer Titan-Nickel-Legierung) sowie weiterer Anmerkungen (zusätzliche Erzeugung thermischer

Energie zur Rückstellung der FGL, höhere Kosten, etc.). Abstrahiert betrachtet kann die Lösung dem mechatronischen Lösungsset der Adaptronik zugeordnet werden. Der Hauptteil gestaltet sich in der Art, dass die mechatronische Funktion durch Funktionsintegration und die Gewichts-optimierung an den betrachteten Komponenten (Tankdeckel) realisiert wird. Die Art des Implementierens erfolgt durch Substituierung (mechanischer Mechanismus wird durch mechatronischen Mechanismus ersetzt). Im Strukturteil wird diese Lösungsmöglichkeit der Abstraktionsbereich der Funktionen und der Wirkprinzipien sowie einer Änderungskonstruktion als Art der Konstruktion zugeordnet. Die Einteilung in Funktions- und Prinzipiebene ergibt sich einerseits aus der Verschmelzung von mehreren Funktionen zu einer einzigen sowie durch die Realisierung dieser Funktion durch Wirkprinzipien.

5.8.2.3 Zugriff auf den Konstruktionskatalog an einem Beispiel

Als Beispiel für die Anwendung des vorgestellten Konstruktionskataloges dient ein steer-by-wire-System (siehe Abbildung 5.31).

Bei einer Änderungskonstruktion soll die Funktion „Lenken eines Automobils“, die bisher mechanisch per Lenksäule ausgeführt ist, ersetzt werden durch ein nicht-(rein)mechanisches Konzept.

Strukturteil (Klassifizierungskriterien)		Hauptteil (Lösungen)			Zugriffsteil (Lösungscharakteristika)			Anmerkungen		
Konstruktionsart	Abstraktions-ebene	Art der Implementierung	Bereich der Gewichts-optimierung	Mechatron. Funktionen und Konzepte	Mechatron. Lösungsset	Explizite Lösungen	Lösungs-beschreibg	Wert der Gewichts-optimierung	Zielkonflikte	Versorgung
Änderungs-konstruktion	funktional	Substitution	Komponente	Funktions-integration	x-by-wire	steer-by-wire	TiNi alloy	ca. 50%	Kosten, zusätzliche E-Motoren	Elektr. Versorgung
			umliegende Komponente	...	...	...	...	...	...	...
		
	prinzipiell	Addition	...	...	...	...	...	...	...	...
		
		
		
physikalisch	...	...	...	...	...	...	...	...	...
	
	
Neu-konstruktion	funktional	...	...	...	...	...	...	...	...
	prinzipiell	...	...	...	...	...	...	...	...
	physikalisch	...	...	...	...	...	...	...	...

Abbildung 5.31: Beispielhafter Aufbau des Konstruktionskataloges

Dabei bietet sich die Möglichkeit, das gesamte Subsystem für die Funktion „Lenken“ zu betrachten, wobei die Lösung durch eine Teilsubstitution mechanischer Komponenten erzielt wird: Die

Übertragung des mechanischen Drehmoments durch die Lenksäule erfolgt dabei durch eine Wandlung in elektrische Energie, die Übertragung per Signalkabel und die Rückwandlung in mechanische Energie. Dabei werden verschiedene Sensoren und Motoren eingesetzt. Als mechatronisches Lösungsset bietet sich das x-by-wire-Konzept an, wobei als explizite Lösung steer-by-wire ausgewählt wird. Durchschnittlich können durch die Substitution ca. 50 % an Gewicht im Vergleich zur mechanischen Lösung eingespart werden, wobei allerdings zusätzliches Gewicht durch Elektromotoren und Sensoren aufgeschlagen werden muss. Darüberhinaus muss beachtet werden, dass zusätzlich eine Energieversorgung der elektronischen Bauteile gewährleistet werden muss, was weitere Kosten und zusätzliches Gewicht nach sich zieht.

5.8.3 Integration von Konstruktionskatalogen in den Entwicklungsprozess

Die Integration von Konstruktionskatalogen in einen allgemeinen Entwicklungsprozess kann in allen Entwicklungsphasen, beginnend bei der Anforderungserhebung bis hin zum Ausarbeiten eines physikalischen Systems, erfolgen ([Roth00a], [Roth00b]). Dabei werden vor allem die Syntheseschritte während der Entwicklungsphasen unterstützt, wobei Teillösungen für ein Entwicklungsproblem zu einer Gesamtlösung aggregiert werden. So kann die Anwendung von Konstruktionskatalogen die Entwicklungszeit beeinflussen, indem gewisse Entwicklungsschritte für Lösungsfindung verkürzt oder sogar übersprungen werden können. Damit kann die Entwicklungszeit minimiert werden.

Bei dem in dieser Arbeit vorgestellten Konstruktionskatalog aus mechatronischen Konzepten und Technologien mit dem Ziel einer Gewichtsoptimierung müssen vor allem die unterschiedlichen System- und Abstraktionsebenen betrachtet werden, die ja im Vergleich zur mechanischen Entwicklung aufgrund der Komplexität mechatronischer Systeme stärker im Fokus stehen.

Ein bekanntes mechatronisches Konzept aus dem Katalog kann auf der einen Seite als Lösung für ein bestimmtes Subsystem, abgeleitet aus der Systemdekomposition, dienen (Subsystem-Ebene, physikalische Abstraktionsebene) und andererseits kann eine einzige mechatronische Funktion mehrere andere Funktionen mechatronischer, mechanischer oder elektronischer Art gleichzeitig ersetzen (Komponenten-Ebene, funktionelle Abstraktionsebene). Somit kann eine Verkürzung der Entwicklungszeit erwirkt werden, immer wenn eine Lösungssammlung im Einsatz ist, da gewisse Entwicklungsschritte übersprungen werden können.

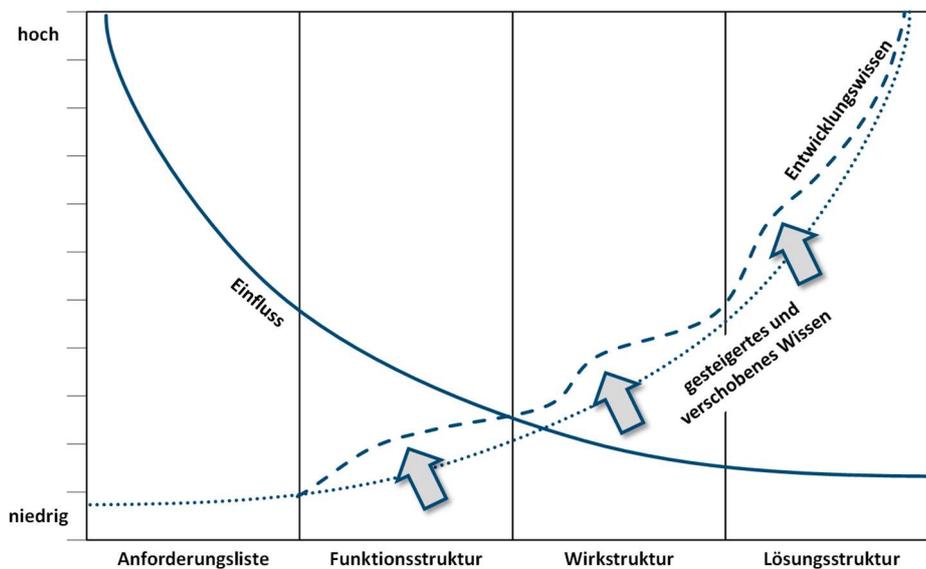


Abbildung 5.33: Vorteile beim Einsatz von Konstruktionskatalogen (ähnlich zu [LuSV14])

5.9 Werkzeuge und Tools

Werkzeuge und Tools dienen dazu, die Anwendung von Strategien und Methoden zu unterstützen. Oftmals ist eine simple Anwendung von Methoden aufgrund der Komplexität der Methoden selbst oder des zu betrachtenden bzw. zu entwickelnden System sowie einer großen Menge an Informationen nicht mehr ohne weitere technische oder computergestützte Unterstützung möglich.

Im Zuge dieser Ausarbeitung sind zwei Software-Tools entwickelt worden: zum Einen zur Unterstützung bei der Bestimmung der sekundären Gewichtsänderungen, zum Anderen bei der durchgängigen Betrachtung von Gewichtseigenschaften während des Entwicklungsprozess inklusive der Bestimmung von Gewichtsrelevanzwerten. Desweiteren steht ein Tool bereit, das den Zugriff auf den Konstruktionskatalog mit mechatronischen Konzepten und Lösungen, die für eine Gewichtsoptimierung geeignet sind, vereinfacht.

5.9.1 Software-Tool zur Bestimmung sekundärer Effekte

Aufgrund des komplexen Charakters der Fortpflanzung von Änderungen bei Gewichtseigenschaften innerhalb eines betrachteten Systems ist ein Software-Tool erstellt worden, das die in Kapitel 5.6.2 vorgestellte Methode der sekundären Gewichtsänderungen abbilden kann.

Bei Eingabe einer primären Maßnahme an einem Subsystem bzw. einer Komponente können alle möglichen sekundären Auswirkungen sowohl in Top-Down- als auch Bottom-Up-Vorgehensweise abgebildet. Voraussetzung für die Anwendung und Durchführung des Software-Programms ist die Hinterlegung der Systemstruktur, der absoluten Gewichte jedes Systemelement sowie der

Gewichtseinflussfaktoren inklusive der Beeinflussungsrichtung über eine Eingabemaske. Die Systemstruktur sowie die zur primären Maßnahme geeigneten Systemelemente werden graphisch dargestellt (siehe Abbildung 5.34).

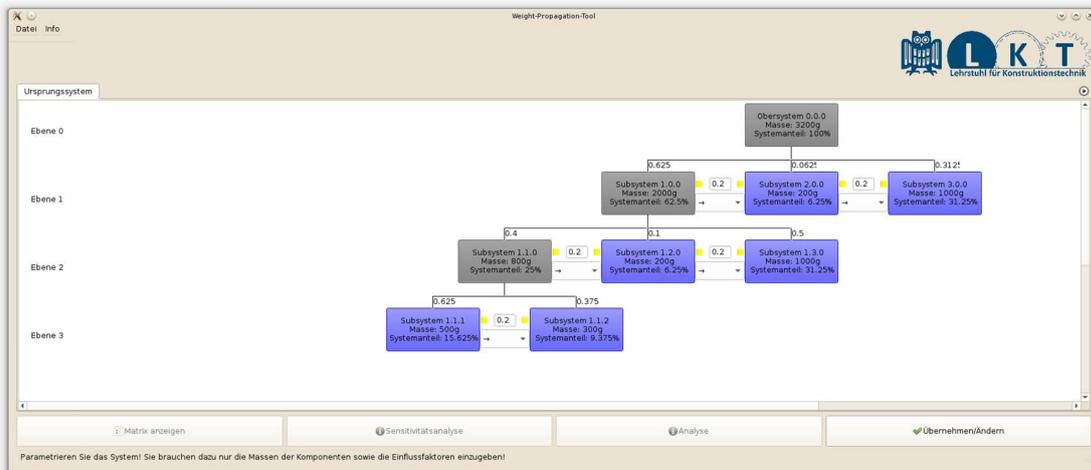


Abbildung 5.34: Systemstruktur im Software-Tool

Durch die Anwendung einer Primärmaßnahme an einem bestimmten System werden die primäre sowie die sekundär bedingte Gesamtersparnis des Systems berechnet. Darüberhinaus werden Primär- und Sekundäreffekte farblich dargestellt.

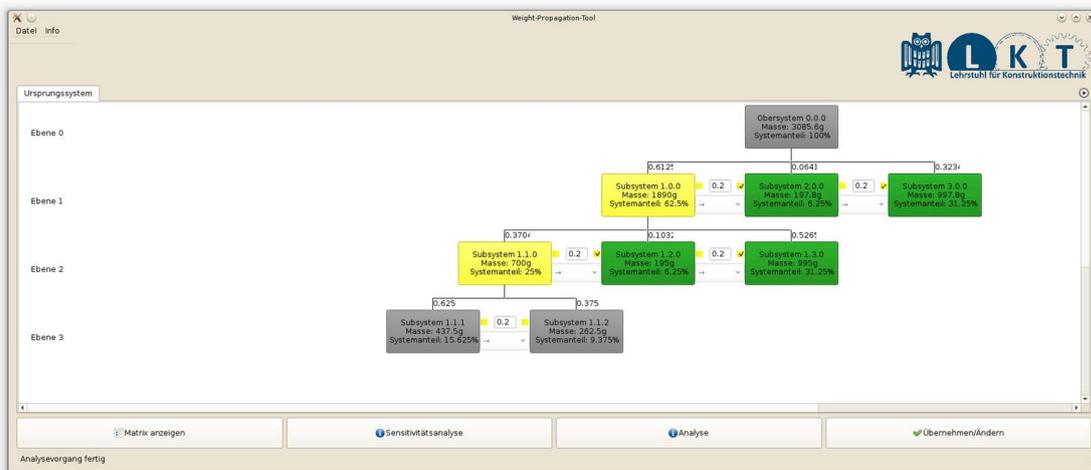
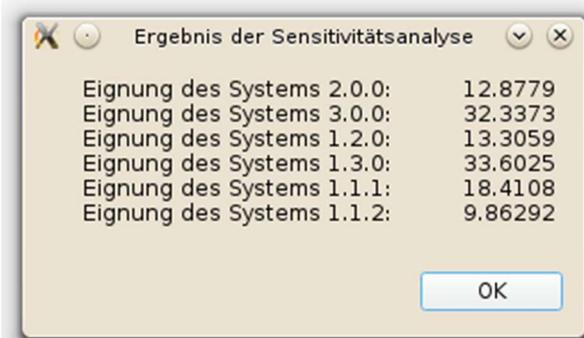


Abbildung 5.35: Darstellung von primären Maßnahmen und resultierenden Sekundäreffekten

Somit wird von einem Systemelement einer tieferen Systemebene die Gesamtersparnis berechnet (bottom-up).

Analog dazu und zur vorgestellten Methode aus Kapitel 5.6.2 ist es auch möglich eine erwünschte Gesamtersparnis festzulegen. Basierend darauf erfolgen in einer Sensitivitätsanalyse eine Berechnung der Systemstruktur und die Ausgabe der Eignung der für primäre Maßnahmen geeig-

neten Systemelemente. In Abbildung 5.36 ist beispielhaft eine Sensitivitätsanalyse nach Formel (5.20) für die Systemdarstellung aus Abbildung 5.35 dargestellt, wobei System 1.3.0 am besten geeignet ist, da durch die geringste Primärmaßnahme das gewünschte Ergebnis erreicht wird. Darüberhinaus können auch die weiteren Bestandteile der Methode der sekundären Gewichtsänderungen im Software-Tool abgebildet werden. Die Matrix-Darstellung der Systemstruktur kann nach einem Berechnungsdurchgang des vollständigen Systems angezeigt werden. Die Abbildung von verschiedenen Szenarien bei Zielkonflikten und mehreren Gewichtseinflussfaktoren kann (noch) nicht auf eine einfache Weise implementiert werden und erfordert daher vom Anwender die händische Erstellung der Szenarien.



System	Eignungswert
Eignung des Systems 2.0.0:	12.8779
Eignung des Systems 3.0.0:	32.3373
Eignung des Systems 1.2.0:	13.3059
Eignung des Systems 1.3.0:	33.6025
Eignung des Systems 1.1.1:	18.4108
Eignung des Systems 1.1.2:	9.86292

Abbildung 5.36: Sensitivitätsanalyse im Software-Tool, Werte berechnet nach Formel (5.20)

5.9.2 Software-Tool zur Unterstützung bei der Gewichtsoptimierung in den frühen Entwicklungsphasen

Für die Unterstützung der Methoden zur Gewichtsoptimierung in den frühen Phasen der Entwicklung mechatronischer Produkte kann mithilfe des hier vorgestellten IT-Werkzeuges der Ablauf gemäß Abbildung 5.10 abgebildet werden. Durch die Unterteilung in die verschiedenen Abstraktionsebenen (Anforderungsebene, Funktionsebene I, Funktionsebene II, Wirkprinzipiebene) in verschiedene Reiter kann jede dieser Ebenen abgeschlossen betrachtet werden (siehe Abbildung 5.37) und weist jeweils den in Kapitel 5.7.2 vorgestellten Gewichtsrelevanzwert als Ergebnis jeder Ebene auf.

Für die Ebene der Anforderungen werden im Software-Werkzeug für die Anforderungsliste sowie die Evaluierung der Kundenanforderungen Vorlagen bereitgestellt, die ausgefüllt werden müssen. Darüberhinaus besteht die Möglichkeit, die gewichtsintensiven Anforderungen bei einem Vergleich mit Vorgängerprodukten zu identifizieren.

Auf Funktionsebene I wird die Erstellung der Funktionsstruktur in der Art unterstützt, dass Funktionen und ihre dazugehörigen Flüsse untereinander abgefragt werden. Dadurch können schnell

und effektiv verschiedenartig gestaltete Funktionsstruktur zu demselben Entwicklungsproblem verglichen werden. Funktionsgewichtsziele und Funktionsgewichte können auf Grundlage der erstellten und gewählten Funktionsstruktur und der Zuordnung der Kundenfunktionen direkt in Tabellen erfasst und verglichen werden.



Abbildung 5.37: Software-Tool zur Unterstützung der Gewichtsoptimierung in frühen Phasen

Auf Wirkebene werden physikalische Effekte vorgestellt, die mit einer Sammlung (z. B. Konstruktionskatalog) verknüpft werden können. Durch in dieser Sammlung hinterlegte Kompatibilitäten können gewisse Kombinationen der Effekte untereinander direkt vernachlässigt werden. Die zugehörigen Gewichtswerte jedes Wirkprinzips im Vergleich zum Wirkprinzip des Vorgänger- oder Vergleichsproduktes ergeben durch automatische Multiplikation der entsprechenden Funktionswertigkeit und Summation aller Werte die Gesamtwertigkeit einer prinzipiellen Lösung, die auch grafisch abgebildet werden kann. Bei verschiedenen prinzipiellen Lösungen ist ein Vergleich und die Auswahl der besten Lösung einfach durchzuführen.

5.9.3 Software-Tool für einen Konstruktionskatalog

Das Software-Tool für den Zugriff zum Konstruktionskatalog bildet die in Kapitel 5.8.2 vorgestellte Methode ab und stellt somit eine Unterstützung beim Zugriff auf einen Wissenspeicher dar. Analog zur Methode werden nach und nach über die verschiedenen Anteile im Konstruktionskatalog die Kriterien hierarchisch abgefragt und anschließend nur noch die dazugehörigen Unterkriterien angezeigt. Die Auswahl einer Lösung oder eines Konzeptes erfolgt im letzten Schritt unter Angabe der im Katalog hinterlegten Anmerkungen, die letztendlich die Auswahlkriterien für die entsprechende Lösung sind.

Neben der Wissensbereitstellung für mögliche Lösungen und Lösungskonzepte bietet das Software-Werkzeug die Möglichkeit, die durch die Anwendung einer bestimmten Lösung zu überspringenden Entwicklungsschritte und -aktivitäten anzuzeigen und dementsprechend automatisch zur nächsten Entwicklungsphase überzugehen (siehe auch Abbildung 5.32).

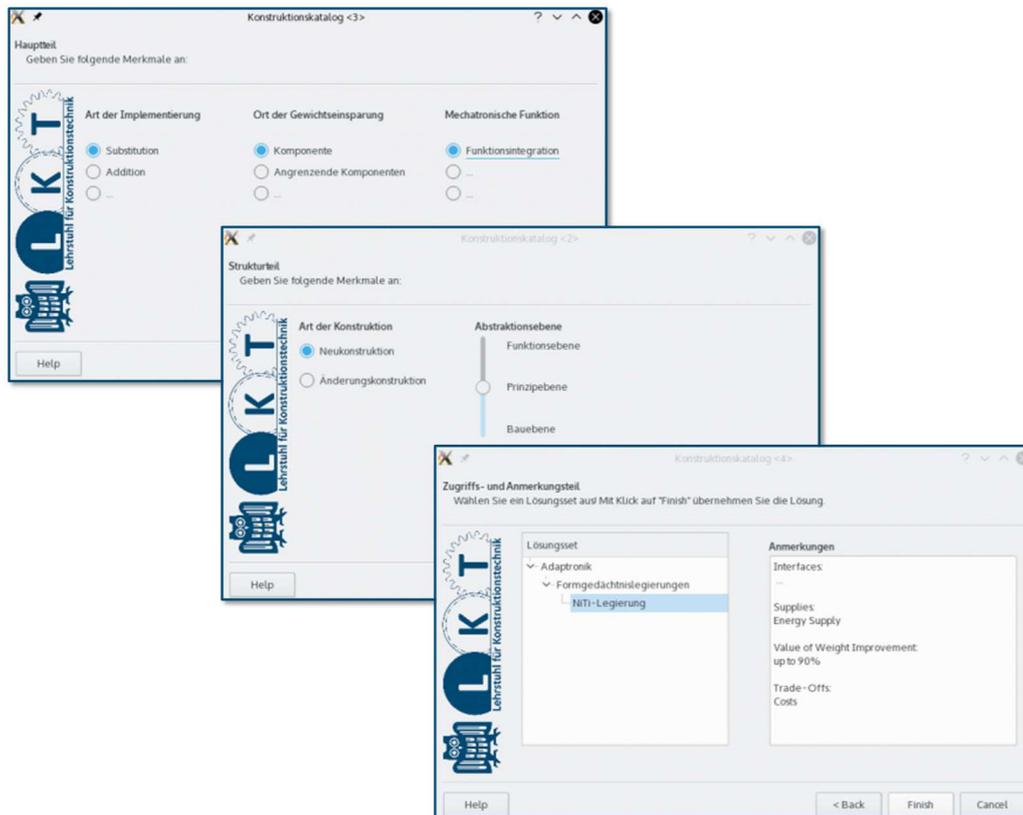


Abbildung 5.38: Software-Unterstützung beim Zugriff auf den Konstruktionskatalog

5.9.4 Software-Tool zur Unterstützung des Gesamtprozesses

Die Software-Unterstützung für den Gesamtprozess vereint alle oben vorgestellten IT-Tools zur grafischen Darstellung aller möglichen Schritte bei der Entwicklung gewichtsoptimierter, mechatronischer Produkte, die Entwicklung des Gewichtsstatus und des Verlaufs zum Zielgewicht hin sowie die Berechnung der relevanten Kenngrößen der jeweiligen Entwicklungsschritte (z. B. Gewichtsrelevanzwerte etc.). Desweiteren werden die für jeden Schrittmöglichen Gewichtsoptimierungsmaßnahmen und -strategien beschrieben und vorgeschlagen. Somit kann der Entwickler bei jeder Entwicklungs- und Analysetätigkeit sowie bei der Entscheidungsfindung unterstützt werden.

Mithilfe des Gesamt-Tools kann die Entwicklungszeit durch spezifische Unterstützung des Entwicklers wesentlich verringert, da die Mensch-Maschine-Interaktionen nur die tatsächlich relevanten Themen betreffen und der Entwickler komplett durch den Prozess begleitet wird. Es ist

allerdings nicht auszuschließen, dass bei einer (hier nicht abgebildeten) multikriteriellen Entscheidungsfindung die Entwicklungszeit ansteigt.

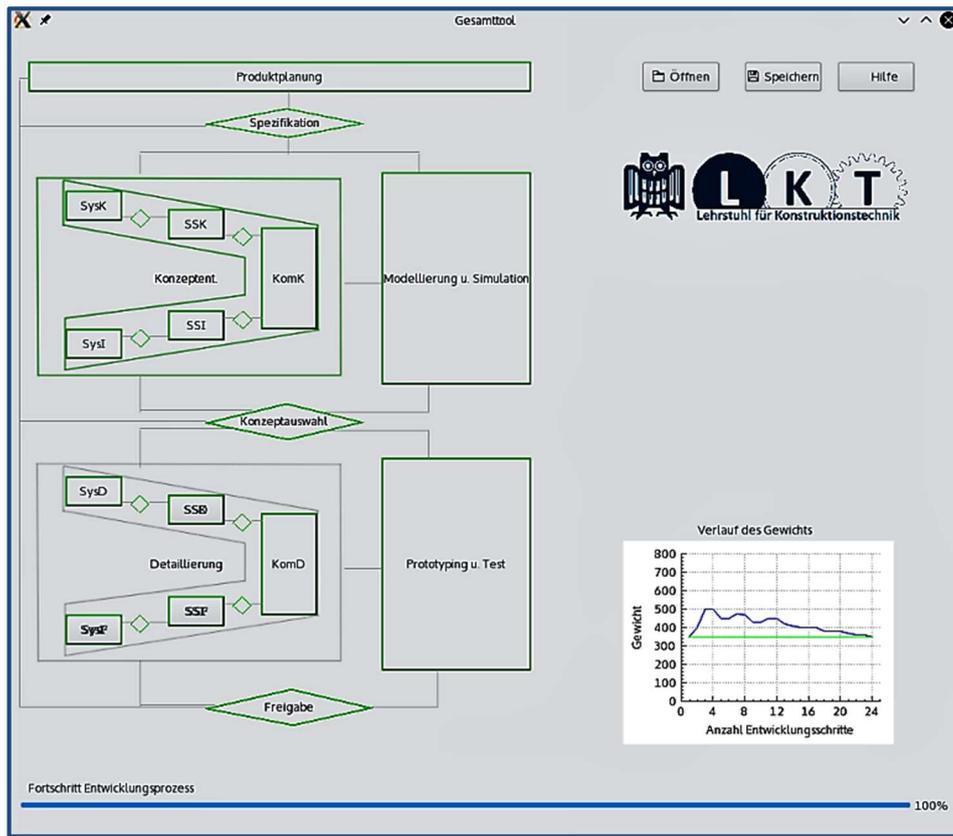


Abbildung 5.39: Software-Tool zur Unterstützung des Gesamtprozesses

5.10 Zusammenfassung

Das Prozessmodell stellt im vorangegangenen Kapitel die Grundlage und den zentralen Bestandteil der Methodik für die Entwicklung gewichtsoptimierter, mechatronischer Produkte dar. Die Methodik selbst vereint zwei verschiedene Ansichten: die Gewichtsoptimierung mechatronischer Produkte (Prozesssicht) und die Gewichtsoptimierung technischer Produkte durch mechatronische Konzepte (Produkt-/Technologiesicht).

Die Notwendigkeit einer systematischen und systemischen Betrachtung von Gewichtskriterien durch die Strategie des Systemleichtbaus ist unabdingbar, um alle möglichen Potenziale zu erkennen und optimal auszunutzen. Die vorgestellten Gewichtsoptimierungsstrategien (Systemleichtbau) und -methoden (frühe Phasen und sekundäre Effekte) ermöglichen eine über den ganzen Entwicklungsprozess durchgehende Betrachtung von Gewichtskriterien und -eigenschaften, die durch ebenfalls entwickelte Software-Tools unterstützt wird. Bei der Entscheidungsfindung auf verschiedenen Abstraktionsebenen sind Kennwerte etabliert worden, die die Auswahl aus verschiedenen Lösungsmöglichkeiten erleichtern soll.

Neben der prozesshaften Betrachtung ermöglicht die Berücksichtigung vorhandener mechatronischer Konzepte und Technologien als Lösungsmöglichkeiten und deren Speicherung in einem Konstruktionskatalog eine Vereinfachung und Verkürzung des Entwicklungsprozesses.

Zur Unterstützung der vorgestellten Methoden sind mehrere Werkzeuge auf IT-Basis entwickelt worden, die den Ablauf und die Berechnung der verschiedenen Kennwerte erleichtern.

6 Evaluierung und Validierung der Methodik

In diesem Kapitel werden die Methodik und die Einzelmethoden aus dem Rahmenwerk für die gewichtsoptimierte Entwicklung mechatronischer Produkte, wie sie in Kapitel 5 beschrieben wurden, an einem Beispielszenario evaluiert. Dabei steht vor allem die Anwendbarkeit der Methoden im Fokus. Neben der Verdeutlichung der beschriebenen theoretischen Aspekte der Gesamtmethodik und der Methoden soll dieses Kapitel auch Rückschlüsse über mögliche Limitationen geben. Zuerst werden im ersten Unterkapitel das Produktbeispiel und die Ausgangssituation erläutert, anhand dessen die Evaluierung und Validierung durchgeführt wird. Kapitel 6.2 beschreibt die Anwendung der Methoden im Rahmen der Gesamtmethodik und der vier Hauptentwicklungsphasen, die sich an die Abstraktionsebenen anlehnen. Kapitel 6.3 stellt die Anwendung der Methode der sekundären Gewichtseinsparung an einem fiktiven Beispielsystem dar, bevor in Kapitel 6.4 die Erkenntnisse, die sich aus der Validierung ergeben, kritisch beäugt und diskutiert werden.

6.1 Ausgangssituation und Produkt

Bei dem Produkt, das durch die entwickelte Methodik hinsichtlich des Gewichtes optimiert werden soll, handelt es sich um ein Fahrrad-Nachrüstset für eine Elektro-Motor-/Generator-Einheit der Firma BionX ([Bion13], [Bion14]). Gemäß der Definition und des Aufbaus eines mechatronischen Systems (siehe Kapitel 2.3.2) kann die betrachtete Modellvariante P250 (siehe Abbildung 6.1) eindeutig als mechatronisches System angesehen werden.



Abbildung 6.1: BionX P250DX als Nachrüstset im nicht-eingebauten (links) und eingebauten Zustand (rechts)

[Bion13]

Das Nachrüstset P250DX der Firma BionX wird anstelle des normalen Hinterrades bei Fahrrädern eingesetzt. Schaltung und Bremsen bleiben bei der Nachrüstung komplett vorhanden. Zusätzlich

wird am Lenker ein Bedienpanel zum Einstellen der elektrischen Unterstützung durch den Elektromotor und im Rahmen ein Akku zur Speicherung der elektrischen Energie angebracht. Durch die Ausführung als Motor-Generator-Einheit erfolgt beim Bremsen eine Rekuperation, die einen Teil der Verzögerungsenergie als elektrische Energie in den Energiespeicher zurückspeist.

Die Motor-Generator-Einheit selbst ist ein getriebeloser Direktläufer-Motor, der als Gleichstrom-Hinterrad-Nabenmotor ausgeführt ist. Bei einem Gewicht von 4,7 kg weist die bürstenlose und wartungsfreie Einheit mit integrierter Drehmoment-Sensorik ein nominelles Drehmoment von 9 Nm und ein maximales Drehmoment von 40 Nm auf. Die Energiespeicher-Einheit ist ein aus 52 Lithium-Ionen-Zellen zusammengesetzter Akkumulator mit einer Nennspannung von 48 V, eine Ladungsmenge von 8,8 Ah und eine Energiemenge von 423 Wh. Das Gewicht des gesamten Nachrüstsets beträgt 8,5 kg.

Ziel ist die Gewichtsoptimierung des BionX-Nachrüstsets im Rahmen einer fiktiven Änderungskonstruktion nach den oben vorgestellten Methoden und Strategien. Einhergehend mit der Gewichtsoptimierung werden weitere Teilziele definiert, die ausführlicher in Kapitel 6.2.1.1 dargestellt werden.

6.2 Anwendung der Methoden für Gewichtsoptimierung in frühen Entwicklungsphasen

Die Validierung und Verifikation der in Kapitel 5 vorgestellten Methodik orientiert sich am Prozessmodell mit der Anwendung der verschiedenen Methoden und Strategien in frühen Entwicklungsphasen (vergleiche Kapitel 5.6.1). Zu beachten ist, dass lediglich das System „Nachrüstset“ im übergeordneten System „Fahrrad“ betrachtet wird, welches wiederum dem Übersystem „Umwelt“ untergeordnet ist (Abbildung 6.2). Desweiteren handelt es sich in diesem Beispiel um eine Änderungskonstruktion^{iv}, da ein vorhandenes System analysiert und optimiert werden soll. Prinzipiell unterscheiden sich Methodik und Methoden nicht zu einer Neukonstruktion. Zunächst erfolgt in Kapitel 6.2.1 die Aufarbeitung der Anforderungsliste nach Gewichtskriterien. Die Phase der Konzeptionierung wird in Kapitel 6.2.2 beschrieben und umfasst im Besonderen die Systemkonzeptionierung, wo die Methoden der Gewichtsoptimierungen für frühe Phasen betrachtet werden. Ein Augenmerk liegt weiterhin auf der Anwendung des Systemleichtbaus und den Methoden der sekundären Einsparungen und Optimierungen. Die Detaillierungsphase umfasst eine

^{iv} Unter „Anpassungskonstruktion“ bzw. „Änderungskonstruktion“ wird die Änderung bereits bestehender Konstruktionen zur Beseitigung von Mängeln, zur Berücksichtigung neuer Sicherheits- und Umweltbestimmungen oder zur Anpassung an andere Randbedingungen unter Beibehaltung des ursprünglichen Konzeptes verstanden. [PBF07]

ausführlichere Betrachtung des in der Konzeptphase erstellten Konzeptes und der Methode der sekundären Gewichtsoptimierungen.

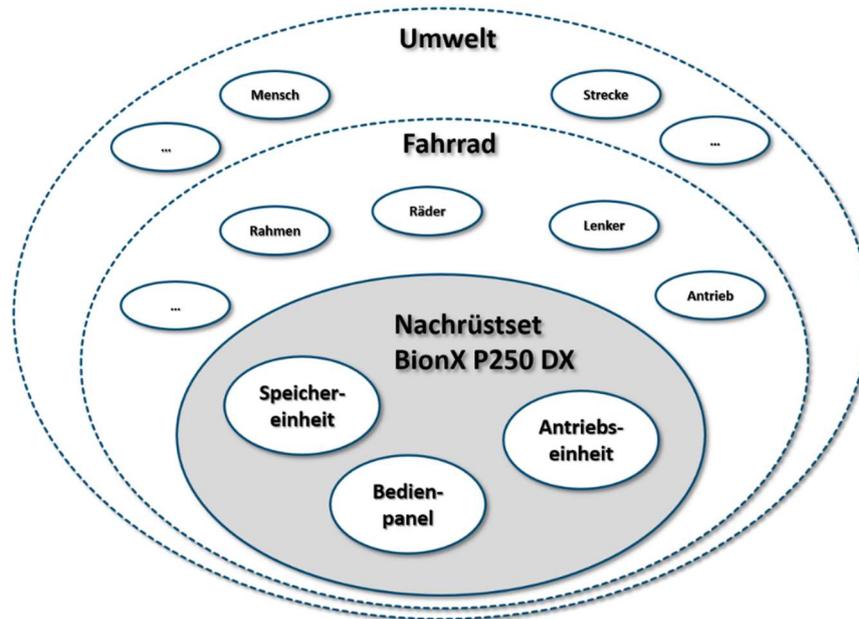


Abbildung 6.2: Systembetrachtung des Validierungsbeispiels

Die in Kapitel 5.9 entwickelten Software-Werkzeuge unterstützen die Anwendung der Methodik und der Methoden.

6.2.1 Produktplanungsphase

Die Produktplanungsphase umfasst die Erstellung der Anforderungsliste mit der Identifizierung gewichtsrelevanter Anforderungen, die Bestimmung der Kundenfunktionen und des Gesamtgewichtsziels.

6.2.1.1 Klärung der Aufgabe

Ausgehend von dem vorhandenen Nachrüstset sollen folgende Grobanforderungen erfüllt werden:

- Gewichtsoptimierung des Gesamtsystems um mindestens 20%
- Optimierung der Gewichtsverteilung bezüglich der Trägheitsmomente
- Funktionalität des Gesamtsystems gleichbleibend oder besser
- Kosten des Gesamtsystems gleichbleibend oder begründbar teurer
- Gewährleistung von Sicherheit, Montierbarkeit, Herstellbarkeit
- Beibehaltung der Lebensdauer und der Wartungsintervalle
- modernes, schlichtes Design

Es ist ersichtlich, dass ein Gewichtsoptimierungsproblem – wie auch schon in früheren Kapiteln dargestellt – immer die Betrachtung weiterer Kriterien wie Kosten und Funktionalität miteinschließt.

6.2.1.2 Initiale Anforderungserhebung

Mithilfe einer Produktanalyse des bestehenden Produktes kann eine erste Anforderungsliste erstellt werden. Zusätzlich werden vergleichbare Produkte, die momentan auf dem Markt verfügbar sind (siehe [WWW4], [WWW5], [WWW6]) analysiert.

Besonders herauszustellende Anforderungen sind zu diesem frühen Zeitpunkt des Entwicklungsprozesses die geometrischen Einschränkungen bezüglich Bauraum und die Funktionalität, wie z. B. Leistung, Drehmoment und Reichweite.

Die Anforderungsliste in Tabelle 6.1 stellt eine vereinfachte Liste dar, in der die wichtigsten Anforderungen zusammengetragen sind. Sie wird nach verschiedenen Hauptkriterien unterteilt, um die Übersichtlichkeit zu bewahren. Dabei sind vor allem die Hauptgruppen „Geometrie“, „Funktionalität“ und „Material / Stoff“ herauszustellen, die für den weiteren Entwicklungsprozess mit einer Gewichtsoptimierung von größerer Bedeutung sind.

Teilweise sind in dieser Liste auch Anforderungen aufgeführt, die nur implizit das Nachrüstset betreffen: So zum Beispiel wirken sich die Felgenbauweise bzw. der Felgenwerkstoff des aufzurüstenden Fahrrads sowie die Anordnung der Speichen (gekreuzte oder gerade Einspeichung) auf die Einbaubarkeit, Montage und allgemeine Anwendbarkeit der Nachrüstkomponenten aus.

6.2.1.3 Bestimmung der gewichtsrelevanten und gewichtsintensiven Anforderungen

Aufbauend auf der ersten Anforderungserhebung werden die Anforderungen soweit wie möglich quantifiziert. Dafür notwendig sind die Analyse verschiedener Dokumente (z. B. Bedienungsanleitung, Handbuch u. a.) bezüglich des zu untersuchenden Systems sowie das Studium von Konkurrenz- oder Vorgängerprodukten zu nicht in den Dokumenten ausgewiesenen Kriterien (z. B. allgemeine Sicherheitsvorschriften).

Ausgehend von diesen Angaben müssen die gewichtsrelevanten Anforderungen identifiziert und spezifiziert werden. Einfach zu identifizieren sind dabei die Anforderungen, die direkt das Gewicht und andere Gewichtseigenschaften beeinflussen, so zum Beispiel: Gewicht des Produktes allgemein, verwendete Werkstoffe, das veranschlagte Volumen oder Wirkungsgrad. Weiterhin sind aber auch indirekter Einflüsse auf Gewichtseigenschaften des Produktes zu beachten. Hierbei sind z. B. Verschleiß, Schutzklassen oder Sicherheitsfaktoren.

Tabelle 6.1: Anforderungsliste mit gewichtsintensiven Anforderungen

Nr.	F/W	Beschreibung	Wert	Anmerkungen	gewichtsabhängig?
Geometrie					
1.1		Breite	b = 135-142 mm	beschränkt durch Hinterbau	x
1.2		Durchmesser	d = max. 26' - X	begrenzt durch Speichenabstand	x
1.3		Volumen	$V = \pi/4 * b * d^2$	bei Zylinderform	x
1.4		Anordnung	auf Hinterrad		
1.5		Speichenaufbau	Verlauf/Form	begrenzt Motor-Geometrie	x
1.6		Felgenmaterial	Aluminium		x
1.7		Felgenform		Felgenbremse, Scheibenbremse	x
1.8		Speichenaufnahme		gekrümmt, gerade	x
1.9		Gehäuseform		beeinflusst Volumen	x
1.10		Speichenmaterial	Aluminium		
Funktion					
2.1		Beschleunigung	a = 1 m/s²	behutsam, Freizeitradfahrer	
2.2		Rückgewinnung	50% der Bewegungsenergie		
2.3		Leistung	P = max. 250 W		
2.4		Drehmoment	M = max. 9 Nm	nominell	
2.5		Leistungsgewicht		gleichbleibend	x
2.6		Geschwindigkeit	v = max. 25 km/h		
2.7		Geräusch	max. 40 dB	Zimmerlautstärke	
2.8		Temperatur		für Mensch ungefährlich	
2.9		Reichweite	R = 100 km		x
2.10		Wirkungsgrad		gleichbleibend oder besser	x
2.11		Gewicht	6,8 kg	Gesamtsystem	x
2.12		Gewicht	3,5 kg	Motor	x
Sicherheit					
3.1		Schutzklasse	IP66	elektrisch	x
3.2		Schutzklasse	C4	Korrosion	x
3.3		Schutzklasse		EMV	x
3.4		Schutzklasse	II	Strom	x
3.5		Schutzklasse	II	Explosion	x
3.6		Erwärmung	< 30°C		
Instandhaltung					
4.1		Intervall	max. 1 pro Jahr		
4.2		Verschleiß	kein	Motor	
4.3		Verschleiß	Betriebsstunden	Lager, Speichen, Nippel, Felge, Bremsscheibe	x
Kosten					
5.1		Verkaufspreis	250€		
5.2		Herstellpreis	150€		
Produktion					
6.1		Montage	so einfach wie möglich		
6.2		Teileanzahl	niedrig		x
Gebrauch					
7.1		Handhabung	so einfach wie möglich		

Für die Methode zur Bestimmung der gewichtsintensiven Anforderungen nach [McLe10] werden aufgrund der Komplexität ausgewählte Anforderungen aus Tabelle 6.1 mit den Komponenten des Vorgängerproduktes (hier in diesem Falle das zu optimierende Produkte) zueinander in Beziehung gesetzt, wobei jeder Anforderung ein Wert für das beeinflusste Gewicht und jeder Komponente ein durchschnittliches Gewicht zugewiesen werden kann. Aufbauend auf diesem Schritt wird die Anzahl der Verknüpfungen einer jeden Anforderungen in Bezug zu allen anderen Anforderungen bestimmt. Abschließend werden die bestimmten Werte in einem Diagramm (siehe Abbildung 6.3) aufgetragen, in dem die Anforderungen nach Anzahl der Verknüpfungen und beeinflusstem Gewicht klassifiziert werden können.

Die Domain-Mapping-Matrizen für die Anforderungen und die Komponenten sowie die Design-Structure-Matrizen für die Beziehungen der Anforderungen untereinander sind in Tabelle A.1 bis Tabelle A.5 zu finden.

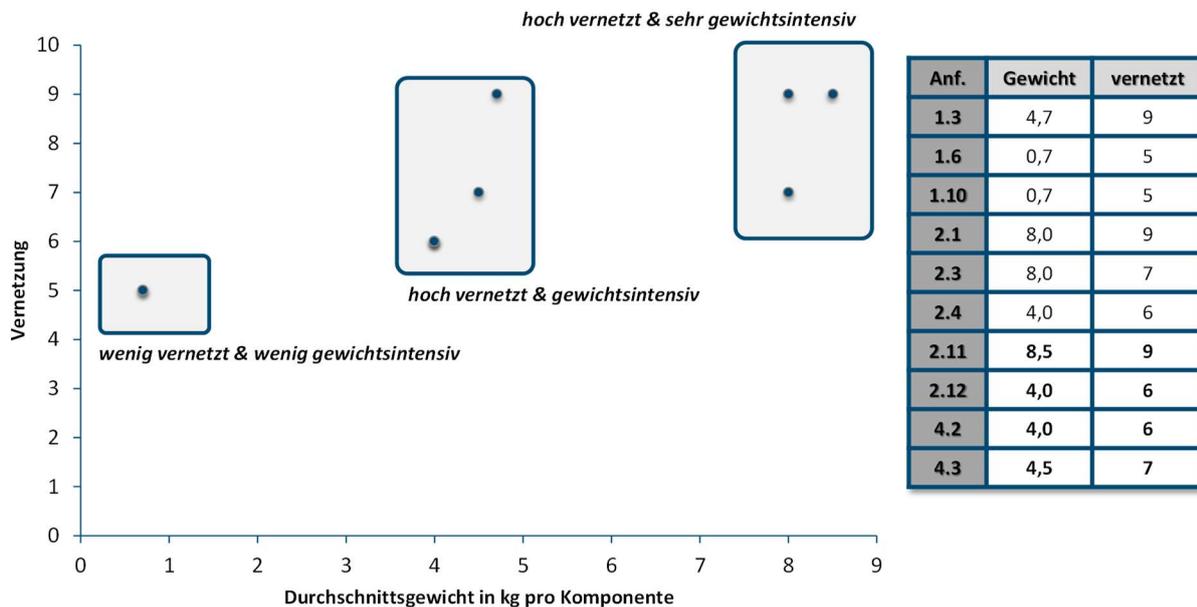


Abbildung 6.3: Klassifizierung der Anforderungen nach Vernetzung und Gewichtsbeeinflussung

Wie aus Abbildung 6.3 ersichtlich wird, ist besonderes Augenmerk auf folgende Anforderungen zu legen: Gesamtgewicht (Anforderung 2.11), Beschleunigung (Anforderung 2.1) sowie Leistung (Anforderung 2.3). Desweiteren sollten Bauvolumen (Anforderung 1.3), Drehmoment (Anforderung 2.4), das Motorgewicht (Anforderung 2.12) sowie Verschleiß des Motors (Anforderung 4.2) und der sonstigen Bauteile (Anforderung 4.3) gesondert betrachtet werden.

Der Gewichtsrelevanzwert für die Anforderungen ergibt sich nach Formel (5.21) bei einer Grenze „wenig vernetzt“ zu „stark vernetzt“ von 5 zu:

$$G_R = \frac{n_{R^*}}{n_R} = \frac{2}{10} = 0,2 \quad (6.1)$$

Wäre es möglich, mehr Anforderungen so zu gestalten, dass sie weniger stark vernetzt sind, würde der Gewichtsrelevanzwert höher sein. Um den Wert mit einer anderen Anforderungsliste derselben Entwicklungsaufgabe zu vergleichen, muss immer derselbe Grenzwert zwischen stark und schwach vernetzten Bedingungen identisch sein.

6.2.1.4 Bestimmung der Kundenanforderungen

Die Kundenanforderungen sind aufgrund der Zielgruppe, die als potenzielle Käufer für das Nachrüstset infrage kommen, wie folgt zusammengestellt worden:

- KF 1: Sicherheit
- KF 2: Preis
- KF 3: Leistung
- KF 4: Design
- KF 5: Bedienbarkeit
- KF 6: Wartung

In einem einfachen paarweisen Vergleich sind diese in Abbildung 6.4 aufgeführt und evaluiert worden.

	KF1	KF2	KF3	KF4	KF5	KF6	aktive Summe	Rang	Gewichtung
KF 1	-	1	0	2	2	2	7	2	0,233
KF 2	1	-	0	2	2	2	7	2	0,233
KF 3	2	2	-	2	2	2	10	1	0,333
KF 4	0	0	0	-	1	2	3	4	0,100
KF 5	0	0	0	1	-	1	2	5	0,067
KF 6	0	0	0	0	0	-	1	6	0,033
passive Summe	3	3	0	7	8	9	30	-	1,000

Abbildung 6.4: Evaluierung der Kundenanforderungen (paarweiser Vergleich)

Deutlich wird vor allem, dass die Leistung, der Preis und die Sicherheitsvorkehrungen des Produktes für den Kunden am wichtigsten sind, wohingegen Design, Bedienbarkeit und Wartung eine eher untergeordnete Rolle spielen.

6.2.1.5 Bestimmung des Gesamtgewichtsziels

Durch den Vergleich mit Konkurrenz- und Vorgängerprodukten (siehe [WWW4], [WWW5], [WWW6]) und die Berücksichtigung eines innovativen Charakters soll das Gesamtgewicht um ca.10% von 8,5 kg auf 7,8 kg verringert werden.

6.2.1.6 Festlegung der Analysepunkte

Aufgrund der geringen Komplexität des zu betrachtenden Produktes werden insgesamt drei Systemebenen etabliert: Systemebene, Subsystemebene I und Komponentenebene. Damit ergeben sich neben den festen Makro-Analysepunkte zwischen den Hauptphasen in der Konzeptphase sowie Detaillierungsphase jeweils vier Mikro-Analysepunkte, deren Aussagekraft und Detaillierung aufgrund der Konkretisierung zunimmt, je weiter der Produktentwicklungsprozess fortgeschritten ist.

6.2.2 Konzeptphase

Als Folgephase der Produktplanung werden aufbauend auf den Ergebnissen der Produktplanung (Anforderungsliste, Gesamtgewichtsziel, Kundenanforderungen) in der Konzeptphase ein umfassendes Systemkonzept inklusive Subsystemkonzepten und Komponentenkonzepten erstellt. Das grundsätzliche Vorgehen in der Konzeptphase ist in Kapitel 5.3.3, die angewandten Methoden für die frühen, abstrakten Schritte (Anforderungen, Funktionen, Wirkprinzipien) in Kapitel 5.6.1.

6.2.2.1 Systemkonzeptionierung

Für die Systemkonzeptionierung werden auf abstrakter Ebene die Methoden zur Gewichtsoptimierung für Funktionen und Wirkprinzipien angewandt.

Funktionsstrukturen

Durch eine Funktionsanalyse des bestehenden Produktes (BionX Nachrüstset P250DX) und die Systemabgrenzung aus Abbildung 6.2 kann eine grobe Funktionsstruktur auf Systemebene generiert werden (Abbildung 6.5).

Zu der in Kapitel 5.6.1 vorgestellten Vorgehensweise erfolgt in Funktionsebene I eine Variation der Funktionsstruktur, wobei bezüglich der Gewichtsoptimierung zuerst auf eine Verringerung der Funktionen und im zweiten Schritt mit verschiedenen Ansätzen eine Verlagerung von Stoffflüssen hin zu Energie- oder Signalflüssen zu erstreben ist.

Zwei Variationen der Funktionsstruktur sind im Anhang zu finden (Abbildung A.1 und Abbildung A.2). Zur Bestimmung, welche Funktionsstruktur aus den drei vorgestellten bezüglich einer Gewichtsoptimierung zu bevorzugen ist, kann Formel (5.22) zu Rate gezogen werden.

Für die Gewichtsrelevanz der originalen Funktionsstruktur (Abbildung 6.5) ergibt sich daher ein Wert von:

$$G_{F1} = \frac{1}{n_{F1}} \cdot \left(1 - \frac{n_{MF1}}{n_{Flow1}}\right) = \frac{1}{9} \cdot \left(1 - \frac{5}{15}\right) = \frac{2}{27} \approx 0,074 \quad (6.2)$$

Die Gewichtsrelevanz der beiden Variationen der Funktionsstruktur ergeben sich zu:

$$G_{F2} = \frac{1}{n_{F2}} \cdot \left(1 - \frac{n_{MF2}}{n_{Flow2}}\right) = \frac{1}{9} \cdot \left(1 - \frac{7}{15}\right) = \frac{8}{135} \approx 0,059 \quad (6.3)$$

$$G_{F3} = \frac{1}{n_{F3}} \cdot \left(1 - \frac{n_{MF1}}{n_{Flow3}}\right) = \frac{1}{10} \cdot \left(1 - \frac{9}{17}\right) = \frac{8}{170} \approx 0,047 \quad (6.4)$$

Somit kann festgestellt werden, dass die ursprüngliche Funktionsstruktur aufgrund der Gewichtsrelevanz weiterverfolgt wird.

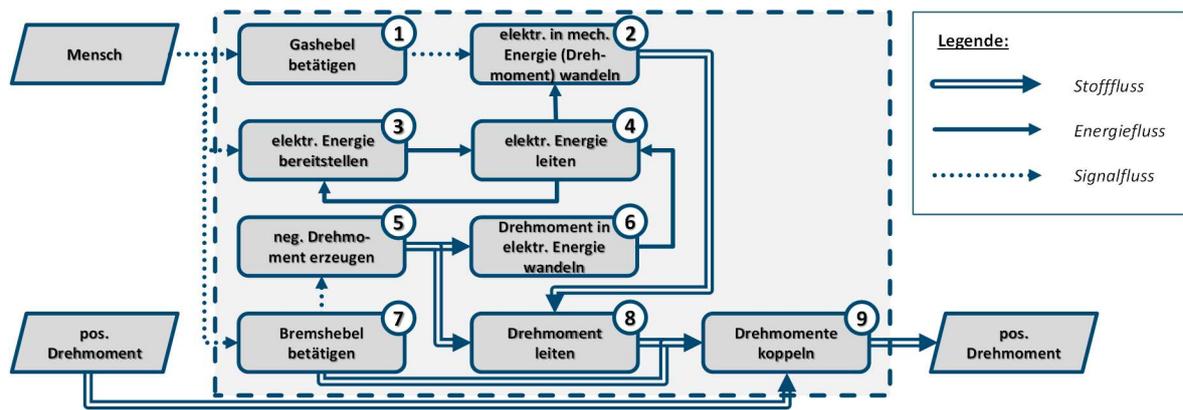


Abbildung 6.5: grobe Funktionsstruktur des Validierungsbeispiels

Die Betrachtung der Funktionen auf Funktionsebene II erfolgt in zwei Schritten: zuerst werden die in der Funktionsstruktur festgelegten technischen Funktionen mit den gewichteten Kundenanforderungen zur Festlegung der Funktionsgewichtsziele verglichen, anschließend die technischen Funktionen mit den Komponenten oder Bauteilgruppen zur Bestimmung der Funktionsgewichte aus den Vorgängermodellen.

Aus dem Vergleich in Abbildung 6.6 ist zu erkennen, dass zur Erreichung des Gesamtgewichtsziels von 7,8 kg vor allem die technischen Funktionen „elektrische Energie in Drehmoment wandeln“, „elektrische Energie speichern“ sowie „Drehmoment in elektrische Energie wandeln“ prägend sind.

		Technische Funktionen								
Kundenfunktionen	Gew.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0,23	0,05	0,20	0,2	0,1		0,20	0,05	0,10	0,10
2	0,23		0,15	0,6			0,15		0,05	0,05
3	0,33		0,50	0,1			0,30		0,05	0,05
4	0,10	0,10	0,15	0,1	0,2		0,15	0,10	0,20	
5	0,07	0,20	0,25	0,1			0,25	0,20		
6	0,03	0,15		0,1	0,1			0,15	0,25	0,25
Funktionswichtigkeit		0,04	0,28	0,24	0,05	0,00	0,21	0,04	0,08	0,06
Funktionsgewichtziel		311	2184	1872	364	0	1664	312	623	467

Abbildung 6.6: Festlegung von Funktionsgewichtszielen

Im zweiten Schritt erfolgt in Abbildung 6.7 auf Basis einer Produktuntersuchung mit Abschätzung der Bauteilgewichte ein Vergleich mit den technischen Funktionen. Es zeigt sich, dass neben zwei

eben kritisch identifizierten technischen Funktionen die Funktion „elektrische Energie leiten“ hier besonders zu berücksichtigen ist.

		Technische Funktionen								
Bauteile	Gewicht	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Bremshebel	50							1		
Motor/Generator	4000		0,5				0,5			
Rad	700								0,5	0,5
elektr. Verbindungen	350			0,1	0,9					
Akku	3300			0,9	0,1					
Bedienkonsole	88	0,5						0,5		
Funktionsgewicht		44	2000	3005	645	0	2000	94	350	350

Abbildung 6.7: Bestimmung der Funktionsgewichte

Zur Bewältigung und Priorisierung der entstehenden Probleme kann zusätzlich die Funktionswichtigkeit der technischen Funktionen berücksichtigt werden.

Für den Vergleich von Funktionsgewichtszielen mit den Funktionsgewichten ergibt sich somit folgendes Bild.

Technische Funktion	1	2	3	4	5	6	7	8	9	ges.
i_{TF}	0,04	0,28	0,24	0,05	0,00	0,21	0,04	0,08	0,06	1
Funktionsgewichtsziel	311	2184	1872	364	0	1664	312	623	467	7797
Funktionsgewicht	44	2000	3005	645	0	2000	94	350	350	8488
Differenz	-267	-184	+1133	+281	-	+336	-218	-273	-117	+691
Ziel erreicht?	ja	ja	nein	nein	-	nein	ja	ja	ja	nein
$i_{TF} \cdot \text{Differenz}$	-	-	272	14	-	71	-	-	-	-

Abbildung 6.8: Vergleich Funktionsgewichtsziele mit Funktionsgewichten des Validierungsbeispiels

Durch die Zuordnung der technischen Funktionswertigkeit zeigt sich, dass vor allem die technische Funktion 3 einen maßgeblichen Einfluss auf das Produktgewicht trägt. Daher ist es sinnvoll, in weiteren Gewichtsoptimierungsschritten vor allem Teilfunktion 3 in den Fokus zu stellen.

Wirkprinzipien und prinzipielle Lösung

Die Festlegung der Funktionsstruktur als Vorfestlegung des Gesamtkonzepts dient als Ausgangsbasis für die Bestimmung der Wirkprinzipien und der prinzipiellen Lösung. Im ersten Schritt werden für die festgelegten Funktionen physikalische Lösungsprinzipien gesucht, wie in Abbildung 6.9 dargestellt. Diese Effekte werden nach bestimmten Kriterien charakterisiert (z. B. Effektivität, Realisierungsmöglichkeiten, ...) und vorausgewählt. Dabei können Konstruktionskataloge nach [Roth00a] oder ein nach in dieser Arbeit vorgestelltem Ansatz gestalteter Konstruktionskatalog mit mechatronischen Lösungsprinzipien hilfreich sein.

technische Funktionen	Wirkprinzipien				
1	Zughebel	Drehhebel	Druckhebel	Seilzug	Knopf
2	Drehfeld-Maschine	Kommutator-Maschine	elektrostat. Maschine	Unipolar-maschine	
3	Akku	Sonnenenergie	Windenergie	Kondensator	Schwungrad
4	Elektronenleitung	Ionenleitung			
5	Reibkraft an Felge	Reibkraft am Boden			
6	Drehfeld-Maschine	Kommutator-Maschine			
7	Zughebel	Drehhebel	Druckhebel	Seilzug	Knopf
8	Welle	Kupplung	Getriebe		
9	Welle	Kupplung	Getriebe		

Abbildung 6.9: Suche nach physikalischen Effekten und Vorauswahl der Wirkprinzipien

Abbildung 6.9 zeigt, dass gewisse Wirkprinzipien nicht geeignet sind. So sind z. B. für Funktion 4 („elektrische Energie leiten“) Wirkprinzip „Ionenleitung“ oder für Funktion 3 („elektrische Energie bereitstellen“) Wirkprinzip „Windenergie“.

Mit den vorausgewählten Wirkprinzipien erfolgt eine Zuordnung ihrer Gewichtsabhängigkeit. Dafür wird ein Vergleich mit der dem Vorgängerprodukt notwendig, wobei jedem Wirkprinzip aus dem Vorgängerprodukt der Gewichtswert 100% zugeordnet wird. Zu den anderen ermittelten Wirkprinzipien werden entsprechend ihres Realisierungsgewichtes zum Vergleichswert zugeordnet. Das Realisierungsgewicht der Wirkprinzipien wird durch Produkt- und Marktanalysen ermittelt, wobei diese oft aus Komponenten oder Bauteile zu bestimmen sind.

Gewichtsrelevanzreihenfolge I	technische Funktionen	Funktions-wichtigkeit	Gewichtsrelevanzreihenfolge II					
	2	0,28	II.1	II.2	II.3	II.4		Wirkprinzip
			1,00	1,00	0,90	0,85		Gewichtsrelevanz*
	3	0,24	III.1	III.2	III.3	III.4	III.5	Wirkprinzip
			1,00	1,05	1,10	0,80	1,80	Gewichtsrelevanz*
	6	0,21	VI.1	VI.2				Wirkprinzip
			1,00	1,00				Gewichtsrelevanz*
	8	0,08	VIII.1	VIII.2	VIII.3			Wirkprinzip
			1,00	0,90	1,50			Gewichtsrelevanz*
	9	0,06	IX.1	IX.2	IX.3			Wirkprinzip
0,7			0,60	1,00			Gewichtsrelevanz*	
4	0,05	IV.1	IV.2				Wirkprinzip	
		1,00	1,20				Gewichtsrelevanz*	
1	0,04	I.1	I.2	I.3	I.4	I.5	Wirkprinzip	
		1,11	1,00	1,11	1,22	0,56	Gewichtsrelevanz*	
7	0,04	VII.1	VII.2	VII.3	VII.4	VII.5	Wirkprinzip	
		1,00	0,90	1,00	1,10	0,50	Gewichtsrelevanz*	
5	0,00	V.1	V.2				Wirkprinzip	
		1,00	1,50				Gewichtsrelevanz*	

*geschätzte Werte

Abbildung 6.10: Bestimmung der Gewichtsrelevanz der einzelnen Wirkprinzipien und der Wirkstruktur

Für den Gewichtsrelevanzwert der blauen Lösungsvariante (im Vergleich zur Vorgängerlösung in rot) ergibt sich somit:

$$\begin{aligned}
 G_L &= \frac{1}{\sum_i G_{L,i}} = \frac{1}{\sum_i i_{TF,i} \cdot g_{L,i}} \\
 &= \frac{1}{0,28 + 0,192 + 0,21 + 0,08 + 0,036 + 0,05 + 0,04 + 0,04} \quad (6.5) \\
 &= \frac{1}{0,928} \approx 1,078
 \end{aligned}$$

Wie am Relevanzwert zu erkennen ist, würde beim Ändern von zwei Wirkprinzipien („Energie bereitstellen“ anstatt mit „Akku“ durch „Kondensator“ sowie „Drehmoment koppeln“ anstelle von einem „Getriebe“ eine „Kupplung“) die veränderte Wirkstruktur eine deutliche Verbesserung in Bezug auf ein gewichtsoptimiertes Produkt nach sich ziehen würde.

6.2.2.2 Subsystemkonzeptionierung

Ausgehend von der Systemkonzeptionierung und deren Funktions- und Wirkstruktur wird mit einer Dekomposition in Subsysteme die Möglichkeit geboten, die Funktionen detailliert zu betrachten, wobei die Schnittstellen zu den anderen Subsystemen genauestens zu definieren sind. Basierend auf der groben Funktionsstruktur aus Abbildung 6.5 wird die Funktionsstruktur weiter detailliert, wie Abbildung 6.11 zeigt.

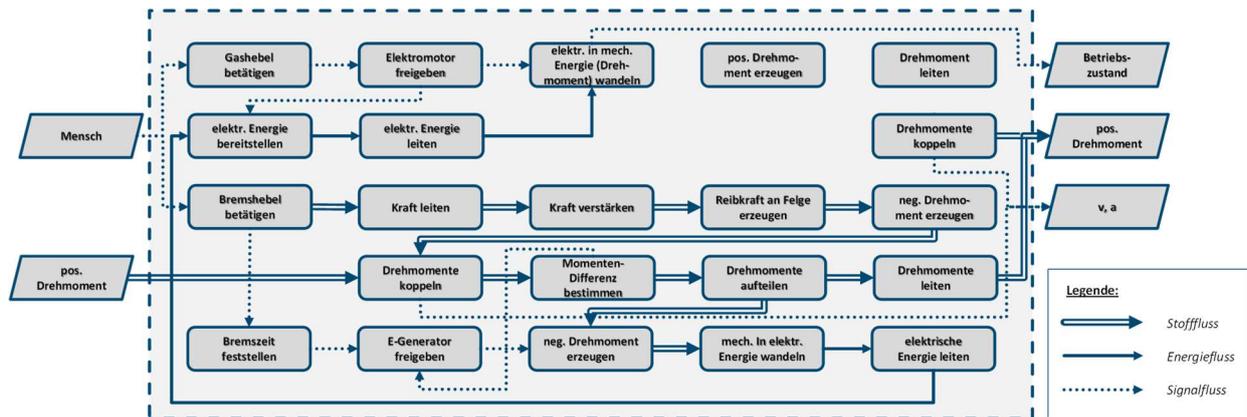


Abbildung 6.11: Detaillierte Funktionsstruktur

Aus dieser detaillierten Funktionsstruktur werden die Subsysteme spezifiziert. So können fünf Subsysteme definiert werden: die Motor-Einheit, die Generator-Einheit, die Speichereinheit für elektrische Energie sowie die Steuereinheit.

6.2.3 Weitere Entwicklungsschritte

Ausgehend von der Subsystemkonzeptionierung erfolgt die Komponentenkonzeptionierung innerhalb der identifizierten Subsysteme, die daraufhin in die Subsysteme integriert werden, wobei weitere Rückschlüsse bezüglich Kompatibilitäten und Gewichtsoptimierungsmöglichkeiten gezogen werden. Gerade in diesen Schritten würde bei genauer Kenntnis der Gewichtsabhängigkeiten eine Betrachtung von sekundären Gewichtseinsparungen eine weitere Gewichtsoptimierung möglich machen.

6.3 Anwendung der Methoden für sekundäre Gewichtsoptimierung

Die Anwendung der sekundären Gewichtsoptimierung kann auf das angegebene Beispiel nicht angewandt werden. Dafür verantwortlich ist einerseits die fehlende Kenntnis der Gewichtseinflussfaktoren bzw. Gewichtsanteile und andererseits schwierige Bestimmung dieser Faktoren für ein vorgegebenes Produkt.

Beispielhaft zur Veranschaulichung der Funktionsweise des mathematischen Ansatzes für sekundäre Gewichtsoptimierungspotenziale wird folgendes (fiktives) Beispiel verwendet. Die ausführlichen Berechnungsschritte werden im Anhang A.2 aufgeführt.

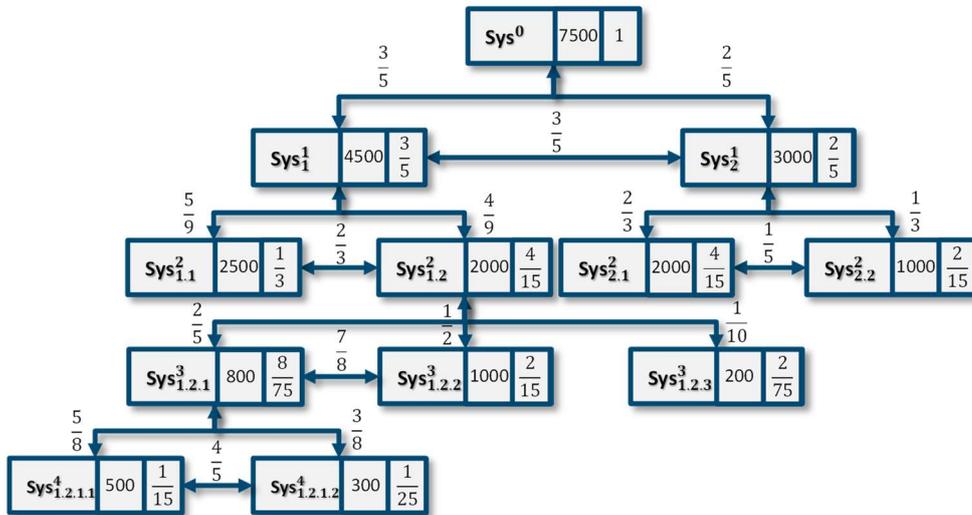


Abbildung 6.12: Beispielsystemhierarchie für die Anwendung des Sekundäransatzes (ähnlich zu [Meis14])

Das Systemnetzwerk besteht aus zwölf Systemelementen, die über fünf verschiedene Systemebenen verteilt sind. Ausgangspunkt ist eine primäre Maßnahme an Subsystem 1.2.1 auf Subsystemebene 3 mit einer Primärgewichtsänderung $P_{1.2.1}^3$ von -10%. Diese primäre Einsparung bewirkt sekundäre Auswirkungen ($S_{1.2.2}^3 = 8,75\%$ und $S_{1.2.3}^3 = 0\%$) auf den Subsystemen in derselben Subsystemgruppe. Die Gesamteinsparung dieser Systemgruppe ergibt sich daher zu 8,375%. Damit kann die Subsystemgruppe als abgeschlossen betrachtet werden, sodass der Einsparungswert auf die nächsthöhere Systemebene übertragen werden kann, wobei dann Subsystem 1.2 als Systemelement mit Primärmaßnahme angesehen wird. Für diese Subsystemgruppe, bestehend aus Subsystem 1.1 und 1.2, ergibt gemäß dem Gewichtseinflussfaktor eine Gewichtsänderung von -6,824%. Dieser Wert übertragen auf Subsystemebene 1 mit den Subsystem 1 und 2 ermöglicht eine Gewichtsänderung dieser Ebene von -5,732%, was der Gewichtsänderung des Gesamtsystems (im bottom-Up-Vorgehen) entspricht.

Durch die sekundären Einsparungen können jetzt in einem zweiten Schritt (top-down-Vorgehensweise) die bis jetzt nicht beteiligten Subsysteme (Subsysteme abhängig von Subsystem 2) betrachtet werden. Hierbei werden die Gewichte der einzelnen Systemelemente neu berechnet, die sich aufgrund der Gewichtsänderung des übergeordneten Systems verändert haben.

Zusätzlich erfolgt in den an den sekundären Einsparungen beteiligten Subsystem (Subsysteme abhängig von Subsystem 1) eine Neuberechnung von Gewichts- und Gesamtgewichtsanteilen.

6.4 Diskussion der Ergebnisse

Die Anwendung der Methoden und Strategien auf das Beispiel des Nachrüstsets ermöglicht die Validierung und Veranschaulichung der in dieser Arbeit vorgestellten Methoden in frühen Entwicklungsphasen. Dabei erfolgt eine besondere Betrachtung der Produktplanungs- und Konzeptphase, die die frühen Phasen des Entwicklungsprozesses abbilden. Die vorgestellten Methoden für die Gewichtsoptimierung in abstrakten Entwicklungsschritten unterstützen die besondere Berücksichtigung von Gewichtskriterien, eine Entscheidung und Zielführung auf ein vorher festgelegtes Gesamtgewichtsziel. Ein weiteres Beispiel für die Validierung wurde bereits in [LuBV14b] vorgestellt. Die Relevanzwerte ermöglichen einen Vergleich zwischen verschiedenen Lösungsstrukturen und unterstützen die Entscheidung in den Analysepunkten, insbesondere während der Hauptphasen. Damit werden Mikrozyklen gefördert. Die Anforderungen der Methodik – Frontloading von Gewichtsoptimierungsmethoden, die Möglichkeit einer ständigen Kontrolle sowie die Reduzierung von Makrozyklen – können somit erfüllt werden.

Durch die Anwendung der Methode der sekundären Gewichtsoptimierung auf einer detaillierten System- bzw. Komponentenbetrachtung in wechselnder Top-Down-/Bottom-Up-Prozedur kann nachgewiesen werden, dass eine Bestimmung von Eigenschaftsänderungen große Auswirkungen auf die Funktionalität des Endproduktes vorweist. Problematisch dabei ist, wie schon vorher berichtet, die Bestimmung der verschiedenen Gewichtseinflussfaktoren. Dies setzt eine gute Kenntnis des Systemverhaltens voraus und bedarf einigen Aufwandes. Vielversprechend sind allerdings die Vorteile in Bezug auf Gewichtsoptimierung bei Anwenden der Methode.

Die Einbindung von vorhandenen mechatronischen Lösungen aus der Technologiesicht in Form des in Kapitel 5.8 vorgestellten Konstruktionskataloges ist an diesem Beispiel nicht validiert worden. Der Katalog bietet aber einen vielversprechenden Ansatz zur Strukturierung und zur Speicherung von bekannten mechatronischen Technologien mit Eignung zur Gewichtsoptimierung. Die Validierung des Katalogeinsatzes erfolgte bereits in den Vorarbeiten [LuSV13] und [LuSV14].

7 Zusammenfassung und Ausblick

7.1 Zusammenfassung

Fokussiert wurde in dieser Arbeit vor allem die Betrachtung von Gewichtskriterien als eine spezielle Form der X-Kriterien aus methodischer und systemtechnischer Sichtweise während der Entwicklung gewichtsoptimierter, mechatronischer Produkte. Die Anwendung von Berechnungswerkzeugen mit Leichtbau-Charakter (z. B. Finite-Elemente-Analysen für Strukturoptimierungen u. v. m.), der Einsatz von modernen Leichtbauwerkstoffen (z. B. Faserverbundwerkstoffe, metallische Leichtbaumaterialien oder Multi-Material-Design) sowie leichtbaugerechten Fertigungsverfahren war nicht im Fokus dieser Abhandlung und wurde nur am Rande erwähnt. Der interdisziplinäre Charakter mechatronischer Systeme stellt besondere Anforderungen an den Entwicklungsprozess, wobei sich hier eher die Gesamtsystemsicht als die domänenspezifische Vorgehensweise herausgebildet hat. Über den gesamten Produktlebenszyklus gesehen adressiert die Methodik im Speziellen den Bereich der Produktentwicklung und Konstruktion, wobei zusätzlich die vorhergehende Produktplanung mitbetrachtet wurde im Gegensatz zu der anschließenden Phase des Produktionsanlaufes. Die Gesamtmethodik basiert im Wesentlichen auf zwei Perspektiven (prozessnahe und produkt-/technologienahe Perspektive), die durch die Definition von verschiedenen Sichtweisen im Rahmenwerk beschrieben werden. Im besonderen Fokus dieser Arbeit stehen die zentrale Sicht der Prozessmodellierung sowie der Methoden und Strategien, wobei die anderen Sichtweisen angeschnitten werden und Möglichkeit bieten für weitere Forschungsarbeiten.

In den vorangegangenen Kapiteln wurde eine Methodik für die gewichtsoptimierte Entwicklung mechatronischer Produkte vorgestellt. Eine ausführliche Analyse über den Stand der Technik und Wissenschaft bezüglich Gewichtsoptimierung technischer Produkte, mechatronischen Entwicklungsmethodiken und des X-gerechten Designs ist in Kapitel 3 durchgeführt worden, nachdem zentrale Begriffe definiert und relevante Grundlagen dargestellt worden sind. Kapitel 4 zeigt, dass gerade bei der Gewichtsoptimierung zwar eine Vielzahl von Möglichkeiten, Methoden und Werkzeuge vorhanden ist, allerdings sind diese meist unabhängig voneinander, oft unsystematisch und relativ spät im Entwicklungsprozess anwendbar. Aus methodischer Sicht fehlt eine ganzheitliche Vorgehensweise bei der Betrachtung von X-Kriterien (hier Gewichtskriterien) über den gesamten Produktentwicklungsprozess. Aus systemtechnischer Sicht bedarf das Finden einer optimalen Lösung nach Gewichtskriterien einer systematischen, systemischen Denkweise, die das

Gesamtsystem in den Fokus stellt. Aus der Gesamtheit der Defizite aus methodischer, systemtechnischer und gewichtsrelevanter Sicht leitet sich der Handlungsbedarf dieser Abhandlung ab, die Entwicklung einer Methodik für gewichtsoptimierte, mechatronische Produkte.

Die Methodik wird im Detail in Kapitel 5 beschrieben. Der Darstellung eines Rahmenwerkes und der Festlegung der Anforderungen an die Methodik folgte die Konzentration auf die Kernpunkte dieser Arbeit. Der zentrale Punkt umfasst die Beschreibung der Prozessmodellierung, der durch die Darstellung von weiteren Gewichtsoptimierungsmethoden und der Schilderung der Einbindung von Technologien und Wissen bezüglich Gewichtsoptimierung ergänzt und unterstützt wird. Das entwickelte Prozessmodell als Kern der Methodik und des Rahmenwerks besteht aus zwei aufeinanderfolgenden Hauptentwicklungsschritten (Konzeptionierung und Detaillierung), die jeweils aus einem aus der VDI-Richtlinie 2206 [VDI2206] bekannten, aber adaptierten V-Modell aufgebaut sind. Die Orientierung an die Richtlinie ermöglicht ein systemisches und systemhierarchisch gestaltetes Vorgehen. Die Hauptphasen selbst enden mit sogenannten Makro-Analysepunkten, die Entwicklungsschritte auf den unterschiedlichen Systemebenen innerhalb der Hauptphasen werden durch Mikro-Analysepunkte voneinander abgetrennt. Durch diese Meilensteine werden die Entwicklungsergebnisse jeder Phase nach gewichtsrelevanten Kriterien geprüft und ermöglichen die Einleitung von Iterationen. Unterstützt wird dieser Prozess durch die vorgestellten Gewichtsoptimierungsstrategien (insbesondere Systemleichtbau) und Gewichtsoptimierungsmethoden. Detailliert sind speziell Methoden für frühe Phasen und sekundäre Optimierungen betrachtet worden. Dabei sind einerseits die Betrachtung von Gewichtskriterien bei der Erstellung von Anforderungen, Funktionen und Wirkprinzipien, andererseits die mathematische Beschreibung und Bestimmung sekundärer Gewichtsoptimierungen aus systemhierarchischer Sicht fokussiert worden. Darüberhinaus ermöglichen die in dieser Arbeit definierten Gewichtsrelevanzwerte eine ganzheitliche und den Entwicklungsprozess begleitende Illustration der Gewichtseigenschaften und einen Vergleich von Entwicklungszwischenergebnissen bezüglich Gewichtskriterien. Neben diesen eher dem Entwicklungsprozess nahestehenden Methoden stellt die Einbindung vorhandener mechatronischer Konzepte und Technologien zur Gewichtsoptimierung und deren Speicherung in einem Konstruktionskatalog einen weiteren wesentlichen Bestandteil des Rahmenwerks und der Methodik dar. Somit basiert die Entwicklung gewichtsoptimierter, mechatronischer Produkte auf zwei Säulen: zum einen aus der Prozesssicht (methodische Gewichtsoptimierung mechatronischer Produkte), zum anderen aus der Produkt- bzw. Technologiesicht (Gewichtsoptimierung durch den Einsatz von mechatronischen Konzepten). Die

Anwendung der Methodik und der Methoden wird durch diverse rudimentäre Software-Tools ergänzt.

Abgerundet wird diese Arbeit in Kapitel 6 durch die Validierung ausgewählter Methoden der beschriebenen Methodik am Beispiel eines Fahrrad-Nachrüstsets als Motor-Generator-Einheit. Im Fokus steht dabei neben der Anwendbarkeit des vorgestellten Entwicklungsprozesses im Besonderen die Überprüfung der entwickelten Methoden.

7.2 Beantwortung der Forschungsfragen

Zu den in Kapitel 1 gestellten initialen Forschungsfragen sind diese nach der Sichtung des Standes der Technik und Wissenschaft und der Ableitung des Handlungsbedarfs als Grundlage dieser Ableitung in Kapitel 4.2 detailliert worden und sollen durch die in Kapitel 5 vorgestellte Methodik beantwortet werden. Ebenso wird Stellung genommen zu den in Kapitel 5.2 adressierten Anforderungen.

F1-a. *Wie gestaltet sich der allgemeine Prozess zur Berücksichtigung von Gewichtseigenschaften bei der Entwicklung mechatronischer Produkte?*

Der Prozess ist so gestaltet, dass sowohl der mechatronische Charakter als auch eine Sichtweise auf Gewichtskriterien berücksichtigt werden. Daher sind zwei Hauptphasen, bestehend aus adaptierten V-Modellen, die der mechatronischen Produktentwicklung gerecht werden, etabliert worden. Diese V-Modelle, die eine für eine Gewichtsoptimierung wichtige Top-Down-/Bottom-Up-Vorgehensweise ermöglichen, sind systemhierarchisch in weitere Mikro-Phasen untergliedert, die jeweils eine Systemebene ansprechen. In diesen Mikro-Phasen stehen über den gesamten Entwicklungsprozess z. T. auch neu entwickelte Methoden zur Verfügung, die die Gewichtsoptimierung unterstützen.

F1-b. *Wie werden die Gewichtseigenschaften während der Entwicklung kontrolliert, überwacht und angepasst?*

Die Gewichtseigenschaften, die sich von der ganz frühen Phase bis hin zu den späten Entwicklungsphasen von geschätzten, eher ungenauen zu berechneten und genau bestimmten Werten entwickeln, werden mithilfe von Analysepunkten kontrolliert, die bei möglichen Entscheidungen Iterationen einleiten können. Dabei werden Makro- und Mikro-Analysepunkte unterschieden, die die Hauptphasen bzw. Mikrophasen abschließen. Mikro-Iterationen, ausgelöst in Mikro-Analysepunkten, sind Makro-Iterationen zu bevorzugen. Die Analysepunkte selbst werden nach Art

der Analyse, Art der Ergebnisse, Art des Analysegegenstandes und der Systemebene unterschieden. Desweiteren ermöglichen die vorgestellten Gewichtsrelevanzwerte einen Vergleich zwischen verschiedenen Lösungen auf unterschiedlichen Abstraktionsebenen für die gleiche Problemstellung.

F1-c. *In welcher Weise kann bereits in frühen Phasen Einfluss auf das Gewicht des späteren Produktes genommen werden?*

Durch die Verlagerung der Aktivitäten der Gewichtsoptimierung von den späten in die frühen Phasen kann gemäß dem Paradoxon der Konstruktion [Ehrl09] großer Einfluss auf das Gewicht des Endproduktes genommen werden. Mit der Einführung für ein Vorgehen für eine Gewichtsoptimierung in frühen Entwicklungsphasen (vor allem die Abstraktionsebenen der Anforderungen, Funktionen und Wirkprinzipien), der Anpassung bekannter Methoden nach Gewichtsaspekten und der Etablierung neuer Methoden kann bereits zu einem frühen Zeitpunkt im Entwicklungsprozess der Gewichtsoptimierung Rechnung getragen werden und potenzielle schlechte – im Hinblick auf Gewichtskriterien – Lösungen identifiziert und nicht weiter verfolgt werden.

F2-a. *Welche Bedeutung kommt den traditionellen Leichtbaustrategien und den Methoden der (mechatronischen) Produktentwicklung zu?*

Die traditionellen Leichtbaustrategien bleiben unangetastet und werden durch den besonders betrachteten Systemleichtbau, der die gesamte Aufgabe der Gewichtsoptimierung umfasst, zu gewissen Zeitpunkten eingesetzt. Allerdings ermöglichen die klassischen Leichtbaustrategien oft nur eine Einflussnahme in späten Entwicklungsphasen (Material-, Form-, Fertigungsleichtbau).

F2-b. *Wie müssen diese Strategien und Methoden angepasst werden?*

Die Methoden der (mechatronischen) Produktentwicklung sind in der Art angepasst worden, dass stetig der Fokus auf eine Gewichtsoptimierung aufrecht gehalten werden kann. So werden in dieser Arbeit durchaus bekannte Methoden (z. B. beim Erstellen oder Verändern einer Funktionsstruktur) in der Art umgesetzt oder adaptiert, dass stets der Hintergedanke einer Gewichtsoptimierung existiert.

F3-a. *In welcher Weise spielen Gewichtsänderungen innerhalb des Produktes während der Entwicklung eine Rolle? Wie können diese repräsentiert werden?*

Gewichtsänderungen von Komponenten oder Subsystemen, bedingt durch geänderte Anforderungen oder Randbedingungen, während des Entwicklungsprozesses stellen den Entwickler vor

große Probleme, da diese Änderungen oftmals weitreichende Folgen durch die Weitergabe dieser Gewichtsänderungen auf andere Systemteile nach sich ziehen. Das Ziel ist diese sogenannte Gewichtsweitergabe zum Vorteil der Gewichtsoptimierung des Gesamtsystems zu nutzen, wobei eine lokale Gewichtsverschlechterung in Kauf genommen werden kann.

F3-b. *Welchen Beitrag können die Systemtechnik und das Systems Engineering leisten?*

Mithilfe der Systemtechnik werden jedem Systembestandteil Gewichtsanteile und Gewichtseinflussfaktoren zugeordnet, die durch den vorgestellten mathematischen Ansatz bei einer Gewichtsänderung eines Systembestandteils zum Tragen kommen. Somit können sowohl top-down als auch bottom-up sekundäre Potenziale identifiziert werden und umgesetzt werden. Desweiteren ermöglicht der Einsatz einer Sensitivitätsanalyse die Identifizierung desjenigen Systembestandteils (meist auf der untersten Systemebene hierarchisch gesehen), der am besten geeignet ist, um eine bestimmte Gewichtsänderung des Gesamtsystems hervorzurufen.

F4-a. *Wie können (bereits vorhandene, technologisch bewährte) mechatronische Konzepte zur Gewichtsoptimierung eines Produktes beitragen? Welche Anforderungen müssen mechatronische Konzepte erfüllen, um zur Gewichtsoptimierung beitragen zu können?*

Mechatronische Konzepte und Technologien sind durchaus in der Lage, zu der Gewichtsoptimierung eines Produktes beizutragen. Da der Einsatz mechatronischer Komponenten oftmals eine Funktionsintegration mit sich bringt, besteht durch die Einbindung dieser in ein technisches Produkt eine Gewichtsoptimierung in der Art, dass die durch die Funktionsverlagerung nicht mehr benötigten Systembestandteile (Komponenten, Subsysteme) aus dem Gesamtsystem ausgeschlossen werden.

Die mechatronischen Konzepte müssen einerseits derart eingeteilt werden, dass der richtige Zeitpunkt für die Einbindung in den Entwicklungsprozess gewählt werden kann, andererseits muss erkenntlich sein, welche Funktionen anderer bestehender Systembestandteile übernommen werden können. Darüberhinaus darf das allgemeine Integrationspotenzial einer mechatronischen Lösung in die übergeordnete Systemebene nicht mit allzu großen Aufwand verbunden sein.

F4-b. *Wo im Prozess können diese mechatronischen Konzepte eingesetzt werden?*

Die Einbindung dieser mechatronischen Konzepte in den Entwicklungsprozess ist in allen Abstraktionsebenen und zu allen Zeitpunkten möglich. Abhängig von der Abstraktheit der mechat-

ronischen Technologie oder des Konzeptes wird die Lösung der entsprechenden Abstraktionsebene zu geordnet. Dadurch können gewisse Entwurfs- und Konstruktionsaktivitäten übersprungen werden; lediglich eine Anpassung an die gegebene Aufgabenstellung ist durchzuführen.

F4-c. *Wie können mechatronische Konzepte dem Konstrukteur/Entwickler zur Verfügung gestellt werden? Welche Arten der Wissensspeicherung sind sinnvoll?*

Die erwähnten mechatronischen Konzepte und Technologien werden in dem entwickelten Konstruktionskatalog als Lösungen (explizites Wissen) bereitgestellt. Der Katalog ist entsprechend den bekannten Hauptkategorien der Konstruktionskataloge nach [Roth00a] aufgebaut, wobei die einzelnen Kategorien einen speziellen Aufbau aufweisen. Durch eine bestimmte Vorgehensweise beim Zugriff auf den Konstruktionskatalog können die für die Problemstellung besten Lösungen angezeigt werden.

7.3 Fazit und Ausblick

Das in dieser Arbeit vorgestellte Rahmenwerk und die daraus abgeleitete Methodik ist besonders in Bezug auf die Prozess-, Methoden- und Systemverständnissicht betrachtet worden. Desweiteren sind die Sichten der Technologien, der Wissensspeicherung sowie der Tools und Werkzeuge angeschnitten und erste Konzepte sowie Software-Prototypen vorgestellt. Diese Sichten sowie die Sichtweise der Organisation bergen bei einer ausführlichen Analyse und Untersuchung großes Potenzial, die Methodik zu erweitern und weiter auszuverfeinern.

Eine weiterführende Untersuchung mechatronischer Technologien mit Potenzial zu Gewichtsoptimierungen in Verbindung mit dem Wissensaspekt, wie diese Technologien gespeichert und auch wieder zur Verfügung gestellt werden können, was bereits mit dem Ansatz des Konstruktionskataloges in dieser Arbeit vorgestellt worden ist, kann diese Sichten weiter ausbauen. Dazu notwendig ist eine detaillierte Analyse einer Vielzahl mechatronischer Konzepte und Lösungen sowie deren Beurteilung nach bestimmten Kriterien, die eine Gewichtsoptimierung begünstigen. Durch die Einbindung in einen Konstruktionskatalog können diese Konzepte über den gesamten Entwicklungsprozess bereitstehen. Eine softwaretechnische Umsetzung in Form von Datenbanken oder weiteren Tools kann effizienzsteigernd wirken.

Die detaillierte Betrachtung der Organisationssicht stellt eine Möglichkeit dar, einerseits die Produktentwicklung unter Gewichtsoptimierungsaspekten besser in bestehende Organisations-

strukturen in Unternehmen einzubinden und andererseits daraus abgeleitet die Verantwortlichkeiten bei Entscheidungsfragen mit Hilfe der Nachverfolgung des Gewichtes des zu entwickelnden Produktes über den gesamten Entwicklungsprozess zu verteilen.

Die Erweiterung des vorgestellten mathematischen Ansatzes zur Bestimmung sekundärer Gewichtseinsparpotenziale mit momentaner Anwendung auf Systeme mit einfach hierarchischer Struktur auf Baustrukturbene würden die Beschreibung von Eigenschaftsänderung von Systemen vereinfachen, nicht nur in Bezug auf Gewichtsaspekte, sondern auch auf andere konkurrierende X-Kriterien. Voraussetzung dafür ist die Kenntnis der Gewichtsanteile und der Gewichtseinflussfaktoren, wobei die Datengewinnung einen großen Aufwand bedeutet. Durch eine Erweiterung des Ansatzes kann es möglich sein, auch komplexere Systeme einfach auf ihre Einsparpotenziale nicht nur auf Bauebene, sondern auch auf funktionaler und prinzipieller Abstraktionsebene zu untersuchen. Somit können schon relativ früh im Entwicklungsprozess Aussagen darüber getroffen werden, wie sich eine Änderung (sei es bei der Funktionsstruktur, bei den Wirkprinzipien oder bei der physikalischen Struktur eines Produktes) bezüglich des Gewichtes auf das Gesamtsystem auswirkt. Desweiteren müssen Verfahren entwickelt werden, die es ermöglichen, Systembausteine mit mehreren Aus- und Eingängen zu berücksichtigen. Als Beispiel sei hier ein möglicher Einsatz und die Integration in den bestehenden Ansatz von Szenariotechniken zu nennen. Darüberhinaus kann durch den Übergang vom eindimensionalen Problem der Gewichtsbeurteilung in skalarer Beschreibung zu einer mehrdimensionalen Betrachtung anderer Kriterien in vektorieller oder matrizieller Beschreibung die Entscheidung bei multikriteriellen Problemen eindeutig vereinfacht werden. Zusätzlich ist mit einer softwaretechnischen Umsetzung bzw. Erweiterung des bestehenden Software-Tools eine Zeit- und Effizienzsteigerung möglich.

Desweiteren zeigt das Frontloading von Gewichtsoptimierungsaktivitäten aus späten mit klassischen Leichtbaustrategien zu frühen Phasen mit neuen Methoden und Strategien Potenzial zu einer verbesserten Gewichtsoptimierung. Erste Methoden wie Funktionsstruktur, Wirkprinzipien und Wirkstrukturen bezüglich einer Gewichtsoptimierung sind vorgestellt worden. Somit sind bereits im frühen Stadium des Entwicklungsprozesses Aussagen über eine Gewichtsrelevanz bestimmter Strukturen möglich. Eine Aussage bereits in frühen Phasen über Gewichtseigenschaften des späteren Produktes fällt aufgrund der typischen Unsicherheiten schwer, es kann aber immerhin eine Entscheidung, ob die durchgeführten Aktivitäten die Gewichtseigenschaften begünstigen oder verschlechtern. Durch eine Detaillierung dieser Methoden bzw. die Einführung weiterer

Methoden und die Berücksichtigung dieser Unsicherheiten kann ein weiteres Frontloading begünstigt werden und damit aussagekräftige Ergebnisse bringen.

Die Einführung der Gewichtsrelevanzwerte ermöglicht einen objektiven, normierten Blick bezüglich Gewichtskriterien auf verschieden abstrakte Strukturen des Entwicklungsprozesses zu werfen. Somit wird z. B. die Beurteilung von verschiedenen Funktionsstrukturen nach Gewichtskriterien vereinfacht.

Aus den Erkenntnissen der Analysen und der Validierung in dieser Arbeit zeigt sich, dass die Datenerhebung zur Bestimmung verschiedener Werte (z. B. Gewichtseinflussfaktoren bei der sekundären Gewichtsoptimierung, Wertebestimmung aus Vorgängerprodukten, u. a.) ein Hindernis darstellt. Dies stellt einen Ansatzpunkt für weitere Forschungsarbeiten dar, inwieweit Werte und Daten aus Benchmarks oder Produktanalysen den Entwicklungsprozess beeinflussen.

Verbesserungsmöglichkeiten zur Methodik bieten sich weiterhin bei einer Einbeziehung anderer Phasen des Produktlebenszyklus, insbesondere die frühe Integration von verschiedenen Aspekten der Produktionsentwicklung oder des Produktnutzungsverhalten im Rahmen eines Concurrent Engineering Rahmenwerkes. Dabei wird beispielsweise die Strategie des Fertigungsleichtbaus durch die Berücksichtigung von Herstellungs-, Montage- und anderen Produktionsaspekten unterstützt, die Strategie des Bedingungsleichtbaus hingegen durch die Erkenntnisse aus Nutzungs- und Entsorgungsphase des Produktlebenszyklus.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Einbindung von Nachhaltigkeitsaspekten, hier in Form von gewichtsrelevanten Kriterien und Eigenschaften, ein wesentlicher Bestandteil der zukünftigen Produktentwicklung weltweit sein wird. Als eine mögliche Lösung zur Betrachtung der Nachhaltigkeit in der Produktentwicklung wird die Gewichtsoptimierung angesehen, die in dieser Abhandlung auf Grundlage der zukunftssträchtigen mechatronischen Technologien, Konzepte und einer entsprechenden Prozessgestaltung einen Ansatz zur Integration in einen Entwicklungsprozess bietet und die daraus resultierend weitere Ansatzpunkte für zukünftige Arbeiten auf diesem Forschungsgebiet zeigt.

8 Literaturverzeichnis

- [Aber06] Aberdeen Group: *The Mechatronics System Design Benchmark Report*. Aberdeen Group, Inc., Boston. 2006
- [ADL05] Arthur D. Little Unternehmensberatung: *Markt- und Technologiestudie Leistungselektronik Automotive 2015*. Arthur D. Little GmbH. Frankfurt. 2005
- [ALBR12] Alonso, E.; Lee, T.; Bjelkengren, C.; Roth, R.; Kirchain, R.: *Evaluating the Potential for Secondary Mass Savings in Vehicle Lightweighting*. In: *Environmental Science & Technology*, vol. 46, no. 5. 2012. S. 2893–2901
- [ALBu11] Albers, A.; Burkhardt, N.: *Systemleichtbau – ganzheitliche Gewichtsreduzierung*. In: Henning, F.; Moeller, E. (Hrsg.): *Handbuch Leichtbau*. München, Hanser. 2011. S. 115-132
- [Andr05] Andreasen, M.: *Concurrent Engineering - effiziente Integration der Aufgaben im Entwicklungsprozess*. In: Schächli, B.; Andreasen, M.; Kirchgeorg, M.; Radermacher, F. (Hrsg.): *Handbuch Produktentwicklung*. München, Hanser. 2005. S. 293-316
- [AnMo97] Andreasen, M.: *Basic thinking patterns and working methods for multiple DfX*. In: Meerkamm, H. (Hrsg.): *Beiträge zum 8. Symposium Design for Manufacturing*. Erlangen, Lehrstuhl für Konstruktionstechnik. 1997. S. 7-12
- [AWRH13] Albers, A.; Wagner, D.; Ruckpaul, A.; Hessenauer, B.; Burkhardt, 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*, vol. 5: *Design for X/Design to X*. Seoul, Design Society. 2013. S. 301-310
- [Band07] Bandte, H.: *Komplexität in Organisationen: Organisationstheoretische Betrachtungen und agentenbasierte Simulation*. Wiesbaden, Deutscher Universitäts-Verlag. 2007
- [Baue03] Bauer, S.: *Design for X – Ansätze zur Definition und Strukturierung*. In: Meerkamm, H. (Hrsg.): *Beiträge zum 14. DfX-Symposium*. Erlangen, Lehrstuhl für Konstruktionstechnik. 2003. S. 1-8

- [Baue05] Bauer, S.: *Visualisierung von DfX-Anforderungen in der Produktentwicklung auf Basis ihrer Wechselwirkungen – Methode und Anwendungen*. In: Meerkamm, H. (Hrsg.): Beiträge zum 16. DfX-Symposium. Erlangen, Lehrstuhl für Konstruktionstechnik. 2005. S. 1-10
- [Baue07] Bauer, S.: *Konzept und Umsetzung eines Systems zur strukturierten Sammlung und Bereitstellung von DfX-Richtlinien*. In: Meerkamm, H. (Hrsg.): Beiträge zum 18. DfX-Symposium. Erlangen, Lehrstuhl für Konstruktionstechnik. 2007. S. 13-22
- [Baue09] Bauer, S.: *Entwicklung eines Werkzeugs zur Unterstützung multikriterieller Entscheidungen im Kontext des Design for X*. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 1, Band 404. Düsseldorf, VDI-Verlag. 2009
- [Bend05] Bender, K.: *Embedded Systems – Qualitätsorientierte Entwicklung*. Berlin, Springer. 2005
- [Bion13] BionX International Corporation: *BionX Systeme 2014*. BionX International Corporation. 2013
- [Bion14] BionX International Corporation: *BionX Benutzerinformation*. BionX International Corporation. 2014
- [Birk80] Birkhofer, H.: *Analyse und Synthese der Funktionen technischer Produkte*. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 1, Band 70. Düsseldorf, VDI-Verlag. 1980
- [Bish08] Bishop, R.: *Mechatronic Systems, Sensors, and Actuators – Fundamentals and Modelling*. Boca Raton, CRC Press. 2008
- [Bjel08] Bjelkengren, C.: *The impact of mass decomposing on assessing the value of vehicle lightweighting*. Master Thesis, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge. 2008
- [BICH09] Blessing, L.; Chakrabarti, A.: *DRM, a Design Research Methodology*. Dordrecht, Springer. 2009
- [Brus96] van Brussel, H.: *Mechatronics – A Powerful Concurrent Engineering Framework*. In: IEEE ASME transactions on mechatronics, vol. 1, no. 2. 1996. S. 127-136

- [BuMV07] Burr, H.; Mueller, M.; Vielhaber, M.: *EIMS – A framework for engineering process analysis*. In: Bocquet, J. (Hrsg.): Proceedings of the 16th International Conference on Engineering Design ICED '07, section: Innovation. Paris, The Design Society. 2007. Paper No. DS42_P_428
- [CISE01] Clarkson, P.; Simons, C.; Eckert, C.: *Prediction Change Propagation in Complex Design*. In: Proceedings of DETC '01 - ASME 2001 Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference. Pittsburgh, American Society of Mechanical Engineers. 2001. Paper ID: DECT2001/DTM-21698
- [Coop90] Cooper, R: *Stage-Gate Systems: A New Tool for Managing New Products*. In: Business Horizons, vol. 33, no. 3. 1990. S. 44-54
- [Crai08] Craig, K.: *Mechatronic Design - Energy Efficiency and Sustainability*. In: Design News, vol. 63, no. 18. 2008. S. 18
- [DaVG05] Dahm, H.; Voigt, B.; Gatzka, R.: *Computer Aided Weight Management aus der Praxis*. In: Grote, K. (Hrsg.): Tagungsband Drittes Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik. Aachen, Shaker. 2005. S. 225-234
- [DaVG06] Dahm, H.; Gatzka, R.; Voigt, B.: *Fahrzeugdiät durch Computer Aided Weightmanagement*. In: Verkehr und Technik, Nr. 7. 2006. S. 265-269
- [DeLu09] Degischer, P.; Lüftl, S.: *Leichtbau. Prinzipien, Werkstoffauswahl und Fertigungsvarianten*. Weinheim, Wiley-VCH. 2009
- [DIN EN12973] Deutsches Institut für Normung: *DIN EN 12973 – Value Management*. Berlin, Beuth. 2002
- [DIN69910] Deutsches Institut für Normung: *DIN 69910 – Wertanalyse*. Berlin, Beuth. 1987
- [Dohr14] Dohr, F.: *Methodik für die simulationsbasierte Entwicklung mechatronischer Systeme*. Dissertation, Naturwissenschaftlich-Technische Fakultät II - Physik und Mechatronik, Universität des Saarlandes. Saarbrücken, Saarländische Universitäts- und Landesbibliothek. 2014.
- [DoSV13] Dohr, F.; Stoffels, P.; Vielhaber, M.: *Early System Simulation to Support Eco-Design of Vehicle Concepts*. In: Abramovici, M.; Stark, R. (Hrsg.): Smart Product Engineering – Proceedings of the 23rd CIRP Design Conference. Berlin, Springer. 2013. S. 999-1008

- [DoVi12] Dohr, F.; Vielhaber, M.: *Toward Simulation-Based Mechatronic Design*. In: Marjanovic, D.; Storga, M.; Pavkovic, N.; Bojcetic, N. (Hrsg.): Proceedings of the 12th International Design Conference – DESIGN 2012. Dubrovnik, University of Zagreb / Design Society. 2012. S. 411-420
- [DoVi13] Dohr, F.; Vielhaber, M.: *Process Model for Simulation-Based Mechatronic Design*. In: Dankowicz, H.; Quinn, D. (Hrsg.): Proceedings of ASME 2013 International Design Engineering Technical Conferences. New York, American Society of Mechanical Engineers. 2013. Paper ID: DECT2013-13116
- [Drec07] Drechsler, K.: *Leichtbau. Entwicklung, Bedeutung und Disziplinen*. In: Engler, U. (Hrsg.): Themenheft Forschung, Nr. 3: Leichtbau. Universität Stuttgart. 2007. S. 6-14
- [EGBU10] Eckstein, L.; Göbbels, R.; Biermann, J.; Urban, P.: *Analyse der sekundären Gewichtseinsparung*. FAT-Schriftenreihe Nr. 230. Berlin, Verband der Automobilindustrie. 2010
- [EGGH13] Ellenrieder, G.; Gänsicke, T.; Goede, M.; Herrmann, H.: *Die Leichtbaustrategien*. In: Friedrich, H. (Hrsg.): Leichtbau in der Fahrzeugtechnik. Wiesbaden, Vieweg & Teubner. 2013. S. 43-118
- [EGGL11a] Eckstein, L.; Göbbels, R.; Goede, M.; Laue, T.; Wohlecker, R.: Analyse sekundärer Gewichtseinsparpotenziale in Kraftfahrzeugen. In: Automobiltechnische Zeitschrift, vol. 112, no. 1. 2011. S. 68-76
- [EGGL11b] Eckstein, L.; Göbbels, R.; Goede, M.; Laue, T.; Wohlecker, R.: *Analysis of Secondary Weight Reduction Potentials in Vehicles*. In: ATZ worldwide, no. 1. 2011. S. 52-60
- [Ehrl09] Ehrlenspiel, K.: *Integrierte Produktentwicklung – Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit*. München, Hanser. 2009
- [EiGB13] Eisenbart, B.; Gericke, K.; Blessing, L.: *An analysis of functional modeling approaches across disciplines*. In: Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing, vol. 27, special issue 3. 2013. S. 281-289
- [EiRZ14] Eigner, M.; Roubanov, D.; Zafirov, R.: *Modellbasierte virtuelle Produktentwicklung*. Berlin Heidelberg, Springer Vieweg. 2014
- [Eisn02] Eisner, H.: *Essential of Project and Systems Engineering Management*. New York, Wiley. 2002

- [EKLM07] Ehrlenspiel, K.; Kiewert, A.; Lindemann, U.; Mörtl, M.: *Kostengünstig Entwickeln und Konstruieren*. Berlin Heidelberg, Springer. 2007
- [Enge06] Engeln, W.: *Methoden der Produktentwicklung*. München, Oldenbourg Industrieverlag. 2006
- [EnWe00] Endebrock, K.; Welp, E.: *Zielkostenorientierte Kostenbeurteilung in der Konzeptphase der Produktentwicklung*. In: VDI-Berichte Band 1558: Erfolgreiche Produktentwicklung. Düsseldorf, VDI-Verlag. 2000. S. 199-217
- [EpBr12] Eppinger S.; Browning, T.: *Design structure matrix methods and applications*. Cambridge, MIT Press. 2012
- [Este08] Estefan, J.: *Survey of Model-Based Systems Engineering (MBSE) Methodologies*. Seattle, INCOSE. 2008
- [FAA06] Federal Aviation Administration: *Systems Engineering Manual*. 2006
- [Fahr02] Fahrni, L.: *Erfolgreiches Benchmarking in Forschung und Entwicklung, Beschaffung und Logistik*. München, Hanser. 2002
- [FeGr13] Feldhusen, J.; Grote, K. (Hrsg.): *Pahl/Beitz: Konstruktionslehre – Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung*. Berlin Heidelberg, Springer. 2013
- [FeKl89] Feyerabend, F.; Klemens, U.: *Verfahren zur Gewichtsreduzierung*. In: *Der Konstrukteur*, no. 6. 1989. S. 88-93
- [Feye91a] Feyerabend, F.: Einführung und Industriebeispiel: Wertanalyse Gewicht. In: *Der Konstrukteur*, no. 7-8. 1991. S. 64-67
- [Feye91b] Feyerabend, F.: Wertanalyse Gewicht. Methodische Gewichtsreduzierung – am Beispiel von Industrierobotern. *Fortschritt-Berichte VDI*, Reihe 1, Nr. 201. Düsseldorf, VDI-Verlag. 1991
- [FiKR07] Field, K.; Kirchain, R.; Roth, R.: *Process Cost Modelling – Strategic Engineering and Economic Evaluation of Materials Technologies*. In: *The Journal of the Minerals, Metals & Materials Society*, vol. 59, no. 11. 2007. S. 21-32
- [Fisc11] Fischer, F.: *Funktionsintegrative Mischverbunde für den Systemleichtbau*. Dissertation, Fakultät für Maschinenwesen, Technische Universität Dresden. München, Verlag Dr. Hut. 2011
- [Frie13] Friedrich, H. (Hrsg.): *Leichtbau in der Fahrzeugtechnik*. Wiesbaden, Springer Vieweg. 2013

- [GAPW93] Grabowski, H.; Anderl, R.; Polly, A.; Warnecke, H.: *Integriertes Produktmodell*. Berlin, Beuth. 1993
- [GaSW07] Gausemeier, J.; Stoll, K.; Wenzelmann, C.: *Szenario-Technik und Wissensmanagement in der strategischen Planung*. In: Gausemeier, J. (Hrsg.): 3. Symposium für Vorausschau und Technologieplanung, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 219. Paderborn. 2007. S. 3-30
- [GJPK11] Gumpinger, T.; Jonas, H.; Plaumann, B.; Krause, D.: *A Visualization Concept for Supporting Module Lightweight Design*. In: Culley, S.; Hicks, B.; McAloone, T.; Howard, T.; Dong, A. (Hrsg.): Proceedings of the 18th International Conference on Engineering Design ICED '11, vol. 10: Design Methods and Tools II. 2011. S. 349-359
- [Goed07] Goede, M.: *Karosserieleichtbau als Baustein einer CO₂-Reduzierungsstrategie*. In: Lehrstuhl für Verbrennungskraftmaschinen Aachen; Institut für Kraftfahrzeugwesen; VDI-Gesellschaft Fahrzeug- und Verkehrstechnik (Hrsg.): 16. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik. 2007.
- [Gran12] Granzow, S.: *Mechatronische Schwingungstilger in Fahrzeugen - Ganzheitliche Massen- und Energiebilanz*. Dissertation, Fakultät für Maschinenwesen, Technische Universität München. München. 2012
- [GSRK09] Goede, M.; Stehlin, M.; Rafflenbeul, L.; Kopp, G.; Beeh, E.: *Super Light Car - lightweight construction thanks to a multi-material design and function integration*. In: European Transport Research Review, vol. 1, no. 1. 2009. S. 5-10
- [GuJK09] Gumpinger, T.; Jonas, H.; Krause, D.: *New Approach for Lightweight Design - From Differential Design to Integration of Functions*. In: Norell Bergendahl, M.; Grimheden, M.; Leifer, L.; Skogstad, P.; Lindemann, U. (Hrsg.): Proceedings of ICED '09, the 17th International Conference on Engineering Design, vol. 6: Design Methods and Tools 2. Stanford, Design Society. S. 201-210
- [GuKr08] Gumpinger, T.; Krause, D.: *Potenziale der Methode Funktionsintegration beim Leichtbau von Flugzeugküchen*. In: Meerkamm, H. (Hrsg.): Beiträge zum 19. DfX-Symposium. Erlangen, Lehrstuhl für Konstruktionstechnik. 2008. S. 111-118

- [GuKr11a] Gumpinger, T.; Krause, D.: *Development of Modular Products under Consideration of Lightweight Design*. In: Culley, S.; Hicks, B.; McAlloone, T.; Howard, T.; Dong, A. (Hrsg.): *Proceedings of the 18th International Conference on Engineering Design ICED '11*, vol. 4: Product and Systems Design. 2011. S. 175-184
- [GuKr11b] Gumpinger, T.; Krause, D.: *Tracing of Weight Propagation for Modular Product Families*. In: Eppinger, Steven D.; Maurer, M.; Eben, K.; Lindemann, U. (Hrsg.): *Proceedings of the 13th International DSM Conference – Invest on Visualization*. München, Hanser. 2011. S. 103-114
- [Hald97] Haldenwanger, G.: *Zum Einsatz alternativer Werkstoffe und Verfahren im konzeptionellen Leichtbau von PKW-Rohkarosserien*. Dissertation, Technische Universität Dresden. Dresden. 1997
- [Hask06] Haskins, C.: *Systems Engineering Handbook - A Guide for System Life Cycle Processes and Activities*. Seattle, International Council on Systems Engineering. 2006
- [HaTF96] Harashima, F., Tomizuka, M., Fukuda, T.: *Mechatronics - 'what is it, why, and how? – An Editorial'*. In: *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 1, no. 1. 1996. S. 1-4
- [HeNZ05] Hehenberger, P.; Naderer, R.; Zeman, K.: *Entwicklungsmethodik und Produktmodelle zur Handhabung von Komplexität und Lösungsvielfalt mechatronischer Systeme während des Produktlebenszyklus*. In: *VDI-Berichte Band 1892: Mechatronik 2005 - Innovative Produktentwicklung*. Düsseldorf, VDI-Verlag. 2005. S. 933-945
- [Hert80] Hertel, H.: *Leichtbau - Bauelemente, Bemessungen und Konstruktionen von Flugzeugen und anderen Leichtbauwerken*. Berlin, Springer. 1980
- [Hert07] Hertel, G.: *Mercer-Studie Autoelektronik*. In: *Automobil-Elektronik*. 2007. S. 26-27
- [Heym05] Heymann, M.: *"Kunst" und Wissenschaft in der Technik des 20. Jahrhunderts - Zur Geschichte der Konstruktionswissenschaft*. Zürich, Chronos. 2005
- [HJSS06] Helton, J.; Johnson, J.; Sallaberry, C.; Storlie, C.: *Survey of Sampling-Based Methods for Uncertainty and Sensitivity Analysis*. In: *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 91, no. 10-11. 2006. S. 1175-1209

- [Huan96] Huang, G.: *Design for X - Concurrent Engineering Imperatives*. London, Chapman & Hall. 1996
- [HuEd96] Hubka, V.; Eder, W.: *Design Science - Introduction to the Needs, Scope and Organization of Engineering Design*. London, Springer. 1996
- [HWFV12] Haberfellner, R.; de Weck, O.; Fricke, E.; Vössner, S.: *Systems Engineering – Grundlagen und Anwendung*. Zürich, Orell Füssli. 2012
- [Iser08] Isermann, R.: *Mechatronische Systeme – Grundlagen*. Berlin, Springer. 2008
- [ISO14062] International Organization for Standardization: *ISO/TR 14062 - Environmental management: Integrating environmental aspects into product design and development*. 2002
- [Jend03] Jendritza, D.: *Modulare Türen mit mechatronischen Modulen*. In: Schmitz, G. (Hrsg.): *Mechatronik im Automobil 2 - Aktuelle Trends in der Systementwicklung für Automobile*. Renningen, expert-Verlag. 2003. S. 31-53
- [Kall15] Kallweit, R.: *Wissensorientierte Gestaltung der Produktentwicklung - Entwicklung eines Ansatzes für die militärische Luftfahrtindustrie in Deutschland*. In: Kern, E. (Hrsg.): *Reihe Wissens-, Qualitäts- und Prozessmanagement, Band 2*. Köln, EUL-Verlag. 2015
- [Karb13] Karbe, E.: *Leichtbau im Automobilbau*. In: i2b Vortragsreihe Leichtbau als Schlüsseltechnologie. Bremen. 2013
- [KaSW12] Kaffenberger, R.; Schulze, S; Weber, H.: *INCOSE Systems Engineering Handbuch*. München, Gesellschaft für Systems Engineering. 2012
- [Klei09] Klein, B.: *Leichtbau - Berechnungsgrundlagen und Gestaltung*. Wiesbaden, Vieweg + Teubner. 2009
- [Klei13] Klein, B.: *Leichtbau - Berechnungsgrundlagen und Gestaltung*. Wiesbaden, Springer Vieweg. 2013
- [KnWe88] Knauer, B.; Wende, A.: *Konstruktionstechnik und Leichtbau - Methodik, Werkstoff, Gestaltung, Bemessung*. Berlin, Akademie-Verlag. 1988
- [KoBM11] Kopp, G.; Burkardt, N.; Majic, N.: *Leichtbaustrategien und Bauweisen*. In: Henning, F.; Moeller, E. (Hrsg.): *Handbuch Leichtbau*. München, Hanser. 2011. S. 57-76

- [Koeh09] Köhler, C.: *Technische Produktänderungen - Analyse und Beurteilung von Lösungsmöglichkeiten auf Basis einer Erweiterung des CPM/PDD-Ansatzes*. Dissertation, Naturwissenschaftlich-Technische Fakultät III, Universität des Saarlandes. Saarbrücken. 2009
- [Krau12] Krause, D.: *Leichtbau*. In: Rieg, F.; Steinhilper, R. (Hrsg.): *Handbuch Konstruktion*. München, Hanser. 2012. S. 463-484
- [KrBl14] Kreis, T.; Blankenburg, S.: *Gewichtsmanagement – Leichtbau intelligent steuern*. In: *lightweight design*, vol. 7, no. 6. 2014. S. 54-57
- [KrFG07] Krause, F.; Franke, H.; Gausemeier, J.: *Innovationspotenziale in der Produktentwicklung*. München, Hanser. 2007
- [KSSB11] Kossiakoff, A.; Sweet, W.; Seymour, S.; Biemer, S.: *Systems Engineering – Principles and Practice*. Hoboken, Wiley-Interscience. 2011
- [LaCz11] Langbein, S.; Czechowicz, A.: *Die Form denkt mit*. In: *MECHATRONIK*, no. 11-12. 2011. S. 20-23
- [Lind07] Lindemann, U.: *A Vision to Overcome "Chaotic" Design for X Processes in Early Phases*. In: Bocquet, J. (Hrsg.): *Proceedings of the 16th International Conference on Engineering Design ICED '07*, section: Design for X. Paris, The Design Society. 2007. Paper No. DS42_P_320
- [Lind09] Lindemann, U.: *Methodische Entwicklung technischer Produkte – Methoden flexibel und situationsgerecht anwenden*. Berlin, Springer. 2009
- [LLRB14] Liebl, J.; Lederer, M.; Rohde-Brandenburger, K.; Biermann, J.; Roth, M.; Schäfer, H.: *Energiemanagement im Kraftfahrzeug - Optimierung von CO2-Emissionen und Verbrauch konventioneller und elektrifizierter Automobile*. Wiesbaden, Springer Vieweg. 2014
- [LuBV14a] Luedeke, T.; Bonertz, R.; Vielhaber, M.: *Weight Optimization Approach for Conceptual Design – Requirements, Functions, Working Principles*. In: Laakso, M.; Ekman, K. (Hrsg.): *Proceedings of 10th NordDesign Conference*. Aalto University, Helsinki. 2014. S. 805-814

- [LuBV14b] Luedeke, T.; Bonertz, R.; Vielhaber, M.: *Gewichtsoptimierung in den frühen Phasen der Entwicklung – Anforderungen, Funktionen, Wirkprinzipien*. In: Rieg, F.; Brökel, K., Feldhusen, J.; Grote, K.; Stelzer, R. (Hrsg.): Tagungsband 12. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik 2014. Bayreuth, Lehrstuhl für Konstruktionslehre und CAD. 2014. S. 407-416
- [LuMV14] Luedeke, T.; Meiser, P., Vielhaber, M.: *Systematic Determination of Secondary Weight Improvements*. In Marjanovic, D.; Storga, M.; Pavkovic, N.; Bojcetic, N. (Hrsg.): Proceedings of the 13th International Design Conference – DESIGN 2014. Dubrovnik, University of Zagreb / Design Society. 2014. S. 283-292
- [LuSV13] Luedeke, T.; Scheid, S.; Vielhaber, M.: *Mechatronische Konzepte zur Gewichtsreduzierung und –verteilung*. In: Bertram, T.; Corves, B.; Janschek, K. (Hrsg.): Tagungsband VDI-Fachtagung Mechatronik 2013. Aachen, Institut für Getriebetechnik und Maschinendynamik. 2013. S. 129-134
- [LuSV14] Luedeke, T.; Scheid, S., Vielhaber, M.: *Weight Optimization with a Mechatronic Design Catalogue*. In: Marjanovic, D.; Storga, M.; Pavkovic, N.; Bojcetic, N. (Hrsg.): Proceedings of the 13th International Design Conference – DESIGN 2014. Dubrovnik, University of Zagreb / Design Society. 2014. S. 1123-1132
- [LuVi12a] Luedeke, T.; Vielhaber, M.: *Lightweight Mechatronics Design – An Integrated Approach*. In: Marjanovic, D.; Storga, M.; Pavkovic, N.; Bojcetic, N. (Hrsg.): Proceedings of the 12th International Design Conference – DESIGN 2012. Dubrovnik, University of Zagreb / Design Society. 2012. S. 999-1008
- [LuVi12b] Luedeke, T.; Vielhaber, M.: *Towards a Process Model for the Development of Light, Mechatronics Products*. In: Hansen, P.K.; Rasmussen, J., Jorgensen, K.; Tollestrup, C. (Hrsg.): Proceedings of 9th NordDesign Conference. Aalborg, Center for Industrial Production. 2012. S. 384-401
- [LuVi13a] Luedeke, T.; Vielhaber, M.: *Early Development of Weight-Optimized Mechatronic Products*. In: Abramovici, M.; Stark, R. (Hrsg.): Smart Product Engineering – Proceedings of the 23rd CIRP Design Conference. Berlin, Springer. 2013. S. 695-704

- [LuVi13b] Luedeke, T.; Vielhaber, M.: *Consideration of Weight Properties during the Design of Weight-Optimized Mechatronic Products*. In: Lindemann, U.; Venkataraman, S.; Kim, Y.S.; Lee, S.W. (Hrsg.): Proceedings of the 19th International Conference on Engineering Design ICED '13, vol. 5: Design for X/Design to X. Seoul, Design Society. 2013. S. 291-300
- [LuVi14a] Luedeke, T.; Vielhaber, M.: *Holistic Approach for Secondary Weight Improvements*. In: Moroni, G.; Tolio, T. (Hrsg.): Proceedings of 24th CIRP Design Conference. Procedia CIRP, vol. 21. Mailand, Elsevier. 2014. S. 218-223
- [LuVi14b] Luedeke, T.; Vielhaber, M.: *Ganzheitliche Integration von „Design for X“-Kriterien in den mechatronischen Produktentwicklungsprozess am Beispiel der Gewichtsoptimierung*. In: Rieg, F.; Brökel, K., Feldhusen, J.; Grote, K.; Stelzer, R. (Hrsg.): Tagungsband 12. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik 2014. Bayreuth, Lehrstuhl für Konstruktionslehre und CAD. 2014. S. 471-480
- [McLe10] McLellan, J.: *A Proposed Method to Identify Requirements Significant to Mass Reduction*. Master Thesis, Graduate School Mechanical Engineering, Clemson University. 2010
- [Meer99] Meerkamm, H.: *Design for X – Vielfalt der Anforderungen versus Zielorientierung*. In: Linde, H. (Hrsg.): Tagungsband WOIS-Symposium 1999. Coburg. 1999. S. 120-131
- [Meis14] Meiser, P.: *Beschreibung von primären und sekundären Gewichtsänderungen in technischen Produkten*. Bachelor-Arbeit, Universität des Saarlandes, Lehrstuhl für Konstruktionstechnik. 2014
- [MMFM09] McLellan, J.; Maier, J.; Fadel, G.; Mocko, G.: *A Method for Identifying Requirements Critical to Mass Reduction Using DSMs and DMMs*. In: Kreimeyer, M.; Maier, J.; Fadel, G.; Lindemann, U. (Hrsg.): Proceedings of the 11th International DSM Conference. München, Hanser. 2009. S 197-205
- [Moeh04] Moehringer, S.: *Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme*. Habilitation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn. Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe Band 156. 2004

- [Moeh09] Moehringer, S.: *Mechatronic Design – Historical Background and Challenges for the Future*. In: Norell Bergendahl, M.; Grimheden, M.; Leifer, L.; Skogstad, P.; Lindemann, U. (Hrsg.): Proceedings of ICED '09, the 17th International Conference on Engineering Design, vol. 4: Product and Systems Design. Stanford, Design Society. S. 333-344
- [MoSt10] Moehringer, S.; Stetter, R.: *A Research Framework for Mechatronic Design*. In: Marjanovic, D.; Storga, M.; Pavkovic, N.; Bojcetic, N. (Hrsg.): Proceedings of the 11th International Design Conference – DESIGN 2010. Dubrovnik, University of Zagreb / Design Society. 2010. S. 885-894
- [MWBK12] Meerkamm, H.; Wartzack, S.; Bauer, S.; Krehmer, H.; Stockinger, A.; Walter, M.: *Design for X (DFX)*. In: Rieg, F.; Steinhilper, R. (Hrsg.): Handbuch Konstruktion. München, Hanser. 2012. S. 445-462
- [NaAn10] Nattermann, R.; Anderl, R.: *Approach for a Data-Management-System and a Proceeding-Model for the Development of Adaptronic Systems*. In: ASME 2010 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, vol. 3: Design and Manufacturing. Vancouver, ASME. 2010. S. 379-387
- [NaAn11] Nattermann, R.; Anderl, R.: *Simulation Data Management Approach for Developing Adaptronic Systems – The W-Methodology*. In: International Scholarly and Scientific Research & Innovation, vol. 5, no. 3. 2011. S. 286-292
- [NaAn13] Nattermann, R.; Anderl, R.: *The W-Model – Using Systems Engineering for Adaptronics*. In: Procedia Computer Science, vol. 16. 2013. S. 937-946
- [Nam010] Namouz, E.: *Mass and assembly time reduction for future generation automotive vehicles based on existing vehicle model*. Master Thesis, Clemson University. Clemson. 2010
- [Niss06] Nissl, A.: *Modell zur Integration der Zielkostenverfolgung in den Produktentwicklungsprozess*. Dissertation, Fakultät für Maschinenwesen, Technische Universität München. München, Dr. Hut. 2006
- [Patz82] Patzak, G.: *Systemtechnik. Planung komplexer innovativer Systeme – Grundlagen, Methoden, Techniken*. Berlin, Springer. 1982
- [PBFG07] Pahl, G.; Beitz, W.; Feldhusen, J.; Grote, K.: *Konstruktionslehre*. Berlin, Springer. 2007

- [PKBR12a] Posner, B.; Keller, A.; Binz, H.; Roth, D.: *Holistic Lightweight Design for Function and Mass: A Framework for the Function Mass Analysis*. In: Marjanovic, D.; Storga, M.; Pavkovic, N.; Bojcetic, N. (Hrsg.): Proceedings of the 12th International Design Conference – DESIGN 2012. Dubrovnik, University of Zagreb / Design Society. 2012. S. 1071-1080
- [PKBR12b] Posner, B.; Keller, A.; Binz, H.; Roth, D.: *Anforderungen an eine Methode zum leichtbaugerechten Konstruieren*. In: Stelzer, R.; Grote, K.; Brökel, K.; Rieg, F.; Feldhusen, J. (Hrsg.): Tagungsband 10. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik 2012. Dresden, TUDpress Verlag der Wissenschaften. 2012. S. 537-548
- [PoBR13a] 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, Fraunhofer. 2013. S. 1-10
- [PoBR13b] 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.): Proceedings of the 19th International Conference on Engineering Design ICED '13, vol. 5: Design for X/Design to X. Seoul, Design Society. 2013. S. 271-280
- [PoBR14a] Posner, B.; Binz, H.; Roth, D.: *Supporting Lightweight Design Potential Assessment in the Conceptual Phase*. In: Marjanovic, D.; Storga, M.; Pavkovic, N.; Bojcetic, N. (Hrsg.): Proceedings of the 13th International Design Conference – DESIGN 2014. Dubrovnik, University of Zagreb / Design Society. 2014. S. 353-362
- [PoBR14b] Posner, B.; Binz, H., Roth, D.: *Development of Working Structure with a Focus on Lightweight Design*. In: Scharf, P.; Weber, C. (Hrsg.): Proceedings of the 58th Ilmenau Scientific Colloquium IWK. Ilmenau, Technische Universität. 2014. Paper ID: 3.1.5
- [PoLi11] Ponn, J.; Lindemann, U.: *Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte - Systematisch von Anforderungen zu Konzepten und Gestaltlösungen*. Berlin, Springer. 2011

- [Rodd12] Roddeck, W.: *Einführung in die Mechatronik*. Wiesbaden, Springer Vieweg. 2012
- [Rode91] Rodenacker, W.: *Methodisches Konstruieren - Grundlagen, Methodik, praktische Beispiele*. Berlin, Springer. 1991
- [Roth00a] Roth, K.: *Konstruieren mit Konstruktionskatalogen. Band 1 – Konstruktionslehre*. Berlin, Springer. 2000
- [Roth00b] Roth, K.: *Konstruieren mit Konstruktionskatalogen. Band 2 - Kataloge*. Berlin, Springer. 2000
- [Rude98] Rude, S.: *Wissensbasiertes Konstruieren*. Aachen, Shaker. 1998
- [SaVe92] Salminen, V.; Verho, A.: *Systematic and innovative design of a mechatronic product*. In: *Mechatronics*, vol. 2, no. 3. 1992. S. 257-275
- [Schi14] Schindler, V.: *Kraftfahrzeugtechnik*. In: Grote, K.; Feldhusen, J. (Hrsg.): *Dubbel – Taschenbuch für den Maschinenbau*. Berlin, Springer. 2014. S. Q2-Q36
- [Schm04] Schmidt, W.: *Methodische Entwicklung innovativer Leichtbau-Produkte*. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 1, Band 369. Düsseldorf, VDI-Verlag. 2004
- [Schw89] Schweitzer, G.: *Mechatronik - Aufgaben und Lösungen*. In: *VDI-Berichte Band 787: Mechatronik im Maschinen- und Fahrzeugbau*. Düsseldorf, VDI-Verlag. 1989. S. 1-15
- [ScLD09] Schuh, G.; Lenders, M.; Bender, D.: *Szenariorobuste Produktarchitekturen*. In: Gausemeier, J. (Hrsg.): *5. Symposium für Vorausschau und Technologieplanung, Verlagsschriftenreihe des Heinz-Nixdorf-Instituts, Band 265*. Paderborn. 2009. S. 99-120
- [ScPM01] Schmidt, W.; Puri, W.; Meerkamm, H.: *Strategies and Rules for Lightweight Design*. In: Culley, S.; Duffy, A.; McMahon, C.; Wallace, K. (Hrsg.): *Proceedings of the 13th International Conference on Engineering Design ICED '01*. Glasgow, Design Society. 2001. S. 27-34
- [ScPu00] Schmidt, W.; Puri, W.: *Systematische Entwicklung gewichtsoptimierter Bauteile*. In: Meerkamm, H. (Hrsg.): *Beiträge zum 11. DfX-Symposium*. Erlangen, Lehrstuhl für Konstruktionstechnik. 2000. S. 37-40
- [ScZu03] Schäuffele, J.; Zurawka, T.: *Automotive Software Engineering: Grundlagen, Prozesse, Methoden und Werkzeuge effizient einsetzen*. Wiesbaden, Vieweg + Teubner. 2003

- [Seid06] Seidenschwarz, W.: *Target Costing*. München, Vahlen. 2006
- [ShAC07] Shishko, R.; Aster, R.; Cassingham, R. C.: *NASA Systems engineering handbook*. National Aeronautics and Space Administration. Washington. 2007
- [Sobe07] Sobek, W.: *Entwerfen im Leichtbau*. In: Engler, U. (Hrsg.): Themenheft Forschung, Nr. 3: Leichtbau. Universität Stuttgart. 2007. S. 70-82
- [Stat14] Statistisches Bundesamt: *Nachhaltige Entwicklung in Deutschland – Indikatorenbericht 2014*. Wiesbaden. 2014
- [Stew81] Steward, D.: *The Design Structure System - A Method for Managing the Design of Complex Systems*. In: IEEE Transactions on Engineering Management, vol. 28, no. 3. 1981. S. 71-74
- [Stoe99] Stößer, R.: *Zielkostenmanagement in integrierten Produkterstellungsprozessen*. Aachen, Shaker. 1999
- [SWRK11] Siddiqi, A.; de Weck, O.; Robinson, B.; Keller, R.: Characterizing the Dynamics of Design Change. In: Culley, S.; Hicks, B.; McAloone, T.; Howard, T.; Dong, A. (Hrsg.): Proceedings of the 18th International Conference on Engineering Design ICED '11, vol. 1: Design Processes. 2011. S. 355-365
- [TeGo11] Teske, L.; Goßmann, H.: *Karosseriebauweisen*. In: Braess, H.; Seiffert, U. (Hrsg.): Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik. Wiesbaden, Vieweg & Teubner. 2011. S. 379-391
- [ThFu00] Thomke, S.; Fujimoto, T.: *The Effect of "Front-Loading" Problem-Solving on Product Development Performance*. In: Journal of Product Innovation Management, vol. 17, no. 2. 2000. S. 128-142
- [Tomi02] Tomizuka, M.: *Mechatronics - from the 20th to 21st century*. In: Control Engineering Practice, vol. 10. 2002. S. 877-886
- [TrHR11] Trautwein, T.; Henn, S.; Rother, K.: *Weight Spiral Adjusting Lever in Vehicle Engineering*. In: ATZ worldwide eMagazine, vol. 113, no. 5. 2011. S. 30-35
- [UIEp08] Ulrich, K.; Eppinger, S.: *Product Design and Development*. Boston, McGraw-Hill/Irwin. 2008
- [UIPr95] Ulrich, P.; Probst, G.: *Anleitung zum ganzheitlichen Denken und Handeln*. Bern, Haupt. 1995
- [VDA11] Verband der Automobilindustrie: *Elektromobilität – Eine Alternative zum Öl*. Berlin. 2011

- [VDI2206] Verein Deutscher Ingenieure: *VDI-Richtlinie 2206 - Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme*. Düsseldorf, VDI-Verlag. 2004
- [VDI2221] Verein Deutscher Ingenieure: *VDI-Richtlinie 2221 - Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte*. Düsseldorf, VDI-Verlag. 1993
- [VDI2222] Verein Deutscher Ingenieure: *VDI-Richtlinie 2222 - Konstruktionsmethodik*. Düsseldorf, VDI-Verlag. 1997
- [VDI2223] Verein Deutscher Ingenieure: *VDI-Richtlinie 2223 – Methodisches Entwerfen technischer Produkte*. Düsseldorf, VDI-Verlag. 2004
- [VDI2800] Verein Deutscher Ingenieure: *VDI-Richtlinie 2800 - Wertanalyse*. Düsseldorf, VDI-Verlag. 2006
- [Vers94] Versteegen, G.: *Softwareerstellung nach dem V-Modell – Von Amts wegen*. In: iX, no. 11. 1994. S. 162-165
- [ViBC10] Vielhaber, M.; Bergsjö, D.; Catic, A.: *Mechatronic Systems Engineering – Theory and Automotive Practice*. In: Marjanovic, D.; Storga, M.; Pavkovic, N.; Bojčević, N. (Hrsg.): *Proceedings of the 11th International Design Conference – DESIGN 2010*. Dubrovnik, University of Zagreb / Design Society. 2010. S. 975-984
- [Viel11] Vielhaber, M.: *Design to Knowledge – A Root Design Principle*. In: Scharf, P.; Kurtz, P. (Hrsg.): *Proceedings of the 56th Ilmenau Scientific Colloquium IWK*. Ilmenau, Technische Universität. 2011
- [Wall95] Wallaschek, J.: *Modellierung und Simulation als Beitrag zur Verkürzung der Entwicklungszeiten mechatronischer Produkte*. In: VDI-Berichte Band 1215: *Simulation in der Praxis – neue Produkte effizienter entwickeln*. Düsseldorf, VDI-Verlag. 1995. S. 35-50
- [WaRD96] Watson, B.; Radcliffe, D.; Dale, P.: *A Meta-Methodology for the Application of DfX Design Guidelines*. In: Huang, G. (Hrsg.): *Design for X – Concurrent Engineering Imperatives*. London, Chapman & Hall. 1996. S. 441-462
- [Wart01] Wartzack, S.: *Predictive Engineering - Assistenzsystem zur multikriteriellen Analyse alternativer Produktkonzepte*. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 1, Band 336. Düsseldorf, VDI-Verlag. 2001

- [Webe05] Weber, C.: *CPM/PDD - An Extended Theoretical Approach to Modelling Products and Product Development Processes*. In: Bley, H.; Jansen, H.; Krause, F.; Shpitalni, M. (Hrsg.): *Proceedings of the 2nd German-Israeli Symposium on Advances in Methods and Systems for Development of Products and Processes*. Stuttgart, Fraunhofer. 2005. S. 159-179
- [Webe07] 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. (Hrsg.): *The Future of Product Development - Proceedings of the 17th CIRP Design Conference*. Berlin, Springer. 2007. S. 85-104
- [Webe12] Weber, C.: *Produkte und Produktentwicklungsprozesse mit Hilfe von Merkmalen und Eigenschaften – eine kritische Zwischenbilanz*. In: Krause, D.; Paetzold, K.; Wartzack, S. (Hrsg.): *Beiträge zum 23. DfX-Symposium*. Hamburg, TUtech. 2012. S 25-62
- [Weck06] de Weck, O.: *A Systems Approach to Mass Budget Management*. In: *Proceedings of the 11th AIAA/ISSMO Multidisciplinary Analysis and Optimization Conference*. Portsmouth, AIAA. 2006. Paper ID: AIAA 2006-7055
- [WeWD03] Weber, C.; Werner, H.; Deubel, T.: *A different view on Product Data Management/Product Life-Cycle Management and its future potentials*. In: *Journal of Engineering Design*, vol. 14, no. 4. 2003. S. 447-464
- [WeWe00] Weber, C.; Werner, H.: *Klassifizierung von CAx-Werkzeugen für die Produktentwicklung auf der Basis eines neuartigen Produkt- und Prozessmodells*. In: Meerckam, H. (Hrsg.): *Beiträge zum 11. DfX-Symposium*. Erlangen, Lehrstuhl für Konstruktionstechnik. 2000. S. 126-143
- [WeWe01] Weber, C.; Werner, H.: *Schlußfolgerungen für "Design for X" aus der Perspektive eines neuen Ansatzes zur Modellierung von Produkten und Produktentwicklungsprozessen*. In: Meerckam, H. (Hrsg.): *Beiträge zum 12. DfX-Symposium*. Erlangen, Lehrstuhl für Konstruktionstechnik. 2001. S. 37-48
- [Wied06] Wiedemann, J.: *Leichtbau – Elemente und Konstruktion*. Berlin, Springer. 2006
- [Wohl05] Wohlers, W.: *Mehrstufige Optimierung komplexer strukturmechanischer Probleme*. Göttingen, Cuvillier. 2005
- [WWW1] Die Welt: *Elektronik-Anteil im Auto – Auf dem Weg zum rollenden Rechenzentrum*. <http://www.welt.de/120418644>. letzter Aufruf: 06.12.2015

- [WWW2] Europäisches Parlament: *CO₂-Emissionen von Neuwagen sollen bis 2020 auf 95g/km CO₂ sinken.* <http://www.europarl.europa.eu/news/de/newsroom/content/20140222STO36702/html/CO2-Emissionen-von-Neuwagen-sollen-bis-2020-auf-95-gkm-CO2-sinken>. letzter Aufruf: 06.12.2015
- [WWW3] SFB Transregio 10: *Fertigungstechnik und Leichtbau.* <http://www.leichtbau.de>. letzter Aufruf: 06.12.15
- [WWW4] Ulrich Alber GmbH: *Neodrives – Electrifying Technology.* <http://www.neodrives.com>. letzter Aufruf: 06.12.2015
- [WWW5] myStromer AG: *Stromer.* <https://www.stromerbike.com/de/de/technologie/st1-technologie>. letzter Aufruf: 07.12.2015
- [WWW6] Go SwissDrive AG: *Go Swissdrive.* <http://www.go-swissdrive.com>. letzter Aufruf: 07.12.2015

A Anhang

A.1 Validierung der Methodik – Frühe Gewichtseinsparmethoden

Methoden der gewichtsintensiven Anforderungen nach McLellan

Binäre Matrix $[R \times C]_{bin}$ (Anforderungen zu Komponenten)

Tabelle A.1: Domain-Mapping-Matrix (binär) des BionX Nachrüstset

	Bremshebel	Motor	Rad	Leitungen	Akku	Bedienkonsole
1.3	0	1	1	0	0	0
1.6	0	0	1	0	0	0
1.10	0	0	1	0	0	0
2.1	0	1	1	0	1	0
2.3	0	1	0	1	1	0
2.4	0	1	0	0	0	0
2.11	1	1	1	1	1	1
2.12	0	1	0	0	0	0
4.2	0	1	0	0	0	0
4.3	1	0	1	1	1	1

Gewichtsmatrix $[R \times C]_{wei}$ (Anforderungen zu Komponenten)

Tabelle A.2: Domain-Mapping-Matrix (Gewicht) des BionX Nachrüstset

	Bremshebel	Motor	Rad	Leitungen	Akku	Bedienkonsole
1.3	0	4,0	0,7	0	0	0
1.6	0	0	0,7	0	0	0
1.10	0	0	0,7	0	0	0
2.1	0	4,0	0,7	0	3,3	0
2.3	0	4,0	0	0,35	3,3	0
2.4	0	4,0	0	0	0	0
2.11	0,05	4,0	0,7	0,35	3,3	0,09
2.12	0	4,0	0	0	0	0
4.2	0	4,0	0	0	0	0
4.3	0,05	0	0,7	0,35	3,3	0,09

Binäre Matrix $[C \times R]_{bin}$ (Komponenten zu Anforderungen)

Tabelle A.3: transponierte Domain-Mapping-Matrix (binär) des BionX Nachrüstset

	1.3	1.6	1.10	2.1	2.3	2.4	2.11	2.12	4.2	4.3
Bremshebel	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1
Motor	1	0	0	1	1	1	1	1	1	0
Rad	1	1	1	1	0	0	1	0	0	1
Leitungen	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1
Akku	0	0	0	1	1	0	1	0	0	1
Konsole	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1

Binäre Matrix $[R \times R]_{bin}$ (Anforderungen zu Anforderungen) aus Matrixmultiplikation von $[R \times C]_{bin}$ und $[C \times R]_{bin}$

Tabelle A.4: Design Structure Matrix (binär) des BionX Nachrüstset

	1.3	1.6	1.10	2.1	2.3	2.4	2.11	2.12	4.2	4.3
1.3	2	1	1	2	1	1	2	1	1	1
1.6	1	1	1	1	0	0	1	0	0	1
1.10	1	1	1	1	0	0	1	0	0	1
2.1	2	1	1	3	2	1	3	1	1	2
2.3	1	0	0	2	3	1	3	1	1	2
2.4	1	0	0	1	1	1	1	1	1	0
2.11	2	1	1	3	3	1	6	1	1	5
2.12	1	0	0	1	1	1	1	1	1	0
4.2	1	0	0	1	1	1	1	1	1	0
4.3	1	1	1	2	2	0	5	0	0	5

Gewichtsmatrix (Anforderungen zu Anforderungen) aus Matrixmultiplikation von $[R \times C]_{weight}$ und $[C \times R]_{bin}$

Tabelle A.5: Design Structure Matrix (Gewicht) des BionX Nachrüstset

	1.3	1.6	1.10	2.1	2.3	2.4	2.11	2.12	4.2	4.3
1.3	4,7	0,7	0,7	4,7	4,0	4,0	4,7	4,0	4,0	0,7
1.6	0,7	0,7	0,7	0,7	0	0	0,7	0	0	0,7
1.10	0,7	0,7	0,7	0,7	0	0	0,7	0	0	0,7
2.1	4,7	0,7	0,7	8,0	7,3	4,0	8,0	4,0	4,0	4,0
2.3	4,0	0	0	7,3	8,0	4,0	7,65	4,0	4,0	3,65
2.4	4,0	0	0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	0
2.11	4,7	0,7	0,7	8,0	7,65	4,0	8,49	4,0	4,0	4,49
2.12	4,0	0	0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	0
4.2	4,0	0	0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	0
4.3	0,7	0,7	0,7	4,0	3,65	0	4,49	0	0	4,49

Funktionsvariation

Variation durch Änderung der Flussart

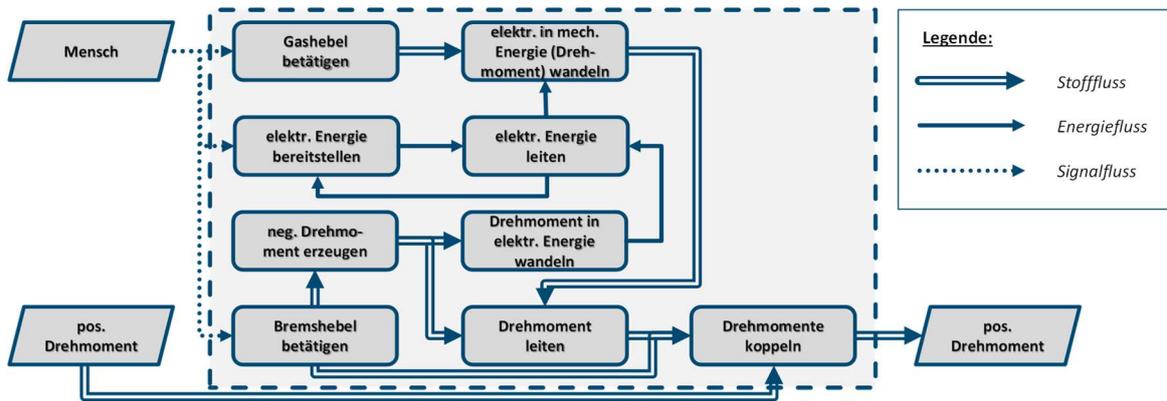


Abbildung A.1: Variation 1 der Funktionsstruktur des Validierungsbeispiels

Variation durch Änderung der Flussart und Anzahl der Funktionen

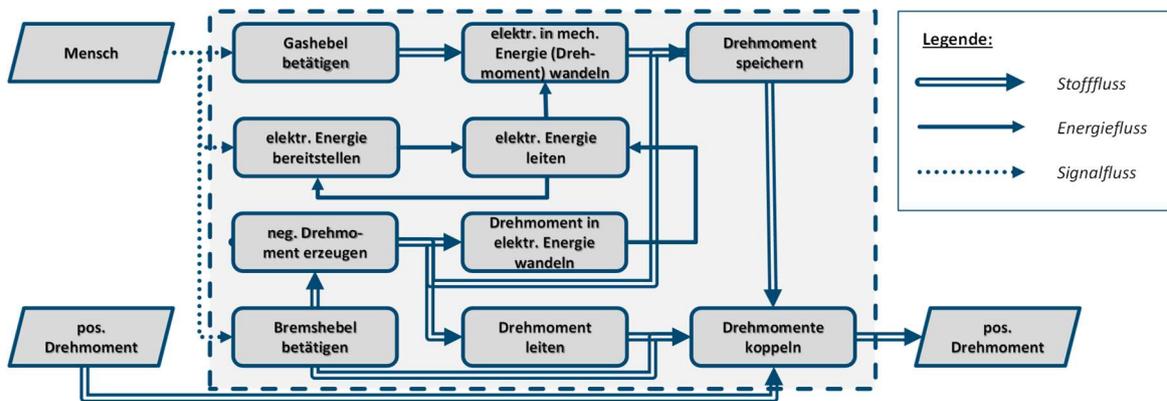


Abbildung A.2: Variation 2 der Funktionsstruktur des Validierungsbeispiels

A.2 Validierung der Methodik – Methoden in zur sekundären Gewichtseinsparung

Primärmaßnahme:

$$P_{1.2.1}^3 = -10\% \tag{A.1}$$

verändertes Gewicht:

$$W_{1.2.1}^{3*} = W_{1.2.1}^3 (1 + P_{1.2.1}^3) = 800g(1 - 0,1) = 720g \tag{A.2}$$

Sekundärmaßnahme am direkt benachbarten System:

$$S_{1.2.2}^3 = P_{1.2.1}^3 \cdot \prod_{i=1}^{2-1} I_{1.2.i,1.2.(i+1)}^3 = P_{1.2.1}^3 \cdot I_{1.2.1,1.2.2}^3 = -0,1 \cdot \frac{7}{8} = -\frac{7}{80} \approx -8,75\% \tag{A.3}$$

Sekundärmaßnahme an weiterem System in der Subsystemgruppe:

$$S_{1.2.3}^3 = P_{1.2.1}^3 \cdot \prod_{i=1}^{3-1} I_{1.2,i,1.2,(i+1)}^3 = P_{1.2.1}^3 \cdot I_{1.2.1,1.2.2}^3 \cdot I_{1.2.2,1.2.3}^3 = 0 \quad (\text{A.4})$$

neues Gewicht des benachbarten Systems:

$$W_{1.2.2}^{3*} = \frac{R_{1.2.2}^3}{R_{1.2.1}^3} \cdot W_{1.2.1}^3 \cdot (1 + P_{1.2.1}^3 \cdot I_{1.2.1,1.2.2}^3) = \frac{1/2}{2/5} \cdot 800g \left(1 - 0,1 \cdot \frac{7}{8}\right) = 912,5g \quad (\text{A.5})$$

neues Gewicht an weiterem System in der Subsystemgruppe:

$$\begin{aligned} W_{1.2.3}^{3*} &= \frac{R_{1.2.3}^3}{R_{1.2.1}^3} \cdot W_{1.2.1}^3 \cdot (1 + P_{1.2.1}^3 \cdot I_{1.2.1,1.2.2}^3 \cdot I_{1.2.2,1.2.3}^3) = \frac{1/10}{2/5} \cdot 800g(1 - 0) \\ &= \frac{1}{4} \cdot 800g = 200g \end{aligned} \quad (\text{A.6})$$

Einsparung in der Subsystemgruppe entspricht Primärmaßnahme auf höherem Systemlevel:

$$\begin{aligned} S_{G(1)}^3 &= R_{1.2.1}^3 \cdot P_{1.2.1}^3 + \sum_{i=2}^3 R_{1.2,\dots,i}^3 S_{1.2,\dots,i}^3 \\ &= R_{1.2.1}^3 \cdot P_{1.2.1}^3 + R_{1.2.2}^3 S_{1.2.2}^3 + R_{1.2.3}^3 S_{1.2.3}^3 = -\frac{2}{5} \cdot \frac{1}{10} - \frac{1}{2} \cdot \frac{7}{80} \\ &= -\frac{67}{800} = P_{1.2}^2 \approx -8,375\% \end{aligned} \quad (\text{A.7})$$

neues Gewicht der Subsystemgruppe:

$$\begin{aligned} W_{G(1)}^{3*} &= \sum_{i=1}^3 W_{1.2,i}^{3*} \\ &= \frac{W_{1.2.1}^3}{R_{1.2.1}^3} \sum_{i=1}^3 R_{1.2,i}^3 \left(1 + P_{1.2.1}^3 \cdot \prod_{j=1}^{i-1} I_{1.2,j,1.2,(j+1)}^m\right) \\ &= \frac{W_{1.2.1}^3}{R_{1.2.1}^3} \left(R_{1.2.1}^3 (1 + P_{1.2.1}^3) + R_{1.2.2}^3 (1 + P_{1.2.1}^3 \cdot I_{1.2.1,1.2.2}^3) \right. \\ &\quad \left. + R_{1.2.3}^3 (1 + P_{1.2.1}^3 \cdot I_{1.2.1,1.2.2}^3 \cdot I_{1.2.2,1.2.3}^3) \right) \\ &= \frac{800g}{2/5} \left(\frac{2}{5} \left(1 - \frac{1}{10}\right) + \frac{1}{2} \left(1 - \frac{7}{80}\right) + \frac{1}{10} (1 + 0) \right) \\ &= 2000g \left(\frac{9}{25} + \frac{73}{160} + \frac{1}{10} \right) = 2000g \cdot \frac{733}{800} = 1832,5g \end{aligned} \quad (\text{A.8})$$

Sekundäreinsparung an benachbartem System:

$$S_{1.1}^2 = P_{1.2}^2 \cdot I_{1.2,1.1}^2 = -\frac{67}{800} \cdot \frac{2}{3} = -\frac{67}{1200} \approx 5,583\% \quad (\text{A.9})$$

Einsparung in der Subsystemgruppe entspricht Primärmaßnahme auf höherem Systemlevel:

$$\begin{aligned} S_{G(1)}^2 &= R_{1.2}^2 \cdot P_{1.2}^2 + R_{1.2}^2 \cdot P_{1.2}^2 \cdot I_{1.2,1.1}^2 = -\frac{4}{9} \cdot \frac{67}{800} - \frac{5}{9} \cdot \frac{67}{1200} = -\frac{1}{9} \cdot \frac{737}{1200} \\ &= -\frac{737}{10800} = P_1^1 \approx -6,824\% \end{aligned} \quad (\text{A.10})$$

Sekundäreinsparung an benachbartem System:

$$S_2^1 = P_1^1 \cdot I_{1,2}^1 = -\frac{737}{10800} \cdot \frac{3}{5} = -\frac{737}{18000} \approx -4,094\% \quad (\text{A.11})$$

Einsparung in der Subsystemgruppe entspricht Einsparung des Gesamtsystems:

$$\begin{aligned} S_{G(1)}^1 &= R_1^1 \cdot P_1^1 + R_2^1 \cdot P_1^1 \cdot I_{1,2}^1 = -\frac{3}{5} \cdot \frac{737}{10800} - \frac{2}{5} \cdot \frac{737}{18000} = -\frac{1}{5} \cdot \frac{5159}{18000} \\ &= -\frac{5159}{90000} = P^0 \approx -5,732\% \end{aligned} \quad (\text{A.12})$$

verändertes Gewicht des Gesamtsystems:

$$W^{0*} = W^0 \cdot (1 + P^0) = 7500g \cdot \frac{84841}{90000} = 7070,1g \quad (\text{A.13})$$