

Marcus Stegmiller

**Eine Methodik zur Modellierung robuster
Teilzielsysteme für Gewicht in der
Automobilindustrie**

A Methodology for the Modeling of Robust
Partial Objective Systems for Weight in the
Automotive Industry

Band 134

Systeme ■ Methoden ■ Prozesse

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. A. Albers
Univ.-Prof. Dr.-Ing. S. Matthiesen
(Hrsg.)

Forschungsberichte



Marcus Stegmiller

**Eine Methodik zur Modellierung robuster
Teilzielsysteme für Gewicht in der Automobilindustrie**

A Methodology for the Modeling of Robust Partial Objective
Systems for Weight in the Automotive Industry

Band 134

Herausgeber: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. A. Albers
Univ.-Prof. Dr.-Ing. S. Matthiesen

Copyright: IPEK • Institut für Produktentwicklung, 2021
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Die Forschungsuniversität in der Helmholtz-Gemeinschaft
Alle Rechte vorbehalten

Druck: Stolzenberger Druck und Werbung GmbH & Co. KG, Leimen
06224-7697915

ISSN 1615-8113

Methodik zur Modellierung robuster Teilzielsysteme für Gewicht in der Automobilindustrie

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

DOKTORS DER INGENIEURWISSENSCHAFTEN (Dr.-Ing.)

von der KIT-Fakultät für Maschinenbau des

Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)

angenommene

DISSERTATION

von

M.Sc. Marcus Stegmiller

Tag der mündlichen Prüfung: 20.01.2021

Hauptreferent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Albert Albers

Korreferent: Prof. Dr. Claudia Eckert

Vorwort der Herausgeber (Stand: Juli 2017)

Wissen ist einer der entscheidenden Faktoren in den Volkswirtschaften unserer Zeit. Der Unternehmenserfolg wird mehr denn je davon abhängen, wie schnell ein Unternehmen neues Wissen aufnehmen, zugänglich machen und verwerten kann. Die Aufgabe eines Universitätsinstitutes ist es, hier einen wesentlichen Beitrag zu leisten. In den Forschungsarbeiten wird ständig Wissen generiert. Dieses kann aber nur wirksam und für die Gemeinschaft nutzbar werden, wenn es in geeigneter Form kommuniziert wird. Diese Schriftenreihe dient seit mehr als 20 Jahren als eine Plattform zum Transfer und macht damit das Wissenspotenzial aus aktuellen Forschungsarbeiten am IPEK - Institut für Produktentwicklung Karlsruhe* am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) verfügbar. Die Forschung des IPEK ist dabei strukturiert in die Kategorien Systeme, Methoden und Prozesse, um so der Komplexität heutiger Produktentwicklung ganzheitlich gerecht zu werden. Erst die Verknüpfung dieser drei Kategorien ermöglicht die Synthese innovativer Systeme durch Nutzung neuester Methoden und Prozesse. Gleichzeitig werden durch die Systemsynthese die erforschten neuen Methoden und Prozesse validiert und deren Mehrwert für die Praxis abgesichert. Dieses Forschungskonzept prägt nicht nur das IPEK-Leitbild, sondern auch den Charakter dieser Schriftenreihe, da immer alle drei Kategorien und deren Wechselwirkungen berücksichtigt werden. Jeder Band setzt hier individuelle Schwerpunkte und adressiert dabei folgende Forschungsgebiete des IPEK:

- das Entwicklungs- und Innovationsmanagement,
- die Entwicklungs- und Konstruktionsmethodik,
- der Leichtbau von der Ebene des ganzen Systems bis hinunter zur Optimierung des Bauteils,
- die Validierung technischer Systeme auch unter Berücksichtigung der NVH Aspekte (Noise, Vibration, Harshness) mit dem Fokus auf Schwingungen und Akustik an Komponenten und in den Gesamtsystemen sowie deren subjektiver Beurteilung durch den Menschen,
- die Antriebssystemtechnik mit den Schwerpunkten komplette Antriebslösungen für Fahrzeuge und Maschinen,
- das Design, die Tribologie und Erprobung von Kupplungen und Bremsen sowie
- die Gerätetechnik mit dem Schwerpunkt auf Power-Tools.

Die Forschungsberichte stellen Ergebnisse unserer Forschung sowohl anderen Wissenschaftlern als auch den Unternehmen zu Verfügung, um damit die Produktentwicklung in allen ihren Facetten mit innovativen Impulsen zu optimieren

Albert Albers und Sven Matthiesen

* Eh.: Institut für Maschinenkonstruktionslehre und Kraftfahrzeugbau, Universität Karlsruhe (TH)

Vorwort zu Band 134

Der globale Markt für Fahrzeuge hat sich in den letzten drei Jahrzehnten stürmisch entwickelt. Die Anzahl der produzierten Fahrzeuge – insbesondere auch im Bereich des Segments der Personenkraftwagen (PKW) – ist enorm. Die Attraktivität des PKW als Lösung für die individuelle Mobilität ist weltweit ungebrochen, auch wenn sich die Randbedingungen für die Mobilitätssysteme gerade stark verändern. Fahrzeuge müssen heutzutage nicht nur die Transportfunktion erfüllen. Um erfolgreich in den Märkten zu sein und auch die Anforderungen aus Gesellschaft und Umwelt zu antizipieren, müssen Fragestellungen der Nachhaltigkeit, des CO₂-Ausstoßes, aber auch der Sicherheit und der Integration in ein Verkehrssystem neu gedacht werden. Der Aspekt der Nachhaltigkeit muss dabei insbesondere auch in der Zurverfügungstellung nachhaltig entwickelter und hergestellter Komponenten und Teilsysteme adressiert werden. So streben einige Automobilhersteller bereits an, in den nächsten Jahren die komplette Produktion CO₂-neutral durchführen zu können. Der CO₂-Fußabdruck eines Fahrzeugs muss dabei ganzheitlich betrachtet werden, vom Abbau der für die Herstellung notwendigen Materialien, über den Herstellungsprozess selbst, die spätere Nutzung durch den Kunden als auch letztendlich die Entsorgung am Gebrauchsdauerende müssen alle Aspekte berücksichtigt werden. Dies stellt besondere Herausforderungen an die Entwicklung. Den Energieverbrauch während des Betriebes zu senken, ist eine zentrale Entwicklungsrichtung. Dies erfolgt im konventionellen Bereich durch effizientere neue Verbrennungsmotoren, Hybridisierung, aber auch durch die Verwendung von Elektroantrieben mit Batteriespeicher oder Brennstoffzelle. Gerade die batterieelektrischen Fahrzeuge leiden dabei unter dem sehr hohen Gewicht des Batteriespeichers, aber auch für alle anderen technischen Lösungen gilt, dass ein zentraler Lösungsbaustein zur Reduzierung der Energieverbräuche der ganzheitliche Leichtbau ist. Leichtbau bedeutet in diesem Zusammenhang mehr als der reine Material-Leichtbau. Es müssen vielmehr ganzheitlich auf allen Ebenen durch die Leichtbaukonzepte und neue Designlösungen diese Herausforderungen angegangen werden. Gleichzeitig ist dabei aber auch die Wirtschaftlichkeit zu bedenken. Es ist daher immer notwendig, bei der Planung neuer Fahrzeuggenerationen ein ausgewogenes Verhältnis zwischen den Gewichtszielen der verschiedenen Komponenten und Systeme und den Kosten zur Erreichung dieser Gewichtsziele darzustellen. Dabei zeigen heutige Entwicklungsprozesse, dass die Gewichtsziele für Module oder Teilsysteme häufig in der Praxis entweder mit großen Reserven im Zielsystem des Fahrzeugs vorgegeben werden, oder aber andererseits auch entlang des Entwicklungsprozesses nicht erreicht werden. Hier im Produktentwicklungsprozess von Anfang an eine Unterstützung zu liefern, um in den Zielsystemen neuer Fahrzeuggenerationen die Gewichtsziele wohlbegründet und strukturiert zu erarbeiten und vorzugeben und dann im weiteren Entwicklungsprozess über die Entwicklungsgenerationen hinweg das Wechselspiel zwischen Zielgewicht, Auslegungsgewicht und Ist-Gewicht zu verstehen und methodisch die Steuerung zu

unterstützen, ist eine wissenschaftlich herausfordernde Aufgabenstellung. Dieser Aufgabe hat sich Herr Dr.-Ing. Marcus Stegmiller mit seiner wissenschaftlichen Arbeit gestellt.

Herr Dr. Stegmiller hat mit seiner Arbeit einen wichtigen Beitrag geleistet, um das Gewichtsmanagement in der Automobilindustrie durch die Entwicklung einer Methodik zur Modellierung von Teilzielsystemen für Gewicht zu unterstützen. Die Methodik baut die Teilzielsysteme durch ein geeignetes Framework auf und die Quantifizierung der enthaltenen Zielsystemelemente wird durch eine Kombination von ausgewählten und teils angepassten Methoden unterstützt. Die Arbeit leistet einen wichtigen Beitrag sowohl in der Wissenschaft der Produktentwicklung zum Verständnis der Komplexität des Gewichtsmanagementprozesses als auch für die Praxis durch eine validierte Methodik.

Januar, 2021

Albert Albers

Kurzfassung

In der vorliegenden Forschungsarbeit wird eine Methodik zur Modellierung robuster Teilzielsysteme für Gewicht in der Automobilindustrie vorgestellt. Die Gestaltung, Prozessintegration und Quantifizierung von Gewichtszielen in der Fahrzeugentwicklung stellen den Kern der Forschungsarbeit dar. Die Methodik hat den Anspruch, das automobilen Gewichtsmanagement bei deren Kernaufgaben Planung, Kontrolle, Steuerung und Optimierung der Eigenschaft Gewicht methodisch und prozessual zu unterstützen.

Das Fahrzeuggewicht als auslegungskritische und stark wechselwirkende Entwicklungsgröße unterstreicht die hohe Relevanz von Gewichtszielen in der Automobilindustrie. Gewichtsziele sollten dabei als ein kontinuierlich weiterzuentwickelndes Teilzielsystem des gesamten Zielsystems verstanden werden. Die Modellierung der Wechselwirkungen innerhalb und zwischen den Teilzielsystemen stellt dabei eine zentrale Herausforderung dar. Der Lösungsansatz in der vorliegenden Arbeit basiert auf einem durchgängigen Informationstransfer aus vorherigen Produktgenerationen im Sinne des Modells der PGE – Produktgenerationsentwicklung. Zudem wird die Notwendigkeit einer durchgängigen Weiterentwicklung des Zielsystems im Verlauf der Produktentwicklung betont und methodisch unterstützt.

Die entwickelte Methodik umfasst zunächst den Aufbau eines Teilzielsystems für Gewicht. Dieser entstand aus der Analyse zahlreicher und teilweise gegenläufiger Anforderungen an Gewichtsziele. Der Aufbau basiert konkret auf der Trennung von anspruchsvollen sowie agilen Zielgewichten und konservativen sowie festen Auslegungsgewichten. Ziel- und Auslegungsgewichte sind über einen projektspezifischen Vorhalt verbunden, der entwicklungsphasenabhängig angepasst wird. Die Synchronisierung und die Integration des Teilzielsystems für Gewicht in den Produktentwicklungsprozess stellen entscheidende Stellhebel zur gewichtsoptimalen Fahrzeugprojektsteuerung dar und bilden daher einen zentralen Teil der Methodik.

Die Methodik umfasst zudem ein Methodenset zur Quantifizierung konkreter Gewichtsziele. Die Teilmethoden zeichnen sich durch eine konsequente Nutzung von Vorgängerwissen im Sinne des Modells der PGE aus. Dies soll eine effektive und effiziente Handhabung der steigenden Komplexität, Volatilität und Unsicherheit der Entwicklungsgröße Gewicht ermöglichen. Das Methodenset beinhaltet Teilmethoden zur Bestimmung von Gewichtsunsicherheiten, Gewichtsprognosen, Gewichtsrisiken und -risiken sowie betriebswirtschaftlichen Gewichtsbewertungen.

Die durchgeführte Validierung bestätigt die Eignung der Methodik und ihrer Teilmethoden zur Modellierung robuster Teilzielsysteme für Gewicht in der Automobilindustrie. Im Zuge dessen offenbaren sich weitere Verbesserungspotentiale und Forschungsbedarfe.

Abstract

This research paper presents a methodology for modeling robust partial objective systems für weight in the automotive industry. The design, process integration and quantification of weight targets in vehicle development represent the core of the research work. The methodology is intended to methodically and processually support automotive weight management in its main tasks of planning, monitoring, controlling and optimizing the property weight.

Vehicle weight as a design-critical and strongly interacting development variable underlines the great importance of weight targets in the automotive industry. Weight targets should be understood as a partial objective system of the entire objective system that is continuously being further developed. Modeling the interactions within and between the partial objective systems is a central challenge. The solution approach in this paper is based on a continuous information transfer from previous product generations in the sense of the model of PGE - product generation development. In addition, the necessity of a continuous further development of the objective system during product development is emphasized and methodically supported.

The methodology developed comprises the development of a partial objective system for weight that results from the analysis of numerous and sometimes contradictory requirements for weight targets. The structure is based on the separation of challenging and agile target weights from conservative and fixed design weights. Target and design weights are linked via a project-specific margin, which is adjusted depending on the development phase. The synchronization and integration of the partial objective system for weight into the product development process are decisive levers for weight-optimized vehicle project control and therefore form a core part of the methodology.

The methodology also includes a set of methods for quantifying concrete weight targets. The submethods are characterized by a consistent use of predecessor knowledge in the sense of the PGE model. This should enable an effective and efficient handling of the increasing complexity, volatility and uncertainty of the development variable weight. The method set includes submethods for determining weight uncertainties, weight forecasts, weight chances and risks as well as economical weight evaluations.

The validation carried out confirms the suitability of the methodology and its submethods for modeling robust partial objective systems for weight in the automotive industry. During this, further improvement potentials and research needs are revealed.

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Doktorand am IPEK – Institut für Produktentwicklung Karlsruhe in Kooperation mit der Abteilung Leichtbau und Gewicht der BMW Group in München.

Mein erster Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Albert Albers für die Betreuung meiner wissenschaftlichen Arbeit. Die wissenschaftlichen Gespräche, aber auch der weitere Austausch in Form von Projekten oder Think Days hat mich in meiner Arbeit bestärkt und diese erheblich weiterentwickelt. Aus seiner Faszination und Kompetenz im Bereich der Produktentwicklung konnte ich viele Impulse und Motivation gewinnen.

Des Weiteren möchte ich Frau Prof. Dr. Claudia Eckert von der Open University (Milton Keynes, UK) für den wissenschaftlichen Austausch während der Arbeit und die Übernahme des Korreferats herzlich danken.

Im Rahmen der Kooperation mit der BMW Group möchte ich mich bei den Kollegen und Führungskräften aus der Abteilung Leichtbau und Gewicht bedanken. Hier habe ich den Großteil meiner Zeit verbracht und habe ein bemerkenswertes Miteinander und große Unterstützung erfahren. Im Besonderen möchte ich mich bei Herrn Dr. Benjamin Hessenauer für die BMW-seitige Betreuung meiner Arbeit bedanken. Durch die gewährten Freiheiten und das große entgegengebrachte Vertrauen konnte ich mich in vielen Bereichen weiterentwickeln. So ist neben der fachlichen Seite auch eine Freundschaft entstanden.

Darüber hinaus danke ich allen Kollegen am IPEK für das angenehme Arbeitsklima, die spannenden Diskussionen, die lehrreichen Projekte und die tollen Momente, die ich mit meiner Zeit am IPEK verbinde. Dies gilt insbesondere für die Kollegen der Forschungsgruppe CAE/Optimierung.

Ganz besonders danke ich meinen Freunden und meiner Familie für die großartige Unterstützung. Der größte Dank gilt dabei meinen Eltern, da sie mein Studium und die daraus folgende Doktorarbeit erst möglich gemacht haben.

*Viele sind hartnäckig in Bezug auf den einmal eingeschlagenen Weg,
Wenige in Bezug auf das Ziel.*

Friedrich Nietzsche, 1878-1880

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	xi
Abstract	xiii
Abbildungsverzeichnis	xxiii
Tabellenverzeichnis	xxxii
Abkürzungsverzeichnis	xxxiii
Formelverzeichnis	xxxv
1 Einleitung	1
1.1 Motivation.....	2
1.2 Fokus der Arbeit.....	4
1.3 Aufbau der Arbeit.....	6
2 Grundlagen und Stand der Forschung	9
2.1 Produktentstehungsprozesse.....	9
2.1.1 Prozessmodelle der Produktentstehung.....	11
2.1.2 PGE – Produktgenerationsentwicklung.....	22
2.1.3 Produktentstehungsprozesse in der Automobilindustrie.....	27
2.1.4 Zwischenfazit.....	31
2.2 Gewichtsmanagement in der Automobilindustrie.....	32
2.2.1 Rolle des Gewichts in der Automobilentwicklung.....	32
2.2.2 Aufgaben des Gewichtsmanagements in der Automobilindustrie.....	45
2.2.3 Komplexität und Unsicherheit im Umfeld des Gewichtsmanagements.....	48
2.2.4 Zielsysteme im Kontext des Gewichtsmanagements.....	62
2.2.5 Leichtbau als Schlüsselement des Gewichtsmanagements.....	73
2.2.6 Gewichtsmanagementprozesse in der industriellen Praxis.....	80
2.2.7 Zwischenfazit.....	85
2.3 Gewichtsmanagement in anderen Branchen.....	85
2.3.1 Gewichtsmanagement in der Luft- und Raumfahrt.....	86
2.3.2 Erklärungsansätze für die Unterschiede zur Automobilindustrie.....	90
2.3.3 Branchenübergreifenden Gewichtsmanagement-Umfrage.....	91
2.3.4 Zwischenfazit.....	94
2.4 Fazit.....	94
3 Zielsetzung und Forschungsvorgehen	95
3.1 Zielsetzung.....	95
3.1.1 Forschungsbedarf.....	95

3.1.2	Forschungshypothesen	96
3.1.3	Forschungsfragen	97
3.2	Forschungsvorgehen.....	98
3.2.1	Forschungsmethodik.....	98
3.2.2	Forschungsmethoden	100
3.2.3	Forschungsumgebung.....	105
3.3	Fazit	107
4	Anforderungen an Modellierung robuster Teilzielsysteme für Gewicht.	109
4.1	Empirische Studie zur Konkretisierung des Forschungsbedarfs.....	109
4.1.1	Studiendesign	109
4.1.2	Ergebnisse der Fragebogenstudie.....	111
4.2	Anforderungen an Teilzielsysteme für Gewicht.....	115
4.3	Fazit	121
5	Methodik zur Modellierung von Teilzielsystemen für Gewicht.....	123
5.1	Modellierung eines Frameworks für Teilzielsysteme für Gewicht	124
5.1.1	Aufbau des Frameworks für Gewichtsziele.....	124
5.1.2	Integration des Frameworks in den Fahrzeugentwicklungsprozess.....	128
5.2	Vorgehen zur Quantifizierung von Gewichtszielen	136
5.3	Fazit	140
6	Methodenset zur Quantifizierung von Gewichtszielen	141
6.1	Methode zur Bestimmung von Gewichtsunsicherheiten.....	142
6.1.1	Motivation und Kernidee.....	142
6.1.2	Umsetzung.....	143
6.1.3	Validierung.....	153
6.1.4	Anwendungsszenarien.....	156
6.2	Methode zur Gewichtsabschätzung	158
6.2.1	Motivation und Kernidee.....	158
6.2.2	Umsetzung.....	159
6.2.3	Validierung.....	167
6.2.4	Anwendungsszenarien.....	170
6.3	Methodensammlung zur Abschätzung von Gewichtsrisiken.....	171
6.3.1	Motivation und Kernidee.....	171
6.3.2	Umsetzung und Validierung.....	172
6.3.3	Anwendungsszenarien.....	192
6.4	Methode zur betriebswirtschaftlichen Gewichtsbeurteilung	193
6.4.1	Motivation und Kernidee.....	193
6.4.2	Umsetzung.....	195

6.4.3	Validierung	199
6.4.4	Anwendungsszenarien	200
6.5	Fazit.....	202
7	Validierung und Anwendung der Methodik.....	203
7.1	Validierung der Methodik	203
7.2	Anwendung der Methodik in der Automobilindustrie	211
7.3	Fazit.....	214
8	Zusammenfassung und Ausblick.....	215
8.1	Zusammenfassung	215
8.2	Ausblick	218
	Literaturverzeichnis	221
	Glossar	CCXXXIX
	Anhang A	CCXLV
	Fragebogen Automobilindustrie.....	CCXLV
	Anhang B	CCXLVII
	Fragebogen Gewichtszielanspannung	CCXLVII

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: Thema der Arbeit und relevante (angrenzende) Forschungsfelder, Darstellung angelehnt an Blessing und Chakrabarti (2009).....	4
Abbildung 1.2: Aufbau der vorliegenden Arbeit.....	6
Abbildung 2.1: Wechselwirkung von Technik mit Natur, Mensch und Gesellschaft nach Ropohl (2009).....	10
Abbildung 2.2: Stage-Gate-Ansatz nach Cooper (1994), Darstellung nach Bursac (2016) ..	11
Abbildung 2.3: V-Modell auf Makroebene nach VDI-Verein Deutscher Ingenieure (2004), Darstellung nach Bursac (2016).....	13
Abbildung 2.4: Münchener Produktkonkretisierungsmodell (Ponn & Lindemann, 2011, S. 28).....	14
Abbildung 2.5: 3-Zyklen-Modell der Produktentstehung (Gausemeier et al., 2011, S. 16)	15
Abbildung 2.6: ZHO-Modell nach Albers und Meboldt (2007)	16
Abbildung 2.7: Das erweiterte ZHO-Modell nach Albers et al. (2012).....	18
Abbildung 2.8: Integriertes Produktentstehungsmodell (Albers et al., 2016b)	19
Abbildung 2.9: Die Ebenen des Produktentstehungsmodells (Albers et al., 2016b)	20
Abbildung 2.10: Abstraktionsgrade des iPeM nach Albers und Muschik (2010b), Darstellung nach Bursac (2016).....	21
Abbildung 2.11: Unternehmensfokus von reiner Anpassungsentwicklung (1) zur kompletten Neuentwicklung (100) gemäß Pahl et al. (2013) nach Albers et al. (2015a)	22
Abbildung 2.12: Produktgenerationsentwicklung am Beispiel der BMW 3er Baureihe (Henninger, 2019).....	23
Abbildung 2.13: Abgrenzung von Referenzprodukt und Referenzsystem nach Albers et al. (2019b)	25
Abbildung 2.14: Produktgenerationen und Entwicklungsgenerationen nach Albers et al. (2018b)	26
Abbildung 2.15: Schematische Darstellung der gängigen Matrixstruktur in der Automobilindustrie nach Raubold (2011).....	27

Abbildung 2.16: Generischer Projektplan in der Automobilindustrie nach Braess et al. (2013a, S. 1133–1154), Heißing et al. (2011, S. 505–510) und Decker et al. (2013).....	29
Abbildung 2.17: Aspekte des Gewichts in der Automobilindustrie.....	32
Abbildung 2.18: Wechselwirkungen des Gewichts mit Fahrzeugeigenschaften (BMW AG, 2018).....	35
Abbildung 2.19: Darstellung der Fahrwiderstände nach Gänsike et al. (2017)	36
Abbildung 2.20: Kraftstoffeinsparung bei 100 kg Gewichtsreduktion für unterschiedliche Fahrzyklen nach Rohde-Brandenburger (2013)	38
Abbildung 2.21: Zahlungsbereitschaft pro Kilometer abhängig von Grundreichweite. Datenpunkte aus Hackbarth und Madlener (2016), Hidrue et al. (2011) und Daziano (2013).....	41
Abbildung 2.22: Gewichtsspirale bei Fahrzeuggewichtsänderungen nach Gänsike et al. (2017).....	42
Abbildung 2.23: Vereinfachtes Modell zum Wankverhalten nach Gänsike et al. (2017)	43
Abbildung 2.24: Dualismus des Gewichts als Ein- und Ausgabegröße der Entwicklung, Bild aus A2mac1 (2020)	44
Abbildung 2.25: Erweitertes ZHO-Modell nach Albers et al. (2012) im Kontext des Gewichtsmanagements (konkrete Beispiele in Klammern dargestellt)	45
Abbildung 2.26: Das iPeM im Kontext des Gewichtsmanagements.....	47
Abbildung 2.27: Strukturelle Komplexität nach Patzak (1982).....	49
Abbildung 2.28: Systemeinteilung nach dynamischer und struktureller Komplexität. Darstellung von Ebel (2015), angelehnt an Schuh (2005, S. 6).....	49
Abbildung 2.29: Einteilung der Komplexitäten nach Lindemann et al. (2009, S. 27)	50
Abbildung 2.30: Entropie-Kompass nach Breitschuh et al. (2018).....	51
Abbildung 2.31: Unsicherheitsquellen nach Weck et al. (2007)	53
Abbildung 2.32: Unsicherheitstypen nach Earl et al. (2005)	54
Abbildung 2.33: Einteilung der Unsicherheit nach Hastings und McManus (2006)	54
Abbildung 2.34: Verschiedene Ausbreitungsformen von Änderungen nach Eckert et al. (2004).....	56
Abbildung 2.35: Risikoportfolio nach Albers et al. (2018f).....	57
Abbildung 2.36: Kritikalitätsmatrix nach Albers et al. (2014).....	58

Abbildung 2.37: Zerlegungsbild eines BMW 5er Touring (links) nach Autobild (2018); Anforderungen an Automobile nach Braess et al. (2013b, S. 12)	61
Abbildung 2.38: Einteilung der Systemkomplexität von Automobilentwicklung und Gewichtsmanagement in Anlehnung an Schuh (2005, S. 6)	61
Abbildung 2.39: Zielsystem eines Entwicklungsprojekts nach Bader (2007, S. 20).....	64
Abbildung 2.40: Beurteilungsdimensionen von Zielen nach Ebel (2015)	64
Abbildung 2.41: Beziehungsarten in Zielsystemen nach Gebauer (2001, S. 48).....	65
Abbildung 2.42: Einschränkende Wirkung von Randbedingungen nach Pohl (2007, S. 19)66	
Abbildung 2.43: Einordnung der Partialmodelle der Produktentstehung nach Albers et al. (2010), Partialmodelle aus Stechert (2010, S. 41) und Frank (2006, S. 79).....	67
Abbildung 2.44: Übersicht über die Strukturierung von Zielsystemen nach Ebel (2015) ...	68
Abbildung 2.45: Ausschnitt der inneren Struktur von Zielsystemen im Kontext des Gewichts nach Zangemeister (1973) (links) und Muschik (2011) (rechts)	69
Abbildung 2.46: Operationen bei der Entwicklung des Zielsystems nach Meboldt (2008)	71
Abbildung 2.47: Leichtbaustrategien inklusive Zuordnung relevanter Unterkategorien und empfohlener Ablauf nach Kopp et al. (2011).....	74
Abbildung 2.48: Zusammenhang zwischen Kosten und Gewicht eines Systems nach Lüdeke (2016).....	75
Abbildung 2.49: Prozessschritte des TWA nach Wagner (2015).....	78
Abbildung 2.50: Funktion-Masse-Matrix (links) und Funktionsportfolio (rechts) nach Revfi et al. (2018b)	79
Abbildung 2.51: Gegenstromverfahren am Beispiel der Gewichtszielableitung	81
Abbildung 2.52: Gewichtsbewertung in Form eines Wasserfalldiagramms nach Kreis und Blankenburg (2014)	82
Abbildung 2.53: Qualitative Änderungshäufigkeit während der Entwicklung nach Heißing et al. (2011, S. 511).....	83
Abbildung 2.54: Gewichtsgrößen über die Entwicklungszeit nach American National Standard (2015).....	87
Abbildung 2.55: Zielvorgaben gemäß des PVP-Ansatzes nach Andrew (2001).....	88
Abbildung 2.56: Vorgehensmodell für das Gewichtsmanagement nach Weck (2006).....	89
Abbildung 2.57: Akzeptierte Gewichtsherausforderung vs. Branche nach Fisher (2017)...	91

Abbildung 2.58: Akzeptierte Gewichtsherausforderung vs. Kenntnis der Gewichtsrisiken nach Fisher (2017).....	92
Abbildung 2.59: Anteil der Projekte mit Gewichtsreduktionsmaßnahmen, die Projektkosten und Projektdauer beeinflussen, nach Fisher (2017)...	93
Abbildung 2.60: Anteil der Gewichtsingenieure, die Einfluss auf die Produktgestaltung und Produktauslegung haben, nach Fisher (2017).....	93
Abbildung 3.1: DRM im Kontext der vorliegenden Arbeit, nach Eckert et al. (2003) – Darstellung nach Bursac (2016)	99
Abbildung 3.2: Co-betreute Forschungsarbeiten mit Kapitelverweis im zeitlichen Kontext	104
Abbildung 3.3: Forschungsumgebung und dort angewandte Forschungsmethoden	105
Abbildung 3.4: Marken der BMW Group (BMW Group, 2019b)	106
Abbildung 3.5: Vorgehensweise in dieser Arbeit	108
Abbildung 4.1: Verteilung der Befragten nach Branche und Unternehmensart	110
Abbildung 4.2: Verteilung der Befragten nach Berufserfahrung.....	111
Abbildung 4.3: Verteilung der Befragten nach Kenntnisstand beziehungsweise Kontakt zu firmeninterner Gewichtsmanagement-Abteilung.....	111
Abbildung 4.4: Antworten auf Frage: „Wie groß ist der Stellenwert des Gewichtsziels in Ihrem Unternehmen verglichen mit anderen Zielgrößen (z.B. Kostenziele, Funktionsziele)?“	112
Abbildung 4.5: Antworten auf Frage links: „Sind die Gewichtsziele in Ihrem Unternehmen stets niedriger als das Ist-Gewicht?“ und auf Aussage rechts: „Die anspruchsvollen initialen Gewichtsziele erfordern erhebliche Gewichtsreduzierungsmaßnahmen zur Zielerreichung.“	113
Abbildung 4.6: Antworten auf die Aussage: „Die Entwicklung des Produktgewichts im Projekt-verlauf ist u.a. aufgrund von technischen und regulatorischen Änderungen sehr volatil.“	113
Abbildung 4.7: Antworten auf Frage links: „Werden die initialen Produktgewichtsziele am Ende der Entwicklung erreicht?“ und auf Frage rechts: „Werden die Gewichtsziele in Ihrem Unternehmen auf veränderte Randbedingungen angepasst?“	114
Abbildung 4.8: Anforderungscluster an die Methodik.....	115
Abbildung 4.9: Antworten auf Frage: „Wie leitet Ihr Unternehmen Produktgewichtsziele her? (Mehrfachnennungen möglich)?“	117

Abbildung 4.10: Modellierung von TZS-G als Teilaktivität in der Produktentstehung	118
Abbildung 4.11: Detaillierte Anforderungcluster an die Methodik.....	122
Abbildung 5.1: Zusammenhang zentraler Begriffe nach Blessing und Chakrabarti (2009), Darstellung nach Gericke et al. (2017).....	123
Abbildung 5.2: Ableitung von Gewichtseigenschaften aus den Anforderungen	125
Abbildung 5.3: Portfoliodiagramm Zieleigenschaften	126
Abbildung 5.4: Ableitung der Gewichtsziele aus dem Portfoliodiagramm	127
Abbildung 5.5: Teilzielsystem Gewicht mit beispielhaften Wechselwirkungen innerhalb des Zielsystems – Darstellung angelehnt an Albers und Muschik (2010a) und Muschik (2011).....	128
Abbildung 5.6: Variantenabhängige Fahrzeuggewichte innerhalb eines Fahrzeugprojekts	130
Abbildung 5.7: Gewichtszielframework zur Plattform- und Baukastenauslegung, Nomenklatur gemäß Albers et al. (2020a).....	131
Abbildung 5.8: Festgelegtes Gewicht durch Konstruktionsabschlüsse im Projektverlauf am Beispiel BMW nach Trautwein (2011)	132
Abbildung 5.9: Kosten und Beeinflussbarkeit in Relation zum Projektfortschritt nach Ehrlenspiel et al. (2014, S. 13)	132
Abbildung 5.10: Phaseneinteilung der Fahrzeugentwicklung hinsichtlich des Auslegungsgewichts	133
Abbildung 5.11: Methodenset zur Quantifizierung der Gewichtsziele	136
Abbildung 6.1: Bausteine und innere Struktur einer Methode nach Gericke et al. (2017)	141
Abbildung 6.2: Zuweisung der Massenänderungsursachen zu Unsicherheitstypen und - kategorien, linke Tabelle nach SAWE Recommended Practices and Standards (2015)	144
Abbildung 6.3: Unsicherheitstypen und -kategorien als Bestandteile der Gewichtsunsicherheit	145
Abbildung 6.4: Verteilung der Änderungsgewichte der Kategorie Bewertungsunsicherheit	146
Abbildung 6.5: Q-Q-Diagramm der Änderungsgewichte der Kategorie Bewertungsunsicherheit.....	147
Abbildung 6.6: Vergleich der Änderungsverteilungen einzelner Fahrzeuge zur Grundgesamtheit	148

Abbildung 6.7: Verteilung der aufsummierten Änderungsgewichte durch die Monte-Carlo Simulation	150
Abbildung 6.8: Entwicklungsphasen mit durchschnittlicher Änderungsanzahl.....	151
Abbildung 6.9: Durchschnittlicher Unsicherheitskegel für die Bewertungsunsicherheit ..	152
Abbildung 6.10: Zuordnung der Unsicherheitstypen auf das ZHO-Modell	153
Abbildung 6.11: Validierung mit realen Fahrzeuggewichten zum Meilenstein Zielvereinbarung	154
Abbildung 6.12: Anwendung zur Quantifizierung der Gewichtsziele	157
Abbildung 6.13: Anwendung als Zielflugkorridor	157
Abbildung 6.14: Ableitung eines Gewichtsmanagement-KPI	158
Abbildung 6.15: Modulgewichte der Karosserie-Bodengruppe in Abhängigkeit der Fahrzeuglänge (Gewichte in Prozent des schwersten Modulgewichts)	160
Abbildung 6.16: Verbessertes Regressionsmodell durch die faktorbasierte Normierung (Gewichte in Prozent des schwersten Modulgewichts)	161
Abbildung 6.17: Vorgehensmodell der Methode zur Gewichtsabschätzung	162
Abbildung 6.18: Ergebnis durch Normierung der Parameter	164
Abbildung 6.19: Prognose von Modulgewichten neuer Fahrzeuge	165
Abbildung 6.20: Benutzeroberfläche zur Prognose des Entwicklungsbereichs Karosserie	166
Abbildung 6.21: Berücksichtigung des Übernahmeanteils bei der Gewichtsschätzung eines Moduls	167
Abbildung 6.22: Streuung der Modul-, Entwicklungsbereichs- und Gesamtfahrzeuggewichte	168
Abbildung 6.23: Vergleich der Methoden	169
Abbildung 6.24: Elemente zur Abschätzung von Gewichtschanzen und -risiken	172
Abbildung 6.25: Chancen und Risiken im Kontext der PGE	173
Abbildung 6.26: Änderungsanzahl in Abhängigkeit der Neuentwicklungsanteile	174
Abbildung 6.27: Auswertung der Änderungsgewichte vor und nach Zielvereinbarung (ZV) (in Prozent des jeweiligen Gesamtfahrzeuggewichts)	176
Abbildung 6.28: Ergebnisse des Fragebogens	178
Abbildung 6.29: Expertenbewertung in Form eines Rankings der Konzepte (1 = bestes, 8 = schlechtestes)	179

Abbildung 6.30: Portfoliodiagramm TWA Heckklappe	181
Abbildung 6.31: Grafische Darstellung der Bewertungsunsicherheiten am Beispiel der Funktion „Wertigkeit (ohne Funktion) darstellen“	182
Abbildung 6.32: Vergleichsebenen des Gewichtsbenchmarks	185
Abbildung 6.33: Logik zur Identifizierung von leichtbaurelevanten SE-Teams	186
Abbildung 6.34: Bausteine des Leichtbau-Ideenmanagement-Konzepts	188
Abbildung 6.35: Rollenkonzept des Leichtbau-Ideenmanagements	189
Abbildung 6.36: Ideenkonzept des Leichtbau-Ideenmanagements	190
Abbildung 6.37: Prozess einer Leichtbauidee.....	191
Abbildung 6.38: Benutzeroberfläche (Dashboard) der Leichtbauideendatenbank (Abbildung enthält Beispielwerte).....	191
Abbildung 6.39: Mögliche Leichtbaukosten nach Position im Fahrzeug abgeleitet aus Ellenrieder et al. (2017), Fahrzeugbild aus BMW AG (2018)	194
Abbildung 6.40: Qualitative Übersicht der Anrechnung von Sprungfunktionen unter sinkender Unsicherheit im Fahrzeugentwicklungsprozess	199
Abbildung 6.41: Vergleich der berechneten €/kg-Werte zu Literaturwerten aus Ellenrieder et al. (2017, S. 99) und Heuss et al. (2012)	200
Abbildung 6.42: Pareto-Front zur Visualisierung betriebswirtschaftlich sinnvoller Leichtbauentscheidungen	202
Abbildung 7.1: Vorgehen zur Zielableitung hinsichtlich der Aktivitäten der Problemlösung	205
Abbildung 7.2: Einordnung der entwickelten Methoden in die Aktivitätenmatrix des iPeM	207
Abbildung 7.3: Gewichtsziel-Framework im automobilen PEP.....	209
Abbildung 7.4: Anwendung der Kritikalitätsmatrix auf Methodik	210
Abbildung 7.5: Anwendung der Methodik an einem realen Fahrzeugprojekt – Oben: Quantifizierung der Gewichtsziele anhand historischer Daten – Unten: Zeitliche Einordnung in den damaligen Fahrzeugentwicklungsprozess.....	212

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Literaturübersicht zur Zahlungsbereitschaft für Beschleunigung nach Plotho (2018)	37
Tabelle 2.2: Energieverbräuche für Elektrofahrzeuge in Abhängigkeit des Gewichts nach Plotho (2018)	40
Tabelle 2.3: Überblick über relevante Unsicherheitsdefinitionen nach Ehret (2018)	52
Tabelle 2.4: Leichtbaumethoden und Beurteilung angepasst nach Lüdeke (2016)	76
Tabelle 2.5: Durchschnittliche Leichtbaumehrkosten je Branche nach Ellenrieder et al. (2017, S. 115)	86
Tabelle 3.1: Steckbrief – Teilnehmende Beobachtung, nach Marxen (2014)	100
Tabelle 3.2: Steckbrief – Interviewstudie, nach Marxen (2014)	101
Tabelle 3.3: Steckbrief – Fragebogen, nach Marxen (2014)	101
Tabelle 3.4: Steckbrief – Fallstudie, nach Marxen (2014)	103
Tabelle 6.1: Vergleich der Ergebnisse von Fehlerfortpflanzung und Monte-Carlo Simulation	150
Tabelle 6.2: Vor- und Nachteile der Mischform aus zentralem und communitybasierten Modell nach Zemke (2019)	188

Abkürzungsverzeichnis

BEV	Battery Electric Vehicle
EOP	End of Production
ETWA	Erweiterter Target Weighing Ansatz
ICE	Internal Combustion Engine
IP	Integrierte Produktentwicklung (Lehrveranstaltung am IPEK)
IPEK	Institut für Produktentwicklung Karlsruhe
KIT	Karlsruher Institut für Technologie
OEM	Original Equipment Manufacturer
PHEV	Plug-In Hybrid Electric Vehicle
S	Schwerpunkt
SA	Sonderausstattung
SAV	Sports Activity Vehicle
SMK	Schwungmassenklasse (für Abbildung der Fahrwiderstände)
SOP	Start of Production
TA	Teilaktivität
TZS-G	Teilzielsystem für Gewicht
ZHO	Ziel-, Handlungs- und Objektsystem
ZS	Zielsystem

Formelverzeichnis

A	m^2	Fläche
a	m/s^2	Beschleunigung
B	m	Breite
$b_{n, \text{stet}}$	-	Regressionskoeffizienten der stetigen Einflussvariablen
c_w	-	Luftwiderstandsbeiwert
F_B	N	Beschleunigungswiderstand
F_{ges}	N	Gesamter Fahrwiderstand
F_L	N	Luftwiderstand
F_R	N	Rollwiderstand
f_r	-	Rollwiderstandskoeffizient
F_S	N	Steigungswiderstand
g	m/s^2	Schwerebeschleunigung
H, h	m	Höhe
L	m	Länge
LF_i	€/kg	Leichtbaufaktor
m	kg	Masse
n	-	Anzahl
P	kW	Leistung
r	m	Radius
\hat{S}_x	-	Standardabweichung einer Stichprobe mit unbekannter Verteilung

t	s	Zeit
v	m/s	Geschwindigkeit
w_€	-	Gewichtungsfaktor €
w_{CO₂}	-	Gewichtungsfaktor CO ₂
w_m	-	Gewichtungsfaktor Masse
X_i	-	unabhängige Variable
X_{n,Fak}	-	Faktoren
X_{n,stat}	-	stetige Einflussvariable
X_{Basis}	kg	Basisgewicht des Moduls
X̄	-	Mittelwert einer Stichprobe
Y	-	abhängige Variable
α	rad	Winkel
λ	-	Massenfaktor für Trägheitsmomente der beschleunigten, rotierenden Massen im Antriebsstrang
μ	-	Mittelwert der Grundgesamtheit
ρ	kg/m ³	Dichte
σ	-	Standardabweichung der Grundgesamtheit

1 Einleitung

Der zivilisatorische, wirtschaftliche und kulturelle Fortschritt der Menschheit ist seit jeher untrennbar mit Mobilität verbunden, die individuelle Mobilität ist dabei ein Grundbedürfnis der Menschheit (Albers, 2020). Das rasante Bevölkerungswachstum und der wachsende Wohlstand führen zu steigender Mobilität, so sind im Jahr 2018 Fahrzeugproduktionszahlen von knapp 85 Millionen zu verzeichnen (Albers, 2020). Die Produktion und der Betrieb dieser Fahrzeuge, die zum Großteil mit Verbrennungsmotoren ausgestattet sind, resultieren in einem immer größer werdenden Energie- und Ressourcenverbrauch (Hansen, 2013). Dieser stetig steigende Verbrauch muss jedoch hinsichtlich der Bedrohungen durch den Klimawandel mehr denn je reduziert werden (Friedrich & Krishnamoorthy, 2017).

Ein entscheidender Stellhebel ist hierbei die Masse des Fahrzeugs, da diese nach dem zweiten Newtonschen Gesetz ($\text{Kraft} = \text{Masse} \cdot \text{Beschleunigung}$) proportional zur Beschleunigungskraft ist. Darüber hinaus ist der Roll- und Steigungswiderstand ebenfalls masseabhängig. Eine reduzierte Fahrzeugmasse führt demnach zu geringeren Kraft- und damit Energieaufwänden. (Kopp et al. (2011), Gänsike & Sandiano, 2015)

Hieraus leitet sich der Bedarf nach gewichtsreduzierten Fahrzeugen ab, zu deren Entwicklung Leichtbauaktivitäten und ein strukturiertes Gewichtsmanagement nötig sind (Ellenrieder et al., 2017). An dieser Stelle sei erwähnt, dass in der vorliegenden Forschungsarbeit vornehmlich der Begriff Gewicht anstelle von Masse verwendet wird. Dies entspricht der üblichen Sprachregelung im automobilen Gewichtsmanagement, obwohl Masse die physikalisch korrekte Größe beschreibt.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird das Gewichtsmanagement und insbesondere die Modellierung von Gewichtszielen im Kontext der Automobilindustrie detailliert betrachtet. Hierzu wird das Themengebiet zunächst motiviert, um danach eine Fokussierung auf die relevanten Forschungsfelder vorzunehmen. Eine Übersicht über den Aufbau der Arbeit schließt dieses Kapitel ab.

1.1 Motivation

Das Gewicht eines Fahrzeugs zeichnet sich durch zahlreiche technische wie betriebswirtschaftliche Wechselwirkungen mit anderen Fahrzeugeigenschaften aus. Der positive Einfluss des Fahrzeuggewichts auf Verbrauch, Reichweite und Fahrdynamik führt aufgrund strikterer Emissionsgesetzgebungen und steigender Kundenanforderungen zu einer erhöhten Relevanz des Leichtbaus. Dies wird durch betriebswirtschaftliche Aspekte in der Fahrzeugauslegung noch verstärkt. So kann ein initial gewichtsreduziertes Subsystem zu geringeren gewichtsinduzierten Belastungen auf andere Subsysteme führen, wodurch diese leichter ausgelegt werden können. Dieser Kaskadeneffekt wird Gewichtsspirale genannt und kann erhebliche Kosteneinsparungen ermöglichen (Ellenrieder et al., 2017). (Kopp et al., 2011)

Im Gegensatz dazu gibt es zahlreiche Aspekte in der Fahrzeugentwicklung, die zu steigenden Gewichten führen und die Anwendung von Leichtbaumaßnahmen erschweren. So herrscht in der Automobilindustrie ein hoher Kostendruck durch den starken Wettbewerb aus horizontalen und vertikalen Branchen. Die Zahlungsbereitschaft des Kunden für Leichtbau und die damit einhergehende Verbesserung der kundenerlebbareren Fahrzeugeigenschaften (siehe Albers et al. (2018d)) ist dabei limitiert und teilweise geringer als in anderen Branchen wie zum Beispiel der Luft- und Raumfahrt. (Ellenrieder et al., 2017)

Der Kostendruck und die angestrebten Stückzahlen erfordern zudem eine Massenproduktion mit Plattform- und Baukastenstrategien (R. Schneider & Rieck, 2012). Diese Vereinheitlichung führt zu technischen Kompromissen, die in der Regel dem Leichtbau abträglich sind. Des Weiteren resultieren die steigenden Kundenanforderungen hinsichtlich Entertainmentangebot, Assistenzsystemen, Dachsystemen, Sicherheit, Komfort oder Akustik in erhöhten Gewichtsbelastungen neuer Fahrzeuggenerationen. (Ellenrieder et al., 2017)

Diese teils gegensätzlichen Aspekte haben einen starken Einfluss auf das Fahrzeuggewicht im Verlauf der Produktentstehung. Dieser Effekt wird durch die langen Entwicklungszeiten in der Automobilindustrie von etwa fünf Jahren noch verstärkt (Heißing et al., 2011, S. 504–508). Während der Entwicklungszeit sind die zugrundeliegenden Anforderungen und damit auch die virtuellen Entwicklungsmodelle, physikalischen Prototypen und konkreten Bauteile ständigen Änderungen unterworfen (Jarratt et al., 2011). Diese Änderungen können folglich zu stark veränderlichen Fahrzeuggewichten führen. Aus diesem Grund ist eine Steuerung der Entwicklungsgröße Gewicht notwendig, die vom sogenannten Gewichtsmanagement wahrgenommen wird. Das Gewichtsmanagement

übernimmt dabei neben der Steuerung weitere wichtige Aktivitäten wie die Planung, Kontrolle und Optimierung der Eigenschaft Gewicht. Ziel des Gewichtsmagements ist dabei die möglichst robuste Erreichung der Gewichtsziele unter geringem Kosteneinsatz. (Kreis & Blankenburg, 2014)

Die Festlegung von Auslegungs- und Gewichtszielen ist dabei eine der zentralen Aufgaben des Gewichtsmagements. Dies stellt eine große Herausforderung dar, da komplexe Produkte wie das Automobil durch starke Abhängigkeiten und Wechselwirkungen geprägt sind. Da das Fahrzeuggewicht die Aggregation der miteinander interagierenden Subsystem- und Komponentengewichte darstellt, ist die Definition von optimalen Gewichtszielen nicht trivial. So sollten die Leichtbaupotentiale der Subsysteme zur Quantifizierung geeigneter Gewichtsziele identifiziert werden, ohne dadurch überproportionale Gewichtserhöhungen in anderen Subsystemen auszulösen.

Darüber hinaus stellt das Gewicht, also zum Beispiel das Gesamtfahrzeuggewicht oder bestimmte Beladungs- oder Achslastverteilungen, eine dimensionierende Größe bei der Auslegung von Subsystemen dar (Gänsike et al., 2017). Aus diesem Grund sollte das Zielgewicht bereits früh im Entwicklungsprozess mit einem hohen Reife- wie auch Härtegrad festgelegt werden (Ebel, 2015). Der theoretisch geforderte hohe Härtegrad wird jedoch aus Kostengründen oftmals nicht durchgesetzt. Gleichzeitig wird meist ein sehr anspruchsvolles Gewichtsziel gefordert, um die Gewichtsspirale und damit auch die Kosten nach unten zu drehen. Dies birgt die Gefahr von unrealistisch niedrigen Gewichtszielen, die im Projektverlauf nach oben korrigiert werden. Als Konsequenz davon könnten Bauteile falsch dimensioniert und späte Änderungen notwendig werden. Zudem schwindet dadurch das Vertrauen in die Gewichtsziele, wodurch die Konstrukteure eigene Vorhalte für eine robusten Bauteilauslegung bilden und somit die Gewichtsspirale sogar nach oben gedreht werden könnte. Eine möglichst optimale Auflösung dieses Spannungsfeldes bei der Gewichtszielfindung ist eine wichtigsten, aber auch herausforderndsten Aufgaben des Gewichtsmagements.

Die dargestellten Herausforderungen des Gewichtsmagements sollen in der vorliegenden Arbeit behandelt werden. Der Fokus liegt hierbei auf der Entwicklung einer Methodik zur Modellierung robuster Teilzielsysteme für Gewicht in der Automobilindustrie, da die Bereitstellung von Auslegungs- und Zielgewichten die Kernaktivität des Gewichtsmagements darstellt.

1.2 Fokus der Arbeit

Der Fokus dieser Arbeit liegt auf der Modellierung robuster Teilzielsysteme für Gewicht im Kontext des automobilen Gewichtsmanagements. Im Zuge dessen wird ein Beitrag für die folgenden drei Forschungsfelder geleistet (siehe Abbildung 1.1):

- Modellierung von Teilzielsystemen (Fokus Gewicht)
- Produktgenerationsentwicklung
- Leichtbau und Gewichtsmanagement

Die Modellierung von Teilzielsystemen stellt einen Kerninhalt der vorliegenden Arbeit dar. Hierzu werden bestehende Forschungsarbeiten zu Zielsystemen in der Produktentstehung aufgegriffen und für die Größe Gewicht im Kontext der Automobilindustrie konkretisiert (vgl. Kapitel 2.2.4). Dies soll vor allem unter dem Aspekt der Robustheit geschehen, wodurch die Themenfelder Komplexität, Unsicherheit und Risiko in den Fokus rücken (vgl. Kapitel 2.2.3). Da das Zielsystem im Verlauf der Produktentstehung kontinuierlich weiterentwickelt werden sollte, werden hierzu ganzheitliche Prozessmodelle der Produktentstehung detailliert betrachtet (Kapitel 2.1.1).

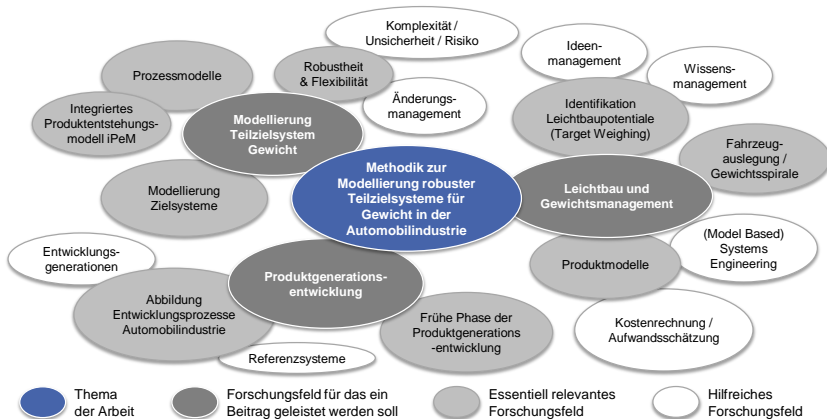


Abbildung 1.1: Thema der Arbeit und relevante (angrenzende) Forschungsfelder, Darstellung angelehnt an Blessing und Chakrabarti (2009)

Das zweite zentrale Forschungsfeld umfasst das Beschreibungsmodell der PGE – Produktgenerationsentwicklung nach Albers et al. (2015a) (vgl. Kapitel 2.1.2). Die konsequente und systematische Nutzung dieses Beschreibungsmodell im Kontext des automobilen Gewichtsmanagements stellt einen weiteren Kerninhalt der vorliegenden Arbeit dar. Im Zuge dessen werden aktuelle Entwicklungsprozesse der Automobilindustrie auf Parallelen und Potentiale hinsichtlich der PGE untersucht (vgl. Kapitel 2.1.3). Ein Hauptaugenmerk liegt dabei auf der frühen Phase der Produktentstehung, da dort das Produkt und dessen Gewicht entscheidend beeinflusst werden.

Das Gewichtsmanagement und der Leichtbau bilden das dritte Forschungsfeld der Arbeit. Die Rolle des Gewichts (vgl. Kapitel 2.2.1) und die Aufgaben des Gewichtsmanagements in der Fahrzeugentwicklung (vgl. Kapitel 2.2.2) werden dabei detailliert untersucht. Im Kontext des Leichtbaus werden ausgewählte Leichtbaumethoden weiterentwickelt und Aspekte des Ideen- und Wissensmanagement integriert (vgl. Kapitel 2.2.5).

1.3 Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Arbeit gliedert sich in die in Abbildung 1.2 dargestellten acht Kapitel, die nachfolgend kurz vorgestellt werden.

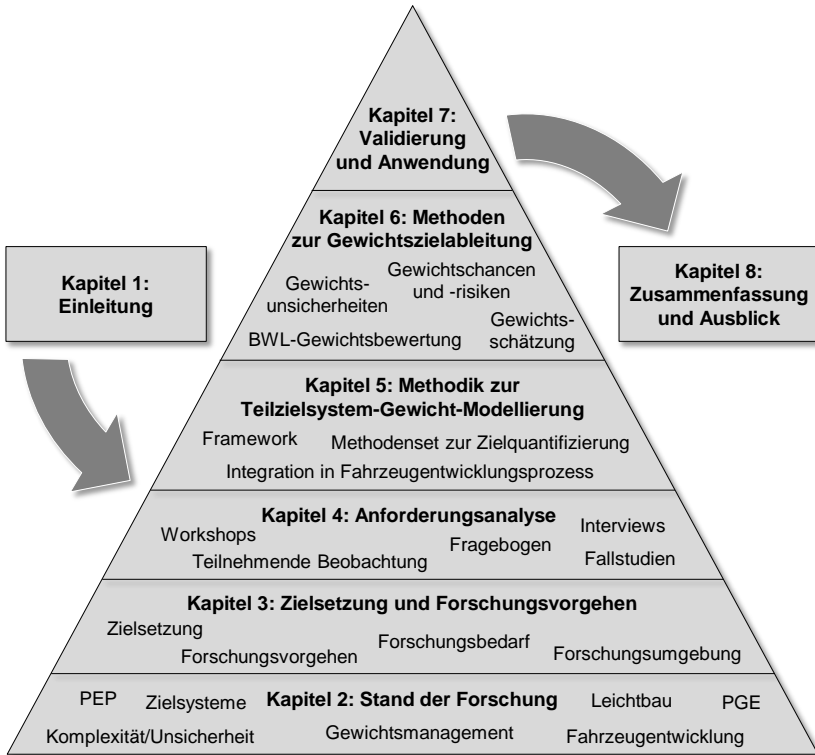


Abbildung 1.2: Aufbau der vorliegenden Arbeit

Nach der Einleitung folgen die Grundlagen und der Stand der Forschung in Kapitel 2 als zentrale Basis der eigenen Forschung. Dabei werden zunächst Produktentstehungsprozesse beleuchtet, indem relevante Prozessmodelle, das Modell der Produktgenerationsentwicklung und automobiler Produktentstehungsprozesse beschrieben werden. Auf dieser Basis wird das Gewichtsmanagement in der Automobilindustrie vorgestellt. Hierzu wird zunächst die Rolle des Gewichts in der Automobilentwicklung diskutiert und die Aufgaben des Gewichtsmanagements

aufgeführt. Des Weiteren werden relevante Forschungsfelder im Umfeld des Gewichtsmanagements vorgestellt, die den Umgang mit Komplexität, Unsicherheit, Änderungen, Risiko, Zielsystemen und Leichtbau umfassen. Abschließend werden konkrete Gewichtsmanagementprozesse in der Automobilindustrie, aber auch in anderen Branchen, vorgestellt, verglichen und interpretiert.

Auf Basis der Erkenntnisse aus dem Stand der Forschung und der identifizierten Forschungslücke werden in Kapitel 3 die Zielsetzung und das Forschungsvorgehen abgeleitet. Dazu werden Forschungshypothesen und -fragen aufgestellt, die im Verlauf der Arbeit beantwortet werden. Das angewandte Forschungsvorgehen umfasst eine übergreifende Forschungsmethodik mit entsprechenden Forschungsmethoden, die in einer definierten Forschungsumgebung durchgeführt werden.

Kapitel 4 beinhaltet eine umfassende Anforderungsanalyse aus den durchgeführten Forschungsmethoden. Aus Fallstudien, Interviews, Fragebogen, Workshops und der teilnehmenden Beobachtung werden dabei die Anforderungen an die zu entwickelnde Methodik gesammelt und aufbereitet.

In Kapitel 5 wird auf Basis der identifizierten Anforderungen eine Methodik zur Modellierung von robusten Teilzielsystemen für Gewicht entwickelt. Diese Methodik besteht aus einem Framework von Gewichtzielen, welches in den Fahrzeugentstehungsprozess eingebettet wird. Zudem wird ein methodisches Vorgehen zur Quantifizierung von konkreten Gewichtsziele entwickelt.

Dieses Vorgehen enthält vier zentrale Methoden, die in Kapitel 6 umfassend erläutert werden. Hierzu wird im Sinne einer vollständigen Methodenbeschreibung auf die Kernidee, Umsetzung, Validierung und relevante Anwendungsszenarien eingegangen.

Kapitel 7 behandelt die Validierung und Anwendung der Gesamtmethodik. Die Validierung erfolgt dabei argumentativ anhand abgeleiteter Kriterien aus Produkt- und Problemlösungsmodellen. Zudem wird von der konkreten Anwendung der Methodik in der Praxis beleuchtet und eine beispielhafte Anwendung an einem realen Fahrzeugprojekt durchgeführt.

Abschließend wird die vorliegende Arbeit in Kapitel 8 zusammengefasst und weiterführende Forschungsfragen im Rahmen eines Ausblicks diskutiert.

2 Grundlagen und Stand der Forschung

In diesem Abschnitt wird zunächst auf Produktentstehungsprozesse und deren Anwendung in der Automobilindustrie eingegangen (Kapitel 2.1). Da die Automobilindustrie in Generationen mit teils hohen Übernahmeumfängen entwickelt (Heißing et al., 2011, S. 509), wird die Produktgenerationsentwicklung als geeignetes Beschreibungsmodell der Automobilentwicklung vorgestellt. Darauf aufbauend werden die Aufgaben, der Nutzen und die Herausforderungen des Gewichtsmanagements in der Automobilindustrie (Kapitel 2.2) beschrieben. Abschließend werden die Gewichtsmanagementprozesse der Automobilindustrie mit anderen Branchen (Kapitel 2.3) ins Verhältnis gesetzt.

2.1 Produktentstehungsprozesse

In diesem Kapitel werden Produktentstehungsprozesse sowohl allgemein als auch speziell im Kontext der Automobilindustrie beschrieben. Hierzu ist es zielführend, auf Basis der Modell- und Systemtheorie, die Produktentstehung ganzheitlich zu betrachten.

Die Entwicklung geeigneter Produktentstehungsprozesse erfordert dabei eine zweckgebundene Modellierung des betrachteten Systems. Ropohl (2009) definiert den Begriff „System“ folgendermaßen:

Definition 1: System

Ein System ist das Modell einer Ganzheit, die (a) Beziehungen zwischen Attributen (Inputs, Outputs, Zustände etc.) aufweist, die (b) aus miteinander verknüpften Teilen bzw. Subsystemen besteht, und die (c) von ihrer Umgebung bzw. von einem Supersystem abgegrenzt wird.

Nach der allgemeinen Modelltheorie von Stachowiak (1973) sind Modelle immer Abbildungen von Originalen. Diese weisen Abbildungs-, Verkürzungs- und pragmatische Merkmale auf. Gemäß den Verkürzungs- und pragmatischen Merkmalen stellt ein Modell immer eine reduzierte Abbildung dar, die einen gewissen Zweck für eine bestimmte Nutzergruppe aufweist.

Auf dieser Basis kann die Technik im Allgemeinen in Systemen modelliert werden. Diese beschränkt sich dabei nicht nur auf das resultierende technische System (Produkt), sondern umfasst auch die Produktentstehung und die Produktverwendung. Die Produktentstehung und -verwendung sind hierbei soziotechnische Systeme, die die Verbindung von technischen Systemen mit Natur, Mensch und Gesellschaft beschreiben. Die Technik wechselwirkt demnach mit der Umwelt, indem sie den Umweltbedingungen unterliegt, diese aber auch beeinflusst. Abbildung 2.1 stellt diese Zusammenhänge grafisch dar. (Ropohl, 2009)

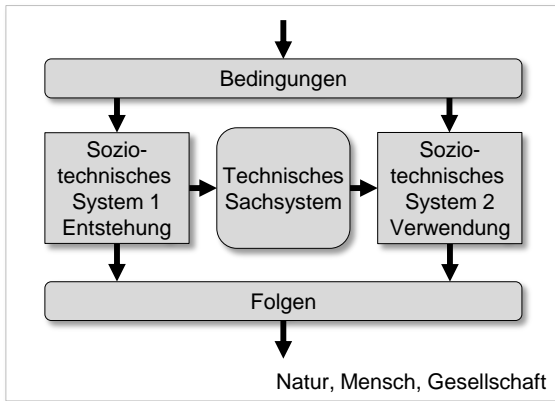


Abbildung 2.1: Wechselwirkung von Technik mit Natur, Mensch und Gesellschaft nach Ropohl (2009)

Die Begriffe des soziotechnischen Systems gehen auf die Untersuchungen von Trist und Bamforth (1951) zurück. Ein soziotechnisches System beschreibt dabei das Zusammenspiel von sozialen (z.B. Mitarbeiter) und technischen Teilkomponenten (z.B. Maschinen). Da die Produktentstehung ein solches System darstellt, ist der Mensch eine zentrale Komponente davon. Dies unterstreicht auch Albers (2010), indem er den Menschen als Mittelpunkt der Produktentstehung ansieht, der bei der Entwicklung neuer Methoden durchgängig und zwingend betrachtet werden muss. Diese Methoden sollten zur effektiven und effizienten Anwendung in Produktentstehungsprozessen integriert werden. Relevante Prozessmodelle im Kontext dieser Arbeit werden dazu im Folgenden vorgestellt.

2.1.1 Prozessmodelle der Produktentstehung

Das soziotechnische System der Produktentstehung wird in diesem Kapitel durch ausgewählte Prozessmodelle beschrieben, wobei der Fokus auf übergreifende und ganzheitliche Ansätze liegt. Um nachfolgend auf die Produktentstehungsprozesse in der Automobilindustrie überleiten zu können, wird mit dem branchenüblichen und managementorientierten Stage-Gate-Ansatz begonnen. Über die entwicklerorientierte VDI-Richtlinie 2206 wird auf ganzheitliche Modelle übergeleitet. Diese umfassen das Münchner Produktkonkretisierungsmodell (MKM), das 3-Zyklen-Modell der Produktentstehung und das integrierte Produktentstehungsmodell (iPeM).

2.1.1.1 Stage-Gate-Ansatz

Der Stage-Gate-Ansatz stellt ein managementorientiertes Modell von Produktentstehungsprozessen dar. Das Modell besteht aus Phasen (engl. *stages*) und Meilensteinen (engl. *gates*), die entlang einer Zeitachse dargestellt sind. Das Prozessmodell legt dabei fest, welche Ergebnisse zu den Meilensteinen vorliegen müssen. Dies wird in Projektreviews überprüft und im Zuge dessen entschieden, ob die darauffolgende Phase gestartet werden darf. Der Stage-Gate-Ansatz wurde stetig weiterentwickelt, wodurch unterschiedliche Generationen, dargestellt in Abbildung 2.2, entstanden sind. (Cooper, 1994)

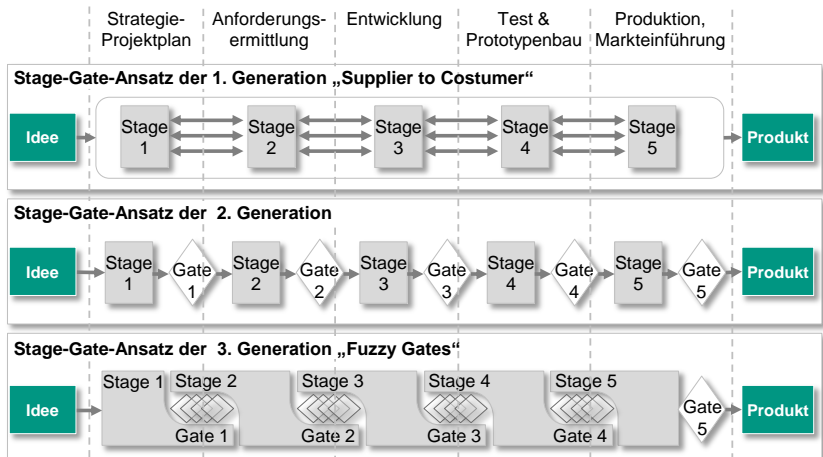


Abbildung 2.2: Stage-Gate-Ansatz nach Cooper (1994), Darstellung nach Bursac (2016)

Die erste Generation wurde von der NASA entwickelt und wird oftmals *Phased Review Process* genannt. Dieser Ansatz entspringt einer Auftraggeber-Lieferanten-Sichtweise, wonach die Ergebnisse einer Phase komplett „geliefert“ werden müssen, bevor mit der darauffolgenden Phase fortgefahren werden kann. Dies führt bei der Produktentwicklung oftmals zu zeitlichen Verzögerungen, sobald auch nur eine Anforderung in der jeweiligen Phase nicht zufriedenstellend erfüllt werden konnte. Ein weiterer Kritikpunkt ist die Fokussierung auf technische Herausforderungen, während betriebswirtschaftliche oder Marketing-Aspekte kaum berücksichtigt werden. (Cooper, 1994)

Die zweite Generation rückt diese Kritikpunkte in den Fokus, indem die Phasen cross-funktional ausgerichtet sind. Anstatt bestimmte Phasen alleinigen Unternehmensbereichen zuzuweisen, werden Projektteams gebildet, die aus unterschiedlichen Bereichen wie Marketing, Entwicklung oder Produktion bestehen. Darüber hinaus werden einzelnen Aktivitäten in den Phasen parallelisiert, wodurch eine zeitliche Straffung der Entwicklungszeit möglich wird. Dies erfordert jedoch mehr Abstimmungsbedarf und eine Überlappung der Phasen ist nach wie vor nicht vorgesehen. (Cooper, 1994)

Die dritte Generation baut auf der Erkenntnis auf, dass die bisherigen Prozesse zu starr und zu ineffizient sind. Die Lösung wird dabei in der Umsetzung der folgenden vier Fs gesehen: *Fluidity*, *Fuzzy Gates*, *Focused* und *Flexible*. Kernelemente sind dabei die Fuzzy Gates, die flexible Gates darstellen. Somit können Phasen überlappen, Gates aufgrund unvorhergesehener Ereignisse verschoben und somit eine höhere Flexibilität im Produktentstehungsprozess erreicht werden. Auf diese Weise soll ein optimaler Kompromiss aus geordnetem Vorgehen und schneller Handlungsfähigkeit erreicht werden. (Cooper, 1994)

Eine konsequente Weiterführung der dritten Generation stellt gewissermaßen das Konzept des *Simultaneous Engineerings (SE)* dar. Hierbei überlappen die Phasen noch deutlich stärker, wodurch die Entwicklungszeit weiter reduziert werden soll. Durch die cross-funktionale Organisation in sogenannten SE-Teams wird zudem eine Kostenreduktion und Qualitätsverbesserung erwartet. Gerade in der Automobilindustrie findet dieser Ansatz großflächige Anwendung, da die enge Zusammenarbeit von Entwicklung und Produktion innerhalb der SE-Teams aufgrund hoher Stückzahlen und komplexer Produktionsprozesse von hoher Bedeutung ist. (Bochtler et al., 1995, S. 1–18)

2.1.1.2 VDI-Richtlinie 2206

Die VDI-Richtlinie 2206 beschreibt einen Leitfaden für die Entwicklung von mechatronischen Systemen. Dieser basiert auf der Erkenntnis, dass kein fester und

immer gültiger Ablaufplan definierbar ist, dem der Konstrukteur folgen kann. Es wird daher ein flexibles Vorgehensmodell empfohlen, das im Wesentlichen auf den folgenden drei Elementen basiert. (VDI-Verein Deutscher Ingenieure, 2004)

- Allgemeiner Problemlösungszyklus auf Mikroebene
- V-Modell auf Makroebene (siehe Abbildung 2.3)
- Vordefinierte Prozessbausteine für wiederkehrende Arbeitsschritte

In der Richtlinie wird die Problemlösungsmethode nach Daenzer und Huber (1994) als Problemlösungszyklus auf Mikroebene empfohlen. Diese Problemlösungsmethode kann durch die systematische Unterteilung der Problemstellung in Teilschritte flexibel an bestehende Randbedingungen angepasst werden.

Das V-Modell auf Makroebene ordnet die Teilschritte zur Entwicklung mechatronischer Produkte in einen Zyklus mit Wechselwirkungen ein. Ein zentraler Aspekt ist hierbei, dass das Modell problem- und aufgabenspezifisch anpassbar ist und auch mehrere Zyklen durchlaufen werden können. Das V-Modell stellt demnach ein generisches und systematisches Entwicklungsvorgehen dar und wird in die Phasen Systementwurf, domänenspezifischer Entwurf und Systemintegration untergliedert. Auf diese Weise werden die Anforderungen durch meist mehrere Zyklen in das finale Produkt überführt.

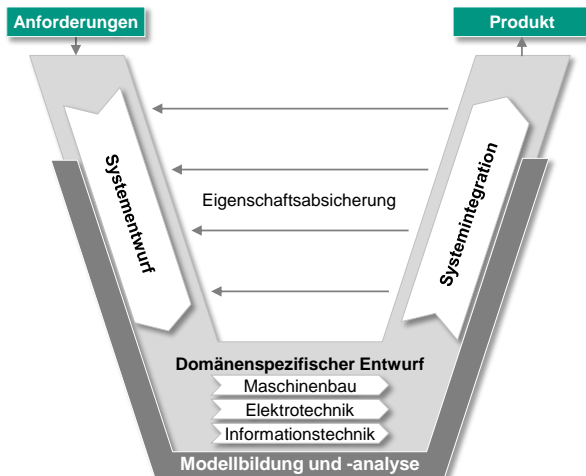


Abbildung 2.3: V-Modell auf Makroebene nach VDI-Verein Deutscher Ingenieure (2004), Darstellung nach Bursac (2016)

2.1.1.3 Münchner Konkretisierungsmodell (MKM)

Das Münchner Konkretisierungsmodell (MKM) beschreibt ein übergreifendes und ganzheitliches Modell der Produktentstehung. Dabei werden die Kritikpunkte bei der VDI Richtlinie 2206 aufgegriffen, indem die starke Wechselwirkung zwischen Anforderungsraum und Lösungsraum modelliert wird. (Ponn & Lindemann, 2011)

Der Anforderungsraum umfasst alle technischen Ziele und geforderten Produkteigenschaften. Der Lösungsraum besteht aus Funktionsebene, Wirkebene und Bauebene und spannt alle möglichen Lösungen auf. Der Anforderungsraum erstreckt sich über alle Ebenen, da die Anforderungen im Verlauf der Produktentwicklung stets ergänzt und konkretisiert werden sollten.

Das Modell legt das Hauptaugenmerk auf die Konkretisierung des Lösungsraums. Startpunkt ist eine abstrakte Funktionssicht, die durch entsprechenden Wirkprinzipien in eine konkrete Gestalt auf Bauebene überführt wird. Dieser Ablauf kann situationsabhängig angepasst werden und ist durch zahlreiche Iterationen geprägt. Die Pfeile und die Achsbeschriftungen in Abbildung 2.4 unterstreichen den iterativen Charakter dieses Modells.

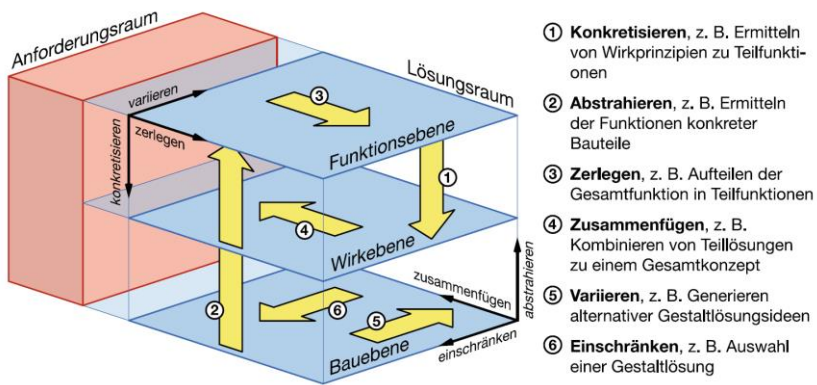


Abbildung 2.4: Münchener Produktkonkretisierungsmodell (Ponn & Lindemann, 2011, S. 28)

2.1.1.4 3-Zyklusmodell der Produktentstehung

Das 3-Zyklusmodell der Produktentstehung beschreibt einen integrierten Ansatz, indem neben der Produktentwicklung auch die Produktionssystementwicklung berücksichtigt wird. In Form von 3 Zyklen wird dabei der Gesamtprozess von der

Produkt- beziehungsweise Geschäftsidee bis zum Serienanlauf beschrieben (siehe Abbildung 2.5). Im Gegensatz zu konventionellen Ansätzen mit Phasen und Meilensteinen verkörpern die Zyklen den iterativen Charakter dieses Modells. (Gausemeier et al., 2011)

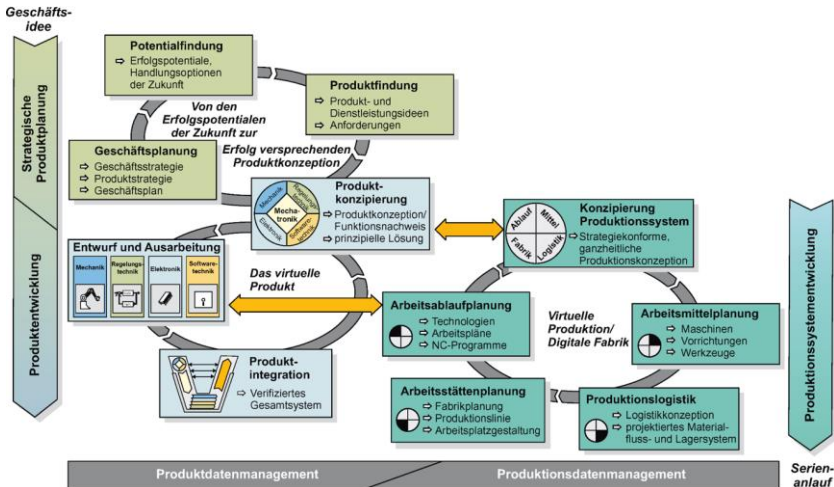


Abbildung 2.5: 3-Zyklus-Modell der Produktentstehung (Gausemeier et al., 2011, S. 16)

Im ersten Zyklus (*Strategische Produktplanung*) sollen vielversprechende Produktkonzepte durch die Identifikation von Erfolgspotentialen entwickelt werden. Hierzu werden die Aufgabenbereiche Potentialfindung, Produktfindung, Geschäftsplanung und Produktkonzipierung adressiert.

Der zweite Zyklus (*Produktentwicklung*) stellt die konkrete Entwicklung des Produkts dar. Der Zyklus besteht aus dem fachgebietspezifischen Entwurf, der Produktintegration und der fachgebietsübergreifenden Produktkonzipierung.

Der dritte Zyklus (*Produktionssystementwicklung*) umfasst die Konzipierung des Produktionssystems. Hierzu müssen die vier Aufgabenbereiche Arbeitsmittelplanung, Produktionslogistik, Arbeitsstättenplanung und Arbeitsablaufplanung integrativ berücksichtigt werden.

Zur Entwicklung eines möglichst optimalen Produkts hinsichtlich der Anforderungen dürfen die drei Zyklen nicht isoliert abgearbeitet, sondern sollten integrativ und iterativ vorangetrieben werden. (Gausemeier et al., 2011)

2.1.1.5 iPeM – integriertes Produktentstehungsmodell

Das integrierte Produktentstehungsmodell (Albers & Meboldt, 2007) ist ein ganzheitliches Rahmenwerk zur Beschreibung und Unterstützung der Produktentstehung. Das iPeM integriert Ansätze und Methoden der Produktentstehung aus Entwickler- und Managementsicht. Im Folgenden werden die Kernelemente des Modells detailliert vorgestellt.

ZHO-Modell

Das iPeM basiert auf dem ZHO-Modell (Ziel-, Handlungs- und Objektsystem), welches auf die Arbeit von Ropohl (1975) zurückzuführen ist. Ropohl entwickelte auf Basis der allgemeinen Systemtheorie ein generisches Modell zur Beschreibung der Produktentstehung. Das soziotechnische System der Produktentstehung wird dabei aus den miteinander wechselwirkenden Systemen Zielsystem, Handlungssystem und Sachsystem (Objektsystem) modelliert. Dieses Modell wurde von Albers und Meboldt (2007) aufgegriffen (siehe Abbildung 2.6) und systematisch weiterentwickelt.

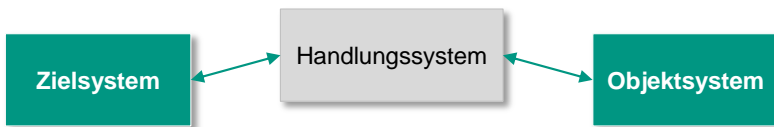


Abbildung 2.6: ZHO-Modell nach Albers und Meboldt (2007)

Auf dieser Basis entstanden im Rahmen der Weiterentwicklung durch Albers und Braun (2011)¹ die nachfolgenden Definitionen, die den dynamischen und iterativen Charakter von Ziel- und Objektsystem unterstreichen.

Definition 2: Zielsystem

Ein vollständiges Zielsystem beinhaltet alle relevanten Ziele, deren Wechselwirkungen, Randbedingungen und Begründungen, die für die Entwicklung des richtigen Produkts erforderlich sind.

¹ Ziel- und Objektsystem nach (Ebel, 2015) übersetzt; Handlungssystem nach (Lohmeyer, 2013) übersetzt.

Definition 3: Handlungssystem

Das Handlungssystem ist ein soziotechnisches System, das aus strukturierten Aktivitäten, Methoden und Prozessen aufgebaut ist. Es enthält weiterhin alle für die Realisierung einer Produktentstehung notwendigen Ressourcen (Entwickler, Budget, Ausstattung etc.). Das Handlungssystem erstellt sowohl das Ziel- als auch das Objektsystem, beide Systeme sind durch das Handlungssystem miteinander verbunden.

Definition 4: Objektsystem

Das Objektsystem enthält alle Dokumente und Artefakte, die als Teillösungen während des Entstehungsprozesses anfallen. Es ist vollständig, sobald der geplante Zielzustand erreicht ist. Das eigentliche Produkt ist neben Zwischenprodukten (z.B. Zeichnungen oder Prototypen) eines der Elemente des Objektsystems. Das Handlungssystem nimmt während des Produktentstehungsprozesses ständig Teile des Objektsystems auf und leitet daraus durch Schritte der Analyse und Synthese neue Ziele ab. Endergebnis eines Produktentstehungsprozesses ist neben dem eigentlichen Produkt auch die Summe aller Zwischenergebnisse im Objektsystem, das vollständige Zielsystem und nicht zuletzt das gesammelte Erfahrungswissen im Handlungssystem aus der Durchführung und Reflexion des Prozesses.

Erweitertes ZHO-Modell

Der iterative verlaufende Produktentstehungsprozess wurde durch Albers und Lohmeyer (2012) in Form des erweiterten ZHO-Modells abgebildet (siehe Abbildung 2.7). Dieses Model fokussiert das Handlungssystem auf den individuellen Menschen, der eine Wissensbasis und eine Lösungsraum erfassen kann. Zudem wird das Systemtripler um die zentralen Aktivitäten Analyse und Synthese erweitert.

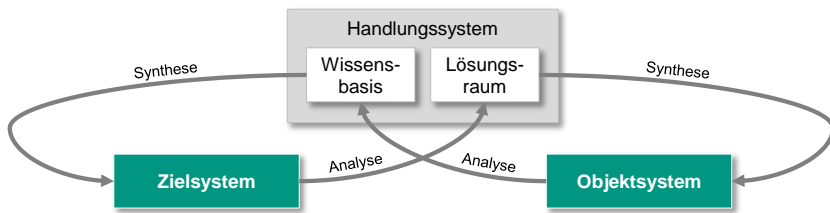


Abbildung 2.7: Das erweiterte ZHO-Modell nach Albers et al. (2012)

Die Zyklen Analyse und Synthese zeigen, wie aus der Wissensbasis das Zielsystem abgeleitet werden kann. Daraus ergibt sich durch Analyseaktivitäten ein Lösungsraum, der durch Synthese in ein Objektsystem überführt werden kann. Die Analyse des Objektsystems erweitert die Wissensbasis. Hier beginnt der iterative Prozess von neuem, indem das Zielsystem auf den neuen Kenntnisstand angepasst beziehungsweise detailliert wird. Auf diese Weise kann der Härte- und Reifegrad von Zielen erhöht werden. Der Härtegrad sagt dabei aus, wie konkret der Entscheidungsstand ist und der Reifegrad wie fundiert das Ziel ist. (Albers et al., 2012)

Das iPeM – integrierte Produktentstehungsmodell

Das integrierte Produktentstehungsmodell fußt auf den fünf zentralen Hypothesen von Albers (2010) und greift dabei die Struktur des ZHO-Modells auf. So wird die Produktentstehung als Überführung eines (anfangs vagen) Zielsystems in ein konkretes Objektsystem durch ein Handlungssystem verstanden (Albers, 2010). Das Handlungssystem erstellt und verbindet das Ziel- und Objektsystem. Eine direkte Verbindung zwischen Ziel- und Objektsystem ist nicht möglich. Viel mehr wird das Zielsystem während der Produktentstehung durch das Handlungssystem auf Basis neuer Informationen erweitert, angepasst und konkretisiert. Das Objektsystem stellt die Arbeitsergebnisse dar und umfasst damit alle Teillösungen und das finale Produkt (siehe Definitionen 1-3). (Albers & Braun, 2011)

Das iPeM, bestehend aus dem Ziel-, Handlungs- und Objektsystem, ist in Abbildung 2.8 dargestellt. Das Handlungssystem besteht aus einem statischen und einem dynamischen Teil. Der statische Teil umfasst die Aktivitäten der Produktentstehung, die Aktivitäten der Problemlösung und das Ressourcen-System. Die Aktivitäten der Produktentstehung beschreiben voneinander zu unterscheidenden Tätigkeiten innerhalb der Produktentstehung, ohne eine zeitliche Reihenfolge vorzugeben. Die oberen vier Aktivitäten werden Grundaktivitäten bezeichnet und finden parallel zu den anderen Aktivitäten statt. Diese können

jedoch nicht eigenständig existieren. Die unteren acht Aktivitäten werden Produktentwicklungsaktivitäten genannt und stellen den Kern eines jeden Entwicklungsprozesses dar. (Albers et al., 2016b)

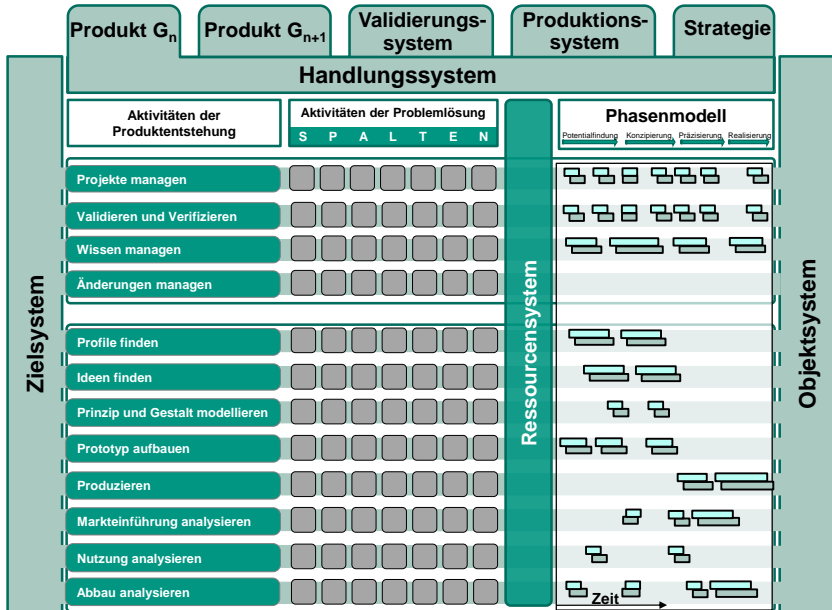


Abbildung 2.8: Integriertes Produktentstehungsmodell (Albers et al., 2016b)

Die Aktivitäten der Problemlösung umfassen die sieben Schritte des Problemlösungsprozesses SPALTEN (Albers et al., 2016a). SPALTEN steht als Akronym für die Aktivitäten **S**ituationsanalyse, **P**roblemeingrenzung, **A**lternative Lösungssuche, **L**ösungsauswahl, **T**ragweitenanalyse, **E**inführen und Umsetzen und **N**achbereiten und Lernen. Die Aktivitäten der Problemlösung werden im iPeM in Form einer Matrix auf die Aktivitäten der Produktentstehung gespiegelt. So ergeben sich 84 Felder, denen spezielle Vorgehensweisen und Methoden zugeordnet werden können

Das Ressourcensystem erstreckt sich über alle Aktivitäten und besteht aus Mitarbeitern, Kapital, Informationen und Arbeitsmittel. Neben dem statischen Teil findet sich der dynamische Teil in Form eines Phasenmodells. Das Phasenmodell ermöglicht eine zeitliche Einordnung und Planung der Aktivitäten. Hierbei wird

zwischen Referenz-, SOLL- und IST-Prozess unterschieden. Der Referenzprozess stellt eine generische zeitliche Dokumentation auf Basis bisheriger Erfahrungen dar. Der SOLL-Prozess stellt, abspingend vom Referenzprozess, eine konkrete Planung eines Projekts dar. Der tatsächliche Projektverlauf wird schließlich in Form des IST-Prozesses dargestellt. Auf diese Weise kann im Nachgang ein IST-SOLL-Vergleich erstellt und der Referenzprozess auf Basis dieser Erkenntnisse verbessert werden. Die unterschiedlichen Reiter in Abbildung 2.8 beschreiben weitere Ebenen, die durch das iPeM abgebildet werden. In Abbildung 2.9 sind diese Ebenen detaillierter dargestellt. (Albers & Braun, 2011)

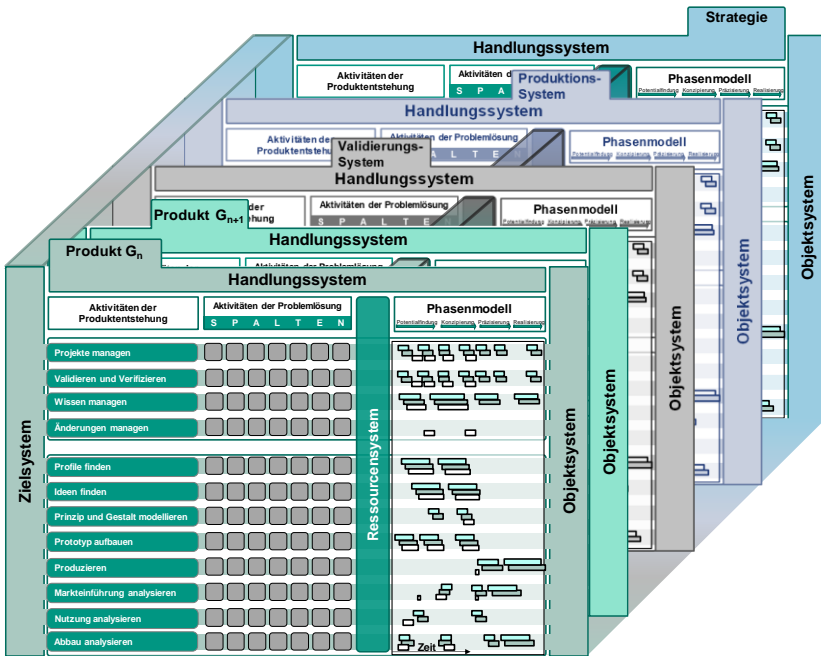


Abbildung 2.9: Die Ebenen des Produktentstehungsmodells (Albers et al., 2016b)

Die Ebenen umfassen zunächst das aktuell in Entwicklung befindliche Produkt (G_n) und die darauffolgende Produktgeneration (G_{n+1}). Darüber hinaus existiert die Ebene Validierungssystem, die die Entwicklung von Prüfständen, Validierungsmodellen und Messtechnik umfasst. Die Entwicklung des Produktionssystems ist ein weiterer Entwicklungsprozess und wird daher in einer

eigenen Ebene dargestellt. Die letzte Ebene beschreibt die Entwicklungsprozesse im Kontext der strategischen Ausrichtung eines Unternehmens. (Albers et al., 2016b)

Ziel- und Ressourcensystem erstrecken sich dabei über alle Ebenen, da sowohl die Ziele als auch die Ressourcen eines Unternehmens übergreifend betrachtet werden müssen. Da jede Ebene einen Entwicklungsprozess darstellt, werden in jeder Ebene die Aktivitäten der Produktentwicklung durchgeführt. Dabei ist eine starke Vernetzung der Ebenen anzustreben, da die Entwicklungsprozesse verknüpft sind und interagieren. Ähnliches gilt für die Objektsysteme, die grundsätzlich in jeder Ebene eigenständig sind, allerdings untereinander interagieren und einzelne Objekte austauschen können. (Albers et al., 2016b)

Abschließend sei auf die Eigenschaft des iPeMs als Metamodell hingewiesen. Wie bereits im Kontext des Phasenmodells erläutert, dient das iPeM als Metamodell, welches über Referenzmodelle in SOLL- und IST-Modelle überführt werden kann. Darüber hinaus kann das iPeM inhaltlich spezifiziert werden, in dem domänen- oder produktspezifische Methoden in den Fokus rücken. Wird das iPeM beispielsweise in der Fahrzeugentwicklung eingesetzt, kann das generische Metamodell auf die domänenspezifisch geeigneten Methoden reduziert werden. Abbildung 2.10 stellt die dadurch entstehenden Abstraktionsgrade des iPeM grafisch dar. (Albers & Muschik, 2010b)

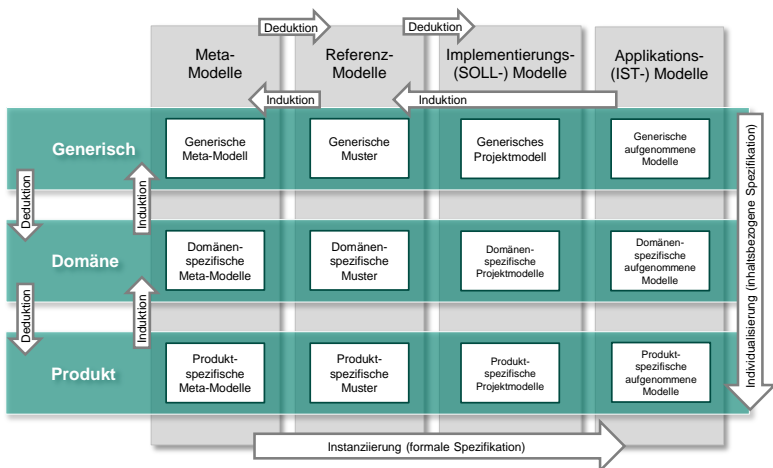


Abbildung 2.10: Abstraktionsgrade des iPeM nach Albers und Muschik (2010b), Darstellung nach Bursac (2016)

2.1.2 PGE – Produktgenerationsentwicklung

Im vorherigen Abschnitt wurde das integrierte Produktentstehungsmodell iPeM vorgestellt. Dabei wurde der Begriff Produktgeneration verwendet und der Bezug zur darauffolgenden Generation angedeutet. In diesem Kapitel soll das zugrundeliegende Beschreibungsmodell erläutert werden.

Produktentwicklungsprojekte werden in der klassischen Konstruktionsmethodik zwischen einem korrigierenden oder generierenden Konstruktionsvorgehen unterschieden. Das korrigierende Vorgehen zeichnet sich dabei durch die Übernahme der meisten Subsysteme und Lösungsprinzipien aus. Dagegen erfolgt im generierenden Vorgehen ein Abstraktions- und Konkretisierungsprozess, der zu völlig neuen Lösungen führt. (Ehrlenspiel & Meerkamm, 2013)

Darauf aufbauend unterscheiden Pahl et al. (2013) Produktentwicklungsprojekte in Neu-, Anpassungs- und Variantenkonstruktionen. Die Kategorien werden dabei nach Neuheitsgrad, Möglichkeit der Verwendung bekannter Lösungsprinzipien und der Unsicherheit bezüglich der Randbedingungen differenziert.

Im Kontext dieser Einteilung wird in der jüngeren Literatur oftmals darauf verwiesen, dass komplette Neuentwicklungen aus ökonomischen und risikoanalytischen Gründen selten sind (Deubzer & Lindemann, 2009). Daher werden neue Produkte meist mit möglichst hohem Übernahmeanteil entwickelt, was vor allem für kritische Subsysteme zutrifft (Eckert et al., 2004). Eine Umfrage (siehe Abbildung 2.11) unter 159 Entwicklungsingenieuren aus unterschiedlichen Firmen und Branchen unterstreicht dies, da die meisten Entwicklungen weder komplette Neuentwicklungen (entspricht Wert von 100) noch reine Anpassungsentwicklungen (1) darstellen.

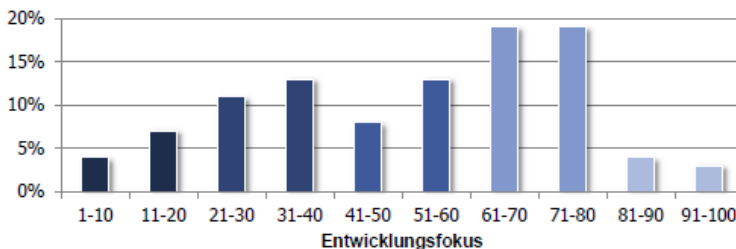


Abbildung 2.11: Unternehmensfokus von reiner Anpassungsentwicklung (1) zur kompletten Neuentwicklung (100) gemäß Pahl et al. (2013) nach Albers et al. (2015a)

Auf Basis dieser Erkenntnisse wurde das Beschreibungsmodell der PGE – Produktgenerationsentwicklung entwickelt. Dieses Modell soll die bisherigen Kategorisierungen präzisieren und die Entwicklungspraxis in Unternehmen realistischer abbilden (siehe Abbildung 2.12). Albers et al. (2015a) etablierten dazu die folgende Definition der Produktgenerationsentwicklung, die von Albers et al. (2019b) weiter präzisiert wurde.

Definition 5: Produktgenerationsentwicklung

Die Produktgenerationsentwicklung ist die Entwicklung einer neuen Generation eines technischen Produkts, die sowohl durch die Anpassung von Teilsystemen als Übernahmevariation als auch durch eine signifikante Neuentwicklung von Teilsystemen charakterisiert ist. Neu entwickelte Anteile technischer Produkte können durch Gestalt- und durch Prinzipvariation realisiert werden. Neue Produktgenerationen basieren immer auf einem Referenzsystem, dessen Referenzelemente die grundsätzliche Struktur beschreiben.



Abbildung 2.12: Produktgenerationsentwicklung am Beispiel der BMW 3er Baureihe (Henninger, 2019)

Wie bereits angedeutet, wird in der PGE zwischen drei unterschiedlichen Arten von Variation unterschieden. Diese bestimmen den Neuentwicklungsanteil und werden gemäß Albers et al. (2015a) und Albers et al. (2020b) folgendermaßen definiert:

Definition 6: Übernahmevariation (ÜV)

Übernahme bestehender Lösungen aus Referenzsystemelementen in die neue Produktgeneration. Anpassungen an den Schnittstellen erfolgen den Anforderungen der Systemintegration entsprechend. Eine Minimierung konstruktiver Anpassungen wird fokussiert.

Definition 7: Gestaltvariation (GV)

Entwicklung von Funktionseinheiten durch Veränderung der Gestalt bei (im Vergleich zu Referenzsystemelement) Beibehaltung des Lösungsprinzips. Gestaltvariation ist die häufigste Aktivität in der Produktentwicklung.

Definition 8: Prinzipvariation (PV)

Entwicklung bestimmter Funktionseinheiten mit Hilfe eines (im Vergleich zu Referenzsystemelement) neuen Lösungsprinzips.

Da eine neue Produktgeneration meist auf mehreren bereits existierenden Produkten mit ausgewählten Artefakten und entsprechenden Wechselwirkungen basiert, wird die PGE um das übergeordnete Element *Referenzsystem* ergänzt. Albers et al. (2019b) definieren das Referenzsystem wie folgt:

Definition 9: Referenzsystem

Das Referenzsystem für die Entwicklung einer neuen Produktgeneration ist ein System, dessen Elemente bereits existierenden oder bereits geplanten soziotechnischen Systemen und der zugehörigen Dokumentation entstammen und Grundlage und Ausgangspunkt der Entwicklung der neuen Produktgeneration sind.

Jede Produktgeneration basiert immer auf einem Referenzsystem, welches Referenzsystemelemente aus mindestens einem, meist aber aus mehreren

vorhandenen Produkten enthält. Diese Produkte werden als Referenzprodukte bezeichnet und von Albers et al. (2015a) folgendermaßen definiert:

Definition 10: Referenzprodukt

Referenzprodukte sind bestehende Produkte (z. B. Vorgänger- oder Wettbewerbsprodukte), auf deren Basis neue Produktgenerationen entwickelt werden. Dazu werden teilweise deren Struktur und Teilsysteme übernommen oder als Ausgangspunkt für Variationen zugrunde gelegt.

Die herangezogenen Teilsysteme können sowohl aus dem Objektsystem (z.B. Gestalt oder Wirkprinzipien) als auch aus dem Zielsystem (Anforderungen oder Randbedingungen) stammen.

Der Zusammenhang zwischen Referenzsystem und Referenzprodukt wird in Abbildung 2.13 erläutert. Es ist zu erkennen, dass Teilsysteme der Referenzprodukte ins Referenzsystem übernommen werden und dadurch Wechselwirkungen auftreten, die ebenfalls im Referenzsystem enthalten sind.

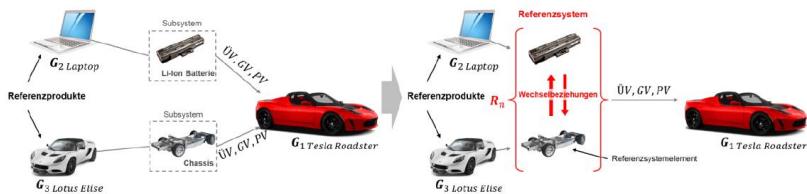


Abbildung 2.13: Abgrenzung von Referenzprodukt und Referenzsystem nach Albers et al. (2019b)

Das Beschreibungsmodell der Produktgenerationsentwicklung hat einen fraktalen Charakter und kann daher auch auf die Entwicklungszyklen innerhalb einer Produktgeneration übertragen werden. Ein komplexes Produkt wird hierbei typischerweise in mehreren Bauphasen beziehungsweise Iterationen entwickelt, um den Reifegrad systematisch zu erhöhen. Die verschiedenen Reifegrade beziehungsweise Entwicklungsstände können dabei als *Entwicklungsgenerationen* verstanden werden, die ebenfalls durch Übernahme-, Gestalt- und Prinzipvariation charakterisiert sind. (Albers et al., 2017c; Albers et al., 2018f; Albers et al., 2018b)

Albers et al. (2018b) entwickelten dazu die folgende Definition:

Definition 11: Entwicklungsgeneration

Eine Entwicklungsgeneration $E_{i,j}$ ist ein Zustand des beabsichtigten Kunden-, Anwender- und Anbieternutzens der Produktgeneration G_i .

Diese Definition ist sehr allgemein gehalten und soll daher am Beispiel der Automobilentwicklung veranschaulicht werden. So können beispielsweise die virtuellen und physischen Fahrzeugprototypen im Verlauf der Automobilentwicklung als Entwicklungsgenerationen verstanden werden. Diese Prototypen dienen zur Absicherung vorher definierter Umfänge (z.B. Baubarkeit, Funktionen, Crash) und stellen daher einen bestimmten Zustand des beabsichtigten Kunden-, Anwender- und Anbieternutzens der aktuellen Produktgeneration dar. Darüber hinaus können Entwicklungsgenerationen auch als Stages nach Cooper (1994) angesehen werden. Abbildung 2.14 veranschaulicht die beschriebenen Zusammenhänge zwischen Produkt- und Entwicklungsgenerationen mitsamt der vereinbarten Nomenklatur. (Albers et al., 2018b)

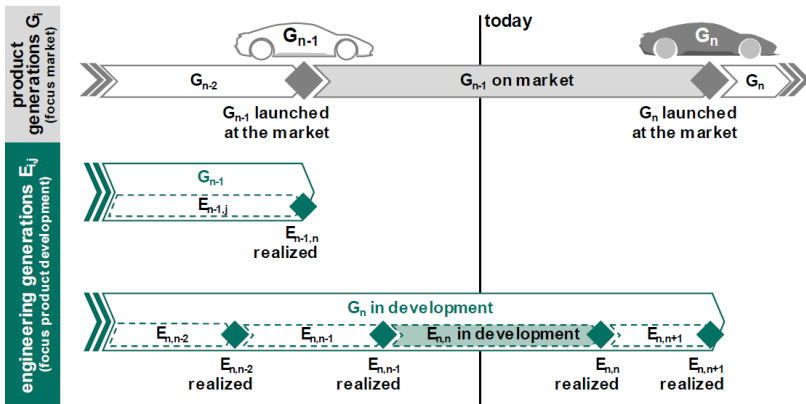


Abbildung 2.14: Produktgenerationen und Entwicklungsgenerationen nach Albers et al. (2018b)

2.1.3 Produktentstehungsprozesse in der Automobilindustrie

In diesem Abschnitt sollen die wichtigsten Elemente der Produktentstehungsprozesse in der Automobilindustrie erläutert werden. Dazu wird zunächst auf die Matrixstruktur eingegangen, die die gängigste Organisationsstruktur in der Automobilindustrie darstellt (Hab & Wagner, 2006). Diese Matrix spannt sich durch Entwicklungsbereiche und Fahrzeugprojekte auf und ist in Abbildung 2.15 dargestellt. (Raubold, 2011)

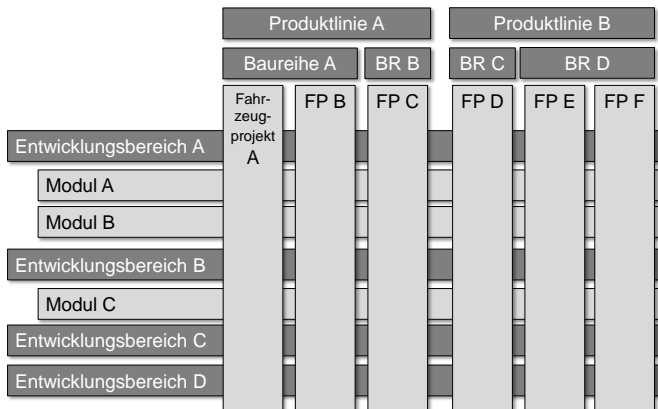


Abbildung 2.15: Schematische Darstellung der gängigen Matrixstruktur in der Automobilindustrie nach Raubold (2011)

Entwicklungsbereiche finden sich bei allen großen Automobilherstellern und werden für technische Komponenten und Subsystem gebildet. In den meisten Unternehmen werden diese auf oberster Ebene in die Bereiche Karosserie, Fahrwerk, Elektrik und Antrieb unterteilt (Hab & Wagner, 2006). Diese vier Entwicklungsbereiche, teilweise durch Interieur auf fünf erweitert, werden in Form von Modulen und Submodulen detailliert. Module werden im Rahmen dieser Arbeit im Sinne der Definition von Albers et al. (2015c) folgendermaßen verstanden:

Definition 12: Modul

Ein Modul ist ein technisches Subsystem, das sich durch andere technische Subsysteme ersetzen lässt, so dass die Menge aller Funktionen oder Attribute des technischen Systems variiert wird.

Die Entwicklungsbereiche werden in der Matrix durch Fahrzeugprojekte überlagert. Hier findet die Integration der technischen Komponenten in konkrete Fahrzeugprojekte statt. Ein Fahrzeugprojekt umfasst dabei meist mehrere, technisch verwandte Fahrzeugmodelle, die sich zum Beispiel durch Motorisierung, Getriebeart oder länderspezifische Konfigurationen unterscheiden können. Diese Modelle können Baureihen zugeordnet werden, welche sich wiederum in Produktlinien gruppieren. Meist entsprechen die Baureihen den Fahrzeugprojekten. Umfasst eine Baureihe jedoch eine große Anzahl an Modellen, so kann diese Baureihe auch in mehreren Fahrzeugprojekten entwickelt werden. Als Beispiel kann hierbei die 3er Baureihe der BMW Group dienen. Diese Baureihe umfasst die Fahrzeugprojekte 3er Limousine, 3er Touring, 3er GT und 3er Limousine Langversion (BMW AG, 2019). (Cusumano & Nobeoka, 1998)

Im Rahmen dieser Arbeit wird eine Baureihe nach Albers et al. (2015c) wie folgt definiert:

Definition 13: Baureihe

Eine Baureihe bezeichnet mehrere technische Systeme, die eine ähnliche Produktarchitektur aufweisen. Die jeweiligen technischen Systeme unterscheiden sich dabei durch die Ausprägung einzelner Attribute, die durch Skalieren variiert werden.

Die heutige Automobilindustrie ist geprägt von einer starken Erhöhung der Fahrzeugbaureihen, -modelle und -varianten (Deloitte, 2016). Um dieser Herausforderung hinsichtlich Komplexität und Wirtschaftlichkeit zu begegnen, wurden Plattform- und Baukastenstrategien entwickelt (R. Schneider & Rieck, 2012). Auf diese Weise können neue Fahrzeuge unter Verwendung von großen Übernahmeanteilen realisiert werden.

In dieser Arbeit werden die Begriffe Plattform, Hut und Baukasten gemäß der Definition von Albers et al. (2015c) folgendermaßen verwendet:

Definition 14: Plattform und Hut

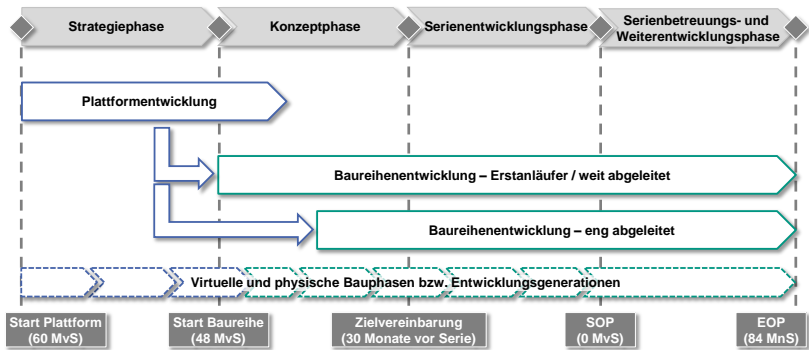
Eine Plattform ist die Menge jener Subsysteme, die in unterschiedlichen technischen Systemen unverändert zum Einsatz kommt. Der Hut hingegen umfasst die restlichen Subsysteme, die in den unterschiedlichen technischen Systemen die Menge aller Funktionen oder Attribute variieren.

Definition 15: Baukasten

Ein Baukasten ist die Menge aller technischen Subsysteme, die dem zugehörigen Baukasten-Regelwerk folgen, mit dem Ziel, aus diesen Subsystemen technische Systeme mit jeweils unterschiedlicher Menge aller Funktionen konfigurieren zu können.

Nachdem die Organisationsstruktur und zentrale Begriffe erläutert wurden, soll im nächsten Schritt der zeitliche Verlauf der automobilen Produktentstehung dargestellt werden.

Der Produktentstehungsprozess in der Automobilindustrie orientiert sich am Stage-Gate-Ansatz und dem Simultaneous Engineering. Die Projektphasen sind durch Meilensteine getrennt und bauen aufeinander auf (siehe Abbildung 2.16). Verfolgt das Unternehmen eine Plattformstrategie, erfolgt die Plattformentwicklung meist getrennt von der Baureihenentwicklung. Parallel dazu werden virtuelle als auch physische Bauphasen beziehungsweise Entwicklungsgenerationen aufgebaut und ausgewertet, um eine möglichst kontinuierliche Validierung sicherzustellen. (Heißing et al., 2011, S. 505–510)



Die Zeitangaben dienen zur Orientierung – Die exakten Zeitpunkte der Meilensteine sind immer firmen- und projektabhängig!

Abbildung 2.16: Generischer Projektplan in der Automobilindustrie nach Braess et al. (2013a, S. 1133–1154), Heißing et al. (2011, S. 505–510) und Decker et al. (2013)

Der Produktentstehungsprozess lässt sich in vier übergeordnete Phasen einteilen – die Strategie-, Konzept-, Serienentwicklungs- und Serienbetreuungsphase. Dieser

Prozess hat sich in der deutschen Automobilindustrie bewährt und findet sich gleichermaßen bei VW, Porsche, Audi, Daimler und BMW (Heißing et al., 2011, S. 507). Die konkrete Entwicklungszeit variiert zwischen den Herstellern und der jeweilige Baureihe. Die Plattform- und Baukastenstrategie kombiniert mit zeitlich überlappenden Fahrzeugentstehungsprozessen (Simultaneous Engineering) führt dabei zu starken Wechselwirkungen der Baureihen und damit zu erhhelter Komplexität (R. Schneider & Rieck, 2012).

Die Strategiephase umfasst meist den Zeitraum von 60 bis 48 Monate vor Start of Production (SOP) des Erstanlufers. Anschließend folgt die Konzeptphase, die mit der Zielvereinbarung, teilweise auch Konzeptfestlegung genannt, abschließt. Etwa 30 Monate vor Serie startet die Serienentwicklung und dauert bis SOP an. Die Serienbetreuungsphase startet nach SOP und ist notwendig, da durch Facelifts und technische Überarbeitungen bis zum EOP Entwicklungstätigkeiten anfallen können. Im Folgenden werden die einzelnen Phasen detaillierter beschrieben. (Heißing et al., 2011, S. 505–510; Decker et al., 2013)

Die Strategiephase umfasst die Planung des zu entwickelnden Fahrzeugportfolios. Basierend auf diesem Portfolio kann das notwendige Spreizungskonzept der Plattform festgelegt werden. Somit können auslegungsrelevante Fahrzeuge identifiziert werden, die in der Plattformentwicklung abgesichert werden müssen. (Braess et al., 2013a, S. 1133–1143)

In der Konzeptphase wird die Plattformentwicklung abgeschlossen und die Baureihenentwicklung gestartet. Je nach Komplexitätsgrad der Baureihe (Erst-anlufer, eng- oder weitabgeleitete Baureihe) wird die Baureihenentwicklung früher oder später gestartet. Die Konzeptphase endet mit der Zielvereinbarung, in der das Fahrzeugkonzept und die Zielgrößen wie Kosten, Gewicht und Eigenschaften detailliert vereinbart werden. (Braess et al., 2013a, S. 1143–1154)

In der Serienentwicklung werden die vereinbarten Konzepte umgesetzt und mithilfe physischer Prototypen aufgebaut und validiert. Am Ende dieser Phase beginnt die Umsetzung in den entsprechenden Produktionswerken zunächst in Form von Vorserienfahrzeugen und schließt mit dem SOP ab. In diese Phase fallen auch die Zulassungsaktivitten (Homologation) in den beabsichtigten Vertriebsmärkten. (Braess et al., 2013a, S. 1147–1152)

Die Serienbetreuung beschreibt die Phase von SOP bis EOP. Diese umfasst die Modellpflege und Produktaufwertungen in Form von Facelifts und technischen Überarbeitungen. Hierbei müssen Änderungen durch Vertrieb, Regulatorik oder

Design eingearbeitet und abgesichert werden. (Heißing et al., 2011, S. 505–510; Decker et al., 2013; Braess et al., 2013a, S. 1152)

2.1.4 Zwischenfazit

In diesem Abschnitt wurden zunächst relevante Prozessmodelle der Produktentstehung vorgestellt und erläutert. Hierbei ist das integrierte Produktentstehungsmodell (iPeM) für die weitere Verwendung in dieser Arbeit ausgewählt worden. Dies begründet sich darin, dass das Metamodell weder zu starre sequenzielle Entwicklungsschritte vorschreibt, noch ein zu offenes Modell ohne konkrete Hilfestellung für den Entwickler darstellt. So wird der Entwickler durch das Phasenmodell bei der Planung der nächsten Entwicklungsaktivitäten unterstützt. Gleichzeitig wird er durch die Aktivitätenmatrix bei der Wahl der geeigneten Methoden beraten. Eine Umsetzung dieser Methodenempfehlung findet sich in der Anwendung *InnoFox* (Albers et al., 2015b). Zudem unterstützt das iPeM sowohl die Sicht des operativen Entwicklers als auch des Managements.

Das Beschreibungsmodell der PGE – Produktgenerationsentwicklung wurde darauf aufbauend vorgestellt. Dieses Modell ermöglicht eine praxisnahe Beschreibung realer Produktentwicklungen, die meist auf Referenzsystemen basieren und somit keine kompletten Neuentwicklungen darstellen.

Der letzte Abschnitt umfasste eine Vorstellung der Produktentstehungsprozesse in der Automobilindustrie. In diesem Kontext wurden die Organisationsstruktur, einige zentrale Begriffe und die zeitlichen Projektphasen erläutert. Hierbei zeigten sich Parallelen zum Beschreibungsmodell der PGE. So hat die Baureihenentwicklung kombiniert mit der Plattform- und Baukastenstrategie das Ziel, möglichst große Übernahmeumfänge zu definieren. Als Folge enthalten neuentwickelte Fahrzeuge meist nur einen Neuteilumfang von etwa 30 % (Heißing et al., 2011, S. 509). Die Aufteilung des Fahrzeugentstehungsprozesses in Bauphasen kann zudem mit den Entwicklungsgenerationen der PGE beschrieben werden.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die PGE ein geeignetes Beschreibungsmodell für die automobilen Produktentstehungsprozesse und deren Randbedingungen darstellt. Es sei jedoch erwähnt, dass die Automobilhersteller derzeit noch nicht konsequent im Sinne der PGE entwickeln. So wird das Referenzsystem neuer Produktgenerationen oftmals nicht systematisch und umfassend modelliert, wodurch der Wissenstransfer aus Vorgängergenerationen, z.B. hinsichtlich der Variationsanteile, behindert werden kann. Dies ist einer der Gründe, weshalb der Methodenentwicklungen im Kontext der PGE ein großes Potential zugeschrieben wird.

2.2 Gewichtsmanagement in der Automobilindustrie

In diesem Abschnitt wird das Gewichtsmanagement in der Automobilindustrie umfassend vorgestellt. Es wird zunächst auf die Rolle des Gewichts in der Automobilentwicklung eingegangen, um auf dieser Basis die Aufgaben des Gewichtsmanagements abzuleiten. Die Aufgaben umfassen unter anderem die Quantifizierung von Gewichtszielen und die Steuerung von Leichtbauaktivitäten. Diese beiden Themenfelder werden in diesem Abschnitt detailliert betrachtet und im Kontext der vorherrschenden Komplexität und Unsicherheit diskutiert. Abschließend werden automobiler Gewichtsmanagementprozesse in der heutigen industriellen Praxis vorgestellt.

2.2.1 Rolle des Gewichts in der Automobilentwicklung

Die Rolle des Gewichts in der Automobilindustrie wird in diesem Abschnitt hinsichtlich dreier Aspekte beleuchtet, die in Abbildung 2.17 dargestellt sind.



Abbildung 2.17: Aspekte des Gewichts in der Automobilindustrie

2.2.1.1 Gewichtsdefinitionen Automobil

Die offiziellen Gewichtsangaben von Automobilen sind in Normen und Gesetzen festgelegt und können weltweit variieren. Im Rahmen dieser Arbeit werden die Gewichtsangaben nach DIN 70020 verwendet. Die drei zentralen Beladungszustände (Messlast 1-3) für die Gesamtfahrzeugauslegung werden wie folgt definiert:

Definition 16: Messlast 1 – Leergewicht

Leergewicht nach DIN 70020 Teil 2: Gewicht des trockenen Fahrzeugs mit kompletter Ausrüstung für den normalen Fahrbetrieb, wie vom Hersteller vorgesehen, zuzüglich Kühlmittel, mindestens 90 % Füllung des Kraftstoffbehälters², Feuerlöscher², Ersatzrad (-räder)², Standardsatz von Ersatzteilen², Unterlegkeile² und Standard-Werkzeugsatz².

Definition 17: Messlast 2 – Konstruktionsgewicht

Das Konstruktionsgewicht ist das Gewicht des Fahrzeuges, welches sich aus der Summe des Leergewichts (Messlast 1) und bestimmten Sitzbelastungen ergibt. So sind bei einem 4- und 5-Sitzer jeweils zwei Personen vorne und eine Person auf der zweiten Sitzreihe zu verorten. Weitere Varianten finden sich in DIN 70020. Als Gewicht eines Fahrzeuginsassen sind 68 kg anzunehmen.

Definition 18: Messlast 3 – Zulässiges Gesamtgewicht

Zulässiges Gesamtgewicht in Übereinstimmung mit der Fahrzeugzulassung.

Zulässiges Gesamtgewicht nach DIN 70020 Teil 2 und unter Ausnutzung der zulässigen Hinterachslast.

Im Kontext dieser Beladungszustände sei erwähnt, dass die Gewichtssteuerung in der Regel auf dem Leergewicht (Messlast 1) beruht. Die Messlast 2 ist über die konstanten Personengewichte direkt an das Leergewicht gekoppelt. Die Messlast 3

² Falls vom Fahrzeughersteller vorgesehen

kann hingegen über variable Zuladungsgewichte flexibler gestaltet werden, weshalb die Messlast 3 meist gesondert betrachtet wird. (VO (EU) Nr. 1230/2012 L353)

Neben den offiziellen Beladungszuständen gibt es eine Reihe von Gewichtsarten, die in der Fahrzeugentwicklung existieren. Im Folgenden werden drei zentrale Gewichtsarten im Kontext der vorliegenden Arbeit definiert. Die Definitionen sind an die Definitionen von SAWE Recommended Practices and Standards (2007) und Kreis und Blankenburg (2014) angelehnt und werden so oder so ähnlich in der Automobilindustrie verwendet.

Definition 19: Ist-Gewicht

Das Ist-Gewicht ist das Gewicht eines definierten Bauteilumfangs zum aktuellen Zeitpunkt. Der Bauteilumfang entspricht dem aktuell gültigen Konstruktionsstand und berücksichtigt zudem nicht genehmigungspflichtige Maßnahmen (z.B. Einflüsse durch Fertigungsverfahren) bis SOP. Das Ist-Gewicht bildet den Beladungszustand Messlast 1 (Leergewicht) ab.

Definition 20: Prognosegewicht

Das Prognosegewicht ist das prognostizierte Gewicht eines definierten Bauteilumfangs zu SOP. Es basiert auf dem Ist-Gewicht und berücksichtigt genehmigungspflichtige Maßnahmen, die mit hoher Wahrscheinlichkeit bis SOP eintreten. Das Prognosegewicht bildet den Beladungszustand Messlast 1 (Leergewicht) ab.

Definition 21: Zielgewicht

Das Zielgewicht ist das geforderte Gewicht eines Bauteilumfangs zu SOP. Das Zielgewicht bildet den Beladungszustand Messlast 1 (Leergewicht) ab.

2.2.1.2 Wechselwirkungen von Gewicht

In diesem Abschnitt werden die Wechselwirkungen des Gewichts auf die Fahrzeugeigenschaften vorgestellt. Der Fokus liegt hierbei auf den kundenwerten Fahrzeugeigenschaften, die eine Wechselwirkung mit dem Gewicht aufweisen. Die kundenwerten Eigenschaften werden regelmäßig durch Kundenbefragungen ermittelt (vgl. Braess & Seiffert, 2013, S. 12; Aral AG, 2015; ADAC, 2012). Es

werden sowohl Verbrenner (Benziner, Diesel) als auch batterieelektrische Fahrzeuge (PHEV, BEV) berücksichtigt. Die Wechselwirkungen sind in Abbildung 2.18 dargestellt und werden nachfolgend näher erläutert.

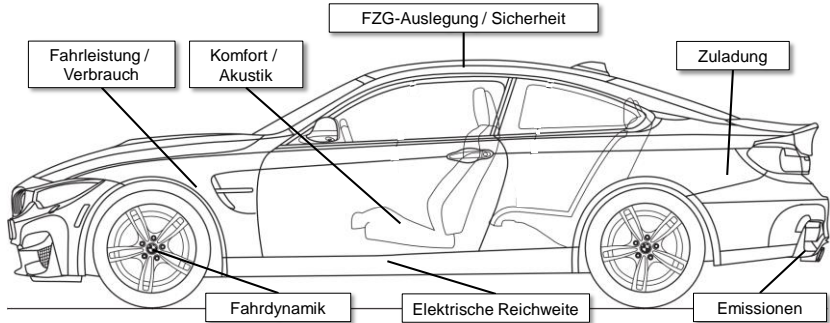


Abbildung 2.18: Wechselwirkungen des Gewichts mit Fahrzeugeigenschaften (BMW AG, 2018)

Um die Wechselwirkungen des Gewichts mit den identifizierten Fahrzeugeigenschaften nachvollziehen zu können, wird zunächst der physikalische Einfluss des Gewichts auf den Fahrwiderstand erläutert. Der Fahrwiderstand setzt sich aus dem Luft- (F_L), Roll- (F_R), Steigungs- (F_S) und Beschleunigungswiderstand (F_B) zusammen und kann folgendermaßen dargestellt werden (Gänsike et al., 2017):

$$F_{ges} = F_L + F_R + F_S + F_B = \frac{\rho}{2} v^2 c_w A + f_r m g \cos(\alpha) + m g \sin(\alpha) + \lambda m a. \quad \text{Gl. 1}$$

Die aufgeführten Fahrwiderstände sind in Abbildung 2.19 grafisch dargestellt. Die Fahrzeugmasse ist Teil von drei der vier Widerstände, wodurch dessen große Relevanz deutlich wird. Da der Fahrwiderstand beim Fahren überwunden werden muss, hat die Fahrzeugmasse einen signifikanten Einfluss auf Fahrleistung, Verbrauch, Reichweite und Fahrdynamik.

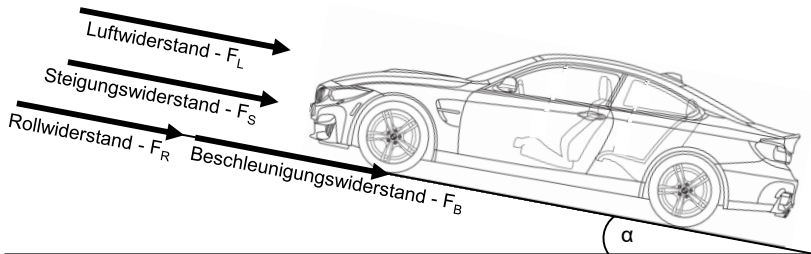


Abbildung 2.19: Darstellung der Fahrwiderstände nach Gänsike et al. (2017)

Fahrleistung

Die Fahrleistung wird in dieser Arbeit mit der Beschleunigung von 0-100 km/h in Sekunden beschrieben. Die Beschleunigung hängt neben der Motorleistung, der Fahrzeugart, der Getriebeübersetzung und weiteren Einflussfaktoren vom Fahrwiderstand und damit vom Fahrzeuggewicht ab. In der Literatur wurde hierzu ein formelmäßiger Zusammenhang von der Environmental Protection Agency (2009) veröffentlicht, der durch Simulationen von Redelbach et al. (2012) bestätigt werden konnte. Die Formel ist in Gl.2 aufgeführt und beschreibt ein Verbrennungsfahrzeug mit Automatikgetriebe. Die Formel gilt näherungsweise auch für Handschalter (Environmental Protection Agency, 2009) und lautet

$$t[s] = 1,679 \left(\frac{P[PS]}{m[kg]} \right)^{-0,805} \quad \text{Gl. 2}$$

Wie dem negativen Exponenten entnommen werden kann, handelt es sich um eine Hyperbel. Das bedeutet, dass eine Gewichtsreduktion bei höheren Motorleistungen zu einer verhältnismäßig geringeren Beschleunigungsverbesserung von 0-100km/h führt.

Hybrid- und batterieelektrische Fahrzeuge weisen eine andere Motorcharakteristik als Verbrennungsfahrzeuge auf und erreichen dadurch bessere absolute Beschleunigungswerte. Der relative Einfluss des Gewichts auf die Beschleunigungszeit wird jedoch als vergleichbar angenommen, da sich dieser vor allem aus dem Leistungsgewicht und den Fahrwiderständen zusammensetzt.

Dem Gewichtseinfluss auf die Beschleunigung steht eine Zahlungsbereitschaft der Kunden für Beschleunigung gegenüber. Diese Zahlungsbereitschaft wurde in der Literatur von mehreren Autoren untersucht. Die Ergebnisse sind in Tabelle 2.1

aufgelistet. Dabei zeigt sich, dass durch unterschiedliche Modelle, Erhebungsmethoden und Datenquellen teilweise stark abweichende Werte ermittelt wurden. Aus diesem Grund wird im Rahmen dieser Arbeit ein arithmetischer Mittelwert verwendet, da eine Qualitätsbewertung der unterschiedlichen Modelle kaum möglich ist. Hierbei sei erwähnt, dass die Studien keinen Unterschied zwischen Fahrzeugklassen und somit Beschleunigungsniveaus machen. Dem Kunden wäre demnach eine Beschleunigungsverbesserung von 5 s auf 4 s genauso viel wert wie von 10 s auf 9 s. Vergleicht man die Zahlungsbereitschaft für Supersportwagen mit der von Kompaktwagen, erscheint diese Annahme als kaum haltbar.

Tabelle 2.1: Literaturübersicht zur Zahlungsbereitschaft für Beschleunigung nach Plotho (2018)³

Zahlungsbereitschaft für Beschleunigung		
Quelle	Wert	Einheit
Leard et al. (2017), aus Marktdaten	932,17	€ (2018) pro Sek 0-100 km/h
Greene (2010), getrimmter Durchschnitt aus 8 Studien	941,80	€ (2018) pro Sek 0-100 km/h
Potoglou und Kanaroglou (2007), Mittelwert, Stated Choice Szenario	635,18	€ (2018) pro Sek 0-100 km/h
Mackenzie (2009) ⁴ , abgelesen, aus Marktdaten	992,10	€ (2018) pro Sek 0-100 km/h
Mittelwert (gewichtet)	917,62	€ (2018) pro Sek 0-100 km/h

Kraftstoffverbrauch und Emissionen

Der Einfluss des Gewichts auf die Fahrwiderstände wirkt sich ebenfalls auf den Kraftstoffverbrauch und damit auf die Abgasemissionen eines Verbrennungsfahrzeugs aus. Hierbei sind die Kraftstoffart und das Fahrverhalten zu berücksichtigende Einflussparameter. So sind Dieselmotoren durch eine höhere Verdichtung effizienter als Benzinmotoren, wodurch der Gewichtseinfluss dort geringer ausfällt (Adomeit et al., 2013, S. 296).

Der CO₂-Ausstoß hängt von der chemischen Zusammensetzung des Kraftstoffs ab. Es ergeben sich dabei je Liter Kraftstoff ca. 2650 g CO₂ für Dieselfahrzeuge und ca. 2400 g CO₂ für Benzinfahrzeuge (Braess et al., 2013b, S. 18).

³ Co-betreute Abschlussarbeit

⁴ Abschlussarbeit

Das Fahrverhalten ist eine weitere Einflussgröße auf den Verbrauch. Zahlreiche wissenschaftliche Untersuchungen verwenden den Fahrzyklus NEFZ, den Neuen Europäischen Fahrzyklus. Dieser wurde in Europa 2018 vom Zyklus WLTP (Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure) abgelöst, findet in China jedoch immer noch Anwendung für die Verbrauchs- und Emissionsbestimmung (International Council of Clean Transportation, 2016). Der NEFZ ist umstritten, da die ermittelten Werte oftmals nicht realitätsnah sind. Dennoch bieten die damit ermittelten Werte gute Anhaltspunkte und eine relative Vergleichbarkeit hinsichtlich des Gewichtseinflusses.

Rohde-Brandenburger (2013) verwendet den NEFZ um mithilfe eines Verbrauchsmodells den Einfluss einer Gewichtsreduzierung von 100 kg zu bestimmen. Dabei wurde nicht nur der NEFZ an sich verwendet, sondern auch der Effekt bei Konstantfahrt, NEFZ_mod (Beschleunigungsarbeit und Schubweg verdoppelt) und NEFZ_AA (angepasster Antriebsstrang über Hubraum und Übersetzung ermöglicht durch Gewichtsreduktion) berücksichtigt. Die Ergebnisse finden sich in Abbildung 2.20.

	vPe	Konstantfahrt		NEFZ		NEFZ_mod		NEFZ_AA	
	l/kWh	l/100 km	g/km	l/100 km	g/km	l/100 km	g/km	l/100 km	g/km
Otto-Saugmotor	0,264	0,07	1,7	0,15	3,4	0,22	5,1	0,35	8,2
Otto aufgeladen	0,275	0,08	1,8	0,15	3,6	0,23	5,4	0,35	8,2
Diesel aufgeladen	0,220	0,06	1,6	0,12	3,2	0,18	4,7	0,28	7,4

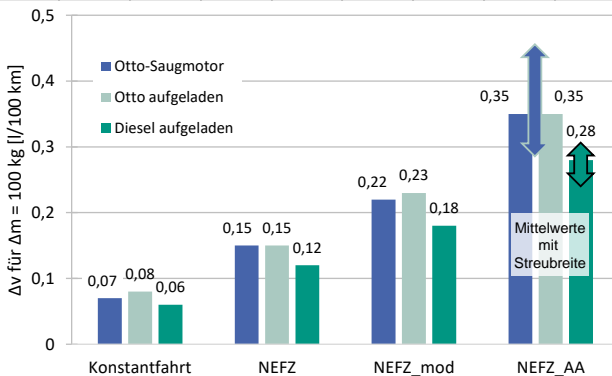


Abbildung 2.20: Kraftstoffeinsparung bei 100 kg Gewichtsreduktion für unterschiedliche Fahrzyklen nach Rohde-Brandenburger (2013)

Diese Auswertung zeigt, dass Zyklus und Kraftstoff einen signifikanten Einfluss haben. Kann dabei der Antriebsstrang aufgrund Gewichtsreduzierungen angepasst werden (NEFZ_AA) sind deutlich höhere Verbrauchseinsparungen realisierbar. Die ermittelten Werte sind valide, da sie auf Rollenprüfständen nachgebildet werden können (Koffler & Rohde-Brandenburger, 2010).

Die Bestimmung des Kraftstoffverbrauchs von Hybridfahrzeugen gestaltet sich auf Grund der starken Abhängigkeit von Ladeverhalten, elektrischer Reichweite und Fahrverhalten als sehr komplex. Im Rahmen dieser Arbeit wird der Kraftstoffverbrauch für PHEVs angenähert, indem der Anteil des Verbrennungsmotors an der Gesamtleistung mit der oben beschriebenen Verbrauchsreduktion multipliziert wird.

Elektrische Reichweite und Zellreduktion

Durch den gewichtsabhängigen Fahrwiderstand ist der Energieverbrauch von elektrifizierten Fahrzeugen ebenfalls gewichtsabhängig. Der Einfluss des Gewichts ist jedoch aufgrund der Rekuperationsfähigkeit und der effizienteren Elektromotoren bei elektrifizierten Fahrzeugen geringer als bei Verbrennungsfahrzeugen (Redelbach et al., 2012). Der Gewichtseinfluss ist jedoch nicht vernachlässigbar, da die Rekuperation der Batterie aufgrund Bremsvorgängen sowie Reibungs- und Rollverlusten bei maximal 30 % liegt (Henning et al., 2019). Der konkrete Gewichtseinfluss wurde in mehreren Studien unter teils unterschiedlichen Prämissen bezüglich Verbrauchsermittlung und Rekuperationsfähigkeit untersucht. Eine Übersicht und ein entsprechender Mittelwert sind in der Tabelle 2.2 dargestellt.

Tabelle 2.2: Energieverbräuche für Elektrofahrzeuge in Abhängigkeit des Gewichts nach Ploto (2018)⁵

Energieverbrauch BEV in Abhängigkeit des Gewichts			
Quelle	Wert	Einheit	Fahrzyklus
Eckstein et al. (2010)	ca. 0,0067	kWh/100km/kg (Wert abgelesen und berechnet)	NEFZ
Redelbach et al. (2012)	ca. 0,0037	kWh/100km/kg (Wert abgelesen und berechnet)	NEFZ
Ellenrieder et al. (2017)	0,0034	kWh/100km/kg	NEFZ
Ellenrieder et al. (2017)	0,004	kWh/100km/kg	Stadt / Land (nicht genau spezifizierbar)
Hofer et al. (2012)	0,0052	kWh/100km/kg	NEFZ
Mittelwert	0,00459	kWh/100km/kg	-

Der gewichtsinduziert verringerte Energieverbrauch kann auf zwei Wegen von Nutzen sein. Zum einen existiert eine Zahlungsbereitschaft der Kunden für elektrische Reichweite. Hierzu wurden drei Studien herangezogen und die Ergebnisse in Abbildung 2.21 aufgetragen. Da die Werte aus unterschiedlichen Jahren und Währungen stammen, wurden die Werte inflationsbereinigt auf das Jahr 2018 in Euro umgerechnet. Eine angewandte Potenzregression mit dem Bestimmtheitsmaß⁶ R^2 von 0,94 zeigt eine gute Übereinstimmung der Studien.

⁵ Co-betreute Abschlussarbeit

⁶ Das Bestimmtheitsmaß R^2 ist ein Maß zur Beurteilung der Anpassungsgüte einer Regression, also wie gut ein Modell die Messwerte beschreiben kann. Der Wertebereich reicht von 0 bis 1, wobei 1 eine perfekte Übereinstimmung von Modell und Messwerten repräsentiert. (Kosfeld et al., 2016).

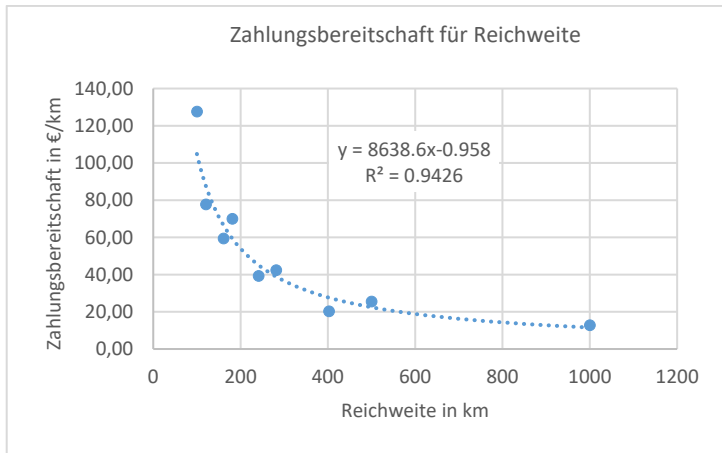


Abbildung 2.21: Zahlungsbereitschaft pro Kilometer abhängig von Grundreichweite.
Datenpunkte aus Hackbarth und Madlener (2016),
Hidrué et al. (2011) und Daziano (2013)

Aus dem dargestellten Zusammenhang wird deutlich, dass die Zahlungsbereitschaft bei höheren elektrischen Grundreichweiten stark abnimmt. Bei höheren Grundreichweiten kommt deshalb ein weiterer Effekt zum Tragen. So kann die Reduktion von Batteriezellen im Hochvoltspeicher bei gleicher Reichweite günstiger als eine Reichweitenerhöhung sein. Dies muss im Einzelfall abgewogen werden, da die Batteriezellen oftmals konkurrierende Anforderungen bezüglich Kosten, Bauraum oder Plattform- und Baukastenstrategien erfahren (vgl. Nykvist & Nilsson, 2015).

Auslegung und Sicherheit

Das Fahrzeuggewicht ist eine dimensionierende Größe in der Fahrzeugauslegung. Dies zeigt sich besonders im Kontext der sogenannten Gewichtsspirale (Trautwein, 2011). Die Gewichtsspirale ist ein Effekt im Fahrzeugbau, der die Sekundäreffekte von Gewichtsänderungen beschreibt. Solch eine Gewichtsspirale ist in Abbildung 2.22 in jeweils beide Richtungen dargestellt. In diesem Beispiel führt eine leichtere Karosserie zu geringeren Kräften auf das Fahrwerk, wodurch dieses leichter und günstiger konstruiert werden kann. Durch diese Gewichtsreduktionen kann ein kleinerer Motor für die gleichen Fahrleistungen bei niedrigerem Verbrauch verwendet werden. Somit kann ein kleinerer Tank bei konstanter Reichweite verbaut

werden. In Summe führt solch eine Spirale zu leichteren und kostengünstigeren Fahrzeugen. (Gänsike et al., 2017)

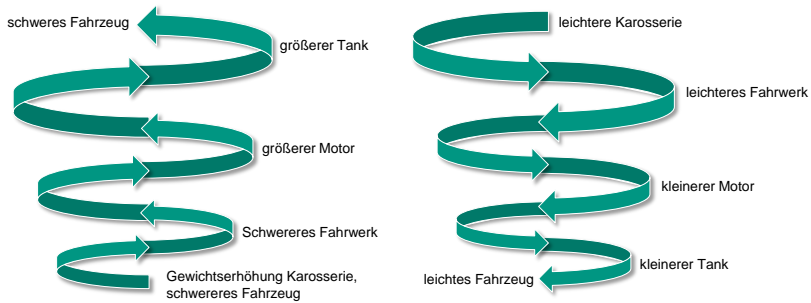


Abbildung 2.22: Gewichtsspirale bei Fahrzeuggewichtsänderungen nach Gänsike et al. (2017)

Im Zuge der beschriebenen Sekundäreffekte sollten ebenfalls die Auslegungsgrenzen von Fahrzeugkomponenten erläutert werden. Auslegungsgrenzen beschreiben im Kontext dieser Arbeit die maximal ertragbare Komponentenbelastung hervorgerufen durch Gewicht. Prominente Beispiele sind hierfür Federn, Räder- und Reifen, Bremsen, Lenkung oder die Crashesicherheit (insbesondere Dachdrucktest). Das Überschreiten solcher Auslegungsgrenzen ist oftmals der Startpunkt einer Gewichtsspirale.

Zuladung

Die Zuladung beschreibt die Differenz aus zulässigem Gesamtgewicht (Messlast 3) und Leergewicht (Messlast 1). Die Zuladung stellt somit die Nutzlast der Kunden und damit eine kundenerlebte Eigenschaft dar (Albers et al., 2018d). Da sich viele Komponenten-Auslegungsgrenzen auf das zulässige Gesamtgewicht beziehen (z.B. Bremsen), kann dieses Gewicht oftmals nicht erhöht werden. Demzufolge führt eine Erhöhung des Leergewichts zu einer reduzierten Zuladung und daher zu einem Produkt mit geringerer Kundenwertigkeit.

Fahrdynamik

Die Fahrdynamik im Sinne der Querdynamik ist oftmals ein zentrales Verkaufsargument der Automobilindustrie (ADAC, 2012). Das Fahrzeuggewicht verkörpert hierbei eine wichtige Einflussgröße, da die Fliehkraft schwerere Fahrzeuge grundsätzlich stärker zur kurvenäußeren Seite zieht (Gänsike et al., 2017). Eine zentrale Größe bei der Bewertung der Querdynamik ist das

Wankmoment. Die Modellierung eines Fahrzeugs durch ein Feder-Masse-Dämpfer-System veranschaulicht den Zusammenhang aus Fahrzeuggewicht, Schwerpunkt und Wankmoment (siehe Abbildung 2.23). Es zeigt sich, dass ein geringeres Gewicht und ein niedrigerer Schwerpunkt zu niedrigeren Wankmomenten führt, wodurch ein gleichmäßigerer Kraftschluss und ein stabileres Fahrverhalten erreicht werden kann.

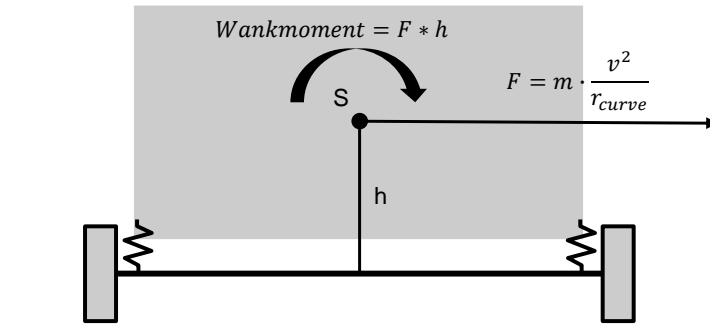


Abbildung 2.23: Vereinfachtes Modell zum Wankverhalten nach Gänsike et al. (2017)

Aus Sicht der Querdynamik sind Leichtbauaktivitäten vor allem im Dach-, Front- und Heckbereich zu bevorzugen (Ellenrieder et al., 2017, S. 99). Die Bestimmung einer konkreten Zahlungsbereitschaft des Kunden für Querdynamik ist allerdings aufgrund der subjektiven Wahrnehmung nicht trivial.

Komfort und Akustik

Der Einfluss des Gewichts auf Fahrkomfort und Akustik ist ebenfalls nicht trivial. Im Rahmen dieser Arbeit werden hierzu nur grundsätzliche Aussagen berücksichtigt. Allgemein gilt, dass der Fahrkomfort durch niedrigere ungedeferte Massen wie Reifen, Räder oder Bremsen verbessert wird. Dagegen wird die Fahrzeugakustik in der Regel durch einen höheren Materialeinsatz und damit höheres Gewicht verbessert (Hessenauer, 2014).

2.2.1.3 Charakteristika von Gewicht in der Fahrzeugentwicklung

In der Konstruktionsmethodik wird bei der Modellierung von Produkten meist zwischen Merkmalen (englisch: *characteristics*) und Eigenschaften (englisch: *properties*) unterschieden. Die Merkmale definieren dabei das Produkt und können vom Entwickler direkt bestimmt werden. Die Eigenschaften beschreiben das Produktverhalten und können nicht direkt vom Entwickler bestimmt werden. Das

Gewicht einer Konstruktion wird in der Literatur meist als Eigenschaft verstanden. Das bedeutet, dass das Gewicht eine Resultierende aus den gewählten Merkmalen wie Material (inkl. Dichte) und Geometrie darstellt. (Weber & Werner, 2000)

Aus dem Verständnis der Eigenschaft Gewicht als resultierende Größe leitet sich oftmals die Meinung ab, dass Gewichtsziele unnötig seien. Diese Sichtweise ignoriert allerdings die Tatsache, dass gerade das Gewicht als stark wechselwirkende Größe (siehe Abschnitt vorher) eine zentrale Auslegungsgröße in der Konstruktion darstellt. Man kann deshalb von einem Dualismus des Gewichts als Ein- und Ausgabegröße der Entwicklung sprechen. Dies ist bei komplexen Produkten oftmals nicht direkt ersichtlich, da sich die Eingangsgrößen (Auslegungsfälle) meist auf aggregierte Gewichte beziehen, die Ausgangsgröße jedoch komponentenbezogene Gewichte darstellen. Dieser iterative Zusammenhang ist in Abbildung 2.24 grafisch dargestellt.

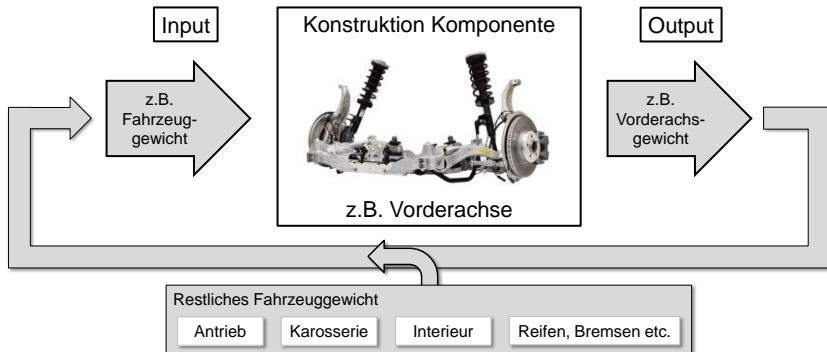


Abbildung 2.24: Dualismus des Gewichts als Ein- und Ausgabegröße der Entwicklung, Bild aus A2mac1 (2020)

Neben dem beschriebenen Dualismus zeichnet sich das Gewicht durch eine hohe Anfälligkeit gegenüber technischen Änderungen aus. Da jede physische Komponente ein Gewicht hat, führen Änderungen meist auch zu Gewichtsänderungen. Diese Gewichtsänderungen können wiederum Konstruktionsanpassungen in anderen Komponenten notwendig machen und somit eine Gewichtsspirale anstoßen.

Eine weitere Charakteristik des Gewichts in der Automobilindustrie ist die projektabhängige Relevanz des Gewichts. Die vorgestellten Wechselwirkungen zeigen zahlreiche, aber oftmals auch verhältnismäßig geringe Auswirkungen auf

kundenerlebbarer Fahrzeugeigenschaften. Da das Gewicht selbst oftmals kein entscheidender Kaufgrund für Kunden ist, müssen Gewichtsreduzierungsmaßnahmen meist über deren Einfluss auf andere kunden- oder unternehmenskritische Eigenschaften (z.B. Kosten) argumentiert werden (vgl. Aral AG, 2015). Die individuelle Gewichtssituation des jeweiligen Fahrzeugprojekts bestimmt daher oftmals die Relevanz und damit den Härtegrad des angestrebten Gewichtsziels.

2.2.2 Aufgaben des Gewichtsmanagements in der Automobilindustrie

Eine zentrale Aufgabe des Gewichtsmanagements ist die Bereitstellung von Auslegungs- und Zielgewichten über den gesamten Fahrzeugentstehungsprozess hinweg. Die Vorgehensweise lässt sich anschaulich am erweiterten ZHO-Modell nach Albers et al. (2012) in Abbildung 2.25 erläutern.

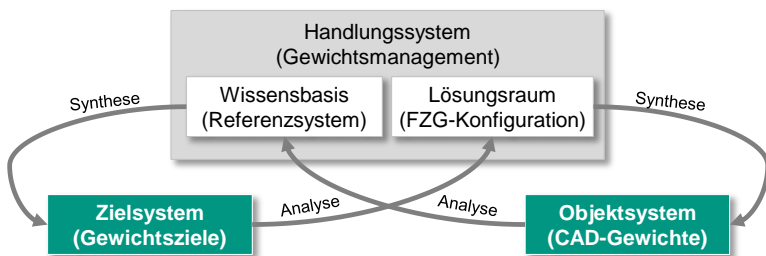


Abbildung 2.25: Erweitertes ZHO-Modell nach Albers et al. (2012) im Kontext des Gewichtsmanagements (konkrete Beispiele in Klammern dargestellt)

Das Gewichtsmanagement als Teil des Handlungssystems leitet in einer frühen Phase des Fahrzeugprojekts ein Gesamtfahrzeuggewichtsziel unter Zuhilfenahme der Wissensbasis ab. Die Wissensbasis setzt sich anfangs aus dem Wissen über die unternehmensinternen Randbedingungen und dem Referenzsystem bestehend aus Vorgänger- und relevanten Wettbewerbsfahrzeugen zusammen. Auf Basis dieses Zielgewichts startet eine initiale Analyse- und Syntheseschleife der Entwicklungsbereiche, die in einer ersten Fahrzeugkonfiguration resultiert. Diese wird meist als virtuelles Modell im Objektsystem umgesetzt. Die Erkenntnisse aus den ersten Artefakten im Objektsystem erweitern die Wissensbasis. Darauf aufbauend werden die Gewichtsziele nachgeschärft und konkretisiert. Dies stellt den Start der nächsten Iteration dar. (Ellenrieder et al., 2017, S. 82–92)

Neben der Bereitstellung von Ziel- und Auslegungsgewichten werden nachfolgend weitere Aufgaben des Gewichtsmanagement anhand der Aktivitäten der Produktentstehung im iPeM vorgestellt (siehe Abbildung 2.26). Die Teilaktivität *Gewicht managen* findet sich grundsätzlich in der Aktivität *Projekte managen* wieder. Jedoch erfordert diese Teilaktivität den Input von weiteren gewichtsrelevanten Aktivitäten. So wurde bereits angedeutet, dass die Gewichtsziele fortwährend anhand neuer Erkenntnisse (Gewichtsdaten, neue Anforderungen etc.) *validiert und verifiziert* werden müssen. Im Zuge dessen muss ein stetiger Wissensaufbau und ein *Wissensmanagement* innerhalb der Gewichtsmanagementabteilung betrieben werden. Dieser Bedarf wird durch die stetige Mitarbeiterfluktuation bei heutigen Automobilherstellern noch verstärkt und durch Befragungen bei Gewichtsingenieuren unterstrichen (Fisher, 2017). Wie bereits im vorherigen Kapitel erwähnt, verändern technische Änderungen meist das Fahrzeugesamtgewicht, da die meisten Änderungen an Komponenten auch eine Gewichtsänderung mit sich bringen. Aus diesem Grund sollte das Gewichtsmanagement die *Änderungen* im Fahrzeugprojekt ständig beobachten und im Idealfall mitgestalten. (Kreis & Blankenburg, 2014; SAWE Recommended Practices and Standards, 2018)

Das Gewichtsmanagement ist aber nicht nur Teil der Grundaktivitäten, sondern auch der Produktentwicklungsaktivitäten. So beinhaltet das Gewichtsmanagement auch die aktive Gestaltung des Gewichts in den Aktivitäten *Profile finden*, *Ideen finden* und *Prinzip und Gestalt modellieren*. Die Aktivität *Prototyp aufbauen* ist ebenfalls relevant, da die Prototypen gewogen und damit als Validierungsfahrzeuge herangezogen werden. Die Kenntnis und Steuerung der exakten Konfiguration ist daher von entscheidender Bedeutung. Eine weitere Aufgabe des Gewichtsmanagements ist die Bereitstellung der Homologationsgewichte für die Zulassung der Fahrzeuge in den Vertriebsmärkten. Diese sind von hoher Kritikalität, da auf Basis dieser Gewichte zum Beispiel Verbrauchswerte oder Zuladungsgrenzen bestimmt werden. Da die ab SOP produzierten Fahrzeuge nur in einem gewissen Toleranzbereich von den Homologationsgewichten abweichen dürfen, muss die *Produktion* und die *Markteinführung* durchgängig überwacht werden. Die *Nutzung* muss insofern analysiert werden, als dass bei manchen Auslegungslastfällen die Häufigkeit der Kundenbestellung (engl. *take rate*) von Sonderausstattungen (SA) bei der Berechnung berücksichtigt werden muss. Der *Abbau* sollte hinsichtlich der eingesetzten (Leichtbau-)Materialien analysiert werden, um Wissen für die Nutzung in zukünftigen Produktgenerationen aufbauen zu können. (Kreis & Blankenburg, 2014; SAWE Recommended Practices and Standards, 2018; SAWE Recommended Practices and Standards, 2007)



Abbildung 2.26: Das iPeM im Kontext des Gewichtsmanagements

Es zeigt sich, dass alle Aktivitäten der Produktentstehung potenziell relevant für das Fahrzeuggewicht und damit das Gewichtsmanagement sind. Prinzipiell sollten damit auch alle Aktivitäten bei der Quantifizierung von Gewichtszielen berücksichtigt werden, was eine erhebliche Herausforderung für das Gewichtsmanagement bedeutet. Aus diesem Grund wird üblicherweise eine projektabhängig reduzierte Anzahl an Aktivitäten für die Gewichtszielableitung herangezogen.

Die vorgestellten Aufgaben des Gewichtsmanagements führen zur folgenden, an Kreis und Blankenburg (2014) angelehnten, Definition des Gewichtsmanagements.

Definition 22: Gewichtsmanagement

Unter Gewichtsmanagement wird die Planung, Kontrolle, Steuerung und Optimierung der Eigenschaft „Gewicht“ in Projekten der Produktentwicklung verstanden.

2.2.3 Komplexität und Unsicherheit im Umfeld des Gewichtsmagements

Die Komplexität des Produkts Automobil und des dazugehörigen Umfelds führen zu Unsicherheiten, die eine große Herausforderung für das Gewichtsmangement darstellen. In diesem Abschnitt soll zunächst allgemein auf Komplexität, Unsicherheit und Änderungen in der Produktentstehung eingegangen werden. Darauf aufbauend wird auf den Begriff des Risikos eingegangen und zentrale Ansätze des Risikomanagements beschrieben. Komplexität, Unsicherheit und Risiko werden schließlich im Kontext des automobilen Gewichtsmagements diskutiert und resultierende Herausforderungen abgeleitet.

2.2.3.1 Komplexität in der Produktentstehung

Im Kontext der Automobilentwicklung wird häufig von komplexen Produkten und Prozessen gesprochen. In diesem Abschnitt soll daher der Begriff der Komplexität näher beleuchtet werden. Der Duden (2019) definiert *komplex* als *vielschichtig*, *umfassend* oder *ineinandergreifend*. Diese Synonyme deuten einen Zusammenhang mit Systemen und Vernetzung an, der auch von weiteren Autoren in der Literatur aufgegriffen wird.

So ist ein System nach Luhmann (1994, S. 66) dann als komplex zu bezeichnen, wenn nicht mehr jedes Element eines Systems jederzeit mit jedem anderen verknüpft sein kann. Die Vernetzung scheint auch für weitere Autoren ein zentrales Merkmal von Komplexität zu sein. So besteht für Simon (1994, S. 183) ein komplexes System aus einer großen Anzahl an Elementen, die zahlreiche Interaktionen aufweisen. Diese Ansicht wird von Patzak (1982, S. 22) systematisiert, indem er die Komplexität als Zusammenspiel aus Varietät (Elementvielfalt) und Konnektivität (Beziehungsvielfalt) modelliert. Diese Komplexität wird strukturelle Komplexität eines Systems genannt und ist in Abbildung 2.27 dargestellt (Biedermann et al., 2010).

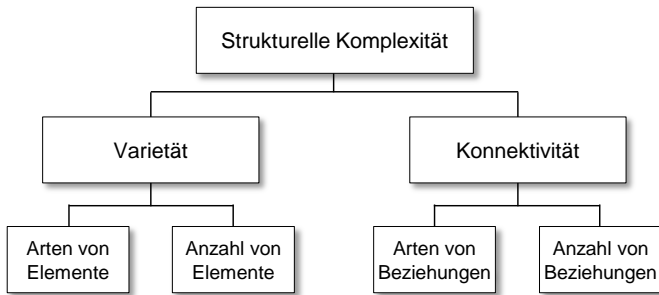


Abbildung 2.27: Strukturelle Komplexität nach Patzak (1982)

Neben der strukturellen Komplexität existiert nach Schuh (2005, S. 6) noch die dynamische Komplexität. Diese setzt sich aus der Veränderlichkeit und Dynamik der Systemelemente und Wechselwirkungen zusammen. Die Offenheit der Systemgrenze und die damit einhergehende Interaktion mit anderen Systemen ist hierbei eine zentrale Einflussgröße.

Die Ausprägungen der zwei Komplexitätsarten ermöglichen eine Einteilung von Systemen. Abbildung 2.28 stellt diese Einteilung dar und verdeutlicht, dass Komplexität vor allem durch eine hohe dynamische Komplexität entsteht. (Schuh, 2005, S. 6)

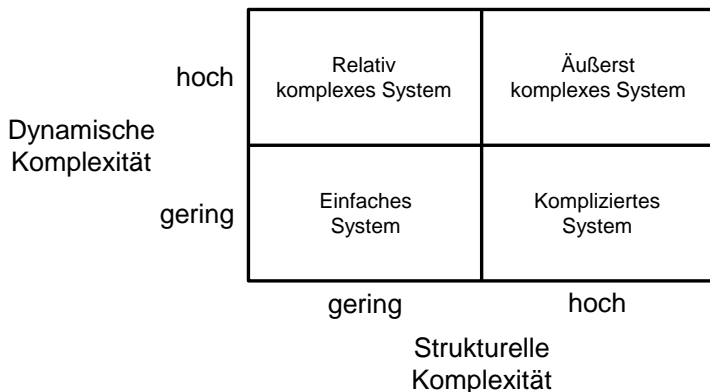


Abbildung 2.28: Systemeinteilung nach dynamischer und struktureller Komplexität. Darstellung von Ebel (2015), angelehnt an Schuh (2005, S. 6)

Lindemann et al. (2009, S. 27) greifen dieses Verständnis der Komplexität in der Produktentstehung auf und schlagen die Unterteilung in Markt-, Produkt-, Prozess- und Organisationskomplexität vor. Dabei sollte gerade im Hinblick auf Strategien zum Umgang mit Komplexität zwischen innerer (beeinflussbarer) und externer (nicht beeinflussbarer) Komplexität unterschieden werden. Abbildung 2.29 veranschaulicht die beschriebenen Unterteilungen und konkretisiert mit einigen Beispielen.

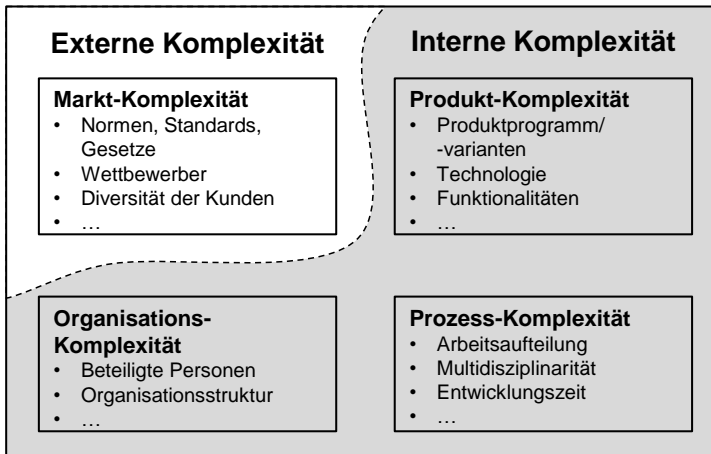


Abbildung 2.29: Einteilung der Komplexitäten nach Lindemann et al. (2009, S. 27)

Geraldi et al. (2011) betonen dagegen die unterschiedlichen Facetten der Systemkomplexität. So leiten sie aus der Analyse zahlreicher Veröffentlichungen die folgenden fünf Dimensionen der Komplexität ab:

- *Strukturelle Komplexität*: Anzahl, Varietät und Konnektivität der Systemelemente
- *Unsicherheit*: Ausdruck von Neuheit, Mehrdeutigkeit, Erfahrung und Verfügbarkeit von Information
- *Dynamik (Dynamische Komplexität)*: Auftreten von Änderungen
- *Schnelligkeit*: Dringlichkeit, Kritikalität von Terminzielen und Straffheit der Zeitrahmen
- *Sozio-Politische Komplexität*: Entstehung durch Hidden Agendas, Interessenkonflikten, Kommunikationsbarrieren und Missverständnissen

Breitschuh et al. (2018) kombinieren die Dimensionen der Komplexität mit dem *Cynefin Framework* von Snowden und Boone (2007) zum sogenannten *Entropie-Kompass* (siehe Abbildung 2.30). Das *Cynefin Framework* als Kern des Modells ermöglicht eine Bewertung des vorliegenden Systems hinsichtlich dessen Status und gibt geeignete Handlungsempfehlungen. Der Status des Systems kann dabei chaotisch, komplex, offensichtlich oder kompliziert sein. Die Dimensionen der Komplexität umgeben dieses Framework, um Übergänge zwischen den Status abbilden und detektieren zu können.

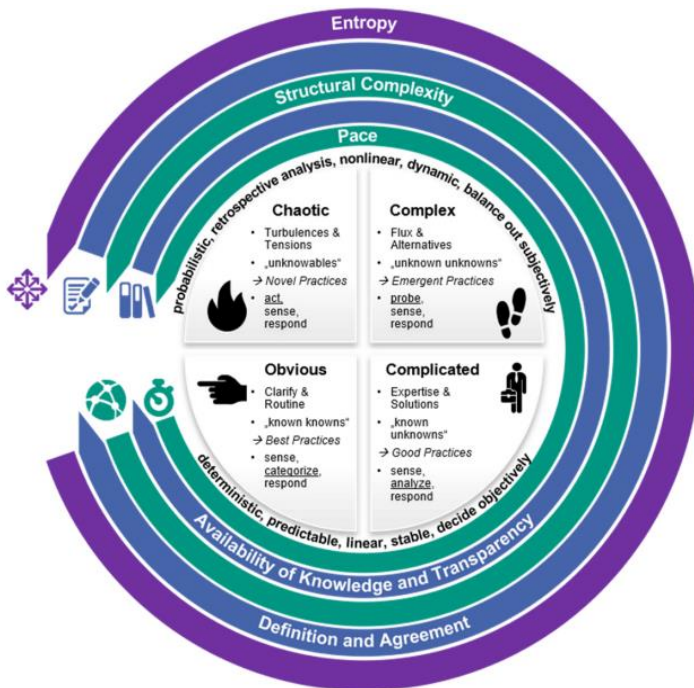


Abbildung 2.30: Entropie-Kompass nach Breitschuh et al. (2018)

Die Komplexität steht nach Ansicht vieler Autoren in starker Wechselwirkung zur Unsicherheit in Produktentstehungsprozessen. So ist Suh (1999) der Überzeugung, dass die Komplexität durch das Maß an Unsicherheit bestimmt wird. Unsicherheit führt demnach erst zu Komplexität. Im Gegensatz dazu versteht Malik (2003, S. 292) die Unsicherheit als Merkmal von Komplexität. Demnach führt eine geringe Komplexität zu geringen Unsicherheiten (Maurer, 2007, S. 33).

Es lässt sich festhalten, dass Komplexität und Unsicherheit in der Produktentstehung gegenseitig wechselwirken. Aus diesem Grund wird die Unsicherheit im folgenden Abschnitt näher beleuchtet.

2.2.3.2 Unsicherheit in der Produktentstehung

In der Literatur finden sich zahlreiche Definitionen für den Begriff der Unsicherheit in der Produktentstehung, da Unsicherheiten allgegenwärtig sind und nicht ignoriert werden dürfen (Weck et al., 2007). In Tabelle 2.3 sind einige Definitionen aufgelistet, die einen Überblick über das Spektrum der Unsicherheitsbetrachtungen geben.

Tabelle 2.3: Überblick über relevante Unsicherheitsdefinitionen nach Ehret (2018)⁷

Definition	Quelle
Eine grundlegende Definition von Unsicherheit ist "Anfälligkeit hinsichtlich Chancen oder Risiken", "Zweifelhaftigkeit oder Unklarheit", „Mangel an Sicherheit oder Vertrauen; Zögern, Unentschlossenheit" und "etwas, das nicht eindeutig bekannt oder erkennbar ist".	Murray (1961)
Die Unsicherheit kann durch die Differenz zwischen benötigten und vorhandenen Informationen zur Lösung eines Problems beschrieben werden.	Galbraith (1973)
Unsicherheit beschreibt unvollständiges Wissen (an Informationen oder in Bezug auf den Kontext) das dazu führt, dass modellbasierte Vorhersagen von der Realität abweichen. Diese Abweichung kann durch eine Verteilungsfunktion beschrieben werden.	DeLaurentis und Mavris (2000)
Beinhaltet unbekanntes, sich verändernde Variablen, deren Ungewissheit im Laufe der Zeit, durch Ereignisse und Aktionen bekannt wird und sich auflöst.	Mun (2006)
Unsicherheit beschreibt eine Abweichung wirkender Einflussfaktoren von einem deterministischen Wert.	Wiebel et al. (2013)
Unsicherheit im Kontext heutiger Produktentstehungsprozesse ist die Wissens- und Definitionslücke in der Entwicklung.	Lohmeyer (2013)
Unsicherheit beschreibt den Anteil der Unbestimmtheit in einer prinzipiell fixierten Größe, der durch mangelnde oder unvollständige Kenntnis oder durch die angewandte Messmethodik und Messfehler bedingt ist.	Heinemeyer und Mosbach-Schulz (2014)

Neben diesen Definitionen haben Weck et al. (2007) analysiert, dass *Unsicherheit* ein amorphes Konzept sei, mit dem sowohl die Wahrscheinlichkeit von falschen Annahmen während der Entwicklung als auch das Vorhandensein von völlig

⁷ Co-betreute Abschlussarbeit

unbekannten Fakten, die einen Einfluss auf das zukünftige Produkt oder System und dessen Markterfolg haben könnten, beschrieben wird. Darauf aufbauend können fünf Ursachen von Unsicherheit identifiziert werden, die überlappen und voneinander abhängig sind (siehe Abbildung 2.31). Hier zeigen sich Parallelen zur Einteilung der Komplexität nach Lindemann et al. (2009).

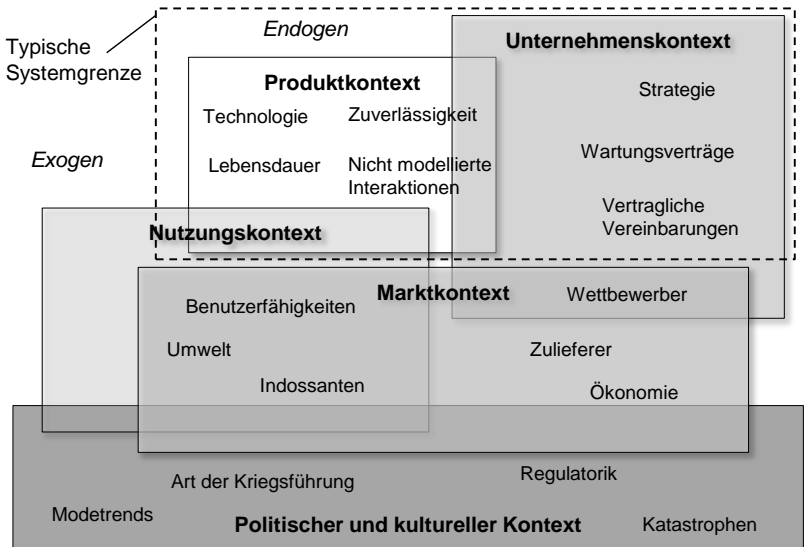


Abbildung 2.31: Unsicherheitsquellen nach Weck et al. (2007)

Die daraus entstehenden Unsicherheiten werden von Earl et al. (2005) zunächst nach bekannten und unbekanntem Unsicherheiten aufgeteilt. Die bekannten Unsicherheiten sind vorhersehbar und beschreibbar, die unbekanntem Unsicherheiten sind unvorhersehbar und damit auch nicht auflösbar. Diese Einteilung spaltet sich in die zwei Bereiche Beschreibungs- und Datenunsicherheit auf (siehe Abbildung 2.32). Diese Einteilung stammt aus der Modellerstellung in der Produktentwicklung und entspricht der Unterscheidung von Modell- und Datenunsicherheit.

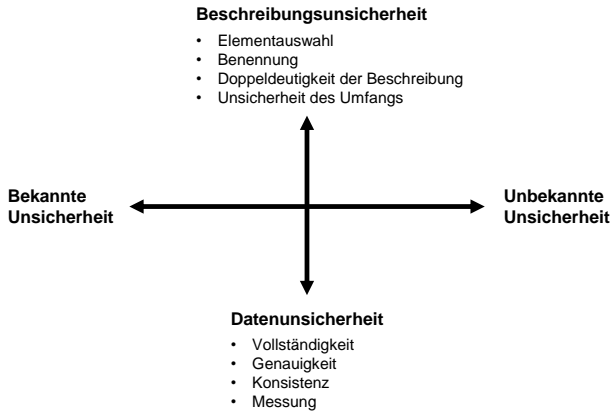


Abbildung 2.32: Unsicherheitstypen nach Earl et al. (2005)

Hastings und McManus (2006) teilen die grundsätzlichen Ansichten, sehen die Unsicherheit allerdings als Kontinuum und führen drei Unsicherheitskategorien ein (siehe Abbildung 2.33). Das Kontinuum erstreckt sich über statistische, bekannte und unbekannte Unsicherheiten. Die statistischen Unsicherheiten können statistisch erfasst und damit bestimmt werden. Die bekannten Unsicherheiten sind qualitativ bekannt, aber quantitativ meist nur mit großem Aufwand bestimmbar. Dies würde eine Überführung in die Kategorie der statistischen Unsicherheiten bedeuten. Die unbekannteten Unsicherheiten sind per se unvorhersehbar und damit nicht bestimmbar. Zudem nehmen Hastings und McManus (2006) die Entwicklerperspektive ein und beschreiben die Unsicherheit als Ansammlung von Wissens- und Definitionslücken. Wissenslücken liegen vor, wenn nicht alle notwendigen Informationen für die Produktentwicklung vorliegen. Definitionslücken liegen vor, wenn ein Produkt noch nicht ausreichend spezifiziert ist (z.B. bei noch ausstehenden Entscheidungen).

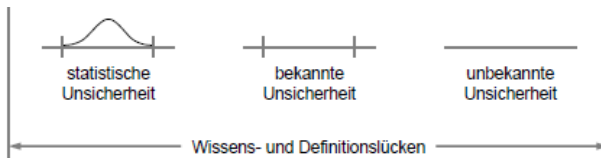


Abbildung 2.33: Einteilung der Unsicherheit nach Hastings und McManus (2006)

2.2.3.3 Technische Änderungen in der Produktentstehung

Technische Änderungen in der Produktentstehung sind Ausdruck, aber auch Ursprung von Unsicherheit. So können Unsicherheiten in den Anforderungen zu technischen Änderungen führen, dagegen führen technische Änderungen zu einer Gewichtsunsicherheit hinsichtlich des späteren Produktgewichts. Aus diesem Grund werden Änderungen im folgenden Abschnitt näher beleuchtet. (Weck et al., 2007)

Änderungen werden in zahlreichen wissenschaftlichen Fachrichtungen beschreiben. So wird beispielsweise der Term Änderungsmanagement (engl. *change management*) oftmals im Rahmen von Umorganisationen von Geschäftsmodellen oder Firmen verwendet. In dieser Arbeit soll daher der Begriff der Änderungen auf technische Änderungen (engl. *engineering change*) eingegrenzt werden. Eine technischen Änderung wird gemäß Jarratt et al. (2004) wie folgt definiert:

Definition 23: Technische Änderung

Eine technische Änderung ist eine Änderung an Bauteilen, Zeichnungen oder Software, die bereits während des Produktentwicklungsprozesses freigegeben wurden. Die Änderung kann von beliebiger Größe oder Art sein; die Änderung kann eine beliebige Anzahl von Personen betreffen und beliebig lange dauern.

Wie bereits einleitend angedeutet, kann eine technische Änderung, im Folgenden nur Änderung genannt, zahlreiche Gründe haben. Eckert et al. (2004) kategorisierten die Änderungsgründe beispielsweise in *emergent* (vom Produkt herrührend, z.B. Fehler, Sicherheit oder Qualität) oder *initiiert* (von außerhalb des Produkts, z.B. Kundenwünsche, Marketing, Produktion, Lieferanten oder Gesetzgebung).

Neben den Änderungsgründen sind vor allem die Auswirkungen von Änderungen von großem Interesse in der Produktentwicklung. Änderungen beeinflussen dabei vor allem die Projektkosten, die Projektdauer und die beteiligten Mitarbeiter (Jarratt et al., 2011). So haben verschiedene Studien ergeben, dass vor allem späte Änderungen sehr teuer werden können. So berichten Terwiesch und Loch (1999) von einer Änderung aus der Automobilindustrie, die aufgrund von Anpassungen an Produktionswerkzeugen etwa 200.000 € kostete. Im Gegensatz dazu, kostete eine andere Änderung am gleichen Bauteil weniger als 10.000 €, da die Änderung bereits vor der Herstellung des Werkzeugs umgesetzt wurde. Die Erfahrungen aus der

teilnehmende Beobachtung des Autors bei der BMW Group bestätigen diese Größenordnungen. Betriebswirtschaftlich sinnvolle Leichtbauoptimierungen an Bauteilen müssen unter anderem deshalb deutlich vor der Werkzeugherstellung erfolgen.

Gerade in komplexen Produkten kommen Änderungen meist nicht singular vor. So führen Änderungen oftmals zu weiteren Änderungen, eine Studie von Rowell et al. (2009) ergab zum Beispiel, dass 36% der untersuchten Änderungen durch eine andere Änderung hervorgerufen wurden. Diese Ausbreitung von Änderungen kann dabei gemäß Eckert et al. (2004) in endliche und unendliche Änderungsausbreitungen unterschieden werden (siehe Abbildung 2.34). Endliche Ausbreitungen können wiederum als auslaufende kleine Änderungswellen oder aber als Änderungsblüte auftreten. Diese Blüte steht dabei sinnbildlich für eine hohe Änderungsanzahl, die rechtzeitig aufgelöst werden konnte. Unendliche Ausbreitungen werden dabei als Lawine dargestellt, die mindestens zu einem Zeitverzug und schlimmstenfalls zu einem Projektabbruch führt.

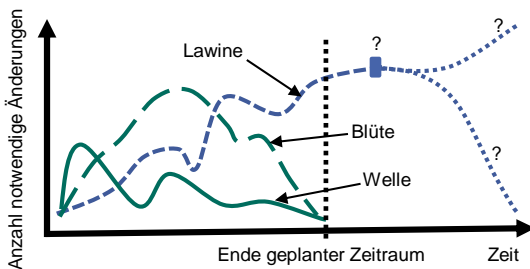


Abbildung 2.34: Verschiedene Ausbreitungsformen von Änderungen nach Eckert et al. (2004)

Allgemein kann festgehalten werden, dass die Auswirkungen von Änderungen stark vom zugrundeliegenden Produkt abhängig sind. So bestimmen gerade die Produktkomplexität, die Produktarchitektur und der Innovationsgrad des Produkts das Ausmaß der Änderungsauswirkungen. Da das Automobil als komplexes Produkt gilt, meist auf Plattformarchitekturen aufbaut und einige Subsysteme einen erhöhten Innovationsgrad aufweisen, ist von hohen Änderungsauswirkungen auszugehen. Wie am Anfang des Kapitels beschrieben, resultiert daraus eine erhöhte Unsicherheit, die im Produktentstehungsprozess berücksichtigt werden muss. Im folgenden Abschnitt wird mit dem Risikomanagement ein geeigneter Ansatz beschrieben, um die Auswirkungen von Änderungen und Unsicherheiten erfolgreich zu managen.

2.2.3.4 Risikomanagement – Umgang mit Komplexität und Unsicherheit

Komplexität und Unsicherheit sind deshalb im Fokus von zahlreichen Forschungsarbeiten, weil sie zu Risiken in der Produktentstehung führen. So repräsentiert das Risiko gemäß DIN ISO 31000 die Auswirkung von Unsicherheit auf Ziele. Hastings und McManus (2006) unterstreichen dieses Verständnis, in dem sie Risiken als Produkt aus Eintrittswahrscheinlichkeit eines unsichereren Ereignisses und dem Ausmaß der Auswirkung beschreiben. Hierbei ist wichtig zu erwähnen, dass Risiken auch positive Auswirkungen beschreiben können. Diese werden dann meist Chancen oder Potentiale genannt.

Ein zentraler Aspekt des Risikomanagements ist die Identifikation und Beurteilung von Risiken. Hierfür existieren unzählige Methoden und Vorgehensweisen, von denen im Folgenden zwei Ansätze näher beschreiben werden. So kann nach Albers et al. (2017d) das technische Risiko der Subsysteme eines Produkts auf Basis der jeweiligen Referenzprodukte bestimmt werden. Aus dem Ursprung des Referenzprodukts (z.B. firmenintern, branchenfremd oder aus der Forschung) und dem Neuentwicklungsanteil der Subsysteme kann ein Risikoportfolio gebildet werden (siehe Abbildung 2.35).

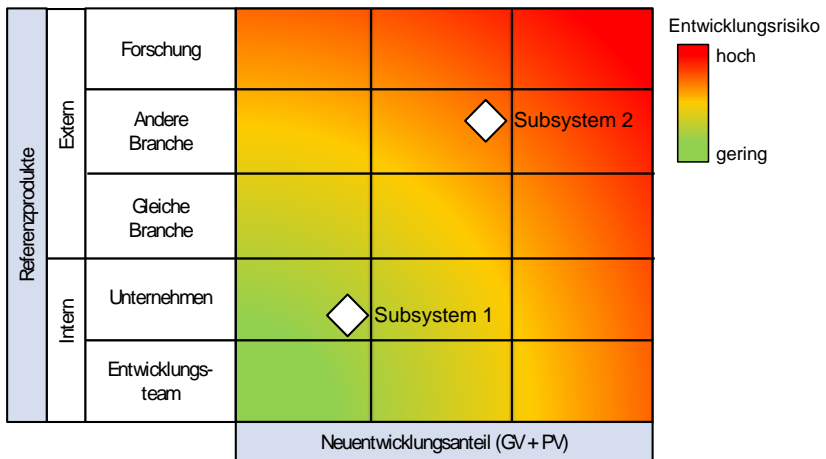


Abbildung 2.35: Risikoportfolio nach Albers et al. (2018f)

Ein weiterer Ansatz stammt aus dem Bereich der Validierung, wonach die risikobehaftetsten (kritischsten) Subsysteme zuerst validiert werden sollten. Albers et al. (2014) entwickelten hierzu eine Kritikalitätsmatrix, mit der die Kritikalität von

Subsystemen anhand der Dimensionen Impact, Technologie und Anwendungsszenario bewertet werden kann (siehe Abbildung 2.36). Der Impact beschreibt dabei den Einfluss des Subsystems auf das restliche Produkt und die Technologie repräsentiert den Bekanntheitsgrad der verwendeten Technologie. Das Anwendungsszenario spiegelt den Änderungsgrad der Anforderungen und Randbedingungen des Subsystems im Vergleich zur vorherigen Produktgeneration wider.

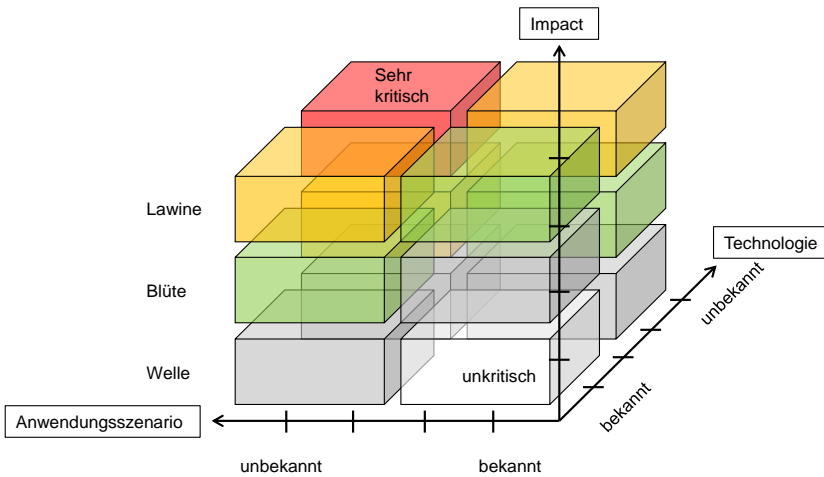


Abbildung 2.36: Kritikalitätsmatrix nach Albers et al. (2014)

Neben der Identifikation und Beurteilung kommt dem konkreten Umgang mit Komplexität, Unsicherheit und damit Risiko eine große Bedeutung zu. Der Umgang kann prinzipiell auf zwei Ansätzen beruhen. Zum einen kann versucht werden, die jeweilige Größe zu verringern (Neufville & Scholtes, 2011). Die Komplexität eines Systems kann beispielsweise durch die Verwendung von zweckmäßig vereinfachten Modellen gehandhabt und damit scheinbar reduziert werden. Hierfür muss das System allerdings umfassend verstanden sein, um keine relevanten Wechselwirkungen zu vergessen beziehungsweise zu verlieren. In diesem Kontext sei auf das Model Based Systems Engineering (MBSE) verwiesen, welches für die Modellierung komplexer Systeme konzipiert ist (INCOSE Technical Operations, 2007). Weitere Methoden zielen auf das Schließen der jeweiligen Wissenslücke ab. In diesem Zusammenhang beschreibt Albers (2010) die Validierung als zentrale Aktivität der Produktentstehung.

Der zweite Ansatz umfasst den bewussten Umgang mit Komplexität, Unsicherheit und Risiko um das technische System robust zu schützen (Neufville & Scholtes, 2011). Hierbei wird nicht die jeweilige Größe selbst, sondern die entsprechende Auswirkung reduziert. Dies wird in passiv geschützten Systemen über Sicherheitsfaktoren realisiert. Solche so genannte *Margins* (deutsch: Vorhalte) wurden von Eckert und Isaksson (2017) an Praxisbeispielen analysiert. Dabei wurden Optimierungspotentiale hinsichtlich Definition, Transparenz und Dopplung von Vorhalten identifiziert.

Neufville und Scholtes (2011) schlagen statt Vorhalten ein flexibles Produktdesign vor. Das bedeutet, dass ein Produkt so gestaltet wird, dass es möglichst aufwandsarm auch zu späteren Zeitpunkten noch geändert oder angepasst werden kann. Die Auslegung solcher Produkte kann durch Szenarioanalysen unterstützt werden (Meyer-Schwickerath, 2014). Lindemann und Lorenz (2008) rücken den Produktentstehungsprozess in den Fokus, in dem sie einen aktiven Unsicherheitsschutz durch flexible Produktentstehungsprozesse und interdisziplinären Entwicklerteams empfehlen. Flexible Produktentstehungsprozesse erfordern dabei nach Albers et al. (2012) kontinuierliche Validierungsaktivitäten.

Im Zuge dessen soll auf die Begriffe Agilität, Flexibilität und Robustheit näher eingegangen werden. Die weitverbreitete Meinung, wonach Agilität und Flexibilität als Synonyme zu verstehen sind, wird als einer der Hauptgründe für das Scheitern von agilen Ansätzen angesehen (Aulinger, 2017). Agilität ist dabei mehr als reine Flexibilität. So beschreibt Aulinger (2017), dass in agilen Organisationen Flexibilität und Stabilität die richtigen Plätze und das richtige Maß gefunden haben. Dies wird durch Albers et al. (2019a) unterstrichen, indem die Planungsstabilität als wichtiges Kriterium bei der Wahl der agilen Prozesselemente angesehen wird.

Wieland und Wallenburg (2012) betonen dagegen den flexiblen Charakter der Agilität, indem sie Agilität als die Fähigkeit eines Systems beschreiben, auf Veränderungen durch eine schnelle Anpassung der anfänglich stabilen Struktur zu reagieren. Agilität wird in diesem Kontext als reaktive Strategie eingeordnet. Als proaktive Strategie wird dagegen die Robustheit angesehen. So beschreiben Wieland und Wallenburg (2012) die Robustheit als die Fähigkeit eines Systems, Veränderungen ohne Anpassung seiner anfänglich stabilen Struktur standzuhalten.

In der vorliegenden Arbeit wird der Begriff Robustheit allerdings weiter gefasst. So wird die weit verbreitete und relativ allgemeine Definition von Taguchi (2004) aufgegriffen, wonach Robustheit ein Maß für den Einfluss der Streuung der Eingangsgrößen auf die der Ausgangsgrößen ist. Der VDA (2011) konkretisiert

diese Definition für Produktionsprozesse. So zeichne sich ein robuster Produktionsprozess durch die Resistenz gegen unerwünschte Einflussgrößen und die Sicherstellung einer termin- und abrufgerechten Produktion mit ausgezeichneter Qualität unter Einhaltung der geplanten, wirtschaftlichen Aufwandes aus. Agilität kann daher Teil eines robusten Systems sein, da Robustheit vornehmlich die Erreichung der vorher festgelegten Ziele und weniger die Erhaltung der anfänglichen Struktur sicherstellen soll. Dieses Verständnis von Agilität spiegelt sich in der Definitionen von Albers et al. (2019a), die im Rahmen der vorliegenden Arbeit verwendet wird.

Definition 24: Agilität

Agilität - basierend auf dem Verständnis des ZHO-Systemtripels - ist die Fähigkeit eines Handlungssystems, die Gültigkeit eines Projektplans hinsichtlich der Planungsstabilität der Elemente im ZHO-Triple kontinuierlich zu überprüfen, zu hinterfragen und bei Vorliegen einer ungeplanten Informationskonstellation eine situations- und bedarfsgerechte Anpassung der Sequenz aus Synthese- und Analyseaktivitäten umzusetzen, wodurch der Kunden-, Anwender- und Anbieternutzen zielgerichtet erhöht werden.

Aus dieser Definition ergibt sich im weiteren Verlauf der Arbeit die Forderung nach agilen anstatt flexiblen Gewichtszielen als Teil eines robusten Zielsystems.

2.2.3.5 Komplexität, Unsicherheit und Risiko im Kontext des automobilen Gewichtsmanagements

In diesem Abschnitt soll zunächst die Komplexität der Automobilentwicklung im Allgemeinen und des automobilen Gewichtsmanagement im Speziellen untersucht werden. Die Automobilentwicklung weist eine hohe strukturelle Komplexität auf. Dies lässt sich zum einen auf die hohe Varietät zurückführen, da ein modernes Auto aus bis zu 30000 Einzelteilen besteht (Toyota, 2019). Zum anderen ist eine hohe Konnektivität durch die unzähligen und verschiedenartigen Wechselwirkungen erkennbar. Diese Komplexität wird in Abbildung 2.37 deutlich, indem die Bauteile und eine Auflistung der wichtigsten Anforderungen eines Automobils dargestellt sind.



Abbildung 2.37: Zerlegungsbild eines BMW 5er Touring (links) nach Autobild (2018); Anforderungen an Automobile nach Braess et al. (2013b, S. 12)

Die dynamische Komplexität der Automobilentwicklung speist sich aus der Vielzahl an teilweise gegensätzlichen Anforderungen und weiterer Randbedingungen im Umfeld der Automobilentwicklung. So führen die Plattform- und Baukastenstrategien, die Werkestrukturen, das Lieferantennetzwerk, das volatile Regulatorik- und Marktumfeld und die zahlreichen Wettbewerber zu häufigen Änderungen im Produktentstehungsprozess. Diese Dynamik hat in der Automobilindustrie zur Anwendung aufwändiger Änderungsmanagementsysteme geführt (Braess et al., 2013a, S.1151). Aus diesen Gründen kann der Automobilentwicklung eine hohe dynamische Komplexität zugewiesen werden. In Kombination mit der bereits erläuterten strukturellen Komplexität kann die Automobilentwicklung als äußerst komplex beschrieben werden (siehe Abbildung 2.38).

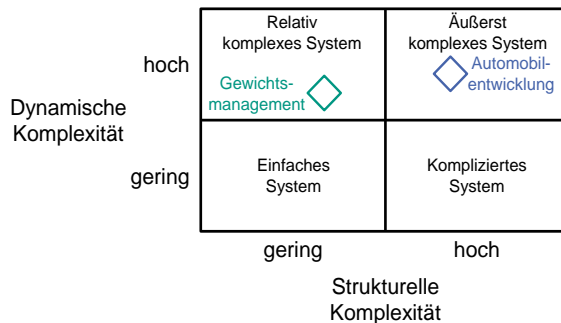


Abbildung 2.38: Einteilung der Systemkomplexität von Automobilentwicklung und Gewichtsmanagement in Anlehnung an Schuh (2005, S. 6)

In dieser Abbildung ist neben der Automobilentwicklung auch das Gewichtsmanagement eingezeichnet. Die Einordnung des Gewichtsmanagements als relativ komplexes System resultiert zum einen aus der hohen dynamischen Komplexität. Diese ergibt sich durch die starke Kopplung der Änderungen in der Automobilentwicklung mit der Größe Gewicht. So führen die meisten Änderungen auch zu Gewichtsänderungen, wodurch das Gewichtsmanagement einer hohen Dynamik ausgesetzt ist. Die strukturelle Komplexität ist dagegen als relativ gering einzuschätzen, da das Gewichtsmanagement lediglich die Bauteilgewichte aufsummieren muss. Die weitreichenden Beziehungen zwischen den Bauteilen müssen daher bei der Gewichtshochrechnung kaum berücksichtigt werden. Lediglich die hohe Anzahl der Bauteile und Konfigurationsvarianten eines Fahrzeugs sorgt für eine gewisse strukturelle Komplexität.

An dieser Stelle muss zwischen reinem Gewichtsdatenmanagement und Leichtbauaktivitäten unterschieden werden. Erfolgreiche Leichtbauaktivitäten erfordern ein hohes Systemverständnis des entsprechenden Produkts. Da in der vorliegenden Arbeit die Leichtbaugestaltung des Fahrzeugs als Teil des Gewichtsmanagements verstanden wird, ist die strukturelle Komplexität ebenfalls erhöht.

Aus dieser Betrachtung wird deutlich, dass die Automobilentwicklung und das dazugehörige Gewichtsmanagement komplexe Systeme darstellen. Wie bereits erläutert, geht Komplexität auch immer mit Unsicherheit einher. Die Unsicherheit im Gewichtsmanagement speist sich dabei vor allem aus ungenauen Gewichtsprognosen und gewichtsrelevanten Änderungen im Produktentstehungsprozess. Die resultierenden Gewichtsunsicherheiten erschweren die Definition von Auslegungs- und Zielgewichten und stellen deshalb eine zentrale Herausforderung des Gewichtsmanagements dar.

2.2.4 Zielsysteme im Kontext des Gewichtsmanagements

Eine der zentralen Aufgaben des Gewichtsmanagements ist die Bereitstellung von Auslegungs- und Zielgewichten für das jeweilige Fahrzeugprojekt. In diesem Abschnitt wird das Themenfeld der Ziele näher beleuchtet, indem zunächst allgemein auf Zielsysteme in der Produktentstehung eingegangen wird. Darauf aufbauend werden Zielsysteme in Teilzielsysteme unterteilt und für die Größe Gewicht konkretisiert. Der Abschnitt schließt mit der Vorstellung und Erläuterung diverser Methoden und Vorgehensweisen zur Quantifizierung konkreter Zielwerte.

2.2.4.1 Zielsysteme in der Produktentstehung

Zielsysteme in der Produktentstehung beinhalten gemäß Albers und Braun (2011) alle Ziele, deren Wechselwirkungen, Randbedingungen und Begründungen, die für die Entwicklung des richtigen Produkts erforderlich sind. Diese Zielsystemelemente werden im Folgenden näher erläutert.

Ein Ziel wird von Eiletz (1999, S. 11) und Lohmeyer (2013) wie folgt definiert:

Definition 25: Ziel

Ein Ziel ist die bewusste gedankliche Vorwegnahme eines zukünftigen Soll-Zustands, der gemeinsam vereinbart und durch aktives Handeln angestrebt oder vermieden wird. Ziele begründen die Funktion und die Gestalt von Objekten.

Hierbei sei erwähnt, dass in der Literatur oftmals eine Unterscheidung von Zielen und Anforderungen gefordert wird. Dies soll im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht näher diskutiert werden, da die Unterscheidung nicht komplett trennscharf erfolgen kann und im Gewichtsmanagement meist nur von Zielen die Rede ist. Für weiterführende Informationen sei auf die Arbeiten von Eiletz (1999), Pohl (2007), Ponn und Lindemann (2011, S. 35–60), Albers et al. (2012), Lohmeyer (2013) und Ebel (2015) verwiesen.

Die allgemein gehaltene Definition von Zielen deutet bereits darauf hin, dass Ziele in der Produktentstehung sehr vielschichtig sein können. So bietet Bader (2007, S. 20) in Abbildung 2.39 einen umfassenden Überblick über die Ziele eines Entwicklungsprojekts. Die Produktziele, die ein Konstrukteur wohl intuitiv unter dem Begriff Ziel versteht, stellen hierbei nur eine Teilmenge der Projektziele dar, die wiederum eine Teilmenge des gesamten Zielsystems darstellen. Die Projektziele hängen demnach von übergreifenden Unternehmenszielen, daraus abgeleiteten Produkt- und Ressortstrategien und externen Einflüssen ab. (Bader, 2007, S. 19–21)

Angewandt auf die Automobilindustrie mit ihren charakteristischen Großkonzernen, dem Lieferantennetzwerk, der Produktvielfalt, den zahlreichen Wettbewerbern und Regulatorikeinflüssen wird die vorherrschende Komplexität bei der Modellierung von Zielsystemen deutlich (Braess et al., 2013b, S. 11–46). Diese Komplexität führt oftmals zu veränderten Projektbedingungen, wodurch Änderungen des Zielsystems nötig werden. Zielsystemänderungen sind deshalb eher der Normalfall als die Ausnahme (Albers et al., 2013a).

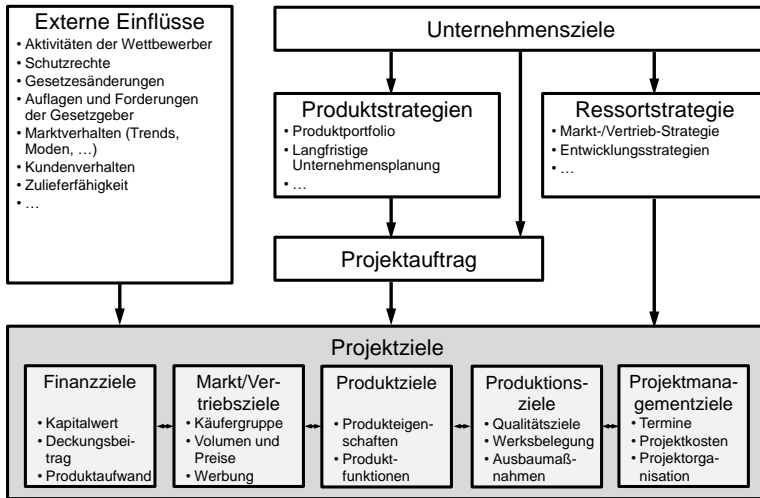


Abbildung 2.39: Zielsystem eines Entwicklungsprojekts nach Bader (2007, S. 20)

Auf Basis dieser weitreichenden Ziele Landschaft hat Ebel (2015) vier generische Beurteilungsdimensionen von Zielen hergeleitet, die das Zielsystemverständnis unterstützen sollen. So schlägt er eine Beurteilung der Ziele nach Reifegrad, Härtegrad, Auswirkungen und Beeinflussbarkeit vor (siehe Abbildung 2.40).

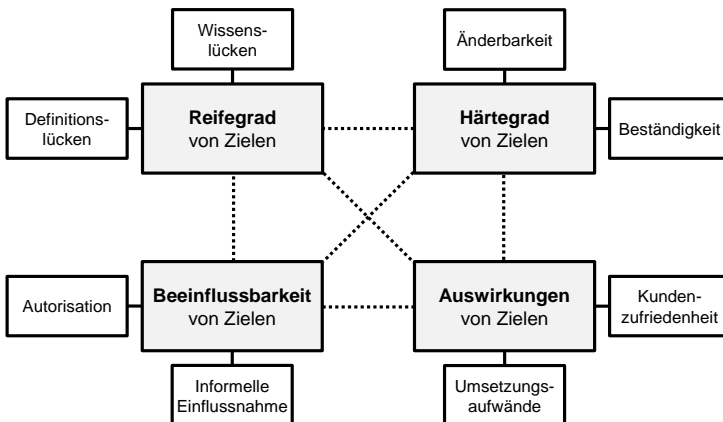


Abbildung 2.40: Beurteilungsdimensionen von Zielen nach Ebel (2015)

Aus jeweils zwei Beurteilungsdimensionen lassen sich dabei Matrizen aufspannen, aus denen sich konkrete Vorgehensweisen ableiten lassen. So bilden Reifegrad und Härtegrad eine Entscheidungsmatrix, die Aufschluss geben kann, ob ein Ziel zunächst eher verstanden oder definiert werden sollte. So sollte beispielsweise ein Ziel, von dessen Beständigkeit weitere Ziele abhängig sind, bereits früh mit einem hohen Härtegrad versehen werden. Die zeitliche Entwicklung des Reifegrades eines Zielsystems kann dabei durch verschiedene Ansätze gemessen werden. Als Beispiel sei auf die Metrik von Albers et al. (2018c) hingewiesen, die eine prozentuale Berechnung des Reifegrads, vor allem im Kontext von agilen Produktentwicklungsprozessen, ermöglicht.

Die Betrachtung der Ziele impliziert, dass neben der reinen Auflistung der Ziele auch die Wechselwirkungen zwischen den Zielen von großer Bedeutung sind. Aus diesem Grund fordert Eiletz (1999, S. 61) die Durchgängigkeit und Kompatibilität von Zielen innerhalb des Zielsystems. So sollten Ziele im Sinne der Durchgängigkeit an den jeweils übergeordneten Zielen ausgerichtet sein. Eine Durchgängigkeit von abstrakten strategischen Zielen zu konkreten Detailzielen sollte deshalb angestrebt werden. Da die Ziele aufgrund der notwendigen Verbindlichkeit auf die jeweilige Organisationsstruktur aufgeteilt werden sollten, ist besonders auf die Kompatibilität der fragmentierten Ziele zu achten. (Eiletz, 1999, S. 61–62)

Die Wechselwirkungen beziehungsweise Beziehungen zwischen den Zielen können dabei hierarchisch oder semantisch modelliert werden (Gebauer, 2001, S. 45–50). Auf diese Weise baut sich entweder eine Baumstruktur (hierarchisch) oder eine Netzstruktur (semantisch) auf. Die entsprechenden Beziehungen sind in Abbildung 2.41 exemplarisch dargestellt.

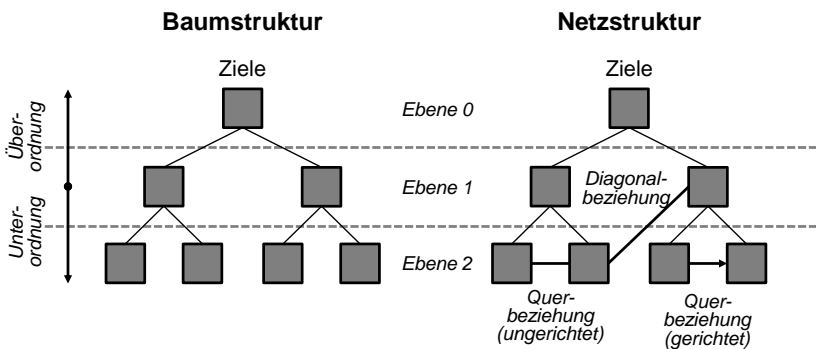


Abbildung 2.41: Beziehungsarten in Zielsystemen nach Gebauer (2001, S. 48)

Ein Zielsystem enthält gemäß der Definition neben Zielen und Wechselwirkungen auch Randbedingungen. Diese werden von Lohmeyer (2013) basierend auf den Sichtweisen von Bader (2007, S. 13) und Clarkson und Eckert (2005) wie folgt definiert:

Definition 26: Randbedingung

Eine Randbedingung ist eine aus dem Umfeld der Entwicklung resultierende Einschränkung, die von anderen verantwortet wird und daher zwar ermittelt, aber nicht eigenständig definiert oder geändert werden kann.

Randbedingungen können zudem nach Muschik (2011) zwischen exogenen (Ursprung außerhalb Unternehmen) und endogenen (Ursprung innerhalb Unternehmen) Randbedingungen unterschieden werden. Der Lösungsraum wird somit von Randbedingungen eingeschränkt, wie in Abbildung 2.42 grafisch dargestellt ist.

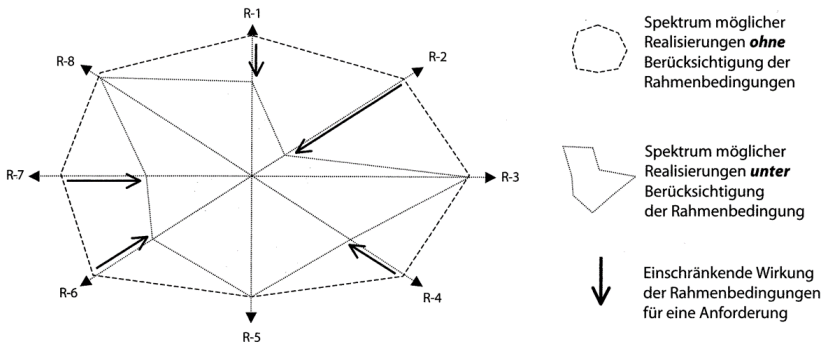


Abbildung 2.42: Einschränkende Wirkung von Randbedingungen nach Pohl (2007, S. 19)

Es zeigt sich, dass die Beschreibung und Modellierung von Zielen, Wechselwirkungen und Randbedingungen umfassende Modelle erfordert. Hierzu schlagen Stechert (2010, S. 41) und Frank (2006, S. 79) umfassende Partialmodelle vor, die sich nicht nur auf das Zielsystem beschränken. Die Partialmodelle wurden deshalb von Albers et al. (2010) in den ZHO-Ansatz eingeordnet. Diese Einordnung ist in Abbildung 2.43 abgebildet, wobei für die nähere Beschreibung der Partialmodelle auf die genannten Autoren verwiesen wird.

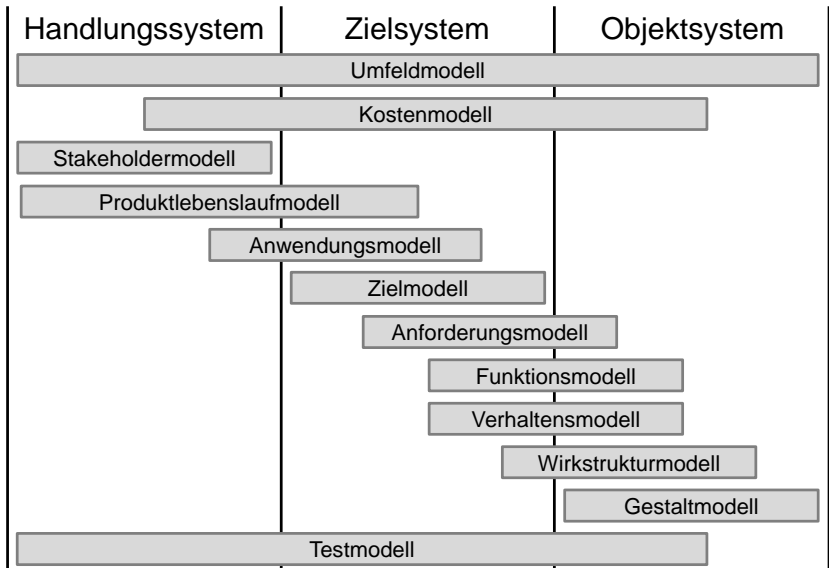


Abbildung 2.43: Einordnung der Partialmodelle der Produktentstehung nach Albers et al. (2010), Partialmodelle aus Stechert (2010, S. 41) und Frank (2006, S. 79)

Ebel (2015) hat diese Partialmodelle in zwei Fallstudien angewandt, um Erkenntnisse hinsichtlich der Modellierung von Zielsystemen zu erlangen. Hierbei kristallisierten sich neun erforderliche Partialmodelle für eine ganzheitliche und durchgängige Modellierung von Zielsystemen heraus. Zudem werden neben den Partialmodellen noch weitere Bausteine wie Elementtypen, Relationen und Attribute definiert, die für eine umfassende Zielsystemmodellierung notwendig sind (siehe Abbildung 2.44). (Ebel, 2015)

Die konkrete Modellierung eines Zielsystems kann durch das Modell der PGE signifikant unterstützt werden. So beschreibt Richter et al. (2019) wie Zielobjekte des Zielsystems mithilfe von Referenzprodukten modelliert und kontinuierlich weiterentwickelt werden können.

Partial- modelle	Ziele	Anforderungen	Anwendungsfälle
	Funktionen	Gestalt / Implementation	Phasen und PE-Aktivitäten
	Meilensteine und Deliverables	Stakeholder	Tests
Element- typen	Ziel	Anforderung	Anwendungsfall
	Funktion	Gestalt / Implementation	Phasen / Aktivitäten
	Meilenstein	Deliverable	Stakeholder
	Test	Entscheidung	Begründung
	Dokument / Information	Schnittstelle	
Relationen	Dekomposition	Verfeinerung	Ungerichtete Relation
	Gerichtete Relation	Unterstützung	Konflikt
	Inkonsistenz	Ableitung	Erfüllung
	Verifizierung	Validierung	Verantwortlichkeit
	Treiber		
Attri- bute	Bezeichner	Status	Wichtigkeit
	Autorisation	Änderungsinformation	Freitext

Abbildung 2.44: Übersicht über die Strukturierung von Zielsystemen nach Ebel (2015)

2.2.4.2 Teilzielsysteme in der Produktentstehung im Kontext des automobilen Gewichtsmangements

Im vorangegangenen Abschnitt wurden Zielsysteme aus verschiedenen Gesichtspunkten betrachtet. Dabei wurden die zentralen Zielsystembausteine (Ziele, Wechselwirkungen, Randbedingungen und Begründungen) vorgestellt. In diesem Abschnitt sollen Zielsysteme im Kontext des automobilen Gewichtsmangements betrachtet und konkretisiert werden.

Das Gewicht stellt eine zentrale Entwicklungs- und Auslegungsgröße in der Fahrzeugentwicklung dar (siehe Kapitel 2.2.1). Aus diesem Grund haben Gewichtsziele und deren Management einen maßgeblichen Einfluss auf den Entwicklungserfolg. Diese Aufgabe wird bei den meisten Automobilherstellern von spezialisierten Gewichtsmangement-Abteilungen übernommen, die keinem Entwicklungsbereich direkt untergeordnet sind. Ähnliches gilt für andere subsystemübergreifende Fahrzeugeigenschaften wie Aerodynamik, Fahrzeugsicherheit, Akustik oder Fahrleistung.

Die Praxisbeobachtungen zeigen also, dass Zielsysteme komplexer Produkte nach gewissen Gesichtspunkten wie Gewicht oder Fahrleistung unterteilt werden. Diese Unterteilung wird ab einem gewissen Konkretisierungsgrad des Zielsystems für eine bessere Handhabbarkeit unerlässlich.

In der Literatur wurde diese Erkenntnis durch Ansätze zur Unterteilung des Zielsystems aufgegriffen. So teilt Zangemeister (1973) das Zielsystem in Pyramiden ein (siehe Abbildung 2.45 links). Diese Zielpyramiden sind vertikal nach Zielstufen und horizontal nach Zielbereichen aufgespannt. Die Zielinhalte einer jeden Pyramide sollen grundsätzlich auf die nächsthöhere Ebene ausgerichtet sein. So ergibt sich eine Makrostruktur in Form einer Pyramide, die vertikal nach Zielebenen und horizontal nach Zielgruppen aufgebaut ist. Die übergreifende Zielpyramide stellt das komplette Zielsystem dar.

Muschik (2011) greift die Grundidee der Unterteilung des Zielsystems auf, indem sie das gesamte Zielsystem in Bereiche mit zusammenhängenden Inhalten (*affiliated content*) einteilt (siehe Abbildung 2.45 rechts). Diese Bereiche können in sich wiederum eine hierarchische Struktur mit Teilbereichen aufweisen.

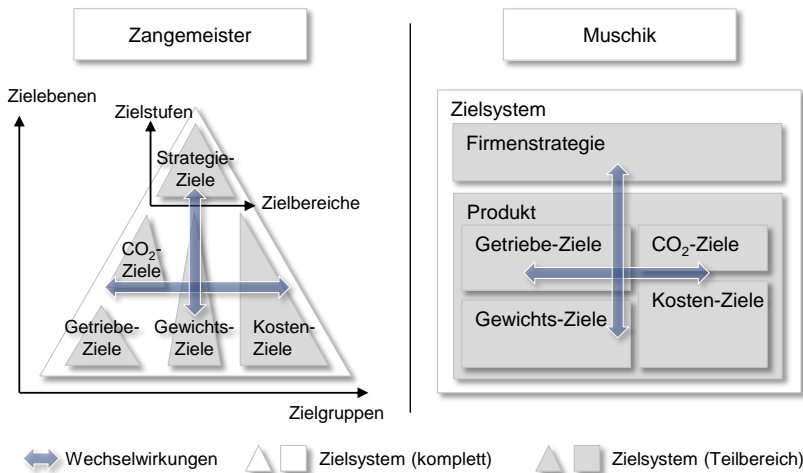


Abbildung 2.45: Ausschnitt der inneren Struktur von Zielsystemen im Kontext des Gewichts nach Zangemeister (1973) (links) und Muschik (2011) (rechts)

In dieser Abbildung wurden bereits beispielhaft gewichtsrelevante Themen in der Automobilentwicklung eingezeichnet. Hierbei zeigt sich, dass

Fahrzeugeigenschaften wie das Gewicht einen eigenen Teilbereich mit Zielen, Wechselwirkungen (auch in andere Teilbereiche), Randbedingungen und Begründungen definieren. Daher erscheint es im Sinne einer einheitlichen Sprache zweckmäßig, die beschriebenen Teilbereiche eines Zielsystems als Teilzielsysteme zu definieren (Stegmiller & Albers, 2019). Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde daher die folgende Definition erarbeitet:

Definition 27: Teilzielsystem

Ein Teilzielsystem beschreibt im Kontext der KaSPro – Karlsruher Schule für Produktentwicklung einen Ausschnitt eines Zielsystems unter einem bestimmten Gesichtspunkt (z.B. Gewicht). Das Teilzielsystem für Gewicht kann mit „TZS-G“ abgekürzt werden.

Im Zuge dieser Definition sei angemerkt, dass Teilzielsysteme keine eigenständigen Zielsysteme darstellen. Bei der Modellierung von Teilzielsysteme muss beachtet werden, dass es sich nur um einen Ausschnitt des Zielsystems handelt. Teilzielsysteme komplexer Produkte weisen demnach besonders zahlreiche Wechselwirkungen mit andere Teilzielsysteme auf. Diese dürfen hierbei nicht abgeschnitten und vernachlässigt werden.

2.2.4.3 Methoden zur Zielableitung

In diesem Abschnitt sollen grundlegende Ansätze und Methoden zur Zielableitung vorgestellt werden.

Um Zielsysteme durchgängig, kompatibel und damit konfliktfrei zu gestalten und zu bewahren, müssen Zielsysteme kontinuierlich weiterentwickelt werden. Diese Weiterentwicklung kann nach Meboldt (2008) durch die drei Operationen Erweitern, Konkretisieren und Verändern erfolgen (siehe Abbildung 2.46).

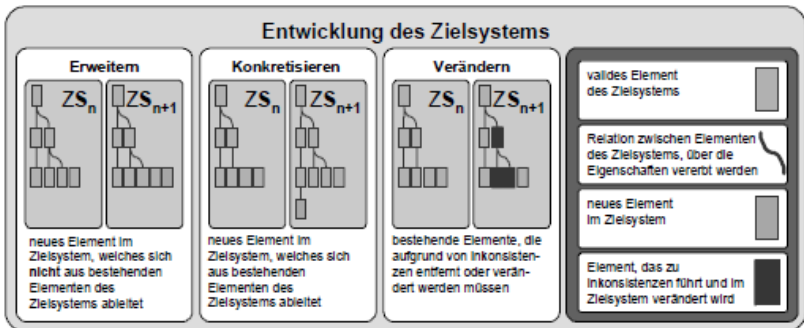


Abbildung 2.46: Operationen bei der Entwicklung des Zielsystems nach Meboldt (2008)

Die Anwendung der vorgestellten Operationen bedingt eine Quantifizierung der Zielelemente. Soll zum Beispiel ein Zielsystem um ein Gewichtsziel erweitert werden, so muss dieses Gewichtsziel unter den vorliegenden Randbedingungen bestimmt werden. Dies erfordert ein methodisches Vorgehen zur Zielableitung, welches die Festlegung von SMARTen Zielen anstrebt.

Doran (1981) entwickelte das Akronym SMART und beschreibt damit fünf Merkmale, die bei einer sinnvollen Zielsetzung stets beachtet werden sollten. Die Merkmale lauten *spezifisch* (specific), *messbar* (measurable), *zuweisbar* (assignable), *realistisch* (reasonable) und *terminiert* (time-bound). Es sei drauf verwiesen, dass die Merkmale eher als Richtlinie zu verstehen sind und nicht jedes Ziel alle Merkmale vorweisen muss. Zudem existieren in der Literatur noch weitere Interpretationen des Akronyms. So wird das A oftmals auch als *akzeptiert* oder *anspruchsvoll* interpretiert. In der klassischen Übersetzung ist dies durch *realistisch* abgedeckt, indem dort ein Mittelweg aus herausfordernden und realistischen Zielen gefordert wird. Dies stellt sicher, dass die Ziele für den Zielnehmer motivierend und damit akzeptabel sind. (Doran, 1981; Kehr & Schattke)

Für die Definition SMARTer Ziele werden in der Projektmanagement-Literatur drei Verfahren unterschieden. Diese sind das Top-Down-, Bottom-Up- sowie das Gegenstromverfahren, welches eine Kombination aus den erstgenannten darstellt. (Meyer & Reher, 2016, S. 25)

Das Top-Down-Verfahren beschreibt die Zieldefinition vom Groben ins Feine. So werden zunächst die Unternehmensziele abgeleitet, die dann als Basis für detailliertere Ziele auf Projekt-, Produkt- und Komponentenebene dienen. Dieser Ansatz ist hierarchisch aufgebaut und bietet einige Vorteile. Zu diesen Vorteilen

zählt die Ausrichtung auf die gesamtunternehmerischen Ziele und die damit verbundenen Durchgängigkeit der Ziele. Auf diese Weise wird eine zielgerichtete Produktentwicklung hinsichtlich der marktrelevanten Eigenschaften sichergestellt. Die Nachteile liegen in der als autoritär und starr wahrgenommenen Vorgehensweise vor allem in zwei Punkten. Zum einen besteht die Gefahr, dass die „von oben“ vorgegebenen Ziele zu geringer Akzeptanz und Demotivation führen. Zum anderen gehen wichtige Informationen aus den operativen Entwicklungsbereichen verloren, wenn diese nicht abgefragt werden. (Meyer & Reher, 2016, S. 25; Schott & Campana, 2005, S. 73–74)

Einige typische Methoden des Top-Down-Verfahrens sind im Folgenden aufgeführt:

- Methoden zur langfristigen Unternehmensplanung (z.B. Szenariotechnik nach Meyer-Schwickerath (2014))
- Wettbewerbsanalyse / Benchmarking (Kairies, 2008)
- Kundenbefragungen / Kundenkliniken (Braess et al., 2013b)
- Prozentuale / erfahrungsbasierte Aufteilung der Gesamtziele (z.B. tree decomposition nach Weck (2006))

Das Bottom-Up-Verfahren beschreibt die Zielfindung vom Feinen ins Grobe. Die operativen Teilziele werden in den jeweiligen Entwicklungsbereichen definiert und auf der darüber liegenden Abstraktionsebene aufsummiert. Die Vor- und Nachteile gestalten sich gegenteilig zum Top-Down-Verfahren. Die Expertise der Entwicklungsbereiche wird ideal genutzt und die Ziele erfahren eine hohe Akzeptanz und erzeugen Motivation. Nachteilig ist jedoch, dass die große Gefahr des Überinvestments besteht, da der gesamtunternehmerische Blick den Entwicklungsbereichsinteressen teilweise entgegensteht. Eine langfristige und strategische Verfolgung der Unternehmensinteressen erschwert sich dadurch. (Schott & Campana, 2005, S. 74–75)

Einige typische Methoden des Bottom-Up-Verfahrens sind im Folgenden aufgeführt:

- Expertenabschätzungen auf Subsystemebene (Braess et al., 2013a, S. 1153–1154)
- Berechnungen und Simulationen (Braess et al., 2013a, S. 1155–1195)
- Methoden zur Aufwandsschätzung, z.B. algorithmische Methoden oder Kennzahlenmethoden (Hummel, 2011, S. 13; Amberg et al., 2011, S. 13–17)

Es wird deutlich, dass beide Verfahren signifikante Nachteile besitzen. Aus diesem Grund wird in der Literatur eine Kombination beider Ansätze empfohlen, welches meist als Gegenstromverfahren bezeichnet wird. (Meyer & Reher, 2016, S. 25)

Die Kernidee des Gegenstromverfahrens besteht in der Bildung zweier Sichten, die dann in einem iterativen Abstimmungs- und Verhandlungsprozess zu einem vereinbarten Zielsystem zusammengeführt werden. Die Zielesicht wird Top-Down gebildet und orientiert sich an den gesamtunternehmerischen Zielen. Diese Ziele sollen den Markterfolg eines Produkts sicherstellen und müssen nicht zwangsläufig technisch begründet sein. Dieser Sicht steht die Lösungssicht gegenüber, die sich Bottom-Up in den Entwicklungsbereichen bildet. Hier werden konkrete technische Lösungen bewertet und daraus realistische Teilziele gebildet. Da die beiden Sichten meist nicht exakt übereinstimmen, startet ein iterativer Verhandlungsprozess, in dem beispielsweise neue technische Konzepte, Randbedingungen oder Kostenstrukturen diskutiert und angepasst werden. (Meyer & Reher, 2016, S. 25; Schott & Campana, 2005, 75ff)

Das beschriebene Gegenstromverfahren ist Teil aktueller Gewichtsmanagementprozesse und wird in Kapitel 2.2.6 am Beispiel der Gewichtszielableitung detailliert beschrieben.

2.2.5 Leichtbau als Schlüsselement des Gewichtsmanagements

Das Gewichtsmanagement umfasst neben der Festlegung von Gewichtszielen auch die Steuerung der Gewichtsentwicklung. Diese Steuerungsfunktion kann unter anderem über intelligente Leichtbauaktivitäten wahrgenommen werden. In diesem Abschnitt werden daher die fünf Leichtbaustrategien und vielversprechende Leichtbaumethoden vorgestellt.

2.2.5.1 Leichtbaustrategien

Die Leichtbauaktivitäten können nach Kopp et al. (2011) in fünf Leichtbaustrategien eingeordnet werden. Diese Strategien umfassen weitere Unterkategorien, die in Abbildung 2.47 dargestellt sind. Die Abbildung deutet zudem die empfohlene zeitliche Abfolge der Leichtbaustrategien an.

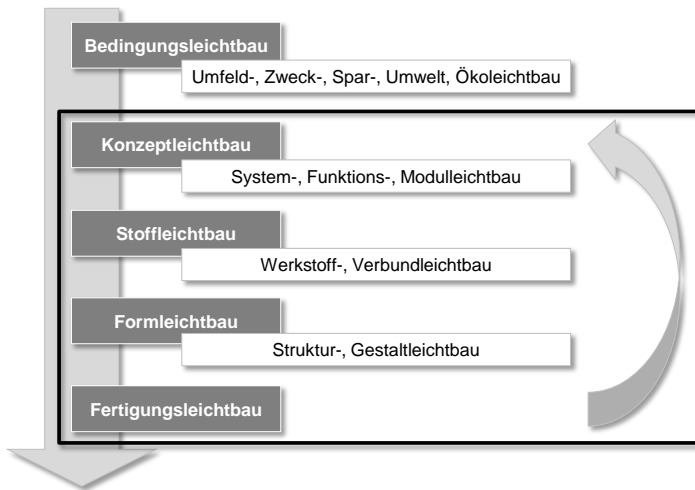


Abbildung 2.47: Leichtbaustrategien inklusive Zuordnung relevanter Unterkategorien und empfohlener Ablauf nach Kopp et al. (2011)

Es sollte zunächst der Bedingungsleichtbau adressiert werden, der das Hinterfragen der Anforderungen an das Produkt umfasst. Dieser Schritt ist von hoher Wichtigkeit, da die Anforderungen die Gestalt und Funktion des späteren Produkts definieren und damit das Gewicht zu einem erheblichen Teil festlegen. Sind die Anforderungen definiert, wird der Konzeptleichtbau als nächster Schritt empfohlen. Der Konzeptleichtbau hat zum Ziel, ein Gesamt- oder Teilsystemoptimum aus Gewichtssicht zu erreichen. Hier werden beispielsweise die Lastpfade über mehrere Bauteile hinweg optimiert oder mehrere Bauteile durch eine Integralbauweise vereinigt. Das Resultat sind oftmals stark veränderte Einzelbauteile, weshalb der Konzeptleichtbau früh in der Entwicklung erfolgen sollte. Durch den teilweise starken Eingriff in den Produktaufbau werden dem Konzeptleichtbau große Leichtbaupotentiale nachgesagt. (Kopp et al., 2011)

Die drei weiteren Leichtbaustrategien Stoff-, Form- und Fertigungsleichtbau können oftmals nicht getrennt voneinander betrachtet werden, da eine Materialsubstitution meist eine angepasste Formgebung und Fertigungstechnik erfordert. Als Beispiele sind beim Formleichtbau Topologie- und Formoptimierungsverfahren zu nennen. Der Fertigungsleichtbau umfasst neben Fertigungsverfahren wie Tailored Rolled Blanks auch Füge- und Montageprozesse wie Kleben, Lötten oder Laserschweißen. (Kopp et al., 2011)

Abbildung 2.48 beleuchtet einige Haupt- und Unterkategorien der Leichtbaustrategien aus einem anderen Blickwinkel. So wird der Leichtbau ins Verhältnis zu den Kosten gesetzt und entsprechend eingeordnet. Es ist erkennbar, dass sowohl ein Kostenoptimum (Punkt A) als auch ein Gesamtoptimum aus Kosten und Gewicht (Punkt B) existiert. Das Gesamtoptimum kann durch Leichtbauoptimierungen erreicht werden und begründet sich durch sekundäre Kostenpotentiale (z.B. erhöhter Kundennutzen oder regulatorische Vorteile), die über die Herstellkosten hinausgehen. (Lüdeke, 2016)

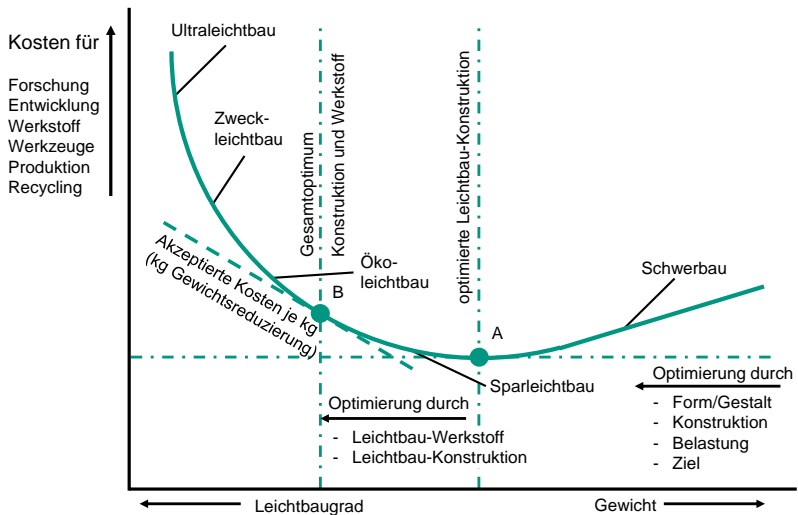


Abbildung 2.48: Zusammenhang zwischen Kosten und Gewicht eines Systems nach Lüdeke (2016)

2.2.5.2 Leichtbaumethoden

Zur systematischen Umsetzung der vorgestellten Leichtbaustrategien wurden zahlreiche Leichtbaumethoden entwickelt. In diesem Abschnitt wird zunächst eine Übersicht über einige relevante Leichtbaumethoden vorgestellt, um anschließend die subsystemübergreifende Leichtbaumethode *Target Weighing Ansatz* detaillierter zu erläutern.

Lüdeke (2016) hat in seiner Arbeit bereits unterschiedliche Leichtbaumethoden vorgestellt und diese klassifiziert. Diese Vorarbeit soll im Folgenden aufgegriffen werden, um einen Überblick über die gängigsten Leichtbaumethoden zu erhalten.

Die Leichtbaumethoden, dargestellt in Tabelle 2.4, wurden dabei nach Einsatzzeitpunkt im Entwicklungsprozess, Abstraktionsebene, Systemebene und Leichtbaupotential bewertet. Der Einsatzzeitpunkt wird hierbei nach früher Phase (vor Konzeptfestlegung) und später Phase (nach Konzeptfestlegung) eingeteilt. Die Abstraktionsebene wird nach Anforderungen (*R*), Funktionen (*F*), Wirkprinzipien (*L*) und physikalischer Baustruktur (*P*) unterschieden. Die Systemebene umfasst die Komponenten, die Teilsysteme und das Gesamtsystem. Für eine detaillierte Beschreibung der Leichtbaumethoden sei auf die entsprechende Literatur verwiesen. Im Rahmen dieser Arbeit wird lediglich auf die von Albers et al. (2013b) entwickelte Leichtbaumethoden *Target Weighing Ansatz* und deren Weiterentwicklung detaillierter eingegangen. (Lüdeke, 2016)

Tabelle 2.4: Leichtbaumethoden und Beurteilung angepasst nach Lüdeke (2016)

	Einsatz im Entwicklungsprozess		Anwendung auf Abstraktionsebene				Anwendung auf Systemebene			Leichtbaupotential
	frühe Phase	späte Phase	R	F	L	P	Komponenten	Teilsystem	Gesamtsystem	
Alonso (Alonso et al., 2012)	Kurzbeschreibung: Analytische Abschätzung von sekundären Gewichtseinsparpotenzialen									
	○	●	○	○	○	●	◐	◑	●	◑
Dahm (Dahm et al., 2006)	Kurzbeschreibung: Ansatz zur Behandlung von Gewichtseigenschaften und -daten entlang Entwicklungsprozess über den sogenannten Tunnel-Effekt.									
	○	●	○	○	○	●	●	◑	◑	◑
de Weck (Weck, 2006)	Kurzbeschreibung: Übergreifender Gewichtbudgetmanagement-Ansatz mit Fokus auf Gewichtswchselwirkungen und Gewichtsunsicherheiten.									
	○	●	○	○	○	●	○	○	●	◑
Eckstein (Eckstein et al., 2011)	Kurzbeschreibung: Empirische und analytische Bestimmung sekundärer Gewichtseinsparpotenzialen bei Automobilen (u.a. FEM-Ansätze).									
	○	●	○	○	○	●	◑	◑	◑	◑
Feyerabend (Feyerabend, 1991)	Kurzbeschreibung: Wertanalyse Gewicht zur Identifikation von Wertsteigerung durch Gewichtsreduktion.									
	◐	◑	○	●	○	○	◑	◐	●	◑

Granzow (Granzow, 2012)	Kurzbeschreibung: Identifikation von Leichtbaupotentialen durch den Einsatz von mechatronischen Systemen.									
	●	●	○	●	○	○	◐	◐	◐	◐
Gumpinger (Gumpinger et al., 2011)	Kurzbeschreibung: Leichtbau durch Funktionsintegration bei modularen Produkten.									
	◐	◐	○	●	○	○	◐	◐	◐	◐
Kreis (Kreis & Blankenburg, 2014)	Kurzbeschreibung: Werkzeuge und Methoden zur Entscheidungsfindung bei Leichtbaumaßnahmen im Rahmen des Gewichtsmanagements.									
	○	●	○	○	○	●	●	◐	◐	◐
Lüdeke (Lüdeke, 2016)	Kurzbeschreibung: Umfassende Methodik für die gewichtsoptimierte Entwicklung mechatronischer Systeme.									
	◐	◐	◐	◐	◐	◐	◐	◐	◐	◐
McLellan (McLellan, 2010) ⁸	Kurzbeschreibung: Vorgehensweise zur Identifikation von gewichtskritischen Anforderungen.									
	●	○	○	○	●	●	◐	◐	◐	◐
Namouz (Namouz, 2010) ⁹	Kurzbeschreibung: Vorgehensweise zur Identifikation von sogenannten <i>lazy parts</i> , die kaum zur Funktionalität des Gesamtsystems beitragen.									
	●	○	○	○	●	●	◐	◐	◐	◐
Ponn (Ponn & Lindemann, 2011)	Kurzbeschreibung: Entwicklungsphasenabhängiges Methodenset zur Gewichtsoptimierung (Anforderungs-, Funktions-, Wirk- und Bauteilebene).									
	◐	◐	◐	◐	◐	◐	◐	◐	◐	◐
Posner (Posner et al., 2012)	Kurzbeschreibung: Funktionsmassenanalyse auf Basis der Wertanalyse zur Ableitung von Gewichtszielen und Leichtbaupotentialen.									
	●	◐	○	●	◐	◐	◐	◐	◐	◐
Sandiano (Gänsike & Sandiano, 2015)	Kurzbeschreibung: Vorgehen zur ganzheitlichen und systematischen Bewertung von Leichtbaupotentialen									
	◐	◐	◐	◐	○	●	●	◐	○	◐
	Kurzbeschreibung: Ansatz zur frühzeitigen Berücksichtigung sekundärer Gewichtseinsparpotentialen bei Ableitung / Erreichung von Gewichtszielen.									

⁸ Abschlussarbeit⁹ Abschlussarbeit

Trautwein (Trautwein, 2011)	○	●	○	○	○	●	○	○	●	◐		
Wagner (TWA) (Wagner, 2015)	Kurzbeschreibung: Funktionsbasierte und subsystemübergreifende Leichtbaumethode zur Analyse und Synthese von Leichtbaupotentialen.											
	●	◐	◑	●	◐	◑	◐	◑	●	◐	◑	
Legende:	○	nicht erfüllt	◐	wenig erfüllt	◑	teilweise erfüllt	●	größtenteils erfüllt	◐	◑	●	voll erfüllt

Der *Target Weighing Ansatz* (TWA) beschreibt eine funktionsbasierte und subsystemübergreifende Leichtbaumethode. Nach Matthiesen (2011) sind Funktion und Gestalt über Synthese- und Analyseschritte direkt miteinander verbunden. Aus einer vorliegenden Gestalt können die Funktionen analysiert und diese wiederum durch Synthese in eine andersartige Gestalt überführt werden. Durch die Abstraktion auf Funktionsebene können subsystemübergreifende Leichtbaupotentiale identifiziert werden, da eine Funktion meist durch mehrere Subsysteme realisiert wird. Aus diesem Grund wird der TWA vornehmlich der Leichtbaustrategie Konzeptleichtbau zugeordnet, wobei auch die restlichen Strategien implizit adressiert werden. (Albers et al., 2013b)

Der TWA verbindet Methoden des Value Engineering und des Target Costing. Das Grundprinzip liegt darin, dass Gewicht (angelehnt an Feyerabend (1991) und Posner et al. (2012)) und Kosten (vgl. VDI 2800, ICS 03.100.40) der vorhandenen Subsysteme auf die bereitgestellten Funktionen zugeordnet werden. Die entsprechenden Prozessschritte des TWA sind in Abbildung 2.49 dargestellt.

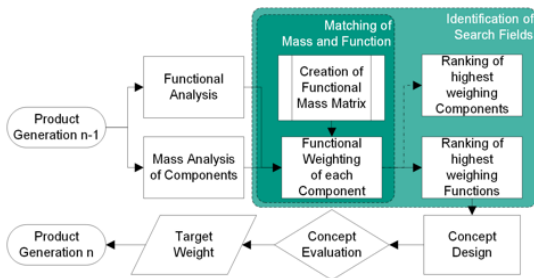


Abbildung 2.49: Prozessschritte des TWA nach Wagner (2015)

Das Referenzsystem im Sinne der Produktgenerationsentwicklung stellt den Ausgangspunkt des TWA dar. Hierbei muss ein geeigneter Betrachtungsraum

festgelegt werden – es muss also definiert werden, welche Referenzsystemelemente betrachtet werden. Der ausgewählte Betrachtungsraum wird zunächst in Subsysteme beziehungsweise Komponenten aufgeteilt und mit den zugehörigen Gewichten, zum Beispiel aus CAD-Daten, versehen. Gleichzeitig werden die Funktionen des betrachteten Systems analysiert und auf Vollständigkeit überprüft. In diesem Beispiel steht das Gewicht im Fokus, das Vorgehen für Kosten ist aber identisch. (Albers et al., 2013b)

Der nächste Schritt umfasst das Herzstück des TWAs – die Funktion-Masse-Matrix. In dieser Matrix werden die Subsystemgewichte prozentual den Funktionen zugewiesen. Auf diese Weise entstehen Funktionsgewichte beziehungsweise im Fall von Kosten Funktionskosten (siehe Abbildung 2.50 (links)). Um die Funktionsgewichte nun mit der jeweiligen Funktionswichtigkeit vergleichen zu können, wird zunächst ein paarweiser Vergleich der Funktionen durchgeführt. Funktionsgewichte und -wichtigkeiten können schließlich in einem Funktionsportfolio gegeneinander aufgetragen werden (siehe Abbildung 2.50 (rechts)). Auf diese Weise werden Leichtbausuchfelder in Form von Funktionen sichtbar, die ein zu hohes Gewicht in Relation zu ihrer Wichtigkeit aufweisen.

Hierbei spricht man von Leichtbausuchfeldern und nicht von Leichtbaupotentialen, da die identifizierten Funktionen nicht zwangsweise leichter gestaltet werden können. Dies wird im darauffolgenden Syntheseschritt untersucht, indem neue Konzeptideen unter Zuhilfenahme von Kreativitätsmethoden wie Brainstorming oder Brainwriting erstellt werden. Hier zeigt sich, ob die zu schweren Funktionen wirklich in leichtere Gestaltkonzepte überführt und damit Leichtbaupotentiale gehoben werden können. Im finalen Schritt können die erarbeiteten Konzepte in die Funktion-Masse-Matrix wieder eingesetzt werden und nach ihrer Gewichts- und/oder Kostenersparnis bewertet werden (Albers et al., 2013b)

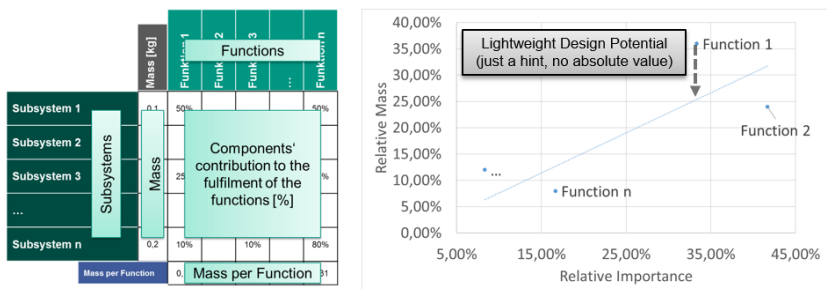


Abbildung 2.50: Funktion-Masse-Matrix (links) und Funktionsportfolio (rechts)
nach Revfi et al. (2018b)

Der Leichtbau gilt, wie auch schon in Kapitel 2.2.1 dargestellt, als ein Stellhebel zur Erreichung der immer strengeren CO₂-Gesetzgebung (Gänsike et al., 2017). Aus diesem Grund wurde der TWA um die Bewertungsgröße CO₂ erweitert und wird deshalb zukünftig Erweiterter TWA (ETWA) genannt (Albers et al., 2017e). Die Bewertungsgrößen Gewicht, Kosten und CO₂ können bei der finalen Konzeptbewertung individuell gewichtet werden, wie es in der folgenden Gleichung dargestellt ist:

$$E = w_m m + w_{CO_2} CO_2 + w_{\epsilon} \epsilon. \quad \text{Gl. 3}$$

Das Formelzeichen E stellt dabei den Gesamtaufwand dar. Die Gewichtungsfaktoren w_x beschreiben den Einfluss des jeweiligen Parameters, wobei die Summe aller Gewichtungsfaktoren eins ergeben muss. (Revfi et al., 2018a)

Die Durchführung des ETWA kann dabei durch weitere Methoden unterstützt werden. So wurde der Aufbau von SysML-Modellen im Kontext des Model Based Systems Engineering (MBSE) als wertvolle Inputquelle für die Funktions- und Komponentenanalyse identifiziert (Albers et al., 2018e).

Darüber hinaus kann die Auswahl der generierten Konzeptideen durch die Betrachtung der enthaltenen technologischen Unsicherheiten unterstützt werden. Hierzu werden die Konzepte nach den Einflussfaktoren *Impact*, *Anteil an Übernahmevariation (PGE)* und *Technologie* sowie *Anwendungsszenario des Referenzprodukts* eingeteilt. Auf diese Weise kann das Risiko, aber auch das Potential der Konzepte fundierter eingeschätzt werden. (Albers et al., 2018g)

Als weiterer Anwendungsfall des ETWA wurde das Benchmarking identifiziert. Hierzu muss der ETWA zunächst für die Konkurrenzprodukte angewandt werden. Die Ergebnisse hinsichtlich Gewicht, Kosten und Emissionen können dann in einem 3D-Funktionsportfolio verglichen werden. Hierbei stellt der Grad der jeweiligen Anforderungserfüllung eine weitere Achse neben Gesamtaufwand und relativer Wichtigkeit dar. (Albers et al., 2019c)

2.2.6 Gewichtsmanagementprozesse in der industriellen Praxis

In diesem Abschnitt werden reale Gewichtsmanagementprozesse in der automobilen Praxis vorgestellt. Diese Prozesse wurden zunächst im Rahmen der teilnehmenden Beobachtung bei der BMW Group durch aktive Mitarbeit, Prozessanalysen und Experteninterviews identifiziert und strukturiert. Ein Abgleich

mit der einschlägigen Literatur lässt darauf schließen, dass die automobilen Gewichtsmanagementprozesse in vergleichbaren Unternehmen sehr ähnlich ablaufen. Diese werden gemäß der Definition des Gewichtsmanagements (siehe Kapitel 2.2.2) nach den vier Kernelementen Planung, Kontrolle, Steuerung und Optimierung strukturiert.

2.2.6.1 Planung der Gewichtsentwicklung

Die Planung der Gewichtsentwicklung orientiert sich an den in Kapitel 2.1.3 dargestellten Entwicklungsphasen in der Automobilindustrie. Die zentralen Planungselemente stellen dabei die Gewichtsziele dar, mit denen die Gewichtsentwicklung gesteuert wird. Je nach Projektphase werden die Gewichtsziele hinsichtlich des Härte- und Reifegrades unterschiedlich gestaltet. So wird zum Start der Konzeptphase (etwa 48 Monate vor SOP) ein Gewichtsziel festgelegt, welches die Basis der Konzeptauslegung bildet (Ellenrieder et al., 2017, S. 87). Da in der Konzeptphase das Fahrzeug zu großen Teilen aus- und festgelegt wird, kommt diesem Gewichtsziel eine hohe Relevanz zu (Trautwein, 2011). Abbildung 2.51 stellt die Ableitung dieses Gewichtsziels nach dem Gegenstromverfahren dar, welches nachfolgend detailliert erläutert wird (Braess et al., 2013a, S. 1153).

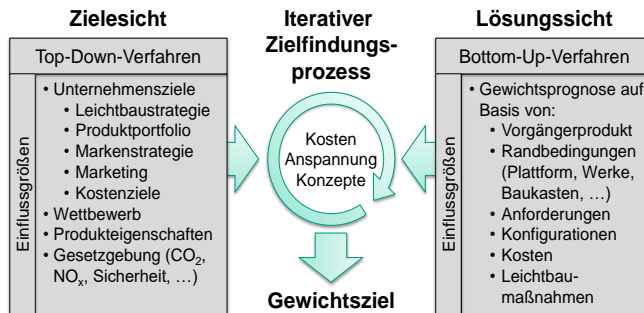


Abbildung 2.51: Gegenstromverfahren am Beispiel der Gewichtszielableitung

Wie bereits in Kapitel 2.2.4 erläutert, stellt das Gegenstromverfahren eine Kombination aus Top-Down- und Bottom-Up-Verfahren dar, welches die Zielesicht der Unternehmensführung mit der Lösungssicht der Entwicklungsbereiche vereinigt.

Das Gewichtsziel wird bei der Zielesicht auf Basis der Unternehmensziele hergeleitet, die unter anderem die Marken- und Leichtbaustrategie, das

Produktportfolio, das Marketing und die Kostenziele umfassen (Ellenrieder et al., 2017, S. 82–93; Trautwein, 2011). Zudem werden der Wettbewerb und die Produkteigenschaften im Hinblick auf Kunden- und Gesetzesanforderungen berücksichtigt (Braess et al., 2013a, S. 1140–1142; Trautwein, 2011). Auf Basis dieser Vorgaben wird Top-Down ein entsprechendes Gewichtsziel festgelegt. Die technische Machbarkeit des Gewichtsziels unter den gegebenen Randbedingungen ist bei diesem Vorgehen nicht sichergestellt.

Die Lösungssicht umfasst eine technische Bottom-Up-Bewertung der Entwicklungsbereiche. Diese erstellen eine Gewichtsprognose auf Basis des Referenzsystems, welches in der Regel das Vorgängerfahrzeug beinhaltet (Braess et al., 2013a, S. 1153). Zudem werden die Randbedingungen betrachtet, die in Form von Plattform-, Baukasten- und Produktionsstrategien vorliegen können (Kreis & Blankenburg, 2014). Des Weiteren zeichnen sich neue Fahrzeuge meist durch erhöhte Anforderungen hinsichtlich Sicherheit, Akustik oder Fahrdynamik aus und enthalten umfangreichere Ausstattungspakete (Unsel, 2012). Dies führt zu Gewichtsmehrungen im Vergleich zum Vorgängerfahrzeug. Neben diesen Einflussgrößen müssen die Entwicklungsbereiche ihre Kostenziele berücksichtigen, wodurch hohe Übernahmeumfänge notwendig werden (Kreis & Blankenburg, 2014). Dies reduziert die realisierbaren Gewichtseinsparpotentiale durch Leichtbau. Die Bottom-Up-Bewertung wird meist in Form eines Wasserfalldiagramms dargestellt und ist in Abbildung 2.52 beispielhaft abgebildet.

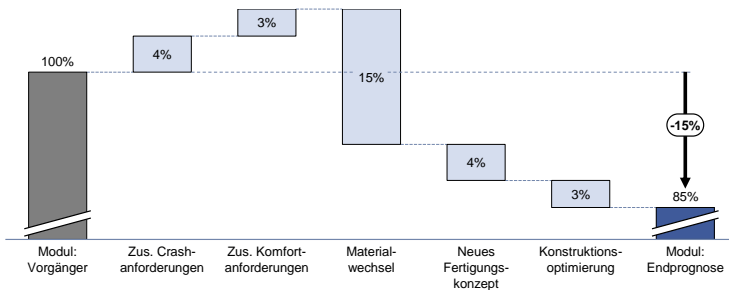


Abbildung 2.52: Gewichtsbewertung in Form eines Wasserfalldiagramms nach Kreis und Blankenburg (2014)

Im finalen Schritt des Gegenstromverfahrens zur Zielableitung folgt der iterative Zielfindungsprozess. Dieser ist meist nötig, da die Ziele Sicht in der Regel zu sehr herausfordernden Gewichtszielen kommt, wogegen die Lösungssicht ein eher

konservatives Gewichtsziel aufgrund der Randbedingungen empfiehlt (Ellenrieder et al., 2017, S.87–95). In diesem Prozess werden neben dem Gesamtfahrzeuggewichtsziel auch meist die Gewichtsziele der Entwicklungsbereiche festgelegt (Ellenrieder et al., 2017, S. 95). Die Kunst hierbei ist es, sowohl herausfordernde als auch realistische Gewichtsziele zu definieren. Hierzu können die technischen Anforderungen, die Kostenvorgaben und die zugrundeliegenden Fahrzeugkonzepte hinterfragt und geändert werden (Braess et al., 2013a, S. 1153).

Zudem wird meist eine leichte Anspannung des Gewichtsziels von der Projektleitung vorgenommen. Anspannung bedeutet, dass ein Gewichtsziel niedriger als die Lösungssicht vereinbart wird, ohne dafür eine konkrete technische Lösung ausweisen zu können (Ellenrieder et al., 2017, S. 95). Dies wird durch die vorherrschende Annahme begründet, nach der das Gewicht im Verlauf der Produktentstehung sinkt. Dies soll durch Optimierungsschleifen, Kostenreduktionen und Gewichtsklausuren ermöglicht werden (Ellenrieder et al., 2017, S. 101–102).

Die Anspannung führt in den meisten Fahrzeugprojekten zu sehr herausfordernden Gewichtszielen, die technisch noch nicht hinterlegt sind. Da die in der Konzeptphase durchgeführte Fahrzeugauslegung auf diesen Gewichtszielen beruht, birgt dieses Vorgehen gewisse Gefahren. So können späte Änderungen mit Gewichtseinfluss die Zielerreichung gefährden und damit kosten- und zeitintensive Gegenmaßnahmen notwendig machen. Abbildung 2.53 zeigt, dass späte Änderungen nicht geplant, aber durchaus normal sind. Diese Änderungen können zudem sehr gewichtsintensiv sein, was sich am Beispiel des SCR-Systems (Emitec, 2012) und der Small-Overlap-Crash Anforderungen (IIHS, 2012) beispielhaft belegen lässt.

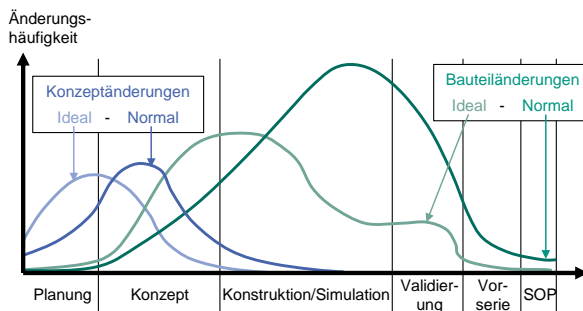


Abbildung 2.53: Qualitative Änderungshäufigkeit während der Entwicklung nach HeiBing et al. (2011, S. 511)

Wie bereits angedeutet, erfolgt in der Konzeptphase die Fahrzeugauslegung auf Basis der ermittelten Gewichtsziele. Zum Ende der Konzeptphase ist somit der Produktreifegrad deutlich erhöht und die Gewichtsziele werden hinsichtlich ihrer Sinnhaftigkeit überprüft. Hierfür wird der vorgestellte Zielfindungsprozess nochmals durchgeführt. Das hierbei ermittelte Gewichtsziel erfährt dabei einen deutlich höheren Härtegrad, weil es von den Entwicklungsbereichen verbindlich unterschrieben wird. Die Entwicklungsbereiche garantieren hiermit, im Gegensatz zum vereinbarten Gewichtziel am Anfang der Konzeptphase, dass sie die Gewichtsziele erreichen werden. (Braess et al., 2013a, S. 1153)

2.2.6.2 Kontrolle der Gewichtsentwicklung

Die Kontrolle der Gewichtsentwicklung umfasst die Verfolgung und Berichterstattung der Gewichtsentwicklung. Dies ist eine herausfordernde Aufgabe, da sich das Fahrzeuggewicht durch Änderungen an Konfiguration, Konzept oder Komponenten ständig ändern kann. Diese Aufgabe wird durch zwei grundlegende Methoden bewältigt. Zum einen werden in regelmäßigen Abständen absolute Gewichtsbewertungen des Fahrzeugs durchgeführt. Dies kann durch Expertenabschätzungen, CAD-Modelle oder tatsächlich gewogene Prototypen beziehungsweise Vorserienmodelle erfolgen (Kreis & Blankenburg, 2014; Braess et al., 2013a, S. 1143–1156). Zum anderen werden Projektbeschlüsse hinsichtlich technischer Änderungen mit den relativen Gewichtsdelas aufsummiert, um ein stets aktuellen Gewichtsstatus bereitstellen zu können (Kreis & Blankenburg, 2014). Hierzu werden verstärkt Produktdatenmanagement(PDM)-Systeme verwendet, um die großen Datenmengen zielgerichtet handhaben zu können (Braess et al., 2013a, 1144-1145).

2.2.6.3 Steuerung und Optimierung der Gewichtsentwicklung

Der Anspruch des Gewichtsmanagement ist nach Ellenrieder et al. (2017, S. 101) die Punktlandung bei der Zielerreichung. Um dies verwirklichen zu können, muss das Gewichtsmanagement die Gewichtsentwicklung steuern und gegebenenfalls optimieren. Unter Optimierung wird in diesem Kontext weniger das Finden eines mathematischen Optimums, sondern eine kontinuierliche und zielgerichtete Verbesserung verstanden. Hierzu werden die aktuellen Fahrzeuggewichte ständig mit den Gewichtszielen verglichen und auftretende Ziellücken hinsichtlich Restlaufzeit des Projekts und Gegenmaßnahmen bewertet. Sind Gegenmaßnahmen notwendig, unterstützt das Gewichtsmanagement bei der Umsetzung der Leichtbaumaßnahmen, indem notwendige Vorarbeiten koordiniert und relevante Gewichtsdaten bereitgestellt werden (Kreis & Blankenburg, 2014).

Falls keine geeigneten Maßnahmen zum Schließen der Ziellücke vorhanden sind, so führt das Gewichtsmanagement Leichtbaumethoden, Zerlegeworkshops und Gewichtsklausuren durch, um eine Gewichtsoptimierung darzustellen (Kreis & Blankenburg, 2014; Ellenrieder et al., 2017, S. 101). Da Unternehmen kostengetrieben wirtschaften, kann es vorkommen, dass Gewichtsziele aus Kostengründen nicht erreicht werden können (Ellenrieder et al., 2017, S. 101). In diesem Fall wird die Gewichtsmanagementabteilung eine Anpassung des Gewichtsziels anstreben und bei der Projektleitung einfordern.

2.2.7 Zwischenfazit

In diesem Kapitel wurden die Grundlagen des Gewichtsmanagements in der Automobilindustrie dargelegt. So wurden zunächst zentrale Gewichtsarten definiert und die Wechselwirkungen des Gewichts mit anderen Fahrzeugeigenschaften erläutert. Zudem wurden relevante Charakteristiken des Gewichts herausgearbeitet.

Auf Basis dieser Informationen wurden die Aufgaben des Gewichtsmanagements mithilfe des iPeMs vorgestellt. Die identifizierten Tätigkeitsfelder umfassen die Ableitung von Zielen, die Steuerung von Leichtbauaktivitäten und den Umgang mit Komplexität und Unsicherheiten. Diese Teilgebiete wurden daraufhin systematisch erarbeitet und der Bezug zum automobilen Gewichtsmanagement hergestellt. Abschließend wurden aktuelle Gewichtsmanagementprozesse in die Aktivitäten Planung, Kontrolle, Steuerung und Optimierung unterteilt und detailliert vorgestellt.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass das Gewichtsmanagement eine umfangreiche und komplexe Aktivität in der Produktentstehung darstellt. Dies begründet sich vornehmlich darin, dass das Gewicht eine stark wechselwirkende Größe darstellt, dessen Wichtigkeit in der Automobilentwicklung sehr projektabhängig ist. Bisherige Gewichtsmanagementprozesse berücksichtigen dies bereits teilweise, dennoch konnte der Bedarf nach weiterer methodischer Unterstützung festgestellt werden.

2.3 Gewichtsmanagement in anderen Branchen

In diesem Kapitel werden Gewichtsmanagementprozesse aus anderen Branchen – vornehmlich der Luft- und Raumfahrt – vorgestellt. Daraufhin werden die Unterschiede zur Automobilindustrie herausgearbeitet und mögliche Gründe identifiziert. Abschließend werden die Ergebnisse einer branchenübergreifenden Umfrage unter Gewichtsingenieuren vorgestellt und diskutiert. Die aus diesem

Kapitel gewonnenen Erkenntnisse sollen bei der Identifikation der Forschungslücke und des Forschungsbedarfs im Umfeld des automobilen Gewichtsmanagements unterstützen.

2.3.1 Gewichtsmanagement in der Luft- und Raumfahrt

In der Luft- und Raumfahrt erfährt das Gewicht eine grundsätzlich höhere Bedeutung als in der Automobilindustrie. Im Gegensatz zu bodengebundenen Fahrzeugen muss in der Luft- und Raumfahrt das Gewicht durch Auftrieb ausgeglichen bzw. gegen die Erdbeschleunigung bewegt werden. Aus diesem Grund führt ein erhöhtes Gewicht zu signifikant erhöhten Energieverbräuchen. Dieser Zusammenhang spiegelt sich neben den Stückzahleffekten bei der Betrachtung der durchschnittlich zulässigen Leichtbaumehrkosten wider, die in Tabelle 2.5 aufgeführt sind. (Ellenrieder et al., 2017, S. 114–115)

Tabelle 2.5: Durchschnittliche Leichtbaumehrkosten je Branche nach Ellenrieder et al. (2017, S. 115)

Branche	Zulässige durchschnittliche Mehrkosten
Raumfahrt	bis zu 5000 EUR/kg
Verkehrsflugzeuge	bis zu 500 EUR/kg
Automobilindustrie	2-10 EUR/kg
LKW / Schienenfahrzeuge	1-2 EUR/kg

Die hohe Relevanz des Gewichts in der Luft- und Raumfahrt hat zur Entwicklung ausgereifter Gewichtsmanagementprozesse geführt. Im Folgenden sollen drei etablierte Ansätze zur erfolgreichen Gewichtssteuerung vorgestellt werden. Diese Ansätze beruhen allesamt auf der Erfahrung, dass das Gewicht eines jeden Vehikels, sei es Schiff, Flugzeug, Raumschiff oder Automobil, unabhängig von Größe, Komplexität oder Art, im Verlauf der Produktentstehung tendenziell steigt und eine Verschiebung des Schwerpunkts festzustellen ist (Boze & Hester, 2009).

2.3.1.1 Mass Properties Control for Space Systems (Raumfahrt)

Dieser Ansatz stellt den empfohlenen Standard für Gewichtsmanagementprozesse in der Raumfahrt dar. Er wurde von der Gesellschaft der Gewichtingenieure (SAWE) und dem amerikanischen Institut für Luft- und Raumfahrt (AIAA) entwickelt. In diesem Standard werden die zentralen Gewichtsgrößen definiert und einheitliche Prozesse, Vorgehensweisen und Methoden beschrieben. Ein zentraler Inhalt des

Standards beschreibt die Entwicklung der Gewichtsgrößen über den Projektverlauf und ist in Abbildung 2.54 dargestellt. Hierbei werden die folgenden Gewichtsgrößen unterschieden: (American National Standard, 2015)

- **Allowable Mass:** Zulässige Masse des Produkts
- **Basic Mass:** Aktuell gültige Leermasse des Produkts
- **Margin:** Vorhalt für Massenänderungen, die nicht durch die Mass Growth Allowance (MGA) abgedeckt sind (zum Beispiel Anforderungsänderungen)
- **Mass Growth Allowance (MGA):** Prognostizierte Gewichtsänderung der betrachteten Komponenten abhängig von Bauteilkategorie und Reifegrad
- **Mass Limit:** Maximale Masse zur Erfüllung der Missionsanforderungen
- **Mass Reserve:** Massenreserve für unvorhergesehene Ereignisse
- **Predicted Mass:** Prognose der finalen Produktmasse (Basic Mass + MGA)

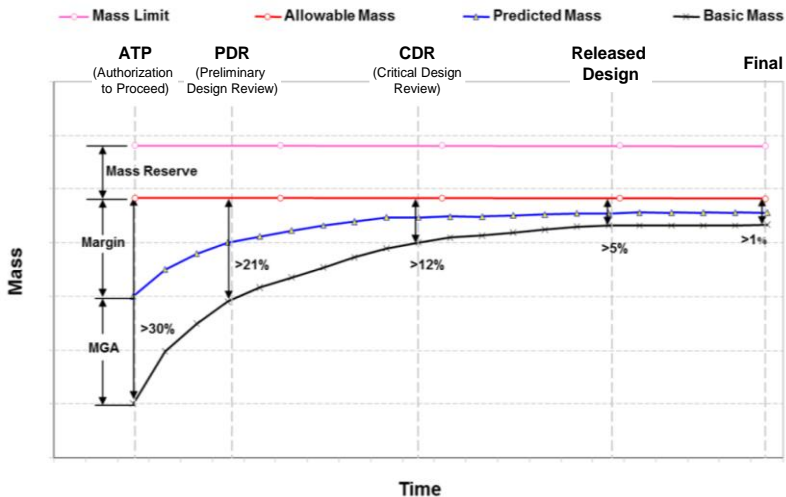


Abbildung 2.54: Gewichtsgrößen über die Entwicklungszeit nach American National Standard (2015)

Die Abbildung verdeutlicht den angestrebten „Anflug von unten“ des Ist-Gewichts (*Basic Mass*) an das Gewichtziel. Bemerkenswert sind die drei Arten von Sicherheitsvorhalten (*MGA*, *Margin* und *Mass Reserve*), die ein Überschreiten des Gewichtziels vermeiden sollen. Dies unterstreicht die Kritikalität, die von einem Überschreiten der Gewichtziele in der Raumfahrt ausgeht.

2.3.1.2 Profile Planned Value (PVP) (Luftfahrt)

Der PVP-Ansatz wird in der Luftfahrt eingesetzt und beruht auf der Beobachtung, dass Flugzeuge im Entwicklungsprozess je nach Intensität der Gewichtskontrolle zwischen 5 % und 12 % schwerer als die initiale Gewichtsschätzung werden. Im Gegensatz zur davor vorgestellten Methode werden im PVP-Ansatz die Gewichtsziele anfangs bewusst anspruchsvoller definiert. Je Phase wird dieses Gewichtsziel um einen gewissen Prozentsatz entspannt, der den beobachteten typischen Gewichtsmehrungen entspricht. Auf diese Weise wird die Erreichung der eigentlichen erforderlichen Gewichtsziele unterstützt. Dieses Vorgehen ist in Abbildung 2.55 skizziert. (Andrew, 2001)¹⁰

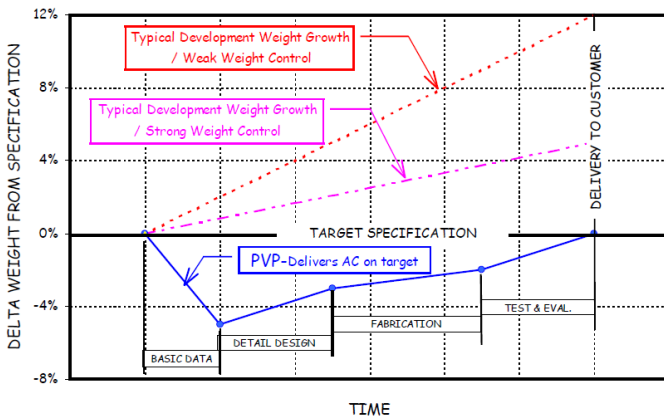


Abbildung 2.55: Zielvorgaben gemäß des PVP-Ansatzes nach Andrew (2001)¹¹

2.3.1.3 Mass Budget Management (Universell – Fokus auf Luft- und Raumfahrt)

Weck (2006) entwickelt in seiner Arbeit ein umfassendes Vorgehensmodell für das Gewichtsmanagement. Dieses Modell umfasst fünf aufeinanderfolgenden Aktivitäten mit entsprechenden Methoden. Diese sind in Abbildung 2.56 dargestellt und werden im Folgenden erläutert. (Weck, 2006)

¹⁰ Abschlussarbeit

¹¹ Abschlussarbeit

- **Systemmodell (1):** Grundlegende Gewichtsabschätzung in Abhängigkeit weiterer relevanter Systemeigenschaften
- **Massenvorhalte (2):** Verortung von Massenvorhalten auf Projektebene (Vorhalte hängen von Neuheitsgrad, Produktkomplexität und Reifegrad ab)
- **Massenzuweisung (3):** Zuweisung der Gesamtmasse auf Subsysteme (erfolgt nicht prozentual, sondern modellbasiert unter Berücksichtigung der Gewichtssensitivität der Subsysteme)
- **Massenkriechen (4):** Aufgrund ansteigender Produktmasse im Entwicklungsverlauf sollte die Masse als Berichtsgröße verstanden und intensiv kontrolliert werden
- **Kosten vs. Gewicht (5):** Leichtbaumaßnahmen erfordern einen Kompromiss zwischen Kosten und Gewicht (Unterstützung durch Optimierungsprogramme)

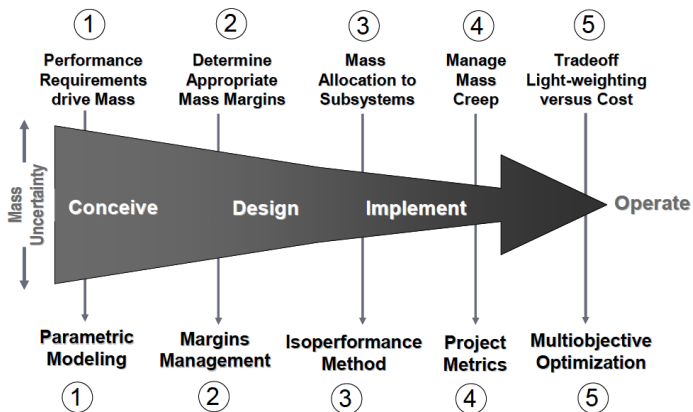


Abbildung 2.56: Vorgehensmodell für das Gewichtsmanagement nach Weck (2006)

Dieses Vorgehensmodell beschreibt auf relativ hoher Abstraktionsebene die notwendigen Aktivitäten des Gewichtsmanagements. Zudem werden phasenspezifische Methoden vorgeschlagen und kurz erläutert. Es ist auffällig, dass auch hier die Unsicherheiten in Form von Gewichtserhöhungen im Entwicklungsverlauf stark betont werden. (Weck, 2006)

2.3.2 Erklärungsansätze für die Unterschiede zur Automobilindustrie

Die im vorherigen Abschnitt vorgestellten Ansätze aus der Luft- und Raumfahrt weisen gewisse Unterschiede zu den aktuellen Gewichtsmanagementprozessen in der Automobilindustrie auf. Nachfolgend werden die wichtigsten Unterschiede aufgeführt und Erklärungsansätze präsentiert.

Der erste bemerkenswerte Unterschied besteht darin, dass in der Luft- und Raumfahrt das Zielgewicht initial höher als das Ist-Gewicht festgelegt wird. Es werden hierbei verschiedene Sicherheitsfaktoren (*MGA*, *Margins*, *Reserves*) angewandt. In der Automobilindustrie findet sich durch das Konzept der *Zielanspannung* die gegenteilige Situation. Es ist bemerkenswert, dass beide Vorgehen damit begründet werden, dass das Gewicht erfahrungsgemäß während der Entwicklung steige beziehungsweise falle. Zudem wird in der Automobilindustrie angenommen, dass die ersten Gewichtsschätzungen zu konservativ sind, während in der Luft- und Raumfahrt zu optimistische Schätzungen erwartet werden. (Boze & Hester, 2009; Ellenrieder et al., 2017, S. 101; Weck, 2006)

Des Weiteren werden in der Automobilindustrie offensichtlich anspruchsvollere Gewichtsziele, gemessen an den Randbedingungen, in Form von angespannten Gewichtszielen festgelegt (Ellenrieder et al., 2017, S. 95). Dies lässt sich durch die starke Wettbewerbssituation und den damit verbunden Leistungs- und Kostendruck begründen. Ziel ist die Entwicklung eines attraktiven Produkts unter möglichst geringem Kosteneinsatz, was sich in hohen Übernahmeanteilen ausdrückt (Heißing et al., 2011, S. 509). Eine Verfehlung des Gewichtsziels wird dabei in Kauf genommen, da dies ein geringeres Risiko als in der Luft- und Raumfahrt darstellt.

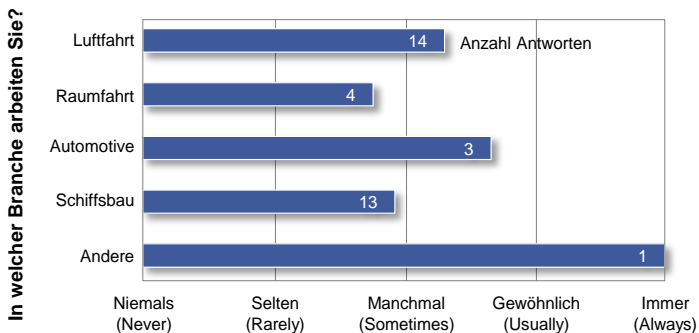
Der dritte Unterschied betrifft die Auslegung und Dimensionierung der Fahrbeziehungsweise Flugzeuge. Die Auslegung in der Luft- und Raumfahrt basiert auf dem Prognosegewicht (American National Standard, 2015), welches einen gewissen Gewichtszuwachs beinhaltet. In der Automobilindustrie basiert die Auslegung meist auf den angespannten Gewichtszielen in der Konzeptphase (Braess et al., 2013a, S. 1153). Dies ist insofern erstaunlich, da Gewichtsmehrungen in der Luft- und Raumfahrt durch die höheren zulässigen Leichtbaukosten und geringeren Stückzahlen besser ausgeglichen werden könnten. Aber auch hier ist die Begründung in der niedrigeren Relevanz des Gewichts in der Automobilindustrie zu vermuten. Hinzu kommt, dass der Kostendruck eine Umkehrung der Gewichtsspirale erfordert (Trautwein, 2011) und Auslegungsfehler bei bodengebundenen Fahrzeugen weniger katastrophale Auswirkungen haben.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Automobilindustrie teils abweichende Gewichtsmanagementprozesse aufweist. Dies ist durch die geringere Gewichtsrelevanz, den hohen Kostendruck und weitere Randbedingungen (Stückzahlen, Variantenvielfalt, Werkestruktur, Übernahmeanteile) begründbar.

2.3.3 Branchenübergreifenden Gewichtsmanagement-Umfrage

In diesem Abschnitt wird eine branchenübergreifende Umfrage unter Gewichtsingenieuren und deren Ergebnisse vorgestellt und diskutiert. Diese Umfrage wurde von Fisher (2017) im Jahr 2016 auf der Internationalen Konferenz der Gewichtsingenieure in Denver, Colorado durchgeführt. In der Umfrage wurden aktuelle Gewichtsmanagementprozesse in verschiedenen Branchen untersucht. Insgesamt haben 35 Gewichtsingenieure aus unterschiedlichen Branchen und Unternehmensgrößen teilgenommen. (Fisher, 2017)

Im Rahmen der Umfrage wurde zunächst untersucht, ob verschiedene Branchen mit unterschiedlich herausfordernden Gewichtszielen konfrontiert sind. Abbildung 2.57 zeigt, dass in der Automobilindustrie, im Vergleich zur Luft- und Raumfahrtindustrie, herausforderndere Gewichtsziele akzeptiert werden. Dies belegt die Annahme aus dem vorherigen Kapitel, jedoch sei auf die geringe Stichprobe verwiesen. Dennoch ist bemerkenswert, dass die Raumfahrt als Industrie mit den höchsten zulässigen Leichtbaukosten die geringste Gewichtsherausforderung wahrnimmt.



Projekt beinhaltet eine Gewichtsherausforderung, die signifikante Gewichtsreduktionsmaßnahmen erfordert.

Abbildung 2.57: Akzeptierte Gewichtsherausforderung vs. Branche nach Fisher (2017)

In der nächsten Frage wurde untersucht, ob bereits in einer frühen Phase eine umfassende Kenntnis der Gewichtsr Risiken und der zugehörigen Lösungsansätze besteht. Hierbei gaben 23 von 34 Befragten an, dass dies nur manchmal oder sogar selten der Fall ist. Dies ist nicht verwunderlich, da gerade der Produktentstehungsprozess komplexer Produkte durch unvorhergesehene Ereignisse charakterisiert ist. Dies unterstreicht Albers (2010) durch die Hypothese, dass jeder Produktentstehungsprozess individuell und einzigartig ist.

Die Kombination dieser Fragestellung mit der angenommenen Gewichtsherausforderung ist in Abbildung 2.58 dargestellt. Hierbei zeigt sich, dass größere Gewichtsherausforderungen meist mit einer erhöhten Kenntnis der Gewichtsr Risiken einhergehen. Dennoch kamen in der Umfrage auch Fälle vor, in denen Gewichtsherausforderungen ohne umfassende Kenntnis der Gewichtsr Risiken und der zugehörigen Ausgleichsmaßnahmen angenommen wurden. In diesem Zusammenhang zeigte sich in einer weiteren Frage, dass 27 von 34 Befragten Gewichtsdaten hinsichtlich Chancen und Risiken für gewöhnlich oder sogar immer analysieren und daraus Gewichtsprognosen ableiten. Dies scheint demnach bei den meisten Gewichtsingenieuren eine der Kernaktivitäten zu sein.

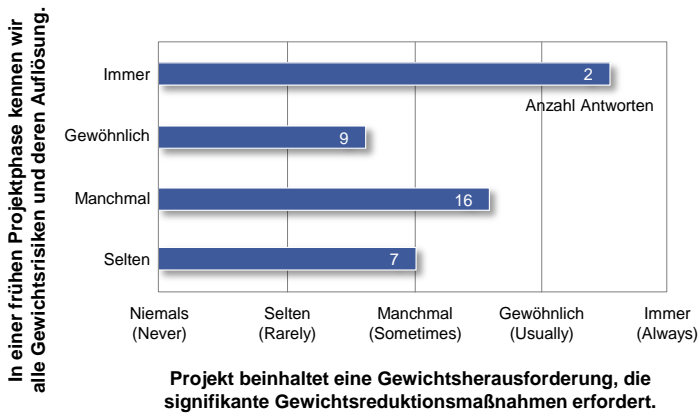


Abbildung 2.58: Akzeptierte Gewichtsherausforderung vs. Kenntnis der Gewichtsr Risiken nach Fisher (2017)

Im weiteren Verlauf der Umfrage wurde die Relevanz des Gewichtsr Managements abgefragt. So bestätigten 30 von 34 Befragten, dass die Entwicklungsprojekte mindestens *manchmal* Gewichtsreduktionsmaßnahmen benötigen, die einen

signifikanten Einfluss auf Projektkosten und -dauer haben können (siehe Abbildung 2.59). Dies unterstreicht die Relevanz des Gewichts und des Gewichtsmanagements.

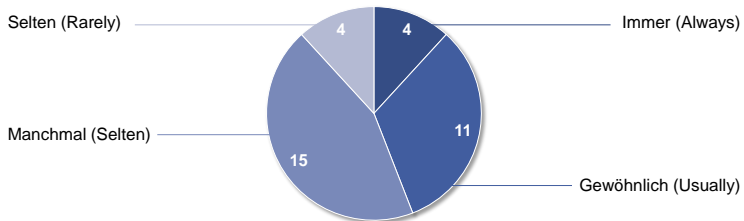


Abbildung 2.59: Anteil der Projekte mit Gewichtsreduktionsmaßnahmen, die Projektkosten und Projektdauer beeinflussen, nach Fisher (2017)

Neben den akzeptierten Gewichtsherausforderungen und den notwendigen Gewichtsreduzierungsmaßnahmen stellt sich die Frage, ob die Gewichtsingenieure auch einen entsprechenden Einfluss auf die Produktgestaltung haben (siehe Abbildung 2.60). Die Antworten zeigen, dass hohe Gewichtsherausforderungen auch meist mit einem erhöhten Einfluss der Gewichtsingenieure einhergehen. Dennoch gibt es auch hier Ausnahmen, in denen Gewichtsingenieure Ziellücken schließen sollen, jedoch kaum Einfluss auf die Produktgestaltung haben.

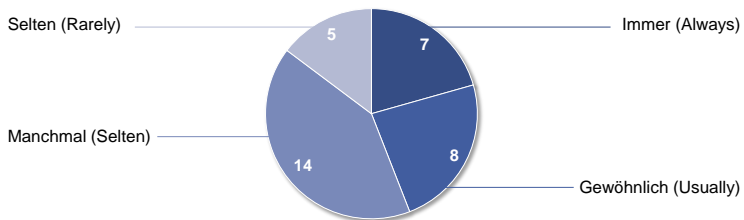


Abbildung 2.60: Anteil der Gewichtsingenieure, die Einfluss auf die Produktgestaltung und Produktauslegung haben, nach Fisher (2017)

Eine weitere Erkenntnis der Studie ist, dass die Dokumentation der Gewichtsmanagementprozesse oftmals ungenügend ist. Gerade unerfahrene Gewichtsingenieure beklagen diesen Mangel und wünschen sich einen verbesserten Wissenstransfer (Fisher, 2017).

2.3.4 Zwischenfazit

In diesem Abschnitt wurden Gewichtsmanagementprozesse außerhalb der Automobilindustrie vorgestellt und analysiert. Hierbei zeigten sich abweichende Herangehensweisen, die oftmals durch die Branchenunterschiede erklärt werden konnten. Dennoch können aus den unterschiedlichen Herangehensweisen wertvolle Impulse für die Optimierung der automobilen Gewichtsmanagementprozesse abgeleitet werden. Durch die abschließende Betrachtung der Ergebnisse einer branchenübergreifenden Umfrage unter Gewichtsingenieuren konnten zuvor gewonnene Erkenntnisse hinterlegt und neue Blickwinkel aus der industriellen Praxis erschlossen werden.

2.4 Fazit

In diesem Kapitel wurden die Grundlagen und der Stand der Forschung im Kontext des automobilen Gewichtsmanagements vorgestellt. Hierzu wurden zunächst theoretische Prozessmodelle der Produktentstehung eingeführt und deren praktische Umsetzung in der Automobilindustrie betrachtet. Im Zuge dessen wurde das Beschreibungsmodell der Produktgenerationsentwicklung erläutert und die Automobilindustrie als geeignetes Anwendungsgebiet identifiziert.

Aufbauend auf diesen Grundlagen wurde das Gewichtsmanagement in der Automobilindustrie vorgestellt. Hierzu wurden die umfangreichen Aufgaben und Herausforderungen des Gewichtsmanagements anhand des iPEM vorgestellt. Ein besonderes Augenmerk lag dabei auf der besonderen Charakteristik der Größe Gewicht. So bewegt sich das Gewicht im Spannungsfeld zwischen zentraler Auslegungsgröße mit weitreichenden Wechselwirkungen und einer resultierenden, sowie nicht direkt kundenerlebbaren Größe. Diese Charakteristik zeigt sich teilweise auch in den Gewichtsmanagementprozessen der industriellen Praxis. Dennoch konnte bei der Modellierung von Teilzielsystemen für Gewicht (TZS-G) ein erhöhter Bedarf nach methodischer Unterstützung abgeleitet werden. Hierbei bietet sich das Beschreibungsmodell der PGE als methodisches Fundament an, da die Automobilindustrie seit jeher in Generationen entwickelt.

Abschließend wurden Gewichtsmanagementprozesse in anderen Branchen betrachtet und die Unterschiede analysiert. Zusammen mit den Ergebnissen der branchenübergreifenden Befragung von Gewichtsingenieuren konnten Verbesserungspotentiale für das automobilen Gewichtsmanagement abgeleitet werden.

3 Zielsetzung und Forschungsvorgehen

In diesem Kapitel wird die Zielsetzung der Arbeit vorgestellt und ein geeignetes Forschungsvorgehen abgeleitet.

3.1 Zielsetzung

Im Folgenden wird der Forschungsbedarf erläutert und in einer konkreten Zielsetzung der Arbeit formuliert. Mit Hilfe von Forschungshypothesen und daraus abgeleiteten Forschungsfragen wird die Zielsetzung anschließend in thematisch abgegrenzte Arbeitspakete unterteilt.

3.1.1 Forschungsbedarf

Das Gewichtsmanagement in der Automobilindustrie hat die Aufgabe, die Gewichtsdaten des Fahrzeugs wie Gesamtgewicht, Achslastverteilung oder Zuladung über den gesamten Projektverlauf zu steuern. Das übergeordnete Ziel ist dabei nicht das leichteste Fahrzeug, sondern die Erreichung von gesamtunternehmerisch optimalen Fahrzeuggewichten. Ein entscheidender Stellhebel ist die Definition, Quantifizierung und Steuerung von Fahrzeugauslegungs- und Zielgewichten.

Die Zielsystemmodellierung für die stark vernetzte Größe Gewicht verbunden mit dem projektabhängig variierenden Härtegrad des Gewichtsziels stellt eine große Herausforderung dar. Diese wird durch die steigende Volatilität, Unsicherheit, Komplexität und Mehrdeutigkeit (abgekürzt im Englischen als *VUCA*) in der Automobilindustrie noch verstärkt, so dass bestehende Gewichtszielprozesse nicht mehr ausreichen. Um diese Herausforderung meistern zu können, sollten die Potentiale der Produktgenerationsentwicklung konsequent umgesetzt und die Modellierung des Teilzielsystems für Gewicht als begleitende Aktivität im Sinne des iPeM verstanden werden.

Im Rahmen dieser Arbeit soll hierzu das automobiler Gewichtsmanagement durch die Entwicklung einer Methodik zur Modellierung robuster Teilzielsysteme für Gewicht unterstützt werden. Robustheit wird in der vorliegenden Arbeit, wie in Kapitel 2.2.3 beschrieben, als Fähigkeit eines Systems verstanden, die geplanten

Termin-, Qualitäts- und Aufwandsziele durch Resistenz gegen unerwünschte Einflussgrößen zu erreichen. Robustheit soll hierbei weniger durch pauschale Vorhalte und Überdimensionierung, sondern viel mehr durch Agilität, Prognosefähigkeit und Handlungsschnelligkeit erzeugt werden.

Die Methodik soll diese Teilzielsysteme durch ein geeignetes Framework aufbauen und in den Fahrzeugentwicklungsprozess integrieren. Hierbei ist die zeitliche Synchronisation mit dem Fahrzeugentwicklungsprozess von entscheidender Bedeutung, um Leichtbauaktivitäten aber auch die Prozessstabilität optimal zu unterstützen. Des Weiteren soll die Quantifizierung der enthaltenen Zielsystemelemente durch eine Kombination von ausgewählten und teils angepassten Methoden unterstützt werden.

Bisher wurde dabei noch nicht untersucht, wie eine Methodik zur Modellierung von robusten TZS-G in der Automobilindustrie im Kontext der Produktgenerationsentwicklung entwickelt werden kann. Zudem soll in der vorliegenden Arbeit ein Fokus auf die Anwendbarkeit und Übertragbarkeit der Methodik gelegt werden, da dies elementar für den Erfolg der Methodik ist.

Das Ziel der Arbeit kann folgendermaßen zusammengefasst werden:

Ziel der Arbeit:

Das Gewichtsmanagement in der Automobilindustrie soll durch die Entwicklung einer Methodik zur Modellierung von robusten Teilzielsystemen für Gewicht unterstützt werden. Die Methodik soll diese Teilzielsysteme durch ein geeignetes Framework aufbauen und die Quantifizierung der enthaltenen Zielsystemelemente durch eine Kombination von ausgewählten und teils angepassten Methoden unterstützen.

3.1.2 Forschungshypothesen

Die Zielsetzung der Arbeit begründet sich aus einer Reihe von Forschungshypothesen, die in diesem Kapitel aufgestellt werden. Die Forschungshypothesen verkörpern zentrale Annahmen, die dabei helfen, die notwendigen Untersuchungen zu identifizieren und zu strukturieren.

Forschungshypothese 1:

Die Entwicklungsgröße Gewicht erfordert durch ihre charakteristischen Eigenschaften im Kontext der Automobilentwicklung speziell angepasste Teilzielsysteme.

Forschungshypothese 2:

Die robuste Erreichung wettbewerbsfähiger Fahrzeuggewichte im Spannungsfeld teils konkurrierender Unternehmensziele wird durch den Übergang von einem starren zu einem anpassungsfähigen Teilzielsystem für Gewicht unterstützt.

Forschungshypothese 3:

Die Methoden zur Ableitung von Gewichtszielen können durch das Beschreibungsmodell der Produktgenerationsentwicklung effektiver und effizienter gestaltet werden.

3.1.3 Forschungsfragen

Die zuvor vorgestellten Forschungshypothesen und der Forschungsbedarf münden in den Forschungsfragen. Die Forschungsfragen beschreiben die zentralen Fragestellungen der Arbeit. Die erfolgreiche Beantwortung der Forschungsfragen führt daher zur Erreichung der Zielsetzung der Arbeit.

Forschungsfrage 1:

Welche Anforderungen an eine Methodik zur Modellierung von robusten Teilzielsystemen für Gewicht leiten sich aus dem Einfluss des Fahrzeuggewichts auf die im iPeM modellierte automobile Produktentstehung ab?

Forschungsfrage 2:

Wie baut sich ein Framework für robuste Teilzielsysteme für Gewicht auf Basis der vorab abgeleiteten Anforderungen auf und wie sollte es in den Fahrzeugentwicklungsprozess eingebettet werden?

Forschungsfrage 3:

Welche Methoden zur Quantifizierung der Zielsystemelemente sollte die Methodik gemäß den Anforderungen enthalten und wie sollten diese miteinander kombiniert werden?

Das Forschungsvorgehen zur Beantwortung der Forschungsfragen wird im folgenden Kapitel näher erläutert.

3.2 Forschungsvorgehen

In diesem Kapitel wird zunächst die Forschungsmethodik in Form der Design Research Methodology (DRM) erläutert. Anschließend werden ausgewählte empirische Forschungsmethoden und die Forschungsumgebung dieser Arbeit vorgestellt.

3.2.1 Forschungsmethodik

Die Design Research Methodology (DRM) nach Blessing und Chakrabarti (2009) repräsentiert eine generische Vorgehensweise zur Beantwortung von Forschungsfragen. Sie besteht aus Analyse- und Syntheseschritten und reicht von empirischen oder literaturbasierten Voruntersuchungen bis hin zur praxisnahen Einführung neuer Methoden. Dieser Prozess wird durch vier aufeinander folgende Phasen beschrieben, die an ein spezifisches Forschungsprojekt angepasst werden können. (Blessing & Chakrabarti, 2009, S. 13–17)

Dabei müssen weder alle Phasen noch jede Phase mit dem gleichen fachlichen Tiefgang durchgeführt werden. Je nach Projekt und dessen Randbedingungen können die Phasen ausschließlich *literaturbasiert*, *initial* durch erste wegweisende Schritte oder *umfassend* bearbeitet werden. Abbildung 3.1 stellt die vier Phasen im

Kontext des vorliegenden Forschungsvorhabens dar. (Blessing & Chakrabarti, 2009, S. 18–19)

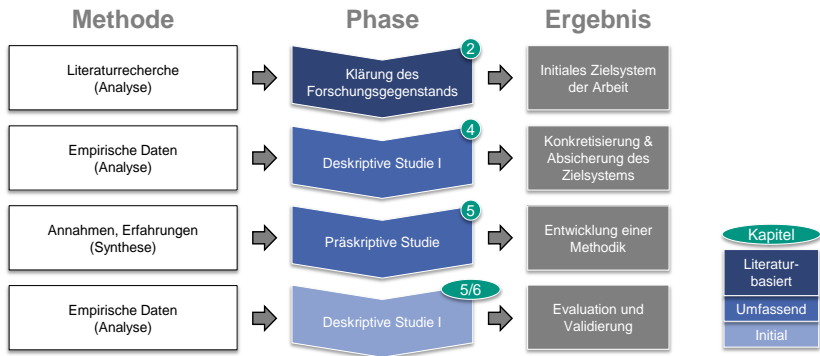


Abbildung 3.1: DRM im Kontext der vorliegenden Arbeit, nach Eckert et al. (2003) – Darstellung nach Bursac (2016)

Die vier Phasen beinhalten in dieser Arbeit folgende Punkte:

- Kapitel 2 dient zur **Klärung des Forschungsbedarfs** und führt zur Zielsetzung, ein robustes Teilzielsystem für Gewicht im Kontext der PGE – Produktgenerationsentwicklung zu modellieren
- Die **deskriptive Studie I** in Kapitel 4 umfasst eine empirische Studie zu Gewichtsmanagementprozessen in der Automobilbranche und eine teilnehmende Beobachtung in der Gewichtsmanagement-Abteilung eines Automobilherstellers. Aus diesen Studien werden Anforderungen an die zu entwickelnde Methodik abgeleitet, wodurch das Zielsystem der Arbeit konkretisiert und abgesichert wird.
- In Kapitel 5 und 6 wird mittels einer **präskriptiven Studie** eine Methodik zur Modellierung von Teilzielsystemen für Gewicht, basierend auf den abgeleiteten Anforderungen, entwickelt und in den Fahrzeugentwicklungsprozess eingebunden.
- Im Rahmen einer **deskriptiven Studie II**, beschrieben in Kapitel 6 und 7, werden die Methodik und ihre Teilmethoden empirisch, analytisch und argumentativ evaluiert.

3.2.2 Forschungsmethoden

Die DRM ermöglicht ein Forschungsvorhaben in verschiedene Phasen einzuteilen und damit zu strukturieren. Dabei werden bereits erste Entscheidungen bezüglich des fachlichen Tiefgangs je Phase getroffen (*literaturbasiert, umfassend* oder *initial*). Dies wirkt sich direkt auf die konkreten Methoden aus, die zur Bearbeitung der jeweiligen Phase gewählt werden. Im Folgenden werden die in dieser Arbeit verwendeten Forschungsmethoden beschrieben und auf ihre Eignung für das jeweilige Forschungsziel eingegangen.

Um die erste Forschungsfrage (vgl. Kapitel 3.1.3) beantworten zu können, werden zwei unterschiedliche Forschungsmethoden angewandt. Zunächst werden die Gewichtsmanagementprozesse im Rahmen einer **teilnehmenden Beobachtung** analysiert. Die Forschungsmethode ist in der folgenden Tabelle als Steckbrief stichpunktartig beschrieben. Daraufhin werden die relevanten Vor- und Nachteile der Methode, bezogen auf das beabsichtigte Forschungsziel, kurz dargelegt.

Tabelle 3.1: Steckbrief – Teilnehmende Beobachtung, nach Marxen (2014)

Teilnehmende Beobachtung	
Anwendungsfeld	<ul style="list-style-type: none"> - Empirische Forschung, Analyse von realen Entwicklungsprozessen - Anwendungsstudien, Entwicklungsunterstützung in realen Prozessen - Langzeitprojekte, welche Einblicke in Entwicklungsaktivitäten und Prozesse ermöglichen, indem die Datenquelle eine soziale Gruppe ist, in der der Forscher Mitglied wird
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> - Direkte Datensammlung, da der Beobachter ein Teil der Datenquelle ist
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> - Beobachtung kann die Entwickler von den Aktivitäten ablenken, die natürlichen Abläufe innerhalb des Teams werden gestört - Gefahr der Unehrlichkeit, um sich in gutem Licht darzustellen, wenn den Team-Mitgliedern bewusst ist, dass der Forscher unter ihnen ist

Da sich heutige Fahrzeugentwicklungen und damit das begleitende Gewichtsmanagement über mehrere Jahre erstrecken, bietet sich diese Forschungsmethode für eine Prozessanalyse an. Die direkte Zusammenarbeit mit Mitarbeitern und die Begleitung der Entscheidungsfindungen befähigen den Beobachter die relevanten Verbesserungspotentiale zu identifizieren. Es sei allerdings darauf hingewiesen, dass der Beobachter die Mitarbeiter beeinflussen kann und somit die natürlichen Abläufe zu einem gewissen Grad gestört werden. (Marxen, 2014)

Die teilnehmende Beobachtung wird in der vorliegenden Arbeit mit der Forschungsmethode **Interviewstudie** kombiniert. Die Gesprächspartner werden dabei vornehmlich in Form eines problemzentrierten Interviews (PCI) (Witzel & Reiter, 2012) befragt. Vor- und Nachteile dieser Methode sind in der folgenden Tabelle dargestellt.

Tabelle 3.2: Steckbrief – Interviewstudie, nach Marxen (2014)

Interviewstudie	
Anwendungsfeld	<ul style="list-style-type: none"> - Empirische Forschung, Analyse von realen Entwicklungsprozessen - Experimentelle Studien, Evaluation in kontrollierten Umgebungen - Anwendungsstudien, Entwicklungsunterstützung in realen Prozessen - Felder der Entwicklungsmethodik, in der die Wahrnehmung der Menschen bzgl. einer Situation oder einem Prozess von Interesse ist
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> - Direkte Datenerfassung aus intensivem Dialog mit Befragtem
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> - Eine Verzerrung der Studie kann auf vielfältige Arten passieren - Erheblicher Aufwand durch Vorbereitung, Nachbereitung und Auswertung

Der Vorteil dieser Methode liegt in dem direkten Dialog mit dem Befragten. Eine spezielle Fragestellung kann so intensiv besprochen werden und der Forscher kann bei Unklarheiten oder Fehlinterpretationen unmittelbar eingreifen. Da Interviews leicht verzerrt werden können, werden die Resultate in dieser Arbeit vornehmlich zum Verständnisaufbau im Rahmen der Prozessanalyse verwendet. (Marxen, 2014)

Die Prozessanalyse und die identifizierten Verbesserungspotentiale beschränken sich durch die teilnehmende Beobachtung zunächst auf einen spezifischen Automobilhersteller. Um den unternehmensübergreifenden Forschungsbedarf erfassen zu können, wurde die Forschungsmethode **Fragebogen** angewandt. Diese Forschungsmethode wurde zudem im Rahmen der teilnehmenden Beobachtungen für Teilaspekte herangezogen.

Tabelle 3.3: Steckbrief – Fragebogen, nach Marxen (2014)

Fragebogen	
Anwendungsfeld	<ul style="list-style-type: none"> - Empirische Forschung, Analyse von realen Entwicklungsprozessen - Experimentelle Studien, Evaluation in kontrollierten Umgebungen - Anwendungsstudien, Entwicklungsunterstützung in realen Prozessen - Felder der Entwicklungsmethodik, in der die Wahrnehmung der Menschen bzgl. einer Situation oder einem Prozess von Interesse ist

Zielsetzung und Forschungsvorgehen

Vorteile	<ul style="list-style-type: none">- Direkte Datenerfassung- Einfacher Zugang zu großen Auswahlgruppen, vor allem mit Online-Umfragen- Es steht eine große Anzahl von Online-Umfrage-Tools zur Verfügung
Nachteile	<ul style="list-style-type: none">- Forscher kann nicht eingreifen- Präzise Fragen müssen formuliert werden. Missverständnisse durch die Teilnehmer können die komplette Studie ruinieren

Die Forschungsmethode Fragebogen eignet sich, um die Wahrnehmung von Mitarbeitern verschiedener Automobilunternehmen bezüglich der unternehmensinternen Gewichtsmanagementprozesse abzufragen. Entscheidende Gründe hierfür sind, dass ein Fragebogen offline wie online schnell verteilt werden kann und durch eine hinreichende Beschreibung selbsterklärend und somit selbständig ausfüllbar ist. Letzteres birgt bei unzureichend beschriebenen Fragen die Gefahr, dass die Studie unbrauchbar wird, da der Forscher nicht mehr korrigierend eingreifen kann. (Marxen, 2014)

In der präskriptiven Studie wird eine konkrete Methodik entwickelt, die wiederum aus einzelnen Methoden besteht. Zur Entwicklung dieser Methoden wird neben der Erkenntnissen aus der teilnehmenden Beobachtung, den Interviews und Fragebogen die **quantitative Datenanalyse** als weitere Forschungsmethode verwendet.

So werden in Kapitel 6.1, mit dem Ziel Gewichtsunsicherheiten bestimmen zu können, die technischen Änderungen an Fahrzeugen vor allem durch Methoden der **deskriptiven Statistik** analysiert. Das bedeutet, dass die zunächst erhobenen und dann kategorisierten Daten (hier Änderungsanträge) in Form von Kennwerten, Tabellen und Grafiken beschrieben werden. Statistische Kennwerte wie Mittelwert, Median, Varianz, Exzess oder Standardabweichung helfen beim Verständnis der Daten und ermöglichen eine zielgerichtete Weiterverarbeitung. In diesem Fall konnten Gewichtsunsicherheiten über geeignete statistische Fehlerfortpflanzungsgesetze aus den Daten berechnet werden. (Bortz & Schuster, 2010)

In Kapitel 6.2 werden ebenfalls Daten analysiert – in diesem Fall reale Fahrzeug- und Subsystemgewichte. Ziel ist die Entwicklung einer Methode zur Gewichtsabschätzung auf Basis von gewichtstreibenden Fahrzeugparametern. Hierzu werden die erhobenen Daten mit Methoden der **Interferenzstatistik** und **varianzanalytischen Methoden** untersucht. Das bedeutet, dass die Daten nicht nur beschrieben, sondern hinsichtlich ihrer Abhängigkeiten zueinander analysiert werden. Hierzu werden Regressions-, Hauptkomponenten- und Korrelationsanalysen durchgeführt. Ziel ist es in diesem Kapitel, die abhängigen und

unabhängigen Fahrzeugparameter zu identifizieren, die maßgeblich für die Gewichtsunterschiede zwischen den Fahrzeugen verantwortlich sind. Anhand dieser Parameter können schließlich Gesamt- und Subsystemgewichte neuer Fahrzeugprojekte prognostiziert werden. (Bortz & Schuster, 2010)

Zur Validierung und Weiterentwicklung der Ergebnisse aus der präskriptiven Studie werden Fallstudien sowohl im Automobilunternehmen als auch im universitären Umfeld durchgeführt.

Tabelle 3.4: Steckbrief – Fallstudie, nach Marxen (2014)

Fallstudie	
Anwendungsfeld	<ul style="list-style-type: none"> - Explorative Forschung mit dem Ziel, Forschungsfragen zu identifizieren - Empirische Forschung, Analyse von realen Entwicklungsprozessen - Anwendungsstudien, Entwicklungsunterstützung in realen Prozessen - Untersuchung von komplexen Situationen, wenn das Ziel ein ganzheitliches Bild ist - Identifikation von Hypothesen - Falsifizierung von Theorien - Zeigt Anwendbarkeit / Nutzen einer Entwicklungsunterstützung
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> - Ganzheitlicher Ansatz - Funktioniert auch mit sehr komplexen Situationen
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> - Andauernde Diskussion, ob es sich um eine gültige Forschungsmethode handelt oder nicht - Aufwand durch die notwendige Anwendung von verschiedenen Forschungsmethoden

Durch diese Forschungsmethode kann die Anwendbarkeit beziehungsweise der Nutzen einer Entwicklungsunterstützung in einem komplexen Umfeld wie der Automobilentwicklung untersucht werden. Hierbei muss beachtet werden, dass die Methoden meist mit weiteren Methoden angereichert werden sollte. So werden in dieser Arbeit die Ergebnisse der Fallstudie durch weitere, meist argumentative, Validierungsaktivitäten untermauert. (Marxen, 2014)

Die in diesem Abschnitt beschriebenen Forschungsmethoden finden sich auch in den vom Autor co-betreuten Forschungsarbeiten wieder. Vor allem die Methode der teilnehmenden Beobachtung kam zur Anwendung, da die Arbeiten allesamt bei der BMW Group in der Leichtbau- und Gewichtsmanagementabteilung durchgeführt wurden. Die folgende Abbildung setzt die betreuten Arbeiten in den zeitlichen Kontext und verweist auf die Kapitel, in denen die diese näher beschrieben werden.

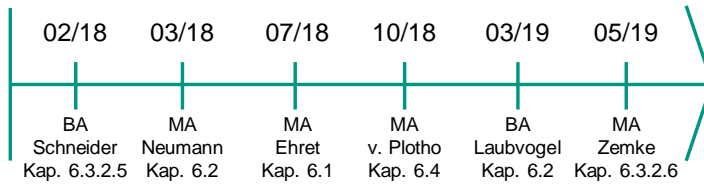


Abbildung 3.2: Co-betreute Forschungsarbeiten mit Kapitelverweis im zeitlichen Kontext

Im Folgenden werden die co-betreuten Arbeiten und ausgewählte, darin enthaltene Forschungsmethoden kurz vorgestellt:

Bachelorarbeit Schneider (2018)

In dieser Arbeit wurde eine Methode zur Identifikation von Leichtbaumaßnahmen auf Basis einer intelligenten und teilautomatisierten Wettbewerbsanalyse entwickelt. Hierzu wurde eine Excel-basiertes Programm aufgebaut, welches gewichtsbasierte Wettbewerbsvergleiche anhand von Fahrzeugzerlegedaten des Dienstleisters A2Mac1 (A2mac1, 2020) durchführt. In zahlreichen Experteninterviews sind schließlich Leichtbaukriterien und Checklisten abgestimmt worden, die eine strukturierte Analyse der generierten Wettbewerbsvergleiche hinsichtlich enthaltener Leichtbaupotentiale ermöglichen.

Masterarbeit Neumann (2018) und Bachelorarbeit Laubvogel (2019)

In diesen aufeinander aufbauenden Arbeiten wurde eine Methode zur Prognose von Fahrzeug- und Subsystemgewichten auf Basis statistischer Ansätze und physikalischer Wechselwirkungen entwickelt. Hierzu wurden gewichtsrelevante Eigenschaften einzelner Subsysteme durch Recherche, Experteninterviews und Stücklisten identifiziert und deren Einfluss durch Korrelationsanalysen bestimmt. Eine jeweils erfolgreiche Validierung der Methode zur Gewichtsprognose an realen Fahrzeugen der BMW Group rundet die Arbeiten ab.

Masterarbeit Ehret (2018)

In dieser Arbeit wurde eine methodische Vorgehensweise zur Quantifizierung von Gewichtsunsicherheiten in der Automobilindustrie entwickelt. Unter Einbeziehung der Ursachen von Gewichtsänderungen, den dokumentierten Änderungen im Änderungsmanagementtool der BMW Group und regelmäßigen Besprechungen mit Gewichtsexperten wurde ein einheitliches Verständnis von Gewichtsunsicherheiten geschaffen. Auf dieser Basis konnten Unsicherheitskategorien definiert und die

realen Änderungsmaßnahmen entsprechend eingeordnet werden. Eine statistische Analyse dieser Änderungen ermöglichte schließlich die Berechnung von projektphasenabhängigen Unsicherheitskorridoren für das Fahrzeuggewicht.

Masterarbeit v. Plotho (2018)

Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine Methode zur betriebswirtschaftlichen Bewertung von Leichtbaumaßnahmen in der Automobilindustrie entwickelt. Hierzu wurde zunächst der Leichtbaueffekt auf verschiedene Fahrzeugeigenschaften quantifiziert. Die aus der Literatur bekannten € pro kg Werte konnten dabei bestätigt und um Effekte aus der Elektromobilität erweitert werden. Darüber hinaus wurde eine Anrechnungslogik entwickelt, mit der die Wirtschaftlichkeit von einzelnen Leichtbaumaßnahmen in einer späten Projektphase bewertet werden kann.

Masterarbeit Zemke (2019)

In dieser Arbeit wurde ein Konzept für eine fachbereichsübergreifende Leichtbaudatenbank entwickelt. Zunächst wurden hierzu Leichtbau-Workshops in diversen Fahrzeugprojekten begleitet und hinsichtlich Verbesserungspotentialen analysiert. Konkrete Anforderungen an eine Leichtbaudatenbank wurden daraufhin in Experteninterviews identifiziert. Diese Analysen mündeten schließlich in ein Konzept für die Leichtbauideendatenbank, welches Rollen, Regeln, Vorgehensweisen, Arbeitsprozesse und eine Ideenstruktur enthält. Dieses wurde schließlich in Form eines Prototypen aufgebaut und erfolgreich in der Gewichtsmanagementabteilung getestet.

3.2.3 Forschungsumgebung

Die vorliegende Arbeit wird in drei Forschungsumgebungen durchgeführt. Abbildung 3.3 stellt diese in Verbindung mit den dort angewandten Forschungsmethoden dar.

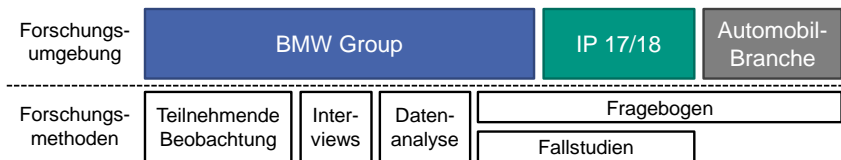


Abbildung 3.3: Forschungsumgebung und dort angewandte Forschungsmethoden

Der überwiegende Teil der Forschung fand im Rahmen einer dreieinhalbjährigen kooperativen Promotion in der Leichtbau- und Gewichtsmanagementabteilung der BMW Group statt. In dieser Zeit konnten die internen Prozesse und Abläufe durch verschiedenste Methoden analysiert und Verbesserungsansätze anwendungsorientiert getestet werden. So konnten praxisnahe Einblicke durch die aktive Mitarbeit in langfristigen Fahrzeugprojekten und die Teilnahme an entsprechenden Meetings gewonnen werden. Desweiteren ermöglichte der Zugang zu allen relevanten Gewichts- und Fahrzeugdaten gepaart mit unzähligen Gesprächen bis hin zu semiformalen Experteninterviews und Fragebögen eine detaillierte Analyse des Gewichtsmanagements der BMW Group.

Die BMW Group ist einer der weltweit führenden Premium-Hersteller von Automobilen und Motorrädern mit etwa 130.000 Mitarbeitern. 2018 wurden etwa 2,5 Mio. Automobile ausgeliefert und ein Umsatz von etwa 100 Mrd. Euro erwirtschaftet. Im Bereich der Automobile umfasst die BMW Group die Marken BMW, Mini und Rolls-Royce Motor Cars. Ein Überblick über die Marken der BMW Group ist in Abbildung 3.4. dargestellt (BMW Group, 2019a).

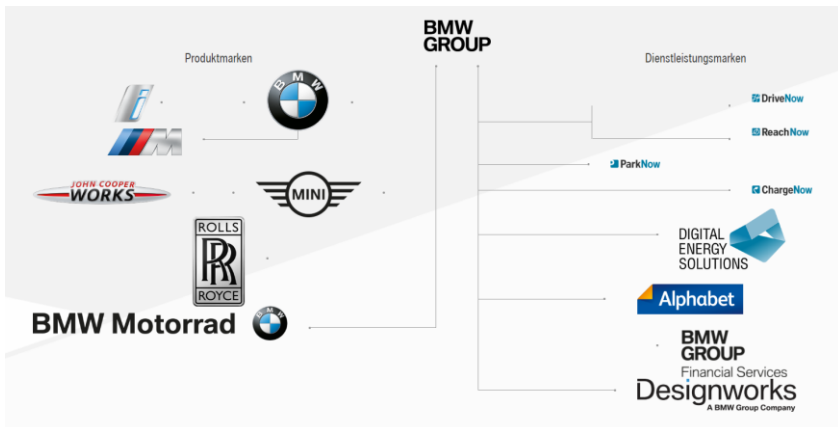


Abbildung 3.4: Marken der BMW Group (BMW Group, 2019b)

Die zweite Forschungsumgebung umfasst das universitäre Umfeld. Konkret wird in dieser Arbeit am IPEK im Rahmen des Live-Labs *IP – Integrierte Produktentwicklung* (Albers et al., 2017b) geforscht. Dabei handelt es sich um eine Lehrveranstaltung, in der jedes Jahr etwa 40 ausgewählte KIT-Masterstudenten des Maschinenbaus ein halbes Jahr in Kooperation mit einem Industrieunternehmen

einen kompletten Produktentstehungsprozess von der Produktprofilerstellung bis zum realen Prototypen durchlaufen. Im betrachteten Jahrgang 2017/18 war der Kooperationspartner die BMW Group. (Albers et al., 2017b)

Die dritte Forschungsumgebung in dieser Arbeit ist die Automobilbranche. Mit Hilfe eines Fragebogens wurden vor allem im Rahmen des *Stuttgarter Symposiums für Automobil- und Motorentechnik 2018* (FKFS) Firmenvvertreter aus der Automobilbranche zu deren Gewichtsmanagementprozessen befragt. Durch den Einblick in andere Automobilunternehmen sollten die Forschungslücke und die abgeleiteten Forschungshypothesen abgesichert und konkretisiert werden.

3.3 Fazit

In diesem Kapitel wurde die Forschungsmethodik DRM auf das Forschungsvorhaben angewandt. Abbildung 3.5 zeigt die hierbei abgeleitete Vorgehensweise.

Die ersten drei Kapitel dienen der Klärung des Forschungsbedarfs und schließen mit Forschungsziel, Forschungshypothesen und Forschungsfragen (vgl. Kapitel 3.1) ab. Mittels der deskriptiven Studie I werden in Kapitel 4 die Anforderungen an die Modellierung von TZS-G abgeleitet. Auf dieser Basis wird in Kapitel 5 eine Methodik bestehend aus einem Framework und einem Methodenset zur Ableitung von Gewichtszielen entwickelt. Die Einzelmethode dieses Sets werden in Kapitel 6 entwickelt und validiert. Kapitel 7 dient der Validierung und Anwendung der Gesamtmethodik. Die Arbeit wird mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick in Kapitel 8 abgerundet.

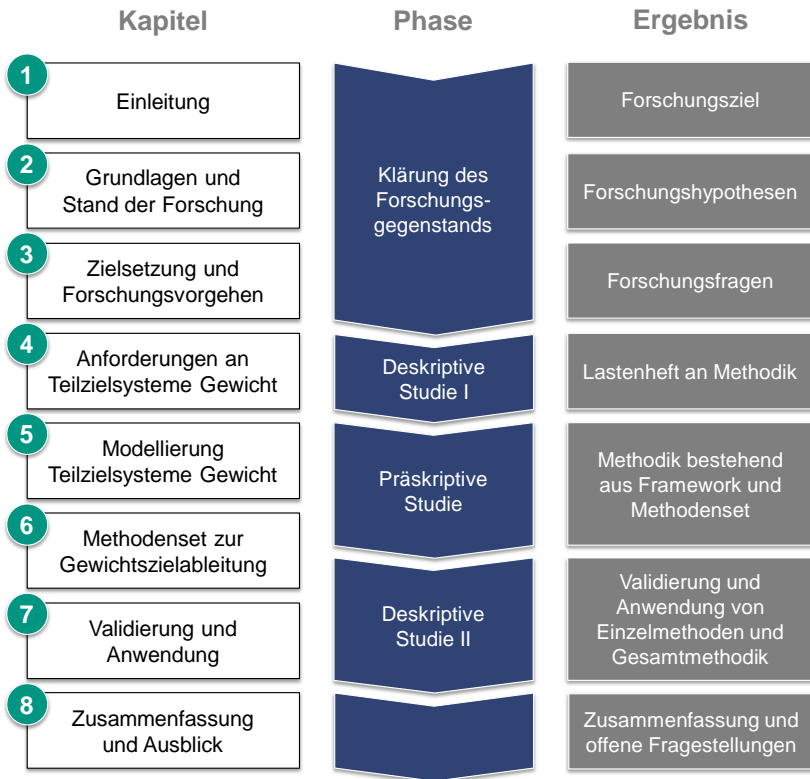


Abbildung 3.5: Vorgehensweise in dieser Arbeit

4 Anforderungen an Modellierung robuster Teilzielsysteme für Gewicht

In diesem Kapitel sollen Anforderungen an die Modellierung robuster Teilzielsysteme für Gewicht abgeleitet werden. Hierzu wird die erste Forschungsfrage aus Kapitel 3.1.3 bearbeitet.

Welche Anforderungen an eine Methodik zur Modellierung von robusten Teilzielsystemen für Gewicht leiten sich aus dem Einfluss des Fahrzeuggewichts auf die im iPeM modellierte automobiler Produktentstehung ab?

Gemäß dem in Kapitel 3.2 entwickelten Forschungsvorgehen wird diese Forschungsfrage mit einer umfassenden deskriptiven Studie beantwortet. Die Studie umfasst eine Literaturrecherche, einen Fragebogen in der Automobilbranche und eine teilnehmende Beobachtung bei einem Automobilhersteller. Zunächst wird mit dem Fragebogen an die Automobilindustrie begonnen. Damit kann der identifizierte Forschungsbedarf abgesichert und erste Anforderungen an ein robustes TZS-G abgeleitet werden. In den nachfolgenden Unterkapiteln werden Erkenntnisse aus der Literatur und der teilnehmenden Beobachtung zu weiteren Anforderungen zusammengefasst. Die identifizierten Anforderungen münden schließlich in ein Lastenheft für die zu entwickelnde Methodik.

4.1 Empirische Studie zur Konkretisierung des Forschungsbedarfs

Diese Studie soll den Forschungsbedarf nach einem robusten TZS-G untermauern und erste Anforderungen an eine entsprechende Methodik liefern.

4.1.1 Studiendesign

Basierend auf den Erkenntnissen aus dem Stand der Forschung und der teilnehmenden Beobachtung wurde ein anonymer Fragebogen erstellt. Hierbei flossen vor allem die Beobachtungen aus der täglichen Mitarbeit in der Gewichtsmanagementabteilung der BMW Group ein. Ziel des Fragebogens ist

dabei, die beobachteten Herausforderungen des Gewichtsmanagements mit den Erfahrungen von Gewichtsexperten aus anderen Automobilunternehmen abzugleichen.

Der Fragebogen wurde auf der automobilen Fachtagung *Stuttgarter Symposium für Automobil- und Motorentechnik 2018* (FKFS) vorgestellt und verteilt. Der Fragebogen beinhaltet vor allem Fragen zu Struktur, Aufgaben und Herausforderungen des Gewichtsmanagements in der industriellen Praxis. Zielgruppe sind Vertreter unterschiedlicher Automobilhersteller und -zulieferer, die Erfahrung in ihren unternehmenseigenen Gewichtsmanagementprozessen haben. Der Fragebogen ist im Anhang A vollständig abgebildet.

Es gab insgesamt 13 Rückläufer, die jeweils alle Fragen beantwortet haben. Da der Autor den Fragebogen im Rahmen der Vorstellung eines Konferenzbeitrags (Stegmiller et al., 2018) an das Auditorium verteilt hat, kann eine Rückläuferquote nicht exakt berechnet werden. Der Autor schätzt die Rückläuferquote auf etwa 25 Prozent. Die geringe Quote lässt sich durch die Notwendigkeit von Hintergrundwissen im Gewichtsmanagement und eine gewisse Unsicherheit in der Automobilbranche bezüglich Geheimhaltung erklären.

Im ersten Teil des Fragebogens wurden unter anderem die Unternehmenscharakteristiken, die individuelle Berufserfahrung und der Kenntnisstand über die firmeninterne Gewichtsprozesse abgefragt. Die Verteilung der Befragten ist in den folgenden Abbildungen dargestellt.

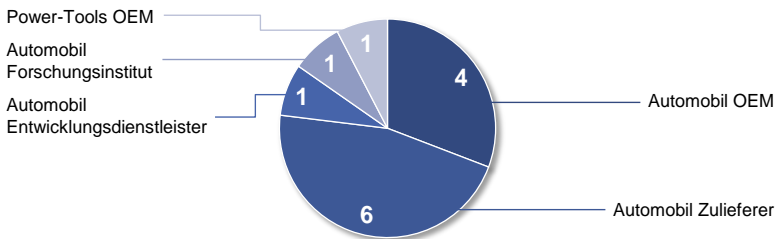


Abbildung 4.1: Verteilung der Befragten nach Branche und Unternehmensart

Es zeigt sich, dass 12 von 13 Befragten in der Automobilbranche tätig sind. Der Power-Tools Original Equipment Manufacturer (OEM) wird in der Auswertung ebenfalls berücksichtigt, da die Datenbasis relativ gering ist und das Gewicht in dieser Branche ebenfalls von hoher Relevanz ist.

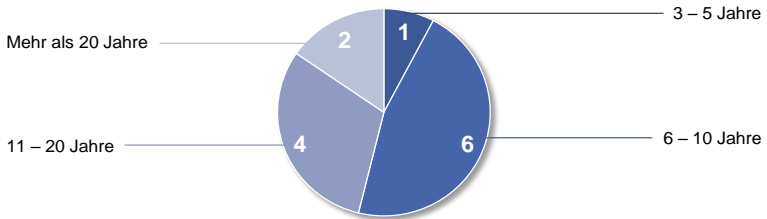


Abbildung 4.2: Verteilung der Befragten nach Berufserfahrung

In dieser Abbildung ist zu erkennen, dass lediglich einer der Befragten weniger als sechs Jahre Berufserfahrung vorweist. Daraus folgt, dass die Befragten über ausreichend Berufserfahrung verfügen.

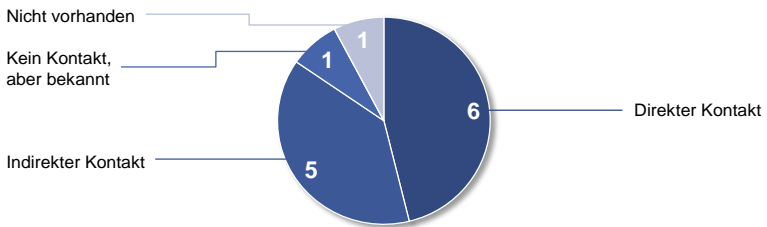


Abbildung 4.3: Verteilung der Befragten nach Kenntnisstand beziehungsweise Kontakt zu firmeninterner Gewichtsmanagement-Abteilung

Es zeigt sich, dass der Fragebogen nur von Firmenvertretern (bis auf einen) ausgefüllt wurde, die Kontakt beziehungsweise Kenntnis über die internen Gewichtsmanagementprozesse haben. Die getätigten Aussagen können daher als fachlich fundiert angesehen werden.

4.1.2 Ergebnisse der Fragebogenstudie

Der in Kapitel 3.1.1 identifizierte Forschungsbedarf nach einem robusten automobilen TZS-G fußt auf einigen Hypothesen. Diese werden in diesem Kapitel aufgeführt und mit der dazugehörigen Frage abgeglichen. Auf diese Weise können die Hypothesen im Rahmen der begrenzten statistischen Basis bewertet und erste Anforderungen an die zu entwickelnde Methodik abgeleitet werden

Hypothese 1:

Der Stellenwert des Gewichts ist in der Regel projektabhängig.

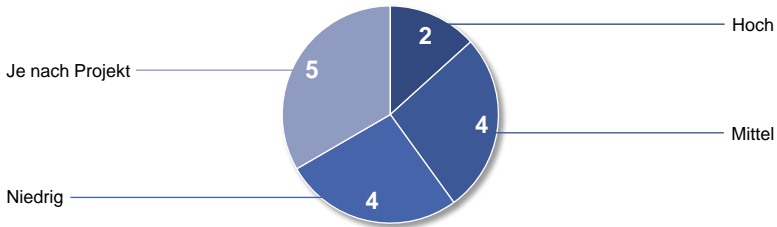


Abbildung 4.4: Antworten auf Frage: „Wie groß ist der Stellenwert des Gewichtsziels in Ihrem Unternehmen verglichen mit anderen Zielgrößen (z.B. Kostenziele, Funktionsziele)?“

Bei dieser Frage konnten mehrere Antworten ausgewählt werden, daher in Summe 15 Antworten. Zwei Befragte wählen zugleich *Niedrig* und *Je nach Projekt* aus. Das Ergebnis unterstreicht die These, dass das Gewichtsziel oftmals nicht die höchste Priorität hat. Vielmehr ist der Stellenwert des Gewichtsziels projektabhängig oder eines von vielen Zielen. Gewichtsziele haben demnach einen projektabhängig unterschiedlichen Härtegrad. Als erste Anforderung an robuste Gewichtsziel-systeme kann demnach eine gewisse Agilität und Anpassbarkeit abgeleitet werden.

Hypothese 2:

Die Gewichtsziele stellen in der Regel eine Herausforderung dar.

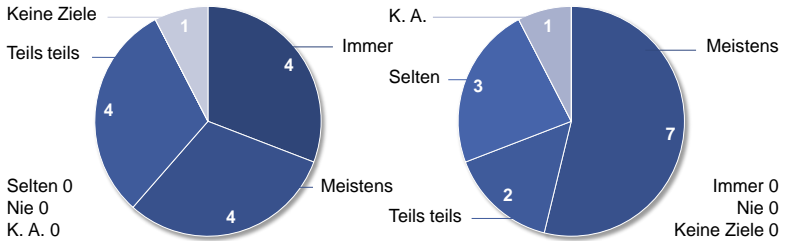


Abbildung 4.5: Antworten auf Frage links: „Sind die Gewichtsziele in Ihrem Unternehmen stets niedriger als das Ist-Gewicht?“ und auf Aussage rechts: „Die anspruchsvollen initialen Gewichtsziele erfordern erhebliche Gewichtsreduzierungsmaßnahmen zur Zielerreichung.“

Es bestätigt sich, dass Gewichtsziele meist herausfordernd gestellt sind und zur Erreichung Gewichtsreduzierungsmaßnahmen als notwendig erachtet werden. Daraus lässt sich ableiten, dass ein niedriges Gewicht als erstrebenswert und hierzu herausfordernde Gewichtsziele als förderlich angesehen werden. Herausfordernde Ziele sollten demnach Teil erfolgreicher TZS-G sein.

Hypothese 3:

Die Entwicklung des Produktgewichts im Projektverlauf ist sehr volatil.

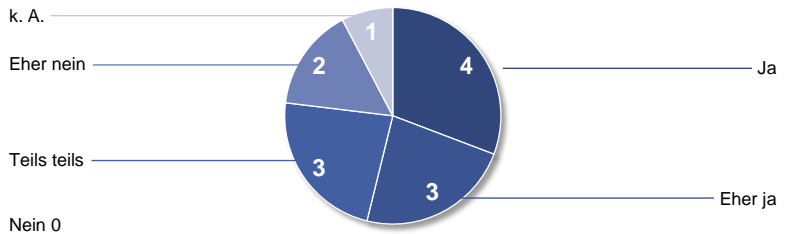


Abbildung 4.6: Antworten auf die Aussage: „Die Entwicklung des Produktgewichts im Projektverlauf ist u.a. aufgrund von technischen und regulatorischen Änderungen sehr volatil.“

10 von 13 Befragte halten den Gewichtsverlauf zumindest teilweise für sehr volatil. Ein robustes TZS-G muss sich dieser Tatsache stellen, indem es schnell und kostengünstig auf veränderte Projekttrandbedingungen reagieren kann. Eine gewisse Agilität des Zielsystems ist deshalb gefordert.

Hypothese 4:

Initiale Gewichtsziele werden am Ende der Entwicklung oftmals nicht erreicht. Ein Grund dafür ist, dass Gewichtsziele an veränderte Randbedingungen angepasst werden.

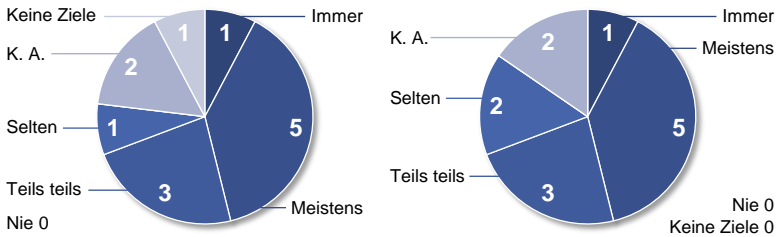


Abbildung 4.7: Antworten auf Frage links: „Werden die initialen Produktgewichtsziele am Ende der Entwicklung erreicht?“ und auf Frage rechts: „Werden die Gewichtsziele in Ihrem Unternehmen auf veränderte Randbedingungen angepasst?“

Es ist auffällig, dass bei sechs Firmen die initialen Gewichtsziele meistens oder immer erreicht werden. Dagegen werden in nur zwei Firmen die Gewichtsziele an veränderte Randbedingungen selten oder nie angepasst. Da zudem eine hohe Volatilität der Gewichtswerte vorher bestätigt wurde, erscheint die linke Frage als zu positiv bewertet. Dennoch lässt sich festhalten, dass Gewichtsziele bei 9 von 13 Firmen zumindest teilweise angepasst werden. Somit zeigt sich, dass Gewichtszielanpassungen in der Automobilindustrie durchaus üblich sind. So lässt sich abermals die Anforderung nach agil anpassbaren TZS-G ableiten.

Insgesamt zeigt sich, dass der Fragebogen die abgeleiteten Hypothesen aus dem Stand der Forschung und der teilnehmenden Beobachtung bestätigt. Die Ergebnisse untermauern die Herausforderungen im Gewichtsmanagement und den Bedarf für methodische Unterstützung. Zentrale Anforderungen an die Modellierung von TZS-G konnten dabei ermittelt werden. Diese werden im folgenden Kapitel strukturiert und weiterentwickelt.

4.2 Anforderungen an Teilzielsysteme für Gewicht

Die Ergebnisse des Fragebogens zeigen, dass die Anforderungen an die Modellierung von robusten TZS-G vielschichtig und teilweise gegenläufig sind. So sollen Gewichtsziele herausfordernd sein, um zum Leichtbau anzuregen. Im Gegensatz dazu sind Gewichtsziele volatilen Randbedingungen ausgesetzt und müssen deshalb agil anpassbar sein. Zusammen mit den Erkenntnissen aus dem Stand der Forschung und der teilnehmenden Beobachtung ergeben sich daraus sechs Anforderungscluster, die in der Abbildung 4.8 dargestellt sind.

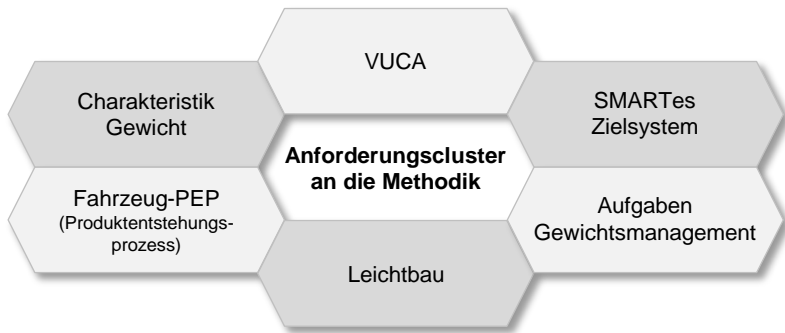


Abbildung 4.8: Anforderungscluster an die Methodik

Die sechs Anforderungscluster werden nachfolgend konkretisiert. Eine Zusammenfassung der Anforderungen wird abschließend in Abbildung 4.11 dargestellt.

Charakteristik Gewicht

In Kapitel 2.2.1 wurde die Rolle und die Charakteristik der Entwicklungsgröße Gewicht in der Automobilentwicklung beschrieben. Aus diesen Erkenntnissen lassen sich Anforderungen an TZS-G ableiten. So konnten zunächst zahlreiche Wechselwirkungen des Gewichts mit weiteren Fahrzeugeigenschaften festgestellt werden. Darüber hinaus wurde ersichtlich, dass technische Änderungen im Projektverlauf in der Regel auch zu Gewichtsänderungen führen. Diese Volatilität wird durch den projektabhängigen Härtegrad des Gewichtsziels noch verschärft (siehe Fragebogenergebnis in Abbildung 4.4). So können Gewichtszieländerungen je nach Projekt völlig unkritisch oder aber zu millionenschweren Änderungen oder

einem Projektabbruch führen. Ein robustes TZS-G muss darauf agil reagieren können, um unwirtschaftliche Gewichtsvorhalte vermeiden zu können.

Des Weiteren sollte die Kostenauswirkung von Gewicht bei der Ableitung von Gewichtsziele stets bedacht werden. Gerade Auslegungsgrenzen in Kombination mit der beschriebenen Gewichtsspirale können hierbei hohe Kosten verursachen. Dies ist einer der Gründe, weshalb das Gewicht nicht nur eine Resultierende einer technischen Konstruktion ist, sondern auch ein zentraler Auslegungs- und Gestaltungsparameter.

Leichtbau

Die Existenz von Gewichtsziele wird meist damit begründet, Leichtbau im Fahrzeug zu forcieren und somit wettbewerbsfähige Fahrzeuggewichte sicherzustellen. Dazu werden herausfordernde Gewichtsziele benötigt, wie es auch das Akronym SMART fordert. Herausfordernde Ziele ermöglichen die Umkehrung der Gewichtsspirale, in dem alle Konstruktionsabteilungen auf ein verhältnismäßig niedriges Gewicht auslegen (Trautwein, 2011). Auf diese Weise können zudem die internen Gewichtsvorhalte der Konstruktionsabteilungen abgeschmolzen werden, da ein gewisser Druck und damit auch Motivation durch die niedrigen Gewichtsziele erzeugt wird. So werden späte Gewichtsänderungen oftmals ohne Gewichtszieleanpassungen durch interne Vorhalte ausgeglichen.

Der Druck durch herausfordernde Gewichtsziele kann zudem den subsystemübergreifenden Konzeptleichtbau unterstützen, da hohe Gewichtseinsparungen oftmals nur auf Konzeptebene realisiert werden können (Revfi et al., 2018b). Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass ein erfolgreiches TZS-G weiterhin herausfordernde Gewichtsziele beinhalten sollte.

SMARTe Zielgebung

Ein zentrales Erfolgskriterium von Zielen ist die Akzeptanz beim Zielenehmer. Ohne Akzeptanz werden die Ziele entweder gar nicht erst angenommen oder nicht konsequent verfolgt. Zudem besteht die Gefahr, dass übermäßige interne Vorhalte gebildet werden, die die Steuerung des Gewichts weiter erschweren.

Die hohe Relevanz des Themas *Akzeptanz* konnte im Rahmen der teilnehmenden Beobachtung oftmals festgestellt werden. So hat ein Fragebogen (siehe Anhang B) unter 18 Gesamtfahrzeuggewichtsverantwortlichen der BMW Group ergeben, dass ein nicht maßnahmenhinterlegtes Zieldelta nur unter bestimmten Randbedingungen von den freigebenden Entwicklungsbereichen akzeptiert wird. Lediglich ein hoher Neuentwicklungsanteil, eine frühe Projektphase und leichtere

Wettbewerbsfahrzeuge werden als Argumente akzeptiert. Diese Erkenntnisse werden bei der weiteren Entwicklung der Einzelmethoden berücksichtigt und motivieren die gezielte Anwendung des PGE-Ansatzes.

Demnach sollten die Anteile an Übernahme-, Gestalt- und Prinzipvariation eine maßgebliche Rolle bei der Ableitung von Gewichtszielen spielen. Dies impliziert die konsequente Nutzung von Vorgängerwissen. Bereits heute ist die Nutzung von Vorgängerwissen in der Automobilindustrie weit verbreitet, da die Fahrzeuge meist in Generationen entwickelt werden. Der Fragebogen aus Kapitel 4.1 unterstreicht dies mit den in Abbildung 4.9 dargestellten Ergebnisse.

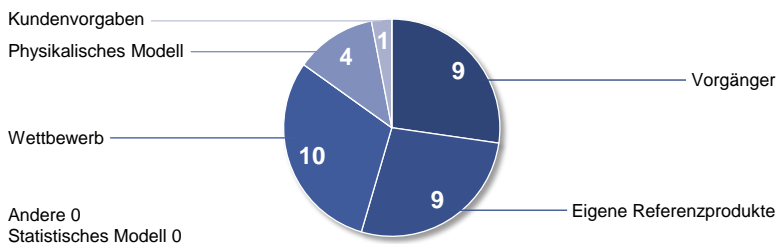


Abbildung 4.9: Antworten auf Frage: „Wie leitet Ihr Unternehmen Produktgewichtsziele her? (Mehrfachnennungen möglich)“

Es zeigt sich, dass bei 9 von 13 Unternehmen der Vorgänger und andere eigene Referenzprodukte zur Ableitung von Gewichtszielen verwendet werden. Sogar 10 von 13 nutzen Wettbewerbsdaten. Dieses Ergebnis unterstreicht die Umfrageergebnisse aus Studien im Rahmen der PGE-Forschung, wonach Produkte in Generationen entwickelt werden (Albers et al., 2015a).

Es kann festgehalten werden, dass ein smartes Zielsystem vor allem transparente und akzeptierte Ziele bereitstellen muss. Wie bereits beschrieben, kann der PGE-Ansatz dabei entscheidend unterstützen.

In diesem Anforderungscluster sei zudem noch auf zwei weitere Anforderungen hingewiesen. Zum einen können agile Ziele als *moving targets* interpretiert werden, was wiederum die Akzeptanz und vor allem den Härtegrad des Ziels schwächt. Dies sollte für motivierende, herausfordernde Ziele vermieden werden.

Zum anderen sei auf die von Ebel (2015) entwickelten Beurteilungsdimensionen von Zielen verwiesen. Diese zeigen, dass eine geringe Beeinflussbarkeit sowie hohe

Auswirkung von Zielen zu kritischen Zielen führt. Dies ist beim Gewicht der Fall, da das Gesamtfahrzeuggewichtziel meist eine unternehmensweite Zielgröße darstellt. Daraus folgt, dass Gewichtszielanpassungen von hohen Hierarchieebenen im Unternehmen wie Projektleiter oder sogar Vorstand genehmigt werden müssen. Die Beeinflussbarkeit des Gewichtsziels durch die Gewichtsmangementabteilung ist somit begrenzt. Um das kritische Gewichtsziel nun gemäß den Beurteilungsdimensionen in ein wichtiges Ziel zu transformieren, sollte die Beeinflussbarkeit des Gewichtsziels durch die Gewichtsmangementabteilung gestärkt werden.

Fahrzeug-Produktentstehungsprozess (FZG-PEP)

Das Fahrzeuggewicht hat einen starken Einfluss auf den Fahrzeugentstehungsprozess. In Kapitel 2.2.2 konnte gezeigt werden, dass ein Großteil der Aktivitäten der Produktentstehung mit dem Gewicht verknüpft ist. Dabei konnte die Methodik zur Modellierung von TZS-G als Teilaktivität der Aktivität *Projekte managen* zugeordnet werden. Diese Verortung, abgebildet in Abbildung 4.10, zeigt, dass die Methodik die Aktivitäten der Problemlösung (*SPALTEN*) vollständig durchlaufen sollte.

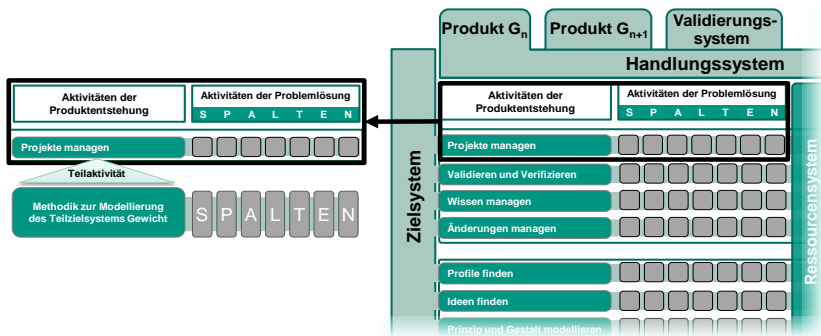


Abbildung 4.10: Modellierung von TZS-G als Teilaktivität in der Produktentstehung

Hieraus leitet sich die Anforderung an die Methodik ab, dass die enthaltenen Methoden die Aktivitäten der Problemlösung umfassend abdecken sollten. Hinzu kommt, dass das Gewicht mit einem Großteil der Aktivitäten der Produktentstehung wechselwirkt. Diese Wechselwirkungen sollten daher bei der Zielableitung berücksichtigt werden. Dies kann nur durch eine systematische Nutzung von

Vorgänger- und Referenzsystemdaten gemäß der Produktgenerationsentwicklung effizient geleistet werden.

Im Fahrzeugentstehungsprozess wird die Auslegung und Dimensionierung des Fahrzeugs beziehungsweise der Komponenten in besonderem Maße von Gewichtsdaten beeinflusst. Späte Änderungen des Auslegungsgewichts können dabei hohe Änderungskosten, Mehrgewicht oder Ausstattungsausschlüsse verursachen. Beispiele reichen hier von relativ günstigen Bremsensprüngen auf höhere Zollgrößen bis hin zu späten und kostspieligen Lenkungsneuentwicklungen aufgrund erhöhter Vorderachslasten. Um dies zu verhindern, sollten bereits in einer frühen Projektphase realistische und robuste Auslegungsgewichte bereitgestellt werden. Die Gewichtsmanagementabteilung sollte daher bereits ab Projektbeginn an der Auslegung beteiligt sein. Dies ist von besonderer Bedeutung, da in einer frühen Projektphase die Fahrzeugplattformen, Baukästen und Zukaufteile dimensioniert werden.

Durch realistische und damit verlässliche Auslegungsgewichte können zudem die internen Vorhalte langsam abgebaut werden, die sich in der Praxis immer wieder beobachten lassen. Diese Vorhalte sollten zudem im Sinne der optimalen Gewichtssteuerung grundsätzlich bei der Projektleitung und nicht bei den konstruierenden Entwicklungsbereichen liegen.

Volatility, Uncertainty, Complexity, Ambiguity (VUCA)

Das Akronym VUCA beschreibt das heutige und zukünftige Unternehmensumfeld, das tendenziell volatil, unsicherer, komplexer und mehrdeutiger wird (Bennett & Lemoine, 2014). Die Literaturrecherche und die teilnehmende Beobachtung zeigten, dass dies in besonderem Maße auf die Automobilindustrie zutrifft. Durch die starke Vernetzung des Gewichts mit dem Produktentwicklungsprozess haben die daraus resultierenden Herausforderungen einen erheblichen Einfluss auf die Modellierung von TZS-G.

Gewichtsentwicklungen werden volatiler und unsicherer, was auch durch den Fragebogen (siehe Abbildung 4.6) bestätigt wurde. Albers (2010) unterstreicht dies durch seine Hypothese, dass eine Produktentwicklung immer einmalig und einzigartig sei. Diese Volatilität und Unsicherheit zeigt sich in zahlreichen Gewichtszielanpassungen aufgrund veränderter Randbedingungen. Dies konnte während der teilnehmenden Beobachtung aber auch durch den Fragebogen (siehe Abbildung 4.7) festgestellt werden. Folglich müssen Gewichtszieländerungen bei der Modellierung von robusten TZS-G als natürlich und nicht als Fehler verstanden werden.

Branchen wie die Luft- und Raumfahrttechnik haben diese Tatsache bereits akzeptiert. Hier werden so genannte *Mass Growth Allowances (MGA)* (SAWE Recommended Practices and Standards, 2015) gewährt und eingeplant. Zudem werden weitere Vorhalte, so genannte *Margins*, für eine zusätzliche Robustheit vorgehalten. Diese Ansätze sollten, wie bereits in Kapitel 2.3.2 erläutert, nicht direkt in die Automobilbranche übernommen werden, da dort andere Randbedingungen herrschen. Dennoch sollten Elemente davon adaptiert werden.

Agile Ansätze (Albers et al., 2017a) und eine ausgeprägte Szenarioanalyse (Meyer-Schwickerath, 2014) werden oftmals den Herausforderungen der VUCA-Welt entgegengesetzt. Eine Strategie zum Überleben in der VUCA-Welt leitet sich zudem aus dem Akronym selbst ab. Diese setzt sich aus *vision* (Vision), *understanding* (Verstehen), *clarity* (Klarheit) und *agility* (Agilität) zusammen (Johansen, 2007). Diese Ansätze sollten daher auch bei der Modellierung von robusten TZS-G betrachtet werden.

Aufgaben Gewichtsmanagement (G-Mgmt)

Die Aufgaben des Gewichtsmanagements wurden in Kapitel 2.2.2 vorgestellt. Daraus leiten sich Anforderungen an robuste TZS-G ab.

Wie bereits erwähnt stellt das Gewichtsmanagement Auslegungsgewichte für die Fahrzeugentwicklung bereit. Dabei sollte sowohl eine Über- als auch eine Unterdimensionierung vermieden werden. Zu hohe Gewichte führen zu einer unwirtschaftlichen Überdimensionierung und schlechteren Fahreigenschaften. Zu niedrige Gewichte führen zu späten Gewichtsanpassungen, die in der Regel kosten- und zeitintensive Gegenmaßnahmen erfordern.

Eine weitere Aufgabe besteht in der Bereitstellung verlässlicher Homologationsgewichte und stabiler Fahrzeuggewichte bis zum Ende der Produktion (EOP). Durch die hohe Modell- und Variantenanzahl, die langen Fahrzeugentwicklungszeiten und die starken Wechselwirkungen des Gewichts benötigt die Gewichtsmanagementabteilung eine einfache und handhabbare Methodik zur Modellierung von robusten TZS-G.

4.3 Fazit

In diesem Kapitel wurde die Forschungsfrage 1 beantwortet, die wie folgt lautete:

Welche Anforderungen an eine Methodik zur Modellierung von robusten Teilzielsystemen für Gewicht leiten sich aus dem Einfluss des Fahrzeuggewichts auf die im iPeM modellierte automobiler Produktentstehung ab?

Dazu wurde eine deskriptive Studie in Form einer Literaturrecherche, einer teilnehmenden Beobachtung und eines Fragebogens in der Automobilindustrie durchgeführt. Die Ergebnisse mündeten in Anforderungen, die systematisch geclustert und kondensiert wurden (siehe Abbildung 4.11). Auf Basis dieser Anforderungen wird im nächsten Kapitel eine Methodik zur Modellierung von TZS-G entwickelt.

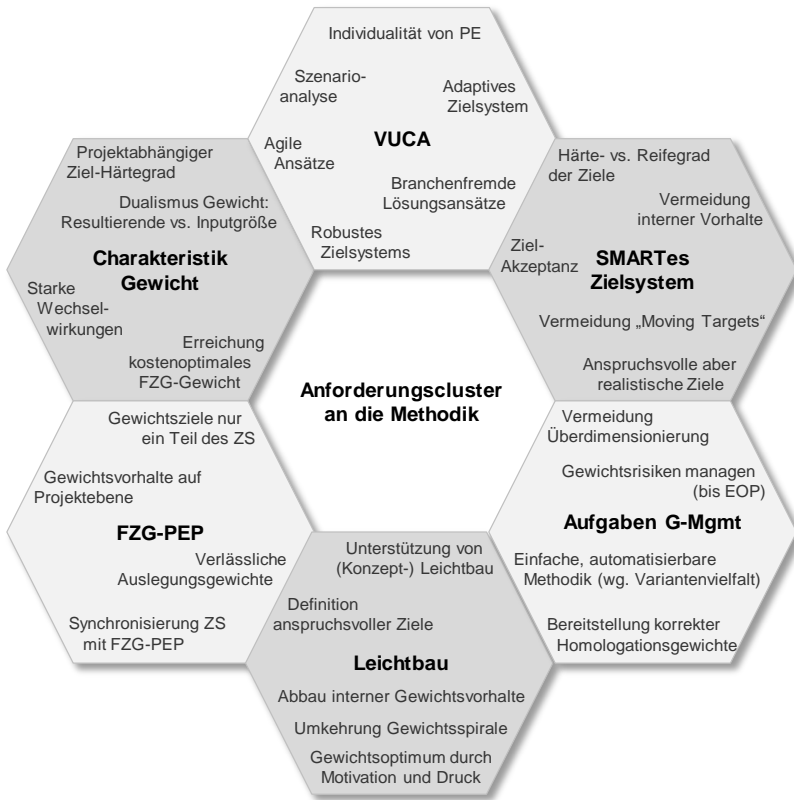


Abbildung 4.11: Detaillierte Anforderungscluster an die Methodik

5 Methodik zur Modellierung von Teilzielsystemen für Gewicht

In diesem Kapitel werden die abgeleiteten Anforderungen aus Kapitel 1 in eine Methodik zur Modellierung von Teilzielsystemen für Gewicht überführt. Unter einer Methodik wird dabei gemäß Blessing und Chakrabarti (2009) eine Kombination aus Methoden, Richtlinien und Tools verstanden, deren Durchführung und Ablauf durch einen Prozess beschrieben ist. Abbildung 5.1 veranschaulicht die Zusammenhänge zwischen Methodik, Methoden, Richtlinien, Prozesse und Tools.

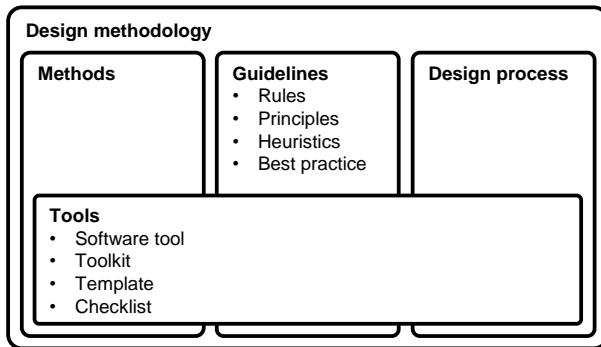


Abbildung 5.1: Zusammenhang zentraler Begriffe nach Blessing und Chakrabarti (2009), Darstellung nach Gericke et al. (2017)

In den nachfolgenden Unterkapiteln wird die Methodik schrittweise aufgebaut. Zunächst muss anhand der abgeleiteten Anforderungen aus Kapitel 1 der konkrete Output der Methodik definiert werden. Darauf aufbauend kann die Integration der Methodik in den Fahrzeugentwicklungsprozess erfolgen. Auf dieser Basis werden abschließend die Bestandteile der Methodik, wie in Abbildung 5.1 dargestellt, entwickelt.

5.1 Modellierung eines Frameworks für Teilzielsysteme für Gewicht

Die zu entwickelnde Methodik hat zum Ziel, ein robustes TZS-G zu modellieren. Demnach muss zunächst der Aufbau eines solchen TZS-G anhand der vorab abgeleiteten Anforderungen definiert werden. Hierzu wird im Folgenden ein Framework bestehend aus Gewichtstypen und den entsprechenden Wechselwirkungen entwickelt. Anschließend wird dieses Framework in den Fahrzeugentwicklungsprozess integriert. Im Zuge dessen wird die zweite Forschungsfrage aus Kapitel 3.1.3 beantwortet.

Wie baut sich ein Framework für ein robustes Teilzielsystem für Gewicht auf Basis der vorab abgeleiteten Anforderungen auf und wie sollte es in den Fahrzeugentwicklungsprozess eingebettet werden?

5.1.1 Aufbau des Frameworks für Gewichtsziele¹²

In Kapitel 1 wurden die Anforderungen an Gewichtsziele und an die entsprechende Herleitungsmethodik in sechs Cluster einsortiert. Aus den Anforderungen, die sich speziell auf Gewichtsziele beziehen, werden im Folgenden konkurrierende Zieleigenschaften abgeleitet. Diese abgeleiteten Eigenschaften lauten *agil*, *fest*, *anspruchsvoll* und *konservativ* und können zugleich typischen Sichtweisen innerhalb eines Unternehmens zugeordnet werden.

Die Projektleitung fordert in der Regel agile Ziele, um auf veränderliche Randbedingungen reagieren zu können (Projektsicht). Dagegen fordert die Fahrzeugauslegung feste Gewichtsziele, um frühzeitig Plattformen, Baukästen und Komponenten auslegen zu können (Auslegungssicht). Späte Gewichtsänderungen führen hierbei oftmals zu kosten- und zeitintensiven technischen Änderungen

Anspruchsvolle Ziele werden vom Markt gefordert, da die Kunden beziehungsweise die Gesellschaft stetig verbesserte Fahrzeugeigenschaften wie Verbrauch, Reichweite oder Fahrdynamik erwarten (Marktsicht). Zudem verkörpert der Leichtbau immer auch eine Technologieführerschaft im Premium-Automobilsegment. Dagegen fordern die Konstrukteure in den freigebenden

¹² Die Kernelemente dieses Abschnitts wurden bereits in der Veröffentlichung (Stegmiller et al., 2018) publiziert.

Entwicklungsbereichen eher konservative Gewichtsziele. Dies begründet sich darin, dass dort meist ein hoher Kostendruck herrscht und neben dem Gewicht zahlreiche weitere Eigenschaften und Funktionen umgesetzt werden müssen (Konstrukteurssicht).

Abbildung 5.2 stellt die oben beschriebene Zuweisung der Anforderungen auf die Zieleigenschaften dar. Es sei hierbei erwähnt, dass nur die Anforderungen zugewiesen wurden, die sich speziell auf Gewichtsziele und nicht auf die Herleitungsmethodik beziehen. Diese werden zu einem späteren Zeitpunkt der Arbeit aufgegriffen.

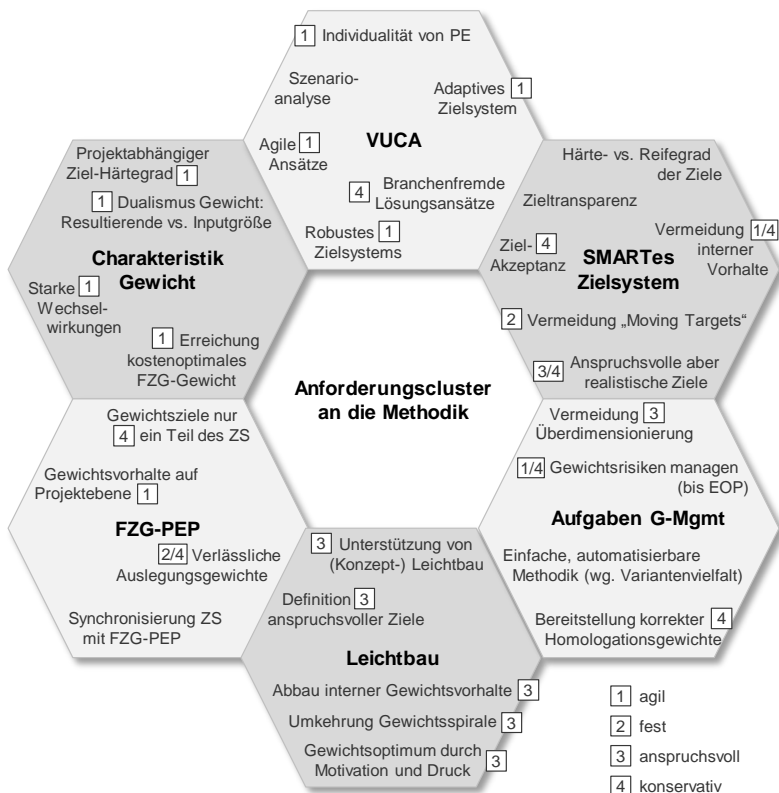


Abbildung 5.2: Ableitung von Gewichtszieleigenschaften aus den Anforderungen

Bislang wurden vier zentrale Zieleigenschaften aus den Anforderungen identifiziert. Mithilfe eines Portfoliodiagramms sollen nun konkrete Gewichtsziele abgeleitet werden. Dieses Portfoliodiagramm ist in Abbildung 5.3 dargestellt und setzt die Zieleigenschaften und die unterschiedlichen Unternehmenssichten ins Verhältnis.

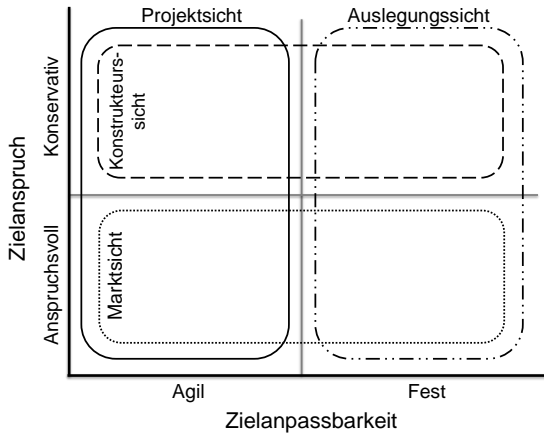


Abbildung 5.3: Portfoliodiagramm Zieleigenschaften

Um dem Anspruch nach einem robusten TZS-G gerecht zu werden, müssen alle Unternehmenssichten berücksichtigt werden. Da im Portfoliodiagramm kein Punkt existiert, in dem alle Sichten bedient werden, müssen mindestens zwei unterschiedliche Gewichtsziele eingeführt werden. Um die Menge an Zielen im Sinne der Einfachheit und Transparenz möglichst gering zu halten, sollten zwei Gewichtsziele gewählt werden, die sich in diagonal zueinander liegenden Quadranten befinden. Da anspruchsvolle und zugleich feste Gewichtsziele, wie bereits in Kapitel 1 beschreiben, zu großen Auslegungsrisiken führen können, existiert nur eine geeignete Lösung.

Diese Lösung setzt sich aus einem festen und eher konservativen Auslegungsgewicht und einem agilen und anspruchsvollen Zielgewicht auf Gesamtfahrzeugebene zusammen. Die beiden Größen sind durch einen projektspezifischen Puffer verbunden. Der Puffer liegt hierbei bei der Projektleitung und nicht bei den freigebenden Entwicklungsbereichen. Dies ermöglicht eine übergreifende Steuerung des Gewichts, wodurch auf interne wie externe Änderungen im Sinne des Gesamtoptimums reagiert werden kann. Die Entwicklungsbereiche müssen sich ihrerseits darauf verlassen können, dass ihr

anspruchsvolles Gewichtsziel bei sich ändernden Randbedingungen über den Puffer korrigiert wird. Nur so entsteht Vertrauen und Akzeptanz für anspruchsvolle Gewichtsziele.

Das oben beschriebene Auslegungsgewicht wird im Rahmen dieser Arbeit gemäß der folgenden Definition 27 verwendet. Die Definition des Zielgewichts aus Kapitel 2.2.1 ist weiterhin gültig.

Definition 28: Auslegungsgewicht

Das Auslegungsgewicht wird zur Auslegung der technischen Systeme im Fahrzeug verwendet. Es stellt gegenüber dem Ist- und Zielgewicht durch die systematische Berücksichtigung zusätzlicher Informationen eine realistischere Prognose des Gewichts zu SOP und/oder zu darauffolgenden Serieneinsatzterminen dar.

Das Zielgewicht wird, im Gegensatz zum Auslegungsgewicht, auf die Entwicklungsbereiche und Module heruntergebrochen. Somit können die Potentiale eines anspruchsvollen Ziels hinsichtlich Leichtbau, Motivation und Druck gehoben werden, ohne die Auslegung des Fahrzeugs durch risikoreiche Ziele im Umfeld volatiler Randbedingungen zu gefährden.

Abbildung 5.4 zeigt die Verortung der Gewichtsziele und überführt diese in eine für Gewicht gebräuchliche Säulendarstellung. Zudem wird die Lage der heute üblichen festen und anspruchsvollen Zielgewichte angedeutet.

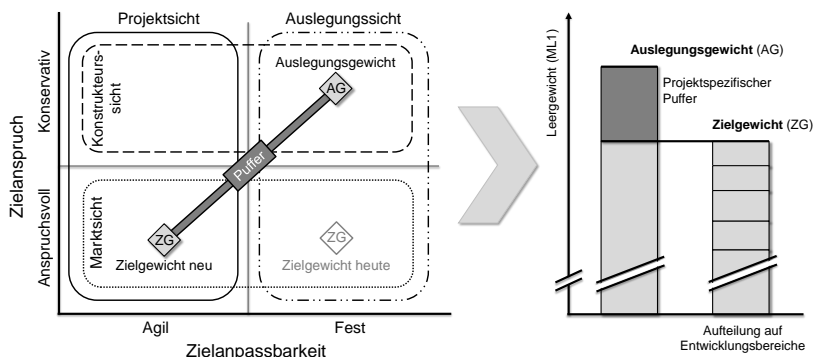


Abbildung 5.4: Ableitung der Gewichtsziele aus dem Portfoliodiagramm

Die gewonnenen Erkenntnisse beziehen sich auf das Gewicht von Gesamtfahrzeug und dessen Subsysteme. Die Gewichtsmanagementabteilung verantwortet darüber hinaus noch weitere Gewichtsdaten wie die Achslasten, die Achslastverteilung, den Schwerpunkt oder die Massenträgheitsmomente. Da diese Gewichtsdaten vornehmlich für die Fahrzeugauslegung verwendet werden, bildet das oben definierte Auslegungsgewicht die Basis für deren Berechnung.

Der Aufbau des Zielsystems aus Teilzielsystemen, wie z.B. Gewicht oder Kosten, ist in Abbildung 5.5 beispielhaft dargestellt. Die innere Struktur des Teilzielsystems für Gewicht wird hierbei durch das entwickelte Framework maßgeblich definiert. Zudem hebt die Darstellung die zahlreichen Wechselwirkungen innerhalb und zwischen den Teilzielsystemen hervor, die bei der Modellierung von Teilzielsystemen nicht vernachlässigt werden dürfen.

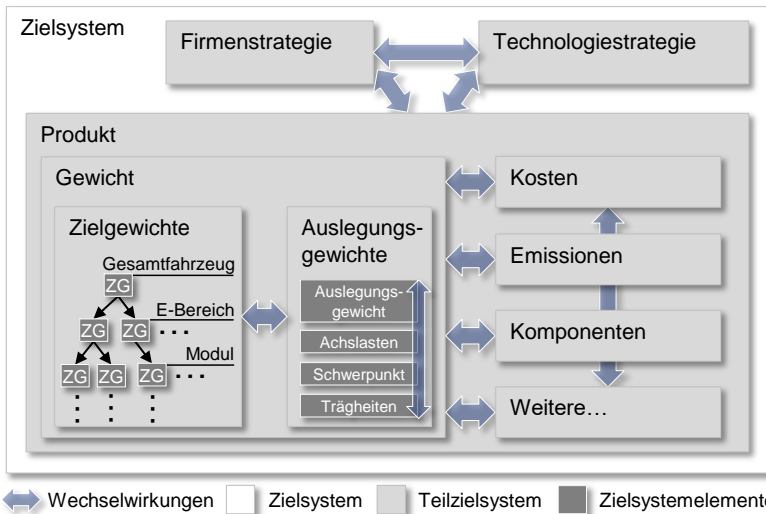


Abbildung 5.5: Teilzielsystem Gewicht mit beispielhaften Wechselwirkungen innerhalb des Zielsystems – Darstellung angelehnt an Albers und Muschik (2010a) und Muschik (2011)

5.1.2 Integration des Frameworks in den Fahrzeugentwicklungsprozess

Im vorherigen Kapitel wurde ein Framework in Form einer grundsätzlichen Trennung von Auslegungs- und Zielgewichten entwickelt. Im Folgenden wird das Framework

in den Fahrzeugentwicklungsprozess integriert, um die abgeleiteten Anforderungen umzusetzen.

Zunächst muss das Framework auf die Randbedingungen der Automobilindustrie angepasst werden. Im Vergleich zu Branchen wie der Raumfahrt herrscht in der Automobilindustrie eine sehr hohe Modell- und Variantenvielfalt. Daraus folgt, dass ein einzelnes Fahrzeugprojekt auf Grund unterschiedlicher Antriebsstrang- und Ausstattungsvarianten zahlreiche Gesamtgewichte annehmen kann. Hinzu kommt, dass Automobile typischerweise in Baukästen und Plattformen entwickelt werden. Dies führt zu starken Gewichtsabhängigkeiten zwischen unterschiedlichen Fahrzeugprojekten und deren Varianten. Aus diesen Gründen ist die Ableitung von Auslegungs- und Zielgewichten in der Automobilindustrie sehr umfangreich und herausfordernd.

Ein Fahrzeugprojekt wird in der Regel mit unterschiedlichen Motorisierungen, Getrieben, Serien- und Sonderausstattungen angeboten. Dies resultiert in verschiedenen Fahrzeuggewichten und damit unterschiedlichen Auslegungs- und Zielgewichten. Je nach Verwendungszweck und Meilenstein wird zur Komplexitätsreduzierung eine spezielle Variante als Berichtstyp ausgewählt, die meist der absatzstärksten Variante entspricht. Dieser Berichtstyp wird dann durch Gewichtsziele und durch ein detailliertes Gewichtsmonitoring intensiv überwacht und gesteuert.

Dieses Vorgehen wird in dieser Arbeit weiterverfolgt, in dem Auslegungs- und Zielgewichte zunächst für den Berichtstyp detailliert hergeleitet werden. Der Berichtstyp kann im Sinne der PGE meist als Varianten-Referenzprodukt (Peglow et al., 2017) verstanden werden, da die Varianten des Berichtstyps durch hohe Übernahmevarianteanteile geprägt sind. Die Anwendung typischer Gewichtspauschalen für die abweichenden Umfänge ermöglicht hierbei eine schnelle Gewichtsüberleitung auf die Varianten (siehe Abbildung 5.6). Diese Gewichtspauschalen sind oftmals bekannt, da sie im Rahmen der Baukastenstrategie Übernahmeumfänge von anderen Fahrzeugprojekten sind. Die Gewichtsüberleitung auf auslegungsrelevante Varianten, wie zum Beispiel die schwerste oder leichteste Variante, wird dabei detaillierter durchgeführt. Im weiteren Verlauf der Arbeit wird sich zeigen, dass die auslegungsrelevanten Varianten bereits bei der Zielableitung des Berichtstypen berücksichtigt werden sollten.

Merkmale	Ausprägungen (Gewichtsdeltas)			
Gebiet (Einfluss auf Regulatorik, Ausstattung etc.)	Europa	USA	China	Japan
Motor	100kW	140kW	180kW	250kW
Elektrifizierung	ICE	ICE + 48V	PHEV	BEV
Antriebsart	Frontantrieb	Heckantrieb	Allrad	
Kraftstoff	Benzin	Diesel		
Getriebe	Manuell	Automatik		
Lenkungsart	Linkslenker	Rechtslenker		



Anmerkung:
Die dargestellten Ausprägungen und Gewichtsdeltas sind realistische, jedoch fiktive Beispiele.

Abbildung 5.6: Variantenabhängige Fahrzeuggewichte innerhalb eines Fahrzeugprojekts

Da heutige Fahrzeugentwicklungen in der Regel auf übergreifenden Plattformen und Baukästen aufbauen, können einzelnen Fahrzeugprojekte kaum mehr singular betrachtet werden. Umgekehrt müssen bei der Dimensionierung der Plattformen und Baukästen die darauf aufbauenden Fahrzeuge frühzeitig berücksichtigt werden. Da das Gesamtgewicht und die Achslasten dimensionierende Größen in der Auslegung darstellen, müssen die Auslegungsgewichte und Zielgewichte der Fahrzeuge frühzeitig bestimmt werden. Die Anlaufstafelung (zeitliche Planung der Produktionsstarts) der Fahrzeuge führt dazu, dass zwischen der Dimensionierung einer Plattform bis zum EOP des letzten Fahrzeugs bis zu 20 Jahre liegen können. Falls aus Kostengründen die drauffolgende Plattformgeneration einen hohen Übernahmeanteil aufweisen soll, verlängert sich dieser Zeitraum noch weiter. Dies verdeutlicht die Wichtigkeit einer realistischen Gewichtsprognose in einer frühen Entwicklungsphase.

Für die Auslegung der Plattform sind die auftretenden Extremgewichte von besonderer Bedeutung, das heißt die Auslegungsgewichte der schwersten Fahrzeuge und die Zielgewichte der leichtesten Fahrzeuge. Für die Auslegung der Baukästen (z.B. Bremsen, Lenkungen oder Reifen) sind allerdings auch die Auslegungs- und Zielgewichte der restlichen Fahrzeuge von Bedeutung. Abbildung 5.7 veranschaulicht die gewichtsseitige Auslegung in Form der so genannten Plattformspreizung.

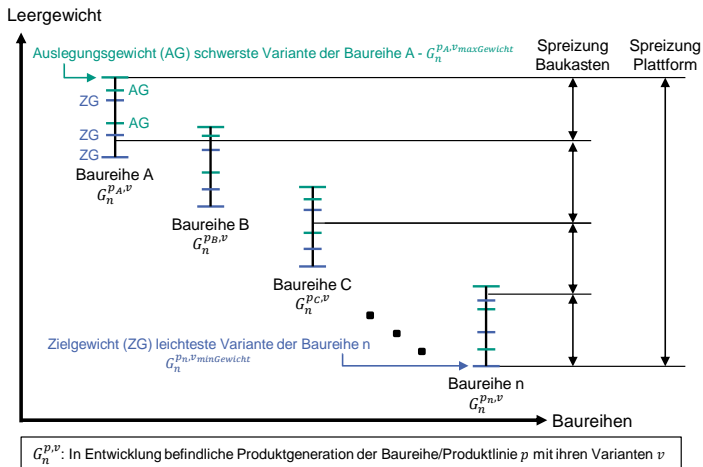


Abbildung 5.7: Gewichtszielframework zur Plattform- und Baukastenauslegung, Nomenklatur gemäß Albers et al. (2020a)

Nachdem die Anwendung des Gewichtszielframeworks in Bezug auf Variantenvielfalt, Plattform- und Baukastenauslegung erläutert wurde, soll nun der Fokus auf der konkreten Anwendung im Fahrzeugprojekt liegen. Wie bereits in den vorherigen Kapiteln beschrieben, besteht die zentrale Herausforderung des Gewichtsmanagements darin, ein wettbewerbsfähiges Fahrzeuggewicht unter den gegebenen Randbedingungen robust zu erreichen. Es muss demnach eine Über- als auch eine Unterdimensionierung durch eine intelligente Festlegung von Auslegungs- und Zielgewichten vermieden werden.

Dazu wird zunächst die zeitliche Entwicklung des Fahrzeuggewichts über den Projektverlauf aus mehreren Blickwinkeln untersucht. Da das Fahrzeuggewicht die Summe der Komponentengewichte darstellt, kann sich das Fahrzeuggewicht nur durch eine Änderung der enthaltenen Komponenten verändern. Für die Gewichtssteuerung ist demnach der mögliche Änderungsumfang entscheidend. Dieser hängt zum einen vom Neuentwicklungsanteil und zum anderen von der Projektphase ab. Da es sich in der Automobilindustrie um eine Massenproduktion mit zahlreichen Lieferanten und komplexen Produktionssystemen handelt, nimmt der mögliche Änderungsumfang Richtung SOP immer weiter ab. Abbildung 5.8 zeigt diesen Zusammenhang, in dem die Konstruktionsabschlüsse mit dem damit festgelegten Gewicht gegen die Projektphase aufgetragen werden. Der Reifegrad des Produkts verhält sich dementsprechend genau gegenläufig.

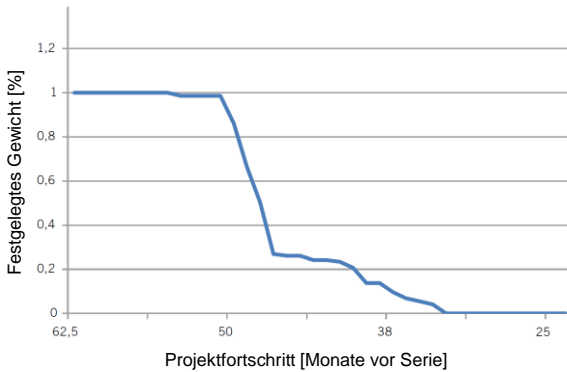


Abbildung 5.8: Festgelegtes Gewicht durch Konstruktionsabschlüsse im Projektverlauf am Beispiel BMW nach Trautwein (2011)

Diese Beobachtung beschreibt eine grundlegende Herausforderung der Produktentstehung. So skizziert Abbildung 5.9, dass Produktänderungen in späteren Projektphasen deutlich problematischer (reduzierter Lösungsraum) und teurer werden. Effektiver und effizienter Leichtbau kann demnach nur in einer frühen Phase erfolgen.

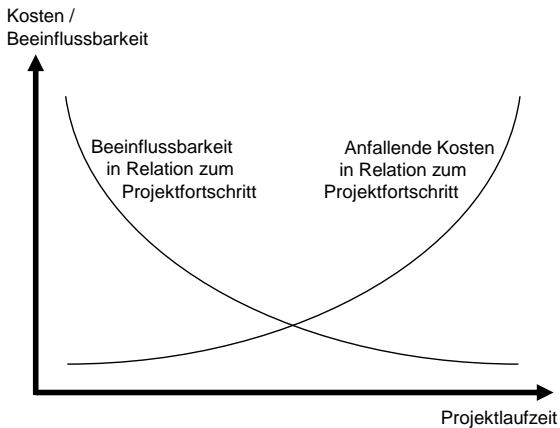


Abbildung 5.9: Kosten und Beeinflussbarkeit in Relation zum Projektfortschritt nach Ehrlenspiel et al. (2014, S. 13)

Auf Basis dieser Erkenntnisse wird im Folgenden eine Unterteilung der Fahrzeugentwicklung in drei Phasen vorgeschlagen, um das abgeleitete Gewichtszielframework optimal einsetzen zu können. Zudem ermöglichen die unterschiedlichen Phasen eine Umsetzung der zum Teil gegensätzlichen Anforderungen aus Abbildung 4.11. Die drei Phasen werden *Leichtbauphase*, *Auslegungsphase* und *Zielführungsphase* genannt. Diese Vorgehensweise kann sowohl für die Plattformentwicklung mit angeschlossener Erstanläuferentwicklung als auch für die Entwicklung später ausgeleiteter Fahrzeuge angewandt werden.

Die drei Phasen sind in Abbildung 5.10 dargestellt, orientieren sich an den Entwicklungsgenerationen und werden nachfolgend näher erläutert. Dabei wird für jede Phase auf die zugrunde liegenden Anforderungen eingegangen.

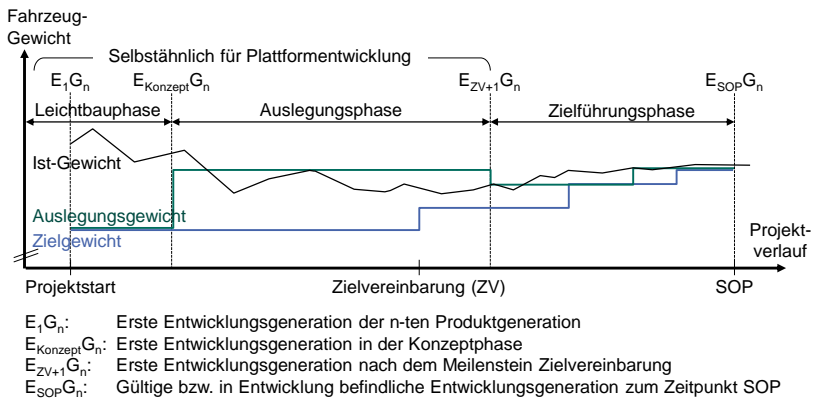


Abbildung 5.10: Phaseneinteilung der Fahrzeugentwicklung hinsichtlich des Auslegungsgewichts

Leichtbauphase

In der Leichtbauphase entspricht das Auslegungsgewicht dem Zielgewicht, ein Puffer existiert demnach nicht. In dieser Phase ist das Ist-Gewicht noch sehr unsicherheitsbehaftet, da viele Umfänge noch nicht final konstruiert wurden. Oftmals ist auch die Konfiguration des Fahrzeugs in Bezug auf Motorisierungen, Materialauswahl oder Neuteilumfang noch in Diskussion. In dieser Phase kann ein Auslegungsgewicht aufgrund der unsichereren Datengrundlage nur schwer bestimmt werden. In der Regel besteht aber ein aus dem Wettbewerb abgeleitetes Gesamtfahrzeuggewichtsziel. Da das Unternehmen grundsätzlich auf dieses Ziel

hinarbeiten sollte, macht es Sinn auch im ersten Schritt darauf auszulegen. So wird sichergestellt, dass die Gewichtsspirale nicht durch ein höheres Auslegungsgewicht angestoßen oder vielleicht sogar umgekehrt werden kann. Auf diese Weise kann das volle Leichtbaupotential gehoben werden.

Die Leichtbauphase umfasst mindestens eine Entwicklungsgeneration und endet, sobald belastbare Gewichtsdaten vorliegen und die Fahrzeugkonfiguration in großen Teilen festgelegt wurde. Dieser Zeitpunkt kann generisch nicht eindeutig in einer Entwicklungsgeneration verortet werden, muss aber in einer Phase liegen, in der ein Großteil der Komponenten noch anpassbar ist (siehe Abbildung 5.8).

Auslegungsphase

An die Leichtbauphase schließt die Auslegungsphase an, in der das vorgestellte Gewichtszielframework in der ursprünglichen Ausprägung angewandt wird. Die Phase entspricht in etwa der Konzeptphase aus Abbildung 2.16. Falls ein Fahrzeug keine Strategiephase erfährt, beginnt diese dann auf Kosten der Leichtbauphase etwas verzögert.

Zur Quantifizierung der Auslegungs- und Zielgewichte werden die im nachfolgenden Kapitel vorgestellten Informationen herangezogen. Da in dieser Phase die Änderungsumfänge kontinuierlich abnehmen, sind robuste und verlässliche Auslegungsgewichte zur Vermeidung später und damit zeit- und kostenintensiver Änderungen erforderlich. Größere technische Änderungen sollten in dieser Phase vorgenommen werden, da hier noch ausreichend Handlungsspielraum für eine bestmögliche Lösungsintegration im Hinblick auf Gewicht, Kosten und Eigenschaften besteht.

Eine Plausibilisierung des Zielgewichts ist in dieser Phase zu empfehlen, wobei es nach wie vor ein anspruchsvolles Ziel darstellen sollte. An dieser Stelle sei nochmals drauf hingewiesen, dass das Zielgewicht im Unternehmenszielsystem verankert ist und damit das offizielle Projektziel darstellt. Unter anderem aus diesem Grund wird das Zielgewicht und nicht das Auslegungsgewicht auf die Subsysteme heruntergebrochen.

Die Auslegungsphase endet mit der Entwicklungsgeneration, die sich an den Meilenstein Zielvereinbarung anschließt. Bei der Zielvereinbarung sichern alle freigebenden Entwicklungsbereiche die Erreichung der vereinbarten Gewichtsziele zu. In der Vorbereitung der Zielvereinbarung werden daher oftmals die Gesamtfahrzeugzielgewichte angepasst, um konsensfähige Gewichtsziele zu erreichen.

Zielführungsphase

Die zugesicherten Gewichtsziele kombiniert mit überwiegend abgeschlossenen Konstruktionsabschlüssen in dieser Phase führen zu einer meist verlässlichen Gewichtsentwicklung bis SOP. Zudem ist prozessual sichergestellt, dass Ist-Gewicht und Zielgewicht ein gewisses Delta nicht überschreiten und zum SOP konvergieren. Dadurch kann die finale Zielführungsphase einsetzen. Das Auslegungsgewicht wird in dieser Phase nicht mehr methodisch hergeleitet, sondern entspricht dem jeweiligen Prognosegewicht der Entwicklungsgeneration. So ist sichergestellt, dass das Auslegungsgewicht zu SOP dem Ist-Gewicht im Sinne einer konsistenten Auslegung entspricht. Durch die Auslegung auf das Prognosegewicht kann damit durch jede folgende Entwicklungsgenerationen die Funktionsfähigkeiten des aktuellen Entwicklungsstands sichergestellt werden. Dies orientiert sich an Zielsetzung der sogenannten Sprints in der agilen Produktentwicklung. Die Zielführungsphase endet mit dem SOP des Fahrzeugprojekts.

Die Fahrzeuge müssen auch nach SOP gewichtsseitig weiterbetreut werden, da sich Ausstattungsänderungen, Gesetze oder technische Änderungen im Rahmen von Facelifts auf das Gewicht auswirken können. Falls diese Änderungen klein ausfallen, wird wie in der Zielführungsphase vorgegangen. Sollten auslegungskritische Änderungen auftreten, kann es Sinn machen, das Vorgehen aus der Auslegungsphase anzuwenden.

Die Einführung eines Auslegungsgewichts ermöglicht einen höheren Grad an Agilität in der Gewichtssteuerung. Dies begründet sich vor allem darin, dass das Auslegungsgewicht von der Gewichtsmanagementabteilung und den Fahrzeugkonzeptauslegern bestimmt wird. Auf diese Weise muss das Zielgewicht, welches ein offizielles Projektziel darstellt, nicht zwangsläufig angepasst werden. Dies hat große Vorteile, da die Änderung von Projektzielen ein schwieriger und meist langwieriger Prozess ist, der nicht selten mit gleichbleibenden Zielen endet. Der Definitionsprozess des Auslegungsgewichts führt darüber hinaus zu einem intensiveren Austausch der Prozesspartner und damit implizit zu einer größeren Beteiligung der Gewichtsmanagementabteilung an der Fahrzeugauslegung.

5.2 Vorgehen zur Quantifizierung von Gewichtszielen

In diesem Abschnitt wird ein Vorgehen zur Quantifizierung des beschriebenen Gewichtszielframeworks innerhalb der zu entwickelnden Methodik vorgestellt. Hierbei liegt der Fokus auf relevanten Methoden und deren Interaktion (siehe Abbildung 5.1). Im Zuge dessen wird die dritte Forschungsfrage aus Kapitel 3.1.3 beantwortet.

Welche Methoden zur Quantifizierung der Zielsystemelemente sollte die Methodik gemäß den Anforderungen enthalten und wie sollten diese miteinander kombiniert werden?

Die Modellierung des Fahrzeugentwicklungsprozesses im iPeM macht deutlich, dass ein Großteil der Produktentstehungsaktivitäten vom Gewicht beeinflusst wird. Daraus wurde abgeleitet, dass die entsprechenden Wechselwirkungen bei der Gewichtszielableitung berücksichtigt werden müssen. Dies soll in dieser Arbeit durch die konsequente Nutzung des PGE-Ansatzes ermöglicht werden.

Hierzu wurde ein Prozess zur Gewichtszielableitung entwickelt, der mehrere Inputgrößen und Methoden umfasst (siehe Abbildung 5.11). Die grau eingefärbten Gewichtsinfos werden als gegeben angenommen und sind daher nicht Umfang dieser Arbeit. Eine detaillierte Beschreibung der entwickelten beziehungsweise angepassten Methoden folgt in Kapitel 6. Nach der Beschreibung der einzelnen Bestandteile wird das Vorgehen kurz erläutert.

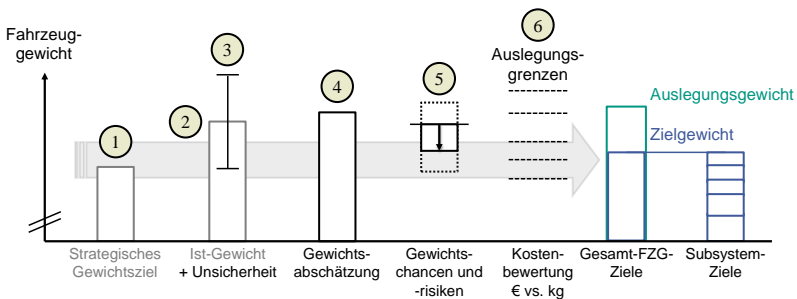


Abbildung 5.11: Methodenset zur Quantifizierung der Gewichtsziele

Strategisches Gewichtsziel (1)

Das strategische Gewichtsziel ist in der Regel auf Gesamtfahrzeugebene und leitet sich aus Wettbewerbsprognosen und unternehmensstrategischen Entscheidungen ab. Die detaillierte Herleitung dieses Ziels ist nicht Teil der vorliegenden Arbeit, da dieses Ziel nicht federführend von der Gewichtsmanagementabteilung bestimmt wird. Das strategische Gewichtsziel wird demnach in der Methodik als gegeben betrachtet.

Ist-Gewicht (2)

Das Ist-Gewicht stellt das aktuell gültige Fahrzeuggewicht dar (siehe Definition in Kapitel 2.2.1). Das Ist-Gewicht basiert auf den Ergebnissen des letztmaligen Gewichtsbeurteilungslaufs in den Entwicklungsbereichen und wird durch Deltagewichte von genehmigten Änderungsanträgen fortgeschrieben. Dieser Wert wird im Entwicklungsprozess fortwährend aktualisiert und kann demnach als gegebener Input-Wert für die Methodik angesehen werden.

Methode zur Bestimmung von Gewichtsunsicherheiten (3)

Die Gewichtsunsicherheit beschreibt in diesem Fall die Unsicherheit, die im Ist-Gewicht enthalten ist. Diese setzt sich unter anderem aus technischen Änderungen bis SOP, Produktionstoleranzen oder Gewichtsänderungen von Zukaufteilen zusammen. In Kapitel 6.1 wird eine Methode zur Bestimmung und Anwendung der Gewichtsunsicherheiten detailliert erläutert.

Methode zur Gewichtsabschätzung (4)

Wie bereits erläutert, ist eine verlässliche Gewichtsprognose von zukünftigen Fahrzeugen in einer frühen Phase von großer Bedeutung für die Auslegung von Plattformen und Baukästen. Hierzu wurde ein parametrisches Gewichtsschätztool auf Basis vorheriger Produktgenerationen im Sinne des PGE-Ansatzes entwickelt. In Kapitel 6.2 wird diese Methode detailliert erläutert.

Methode zur Abschätzung der Gewichtsrisiken und -risiken (5)

Die Gewichtsrisiken und -risiken beschreiben die Tendenz der Gewichtsentwicklung auf Basis konkreter Maßnahmen. Im Gegensatz zu den Gewichtsunsicherheiten wird hierbei kein statistischer Korridor aufgespannt, sondern viel mehr eine Mittelwertverschiebung des Ist-Gewichts vorgenommen. Diese maßnahmenhinterlegte Gewichtstendenz ist von elementarer Bedeutung, um anspruchsvolle, transparente und realistische Zielgewichte festlegen zu können. Die Gewichtsrisiken und -risiken werden dabei durch Projekteigenschaften wie den

Neuentwicklungsanteil oder die Projektphase begrenzt. Subsystemübergreifende Leichtbaumethoden, systematisches Benchmarking und eine projektübergreifende Leichtbauideendatenbank können bei der Identifikation von Leichtbauideen und damit Gewichtschancen unterstützen. In Kapitel 6.3 wird dieser Methodenkomplex detailliert vorgestellt.

Methode zur betriebswirtschaftlichen Gewichtsbeurteilung (6)

Wie bereits im Stand der Forschung erläutert, existieren starke Wechselwirkungen zwischen Gewicht und Kosten. Diese müssen bei der Festlegung von Gewichtsziele berücksichtigt werden. So kann die gewichtsseitige Überschreitung von Komponentenauslegungsgrenzen oder von Verbrauchszielen hohe Kosten nach sich ziehen. In Kapitel 6.4 wird in diesem Kontext eine Methode zur betriebswirtschaftlichen Gewichtsbeurteilung vorgestellt.

Diese sechs Gewichtsinformationen werden im Rahmen der Methodik für die Quantifizierung von Auslegungs- und Zielgewichten herangezogen. Hierbei sei erwähnt, dass für die Durchführung der Methodik nicht alle aufgeführten Informationen vollständig vorliegen müssen. Die Güte der Gewichtsziele hängt jedoch entscheidend von der Qualität und Quantität der Eingangsdaten ab.

Gewichtszieleableitungsprozess

Der Gewichtszieleableitungsprozess soll im Folgenden Schritt für Schritt erläutert werden. Sobald ein Fahrzeug in die vorher definierte Auslegungsphase eintritt, wird ein Auslegungs- und Zielgewicht definiert. Das Zielgewicht entspricht zunächst dem strategischen Gewichtsziel und wird in diesem Schritt plausibilisiert. Dies geschieht, in dem das unsicherheitsbehaftete Ist-Gewicht, die Ergebnisse der Gewichtsabschätzung und die Gewichtschancen und -risiken betrachtet werden. Wenn diese Gewichtsinformationen eine Zielerreichung als realistisch erscheinen lassen, sollte das Zielgewicht weiterhin dem strategischen Gewichtsziel entsprechen. Wird die Zielerreichung als unrealistisch erachtet, muss ein entsprechend angepasstes Zielgewicht definiert werden. Die Entscheidung über eine Anpassung des Zielgewichts und die damit einhergehende Änderung des unternehmensweit abgestimmten Zielsystems erfordert die Genehmigung durch den Projektleiter oder in kritischen Fällen durch den Vorstand des Unternehmens.

Im nächsten Schritt werden auf Basis des Gesamtfahrzeugzielgewichts die Subsystemzielgewichte abgeleitet. Da die Gewichtsdaten des Ist-Gewichts, der Gewichtsabschätzung und der Gewichtschancen und -risiken auf Modulebene vorhanden sind, können konkrete Entwicklungsbereichs- und (bei Bedarf) Modulziele vereinbart werden. Die Gewichtsunsicherheiten werden prozentual auf

Gesamtfahrzeugebene bestimmt und können deshalb näherungsweise ebenfalls auf Entwicklungsbereichs- und Modulebene angewandt werden.

Bei der Quantifizierung der Entwicklungsbereichs- und Modulzielgewichte sollte auf die komponentenspezifischen Randbedingungen eingegangen werden. So hat der bereits in Kapitel 4.2 erwähnte Fragebogen ergeben, dass die Module nur unter bestimmten Voraussetzungen anspruchsvolle Gewichtsziele akzeptieren. Diese Voraussetzungen sind hohe Neuteilumfängen, leichtere Wettbewerber und eine ausreichend frühe Projektphase. Dies unterstreicht die Ansätze der PGE, da auch dort das Entwicklungspotential am Neuentwicklungsanteil und dem vorliegenden Referenzsystem festgemacht wird. In diesem Prozessschritt muss zudem darauf geachtet werden, dass die Summe der vereinbarten Modul- und Entwicklungsbereichsziele dem Gesamtfahrzeugzielgewicht entspricht.

Das Auslegungsgewicht basiert auf denselben Gewichtsinformationen, jedoch rücken die gewichts- und kostenseitigen Risiken stärker in den Fokus. Ein realistisches Fahrzeuggewicht wird auf Basis des unsicherheitsbehafteten Ist-Gewichts, der Gewichtsabschätzung und den Gewichtsrisiken und -chancen abgeleitet und mit den Kostenauswirkungen abgeglichen. Auf diese Weise wird ein robustes Auslegungsgewicht definiert, das typischerweise über den Zielgewicht liegt. Das Delta entspricht dem projektabhängigen Puffer und kann dadurch alternative Gewichtsszenarien abdecken. Durch die Definition des Auslegungsgewichts zwischen Gewichtsmanager und Konzeptausleger liegt der dadurch entstehende Puffer automatisch auf Projektebene und nicht bei den Entwicklungsbereichen. Auf diese Weise können Zielverfehlungen agil ausgeglichen und eine robuste Fahrzeugauslegung sichergestellt werden.

5.3 Fazit

In diesem Kapitel wurden die zweite und dritte Forschungsfrage beantwortet. Diese lauteten:

Wie baut sich ein Framework für robuste Teilzielsysteme für Gewicht auf Basis der Anforderungen auf und wie sollte es in den Fahrzeugentwicklungsprozess eingebettet werden?

Welche Methoden zur Quantifizierung der Zielsystemelemente sollte die Methodik gemäß den Anforderungen enthalten und wie sollten diese miteinander kombiniert werden?

Hierzu wurde die abgeleiteten Anforderungen untersucht und in vier, teilweise konkurrierende, Gewichtseigenschaften überführt. Abspringend von diesen Eigenschaften wurde ein entsprechendes Framework aufgebaut. Dieses wurde anschließend in den Fahrzeugentwicklungsprozess über die Definition von drei Phasen eingebettet. Diese Phasen wurden Leichtbauphase, Auslegungsphase und Zielführungsphase genannt und unterscheiden sich hauptsächlich durch die Bestimmung des Auslegungsgewichts. Durch das Framework und die phasenabhängige Wahl des Auslegungsgewichts konnten die anspruchsvollen Anforderungen weitestgehend abgedeckt werden.

Die abgeleiteten Anforderungen erfordern darüber hinaus eine methodengestützte Quantifizierung der Gewichtsziele. Das dafür erforderliche Methodenset wurde in diesem Kapitel definiert und kurz vorgestellt. Die prozessuale Anwendung der Methoden zur Quantifizierung von Gewichtsziele in den drei definierten Phasen schließt das vorliegende Kapitel ab.

Die Kernidee, Umsetzung, Validierung und Anwendungsszenarien der einzelnen Methoden werden im folgenden Kapitel 6 detailliert erläutert. Eine beispielhafte Anwendung der gesamten Methodik folgt in Kapitel 7.

6 Methodenset zur Quantifizierung von Gewichtszielen

In diesem Abschnitt werden die in Kapitel 5.2 eingeführten Methoden zur Quantifizierung von Gewichtszielen detailliert vorgestellt. Gericke et al. (2017) legen in ihrer Arbeit dar, wie eine Methode vollständig beschrieben werden sollte. Die zentralen Bausteine und die innere Struktur sind in Abbildung 6.1 dargestellt.

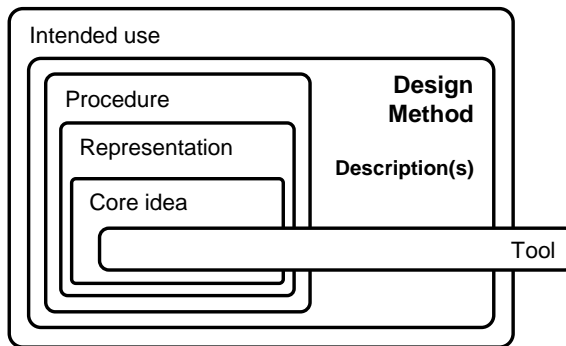


Abbildung 6.1: Bausteine und innere Struktur einer Methode nach Gericke et al. (2017)

Basierend auf diesen Erkenntnissen werden die einzelnen Methoden durch die zugrunde liegende Kernidee, die erfolgte Umsetzung, die Ergebnisse der Validierung und möglichen Anwendungsszenarien beschrieben. In der vorliegenden Arbeit umfasst die Umsetzung die dargestellten Bausteine Procedure, Representation und Tool. Dieses Vorgehen hat zum Ziel, die Methoden vollständig zu beschreiben um damit die Anwendbarkeit in der industriellen Praxis entscheidend zu unterstützen.

In den folgenden Unterkapiteln werden Methoden zur Bestimmung von Gewichtsunsicherheiten, zur Gewichtsschätzung, zur Abschätzung der Gewichtsrisiken und zur betriebswirtschaftlichen Gewichtsbeurteilung vorgestellt.

6.1 Methode zur Bestimmung von Gewichtsunsicherheiten

In diesem Kapitel wird eine Methode zur Bestimmung von Gewichtsunsicherheiten vorgestellt. Hierbei wird auf die Motivation, die Kernidee und die Umsetzung der Methode, aber auch auf Validierungsergebnisse und mögliche Anwendungsszenarien eingegangen. Die Methode wurde in der Veröffentlichung von Stegmiller und Albers (2019) detailliert beschrieben und anteilig im Rahmen der betreuten Abschlussarbeit von Ehret (2018)¹ entwickelt.

6.1.1 Motivation und Kernidee

Eine zentrale Aufgabe des Gewichtsmanagements umfasst die Bereitstellung von verlässlichen Gewichtsdaten für den Fahrzeugentwicklungsprozess. Dies stellt eine Herausforderung dar, weil die Gewichtsdaten eines Fahrzeugs wie Gesamtgewicht oder Achslastverteilung einer gewissen Unsicherheit unterliegen. Diese Unsicherheit wird im Folgenden als Gewichtsunsicherheit bezeichnet.

Die Gewichtsunsicherheit setzt sich aus verschiedenen Unsicherheitsquellen zusammen. So unterliegt ein durch Schätzen, Berechnen oder Wiegen ermittelter Gewichtswert einer grundsätzlichen Ungenauigkeit. Diese kann zum Beispiel durch Mess- und Modellunsicherheiten, aber auch durch Produktionstoleranzen hervorgerufen werden.

Da bei der Fahrzeugauslegung meist das Prognosegewicht zu SOP oder sogar EOP und weniger das aktuelle Ist-Gewicht von Belang ist, müssen weitere Gewichtsunsicherheiten berücksichtigt werden. Die im Produktentwicklungsprozess auftretenden Änderungen, Anpassungen und Ausoptimierungen führen dabei zu signifikanten Gewichtsänderungen und somit Prognoseunsicherheiten. Somit wird deutlich, dass eine verlässliche Gewichtsangabe und im Besonderen eine Gewichtsprognose immer mit entsprechender Unsicherheit angegeben werden sollte.

Hieraus wurde die Notwendigkeit zur Entwicklung einer Methode zur Bestimmung der Gewichtsunsicherheiten von Fahrzeugprojekten abgeleitet. Diese Methode beruht auf der Analyse der Produktänderungen vergangener Fahrzeugentwicklungen. Die Entwicklung komplexer technischer Produkte wird in der Regel

¹ Co-betreute Abschlussarbeit

von einem Änderungsmanagement begleitet. Über dieses Änderungsmanagement werden Änderungen eingesteuert, bewertet und schließlich genehmigt oder abgelehnt. (Braess & Seiffert, 2013)

Diese Änderungsanträge beinhalten unter anderem das verursachte Deltagewicht. Diese Gewichtsinformation wird in der entwickelten Methode zur Bestimmung der Gewichtsunsicherheiten herangezogen. Hierbei werden die Änderungen zunächst gemäß ihrer Ursache in verschiedene Kategorien klassifiziert, um die daraus gewonnenen Informationen zielgerichtet einsetzen können. Die klassifizierten Änderungen werden im nächsten Schritt statistisch ausgewertet und in eine Gewichtsunsicherheit umgerechnet. Die ermittelten Gewichtsunsicherheiten können schließlich für die Quantifizierung der Gewichtsziele, aber auch für weitere Zwecke verwendet werden. In den folgenden Teilkapiteln wird auf die Umsetzung, Validierung und Anwendung der Gewichtsunsicherheiten näher eingegangen.

6.1.2 Umsetzung

Dieser Abschnitt erläutert die konkrete Umsetzung der zuvor vorgestellten Methode. Die Umsetzung umfasst die Identifikation, Klassifizierung und Quantifizierung der Gewichtsunsicherheiten.

6.1.2.1 Identifizierung und Klassifizierung der Gewichtsunsicherheiten

Automobilhersteller betreiben in der Regel ein Änderungsmanagement, um technische Änderungen am Produkt transparent und nachvollziehbar zu machen. Dies geschieht in Form von Änderungsanträgen, die eine Beschreibung des Problems, der Lösung und deren Auswirkungen auf Produkteigenschaften wie Kosten oder Gewicht enthalten. (Braess & Seiffert, 2013)

Diese Informationen werden im Folgenden verwendet, um Gewichtsunsicherheiten zu ermitteln. Die zugrunde liegende Annahme entspringt dem Ansatz der Produktgenerationsentwicklung, wonach Informationen früherer Produktgenerationen für kommende Produktgenerationen wiederverwendet werden sollten. Hieraus wird gefolgert, dass die Gewichtsänderungen in früheren Fahrzeuggenerationen eine Vorhersage der Gewichtsänderungen in der nächsten Generation ermöglichen.

Wie in Abbildung 6.2 dargestellt, gibt es verschiedene Ursachen für (Gewichts-) Änderungen. Diese sind elementar für die Bestimmung und sinnvolle Anwendung von Gewichtsunsicherheiten. Um beispielsweise eine Überdimensionierung des Fahrzeugs zu vermeiden, ist eine Berücksichtigung aller externen Unsicherheiten

nicht zielführend. Dies würde zu entsprechend großen Unsicherheitsintervallen führen, auf die nicht mehr sinnvoll ausgelegt werden kann. Daher erscheint eine Unterscheidung von internen und externen Gewichtsunsicherheiten zweckmäßig.

Auf Basis dieser Überlegung wurden zwei Unsicherheitskategorien, unterteilt in fünf Unsicherheitsarten, auf Grundlage der zehn Massenänderungsursachen aus den SAWE Recommended Practices and Standards (2015) definiert. Die Klassifizierung und Definition der Gewichtsunsicherheiten ist in Abbildung 6.2 dargestellt.

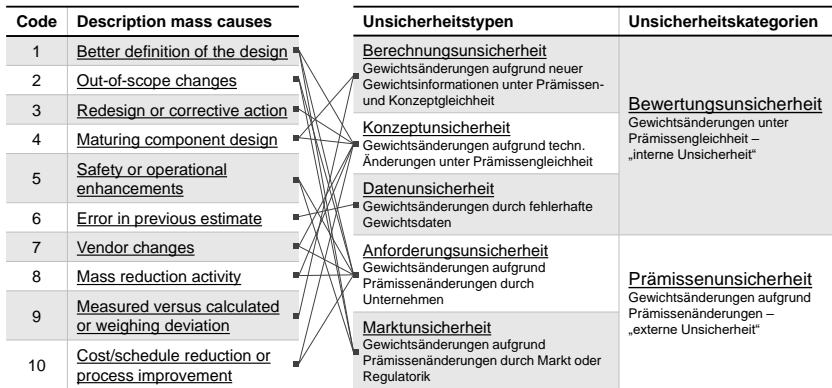


Abbildung 6.2: Zuweisung der Massenänderungsursachen zu Unsicherheitstypen und -kategorien, linke Tabelle nach SAWE Recommended Practices and Standards (2015)

In der Abbildung wird deutlich, dass die bisherigen Massenänderungsursachen nicht immer eindeutig den Unsicherheitsarten zugeordnet werden können. Dies ist auf die beabsichtigte Trennung von internen und externen Unsicherheitsquellen zurückzuführen. Als Beispiel kann hier die Nummer acht „Massenreduktionsaktivität“ genannt werden. So könnten Gewichtsreduktionsmaßnahmen vom Konstrukteur unter Durchführung einer Topologieoptimierung unter gleichen Projektrandbedingungen identifiziert werden. Alternativ könnte die Projektleitung beschließen, dass das Material der Fahrzeugkarosserie trotz der Mehrkosten von Stahl in Aluminium geändert werden soll. In diesem Fall wären die Projektrandbedingungen verändert worden, was einem externen Eingriff entspricht. Dies ist ein entscheidender Unterschied bei der Abschätzung von Leichtbaupotentialen und Zielerreichungswahrscheinlichkeiten im Rahmen des Gewichtsmanagements. Die aufgeführten Unsicherheitstypen und -kategorien sind in der folgenden Abbildung 6.3 übersichtlich dargestellt und mit konkreten Beispielen spezifiziert.



Abbildung 6.3: Unsicherheitstypen und -kategorien als Bestandteile der Gewichtsunsicherheit

6.1.2.2 Quantifizierung der Gewichtsunsicherheiten

In diesem Abschnitt wird schrittweise das Vorgehen zur Quantifizierung der Gewichtsunsicherheiten beschrieben. Dies wird an der Unsicherheitskategorie Bewertungsunsicherheit beispielhaft durchgeführt, wobei das Vorgehen für alle Unsicherheitskategorien und -typen identisch ist.

Der erste Schritt besteht darin, die genehmigten Änderungsanträge (die vorliegende Datenbasis umfasst etwa 20.000 Anträge aus 15 Fahrzeugprojekten) den Unsicherheitskategorien zuzuordnen und in Projektphasen chronologisch zu sortieren. Da dies ein sehr großer manueller Aufwand ist, wurde ein Verfahren zur automatisierten Klassifizierung der Änderungsanträge entwickelt. Durch den Einsatz von textbasiertem maschinellem Lernen konnten die Änderungen anhand der enthaltenen Freitext-Beschreibungen den Unsicherheitskategorien zugeordnet werden. Da die Beschreibungen sehr heterogen sind, konnte bisher nur eine Erfolgsquote von ca. 80 % nachgewiesen werden. Daher muss die Zuordnung der

schwersten Änderungen noch einmal manuell überprüft werden, da diese den stärksten Effekt auf die Ergebnisse haben. Diese Überprüfungen werden anschließend als zusätzliche Trainingsdaten für das zugrunde liegende Modell verwendet, wodurch steigende Erfolgsraten in Zukunft zu erwarten sind.

Abbildung 6.4 zeigt die Verteilung aller Änderungsgewichte der Kategorie Bewertungsunsicherheit in Form eines Histogramms. Die Gewichte werden prozentual zum jeweiligen Gesamtfahrzeuggewicht angegeben, um eine Vergleichbarkeit herzustellen. Eine Normalverteilung mit identischem Mittelwert und Standardabweichung dient zur ersten optischen Untersuchung der vorliegenden Verteilung auf Normalverteilung.

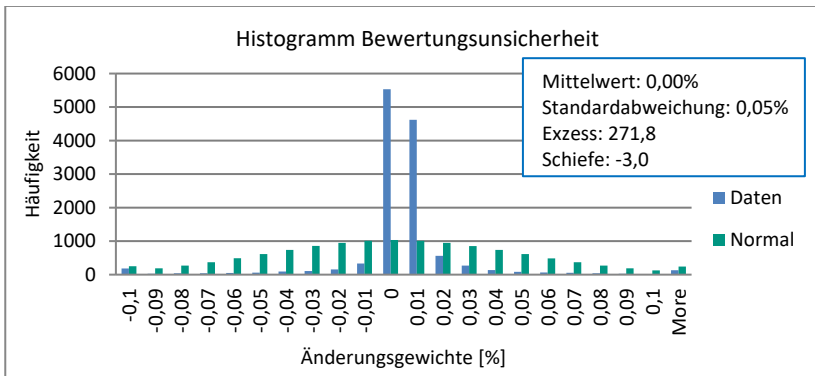


Abbildung 6.4: Verteilung der Änderungsgewichte der Kategorie Bewertungsunsicherheit

Die optische Kontrolle und die Werte für Exzess² und Schiefe³ deuten darauf hin, dass die Änderungsgewichte nicht normal verteilt sind. Die Verteilung ist stark spitzgipflig (Exzess >> 0) und ist asymmetrisch leicht nach rechts geneigt

² Der Exzess ist ein Maß für die Steilheit einer Wahrscheinlichkeitsverteilung. Eine Normalverteilung hat immer den Wert Null. Negative Werte stellen eine flachgipflige Verteilung dar, wonach weniger Extremwerte existieren. Positive Werte stellen eine spitzgipflige Verteilung dar, wonach ein starker Peak und mehr Extremwerte vorhanden sind.

³ Die Schiefe ist ein Maß für die Asymmetrie einer Wahrscheinlichkeitsverteilung. Eine Normalverteilung hat immer den Wert Null. Negative Werte stellen eine linksschiefe Verteilung dar, wonach diese nach links flacher abfällt und sich die Masse der Verteilung auf der rechten Seite befindet. Positive Werte stellen eine rechtsschiefe Verteilung dar, wonach diese nach rechts flacher abfällt und sich die Masse der Verteilung auf der linken Seite befindet.

(Schiefe < 0). Dementsprechend existieren überproportional viele Änderungsgewichte nahe Null, aber auch viele Ausreißer im Vergleich zu einer Normalverteilung. (Dümbgen, 2016)

Das Quantil-Quantil-Diagramm⁴ in Abbildung 6.5 unterstreicht, dass es sich nicht um eine Normalverteilung handelt (dasselbe gilt auch für die anderen Unsicherheitstypen). Dies ist daran erkennbar, dass die blaue Kurve deutlich von der grünen Ursprungslinie abweicht. Eine Normalverteilung würde der eingezeichneten Ursprungsgeraden durchgängig folgen. (Dümbgen, 2016)

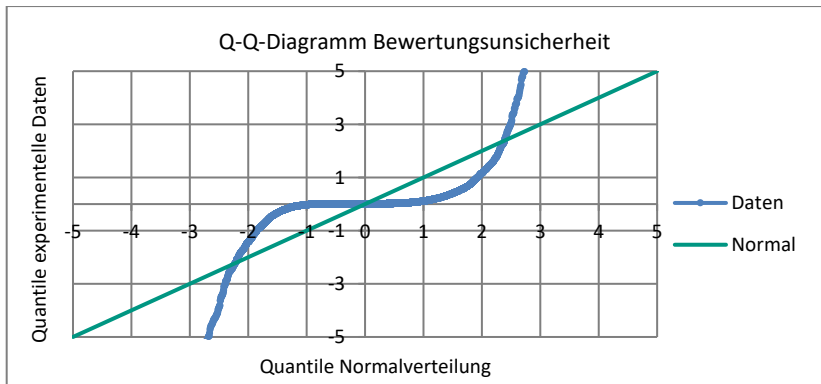


Abbildung 6.5: Q-Q-Diagramm der Änderungsgewichte der Kategorie Bewertungsunsicherheit

Wie bereits erwähnt, stellt diese Verteilung eine Zusammenfassung aller Änderungen der Bewertungsunsicherheit von 15 Fahrzeugprojekten dar. Im nächsten Schritt wird geprüft, ob die fahrzeugspezifischen Änderungen dieser Verteilung ebenfalls folgen. Dies ist eine Voraussetzung für die übergreifende Anwendung der vorgestellten Methode.

⁴ Ein Q-Q-(Quantil-Quantil-)Diagramm stellt ein grafisches Verfahren zum Vergleich der Wahrscheinlichkeitsverteilung experimenteller Daten mit der Normalverteilung dar. Dies geschieht über die Darstellung der jeweiligen Quantile. Die experimentellen Daten folgen einer Normalverteilung, wenn die Punkte im Q-Q-Diagramm näherungsweise auf der Ursprungsgeraden $y = x$ liegen.

Abbildung 6.6 zeigt die Verteilung der Änderungen von drei Fahrzeugen im Vergleich zur Gesamtverteilung. Die Änderungen der Einzelfahrzeuge wurden auf die Gesamtzahl der Änderungen hochskaliert, um die Verteilungen vergleichbar zu machen.

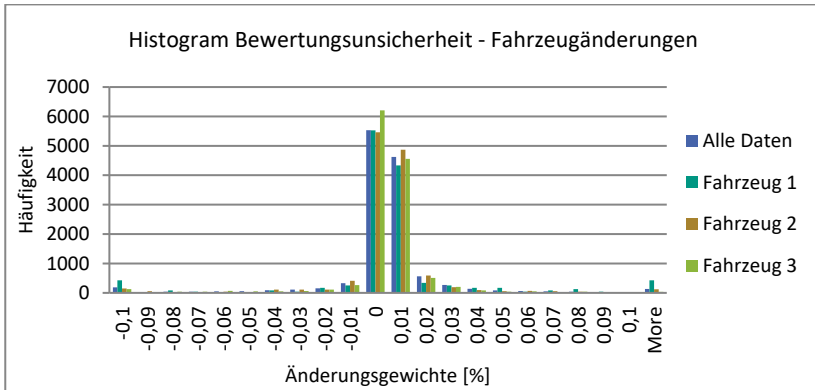


Abbildung 6.6: Vergleich der Änderungsverteilungen einzelner Fahrzeuge zur Grundgesamtheit

Das Diagramm zeigt, dass die Verteilungen sehr ähnlich sind, obwohl die Fahrzeuge gewisse Unterschiede aufweisen. So weisen die Fahrzeuge unterschiedliche Dimensionen als auch Neuentwicklungsanteile auf und gehören unterschiedlichen Marktsegmenten an. Die auftretenden Änderungen unterscheiden sich dadurch in Menge und Gewicht. Dies wird durch die Prozentgewichte teilweise ausgeglichen. Dennoch sind Unterschiede zwischen den Fahrzeugen zu beobachten, die im Verlauf der Arbeit noch einmal aufgegriffen werden. Zusammenfassend ergibt die Untersuchung, dass die Verteilung der Gesamtänderungen als Näherungswert für ein einzelnes Fahrzeug verwendet werden kann.

Der nächste Schritt umfasst die Berechnung der Gewichtsunsicherheit aus der Gesamtverteilung der Änderungsgewichte. Die Angabe der Unsicherheit einer Größe f erfolgt dabei durch Mittelwert \bar{f} und Standardabweichung \hat{S}_f gemäß

$$f = \bar{f} \pm \hat{S}_f. \tag{Gl. 4}$$

Die Gewichtssumme aus n Änderungen stellt in diesem Anwendungsfall die Funktion f dar. Unter Anwendung der Gaußschen Fehlerfortpflanzung kann die Unsicherheit der Gewichtssumme als Funktion der Änderungsanzahl n bestimmt werden. Hierbei handelt es sich um einen Sonderfall, da alle aufsummierten Änderungen x_i dieselbe Standardabweichung \hat{S}_x aufweisen. Die Unsicherheit kann damit nach

$$f = \bar{f} \pm \sqrt{\left(\frac{\delta f}{\delta x_1} \cdot \hat{S}_{x_1}\right)^2 + \left(\frac{\delta f}{\delta x_2} \cdot \hat{S}_{x_2}\right)^2 + \dots + \left(\frac{\delta f}{\delta x_n} \cdot \hat{S}_{x_n}\right)^2} = n \cdot \bar{x} \pm \sqrt{n \cdot \hat{S}_x^2} \quad \text{Gl. 5}$$

berechnet werden. (Harvard Instructional Physics Labs, 2013)

Wie bereits dargelegt, entspricht die Verteilung der Änderungsgewichte keiner Normalverteilung. Dies stellt allerdings eine Voraussetzung für die Anwendung der Gaußschen Fehlerfortpflanzung dar. Um den durch die Anwendung verursachten Fehler abschätzen zu können, sollten die berechneten Gewichtsunsicherheiten validiert werden. Zu diesem Zweck wird die Fehlerfortpflanzungsformel zunächst auf ein exemplarisches Fahrzeug mit 297 Änderungsanträgen angewendet. Alle Änderungen entstammen der Kategorie Bewertungsunsicherheit und umfassen den kompletten Produktentwicklungsprozess. Die Unsicherheit ergibt sich somit zu

$$f = 297 \cdot (-0.00006 \%) \pm \sqrt{297 \cdot (0.04896\%)^2} = -0.02 \% \pm 0.84 \%. \quad \text{Gl. 6}$$

Das Ergebnis kann wie folgt interpretiert werden: Der Mittelwert liegt nahe Null, so dass sich das Fahrzeuggewicht durch die Änderungen im Durchschnitt kaum ändert. Die Standardabweichung beträgt 0,84 %, was bedeutet, dass in etwa 68 % (Voraussetzung Normalverteilung) der möglichen Fälle die Fahrzeuggewichtsänderung durch Bewertungsunsicherheit im Bereich von -0,86 % bis +0,82 % bleibt (Mittelwert berücksichtigt).

Um das Ergebnis zu validieren, wurde eine Monte-Carlo-Simulation durch ein vom Autor entwickeltes Matlab-Skript (The MathWorks, 2018) durchgeführt. Die oben definierte Anzahl an Änderungen wird dabei zufällig aus allen vorhandenen Änderungen ausgewählt und aufsummiert. Das Skript wiederholt dies 400.000 mal, wodurch die Verteilung der aufsummierten Änderungsgewichte in Abbildung 6.7 entsteht.

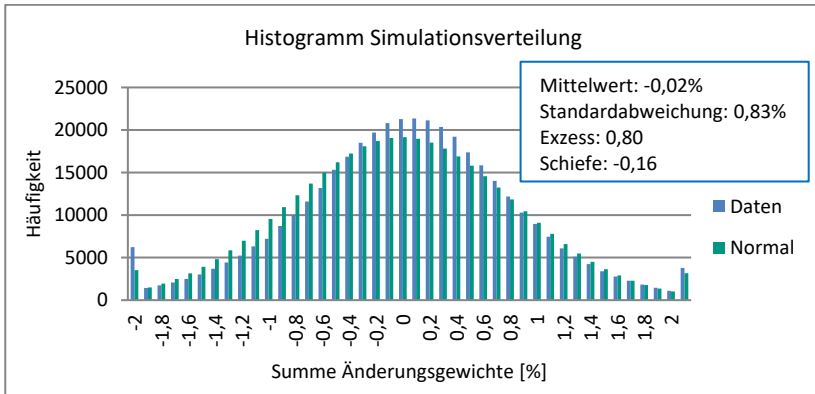


Abbildung 6.7: Verteilung der aufsummierten Änderungsgewichte durch die Monte-Carlo Simulation

Wie in der Abbildung zu sehen ist und aus den Werten für Exzess und Schiefe abgeleitet werden kann, entspricht die Verteilung nahezu einer Normalverteilung. Dies ist bemerkenswert, da die zugrunde liegenden Daten nicht normalverteilt sind. Dies ermöglicht die Interpretation der Standardabweichung entsprechend einer Normalverteilung. Ein zentrales Merkmal dabei ist, dass sich etwa 68 % aller möglichen Änderungsgewichte um den Mittelwert plus/minus einfacher Standardabweichung befinden. Dies ist von großer Bedeutung für die weitere Interpretation und Verwendung der Ergebnisse.

Die singuläre Durchführung der Monte-Carlo-Simulation für das exemplarische Fahrzeug bestätigte die Ergebnisse der Fehlerfortpflanzungsformel. Um dies abzusichern, wurden zwei weitere Fahrzeuge nach beiden Methoden berechnet und in der folgenden Tabelle dargestellt.

Tabelle 6.1: Vergleich der Ergebnisse von Fehlerfortpflanzung und Monte-Carlo Simulation

Fahrzeug	Anzahl Änderungen	Ergebnis Fehlerfortpflanzung	Ergebnis Monte-Carlo Simulation
1	297	-0.017 % ± 0.844 %	-0.017 % ± 0.833 %
2	918	-0.053 % ± 1.483 %	-0.055 % ± 1.432 %
3	1470	-0.086 % ± 1.877 %	-0.082 % ± 1.769 %

Es zeigt sich, dass die berechneten Mittelwerte und Standardabweichungen mit zunehmender Anzahl der Änderungen leicht divergieren. Dies kann auf die

spitzgipflige Verteilung der zugrunde liegenden Daten zurückgeführt werden. Auf Grund der geringen Abweichung können die Ergebnisse der Fehlerfortpflanzung im weiteren Verlauf als konservative Gewichtsunsicherheiten angenommen werden. Alternativ könnte auch ein Korrekturfaktor eingeführt werden.

Auf Basis der obigen Ergebnisse wird im nächsten Schritt die Gewichtsunsicherheit für jede Entwicklungsphase beziehungsweise Entwicklungsgeneration berechnet. Zu diesem Zweck wurde aus den vorhandenen Daten die durchschnittliche Anzahl der Änderungen pro Entwicklungsphase abgeleitet, die der Bewertungsunsicherheit zugeordnet sind. Die Ergebnisse sind in der folgenden Abbildung dargestellt.



Abbildung 6.8: Entwicklungsphasen mit durchschnittlicher Änderungsanzahl

Es ist zu beachten, dass das im Rahmen der Arbeit untersuchte Änderungsmanagement in der Regel zwischen den Meilensteinen zwei und drei beginnt. Dies ist der Grund für die geringen Änderungen in den frühen Phasen. Darüber hinaus wird das Fahrzeugkonzept im Laufe der Entwicklung immer weiter konkretisiert. Dementsprechend werden frühzeitige Konzeptanpassungen oftmals nicht als Änderung verstanden und deklariert.

Ausgehend von der durchschnittlichen Änderungsanzahl je Unsicherheitskategorie kann eine Gewichtsunsicherheit je Entwicklungsphase berechnet werden. Die ermittelten Gewichtsunsicherheiten summieren sich zu einem Unsicherheitskegel, der in Abbildung 6.9 dargestellt ist. Bei der Berechnung sollte sichergestellt werden, dass die mittleren Änderungsgewichte je Phase vergleichbar sind. Für die vorliegenden Daten ist dies nicht der Fall, da die Änderungen vor Zielvereinbarung eine durchschnittlich höhere Gewichtsauswirkung als die Änderung nach Zielvereinbarung haben. Eine getrennte Berechnung der mittleren Änderungsgewichte der beiden Phasen führen hierbei zu einem Unsicherheitsknick zur Zielvereinbarung. Es zeigt sich ein höherer Unsicherheitsanstieg vor Zielvereinbarung trotz der im Mittel geringeren Änderungsanzahl.

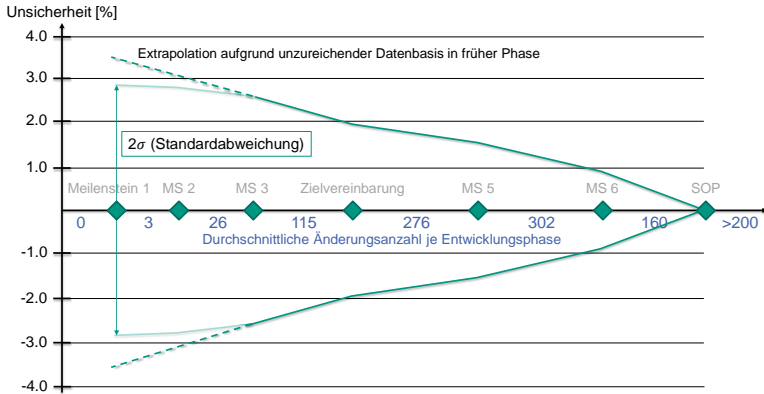


Abbildung 6.9: Durchschnittlicher Unsicherheitskegel für die Bewertungsunsicherheit

Aufgrund der geringen Änderungsanzahl in der frühen Phase (vor MS 3) kann der Unsicherheitskegel dort nicht adäquat bestimmt werden. Die Unsicherheiten sind in dieser Phase vermutlich höher, als die vorliegende Datenbasis impliziert. Daher wird eine Extrapolation des Unsicherheitskegels für die frühe Phase empfohlen. Dieser Ansatz kann durch die tendenziell höheren Änderungsgewichte in dieser Phase und das quadratische Fehlerfortpflanzungsgesetz gerechtfertigt werden.

Eine zentrale Erkenntnis der Betrachtung der Bewertungsunsicherheit (Prämissengleichheit) ist, dass der Mittelwert auf Gesamtfahrzeugebene zu jeder Phase nahe Null ist. Das bedeutet, dass sich positive wie negative Gewichtsänderungen in einem durchschnittlichen Fahrzeugprojekt ausgleichen. Die weit verbreitete Annahme in der Literatur (z.B. Ellenrieder et al., 2017, S. 102), wonach das Fahrzeuggewicht im Verlauf der Entwicklung kontinuierlich sinkt, konnte demnach nicht bestätigt werden. Die beobachteten Gewichtszunahmen aus der Luft- und Raumfahrt konnten jedoch ebenfalls nicht beobachtet werden. Im Zuge dessen sei auch auf den psychologischen Aspekt einer „sich selbst erfüllenden Prophezeiung“ hingewiesen. So könnten die frühzeitig abgeschätzten Gewichte bereits als eine Art Referenz oder unterbewusste Zielmarke angesehen werden, die von den Entwicklungsbereichen erreicht werden wollen.

Es sei darauf verwiesen, dass es sich hierbei um Mittelwerte handelt. Einzelne Fahrzeuge weisen signifikante Gewichtsänderungen auf, sowohl positiv wie negativ (siehe Standardabweichung). Die Daten zeigen jedoch, dass eine Verschiebung des Mittelwerts nur durch externe Eingriffe (Prämissenänderungen) erfolgen kann.

Die vorgestellte Methode lässt sich für die Bestimmung der Gewichtsunsicherheiten von Achslasten gleichermaßen anwenden. Hierzu müssen die Änderungen hinsichtlich ihres Effekts auf die Achslasten bewertet werden. Die resultierenden Verteilungen können dann abermals zu Unsicherheitskegeln zusammengefasst werden. In der Regel sind die Gewichtsunsicherheiten der Achslasten prozentual höher als die des Gesamtgewichts. Dies begründet sich durch kombinierte Unsicherheiten bei den Achslasten. So muss bei einer Gewichtsänderung nicht nur das Gewichtsdelta, sondern auch die Verortung im Fahrzeug berücksichtigt werden.

6.1.3 Validierung

In diesem Abschnitt wird die Methode validiert, indem zunächst die Vollständigkeit der eingeführten Unsicherheitskategorien und -typen überprüft wird. Anschließend werden die ermittelten Unsicherheiten validiert und auf Möglichkeiten zur Anpassung der Unsicherheiten auf individuelle Fahrzeugcharakteristiken eingegangen.

6.1.3.1 Vollständigkeit der Klassifizierung

Im Rahmen der Validierung sollen zunächst die abgeleiteten Unsicherheitskategorien und -typen auf Vollständigkeit überprüft werden. Hierzu werden die Unsicherheitstypen auf das in Kapitel 2.1.1 vorgestellte ZHO-Modell projiziert und in Abbildung 6.10 dargestellt.

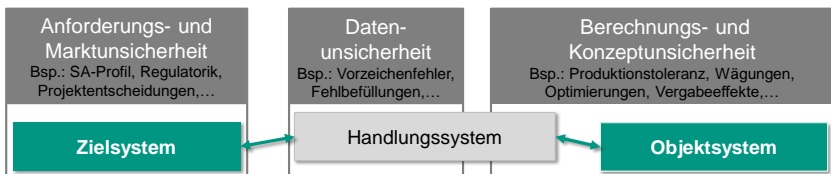


Abbildung 6.10: Zuordnung der Unsicherheitstypen auf das ZHO-Modell

Es zeigt sich, dass das komplette Tripel der Produktentstehung durch die Unsicherheitstypen abgedeckt ist. Dies wird durch Abbildung 6.2 untermauert, da alle in SAWE Recommended Practices and Standards (2015) aufgeführten Gewichtsänderungsursachen den Unsicherheitstypen zugeordnet werden konnten. Aus diesen Gründen werden die identifizierten fünf Unsicherheitstypen als näherungsweise vollständig angesehen.

6.1.3.2 Validierung der ermittelten Unsicherheiten

Im nächsten Schritt soll die berechnete Gewichtsunsicherheit aus dem vorangegangenen Abschnitt validiert werden. Dazu wird die berechnete Unsicherheit mit der tatsächlichen Gesamtgewichtsänderung von realen Fahrzeugprojekten zwischen einem bestimmten Entwicklungspunkt und SOP verglichen. Dies ist für den Meilenstein Zielvereinbarung in der folgenden Abbildung dargestellt.

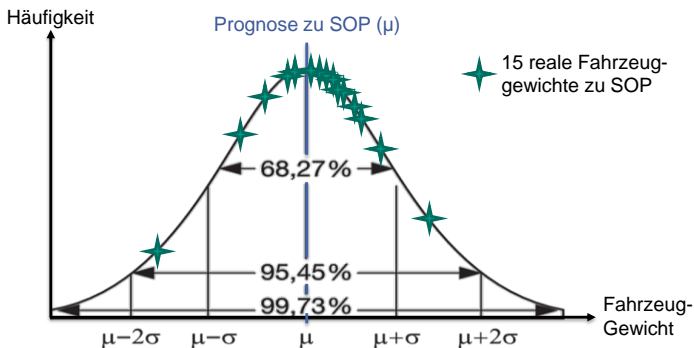


Abbildung 6.11: Validierung mit realen Fahrzeuggewichten zum Meilenstein Zielvereinbarung

Gemäß den obigen Daten liegen zwei von 15 Fahrzeugen außerhalb der einfachen Standardabweichung. Dies entspricht einem Prozentsatz von rund 86 % und übersteigt damit die für eine Normalverteilung erwarteten 68 %. Da der Stichprobenumfang von 15 Fahrzeugen relativ gering ist, dürfen Schlussfolgerungen nur mit Vorsicht gezogen werden.

Das Ergebnis ist jedoch ein Hinweis darauf, dass die Standardabweichung etwas zu groß beziehungsweise zu konservativ gewählt ist. Dies könnte durch die spitzgipflige Verteilung der Änderungsanträge erklärt werden. Eine Analyse weiterer Fahrzeuge im Rahmen der Validierung wird daher empfohlen, um eine fundiertere Aussage über die ermittelte Standardabweichung treffen zu können.

6.1.3.3 Anpassung an individuelle Fahrzeugcharakteristiken

Die vorgestellte Methode enthält einige Vereinfachungen. So wurden die Änderungsanträge der 15 untersuchten Fahrzeuge in einer Grundgesamtheit zusammengefasst und Mittelwerte in Bezug auf Gewichtsverteilung und Änderungsanzahl verwendet. Dies stellt eine Vereinfachung aufgrund der Vielfalt

der Fahrzeuge dar. Die Erkenntnisse aus dem PGE-Ansatz und bestehender Vorgehensweisen wie die von Boze und Hester (2009) zeigen, dass spezifische Informationen über die Fahrzeugprojekte verwendet werden sollten. Im Folgenden werden drei solcher Ansätze auf die vorhandenen Daten angewandt und diskutiert.

Neuentwicklungsanteil

Gemäß der PGE ist ein Produkt durch eine Kombination der Aktivitäten Übernahmevariation (ÜV), Gestaltvariation (GV) und Prinzipvariation (PV) definiert. Die Komponenten eines Fahrzeugs können folglich diesen Aktivitäten zugeordnet werden. Da die Übernahmeumfänge im Laufe der Entwicklung kaum verändert werden können, sollten Fahrzeuge mit hohen Übernahmeanteilen kleineren Gewichtsunsicherheiten ausgesetzt sein.

Diese Hypothese kann prinzipiell durch die 15 untersuchten Fahrzeuge bestätigt werden. Einige Fahrzeuge mit hohen Übernahmeanteilen weisen jedoch keine signifikant kleineren Unsicherheiten auf. Dies liegt daran, dass diese Fahrzeuge zeitlich so kurz nach dem Referenzfahrzeug entwickelt werden, dass sich die meisten Übernahmekomponenten selbst noch in der Entwicklung befinden. Dies zeigt, dass Änderungen und damit Gewichtsunsicherheiten in der Regel mehrere Fahrzeuge in der Entwicklung betreffen.

Fahrzeugplattformen

Die untersuchten Fahrzeuge basieren auf zwei verschiedenen Plattformen, eine für den Frontantrieb und eine für den Heckantrieb. Die Daten zeigten, dass Fahrzeuge der Frontantriebsplattform im Durchschnitt nur etwa die Hälfte der Änderungsanträge gegenüber den Fahrzeugen der Heckantriebsplattform aufweisen. Möglicherweise liegt dies darin begründet, dass auf der Frontantriebsplattform weniger unterschiedliche Fahrzeuge in Bezug auf Abmessungen, Marktsegment und Technologie basieren. Die absoluten Gewichte der Änderungsanträge sind jedoch in beiden Plattformen vergleichbar. Da die Fahrzeuge mit Frontantrieb im Durchschnitt leichter sind, ist das prozentuale Gewicht deren Änderungen meist höher.

Gewichtsreifegrade

Boze und Hester (2009) sowie weitere Autoren verwenden Gewichtsreifegrade, um die Gewichtsunsicherheit zu bestimmen. Dabei wird davon ausgegangen, dass gewogene Gewichte eine geringere Unsicherheit aufweisen als berechnete oder gar geschätzte Gewichte. Obwohl diese Annahme weitgehend gerechtfertigt ist, konnte dieser Ansatz nicht auf die verwendeten Daten angewendet werden.

Dies hat zwei Hauptgründe: Zum einen enthielten die dem Autor zur Verfügung stehenden Daten diese Informationen nicht, so dass die Gewichtsreifegrade je Komponente nicht angewandt werden konnten. Zum anderen kann die zugrunde liegende Annahme für die vorgestellte Methode kaum getroffen werden. Dies ist auf die zahlreichen Veränderungen in der Fahrzeugentwicklung zurückzuführen. Insbesondere können externe Änderungen nicht durch die Verwendung von Gewichtsreifegraden abgedeckt werden. So werden beispielsweise in einer frühen Projektphase große Teile des Fahrzeugs durch gewogene Vorgängerteile repräsentiert. Nach der zugrunde liegenden Logik wäre das Gewicht daher kaum unsicherheitsbelastet. Dabei werden die anstehenden Änderungen nicht berücksichtigt. Es kann argumentiert werden, dass in diesem Fall die Vorgängergewichte als geschätzt klassifiziert werden sollten. Dies ist richtig, aber für den Konstrukteur verwirrend, und der Grad möglicher Änderungen am Bauteil kann auf Grundlage dieser Informationen nur schwer abgeschätzt werden.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Gewichtsunsicherheiten unter Berücksichtigung der individuellen Fahrzeugcharakteristiken genauer bestimmt werden können. Drei entsprechende Ansätze wurden vorgestellt und exemplarisch angewandt. Dabei hat sich gezeigt, dass eine Differenzierung nach Fahrzeugplattformen zielführend ist. Die Berücksichtigung von Neuentwicklungsumfängen und Gewichtsreifegraden ist grundsätzlich sinnvoll, muss aber mit Vorsicht angewandt werden.

6.1.4 Anwendungsszenarien

Die ermittelten Gewichtsunsicherheiten können im Gewichtsmanagement auf unterschiedliche Weise genutzt werden. Es wurden drei Hauptanwendungsbereiche identifiziert. Diese werden im Folgenden kurz erläutert.

6.1.4.1 Input zur Quantifizierung der Gewichtsziele

Dies ist der Hauptanwendungsfall. Die Verwendung der Gewichtsunsicherheiten im Rahmen der Gewichtszielfindung wurde bereits durch das Wasserfall-Diagramm in Abbildung 5.11 vorgestellt. Durch die Kenntnis der Unsicherheiten ist es möglich, robustere Auslegungsgewichte zu bestimmen. Darüber hinaus können anspruchsvolle, aber dennoch realistische Zielgewichte abgeleitet werden. Dies ist elementar für die Akzeptanz und Transparenz von Zielgewichten. Eine verkürzte Prinzipskizze ist in der folgenden Abbildung dargestellt.

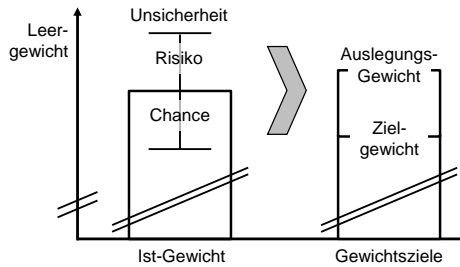


Abbildung 6.12: Anwendung zur Quantifizierung der Gewichtsziele

6.1.4.2 Ableitung eines Zielanflugkorridors

Der Unsicherheitskegel in Abbildung 6.9 stellt die gewichtsbezogenen Chancen und Risiken des Ist-Gewichts dar. Diese Information eignet sich ebenfalls für die Zielsteuerung. Betrachtet man beispielsweise nur die Bewertungsunsicherheit, so spiegelt diese die Gewichtsszenarien ohne externe Eingriffe wider. Liegt das Gewichtsziel außerhalb dieses Unsicherheitskorridors, ist entweder ein externer Eingriff (z.B. Senkung der Anforderungen) oder eine Anpassung des Zielgewichts erforderlich. Darauf aufbauend kann ein Zielanflugkorridor mit Ampelsystem zur Anzeige des Fahrzeuggewichtsstatus wie in Abbildung 6.13 implementiert werden.

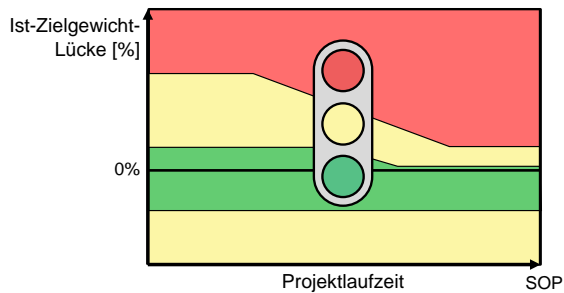


Abbildung 6.13: Anwendung als Zielanflugkorridor

6.1.4.3 Interpretation als Qualitätsindikator (KPI) des Gewichtsmanagements

Bis zu einem gewissen Grad stellt die Gewichtsunsicherheit die Prognosefähigkeit des Unternehmens und insbesondere des Gewichtsmanagements dar. Es müssen

hierzu die geeigneten Unsicherheitsarten aus Abbildung 5 berücksichtigt werden. Für diesen Anwendungsfall eignen sich die beiden Unsicherheitstypen Berechnungsunsicherheit und Datenunsicherheit. Das Ziel und damit die Voraussetzungen für einen niedrigen Key Performance Indikator (KPI) sollte eine möglichst geringe Unsicherheit sein. Hierbei muss erwähnt werden, dass die Gewichtsmanagement-Abteilung stark von den Gewichtsdatenlieferanten abhängig ist. Eine Reduktion des Unsicherheitsniveaus kann daher nur durch eine Optimierung der gesamten Gewichtsberichts-kette erreicht werden.

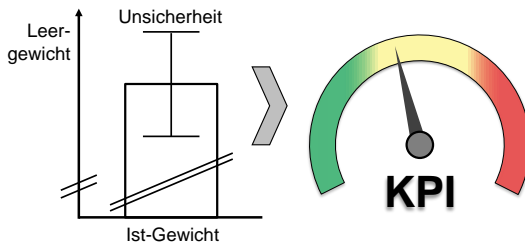


Abbildung 6.14: Ableitung eines Gewichtsmanagement-KPI

6.2 Methode zur Gewichtsabschätzung

In diesem Kapitel wird eine Methode zur Gewichtsabschätzung vorgestellt. Hierbei wird auf die Motivation, die Kernidee und die Umsetzung der Methode, aber auch auf Validierungsergebnisse und mögliche Anwendungsszenarien eingegangen. Die Methode wurde zu großen Teilen im Rahmen der betreuten Abschlussarbeiten von Neumann (2018)⁵ und Laubvogel (2019)⁶ entwickelt.

6.2.1 Motivation und Kernidee

In einer frühen Projektphase werden richtungsweisende Entscheidungen im Rahmen der Auslegung von Plattformen, Baukästen oder Fahrzeugkonzepte getroffen. Diese Entscheidungen können in späteren Projektphasen oftmals nur noch mit zeit- und kostenintensiven Änderungen korrigiert werden. Aus diesen Gründen ist eine frühzeitige Gewichtsabschätzung mit bestmöglicher

⁵ Co-betreute Abschlussarbeit

⁶ Co-betreute Abschlussarbeit

Prognosegenauigkeit von hoher Wichtigkeit. Dies wird auch durch Albers et al. (2018a) unterstrichen, indem postuliert wird, dass zur Entwicklung eines validen und zukunftsrobusten Zielsystems Vorausschau betrieben werden muss.

Die in diesem Abschnitt vorgestellte Methode hat zum Ziel, das Fahrzeugleergewicht auf Modulebene anhand von frühzeitig bekannten Parametern zu prognostizieren. Dazu werden im Sinne der PGE aktuelle und vorangegangene Fahrzeuggenerationen als Referenzsystem verwendet. Hierbei können sowohl unternehmensinterne als auch Wettbewerbsfahrzeuge verwendet werden. Diese werden nach gewichtsbestimmenden Parametern wie Dimension, Motorisierung oder Karosseriebauform untersucht. Ziel dieses Vorgehens ist es, unterschiedliche Fahrzeugkonzepte durch die identifizierten Parameter auf ein normiertes Fahrzeuggewicht, im Folgenden Basisgewicht genannt, zurückrechnen zu können. Dies wird mithilfe einer softwaregestützten numerischen Optimierung in Matlab R2018b (The MathWorks, 2018) durchgeführt.

Abspringend von diesem Basisgewicht können schließlich neue Fahrzeuggenerationen mithilfe der gewichtsbestimmenden Parameter prognostiziert werden. Hierbei wird eine Prognosegenauigkeit von +/- 5 % auf Modulebene angestrebt, wie sie auch von Weck (2006) empfohlen wird. Dagegen hält Fisher (2019) sogar Genauigkeiten von kleiner gleich 10 % für akzeptabel. Durch das Gesetz der großen Zahlen (Fahrmeir et al., 2016, S. 289–300) soll schließlich eine Prognosegenauigkeit von unter +/- 3 % auf Gesamtfahrzeugebene erreicht werden.

6.2.2 Umsetzung

In diesem Abschnitt wird zunächst auf den grundsätzlichen Aufbau des Modells eingegangen. Dabei wird für jedes Modul ein Gewichtsmodell nach den Ansätzen der algorithmischen Aufwandsschätzung aufgebaut. Diese besagen, dass der Aufwand durch eine Verknüpfung von aufwandsbestimmenden Einflussfaktoren abgeschätzt werden kann. Somit kann die Zielvariable, auch abhängige Variable Y genannt, durch mehrere erklärende, idealerweise voneinander unabhängige Variablen X_i wie in Gl. 7 beschrieben werden:

$$Y = f(X_1, X_2 \dots X_n). \quad \text{Gl. 7}$$

In diesem Anwendungsfall repräsentiert Y das prognostizierte Modulgewicht und X_i die gewichtsbestimmenden Parameter. Diese Parameter teilen sich in stetige

Einflussvariablen $X_{n, stet}$ und Faktoren $X_{n, Fak}$ auf. Die funktionalen Beziehungen der Parameter zueinander müssen im Rahmen der Modellbildung identifiziert werden. Dabei wird ein Rahmenwerk vorgegeben, welches eine Kombination der bereits existierenden Ansätze von Fuchs (2014) sowie Malen und Hughes (2015) darstellt. Dieses Rahmenwerk (siehe Gl. 8) besteht aus einer multiplen linearen Regression mit entsprechenden Regressionskoeffizienten $b_{n, stet}$ und berücksichtigt das jeweilige Basisgewicht des Moduls X_{Basis} .

$$Y_{Prognose} = (b_{1, stet} * X_{1, stet} + b_{2, stet} * X_{2, stet} + \dots + b_{n, stet} * X_{n, stet}) * X_{Basis} * X_{1, Fak} * X_{2, Fak} \dots * X_{n, Fak} \quad \text{Gl. 8}$$

Die stetigen Einflussvariablen $X_{n, stet}$ beschreiben hierbei Fahrzeugparameter, die unterschiedliche Zahlenwerte annehmen können. Als Beispiel sei hier die Länge, Breite oder Grundfläche des Fahrzeugs genannt. Abbildung 6.15 zeigt beispielhaft den näherungsweise linearen Zusammenhang zwischen Fahrzeuglänge und dem Modulgewicht der Rohkarosserie-Bodengruppe von 35 Fahrzeugen. Hierbei sei erwähnt, dass auch nichtlineare Abhängigkeiten durch potenzierte Einflussvariablen abgebildet werden können.

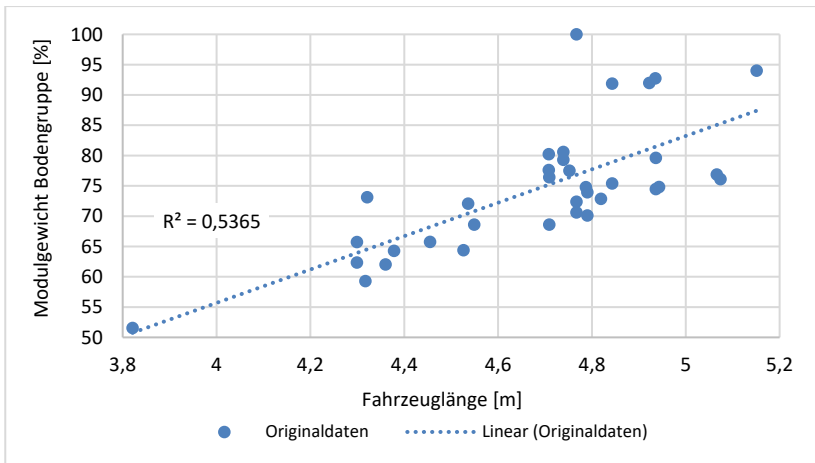


Abbildung 6.15: Modulgewichte der Karosserie-Bodengruppe in Abhängigkeit der Fahrzeuglänge (Gewichte in Prozent des schwersten Modulgewichts)

Die stetigen Einflussvariablen und Regressionskoeffizienten summieren sich zu einem übergreifenden Faktor, der multipliziert mit dem Basisgewicht X_{Basis} und weiteren Faktoren das Prognosegewicht ergibt. Das Basisgewicht X_{Basis} repräsentiert das Gewicht des Basisfahrzeugs und beinhaltet die Standardausprägungen der gewichtsbestimmenden Parameter.

Die Faktoren $X_{n,Fak}$ beschreiben Fahrzeugparameter, die in der Regel nicht durch Zahlenwerte angegeben werden. Ein Beispiel hierzu wäre die Karosseriebauform oder das Material der Bodengruppe. Diese kann zum Beispiel aus Stahl oder Aluminium bestehen und wird folglich über die Faktoren X_{Stahl} und X_{Alu} beschrieben. Die dem Basisfahrzeug zugehörigen Faktoren entsprechen der Standardausprägung und werden deshalb auf den Wert eins normiert. Die Einführung dieser Faktoren ermöglicht eine Normierung der Fahrzeugkonzepte. Abbildung 6.16 veranschaulicht am Beispiel der Bodengruppe, wie hierdurch die Güte des Regressionsmodells (Bestimmtheitsmaß R^2) verbessert werden konnte.

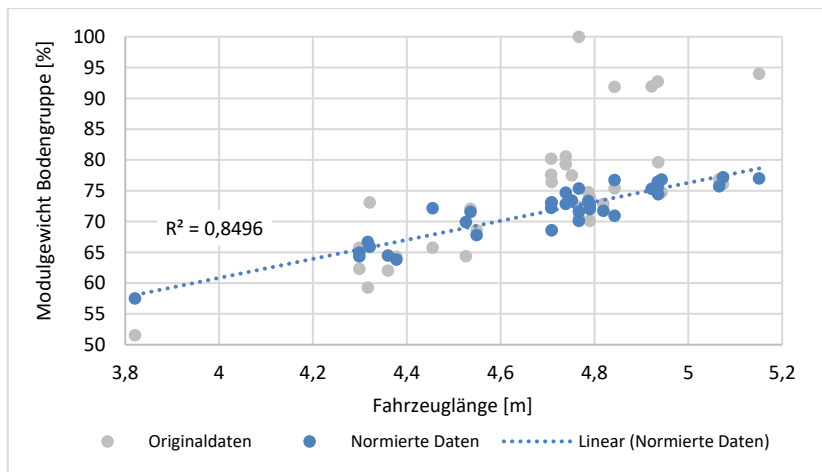


Abbildung 6.16: Verbessertes Regressionsmodell durch die faktorbasierte Normierung (Gewichte in Prozent des schwersten Modulgewichts)

Gl. 8 beschreibt den generischen Aufbau des Gewichtsmodells. Um die Gewichtsmodelle für jedes Modul konkret aufzubauen, wurde das in Abbildung 6.17 dargestellte Vorgehensmodell entwickelt. Das Vorgehensmodell setzt sich aus Aktivitäten zur Datenerhebung, der Identifizierung und Berechnung der gewichtsbestimmenden Parameter bis hin zur Plausibilisierung und anschließender

Anwendung der Methode zusammen. Diese Aktivitäten werden nachfolgend näher erläutert.

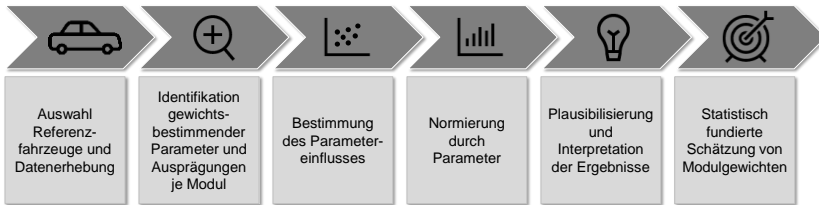


Abbildung 6.17: Vorgehensmodell der Methode zur Gewichtsabschätzung

Auswahl Referenzfahrzeuge und Datenerhebung

Der erste Schritt umfasst den Aufbau einer Datenbasis aus geeigneten Referenzfahrzeugen und deren Modulgewichten. Die gewählten Referenzfahrzeuge können dabei sowohl firmeneigene aber auch Wettbewerbsfahrzeuge umfassen. Hierbei muss auf die Vergleichbarkeit der Gewichtsdaten geachtet werden, indem beispielweise die Modulschneidung der Fahrzeuge angeglichen wird. Dies ist vor allem für Wettbewerbsfahrzeuge und dem damit einhergehenden begrenzten Einblick nicht trivial.

In dieser Arbeit wurden zunächst nur Fahrzeuge der BMW Group herangezogen. Die Datenbasis umfasste dabei 41 Fahrzeuge aus verschiedenen Produktlinien beziehungsweise Marktsegmenten. Um der wachsenden Elektromobilität gerecht zu werden, schließt die Datenbasis 9 Elektro- und 6 Hybridfahrzeuge mit ein. Hierbei ist zu erwähnen, dass die Leergewichte der Fahrzeuge (siehe Definition Messlast 1 in Kapitel 2.2.1) betrachtet werden. Per Definition werden demnach keine Sonderausstattungen, Insassen oder Gepäck berücksichtigt.

Identifikation gewichtsbestimmender Parameter und Ausprägungen je Modul

Ein Vergleich der ermittelten Modulgewichte offenbart oftmals große Gewichtsunterschiede. In diesem Abschnitt geht es darum, Gründe für diese Unterschiede zu identifizieren. Dazu werden die gewichtsbestimmenden Parameter je Modul mithilfe der folgenden drei Aktivitäten untersucht.

- Literaturrecherche zu Aufbau und Funktionsweise
- Vergleich von Konzept- und Stücklisten
- Experteninterviews (Modulleiter, Konzeptausleger, Konstrukteure)

Auf diese Weise stellt sich ein Set an Parametern heraus, die nachfolgend auf ihren Gewichtseinfluss untersucht werden müssen.

Bestimmung des Parametereinflusses

In diesem Schritt werden die identifizierten Parameter auf deren Gewichtseinfluss untersucht. Hierzu werden die Parameter zunächst in stetige Einflussvariablen und Faktoren unterteilt. Danach sollten die Parameter hinsichtlich ihrer statistischen Abhängigkeit zueinander untersucht werden. Dies kann zum Beispiel durch die Analyse der jeweiligen Korrelationskoeffizienten⁷ erfolgen.

Bei einer starken Abhängigkeit der erklärenden Parameter spricht man von Multikollinearität. Dies ist bei Regressionsmodellen zu vermeiden, da dadurch der Einfluss der einzelnen Variablen auf die Zielvariable nicht mehr separat ermittelt werden kann. Der Gewichtseinfluss der Variablen ist somit nicht eindeutig bestimmbar. Zudem führt eine hohe Multikollinearität zu instabilen Modellen, indem sich die Koeffizienten bei einer geringen Änderung der Datenbasis stark verändern können. Aus diesen Gründen sollten stark korrelierende Variablen aus dem Modell entfernt werden. Dies führt meist zu einer geringen Verschlechterung des Gewichtsmodells im Kontext der Trainingsdaten, stellt aber eine sinnvolle Maßnahme für die Robustheit des Modells dar.

Mithilfe einer sogenannten Hauptkomponentenanalyse oder bewusstem Ausprobieren können die einflussreichsten Parameter bestimmt werden. Da die Anwendung der Methode einfach und schnell sein soll, werden nur die einflussreichsten Parameter in das Modell integriert.

Normierung durch Parameter

In diesem Schritt werden die realen Modulgewichte durch die gewichtsbestimmenden Parameter auf das Basisgewicht des Basisfahrzeugs normiert. Die Normierung wird in Matlab durch die Funktion *fmincon* durchgeführt (The MathWorks, 2018). Dabei werden die Abweichungen der normierten Gewichte (Referenzgewichte) vom Basisgewicht durch Variation der Parameter nach der Methode der kleinsten prozentualen Fehlerquadrate minimiert. Die Ergebnisse einer

⁷ Der Korrelationskoeffizient gibt den Grad des linearen Zusammenhangs zwischen zwei Merkmalen an und kann Werte zwischen -1 und 1 annehmen. Je stärker der Koeffizient von Null abweicht, desto stärker ist der lineare Zusammenhang. Der Wert Null beschreibt zwei Merkmale, die keine lineare Abhängigkeit aufweisen. Diese könnten jedoch eine nichtlineare Abhängigkeit aufweisen. (Kosfeld et al., 2016).

solchen Optimierung sind in Abbildung 6.18 für das Modul Bodengruppe dargestellt. Der Variationskoeffizient⁸ der Abweichungen vom Basisgewicht, das Bestimmtheitsmaß R^2 und das korrigierte Bestimmtheitsmaß⁹ dienen dabei als Gütekriterien des Gewichtsmodells.

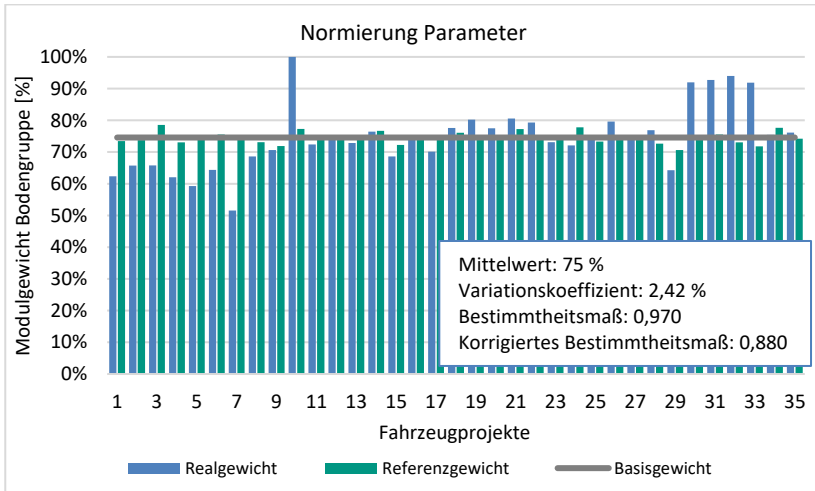


Abbildung 6.18: Ergebnis durch Normierung der Parameter

Plausibilisierung und Interpretation der Ergebnisse

Bevor die Gewichtsmodelle verwendet werden können, müssen die durch Abbildung 6.18 dargestellten Ergebnisse plausibilisiert und interpretiert werden. Hierbei wird zunächst das Gewichtsmodell hinsichtlich der Parameter finalisiert, indem nur die Parameter verwendet werden, die zu einer signifikanten

⁸ Der Variationskoeffizient ist ein relatives Streuungsmaß, das heißt, dass dieser nicht von der Maßeinheit der Zufallsvariable abhängt. Der Koeffizient beschreibt den Quotient aus Standardabweichung und Erwartungswert einer Zufallsvariable. (Kosfeld et al., 2016).

⁹ Das korrigierte Bestimmtheitsmaß \bar{R}^2 erweitert das Bestimmtheitsmaß um eine Berücksichtigung der Anzahl der erklärenden Modellvariablen. Je größer diese Anzahl ist, desto stärker sinkt die Güte des Modells (sofern sich die Modellgüte nicht signifikant verbessert). Aus diesem Grund eignet sich diese Kennzahl als Entscheidungskriterium für die Auswahl der Modellvariablen. Der Werte sind immer kleiner gleich als das Bestimmtheitsmaß. (Cleff, 2008).

Verbesserung des Modells führen. Es sollten so viel Parameter wie nötig, aber so wenige wie möglich herangezogen werden (Optimierung nach korrigiertem Bestimmtheitsmaß).

Zur Plausibilisierung der Zusammenhänge werden die Regressionskoeffizienten und Faktoren auf ihre physikalische Sinnhaftigkeit untersucht. Gewichtsmindernde Faktoren sollten hierbei Werte niedriger eins annehmen. Bei Nichterfüllung ist dies ein starker Hinweis, dass das Modell durch die gewählten Parameter nicht ausreichend beschrieben ist. Finden sich dennoch keine geeigneteren Parameter, kann das Modell über entsprechende Randbedingungen in einen physikalisch sinnvolleren Zusammenhang überführt werden. Dies entspricht folglich nicht mehr der mathematisch idealen Lösung, kann aber dennoch für ein robusteres Modell zielführend sein.

Diese Möglichkeit der Plausibilisierung und Interpretation ist ein wesentlicher Grund, weshalb nicht auf neuronale Netze zurückgegriffen wird. Der Einfluss der Parameter in neuronalen Netzen ist kaum mehr nachvollziehbar und kann somit nicht gegen physikalische Zusammenhänge geprüft werden.

Statistisch fundierte Schätzung von Modulgewichten

Auf Basis der fahrzeugspezifischen Parameter kann schließlich das Modulgewicht einer neuen Fahrzeuggeneration hochgerechnet werden. Abbildung 6.19 veranschaulicht dieses Vorgehen.

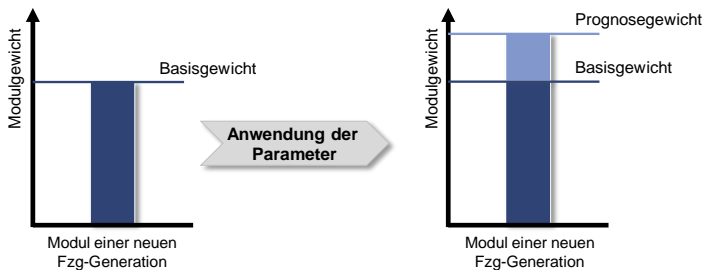


Abbildung 6.19: Prognose von Modulgewichten neuer Fahrzeuge

Im Sinne der Anwenderfreundlichkeit wurde hierzu ein Excel-Tool entwickelt. Dort können die fahrzeugspezifischen Parameter eingegeben und eine Gewichtsprognose erstellt werden. Abbildung 6.20 zeigt beispielhaft die Benutzeroberfläche zur Prognose des Entwicklungsbereichs Karosserie.

Faktorenauswahl Karosserie

Name Derivat: Test!

Abmessungen

Länge [m] L*B [m^2] Wird automatisch befüllt!

Breite [m] R*B [m^2] Wird automatisch befüllt!

Höhe [m] R*H [m^2] Wird automatisch befüllt!

Radstand [m] Üvo*B*H*Fr [m^3] Wird automatisch befüllt!

Höhe Frontklappenhinterkante [m] L*B*H Wird automatisch befüllt!

Überhang vorne [m]

Überhang hinten [m]

Produktlinie

Untere

Kleine

Große

Bauform

Limousine

Cabrio

Coupé

Gran Coupé

SAV

Roadster

Hatch

Touring

SAC

Motor

ICE

PHEV

BEV

Markt

ECE

CHN

US

Antrieb

RWD

AWD

FWD

Türenanzahl

Vier

Zwei

Material Dach

Stahl

Alu

Material Vordertüren

Stahl

Alu

Material Hintertüren

Stahl

Alu

Keine Hintertüren

Türrahmen

Rahmentür

Rahmenlos

Material Frontklappe

Stahl

Alu

Material Heckklappe

Stahl

Alu

SMC

Kunststoff

Heckklappenart

Eintellig

Zweitellig

Heckscheibenklappe

Nein

Ja

Automatisch öffnende HKL

Nein

Ja

Dachvariante

Normales Dach/Cabrio

Panoramadach

Schiebedach

Verdecksystem

Kein Cabrio

Hardtop

Softtop

Leuchtmittel

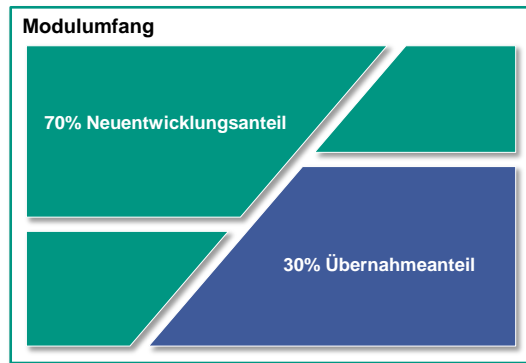
LED

Halogen

Das Prognosegewicht für die Karosserie: Prognose

Abbildung 6.20: Benutzeroberfläche zur Prognose des Entwicklungsbereichs Karosserie

Im Sinne der PGE ist es zielführend auf Basis vergangener Fahrzeuggewichte neue Fahrzeuggenerationen abzuschätzen. Diese Abschätzung kann durch die Berücksichtigung konkreter Übernahme- und Neuentwicklungsumfänge noch verbessert werden. Da das Gewicht der Übernahmeumfänge in der Regel bekannt ist, sollte diese Umfänge nicht durch das Modell prognostiziert werden. Hierzu wurde eine Funktionalität eingebaut, durch die der Anwender den bekannten Gewichtsanteil je Modul prozentual und absolut eintragen kann. Das verbleibende Modulgewicht wird anschließend wie oben beschrieben berechnet und anteilig zum Gesamtgewicht hinzuaddiert. Abbildung 6.21 stellt dieses Vorgehen für einen abstrahierten Modulumfang dar. Durch dieses Vorgehen sollte sich die Genauigkeit der Gewichtsabschätzung weiter verbessern.



$$m_{\text{Modul}} = m_{\text{Übernahme}} + 0,7 \cdot m_{\text{Prognose}}$$

Abbildung 6.21: Berücksichtigung des Übernahmeanteils bei der Gewichtsschätzung eines Moduls

6.2.3 Validierung

Im Rahmen der Validierung wurden 15 Fahrzeuge einzeln aus den Trainingsdaten entfernt und anschließend eine Gewichtsprognose durchgeführt. Die Abweichungen zwischen Real- und Prognosegewicht wurden auf Modul-, Entwicklungsbereich- und Gesamtfahrzeugebene berechnet und in so genannten Box-Plot Diagrammen¹⁰ visualisiert. Diese eignen sich insbesondere für die Darstellung von geringen Stichprobenumfängen mit unbekannter Wahrscheinlichkeitsverteilung und sind in Abbildung 6.22 dargestellt.

¹⁰ Box-Plot-Diagramme dienen zur intuitiven Visualisierung vorhandener Daten. Die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Daten muss dabei nicht bekannt sein. Der Kern des Diagramms bildet die Box, die 50% der Daten abbildet. Der Strich innerhalb der Box markiert den Median, 50% der Daten sind kleiner oder gleich diesem Wert. An die Box schließen sich die Antennen an, die üblicherweise bis zu dem maximalen Wert innerhalb der 1,5-fachen Ausdehnung der Box reichen. Werte die außerhalb der Antennen liegen stellen Ausreißer dar und werden mit einem Punkt gekennzeichnet. (Dümbgen, 2016)

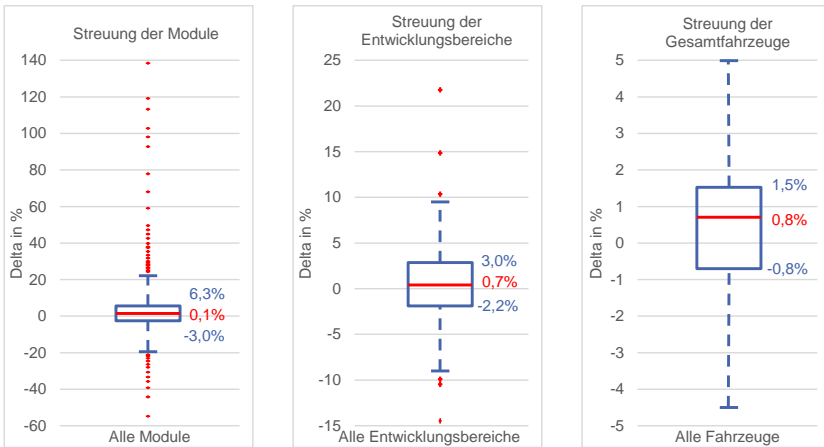


Abbildung 6.22: Streuung der Modul-, Entwicklungsbereichs- und Gesamtfahrzeuggewichte

Die Streuung der Module zeigt teilweise beträchtliche Prognoseabweichungen, wobei die Box mit den mittleren 50 % der Abweichungen in etwa innerhalb der geforderten Toleranz von +/- 5 % liegt. Die starken prozentualen Abweichungen entfallen dabei meist auf sehr leichte Module wodurch Prognoseabweichungen einen hohen prozentualen Wert annehmen. In höheren Aggregationsstufen wie der Entwicklungsbereichs- und Gesamtfahrzeugebene zeigt sich, dass die prozentualen Prognoseabweichungen abnehmen. Gemäß dem Gesetz der großen Zahlen gleichen sich hierbei die Abweichungen vermehrt aus und der prozentuale Wert basiert auf einem höheren Grundgewicht. Die Prognoseabweichung des Gesamtfahrzeuggewichts übersteigt für kein Validierungsfahrzeug die Schwelle von +/- 5 %. 50 % der Fahrzeuge befinden sich sogar in einem Korridor von +/- 2 %.

Im Folgenden wird die Prognosegenauigkeit der entwickelten Methode mit einer gängigen Gewichtsabschätzformel von Yanni und Venhovens (2010) verglichen. Diese Formel (Gl. 9) berücksichtigt die Dimensionen (Länge L , Breite B , Höhe H), die Motorleistung P_{Motor} und eine Ersatzdichte für das Karosseriematerial ρ_{Ersatz} .

$$m_{Fzg} = 1,38 \frac{kg}{kW} \cdot P_{Motor} + \frac{\rho_{Ersatz} \cdot L \cdot B \cdot H + \begin{pmatrix} 70kg \text{ für Diesel} \\ 80 kg \text{ für Allrad} \\ 200kg \text{ für Carbio} \end{pmatrix}}{(1 - 0,12)} \quad \text{Gl. 9}$$

Die 15 Validierungsfahrzeuge wurden mithilfe dieser Formel gewichtsseitig prognostiziert. Abbildung 6.23 zeigt die prozentualen Prognoseabweichungen beider Methoden auf und visualisiert diese in Form eines Box-Plot Diagramms.

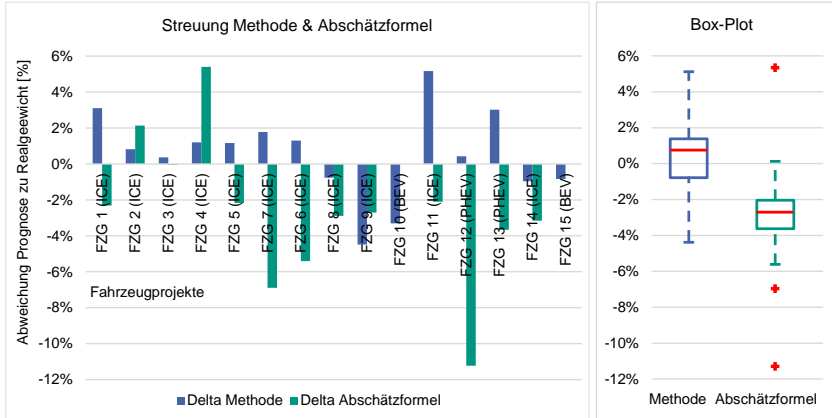


Abbildung 6.23: Vergleich der Methoden

Es wird in der Abbildung deutlich, dass die Abschätzformel insgesamt größere Prognoseabweichungen (rote Ausreißer) hervorruft. Die Box-Plot-Darstellung ist hierbei etwas irreführend, da die Box und die Antennen bei der Abschätzformel etwas kleiner sind. Etwa die Hälfte der Fahrzeuge werden durch die Abschätzformel mit einem ähnlichen Offset geschätzt, wodurch eine kompakte Box entsteht. Dennoch sollten die drei Ausreißer bei einer Stichprobe von 15 nicht ignoriert werden. Zudem ist bemerkenswert, dass die Abschätzformel im Mittel zu geringe Fahrzeuggewichten prognostiziert. Dies ist nicht weiter verwunderlich, da die Abschätzformel eine herstellerübergreifende Gewichtsprognose darstellt. Da die Validierungsfahrzeuge allesamt dem Portfolio eines Premiumherstellers entspringen, sind diese Fahrzeuge durch Mehrausstattungen und erhöhte Anforderungen hinsichtlich Sicherheit, Akustik oder Komfort tendenziell schwerer. Zudem konnten die vollelektrischen Fahrzeuge durch die Formel nicht abgeschätzt werden. Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die entwickelte Methode eine robustere und für eine frühe Phase zufriedenstellende Prognosegenauigkeit bereitstellt. Zudem kann sie auf ein bestimmtes Fahrzeugportfolio angepasst werden.

6.2.4 Anwendungsszenarien

Für die Methode zur Gewichtsabschätzung wurden drei Anwendungsfälle identifiziert. Diese werden im Folgenden kurz erläutert.

6.2.4.1 Gewichtsschätzung von Fahrzeugkonzepten

Der Hauptanwendungsfall des Tools umfasst die Gewichtsschätzung von Fahrzeugkonzepten auf Modul-, Entwicklungsbereichs- und Gesamtfahrzeugebene. Hierbei muss die im vorherigen Kapitel ermittelte Prognoseunschärfe beachtet werden. Durch die getroffenen Vereinfachungen ist die Methode insbesondere für eine frühe Phase der Entwicklung geeignet. Im Entwicklungsverlauf sollten die Gewichtswerte nach und nach durch berechnete und gewogene Komponentengewichte ersetzt werden. Durch das parametrisch aufgebaute Modell können zudem weitere Fahrzeugkonzepte im Rahmen von (Leichtbau-)Szenarien bewertet werden.

Bei der Anwendung der Methode ist darauf zu achten, dass die Gewichtsschätzung auf den gewichtsbestimmenden Parametern vergangener Fahrzeuge beruht. Demnach können neue Technologien teilweise nicht durch die vorhandenen Parameter adäquat beschrieben werden. In diesen Fällen müssen neue Parameter auf Basis von Expertenabschätzungen, Wettbewerbsfahrzeugen oder ersten Prototypen hinzugefügt und quantifiziert werden.

6.2.4.2 Direkte Gewichtszielableitung aus der Methode

Die Kernidee der Methode besteht darin, unterschiedliche Fahrzeugkonzepte durch gewichtsbestimmende Parameter auf ein Basisfahrzeug zu normieren. Diese Normierung kann aus verschiedenen Gründen nur angenähert werden, so dass ein Restdelta zwischen den Fahrzeugen verbleibt. So werden nur die einflussreichsten Parameter im Modell berücksichtigt, die Fahrzeuggewichte der Datenbasis unterliegen einer gewissen Unsicherheit und bei den einzelnen Fahrzeugen wurde unterschiedlich erfolgreich Leichtbau betrieben.

Letzteres kann zur Quantifizierung von Gewichtszielen herangezogen werden, ähnlich wie es bereits von Malen und Hughes (2015) vorgeschlagen wird. Unter der Annahme, dass das Restdelta bei der Normierung vornehmlich unterschiedlich erfolgreichen Leichtbauaktivitäten entspringt, kann das geringste normierte Gewicht als Best-Practice-Gewicht angesehen werden. Basierend auf diesem Gewicht können neue Fahrzeuggenerationen prognostiziert werden. Dieser Prognosewert würde folglich dem Zielgewicht entsprechen.

Wie bereits angedeutet, erfordert dieses Vorgehen ein sehr genaues Modell und präzise Gewichtsdaten. Da beide Anforderungen im Rahmen der Arbeit noch nicht gänzlich erfüllt werden konnten, wurde dieses Vorgehen noch nicht angewandt.

6.2.4.3 Validierung der Gewichtswerte

Eine zentrale Aufgabe des Gewichtsmanagements ist die Bereitstellung von Gewichtsdaten. Diese werden in Form von Bewertungsläufen und Fortschreibungen von den konstruierenden Entwicklungsbereichen angefordert. Durch den Abgleich der prognostizierten Modulgewichte mit den bereitgestellten Gewichtsdaten können diese validiert werden. Starke Abweichungen können dabei auf Fehler in der Berichterstattung hinweisen. Auf diese Weise kann die Qualität der bereitgestellten Daten kontinuierlich verbessert werden.

6.3 Methodensammlung zur Abschätzung von Gewichtschancen und -risiken

In diesem Abschnitt wird eine Methodensammlung zur Abschätzung von Gewichtschancen und -risiken vorgestellt. Der Nutzen der Methodensammlung wird zunächst motiviert und die zugrunde liegende Kernidee vorgestellt. Da die Methodensammlung aus mehreren Einzelumfängen besteht, werden die Unterkapitel Umsetzung und Validierung zusammen betrachtet. Die Annahme hierbei ist, dass validierte Einzelumfänge zu einem validen Gesamtergebnis führen. Eine Betrachtung relevanter Anwendungsszenarien schließt diesen Abschnitt ab.

6.3.1 Motivation und Kernidee

Die bisher vorgestellten Methoden ermöglichen eine Gewichtsschätzung und eine Unsicherheitsbetrachtung des Ist-Gewichts. Für die Quantifizierung von Auslegungs- und Zielgewichten sollten darüber hinaus konkrete Gewichtschancen und -risiken betrachtet werden. Auf diese Weise können zukünftige und projektspezifische Gewichtsänderungen berücksichtigt werden, die durch die zuvor erläuterten und vornehmlich auf historischen Daten fundierten Methoden nicht ausreichend betrachtet werden können.

Die Abschätzung von Gewichtschancen und -risiken erfolgt durch die Betrachtung ausgewählter Projektcharakteristiken und der Anwendung spezieller Teilmethoden. Geeignete Charakteristiken wurden im Rahmen der teilnehmenden Beobachtung identifiziert und validiert. So sollte ein Fahrzeugprojekt zunächst hinsichtlich der

Variationsanteile, der verbleibenden Projektlaufzeit und der Projekttrandbedingungen auf Gewichtschanzen und -risiken untersucht werden. Des Weiteren wird eine systematische Durchführung von Leichtbaumethoden wie dem Target Weighing Ansatz und ein intelligentes Gewichtsbenchmarking empfohlen, um konkrete Leichtbaupotentiale zu identifizieren. Die Ergebnisse dieser Aktivitäten sollten in einer projekt- und generationsübergreifenden Leichtbaudeendatenbank gepflegt und aufbereitet werden. Auf diese Weise kann ein Wissensverlust verhindert und ein projektübergreifend optimaler Leichtbauprozess unterstützt werden. Abbildung 6.24 stellt die beschriebenen Elemente zur Bestimmung von Gewichtschanzen und -risiken dar und teilt diese in Projektcharakteristiken und Teilmethoden ein.

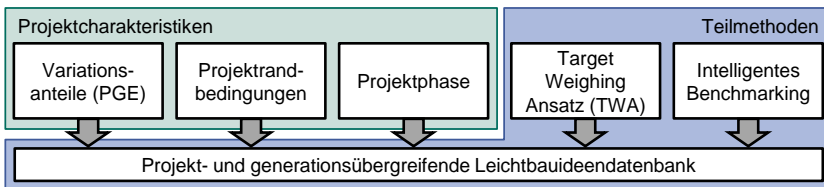


Abbildung 6.24: Elemente zur Abschätzung von Gewichtschanzen und -risiken

6.3.2 Umsetzung und Validierung

In diesem Abschnitt werden die Elemente aus Abbildung 6.24 hinsichtlich Umsetzung und Validierung beschrieben.

6.3.2.1 Einfluss der Variationsanteile im Kontext der PGE

Im Rahmen der Forschungsarbeiten zur PGE konnten anhand der Variationsanteile und der Referenzsysteme erste Aussagen zu Chancen und Risiken getroffen werden (Albers et al., 2018f). Diese Erkenntnisse konnten durch einen Fragebogen im Rahmen der teilnehmenden Beobachtungen bestätigt werden. Dabei wurde den Neuteilumfängen das größte Gewichtsreduktionspotential zugeschrieben. Neue Technologien bieten hierbei besonders viele Chancen aber gleichzeitig auch Risiken. Dies wird durch Abbildung 6.25 für das Beispiel eines Vorderachsträgers grafisch dargestellt.

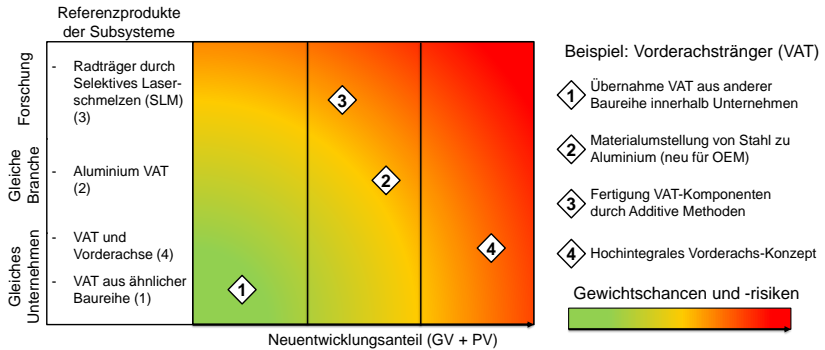
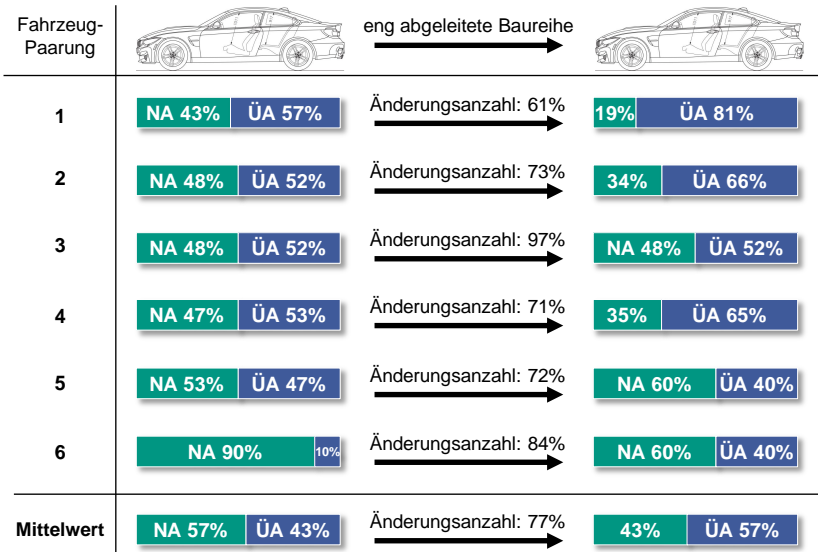


Abbildung 6.25: Chancen und Risiken im Kontext der PGE

Ähnlich wie in der Abbildung müssen die jeweiligen Referenzsysteme gemäß ihrem Ursprung und dadurch ihrer Reife bewertet werden. In Kombination mit den Neuentwicklungsanteilen können damit Gewichtschancen und -risiken ausgewiesen und bei der Zielableitung berücksichtigt werden.

Abschließend sollen diese Vorgehensweise und die getroffenen Annahmen validiert werden. Wie bereits erwähnt, bestätigten die Fachexperten im Rahmen der teilnehmenden Studie die Annahme, nach der Neuentwicklungsumfänge, insbesondere neue Technologien, hohe Gewichtschancen aber auch -risiken mit sich bringen.

Im Folgenden soll dies quantitativ belegt werden. Hierzu wurden die Änderungsanträge von technisch ähnlichen Fahrzeugen verglichen, die sich in ihren Neuentwicklungsumfängen unterscheiden. Es wurde hierbei darauf geachtet, dass sich der Großteil der Übernahmeumfänge nicht mehr in Entwicklung befindet. In Abbildung 6.26 sind die Ergebnisse der Analyse dargestellt.



NA: Neuentwicklungsanteil

ÜA: Übernahmeanteil

Prozentuale Änderungsanzahl: Anzahl der Änderungen in der eng abgeleiteten Baureihe relativ zur Änderungsanzahl in der Basisbaureihe

Abbildung 6.26: Änderungsanzahl in Abhängigkeit der Neuentwicklungsanteile

Es zeigt sich, dass höhere Neuentwicklungsumfänge meist zu einer höheren Änderungsanzahl und damit zu höheren Gewichtsrisiken aber auch Gewichtsrisiken führen. Auffällig ist, dass zwei abgeleitete Baureihen gleich oder mehr Neuentwicklungsanteile aufweisen. Dies hängt damit zusammen, dass auch die Basisbaureihen oftmals abgeleitete Baureihen sind und daher ebenfalls teils erhebliche Übernahmeumfänge aufweisen (meist Baukasten umfänge wie Motor oder Getriebe). Zudem kann eine abgeänderte Karosserie einer technisch eng abgeleiteten Baureihe durch den hohen Gewichtseinfluss der Karosserie zu erhöhten Neuentwicklungsumfängen führen.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass das Untersuchungsergebnis im Mittel die oben getroffene Annahme bestätigt. Folglich kann der Neuentwicklungsanteil als geeigneter Parameter zur Abschätzung der Gewichtsrisiken und -risiken herangezogen werden.

6.3.2.2 Externe Einflussfaktoren auf die Gewichtsentwicklung

In diesem Abschnitt werden die externen Einflussfaktoren auf die Gewichtsentwicklung untersucht. Dies unterscheidet sich von der Gewichtunsicherheitsbetrachtung insofern, als dass hier die prognostizierten Gewichtsänderungen auf Grund von externen Projekteinflüssen konkret für das vorliegende Fahrzeugprojekt aufgelistet werden. Diese Einflüsse können geänderte Gesetze, Anforderungen oder Konfigurationen in Form von Ausstattungspaketen oder Motorisierungen umfassen. Zudem können potenzielle aber noch nicht genehmigte Leichtbaumaßnahmen diesem Betrachtungsfeld zugeordnet werden.

Die in diesem Abschnitt betrachteten Maßnahmen sollten nach ihrer Eintrittswahrscheinlichkeit klassifiziert werden. Die Maßnahmen mit hoher Eintrittswahrscheinlichkeit bilden eine Prognose des Fahrzeuggewichts und verändern somit den Mittelwert der Gewichtunsicherheitsbetrachtung. Die unwahrscheinlicheren Maßnahmen tragen zum vorab bestimmten Gewichtunsicherheitskorridor bei und sollten dadurch vor allem bei der Quantifizierung eines robusten Auslegungsgewichts berücksichtigt werden.

Da die Berücksichtigung von bekannten aber noch nicht entschiedenen Änderungsmaßnahmen in heutigen Gewichtsmanagementprozessen bereits üblich ist, wird für diesen Abschnitt keine zusätzliche Validierungsaktivität durchgeführt (Kreis & Blankenburg, 2014).

6.3.2.3 Einfluss der Produktentwicklungsphase

In Fahrzeugentwicklungsprozessen stellt die verbleibende Entwicklungsdauer einen entscheidenden Parameter für die Gewichtschancen und -risiken dar. So wird das Produkt im Verlauf der Entwicklung durch Entscheidungen immer detaillierter festgelegt. Eine diesbezügliche Analyse von Trautwein (2011) wurde bereits in Abbildung 5.8 dargestellt. Aus der Darstellung kann geschlussfolgert werden, dass im Verlauf der Entwicklung immer weniger Bauteilumfänge verändert werden können. Dementsprechend reduzieren sich die Gewichtschancen und -risiken.

Hierbei sei erwähnt, dass durch die firmeninterne Festlegung von Konstruktionsumfängen externe Risiken nur bedingt reduziert werden. Durch die Festlegung von Serienwerkzeugen, Fertigungsabläufen und Lieferantenvergaben steigen allerdings die Änderungskosten enorm. Daher werden Änderungen nur noch im Notfall durchgeführt, wenn beispielsweise sicherheits- oder zulassungsrelevante Änderungen notwendig werden. Da Leichtbaumaßnahmen in der Regel nicht dazu gehören, müssen Leichtbaupotentiale rechtzeitig im Projektverlauf identifiziert und umgesetzt werden. Hierbei dienen die Leichtbaustrategien (siehe Kapitel 2.2.5) als

geeignete Orientierung. Die Strategien Konzept- und Bedingungsleichtbau sollten demnach zuerst und frühzeitig angewandt werden. Aber auch die anderen drei Strategien (Stoff-, Form- und Fertigungsleichtbau) lösen signifikante Bauteiländerungen aus und müssen deshalb rechtzeitig gestartet werden.

Im Sinne einer Validierung wurden die Änderungsanträge von 15 Fahrzeugprojekten vor und nach Zielvereinbarung ausgewertet. Abbildung 6.27 stellt die Ergebnisse der Auswertung dar.

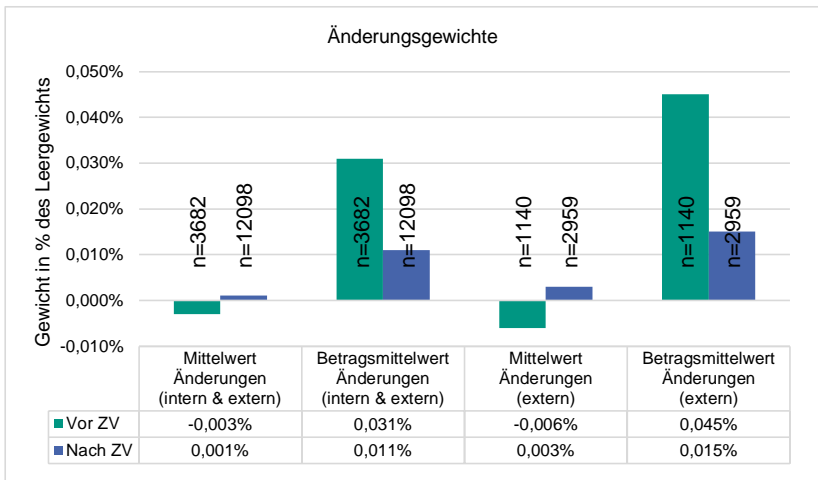


Abbildung 6.27: Auswertung der Änderungsgewichte vor und nach Zielvereinbarung (ZV) (in Prozent des jeweiligen Gesamtfahrzeuggewichts)

Hieraus kann eine Reihe von Erkenntnissen gewonnen werden. Zunächst ist der Mittelwert der Maßnahmen vor Zielvereinbarung negativ, danach ist er positiv. Demnach zeigen sich die Gewichtsreduzierungsmaßnahmen vor allem vor Zielvereinbarung. Darüber hinaus sind die Maßnahmen vor Zielvereinbarung im Schnitt betragsmäßig deutlich schwerer. Dies passt zur Annahme, dass in einer früheren Phase größere Umfänge gestaltet und geändert werden können. Bei externen Änderungen zeigt sich dieses Verhalten besonders stark. Abschließend kann festgehalten werden, dass die Maßnahmenanzahl nach Zielvereinbarung höher ist. Dies begründet sich durch den detaillierteren Entscheidungsstand und den größeren Zeitraum bezogen auf den aktiven Zustand des Änderungsmanagements.

Die Auswertung bestätigt damit die getroffenen Annahmen. Es kann festgehalten werden, dass die verbleibende Restlaufzeit des Projekts einen entscheidenden Einfluss auf die Gewichtschancen und -risiken und damit auf die Quantifizierung der Gewichtsziele hat.

6.3.2.4 Target Weighing Ansatz als systemübergreifende Leichtbaumethode

Im Rahmen dieser Arbeit wurde der in Kapitel 2.2.5 vorgestellte Target Weighing Ansatz (TWA) vornehmlich durch Fallstudien validiert. Die erste Fallstudie fand im universitären Umfeld im Rahmen des Live-Labs *IP – Integrierte Produktentwicklung* statt und diente zur Untersuchung des Nutzens und der Wirksamkeit der Methode. Die zweite und die dritte Fallstudie fanden im industriellen Umfeld im Rahmen der teilnehmenden Beobachtung statt und dienten zur Untersuchung der praxisnahen Anwendung. Die Fallstudien und die daraus resultierenden Erkenntnisse werden im Folgenden näher erläutert.

Fallstudie 1 im Rahmen des Live-Labs IP – Integrierte Produktentwicklung

Diese Fallstudie wurde bereits in der Veröffentlichung von Revfi et al. (2018b) präsentiert. Aus diesem Grund werden im Folgenden nur die wichtigsten Erkenntnisse aufgeführt, für detaillierte Informationen sei auf die Veröffentlichung verwiesen.

Ziel der Fallstudie war die Wirksamkeit des subsystemübergreifenden TWA mit einer empirischen Studie zu belegen. Bislang konnte lediglich gezeigt werden, dass der TWA grundsätzlich in der Lage ist, subsystemübergreifende Leichtbaupotentiale zu identifizieren. In dieser Fallstudie sollte deshalb untersucht werden, ob der TWA im Vergleich zu einem klassischen Entwicklungsvorgehen mit Subsystemverantwortlichkeiten zu besseren Leichtbauergebnissen führt.

Hierzu wurden 37 anwesenden Studenten des in Kapitel 3.2.3 vorgestellten Live-Labs in zwei Gruppen mit jeweils vier Teams gleichmäßig aufgeteilt. In einem knapp fünfstündigen Workshop sollten die insgesamt acht Teams den Unterboden eines Automobils untersuchen und gewichtsoptimieren. Die Aufgabenstellung lautete folgendermaßen: „Identifizieren Sie Leichtbaupotentiale und entwickeln sie erste Lösungskonzepte (unter angemessenen Kosten für die Automobilindustrie)“.

Die Teams der ersten Gruppe wurden anfangs im TWA geschult und mussten die Aufgabenstellung gemäß dem TWA-Vorgehen abarbeiten. Die Mitglieder der Teams der zweiten Gruppe wurden gemäß der Organisation von Automobilunternehmen den Subsystemen des Unterbodens zugewiesen. Sie sollten dadurch

Subsystemverantwortliche darstellen, die in zeitlich definierten Meetings mit den anderen Subsystemverantwortlichen in Kontakt treten durften.

Die Fallstudie wurde auf zwei Arten ausgewertet. Zum einen wurde nach dem Workshop ein Fragebogen mit sieben Fragen an die Teilnehmer ausgeteilt. Dabei wurden von den Autoren vorab definierte Einflussfaktoren für erfolgreichen Leichtbau abgefragt. Die Einflussfaktoren lauteten Kommunikation, ausgeprägte Analysephase, Systemverständnis, subsystemübergreifende Denkweise und die Loslösung von bisherigen Lösungskonzepten. Die Ergebnisse des Fragebogens sind in Abbildung 6.28 dargestellt.

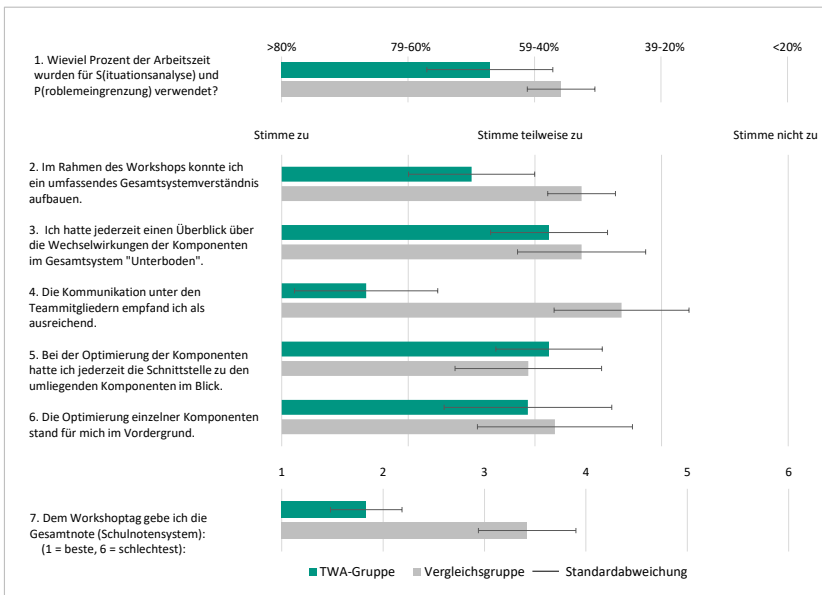


Abbildung 6.28: Ergebnisse des Fragebogens

Hinsichtlich der identifizierten Einflussfaktoren ergaben sich die folgenden Erkenntnisse. Die Analysephase war in der TWA-Gruppe ausgeprägter (Frage 1), zudem wurde die Kommunikation deutlich besser bewertet (Frage 4). Frage 2 zeigt ein verbessertes Systemverständnis der TWA-Gruppe und Frage 5 deutet darauf hin, dass die bestehenden Subsystem-Schnittstellen durch die funktionsbasierte Analyse an Wichtigkeit verlieren. Somit kann man sich von bisherigen Lösungskonzepten besser lösen, wodurch die Kreativität unterstützt wird. Die

Subsystemübergreifende Denkweise zeigt sich in Frage 6 bei der TWA-Gruppe nicht wie erwartet, allerdings sei hierbei erwähnt, dass der TWA im Rahmen des Konzeptleichtbaus auch die Optimierung einzelner Komponenten miteinschließt. Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass der TWA hinsichtlich der Einflussfaktoren für erfolgreichen Leichtbau besser als die herkömmliche Vorgehensweise bewertet wird.

Darüber hinaus wurde das jeweils beste Konzept der 8 Teams von 3 Fachexperten aus der Automobilindustrie hinsichtlich Gewichtsreduktion, Kosten, Neuheitsgrad und Gesamteindruck bewertet. Die Bewertung erfolgte dabei in Form eines Rankings der Konzepte. Die Ergebnisse sind in Abbildung 6.29 dargestellt.

	Teams	Ergebnisse	Mittelwert		Teams	Ergebnisse	Mittelwert
	Gewichtsreduktion	TWA-1	5.7		4.3	Kosten	TWA-1
TWA-2		2.0	TWA-2	2.0			
TWA-3		3.0	TWA-3	3.7			
TWA-4		6.3	TWA-4	7.7			
Vergleich -1		4.0	4.8	Vergleich -1	3.7		4.1
Vergleich -2		5.0		Vergleich -2	3.7		
Vergleich -3		4.3		Vergleich -3	2.3		
Vergleich -4		5.7		Vergleich -4	6.7		
	Teams	Ergebnisse	Mittelwert		Teams	Ergebnisse	Mittelwert
	Neuheitsgrad	TWA-1	1.3		2.9	Gesamteindruck	TWA-1
TWA-2		4.0	TWA-2	2.0			
TWA-3		3.7	TWA-3	4.3			
TWA-4		2.7	TWA-4	5.0			
Vergleich -1		5.7	6.1	Vergleich -1	3.7		4.8
Vergleich -2		5.3		Vergleich -2	5.0		
Vergleich -3		5.7		Vergleich -3	4.7		
Vergleich -4		7.7		Vergleich -4	5.7		

Abbildung 6.29: Expertenbewertung in Form eines Rankings der Konzepte (1 = bestes, 8 = schlechtestes)

Es ist ersichtlich, dass die mittleren Bewertungen von Gewichtsreduktion und Kosten bei beiden Gruppen vergleichbar sind. Allerdings sind die beiden besten Konzepte bezüglich Gewichtsreduktion aus der TWA Gruppe, die Streuung dieser Konzepte ist deutlich höher als bei der anderen Gruppe. Der Hauptgrund hierfür ist bei der Bewertung des Neuheitsgrads ersichtlich, da die TWA-Gruppe zu durchgehend innovativeren und kreativeren Lösungen kam. Dadurch wurden die TWA-Konzepte im Gesamteindruck leicht besser bewertet. Es lässt sich daher

festhalten, dass der TWA in dieser Studie zu innovativeren Konzepten geführt hat, die teilweise große Leichtbaupotentiale aufwiesen.

Das Ergebnis der Studie kann folgendermaßen zusammengefasst werden: Der TWA ermöglicht die Identifikation von subsystemübergreifenden Leichtbaupotentialen durch die funktionsbasierte Analyse technischer Systeme. Dabei bauen die Anwender durch eine **ausgeprägte Analysephase** und **intensive Kommunikation** ein **Systemverständnis** auf, ohne durch vorhandene Schnittstellen bei der Lösungsfindung eingeschränkt zu werden. Dies führt zu **innovativeren Leichtbauansätzen** als bei klassischen Entwicklungsansätzen.

Abschließend wird darauf hingewiesen, dass die Ergebnisse der vorliegenden Fallstudie unsicherheitsbehaftet sind. Die Studie wurde mit Studenten durchgeführt, die unterschiedliche Vorkenntnisse in Bezug auf das Untersuchungsobjekt hatten. Durch die kurze Dauer des Workshops könnte dies einen großen Einfluss auf die entwickelten Konzepte haben. Zudem wurden die Studenten der TWA-Gruppe intensiver betreut, um die korrekte Durchführung der Methode sicherzustellen. Dies stellt einen externen Eingriff dar, der die Ergebnisse verfälschen könnte. Demnach sollten die Ergebnisse eher als starke Indizien, aber nicht als vollumfänglichen Beweis für den Nutzen der Methode verstanden werden.

Fallstudie 2 und 3 im Rahmen der teilnehmenden Beobachtung

In den Fallstudien 2 und 3 wurde der TWA an konkreten Entwicklungsumfängen der BMW Group angewandt. Ziel der Anwendung war dabei in beiden Fällen die Identifikation von Leichtbausuchfeldern bis hin zu Leichtbaupotentialen. Ein zusätzlicher Aspekt im Sinne der Methodenentwicklung war dabei die Analyse hinsichtlich Anwenderfreundlichkeit, Prozesseinbindung und Ergebnisqualität der Methode.

Im Rahmen der Fallstudie 2 wurde das Heckklappenkonzept eines SAV (Sports Activity Vehicle) mithilfe des TWA analysiert. In mehreren Workshops mit ausgewählten Experten wurden die relevantesten Funktionen und Komponenten identifiziert und gruppiert. Daraus wurde eine Funktion-Masse-Matrix aufgestellt und befüllt. Durch die Gewichtung der Funktionen wurde schließlich das Portfoliodiagramm in Abbildung 6.30 erstellt.

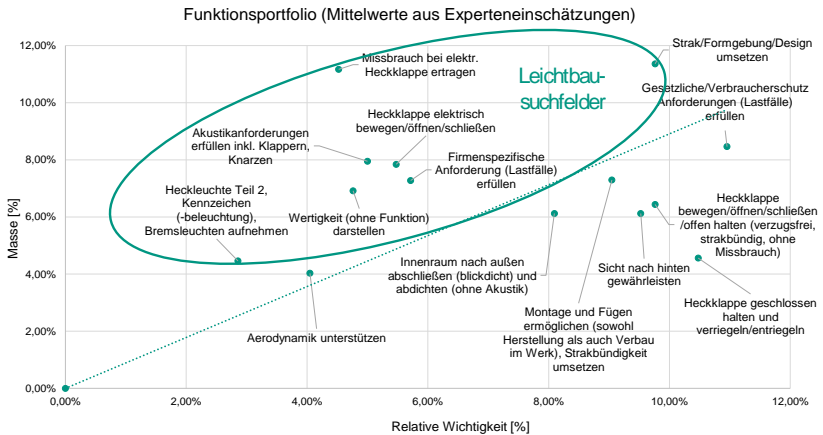


Abbildung 6.30: Portfoliodiagramm TWA Heckklappe

Die Funktionen oberhalb der Regressionslinie stellen gemäß der TWA-Lehre die Leichtbausuchfelder dar. In diesem Fall umfassen die vielversprechendsten Leichtbaufelder die Funktionen hinsichtlich Akustik, Wertigkeit, Design, Aerodynamik, Missbrauch, elektrischer Heckklappe und firmeninternen Anforderungen, die den gesetzlichen Rahmen übersteigen. Es wird deutlich, dass der TWA auf dieser Aggregationsebene vor allem die Anforderungen beleuchtet. Die gewichtsbestimmenden Auswirkungen der Anforderungen waren den Experten bereits vorher implizit bewusst, allerdings konnte die Sensitivität bislang kaum quantifiziert werden. Die Möglichkeit der Quantifizierung wurde als großer Vorteil der Methode angesehen. Auf dieser Grundlage kann folglich der Anforderungslevel hinsichtlich des Gewichtseinflusses diskutiert werden. Die Leichtbaustrategie Anforderungsleichtbau wird demnach durch den TWA unterstützt.

Um die Genauigkeit und Robustheit der zugrundeliegenden Expertenbewertungen zu untersuchen, wurden verschiedene Expertengruppen befragt. So wurde die Funktion-Masse-Matrix von Konzeptauslegern und Konstrukteuren getrennt voneinander bewertet. Des Weiteren wurden die 14 Funktionen von Entwicklung und Vertrieb getrennt voneinander gemäß ihrer Wichtigkeit bewertet. Die Streuung der Bewertungen ist in Abbildung 6.31 grafisch dargestellt.

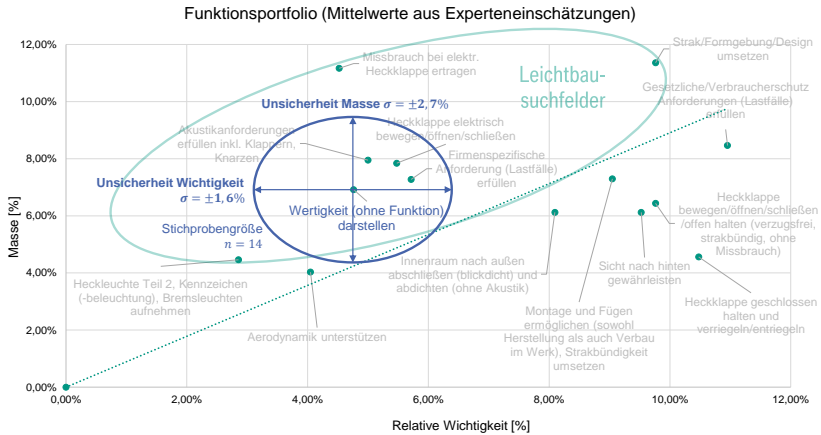


Abbildung 6.31: Grafische Darstellung der Bewertungsunsicherheiten am Beispiel der Funktion „Wertigkeit (ohne Funktion) darstellen“

Diese Auswertung zeigt eine relativ starke Streuung der Funktionsbewertungen. Dies muss auf Grund der geringen Datenbasis etwas relativiert werden, da nur 14 Funktionen von insgesamt vier Fraktionen bewertet wurden. Zudem wird das Funktionsgewicht als auch die Funktionswichtigkeit als Prozent des Gesamtgewichts beziehungsweise der Gesamtwichtigkeit angegeben. Wird nun eine der 14 Funktionen stark abweichend bewertet, ändern sich dadurch auch die anderen Funktionsbewertungen entsprechend. Das führt zu einer erhöhten Streuung der Bewertungen.

Nichtsdestotrotz ist die Streuung signifikant und die Aussagekraft der Ergebnisse damit sehr unsicherheitsbehaftet. Wie im Beispiel verdeutlicht, kann für nahe an der Regressionslinie liegende Funktionen nicht sichergestellt werden, dass diese auch wirklich über dieser Linie liegen. Aus diesem Grund sollten die **TWA-Aktivitäten** von **verschiedenen Expertengruppen durchgeführt** und **gegenseitig validiert** werden.

Es zeigte sich zudem, dass ein Methodenspezialist die ersten Anwendungen leiten sollte. Gerade die Zuweisung von Komponenten auf Funktionen setzt ein gemeinsames Methodenverständnis der Experten voraus. Die vorliegende Fallstudie zeigte jedoch auch, dass trotz der Anwesenheit eines Methodenspezialisten starke Bewertungsunterschiede auftreten können.

Aus diesen Gründen kritisierte ein Teil der teilnehmenden Experten die aus ihrer Sicht sehr subjektive Einschätzung der Abhängigkeiten in der Funktion-Masse-Matrix. Es wurde oftmals angeregt, die Abhängigkeiten durch Simulationsverfahren objektiv zu ermitteln. Eine große Herausforderung stellt hierbei die umfassende Funktionsbewertung des betrachteten Systems dar, da diese meist sehr umfangreiche und oftmals unterschiedliche Simulationen erfordert. Hieraus wurde die Hypothese abgeleitet, dass das Aufwand-Nutzen-Verhältnis der Methode durch die Anwendung aufwändiger Simulationen tendenziell schlechter wird. Diese Hypothese sollte in weiterführenden Arbeiten näher untersucht werden.

Abschließend soll auf die Eignung des TWA hinsichtlich der Quantifizierung von konkreten Gewichtsziele auf System- und Subsystemebene eingegangen werden. Der TWA basiert auf der Grundannahme, dass wichtigere Funktionen ein höheres Gewicht haben dürfen. Dadurch unterstellt man, dass durch Mehrgewicht eine Funktionsverbesserung erreicht werden kann.

Dies ist meistens aber nicht immer der Fall. So können Funktionen oftmals durch größere und damit leistungsfähigere und schwerere Subsysteme verbessert werden, als Beispiel seien Bremsen, Motoren oder Getriebe genannt. Dagegen gibt es Gesamtfahrzeugeigenschaften wie Querdynamik, Längsdynamik oder Crashesicherheit, die eher durch ein geringeres Systemgewicht verbessert werden.

Diese Problematik wird durch die beschriebene Bewertungsunsicherheit der subjektiven Experteneinschätzungen und der technisch nicht hinterlegten Leichtbausuchfelder (Abstand zur Regressionsgeraden) ergänzt. Auf dieser Basis lassen sich aktuell noch keine konkreten Gewichtsziele ableiten, die die nötige Akzeptanz in den Entwicklungsbereichen erfahren. Zudem sind die Entwicklungsbereiche durch die vorgeschriebenen Übernahmeanteile zusätzlich in ihrer Gestaltungsfreiheit eingeschränkt. Hinzu kommt, dass die subsystemorientierte Organisation der Automobilhersteller subsystembezogenen Gewichtsziele aus Gründen der Kompatibilität der Zielsystems erfordert. Dies steht dem funktionsbasierten und subsystemübergreifenden Ansatz des TWAs grundsätzlich entgegen.

Es lässt sich somit festhalten, dass der TWA eine vielversprechende Leichtbaumethode darstellt, der in der aktuellen Form aber zur eigenständigen Quantifizierung von Gewichtsziele noch nicht in der Lage ist.

Die dritte Fallstudie wurde an einem Motorrad-Koffersystem durchgeführt. Da hierbei vergleichbare Erfahrungen gemacht wurden, wird im Rahmen dieser Arbeit nicht näher darauf eingegangen.

6.3.2.5 Identifikation von Leichtbaupotentialen aus Benchmarking-Daten

Eine weitere Methode zur Identifikation von Leichtbaupotentialen stellt die Analyse von Benchmarking-Daten dar. Gemäß PGE können und sollten Wettbewerbsprodukte Teil des Referenzsystems einer neuen Produktgeneration sein. Aus diesem Grund ist die Betrachtung von Wettbewerbsfahrzeugen eine wichtige Einflussgröße auf die Festlegung von Gewichtszielen.

Für den Anwendungsfall des Fahrzeuggewichts hat sich dabei eine kommerzielle Plattform namens A2mac1 (*A2mac1, 2020*) etabliert. Diese zerlegt im Auftrag von Automobilherstellern Serienfahrzeuge und stellt die Komponenteneigenschaften wie Gewicht oder Material strukturiert zur Verfügung. Diese Daten können von Automobilunternehmen für Benchmarking-Aktivitäten verwendet werden.

Um die Daten für den firmeninternen Gebrauch nutzbar zu machen, muss die A2mac1 Komponentenstruktur in die firmeneigene Struktur übersetzt werden. Dies wurde im Rahmen einer betreuten Abschlussarbeit durch ein Excel-Tool erfolgreich umgesetzt (A. Schneider, 2018)¹¹. Dadurch können zum Beispiel die Modul- und Entwicklungsbereichsgewichte firmeninterner Fahrzeuge mit denen der Wettbewerber verglichen werden. Diese Vergleiche offenbaren bereits grundsätzliche Konzept- oder Leichtbauunterschiede, die für die Gewichtszielableitung verwendet werden können. Abbildung 6.32 stellt die unterschiedlichen Vergleichsebenen des Gewichtsbenchmarks dar.

¹¹ Co-betreute Abschlussarbeit

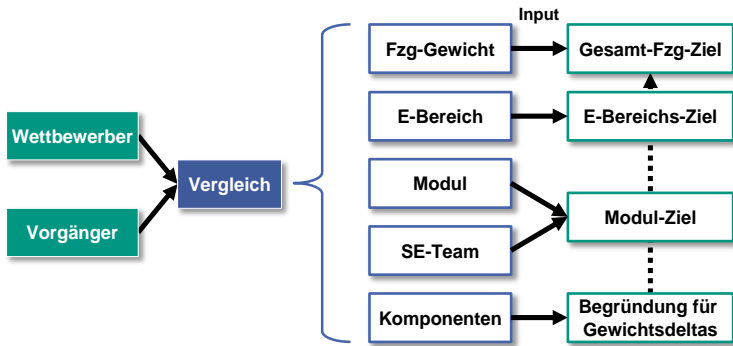


Abbildung 6.32: Vergleichsebenen des Gewichtsbenchmarks

Der Gewichtsvergleich von aggregierten Umfängen ermöglicht einen schnellen Blick auf Gewichtsunterschiede zu einem Wettbewerbsfahrzeug. Durch die alleinige Analyse von aggregierten Umfängen werden allerdings viele Leichtbaupotentiale nicht entdeckt. So könnte ein SE-Team sowohl gewichtsoptimierte als auch kaum optimierte Komponenten enthalten und sich somit ein ausgeglichenes und dadurch unauffälliges Gesamtgewicht ergeben.

Dagegen kann ein paarweiser Komponentenvergleich ebenfalls Probleme verursachen. So ergibt sich eine Funktionalität meist durch das Zusammenspiel von mehreren Komponenten. Aus diesem Grund sind Leichtbaupotentiale auf Basis einzelnen Komponenten oftmals schwer zu bestimmen. Zudem finden sich bei dem Vergleich zweier Fahrzeuge nicht immer direkt korrespondierende Komponenten.

Aus diesen Gründen wurde eine Logik zur automatisierten Identifikation von Leichtbaupotentialen entwickelt, die die Vorteile beider Analysemethoden kombiniert. Diese Logik ist in Abbildung 6.33 dargestellt und wird auf der SE-Team-Ebene angewandt, da dort funktionsähnliche Komponenten in einem überschaubaren Umfang aggregiert werden. Die relevanten Aspekte bei der Analyse sind das Deltagewicht der SE-Teams, der Gleichteilumfang¹², das Deltagewicht der Gleichteile und deren Betragsmittelwert. Anhand manuell festzulegender Grenzwerte für die genannten Aspekte können mit dieser Logik

¹² Unter Gleichteile werden in diesem Abschnitt Einzelkomponenten verstanden, die in beiden verglichenen Fahrzeugen vorkommen. Diese Komponenten zeigen sich anhand der gleichen Benennung und Einsortierung in A2mac1.

leichtbaurelevante SE-Teams des Vergleichsfahrzeugs automatisch identifiziert werden. Zudem können die SE-Teams nach Konzept- oder Bauteilleichtbau unterschieden werden.

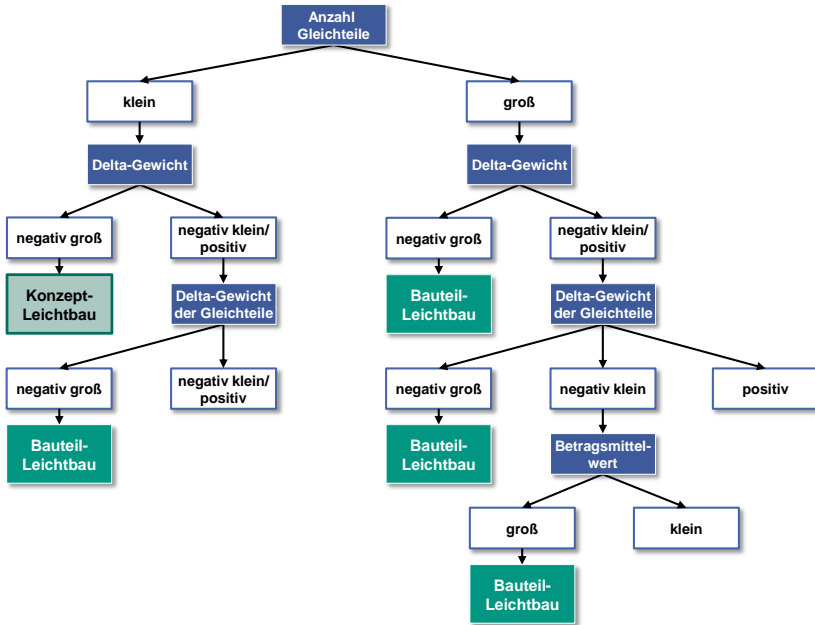


Abbildung 6.33: Logik zur Identifizierung von leichtbaurelevanten SE-Teams

Die Komponenten der identifizierten SE-Teams werden im nächsten Schritt genauer untersucht. Dazu sollen die Komponenten hinsichtlich der Aspekte Kraftflussverlauf, Werkstoffeigenschaften, Umgebungsbedingungen, Anforderungen, Fügungen, Fertigung, Einzelteile, Struktur und Lazy Parts bewertet werden. Aus diesen Bewertungen werden eine Benotung und ein Netzdiagramm automatisch erstellt und die Ergebnisse in einer Datenbank gespeichert.

Die vorgestellten Schritte Datenübersetzung, Modulvergleiche, SE-Team-Identifizierung und Komponentenanalyse wurden in einem Excel-Tool implementiert. Dadurch können Wettbewerbsfahrzeuge schnell und teilautomatisiert auf Leichtbaupotentiale analysiert werden. Konkrete Leichtbaupotentiale werden

am Ende des Prozesses in die Leichtbauideendatenbank übertragen, die im folgenden Abschnitt näher erläutert wird.

6.3.2.6 Projekt- und generationsübergreifendes Leichtbau-Ideenmanagement

Im Rahmen einer sechsmonatigen studentischen Abschlussarbeit (Zemke, 2019)¹³ wurde eine teilnehmende Beobachtung bei der BMW Group durchgeführt und vom Verfasser der vorliegenden Arbeit begleitet. Hierbei wurde der Bedarf nach einer projekt- und generationsübergreifenden Leichtbauideen-Datenbank identifiziert, ein entsprechendes Konzept entwickelt und prototypisch angewandt.

Die teilnehmende Beobachtung bei Gewichtsreduzierungsworkshops und die Befragung von Mitarbeitern der Gewichtsmanagementabteilung ergaben Optimierungspotentiale im Kontext des Wissensmanagements von Leichtbauideen. Diese sind im Folgenden aufgelistet:

- Einheitlichkeit (Projektabhängige Datenhaltung der Ideen)
- Transparenz (Ablage der Ideen dezentral, Zugriff beschränkt)
- Ideentransfer (Keine gesamthafte Übersicht aller Ideen)
- Redundanz (Parallel geführte Ideensammlungen)
- Ideenbeschreibung (Abkürzungen im Titel, Unvollständigkeit, etc.)

Diese Beobachtungen stellen jedoch keine Eigenheit der BMW Group dar, sondern beschreiben allgemeine Herausforderung des Wissensmanagements in der Produktentstehung (vgl. Probst et al., 2010, S. 1–11; Düchting, 2005).

Auf Basis dieser Erkenntnisse wurde ein Konzept erarbeitet, welches aus den in Abbildung 6.34 dargestellten Bausteinen besteht.

¹³ Co-betreute Abschlussarbeit

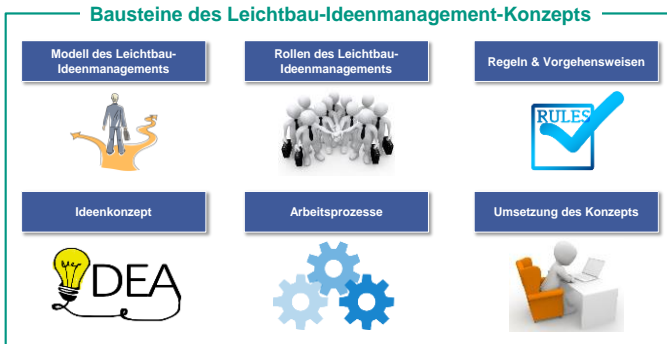


Abbildung 6.34: Bausteine des Leichtbau-Ideenmanagement-Konzepts

Die dargestellten Bausteine werden im Folgenden näher erläutert:

Modell des Leichtbau-Ideenmanagements

In der Literatur existieren verschiedene Modelle des Ideenmanagements, welche sich vornehmlich durch Verantwortlichkeiten und Arbeitsprozesse unterscheiden (Schat, 2017, S. 23–35). Unter Beachtung der Vor- und Nachteile (siehe Tabelle 6.2) wurde für das Leichtbau-Ideenmanagement eine Mischform aus zentralem und communitybasiertem Ideenmanagement gewählt. Vor allem die Vorteile hinsichtlich Transparenz, Einheitlichkeit und Eindeutigkeit führten zu dieser Entscheidung.

Tabelle 6.2: Vor- und Nachteile der Mischform aus zentralem und communitybasierten Modell nach Zemke (2019)¹⁴

Vorteile	Nachteile
Unternehmensweit erreichbar (Viele Mitarbeiter haben Zugriff)	Überblick über gesammelte Ideen kann schnell verloren gehen
Einheitliches Ideenmanagement	Fachkenntnis für Priorisierung
Zentrale Anlaufstelle	
Transparent, effizient, schnell	
Vorbewertung durch Mitarbeiter möglich	
Keine Ungleichbehandlungen	
Einfache Visualisierung der Kategorien	

¹⁴ Co-betreute Abschlussarbeit

Rollen des Leichtbau-Ideenmanagements

Die vorgeschlagenen Rollen des Leichtbau-Ideenmanagements orientieren sich an den sechs Rollen des Ideenmanagements nach Schat (2017, S. 13–22). Diese wurden auf vier Rollen zusammengefasst, die in Abbildung 6.35 dargestellt sind. Der Ideenmanager verantwortet dabei das gesamte Ideenmanagement, während die Gewichtsbeauftragten aus Fahrzeugprojekt und Entwicklungsbereich die Ideenverantwortung in ihren Bereichen innehaben. Ideengeber sind die Ersteller der Ideen und umfassen damit alle Mitarbeiter. Diese Ideen werden von jeweils geeigneten Ideenbearbeiter weiterentwickelt, wodurch ein Reifehub erreicht wird.

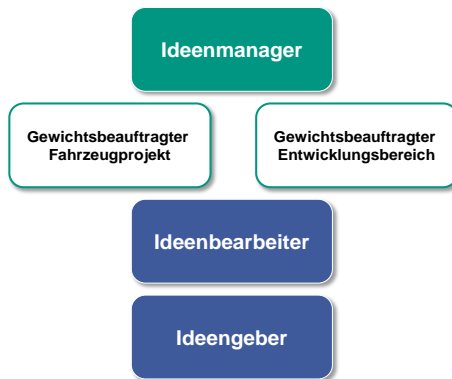


Abbildung 6.35: Rollenkonzept des Leichtbau-Ideenmanagements

Regeln & Vorgehensweisen

Ein funktionierendes Ideenmanagement benötigt definierte und eindeutige Regeln und Vorgehensweisen. Deshalb wurden für das vorliegende Ideenmanagement die wichtigsten W-Fragen definiert. So wurde festgelegt, was eine Idee ist, wo und wie diese eingereicht werden, wer Ideen einreichen und entscheiden darf, wie diese vergütet und wie diese beschrieben werden müssen. Gerade die Beschreibung der Ideen ist ein entscheidender Faktor für den Erfolg eines Ideenmanagements. Erst eine verständliche, umfassende und teilweise abstrahierte Ideenbeschreibung ermöglicht die Wiederverwendbarkeit einer Idee. Da dies mit Aufwand für den Ideengeber und -verantwortlichen verbunden ist, stellt dies eine besondere Herausforderung dar. Die Motivation der Mitarbeiter kann dabei unter anderem durch Anreizmodelle gesteigert werden, jedoch sollte die Hauptmotivation aus dem erlebbaren Nutzen eines Leichtbau-Ideenmanagements resultieren.

Ideenkonzept

Das entwickelte Ideenkonzept orientiert sich an der Funktionsweise von Datenbanken und baut auf der sogenannten Basis-Idee auf, die im Sinne von Eltern-Kind-Beziehungen den Part der Eltern darstellt (siehe Abbildung 6.36). Diese Basis-Idee beschreibt eine Idee fahrzeugspezifisch und unterstützt somit den Transfer der Idee über Fahrzeugprojekte hinweg. Die Basis-Idee wird aus Komponenten- und Lösungssicht beschreiben. Die Komponentensicht verortet die Idee in einem generischen Fahrzeug, anfangend vom Entwicklungsbereich bis hin zur betroffenen Komponente. Die Lösungssicht ermöglicht die Einordnung der Idee in die fünf Leichtbaustrategien und der jeweiligen Substrategien bis hin zum konkreten Lösungsprinzip. Von der Basis-Idee können fahrzeugspezifische Baureihen-Ideen als Kinder abgeleitet werden, die die Ideenbeschreibungen übernehmen und um fahrzeugspezifische Informationen angereichert werden. Durch dieses Ideenkonzept wird die Ideensuche unterstützt und das Neuanlegen bereits vorhandener Ideen reduziert.

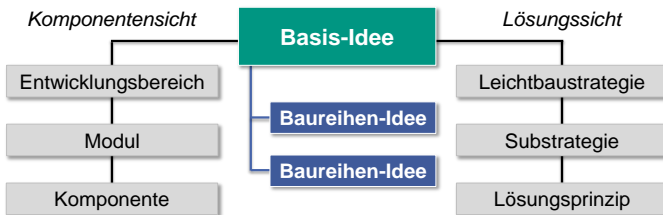


Abbildung 6.36: Ideenkonzept des Leichtbau-Ideenmanagements

Arbeitsprozesse

Im Zuge der Konzeptentwicklung wurden konkrete Arbeitsprozesse festgelegt, die sämtliche Schritte vom Einreichen einer Idee bis zu ihrer Entscheidung umfassen. Abbildung 6.37 fasst die detaillierten Arbeitsprozesse hinsichtlich der wichtigsten Prozessschritte übersichtlich zusammen. Der Prozess kann nach Basis-Idee und Baureihen-Idee unterteilt werden. Die Basis-Idee ist der Baureihen-Idee in der Regel vorgelagert und muss zunächst weiterentwickelt, freigegeben und bewertet werden. Darauf aufbauend kann ein Ideentransfer in konkrete Fahrzeugprojekte erfolgen, wodurch eine Baureihenidee entsteht. Eine Detailbewertung dieser Idee führt dann zur Umsetzung oder Ablehnung. Diese Informationen werden in der Baureihen-Idee dokumentiert und dienen als Anhaltspunkt für den weiteren Ideentransfer.

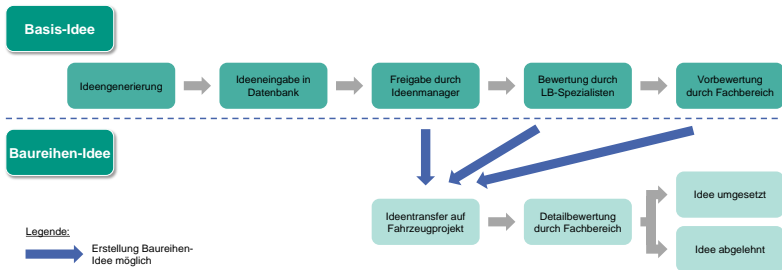


Abbildung 6.37: Prozess einer Leichtbauidée

Umsetzung des Konzepts

Die Umsetzung des Konzepts gliedert sich in die Entwicklung eines Daten(bank)-Modells und die Erstellung der jeweiligen Benutzeroberflächen. Die Entwicklung des Daten(bank)-Modells gliedert sich in die Definition der notwendigen Tabellen und deren jeweilige Beziehung untereinander über sogenannte Schlüssel. Dies mündet in einem Entity-Relationship-Modell, auf welches in dieser Arbeit jedoch nicht näher eingegangen wird. Des Weiteren wurden Entwürfe für Benutzeroberflächen gestaltet, um das Konzept des Leichtbau-Ideenmanagements beziehungsweise der Ideendatenbank greifbarer zu machen. Abbildung 6.38 stellt solch eine Benutzeroberfläche beispielhaft dar.

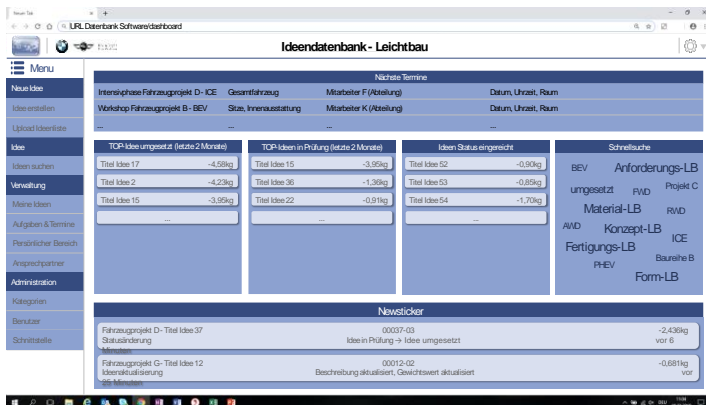


Abbildung 6.38: Benutzeroberfläche (Dashboard) der Leichtbauidéendatenbank (Abbildung enthält Beispielwerte)

Auf Basis des entwickelten Konzepts wurde ein erster Prototyp aufgebaut. Hierzu wurden bereits vorhandene Datenbanksysteme innerhalb des Unternehmens auf deren Eignung untersucht. Die Datenbank mit der höchsten Übereinstimmung wurde ausgewählt und hinsichtlich des entwickelten Konzepts bestmöglich angepasst. Die Anwendung des Prototyps in der Praxis führte bereits zu positiven Rückmeldungen der Erstanwender. Die vorab identifizierten Problemfelder (Einheitlichkeit, Transparenz, Ideentransfer, Redundanz und Ideenbeschreibung) konnten nach Aussage der Erstanwender durch die Ideendatenbank verbessert werden. Im Verlauf der Anwendung muss sich allerdings zeigen, ob das Leichtbau-Ideenmanagement auch wirklich gelebt wird. Wie bereits angedeutet, lebt solch eine Datenbank von mühsam aufgearbeiteten und beschriebenen Ideen. Die Arbeitsbereitschaft, die genehmigte Arbeitszeit, die Vorgaben der Führungskräfte und der persönlich empfundene Nutzen der Datenbank wird darüber entscheiden, ob das vorgeschlagene Konzept sein volles Potential entfalten kann.

6.3.3 Anwendungsszenarien

Wie bereits im Abschnitt über die Motivation und Kernidee beschrieben, können Gewichtschancen und -risiken durch die vorgestellten Produktcharakteristiken und Teilmethoden bestimmt werden. Diese stellen eine wichtige Einflussgröße bei der Quantifizierung von Auslegungs- und Zielgewichten dar.

Durch die empfohlene projekt- und phasenabhängige Bestimmung der Gewichtschancen und -risiken entstehen konkrete Gewichtsszenarien. Hierbei muss beachtet werden, dass die ermittelten Gewichtswerte immer unsicherheitsbehaftet sind. Dies begründet sich durch die getroffenen Annahmen, die vorliegende Komplexität und die volatilen Randbedingungen.

Bei der Zielableitung auf Basis dieser Gewichtsszenarien muss zudem darauf geachtet werden, dass die zugrundeliegenden Annahmen transparent dokumentiert werden. Die aktuell gültigen Randbedingungen und damit verbundenen Gewichtschancen und -risiken müssen dabei eingepflegt und angemessen berücksichtigt werden. Dies ist für die Akzeptanz der Ziele und die später im Projektverlauf folgenden Zielvalidierungen von großer Bedeutung.

6.4 Methode zur betriebswirtschaftlichen Gewichtsbewertung

In diesem Kapitel wird eine Methode zur betriebswirtschaftlichen Gewichtsbewertung vorgestellt. Hierbei wird auf die Motivation, die Kernidee und die Umsetzung der Methode, aber auch auf die Validierungsergebnisse und mögliche Anwendungsszenarien eingegangen. Diese Methode wurde maßgeblich im Rahmen der Abschlussarbeit von Plotho (2018)¹⁵ entwickelt.

6.4.1 Motivation und Kernidee

Im Stand der Forschung wurden bereits zahlreiche Wechselwirkungen des Fahrzeuggewichts mit Fahrzeugeigenschaften beleuchtet, die wiederum die Zahlungsbereitschaft des Kunden für das Fahrzeug mitbestimmen. Dem gegenüber beeinflussen technische Änderungen mit Gewichtsauswirkung in der Regel die Herstellkosten und Einmalaufwände, als Beispiel können hier leichtbaugetriebene Materialsubstitutionen genannt werden (Weck, 2006). Hieraus können Abhängigkeiten zwischen Fahrzeuggewicht und Fahrzeugkosten identifiziert werden.

Das Ziel der Methode ist eine Analyse dieser Abhängigkeiten und die Ableitung eines konkreten € pro kg Werts. Dieser € pro kg Wert gibt exakt die Kosten in Euro an, die dem Unternehmen durch eine Fahrzeuggewichtserhöhung um ein Kilogramm entstehen. Umgekehrt repräsentiert dieser Wert die Obergrenze der betriebswirtschaftlich sinnvollen Leichtbaukosten für ein Kilogramm Gewichtsreduktion. Abbildung 6.39 stellt mögliche Leichtbaukosten abhängig von der Position in einem heckangetriebenen Fahrzeug dar.

¹⁵ Co-betreute Abschlussarbeit

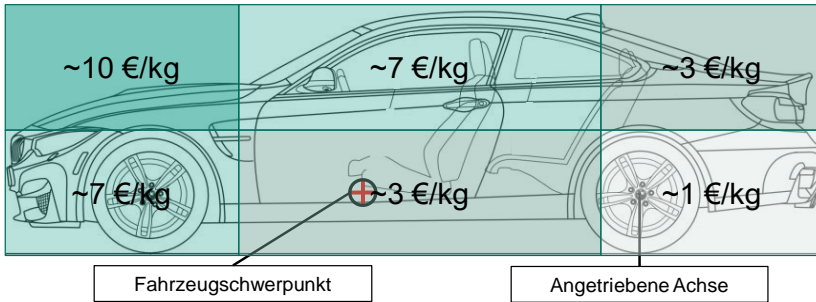


Abbildung 6.39: Mögliche Leichtbaukosten nach Position im Fahrzeug abgeleitet aus Ellenrieder et al. (2017), Fahrzeugbild aus BMW AG (2018)

Da die Automobilindustrie gemäß der Produktgenerationsentwicklung stark durch Plattform-, Kommunalitäts- und Baukastenkonzepte geprägt ist, gibt es meist keine kontinuierliche Abhängigkeit von Gewicht und Kosten. Als Beispiel kann die Bremsenkonfiguration angeführt werden. Hier bietet der Baukasten eine festgelegte Anzahl an unterschiedlich leistungsfähigen Bremsen und entsprechend aufsteigender Herstellkosten. Das zulässige Fahrzeuggewicht ist dabei neben Bremskühlung und Fahrleistung eine der dimensionierenden Auslegungsgrößen (Bill & Dallmer, 2010). Übertritt das zulässige Fahrzeuggewicht ein bestimmtes Auslegungsgrenzwert der Bremse, muss eine leistungsfähigere Bremse eingebaut werden. Daraus ergibt sich eine Sprungfunktion zwischen Gewicht und Kosten. Dieses Beispiel verdeutlicht, dass ein konkreter € pro kg Wert auf der Basis der jeweiligen Gewichtssituation eines Fahrzeugprojekts individuell bestimmt werden müsste.

Die vorgestellte Methode soll deshalb auf der einen Seite einen pauschalen € pro kg Wert für konzeptionelle Entscheidungen in der frühen Phase der Automobilentwicklung liefern. Auf der anderen Seite soll die Methode in der Lage sein, einen fahrzeugspezifischen € pro kg Wert auszugeben, auf dessen Basis in der späten Phase betriebswirtschaftlich optimale Entscheidungen getroffen werden können.

Dazu werden im Folgenden die Abhängigkeiten zwischen Gewicht und Kosten analysiert und quantifiziert. Zudem wird eine Anrechnungslogik für den fahrzeugspezifischen € pro kg Wert entwickelt.

6.4.2 Umsetzung

Die Herleitung eines pauschalen wie fahrzeugspezifischen € pro kg Werts erfolgt durch die Analyse der wichtigsten Abhängigkeiten zwischen Gewicht und Kosten. Diese wurden in die Themenfelder Fahrleistung, Total Cost of Ownership (TCO), elektrische Reichweite, Emissionsregulatorik, Auslegung sowie Fahrodynamik eingeteilt und werden im Folgenden diskutiert.

Fahrleistung

Die Zahlungsbereitschaft für Leichtbau ermittelt sich aus der Zahlungsbereitschaft der Kunden für die Beschleunigung von 0-100km/h und dem Gewichtseffekt auf die Beschleunigung. Die entsprechenden Formeln wurden bereits in Kapitel 2.2.1 vorgestellt. Die Kombination dieser Formeln führt zu folgender Gleichung für den Leichtbaufaktor LF_{FL} :

$$LF_{FL} \left[\frac{\text{€}}{\text{kg}} \right] = 0,892 \cdot \left(\left(\frac{P}{m_{alt} \cdot 2,20462} \right)^{-0,805} - \left(\frac{P}{m_{neu} \cdot 2,20462} \right)^{-0,805} \right) [s] \quad \text{Gl. 10}$$

$$\cdot \frac{\text{Zahlungsbereitschaft pro Sekunde} \left[\frac{\text{€}}{\text{s}} \right]}{m_{alt} - m_{neu} [\text{kg}]}$$

Total Cost of Ownership

Die TCO-Einsparungen durch Leichtbau hängen von der Verbrauchsreduktion durch Leichtbau (siehe Kapitel 2.2.1) ab. Kombiniert mit den länderabhängigen Kraftstoff- beziehungsweise Strompreisen, der durchschnittlichen Fahrleistung und etwaigen Steuernachteilen bei erhöhten CO₂-Emissionen ergibt sich ein Leichtbaufaktor LF_{TCO} . Für eine pauschale Berechnung des Leichtbaufaktors muss demnach eine mittlere Absatzverteilung in den verschiedenen Regionen der Welt bestimmt werden.

Elektrische Reichweite

Wie in Kapitel 2.2.1 beschrieben, existiert eine Zahlungsbereitschaft des Kunden für die Reichweite von elektrischen Fahrzeugen. Diese nimmt mit großen Grundreichweiten stark ab. Da der Leichtbau den Energieverbrauch des Fahrzeugs senkt, entsteht hierdurch eine Zahlungsbereitschaft für Leichtbau im Unternehmen. Aus diesem Zusammenhang lässt sich der Leichtbaufaktor LF_{RW} wie folgt berechnen:

$$LF_{RW} \left[\frac{\text{€}}{\text{kg}} \right] = 100 \cdot \left(\frac{\text{Batteriekapazität}}{\text{Verbrauch} - \text{Verbrauchsreduktion}} - \frac{\text{Batteriekapazität}}{\text{Verbrauch}} \right) \left[\frac{\text{km}}{\text{kg}} \right] \cdot 8638,56 \cdot (\text{Reichweite}_{\text{alt}})^{-0,96} \left[\frac{\text{€}}{\text{km}} \right]. \quad \text{Gl. 11}$$

Umgekehrt ermöglicht der Leichtbau die Reduktion von Batteriezellen bei konstanter Reichweite. Somit können Herstellkosten eingespart werden und damit ein weiterer Leichtbaufaktor LF_{Zell} gebildet werden:

$$LF_{Zell} \left[\frac{\text{€}}{\text{kg}} \right] = \text{Reichweite}[\text{km}] \cdot \text{Verbrauchsreduktion} \left[\frac{\text{kWh}}{\text{km} \cdot \text{kg}} \right] \cdot \text{Zellkosten} \left[\frac{\text{€}}{\text{kWh}} \right]. \quad \text{Gl. 12}$$

Bei der Berechnung des gesamten Leichtbaufaktors sollten die Werte für LF_{RW} und LF_{Zell} verglichen und der kleinere Wert herangezogen werden. Ist die Zahlungsbereitschaft für Reichweite höher als die Zellkosten, sollte der Speicher vergrößert werden. Wenn die vorhandenen Plattformen dies aus Bauraumgründen nicht zulassen, kann der Wert für LF_{RW} auch bei geringerem LF_{Zell} verwendet werden.

Emissionsregulatorik

Die Zahlungsbereitschaft für Leichtbau leitet sich aus Strafzahlungen bei überschrittenen Emissionsgrenzwerten ab. Die daraus abgeleiteten Leichtbaufaktoren können deshalb nur angewandt werden, wenn bereits Strafzahlungen anfallen. Da die Regulatorik in den drei großen Märkten EU, USA und China stark variiert, wird diese im Folgenden einzeln betrachtet.

Der CO₂-Flottengrenzwert in der EU berechnet sich ab dem Jahr 2020 folgendermaßen (Puls, 2013):

$$\text{Grenzwert}_{2020} = 95 \text{ g} + 0,0333 \frac{\text{g}}{\text{kg}} \cdot (\emptyset\text{Flottengewicht}_{\text{OEM}} - \emptyset\text{Flottengewicht}_{\text{EU}}). \quad \text{Gl. 13}$$

Unter der Annahme, dass das durchschnittliche EU-Flottengewicht vom einzelnen OEM kaum verändert wird, erhöht sich der CO₂-Grenzwert mit dem 0,0333-fachen des eigenen Flottengewichts. Da dieser Faktor in etwa dem Leichtbaueffekt entspricht, kann in der EU für Verbrennerfahrzeuge nahezu keine Zahlungsbereitschaft für Leichtbau abgeleitet werden. Da elektrifizierte Fahrzeuge in dieser Gesetzgebung als emissionsfrei gelten, ist der Leichtbaufaktor LF_{EU} dort sogar negativ. (Puls, 2013)

In den USA existieren die folgenden drei Emissionsgesetzgebungen: Das GHG Emission Gesetz, die CAFE Standards und die Gas Guzzler Tax (vgl. National Highway Traffic Safety Administration, 2010; Environmental Protection Agency, 2018). Alle drei Gesetze führen bei Grenzwertüberschreitungen zu Strafzahlungen oder Credit-Käufen. Über die Verbrauchsreduktion durch Leichtbau bei einem aufstandsflächenbasierten Grenzwert (GHG und CAFE) lässt sich jeweils ein positiver Leichtbaufaktor ermitteln. Für die konkrete Berechnung sei hierbei auf die betreute Abschlussarbeit von Plotho (2018)¹⁶ verwiesen. Da die Gesetzgebungen kumulativ wirken, müssen demnach die jeweiligen Leichtbaufaktoren LF_{USA} aufsummiert werden. Leichtbau bei vollelektrifizierten Fahrzeugen hat in der US-Gesetzgebung aktuell keinen Einfluss auf die Grenzwerte.

In China basieren die Verbrauchswerte auf stufenweisen Schwungmassenklassen (SMK) im NEFZ-Zyklus (International Council of Clean Transportation, 2016). Somit steigt der erlaubte Verbrauchsgrenzwert stufenweise mit dem Fahrzeuggewicht. Durch eine Linearisierung lässt sich daraus ein Leichtbaufaktor LF_{China} berechnen, der für elektrifizierte Fahrzeuge ähnlich zur EU negativ ist.

Mithilfe einer gemittelten Absatzverteilung kann aus den 3 länderspezifischen Leichtbaufaktoren ein übergreifender Wert ermittelt werden.

Auslegung und Fahrdynamik

In diesem Abschnitt wird der Nutzen des Leichtbaus für Auslegung und Fahrdynamik untersucht. Die Quantifizierung des Leichtbaunutzens ist dabei nicht trivial, da der Gewichtseinfluss auf Auslegung (siehe Bremsenbeispiel) und Fahrdynamik sehr fahrzeugabhängig ist.

Die Quantifizierung des Leichtbaunutzens auf die Auslegung wird im Folgenden durch die Betrachtung von sekundären Gewichtseffekten umgesetzt. Trautwein (2011) konnte im Rahmen seiner Analyse von aufeinanderfolgenden Fahrzeuggenerationen einen Sekundäreffekt von 37 % bestimmen. Dieser Wert entspricht etwa dem Mittelwert weiterer Literaturquellen (vgl. Braess, 1999; Malen et al., 2013). Unter der Prämisse der Anforderungsgleichheit beinhaltet demnach eine Gewichtserhöhung von 100 kg Sekundäreffekte in Höhe von etwa 37 kg. Die Kosten des Sekundäreffekts einer primären Gewichtserhöhung können folglich zu einem Leichtbaufaktor $LF_{Auslegung}$ verrechnet werden. Die Höhe dieser Kosten muss

¹⁶ Co-betreute Abschlussarbeit

je nach Produktlinie und eingesetzten Materialien abgeschätzt werden. Die Berechnung des Leichtbaufaktors erfolgt nach

$$LF_{Auslegung} \left[\frac{\text{€}}{\text{kg}} \right] = \frac{0,37}{1 - 0,37} \cdot \emptyset \text{Kosten pro kg} \left[\frac{\text{€}}{\text{kg}} \right] = 0,59 \cdot \emptyset \text{Kosten pro kg} \left[\frac{\text{€}}{\text{kg}} \right]. \quad \text{Gl. 14}$$

In den beschriebenen Sekundäreffekten sind bereits Maßnahmen zur Fahrdynamikverbesserung enthalten. Dennoch wirken sich ein höheres Gesamtgewicht, ein hoher Schwerpunkt, eine ungünstige Achslastverteilung und hohe ungefederte Massen immer negativ auf die Fahrdynamik aus. Dies ist auch durch technische Maßnahmen nur bedingt ausgleichbar. Durch die subjektive Wahrnehmung der Fahrdynamik und bislang kaum vorhandener Untersuchungen zu Zahlungsbereitschaften der Kunden für Fahrdynamik, stellt die analytische Berechnung eines Leichtbaufaktors eine große Herausforderung dar. Es wird daher vorgeschlagen, den Leichtbaufaktor $LF_{Auslegung}$ in Abstimmung mit der Fahrdynamik-Abteilung des Unternehmens fahrzeugbezogen leicht nach oben zu korrigieren.

Gesamteffekt

Der gesamte Leichtbaufaktor errechnet sich aus den Einzelfaktoren folgendermaßen:

$$LF_{total} = LF_{FL} + LF_{TCO} + LF_{RW/zell} + LF_{EU} + LF_{USA} + LF_{China} + LF_{Auslegung}. \quad \text{Gl. 15}$$

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass insbesondere die Auslegung einer starken Sprungfunktion folgt. Dies gilt allerdings auch für weitere Themenfelder. So werden die Beschleunigung (0-100km/h) und der Verbrauch vom Hersteller üblicherweise nur auf eine Nachkommstelle gerundet angegeben, die elektrische Reichweite sogar nur in ganzen Zahlen. Hieraus entstehen Sprungfunktionen für die kundenrelevanten Themenfelder Fahrleistung, TCO und elektrische Reichweite. In Vertriebsmärkten mit Schwungmassenklassen wie den USA oder China stellt die Emissionsregulatorik ebenfalls eine Sprungfunktion dar.

Hierdurch wird deutlich, dass eine optimale Steuerung der Leichtbaukosten nur durch individuell berechnete € pro kg Werte für ein spezielles Fahrzeug unter den jeweiligen Randbedingungen erfolgen kann. Für die Berechnung müssen jedoch die aktuellen Fahrzeugdaten wie Gewicht, Verbrauch, Leistung oder Reichweite mit hoher Genauigkeit vorliegen. Dies ist erst zum Ende eines Fahrzeugprojekts der Fall. Aus diesem Grund wurde ein projektphasenabhängiges Anrechnungssystem

entwickelt, welches in Abbildung 6.40 dargestellt ist. Dieses erstreckt sich von pauschalen € pro kg Werten bis hin zu einer exakten Anrechnung der Sprungstellen zum Ende der Fahrzeugentwicklung.



Abbildung 6.40: Qualitative Übersicht der Anrechnung von Sprungfunktionen unter sinkender Unsicherheit im Fahrzeugentwicklungsprozess

Zur automatisierten Berechnung der fahrzeugspezifischen € pro kg Werte wurde ein Excel-Tool entwickelt. Dieses Tool ermöglicht die Eingabe und Pflege von Fahrzeuggewichten und relevanten Randbedingungen wie Auslegungsgrenzen. Auf Basis dieser Information und dem phasenabhängigen Unsicherheitsniveau wird ein angepasster € pro kg Wert berechnet und empfohlen. Auf dieser Basis können vorliegende Leichtbaumaßnahmen bewertet und gegebenenfalls entschieden werden.

6.4.3 Validierung

Die Validierung dieser Methode ist nicht direkt möglich, da es keine „korrekten“ Validierungswerte gibt. Zudem unterliegen viele zentrale Eingabegrößen der Methode der Geheimhaltung, da es sich um sensible Kostendaten handelt.

Es kann lediglich eine indirekte Validierung durchgeführt werden. Dafür werden Leichtbaufaktoren für verschiedene Fahrzeugklassen nach dem vorgestellten Vorgehen berechnet. Die Ergebnisse werden in Abbildung 6.41 mit veröffentlichten Literaturwerten verglichen (Ellenrieder et al., 2017, S. 99; Heuss et al., 2012).

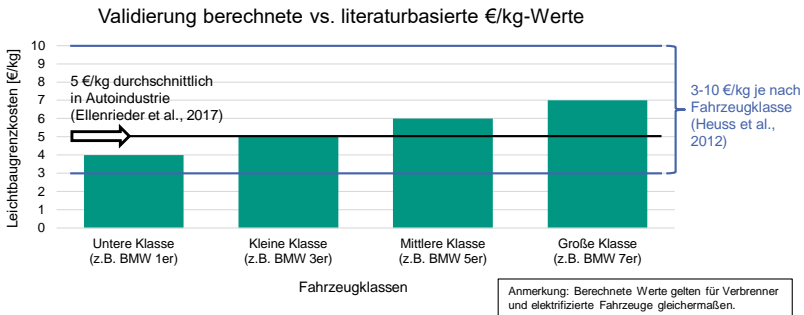


Abbildung 6.41: Vergleich der berechneten €/kg-Werte zu Literaturwerten aus Ellenrieder et al. (2017, S. 99) und Heuss et al. (2012)

Es zeigt sich, dass die Bottom-Up berechneten Werte im Bereich von bisher veröffentlichten Leichtbaufaktoren liegen. Die berechneten Leichtbaugrenzkosten für die großen Fahrzeugklassen unterschreiten jedoch manche Literaturwerte deutlich. Die Bottom-Up Untersuchung hat hierbei gezeigt, dass der Leichtbaunutzen meist unabhängig vom Marktsegment ist. Die physikalischen Abhängigkeiten sind bei allen Fahrzeugen ähnlich. Lediglich die Auslegung zeigt durch die höherwertigen Materialien und Bauteile in großen Fahrzeugklassen einen erhöhten Leichtbaufaktor. Da die bisherigen Leichtbaukosten meist auf Erfahrungswerten aus der Praxis stammen, ist der Unterschied dort auf Grund von Kostendruck in den unteren Produktlinien und Technologieführerschaft in den höheren Produktlinien deutlicher ausgeprägt.

Zusammenfassend lässt sich jedoch festhalten, dass die Übereinstimmung auf ein sinnvolles Modell schließen lässt. Die Abweichungen sind zudem gut erklärbar. Da die Eingangsgrößen des Modells durchgängig auf Literaturwerten, gesetzliche Vorgaben und physikalische Grundprinzipien basieren, werden die Eingabegrößen als valide angesehen. Zudem erfuhr die Herleitungsmethode eine hohe Akzeptanz innerhalb des Unternehmens, was als weitere erfolgreiche Validierung der Methode verstanden werden kann.

6.4.4 Anwendungsszenarien

Die detaillierte Analyse der Abhängigkeiten von Gewicht und Kosten hat die zugrunde liegende Komplexität verdeutlicht. Der Nutzen von Leichtbau kann je nach Fahrzeugsituation völlig unterschiedlich sein. Eine Gewichtsreduktion bei

elektrifizierten Fahrzeugen kann je nach Gesetzgebung sogar negative betriebswirtschaftliche Folgen haben. Wie bereits erläutert, wurde aus diesem Grund eine Anrechnungslogik entwickelt, die die Berechnung pauschaler Leichtbaufaktoren in der Strategie- und Konzeptphase und fahrzeugspezifischer Faktoren am Ende der Serienentwicklungsphase ermöglicht.

Es sei darauf hingewiesen, dass die Leichtbaufaktoren in der Praxis immer einen unsicherheitsbehafteten Wert darstellen. Dies liegt zum einen an den zugrunde liegenden Annahmen, die in Kapitel 6.4.2 erläutert wurden. Zum anderen ist die Verwendung von fahrzeugspezifischen Leichtbaufaktoren detailliert betrachtet immer noch zu oberflächlich. Da Motorisierungen, Ausstattungsvarianten oder Getriebearten innerhalb eines Fahrzeugprojekts zu deutlichen Gewichtsunterschieden führen, müsste auch für diese Varianten ein eigenständiger Leichtbaufaktor bestimmt werden. Hier muss ein sinnvoller Kompromiss aus Aufwand und Nutzen gefunden werden, der zu der vorgestellten Anrechnungslogik geführt hat.

Abschließend sei erwähnt, dass die € pro kg Werte eine betriebswirtschaftlich sinnvolle Grenze zur Entscheidung von Leichtbaumaßnahmen darstellen. Demnach sollten Leichtbaumaßnahmen unter diesem Grenzwert auch bei finanziell angespannten Projekten umgesetzt werden. Abbildung 6.42 visualisiert diese Situation an einem fiktiven Beispiel. So existiert oftmals ein Zielkonflikt zwischen Gewicht und Kosten. Durch den € pro kg Wert werden die Zielgrößen direkt verknüpft. Hieraus folgt, dass Leichtbaumaßnahmen kleiner oder gleich dem Leichtbaukostengrenzwert selbst bei Kostenzielüberschreitungen durchgeführt werden sollten. Eine Nichtumsetzung der Maßnahmen führt zu höheren Kosten beziehungsweise Umsatzeinbußen durch die Auswirkungen des Mehrgewichts.

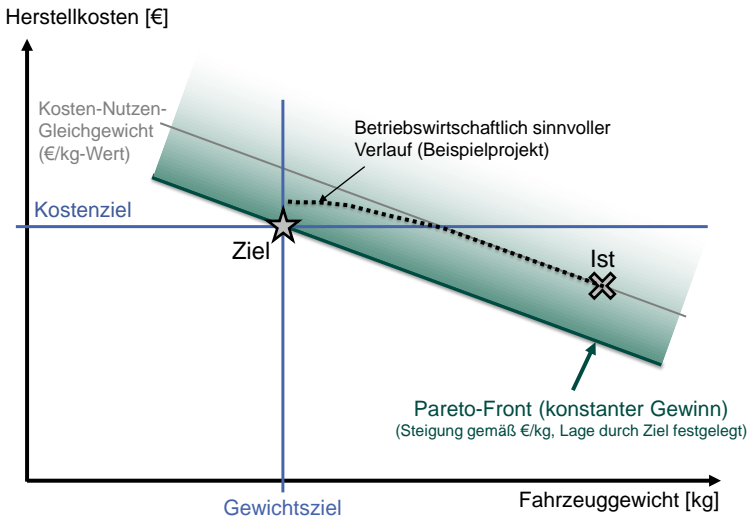


Abbildung 6.42: Pareto-Front zur Visualisierung betriebswirtschaftlich sinnvoller Leichtbauentscheidungen

Diese Geisteshaltung erfordert seitens der Gewichtsmanagementabteilung eine transparente und beständige Kommunikation des Leichtbaunutzens an die Projektleitung. Diese Kommunikation kann durch die detaillierte Herleitung des Leichtbaufaktors in diesem Abschnitt mit stichhaltigen Erklärungen unterstützt werden.

6.5 Fazit

In diesem Abschnitt wurden vier Methoden zur systematischen Quantifizierung von Auslegungs- und Zielgewichten vorgestellt. Die Methoden umfassen die Bestimmung von Gewichtsunsicherheiten, Gewichtsprognosen, Gewichtsrisiken und eine betriebswirtschaftliche Gewichtsbeurteilung. Die Methoden wurden dabei umfassend beschrieben, indem auf Kernidee, Umsetzung, Validierung und Anwendungsszenarien eingegangen wurde. In Verbindung mit dem zuvor entwickelten Framework kann hiermit eine Modellierung von Teilzielsystemen für Gewicht erfolgen. Eine umfassende Validierung sowie eine beispielhafte Anwendung der Gesamtmethodik folgt im nächsten Kapitel.

7 Validierung und Anwendung der Methodik

In diesem Kapitel wird die entwickelte Methodik systematisch validiert und schließlich an einem konkreten Fahrzeugprojekt exemplarisch angewandt. Aus den Ergebnissen werden nachfolgend weitere Optimierungspotentiale abgeleitet.

7.1 Validierung der Methodik

Die Validierung einer Methodik umfasst meist mehrere Schritte, da eine Methodik in der Regel aus mehreren Elementen besteht. Diese Elemente können Methoden Richtlinien, Prozesse oder Tools umfassen (siehe Abbildung 5.2).

In der vorliegenden Arbeit wurden zunächst die grundlegenden Aufgaben des Gewichtsmangements anhand des iPeM zusammengetragen und daraus Anforderungen abgeleitet. Diese Anforderungen konnten durch eine umfassende Literaturrecherche weiter konkretisiert und durch die Deskriptive Studie I (Teilnehmende Beobachtung, Interviews, Fragebogen) abgerundet werden. Auf Basis dieser Anforderungen wurde zunächst der grundsätzliche Bedarf nach einer Methodik zur Modellierung von robusten Teilzielsystemen für Gewicht abgeleitet.

Im nächsten Schritt wurde das Grundgerüst der Methodik definiert, indem ein Framework für Gewichtsziele aus den Anforderungen abgeleitet wurde. Zudem wurde dieses Framework in den PEP integriert und ein entsprechender Prozess beschrieben. Da Framework und Prozess direkt aus den Anforderungen abgeleitet wurden, konnte in Kapitel 1 bereits eine Validierung der enthaltenen Framework- und Prozessbausteine stattfinden.

Zur Quantifizierung der Gewichtsziele, die in Framework und Prozess qualitativ beschrieben wurden, wurde im nächsten Schritt ein Methodenset entwickelt. Dieses Methodenset besteht aus mehreren Einzelmethoden, deren Nutzen sich aus den Anforderungen ableitet. Diese Einzelmethoden konnten bereits in Kapitel 6 einzeln validiert werden. So konnte beispielsweise die Methode zur Gewichtsabschätzung anhand realer Fahrzeugdaten validiert werden. Ähnlich verhält es sich mit den anderen drei Methoden.

Somit lässt sich festhalten, dass die Elemente der Methodik bereits durch die starke Anforderungsorientierung beziehungsweise durch reale Fahrzeugdaten validiert werden konnten. Abschließend ist noch eine Validierung des Gesamtsystems beziehungsweise der Gesamtmethodik notwendig, um die Leistungsfähigkeit des finalen Produkts sicherzustellen.

Die Validierung einer Methodik in der Produktentwicklung stellt eine große Herausforderung dar. So gibt es in der wissenschaftlichen Community der Produktentwicklung noch immer keinen eindeutigen Konsens darüber, welche Validierungsmethoden zulässig sind (Gericke et al., 2017). Dies liegt vor allem darin begründet, dass jede Produktentstehung in realen Unternehmen einzigartig und individuell ist (Albers, 2010). Somit entziehen sich Produktentstehungsprozesse einer direkten Vergleichbarkeit. Die Auswirkung einer Methoden- oder Prozessanpassung ist deshalb nicht direkt quantifizierbar.

Die Validierung einer Methodik kann daher nur indirekt über Experteneinschätzungen, Argumentationen, Fallstudien oder Laborstudien erfolgen (Blessing & Chakrabarti, 2009). Solch eine Laborstudie wurde im Rahmen dieser Arbeit bei der Validierung des TWA angewandt. Die Validierung der entwickelten Methodik kann jedoch nicht auf diese Weise erfolgen, da die Gewichtsmanagementprozesse in der Automobilindustrie eine hohe Vernetzung mit dem PEP aufweisen. Eine Reduktion dieser Aktivitäten auf ein Laborumfeld würde die Komplexität des Gewichtsmanagements zu stark reduzieren.

Aus diesen Gründen wird die Methodik im Folgenden zunächst argumentativ validiert, indem bestehende Modelle wie das iPeM oder die Ziel-Beurteilungsdimensionen von Ebel (2015) zur Validierung herangezogen werden. Aus diesen etablierten Modellen lassen sich Kriterien für eine erfolgreiche Methodik zur Modellierung von TZS-G ableiten. Diese Kriterien können zur Validierung der entwickelten Methodik herangezogen werden. Neben der argumentativen Validierung wird darüber hinaus die Anwendung der Methodik im industriellen Umfeld beschreiben und im Sinne einer Validierung ausgewertet.

7.1.1.1 Validierungskriterien aus dem integrierten Produktentstehungsmodell an die Methodik

Im Kapitel 2.2.2 wurden die Aufgaben des Gewichtsmanagements anhand des iPeM dargestellt. Dabei konnte die Aktivität *Gewicht managen* als Teilaktivität von *Projekte managen* identifiziert werden. Abbildung 7.1 verdeutlicht, dass eine umfassende Teilaktivität wie *Gewicht managen* ebenfalls alle Aktivitäten der Problemlösung (SPALTEN) durchlaufen sollte. Die gilt vor allem für die Quantifizierung von Gewichtszielen, die eine Kernaktivität des

Gewichtsmagements darstellt. Nachfolgend wird eine argumentative Validierung der entwickelten Methodik zur Zielableitung durchgeführt, indem überprüft wird, ob die Methodik alle Aktivitäten der Problemlösung hinreichend adressiert.

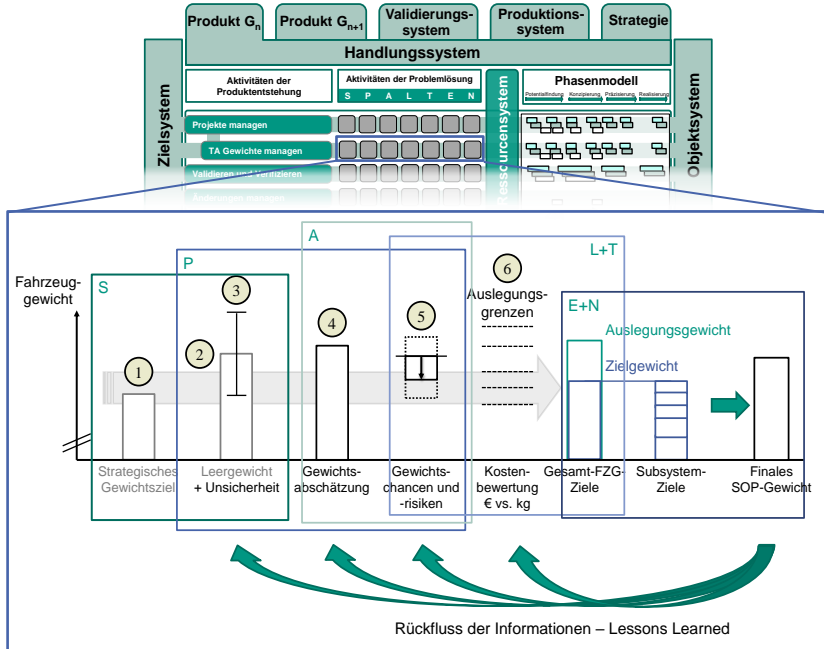


Abbildung 7.1: Vorgehen zur Zielableitung hinsichtlich der Aktivitäten der Problemlösung

In der Abbildung ist zu erkennen, dass alle Aktivitäten der Problemlösung im Vorgehen zur Zielableitung berücksichtigt wurden. Die Situationsanalyse basiert vornehmlich auf der Ermittlung des aktuellen Fahrzeuggewichts und des strategischen Gewichtsziels. Die Methode zur Bestimmung der Gewichtsunsicherheiten gibt hierbei einen wichtigen Input hinsichtlich der Genauigkeit der aktuellen Fahrzeuggewichtsangabe. Diese Information ist zudem eine Kerninformation für die Problemeingrenzung. Indem eine zusätzliche Gewichtsabschätzung sowie Chancen und Risiken betrachtet werden, kann auf Basis der Ist-Ziel-Lücke eine Aussage über die Gewichtsproblematik eines Fahrzeugprojekts getroffen werden. Im Sinne der alternativen Lösungen kann nun über Konfigurationsänderungen (abbildbar über die Gewichtsabschätzung) und andere Gewichtsmaßnahmen diskutiert werden. Hierzu können Leichtbaumethoden

angewandt und bestehende Maßnahmen aus der Leichtbaudatenbank herangezogen werden. Auf dieser Basis kann eine Lösungsauswahl erfolgen, die auch eine Anpassung des Gewichtsziels nach sich ziehen kann. Ein zentrales Auswahlkriterium ist dabei die Kostenauswirkung der gewählten Lösung. Hierbei unterstützt die Methode zur betriebswirtschaftlichen Gewichtsbeurteilung. Die Tragweitenanalyse wird dadurch ebenfalls unterstützt, indem beispielsweise die Auswirkung auf die Fahrzeugauslegung untersucht wird. Die resultierende Lösung wird folglich dem Projektleiter zur Entscheidung vorgelegt und diese dann umgesetzt. Die durchgeführten Aktivitäten führen fortwährend zu Informationen, die im Sinne des Lernens an die Methodenentwicklung zurückgespielt werden.

Es sei darauf verwiesen, dass die Methoden nicht trennscharf den Aktivitäten der Problemlösung zugewiesen werden können. Dennoch zeigt sich, dass alle Aktivitäten durch die Methoden adressiert werden. Im Sinne der Validierung kann daraus gefolgert werden, dass die Vorgehensweise zur Zielableitung umfassend modelliert wurde. Dies ist die Basis für eine erfolgreiche Anwendung der Methodik.

Es hat sich zudem in Kapitel 2.2.2 gezeigt, dass das Gewicht und damit das Gewichtsmanagement in nahezu allen Aktivitäten der Produktentstehung berücksichtigt werden sollte. Hieraus leitet sich ein weiteres Kriterium für die Validierung der entwickelten Methodik ab. So sollte eine erfolgreiche Methodik zur Modellierung von robusten TZS-G die gewichtsrelevanten Aspekte der Aktivitäten der Produktentstehung abdecken. Die Anwendungsgebiete der in der Methodik enthaltenen Methoden und Prozesse wurden hierzu in Abbildung 7.2 den jeweiligen Aktivitäten zugeordnet.

Hierbei zeigen sich auf den ersten Blick die großflächigen Anwendungsgebiete der vier vorgestellten Einzelmethoden. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass die Methoden nur Teilaspekte der Elemente in der Aktivitätenmatrix unterstützen. Die Größe der eingefärbten Aktivitäten stellt kein Indikator für den jeweiligen Leistungsumfang der Methode dar. Im Folgenden soll kurz auf den Leistungsumfang der vier Methoden eingegangen werden.

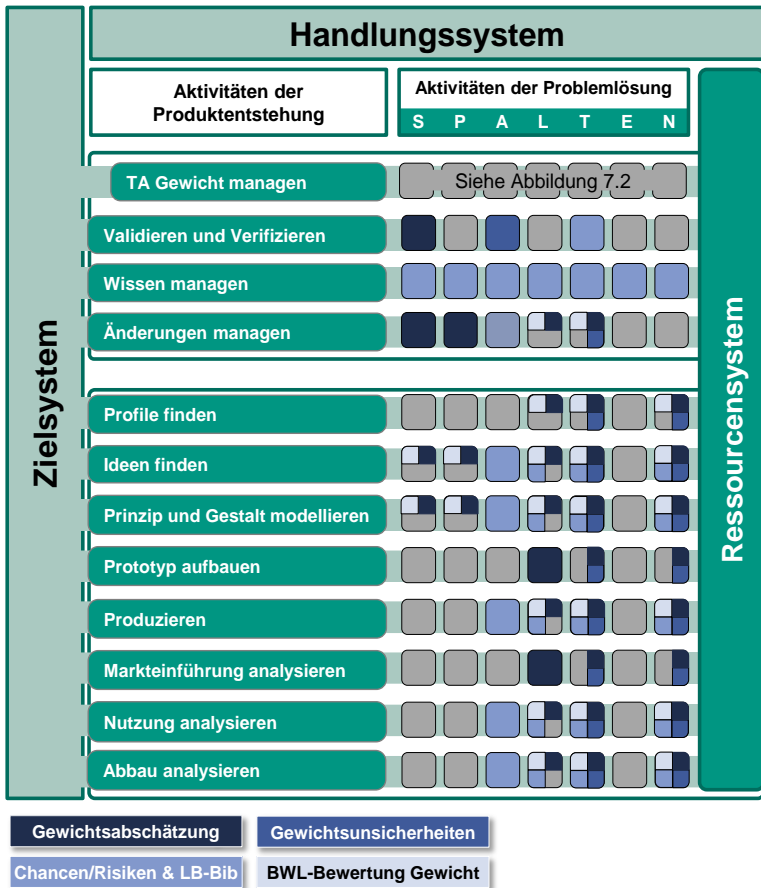


Abbildung 7.2: Einordnung der entwickelten Methoden in die Aktivitätenmatrix des iPeM

Die Methode zur Gewichtsabschätzung berücksichtigt alle Aktivitäten hinsichtlich der technischen Lösungen und deren Tragweite auf das Fahrzeuggewicht. Diese Gewichtsschätzung kann wiederum zur Situationsanalyse und Problemeingrenzung bei neuen Konzepten, anstehenden Änderungen oder Validierungen verwendet werden.

Die Methode zur Bestimmung der Gewichtsunsicherheiten berücksichtigt die Tragweite aller technischer Lösungen hinsichtlich der Gewichtsunschärfe. Bei der

Validierung des Fahrzeuggewichts stellen die Gewichtsunsicherheiten gewissermaßen die alternativen Fahrzeuggewichte dar.

Die Methode zur Abschätzung von Gewichtschancen und -risiken sowie die Leichtbauiddeen-Datenbank unterstützen bei der konkreten technischen Lösungssuche und deren Auswahl. Im Rahmen der Leichtbaumethoden werden dabei Ideen, Prinzipien und Gestalt weiterentwickelt, wobei auch die Produktion, Nutzung und der Abbau berücksichtigt wird. Die Leichtbaudatenbank durchdringt die Aktivität *Wissen managen* hinsichtlich gewichtsrelevanter Themen komplett.

Die Methode zur betriebswirtschaftlichen Gewichtsbeurteilung unterstützt die Lösungsauswahl und die Trageweite technischer Konzepte hinsichtlich der Kostenauswirkung. Teilweise stellen die ermittelten €/kg-Werte zudem eine wichtige Inputgröße für die Situationsanalyse und Problemeingrenzung für die Ideen- und Konzeptentwicklung dar.

Die Aktivität *Nachbereiten und Lernen* wird von den Methoden immer dann unterstützt, wenn diese Teil der jeweiligen Produktentstehungsaktivität sind. Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Aktivitätenmatrix großflächig durch die Methoden abgedeckt wird, wodurch das Validierungskriterium erfüllt ist. Die Methoden ermöglichen dabei die Verdichtung und Anwendbarkeit der zahlreichen Informationen, indem die PGE systematisch angewandt wird. Die Verwendung der Informationen aus den Referenzsystemen (z.B. Vorgänger oder Wettbewerber) ist dabei der zentrale Ansatz. Auf diese Weise können die relevanten Informationen aus allen Aktivitäten der Produktentstehung bei der Quantifizierung von Gewichtszielen berücksichtigt werden.

In diesem Abschnitt konzentrierte sich die Validierung stark auf die Methoden und deren Zusammenspiel im Rahmen der Zielableitung. Im nächsten Abschnitt rückt das Zielframework und dessen zeitliche Integration in den PEP in den Fokus der Validierung.

7.1.1.2 Validierungskriterien aus den Beurteilungsdimensionen von Zielen

Ebel (2015) entwickelte in seiner Arbeit vier Beurteilungsdimensionen für Ziele – Reifegrad, Härtegrad, Beeinflussbarkeit und Auswirkung. Aus der Betrachtung jeweils zweier dieser Eigenschaften lassen sich konkrete Empfehlungen für die Modellierung von Zielsystemen ableiten. Diese Empfehlungen lassen sich auf TZS-G abbilden und bilden dadurch eine Referenz, die zur Validierung der entwickelten Methodik herangezogen werden kann. Im Folgenden soll auf diese Weise die zeitliche Integration des Gewichtsziel-Frameworks in den automobilen Produktentstehungsprozess validiert werden (siehe Abbildung 7.3).

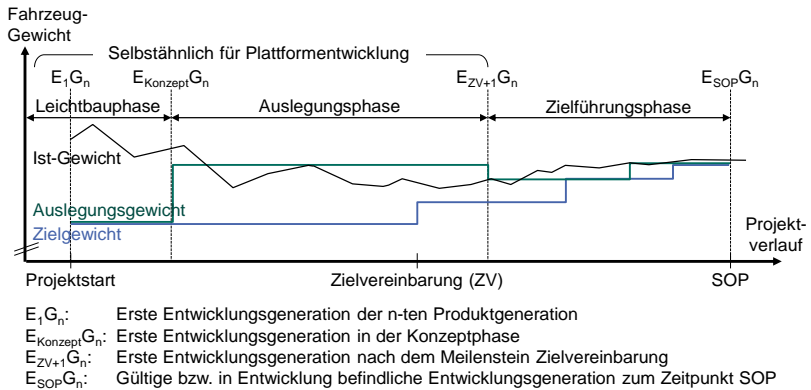


Abbildung 7.3: Gewichtsziel-Framework im automobilen PEP

Die Beurteilungsdimensionen fordern für eine Zielgröße mit weitreichenden Auswirkungen (wie z.B. Gewicht) einen hohen Härtegrad bereits in der frühen Phase, da diese Größe die Dimensionierung weiterer Subsysteme beeinflusst. Hierbei sollte der Härtegrad dem Reifegrad des Ziels vorauslaufen. Diese Rolle kann in der Methodik vom Auslegungsgewicht eingenommen werden. Bisherige Gewichtsziele waren durch ihre Anspannung und damit der relativ hohen Volatilität nicht in der Lage, frühzeitig einen hohen Härtegrad realistisch darzustellen. Das Auslegungsgewicht ist entkoppelt von der Projektentscheidungsvolatilität und kann dadurch eine hohe Beständigkeit und damit Härtegrad verkörpern.

Des Weiteren sollten vernetzte Zielgrößen wie das Gewicht früher als andere Ziele einen hohen Reifegrad erreichen. Dies wird in der Methodik ebenfalls durch das Auslegungsgewicht erreicht, da dieses Gewicht systematisch abgeleitet und regelmäßig plausibilisiert wird. Dabei liegt ein starker Fokus auf der Prognosefähigkeit, wodurch der Reifegrad des Ziels im Vergleich zu anderen als höher einzustufen ist.

Eine weitere Empfehlung betrifft das Zusammenspiel aus Beeinflussbarkeit und Auswirkung der Ziele. Bislang bedarf es einer Genehmigung des Projektleiters um Gewichtsziele anzupassen, wodurch die Beeinflussbarkeit des Gewichtsziels durch das Gewichtsmanagement reduziert wird. Dies führt dazu, dass das Gewichtsziel als kritisch zu charakterisieren ist (siehe Abbildung 7.4). Die Auftrennung in ein Auslegungs- und Zielgewicht reduziert die Auswirkung des Zielgewichts auf die Auslegung. Das Auslegungsgewicht hingegen wird vom Gewichtsmanagement und

den Fahrzeugauslegern bestimmt und ist damit besser beeinflussbar (auch wenn die Projektleitung darüber unterrichtet werden muss). Auf diese Weise kann die Kritikalität des Gewichtsziels deutlich reduziert werden.

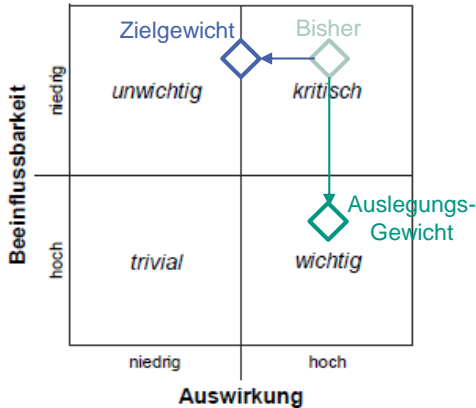


Abbildung 7.4: Anwendung der Kritikalitätsmatrix auf Methodik

In diesem Abschnitt konnte gezeigt werden, dass das Zielframework bestehend aus der Trennung von Auslegungs- und Zielgewicht die Empfehlungen der Ziel-Beurteilungsdimensionen besser als das bisherige Vorgehen umsetzen kann. Das Validierungsergebnis ist daher positiv und deutet auf ein robusteres Zielsystem hin.

7.1.1.3 Validierung durch Anwendung der Methodik in der Automobilindustrie

Die entwickelte Methodik mit den zugehörigen Methoden fand in den Arbeitsabläufen der BMW Group praktische Anwendung. Sowohl die Einzelmethoden als auch das Gewichtszielframework wurden und werden in der Arbeit des Gewichtsmanagements vielfach angewandt.

Die Methode zur Gewichtsabschätzung löste die bisherige Abschätzmethode ab und wurde zum Beispiel bei Konzeptvergleichen und -hochrechnungen neuer batterieelektrischen Fahrzeugen angewandt. Die Methode zur Bestimmung der Gewichtsunsicherheiten diente zur Überarbeitung des Zielfluggkorridors wie in Kapitel 6.1.4 beschrieben. Darüber hinaus konnten die bisherigen €/kg-Werte durch die Methode zur betriebswirtschaftlichen Gewichtsbeurteilung überarbeitet und in weiten Teilen bestätigt werden. Wie bereits beschreiben, wurde die

Leichtbaumethode TWA an Heckklappe und einem Motorrad-Koffersystem durchgeführt, wodurch hilfreiche Erkenntnisse gewonnen wurden.

Neben den Einzelmethoden wurde auch die Vorgehensweise zur Quantifizierung von Gewichtszielen und das übergeordneten Zielframework in realen Gewichtsprozessen übernommen. So konnte das beschriebene Auslegungsgewicht zwischen Gewichtsmanagementabteilung und den Gesamtfahrzeugauslegern definiert und vereinbart werden. Hierbei wurde die zeitliche Integration des Auslegungs- und Zielgewichts wie beschrieben umgesetzt. Zudem ist das beschriebene Vorgehen zur Bestimmung des Auslegungsgewichts übernommen und um ein offizielles Dokument erweitert worden, um die Entscheidungsfindung transparent und nachverfolgbar zu machen.

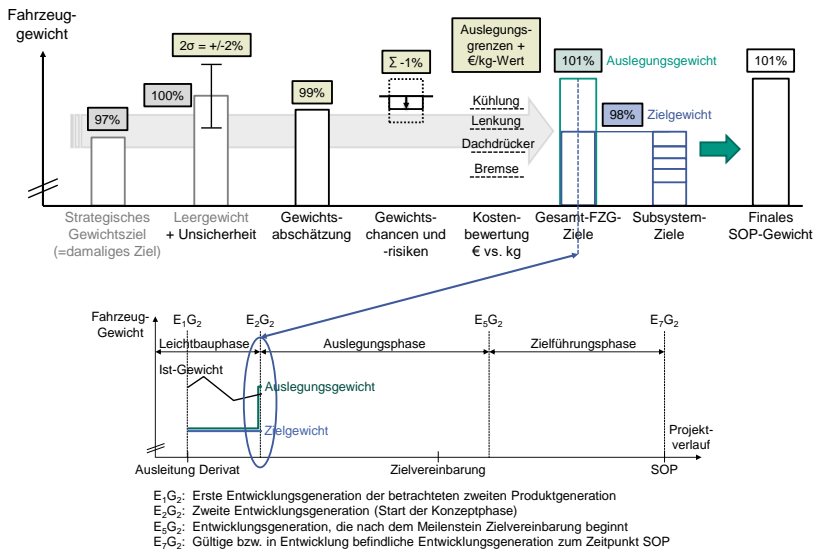
Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Methodik und die enthaltenen Einzelmethoden breite Anwendung in der realen Gewichtsarbeit eines Automobilherstellers finden. Diese Tatsache kann als zusätzliche Validierung der Methodik verstanden werden. Die Anwendung in zukünftigen Fahrzeugprojekten wird den konkreten Nutzen der Methodik verdeutlichen und weitere Verbesserungspotentiale aufdecken.

7.2 Anwendung der Methodik in der Automobilindustrie

In diesem Abschnitt soll die Methodik beispielhaft durchgeführt werden. Dies soll zum Verständnis der Methodik beitragen und die Anwendbarkeit unterstreichen. Als Anwendungsbeispiel wird ein Fahrzeugprojekt der BMW Group herangezogen, welches bereits seit einiger Zeit auf dem Markt ist. Die Entwicklungsphase bis SOP ist daher abgeschlossen, wodurch eine Analyse der aufgetretenen Ereignisse möglich wird.

Dieses Fahrzeugprojekt wurde ausgewählt, da es ein hinsichtlich vieler Eigenschaften durchschnittliches Projekt darstellt. So handelt es sich bei dem Fahrzeug weder um einen Erstanläufer noch um eine eng abgeleitete Baureihe. Dies wird durch einen Neuentwicklungsanteil von etwa 40 % unterstrichen. Zudem ist das betrachtete Fahrzeugprojekt die zweite Generation der Baureihe, es gibt daher schon eine Produktgeneration als Vorgänger. Darüber hinaus handelt es sich um ein volumenstarkes Modell mit durchschnittlichen Anforderungen bezüglich Fahrzeugeigenschaften und Leichtbau.

Als Zeitpunkt der Anwendung wurde ein Projektmeilenstein ausgewählt, der etwa vier Jahre vor SOP lag und den Beginn der Konzeptphase einleitete. Der Grund dafür ist, dass in dieser Phase das eingeführte Auslegungsgewicht definiert werden sollte. Zur Anwendung der Methodik wurden die Gewichtsdaten zu diesem Zeitpunkt aus den Datenbanken ausgelesen. Auf Basis dieser Daten wurde die Methodik angewandt und mit den damaligen Entscheidungen bezüglich der Gewichtsziele verglichen. Die entsprechenden Gewichtsdaten sind in Abbildung 7.5 entdimensionalisiert dargestellt.



**Abbildung 7.5: Anwendung der Methodik an einem realen Fahrzeugprojekt –
Oben: Quantifizierung der Gewichtsziele anhand historischer Daten –
Unten: Zeitliche Einordnung in den damaligen Fahrzeugentwicklungsprozess**

Das strategische Gewichtsziel, das Leergewicht und auch die Gewichtschancen und -risiken wurden dabei aus den historischen Daten übernommen. Dies stellt die Entscheidungsgrundlage zum damaligen Zeitpunkt dar.

Auf Basis dieser Daten und der damals gültigen Fahrzeugkonfiguration wurden die vorab beschriebenen Einzelmethoden angewandt. Die Gewichtsunsicherheit ergibt für dieses Fahrzeug und diesen Zeitpunkt einen Korridor von etwa $\pm 2\%$ bei Verwendung der zweifachen Standardabweichung und Annahme von konstanten

Entwicklungsprämissen. Die Gewichtsabschätzung auf Modulebene addiert sich zu einem Gesamtfahrzeuggewicht, das etwa 1 % niedriger als das damalige Ist-Gewicht ausfällt. Die Gewichtsrisiken und -risiken wurden aus den damaligen potenziellen Maßnahmen gebildet, die mit einer Eintrittswahrscheinlichkeit von hoch und mittel angegeben wurden. Durch die entwickelten Leichtbaumethoden und die Leichtbauideen-Datenbank sollten zukünftig jedoch noch weitere Gewichtsrisiken identifiziert werden können. Die Auslegungsgrenzen der Teilsysteme (z.B. Bremsen oder Lenkung) wurden nachträglich ermittelt, da diese damals wohl noch nicht zur Verfügung standen. Die neue Methodik fordert diese frühzeitig an, was im Unternehmen auch Akzeptanz findet. Zudem kann durch die Methode ein fahrzeugspezifischer €/kg-Wert berechnet werden, der aus Gründen der Geheimhaltung jedoch nicht konkret genannt werden darf.

Auf Basis der Methodenergebnisse können nun Auslegungs- und Zielgewicht bestimmt werden. Das Auslegungsgewicht sollte konservativer gewählt werden, um den notwendigen Härtegrad des Ziels garantieren zu können. Aus diesem Grund rücken die Gewichtsrisiken und Gewichtsunsicherheiten bei der Quantifizierung des Auslegungsgewichts stärker in den Fokus. Das Zielgewicht sollte einen Kompromiss aus strategischem Ziel und einem technisch realisierbaren Ziel darstellen. Hierbei muss das Projekt eine Aussage treffen, wie viel Geld zur Erreichung des Ziels bereitgestellt werden kann. Auf dieser Basis kann das eingezeichnete Zielgewicht bestimmt werden, welches möglichst viele Auslegungsgrenzen unterschreiten sollte. Dies würde bei einem günstigen Gewichtsverlauf ein Stoppen oder gar eine Umkehrung der Gewichtsspirale ermöglichen. Das Zielgewicht wird darüber hinaus auf die Entwicklungsbereiche heruntergebrochen.

Zur Analyse der Methodik-Anwendung wird auf das tatsächlich eingetretene Fahrzeuggewicht hingewiesen, welches zu SOP etwa 1 % höher als das damalige Ist-Gewicht ausgefallen ist. Zum damaligen Meilenstein wurde jedoch das Gewichtsziel auf dem strategischen Gewichtsziel belassen, da eine deutlich geringere Transparenz hinsichtlich möglicher Gewichtsentwicklungen vorlag (keine Unsicherheiten, Abschätzungen, Auslegungsgrenzen) und der Druck vom Gewichtsziel nicht genommen werden wollte. Da es damals noch kein abgespaltenes Auslegungsgewicht gab, wurde demnach weiterhin auf das strategische Gewichtsziel ausgelegt.

In diesen Situationen bietet die entwickelte Methodik eine entscheidende Unterstützung. Die Anwendung der Einzelmethoden schafft Transparenz, wodurch, unter Berücksichtigung der Projektrandbedingungen, individuelle Gewichtsziele definiert werden können. Die Trennung von Auslegungs- und Zielgewicht löst zudem das Spannungsfeld auf, in dem sich die bisherigen eindimensionalen Gewichtsziele

befunden haben. Die Definition von realistischen und herausfordernden Gewichtsziele erfordert somit keinen unbefriedigenden Kompromiss mehr.

Das real eingetretene Fahrzeuggewicht zu SOP unterstreicht die Sinnhaftigkeit der methodisch abgeleiteten Gewichtsziele. Durch das erhöhte Auslegungsgewicht hätten die Probleme durch überschrittene Auslegungsgrenzen deutlich früher im Entwicklungsprozess angegangen werden können. Der dadurch vergrößerte Lösungsraum führt in der Regel zu günstigeren und leichteren Lösungen. Durch die damalige schrittweise Anpassung des Gewichtsziels mussten die technischen Änderungen später eingesteuert werden, was meist zeit- und kostenintensiver ist.

Bei dieser Fallstudie sei nochmals erwähnt, dass dies keine vollständig repräsentative Validierung darstellen kann. Die automobile Produktentstehung ist hochkomplex, individuell und vielschichtig, so dass kleine Änderungen schon große Auswirkungen haben können. Aus diesem Grund sind die getroffenen Analysen hinsichtlich der Potentiale der vorgestellten Methode lediglich als Indizien aber nicht als Beweis zu verstehen. Die Definition von anderen Gewichtsziele zu der damaligen Projektphase hätten beispielsweise zu signifikant anderen Folgemaßnahmen führen können.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die angewandte Methodik in der damaligen Phase zu mehr Transparenz geführt hätte. Vermutlich hätte man auf Basis dieser Informationen realistischere Gewichtsziele definieren können, die späte Ausgleichsmaßnahmen in eine frühere Entwicklungsphase verlegt hätten. Diese Maßnahmen hätten dadurch wohl kosten- und gewichtsgünstiger realisiert werden können.

7.3 Fazit

In diesem Abschnitt wurde die Methodik zur Modellierung von robusten TZS-G validiert und angewandt. Die Validierung hat hierbei gezeigt, dass die Methodik alle relevanten Aktivitäten der Problemlösung abdeckt. Zudem werden durch die entwickelten Einzelmethoden die gewichtsrelevanten Aktivitäten der Produktentstehung berücksichtigt und der Zielableitung systematisch zur Verfügung gestellt. Neben der theoretischen Validierung der Methodik konnte die praktische Anwendung der Methodik in der Automobilindustrie aufgezeigt werden. Diese stellt ein wichtiges Kriterium für eine erfolgreiche Methodenentwicklung dar. Abschließend wurde die Methodik im Rahmen einer Fallstudie an einem realen Fahrzeugprojekt angewandt. Hierbei konnten die Potentiale der Methodik im Rahmen der Forschungsmethode unterstrichen werden.

8 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Kapitel werden zunächst die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit zusammengefasst. Darauf aufbauend werden weiterführende Forschungsarbeiten identifiziert und im Ausblick dargelegt.

8.1 Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit beleuchtet das Gewichtsmanagement in der Automobilindustrie. Hierbei liegt der Fokus auf einer Methodik zur Modellierung robuster TZS-G. Unter Modellierung werden sowohl der Aufbau der inneren Struktur und die Integration in den automobilen Produktentstehungsprozess als auch die methodische Quantifizierung von konkreten Gewichtszielen verstanden.

Das TZS-G als Teil des kompletten Zielsystems ist von großer Bedeutung in der Fahrzeugentwicklung. So beeinflusst das Fahrzeuggewicht sowohl die Fahrzeugauslegung als auch kundenerlebbarere Fahrzeugeigenschaften wie Fahrdynamik, Verbrauch oder Reichweite. Das Fahrzeuggewicht dient daher als Auslegungsgröße in der frühen Phase, aber auch als kontinuierlich zu überwachende Zielgröße. Diese Charakteristik stellt eine der großen Herausforderungen bei der Definition von Gewichtszielen dar.

Bisherige Gewichtsziele in der Automobilindustrie setzen sich meist aus einem Zielgewicht zusammen, welches auch als Auslegungswert herangezogen wird. Dieses Zielgewicht wird über ein iteratives Vorgehen aus Zielesicht (Lösungsoffen) und Lösungssicht (lösungsspezifisch) bestimmt. Dabei wird in der Regel eine Zielanspannung vereinbart, das heißt, dass das Zielgewicht niedriger als das Prognosegewicht des technischen Lösungskonzepts liegt. Auf diese Weise wird ein herausforderndes Zielgewicht geschaffen, welches die Entwicklungsbereiche zum Leichtbau motivieren und die positiven Effekte der Gewichtsspirale möglichst effizient nutzen soll.

Andere Branchen wie die Luft- und Raumfahrt gestalten die Gewichtsziele dagegen auf eine andere Weise. So werden verschiedenartige Vorhalte eingeplant, da deren Erfahrungswerte auf steigende Gewichte im Produktentstehungsprozess hindeuten. Das für die Auslegung kritische Gewicht ist demnach meist deutlich höher als das Ist-Gewicht, eine Zielanspannung wird dort in aller Regel nicht angewandt.

Der Blick in die Forschung offenbart nur wenige konkrete Hilfestellungen bei der Modellierung von TZS-G. So beschränken sich die Forschungsarbeiten meist auf generische Ansätze zum Aufbau von Zielsystemen und zum Umgang mit Komplexität, Unsicherheit und Risiko. Auch die Produktentstehungsprozesse und das Beschreibungsmodell der PGE bieten vielversprechende Ansätze, die allerdings noch auf den Anwendungsfall des automobilen Gewichtsmanagements konkretisiert werden müssen.

Die Analyse der automobilen Praxis sowie der Forschung hat gezeigt, dass im Kontext der Modellierung von Gewichtzielsystemen noch einige Forschungslücken existieren. So wurde deutlich, dass die Quantifizierung von konkreten Gewichtszielen bislang nur unzureichend methodisch unterstützt wird. Meist beruht der Zielfindungsprozess auf Experteneinschätzungen und persönlichen Verhandlungen zwischen Gewichtsmanagement und Entwicklungsbereichen. Dies hängt mit den zahlreichen Wechselwirkungen und der damit einhergehenden Komplexität der Größe Gewicht zusammen. Diese können mit den aktuellen Instrumenten nur unzureichend bei der Zielableitung berücksichtigt werden.

Des Weiteren werden die Gewichtsziele meist noch nicht als Teilzielsystem des gesamten Zielsystems verstanden. Dies hat zur Folge, dass neben den vernachlässigten Wechselwirkungen auch die Struktur der TZS-G nicht ausreichend untersucht wurde. Die Charakteristik des Gewichts als Auslegungs- und zugleich Zielgröße auf Fahrzeug- wie auch Komponentenebene erfordert jedoch ein strukturiertes TZS-G, welches intensiv mit dem Produktentstehungsprozess abgestimmt werden muss.

Diese Forschungslücken wurden in der vorliegenden Arbeit systematisch bearbeitet. So wurden die Forschungslücken zunächst im Rahmen einer deskriptiven Studie detailliert untersucht und Anforderungen an Gewichtsziele abgeleitet. Hieraus ergab sich die Zielsetzung, eine Methodik zur Modellierung robuster TZS-G zu entwickeln. Die Methodik besteht dabei aus drei zentralen Bausteinen (Aufbau, Integration und Quantifizierung des TZS-G), um die beschriebenen Forschungslücken schließen zu können. Das integrierte Produktentstehungsmodell (iPeM) und die PGE – Produktgenerationsentwicklung bilden dabei den methodischen Unterbau. Das iPeM ermöglicht die Modellierung der Gewichtsmanagementaktivitäten, während die PGE als Schlüssel zur Handhabbarkeit der komplexen Größe Gewicht identifiziert wurde.

Der erste Baustein betrifft den inneren Aufbau eines Teilzielsystems für Gewicht. Die teils gegenläufigen Anforderungen verschiedener Unternehmenssichten motivierten dabei eine Auftrennung des Gewichtsziels in ein Zielgewicht, welches

herausfordernd und agil ist, und ein Auslegungsgewicht, welches konservativ und fest ist. Die Zielgewichte werden auf die Subsysteme heruntergebrochen, wodurch jeder Entwicklungsbereich zum Leichtbau angehalten wird. Das Auslegungsgewicht existiert nur auf Gesamtfahrzeugebene und dient als Basis weiterer Auslegungsdaten wie Achslastverteilung, Schwerpunkt oder Massenträgheitsmomente.

Der zweite Baustein umfasst die Integration des TZS-G in den Fahrzeugentwicklungsprozess. Da das Gewicht und damit die Gewichtsziele einen signifikanten Einfluss auf die Fahrzeugauslegung und einige kundenerlebbare Fahrzeugeigenschaften haben, ist das Zusammenspiel von Gewichtsmanagement und Fahrzeugauslegung von hoher Bedeutung. Hierzu wurde der Fahrzeugentwicklungsprozess in drei Phasen aufgeteilt, um die Stärken des TZS-G möglichst effektiv und effizient zu nutzen. Das Fahrzeugprojekt startet dabei mit einer Leichtbauphase, in der das Fahrzeug auf das herausfordernde und größtenteils wettbewerbsabgeleitete Zielgewicht ausgelegt wird. Hierdurch lassen sich die Gewichtspotentiale durch ein etwaiges Umdrehen der Gewichtsspirale bestmöglich ausnutzen. Ein maximales Leichtbaupotential des Fahrzeugkonzepts kann somit abgeschätzt werden.

Sobald die Gewichtsdaten konkreter werden, beginnt mit der Auslegungsphase die zweite Phase. Kernelement ist hierbei die Definition des Auslegungsgewichts, welches sich meist vom Zielgewicht durch eine realistischere Prognose des Fahrzeuggewichts unterscheidet. Da in dieser Phase mehr und mehr Subsysteme final festgelegt werden, ist eine realistische Auslegung hinsichtlich der Robustheit von großer Bedeutung. Späte Änderungen sind erfahrungsgemäß zeit- und kostenintensiv und führen zu schwereren Lösungen.

Die dritte Phase wird Zielführungsphase genannt und beginnt nach der Zielvereinbarung. Das Auslegungsgewicht entspricht nun immer dem Prognosegewicht zu SOP, wodurch ein Konvergieren von Auslegungs-, Ist-, Prognose- und Zielgewicht zu SOP sichergestellt wird. Die Gewichtsunterschiede zwischen diesen Gewichten sind in dieser Phase in der Regel relativ klein, was prozessual durch einen Zielflugkorridor sichergestellt wird.

Der dritte Baustein der Methodik umfasst eine Vorgehensweise zur Quantifizierung konkreter Auslegungs- und Zielgewichte. Diese fußt neben der Betrachtung des strategischen Gewichtsziels und dem Ist-Gewicht auf vier Einzelmethoden. Diese Methoden umfassen die Bestimmung von Gewichtsunsicherheiten, Gewichtsschätzungen, Gewichtschancen und -risiken und eine betriebswirtschaftliche Gewichtsbeurteilung. Hierzu wurden bestehende Methoden

weiterentwickelt und oftmals um Ansätze der PGE ergänzt. Aus dem Zusammenspiel und den Ergebnissen der Methoden können schließlich phasenadäquate und robuste Auslegungs- und Zielgewichte bestimmt werden.

Die Gesamtmethodik als auch die enthaltenen Einzelmethode werden im Rahmen der Arbeit auf vielfältige Weise validiert. So werden die Ergebnisse der Einzelmethode meist mit realen Fahrzeugdaten abgeglichen und dadurch validiert. Die Validierung der Gesamtmethodik muss aufgrund der komplexen Wechselwirkungen mit dem Fahrzeugentwicklungsprozess anderweitig durchgeführt werden. Hierbei wird vornehmlich auf argumentativer Ebene basierend auf wissenschaftlichen Prozess- und Vorgehensmodellen und durch konkrete Anwendungsfälle in der automobilen Praxis validiert.

Die Validierungsergebnisse der Methodik und ihrer Teilmethoden sind dabei durchwegs positiv. Eine weiterführende Anwendung der entwickelten Methodik in den automobilen Fahrzeugentstehungsprozessen wird daher empfohlen.

8.2 Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wird eine umfangreiche Methodik zur Modellierung robuster TZS-G in der Automobilindustrie vorgestellt. Die Validierungen und die bisherigen Praxisanwendungen zeigen dabei vielversprechende Potentiale für die zukünftige Anwendung der Methodik auf.

Im Rahmen der Entwicklung der Methodik kamen weitere interessante Teilaspekte auf, die in der vorliegenden Arbeit nicht oder nur teilweise behandelt werden konnten. Hieraus ergeben sich weiterführende Forschungsfragen, deren Bearbeitung zum Heben weiterer Potentiale führen könnte. Diese werden im Folgenden vorgestellt und kurz erläutert.

Zunächst bieten die Teilmethoden weitere Verbesserungspotentiale. So kann die Methode zur Bestimmung von Gewichtsunsicherheiten unter Einbeziehung von detaillierteren Gewichtsdaten noch individualisierter gestaltet werden. Gerade die Variationsanteile der PGE können dazu intensiv genutzt werden, um die Gewichtsunsicherheiten fahrzeugspezifisch abzuschätzen.

Die Methode zur Gewichtsabschätzung beruht bisher auf Regressionsmodellen, um die physikalischen Zusammenhänge nachvollziehen zu können. Dies könnte in einem nächsten Schritt durch Methoden des maschinellen Lernens angereichert werden. Dabei müssen die Vorteile der Anpassbarkeit von neuronalen Netzen

gegen die Nachteile hinsichtlich der Intransparenz abgewogen werden. Eine Voraussetzung der Anwendung von neuronalen Netzen ist allerdings eine deutlich größere Datenbasis an Fahrzeugen als bisher. Dies kann im Prinzip nur durch die Einbeziehung von Wettbewerbsfahrzeugen erreicht werden, was in dieser Arbeit durch den hohen Übersetzungsaufwand nur in einem kleinen Rahmen geschehen ist.

Die Methode zur Abschätzung von Gewichtchancen und -risiken bietet durch die Vielzahl an betrachteten Untermethoden große Weiterentwicklungspotentiale. Hier sollten speziell die Methoden Target Weighing Ansatz und das Leichtbau-Ideenmanagement betrachtet werden.

Wie bereits beschrieben, wurde der Target Weighing Ansatz zum Erweiterten Target Weighing Ansatz weiterentwickelt. Die Fallstudien haben dabei gezeigt, dass der Aufwand und die subjektive Bestimmung der Abhängigkeiten der Funktion-Aufwand-Matrix kritisiert wurden. Hier sollten Ansätze entwickelt werden, die zu einer objektiveren und schnelleren Bewertung der Abhängigkeiten beitragen, ohne den Aufwand von umfassenden Simulationen zu generieren. Die verwendeten Ansätze für die Gewichtsabschätzungsmethode könnten hierzu geeignet sein. Auf Basis vorheriger Fahrzeuggenerationen könnten die Abhängigkeiten über Regressionsmodelle oder neuronale Netze bestimmt werden. Dies könnte eine Vorbefüllung der Funktion-Aufwand-Matrix ermöglichen und damit den Bewertungsaufwand der Experten reduzieren.

Das Leichtbau-Ideenmanagement umfasst bislang eine Datenbank, um einen schnellen Zugriff auf generische Leichtbauideen bereitzustellen. Die Funktionalitäten könnten hierbei noch deutlich erweitert werden. So wäre es erstrebenswert, wenn solch ein Ideenmanagement neben der Datenhaltung auch die Möglichkeit zur Identifikation neuer Leichtbauideen böte. Das enthaltene Wissen könnte dabei über intelligente Kombinationsmöglichkeiten zu neuartigen Leichtbauideen führen. Kombinationen aus Kreativitätsmethoden und Ansätzen des maschinellen Lernens könnten hierzu geeignete Startpunkte sein.

Die Methoden der betriebswirtschaftlichen Gewichtsbeurteilung stellen einen ersten Ansatz zur Identifikation eines optimalen Kompromisses aus Kosten und Gewicht dar. Hierzu wurden zahlreiche Wechselwirkungen des Gewichts auf kundenerlebbar Fahrzeugeneigenschaften hinsichtlich der Kosten beziehungsweise der Zahlungsbereitschaft der Kunden analysiert. Dieser Optimierungsansatz kann über das so genannte Model-Based-Systems-Engineering (MBSE) auf die relevantesten Fahrzeugeneigenschaften im Sinne einer Gesamtfahrzeugoptimierung ausgeweitet werden. Die Vision ist hierbei eine vollumfängliche virtuelle Auslegung

und Konstruktion eines optimierten Fahrzeugs hinsichtlich der gewählten Zielfunktionen. An dieser Vision arbeiten mehr oder weniger alle Automobilhersteller, jedoch stellt sowohl die Komplexität des Produkts als auch des Entwicklungs- und Marktumfelds eine hohe Herausforderung dar.

Ein anderer etwas radikalerer Ansatz betrifft die Gewichtsziele. Bislang werden die Gewichtsziele im Sinne der Kompatibilität auf die subsystembasierte Organisationsstruktur der Automobilhersteller verteilt. Das bedeutet, dass das Gesamtfahrzeuggewicht auf die Entwicklungsbereiche (z.B. Karosserie) und danach auf die Module (z.B. Türen) heruntergebrochen wird. Diese komponentenbeziehungswise gestaltbezogenen Gewichtsziele führen oftmals zu komponenten- aber nicht zu systemoptimalen Gewichtslösungen. Ein anderer Ansatz entspringt dem Target Weighing Ansatz und rückt die Funktionen in den Blickpunkt der Gewichtsziele. Da die Kunden ein Fahrzeug meist nicht wegen spezieller Komponenten, sondern wegen der kundenerlebbaren Funktionen kaufen, liegt der Gedanke nahe, die Funktionen und nicht die Komponenten mit Zielen zu versehen. Gewissermaßen kann man dann von lösungsoffenen Zielen sprechen, da die Umsetzung der Funktion in Form einer Gestalt nicht vorgegeben wird. Ein weiterer Vorteil ist, dass Funktionen meist durch eine Vielzahl von Komponenten und deren Zusammenspiel ermöglicht werden. Wird nun eine Funktion und nicht die Komponenten mit Gewichtszielen versehen, sollte der Leichtbaufokus eher auf der Konzept- und nicht der Komponentenebene liegen. Das Themenfeld der Funktionsziele sollte daher detailliert untersucht werden. Im Rahmen dieser eher praxisorientierten Arbeit war jedoch die Forderung nach kompatiblen Zielen zur vorhandenen Organisationsstruktur in der Automobilindustrie zu stark, um Funktionsziele intensiv zu untersuchen.

Neben den aufgeführten Forschungsfragen werden sich durch die Anwendung der entwickelten Methodik vermutlich noch weitere Optimierungspotentiale herauskristallisieren. Zudem könnte die Modellierung von Teilzielsystemen unter anderen Gesichtspunkten (z.B. Akustik, Crash, Fahrleistung) zusätzliche Forschungsfragen offenbaren. Es lässt sich daher festhalten, dass die Modellierung von Teilzielsysteme noch weitere spannende Themenfelder für zukünftige Forschungsarbeiten bietet.

Literaturverzeichnis

- A2mac1. (2020). *Website 2020*. Zugriff am 11.11.2020. Verfügbar unter <https://portal.a2mac1.com/de/home/>
- ADAC. (2012). *ADAC AutoMarX*. Zugriff am 11.11.2020. Verfügbar unter <https://www.rankingthebrands.com/PDF/ADAC%20AutoMarX%20Brand%20Ranking%202012,%20ADAC.pdf>
- Adomeit, P., Baar, R., Beck, M., Bönnen, D. & Dorenkamp, Richard, et. al. (2013). Antriebe. In H.-H. Braess & U. Seiffert (Hrsg.), *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik* (7. Aufl., S. 221–498). Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Albers, A. (2010). Five Hypothesis about Engineering Processes and their Consequences. *International Symposium Series on Tools and Methods of Competitive Engineering TMCE 2010, Ancona, Italy*, 343–356.
- Albers, A. (2020). Vorwort. In M. Basiewicz (Hrsg.), *Ein Beitrag zur Validierung nasslaufender Lamellenpakete aus Anfahrerelementen von Fahrzeugen im Betriebszustand "geregelter Dauerschlepp"*. IPEK -Forschungsberichte. Band 128. Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie (KIT): IPEK -Institut für Produktentwicklung.
- Albers, A., Behrendt, M., Klingler, S., Reiss, N. & Bursac, N. (2017a). Agile product engineering through continuous validation in PGE – Product Generation Engineering. *Design Science*, 3, e5, 1-19. Zugriff am 11.11.2020. Verfügbar unter <https://www.cambridge.org/core/journals/design-science/article/agile-product-engineering-through-continuous-validation-in-pge-product-generation-engineering/DF843DD332B7C7D683629FA06B0F6AB4>
- Albers, A. & Braun, A. (2011). A generalised framework to compass and to support complex product engineering processes. *International Journal of Product Development*, 15 (1-3), 6–25.
- Albers, A., Bursac, N., Heimicke, J., Walter, B. & Reiss, N. (2017b). 20 years of co-creation using case based learning. An integrated approach for teaching innovation and research in Product Generation Engineering. *ICL2017 – 20th International Conference on Interactive Collaborative Learning, Budapest, Ungarn*, 636–647.
- Albers, A., Bursac, N., Marthaler, F., Siebe, A., Reiss, N. & Hirschter, T. (2018a). Development methods for 2030: An interpretation of scenarios in the application of methods. *Norddesign 2018, Linköping*, no. 1.

- Albers, A., Bursac, N. & Rapp, S. (2017c). PGE – Produktgenerationsentwicklung am Beispiel des Zweimassenschwungrads. *Forschung im Ingenieurwesen*, 81, 13–31.
- Albers, A., Bursac, N. & Wintergerst, E. (2015a). Produktgenerationsentwicklung – Bedeutung und Herausforderungen aus einer entwicklungsmethodischen Perspektive. *Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung, Stuttgart*, 1–10.
- Albers, A., Ebel, B. & Lohmeyer, Q. (2012). Systems of Objectives in Complex Product Development. *Tools and methods of competitive engineering: Proceedings of the ninth International Symposium on Tools and Methods of Competitive Engineering (TMCE 2012), Karlsruhe, Germany, May 7-11, 2012*, 267–278.
- Albers, A., Ebel, B. & Sauter, C. (2010). Combining Process Model and Semantic Wiki. *11th International Design Conference DESIGN 2010, Dubrovnik*, 1275-1284.
- Albers, A., Fahl, J., Hirschter, T., Endl, M., Ewert, R. & Rapp, S. (2020a). Model of PGE – Product Generation Engineering by the Example of Autonomous Driving. *30th CIRP Design 2020, Online*, 665–677.
- Albers, A., Haug, F., Fahl, J., Hirschter, T., Reinemann, J. & Rapp, S. (2018b). Customer-Oriented Product Development: Supporting the Development of the Complete Vehicle through the Systematic Use of Engineering Generations. 4. *IEEE International Symposium on Systems Engineering (ISSE 2018), Rome, I, October 1-3*, no. 8544391.
- Albers, A., Heimicke, J., Hirschter, T., Richter, T., Reiss, N., Maier, A. et al. (2018c). Managing Systems of Objectives in the agile Development of Mechatronic Systems by ASD – Agile Systems Design. *Norddesign 2018, Linköping*, no. 93.
- Albers, A., Heimicke, J., Müller, J. & Spadinger, M. (2019a). Agility and its Features in Mechatronic System Development: A Systematic Literature Review. *Proceedings of 30th ISPIM Innovation Conference, Florence*, 1–13.
- Albers, A., Heitger, N., Haug, F., Fahl, J., Hirschter, T. & Bursac, N. (2018d). Supporting Potential Innovation in the Early Phase of PGE – Product Generation Engineering: Structuring the Development of the Initial System of Objectives. *R&D Management Conference 2018, Milano*, 469–474.
- Albers, A., Klingler, S. & Ebel, B. (2013a). Modeling systems of objectives in engineering design practice. *International Conference on Engineering Design, ICED13, Seoul*, 379–388.
- Albers, A., Klingler, S. & Wagner, D. (2014). Prioritization of Validation Activities in Product Development Processes. *Proceedings of the DESIGN 2014 - 13th International Design Conference, Dubrovnik, May 19-22, 2014*, 81–90.

- Albers, A. & Lohmeyer, Q. (2012). Advanced systems engineering – towards a model-based and human-centered methodology. *9th International Symposium on Tools and Methods of Competitive Engineering, Karlsruhe*, 407–416.
- Albers, A. & Meboldt, M. (2007). IPEMM-integrated product development process management model, based on systems engineering and systematic problem solving". *Guidelines for a Decision Support Method Adapted to NPD Processes, Paris*, 611–612.
- Albers, A., Moeser, G. & Revfi, S. (2018e). Synergy Effects by using SysML Models for the Lightweight Design Method "Extended Target Weighing Approach". *28th CIRP Design Conference, May 2018, Nantes, France*, 434–439.
- Albers, A. & Muschik, S. (2010a). Development of systems of objectives in early activities of product development processes. *Proceedings of the TMCE 2010, Ancona, Italy*, 1303–1304.
- Albers, A. & Muschik, S. (2010b). The Role and Application of Activities in the integrated product engineering model (iPeM). *Proceedings of the 11th International Design Conference, Dubrovnik*, 127–136.
- Albers, A., Rapp, S., Birk, C. & Bursac, N. (2017d). Die Frühe Phase der PGE – Produktgenerationsentwicklung. *4. Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung, Stuttgart*, 1–10.
- Albers, A., Rapp, S., Fahl, J., Hirschter, T., Revfi, S., Schulz, M. et al. (2020b). Proposing a generalized Description of Variations in different Types of Systems by the Model of PGE - Product Generation Engineering. *Design 2020, online*, 2235–2244.
- Albers, A., Rapp, S., Heitger, N., Wattenberg, F. & Bursac, N. (2018f). Reference Products in PGE – Product Generation Engineering: Analyzing Challenges Based on the System Hierarchy. *28th CIRP Design Conference, May 2018, Nantes, France*, 469–474.
- Albers, A., Rapp, S., Spadinger, M., Richter, T. & Wessels, H. (2019b). The Reference System in the Model of PGE: Proposing a Generalized Description of Reference Products and their Interrelations. *Proceedings of the Design Society International Conference on Engineering Design, Delft*, 1 (1), 1693–1702. <https://doi.org/10.1017/dsi.2019.175>
- Albers, A., Reiss, N., Bursac, N. & Breitschuh, J. (2016a). 15 Years of SPALTEN Problem Solving Methodology in Product Development. *NordDesign 2016, Trondheim*, 411–420.
- Albers, A., Reiss, N., Bursac, N. & Richter, T. (2016b). The integrated Product engineering Model (iPeM) in context of the product generation engineering. *26th CIRP Design Conference, Stockholm*, 100–105.
- Albers, A., Reiss, N., Bursac, N., Walter, B. & Gladysz, B. (2015b). InnoFox: Situationspezifische Methodenempfehlung im Produktentstehungsprozess.

- Proceedings of the Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung, Stuttgart*, 1–10.
- Albers, A., Revfi, S., Kraus, F. & Spadinger, M. (2019c). Function-based benchmarking to identify competitor-based lightweight design potentials. *29th CIRP Design 2019, Povo de Varzim*, 526–531.
- Albers, A., Revfi, S. & Spadinger, M. (2017e). Extended Target Weighing Approach - Identification of Lightweight Design Potential for New Product Generations. *Proceedings of the 21st International Conference on Engineering Design (ICED 17). Vancouver, August 21-25, 2017*, 367–376.
- Albers, A., Revfi, S. & Spadinger, M. (2018g). Extended Target Weighing Approach - Estimation of Technological Uncertainties of Concept Ideas in Product Development Processes. *CO2 Reduction for Transportation Systems Conference, Torino*, no. 2018-37-0028.
- Albers, A., Scherer, H., Bursac, N. & Rachenkova, G. (2015c). Model Based Systems Engineering in Construction Kit Development – Two Case Studies. *Procedia CIRP, Haifa*, 36, 129–134.
- Albers, A., Wagner, D., Ruckpaul, A., Hessenauer, B., Burkardt, N. & Matthiesen, S. (2013b). Target weighing - A new approach for conceptual lightweight design in early phases of complex systems development. *ICED 13, the 19th International Conference on Engineering Design, Seoul*, 301–310.
- Alonso, E., Lee, T., Bjelkengren, C., Roth, R. & Kirchain, R. (2012). Evaluating the Potential for Secondary Mass Savings in Vehicle Lightweighting. *Environmental Science & Technology*, 46, 2893–2901.
- Amberg, M., Bodendorf, F. & Möslein, K. M. (2011). *Wertschöpfungsorientierte Wirtschaftsinformatik*. Springer Berlin Heidelberg.
- American National Standard. (2015). *Mass Properties Control for Space Systems*. S-120A-201X. American Institute of Aeronautics and Astronautics.
- Andrew, W. G. (2001). *Do Modern Tools Utilized in the Design and Development of Modern Aircraft Counteract the Impact of Lost Intellectual Capital within the Aerospace Industry*. Masterarbeit. Massachusetts Institute of Technology, Center for Technology, Policy, and Industrial Development.
- Aral AG. (2015). *Trends beim Autokauf*. Zugriff am 11.11.2020. Verfügbar unter <http://docplayer.org/5517826-Www-ara-de-ara-studie-trends-beim-autokauf-2015-ara-aktiengesellschaft-marktforschung.html>
- Aulinger, A. (2017). *Die drei Säulen agiler Organisationen*. Berlin. Steinbeis-Hochschule Berlin - Institut für Organisation & Management (IOM).
- Autobild. (2018). *Dauertest: Die Tops und Flops des Jahres*. Zugriff am 11.11.2020. Verfügbar unter <https://www.autobild.de/bilder/dauertest-die-tops-und-flops-des-jahres-4499796.html#bild23>

- Bader, J. (2007). Die Hauptstellgrößen des Produktzielmanagements am Beispiel der Automobilentwicklung. Dr. Hut. Dissertation. Technische Universität Dresden: Lehrstuhl für Konstruktionstechnik.
- Bennett, N. & Lemoine, G. J. (2014). What a difference a word makes: Understanding threats to performance in a VUCA world. *Business Horizons*, 57 (3), 311–317.
- Biedermann, W., Diepold, K. J. & Lindemann, U. (2010). Modellabstufungen zur Betrachtung struktureller und dynamischer Komplexität. *Tag des Systems Engineerings 2010, Gesellschaft für Systems Engineering e.V. (Hrsg.), Freising*, 97–108.
- Bill, K. H. & Dallmer, S. (2010). Auslegung und Aufbau der Bremsanlagen für die 'Formula Student'- Rennfahrzeuge BRC08 / BRC09. *XXIX. Internationales mu-Symposium, Bad Neuenahr*, 85–429.
- Blessing, L. T.M. & Chakrabarti, A. (2009). *DRM, a design research methodology*. London. Springer.
- BMW AG. (2018). *BMW M4 Katalog Juli 2018*.
- BMW AG. (2019). *Neuwagen 3er*. Zugriff am 11.11.2020. Verfügbar unter https://www.bmw.de/de/neufahrzeuge/3er.html?bmw=sea:11662565082_kwd-89330538&gclid=EAlaIqobChMImNCAguSB4wIVBPIRCh2ZpwGOEAAAYASAAEgKF9_D_BwE&gclidsrc=aw.ds
- BMW Group. (2019a). *BMW Group im Überblick*. Zugriff am 11.11.2020. Verfügbar unter <https://www.bmwgroup.com/de/unternehmen.html>
- BMW Group. (2019b). *Marken der BMW Group*. Zugriff am 11.11.2020. Verfügbar unter <https://www.bmwgroup.com/de/marken.html>
- Bochtler, W., Laufenberg, L. & Eversheim, W. (1995). *Simultaneous Engineering*. Springer Berlin Heidelberg.
- Bortz, J. & Schuster, C. (2010). *Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler* (7. Aufl.). Berlin Heidelberg. Springer.
- Boze, W. & Hester, P. (2009). Quantifying Uncertainty and Risk in Vehicle Mass Properties throughout the Design Development Phase. *68th Annual Conference of Society of Allied Weight Engineers, Inc., Wichita, Kansas*, no. 3468.
- Braess, H.-H. (1999). "Negative Gewichtsspirale" Erster Ansatz einer quantitativen Erfassung. *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift*, 101, 34–37.
- Braess, H.-H., Breitling, T., Ehlers, C., Grauwunder, N., Hackenberg, U., Liskowsky, V. et al. (2013a). Produktentstehungsprozess. In H.-H. Braess & U. Seiffert (Hrsg.), *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik* (7. Aufl., S. 1133–1221). Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Braess, H.-H., Fritzsche, E., Nettleau, H.-J., Seiffert, U. & Zinke, E. (2013b). Anforderungen, Zielkonflikte. In H.-H. Braess & U. Seiffert (Hrsg.), *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik* (7. Aufl.). Wiesbaden: Springer Vieweg.

- Braess, H.-H. & Seiffert, U. (Hrsg.). (2013). *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik* (7. Aufl.). Wiesbaden. Springer Vieweg.
- Breitschuh, J., Albers, A., Seyb, P., Hohler, S., Benz, J., Bursac, N. et al. (2018). Scaling agile practices on different time scopes for complex problem-solving. *Norddesign 2018, Linköping*, no. 47.
- Bursac, N. (2016). *Model Based Systems Engineering zur Unterstützung der Baukastenentwicklung im Kontext der Frühen Phase der Produktgenerationsentwicklung*. IPEK - Forschungsberichte. Band 93. Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie (KIT): IPEK - Institut für Produktentwicklung.
- Clarkson, J. & Eckert, C. M. (Hrsg.). (2005). *Design Process Improvement. A review of current practice*. London. Springer.
- Cleff, T. (2008). *Deskriptive Statistik und moderne Datenanalyse. Eine computergestützte Einführung mit Excel, SPSS und STATA*. Wiesbaden. Gabler.
- Cooper, R. G. (1994). Perspective third-generation new product processes. *Journal of Product Innovation Management*, 11 (1), 3–14. Zugriff am 11.11.2020. Verfügbar unter <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0737678294901155>
- Cusumano, M. A. & Nobeoka, K. (1998). *Thinking Beyond Lean: How Multi Project Management is Transforming Product Development at Toyota and Other Companies*. New York. The Free Press.
- Daenzer, W. F. & Huber, F. (1994). *Systems Engineering: Methoden und Praxis* (8. Aufl.). Zürich. Verlag Industrielle Organisation.
- Dahm, H., Gatzka, R. & Voigt, B. (2006). Fahrzeugdiät durch Computer Aided Weightmanagement. *Verkehr und Technik*, 7, 265–269.
- Daziano, R. A. (2013). Conditional-logit Bayes estimators for consumer valuation of electric vehicle driving range. *Resource and Energy Economics*, 35, 429–450.
- Decker, D., Hage, M., Jerg, F. & Tatartschuk, E. (2013). Produktentstehungsprozess für Scheinwerfer und Heckleuchten. *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift*, 115, 888–893.
- DeLaurentis, L. & Mavris, D. (2000). Uncertainty modeling and management in multidisciplinary analysis and synthesis. *38th AIAA Aerospace Sciences Meeting & Exhibit. Reno, NV*, 1–12.
- Deloitte. (2016). *Komplexitätsmanagement in der Automobilindustrie*. Berlin. Deloitte.
- Deubzer, F. & Lindemann, U. (2009). Networked Modelling - Use and interaction of product models and methods during analysis and synthesis. *Proceedings of the International Conference on Engineering Design, Stanford*, 371–380.
- DIN 70020 (1993). *DIN 70020 - Teil1*. Berlin. Beuth-Verlag.

- DIN ISO 31000 (2011). *DIN ISO 31000*. Berlin. Beuth-Verlag.
- Doran, G. T. (1981). There's a S.M.A.R.T. Way to Write Management's Goals and Objectives. *Management Review*, 70, 35–36. Zugriff am 11.11.2020. Verfügbar unter <https://community.mis.temple.edu/mis0855002fall2015/files/2015/10/S.M.A.R.T.-Way-Management-Review.pdf>
- Düchting, C. (2005). *Aufbau eines freigabe- und kommunikationsbasierten Assistenzsystems im Produktentstehungsprozess*. Dissertation. Universität Dortmund: Lehrstuhl für Fabrikorganisation.
- Duden. (2019). *Definition "komplex"*. Zugriff am 11.11.2020. Verfügbar unter <https://www.duden.de/rechtschreibung/komplex>
- Dümbgen, L. (2016). *Einführung in die Statistik. Mathematik Kompakt*. Basel. Springer.
- Earl, C., Johnson, J. & Eckert, C. M. (2005). Complexity. In J. Clarkson & C. M. Eckert (Hrsg.), *Design Process Improvement. A review of current practice* (S. 174–197). London: Springer.
- Ebel, B. (2015). *Modellierung von Zielsystemen in der interdisziplinären Produktentstehung (Dissertation)*. IPEK - Forschungsberichte. Band 85. Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie (KIT): IPEK - Institut für Produktentwicklung.
- Eckert, C. M., Clarkson, P. J. & Zanker, W. (2004). Change and Customisation in complex engineering domains. *Research in engineering design*, 15, 1–21.
- Eckert, C. M. & Isaksson, O. (2017). Safety Margins and Design Margins: A Differentiation between Interconnected Concepts. *27th CIRP Design 2017, Cranfield*, 267–272.
- Eckert, C. M., Stacey, M. K. & Clarkson, P. J. (2003). The spiral of applied research: A methodological view on integrated design research. In A. Folkson, K. Gralen, M. Norell & U. Sellgren (Hrsg.), *Proceedings of the 14th International Conference on Engineering Design (ICED'03)* (14. Aufl., no. DS31_1139FPB). Stockholm. Schweden.
- Eckstein, L., Göbbels, R., Goede, M., Laue, T. & Wohlecker, R. (2011). Analyse sekundärer Gewichtseinsparpotenziale in Kraftfahrzeugen. *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift*, 112 (1), 68–76.
- Eckstein, L., Schmitt, F. & Hartmann, B. (2010). Leicht bei Elektrofahrzeugen. *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift*, 11, 788–795.
- Ehrlenspiel, K., Kiewert, A., Lindemann, U. & Mörtl, M. (2014). *Kostengünstig Entwickeln und Konstruieren. Kostenmanagement bei der integrierten Produktentwicklung (VDI-Buch, 7. Aufl. 2014)*. Berlin, Heidelberg. Imprint: Springer Vieweg.

- Ehrlenspiel, K. & Meerkamm, H. (2013). *Integrierte Produktentwicklung. Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit* (5., überarb. und erw. Aufl.). München. Hanser.
- Eiletz, R. (1999). *Zielkonfliktmanagement bei der Entwicklung komplexer Produkte - am Beispiel PKW-Entwicklung*. Konstruktionstechnik München. Band 32. Dissertation. Technische Universität München. Aachen. Shaker Verlag.
- Ellenrieder, G., Gänsike, T., Sandiano, J., Goede, M. & Herrmann, H. G. (2017). Die Leichtbaustrategien. In H. E. Friedrich (Hrsg.), *Leichtbau in der Fahrzeugtechnik* (2. Aufl.). Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Emitec. (2012). *Stickoxidreduktion mit SCR*. Zugriff am 11.11.2020. Verfügbar unter <https://www.emitec.com/technik/produkthanwendungen/scr/>
- Environmental Protection Agency. (2009). *Light-Duty Automotive Technology, Carbon Dioxide Emissions, and Fuel Economy Trends: 1975 through 2009*. EPA420-R-09-014, November 2009.
- Environmental Protection Agency. (2018). *Gas Guzzler Tax*. eCFR — Code of Federal Regulations, Environmental Protection Agency. Zugriff am 11.11.2020. Verfügbar unter https://www.ecfr.gov/cgi-bin/text-id?SID=ca8717e635699c00879312582f3b1a54&mc=true&node=se40.32.600_1513_608&rgn=div8
- VO (EU) Nr. 1230/2012, L353 (2012). *Verordnung (EU) Nr. 1230/2012 der Kommission, 21.12.2012*. Amtsblatt der Europäischen Union.
- Fahrmeir, L., Heumann, C., Künstler, R., Pigeot, I. & Tutz, G. (2016). *Statistik. Der Weg zur Datenanalyse*. Berlin. Springer Spektrum.
- Feyerabend, F. (1991). *Wertanalyse Gewicht: Methodische Gewichtsreduzierung - am Beispiel von Industrierobotern*. Paderborn. VDI-Verlag.
- Fisher, D. J. (2017). Weight Management During Engineering Development - 2016 Sawe Survey Results. *76th SAWE Annual Conference, Montreal, Canada*, no. 3675.
- Fisher, D. J. (2019). Application of SAWE Course "Developing Basic Parametric Methods" to Nacelle Weight Estimating. *78th Annual Conference of Society of Allied Weight Engineers, Inc., Norfolk, Virginia*, no 3729.
- FKFS. *Internationales Stuttgarter Symposium für Automobil- und Motorentechnik*. Zugriff am 26.02.2019. Verfügbar unter <http://fkfs-veranstaltungen.de/internationales-stuttgarter-symposium/>
- Frank, U. (2006). *Spezifikationstechnik zur Beschreibung der Prinziplösung selbstoptimierender Systeme*. HNI-Verlagsschriftenreihe. Band 175. Dissertation. Universität Paderborn: Heinz Nixdorf Institut.
- Friedrich, H. E. & Krishnamoorthy, S. K. (2017). Leichtbau als Treiber von Innovationen. In H. E. Friedrich (Hrsg.), *Leichtbau in der Fahrzeugtechnik* (2. Aufl., S. 1–30). Wiesbaden: Springer Vieweg.

- Fuchs, S. (2014). *Verfahren zur parameterbasierten Gewichtsabschätzung neuer Fahrzeugkonzepte*. Universitätsbibliothek der TU München. Dissertation. Technische Universität München: Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik.
- Galbraith, J. R. (1973). *Designing complex organizations*. Reading, Massachusetts. Addison-Wesley.
- Gänsike, T., Goede, M. & Sandiano, J. (2017). Die Technische Motivation. In H. E. Friedrich (Hrsg.), *Leichtbau in der Fahrzeugtechnik* (2. Aufl., S. 33–44). Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Gänsike, T. & Sandiano, J. (2015). Systematische Bewertung von Leichtbaupotenzialen in der Fahrzeugentwicklung. *Lightweight Design, ATZ*, 8, 42–47.
- Gausemeier, J., Lanza, G., Behmann, B. & Peters, S. (2011). *Produkte und Produktionssysteme integrativ konzipieren: Modellbildung und Analyse in der frühen Phase der Produktentstehung*. Hanser, München.
- Gebauer, M. (2001). *Kooperative Produktentwicklung auf Basis verteilter Anforderungen*. Dissertation. Universität Karlsruhe (TH). Aachen. Shaker Verlag.
- Geraldi, J., Maylor, H. & Williams, T. (2011). Now, let's make it really complex (complicated): A systematic review of the complexities of projects. *International Journal of Operations & Production Management*, 31, 966–990.
- Gericke, K., Eckert, C. M. & Stacey, M. K. (2017). What we need to say about a design method? *21st International Conference on Engineering Design, ICED17, Vancouver*, 101–110.
- Granzow, S. (2012). *Mechatronische Schwingungstilger in Fahrzeugen - Ganzheitliche Massen- und Energiebilanz*. Universitätsbibliothek der TU München. Dissertation. Technische Universität München: Lehrstuhl für Leichtbau.
- Greene, D. L. (2010). *How Consumers Value Fuel Economy: A Literature Review*. ID: 9169068. Environmental Protection Agency.
- Gumpinger, T., Jonas, H. & Krause, D. (2011). New Approach for Lightweight Design - From Differential Design to Integration of Functions. *Proceedings of ICED '09, the 17th International Conference on Engineering Design, Stanford*, 6, 201–210.
- Hab, G. & Wagner, R. (2006). *Projektmanagement in der Automobilindustrie: Effizientes Management von Fahrzeugprojekten entlang der Wertschöpfungskette*. Wiesbaden. Springer Gabler.
- Hackbarth, A. & Madlener, R. (2016). Willingness-to-pay for alternative fuel vehicle characteristics: A stated choice study for Germany. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 85, 89–111.

- Hansen, F. (2013). Mobilität. In H.-H. Braess & U. Seiffert (Hrsg.), *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik* (7. Aufl., S. 1–9). Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Harvard Instructional Physics Labs. (2013). *Handout for Error Propagation*. Zugriff am 11.11.2020. Verfügbar unter http://ipl.physics.harvard.edu/wp-uploads/2013/03/PS3_Error_Propagation_sp13.pdf
- Hastings, D. & McManus, H. (2006). A Framework for Understanding Uncertainty and its Mitigation and Exploitation in Complex Systems. *IEEE Engineering Management Review, Worcester, MA, 34*, 81–99.
- Heinemeyer, G. & Mosbach-Schulz, O. (2014). *Leitfaden zur Unsicherheitsanalyse in der Expositionsschätzung, Empfehlung der Kommission für Expositionsschätzung und -standardisierung des Bundesinstituts für Risikobewertung*. Berlin. BfR.
- Heißing, B., Ersoy, M. & Gies, S. (2011). *Fahrwerkhandbuch*. Springer Fachmedien Wiesbaden.
- Henning, F., Gauterin, F., Dollinger, A. & Burgert, T. (2019). Leichtbau für die Elektromobilität - Eine gewichtige Strategie? KIT & Fraunhofer ICT. *Forum Leichtbau, Hannover*.
- Henninger, H. (2019). *OAMTC - auto touring*. Zugriff am 11.11.2020. Verfügbar unter <https://www.oamtc.at/autotouring/auto/die-glorreichen-sieben-31451395>
- Hessenauer, B. (2014). *Ansätze zum methodischen Systemleichtbau und dessen Unterstützung durch numerische Topologieoptimierung bei dynamischer Belastung. Approaches for methodological lightweight system design and its support by numerical topology optimization in dynamic loading conditions*. IPEK -Forschungsberichte. Band 73. Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie (KIT): IPEK -Institut für Produktentwicklung.
- Heuss, R., Müller, N., van Sintern, W., Starke, A. & Tschiesner, A. (2012). *Lightweight, heavy impact. How carbon fiber and other lightweight materials will develop across industries and specifically in automotive*. Zugriff am 11.11.2020. Verfügbar unter https://www.mckinsey.com/~/media/mckinsey/dotcom/client_service/automotive%20and%20assembly/pdfs/lightweight_heavy_impact.ashx
- Hidrué, M. K., Parsons, G. R., Kempton, W. & Gardner, M. P. (2011). Willingness to pay for electric vehicles and their attributes. *Resource and Energy Economics, 33*, 686–705.
- Hofer, J., Wilhelm, E. & Schenler, W. (2012). Optimal Lightweighting in Battery Electric Vehicles. *World Electric Vehicle Journal Vol. 5*, 1303–1314.
- Hummel, O. (2011). *Aufwandsschätzung in der Software- und Systementwicklung kompakt*. Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg.

- IIHS. (2012). *Frontal Crash Tests – Driver side small overlap frontal test*. Zugriff am 11.11.2020. Verfügbar unter <http://www.iihs.org/iihs/ratings/ratings-info/frontal-crash-tests>
- INCOSE Technical Operations. (2007). *Systems Engineering Vision 2020. INCOSE Technical Operations*, no. INCOSE-TP-2004-004-02. Zugriff am 11.11.2020. Verfügbar unter http://www.ccose.org/media/upload/SEVision2020_20071003_v2_03.pdf
- International Council of Clean Transportation. (2016). *Proposed temporary management regulation for corporate average fuel consumption and new-energy vehicle credits for new passenger cars in China*. China. International Council of Clean Transportation.
- Jarratt, T. A. W., Eckert, C. M., Caldwell, N. H. & Clarkson, P. J. (2011). Engineering change: an overview and perspective on the literature. *Research in engineering design*, 22, 103–124.
- Jarratt, T. A. W., Eckert, C. M. & Clarkson, P. J. (2004). *Engineering change. Design process improvement*, Springer, New York.
- Johansen, R. (2007). *Sensing the future to compete in the present*. Oakland, CA, USA. Berrett-Koehler.
- Kairies, P. (2008). *So analysieren Sie Ihre Konkurrenz. Konkurrenzanalyse und Benchmarking in der Praxis* (8. Aufl.). Tübingen. expert Verlag.
- Kehr, H. M. & Schattke, K. *Motivationsmanagement in der mitarbeiterorientierten Unternehmensführung*. Vortragsfolien. TU München: Lehrstuhl für Psychologie. Zugriff am 11.11.2020. Verfügbar unter <https://silo.tips/download/motivationsmanagement>
- Koffler, C. & Rohde-Brandenburger, K. (2010). On the calculation of fuel savings through lightweight design in automotive life cycle assessments. Klaus. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 10, 128–135.
- Kopp, G., Burkardt, N. & Majic, N. (2011). Leichtbaustrategien und Bauweisen. In F. Henning, E. Moeller & A. Albers (Hrsg.), *Handbuch Leichtbau. Methoden, Werkstoffe, Fertigung* (S. 57–75). München, Wien. Carl Hanser Verlag.
- Kosfeld, R., Eckey, H. F. & Türck, M. (2016). *Deskriptive Statistik. Grundlagen – Methoden – Beispiele – Aufgaben* (6. Aufl.). Wiesbaden. Springer Gabler.
- Kreis, T. & Blankenburg, S. (2014). Gewichtsmangement - Leichtbau intelligent steuern. *Lightweight Design, ATZ*, 7, 54–57.
- Leard, B., Linn, J. & Zhou, Y. C. (2017). *How Much Do Consumers Value Fuel Economy and Performance? Evidence from Technology Adoption*. Washington DC. RFF Report.
- Lindemann, U. & Lorenz, M. (2008). Uncertainty Handling in Integrated Product Development. *10th International Design Conference DESIGN 2008, Dubrovnik, Croatia*, 175–182.

- Lindemann, U., Maurer, M. S. & Braun, T. (2009). *Structural complexity management: An approach for the field of product design*. Berlin. Springer.
- Lohmeyer, Q. (2013). *Menschzentrierte Modellierung von Produktentstehungssystemen unter besonderer Berücksichtigung der Synthese und Analyse dynamischer Zielsysteme. Human-centered modeling of product development systems in consideration of the synthesis and analysis of dynamic systems of objectives*. IPEK -Forschungsberichte. Band 59. Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie (KIT): IPEK -Institut für Produktentwicklung.
- Lüdeke, T. (2016). *Beitrag zur gewichtsoptimierten Entwicklung mechatronischer Produkte*. Dissertation. Universität des Saarlandes: NT - Systems Engineering.
- Luhmann, N. (1994). *Die Wissenschaft der Gesellschaft* (2. Aufl.). Frankfurt am Main. Suhrkamp.
- MacKenzie, D. W. (2009). *Trends and Drivers of the Performance – Fuel Economy Tradeoff in New Automobiles*. Masterarbeit. Massachusetts Institute of Technology (MIT), Division for Engineering Systems.
- Malen, D. E., Göbbels, R. & Wohlecker, R. (2013). Secondary Mass Changes in Vehicle Design Estimation and Application. *SAE International Journal of Materials and Manufacturing*, 6, 174–183.
- Malen, D. E. & Hughes, J. (2015). Mass Benchmarking Using Statistical Methods Applied to Automotive Closures. *SAE International Journal of Materials and Manufacturing*, 8 (3), 853–863. <https://doi.org/10.4271/2015-01-0574>
- Malik, F. (2003). *Strategie des Managements komplexer Systeme*. Verlag Paul Haupt Bern und Stuttgart.
- Marxen, L. (2014). *A Framework for Design Support Development based on the integrated Product Engineering Model iPeM*. IPEK -Forschungsberichte. Band 74. Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie (KIT): IPEK -Institut für Produktentwicklung.
- Matthiesen, S. (2011). Seven years of product development in industry – experiences and requirements for supporting engineering design with ‘thinking tools’. *Proceedings of the 18th International Conference on Engineering Design (ICED 11). Copenhagen, August 15-18, 2011*, 236–245.
- Maurer, M. S. (2007). *Structural awareness in complex product design*. Dr. Hut. Dissertation. Technische Universität München: Lehrstuhl für Produktentwicklung.
- McLellan, J. (2010). *A Proposed Method to Identify Requirements Significant to Mass Reduction*. Masterarbeit. Clemson University, Graduate School Mechanical Engineering.
- Meboldt, M. (2008). *Mentale und formale Modellbildung in der Produktentstehung - als Beitrag zum integrierten Produktentstehungs-Modell (iPeM). Mental and formal modelling, a contribution to the integrated product development model*

- (iPeM). IPEK - Forschungsberichte. Band 29. Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie (KIT): IPEK - Institut für Produktentwicklung.
- Meyer, H. & Reher, H.-J. (2016). *Projektmanagement. Von der Definition über die Projektplanung zum erfolgreichen Abschluss*. Springer Fachmedien Wiesbaden.
- Meyer-Schwickerath, B. (2014). *Vorausschau im Produktentstehungsprozess - Das integrierte Produktentstehungs-Modell (iPeM) als Bezugsrahmen für Vorausschau am Beispiel von Szenariotechnik und strategischer Frühaufklärung*. IPEK - Forschungsberichte. Band 79. Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie (KIT): IPEK - Institut für Produktentwicklung.
- Mun, J. (2006). *Modeling risk, Applying Monte Carlo simulation, real options analysis, forecasting, and optimization techniques*. Hoboken, N.J. John Wiley & Sons.
- Murray, J. (1961). *The Oxford English Dictionary, Vol. XI*. Oxford, United Kingdom. Clarendon Press.
- Muschik, S. (2011). *Development of Systems of Objectives*. IPEK - Forschungsberichte. Band 50. Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie (KIT): IPEK - Institut für Produktentwicklung.
- Namouz, E. (2010). *Mass and assembly time reduction for future generation automotive vehicles based on existing vehicle model*. Masterarbeit. Clemson University, Graduate School Mechanical Engineering.
- National Highway Traffic Safety Administration: (2010). *2017-2025 Model Year Light-Duty Vehicle GHG Emissions and CAFE Standards: Supplemental Notice of Intent*. National Highway Traffic Safety Administration. Zugriff am 11.11.2020. Verfügbar unter <https://www.federalregister.gov/documents/2011/08/09/2011-19905/2017-2025-model-year-light-duty-vehicle-ghg-emissions-and-cafe-standards-supplemental-notice-of>
- Neufville, R. d. & Scholtes, S. (2011). *Flexibility in Engineering Design*. Cambridge. The MIT Press.
- Nykvist, B. & Nilsson, M. (2015). Rapidly falling costs of battery packs for electric vehicles. *Nature Climate Change*, Vol. 5, 329–332.
- Pahl, G., Beitz, W., Feldhuden, J. & Grote, K.-H. (2013). *Pahl/Beitz, Konstruktionslehre: Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung. Methoden und Anwendung* (7. Aufl.). Berlin. Springer.
- Patzak, G. (1982). *Systemtechnik, Planung komplexer innovativer Systeme. Grundlagen, Methoden, Techniken*. Berlin. Springer.
- Peglow, N., Powelske, J., Birk, C., Albers, A. & Bursac, N. (2017). Systematik zur Differenzierung von Varianten im Kontext der PGE-Produktgenerationsentwicklung. 15. *Gemeinsames Kolloquium*

- Konstruktionstechnik 2017, Duisburg*. Zugriff am 11.11.2020. Verfügbar unter http://www.kt-kolloquium.de/de/history/book_of_abstract_2017.pdf
- Pohl, K. (2007). *Requirements Engineering – Grundlagen, Prinzipien, Techniken*. Heidelberg. dpunkt.
- Ponn, J. & Lindemann, U. (2011). *Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte. Systematisch von Anforderungen zu Konzepten und Gestalllösungen* (VDI-Buch, 2. Aufl.). Berlin Heidelberg. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Posner, B., Keller, A., Binz, H. & Roth, D. (2012). Holistic Lightweight Design For Function And Mass: A Framework For The Function Mass Analysis. *Proceedings of the DESIGN 2012 - 12th International Design Conference. Dubrovnik, May 21-24, 2012*, 1071–1080.
- Potoglou, D. & Kanaroglou, P. S. (2007). Household demand and willingness to pay for clean vehicles. *Transportation Research Part D 12: Transport and Environment*, 12 (4), 264–274.
- Probst, G., Raub, S. & Romhardt, K. (2010). *Wissen managen*. Wiesbaden. Springer Gabler.
- Puls, T. (2013). *CO2-Regulierung für Pkw. Fragen und Antworten zu den europäischen Grenzwerten für Fahrzeughersteller*. Köln. Institut der deutschen Wirtschaft.
- Raubold, U. (2011). *Lebenszyklusmanagement in der Automobilindustrie: Ein Optimierungsansatz auf Basis der auf den Lebenszyklus wirkenden Einflussfaktoren* (Beiträge zur Produktionswirtschaft). Wiesbaden. Gabler Verlag.
- Redelbach, M., Klötzke, M. & Friedrich, H. E. (2012). Impact of lightweight design on energy consumption and cost effectiveness of alternative powertrain concepts. *EEVC European Electric Vehicle Congress 2012, Brüssel, Belgien*, 1–9.
- Revfi, S., Albers, A., Holoch, J. & Spadinger, M. (2018a). Extended Target Weighing Approach - A System Lightweight Design Approach for new Product Generations. *Symposium Lightweight Design in Product Development 2018, Zürich*, 29–31.
- Richter, T., Albers, A., Gesk, J. & Witt, J.-H. (2019). A Systematic Approach to Model Objectives in Predevelopment Projects. *International Conference on Engineering Design, ICED19, Delft*, 1363–1372.
- Rohde-Brandenburger, K. (2013). Was bringen 100kg Gewichtsreduzierung im Verbrauch? Eine physikalische Berechnung. *Lightweight Design, ATZ*, 115, 7–8.
- Ropohl, G. (1975). *Systemtechnik, Grundlagen und Anwendung*. Wien. Hanser.
- Ropohl, G. (2009). *Allgemeine Technologie. Eine Systemtheorie der Technik*. Karlsruhe. Universitätsverlag Karlsruhe.

- Rowell, W. F., Duffy, A.H.B., Boyle, I. M. & Masso, N. (2009). The nature of engineering change in a complex product development cycle. *Proceedings of 7th annual conference on systems engineering research, Loughborough*, 1–8.
- SAWE Recommended Practices and Standards. (2007). *Mass Properties Control for Wheeled and Tracked Vehicles*. Los Angeles, CA 90060. Society of Allied Weight Engineers.
- SAWE Recommended Practices and Standards. (2015). *Mass Properties Control for Space Systems*. Los Angeles, CA 90060. Society of Allied Weight Engineers.
- SAWE Recommended Practices and Standards. (2018). *Overview of Mass Properties Engineering for Vehicle Systems*. Los Angeles, CA 90060. Society of Allied Weight Engineers.
- Schat, H.-D. (2017). *Erfolgreiches Ideenmanagement in der Praxis*. Wiesbaden. Springer Gabler.
- Schneider, R. A. & Rieck, K. (2012). *Komplexität in der Automobilindustrie am Beispiel Baukastenstrategie*. Wolfsburg. Volkswagen AG.
- Schott, E. & Campana, C. (2005). *Strategisches Projektmanagement*. Springer Berlin Heidelberg.
- Schuh, G. (2005). *Produktkomplexität managen: Strategien, Methoden, Tools*. Hanser, München.
- Simon, H. A. (1994). *Die Wissenschaft vom Künstlichen*. Wien. Springer.
- Snowden, D. J. & Boone, M. E. (2007). A leader's framework for decision making. *Harvard Business Review*, 85 (11), 68–76.
- Stachowiak, H. (1973). *Allgemeine Modelltheorie*. Wien. Springer-Verlag.
- Stechert, C. (2010). *Modellierung komplexer Anforderungen*. Bericht Nr. 75. Dissertation. TU Braunschweig: Institut für Konstruktionstechnik.
- Suh, N. P. (1999). Theory of Complexity, Periodicity and the Design Axioms. *Research in Engineering Design*, Vol. 11, 116–131.
- Taguchi, G. (2004). *Taguchi's Quality Engineering Handbook*. Hoboken, N.J, USA. John Wiley & Sons.
- Terwiesch, C. & Loch, C. H. (1999). Managing the process of engineering change orders: the case of the climate control system in automobile development. *Journal of Product Innovation Management*, 16 (2), 160–172.
- The MathWorks, I. (2018). MATLAB and Statistics Toolbox Release R2018b [Computer software]. Natick, Massachusetts, United States.
- Toyota. (2019). *Children's question room*. Zugriff am 11.11.2020. Verfügbar unter <https://www.toyota.co.jp/en/kids/faq/d/01/04/>
- Trautwein, T. (2011). Gewichtsspirale. Stellhebel in der Fahrzeugauslegung. *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift*, 113 (5), 390–395.
- Trist, E. L. & Bamforth, K. W. (1951). Some Social and Psychological Consequences of the Longwall Method of Coal-Getting: An Examination of the

- Psychological Situation and Defences of a Work Group in Relation to the Social Structure and Technological Content of the Work System. *Human Relations*, 4 (1), 3–38. <https://doi.org/10.1177/001872675100400101>
- Unsel, T. (2012). Herausforderungen im Spannungsfeld Sicherheit, Leichtbau und Wirtschaftlichkeit. *ATZ, Sonderheft für VDI-FVT 2012*, 12–16.
- VDA. (2011). *Das gemeinsame Qualitätsmanagement in der Lieferkette. Produktherstellung und -lieferung - Robuster Produktionsprozess*. Zugriff am 12.11.2020. Verfügbar unter <https://www.vda-qmc.de/publikationen/download/>
- VDI-Verein Deutscher Ingenieure. (2004). *VDI 2206 -Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme*. ICS 03.100.40; 31.220. VDI-Gesellschaft Entwicklung Konstruktion Vertrieb (VDI-EKV).
- VDI 2800, ICS 03.100.40 (2010). *Wertanalyse*. Düsseldorf.
- Wagner, D. (2015). *Methodengestützte Entwicklung eines elektrischen Energiespeichers zur Erschließung von Leichtbaupotenzialen als Beitrag zur Produktgenerationsentwicklung*. IPEK -Forschungsberichte. Band 89. Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie (KIT): IPEK -Institut für Produktentwicklung.
- Weber, C. & Werner, H. (2000). Klassifizierung von CAx-Werkzeugen für die Produktentwicklung auf der Basis eines neuartigen Produkt- und Prozessmodells. 11. *Symposium Design For X, Tutzing*, 126–143.
- Weck, O. de. (2006). A Systems Approach to Mass Budget Management. 11th *AIAA/ISSMO Multidisciplinary Analysis and Optimization Conference*, 6 - 8 September 2006, Portsmouth, Virginia, no. 7055.
- Weck, O. de, Eckert, C. M. & Clarkson, P. J. (2007). A Classification of Uncertainty for Early Product and System Design. *Proceedings of ICED 2007, the 16th International Conference on Engineering Design, Paris, France, 28.-31.07.2007*, no. DS42_P_480.
- Wiebel, M., Eifler, T., Mathias, J., Kloberdanz, H., Bohn, A. & Birkhofer, H. (2013). Modellierung von Unsicherheit in der Produktentwicklung. In S. Jeschke, E.-M. Jakobs & A. Dröge (Hrsg.), *Exploring Uncertainty* (S. 245–269). Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.
- Wieland, A. & Wallenburg, C. M. (2012). Dealing with supply chain risks. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 42 (10), 887–905. <https://doi.org/10.1108/09600031211281411>
- Witzel, A. & Reiter, H. (2012). *The Problem-Centred Interview*. London. SAGE Publications Ltd.
- Yanni, T. & Venhovens, P. J. T. (2010). Impact and Sensitivity of Vehicle Design Parameters on Fuel Economy Estimates. *SAE Technical Paper, 2010-01-0734*, 1–10. <https://doi.org/10.4271/2010-01-0734>

Zangemeister, C. (1973). *Nutzwertanalyse in der Systemtechnik. Eine Methodik zur multidimensionalen Bewertung und Auswahl von Projektalternativen*. Winnemark, Deutschland. Zangemeister & Partner.

Vom Autor Co-betreute Abschlussarbeiten

- Ehret, K. (2018). *Entwicklung einer methodischen Vorgehensweise zur Quantifizierung der Gewichtsunsicherheiten in der Automobilentwicklung*. Masterarbeit. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), IPEK - Institut für Produktentwicklung, Karlsruhe.
- Laubvogel, C. (2019). *Weiterentwicklung eines Tools zur Prognose von Fachbereichs- und Modulgewichten in einer frühen Phase der Entwicklung*. Bachelorarbeit. Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin, Institut für Fahrzeugtechnik, Berlin.
- Neumann, S. (2018). *Entwicklung einer Methode zur Prognose von Fahrzeug- und Subsystemgewichten auf Basis statistischer Ansätze und physikalischer Wechselwirkungen*. Masterarbeit. Technische Hochschule Köln, Institut für Fahrzeugtechnik (IFK), Köln.
- Plotho, M. v. (2018). *Entwicklung einer Methode zur betriebswirtschaftlichen Bewertung von Leichtbaumaßnahmen in der Automobilindustrie*. Masterarbeit. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), IPEK - Institut für Produktentwicklung, Karlsruhe.
- Schneider, A. (2018). *Identifikation von Leichtbaumaßnahmen für zukünftige Fahrzeugprojekte auf Basis einer intelligenten und teilautomatisierten Wettbewerbsanalyse*. Bachelorarbeit. Technische Hochschule Ingolstadt, Institut für Industriedesign und Konstruktion, Ingolstadt.
- Zemke, D. (2019). *Erstellung eines Konzepts für Ideenmanagement in der Automobilindustrie in Form einer fachbereichsübergreifenden Leichtbaudatenbank*. Masterarbeit. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), IPEK - Institut für Produktentwicklung, Karlsruhe.

Veröffentlichungen des Autors

- Revfi, S., Albers, A. & Stegmiller, M. (2018b). Target Weighing Approach: Study to evaluate the benefits of a methodical approach in comparison to classical company processes for the identification of lightweight design potentials. *Norddesign 2018, Linköping*, no. 29.
- Stegmiller, M. & Albers, A. (2019). Methods and Processes for Robust Mass Properties Management in the Automotive Industry with a main Focus on Weight Uncertainties. *78th Annual Conference of Society of Allied Weight Engineers, Inc., Norfolk, Virginia*, no. 3724.

Stegmiller, M., Albers, A. & Bursac, N. (2018). Methods and processes for robust weight management in the automotive industry. 18. *Internationales Stuttgarter Symposium, Stuttgart*, 919–934.

Glossar

Agilität	Agilität - basierend auf dem Verständnis des ZHO-Systemtripels - ist die Fähigkeit eines Handlungssystems, die Gültigkeit eines Projektplans hinsichtlich der Planungsstabilität der Elemente im ZHO-Triple kontinuierlich zu überprüfen, zu hinterfragen und bei Vorliegen einer ungeplanten Informationskonstellation eine situations- und bedarfsgerechte Anpassung der Sequenz aus Synthese- und Analyseaktivitäten umzusetzen, wodurch der Kunden-, Anwender- und Anbieternutzen zielgerichtet erhöht werden.
Auslegungsgewicht	Das Auslegungsgewicht wird zur Auslegung der technischen Systeme im Fahrzeug verwendet. Es stellt gegenüber dem Ist- und Zielgewicht durch die systematische Berücksichtigung zusätzlicher Informationen eine realistischere Prognose des Gewichts zu SOP und/oder zu folgenden Serieneinsatzterminen dar.
Baukasten	Ein Baukasten ist die Menge aller technischen Subsysteme, die dem zugehörigen Baukasten-Regelwerk folgen, mit dem Ziel, aus diesen Subsystemen technische Systeme mit jeweils unterschiedlicher Menge aller Funktionen konfigurieren zu können.
Baureihe	Eine Baureihe bezeichnet mehrere technische Systeme, die eine ähnliche Produktarchitektur aufweisen. Die jeweiligen technischen Systeme unterscheiden sich dabei durch die Ausprägung einzelner Attribute, die durch Skalieren variiert werden.
Entwicklungsgeneration	Eine Entwicklungsgeneration $E_{i,j}$ ist ein Zustand des beabsichtigten Kunden-, Anwender- und Anbieternutzens der Produktgeneration G_i .

Gestaltvariation (GV)	Entwicklung von Funktionseinheiten durch Veränderung der Gestalt bei (im Vergleich zu Referenzelement) Beibehaltung des Lösungsprinzips. GV ist die häufigste Aktivität in der Produktentwicklung.
Gewichtsmanagement	Unter Gewichtsmanagement wird die Planung, Kontrolle, Steuerung und Optimierung der Eigenschaft „Gewicht“ in Projekten der Produktentwicklung verstanden.
Handlungssystem	Das Handlungssystem ist ein soziotechnisches System, das aus strukturierten Aktivitäten, Methoden und Prozessen aufgebaut ist. Es enthält weiterhin alle für die Realisierung einer Produktentstehung notwendigen Ressourcen (Entwickler, Budget, Ausstattung etc.). Das Handlungssystem erstellt sowohl das Ziel- als auch das Objektsystem, beide Systeme sind durch das Handlungssystem miteinander verbunden.
Ist-Gewicht	Das Ist-Gewicht ist das Gewicht eines definierten Bauteilumfangs zum aktuellen Zeitpunkt. Der Bauteilumfang entspricht dem aktuell gültigen Konstruktionsstand und berücksichtigt zudem nicht genehmigungspflichtige Maßnahmen (z.B. Fertigungseffekte) bis SOP. Das Ist-Gewicht bildet den Beladungszustand Messlast 1 (Leergewicht) ab.
Messlast 1 – Leergewicht	Leergewicht nach DIN 70020 Teil 2: Gewicht des trockenen Fahrzeugs mit kompletter Ausrüstung für den normalen Fahrbetrieb, wie vom Hersteller vorgesehen, zuzüglich Kühlmittel, mindestens 90 % Füllung des Kraftstoffbehälters ²⁹ , Feuerlöscher ²⁹ , Ersatzrad (-räder) ²⁹ , Standardsatz von Ersatzteilen ²⁹ , Unterlegkeile ²⁹ und Standard-Werkzeugsatz ²⁹ .

²⁹ Falls vom Fahrzeughersteller vorgesehen

**Messlast 2 –
Konstruktions-
gewicht**

Das Konstruktionsgewicht ist das Gewicht des Fahrzeuges, welches sich aus der Summe des Leergewichts (Messlast 1) und bestimmten Sitzbelastungen ergibt. So sind bei einem 4- und 5-Sitzer jeweils zwei Personen vorne und eine Person auf der zweiten Sitzreihe zu verorten. Weitere Varianten finden sich in DIN 70020. Als Gewicht eines Fahrzeuginsassen sind 68 kg anzunehmen.

**Messlast 3 –
Zulässiges
Gesamtgewicht**

Zulässiges Gesamtgewicht in Übereinstimmung mit der Fahrzeugzulassung.

Zulässiges Gesamtgewicht nach DIN 70020 Teil 2 und unter Ausnutzung der zulässigen Hinterachslast.

Modul

Physisch zusammenhängende, in der Regel austauschbare Einheit des Gesamtsystems, mit klar definierten Schnittstellen.

Objektsystem

Das Objektsystem enthält alle Dokumente und Artefakte, die als Teillösungen während des Entstehungsprozesses anfallen. Es ist vollständig, sobald der geplante Zielzustand erreicht ist. Das eigentliche Produkt ist neben Zwischenprodukten (z.B. Zeichnungen oder Prototypen) eines der Elemente des Objektsystems. Das Handlungssystem nimmt während des Produktentstehungsprozesses ständig Teile des Objektsystems auf und leitet daraus durch Schritte der Analyse und Synthese neue Ziele ab. Endergebnis eines Produktentstehungsprozesses ist neben dem eigentlichen Produkt auch die Summe aller Zwischenergebnisse im Objektsystem, das vollständige Zielsystem und nicht zuletzt das gesammelte Erfahrungswissen im Handlungssystem aus der Durchführung und Reflexion des Prozesses.

Plattform und Hut	Eine Plattform ist die Menge jener Subsysteme, die in unterschiedlichen technischen Systemen unverändert zum Einsatz kommt. Der Hut hingegen umfasst die restlichen Subsysteme, die in den unterschiedlichen technischen Systemen die Menge aller Funktionen oder Attribute variieren.
Prinzipvariation (PV)	Entwicklung bestimmter Funktionseinheiten mit Hilfe eines (im Vergleich zu Referenzsystemelement) neuen Lösungsprinzips.
Produkt-generations-entwicklung	Die Produktgenerationsentwicklung ist die Entwicklung einer neuen Generation eines technischen Produkts, die sowohl durch die Anpassung von Teilsystemen als Übernahmevariation als auch durch eine signifikante Neuentwicklung von Teilsystemen charakterisiert ist. Neu entwickelte Anteile technischer Produkte können durch Gestalt- und durch Prinzipvariation realisiert werden. Neue Produktgenerationen basieren immer auf einem Referenzsystem, dessen Referenzsystemelemente die grundsätzliche Struktur beschreiben..
Prognosegewicht	Das Prognosegewicht ist das prognostizierte Gewicht eines definierten Bauteilumfangs zu SOP. Es basiert auf dem Ist-Gewicht und berücksichtigt genehmigungspflichtige Maßnahmen, die mit hoher Wahrscheinlichkeit bis SOP eintreten. Das Prognosegewicht bildet den Beladungszustand Messlast 1 (Leergewicht) ab.
Randbedingung	Eine Randbedingung ist eine aus dem Umfeld der Entwicklung resultierende Einschränkung, die von anderen verantwortet wird und daher zwar ermittelt, aber nicht eigenständig definiert oder geändert werden kann.
Referenzprodukt	Referenzprodukte sind bestehende Produkte (z. B. Vorgänger- oder Wettbewerbsprodukte), auf deren Basis neue Produktgenerationen entwickelt werden. Dazu werden teilweise deren Struktur und Teilsysteme übernommen oder als Ausgangspunkt für Variationen zugrunde gelegt.

Referenzsystem	Das Referenzsystem für die Entwicklung einer neuen Produktgeneration ist ein System, dessen Elemente bereits existierenden oder bereits geplanten soziotechnischen Systemen und der zugehörigen Dokumentation entstammen und Grundlage und Ausgangspunkt der Entwicklung der neuen Produktgeneration sind.
System	Ein System ist das Modell einer Ganzheit, die (a) Beziehungen zwischen Attributen (Inputs, Outputs, Zustände etc.) aufweist, die (b) aus miteinander verknüpften Teilen bzw. Subsystemen besteht, und die (c) von ihrer Umgebung bzw. von einem Supersystem abgegrenzt wird.
Technische Änderung	Eine technische Änderung ist eine Änderung an Bauteilen, Zeichnungen oder Software, die bereits während des Produktentwicklungsprozesses freigegeben wurden. Die Änderung kann von beliebiger Größe oder Art sein; die Änderung kann eine beliebige Anzahl von Personen betreffen und beliebig lange dauern.
Teilzielsystem	Ein Teilzielsystem beschreibt im Kontext der Karlsruher Schule für Produktentwicklung einen Ausschnitt eines Zielsystems unter einem bestimmten Gesichtspunkt (z.B. Gewicht).
Übernahmevariation (ÜV)	Übernahme bestehender Lösungen aus Referenzsystemelementen in die neue Produktgeneration. Anpassungen an den Schnittstellen erfolgen den Anforderungen der Systemintegration entsprechend. Eine Minimierung konstruktiver Anpassungen wird fokussiert.
Ziel	Ein Ziel ist die bewusste gedankliche Vorwegnahme eines zukünftigen Soll-Zustands, der gemeinsam vereinbart und durch aktives Handeln angestrebt oder vermieden wird. Ziele begründen die Funktion und die Gestalt von Objekten.

Zielgewicht	Das Zielgewicht ist das geforderte Gewicht eines Bauteilumfangs zu SOP. Das Zielgewicht bildet den Beladungszustand Messlast 1 (Leergewicht) ab.
Zielsystem	Ein vollständiges Zielsystem beinhaltet alle relevanten Ziele, deren Wechselwirkungen, Randbedingungen und Begründungen, die für die Entwicklung des richtigen Produkts erforderlich sind.

Anhang A

Fragebogen Automobilindustrie

Fragebogen Gewichtsmanagement



1) In welcher Branche sind Sie tätig?

- Automobilbau Luft- und Raumfahrt Elektrotechnik Forschungsinstitut
 Andere: _____

2) Wie viele Mitarbeiter hat das Unternehmen in dem Sie derzeit arbeiten?

- 1-100 101-500 501-5000 5001-50000 Mehr als 50000

3) Wie schwer sind die Produkte Ihres Unternehmens im Durchschnitt?

- Unter 50kg 51-500kg 501-5000kg Mehr als 5000kg

4) Arbeiten Sie bei einem OEM oder Zulieferer?

- OEM Zulieferer Andere: _____ k. A.

5) Wie viele Jahre Berufserfahrung haben Sie?

- 0-2 Jahre 3-5 Jahre 6-10 Jahre 11-20 Jahre Mehr als 20 Jahre

6) Wie lange arbeiten Sie schon in Ihrem Unternehmen?

- 0-2 Jahre 3-5 Jahre 6-10 Jahre 11-20 Jahre Mehr als 20 Jahre

7) In welchen Tätigkeitsfelder sind Sie hauptsächlich tätig (Mehrfachnennungen möglich)

- Systemgestaltung / -Integration Konstruktion Produktion IT
 Projektmanagement Validierung Andere: _____

8) Wie gut kennen Sie die Gewichtsmanagementprozesse in Ihrem Unternehmen?

- Direkter Kontakt Indirekter Kontakt Kein Kontakt, aber bekannt Nicht bekannt

9) Wie ist das Gewichtsmanagement in Ihrem Unternehmen organisiert?

- Zentrale Stelle Dezentral Projekt Ich weiß es nicht Andere _____

10) Wie groß ist der Stellenwert des Gewichtsziels in Ihrem Unternehmen verglichen mit anderen Zielgrößen (z. B. Kostenziele, Funktionsziele)

Hoch Mittel Niedrig Je nach Projekt k. A.

11) Wie leitet Ihr Unternehmen Produktgewichtsziele her? (Mehrfachnennungen möglich)?

Vorgänger Eigene Referenzprodukte Wettbewerb Statistisches Modell
 Physikalisches Modell (Simulationen, etc.) Andere: _____

12) Sind die Gewichtsziele in Ihrem Unternehmen stets niedriger als das Ist-Gewicht?

Immer Meistens Teils teils Selten Nie k. A.

13) Werden die initialen Produktgewichtsziele am Ende der Entwicklung erreicht?

Immer Meistens Teils teils Selten Nie k. A.

14) Die Gewichtsziele in einer frühen Phase sind so anspruchsvoll, dass erhebliche Gewichtsreduzierungsmaßnahmen zum Erreichen des Ziels notwendig sind.

Immer Meistens Teils teils Selten Nie k. A.

15) Die Entwicklung des Produktgewichts im Projektverlauf ist u. a. auf Grund von technischen und regulatorischen Änderungen sehr volatil.

Ja Eher ja Teils teils Eher nein Nein k. A.

16) Werden die Gewichtsziele in Ihrem Unternehmen auf veränderte Randbedingungen angepasst?

Immer Meistens Teils teils Selten Nie k. A.

17) Welche Maßnahmen verwendet Ihr Unternehmen um die Robustheit des Gewichtsprozesses zu erhöhen?

Puffer Unsicherheitsabschätzung Szenariotechniken Flexibles Design
 Gewichtsprognosen Keine Andere: _____ k. A.

18) Wie stark ist die Gewichtsmanagementstelle an der Auslegung der Produkte beteiligt?

Hoch Mittel Niedrig Je nach Projekt Nicht beteiligt k. A.

19) Welche ist die tiefste Ebene der Gewichtsziele in Ihrem Unternehmen?

Gesamtsystem 1. Systemebene Tiefere Systemebenen Bauteil k. A.

Anhang B

Fragebogen Gewichtszielanspannung

Fragebogen – Argumentation Gewichtszielanspannung

Fragestellung: „Durch welche Einflussfaktoren kann die Gewichtszielanspannung eines Fachbereichs/Moduls argumentiert werden?“

Gewichtszielanspannung = Nicht mit Maßnahmen hinterlegtes Delta zwischen Planstand und Ziel.

Einflussfaktoren/Argumentationen	Argumentationsstärke hinsichtlich Gewichtszielanspannung
1. Neuentwicklungsanteil des Fachbereichs These: „Ein höherer Neuentwicklungsanteil rechtfertigt eine höhere Zielanspannung.“	<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-around; font-size: small;"> Sehr hoch Hoch Mittel Klein Sehr klein </div>
2. Projektphase These: „In einer frühen Phase kann ein Fachbereich höher angespannt werden.“	<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-around; font-size: small;"> Sehr hoch Hoch Mittel Klein Sehr klein </div>
3a. Hohe Systemrelevanz/Vernetzungsgrad These: „Ein stärker vernetztes Modul (zahlreiche Schnittstellen zu anderen Modulen) kann höher angespannt werden.“ (z.B. Potential durch Systemleichtbau)	<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-around; font-size: small;"> Sehr hoch Hoch Mittel Klein Sehr klein </div>
3b. Niedrige Systemrelevanz/Vernetzungsgrad These: „Ein schwächer vernetztes Modul kann höher angespannt werden.“ (z.B. Potential durch Gestaltungsfreiheit)	<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-around; font-size: small;"> Sehr hoch Hoch Mittel Klein Sehr klein </div>
4. Wettbewerbsvergleich These: „Module, die schwerer als vergleichbare Wettbewerbsmodule sind, können stärker angespannt werden.“	<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-around; font-size: small;"> Sehr hoch Hoch Mittel Klein Sehr klein </div>
5. Auswirkung des Leichtbaus auf Fahrdynamik These: „Wenn die Gewichtsreduktion eines Moduls (z.B. KC – Dach) positiv auf die Fahrdynamik wirkt, kann es stärker angespannt werden.“ (sofern Modulumfang eindeutig im FZG lokalisierbar)	<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-around; font-size: small;"> Sehr hoch Hoch Mittel Klein Sehr klein </div>
6. Kundennutzen des betrachteten Systems These: „Module mit geringem Einfluss auf kundenwerte Eigenschaften können stärker angespannt werden“.	<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-around; font-size: small;"> Sehr hoch Hoch Mittel Klein Sehr klein </div>
7. Fahrzeugsegment / Produktlinie These: „Fahrzeuge aus einer höheren Produktlinie (z.B. LG) können stärker angespannt werden.“	<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-around; font-size: small;"> Sehr hoch Hoch Mittel Klein Sehr klein </div>
Einflussfaktoren bitte hier → → → → eintragen falls noch welche fehlen. Danke!	