

**Ein Vorgehensmodell zur systematischen Werkstoffauswahl
in der frühen Phase der Entwicklung von
Fahrzeugstrukturbauteilen**

Dissertation
zur Erlangung des Grades
des Doktors der Ingenieurwissenschaften
der Naturwissenschaftlich-Technischen Fakultät
der Universität des Saarlandes

von

Robin Kaiser

Saarbrücken

2017

Tag des Kolloquiums: 22.03.2018

Dekan: Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Guido Kickelbick

Vorsitzender des Prüfungsausschusses: Univ.-Prof. Dr.-Ing. G. Frey

1. Berichterstatter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. M. Vielhaber

2. Berichterstatter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. G. Frey

Akademischer Mitarbeiter: Dr.-Ing. L. Klein

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand begleitend zu meiner Tätigkeit im Bereich der Forschung & Vorentwicklung des Karosserierohbaus bei der Daimler AG.

Die wissenschaftliche Betreuung übernahm Herr Prof. Dr.-Ing. Michael Vielhaber, Inhaber des Lehrstuhls für Konstruktionstechnik der Universität des Saarlandes. Für das allgegenwärtige Interesse am Thema, dem entgegengebrachtem Vertrauen sowie der investierten Zeit für konstruktive Diskussionen, möchte ich an dieser Stelle einen ganz besonderen Dank aussprechen. Des Weiteren danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Hans-Georg Herrmann vom Lehrstuhl für Leichtbausysteme der Universität des Saarlandes für die anregenden Gespräche, insbesondere betreffend der systematischen Materialauswahl in der Theorie und automobilen Praxis sowie der Übernahme des Koreferats.

Ein großer Dank gilt ebenso meinen Kollegen bei der Daimler AG für die Unterstützung dieser Forschungsarbeit sowohl zeitlich, fachlich als auch monetär. Hervorzuheben ist dabei vor allem das Interesse und Engagement, welches mein Kollege Dr.-Ing. Jens Humpenöder im Rahmen der fachlichen Betreuung der Arbeit durch Ratschläge, Diskussionen und aufbauende Worte an den Tag legte. Ebenso möchte ich Frau Dr. rer. nat. Ildiko Gössl sowie Herrn Dr.-Ing. Thomas Rudlaff für die entgegengebrachte Unterstützung sowie der Gewährung der notwendigen, wissenschaftlichen Freiräume zur Durchführung der Arbeit von betrieblicher Seite danken. Lob und Dank zugleich gilt darüber hinaus auch allen Studenten (Tobias Martini M. Sc., Daniel Wicht M. Sc., Xiaoxin Yang M. Sc., Florian Eger M. Sc., Robin Pflüger B. Sc.), die in Form von Abschlussarbeiten und Werkstudententätigkeiten ihren persönlichen Teil zum Gelingen sowie der Reife des Gesamtwerks beigetragen haben.

Ein unendlicher Dank gebührt vor allen Dingen meiner Familie und meinem Freundeskreis für das Verständnis und den Rückhalt, sowohl in guten als auch in schwierigen Zeiten. An dieser Stelle liegt es mir besonders am Herzen mich für die erzieherische Prägung sowie finanzielle Unterstützung bei meiner Mutter Iris zu bedanken, welche ich als Wurzel jeglichen Erfolgs in meinem Leben verstehe und größten Tribut zolle.

Zu guter Letzt verdient meine zukünftige Frau Irene das höchste Maß an Anerkennung für die fortwährende Unterstützung in jeglicher Hinsicht und über die gesamte Dauer der Anfertigung

dieser Arbeit, trotz ihres eigenen nebenberuflichen Masterstudiums. Ihr möchte ich die fortfolgende Abhandlung widmen.

Renningen, September 2017

Robin Kaiser

Kurzfassung

Aufgrund politischer Regularien sehen sich die Automobilhersteller gezwungen die Emissionswerte ihrer Fahrzeuge zunehmend zu reduzieren. Neben der Optimierung des Antriebsstrangs gelten vor allem Maßnahmen zur Gewichtsreduktion der Fahrzeugkarosserie als eines der zielführendsten Mittel zur Erfüllung der immer strenger werdenden Grenzwerte zum CO₂-Ausstoß. Hieraus hat sich in den letzten Jahren die Multi-Material-Bauweise entwickelt, welche die Wahl des geeignetsten Werkstoffs für jedes einzelne Strukturbauteil zum Ziel hat. Abweichend zu den klassischen Bauweisen wird also kein homogener Einsatz einer bestimmten Werkstoffsorte für die gesamte Fahrzeugstruktur vorgeschrieben. Mit dieser Strategie des positionsgerechten Materialeinsatzes lassen sich zum Teil drastische Reduktionen des Fahrzeuggewichts herbeiführen.

Variable Last- und Bauraumanforderungen, welche insbesondere in der frühen Phase der Entwicklung für Fahrzeugstrukturbauteile charakteristisch sind, verhindern jedoch die Festlegung eines festen Anforderungsprofils zu Beginn der Bauteilentwicklung und somit auch die Definition der Eingangsgrößen für die klassische Vorgehensweise der systematischen Materialauswahl, wie sie aus der methodischen Produktentwicklung bislang bekannt ist.

Hervorgehend aus diesem Bedarf wurden im Rahmen der vorliegenden Niederschrift Lösungen zur prozesseitigen und methodischen Integration variabler Anforderungsprofile in die systematische Materialauswahl erarbeitet, um selbige für die vorherrschenden Bedürfnisse entlang der Strukturbauteilentwicklung zu ertüchtigen. Die Überprüfung der praktischen Umsetzbarkeit, im Sinne einer Validierung, erfolgt abschließend am Beispiel eines realen Strukturbauteils.

Abstract

Due to political regulations, automobile manufacturers are increasingly forced to reduce the emission values of their vehicles. In addition to the optimization of the powertrain, measures to reduce the weight of the vehicle body are one of the most effective possibilities for meeting the ever-stricter limits on CO₂ emissions. In recent years, the Multi-Material-Design has been developed in this way, which has the objective of selecting the most suitable material for each individual structural component. Deviating from the classical construction methods it is not required to use one particular material type for the entire vehicle structure. With this strategy of position-appropriate material use, some drastic reductions in vehicle weight can be achieved.

The variable load and space requirements, which are characteristic for vehicle structure components, especially in the early phase of the development, however, prevent the definition of a fixed requirement profile at the beginning of the component development and thus also the definition of the input parameters for the classical approach of the systematic material selection as previously known from the methodical product development.

Out of this demand, solutions for the process-oriented and methodic integration of variable requirements profiles into the systematic material selection have been developed along with the creation of this paperwork. That targets to enable the selection to fulfill the present needs of the structure component development process. The verification of practical feasibility in terms of a validation is finally carried out with a real structure component example.

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|--|----------|
| 1 | Einleitung | 1 |
| 1.1 | Ziele der Arbeit | 2 |
| 1.2 | Annahmen, Einschränkungen und sonstige Randbedingungen | 3 |
| 1.3 | Aufbau und methodische Vorgehensweise | 5 |
| 2 | Grundlagen in Forschung und Technik | 7 |
| 2.1 | Anforderungen in der Fahrzeugentwicklung | 7 |
| 2.1.1 | Allgemeine Vorgehensweise im Anforderungsmanagement | 9 |
| 2.1.2 | Produktstruktur und Fahrzeugarchitektur | 10 |
| 2.1.3 | Segmentierung und Identifizierung | 13 |
| 2.1.4 | Anforderungen an Fahrzeugstrukturbauteile | 15 |
| 2.1.5 | Haupteinflussfaktoren für Bauraumanforderungen | 17 |
| 2.1.5.1 | Designanforderungen | 18 |
| 2.1.5.2 | Packageanforderungen | 20 |
| 2.1.6 | Haupteinflussfaktoren für Lastanforderungen | 21 |
| 2.1.6.1 | Crashlastfälle | 22 |
| 2.1.6.2 | Torsions- und Biegefrequenzlastfälle (NVH) | 24 |
| 2.1.6.3 | Steifigkeit, Festigkeit und Betriebsfestigkeit (SFB) | 26 |
| 2.1.7 | Wechselseitiger Einfluss von Bauraum- und Lastanforderungen | 27 |
| 2.1.8 | Softwareunterstützung im Anforderungs- und Änderungsmanagement | 29 |
| 2.2 | Produktentstehungsprozess im Automobilbau | 31 |
| 2.2.1 | Strukturbauteilentwicklungsprozess | 34 |
| 2.2.2 | Designentwicklungsprozess | 38 |
| 2.2.3 | Packageentwicklungsprozess | 41 |
| 2.3 | Materialauswahl | 43 |
| 2.3.1 | Grundlagen der Materialauswahl | 44 |
| 2.3.2 | Einfluss der Materialauswahl auf die Produktkosten | 46 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 2.3.3 | Prozesse zur systematischen Materialauswahl..... | 47 |
| 2.3.4 | Methoden zur systematischen Materialauswahl..... | 51 |
| 2.3.4.1 | Phase I: Ermittlung der Werkstoffanforderungen | 52 |
| 2.3.4.2 | Phase II und III: Grob- und Feinauswahl | 54 |
| 2.3.4.3 | Phase IV: Materialentscheidung | 58 |
| 2.3.5 | Werkstoffe und Bauweisen der Fahrzeugkarosserie | 59 |
| 2.3.5.1 | Schalen-Bauweise | 60 |
| 2.3.5.2 | Space-Frame-Bauweise..... | 60 |
| 2.3.5.3 | Monocoque-Bauweise | 61 |
| 2.3.5.4 | Multi-Material-Bauweise | 61 |
| 2.3.6 | Übertragung der Ansätze zur systematischen Materialauswahl auf Fahrzeugstrukturbauteile..... | 62 |
| 2.3.7 | Leichtbaustrategien..... | 65 |
| 2.3.7.1 | Bedingungsleichtbau..... | 66 |
| 2.3.7.2 | Konzeptleichtbau | 67 |
| 2.3.7.3 | Stoffleichtbau..... | 68 |
| 2.3.7.4 | Formleichtbau | 68 |
| 2.3.7.5 | Fertigungsleichtbau..... | 70 |
| 2.3.8 | Systematische Materialauswahl in begrenztem Bauraum | 71 |
| 3 | Analysierte Defizite und abgeleiteter Handlungsbedarf..... | 75 |
| 4 | Ansatz zur Prozessintegration einer systematischen Materialauswahl in die Strukturbauteilentwicklung | 81 |
| 4.1 | Ermittlung und Einbindung der instabilen Anforderungsprofile | 82 |
| 4.1.1 | Ermittlung und Einbindung der Bauraumanforderungsprofile..... | 82 |
| 4.1.2 | Ermittlung und Einbindung der Lastanforderungsprofile | 84 |
| 4.2 | Versionierung der Anforderungsprofile..... | 86 |
| 4.3 | Vereinfachte Annahmen und resultierender Einsatzbereich | 87 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 5 | Ansatz zur systematischen Materialauswahl von Fahrzeugstrukturbauteilen in der frühen Phase | 95 |
| 5.1 | Formulierung der Randbedingungen | 95 |
| 5.2 | Beschreibung des Bauraumfüllverhaltens | 97 |
| 5.3 | Allgemeine Herleitung der Transferfunktionen | 101 |
| 5.4 | Ermittlung der Auswahllinien gleicher Masse für rechteckige Hohlprofile | 106 |
| 5.4.1 | Allgemeine Vorgehensweise | 106 |
| 5.4.2 | Lastfallspezifische Vorgehensweise | 108 |
| 5.4.2.1 | Zug- oder Drucksteifigkeit | 109 |
| 5.4.2.2 | Zug- oder Druckfestigkeit | 111 |
| 5.4.2.3 | Knicksteifigkeit | 113 |
| 5.4.2.4 | Biegesteifigkeit | 114 |
| 5.4.2.5 | Biegefestigkeit | 116 |
| 5.4.2.6 | Torsionssteifigkeit | 118 |
| 5.4.2.7 | Torsionsfestigkeit | 120 |
| 5.4.2.8 | Zusammenfassung der Erkenntnisse | 122 |
| 5.5 | Berücksichtigung der Bauteilkosten | 125 |
| 5.6 | Materialentscheidung auf Basis eines variablen Konzeptvergleichs | 126 |
| 6 | Validierung der theoretischen Ansätze auf Basis eines praktischen Fallbeispiels..... | 129 |
| 6.1 | Fallbeispiel Schließstrebe | 130 |
| 6.1.1 | Startbedingungen | 130 |
| 6.1.2 | Systematische Materialauswahl bei instabilem Anforderungsprofil | 131 |
| 6.1.2.1 | Szenario 1: Änderung des Außenhautdesigns (Höhe H) | 132 |
| 6.1.2.2 | Szenario 2: Verblockung eines größeren Motors (Breite B) | 136 |
| 6.1.2.3 | Szenario 3: Erhöhung des Radeinschlags (Länge L) | 138 |
| 6.1.2.4 | Szenario 4: Unsicherheit bzgl. der exakten Fahrzeugmasse (Last F) | 140 |
| 6.2 | Diskussion der Ergebnisse | 142 |

| | |
|---|------------|
| 7 Zusammenfassung und Ausblick | 144 |
| 7.1 Resümee..... | 144 |
| 7.2 Beantwortung der Forschungsfragen | 147 |
| 7.3 Ausblick | 151 |
| Literaturverzeichnis | 154 |
| Internetquellen..... | 168 |
| Anhang..... | 170 |
| A.1 Detaillauswertung der Niveaulinie bei Zug- bzw. Drucksteifigkeit..... | 170 |
| A.2 Detaillauswertung der Niveaulinie bei Zug- bzw. Druckfestigkeit..... | 171 |
| A.3 Detaillauswertung der Niveaulinie bei Knicksteifigkeit | 172 |
| A.4 Detaillauswertung der Niveaulinie bei Biegesteifigkeit..... | 173 |
| A.5 Detaillauswertung der Niveaulinie bei Biegefestigkeit..... | 174 |
| A.6 Detaillauswertung der Niveaulinie bei Torsionssteifigkeit | 175 |
| A.7 Detaillauswertung der Niveaulinie bei Torsionsfestigkeit | 176 |
| Abkürzungsverzeichnis..... | 177 |
| Symbol- und Formelverzeichnis..... | 179 |

1 Einleitung

Abhängig von den jeweiligen Fachbereichen kursieren verschiedenste Definitionen sowohl bzgl. des Begriffs „Werkstoff“ als auch „Material“, die zum Teil stark voneinander abweichen. Um etwaigen Missverständnissen beim Lesen der Arbeit vorzubeugen, sei an dieser Stelle definiert, dass jene beiden Begrifflichkeiten im Rahmen dieser Niederschrift, wie bereits von Reuter [Reut07], als Synonym behandelt werden.

Ein Blick zurück in der Geschichte lässt schnell erahnen, wie prägend Werkstoffe bzw. Materialien seit jeher für die Entwicklung der menschlichen Spezies waren und immer noch sind. Nicht ohne Grund wurden für die Benennung geschichtlicher Epochen jene Werkstoffnamen verwendet, die einen signifikanten Einfluss hinsichtlich des technischen Fortschritts für die damalige Zeit mit sich brachten. Exemplarisch stehen hierfür bspw. die Stein-, Kupfer-, Bronze- oder Eisenzeit. [Fris90]

So bestand schon in der frühen Menschheitsgeschichte das Bedürfnis, durch die Bearbeitung von Steinen, scharfkantige Gegenstände zu erzeugen, um somit alltägliche Funktionen, wie bspw. das Schneiden, durch ein Hilfsmittel zu erleichtern. Dieser ursprüngliche Gedanke einen Grundwerkstoff so in Form zu bringen, dass er eine gewünschte Funktion erfüllt, blieb dabei in seiner Grundform bis heute unverändert. [Schr08]

Übertragen auf die heutige Zeit gilt dieses altertümliche Steinwerkzeug als Produkt. Die Ableitung eines Produkts wird dabei durch die Kundenanforderung „muss schneiden können“ initiiert. Die Entstehungsgeschichte, von der ersten Idee, über die Herstellung, bis zur Sicherstellung der Nutzbarkeit für den Kunden, wird dabei anhand der klassischen Produktentwicklung beschrieben.

Mit dem Fortschreiten der Zeitgeschichte stiegen jedoch auch die Ansprüche innerhalb der Gesellschaft kontinuierlich an. Bereits bekannte Produkte wurden als selbstverständlich angesehen, woraus das Bedürfnis an neuen „Alltagshelfern“ resultierte. Ein Entscheidendes unserer heutigen Zeit stellt die Mobilität dar. Den Impuls hierfür lieferte Carl Benz bereits im Jahre 1885, als er ein zweisitziges Gefährt mit einem Einzylinder-Viertaktmotor ausstattete und am 29. Januar 1886 zum Patent anmeldete. [WWW1]

Während es zu dieser Zeit noch darum ging die Menschheit von dem Nutzen der Erfindung zu überzeugen und die Fahrzeuge durch die Einführung der Fließbandproduktion für die breite Masse erschwinglich zu machen, ist dieses Ziel heute längst erreicht.

Um das Automobil im heutigen Wettbewerb für den Kunden interessant zu halten, bedarf es der stetigen Integration neuer Mehrinhalte. Dadurch steigt das Fahrzeuggesamtgewicht an. Dieser Gewichtsanstieg muss durch eine entsprechend angepasste Ausführung der Fahrzeugstruktur kompensiert werden. Gleichzeitig ist sicherzustellen, dass diese Maßnahmen nicht zu Einbußen hinsichtlich des Schutz- und Komfortangebots für den Insassen führen. [EGGH13], [EIFK13]

Man bewegt sich dadurch in einer aufwärtsgerichteten Gewichtsspirale (vgl. Abbildung 2-43, S. 66), welche sich konträr zu den gesetzlich geforderten CO₂-Zielen verhält [GäGo13], [EGGH13]. Um diesem Trend entgegen zu wirken, gibt es verschiedene Stellschrauben innerhalb des Themengebiets der Leichtbaustrategien (vgl. Kapitel 2.3.7, S. 65). Insbesondere der Multi-Material-Leichtbau ist dabei stets auf der Suche nach dem „richtigen“ Material für den „richtigen“ Ort. Dabei stellt jedoch die Indikation des geeignetsten Werkstoffs, für jedes Bauteil der Fahrzeugstruktur, aus einem Pool von ca. 80.000 Materialien [Ashb11], den Konstrukteur vor eine schwer zu lösende Aufgabe.

1.1 Ziele der Arbeit

Das Kernziel der vorliegenden Arbeit besteht darin, dem Bauteilentwickler ein Hilfsmittel an die Hand zu geben, mit dem er bereits in der frühen Phase der Fahrzeugentwicklung, den geeignetsten Werkstoff, aus einer beliebig großen Datenbank, für jede lasttragende Komponente individuell und positionsgerecht bestimmen kann. Während im Fachgebiet der allgemeinen Produktentwicklung neben erfahrungsbasierten Ansätzen [AsBC02] bereits auch erste Vorgehensmodelle zur systematischen Materialauswahl in begrenztem Bauraum [Ashb11], [Pasi06], [Wann10] vorliegen, lassen sich diese jedoch nicht ohne weiteres für die Entwicklung von Fahrzeugstrukturbauteilen verwenden. Insbesondere branchenspezifische Belange, wie die geometrische Berücksichtigung der Bauteilstruktur sowie Bewertung der Auswirkung der vielen Anforderungsänderungen auf die Materialauswahl in der frühen Phase des Fahrzeugentwicklungsprozess, stellen die zu lösenden Herausforderungen dar. Alle daraus resultierenden, funktionstauglichen Varianten gilt es anschließend im Rahmen eines

transparenten Konzeptvergleichs, hinsichtlich der fahrzeugstrategischen und positionsspezifischen Kosten- und Gewichtsziele, zu bewerten [EGGH13].

Dementsprechend lassen sich folgende Hauptforschungsfragen formulieren:

- F1:** Wie muss ein systematischer Materialauswahlprozess gestaltet sein, um dessen Integration in die frühe Phase der Fahrzeugstrukturbauteilentwicklung zu ermöglichen?
- F2:** Wie lassen sich die Auswirkungen eintreffender Anforderungsänderungen auf die Materialauswahl von Fahrzeugstrukturbauteilen in der frühen Entwicklungsphase beschreiben?
- F3:** Wie können alle funktionstauglichen Bauteilkonzepte hinsichtlich der Kenngrößen Kosten und Gewicht transparent miteinander verglichen werden?

1.2 Annahmen, Einschränkungen und sonstige Randbedingungen

Während der Grundgedanke zur systematischen Materialauswahl von Fahrzeugstrukturbauteilen auf einer ganzheitlichen Betrachtung fußen soll, können allein des Umfangs wegen jedoch nicht alle Aspekte des komplexen Auswahlprozesses im Rahmen dieser Arbeit Berücksichtigung finden. Im Vordergrund steht allerdings auch viel mehr die Entwicklung der methodischen Vorgehensweise, als die Menge und Art der darin dargestellten Auswahlkriterien (hier: Kosten und Gewicht auf Basis gleicher Funktion). Für die Betrachtung aus einem anderen oder weiteren Blickwinkel können jene Kriterien problemlos durch Werte oder Kennzahlen aus anderen Bereichen, denen ebenfalls ein hoher Stellenwert in der Automobilindustrie zukommt, beliebig ergänzt oder ersetzt werden. Hierzu zählen unter anderem bspw. Aspekte der Nachhaltigkeit, der Logistik oder auch der technologischen Verfügbarkeit eines Werkstoffs. [EGGH13]

Um herauszufinden wie die theoretisch geeignetste Materialverteilung in einem kompletten Fahrzeug aussehen würde, müssen im ersten Schritt jedoch zuerst einmal die geeignetsten Werkstoffe auf Komponentenebene bestimmt werden können, was somit unweigerlich den Fokus der vorliegenden Arbeit vorgibt.

Hierzu dient in der frühen Phase der Fahrzeugentwicklung, nach einer eingehenden Topologieoptimierung des verfügbaren Bauraums, zur Ermittlung der grundlegenden

Lastpfade, das draus abgeleitete Balkenmodell der gesamten tragenden Karosseriestruktur, als vereinfachte Formulierung der einzelnen Strukturbauteile. Der Vorteil liegt vor allem darin, viele Varianten in kurzer Zeit berechnen zu können. Der Detaillierungsgrad der Komponenten bleibt jedoch sehr gering. [RPSJ16]

Je genauer sich anhand bisheriger Fahrzeugstrukturen entsprechende Vergleichslastfälle für die einzelnen Elemente ableiten lassen, desto stärker nähert sich diese vereinfachte Beschreibung, auf Basis der Grundgleichungen der Technischen Mechanik, dem realen Bauteilverhalten an.

Das Fahrzeugpackage sowie das –design limitieren hierbei den maximal verfügbaren Bauraum für den Querschnitt einer Komponente [Krau07], [BBEG13], [AAAB13], [Maie15]. Dementsprechend gilt es je nach Belastungsart und -höhe geschickte Kombinationen aus Querschnitt und Werkstoff zu finden, die zum einen herstellbar sind und zum anderen den geforderten Steifigkeits- oder Festigkeitsanforderungen gerecht werden [Ashb11], [Pasi02], [Wann10].

Selbst zur Berücksichtigung von Crashlasten dünnwandiger Profile gibt es einen ersten Ansatz (vgl. Cui et. al. [CZWZ11]). Jedoch ist die Modellierung der wirkenden Ersatzlasten sehr aufwendig und kommt aus diesem Grund häufig erst in späteren Entwicklungsphasen zum Einsatz.

Ebenso werden verbindungstechnische Aspekte zwischen mehreren Komponenten vorerst bewusst vernachlässigt, um die Auswahl der einzelnen Komponentenwerkstoffe nicht von vornherein einzuschränken. Für die nachgelagerte Systembetrachtung sind sie jedoch von ausschlaggebendem Interesse und liegen im Fokus angrenzender Forschungsvorhaben (vgl. [KaVS13], [KaBV16]), zum Teil sogar mit baureihenübergreifendem Blickwinkel [KaKV17].

Die Funktionsüberprüfung, die auf Basis von statischen Ersatzlastfällen sowie den Grundgleichungen der Technischen Mechanik erfolgt, erhebt dabei nicht den Anspruch die in der fortschreitenden Entwicklung notwendigen Simulationszyklen zu ersetzen. Jedoch bietet sie die Chance auf kurzfristige Änderungen eines Bauteilanforderungsprofils, wie sie insbesondere in der frühen Phase der Entwicklung häufig vorkommen, schnell zu reagieren und eine erste Abschätzung bzgl. der Auswirkungen auf das Werkstoffkonzept auszuweisen, um damit eine systematische Entscheidungsfindung zu fördern.

Diese Arbeit muss daher viel mehr als Grundstein für eine methodische und grafisch unterstützte Materialauswahl verstanden werden, um die Auswirkungen häufig eintretender Änderungen auf Komponentenebene eines einzelnen Strukturbauteils, in der frühen Phase der Fahrzeugentwicklung, schnell erfassen und bewerten zu können.

1.3 Aufbau und methodische Vorgehensweise

Der strukturelle Aufbau dieser Arbeit lehnt sich an die vierphasige Gliederung der „Design Research Methodology“ nach Blessing und Chakrabarti [BCh09] an (Abbildung 1-1).

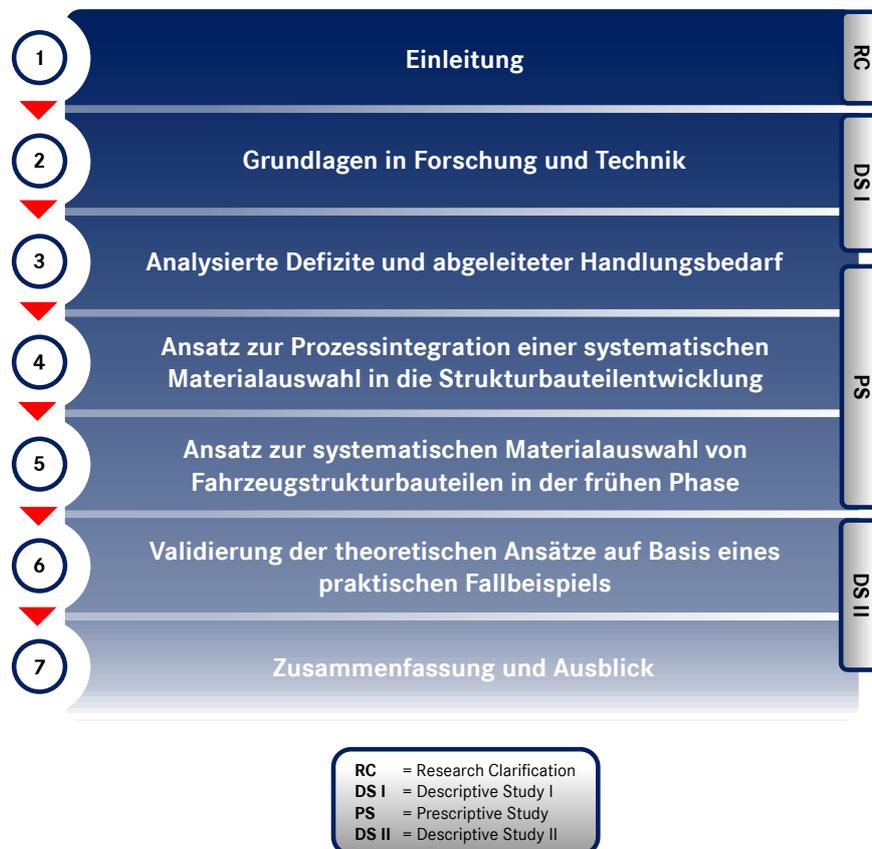


Abbildung 1-1: Aufbau und Strukturierung der Arbeit

Im Sinne dieser methodischen Vorgehensweise beginnt die Ausarbeitung mit der Darstellung der vorherrschenden Ausgangssituation sowie der einleitenden Beschreibung der Forschungsabsicht in Kapitel 1 („Research Clarification“). Zielsetzung und Motivation gehen dabei eindeutig hervor und münden in der Definition der Hauptforschungsfragen. Daraus lassen sich im nächsten Schritt die notwendigen Fachgebiete spezifizieren, welche zur Lösungsfindung benötigt werden und somit einer umfassenden Analyse des aktuellen Standes in der industriellen Praxis sowie der Forschung zu unterziehen sind (Kapitel 2). Aufgedeckte

Defizite jener Revision lassen sich anschließend, durch die Ableitung des notwendigen Handlungsbedarfs, zur Schärfung der eingangs gestellten Forschungsfragen nutzen (Kapitel 3) und bilden damit den nahtlosen Übergang von der „Descriptive Study I“ in die „Prescriptive Study“. Hierbei zeichnen sich zwei separat zu betrachtende Schwerpunktthemen ab. Während sich Kapitel 4 vorrangig mit der Integration einer systematischen Materialauswahl in den Strukturbauteilentwicklungsprozess beschäftigt, liegt der Fokus in Kapitel 5 speziell auf der Herleitung der methodischen Vorgehensweise zur Werkstoffauswahl innerhalb dieses volatilen Umfeldes. Die Überprüfung der Einsetzeignung („Descriptive Study II“) erfolgt anschließend in Kapitel 6 auf Basis einer ausgewählten Strukturkomponente (Schließstrebe) und verschiedener praxisnaher Szenarien. Die abschließende Betrachtung des Gesamtwerks (Kapitel 7) beinhaltet neben einem Resümee der Arbeit ebenso die Feststellung der Möglichkeiten und Grenzen der entwickelten Ansätze, als auch die Klärung der Forschungsfragen. Ein Ausblick offeriert darüber hinaus mögliche Anknüpfungspunkte für weiterführende Forschungsaktivitäten.

2 Grundlagen in Forschung und Technik

Dieses Kapitel soll dazu dienen den aktuellen Wissensstand aus den relevanten Themengebieten darzulegen und somit ein einheitliches Grundverständnis bzgl. der Ausgangslage des Forschungsvorhabens zu schaffen. Aus einem breiten Spektrum an Literatur- und Forschungsfeldern gehen dabei die folgenden drei Sektoren als essenzielle Basis hervor:

- Anforderungen in der Fahrzeugentwicklung (Kapitel 2.1)
- Produktentstehungsprozess im Automobilbau (Kapitel 2.2)
- Materialauswahl (Kapitel 2.3)

Ausgehend von einer Vielzahl allgemeiner Fahrzeuganforderungen gilt es jene Gebiete zu identifizieren, die einen maßgeblichen Einfluss auf die Strukturbauteilauslegung ausüben. Die anschließende Bestimmung der Zeitpunkte möglicher Eintritts- und Änderungsaufkommen dieser spezifischen Anforderungen ermöglicht die Abbildung der Anforderungsprofile zu jedem Zeitpunkt entlang des Entwicklungsprozesses und fungieren somit als entscheidende Eingangsgrößen für die daran anschließende Materialauswahl.

2.1 Anforderungen in der Fahrzeugentwicklung

Die Grundlage einer jeden methodischen Produktentwicklung bildet im ersten Schritt die Erstellung eines Anforderungsprofils mit bestmöglicher Genauigkeit. Dabei lassen sich Anforderungen als die „[...] geforderte[n] Eigenschaften des zu entwickelnden Produktes“ [PoLi11] beschreiben. Die Anforderungen stellen dabei die Eingangsdaten eines beliebigen Systems dar, deren Qualität sich im direkten Wege auf die Ergebnishüte auswirkt. Das „Paradoxon der Konstruktion“ [EhMe13] stellt diesen Sachverhalt nachvollziehbar dar (vgl. Abbildung 2-1).[Mars72]

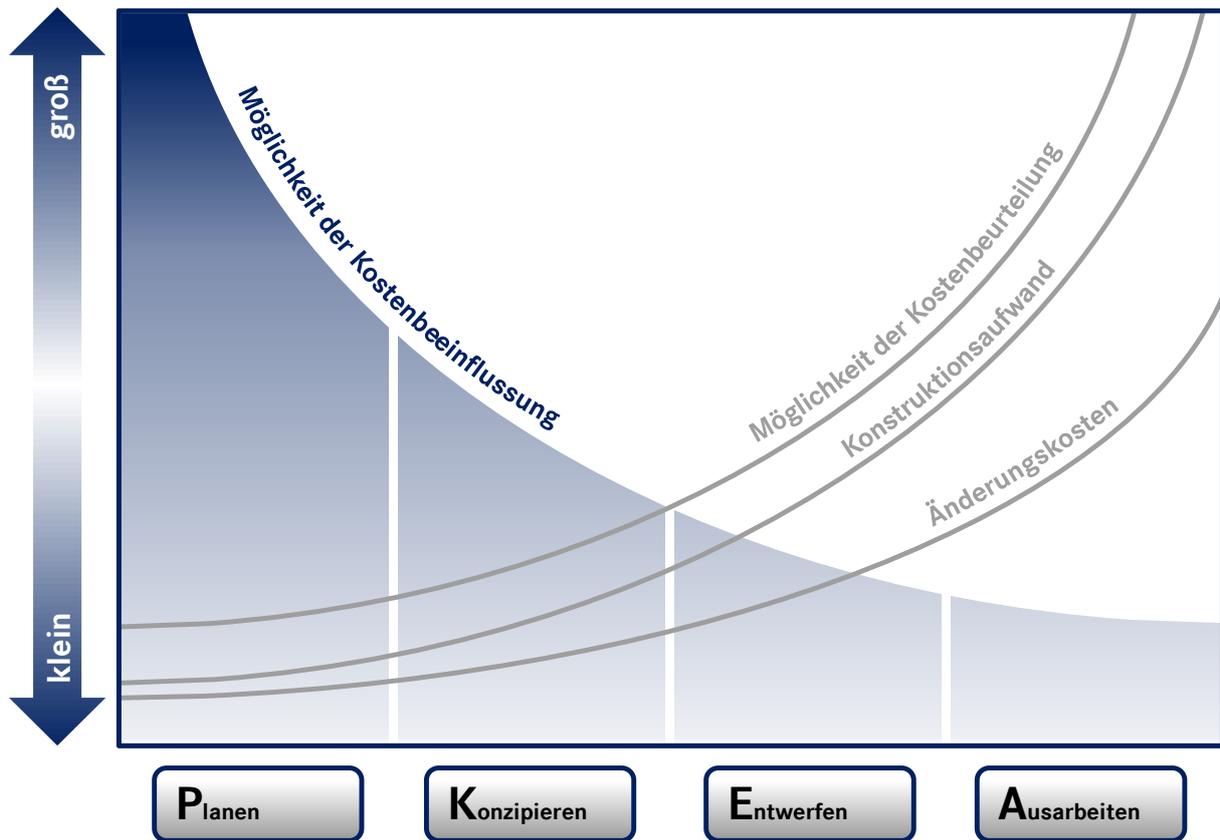


Abbildung 2-1: Paradoxon der Konstruktion in Anlehnung an Ehrlenspiel und Meerkamm [EhMe13]

Einerseits besteht gerade in der frühen Phase des Entwicklungsprozesses die Möglichkeit die Produktkosten drastisch zu beeinflussen. Andererseits steigen sowohl die Aufwände als auch die Kosten erst mit zunehmender Entwicklungszeit progressiv an und verhindern somit eine frühzeitige Kostenbeurteilung. Dieses Verhalten lässt sich neben den Kosten auch auf weitere beliebige Produkteigenschaften übertragen. [EhMe13]

Eine insuffiziente Analyse der Aufgabenstellung resultiert im fortgeschrittenen Entwicklungsverlauf häufig in hohen Reifegradverlusten und Änderungskosten. Die Erstellung und Pflege eines Anforderungsprofils ist daher unerlässlich, um auf dessen Basis bspw. Materialanforderungen für eine systematische Materialauswahl von Fahrzeugstrukturbauteilen ableiten zu können. [Mars72]

Die folgenden Unterkapitel sollen daher dem Zweck dienen, die Hauptanforderungen an Fahrzeugstrukturbauteile zu klären, um somit ein belastbares Anforderungsprofil, als Basis für eine systematische Materialauswahl, zu erhalten.

2.1.1 Allgemeine Vorgehensweise im Anforderungsmanagement

Als allgemeingültige Vorgehensweise zur Fixierung von Anforderungen im automobilen Umfeld hat sich die Verwendung von Lasten- und Pflichtenheften bewehrt, welche in einer Anforderungsliste zusammengeführt werden [BGHH13]. Nach DIN 66905 [DIN66905] werden die Erwartungen des Auftraggebers hinsichtlich des Leistungs- und Lieferumfangs im Lastenheft definiert. Indes beinhaltet das Pflichtenheft die entsprechenden Realisierungsvorgaben des Auftragnehmers. Die daran anschließende Strukturierung der gesammelten Anforderungen erfolgt in einer dynamischen Gesamtanforderungsliste. Der OEM¹ übernimmt in diesen Fall sowohl die Rolle des Auftraggebers als auch des Verfassers der Lastenhefte des gesamten Fahrzeugs. Die Fahrzeuganforderungen selbst resultieren dabei aus einem komplexen Spannungsfeld diverser Einflussfaktoren (vgl. Abbildung 2-2) und fungieren für die verschiedenen Entwicklungsabteilungen als entscheidende Eingangsgrößen. [Mars72]

Abhängig von der Schwerpunktsetzung des Zielprodukts durch das Management ergeben sich somit für die verschiedenen Bereiche entsprechende Gewichtungen. Diese können aufgrund von differenzierten Firmenphilosophien, -strategien sowie Kundenanforderungen zum Teil stark voneinander abweichen. Dabei werden zu Projektbeginn in Form eines Zielkataloges alle wesentlichen objektiven und subjektiven Anforderungen, wie bspw. Zielgruppe, Abmaße, Preis, Antriebsart und Architekturzugehörigkeit, in einem Zielkatalog zusammengefasst. Um stimmige Zielvorgaben zu erhalten, ist eine erste intensive Abstimmung zwischen allen Schnittstellenbereichen notwendig. Steht solch ein firmen- und produktspezifisches Anforderungsprofil auf Gesamtfahrzeugebene fest, gilt es im nächsten Schritt selbiges auf die verschiedenen Systeme, Teilsysteme, Module und Komponenten herunter zu brechen und somit verschiedene Abstraktionsniveaus einzuführen. [Eger16]

¹ Original Equipment Manufacturer

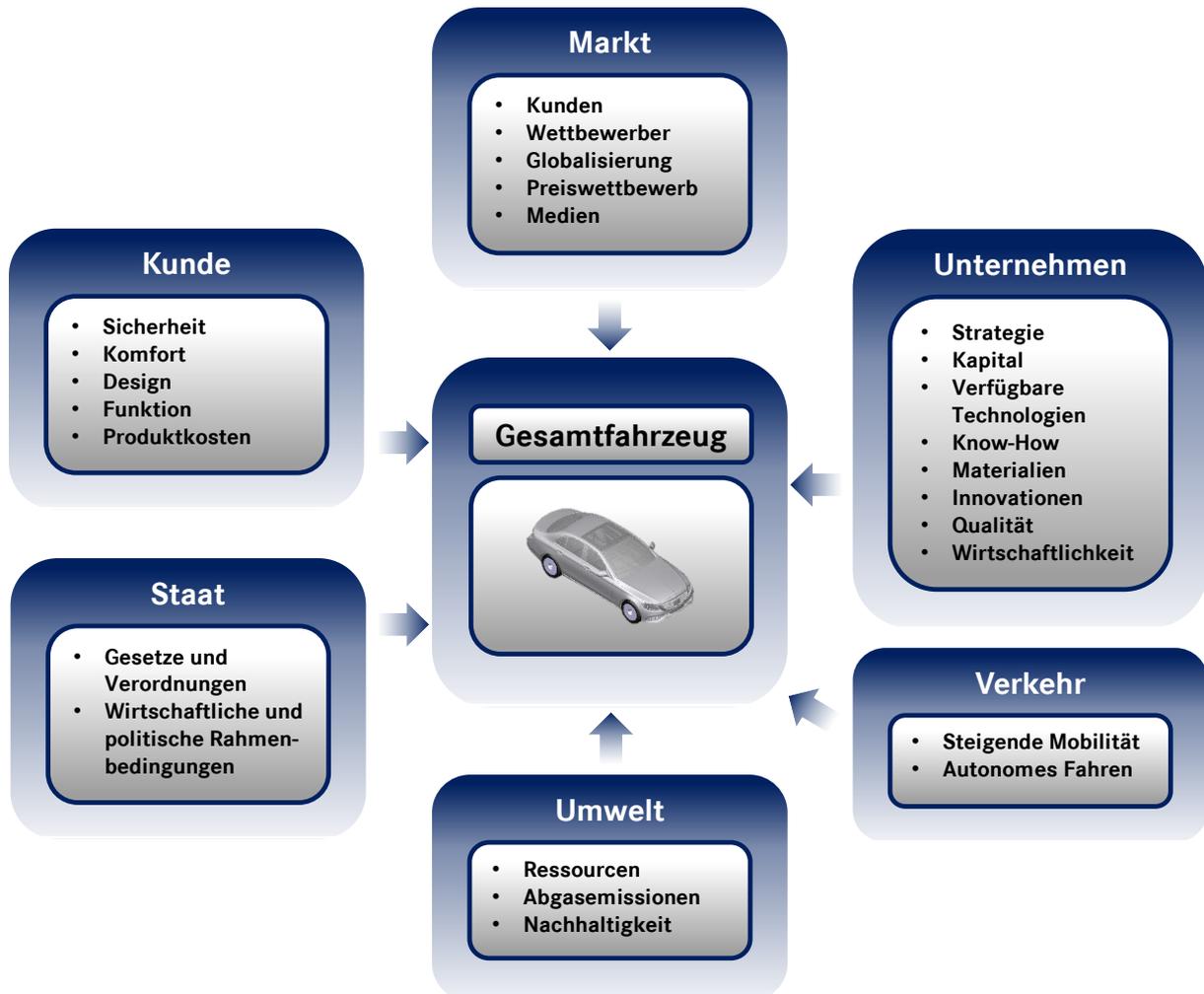


Abbildung 2-2: Anforderungen an das Gesamtfahrzeug nach Achleitner et. al. [AAAB13], Braess et. al. [BGHH13], Gusig und Kruse [GuKr10] sowie Kurek [Kure11]

2.1.2 Produktstruktur und Fahrzeugarchitektur

Um im Sinne einer zielgerichteten Lösungsfindung zu agieren, wird es als sinnvoll erachtet ein komplexes Gesamtprodukt in viele kleine Segmente zu unterteilen. Alle Teillösungen können somit zu einem fortgeschrittenen Zeitpunkt wieder zu einer Gesamtlösung zusammengeführt werden (vgl. V-Modell, siehe Abbildung 2-6, S. 14). Zur detaillierten Betrachtung einzelner Komponenten gilt es demnach das Gesamtfahrzeug mit Hilfe einer systematischen Gliederung bis auf Bauteilebene herunter zu brechen und in diesem Zuge in eine Produktstruktur (oder auch Baustruktur [PaBe93]) zu überführen. [FeGr13]

Die Implementierung dieser Vorgehensweise in ein sogenanntes PDM²-System ermöglicht die Planung und Steuerung der Produktdaten entlang des Produktentstehungsprozesses sowie den gezielten Informationsaustausch mit anderen Fachbereichen [Lind16], [BBEG13]. Das Einfrieren der Daten zu vorgegebenen Meilensteinen (siehe Kapitel 2.2.1) führt, über die gesamte Prozesszeit betrachtet, zu einer Versionierung der Stände entlang der evolutionär verlaufenden Entwicklung und kann zur kontinuierlichen Überprüfung des Produktreifegrads genutzt werden. Die Produktstruktur gilt somit als entscheidendes Element zur Planung eines Produkts. Abbildung 2-3 stellt die Anwendung solch einer Produktstruktur, ausgehend von einer Fahrzeugbaureihe, exemplarisch dar. [FeGr13]

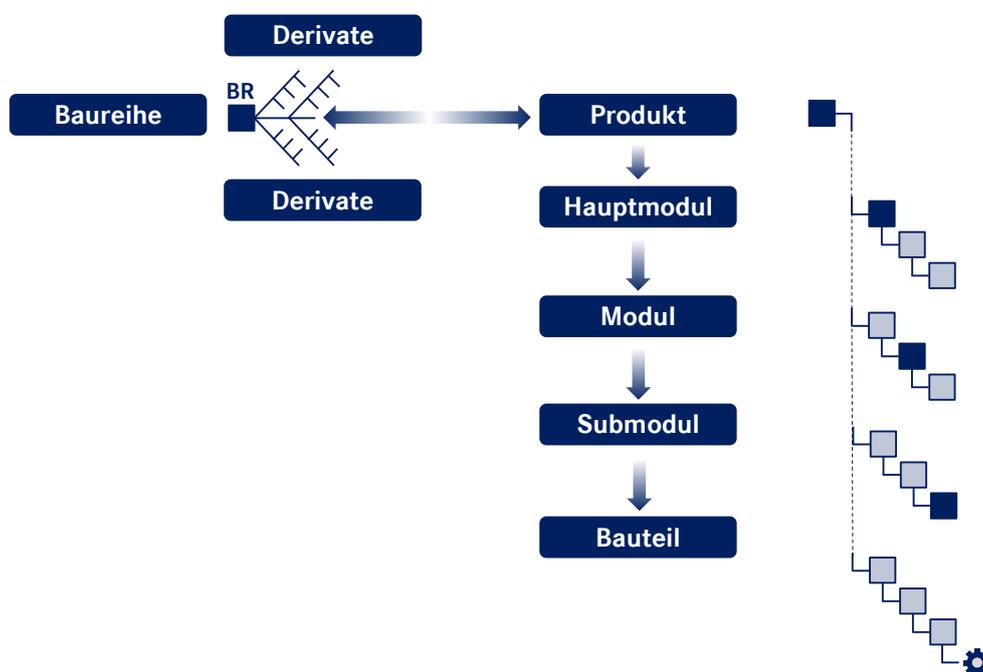


Abbildung 2-3: Exemplarischer Aufbau einer Fahrzeugproduktstruktur in Anlehnung an Klette et. al. [KIEV08]

Hinsichtlich der Einordnung des Begriffs der „Baureihe“ in die Umgebung der allgemeinen Produktstruktur, lässt sich selbige mit dem Begriff „Produkt“ gleichsetzen und beschreibt damit das Gesamtfahrzeug, welches unter anderem verschiedene Aggregateszenarien vorhält. Auf dieser Basis lassen sich bspw. verschiedene Derivate ableiten. Ausgehend vom Produkt sind absteigend zusätzliche Unterteilungen in Hauptmodule, Module, Submodule bis hin zum einzelnen Bauteil möglich. [Eger16]

² Produktdatenmanagement

Die Produktstruktur, das Produkt und somit das Gesamtfahrzeug hängen dabei maßgeblich von der Fahrzeugarchitektur ab. Die wichtigsten Einflussfaktoren die solch eine Architektur bestimmen sind in Abbildung 2-4 ersichtlich.

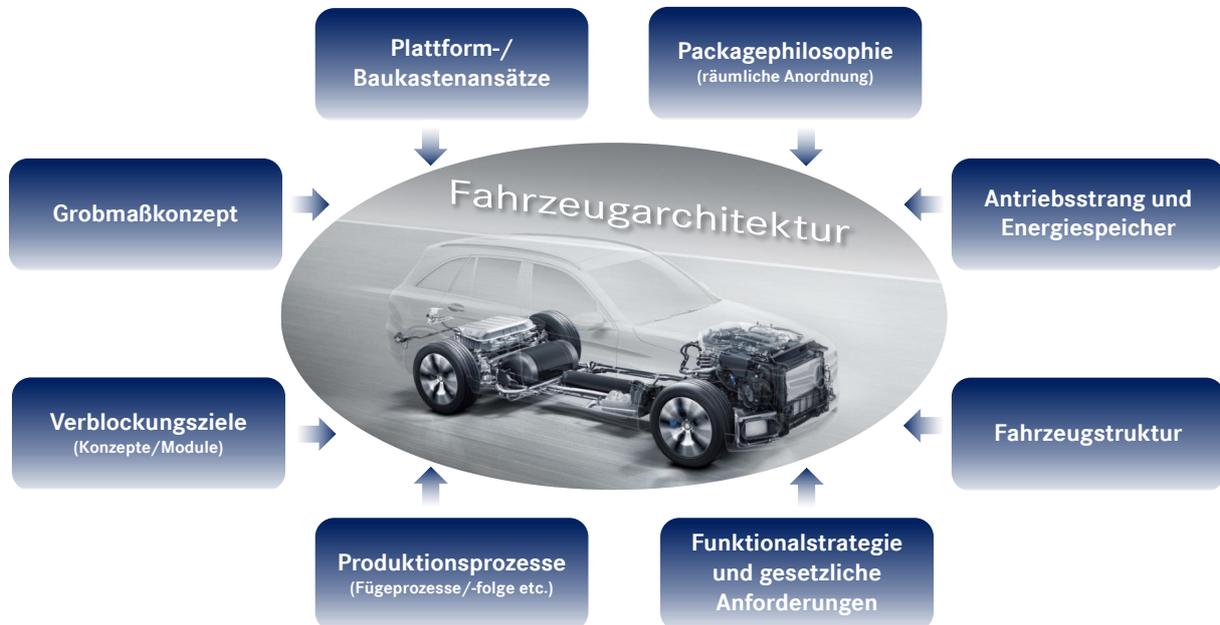


Abbildung 2-4: Bestimmende Faktoren der Fahrzeugarchitektur in Anlehnung an Fuchs und Lienkamp [FuLi13] sowie Roschinski et. al. [RHPK08]

Das Ziel dabei ist es neue Architekturen so zu gestalten, dass möglichst viele Baureihen im selben Rahmenwerk (Architektur) integriert werden können. Somit ist es möglich, mit sehr geringem wirtschaftlichem Aufwand, viele verschiedene Varianten abzubilden (Derivate) und damit den individuellen Kundenwünschen und Marktanforderungen gerecht zu werden. Durch die gleichzeitige Einführung standardisierter Schnittstellen sowie der Mehrfachverwendung einzelner Komponenten und Module können weitere Skaleneffekte, hinsichtlich der Entwicklungs-, Beschaffungs- und Produktionskosten, erzielt werden. Eine variantenorientierte Produktgestaltung bei der Entwicklung neuer Fahrzeugarchitekturen deckt demnach die Anforderungen mehrerer Marktsegmente ab und wartet mit einer flexiblen Reaktionsfähigkeit bzgl. Marktveränderungen und technologischen Entwicklungen auf. Gleichzeitig erhöht sich damit jedoch auch das Risiko. Stellt sich bspw. ein Gleichteil oder ein verblocktes Modul als fehlerhaft heraus, so steigen analog auch die Korrekturaufwände um ein Vielfaches an. [FeGr13]

Aus Sicht der praktischen Anwendung erklären sich somit auch die zunehmenden Bemühungen der Fahrzeughersteller, zusätzlich zu den konventionellen angetriebenen

Fahrzeugplattformen (wie z.B. MFA³ [WWW2], MRA⁴ [WWW2], MQB⁵ [WWW3], MLB⁶ [WWW3], uvm.), eignet auf die Anforderungen von Elektrofahrzeuge zugeschnittene Architekturen (wie z.B.: EVA⁷ [WWW4], MEB⁸ [WWW5]) zu entwickeln oder diese sogar miteinander zu vereinen, um die Kunden- und Marktanforderungen zu einem erschwinglichen Preis zu erfüllen.

2.1.3 Segmentierung und Identifizierung

Entscheidend für die Erfüllung der Kunden- und Marktanforderungen mit dem zu entwickelnden Produkt, ist die Segmentierung aller Gesamtfahrzeuanforderungen bis auf Bauteilebene. Ausgehend von diesen Komponentenanforderungsprofilen können bspw. entsprechende Handlungen hinsichtlich der Wahl des Materials, der Geometrie sowie des Fertigungsverfahrens eingeleitet werden. Als hilfreiches Mittel zur Gliederung des Gesamtfahrzeugs in verschiedene Detaillierungsebenen sei an dieser Stelle der Top-Down-Konstruktionsprozess nach Feldhusen und Lashin [FeLa98] genannt (Abbildung 2-5). Sie gliedern ein Gesamtfahrzeug beispielhaft in unternehmensspezifische Baugruppen- und Bauteilumfänge auf. Ebenso gilt es die komplexen Anforderungen die an das Gesamtsystem gestellt werden, in weniger komplexe Teilprobleme bis auf Komponentenebene aufzugliedern. Als methodisches Hilfsmittel zur Lösung dieser Art von Problemstellung hat sich in der Literatur die Verwendung des V-Modells nach VDI 2206 [VDI2206] durchgesetzt (Abbildung 2-6).

³ Mercedes Front-wheel Drive Architecture

⁴ Mercedes Rear-wheel Drive Architecture

⁵ Modularer Querbaukasten

⁶ Modularer Längsbaukasten

⁷ Electric Vehicle Architecture

⁸ Modularer Elektrifizierungsbaukasten

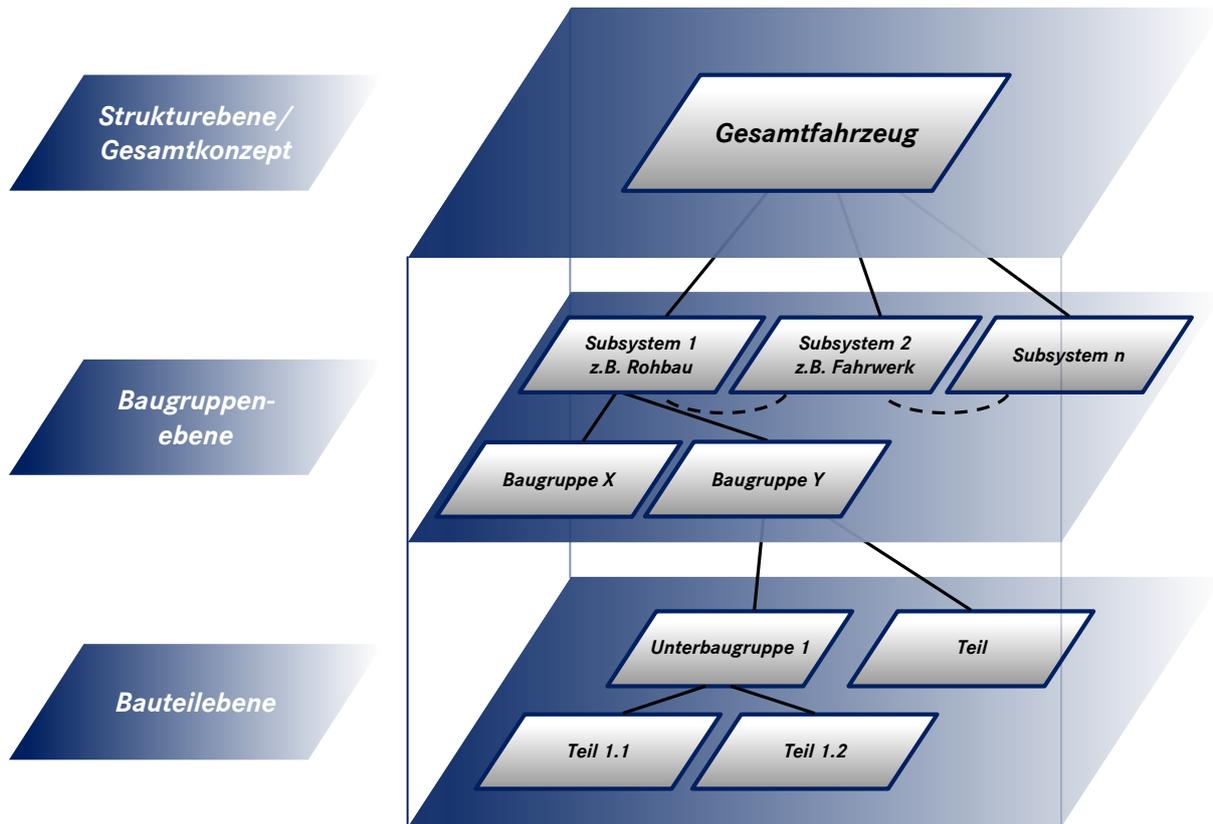


Abbildung 2-5: Ebenen des Top-Down-Konstruktionsprozesses in Anlehnung an Feldhusen und Lashin [FeLa98]

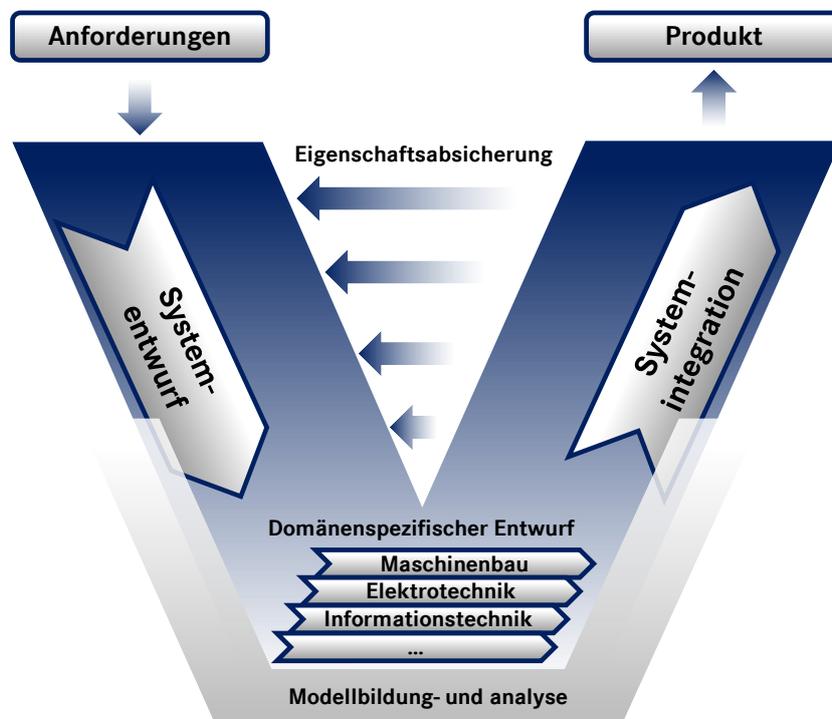


Abbildung 2-6: Vorgehensmodell nach VDI 2206 [VDI2206]

Jenes Vorgehensmodell sieht dabei die Zergliederung eines abstrakten Gesamtproblems in viele konkrete Teilprobleme, auf Basis eines ersten Systementwurfs, vor (linker Flügel). Die daran anschließende Lösungssuche der Teilprobleme erfolgt domänenspezifisch. Die daraus resultierenden Teillösungen gilt es letztendlich wiederum in zunehmend abstraktere Systemebenen zu integrieren (rechter Flügel). Das kann ggf. zu Iterationsschleifen des Vorgehensmodells führen, um die Systemgrenzen und Anforderungszuordnungen aufeinander abzustimmen, anzupassen und in diesem Zuge auf jeder Systemebene abzusichern. [VDI2206]

Aufgrund des hochgradig dynamischen Verhaltens der Anforderungen, insbesondere in der frühen Phase der Strukturbauteilentwicklung (vgl. Kapitel 2.2.2 und 2.2.3), ist neben der Ermittlung rein statischer Anforderungen (z.B.: Einsatztemperatur, Luftfeuchtigkeit, Korrosionsverhalten, usw.) ebenso die Indikation des Systemverhaltens bei eintretenden Änderungen der Eingangsgrößen von gesteigertem Interesse, um zielführende Handlungsmaßnahmen einleiten zu können. Die hauptauslegungsrelevanten, volatilen Eingangsgrößen für die Werkstoffauswahl beschreiben in diesem Kontext vor allem die an den einzelnen Strukturkomponenten vorliegenden Belastungsfälle im Verhältnis zur jeweiligen lokalen Bauraumsituation. Braess et. al. [BGHH13] und Dietrich [Diet15] beschreiben diesen Zielkonflikt auch als die Erfüllung notwendiger Bauteilsteifigkeiten und –festigkeiten in einem eingeschränkten Bauraum.

Um ein gemeinschaftliches Verständnis hinsichtlich des Begriffs „Fahrzeugstrukturbauteile“ sowie den Zusammenhang der Namensgebung mit den damit verbundenen Bauteilcharakteristiken zu schaffen, wird diese Thematik im folgenden Kapitel intensiv beleuchtet.

2.1.4 Anforderungen an Fahrzeugstrukturbauteile

Mit dem Begriff „Fahrzeugstrukturbauteile“ werden im technischen Sprachgebrauch jene Komponenten beschrieben, die in ihrer Hauptaufgabe die Aufnahme aller auftretenden Kräfte und Momente vorsehen. Die Definition einer mechanisch tragfähigen Struktur kann somit anhand der Konstruktionsvorgaben für jene Komponenten in eine allgemeine Form gefasst werden. Sie wird maßgeblich durch die Funktion bestimmt, wodurch die Gestaltung des

Bauteils entsprechend der auftretenden Belastungsarten und -fälle erfolgt. [Ashb11], [Reut07], [BGHH13]

In ihrer, als System wirkenden, Gesamtheit werden sie allgemein auch als Karosseriestruktur oder Fahrzeugrohbau bezeichnet und bilden dabei den gestaltfesten Innenraum. Dadurch schaffen sie zusätzlich eine periphere Energieumsetzungszone und dienen der Aufnahme aller Antriebsaggregate sowie deren Achsmodule. [BGHH13]

In Bezug auf die optischen und funktionalen Anforderungen teilt Birkert [BiHS13] den Begriff der Fahrzeugkarosserie zusätzlich in Strukturbauteile und Außenhautbauteile auf. Abbildung 2-7 soll diese Art der Differenzierung anhand des Rohbaus der Mercedes E-Klasse grafisch verdeutlichen.

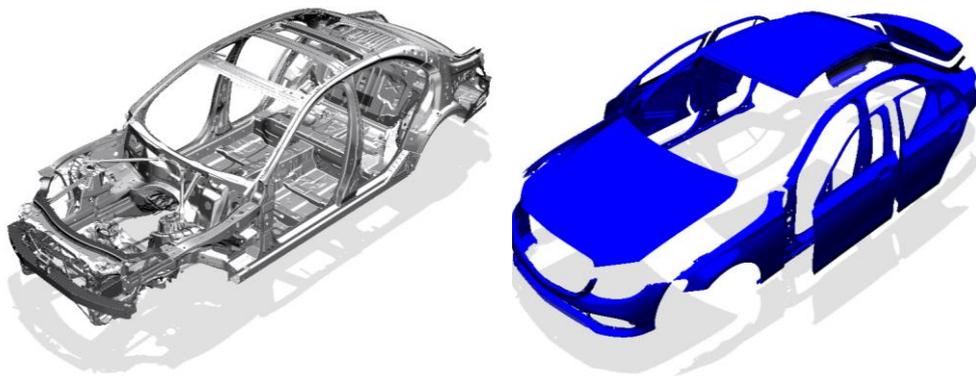


Abbildung 2-7: Strukturbauteile (links) und Außenhautbauteile (rechts) der Mercedes E-Klasse

Strukturbauteile sind im täglichen Gebrauch für die Fahrzeuginsassen, bei geschlossenen Türen und Klappen, nicht sichtbar. Um dies zu gewährleisten werden entsprechende Verkleidungen wie z.B. Dachhimmel oder Säulenabdeckungen zur Kaschierung eingesetzt. Die vorrangige Aufgabe ist somit die Erfüllung der identifizierten und segmentierten Lastfälle (vgl. Kapitel 2.1.3) durch geometrisch und materiell erzeugte Steifigkeiten und/oder Festigkeiten [Hari99]. Hingegen sind alle Karosserieteile die von außen optisch wahrgenommen werden können als sogenannte Außenhautbauteile zu deklarieren und müssen folglich allerhöchsten Ansprüchen an das optische Erscheinungsbild genügen. Hierzu zählen unter anderem die Türen, Seitenwände sowie die Motorhaube, welche Class-A-Oberflächen besitzen. Sie fungieren somit ebenso als Designelement zur optischen

Abgrenzung verschiedener Fahrzeuge und Marken. Außenhautbauteile unterliegen hohen Qualitätsanforderungen und einem speziellen Fokus hinsichtlich des Herstellungsprozesses sowie der Anfertigung der Umformwerkzeuge und der Fügefolge. [BiHS13]

Nachdem das Aufgabenspektrum von Fahrzeugstrukturbauteilen nun vollumfänglich geklärt werden konnte, gilt es fortfolgend die Haupteinflussfaktoren für eintretende Bauraum- und Lastenanforderungen innerhalb der Strukturbauteilentwicklung genauer zu spezifizieren.

2.1.5 Haupteinflussfaktoren für Bauraumanforderungen

Ziel ist es den verfügbaren Entwurfsraum eines Fahrzeugs zwischen den drei Abteilungen Design, Package und Rohbau mit einem gesamtheitlichen Blick auf die Produktziele bestmöglich zu verteilen [Krau07], [BBEG13], [AAAB13], [Maie15]. Die verschiedenen Zuständigkeitsbereiche stehen dabei im ständigen Austausch miteinander, um auftretende Zielkonflikte zur bestmöglichen Gesamtlösung zu führen [Rees05]. Für die Strukturbauteilentwicklung folgt daraus die unausweichliche und direkte Abhängigkeit des maximal verfügbaren Bauraums von entsprechenden Design- und Packagevorgaben (Abbildung 2-8).

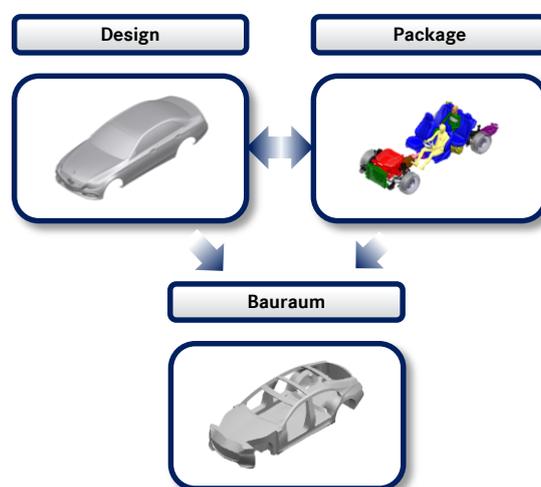


Abbildung 2-8: Die grenzbildenden Faktoren des Bauraums für Fahrzeugstrukturbauteile

Die Interaktion der Bauräume aller einzelnen Komponenten innerhalb des Gesamtfahrzeugs lässt sich dabei domänenunabhängig und anschaulich anhand eines semantischen Netzdiagramms darstellen (Abbildung 2-9).

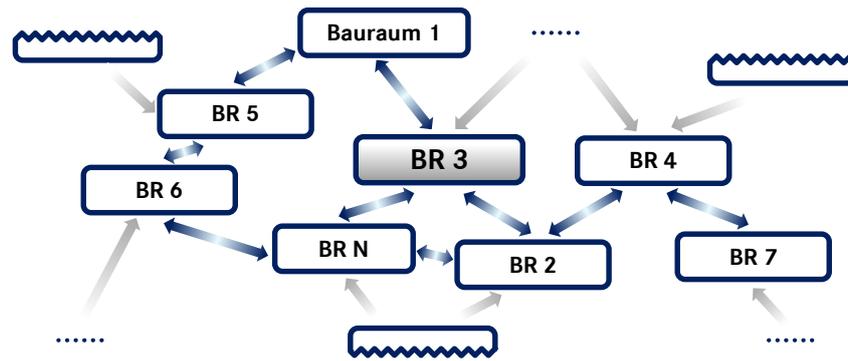


Abbildung 2-9: Allgemeine Darstellung der domänenunabhängigen Bauraumbeziehungen anhand eines semantischen Netzdiagramms in Anlehnung an Pahl et. al. [PBF07]

Dabei wird die Ausbreitung eines jeden Bauteils eines Fahrzeugs, von dessen jeweils umliegenden Komponenten, in allen Raumrichtungen, eingeschränkt. Aus diesem Grund pflanzen sich Änderungen einer Komponente zumeist entlang eines Netzdiagramms fort. Die Verknüpfung untereinander stellt dabei den direkten, räumlichen Bezug zweier Komponenten dar und bildet damit im Gesamten die Anordnung der Bauteile zueinander ab. Die Länge der Fortpflanzung einer eintretenden Änderung an einer Komponente kann dabei, je nach Anspannungsgrad des Bauraums, beliebig weit sein und somit auch den Bauraum von Bauteilen beeinflussen, welche nicht im primären Kontakt zueinander stehen (sekundärer Einfluss).

Um dieses Gefüge der gegenseitigen Einflussnahme besser verstehen zu können, gilt es die verursachenden Quellen in Form der grenzbildenden Faktoren des Rohbaus (Design und Package) detailliert zu analysieren.

2.1.5.1 Designanforderungen

Das Design hat die Aufgabe dem Fahrzeug seinen individuellen Charakter zu verleihen, welcher den Kunden sowohl optisch als auch emotional an selbiges binden soll [Huch07]. Über Jahre hinweg hat sich das Fahrzeugdesign somit, entlang der Entwicklung der menschlichen Empfindungen, weiterentwickelt (Abbildung 2-10). [Eger16], [EsHa13]



Abbildung 2-10: Design im Wandel der Zeit am Beispiel Mercedes Benz [WWW6]

Carl Friedrich Benz entwarf 1886 mit dem „Patent-Motorwagen“ ein Fahrzeugdesign, welches vor allem den funktionalen Anforderungen an das Package und die Rohbaustruktur folgte. Mit dem VW Käfer erschien bereits 1938 ein erstes zeitloses Design, welches aktuell durch die Neuauflage des VW Beetle seine Renaissance erlebt. Stilikonen wie der 300 SL von Mercedes-Benz (1954) (Abbildung 2-11) oder der Porsche 901/911 (1963) werden durch ihre andauernde Verträglichkeit mit den gegenwärtigen, gesellschaftlichen Vorstellungen von Ästhetik in ihrem zeitlosen Design bestätigt. [Maie15], [Eger16]

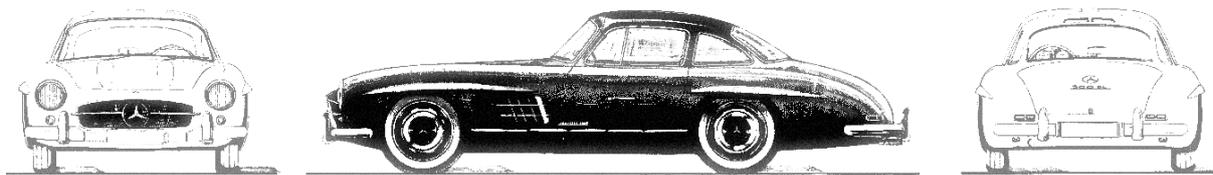


Abbildung 2-11: Designskizzen des Mercedes 300 SL [WWW7]

Unabhängig von der Entfernung zum Fahrzeug soll eine unverwechselbare Identität wahrgenommen werden können. Hierfür ist bspw. die gezielte Wahl der Fahrzeugabmessungen (Länge, Breite, Höhe) oder die Räder-Reifen-Positionierung im Verhältnis zur Karosserie entscheidend, um ein ansprechendes Gesamtbild zu erzeugen. Diese Merkmale können in entsprechenden Proportionsmodellen realitätsnah abgebildet werden und sind durch sogenannte Boxdesigns in ihrer Grundausprägung vordefiniert. [Krau07], [BBEG13], [LHWG13], [Eger16]

Aufgrund der Komplexität des Produkts entsteht eine enge Verflechtung zwischen gestalterischer und technischer Umsetzung, welche sich auch im Aufbau der Fachabteilungen sowie deren Interaktion innerhalb des Entwicklungsprozesses (vgl. Kapitel 2.2.2) widerspiegelt. [Krau07], [BBEG13], [AAAB13], [Maie15]

2.1.5.2 Packageanforderungen

Mit dem Ziel die technische Machbarkeit eines Fahrzeugs sicherzustellen, stellt das Package eine schrittweise detaillierte Abwandlung des funktionalen Fahrzeugentwurfs dar [AAAB13].

Aus einer Fülle von Forderungen und Wünschen, wie bspw. einer bestimmten Motorleistung, Kühlleistung, Fahrbahnausleuchtung, usw. wird das fahrzeugspezifische Package aufgebaut. Jede Komponente beansprucht dabei einen bestimmten Bauraum, in welchem es seine Funktion erfüllen muss. Zusätzliche Randbedingungen wie das Antriebskonzept, Kofferraumvolumen, Innenraummaße usw. erhöhen dabei den Anspannungsgrad. [SKFS13], [AAAB13], [Eger16]

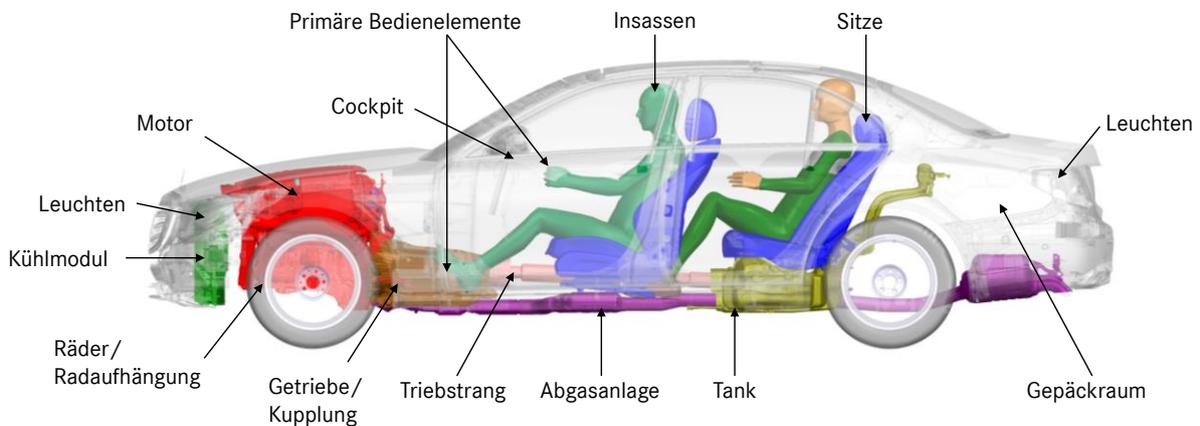


Abbildung 2-12: Das Fahrzeugpackage am Beispiel der Mercedes-Benz E-Klasse (W213) [Eger16]

Alle in Abbildung 2-12 beispielhaft dargestellten Packagekomponenten müssen dabei durch konstruktive Gestaltung in Einklang gebracht werden, um eine stimmige Gesamtfahrzeuflösung zu erlangen. Dies erfordert die Suche nach der bestmöglichen Kompromisslösung, um die verschiedenen Zielkonflikte, Bauraumansprüche und funktionalen Abhängigkeiten zu entschärfen, sodass eine geometrisch und physikalisch verträgliche Positionierung aller beteiligten Fahrzeugkomponenten im sogenannten Package vereint werden können. Gessner [Gess01] beschreibt das Package hierfür treffend als geometrisch-technische Realisierung der Produkthanforderungen unter der Berücksichtigung ästhetischer Designmerkmale. Dabei gilt es bspw. gesetzliche Anforderungen an ein Fahrzeug zu erfüllen und gleichermaßen funktionale Eigenschaften wie Kühlbereiche, Zugänglichkeiten sowie die Wechselwirkung der verschiedenen Fahrzeugkomponenten nicht zu vernachlässigen. [Gess01], [Eger16]

In der Literatur wird der Begriff „Fahrzeugkonzept“ häufig auch als Synonym für das Package verwendet. Ein Fahrzeugkonzept lässt sich demnach ebenso durch die Aufbauausprägung, das vereinfachte Maßkonzept und das geforderte Antriebskonzept definieren. [AAAB13]

Abbildung 2-13 stellt den Zusammenhang dieser drei konzeptbildenden Eckpunkte dar.

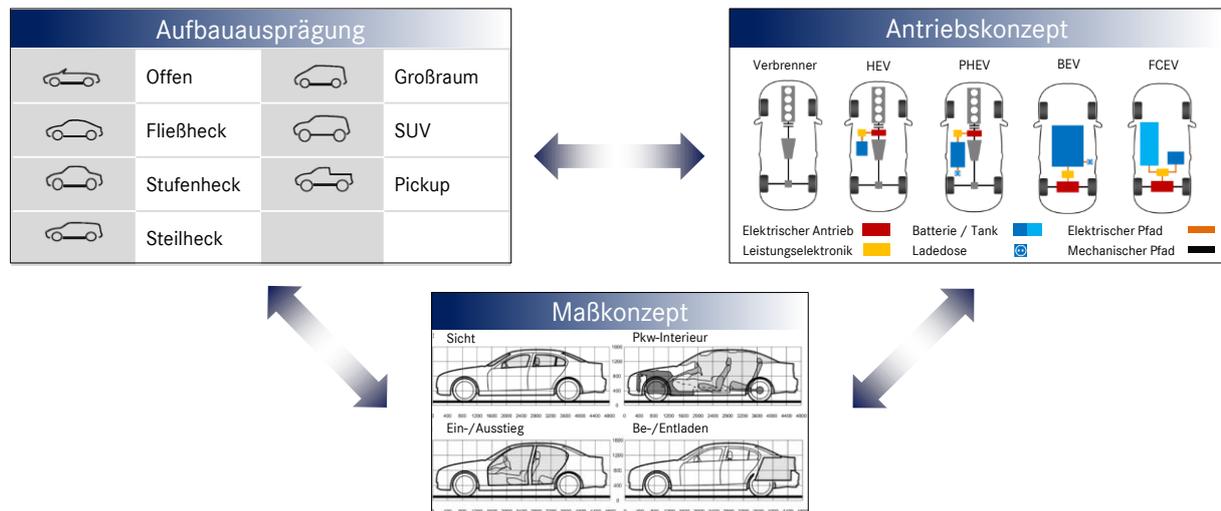


Abbildung 2-13: Zusammenhang der festzulegenden Basisanforderungen in Anlehnung an Achleitner et. al. [AAAB13]

Nach Seeger [Seeg14] und Seiffert et al. [SeGo08] bilden diese drei Sektoren die Basis für die Packagedefinition.

2.1.6 Haupteinflussfaktoren für Lastanforderungen

Um eine funktionale Auslegung der Fahrzeugstrukturen sicherstellen zu können, bedarf es dem Wissen über alle auslegungsrelevanten Fahrzeuglastfälle. Die einzelnen Lastanforderungen lassen sich dabei den drei Hauptdisziplinen Crash, NVH⁹ und SFB¹⁰ zuordnen [EGGH13], [Herr13].

In ihrer Reinform liegen diese zumeist auf Gesamtfahrzeugebene vor, sodass für die Auslegung einer bestimmten Komponente, der jeweilige Belastungsanteil aus der Gesamtlast dem dazugehörigen Komponentenanforderungsprofil zugeordnet werden können muss, um eine anforderungsgerechte Bauteilauslegung zu gewährleisten. Die Fortpflanzung dieser Lastfälle

⁹ Noise-Vibration-Harshness / Geräusch-Vibration-Rauheit

¹⁰ Steifigkeit, Festigkeit, Betriebsfestigkeit

lässt sich schematisch anhand eines Flussdiagramms (o.a. Funktionsstruktur nach Pahl et. al. [PBF07] und Conrad [Conr13]) anschaulich beschreiben (Abbildung 2-14). [Conr13], [EGGH13]

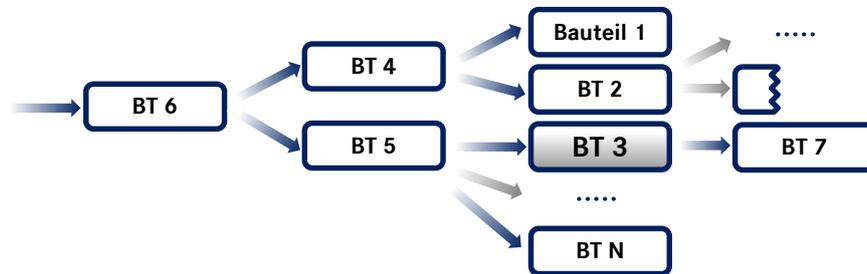


Abbildung 2-14: Allgemeine Darstellung der disziplinunabhängigen Lastverteilung anhand eines Flussdiagramms in Anlehnung an Conrad [Conr13]

Konträr zur Vorgehensweise bei der Darstellung der Bauraumabhängigkeiten (vgl. Abbildung 2-9) lässt sich bei der Beschreibung der Lastaufteilung, ausgehend von der Eingangslast, eine Flussrichtung ausmachen. Diese lässt sich darauf zurückzuführen, dass eine direkte Beeinflussung zweier Komponenten nur dann stattfinden kann, wenn eine physikalische Verbindung vorliegt, über die eine Kraft oder ein Moment übertragen werden kann. Wird ein Strukturbauteil innerhalb eines Lastpfades verändert (bspw. Material- oder Geometrieänderung), so führt dies postwendend auch zu einer neuen Verteilung der Gesamtfahrzeuglastfälle auf die Anforderungsprofile der einzelnen Strukturkomponenten.

Fortfolgend sollen nun die wichtigsten dieser Fahrzeuglastfälle vorgestellt werden, um die jeweiligen Zielrichtungen der verschiedenen Disziplinen kennenzulernen. Da die Beschreibung aller Lastfälle sowie deren unterschiedlichen Varianten den Rahmen dieser Arbeit überschreiten würden, wird an dieser Stelle, im Sinne der Vollständigkeit, auf entsprechende Fachliteratur verwiesen [EGGH13], [EiSc13], [FKNS13], [Klei13], [WiJV16], [Zell12].

2.1.6.1 Crashlastfälle

Trotz der sinkenden Anzahl an Verkehrstoten bleibt das Thema passive Sicherheit in der Fahrzeugindustrie weiterhin allgegenwärtig [Krög02], [WWW8]. Abbildung 2-15 veranschaulicht beispielhaft zwei klassische Crashlastfälle, aus einer Fülle verschiedener, teils länderspezifischer Szenarien [EiSc13].

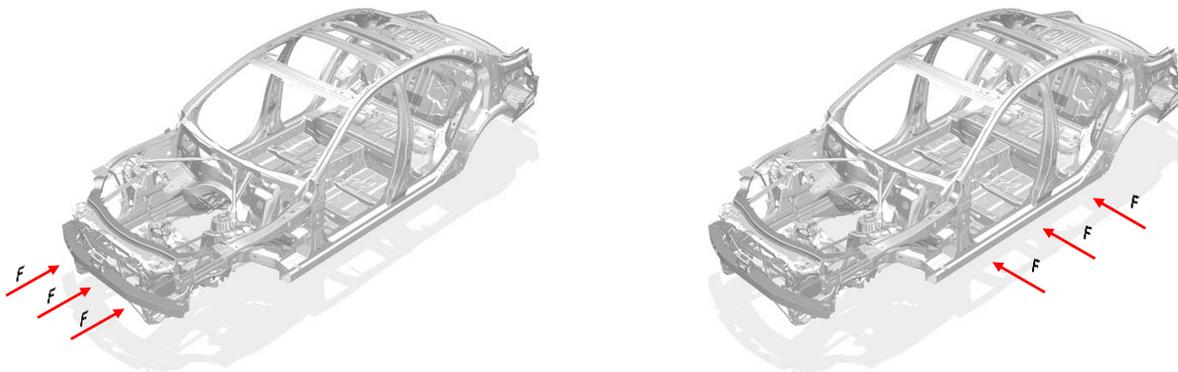


Abbildung 2-15: Frontalaufprall (links) und Seitenaufprall (rechts) in Anlehnung an Eichleider und Schöneburg [EiSc13]

Zu erkennen ist zum einen eine Seitenkollision, die ca. 38 % der Verkehrsunfälle abdeckt sowie zum anderen eine Frontalkollision, die mit ca. 55 % das häufigste Kollisionsszenario darstellt. Die geringste Häufigkeit weist der Auffahrunfall mit den restlichen 7 %, auf. Um die Crashversuche möglichst praxisnah abzubilden, steigt die Varianz der Versuche zunehmend an. Durch die Vielzahl an Simulationen und die Nachbildung des realen Unfallgeschehens in der digitalen Welt, soll der Aufwand bzw. die Anzahl an Crashtests am realen Fahrzeug möglichst gering gehalten werden. Daraus resultiert jedoch auch ein entsprechender Mehraufwand hinsichtlich der rechnerischen Absicherung innerhalb der Fahrzeugentwicklung. [Joha13]

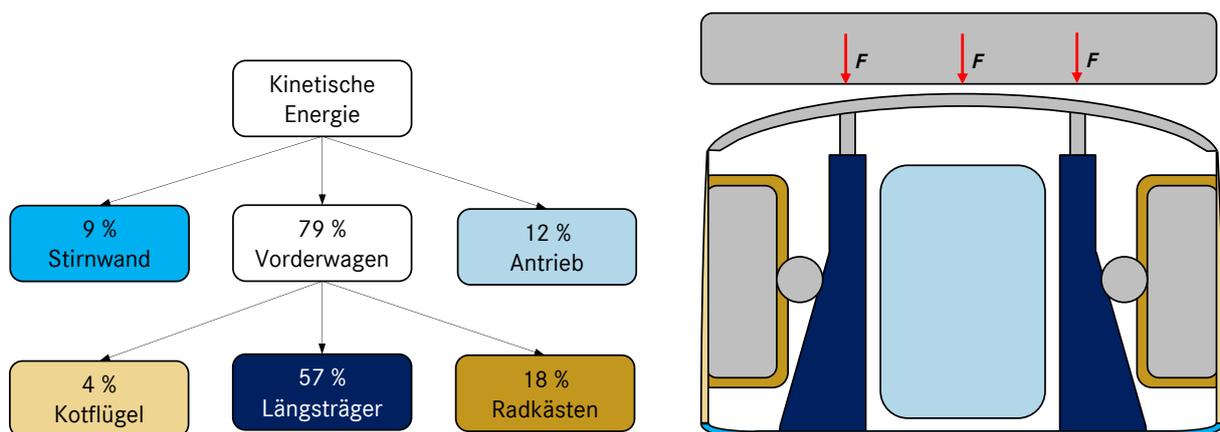


Abbildung 2-16: Aufteilung der dissipierten Gesamtenergie auf die unterschiedlichen Bauteile nach Anselm et. al. [AAAB13]

Nach Anselm [AAAB13] lässt sich bspw. die dissipierte Energie bei einem Frontalaufprall mit 50 km/h den verschiedenen Bauteilen prozentual zuordnen. Aus Abbildung 2-16 geht hervor, dass in diesem Fall die Vorderwagenstruktur mit 79 % an der Aufnahme der Gesamtenergie

beteiligt ist. Die verbleibenden 21 % werden zum einen von der Stirnwand (9 %) und zum anderen vom Antrieb (12 %) umgesetzt. Solch eine prozentuale Aufteilung hinsichtlich der Bauteilbelastung lässt sich jedoch nicht verallgemeinern und auf jede beliebige Fahrzeugstruktur übertragen, da die Crashstrukturen sich von Hersteller zu Hersteller bzw. häufig sogar von Fahrzeug zu Fahrzeug stark unterscheiden, um den spezifischen Anforderungsprofilen gerecht zu werden. Jedoch bietet diese Vorgehensweise die Möglichkeit Crashlasten in einer ersten Näherung einzelnen Komponenten zuzuordnen. Die Aktualisierung des Modells bei eintretenden Systemänderungen bedingt eine iterative Vorgehensweise. [AAAB13], [Krög02]

2.1.6.2 Torsions- und Biegefrequenzlastfälle (NVH)

Um den Fahrkomfort der Insassen sicherzustellen, wird die Fahrzeugstruktur des Weiteren hinsichtlich ihrer sowohl globalen als auch lokalen Torsions- und Biegesteifigkeit ausgelegt (Abbildung 2-17). [FKNS13]

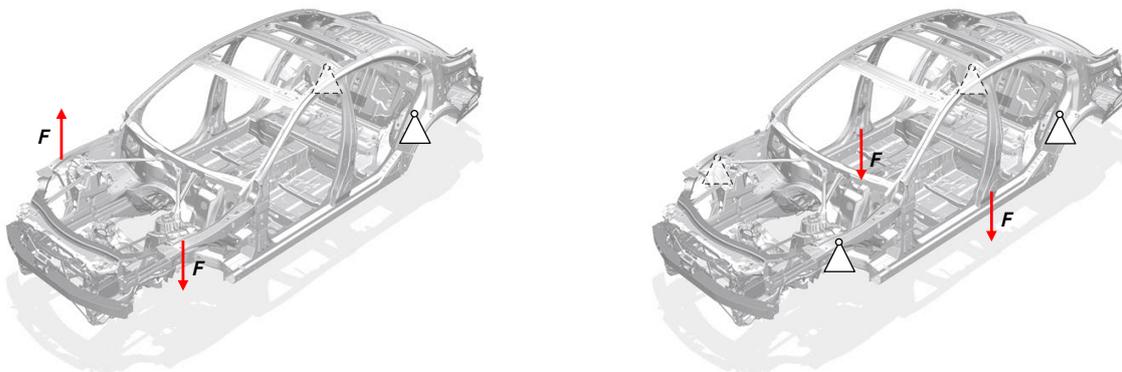


Abbildung 2-17: Schematische Darstellung des Torsion- (links) und Biegelastfalls (rechts) in Anlehnung an Klein [Klei13]

Folgen einer Nichteinhaltung vorgegebener Mindeststeifigkeit können sich im ungünstigsten Fall durch störende Knatter- und Knarzgeräusche oder einen negativen Einfluss auf die Fahrdynamik bemerkbar machen. Globale und lokale Steifigkeitseffekte lassen sich bereits an der isolierten Rohkarosserie ermitteln. Bei Frequenzen oberhalb von 2-4 Hz ist die rein elastische Abbildung der Karosserie nicht mehr zulässig. Die Karosserie bildet im dynamischen Fall gemeinsam mit dem zugehörigen Massebelag ein Schwingungssystem. Dabei bestimmen die globalen Eigenformen maßgeblich das Schwingungsverhalten, während die lokalen Schwingformen für die Einleitung und Übertragung des Körperschalls von Relevanz sind.

Während sich die Eigenformen der Schwingung mit dem bereits beschriebenen Konglomerat aus Rohbaukarosserie und Standard-Massenbelegung ermitteln lassen, ist die Bestimmung der Eigenfrequenzen erst mit dem Trimmed-Body¹¹ oder Gesamtfahrzeugmodell identifizierbar. Durch gezielte Frequenztrennung und einem Abstand von 2-3 Hz zwischen schwingungsfähigen Komponenten wie bspw. Motor, Achse oder Abgasanlage zum Karosserierohbau soll Koppelschwingungen vorgebeugt werden. [Zell12]

Sind die Schwingungen für die Insassen akustisch und haptisch wahrnehmbar, befindet man sich im Fachgebiet NVH. Hierbei findet eine Unterscheidung der Art der Schwingungserregung, in fremd- oder selbsterregend, statt. Ein typisches Beispiel für ein Schwingsystem stellt die Fahrbahn (z.B. Schlechtwegefahrbetrieb) als Schwingungserreger, die Achskinematik als Übertragungspfad sowie die Karosserieschwingung als Systemantwort dar (Abbildung 2-18). [Schl12]

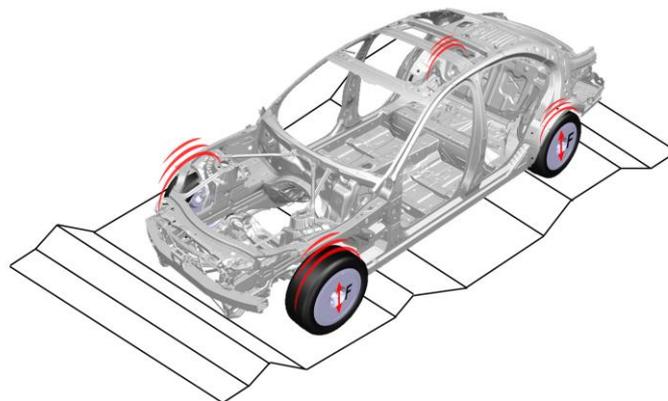


Abbildung 2-18: Übertragung von Körperschall durch Fahrbahnanregung in Anlehnung an Zeller [Zell12]

Frequenzen bis ca. 50 Hz sind bei Kontakt des Menschen mit dem schwingenden System als Vibration spürbar und werden als tieffrequente Schwingungen eingestuft. Indes sind höherfrequente Schwingungen bis ca. 1 KHz als Körperschall bekannt und werden erst dann für den Insassen hörbar, wenn selbiger die Basis für eine Luftschallanregung darstellt. Der Übergangsbereich, häufig auch als „Harshness“ bezeichnet, kennzeichnet das Gebiet in dem die Schwingungen sowohl spürbar als auch hörbar sind und befindet sich im Frequenzbereich zwischen 20 und 100 Hz. In einer Vielzahl der Auslegungsfälle geht es darum diese

¹¹ Mit Aufbaumassen (Interieur, Anbauteile, etc.) belegte Karosserie

Schwingungen zu minimieren, nur einige wenige werden bewusst so modelliert, dass der individuelle Fahrzeugcharakter hervorgehoben wird. [Zell12]

2.1.6.3 Steifigkeit, Festigkeit und Betriebsfestigkeit (SFB)

Ein typischer mechanischer Auslegungslastfall ist der Verladefall. Das Lastniveau wird dabei durch die Masse des Fahrzeugs, den Winkel der Laderampe sowie entsprechender gesetzlicher Berechnungsfaktoren festgelegt. Durch die Variation verschiedener Winkelpositionen, sowohl vertikal als auch horizontal, werden unterschiedliche Szenarien abgebildet (z.B.: Abschleppen, vgl. Abbildung 2-19). [EiSc13], [Kehl14]

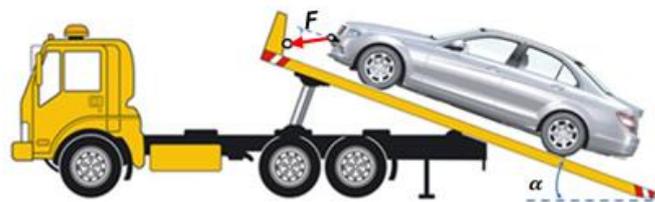


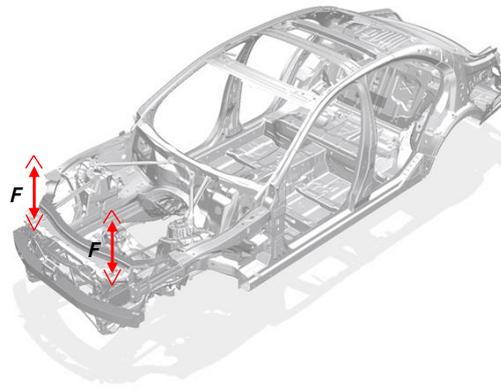
Abbildung 2-19: Lastfall bei der LKW-Verladung (Abschleppen) in Anlehnung an Kehl [Kehl14]

Die Lasteinleitungsposition ist dabei die Abschleppöse, welche direkt an den Fahrzeugrohbau angebunden ist. Das Ziel dieses Lastfalls ist durch die Einhaltung vorgegebener Steifigkeits- und Festigkeitsgrenzwerte der jeweiligen Komponenten innerhalb des Lastpfades beschrieben. Die Einhaltung des Steifigkeitskriteriums ist dabei anhand einer vorgegebenen maximal zulässigen Verschiebung des Fanghakens zu seiner Mittelachse, auf Höhe des Stoßfängerfreigangs, im belasteten Zustand definiert. Gleichmaßen wird auch für die Festigkeit ein entsprechender Grenzwert festgelegt, der nicht überschritten werden darf. [Kehl14]

Dieses Vorgehen sowie die Definition der Grenzwerte gelten dabei ebenso für Fabriklastfälle. Hier besteht häufig die Forderung nach einer vorgegebenen Eigensteifigkeit der Komponente oder des Teilsystems, um eine präzise Montage zu gewährleisten und damit einer Beschädigung des Produkts während des Produktionsprozesses entgegenzuwirken. [EiSc13]

Während die Belastungen bspw. im Abschlepplastfall als nahezu statisch angesehen werden können, weisen die Betriebslastfälle wechselnde oder schwellende Belastungsmuster auf und gelten somit als dynamische Lastfälle [WiJV16].

Solche Lastfälle sind bspw. der Klappendauerlauf (Abbildung 2-20) oder der Türbetätigungstest, welche den Gebrauch durch den Kunden sowie der Werkstattdienste im täglichen Betrieb simulieren. [EiSc13]



**Abbildung 2-20: Schematische Darstellung des Lastangriffs eines Klappendauerlaufs
(ohne Visualisierung Motorhaube)**

An diesen Bauteilen liegen dementsprechend zumeist regellose, stochastische Beanspruchungen über den Zeitraum des Produktlebenszyklus vor. Die Folgen zyklisch wiederholender Beanspruchungen können Spannungsrisse und damit einhergehendes Versagen des Bauteils sein, auch wenn sich der auftretende Spannungsbereich deutlich im elastischen Bereich abspielt [EiSc13]. Ausschlaggebend ist dabei vor allem die Schwingspielzahl. Diese beschreibt die Anzahl der Lastzyklen innerhalb der Betriebszeit einer Komponente, bei einer vorgegebenen Nennspannungsamplitude. Die grafische Darstellung erfolgt dabei in der Regel über sogenannte Wöhler-Kurven. [Hein11], [EiSc13]

2.1.7 Wechselseitiger Einfluss von Bauraum- und Lastanforderungen

Das Ziel der Erreichung vorgegebener Steifigkeiten und/oder Festigkeiten eines bestimmten Strukturbauteils steht im ständigen Zielkonflikt mit dem jeweils dazugehörigen, begrenzten Bauraum. Eine beliebige Ausdehnung des Querschnittes ist somit nicht möglich, was eine entsprechende Einschränkung bei der Werkstoffauswahl zur Folge hat. Auf die physikalischen Zusammenhänge zwischen Last und verfügbarem Bauraum sowie deren Auswirkungen auf die Materialauswahl soll im Folgenden genauer eingegangen werden. In Abbildung 2-21 ist hierfür ein Zugstab mit zwei verschiedenen Flächenquerschnitten (A_1 und A_2) dargestellt, an dem eine Zugkraft F_z anliegt.

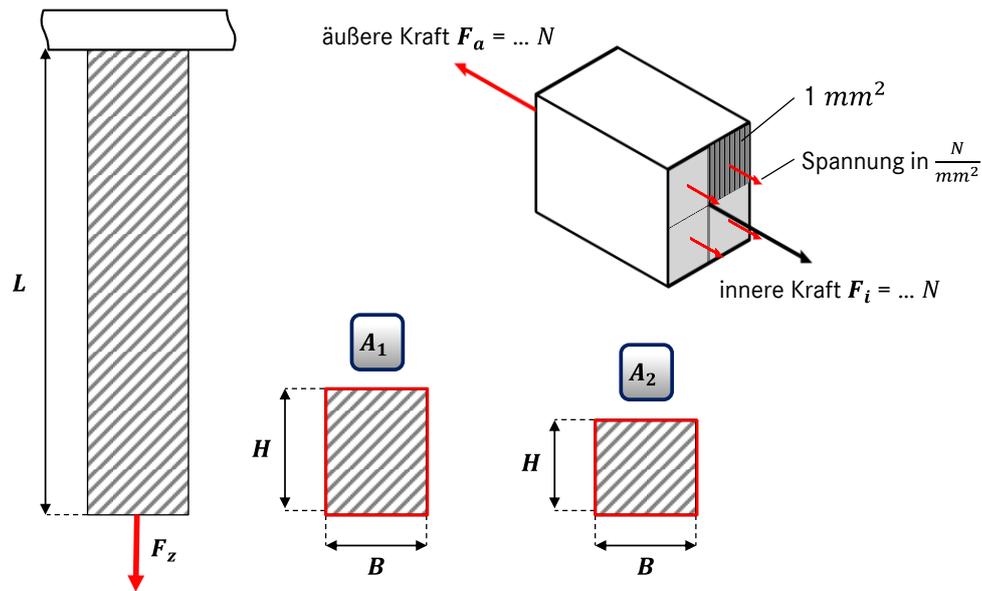


Abbildung 2-21: Der Zusammenhang von Last und Bauraum unter Verwendung von Bögen [BöBö15]

Während die äußere Kraft F_a (hier ist $F_a = F_z$) die Belastung des Bauteils beschreibt, kann durch die Anwendung des Schnittverfahrens die innere Kraft F_i bestimmt werden, welche die Beanspruchung des Werkstoffs definiert. Unter der Annahme einer gleichmäßigen Kraftverteilung entlang der Flächenelemente eines Querschnitts, führt der Quotient aus der inneren Kraft F_i und der Querschnittsfläche A zur vorherrschenden Zugspannung σ_z wie in Formel 2-1 dargestellt. [BiHS13]

$$\sigma_z = \frac{F_i}{A} = \frac{\text{innere Kraft}}{\text{Querschnittsfläche}} \quad (2-1)$$

Im Falle eines schrägen Lastangriffs treten im Bauteilinneren neben den bereits bekannten Normalspannungen σ , die aus der Schnittebene heraus zeigen, gleichzeitig auch Schubspannungen τ , die parallel zur Schnittebene verlaufen, auf. [BöBö15]

Jene Spannungen gilt es anschließend mit den entsprechenden Werkstoffkennwerten $\sigma_{zulässig}$ bzw. $\tau_{zulässig}$ abzugleichen. Erfüllt das Material die Bedingung $\sigma \leq \sigma_{zul}$ bzw. $\tau \leq \tau_{zul}$, hält der Werkstoff der Belastung stand und kann entsprechend eingesetzt werden. Je nach Belastungsart (z.B.: Zug, Druck, Knicken, Biegung, Torsion) und geometrischer Bauteilprägung (T-Profil, U-Profil, O-Profil, usw.) verändert sich zwar die formelseitige Formulierung, die grundlegende Vorgehensweise bleibt davon jedoch unberührt. [BiHS13], [WiJV16]

Dieses Verhalten lässt sich analog auch auf Fahrzeugstrukturbauteile übertragen. Durch die in Kapitel 2.1.6 beschriebenen äußeren Lastanforderungen werden innere Kräfte und daraus resultierende Spannungen hervorgerufen (vgl. Abbildung 2-21). Die Wahl eines geeigneten Werkstoffes sowie die zugehörige Querschnittsfläche führen anschließend zur Funktionserfüllung jeder einzelnen Komponente.

Bei einer vorgegebenen Zugkraft F_z und einer zu Verfügung stehenden Fläche A_1 (Abbildung 2-21) können Werkstoffe eingesetzt werden die der Bedingung $\sigma_{z,1} \geq \sigma_{z,zul}$ entsprechen. Bei Verringerung des Flächenquerschnitts von A_1 auf A_2 , welche durch eine Einschränkung des Bauraums hervorgerufen werden kann, wird die Auswahl geeigneter Werkstoffe postwendend limitiert (vgl. Kapitel 2.3.8). Um innerhalb des limitierten Bauraums die lasttragende Funktion des Bauteils weiterhin zu gewährleisten, müssen infrage kommende Werkstoffe das Kriterium $\sigma_{z,2} \geq \sigma_{z,zul}$ erfüllen. Während die Funktionserfüllung als Grundvoraussetzung von Strukturbauteilen zu verstehen ist, werden die Faktoren Kosten und Gewicht als Optimierungsziele im Leichtbau häufig diskutiert und an die entsprechende Zielstrategie angepasst (siehe auch Kapitel 2.3.7.1). Die Zuteilung von Bauräumen an verschiedene Fraktionen sollte daher funktionsübergreifend betrachtet und entsprechende Mehr- oder Minderkosten ausgewiesen werden, um somit eine nachvollziehbare Entscheidung für alle Parteien herbeizuführen. [EGGH13]

2.1.8 Softwareunterstützung im Anforderungs- und Änderungsmanagement

Die steigende Anzahl und Komplexität der Fahrzeuganforderungen, die aus verschiedensten Kundenbedürfnissen abgeleitet und anschließend den jeweiligen Fachbereichen zugeteilt werden (vgl. Kapitel 2.1.3), erschweren die regelmäßige Pflege der Anforderungsprofile. Aus diesem Grund haben sich, insbesondere in der Fahrzeugindustrie, verschiedene Tools zur Unterstützung des Anforderungsmanagements etabliert. Das Softwarepaket DOORS¹² ermöglicht bspw. die Erstellung und Versionierung von Lasten- und Pflichtenheften. Durch die Verwendung einer zentralen Datenbank haben die Nutzer jederzeit Zugriff auf die aktuellsten Versionsstände. Die Darstellung von Abhängigkeiten zwischen den verschiedenen Anforderungen ist dabei ebenfalls möglich. [VHHM04]

¹² Dynamic Object Oriented Requirements System

Die Überführung dieser zu Beginn meist auf Gesamtfahrzeugebene vorliegenden Anforderungen, in die für die Werkstoffauswahl so relevante Komponentenebene, stellt dabei eine zum Teil schwer zu lösende Aufgabe dar.

PDM¹³- und PLM¹⁴-Systeme bieten indes Möglichkeiten zur Verwaltung und Organisation produktspezifischer Daten entlang des gesamten Entwicklungsprozesses. Anforderungen die im System bereits angelegt wurden, lassen sich mit beliebigen Objekten des PLM-Systems verlinken. Dies ermöglicht somit die Identifizierung aller betroffenen Objekte bei der Änderung einer bestimmten Anforderung. [Köni12]

Um willkürliche Änderungen und damit verbundene hohe Kosten zu vermeiden, gilt es auf Basis eines Änderungsmanagements Prozesse und Verantwortlichkeiten zum Umgang mit eintreffenden Änderungen klar zu definieren, um somit auch den Änderungsprozess entlang des Entwicklungsprozess zu strukturieren. Änderungen sind dabei grundsätzlich nicht als zu vermeidende Vorkommnisse anzusehen, sondern müssen sogar zielgerichtet eingesetzt werden, um den Produktreifegrad fortlaufend zu steigern. Da die Konzeptfindungsphase durch einen kreativen Ideengenerierungsprozess bestimmt wird, der verschiedene Lösungskonzepte zur Umsetzung vorschlägt, wird die Einführung eines toolbasierten Anforderungsmanagements (wie bspw. von IBM oder Clear-Quest angeboten) erst nach der Konzeptfestlegung als sinnvoll erachtet, um selbiges mit vertretbarem Aufwand durchzuführen. [Grand13]

Durch die modellbasierte Abbildung und Analyse von Systemen lässt sich das Systemverhalten bei eintreffenden Änderungen, auch in der frühen Phase der Entwicklung, darstellen. Die Software SysML¹⁵ [WWW9] bietet hierfür eine grafische Oberfläche mit vorgefertigten Bausteinen zur Modellierung der Systemzusammenhänge. Hierfür müssen jedoch bereits zu Beginn alle Beziehungen der verschiedenen Systemkomponenten und -parameter zueinander bekannt sein, um eine vollständige Modellierung realisieren zu können. Entstehen während der fortlaufenden Entwicklung neue Beziehungen und Abhängigkeiten, müssen diese manuell erkannt und im bestehenden Modell ergänzt werden. [FKNS13]

¹³ Produktdatenmanagement

¹⁴ Produktlebenszyklusmanagement

¹⁵ Systems Modeling Language

Konträr zu dieser modellbasierten Vorgehensweise müssen bei der Parametermodellierung nach Toepfer et al. [ToNa17] keine aufwendigen Systemmodelle entworfen und gewartet werden. Stattdessen stellen die Parameter selbst die Beziehung zwischen beliebigen Objekten dar. Dies ermöglicht eine automatisierte Verfolgung und Rückmeldung von Parametern bei Überschreitung vorgegebener Grenzwerte (z.B.: zulässige Mindestabstände von Bauteilen). [ToNa16], [ToNa17]

2.2 Produktentstehungsprozess im Automobilbau

Als Bestandteil des Produktlebenszyklus nach DIN ISO 9004-1 [DIN9004] beschreibt der Produktentstehungsprozess ganz allgemein jene Phasen, die ein Produkt von der ersten Idee bis zur Herstellung durchläuft. Der Vertrieb, Service sowie das Recycling schließen dabei direkt an den Produktentstehungsprozess an und komplettieren somit den Zyklus. Den größten Einfluss auf die Gestaltung des Produkts hat die Produktentwicklung. Die Eingangsdaten zur Zieldefinition werden hierfür aus vorgelagerten Marketing- und Marktforschungsanalysen gewonnen, um die darin enthaltenen Kundenwünsche berücksichtigen zu können. Das Ergebnis der Produktentwicklung stellt die Produktdokumentation dar, welche alle produktbeschreibenden Dokumente, Zeichnungen und Datensätze enthält und somit als Eingangsdaten für die anschließende Prozessplanung und –entwicklung fungiert. [EhMe13]

Bezogen auf die Werkstoffauswahl ist daher im speziellen die Produktentwicklung innerhalb des Produktentstehungsprozesses von entscheidendem Interesse, da in dieser Phase das zum Einsatz kommende Material bestimmt wird, weswegen der Fokus im Folgenden vorrangig auf sie gerichtet sein soll.

Strukturierte Abläufe einer technischen Produktentwicklung werden bspw. durch Pahl/Beitz et al. [PBF07], Ehrlenspiel/Meerkamm [EhMe13], Andreasen [Andr80], Pugh [Pugh90], Cross [Cros94], French [Fren99], Eder/Hosnedl [EdHo08] und Malmqvist/Svensson [MaSv99] detailliert beschrieben. Die vierphasige Vorgehensweise PKEA¹⁶ (vgl. Abbildung 2-22) vereint dabei den Grundgedanken aller genannten Autoren und ist durch die VDI-Richtlinie 2221 [VDI2221] allgemeingültig festgehalten. [EiRZ14]

¹⁶ Planen, Konzipieren, Entwerfen und Ausarbeiten

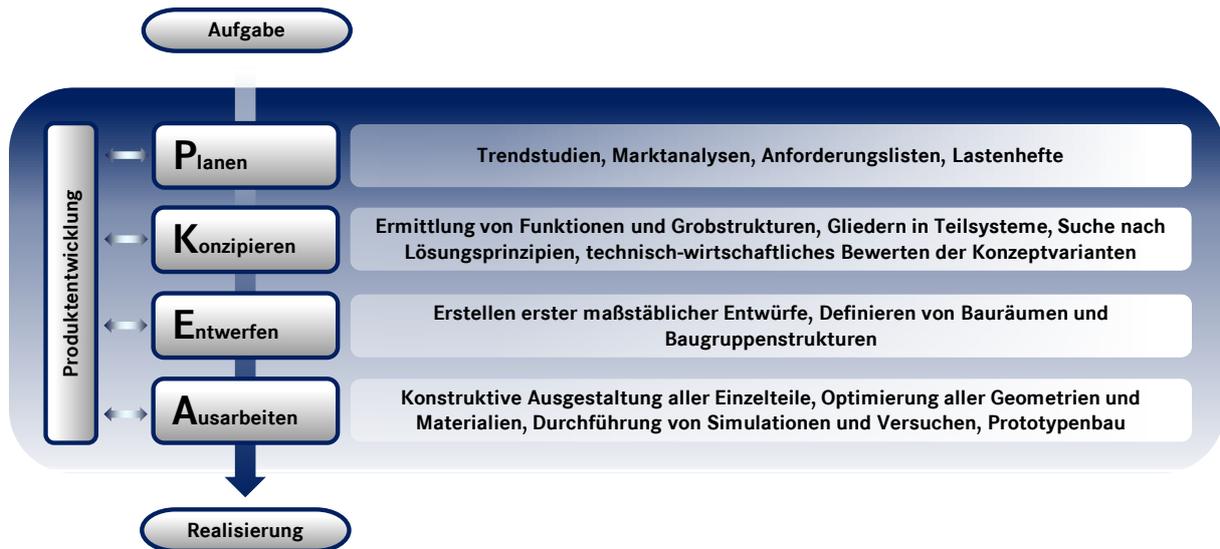


Abbildung 2-22: Die vier Phasen der Produktentwicklung in Anlehnung an Feldhusen und Grote et al. [FeGr13]

Unternehmensspezifische Anpassungen der Detailinhalte innerhalb der einzelnen Phasen sind dabei durchaus üblich.

Anhand von Trendstudien und Marktanalysen wird zu Beginn einer jeden Produktentwicklung eine Anforderungsliste ausgearbeitet, welche im Anschluss in Form eines Lastenhefts dokumentiert wird und dadurch eine gewisse Verbindlichkeit erhält („Planen“). Die Ermittlung von Funktionen und Grobstrukturen sowie die daraus abgeleitete Zuordnung von Bauräumen sind den Phasen „Konzipieren“ und „Entwerfen“ zuzuordnen, bevor die finale Ausgestaltung („Ausarbeiten“) der Einzelteile erfolgen kann. [EhMe13]

Zur Komplexitätsreduktion eines großen Gesamtproblems kommt dabei innerhalb des Entwicklungsprozesses klassischerweise das V-Modell (vgl. Kapitel 2.1.3) zum Einsatz, um die Gliederung in überschaubare Teilprobleme vorzunehmen. Die anschließende zyklische Integration der Teillösungen in die aufsteigenden Systemebenen verfolgt dabei das Ziel einer optimierten und abgesicherten Gesamtlösung. [EhMe13], [PBFG07], [VDI2206]

Dies spiegelt auch den Grundgedanken einer methodisch-iterativen Fahrzeugentwicklung wider, welche eine phasenweise Erhöhung des Detaillierungsgrades vorsieht. Erkenntnisse aus Simulationen, Berechnungen und Versuchen leisten hierzu einen signifikanten Beitrag. Zudem werden zwischen den Übergängen einzelner Prozessschritte sogenannte Meilensteine oder auch Quality-Gates eingeführt, um den aktuellen Projektstatus zu überprüfen. Dabei werden bisherige Projektergebnisse mit den dazugehörigen Zielvorgaben abgeglichen. Im

Falle eines entsprechenden Erfüllungsgrads wird das Projekt in die nächste Phase überführt. Andernfalls müssen zuvor disziplinspezifische Nachbesserungen erfolgen oder damit einhergehende Risiken in Kauf genommen werden.

Unternehmen sind dabei häufig kompetenzorientiert in diverse Abteilungen gegliedert, um Problemstellungen fachgerecht bearbeiten zu können. Je nach Produktportfolio und Unternehmensgröße variiert dabei die Anzahl der Fachbereiche. Typische Kompetenzfelder für eine Rohbauentwicklung sind bspw. Berechnung, Konstruktion, Simulation, Prototypenbau und Versuch. Die dabei anfallenden Aufgaben der verschiedenen Fraktionen werden zumeist getrennt voneinander vorangetrieben. [GuKr10]

Dennoch ist die Kommunikation zwischen den Fachbereichen während der gesamten Entwicklung unabdingbar, um unnötige Arbeitsaufwände zu vermeiden. Der Einsatz von Simultaneous Engineering soll dabei die zielgerichtete, interdisziplinäre Zusammen- und Parallelarbeit des Fahrzeugentwicklungsprozesses unterstützen. [EhMe13]

Ein allgemeingültiges Gesamtbild einer „Produktentstehung“ innerhalb der Automobilindustrie lässt sich im Wesentlichen durch den in Abbildung 2-23 an Göpfert et al. [GöBS13] angelehnten Prozess darstellen. Jener findet sich, wenn auch zum Teil mit geringfügigen Abwandlungen in der Bezeichnung und Anordnung der Meilensteine, in den Prozessbeschreibungen von Audi [BBEG13], VW¹⁷ [Form13], Toyota [Form13] und Mercedes-Benz [PfSc14] wieder.

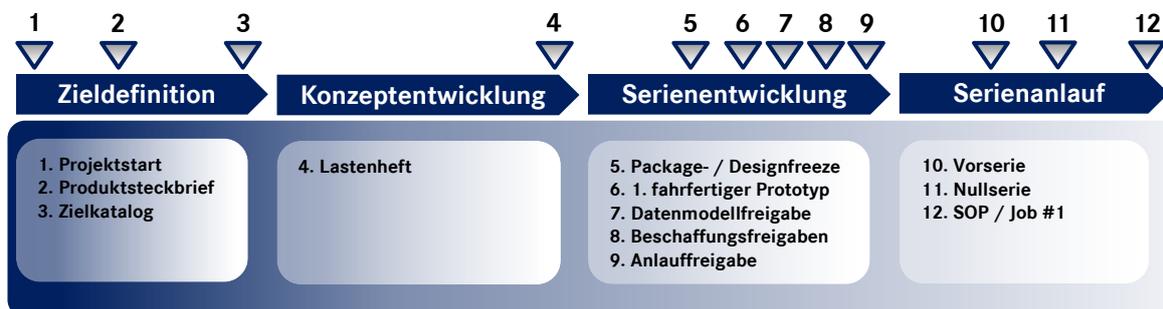


Abbildung 2-23: Der Produktentstehungsprozess in der Automobilindustrie in Anlehnung an Göpfert et al. [GöBS13]

¹⁷ Volkswagen

Eine „Produktentwicklung“ beginnt formal auf Anweisung des zuständigen Entscheidungsgremiums eines Unternehmens. Die wichtigsten Anforderungen definiert dabei das Marketing gemeinsam mit den strategischen Planungs- und Projektsteuerungsabteilungen. Der daraus resultierende Projektzielkatalog fasst alle Kundenwünsche an das Produkt zusammen und sieht gleichermaßen die Übersetzung in technische Anforderungen vor. [GöBS13]

In der Phase der Zieldefinition werden somit die Anforderungen und Zielsetzungen fahrzeugspezifisch bis zum Ende der Konzeptentwicklung immer weiter verfeinert und erste Lösungsvorschläge in Form von Entwürfen umgesetzt. Die anschließende Serienentwicklung sieht die Detaillierung und Finalisierung des vielversprechendsten Konzepts vor und schließt die Produktentwicklung ab, in dem sie das Zusammenspiel aller Komponenten anhand von Prototypen überprüft. Zeitgleich erfolgt die Freigabe zur Beschaffung der Werkzeuge und Zulieferteile. Ab Beginn des Serienanlaufs werden mit fortschreitender Zeit immer größere Chargen seriennaher Fahrzeuge produziert, um die Anlagen und Prozesse schrittweise an die Serienproduktion heranzuführen. [GöBS13]

Die folgende Detailbetrachtung der für die Werkstoffauswahl ausschlaggebenden Teilprozesse wie der Strukturbauteil-, Design- und Packageentwicklungsprozess sowie deren Einordnung in den allgemeinen Produktentstehungsprozess der Automobilindustrie, sollen dem Verständnis der gegenseitigen Einflussnahme dienen.

2.2.1 Strukturbauteilentwicklungsprozess

Während der Startpunkt für frühere Karosseriekonzepte aus bereits bestehenden hervorging, so erweitern heutzutage der Zuwachs an rechnergestützten Tools sowohl den Lösungsraum als auch das Leichtbaupotential um ein Vielfaches. Mit Hilfe der Topologieoptimierung lassen sich bspw. schon in der frühen Phase der Karosserieentwicklung, anhand eines groben Bauraummodells, erste Lastpfadkonzepte entwickeln. Eine der zwei wichtigsten Strategien einer Topologieoptimierung stellt dabei die Maximierung der Steifigkeit, unter der Voraussetzung eines bestimmten Volumengrenzwertanteils, dar (Abbildung 2-24 oben). Diese Strategie liefert einen qualitativen Verlauf der Lastpfade, jedoch unabhängig von der Höhe der Eingangslasten sowie des gewählten Werkstoffs. Bei der zweiten Strategie soll das Ziel einer Masseminimierung verfolgt und gleichzeitig eine vorgegebene Verschiebung nicht

überschritten werden (Abbildung 2-24 unten). Durch die veränderten Zielvorgaben steigt oder schwindet die Ausprägung der Lastpfade in Abhängigkeit zur eingehenden Belastung sowie den verwendeten Einsatzwerkstoffen. [KBSF12], [FrKr13]

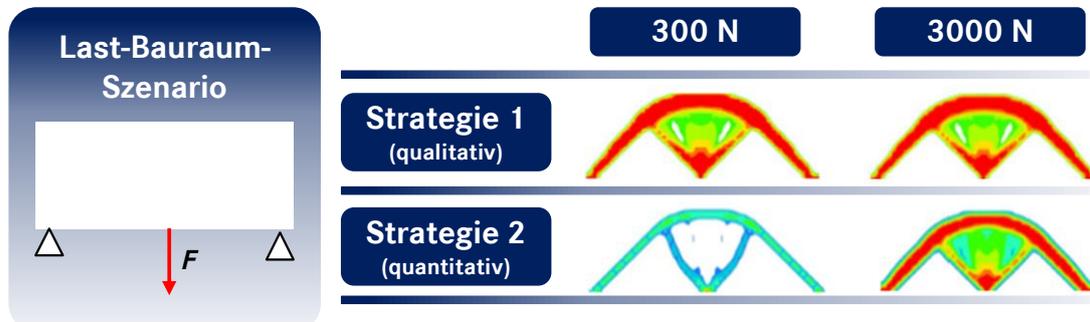


Abbildung 2-24: Die zwei grundlegenden Strategien der Topologieoptimierung in Anlehnung an Kirshnamoorthy et. al. [KBSF12] sowie Friedrich und Kirshnamoorthy [FrKr13]

Während die Abbildung der statischen Lastfälle innerhalb der Topologieoptimierung kein Problem darstellt, können dynamische Crashbelastungen (vgl. Kapitel 2.1.6.1) bislang nur durch Anwendung der ESL¹⁸-Methode berücksichtigt werden. Trotz einiger offenen Fragen zur Genauigkeit und Abweichung dieser Vorgehensweise, gibt es bereits diverse Beispiele für eine erfolgreiche Anwendung der Selbigen. [Harz14], [KBSF12], [EhMe13]

Ähnlich verhält es sich mit der Berücksichtigung dynamischer Betriebslasten (z.B.: schwelend oder wechselnd) anhand von äquivalenten statischen Ersatzbelastungen. Während in der späteren Detailauslegung die Mittel- und Amplitudenspannung sowie die Anzahl der Schwingspiele ausschlaggebend für den Nachweis der Betriebsfestigkeit sind (vgl. Kapitel 2.1.6.3) und mit Hilfe der Schadensakkumulation nach Palmgren und Miner bestimmt werden können, lassen sich statische Ersatzlasten, auf Basis der Maximalbelastung sowie einem entsprechenden Sicherheitsbeiwert (zur Berücksichtigung der Schwingspiele), für die frühe Phase der Strukturauslegung nutzen. [DaDa13], [Hein11], [WiJV16]

Die Übertragung dieser häufig noch sehr zerklüfteten und abstrakten Strukturen aus der Topologieoptimierung in ein Balkenmodell stellt anschließend die erste vereinfachte Abbildung der Fahrzeugstruktur dar (Abbildung 2-25).

¹⁸ Equivalent Static Loads

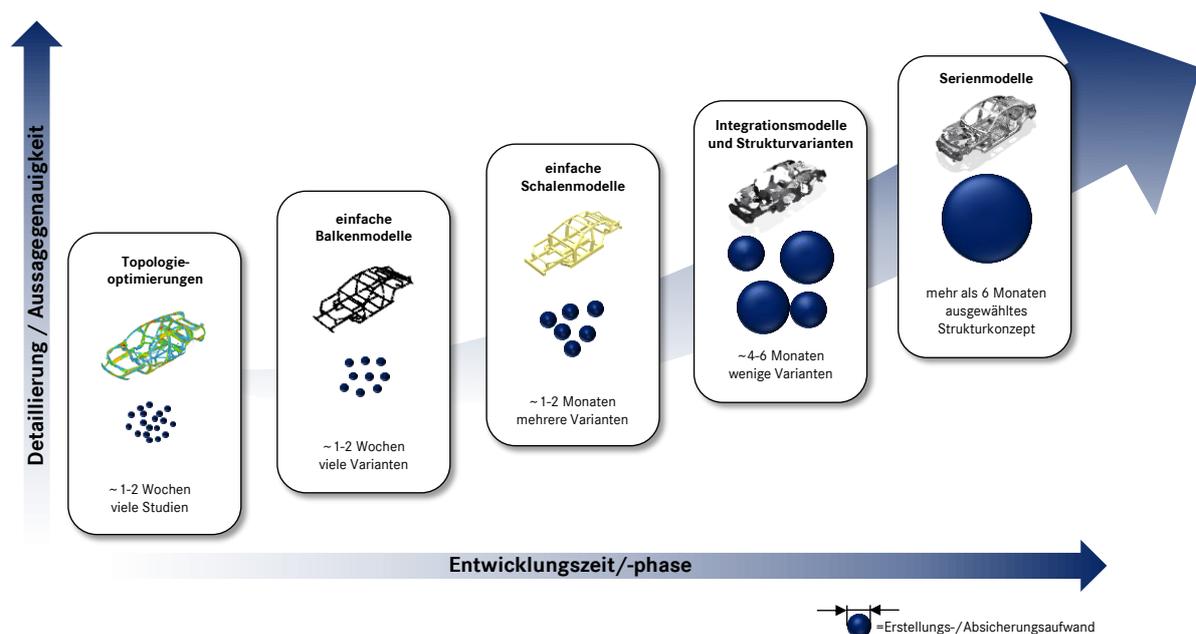


Abbildung 2-25: Zunehmender Detaillierungsgrad entlang der Strukturbauteilentwicklung

Jedem einzelnen Balken können spezifische Steifigkeits- und Festigkeitsparameter zugewiesen werden. Der Detaillierungsgrad in dieser Phase ist zwar noch recht gering, jedoch ist es durch solch eine vereinfachte Formulierung einer kompletten Rohbaustuktur möglich viele Varianten in sehr kurzer Zeit zu berechnen. Rother et al. [RPSJ16] stellen das Potential dieser Vorgehensweise anhand einer Busstruktur vor und zeigen den zeitlichen Vorteil einer Balken- im Vergleich zu einer Schalenmodellierung auf. Daraus gehen Verhältnisse für Vernetzungsaufwand (1:10), NVH/statische Analysen (1:100) und Crashanalysen (1:1000) hervor. Zudem eignen sich solche Balkenmodelle „insbesondere für die Festlegung der Rahmentopologie, von Querschnittsformen und Querschnittsabmessungen sowie Wandstärken in der frühen Phase [...] bei rahmenartigen Strukturen [...]“ [RPSJ16]. Zur Erhöhung der Genauigkeit sowie zur Optimierung innerhalb der Detaillierungsphase kann das Balkenmodell anschließend in ein Schalenmodell überführt werden. [RPSJ16]

Wichtiger Bestandteil dieser Phase ist die softwareseitige Unterstützung zur schnellen Geometrieerstellung. Als Beispiel für solche Lösungen seien mit FCM¹⁹ [WWW10] und SFE²⁰ [WWW11] an dieser Stelle zwei mögliche Softwarepakete genannt, die mit Hilfe von

¹⁹ Fast Concept Modeller

²⁰ Eigenname für einen Konzeptmodellierer der Firma SFE-Tec

Schnitte-Bibliotheken und parameterbasierenden Anpassungsmöglichkeiten den Konstrukteur bei der schnellen Konzeptgeometrieerstellung unterstützen. [SeGo08], [Schm10], [RPSJ16]

Mit zunehmendem Anstieg des Detaillierungsgrades ist die einfache Konzeptmodellierung nicht mehr ausreichend. Um die 3-4 Strukturkonzepte (vgl. Abbildung 2-25) genauer ausarbeiten zu können und bspw. fertigungstechnische Randbedingungen wie Flansche, Verprägungen, Verschraubungslöcher usw. zu berücksichtigen, wird eine klassische Konstruktionssoftware, wie bspw. CATIA [WWW12] oder NX [WWW13], benötigt. Die Vorgehensweise der Karosserieauslegung besteht indessen aus mehreren iterativen Schleifen von Konstruktion, Simulation und Optimierung. Im Fokus steht dabei, in Anlehnung an das V-Modell, zuerst eine Entwicklung und Absicherung auf Komponentenebene, bevor die Integration in ein System bzw. das Gesamtfahrzeug mit anschließender Funktionsüberprüfung erfolgt (vgl. V-Modell in Kapitel 2.1.3). Die Summe möglicher Struktur- und Werkstoffkonzepte wird damit sukzessive eingeschränkt, bis die Übergabe an die Serienentwicklung erfolgt und aus den übrig gebliebenen Fahrzeugkonzepten jenes ausgewählt wird, das den Zielvorgaben des Unternehmens am besten entspricht. Dieses gilt es anschließend im Rahmen der Serienentwicklung auf die Serienproduktion abzustimmen und final auszuarbeiten. Die Simulationsphase wird dabei im späteren Verlauf durch Realversuche ersetzt. [EhMe13], [BeNM13]

Der relevante Zeitabschnitt innerhalb des Produktentstehungsprozesses, in dem auch die Materialauswahl der Strukturbauteile stattfindet, erstreckt sich somit, wie in Abbildung 2-26 dargestellt, von Beginn der Konzeptentwicklung bis zum Ende der Serienentwicklung.

Geprägt von einer Vielzahl an Änderungen entlang des Prozesses kann der zur Verfügung stehende Bauraum, welcher als Grundlage für die Strukturbauteileentwicklung gilt, bis zum Abschluss der Disziplinen Design und Package jederzeit variieren und bildet somit gemeinsam mit den Lastanforderungen das variable Anforderungsprofil für die Strukturbauteileentwicklung und damit automatisch auch für die Materialauswahl.

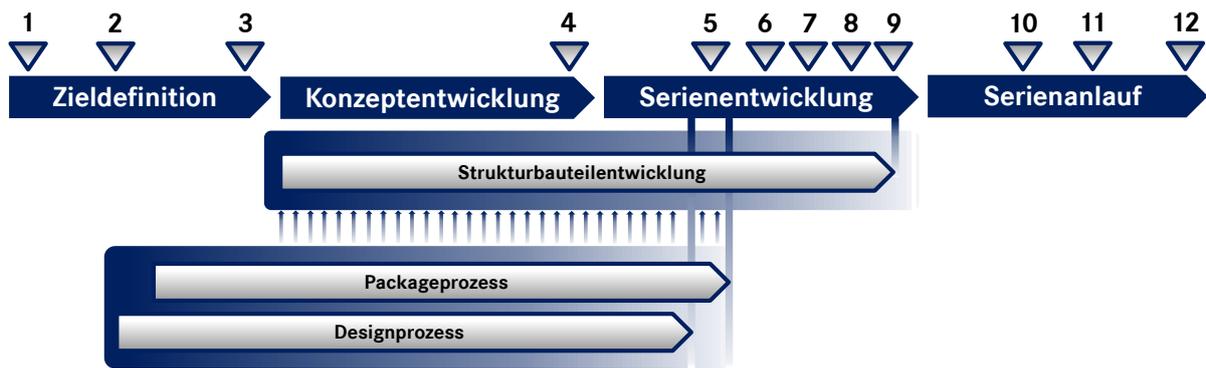


Abbildung 2-26: Einfluss des Design- und Packageentwicklungsprozess auf die Strukturbauteilentwicklung unter Berücksichtigung von Göpfert et al. [GöBS13], VW [Form13], Audi [BBEG13], Toyota [Form13], Mercedes [PfSc14]

Neben der klassischen Bauteilentwicklung lässt sich die allgemeine Vorgehensweise PKEA auch auf die Domänen Design (Kapitel 2.2.2) und Package (Kapitel 2.2.3) übertragen, um eine Unterteilung in mehrere Teilprozesse vorzunehmen und soll daher im Folgenden durchgeführt werden.

2.2.2 Designentwicklungsprozess

Dem Designentwicklungsprozess kommt insbesondere in der frühen Phase der Entwicklung eine besondere Bedeutung zu, da die Freiheitsgrade der Designer zu diesem Zeitpunkt am größten sind. Kreative Ideen und Gedanken werden erst im späteren Prozessverlauf durch weitere Produktrandbedingungen wie die Packagekonformität, die technische Machbarkeit oder die vorgegebenen Zielkosten eingeschränkt. Dabei läuft der Gestaltungsprozess, insbesondere in der frühen Phase, weitestgehend analog ab (Abbildung 2-27) und lässt sich daher nur schwer in den simultanen Produktentstehungsprozess integrieren. Durch diese traditionelle Vorgehensweise ist die interdisziplinäre Zusammenarbeit der verschiedenen Bereiche hinsichtlich des Informationsaustauschs nur in begrenztem Maße möglich.

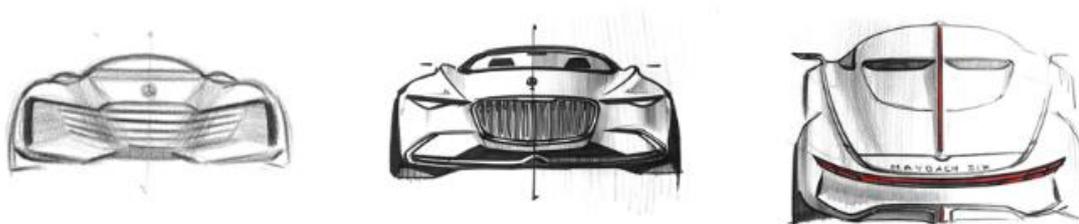


Abbildung 2-27: Design-Skizze des Mercedes Maybach Konzepts [WWW14]

Die Zusammenhänge zwischen Design und Produktentstehung werden in der gegenwärtigen Literatur diskutiert und sollen im Folgenden detailliert betrachtet werden.

Gessner [Gess01] analysiert hierzu im Rahmen seiner Dissertation verschiedene Modelle die den Designentwicklungsprozess strukturieren. Insbesondere der darin aufgezeigte Ansatz nach Mischok et al. [MiAR92] liefert in diesem Zuge eine Beschreibung, welche die praktischen Erfahrungen in der Automobilindustrie am besten widerspiegelt. Die Einordnung dieser Designentwicklungsprozessbeschreibung in den allgemeinen Produktentstehungsprozess führt zu einer integrierten Darstellung (Abbildung 2-28). [MiAR92]

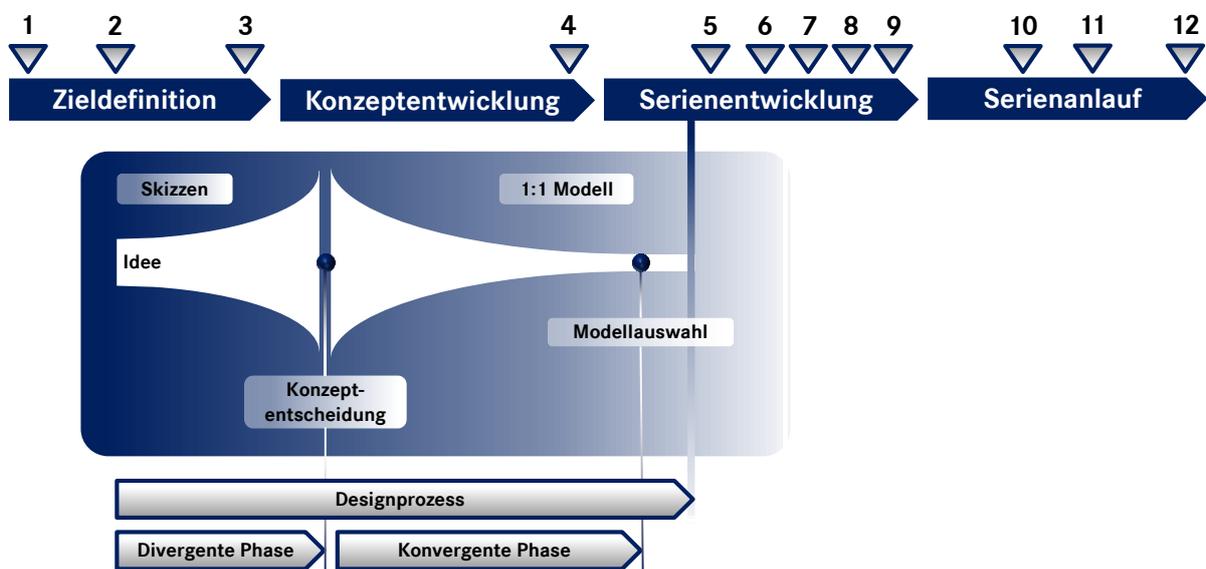


Abbildung 2-28: Die Integration des Designentwicklungsprozesses nach Mischok [MiAR92] in den allgemeinen Produktentstehungsprozess unter Verwendung von Göpfert et al. [GöBS13]

Die Trichter symbolisieren in diesem Fall das jeweilige Maß an Gestaltungsfreiheit entlang der Entwicklungszeit. Der Gesamtprozess lässt sich dabei in zwei Hauptphasen unterteilen. In der divergenten Phase entstehen zu Beginn des Designentwicklungsprozesses auf Basis erster Ideen mehrere Designkonzepte. Aus diesem Konzeptpool wird zum Zeitpunkt der Konzeptentscheidung ein Zieldesign festgelegt, welches im Anschluss in der konvergenten Detaillierungsphase ausgearbeitet und verfeinert wird und mit der Übergabe an die Serienkonstruktion abschließt. [MiAR92]

Die Konzeptentscheidung für ein bestimmtes Automobildesign findet dabei im Rahmen eines Konzeptwettbewerbs statt. Als Basis für diese Designentwürfe legt der Vorstand in Zusammenarbeit mit ausgewählten Gremien die Eingangsgrößen fest. Diese beinhalten bspw.

die Fahrzeugsegmentierung sowie eine erste Grobvorgabe der Packageinhalte und -anordnung. [MaWa09]

Es gilt grundsätzlich aus einer Vielzahl von Entwürfen den Vielversprechendsten auszuwählen. Auf Basis von Skizzen werden Proportionen und Dimensionen so umgesetzt, dass ein stimmiges Gesamtkonzept entsteht. Proportionsmodelle dienen zur Kommunikation mit der Packageentwicklung, um die Hauptabmessungen absichern zu können. Vereinfachte CAD-Modelle, sowohl des Designs als auch des Packages, unterstützen anschließend die parallel dazu verlaufende Strukturbauteilentwicklung. Mit fortschreitender Entwicklungszeit steigt mit dem Detaillierungs- gleichzeitig auch der Reifegrad der Versionsstände stetig an. [AAAB13], [MiAR92], [MaWa09], [Daim12]

Zur besseren Beurteilungsfähigkeit des Gesamterscheinungsbildes sowie der damit verbundenen räumlichen Wirkung werden die Designkonzepte in Tonmodelle, im Maßstab 1:4, übersetzt und bilden damit die Grundlage der Entscheidung. 3D-Scanner ermöglichen ab diesem Zeitpunkt die Digitalisierung des Designs und vereinfachen somit, nach der digitalen Aufbereitung durch die Strakabteilung, den Austausch mit anderen Fachabteilungen. Der Detaillierungsgrad muss für die Erstellung einer abtastfähigen Außenhautvorgabe und zur Steigerung des Reifegrads der Konstruktion entsprechend hoch sein. Es ist von Schwankungen zwischen $\pm 5 \text{ mm}$ zur finalen Außenhaut die Rede. Der anschließende Modellentscheid ist dabei vom vorherigen Konzeptentscheid abzugrenzen und wird zumeist aus einer Kombination verschiedener Modelle abgeleitet. [Krau07], [MiAR92], [Daim12], [Seeg14]

Das gewählte Modell bzw. das Resultat der Modellkombination wird letztendlich immer feiner detailliert, bis am Ende der Konkretisierung ein originalgetreues Designmodell im Maßstab 1:1 als Ergebnis hervor geht, welches sämtliche Details enthält. Ca. 3 Jahre vor SOP²¹ werden die Strak²²-Daten endgültig finalisiert. Bis zur Abnahme der Datenkontrollmodelle und dem damit einhergehenden Abschluss des Designentwicklungsprozesses finden nur noch geringfügige Anpassungen der Außenhaut statt ($\pm 1 \text{ mm}$). Ca. 2 Jahre bevor das erste Fahrzeug das Band verlässt findet der sogenannte Designfreeze statt. Ab diesem Zeitpunkt werden keine

²¹ Start of Production

²² Geometrisches Abbild aller kundensichtbaren Oberflächen

Veränderungen mehr am Design vorgenommen und finale, digitale Daten liegen vor. [AAAB13], [BBEG13],[Gess01], [MiAR92], [Daim12], [Seeg14]

2.2.3 Packageentwicklungsprozess

Der ingenieurmäßig geprägte Prozess der Packageentwicklung lässt sich, in Anlehnung an die allgemeine Konstruktionsmethodik, ebenfalls in vier Phasen gliedern (vgl. „PKEA“ in Kapitel 2.2). Die vorbereitende Planungsphase beinhaltet dabei die grobe Fixierung der Packageinhalte. Mit Hilfe der Vertriebsabteilung gilt es die Kundenanforderungen anhand von Markt- und Trendstudien zu erfassen und daraus die notwendigen Packageinhalte abzuleiten. Auf Basis der Hauptanforderungen ist es somit möglich, in der Phase der Konzeptionierung, die entsprechenden Hauptabmessungen eines Fahrzeugs zu bestimmen. Hierzu werden zu Beginn nur die wichtigsten Komponenten eines Fahrzeuges (z.B.: Antriebsstrang, Achsen, Lenkung, Klimaanlage, Tank, usw.) berücksichtigt, welche jedoch im fortschreitenden Prozess sukzessive um weitere zu ergänzen sind. Insbesondere in der frühen Phase ist der Einsatz sogenannter Platzhaltergeometrien zur ersten, vereinfachten Abbildung der Platzverhältnisse gängige Praxis. Die Bauraum-Dummies werden hierbei typischerweise durch ein Rechteckvolumen, welches den maximalen Bauraum einer Komponente beinhaltet oder durch die CAD-Daten einer verwandten Komponente aus einer vorangegangenen Baureihe repräsentiert. Zusätzlich erfolgt die Berücksichtigung der Insassen anhand sogenannter „Normmenschen“, die den jeweiligen Durchschnitt einer gesellschaftlichen Gruppe, in Form eines 3D-Modells abbilden. Im weiteren Verlauf ist es somit möglich, durch einen kontinuierlichen Abstimmungsprozess der Entwicklungsingenieure aus dem Fachbereich Karosserierohbau sowie den Designteams, anhand eines Grenzpunkteplans die vorläufige Machbarkeit abzusichern. Im Vergleich zum parallel laufenden Designentwicklungsprozess, ist der Detaillierungsgrad des Packages innerhalb der Konzeptphase sehr gering und das Änderungsaufkommen entsprechend hoch. [BiHa10], [MaWa09], [FeGr13], [PBF07]

Zur weiteren Detaillierung des Fahrzeugpackages werden, nach Achleitner [AAAB13], anschließend zusätzliche Anforderungen an Sicht, Crash und Ergonomie dokumentiert sowie die Radhüllkurven festgelegt. Daraufhin muss bis zum Beginn der Serienentwicklung ein vollständiges Maßkonzept ausgearbeitet sein, worauf der Meilenstein „Packagefreeze“ (vgl. Abbildung 2-23, Seite 33) hindeutet. Darauf folgende Änderungen, in der Phase des

Ausarbeitens, finden nur noch in sehr geringem Maße statt, um rückwirkende Anpassungen des Design sowie der Strukturbauteile weitestgehend zu vermeiden und somit den Produktreifegrad fortlaufend zu erhöhen. [AAAB13]

Durch die zentrale Rolle des Packageentwicklungsprozesses innerhalb der Fahrzeugentwicklung weist er Schnittstellen zu nahezu allen Fachbereichen auf. In der frühen Phase stellt die Schnittstelle zwischen Designabteilung und Rohbaukonstruktion eine der wichtigsten, aus einer Fülle verschiedener, dar. Gegen Ende wird diese Rolle der Fertigungs- und Montageplanung zuteil. Das Ergebnis einer finalen Packagefreigabe stellt somit eine stimmige und abgesicherte Bauraumzuordnung sämtlicher Fahrzeugkomponenten, unter Berücksichtigung aller technischen Randbedingungen, dar. [Maie15], [AAAB13], [BBEG13]

Im Rahmen seiner Dissertation konkretisiert Gessner [Gess01] die Anzahl der bereits angesprochenen Packageumfänge über den Entwicklungsverlauf und zeigt damit den Grad der jeweiligen Detaillierung zu verschiedenen Prozesszeitpunkten auf. Nach seiner Interpretation lässt sich der Prozess der Packageentwicklung ebenfalls in vier Phasen gliedern (vgl. Abbildung 2-22, S. 32). Dabei werden für die erste Phase der Packageentwicklung die 15 wichtigsten Komponenten, in Verbindung mit den Hauptabmessungen, berücksichtigt. Hierbei dienen ebenfalls Packagekomponenten von Vorgängermodellen bzw. neu generierte Platzhaltergeometrien dazu verschiedene Anordnungsszenarien darzustellen, um die entsprechende Umsetzbarkeit überprüfen zu können. [Gess01]

Über die Phasen „Konzipieren“ und „Entwerfen“ hinweg steigt sowohl der Detaillierungsgrad als auch die Anzahl an berücksichtigten Baugruppen zunehmend an. Dabei werden Baugruppen immer weiter ausdetailliert und Platzhaltergeometrien nach und nach durch aktuelle Entwicklungsstände einzelner Komponenten ersetzt. [Gess01]

Analog zur Designentwicklung werden in der letzten Phase nur noch minimale Anpassungen vorgenommen. Alle Baugruppen und Aggregate werden durch ihre tatsächlichen Geometrien repräsentiert. Der Umfang des gesamten Fahrzeugpackages besteht somit final aus ca. 1800 Bauteilen und schließt mit dem Meilenstein „Packagefreeze“ ab. [Gess01]

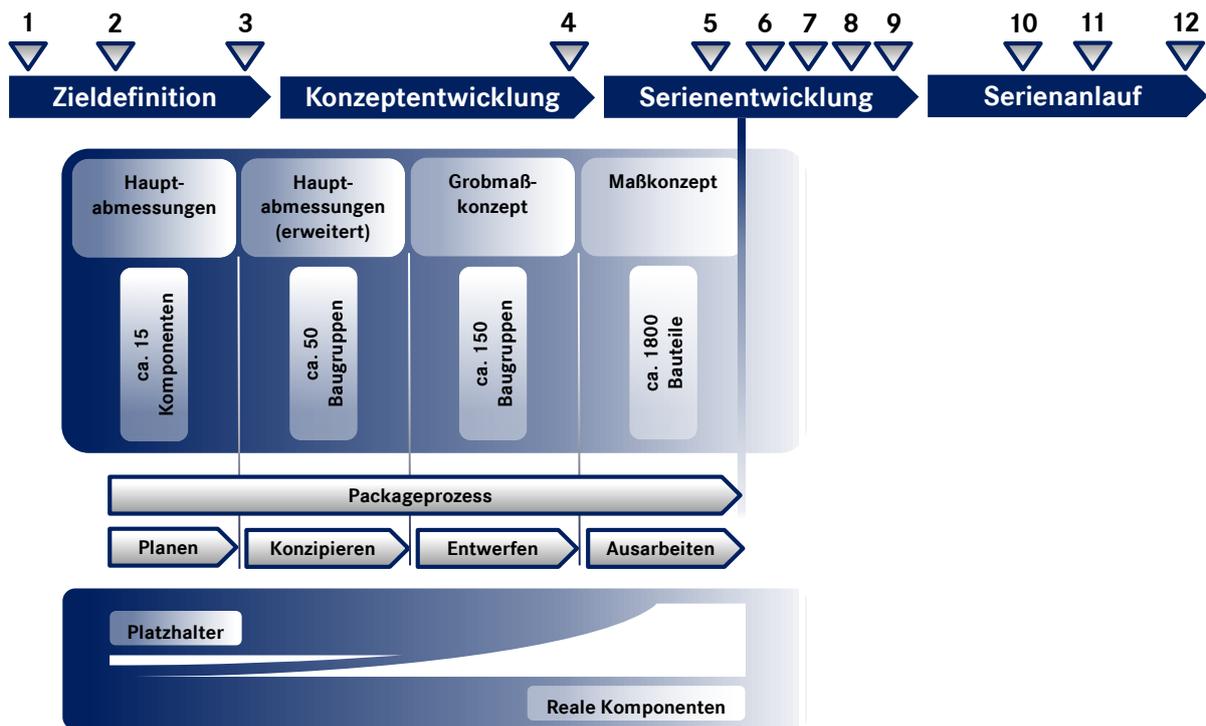


Abbildung 2-29: Die Integration des Packageentwicklungsprozesses nach Gessner [Gess01] in den Produktentstehungsprozess unter Verwendung von Göpfert et al. [GöBS13]

Abbildung 2-29 bietet hierzu einen umfassenden Überblick bezüglich der Einordnung des Packageentwicklungsprozesses in den automobilen Produktentstehungsprozess.

2.3 Materialauswahl

Die Fachliteratur bietet bereits eine Vielzahl verschiedener Vorgehensweisen zur systematischen Bestimmung des geeignetsten Werkstoffs an. Die Vorlage aller Vorgehensmodelle basiert dabei für gewöhnlich auf dem allgemeinen Problemlösungszyklus (Abbildung 2-30) nach Haberfellner [HaNB02].

Eingeleitet wird dieser durch eine Situationsanalyse, um das Spektrum des Produktanforderungsprofils überblicken zu können. Je nach Zielsetzung lassen sich entsprechende Teillösungen entwickeln und synthetisieren. Die anschließende Bewertung mehrerer Gesamtkonzepte bietet die Grundlage für eine transparente Entscheidungsfindung. [Reut14]

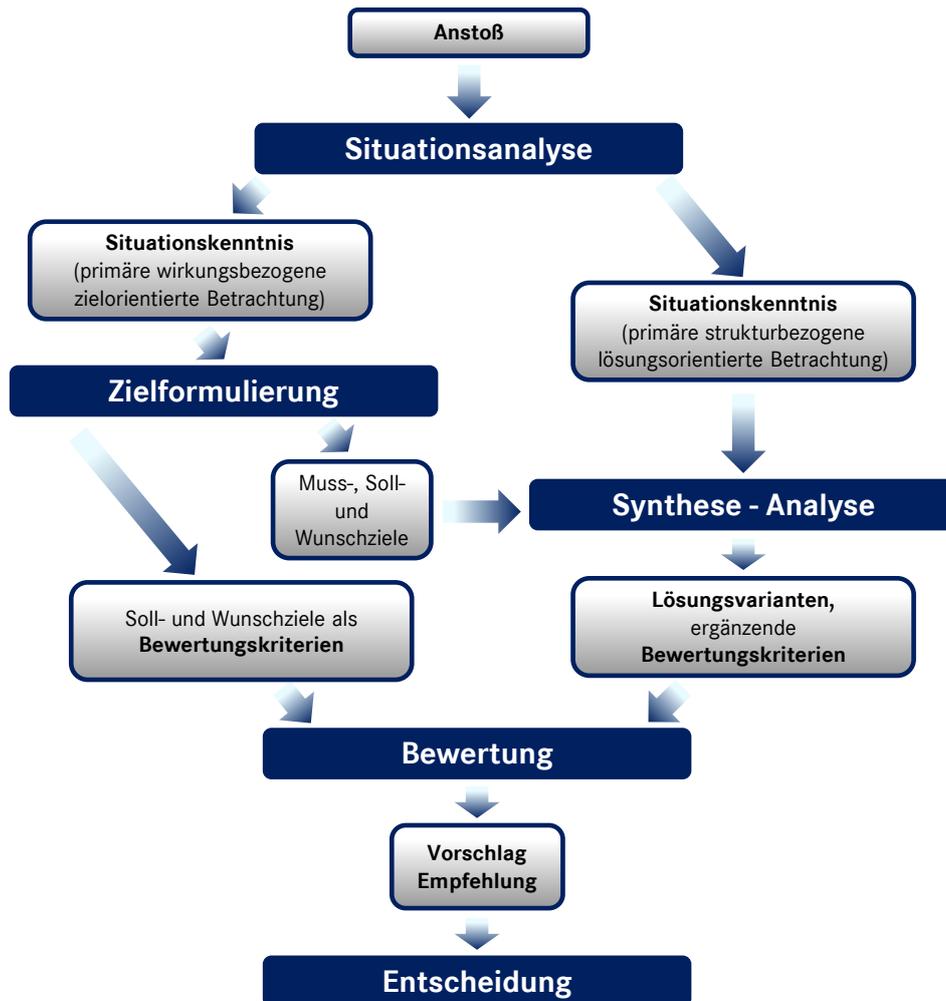


Abbildung 2-30: Der allgemeine Problemlösungszyklus nach Haberfellner et. al. [HaNB02] in Anlehnung an Reuter [Reut14]

Ziel dieses Kapitels ist es einen allgemeinen Überblick über die vorherrschenden Prozesse und Methoden zur systematischen Materialauswahl innerhalb der Produktentwicklung zu schaffen und deren Übertragbarkeit auf die Komponenten der Fahrzeugstruktur zu analysieren.

2.3.1 Grundlagen der Materialauswahl

Die Frage nach dem richtigen Material stellt sich bereits in der frühen Phasen des Produktentstehungsprozesses. Je nach vorherrschender Ausgangssituation muss die Herangehensweise zur Werkstoffauswahl entsprechend angepasst werden. Nach Reuter [Reut07], [Reut14] können dabei vier grundlegende Situationen auftreten:

1. Werkstoffneueinführung

Der Einsatz eines völlig neuen Werkstoffes kann einerseits zu großen Innovationen führen, bringt jedoch andererseits auch große Risiken und einen zusätzlichen Mehraufwand bezüglich der Absicherung des Materials mit sich. In aller Regel sind neue Werkstoffe bei Neukonstruktionen erforderlich.

2. Werkstoffsubstitution

Soll ein bereits verwendeter Werkstoff durch einen für den Konstrukteur, das Unternehmen oder innerhalb eines neuen Anwendungsfalls bis dahin unbekanntes Material ersetzt werden, ist damit immer ein gewisses Ausfallrisiko verbunden, das sich zu diesem Zeitpunkt nicht quantifizieren lässt. Dieser Fall der Werkstoffsubstitution tritt häufig im Kontext einer Anpassungskonstruktion auf.

3. Werkstoffalternative

Liegen bereits weitläufige Informationen bzgl. der Eigenschaften und Handhabung des gewählten Werkstoffs vor, so ist das Ausfallrisiko in diesem Falle sehr gering und daher auch die bevorzugte Vorgehensweise in der industriellen Praxis.

4. Werkstoffvorgabe

Bezüglich des Vorgänger- oder Wettbewerbsproduktes findet keine Werkstoffveränderung statt. Diese Situation tritt bspw. auf, wenn keine Werkstoffe am Markt verfügbar sind, die das Eigenschaftsprofil des bestehenden Materials übertreffen oder bereits bezahlte Anlagen für das Folgeprodukt aus wirtschaftlichen Gründen weiterhin genutzt werden sollen.

Je nach Situation und Risiko gilt es daher den Prozess der Materialauswahl auf die vorliegenden Rahmenbedingungen anzupassen, um hohe Zeit- und Kostenaufwendungen zu vermeiden. Dabei spielen verschiedene Faktoren wie u. a. Konstruktionsart, Bekanntheit des Materials, Komplexität des Bauteils, Projekt- und Losgröße eine entscheidende Rolle [Reut07]. Zur Einordnung des Bekanntheits- und Riskogrades eines Werkstoffs sei an dieser Stelle auf Ehrlenspiel und Kiewert [EhKi90] verwiesen. Des Weiteren ist eine angemessene

Schwerpunktbildung anzustreben, um den zielgerichteten Einsatz der Methodik auf die Hauptfunktionen, -kosten und -merkmale zu gewährleisten [Reut07].

2.3.2 Einfluss der Materialauswahl auf die Produktkosten

Die Produktkosten werden maßgeblich von der Wahl des Konstruktionswerkstoffes bestimmt. Die reinen Materialkosten sind dabei nicht als einziger Faktor zu betrachten. „Zur wirtschaftlichen Beurteilung eines Materials werden alle Kosten analysiert, die im Laufe eines Produktlebens durch den Werkstoff verursacht werden (Lebenslaufkosten, -zykluskosten oder Life Cycle Cost)“ [Reut07]. Aufgrund der auftretenden Komplexität werden im praktischen Umfeld, insbesondere bei der Kalkulation der Lebenszykluskosten, lediglich die Herstellkosten berücksichtigt [Reut07]. Diese lassen sich durch einfache Addition der Fertigungs- und Materialkosten ermitteln. Da die Materialkosten mit ca. 70% [VDI2225b] einen sehr hohen Anteil der Herstellkosten von Personenkraftwagen einnehmen, werden selbige häufig alleine für eine schnelle Kostenbeurteilung herangezogen (Abbildung 2-31). Diese Dominanz lässt sich unter anderem auf die Höhe der Stückzahlen zurückführen [EsAs03].

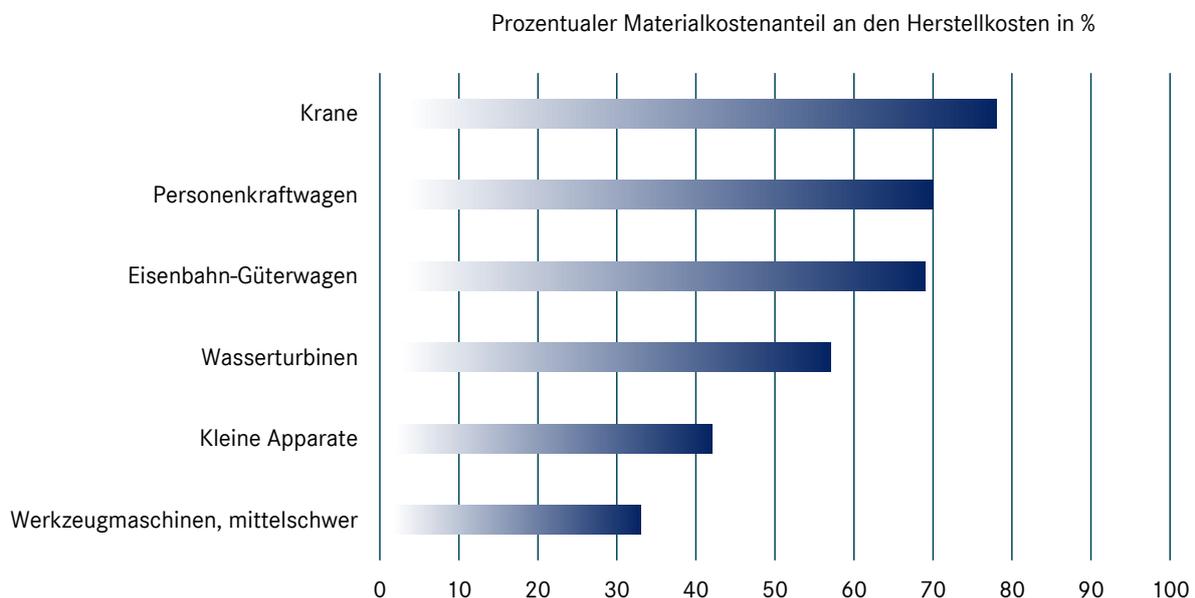


Abbildung 2-31: Prozentuale Materialkostenanteile im Verhältnis zu den Herstellkosten für einige ausgewählte Branchen nach VDI 2225b [VDI2225b]

Die VDI 2225a [VDI2225a] bietet hierzu eine vereinfachte Methode zur Vorkalkulation der sogenannten Relativkosten an. Diese Betrachtungsweise sieht jedoch keine Berücksichtigung später auftretender Kosten, wie bspw. jenen für das Recycling, vor.

Zudem basiert das in Abbildung 2-31 ermittelte Verhältnis von Material- zu Herstellkosten auf vergangenen Fahrzeugkonzepten. Ob selbiges bspw. unter dem Einsatz der Multi-Material-Bauweise, bei abweichenden Einsatzwerkstoffen und Fertigungsverfahren, immer noch Bestand hat, ist derweil noch nicht geklärt.

Es gilt daher situationsbedingt zu entscheiden, ob solch eine vereinfachte Kostenkalkulation eine hinreichende Genauigkeit für das zu konstruierende Produkt aufweist. Auf die Rolle der Kosten und deren Einfluss auf die Werkstoffauswahl wird sowohl in Kapitel 2.3.4.2 als auch in Kapitel 2.3.7.1 noch einmal separat eingegangen.

2.3.3 Prozesse zur systematischen Materialauswahl

Angetrieben von der Idee die Werkstoffauswahl möglichst zielgerichtet und mit wiederholbarer Qualität durchführen zu können, entwickelten sich im Laufe der Jahre unterschiedlichste Prozessbeschreibungen zur Materialauswahl.

Ein erster, grober Ablaufplan hierzu wird bspw. von Ehrlenspiel und Kiewert [EhKi90] vorgeschlagen. Dieser orientiert sich grundsätzlich an dem zuvor erläuterten Problemlösungszyklus nach Haberfellner [HaNB02] (vgl. Kapitel 2.3.1) und ist entsprechend der Suche nach geeigneten Werkstoffen angepasst. Zudem fügt sich der Prozess der Werkstoffwahl in den methodischen Konstruktionsprozess ein (Abbildung 2-32).

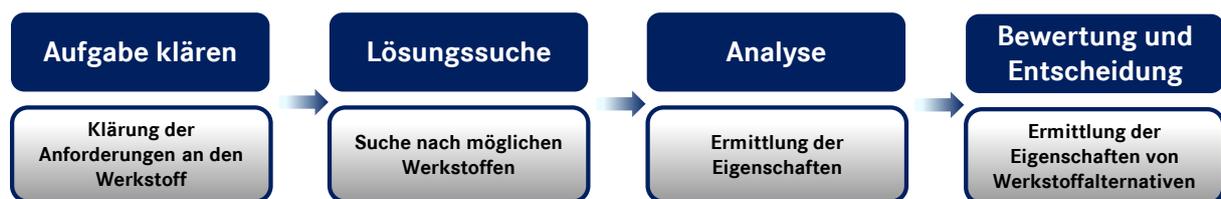


Abbildung 2-32: Materialauswahlprozess nach Ehrlenspiel und Kiewert [EhKi90] in Anlehnung an Reuter [Reut14]

Der Ablauf weist dabei viele übereinstimmende Punkte zu dem Rahmenplan nach Grosch [Gros86] auf. Der Fokus seiner Vorgehensweise liegt jedoch, nach Deutung seines Ablaufplans (Abbildung 2-33), auf der Erstellung eines Materialanforderungsprofils sowie dessen Abgleich mit den verfügbaren Werkstoffen. Die Art der Werkstoffauswahl entscheidet anschließend über das weitere Vorgehen hinsichtlich des Detaillierungsgrades. [Groß00]



Abbildung 2-33: Materialauswahlprozess nach Grosch [Gros86] in Anlehnung an Große [Groß00]

Der detaillierte Ablaufplan nach Illgner [Illg78] ist in Abbildung 2-34 ersichtlich. Auf dessen Basis lassen sich die einzelnen Entscheidungsschritte entlang des Auswahlprozesses nachvollziehen und stehen im Vordergrund seiner Beschreibung. In diese methodische Vorgehensweise fließen dabei zusätzliche Kenntnisse wie bspw. über die Herstellung oder die Formgebung mit ein.

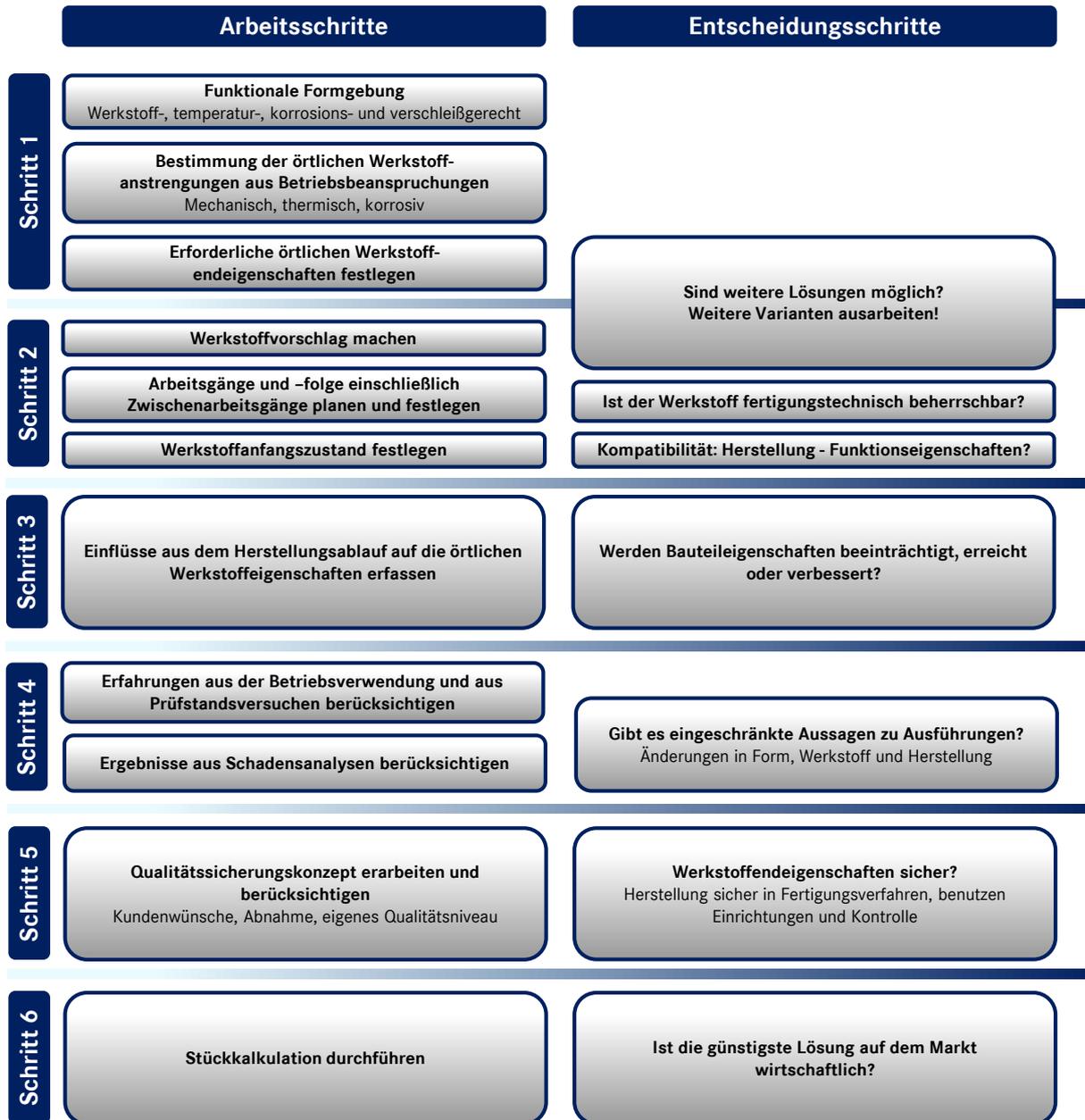


Abbildung 2-34: Materialauswahlprozess nach Illgner [Illg78] in Anlehnung an Reuter [Reut14]

Da die bisher aufgezeigten, eher konzeptionellen Ansätze aus der Literatur sich lediglich bezüglich ihrer Schwerpunktsetzung der einzelnen Prozessschritte unterscheiden, ist eine allgemeine Einteilung durchaus möglich und sinnvoll. [Reut07], [Mars72]

Reuter [Reut07] greift diesen Aspekt auf und ordnet alle werkstoffrelevanten Entscheidungsfelder nach Fischer [Fisc95] in den allgemeinen Konstruktionsprozess nach der VDI-Richtlinie 2221 [VDI2221] ein, um diese in Bezug zueinander zu bringen. Die vierphasige Unterteilung des Konstruktionsprozesses (vgl. Kapitel 2.2) ermöglicht in diesem Zuge die

Zuordnung dieser Entscheidungsfelder in die jeweils zugehörige Phase des Konstruktionsprozesses (Abbildung 2-35). [Reut07]

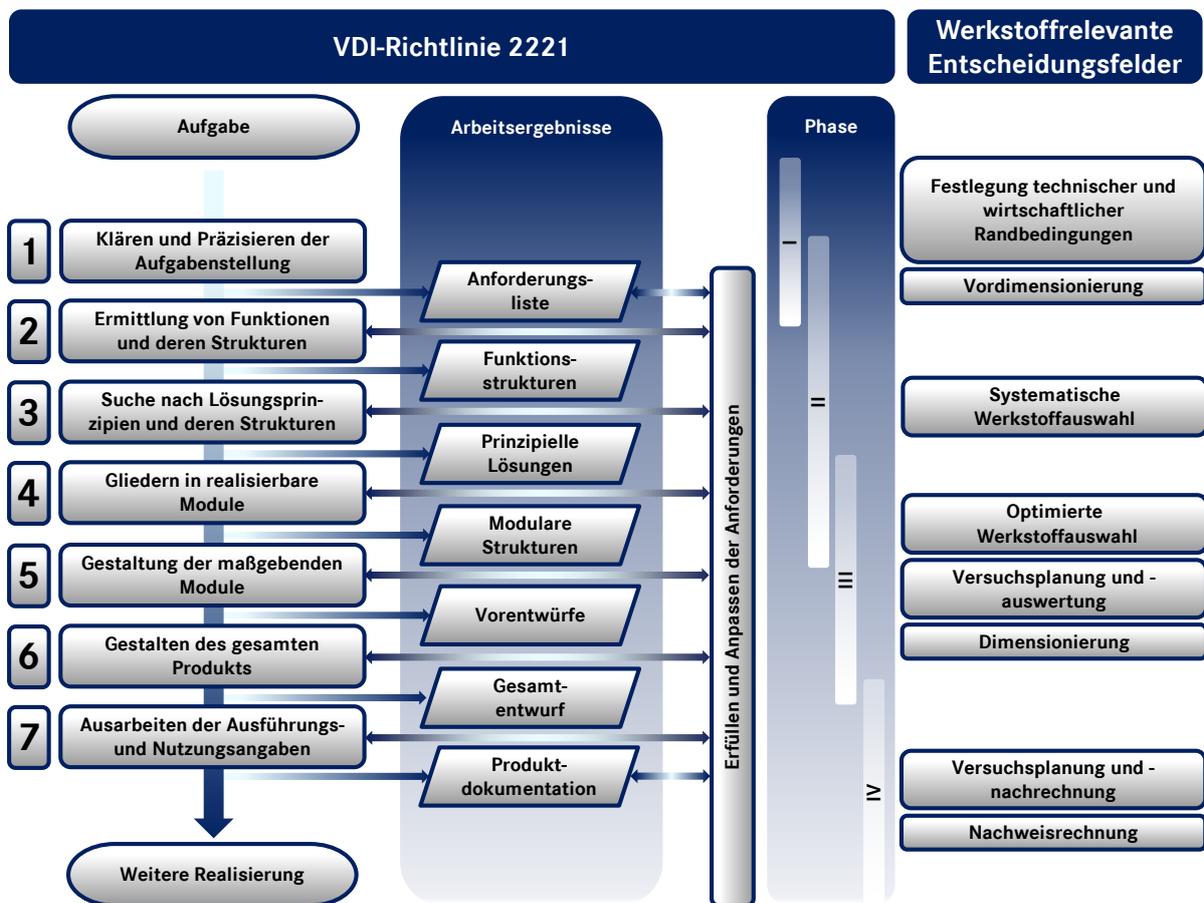


Abbildung 2-35: Einordnung der werkstoffrelevanten Entscheidungsfelder nach Fischer [Fisc95] in den allgemeinen Konstruktionsprozess nach VDI 2221 [VDI2221] in Anlehnung an Reuter [Reut07]

Die erste Phase umfasst dabei die Planung des Produkts durch das Klären der Aufgabenstellung und Sammeln der Anforderungen. Das daraus resultierende Anforderungsprofil bildet die Grundlage für die daran anschließende Konzeptphase (Phase II), die hinsichtlich der Werkstoffauswahl eine erste Vorselektion möglicher Lösungen vorsieht. Die Entwurfsphase (Phase III) beinhaltet darauf basierend die Verfeinerung und Bewertung prinzipieller Lösungen vom Grobentwurf bis hin zum Feinentwurf, bevor in Phase IV die technische Ausarbeitung in Verbindung mit der vollständigen Produktdokumentation durchgeführt wird. [Reut07], [Mars72]

Die vier Phasen des Materialauswahlprozesses stellen somit eine Erweiterung des ursprünglichen Konstruktionsablaufes dar und ersetzen damit die rein erfahrungsbasierte Entscheidung des Konstrukteurs, durch eine sauber dokumentierte und daher zu jeder Zeit

nachvollziehbare, methodische Auswahl. Reuter [Reut07] beschreibt die jeweiligen Phasen der Werkstoffauswahl in Anlehnung an Ashby [Ashb11] dabei ganz allgemein wie folgt:

- I. Ermittlung des Materialanforderungsprofils
(translate design requirements)
- II. Grobauswahl und Ausschlussverfahren
(screen using constraints)
- III. Feinauswahl und Ranking
(rank using objective)
- IV. Detaillierung, Validierung und endgültige Materialauswahl
(seek supporting information for decision making)

Die Wahl eines Werkstoffs ist dabei zumeist eine Problemstellung mit beliebig vielen Einflussgrößen aus verschiedensten Themenfeldern. Im täglichen Betrieb ist sicherlich die Auswahl anhand der Faktoren Kosten und Gewicht bei gleichzeitiger Erfüllung einer vorgegebenen Funktion am verbreitetsten. Jedoch dürfen auch bspw. ökologische Aspekte, bei einer ganzheitlichen Betrachtung der Werkstoffauswahl, nicht vernachlässigt werden. Hierzu gibt es Bestreben bspw. den notwendigen Energiebedarf einer Komponente in Abhängigkeit des gewählten Werkstoffs, über die komplette Lebensdauer des Produkts, zu simulieren und diese Ergebnisse in die Werkstoffentscheidung miteinzubeziehen. [Ashb11]

2.3.4 Methoden zur systematischen Materialauswahl

Während im vorangegangenen Kapitel der Fokus auf der Gliederung des Materialauswahlprozesses sowie dessen Einordnung in den allgemeinen Konstruktionsprozess lag, sollen im Rahmen der methodischen Materialauswahl die planmäßigen Vorgehensmodelle der einzelnen Prozessphasen detailliert betrachtet werden. Im Sinne der Übersichtlichkeit sind daher in Abbildung 2-36 die Aufgaben der einzelnen Phasen zusammenfassend dargestellt.



Abbildung 2-36: Gliederung des Materialauswahlprozesses in die vier Hauptphasen nach Reuter [Reut07] und Ashby [Ashb11]

2.3.4.1 Phase I: Ermittlung der Werkstoffanforderungen

Die erste Herausforderung die eine systematische Werkstoffauswahl mit sich bringt, ist die Klärung des Materialanforderungsprofils. Hierzu müssen die Produkthanforderungen zuerst in Bauteilanforderungen und diese wiederum in Materialanforderungen übersetzt werden. Diese Aufgabe ist nicht trivial. Das Spektrum möglicher Anforderungen ist äußerst breit (vgl. [BuBu05]). Je nach Problemstellung können u.a. mechanische, thermische, chemische, physikalische und ästhetische Eigenschaften von Bauteil und Werkstoff relevant sein. Die Identifizierung und Klassifizierung dieser Anforderungen bildet die Basis für die anschließende Materialauswahl und ist daher von großer Bedeutung. Insbesondere für Strukturbauteile sind somit Werkstoffe von Interesse die, je nach Aufgabenschwerpunkt der einzelnen Komponenten, einen hohen Widerstand gegen Vorformung (Steifigkeit) oder Versagen (Festigkeit) aufweisen [BiHS13]. Aus diesem Grund ist die Bezeichnung jener Materialien als „Strukturwerkstoffe“ in Fachkreisen durchaus üblich [Hari99].

Ashby [Ashb11] legt den Fokus auf die Kategorisierung der Bauteilanforderungen in Funktion, Randbedingungen, Ziel und freie Variablen. Auf dieser Basis werden im weiteren Auswahlprozess (siehe Phase II in Kapitel 2.3.4.2) Materialindizes entwickelt. Das Schema kann eine Hilfe zur Einordnung von Anforderungen sein und ist Grundlage zur Erstellung eigener Materialindizes.

Farag [Fara14] schlägt die Nutzung eines House of Quality (HoQ) zur Übersetzung von Kundenwünschen in Funktionsanforderungen vor. Das HoQ eignet sich um die Korrelation von

gewünschten Eigenschaften zu Produktmerkmalen systematisch zu erfassen und die Relevanz der Merkmale zu gewichten. Die Werkstoffanforderungen gehen aus dieser Betrachtung jedoch nicht explizit hervor. Zudem ist die Funktionskette von Produkt zu Bauteil und letztendlich zum Material mitunter schwer nachzuvollziehen. [Fara14]

Reuter [Reut07] behandelt das Anforderungsmanagement, im Hinblick auf die Materialauswahl, am ausführlichsten. Im Folgenden werden jedoch nur die wichtigsten Methoden und Kategorisierungen aufgeführt. Für einen umfassenden Einblick in die Thematik dieses Gebiets sei an dieser Stelle auf sein Fachbuch „Methodik der Werkstoffauswahl“ [Reut07] verwiesen. Er übernimmt Ashby's [Ashb11] Kategorisierung von Anforderungen in Funktion, Randbedingungen, Ziele und freie Variablen, führt alternativ jedoch auch die Aufteilung in Ziel, Forderung und Wunsch ein. Wünsche sollen bei der Konzeptauswahl noch keine Einschränkung darstellen, können aber bei der Beurteilung entscheidend sein. Beide Arten der Einordnung können demnach ohne großen Aufwand ineinander überführt werden. Zur Übersetzung der Produkthanforderungen in Bauteil- und Materialanforderungen empfiehlt er zudem das Aufstellen von Funktionsdiagrammen (vgl. Kapitel 2.1.6). Das Funktionsdiagramm visualisiert wie sich die Funktionen eines Systems auf seine einzelnen Komponenten verteilen. Die Abhängigkeiten zwischen einzelnen Baugruppen werden dadurch nachvollziehbar. Prinzipiell werden in einem Funktionsdiagramm der Material-, Energie- und Informationsfluss betrachtet [PBFG07]. Als weiteres Werkzeug des Anforderungsmanagements führt Reuter außerdem Checklisten bzw. Fragenkataloge auf [Reut07]. Eine solche Liste kann dabei helfen, sich die grundlegenden Belastungsarten, denen das Bauteil ausgesetzt ist, vor Augen zu führen. Positiv hervorzuheben ist die einfache Anwendung dieser Methode. Die Bewertung und Einordnung der gefundenen Anforderungen sowie die daraus zu ziehenden Schlussfolgerungen bleiben jedoch offen. Zudem können Anforderungen, die nicht durch den zwangsläufig beschränkten Fragenkatalog abgedeckt werden, zu einer falschen Auswahl führen. Des Weiteren erachtet er es als sinnvoll möglichst alle Eigenschaften bzw. Anforderungen in irgendeiner Weise zu quantifizieren, um die Vergleichbarkeit verschiedener Materialien zu ermöglichen. Bei Materialanforderungen wie bspw. dem E-Modul, die sich durch einen Zahlenwert messen lassen, ist dieser Vergleich einfach. Durch die Angabe einer Ober- und Untergrenze ergibt sich somit direkt ein entsprechender Suchraum innerhalb des verfügbaren Werkstoffpools. Schwieriger gestaltet sich die Situation, wenn Eigenschaftswerte qualitativer oder attributiver Natur sind. So ist die

Gießbarkeit eines Werkstoffes bspw. nur qualitativ bzw. anhand einer Werteskala darstellbar. Dennoch können diese Eigenschaften ebenfalls als Ausschlusskriterien zur Eingrenzung der Materialauswahl dienen. [Reut07]

Dieter und Schmidt [DiSc09] führen eine Tabelle ein, an der sich relevante Materialkennwerte anhand der mechanischen und thermischen Belastungen ablesen lassen. Ähnlich wie beim Fragenkatalog nach [Reut07] ist diese Methode eher bei der Strukturierung und weniger bei der Identifizierung der Anforderungen hilfreich. Zudem besteht weiterhin ein Problem bei Anforderungen außerhalb der aufgelisteten Fälle. Ein wesentlicher Vorteil ist allerdings der explizite Verweis auf Kenngrößen, die bei der Auswahl beachtet werden müssen. [DiSc09]

2.3.4.2 Phase II und III: Grob- und Feinauswahl

Die Phasen II und III beschreiben die Vor- und Feinauswahl der Werkstoffe, nachdem die Anforderungen im ersten Schritt (Phase I) geklärt werden konnten. Ziel ist es, den Suchraum aller möglichen Materialien auf eine Liste der aussichtsreichsten Kandidaten einzugrenzen. Auf diesem Bereich der Werkstoffauswahl (Phase II und III) liegt der Fokus der existierenden Literatur. Ashby et al. [AsBC02] unterscheiden dabei drei grundlegende Strategien, mit denen aus einem bestehenden Anforderungsprofil eine oder mehrere Lösungen generiert und anschließend zur Entscheidung gestellt werden können (Abbildung 2-37).

Strategie 1 beschreibt dabei die freie Suche. Das Ziel besteht darin, anhand analytischer Betrachtungen, die bestmögliche Lösung aus der Gesamtheit aller verfügbaren Werkstoffe zu finden. Diese Strategie erlaubt innovative Werkstofflösungen, benötigt jedoch ein detailliertes Anforderungsprofil. Dieser Ansatz bildet den Schwerpunkt der Literatur zur systematischen Werkstoffauswahl. In Strategie 2 führt ein von Experten aufgestellter Fragebogen den Nutzer durch die Auswahl. Dadurch können auch unerfahrene Anwender eine Werkstoffselektion durchführen. Jedoch lassen sich durch dieses Vorgehen keine grundlegend neuen Lösungen erreichen. Bei Strategie 3 beruht die Auswahl auf bisher gesammelten Erfahrungen und Fallstudien. [AsBC02]

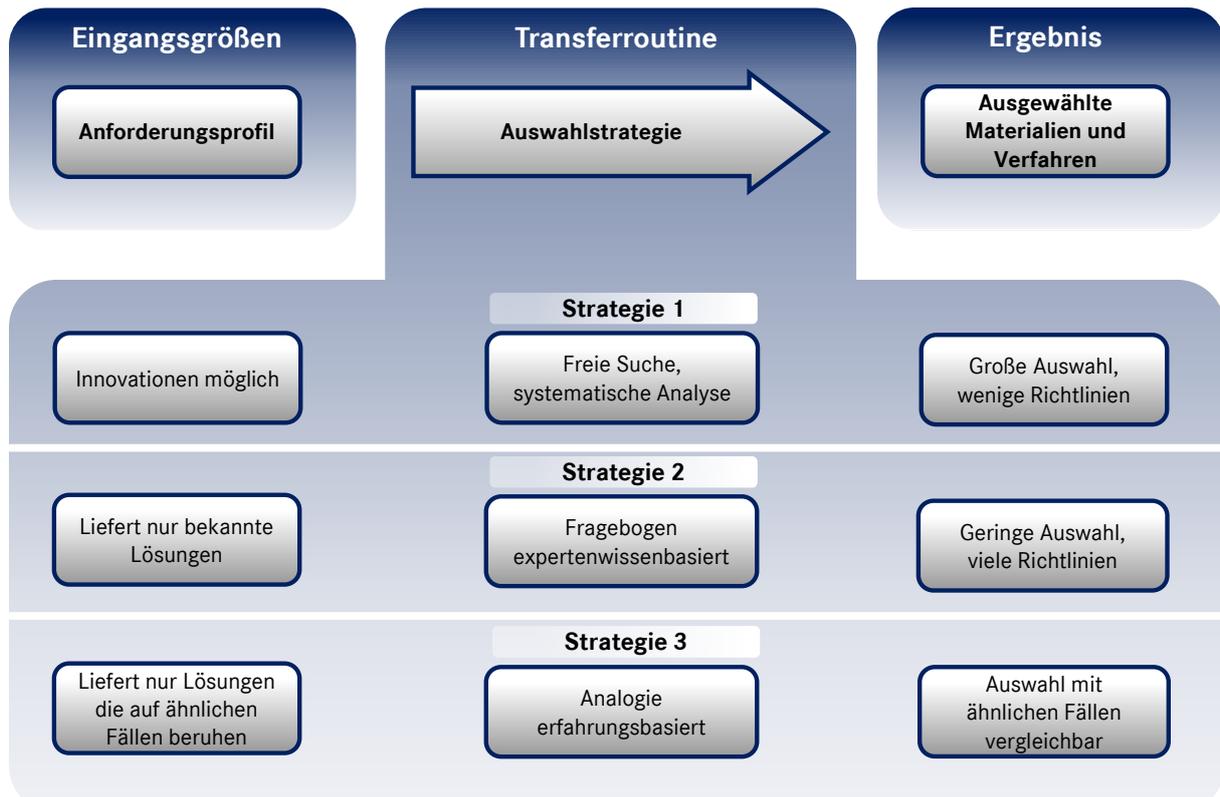


Abbildung 2-37: Die drei grundlegenden Materialauswahlstrategien in Anlehnung an Ashby et. al. [AsBC02]

Um keine Werkstoffinnovationen von vorneherein auszuschließen, sollte es das Ziel einer systematischen Werkstoffauswahl sein, den Suchraum aller möglichen Materialien sukzessive einzugrenzen, um somit eine Liste der vielversprechendsten Kandidaten zu erhalten (Strategie 1). Um diesem Anspruch gerecht zu werden, unterteilt Ashby [Ashb11] den Hauptteil der Werkstoffauswahl in die beiden Arbeitsschritte „Screening“ (Phase II) und „Ranking“ (Phase III). Dabei werden im ersten Schritt „Screening“ (Phase II) jene Werkstoffe eliminiert, die anhand von „harten“ Kriterien (vgl. Forderungen bzw. no go's in Kapitel 2.3.4.1) hinsichtlich der Funktionserfüllung ungeeignet sind. Eine dieser Forderungen kann dabei bspw. die Einsetzbarkeit bei einer vorgegebenen Mindesttemperatur sein. Alle Werkstoffe die diese Vorauswahl überstehen sind somit grundsätzlich verwendbar. Im darauffolgenden Schritt „Ranking“ (Phase III) wird anschließend die Leistung der verbleibenden Materialien bewertet. So findet eine Identifizierung der am besten geeignetsten Kandidaten statt. Die Leistungskriterien müssen je nach Zielsetzung gewählt werden. Eine typische Zielvorgabe im Rahmen des Leichtbaus ist bspw. die Suche nach dem kleinstmöglichen Bauteilgewicht, bei gleichzeitiger Erfüllung einer vorgegebenen Mindeststeifigkeit. [Ashb11], [Reut07]

Um diese Problemstellung zu lösen, bietet die Literatur zwei grundlegende methodische Vorgehensweisen an, die im Folgenden näher betrachtet werden sollen.

Ashby [Ashb11] reduziert einen großen Suchraum auf eine überschaubare Anzahl von Werkstoffe auf Basis der relevanten Materialkennwerte und stellt sie grafisch anhand von Materialschaubildern dar (Abbildung 2-38).

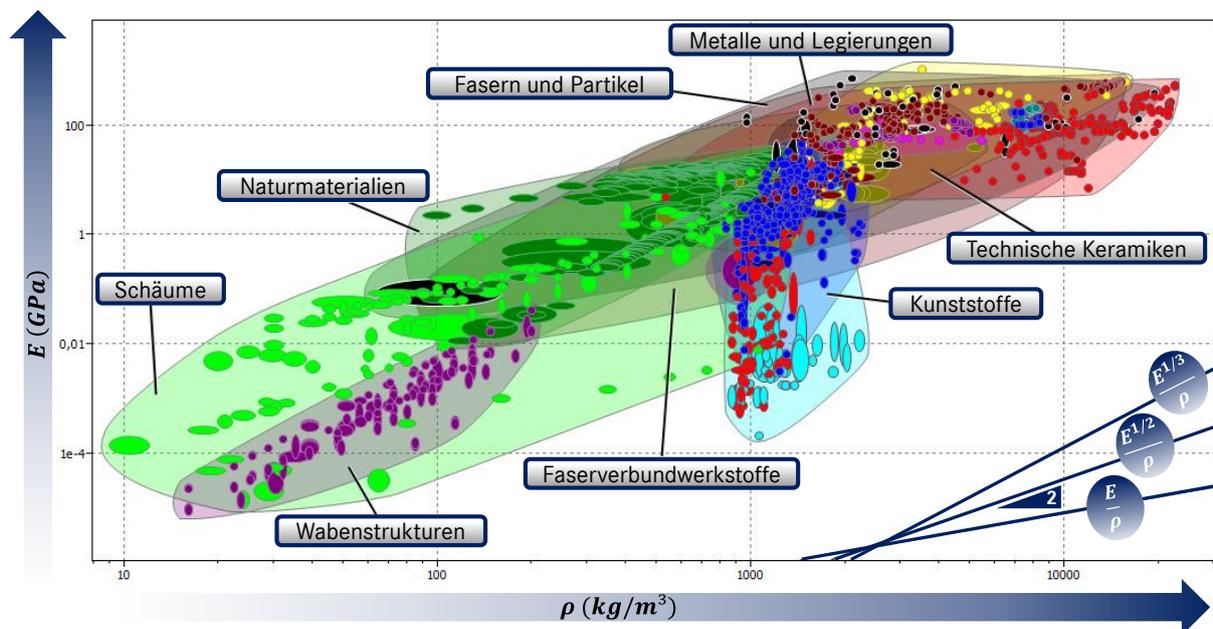


Abbildung 2-38: Doppelt-logarithmisches E - ρ -Diagramm in Anlehnung an Ashby [Ashb11]

Hierfür lassen sich, je nach geometrischer Ausprägung des Bauteilquerschnitts sowie der Art der Belastung, entsprechende Performanceindizes ermitteln. Um die Bedeutung dieser Kennzahlen im Detail verstehen zu können, soll im Folgenden der Index für einen auf Zug beanspruchten, rechteckigen Stab hergeleitet werden. Das Ziel ist dabei die Minimierung der Masse m , die sich aus dem Produkt der Querschnittsfläche A , der Länge L sowie der Werkstoffdichte ρ mit

$$m = A * L * \rho \quad (2-2)$$

beschreiben lässt. Bei vorgegebener Mindeststeifigkeit (S_z)

$$S_z \leq \frac{E * A}{L} \quad (2-3)$$

sollen die geeignetsten Werkstoffe, bei freier Wahl der Querschnittsfläche (freie Variable = A), gefunden werden. Das Umstellen der Massengleichung (2-2) nach der freien Variablen A und einsetzen der selbigen in die Steifigkeitsgleichung (2-3) führt zu

$$m \geq S_z * L^2 * \frac{\rho}{E} \quad (2-4)$$

und beschreibt dabei mit dem Faktor $\frac{\rho}{E}$ das Auswahlkriterium, mit dem die geeignetsten Werkstoffe gefunden werden können. Aufgrund der besseren Darstellbarkeit wird in der praktischen Anwendung die Dichte zumeist jedoch auf der Abszisse und der Werkstoffkennwert (WK) (hier: E-Modul) auf der Ordinate aufgetragen, was den Kehrwert des berechneten Performanceindex, also $\frac{E}{\rho}$, im dazugehörigen Diagramm bedeutet (vgl. Abbildung 2-38, S. 56). Demnach lassen sich die leichtesten und steifsten Lösungen durch die Parallelverschiebung der Auswahllinie in Richtung des linken, oberen Bildrandes identifizieren. Durch analoge Vorgehensweise ist es bspw. für weitere Funktionen und Querschnitte möglich entsprechende Indizes zu entwickeln (Abbildung 2-39).

| Belastungsart | Feste Variable | Freie Variable | Werkstoffindizes | |
|------------------|----------------|----------------|------------------------|-------------------------------|
| | | | Steifigkeit | Festigkeit |
| Stab (Zug) | Last Länge | Fläche | $\frac{E}{\rho}$ | $\frac{R_{p0,2}}{\rho}$ |
| Balken (Biegung) | Last Länge | Fläche | $\frac{E^{1/2}}{\rho}$ | $\frac{R_{p0,2}^{2/3}}{\rho}$ |
| Welle (Torsion) | Last Länge | Fläche | $\frac{G^{1/2}}{\rho}$ | $\frac{R_{p0,2}^{2/3}}{\rho}$ |
| Säule (Druck) | Last Länge | Fläche | $\frac{E^{1/2}}{\rho}$ | $\frac{R_{p0,2}}{\rho}$ |

Abbildung 2-39: Werkstoffindizes zur Minimierung der Masse je nach Belastungsart in Anlehnung an Skolaut [Skol14]

Die Softwareunterstützung in Form des CES²³ der Firma GRANTA sowie die direkte Kopplung jener Materialindizes an die Werkstoffeigenschaften, macht die Materialauswahl für den Benutzer sehr intuitiv und einfach. So lassen sich für eine Werkstoffauswahl mit zwei Optimierungsparametern, wie bspw. Kosten- und Gewichtsreduktion, der entsprechende

²³ Cambridge Engineering Selector

Performanceindex $\left(\frac{E}{\rho}, \frac{E^{1/2}}{\rho}, \frac{E^{1/3}}{\rho}\right)$ auf der Ordinate sowie die Materialkosten pro Kilogramm auf der Abszisse abtragen. Die bestmögliche Lösung ist anschließend möglichst nahe an der sogenannten „Trade-off“-Kurve vorzufinden und verschiebt sich, je nach Gewichtung der Auswahlparameter, entlang der selbigen. Jedoch wird die Wahl für mehr als zwei Kriterien schnell unübersichtlich und auch die Anzahl geeigneter Werkstoffe ist nach Anwendung dieser Methode noch recht hoch. [Ashb11]

Die Matrixmethode, die im Detail durch Farag [Fara14] beschrieben ist, ordnet eine begrenzte Anzahl an Werkstoffen, basierend auf einer Vielzahl von relevanten und gewichteten Parametern. Der Vorteil gegenüber dem vorgeschlagenen Verfahren nach Ashby [Ashb11] liegt in der Betrachtung einer beliebigen Anzahl an signifikanten Einflussgrößen sowie der Wahl eines einzigen Materials, das die geforderten Eigenschaften am besten erfüllt (explizite Entscheidung). Jedoch birgt dieser Ansatz auch gewisse Nachteile in sich. Aufgrund der hohen Anzahl an Eingabeparametern erlaubt der erzeugte Leistungsindex keine direkten Rückschlüsse auf bestimmte Materialeigenschaften. Ebenso ist die Anwendung dieser Methode nur dann sinnvoll, wenn zuvor eine Materialvorauswahl durchgeführt wird, um die Anzahl der Kandidaten für einen detaillierten Vergleich zu reduzieren. [Fara14]

Die sequenzielle Anwendung beider Vorgehensweisen ist grundsätzlich denkbar, um den Suchraum sukzessive einzugrenzen und die übrigen Werkstoffe anschließend, entsprechend ihrer Eignung, zu sortieren.

2.3.4.3 Phase IV: Materialentscheidung

Bezüglich des Ablaufs der Phase IV herrscht innerhalb der Literatur großer Konsens. Simulationen, Experimente und die Erhebung genauer Werkstoffdaten bilden hierbei die wichtigsten Kernpunkte. Als Ergebnis der bisherigen Arbeitsschritte sollte zu Beginn dieser Phase eine enge Auswahl an Werkstoffkandidaten vorliegen. Auf dieser Basis kann überprüft werden, ob die Werkstoffe die zu Beginn gestellten Anforderungen tatsächlich erfüllen. Typischerweise wird aus diesen Erkenntnissen im Anschluss die endgültige Werkstoffentscheidung abgeleitet. Anstelle der reinen Werkstoffeigenschaften stehen nun wiederum die Produkteigenschaften im Vordergrund. Hierbei spielen zusätzlich sowohl die Fertigung als auch die Form eine entscheidende Rolle, sodass die Materialauswahl nicht mehr vom Produktentwicklungsprozess zu trennen ist. Form und Gestaltung eines Bauteils sind

materialabhängig und müssen den Stärken und Schwächen eines Werkstoffs sowie den genutzten Fertigungsverfahren Rechnung tragen. Daher ist letztendlich für alle relevanten Merkmale wie bspw. Funktion, Gewicht, Kosten, usw. die Kombination von Form und Werkstoff zu bewerten. Diese Informationen können wesentlich zur Entscheidungsfindung beitragen, da viele der oben genannten Merkmale nur schwer im Voraus abzuschätzen sind. [Ashb11], [DiSc09], [Fara14], [Reut07], [Reut14]

Farag und Reuter schlagen aus diesem Grund einen sogenannten Varianten- oder Konzeptvergleich vor. Wichtige Aspekte sind dabei die Faktoren Gewicht, Kosten, Funktionsfähigkeit und die Zuverlässigkeit des Bauteils im Gebrauch. Oft werden hierfür Simulationen und Experimente durchgeführt, um die geforderten Eigenschaften zu überprüfen. Zudem sind detaillierte Informationen über die Werkstoffe notwendig, die entweder durch Materialdatenbanken oder direkt über den Hersteller bezogen werden können. [Fara14], [Reut07]

2.3.5 Werkstoffe und Bauweisen der Fahrzeugkarosserie

Der Einfluss der Entdeckung neuer Werkstoffe auf die Entwicklung der Menschheitsgeschichte ist nicht von der Hand zu weisen und wurde bereits in der Einleitung dieser Arbeit ausführlich diskutiert (vgl. Kapitel 1, S. 1). Wie diese bis dato auch die Entwicklungsgeschichte verschiedener Karosseriebauformen beeinflussten, soll Bestandteil des folgenden Kapitels sein.

Beginnend bei den ersten Fahrzeugen im 19. Jahrhundert, die aus heutiger Sicht nur auf eine geringe Menge an Werkstoffen zurückgreifen konnten (z.B.: Holz, Stahl, Gusseisen, Kupfer, Leder), entwickelte sich das Gebiet der „Materialauswahl“ zu einem der bestimmenden Themen der heutigen Fahrzeugentwicklung [FTKK08]. Grund hierfür sind immer komplexere und strengere Anforderungsprofile der Fahrzeuge. Einer der brisantesten Zielkonflikte der heutigen Zeit stellt die Erfüllung der zulässigen CO₂-Emissionen [WWW15], bei gleichzeitiger Performancesteigerung sowie der Integration von Mehrinhalten dar. Können die geforderten Grenzwerte nicht eingehalten werden, drohen den Herstellern neben einem Gesetzesverstoß zusätzlich damit einhergehende Strafzahlungen und herbe Imageverluste. Werden Mehrinhalte für Komfort und Entertainment reduziert, besteht die Gefahr die Wettbewerbsfähigkeit am Markt zu schädigen. Um dem Schadstoffausstoß dennoch Einhaltung

zu gebieten, sind somit effizienzsteigernde Maßnahmen des Motors bzw. die Reduktion des Fahrzeuggewichts von entscheidender Bedeutung. Dabei stellt insbesondere die Fahrzeugkarosserie mit ca. 35-40 % den Hauptanteil des Fahrzeuggesamtgewichts dar. [EGGH13], [EIFK13]

Dies ist der Grund, weswegen sich über die Jahre hinweg verschiedene Karosseriebauweisen entwickelt haben, die jeweils vom Einsatz bestimmter Materialien geprägt sind. Im Folgenden soll auf die wichtigsten, am heutigen Markt eingesetzten Bauweisen eingegangen werden.

2.3.5.1 Schalen-Bauweise

Die klassische Schalen-Bauweise zählt aktuell, aufgrund der vergleichsweise niedrigen Material- und Fertigungskosten, bei gleichzeitig hohen Investitionssummen für die Presswerke, zu den verbreitetsten Bauweisen im Großserienkarosseriebau [FTKK08], [Herr13]. Die selbsttragende Karosserie wird dabei auf Basis von umgeformten Stahlblechen aufgebaut (vgl. [BGHH13], [FTKK08], [Herr13]).

2.3.5.2 Space-Frame-Bauweise

Die tragende Rahmenstruktur von sogenannten Space-Frame-Konzepten (vgl. z. B. [BGHH13], [FTKK08], [Herr13]) besteht hingegen weitestgehend aus (Aluminium-) Strangpressprofilen, die über mehrere Gussknoten miteinander verbunden sind. Für gewöhnlich müssen Beplankungsteile in solchen Konzepten keine lasttragenden Funktionen übernehmen. Eine Ausnahme hinsichtlich dieses Falls stellt dabei die 2. Generation des ASF²⁴-Konzepts dar, welches ausgewählte Flächenteile lasttragend in die Fahrzeugstruktur integriert. Diese Bauweise bietet vor allem Vorteile hinsichtlich Gewicht und Steifigkeit, was sich so auch in der Bewertung des Leichtbaufaktors widerspiegelt [BGHH13]. Weitere Stärken sind sowohl das gute Energieabsorptionsvermögen sowie die hervorragenden Recyclingvoraussetzungen [BGHH13]. Im Vergleich zur Schalen-Bauweise aus Stahl fallen deutlich geringere Investitionskosten, andererseits jedoch hohe Fertigungskosten an. Die Verwendung solcher Profilbauweise eignet sich aus wirtschaftlichen Gründen daher vor allem für kleine Fahrzeugstückzahlen [Herr13]. Abbildung 2-40 stellt so ein Aluminium-Space-Frame-Konzept dar.

²⁴ AUDI Space-Frame

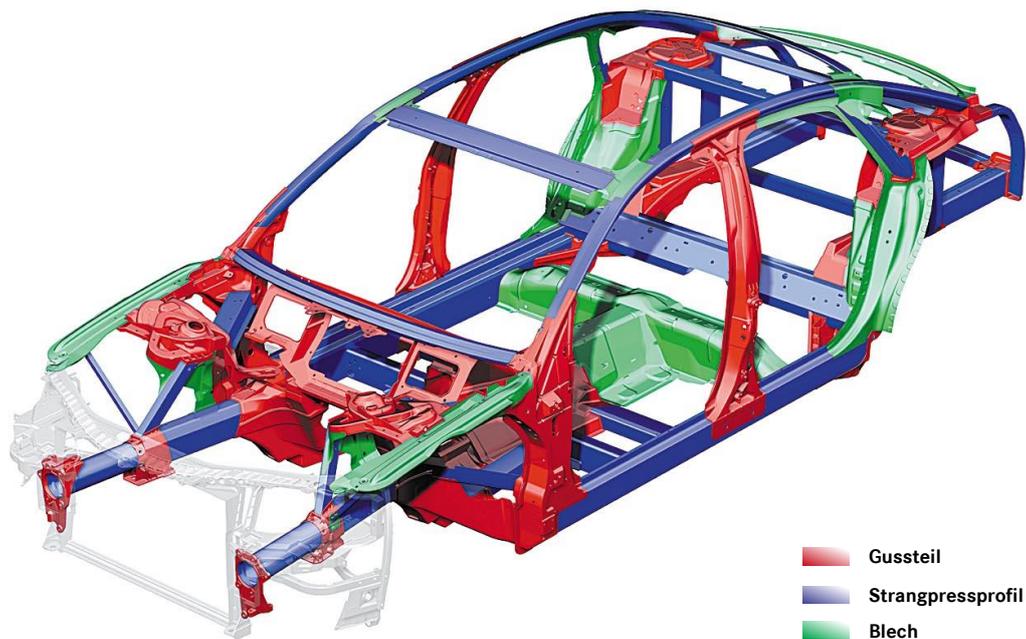


Abbildung 2-40: Das Materialkonzept des AUDI Space-Frame (ASF) AUDI A8 (D3) [BGHH13]

2.3.5.3 Monocoque-Bauweise

Das Monocoque bezeichnet eine weitere Art der Karosseriebauweise, welche die Darstellung der strukturbeanspruchten Gesamtkarosserie auf Basis einer einteiligen Schale vorsieht [FrKr13]. Die Kombination dieser Bauart mit Faserverbund- oder Aluminiumwerkstoffen führt zu einem niedrigen Fahrzeuggewicht, bei gleichzeitig sehr hoher Steifigkeit. Aufgrund der hohen Kosten bleibt diese Bauweise jedoch zumeist hochpreisigen Sportwagen (z.B.: McLaren SLR) sowie dem Rennsport vorbehalten [FTKK08].

2.3.5.4 Multi-Material-Bauweise

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Wahl eines Werkstoffes in der Entwicklung der Fahrzeugstruktur immer eng mit der Ausprägung der zugehörigen Bauweise verbunden ist. So haben sich im Laufe der Zeit verschiedene Bauarten für bestimmte Materialien als besonders geeignet herausgestellt. Die zuvor erläuterten Bauweisen dienen dabei als bestmögliche Beispiele. So werden die Profil- bzw. Schalen-Bauweise direkt mit dem gängigsten, dazugehörigen Umsetzungswerkstoff, also Aluminium bzw. Stahl, assoziiert. Um im Sinne des Leichtbaus noch effizienter agieren zu können, verfolgt der neue Entwicklungstrend des Mutli-Material-Designs das Ziel, beliebige Werkstoffe und Bauweisen anforderungsspezifisch miteinander in einem Karosseriekonzept zu kombinieren [FTKK08], [Sahr11]. Als praktisches Anwendungsbeispiel lässt sich an dieser Stelle die B-Säule aus

formgehärtetem Stahl des neuen ASF-Konzepts von Audi nennen. Um den hohen Sicherheitsanforderungen Sorge zu tragen, wird selbige in die Aluminiumprofilbauweise integriert [FrKr13]. Zudem lässt sich mittlerweile auch der zunehmende Einsatz von Aluminium- sowie die partieller Verwendung von FVK²⁵-Werkstoffen in der Großserie (vgl. [WWW16]) feststellen.

2.3.6 Übertragung der Ansätze zur systematischen Materialauswahl auf Fahrzeugstrukturbauteile

Zur positionsgerechten Bestimmung des Einsatzorts eines beliebigen Werkstoffs innerhalb des Karosserierohbaus wird zunehmend versucht, die allgemeinen Ansätze der systematischen Materialauswahl (vgl. Kapitel 2.3.4) auf die Fahrzeugstruktur zu übertragen. So gliedern bspw. Wilde et al. [WiUS2016] und Baskin et al. [BaDM02] den Fahrzeugrohbau in verschiedene Aufgabenbereiche und ordnen ihnen ein entsprechendes Hauptauslegungskriterium zu (vgl. Abbildung 2-41).

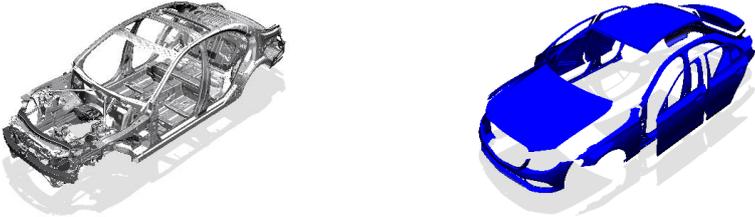


Abbildung 2-41: Materialauswahl anhand der Hauptauslegungskriterien der Karosserie des MLB-evo Konzepts nach Wilde et. al. [WiUS2016]

²⁵ Faserverbundkunststoff

Macey [MaWa09] verfeinert diese Art der Gruppierung zusätzlich um die Einteilung in zug-, druck, knick-, biege- oder torsionsbelastete Strukturbauteile. Nach seinem Dafürhalten gilt es die vorgegebenen Steifigkeits- oder Festigkeitsrandbedingungen, je nach eintreffender Belastungsart, für jedes einzelne Bauteil zu erfüllen. [MaWa09]

Die anschließende Zuordnung der geeigneten Werkstoffe findet unter dem Einsatz von Werkstoffindizes (vgl. Kapitel 2.3.4.2) statt [WiUS2016]. Diese Werkstoffindizes sind gerade in der Auslegung von Strukturbauteilen auch als „Massebedarfskennzahlen“ [FTKK08] oder „gewichtsbezogene Materialkenngrößen“ [Wied07] bekannt und adressieren damit speziell jene Indizes, die das Verhältnis der Dichte ρ zu einem lastfallspezifischen Werkstoffkennwert (WK) wie bspw. E , G , $R_{p0,2}$, τ_t , je nach Belastungsart in Bezug zueinander setzt [FTKK08]. Diese werkstoffbeschreibenden Kennwerte können aus diversen Literaturwerken ([StRö00], [WMJV09], [BöBö15]) oder Materialdatenbanken ([WWW17], [WWW18], [WWW19]) bezogen werden. Liegen für einen bestimmten Werkstoff nur die Erkenntnisse aus dem Zugversuch vor, werden die restlichen Grenzspannungen durch Multiplikation mit entsprechenden Belastungsfaktoren (z.B.: [StRö00], [WMJV09], [BöBö15]) näherungsweise ermittelt. Unter diesen Voraussetzungen ist es möglich, beliebig viele Materialien, in Abhängigkeit der Eingangslast, hinsichtlich des jeweiligen Massebedarfs zu vergleichen. Kellner stellt hierfür im Rahmen seiner Dissertation [Kell13] die Massebedarfskennzahlen für flächige Bauteile und dünnwandige Hohlprofile gegenüber und teilt diese den jeweiligen Karosseriestrukturen zu. Erweitert man seine Darstellung um alle klassischen Lastfälle der Technischen Mechanik (Zug, Druck, Knicken, Biegung, Torsion) für das Ziel der Steifigkeits- bzw. Festigkeitsmaximierung bei minimalem Gewicht, ergeben sich die in Abbildung 2-42 dargestellten Materialauswahlindizes. Der Lastfall der Scherung wird an dieser Stelle bewusst vernachlässigt, da jene Versagensart erfahrungsgemäß an den Verbindungsstellen zweier Komponenten auftritt, der Fokus der Arbeit jedoch vielmehr auf der Auslegung des jeweiligen Strukturbauteils liegt (vgl. Kapitel 1.2, S. 3).



| Lastfall | Dünnwandiges Hohlprofil | | Flächiges Bauteil | |
|----------|-------------------------|------------------------------|------------------------|----------------------------------|
| | Steifigkeit | Festigkeit | Steifigkeit | Festigkeit |
| Zug | $\frac{\rho}{E}$ | $\frac{\rho}{R_{p0,2}}$ | $\frac{\rho}{E}$ | $\frac{\rho}{R_{p0,2}}$ |
| Druck | $\frac{\rho}{E}$ | $\frac{\rho}{R_{p0,2}}$ | $\frac{\rho}{E}$ | $\frac{\rho}{R_{p0,2}}$ |
| Knicken | $\sim \frac{\rho}{E}$ | - | $\frac{\rho}{E^{1/3}}$ | - |
| Biegung | $\sim \frac{\rho}{E}$ | $\sim \frac{\rho}{R_{p0,2}}$ | $\frac{\rho}{E^{1/3}}$ | $\frac{\rho}{R_{p0,2}^{1/2}}$ |
| Torsion | $\sim \frac{\rho}{G}$ | $\sim \frac{\rho}{\tau_t}$ | $\sim \frac{\rho}{G}$ | $\sim \frac{\rho}{\tau_t^{1/3}}$ |

Abbildung 2-42: Materialauswahlindizes für dünnwandige Hohlprofile und flächige Bauteile hergeleitet unter der Verwendung von Ashby [Ashb11], Wiedemann [Wied07] und Skolaut [Skol14] sowie Darstellung in Anlehnung an Kellner [Kell13]

Während sich diese Kennzahlen nach Kellner [Kell13] und Sohmshetty et al. [SRMK11], unter vereinfachter Annahme der Bauteilgeometrie, sehr gut für die Bewertung von Leichtbaupotentialen flächiger Außenhaut- und Strukturbauteile in der frühen Phase der Entwicklung eignen, erachten sie den Einsatz der selbigen zur Beurteilung der Crashperformance als kritisch [Kell13], [SRMK11].

Eichelseder und Schöneburg [EiSc13] unterscheiden in Hochgeschwindigkeits- und Reparaturcrashes und ordnen ihnen die jeweils relevanten Werkstoffkenngrößen R_m und $R_{p0,2}$ zu, die im Verhältnis zur Dichte den notwendigen Auswahlindex bilden. Diese eignen sich nach ihrem Dafürhalten für eine erste Auswahl in der frühen Phase. Jedoch verweisen auch sie auf die notwendige Berücksichtigung der Duktilität eines Werkstoffes, um das Leichtbaupotential im Crashfall vollumfänglich bewerten zu können. [EiSc13]

Daran anknüpfend nutzt Ashby [Ashb11] den Ansatz der Energieaufnahmefähigkeit ($R_{p0,2} * \varepsilon$) von Materialien und setzt jene ins Verhältnis zur Werkstoffdichte, um zu einem Auswahlindex zu gelangen. Dieser Ansatz erscheint einleuchtend, jedoch ist die Aussagegüte aufgrund der verschiedenen Versagensmechanismen (Deformation, Delamination, Brechen, Reißen, usw.) unterschiedlicher Materialien nur begrenzt einsetzbar.

Vor diesem Hintergrund entwickelte Cui et. al. [CZWZ11] seine Formulierung eines Materialindex auf Basis von semianalytischen Ansätzen zur Modellierung der mittleren Kraft im Crashlastfall, speziell für dünnwandige Profile und bildet damit die Erfahrung aus praktischen Crashversuchen tendenziell am besten ab. Aufgrund des damit verbundenen Aufwands der Kraftmodellierung, insbesondere bei eintretenden Änderungen, stellt diese Methode aber auch die aufwändigste Vorgehensweise dar. Aus diesem Grund wird sie häufig erst zu einem späteren Prozesszeitpunkt eingesetzt. [CZWZ11]

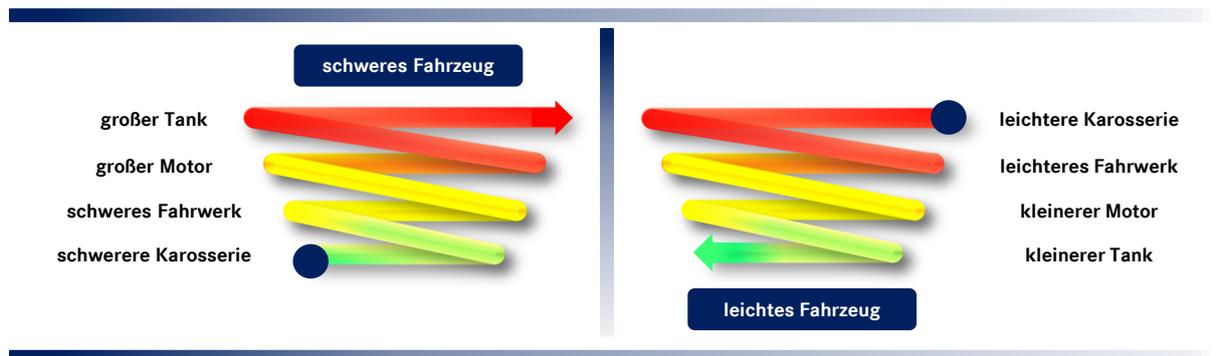
Die Durchführung der in diesem Kapitel vorgestellten Vorgehensweise zur freien Werkstoffauswahl, innerhalb eines Multi-Material-Designs, eröffnet zum Teil hohe Gewichteinsparpotenziale auf Komponentenebene. Um jedoch die vielversprechendste Gesamtlösung ermitteln zu können, muss zusätzlich die Berücksichtigung aller Leichtbaustrategien, über die verschiedenen Systemebenen, bis hin zur Gesamtfahrzeugebene erfolgen.

2.3.7 Leichtbaustrategien

Das Themenfeld Leichtbau lässt sich nach Kopp et al. [KoBM11] in fünf Strategiebereiche unterteilen. Diese sind unter den Bezeichnungen Bedingungs-, Konzept-, Stoff-, Form- und Fertigungsleichtbau bekannt. Während die einzelne Anwendung einer der genannten Domänen häufig nur einen geringen Mehrwert liefert, ist viel mehr die Kombination aller Ansätze fester Bestandteil der heutigen Fahrzeugentwicklung. Nur so ist es möglich die Umkehr der Gewichtsspirale einzuleiten (Abbildung 2-43). [KoBM11]

Gerade diese enge Verknüpfung der verschiedenen Ansätze zur Gewichtsreduktion sowie die stetige Zunahme an rechnergestützten Hilfsmitteln in der frühen Phase gestalten die explizite Zuordnung der Strategien zu den jeweiligen Phasen innerhalb des

Produktentstehungsprozesses (wie z.B. in Schmidt und Puri [ScPu00]) zunehmend schwierig und lassen die Grenzen daher immer stärker verschwimmen.



**Abbildung 2-43: Die Gewichtsspiralen in der Fahrzeugentwicklung (links aufwärts / rechts abwärts)
in Anlehnung an Gänsicke und Goede [GäGo13]**

Im folgenden Kapitel sollen die Schwerpunkte der einzelnen Strategien behandelt und die Zusammenhänge herausgestellt werden.

2.3.7.1 Bedingungsleichtbau

Der Bedingungsleichtbau beinhaltet die detaillierte Auseinandersetzung mit den äußeren Einflüssen die ein Fahrzeugkonzept dimensionieren. Belastungen, Missbrauchslastfälle, usw. (siehe Kapitel 2.1.6) werden genauer erforscht und das Anforderungsprofil dadurch geschärft. Somit lassen sich bspw. Gewichtseinsparungen durch eine bewusste Reduktion der Lebensdauer, aber auch durch konstruktive Maßnahmen wie die Verkürzung von Lastpfaden oder Hebelarme erzielen. Ein klassisches Beispiel hierfür stellt die Masseverteilung eines Fahrzeugs sowie die Auswirkungen auf die damit verbundenen Traktions- und Fahrdynamikeigenschaften dar. Abhängig von der Position des Motors sowie der angetriebenen Achse, lässt sich das Fahrzeug in Sektoren mit hoher und niedriger Leichtbaurelevanz einordnen (vgl. Abbildung 2-44). Somit ist es möglich neben den durchschnittlichen Leichtbaumehrkosten, je nach Strategie (Spar-, Öko-, Zweck-, Ultraleichtbau), durch Multiplikation mit dem jeweiligen Positionsfaktor, die lokal zulässigen Bauteilmehrkosten zu ermitteln. Während diese in der Luft- und Raumfahrtindustrie zum Teil in beträchtlicher Höhe anfallen dürfen, sind im Fahrzeugbereich je nach Zielstrategie Durchschnittswerte zwischen 2 bis 10 € pro eingespartem Kilogramm üblich. [KoBM11], [EGGH13], [Klei13]

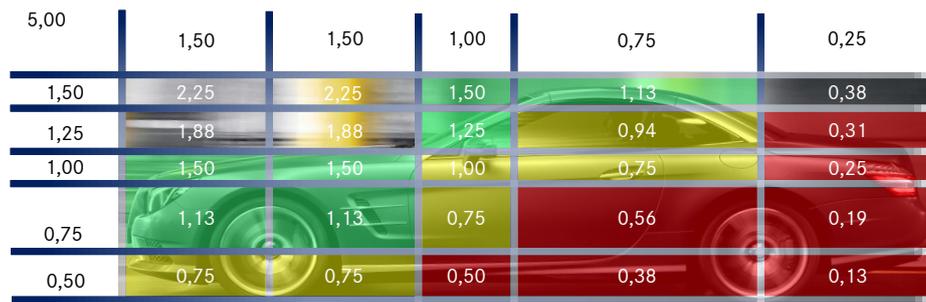


Abbildung 2-44: Leichtbauzonen am Beispiel eines heckgetriebenen Frontmotorfahrzeugs in Anlehnung an Ellenrieder et. al. [EGGH13]

Abhängig von der Höhe der durchschnittlich zulässigen Mehrkosten kann die Spreizung der Zielkosten zwischen den einzelnen Bauteilen eines Fahrzeugs mitunter sehr hoch ausfallen. Weitere Potentiale zur Gewichtsreduktion im Rahmen des Bedingungsleichtbaus bietet, insbesondere bei global agierenden Unternehmen, die Vereinheitlichung länderspezifischer Rahmenbedingungen. Andernfalls müssen länderübergreifend die kritischsten Lastfälle angenommen werden, was auf Grund der draus resultierenden Überdimensionierung im Umkehrschluss eine Erhöhung der Bauteilkosten sowie des –gewichts bedeutet. [FKNS13]

2.3.7.2 Konzeptleichtbau

Der Konzeptleichtbau ist häufig auch unter dem Namen Systemleichtbau bekannt und beschreibt wie und wie viele Funktionen innerhalb eines Bauteils, Moduls oder Systems erfüllt werden sollen [KoBM11]. Dabei erfolgt die Separation in zwei grundlegende Vorgehensweisen. Während die Integralbauweise die Integration möglichst vieler Funktionen in einem Bauteil anstrebt, kennzeichnet die Separation der Funktionen auf möglichst viele Einzelteile die Vorgehensweise der Differentialbauweise. Üblicherweise ist die Differenzialbauweise, aufgrund der erhöhten Teileanzahl sowie der notwendigen Verbindungstechnik und dem Montageaufwand, die teurere Variante von beiden. Vorteile ergeben sich jedoch hinsichtlich der Reparaturfreundlichkeit sowie der Materialauswahl. Im Falle eines defekten Bauteils müssen somit nur wenige Komponenten ersetzt werden. Zusätzlich können im Rahmen der Werkstoffauswahl funktionspezifische Materialien gewählt werden, was eine ungewollte Überdimensionierung oder Einschränkung der Bauteilfunktion vorbeugt. In Bezug auf die zuvor beschriebenen Bauweisen aus Kapitel 2.3.5 lässt sich somit jeweils ein eher differenzialer oder integraler Charakter zuordnen. [EGGH13], [Klei13], [AlBu11]

Während die lasttragenden Bauteile innerhalb der Rahmenbauweise zumeist durch die Profilstrukturen unterhalb der Außenhaut abgedeckt werden, sind die Bepunktungsbauteile der Schalen-Bauweise direkt in die Lastübertragung eingebunden und unterliegen damit gleichzeitig auch erhöhten Ansprüchen der Oberflächenqualität. Je nach Konzept lässt sich die Multi-Material-Bauweise zwischen den Grenzen dieser beiden Karosseriebauarten einordnen. Die Monocoquebauweise bietet den höchsten Integrationsanteil, ist jedoch nur in kleinen Losgrößen realisierbar. [EGGH13]

2.3.7.3 Stoffleichtbau

Der Stoffleichtbau setzt sich zum Ziel für jedes Bauteil, in Abhängigkeit der zur erfüllenden Funktion, den leichtesten Werkstoff auszuwählen. Zur Identifizierung selbiger werden die Materialindizes herangezogen (detailliert beschrieben in Kapitel 2.3.5). Jedoch sind, insbesondere bei einem Wechsel der Werkstoffgruppe, weitere Überlegungen hinsichtlich der geometrischen Umsetzung sowie der Herstellbarkeit notwendig, um die Substitutionstauglichkeit vollumfänglich abzusichern. [KoBM11], [FTKK08], [BGHH13], [Klei13], [Kure11],

2.3.7.4 Formleichtbau

Unter Formleichtbau versteht man die lastgerechte Werkstoffanordnung innerhalb eines verfügbaren Bauraums in Form eines Bauteils (vgl. Abbildung 2-45).

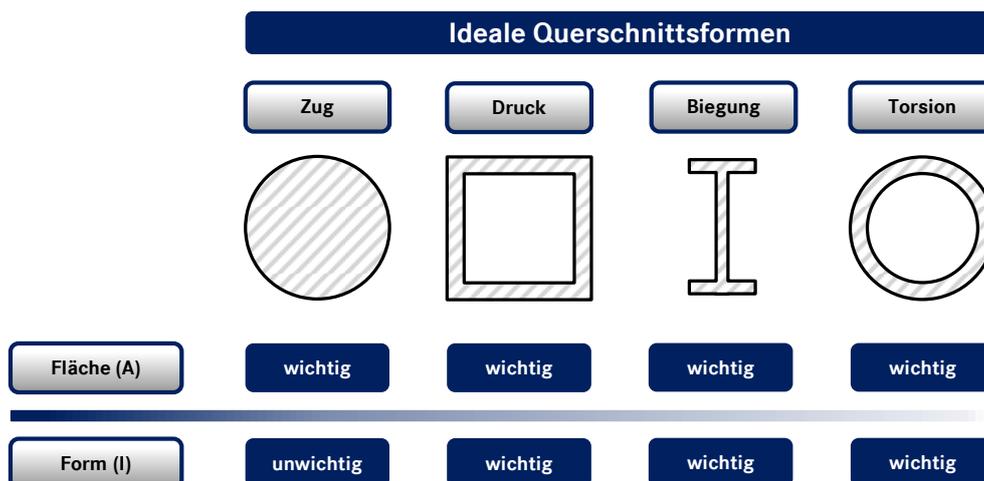


Abbildung 2-45: Günstige Querschnittsformen in Abhängigkeit zur Bauteilbelastung in Anlehnung an Steinhilper und Röper [StRö00] sowie Dietrich [Diet15]

Auf Basis der Grundgleichungen der Technischen Mechanik lassen sich, unter der Anwendung des Steiner'schen Satzes, die günstigsten Querschnittsformen ermitteln. Diese führen zu einer Reduktion der inneren Spannungen bei gleicher Querschnittsfläche, was einer Minimierung des Bauteilgewichts gleichzusetzen ist. [KoBM11], [Reut07], [Lüdk00]

Unter dem Einsatz rechnergestützter Verfahren lässt sich eine automatisierte Vorgehensweise, unter Berücksichtigung eines maximal verfügbaren Bauraums, auf die 3D-Welt übertragen. Die Topologieoptimierung (vgl. Kapitel 2.2.1) ermöglicht dabei die Eliminierung einzelner, spannungsarmer finite Elemente innerhalb dieses Bauraums, bis lediglich die lastpfadgerechten Strukturen als geometrischer Lösungsvorschlag übrig bleiben. Jedoch entsprechen diese Ergebnisse in ihrer Reinform zumeist nicht den Ansprüchen einer fertigungsgerechten Bauteilgeometrie und müssen darum anschließend in herstellbare Formen übersetzt werden, die sich an den topologischen Vorschlag anlehnen. Die Abgrenzung einzelner Bauteile erfolgt anschließend unter Berücksichtigung der Bauweise (Integral- oder Differentialbauweise vgl. Kapitel 2.3.7.2). [EGGH13], [FKNS13], [AlBu11]

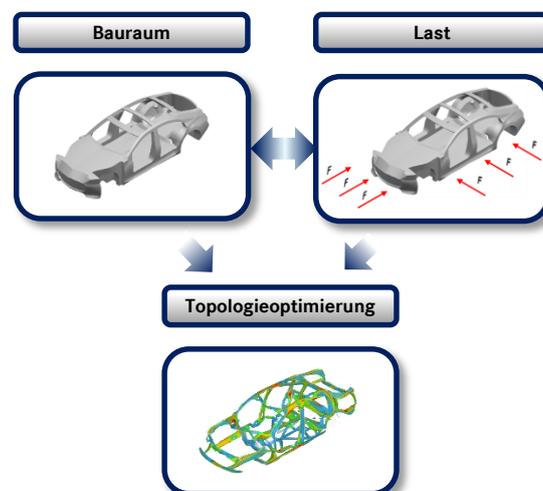


Abbildung 2-46: Topologieoptimierung auf Basis eines begrenzten Bauraums sowie entsprechender Eingangslasten

Nach der Ausdetaillierung dieses Vorschlags anhand einer CAD-Konstruktion, lassen sich die Bauteilfunktionen wiederum mit Hilfe von FEM-Simulationen sowie im späteren Verlauf durch Versuche, auf Basis der Realgeometrie überprüfen. [EGGH13], [FTKK08], [Klei13]

2.3.7.5 Fertigungsleichtbau

Der Begriff des Fertigungsleichtbaus bezieht sich derweil auf die gewichtsreduzierenden Maßnahmen hinsichtlich des Produktionsprozesses. So lassen sich durch den Einsatz bestimmter Technologien, wie bspw. den Tailor Rolled Blanks, die Wandstärken eines Blechbauteils partiell an den Belastungsverlauf anpassen, um in Folge dessen Gewicht und Bauraum zu sparen. Die starke Verflechtung mit dem Stoff- und Formleichtbau wird durch solche Beispiele direkt greifbar. Demnach beeinflusst die Kombination aus Werkstoff und Form maßgeblich die Wahl eines geeigneten Herstellungsverfahrens eines Bauteils. [KoBM11], [EGGH13]

Daher ist man gewillt jeder Werkstoffgruppe, durch ständige technologische Weiterentwicklungen, eine möglichst freie Wahl der Formgebung über entsprechende Fertigungsverfahren zu ermöglichen, um die jeweilige Bauteilprägung ideal an die eingehenden Belastungen anpassen zu können. Dies schlägt sich jedoch, je nach Komplexität der Werkzeuge, des Energie-, Wartungs-, Investitionsbedarfs und vielen weiteren Aspekten, in den Bauteilkosten nieder. Vor diesem Hintergrund lässt sich auch der häufige Wunsch und Einsatz einfach gehaltener Bauteilstrukturen in der Praxis erklären, wenn eine höhere Komplexität mit hohen Zusatzkosten oder gar mit der Wahl eines alternativen Werkstoffs verbunden ist.

Neben der Wahl des geeigneten Fertigungsverfahrens spielt jedoch auch die Verbindungstechnik, zur Schaffung einer zusammenhängenden Karosseriestruktur im Sinne des Fertigungsleichtbaus, eine entscheidende Rolle. Insbesondere im Rahmen der Multi-Material-Bauweise muss diesem Aspekt eine erhöhte Aufmerksamkeit zuteilwerden. Hier gilt es des Öfteren auch hybride Fügeverfahren auszuwählen und das daraus entstehende Modul, Submodul bzw. Gesamtsystem hinsichtlich Kosten, Gewicht und Funktion zu bewerten (vgl. V-Modell Kapitel 2.1.3). Ergeben bspw. Materialkombinationen, die bei der reinen Materialauswahl der verschiedenen Bauteile jeweils nur den 2. Rang erreichen, gemeinsam mit dem dazu passenden Fügeverfahren eine, je nach Zielvorgabe, günstigere oder leichtere Lösung des Gesamtsystems, so bildet diese das zu wählende Optimum [KaMV15]. Eine Beschreibung der Vorgehensweise sowie die Behandlung des Problems bei baureihenübergreifenden Entwicklungen werden in Kaiser et. al. [KaMV15], Kaspar et. al. [KaBV16] sowie Kaspar und Vielhaber [KaVS13] im Detail thematisiert.

2.3.8 Systematische Materialauswahl in begrenztem Bauraum

Wie bereits zu Beginn der Arbeit festgestellt werden konnte, beeinflussen insbesondere das Verhältnis aus Last und Bauraum die Wahl des geeignetsten Werkstoffs, für den jeweiligen Anwendungsfall (vgl. Kapitel 2.1.7). Bei der bisher vorgestellten Aufstellung von Werkstoffindizes nach Ashby [Ashb11] (vgl. Kapitel 2.3.4.2) wird eine freie Variable verwendet, die üblicherweise einen geometrischen Parameter wie die Seitenlänge abbildet. Diese Variable lässt sich anschließend, je nach Werkstoff, variieren. Bspw. würde ein quadratischer Balken aus Stahl eine geringere Kantenlänge des Querschnitts als ein Balken aus Aluminium benötigen, wenn beide die gleiche Biegesteifigkeit aufweisen sollen. Um mit dieser Vorgehensweise das begrenzte Platzangebot innerhalb der Strukturbauteilentwicklung berücksichtigen zu können, kann der Maximalwert des freien, geometrischen Parameters angenommen werden, um eine vollständige Bauraumausfüllung zu simulieren (erweitertes Screening). Folglich werden Materialien die eine bauraumbestimmte Minimalsteifigkeit nicht erfüllen direkt von der Wahl ausgeschlossen (Abbildung 2-47). Den Vergleich hinsichtlich der Performance der übrigen Werkstoffe lässt sich anschließend in gewohnter Weise durch die Materialindizes durchführen. [Ashb11]

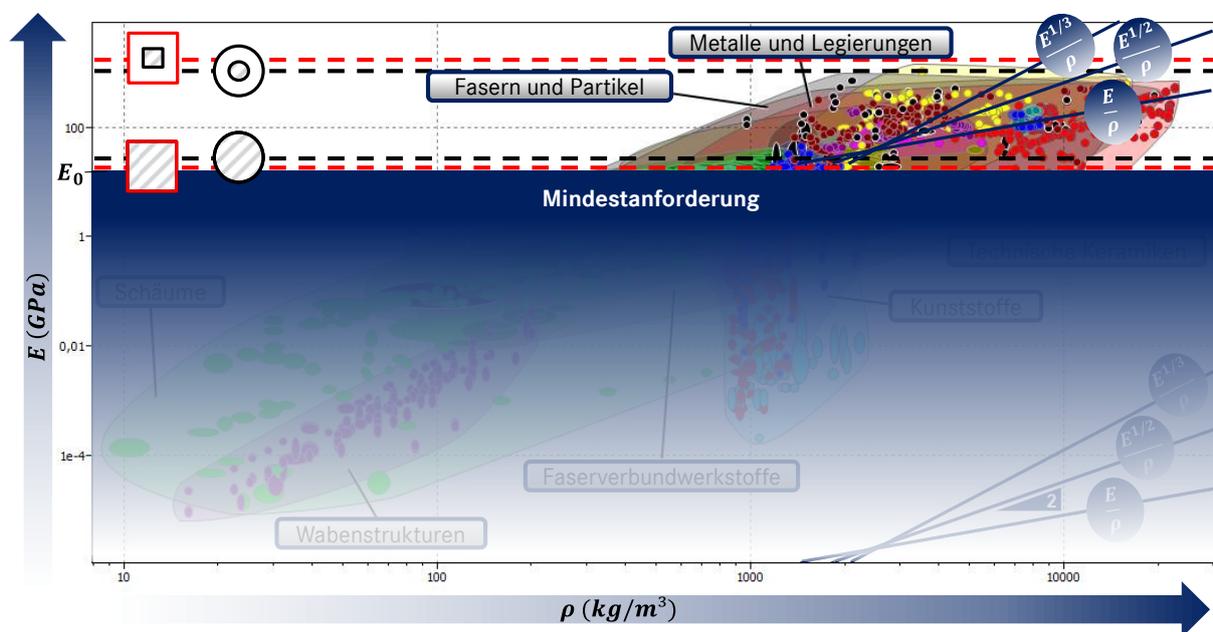


Abbildung 2-47: Berücksichtigung des verfügbaren Bauraums innerhalb der Materialauswahl in Anlehnung an Ashby [Ashb11]

Obwohl diese Methode eine anschauliche Möglichkeit bietet, um räumliche Einschränkungen innerhalb der Materialauswahl zu simulieren, beinhaltet sie auch einige Schwächen. In

Anbetracht der Belastungsfälle von Biegung, Torsion und Knicken, die sehr häufig innerhalb realer Fahrzeugstrukturen auftreten, führt diese Strategie zu einer ungünstigen Materialverteilung innerhalb des verfügbaren Bauraums, da Strukturanlagerungen nahe der Lastachse nur einen sehr geringen Beitrag zum Anstieg des Widerstandsmoments leisten. Um eine bestmögliche geometrische Ausnutzung erzielen zu können, sollte daher das Material möglichst weit von der Lastachse entfernt, also nahe der Grenzen (vgl. Kapitel 2.3.7.4) des freien Bauraums, angelagert werden. Vor diesem Hintergrund schlägt Wanner [Wann10] eine Methode vor, die diese Schwächen adressiert. Am Beispiel von runden Hohlprofilen und Sandwichplatten führt er eine neue Art der Parametrisierung ein. Hierbei ist die äußere Grenze des in seinem Falle sphärischen Querschnitts fixiert, während die innere als freier Parameter verwendet werden kann. Die Materialverteilung lässt sich somit, im Vergleich zum vorangegangenen Ansatz von Ashby [Ashb11], wesentlich belastungsgerechter und realitätsnäher, von außen nach innen, skalieren (Abbildung 2-48). [Ashb11], [Diet15], [Wann10]

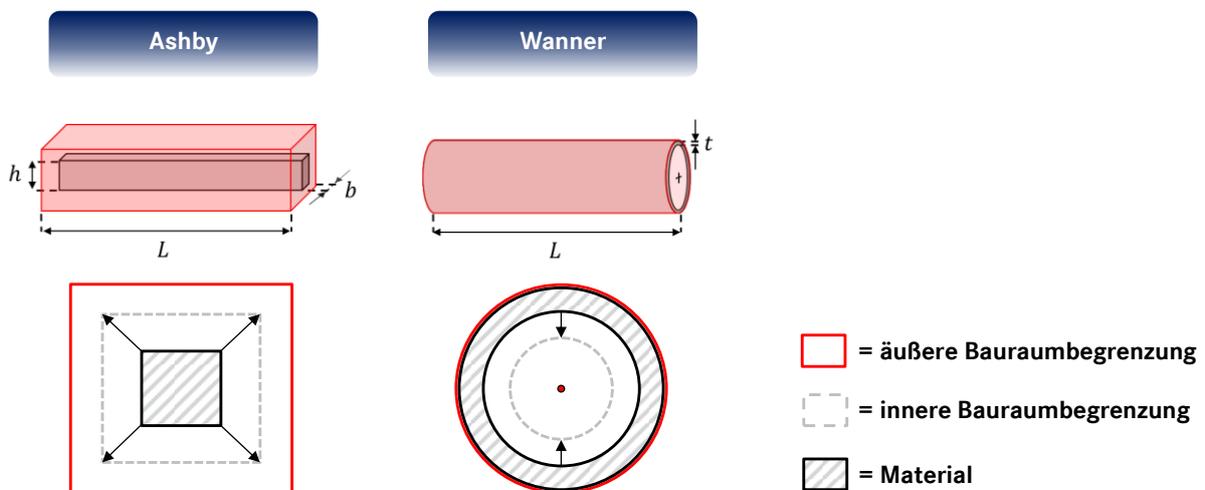


Abbildung 2-48: Die 2 grundlegenden Richtungen der Bauraumfüllung – links von innen nach außen in Anlehnung an Ashby [Ashb11] und rechts von außen nach innen nach Wanner [Wann10]

Die Beschreibung der formelmäßigen Beziehungen der Werkstoffeignung (Materialindex)

$$E(\rho) = \frac{E_0 \rho^2}{(2\rho - \rho_{eff})\rho_{eff}} \quad (2-5)$$

führt dazu, dass sich die beiden Phasen „Screening“ und „Ranking“ nicht mehr getrennt voneinander betrachten lassen, was wiederum den gekrümmten Verlauf der Auswahllinie bei zunehmender Bauraumfüllung erklärt (Abbildung 2-49). [Wann10]

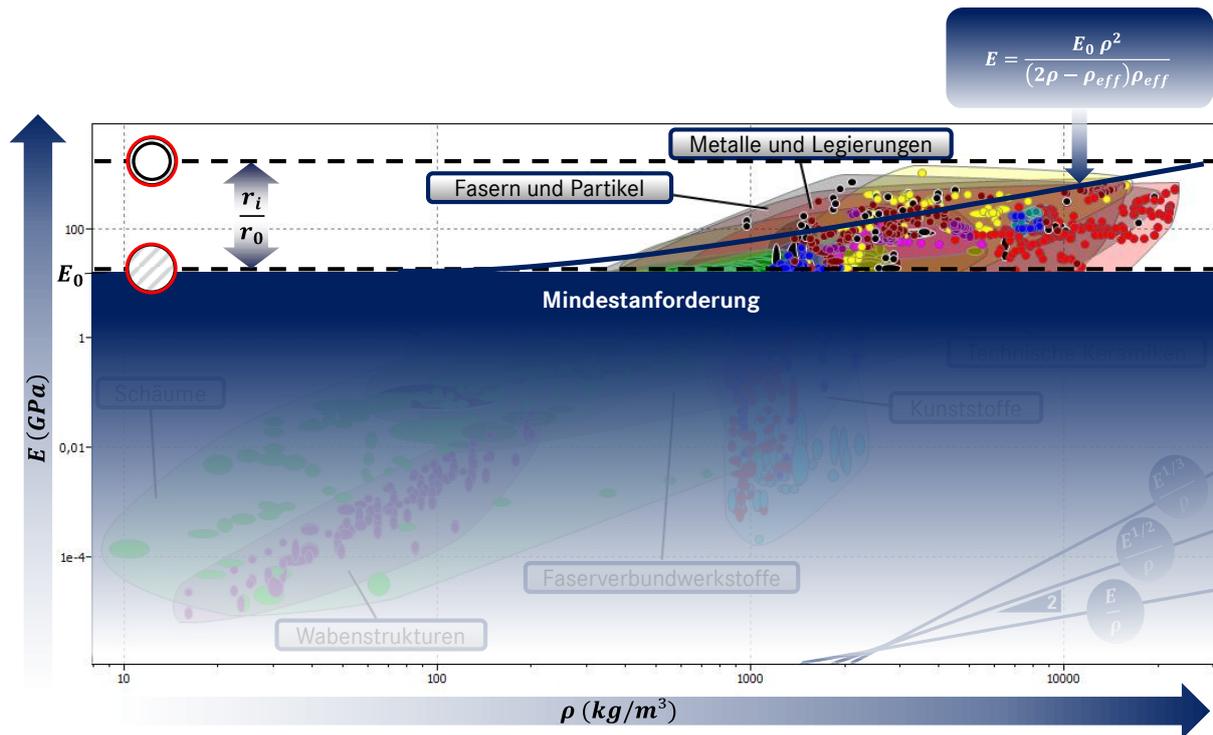


Abbildung 2-49: Berücksichtigung des verfügbaren Bauraums innerhalb der Materialauswahl in Anlehnung an Wanner [Wann10]

Auswirkungen der variierenden Last- und Bauraumanforderungen entlang des Entwicklungsprozesses (vgl. Kapitel 2.2) lassen sich dadurch direkt auf die Materialauswahl sowie den damit verbundenen Wandstärken ins Verhältnis setzen, was eine deutlich transparentere Werkstoffentscheidung zulässt. [Wann10]

Pasini ([Pasi02], [Pasi06]) beschäftigt sich zwar auch mit der Werkstoffauswahl innerhalb eines begrenzten Bauraums, benötigt hierfür jedoch schon eine gewisse Vorauswahl an infrage kommenden Materialien und lässt sich daher nicht direkt in die Auswahldiagramme von Ashby integrieren. Der Fokus liegt vielmehr auf der Bestimmung der geeignetsten Querschnittsformen bei biegebelasteten Balken. Zur Indikation der selbigen führt er sogenannte „Formtransformatoren“ ein, die das Verhältnis der gewählten Querschnittsgeometrie A zum maximal verfügbaren Bauraum A_{max} ($\psi_A = \frac{A}{A_{max}}$) sowie dem resultierenden Flächenträgheitsmoment I zum größtmöglichen Trägheitsmoment I_{max} ($\psi_I = \frac{I}{I_{max}}$) beschreiben (Abbildung 2-50). [Pasi06]

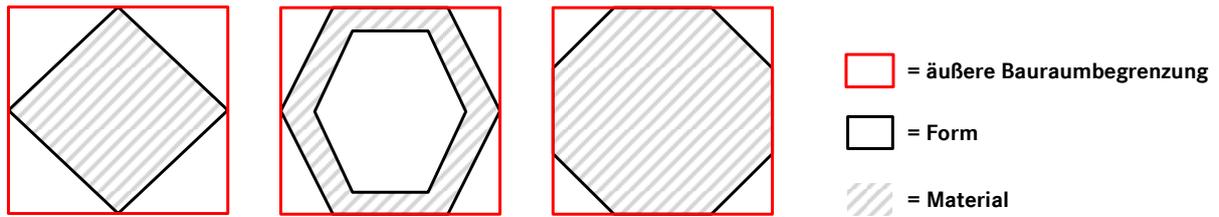


Abbildung 2-50: Beschreibung der Bauraumbegrenzung anhand von beliebig ausgewählten Querschnitten in Anlehnung an Pasini [Pasi02], [Pasi06]

In Verbindung mit den relevanten Werkstoffkennwerten führt ein möglichst hohes Verhältnis des Auswahlindex $\left(\frac{E \psi_I}{\rho \psi_A}\right)$ zur bestmöglichen Kombination aus Material und Form. Die Berücksichtigung einer Mindestanforderung an die Bauteilsteifigkeit lässt sich zusätzlich durch $(E\psi_I)_{min}$ beschreiben (Abbildung 2-51). [Pasi02], [Pasi06]

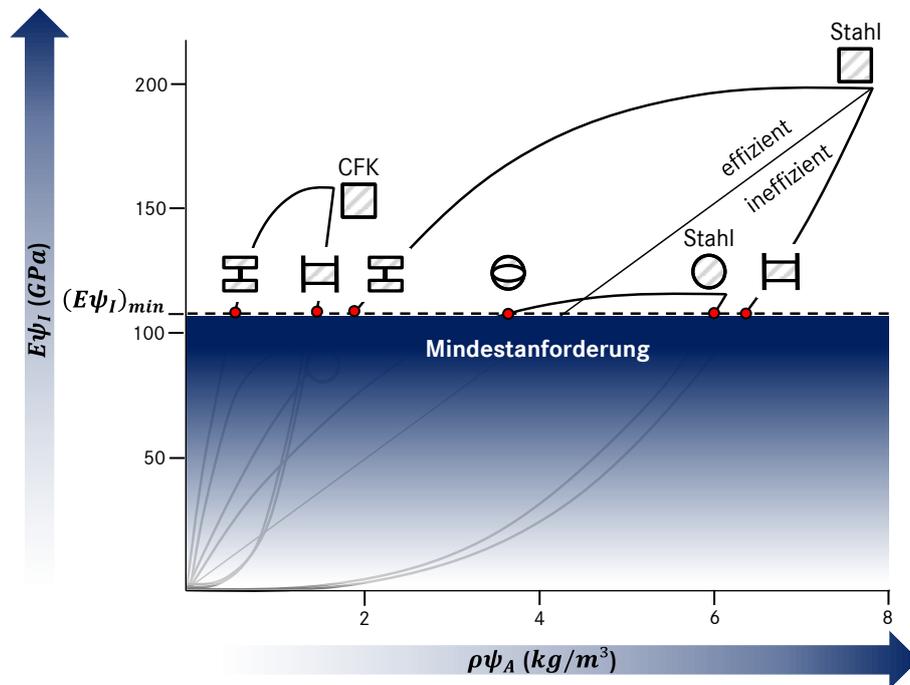


Abbildung 2-51: Auswahlschaubild für Material und Formgebung bei biegebelasteten Balken nach Pasini [Pasi06]

3 Analyierte Defizite und abgeleiteter Handlungsbedarf

Der ausführliche Exkurs durch den Stand der Forschung und Technik präsentiert drei grundlegende Strategien zur Werkstoffauswahl (vgl. Abbildung 2-37, S. 55). Die Strategien 2 (expertenwissenbasiert) und 3 (erfahrungsbasiert) repräsentieren dabei die typischen Vorgehensweisen bisheriger Entwicklungen von Fahrzeugstrukturbauteilen [Stae06]. Dies schlägt sich zum Teil bereits in der Benennung der verschiedenen Karosseriebauweisen nieder, welche in diesem Fall die entsprechend homogen verwendeten Werkstoffsorten innerhalb der Namensgebung einer Bauweise mit sich führen (z.B.: Stahl-Schalen-Bauweise, Aluminium-Spaceframe, usw.) und lässt sich unter anderem auf die einfache und günstige Art der Verbindungstechnik (vgl. [Ulri11]) zwischen den einzelnen Bauteilen zurückführen [BGHH13], [FTKK08], [Herr13].

Die zunehmend strenger werdenden Richtlinien zum CO₂-Ausstoß, bei gleichzeitigem Anstieg der Fahrzeugmehrinhalte (Assistenzsysteme, Sicherheitspakete, usw.), fordern jedoch Innovationen sowie ein Überdenken der bisherigen Vorgehensweisen zur Materialauswahl, um das Fahrzeuggewicht entscheidend zu reduzieren und gleichzeitig drohende Strafzahlungen und Imageverluste zu vermeiden [EGGH13]. Aus diesem Zwang heraus entwickelte sich die Multi-Material-Bauweise, die abhängig von den Bauteilanforderungen, den Einsatz des geeignetsten Werkstoffs an der jeweiligen Stelle vorsieht (vgl. Kapitel 2.3.5.4, S. 61) [KaVS13]. Die bisherige Materialauswahlstrategie verschiebt sich somit immer mehr hin zu einer systematischen Analyse und freien Suche (Strategie 1), um für jedes Bauteil der gesamten Karosserie den geeignetsten Werkstoff nachvollziehbar bestimmen zu können [FTKK08], [Sahr11]. Zwar wird diese Vorgehensweise in der bestehenden Literatur am ausführlichsten beschrieben (vgl. z.B. [Ashb11]), die Einsetzbarkeit im Rahmen der Fahrzeugstrukturbauteilentwicklung ist bis dato, aufgrund der fehlenden Berücksichtigung domänenspezifischer Belange, jedoch nur in eingeschränktem Maße möglich.

Die Herleitung solch einer systematischen Vorgehensweise sowie die Integration der selbigen in den bestehenden Entwicklungsprozess von Fahrzeugstrukturbauteilen gelten daher als zentrales Forschungsvorhaben dieser Arbeit. Durch eine detaillierte Analyse der gesammelten Grundlagen aus Kapitel 2, sollen im Folgenden die bestehenden Defizite identifiziert und durch

die Ableitung der notwendigen Handlungsbedarfe, zur Schärfung der eingangs gestellten Forschungsfragen (S. 3) genutzt werden.

Während über die Einteilung in die vier Phasen der systematischen Materialauswahl innerhalb der breiten Literatur weitestgehend Konsens herrscht, lassen sich bzgl. der tatsächlichen Umsetzung der einzelnen Teilschritte unterschiedliche Vorgehensweisen feststellen (vgl. Kapitel 2.3.4, S. 51). Ein elementarer Konfliktpunkt der alle Methoden betrifft und welcher die direkte Integration einer systematischen Materialauswahl in den Entwicklungsprozess von Fahrzeugstrukturbauteilen verhindert, ist dabei im instabilen Verhalten der Anforderungsprofile begründet. Jene unterliegen insbesondere in der frühen Entwicklungsphase starken Schwankungen, weswegen sich die explizite Festlegung eines geeigneten Konstruktionswerkstoffs zu diesem Zeitpunkt schwierig gestaltet. Mit fortschreitendem Entwicklungsprozess nehmen die Bauraumschwankungen immer weiter ab, bis sich nach Durchlauf der Meilensteine Design- und Packagefreeze ein finaler Bauraum fixieren lässt (vgl. Abbildung 2-28, S. 39 und Abbildung 2-29, S. 43).

Gleichzeitig resultiert aus der anteilmäßigen Verteilung der Gesamtfahrzeuglastfälle auf mehrere Komponenten (vgl. Kapitel 2.1.6, S. 21), selbst bei lediglich lokalen Bauraumveränderungen eines einzelnen Bauteils, eine Variation der Anforderungsprofile aller Strukturkomponenten innerhalb desselben Lastpfades. Die exakte Bauteilbelastung lässt sich somit erst nach der finalen Festlegung der Werkstoffe und Querschnitte aller Bauteile eines Fahrzeugs endgültig bestimmen, da sich erst zu diesem Zeitpunkt das Verhältnis aus Last und verfügbarem Bauraum nicht mehr verändert. Dies führt somit zu einem wechselseitigen Paradoxon. Zur frühzeitigen Erstabschätzung des Anforderungsprofils hat es sich daher bewährt auf die Erkenntnisse der Belastungsverteilung und Bauraumverhältnisse bestehender Fahrzeuge, mit vergleichbaren Fahrzeugstrukturen, zurückzugreifen (wie z.B. in Abbildung 2-16, S. 23) und sich anschließend durch iterative Zyklen aus Konstruktion und Simulation (vgl. Kapitel 2.2.1, S. 34) an die fahrzeugspezifischen Beanspruchungen schrittweise anzunähern. Auf Basis dieser Sachlage lassen sich die ersten beiden Forschungsfragen aus der ersten Hauptforschungsfrage **F1** (vgl. S. 3) wie folgt ableiten:

F1: Wie muss ein systematischer Materialauswahlprozess gestaltet sein, um dessen Integration in die frühe Phase der Fahrzeugstrukturbauteilentwicklung zu ermöglichen?

F1-a: Wie muss ein Materialauswahlprozess für Fahrzeugstrukturbauteile gestaltet sein, um deren variierende Bauraum- und Lastanforderungen berücksichtigen zu können?

F1-b: Wie können die variierenden Eingangsgrößen aus einem vorliegenden Gesamtfahrzeuglastenheft abgeleitet und in ein Komponentenlastenheft überführt werden?

Lässt sich klären wie diese variablen Eingangsgrößen aus den Gesamtanforderungen extrahiert und auf die einzelnen Strukturkomponenten anteilmäßig verteilt werden können, gilt es darauffolgend die restlichen Prozessschritte der systematischen Werkstoffauswahl, auf das volatile Wechselspiel in der Strukturbauteilentwicklung, anzupassen.

Während sich die klassische Vorgehensweise nach Ashby [Ashb11] sowie die Auswahlmethode nach Farag [Fara14] (vgl. Kapitel 2.3.4.2, S. 54), aufgrund der fehlenden Berücksichtigung von Last- und Bauraumschwankungen, nur in begrenztem Maße für die Materialauswahl von Fahrzeugstrukturbauteilen eignen (vgl. Kapitel 2.3.6, S. 62), weisen die Vorgehensmodelle nach Pasini [Pasi02], [Pasi06] und Wanner [Wann10] sowie die erweiterte Methode nach Ashby [Ashb11] jene Eigenschaft auf (vgl. Kapitel 2.3.8, S. 71). Sie stellen dem Nutzer als Ergebnis den notwendigen Füllgrad zur Funktionserfüllung, innerhalb der vorgegebenen Querschnittsgrenzen zur Verfügung (vgl. Kapitel 2.3.8, S. 71). Während sich der Ansatz nach Pasini [Pasi02], [Pasi06] in seiner Schwerpunktsetzung der Identifizierung der geeignetsten Form, unter Verwendung einer geringen, vorausgewählten Menge an Werkstoffen widmet, lassen sich mit den restlichen Ansätzen beliebig viele Materialien in der Auswahl berücksichtigen, was dem Wunsch einer freien Suche und systematischen Analyse (vgl. Abbildung 2-37, S. 55) am besten entspricht.

Ausgehend von einem Startquerschnitt lässt sich der maßgebliche Unterschied zwischen den Vorgehensweisen nach Ashby [Ashb11] und Wanner [Wann10] durch die entgegengesetzte Füllrichtung des Bauraums, zur Sicherstellung der Funktionserfüllung, bei Variation der Last- und Bauraumrandbedingungen, ausmachen (vgl. Abbildung 2-48, S. 72). Ausgehend von den praxisrelevanten Karosserielastfällen (vgl. Kapitel 2.1.6, S. 21) sehen sich die lasttragenden Komponenten häufig nicht nur Zug- und Druck- sondern auch entsprechenden Knick-, Biege- und Torsionsbelastungen ausgesetzt, weswegen sich die Materialanlagerung an den Außenkanten des verfügbaren Bauraums (vgl. Kapitel 2.3.7.4, S. 68) als vorteilhaft erweist. Jedoch sind die daraus resultierenden, mathematischen Zusammenhänge bislang nur für

runde Hohlprofile und Sandwichstrukturen, für den Fall der Biege- oder Torsionsbeanspruchung formuliert (siehe [Wann10]). Dadurch ist die Einsetzbarkeit innerhalb des Karosserierohbaus stark begrenzt und führt somit zu weiteren Fragstellungen die sich aus der Hauptforschungsfrage **F2** (vgl. S. 3) ableiten lassen:

F2: Wie lassen sich die Auswirkungen eintreffender Anforderungsänderungen auf die Materialauswahl von Fahrzeugstrukturbauteilen in der frühen Entwicklungsphase beschreiben?

F2-a: Wie kann der Ansatz zur systematischen Werkstoffauswahl innerhalb eines begrenzten Bauraums, mit einer Füllstrategie von außen nach innen, für den Einsatz in der frühen Phase der Strukturbauteilentwicklung ertüchtigt werden?

F2-b: Wie lässt sich dieser Ansatz zur systematischen Werkstoffauswahl innerhalb eines begrenzten Bauraums auf alle relevanten Grundbelastungsarten (Zug, Druck, Knicken, Biegung, Torsion) übertragen und sich anhand entsprechender physikalischer Beziehungen mathematisch formulieren?

Nach der Identifizierung der grundlegenden Lastpfade im Rahmen der einleitenden Topologieoptimierung, eignet sich insbesondere die drauffolgende Erstellung eines Balkenmodells zur schnellen und vereinfachten Variantenbildung in der frühen Entwicklungsphase [RPSJ16]. Die gewünschte Zuordnung eines Materials, einer Querschnittsform sowie der notwendigen Wandstärken erfolgt dabei iterativ für jedes Einzelteil (vgl. Kapitel 2.2.1, S. 34).

Geht es an die Festlegung eines Werkstoffs spielt jedoch neben der Funktionstauglichkeit vor allem auch die Wirtschaftlichkeit, unter vielen weiteren Kriterien (vgl. Kapitel 1.2, S. 3) eine entscheidende Rolle (vgl. Kapitel 2.3.1, S. 44). Hierzu werden im Rahmen der frühphasigen Werkstoffauswahl für gewöhnlich die Materialkosten pro Kilogramm verschiedener Werkstoffe für einen Vergleich herangezogen (vgl. Kapitel 2.3.4.2, S. 54). Ein stumpfer Vergleich der Kilopreise berücksichtigt jedoch nicht die Eigenschaftsvorteile von Leichtbauwerkstoffen, die sich insbesondere durch ein günstigeres Verhältnis von bspw. Steifigkeit oder Festigkeit zur Dichte bei gleicher Funktion auszeichnen. Entscheidend ist somit nur die tatsächliche Menge eines Materials die benötigt wird, um die geforderte Bauteilfunktion in einem begrenzten Bauraum zu erfüllen. Allein jene Gewichtsmenge darf in einem transparenten Kostenvergleich verschiedener Materialkonzepte einfließen.

Entsprechende Mehrkosten durch Gewichtseinsparung müssen dabei offengelegt werden, um einer Komponente je nach Leichtbauzone und –strategie (vgl. Kapitel 2.3.7.1, S. 66) sowie unter Berücksichtigung der Fügetechnik (vgl. Kapitel 2.3.7.5, S. 70) den zielführendsten Werkstoff zuzuweisen. Hieraus ergeben sich zwei zusätzliche Fragen aus der Hauptforschungsfrage **F3** (vgl. S. 3):

F3: Wie können alle funktionstauglichen Bauteilkonzepte hinsichtlich der Kenngrößen Kosten und Gewicht transparent miteinander verglichen werden?

F3-a: Wie können sowohl die Bauteilkosten als auch das Bauteilgewicht in der frühen Phase der Strukturbauteilentwicklung, trotz variierender Anforderungen, möglichst exakt ermittelt und für die Auswahl eines Materialkonzepts genutzt werden?

F3-b: Wie lassen sich zulässige Leichtbaumehrkosten im Rahmen eines Vergleichs verschiedener Materialkonzepte frühzeitig berücksichtigen und die Auswirkungen variierender Anforderungen auf die Bauteilkosten darstellen?

Im Falle hoher Belastungen bzw. äußerst angespannter Bauraumverhältnisse kann es zudem vorkommen, dass der Füllgrad sehr hoch ausfällt oder sogar eine vollständige Ausnutzung des Bauraums erfordert (vgl. Kapitel 2.3.8, S. 71). Dies hat wiederum grenzwertige bis nicht umsetzbare Querschnittsformen zur Folge, die in der praktischen Anwendung, mit gängigen Fertigungsprozessen, nicht realisierbar sind und somit im schlimmsten Fall zu einer Fehlantwort des geeignetsten Konstruktionswerkstoffs führen können. Es stellt sich daher noch eine weitere Frage aus der Hauptforschungsfrage **F3** (vgl. S. 3) heraus:

F3-c: Wie können fertigungstechnische Randbedingungen bereits in der frühen Phase der Strukturbauteilentwicklung im Rahmen der Werkstoffauswahl berücksichtigt werden?

Der Einsatz grafischer Hilfsmittel dient grundsätzlich der besseren Nachvollziehbarkeit im Rahmen des Entscheidungsprozesses einer systematischen Materialauswahl (vgl. Kapitel 2.3.8, S. 71). Die vorgestellten Auswahldiagramme gilt es daher auf die geforderten Erweiterungen anzupassen oder gegebenenfalls zusätzliche zur Verfügung zu stellen. Vor diesem Hintergrund lässt sich eine letzte Fragestellung auf Basis der Hauptforschungsfrage **F3** (vgl. S. 3) formulieren:

F3-d: Wie können die Ergebnisse aus einer systematischen Materialauswahl in einem volatilen Anforderungsumfeld grafisch aufbereitet werden, um den Bauteilentwickler bei der Materialentscheidung bestmöglich zu unterstützen?

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es diese Forschungsfragen in den nachfolgenden Kapiteln vollumfänglich zu beantworten und den Nachweis der praktischen Anwendbarkeit in der frühen Phase der Entwicklung anhand eines realen Fahrzeugstrukturbauteils zu erbringen. Die Fragen lassen sich hierzu anhand ihrer thematischen Schwerpunkte (prozess- oder methodenorientiert) voneinander separieren und zur besseren Übersicht in getrennten Kapiteln beantworten (vgl. Abbildung 3-1).

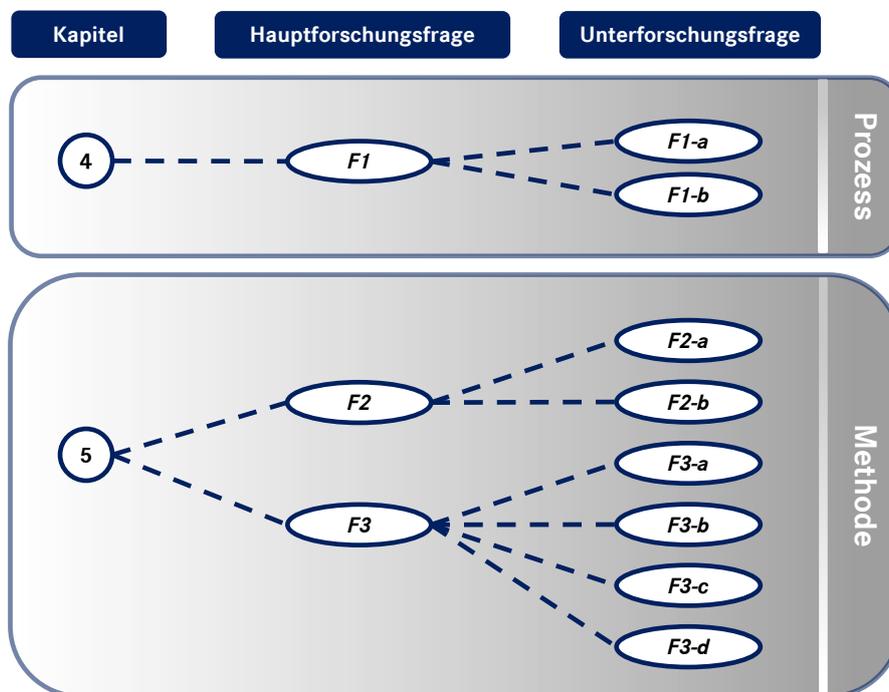


Abbildung 3-1: Gliederung der Forschungsfragen nach Themenschwerpunkt und Kapitel

Die einzige Ausnahme stellt dabei das Übergangskapitel 4.3 dar. Hier verschwimmen die beiden Bereiche aufgrund von ersten Erkenntnissen in der methodischen Vorgehensweise, welche sich entsprechend auf den Einsatzbereich innerhalb des Fahrzeugentwicklungsprozess auswirken.

4 Ansatz zur Prozessintegration einer systematischen Materialauswahl in die Strukturbauteilentwicklung

Da die zeitliche Variation der Anforderungsprofile als fundamentaler Bestandteil der Fahrzeugstrukturbauteilentwicklung angesehen werden kann, ist die Integration einer systematischen Materialauswahl nur dann vollumfänglich realisierbar, wenn sich die klassische Vorgehensweise, unter Einsatz eines stabilen Anforderungsprofils, durch die zusätzliche Verwendung eines variierenden Anforderungsprofils erweitern lässt. Unter Berücksichtigung des allgemeingültigen vierphasigen Auswahlprozesses (vgl. Abbildung 2-36, S. 52) ergibt sich somit auf Basis dieser Neuanforderung, das in Abbildung 4-1 dargestellte spezifische Rahmenwerk eines systematischen Materialauswahlprozess für Fahrzeugstrukturbauteile.

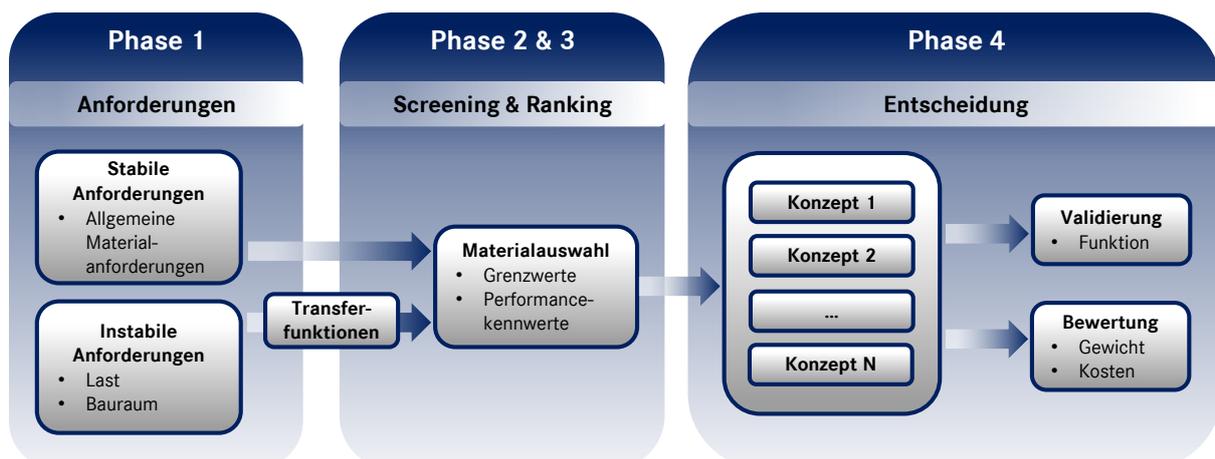


Abbildung 4-1: Materialauswahlprozess zur Einbindung instabiler Anforderungsprofile innerhalb der Fahrzeugstrukturbauteilentwicklung in Anlehnung an Kaiser et. al. [KaWV16]

Ergänzend zur klassischen Vorgehensweise werden neben den stabilen Anforderungen (wie Maximaltemperatur, Mindestdehnung, usw.) insbesondere auch die instabilen Anforderungen (wie Last und Bauraum) entlang des fortlaufenden Entwicklungsprozesses, für die systematische Materialauswahl berücksichtigt. Während sich die stabilen Anforderungen, durch den einfachen Abgleich von Werkstoffkenngrößen direkt für die Materialauswahl verwenden lassen, gilt es die variierenden Last- und Bauraumanforderungen mit Hilfe von Transferfunktionen (vgl. Kapitel 2.3.8) ins Verhältnis zueinander zu setzen (vgl. Kapitel 2.1.7). Auf Basis der resultierenden Grenz- und Performancekennwerte lässt sich daraufhin die Liste interessanter Werkstoffe, bspw. unter Verwendung von Werkstoffauswahlschaubildern

(vgl. Abbildung 2-49, S. 73), drastisch reduzieren. Die übrigen Werkstoffe gilt es anschließend im Rahmen eines Konzeptvergleichs zu bewerten. Um dabei eine einheitliche Vergleichsbasis zu gewährleisten, wird die Funktionserfüllung vorausgesetzt. Die daraus resultierenden Konzepte für jeden Werkstoff gilt es anschließend mit Hilfe eines Kosten- und Gewichtsvergleichs einander gegenüberzustellen. Je nach strategischer Zielsetzung (z.B. zulässige Leichtbaumehrkosten, vgl. Kapitel 2.3.7.1) geht ein Materialkonzept dabei als am geeignetsten hervor.

Im Falle eintretender Änderungen innerhalb des instabilen Anforderungsprofils, muss die Werkstoffauswahl auf Basis dieser neuen Randbedingungen erneut durchgeführt werden. Als Ergebnis geht, je nach Höhe und Richtung der Änderung, ggf. ein anderer Werkstoff als geeigneter hervor.

4.1 Ermittlung und Einbindung der instabilen Anforderungsprofile

Der Schlüssel zur systematischen Bestimmung des geeignetsten Einsatzwerkstoffes eines Fahrzeugstrukturbauteils liegt demnach in der möglichst genauen Erfassung des geltenden Anforderungsprofils, sowohl für den verfügbaren Bauraum (vgl. Kapitel 2.1.5, S. 17) als auch für die anliegende Belastung (vgl. Kapitel 2.1.6, S. 21) einer jeden Komponente, begründet.

Zur Extraktion dieser Bauraum- und Lastanforderungsprofile aus den komplexen Gesamtfahrzeuganforderungen bis auf Komponentenebene, schlägt die Literatur den Einsatz des V-Modells vor (vgl. Kapitel 2.1.3, S. 13). Hinsichtlich der domänenspezifischen Eigenschaften der Bauraum- und Lastanforderungen sowie der Einbindung des vierphasigen Materialauswahlprozesses sind jedoch gewisse Anpassungen dieser allgemein beschriebenen Vorgehensweise notwendig.

4.1.1 Ermittlung und Einbindung der Bauraumanforderungsprofile

Mit dem Wissen, dass die Disziplinen Design und Package entscheidenden Einfluss hinsichtlich der Bauraumzuteilung der Rohbaustrukturkomponenten aufweisen, gilt es deren Interaktion entlang des gesamten Entwicklungsprozesses genauestens zu verfolgen. Hierfür lassen sich, in Anlehnung an den Top-Down-Konstruktionsprozess (vgl. Kapitel 2.1.3, S. 13), unter Einführung einer zusätzlichen Ebene der verschiedenen Disziplinen, die unterschiedlichen Stufen der Detaillierung der Bauraumeinflussfaktoren darstellen (Abbildung 4-2).

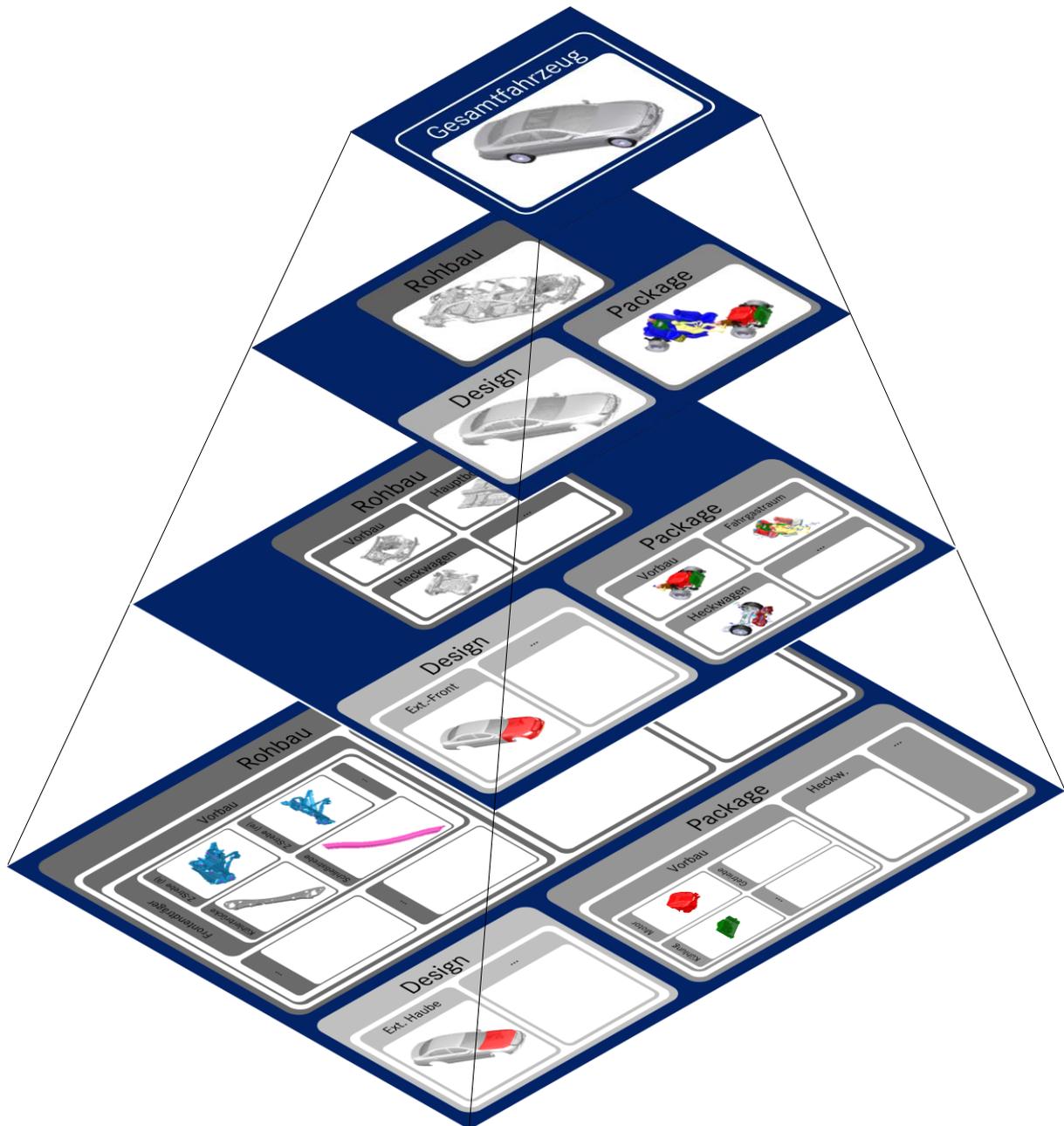


Abbildung 4-2: Top-Down-Darstellung der Bauraumeinflussfaktoren je Disziplin in verschiedenen Detaillierungsebenen

Ausgehend vom Gesamtfahrzeug gilt es den verfügbaren Bauraum auf die drei Disziplinen Rohbau, Design und Package sinnvoll aufzuteilen. Dabei repräsentiert die Domäne Rohbau die Gesamtheit aller zu entwickelnden Strukturbauteile. Eine weitere Detaillierung jeder dieser drei Disziplinen führt zu einer Betrachtung auf Systemebene. Diese Vorgehensweise lässt sich solange durchführen bis auf unterster Ebene nur noch einzelne Komponenten beschrieben werden (vgl. Netzdiagramme, Abbildung 2-9, S. 18). Je nach Komplexität ist die beliebige Erweiterung mehrerer Teilsystem- und Modulebenen zulässig, um ein System Schritt für Schritt bis auf Komponentenebene zu zergliedern.

Die Übertragung dieser Darstellung auf die Logik des V-Modells (vgl. Kapitel 2.1.3, S. 13) ermöglicht die gewünschte, deduktive Unterteilung der komplexen Bauraumanforderungen von Gesamtfahrzeugebene bis auf Einzelteilebene und liefert somit den ersten Teil der notwendigen Eingangsgrößen zur Integration einer systematischen Materialauswahl in den Entwicklungsprozess von Fahrzeugstrukturbauteilen (Abbildung 4-3).

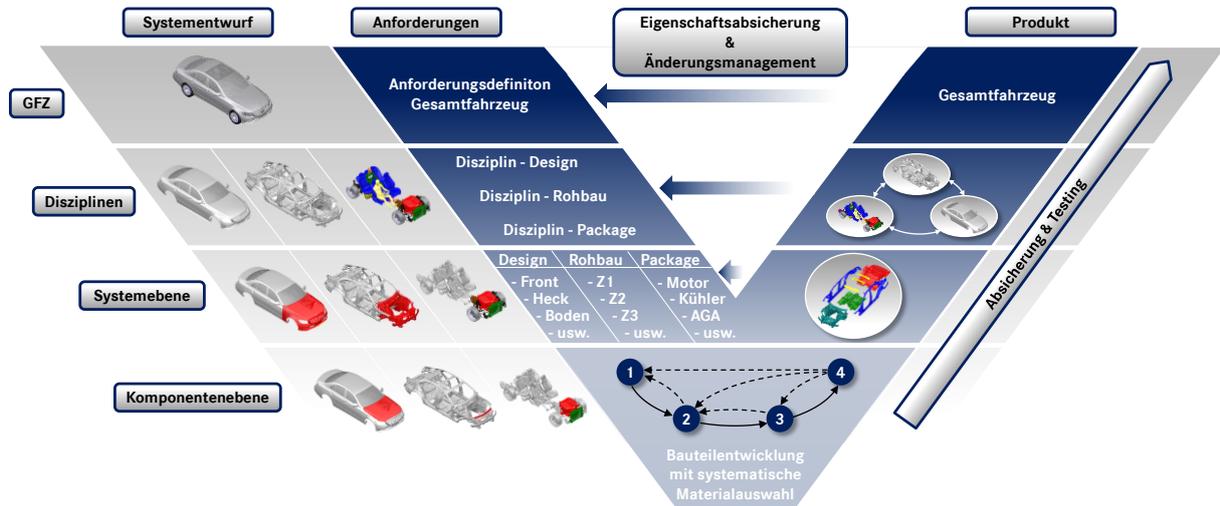


Abbildung 4-3: Deduktive Vorgehensweise zur Ermittlung des verfügbaren Komponentenbauraums

Gemeinsam mit den Lastanforderungen (siehe Kapitel 4.1.2, S. 84) liefert der Durchlauf des vierphasigen Auswahlprozesses (vgl. Abbildung 4-1, S. 81), für jede Strukturkomponente des Fahrzeugrohbaus, den geeignetsten Einsatzwerkstoff als Ergebnis. Neben der schrittweisen Absicherung und Funktionsüberprüfung auf System-, Disziplin- und Gesamtfahrzeugebene (Bottom-Up) auf Basis dieser Materialvorschläge, gilt es bspw. zusätzlich die Möglichkeiten der Verbindungstechnik (vgl. Kapitel 2.3.7.5, S. 70) auf den verschiedenen Detaillierungsebenen zu prüfen. Dies kann unter Umständen zur fertigungsbedingten Nachbesserung der Werkstoffeignung eines Strukturbauteils führen. Die Wahl wird dementsprechend auf denjenigen Werkstoff angepasst, welcher sich zusätzlich auch mit den umliegenden Bauteilen verbinden lässt. Dieser Prozess der Eigenschaftsabsicherung erfordert häufig eine Anpassung der Bauraumverteilung und mündet daher in einer iterativen Vorgehensweise zur Steigerung des Produktreifegrads.

4.1.2 Ermittlung und Einbindung der Lastanforderungsprofile

Analog zur Vorgehensweise bei der Bauraumermittlung jeder einzelnen Strukturbauteilkomponente, erfolgt die Zergliederung der Lastanteile aus den verschiedenen

Gesamtfahrzeuglastfällen (vgl. Kapitel 2.1.6, S. 21) ebenfalls mit Hilfe des V-Modells (Abbildung 4-4).

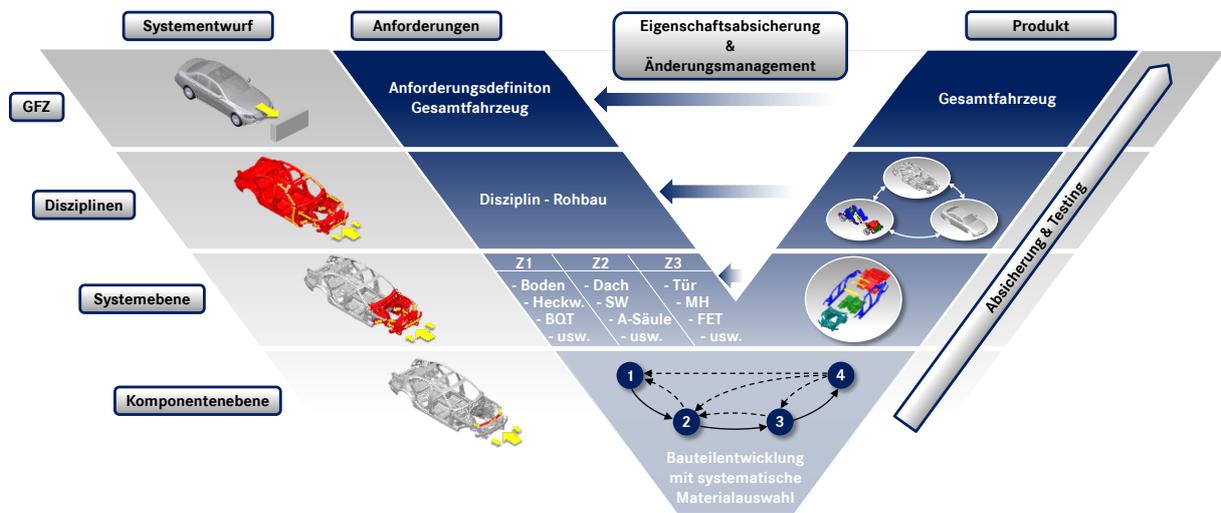


Abbildung 4-4: Deduktive Vorgehensweise zur Ermittlung der kritischen Komponentenbelastung

Der entscheidende Unterschied zur Ermittlung der Komponentenbauräume liegt darin begründet, dass dieser Vorgang für jeden Lastfall separat durchgeführt werden muss, um die unterschiedlichen Arten und Ausprägungen der Belastungen eines Bauteils bestimmen zu können.

Auf Basis ähnlicher Vorgängermodelle lassen sich erste Anhaltswerte für die Komponentenbelastung in der frühen Phase durch die Übersetzung der äußeren Kräfte F_a und Momente M_a in die auslegungsrelevanten, kritischen Schnittkräfte F_i und –momente M_i ableiten (Abbildung 4-5).

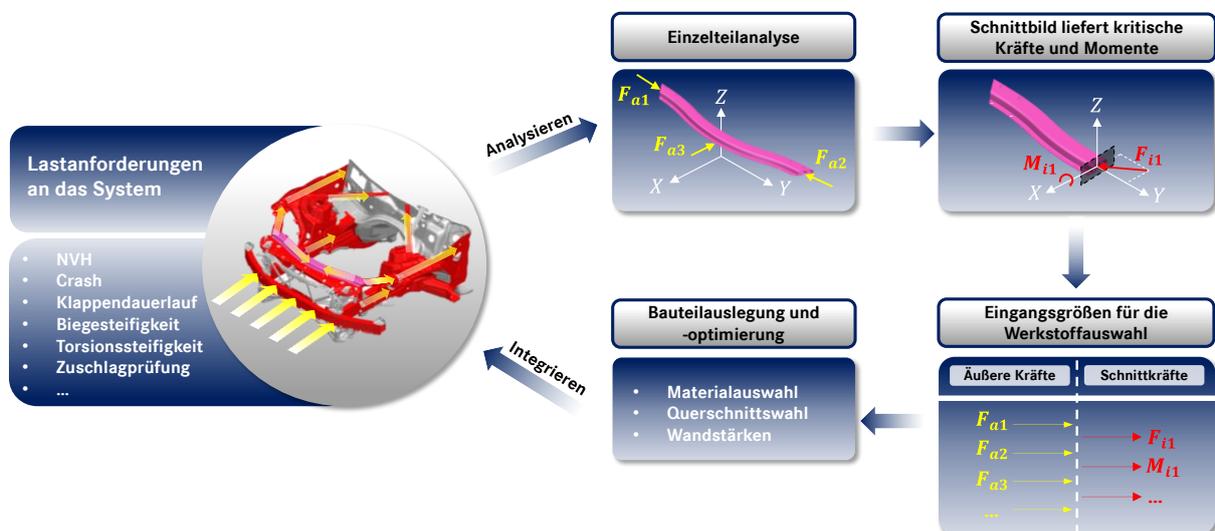


Abbildung 4-5: Iterative Bestimmung der Komponentenlasten

Im weiteren Entwicklungsverlauf ist es möglich, diese groben Startbedingungen durch modellspezifische Anpassungen der Materialien, Querschnitte und Wandstärken, aufgrund der gegenseitigen Abhängigkeit innerhalb eines Lastpfades (vgl. Flussdiagramm, Abbildung 2-14, S. 22), fahrzeugspezifisch iterativ zu detaillieren.

4.2 Versionierung der Anforderungsprofile

Die Ermittlung der Bauraum- und Lastanforderungsprofile bilden die Basis für eine systematische Materialauswahl und damit einhergehende anforderungsgerechte Bauteilauslegung. Jedoch führen die angesprochenen Änderungszyklen zu fortwährenden Schwankungen der Randbedingungen. Diese Tatsache birgt somit die Gefahr, dass die Nachvollziehbarkeit der Materialentscheidung entlang der Bauteilentwicklung verloren geht. Aus diesem Grund bietet die fortlaufende Versionierung der Bauraum- und Laständerungen, passend zum jeweiligen Geometriestand der Komponente, die Chance aus den gesammelten Erkenntnissen einen Zielkorridor (ΔF_i bzw. ΔM_i) für anstehende Neukonstruktionen abzuleiten und damit die Aussagegüte einer Materialauswahl in der frühen Phase der Strukturbauteilentwicklung zu erhöhen. Abbildung 4-6 beschreibt diese Vorgehensweise exemplarisch anhand von vier willkürlich gewählten Zeitpunkten entlang des Entwicklungsprozesses einer ausgewählten Strukturkomponente.

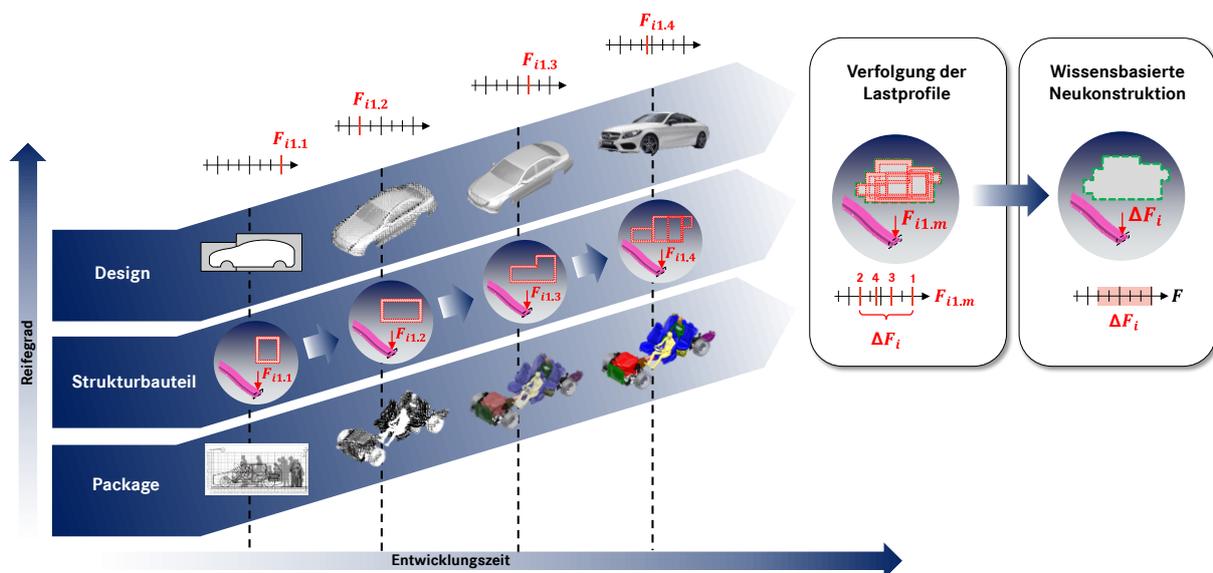


Abbildung 4-6: Versionierung der instabilen Anforderungsprofile entlang der Strukturbauteilentwicklung

Neben dem Fortschritt der geometrischen Detaillierung entlang der Entwicklungszeit, ist ebenso die Variation der eingehenden kritischen Last $F_{i1.1} - F_{i1.4}$ zu erkennen. Durch die

Überlagerung aller gesammelten Stände der Bauraum- und Lastanforderungen nach Abschluss der Serienentwicklungsphase, lassen sich die resultierenden Grenzrandbedingungen insbesondere für die Werkstoffauswahl bei anstehenden Neuentwicklungen in einem vergleichbaren Umfeld nutzen und fungieren somit als Startbereich.

4.3 Vereinfachte Annahmen und resultierender Einsatzbereich

Gerade in der frühen Phase der Entwicklung, in der die Rahmentopologie und Querschnittsformen festgelegt werden (vgl. Kapitel 2.2.1, S. 34) sowie das Design (vgl. Kapitel 2.2.2, S. 38) und Package (vgl. Kapitel 2.2.3, S. 41) noch hohen Schwankungen unterliegen, ist die vereinfachte Formulierung des verfügbaren Bauraums einer Strukturkomponente als Rechteckprofil (Abbildung 4-7), mit der Höhe H , der Breite B und der Länge L , durchaus üblich (Abbildung 4-7).

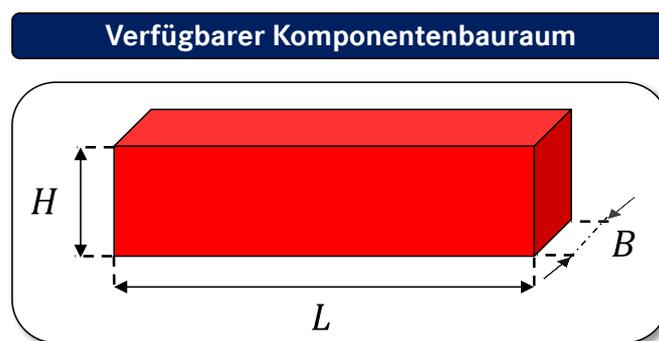


Abbildung 4-7: Vereinfachte Formulierung des verfügbaren Komponentenbauraums in der frühen Phase der Strukturbauteilentwicklung

Im selben Zuge lassen sich die kritischen Belastungsarten der auszubildenden Strukturkomponenten, innerhalb dieser Bauraumgrenzen, anhand der relevanten Grundbelastungsfälle der Technischen Mechanik beschreiben (Abbildung 4-8). Erfahrungsgemäß lässt sich hierbei für jede Komponente eine Hauptbelastungsart (vgl. Kapitel 2.3.6, S. 62) bestimmen. Sollte selbige einmal nicht eindeutig definiert werden können, so muss die Überprüfung aller in Frage kommenden Lastfälle erfolgen. Über diesen Umweg lässt sich anschließend, anhand eines Vergleichs der Ergebnisse bei gleichem Einsatzwerkstoff und identischer Bauteilgeometrie, der kritischste Lastfall für die vereinfachte Lastannahme in der frühen Phase identifizieren.

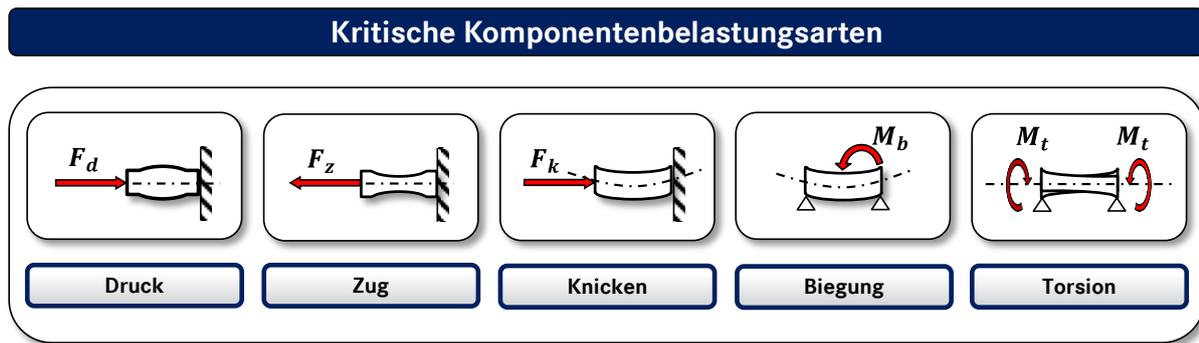


Abbildung 4-8: Vereinfachte Berücksichtigung der kritischen Komponentenlastenfälle in der frühen Phase der Strukturbauteilentwicklung

Ausschlaggebend für die Höhe der Komponentenbelastung ist dabei neben einer wirkenden Kraft F oder einem Moment M , im Verhältnis zur vorherrschenden Bauraumsituation und zulässigen Nachgiebigkeit, auch der Lasteintritt sowie die Bauteillagerung, aus der sich die Art des Lastfalls ergibt. Jener Belastung gilt es, durch die Wahl eines geeigneten Werkstoffs sowie dessen geschickte Verteilung innerhalb des maximal zur Verfügung stehenden Querschnitts, entgegen zu wirken.

Während jener Materialverteilung bei eintretenden Zugbelastungen im Sinne des Formleichtbaus (vgl. Kapitel 2.3.7.4) keine Relevanz zukommt, ist bei vorherrschenden Biege-, Torsions- und Druckbelastungen (im Grenzfall „Knicken“) eine Werkstoffanlagerung an den Außenkanten des verfügbaren Bauraums von Vorteil (vgl. Kapitel 2.3.8) und ermöglicht dadurch einen effizienten Materialeinsatz. Wanner [Wann10] berücksichtigt diesen Aspekt in der Formulierung seiner Transferfunktionen, zur Ermittlung der geeignetsten Werkstoffe sowie den dazugehörigen Wandstärken (vgl. Kapitel 2.3.8). Jedoch nur für runde Hohlprofile.

Um herauszufinden welche Potentiale sich durch die Berücksichtigung einer rechteckigen Bauraumbegrenzung (vgl. Abbildung 4-7, S. 87) sowie einer Bauraumfüllstrategie von außen nach innen ergeben, sollen fortfolgend die bestehenden Ansätze aus der Literatur mit jenem eigenen Ansatz gegenübergestellt werden. Als Vergleichsbasis für die verschiedenen Ansätze dienen dabei die im CAD gemessenen Werte für die wirksame Fläche A im Falle einer Zug- oder Druckbelastung sowie das Flächenträgheitsmoment I_y bzw. I_z bei vorherrschendem Knickverhalten oder eintretender Biegebelastung eines Längsträgerquerschnitts aus einem bestehenden Fahrzeug (Abbildung 4-9). Der exakte Fahrzeugtyp soll an dieser Stelle aus Gründen des Know-How-Schutzes der Daimler AG nicht offengelegt werden.

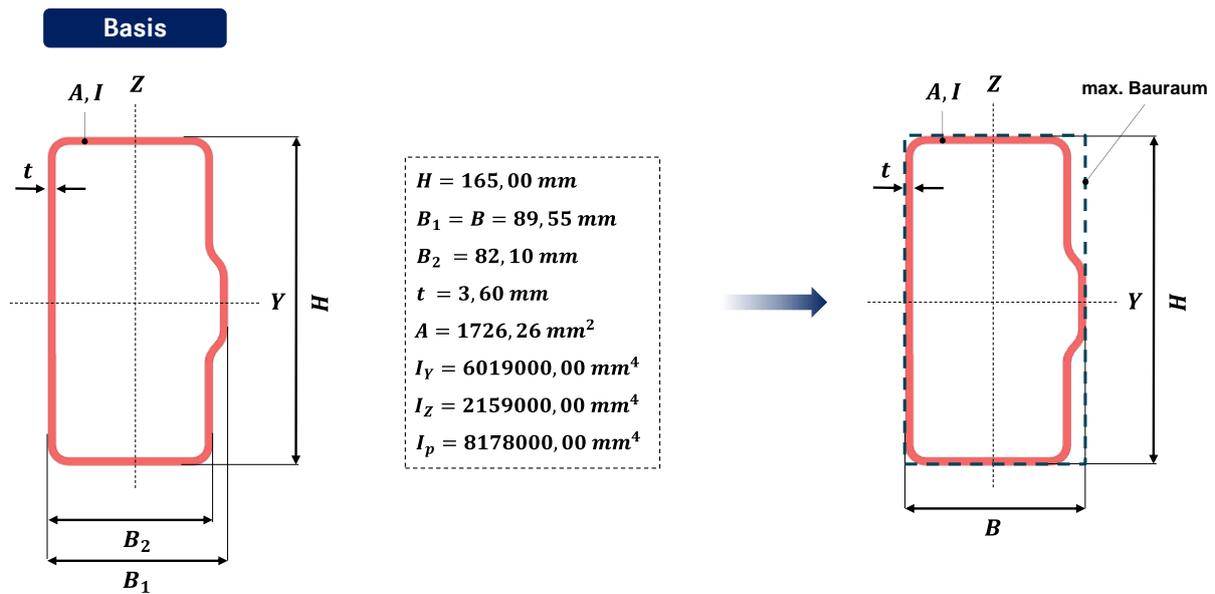


Abbildung 4-9: Gemessene Werte eines realen Längsträgerquerschnitts als Basis für den Vergleich der verschiedenen Ansätze zur vereinfachten Abbildung

Für den Fall der Torsionsbelastung ist dieser Vergleich der verschiedenen Ansätze jedoch nicht ohne weiteres durchführbar. Dies ist darin begründet, dass das polare Flächenträgheitsmoment I_p nur für den Fall eines runden Hohlprofils mit konstanter Wandstärke und kleinen elastischen, aber niemals plastischen Verformungen dem Torsionsträgheitsmoment I_t gleichzustellen ist. Bei jeglichen anderen Geometrien werden durch das anliegende Torsionsmoment neben den Schubspannungen auch Normalspannungen im Bauteil hervorgerufen, was sich in entsprechenden Verwölbungseffekten widerspiegelt, welche sich nur numerisch nachvollziehen lassen. Daraus abgeleitet gibt es bspw. für rechteckige Hohl- und Vollprofile Therme (vgl. [RiOD03]) die dieses Verhalten näherungsweise abbilden. Wie nah diese Ergebnisse jedoch wiederum im Vergleich zu den numerisch ermittelten Werten eines sehr viel komplexeren, realen Querschnitts (wie z.B. der Längsträgerquerschnitt) übereinstimmen, kann an dieser Stelle nicht geklärt werden.

Für alle anderen Belastungsarten lassen sich hingegen, unter Berücksichtigung des maximalen Bauraums $B_1 = B$ zu H (vgl. Abbildung 4-9), die verschiedenen Ansätze zur geometrisch vereinfachten Abbildung sowie der dazugehörigen Füllstrategie miteinander vergleichen. Die hierzu notwendigen Grundgleichungen erhält man dabei aus klassischen Standardwerken der Technischen Mechanik wie z.B. Böge [BöB015] (Abbildung 4-10).

| | Kaiser | Wanner | Ashby |
|-------------------|--|---|---|
| Geometrie | Rechteckprofil | Rundprofil | Rechteckprofil |
| Füllstrategie | Außen nach innen | Außen nach innen | Innen nach außen |
| | Flächen(-trägheitsmomente) $A(t) / I(t)$ | Flächen(-trägheitsmomente) $A(t) / I(t)$ | Flächen(-trägheitsmomente) $A(t) / I(t)$ |
| Zug / Druck | $A = B H - (B - 2 t)(H - 2 t)$ | $A = \pi (R^2 - r^2)$ | $A = B H$ |
| Knicken / Biegung | $I_{k/b} = \frac{B H^3}{12} - \frac{(B - 2 t)(H - 2 t)^3}{12}$ | $I_{k/b} = \frac{\pi}{4} (R^4 - r^4)$ | $I_{k/b} = B H^3$ |

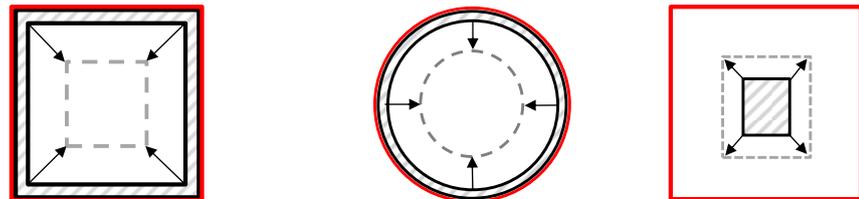


Abbildung 4-10: Vergleich der verschiedenen geometrischen Ansätze und Füllstrategien unter Verwendung von Ashby [Ashb11], Böge [BöBö15] und Wanner [Wann10]

Wendet man diese verschiedenen Ansätze auf den zuvor vorgestellten Querschnitt der Längsträgerstruktur an, ergeben sich folgende Abbilder (Abbildung 4-11) der geometrischen Näherungen.

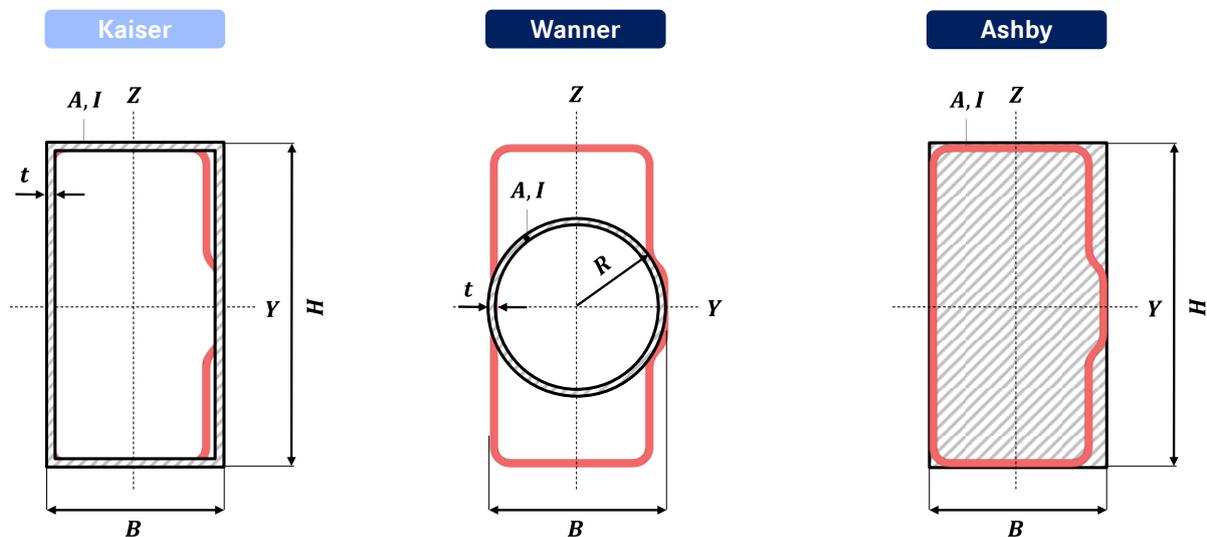


Abbildung 4-11: Anwendung der verschiedenen geometrischen Ansätze und Füllstrategien auf einen realen Längsträgerquerschnitt

Eine erste visuelle Prüfung lässt bereits erahnen, dass der Ansatz des rechteckigen Hohlprofils sowie die Füllstrategie von außen nach innen die realitätsgetreueste Vereinfachung darstellt. Diese Vermutung bestätigt sich im Rahmen des Abgleichs der rechnerisch ermittelten Ergebnisse für die Flächen (Abbildung 4-12) und Flächenträgheitsmomente (Abbildung 4-13),

unter Verwendung der in Abbildung 4-10 enthaltenen Formelsätze für die verschiedenen Varianten.

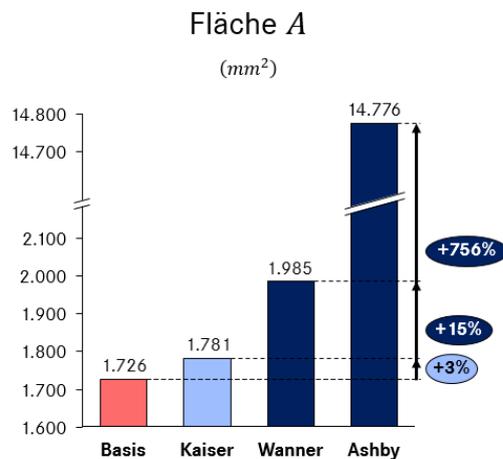


Abbildung 4-12: Rechnerische Vergleich der Flächen der verschiedenen Ansätze

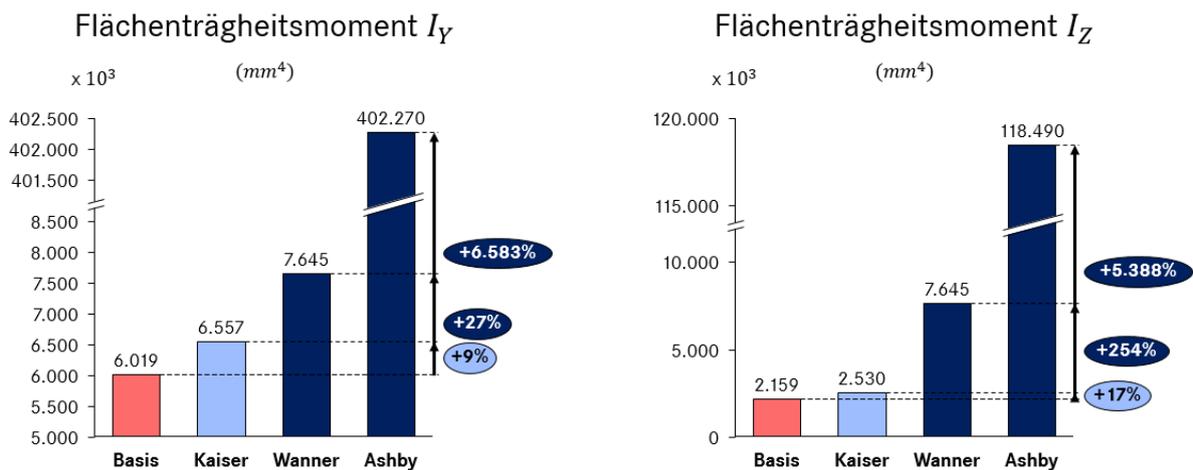


Abbildung 4-13: Rechnerische Vergleich der Flächenträgheitsmoment der verschiedenen Ansätze

Betrachtet man die Auswertung der Flächen (Abbildung 4-12) so lässt sich eine minimale Abweichung von 3% zwischen dem Basiswert und dem eigenen Ansatz feststellen. Indessen ist unter der Befolgung der Strategie nach Wanner eine Ungenauigkeit von 15% zu erwarten. Von jenen beiden weit abgeschlagen befindet sich die Abbildung nach Ashby mit 756%. An dieser Stelle ist berechtigterweise die Fragestellung zulässig, ob dieser hohe Wert der Abweichung wirklich der Realität entspricht. Betrachtet man die Fakten so ist bei vorherrschender Zugbelastung bspw. nur die wirksame Fläche von entscheidender Bedeutung. Die räumliche Anordnung der Materie ist in diesem Fall zweitrangig. Nach der Strategie von Ashby ließen sich somit in den meisten Fällen sogar kompaktere Bauweisen

innerhalb des verfügbaren Bauraums realisieren, mit denen dann auch die hohen Werte für die Abweichung hinfällig wären. Die direkte Abbildung der Auswirkungen auf die Bauteilstruktur, als Resultat auftretender Änderungen des maximal verfügbaren Bauraums, ließe sich in diesem Fall jedoch nicht mehr darstellen.

Berücksichtigt man jedoch die gegebenen Randbedingungen in der industriellen Praxis, so stellen rein auf Zug belastet Komponenten innerhalb der Karosseriestruktur eine eher selten auftretende Ausnahme dar (vgl. Kapitel 2.3.8, ab S.71). Demnach ist die Auswertung der Flächenträgheitsmoment (Abbildung 4-13) für den vorliegenden Anwendungsbereich als ausschlaggebenderes Kriterium zur Bewertung der Ansatzbeurteilung zu verstehen. Ein Blick auf jene Diagramme zeigt, dass mit dem eigenen Ansatz in diesem Fall, verglichen zur realen Bauteilgeometrie (Basis), bei eintretender Belastung um die Y-Achse mit einer Abweichung von 9% und um die Z-Achse mit 17%, die genaueste Abbildung des Längsträgerquerschnitts möglich ist. Während der Abstand der Abweichung mit der Strategie nach Wanner um die Y-Achse mit 27% noch relativ gering ausfällt, so offenbart sich das Hauptproblem dieses Ansatzes bei der Analyse der Abweichung um die Z-Achse (254% zur Basis). Jene Ungenauigkeit lässt sich insbesondere darauf zurückführen, dass mit zunehmender Veränderung des maximalen Bauraums von einer quadratischen Form hin zu einem Rechteck, die Abweichung des runden Hohlprofils zunimmt. Grund hierfür ist die notwendige Einhaltung des kleinsten bauraumbegrenzenden Parameters mit dem Rohrdurchmessers, um die Bauraumgrenzen nicht zu verletzen. In diesem Fall können Auswirkungen von Änderungen des maximalen Bauraums nur für den kleineren der beiden Parameter (Höhe H oder Breite B) realisiert werden, während mit dem eigenen Ansatz die Berücksichtigung beider möglich ist. Der Ansatz nach Ashby bedingt zur Berücksichtigung der Bauraumänderungen, aufgrund der Füllstrategie von innen nach außen, immer einen voll ausgefüllten Bauraum und weicht somit konsequenterweise in beiden Fällen der Rotationsachse, drastisch von den restlichen Konzepten zur vereinfachten Bauteilabbildung ab (vgl. Abbildung 4-13).

Diese eingehende Analyse eines Querschnitts aus einem bestehenden Rohbau bestätigt die aufgestellte Hypothese bzgl. der Zulässigkeit einer vereinfachten Abbildung der gesamten Fahrzeugstruktur durch rechteckige Hohlprofile (bspw. durch Balkenmodelle, vgl. [RPSJ16] S. 36), zur bestmöglichen Bauraum-, Material- und Wandstärkeverteilung in der frühen Phase der Strukturbauteilentwicklung (Abbildung 4-14).

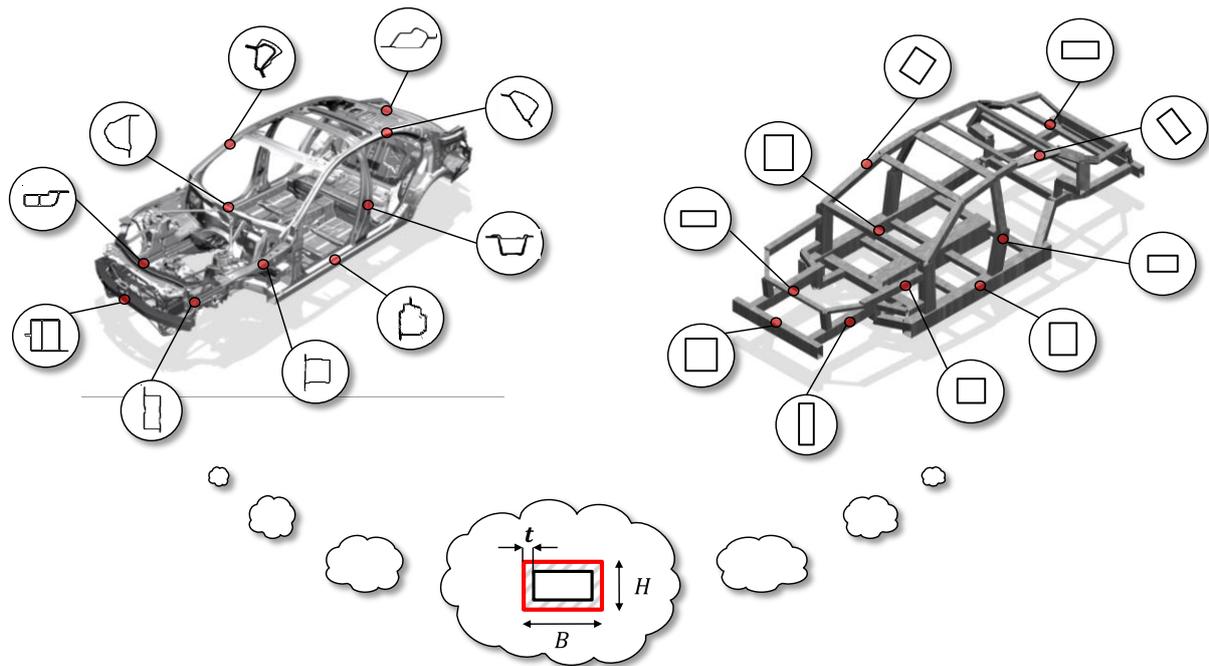


Abbildung 4-14: Abstraktion eines Karosseriemodells auf Basis einfacher Hohlprofile zur Bestimmung der idealen Bauraum-, Material- und Wandstärkenverteilung in der frühen Phase der Strukturbauteilentwicklung

Diese reduzierte Modellbildung bietet den Vorteil viele Varianten, welche zwangsweise aus dem hohen Änderungsaufkommen des Designs (vgl. Kapitel 2.2.2, S. 38) und des Packages (vgl. Kapitel 2.2.3, S. 41) in der frühen Phase resultieren, zu betrachten und deren Auswirkung auf jede einzelne Strukturkomponente zu simulieren. Dadurch wird jedoch auch die Einsetzbarkeit auf die Konzeptentwicklungsphase begrenzt (Abbildung 4-15), da zur detaillierten Auslegung in der Regel komplexere Formen und Querschnitte benötigt werden und sich die auftretenden Lastfälle auch nicht mehr durch statische Ersatzlasten abbilden lassen.

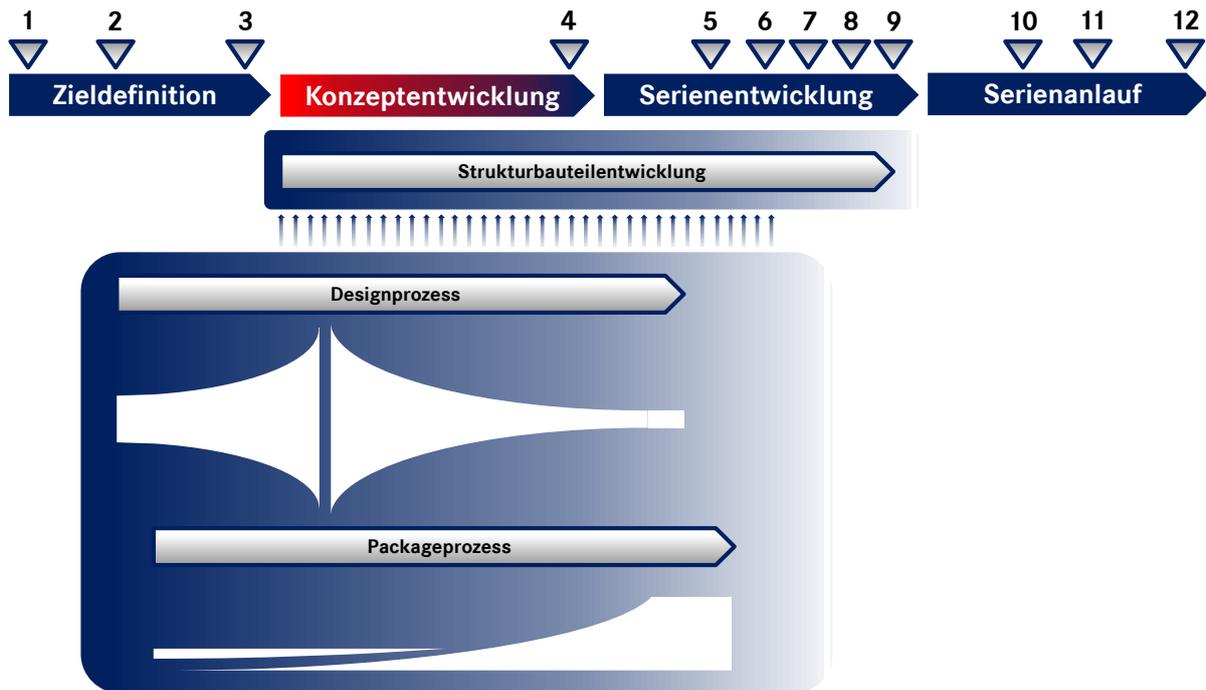


Abbildung 4-15: Einordnung des Einsatzbereichs der systematischen Materialauswahlmethode

5 Ansatz zur systematischen Materialauswahl von Fahrzeugstrukturbauteilen in der frühen Phase

Während in Kapitel 4 der zeitliche Einsatzbereich geklärt sowie die vereinfachte Abbildung der Strukturbauteilgeometrie im frühen Entwicklungsstadium ermittelt werden konnte, soll im Rahmen des folgenden Abschnitts die Herleitung des Vorgehensmodells zur systematischen Materialauswahl erfolgen. Hierzu ist im ersten Schritt sicherzustellen, dass nur jene Werkstoffe in der engeren Auswahl Berücksichtigung finden, welche auch die Funktionsanforderungen, unter der Verwendung herstellbarer Wandstärken, vollumfänglich erfüllen. Erst darauffolgend kann die Werkstoffentscheidung anhand der strategischen Faktoren Kosten und Gewicht, innerhalb eines volatilen Anforderungsprofils, final getroffen werden.

5.1 Formulierung der Randbedingungen

Nach der erfolgten Identifizierung des rechteckigen Hohlprofils als geeignetste, vereinfachte, geometrische Abbildung von Fahrzeugstrukturbauteilen in der frühen Phase der Entwicklung (vgl. Abbildung 4-14, S. 93), gilt es im nächsten Schritt die zugehörigen Transferfunktionen herzuleiten, um die Ermittlung des Füllbedarfs eines gegebenen Bauraums mit einem beliebigen Werkstoff zu ermöglichen (vgl. Abbildung 4-1, S. 81). Die mathematischen Verhältnisse aus verfügbarem Bauraum und eingehender Last lassen sich anhand der Belastungsgleichungen (BG) der Technischen Mechanik (wie bspw. in Böge [BöBö15]) für die verschiedenen Grundbelastungsarten (Abbildung 4-8, S. 88) und Zielgrößen (vgl. 2.1.4, S. 15) aus der Literatur (z.B. [Ashb05]) entnehmen und nach den selektionsrelevanten Werkstoffkennwerten (WK) E , G , $\sigma_{z/d}$, σ_b und τ_t separieren. Zudem ist eine Ermittlung der material- und belastungsabhängigen Wandstärke t nur durch die Auflösung der Belastungsgleichungen $BG(A)$ bzw. $BG(I)$, durch die detaillierte Beschreibung der Flächen A und Trägheitsmomente I , in Abhängigkeit der selbigen Variablen (also: $A(t)$ bzw. $I(t)$) möglich (Abbildung 5-1).

Die größte Schwierigkeit stellt dabei die Formulierung des Torsionsverhaltens rechteckiger Hohlprofile dar. Die bislang genauesten Ansätze für das Trägheits- und Widerstandsmoment, welche auch die Approximation dickwandiger Profile ermöglichen, liefert aktuell

Marshall [Mars72], [RiOD03]. Sie erweisen sich daher für die Beschreibung des mechanischen Verhaltens eines rechteckigen Hohlprofils mit variierenden Wandstärken als am geeignetsten.

| | Belastungsgleichungen $BG(A) / BG(I)$ | | Flächen(-trägheitsmomente) $A(t) / I(t)$ |
|---------------|---|---|--|
| | Steifigkeit | Festigkeit | – |
| Zug/ Druck | $E = \frac{F_{z/d} L}{A \Delta L}$ | $\sigma_{z/d} = \frac{F_{z/d} S_v}{A}$ | $A = (B H - (B - 2 t)(H - 2 t))$ |
| Knicken | $E = \frac{F_k S_v \beta^2 L^2}{\pi^2 I_k}$ | – | $I_k = \frac{B H^3}{12} - \frac{(B - 2 t)(H - 2 t)^3}{12}$ |
| Biegung | $E = \frac{F_b L^3}{\delta C I_b}$ | $\sigma_b = \frac{M_b H S_v}{2 I_b}$ | $I_b = \frac{B H^3}{12} - \frac{(B - 2 t)(H - 2 t)^3}{12}$ |
| Torsion | $G = \frac{M_t L}{\varphi I_t}$ | $\tau_t = \frac{M_t S_v (t (2 (B + H - 2 t)) + 2 ((B - t)(H - t)))}{2 (B + H - 2 t) I_t}$ | $I_t = \frac{t^3 (2 (B + H - 2 t))}{3} + \frac{4 ((B - t)(H - t))^2}{2 (B + H - 2 t)} t$ |

Abbildung 5-1: Aufbereitung der notwendigen Grundgleichungen zur Herleitung der Transferfunktionen für rechteckige Hohlprofile anhand der verschiedenen Lastfälle und Zielgrößen in Anlehnung an Böge [BöBö15] und Marshall [Mars72], [RiOD03]

Die Belastungsgleichungen (vgl. Abbildung 5-1) führen, bei gegebenem Anforderungsprofil, hinsichtlich des verfügbaren Bauraums sowie Höhe und Art der Bauteilbelastung (rechte Seite der BG) zu einer notwendigen Mindestvoraussetzung an die Steifigkeit oder Festigkeit eines zu wählenden Werkstoffs (linke Seite der BG). Diese gilt es entsprechend mit den zulässigen Werkstoffkennwerten einer beliebigen Werkstoffdatenbank abzugleichen. Die Anwendbarkeit der Vorgehensweise zur systematischen Materialauswahl ist somit unabhängig von der Menge der Werkstoffe und Art der Werkstoffdatenbanken, solange die lastfallrelevanten Kennwerte (vgl. Kapitel 2.3.6) enthalten sind. Je nach Branche und Unternehmen weisen solche praktischen Datenbanken, im Vergleich zu wissenschaftlichen, nur noch eine geringe, vorausgewählte Menge an Werkstoffen auf, welche sich im industriellen Gebrauch bereits bewährt haben. Hintergrund hierfür sind häufig branchenspezifische, stabile Anforderungen (vgl. Kapitel 4), welche das Feld interessanter Werkstoffe von Beginn an bereits stark dezimiert. Um im Rahmen dieser Arbeit eine firmenunabhängige Darstellung des methodischen Ablaufs zu gewährleisten sowie firmenspezifisches Know-How zu schützen, wird bei fortfolgendem Bedarf die offen zugängliche Werkstoffdatenbank des CES-Selector[®] [WWW17] verwendet, welche ein breites Spektrum an Kennwerten für verschiedenste Werkstoffgruppen bereit hält. Die Visualisierung erfolgt zudem aus Gründen der Übersichtlichkeit mit einer geringen Anzahl an Werkstoffen

(Abbildung 5-2) innerhalb der bekannten doppelt-logarithmischen Auswahldiagramme (vgl. Abbildung 2-38, S. 56).

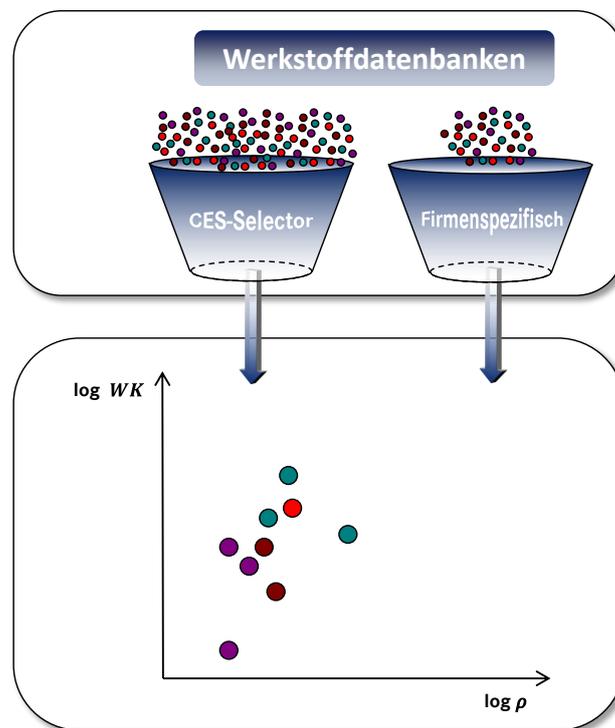


Abbildung 5-2: Schematische Darstellung der Verwendung beliebiger Werkstoffdatenbanken als Eingangsgrößen für die systematische Werkstoffauswahl

Im Sinne der Allgemeingültigkeit wird neben der Beschriftung der Abszisse mit der Dichte ρ , je nach Art der eintretenden Bauteilbelastung, die Ordinate mit dem entsprechenden Werkstoffkennwert (WK) abgetragen.

5.2 Beschreibung des Bauraumfüllverhaltens

Um dem Ziel, der Ermittlung des geeignetsten Werkstoffs sowie der zugehörigen Wandstärke, näher zu gelangen, müssen im nächsten Schritt die Terme für die Flächen $A(t)$ bzw. Trägheitsmomente $I(t)$ in die Belastungsgleichungen $BG(A)$ bzw. $BG(I)$ (Abbildung 5-1, S. 96) der rechteckigen Hohlprofile eingesetzt werden, um eine Formulierung der Belastungsgleichung in Abhängigkeit zur Wandstärke (also $BG(t)$) zu erhalten. Als erste Mindestanforderung an die Materialien einer beliebigen Werkstoffdatenbank ist die Funktionserfüllung bei gleichzeitiger Annahme eines vollständig ausgefüllten Bauraums notwendig. Werkstoffe die selbst bei voller Bauraumausnutzung der eintreffenden Belastung nicht standhalten können, sind somit für den Anwendungsfall ungeeignet und werden erst

wieder im Falle einer Anforderungsänderung interessant, die zu einer Entspannung des bisherigen Last-Bauraum-Verhältnisses führt. Abhängig vom Verhältnis der Kantenlängen der Bauraumgrenzen lassen sich, unter der Annahme einer konstanten Profilwandstärke t , bei einer Bauraumfüllung von außen nach innen, zwei unterschiedliche Füllrichtungen zur korrekten Beschreibung der vollständigen Bauraumausfüllung identifizieren (Abbildung 5-3).

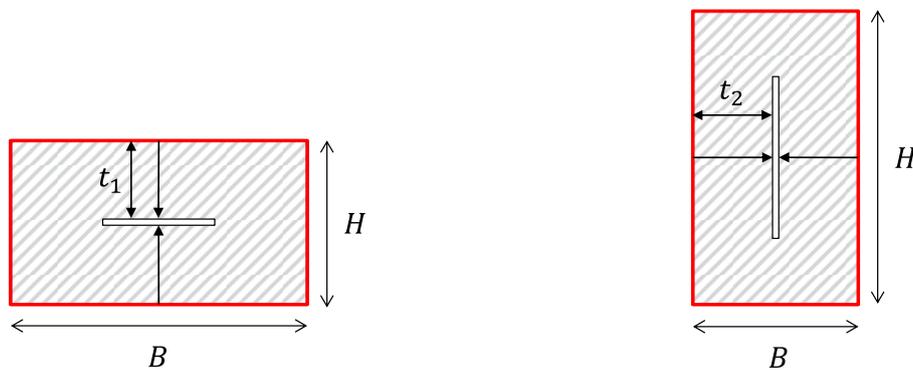


Abbildung 5-3: Die zwei Füllrichtungen eines rechteckigen Hohlprofils – vertikal (links) / horizontal (rechts)

Dies erfordert eine automatisierte Abfrage-logik des Bauraumfüllverhaltens, um die Einsetzbarkeit jener Vorgehensweise auf beliebig große Werkstoffdatenbanken, trotz variierender Seitenverhältnisse, sicherstellen zu können.

Für den Fall einer vertikalen Profilfüllung lässt sich eine vollständige Bauraumausfüllung mit

$$t_1 = \frac{H}{2} \quad (5-1)$$

beschreiben, während die horizontale Füllrichtung eine Wandstärke von

$$t_2 = \frac{B}{2} \quad (5-2)$$

erfordert. Im Hinblick auf eine skriptbasierte Automatisierung lassen sich diese beiden Terme durch Einführung des Seitenverhältnisses $Q = \frac{B}{H}$ zu

$$\frac{t_1}{H} = \frac{1}{2} \quad (5-3)$$

und

$$\frac{t_2}{H} = \frac{Q}{2} \quad (5-4)$$

vereinfachen.

Die gleichzeitige Umstellung der Belastungsgleichungen $BG(t)$ durch Einführung des Seitenverhältnisses sowie der Darstellung des Füllverhältnisses $\frac{t}{H}$ führen zu den detaillierten Formulierungen der Gleichungen $BG\left(\frac{t}{H}\right)$ für die verschiedenen Steifigkeits- (Abbildung 5-4) und Festigkeitslastfälle (Abbildung 5-5).

| | $BG\left(\frac{t}{H}\right)$ - Steifigkeit |
|-------------|--|
| Zug / Druck | $E\left(\frac{t}{H}\right) = \frac{S_{z/d} L}{H^2} \left(2(Q+1) \frac{t}{H} - 4 \left(\frac{t}{H}\right)^2 \right)^{-1}$ |
| Knicken | $E\left(\frac{t}{H}\right) = \frac{12 F_k L^2 S_v}{\pi^2 Q H^4} \left(1 - \left(1 - \frac{2t}{QH} \right) \left(1 - 2 \frac{t}{H} \right)^3 \right)^{-1}$ |
| Biegung | $E\left(\frac{t}{H}\right) = \frac{12 S_b L^3}{C Q H^4} \left(1 - \left(1 - \frac{2t}{QH} \right) \left(1 - 2 \frac{t}{H} \right)^3 \right)^{-1}$ |
| Torsion | $G\left(\frac{t}{H}\right) = \frac{S_t L}{H^4} \left(\frac{2}{3} \left((Q+1) \left(\frac{t}{H}\right)^3 - 2 \left(\frac{t}{H}\right)^4 \right) + 2 \frac{\left(Q - \frac{t}{H}\right)^2 \left(1 - \frac{t}{H}\right)^2 t}{Q + 1 - 2 \frac{t}{H}} \right)^{-1}$ |

Abbildung 5-4: Belastungsgleichungen für die verschiedenen Steifigkeitslastfälle in Abhängigkeit zum Füllverhältnis von rechteckigen Hohlprofilen unter Verwendung von Böge [BöBö15] und Marshall [Mars72], [RiOD03]

| | $BG\left(\frac{t}{H}\right)$ - Festigkeit |
|-------------|---|
| Zug / Druck | $\sigma_{z/d}\left(\frac{t}{H}\right) = \frac{F_{z/d} S_v}{Q H^2} \left(2(Q+1) \frac{t}{H} - 4 \left(\frac{t}{H}\right)^2 \right)^{-1}$ |
| Knicken | – |
| Biegung | $\sigma_b\left(\frac{t}{H}\right) = \frac{6 M_b S_v}{Q H^3} \left(1 - \left(1 - \frac{2t}{QH} \right) \left(1 - 2 \frac{t}{H} \right)^3 \right)^{-1}$ |
| Torsion | $\tau_t\left(\frac{t}{H}\right) = \frac{M_t S_v \left(H \frac{t}{H} \left(2H \left(2Q + 1 - 2 \frac{t}{H} \right) + 2 \left(H^2 \left(Q - \frac{t}{H} \right) \left(1 - \frac{t}{H} \right) \right) \right)}{2H \left(Q + 1 - 2 \frac{t}{H} \right) \frac{\left(\frac{t}{H}\right)^3 \left(2H \left(Q + 1 - 2 \frac{t}{H} \right) \right)}{3} + H \left(4 \left(H^2 \left(Q - \frac{t}{H} \right) \left(1 - \frac{t}{H} \right) \right)^2 \frac{t}{H} \right)}{2H \left(Q + 1 - 2 \frac{t}{H} \right)}$ |

Abbildung 5-5: Belastungsgleichungen für die verschiedenen Festigkeitslastfälle in Abhängigkeit zum Füllverhältnis von rechteckigen Hohlprofilen unter Verwendung von Böge [BöBö15] und Marshall [Mars72], [RiOD03]

Bei gegebenen Randbedingungen hinsichtlich des verfügbaren Bauraums sowie der Last lassen sich mit der Wahl beliebiger Wandstärken innerhalb des geschlossenen Intervalls

$$\frac{t}{H} = \left[0, \min\left(\frac{Q}{2}, \frac{1}{2}\right) \right] \quad (5-5)$$

die dazugehörigen Werkstoffkennwerte ableiten. Nutzt man den kleineren der beiden oberen Grenzwerte $\frac{Q}{2}$ bzw. $\frac{1}{2}$ so erhält man aus der Gleichung $BG\left(\frac{t}{H}\right)$ die notwendige Mindestanforderung an den Werkstoffkennwert ($WK_0(t_{voll})$), welcher zur Funktionserfüllung bei einer vollständigen Ausnutzung des verfügbaren Bauraums notwendig ist. Materialien deren Werkstoffkennwerte darunter liegen sind für das entsprechende Verhältnis aus Bauraum und Last ungeeignet und können somit für die weitere Auswahl vernachlässigt werden (Abbildung 5-6 links).

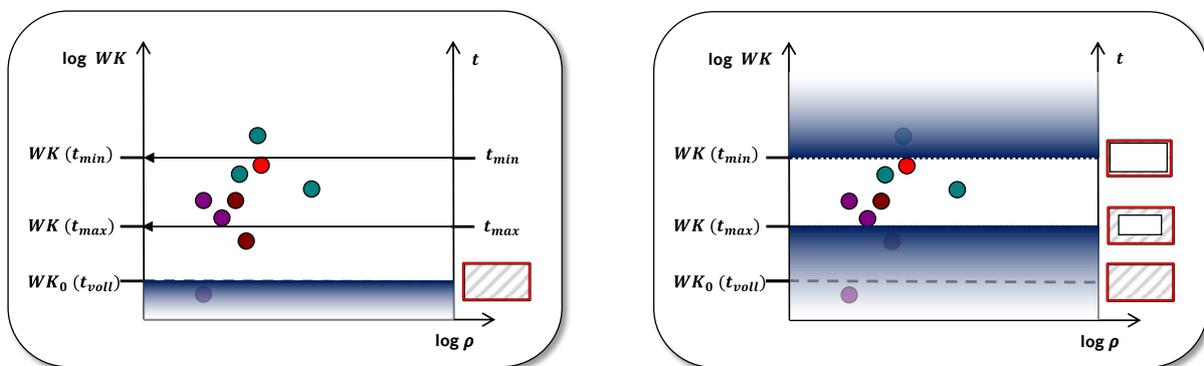


Abbildung 5-6: Bestimmung auswahlrelevanter Werkstoffkennwerte anhand beliebiger Wandstärken (links) sowie resultierende Einschränkung des Auswahlbereichs (rechts)

In praktischen Anwendungsfällen, insbesondere bei Fahrzeugstrukturbauteilen, kommt es jedoch äußerst selten zu einer vollständigen Bauraumausfüllung und der damit einhergehenden Umsetzung von Vollprofilen. Vielmehr bewegen sich interessante Wandstärkenbereich in der Praxis, abhängig von Material, Bauteilgröße und Herstellbarkeit, zwischen einer realisierbaren Mindestwandstärke t_{min} und einer Maximalwandstärke t_{max} (für gängige Strukturbauteile ca. zwischen $0,8 \text{ mm}$ - 6 mm) und führen somit zu den entsprechenden oberen und unteren Werkstoffgrenzwerten $WK(t_{min})$ und $WK(t_{max})$ (Abbildung 5-6 rechts). Demnach sind nur jene Werkstoffe für die weitere Materialauswahl interessant, die innerhalb dieses Sektors vorzufinden sind. Eine Ausnahme bei der Bildung der Grenzwerte stellen bspw. die Strukturschäume dar. In jenem Sonderfall ist die größtmögliche Wandstärke t_{max} bspw. gleich jener Wandstärke für eine volle Bauraumfüllung t_{voll} .

5.3 Allgemeine Herleitung der Transferfunktionen

Um die finale Verwendbarkeit der übrig gebliebenen Werkstoffe überprüfen und im Rahmen eines Konzeptvergleichs gegeneinander bewerten zu können, ist die Bestimmung der zur Funktionserfüllung notwendigen Wandstärken von bedeutendem Interesse. Hierzu gilt es im nächsten Schritt die Umkehrfunktionen der aufgestellten Belastungsgleichungen $BG\left(\frac{t}{H}\right)$ (vgl. Abbildung 5-4 und Abbildung 5-5) durch die Separation von $\frac{t}{H}$ aufzustellen, um auf Basis der vorhandenen Bauraum-, Last- und Werkstoffkenngrößen die resultierenden Wandstärken zu bestimmen. Bei genauerer Betrachtung jener Terme fällt jedoch auf, dass eine einfache Isolationen des Füllverhältnisses in Abhängigkeit zur eintreffenden Bauteilbelastung (also $\frac{t}{H}(BG)$), aufgrund der Komplexität der formelmäßigen Beziehungen, nicht möglich ist. Um die Wandstärken dennoch bestimmen zu können ist die Formulierung der Residuumsfunktion

$$r = BG\left(\frac{t}{H}\right) - WK \quad (5-6)$$

sowie die anschließende Lösung der selbigen mit Hilfe eines numerischen Verfahrens das Mittel der Wahl. Die einfachste Vorgehensweise stellt dabei die Nutzung des Bisektionsverfahrens dar, weswegen es fortfolgend zur Lösungsextraktion genutzt werden soll. Um die nachfolgenden Terme zu vereinfachen, werden die einzusetzenden Unter- und Obergrenzen des Bauraumfüllverhältnisses mit $a_n = \left(\frac{t}{H}\right)_{\text{Untergrenze}}$ und $b_n = \left(\frac{t}{H}\right)_{\text{Obergrenze}}$ abgekürzt. Unter der Annahme, dass die gesuchte Wandstärke t zwischen einem ungefüllten Bauraum $a_n = 0$ und einem voll ausgefüllten Bauraum $b_n = \min\left(\frac{Q}{2}, \frac{1}{2}\right)$ liegt, lassen sich die allgemeinen Formulierungen der Residuumsfunktion für die Untergrenze

$$r(a_n) = BG(a_n) - WK \quad (5-7)$$

und für die Obergrenze

$$r(b_n) = BG(b_n) - WK \quad (5-8)$$

mit jenen Startwerten befüllen. Die Überprüfung der Vorzeichensituation durch Multiplikation der beiden Residuen

$$r(a_n) * r(b_n) > 0 \quad (5-9)$$

gibt Aufschluss darüber, ob sich für den gewählten Werkstoff tatsächlich eine passende Wandstärke innerhalb dieses Lösungsraums befindet. Da es keine geringere Bauraumfüllung als einen leeren Bauraum geben kann, ist das Vorzeichen der Residuumsfunktion $r(a_n)$ immer negativ. Dementsprechend können je nach Lage der Obergrenze für die Residuumsfunktion $r(b_n)$ zwei Situationen auftreten (Abbildung 5-7).

Im ersten Fall liefert $r(b_n)$ ebenfalls ein negatives Ergebnis. Dadurch ergibt die Multiplikation der beiden Residuumsfunktionen ein positives Vorzeichen und führt somit zu einem Ergebnis größer Null. Das bedeutet, dass keine Wandstärke innerhalb des verfügbaren Bauraums vorhanden ist, da selbst eine vollständige Bauraumfüllung zu einer Verfehlung der Funktionsziele führt. Zur Kennzeichnung eines solchen Falls soll der Wert „-1“ für die Wandstärke t ausgegeben werden.

Im zweiten Fall liefert $r(b_n)$ ein positives Ergebnis. Dadurch ergibt die Multiplikation der beiden Residuumsfunktionen ein negatives Vorzeichen und führt somit zu einem Ergebnis kleiner Null. Das bedeutet, dass die zu ermittelnde Bauraumfüllung von der vorgegebenen Unter- und Obergrenze eingeschlossen wird und somit innerhalb des Lösungsbereichs des verfügbaren Bauraums liegt.

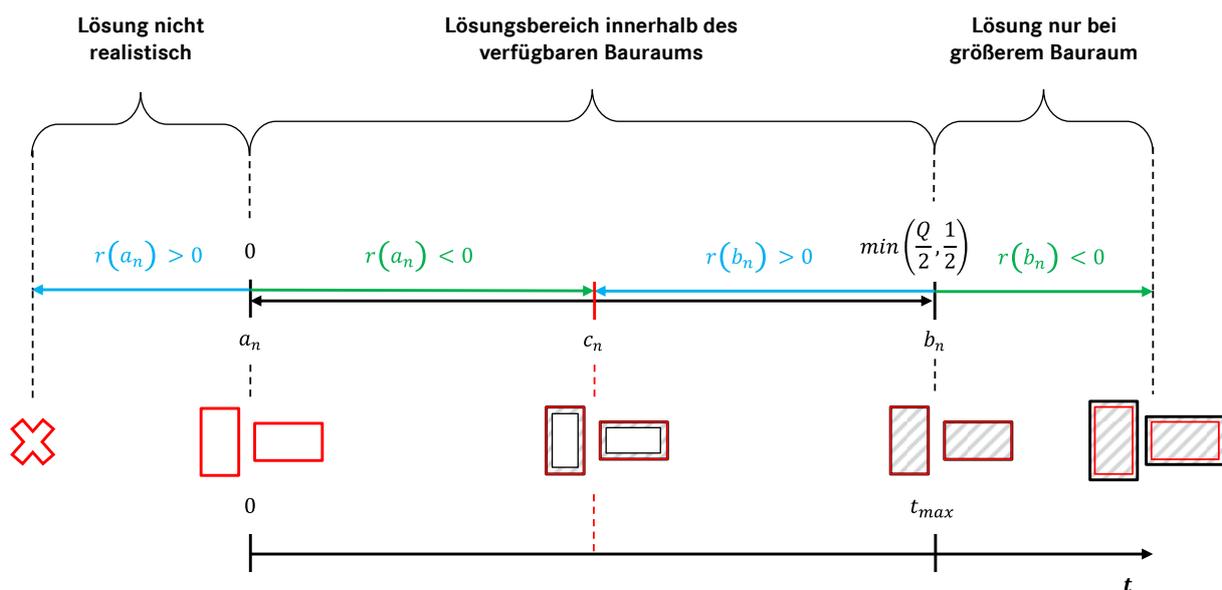


Abbildung 5-7: Beschreibung des Suchraums für das funktionstaugliche Bauraumfüllverhältnis

Um sich der notwendigen Wandstärke nun schrittweise anzunähern, sind mehrere Iterationsschleifen des Bisektionsverfahrens notwendig. Hierzu wird der Mittelwert

$$c_n = \frac{a_n + b_n}{2} \quad (5-10)$$

aus dem unteren und oberen Grenzwert gebildet. Die daraus resultierende Residuumsfunktion

$$r(c_n) = BG(c_n) - WK \quad (5-11)$$

ermöglicht die Bestimmung der Suchrichtung durch einen wiederholten Abgleich der Vorzeichensituation

$$r(a_n) * r(c_n) > 0 \quad (5-12)$$

auf Basis des alten unteren Grenzwerts $r(a_n)$ sowie des neuen Grenzwerts $r(c_n)$. Wie bereits bei der ersten Vorzeichenprüfung können hierbei zwei verschiedene Szenarien auftreten.

Im ersten Fall liefert die Residuumsfunktion $r(c_n)$ ein negatives Ergebnis. Entsprechend führt die Multiplikation der beiden Residuumsfunktionen zu einem positiven Produkt. Daraus lässt sich schließen, dass beide Bauraumfüllungen die innerhalb der Residuumsfunktionen eingesetzt wurden, die gesuchte unterschreiten und c_n dabei näher an der gesuchten Füllsituation liegt als a_n . Somit wird c_n zur neuen Untergrenze a_{n+1} und verringert somit den Suchraum um die Hälfte (Abbildung 5-8).

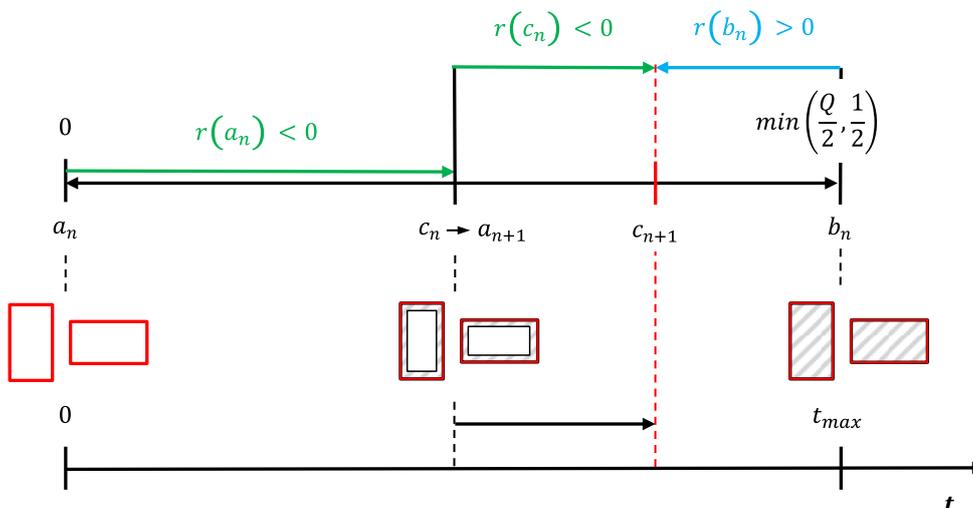


Abbildung 5-8: Iterationsrichtung 1

Die anschließende Überprüfung der Abweichungsgenauigkeit

$$r(a_{n+1}) \vee r(b_n) < 10^{-9} \quad (5-13)$$

nach jeder Iteration fungiert dabei als Abbruchkriterium bei Erreichung eines gewünschten Zielwerts (hier: 10^{-9}) für eine der beiden Funktionen.

Im zweiten Fall liefert die Residuumsfunktion $r(c_n)$ ein positives Ergebnis. Somit führt die Multiplikation der beiden Residuumsfunktionen zu einem negativen Produkt. Daraus kann abgeleitet werden, dass das gesuchte Füllverhältnis zwischen $r(a_n)$ und $r(c_n)$ liegt, weswegen im nächsten Schritt die neue Obergrenze b_{n+1} den Wert aus c_n übernimmt und damit den Suchraum in die umgekehrte Richtung halbiert (Abbildung 5-9).

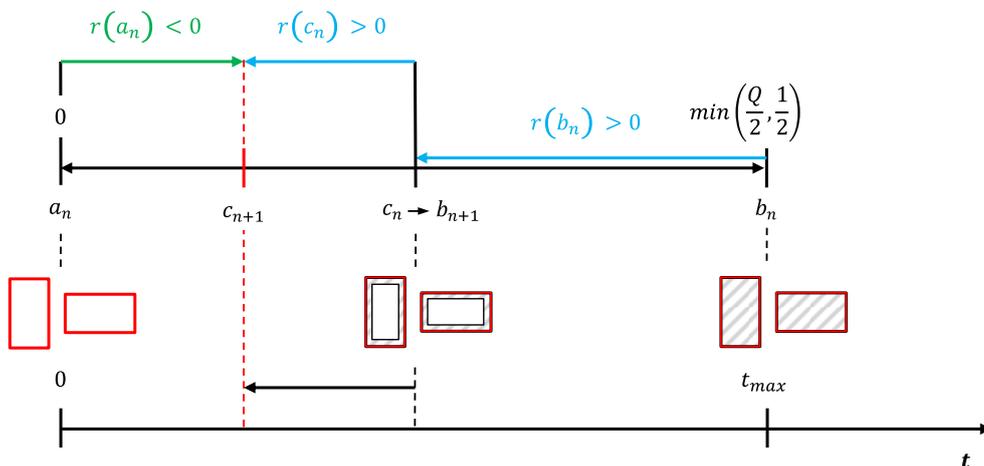


Abbildung 5-9: Iterationsrichtung 2

Die anschließende Überprüfung der Abweichungsgenauigkeit

$$r(a_n) \vee r(b_{n+1}) < 10^{-9} \quad (5-14)$$

erfolgt analog zum ersten Fall.

Unabhängig davon welcher Parameter zum Abbruch der Iterationen führt, gelangt man durch dessen Multiplikation mit der Höhe H , aufgrund der Beziehungen $a_n = \left(\frac{t}{H}\right)_{\text{Untergrenze}}$ und

$b_n = \left(\frac{t}{H}\right)_{\text{Obergrenze}}$, zur erforderlichen Wandstärke

$$t(WK) = ((a_{n+1} \vee b_n) \vee (a_n \vee b_{n+1})) * H \quad (5-15)$$

in Abhängigkeit des jeweiligen Werkstoffs (Abbildung 5-10).

Im Umkehrschluss beschreibt diese weiterführende Formulierung somit das zu Beginn geforderte Bauraumfüllverhältnis in Abhängigkeit zur Belastungsgleichung $\frac{t}{H}(BG)$ in einer, um die Multiplikation der Höhe H , erweiterten Form.

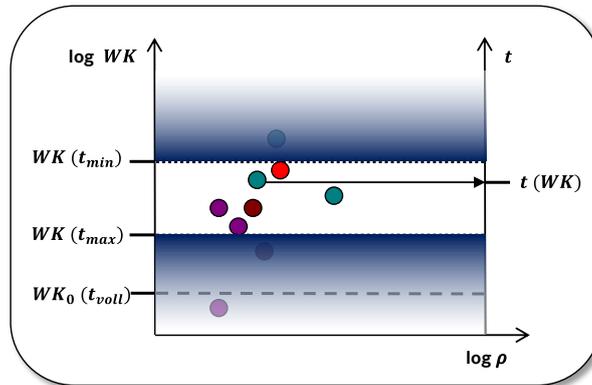


Abbildung 5-10: Grafische Veranschaulichung der Bestimmung der notwendigen Wandstärken $t(WK)$ für einen bestimmten Werkstoff innerhalb des interessanten Auswahlbereichs

Diese Vorgehensweise bietet die Möglichkeit in Frage kommende Werkstoffe, nach der Ermittlung der jeweils benötigten Wandstärken, mit dem dazugehörigen Machbarkeitsbereich der Fertigung abzugleichen. Dadurch lassen sich produktionsspezifische Einflussfaktoren frühzeitig im Rahmen der Materialauswahl berücksichtigen. Ein fiktives Beispiel sei an dieser Stelle anhand eines Bauteils beschrieben, welches aufgrund seines vorherrschenden Bauraum-Last-Verhältnisses lediglich eine Wandstärke $t(WK)$ von $0,5\text{mm}$ benötigt. Aus Gründen der Herstellbarkeit wird jedoch bei diesem Werkstoff eine Mindestwandstärke $t(WK)_{min}$ von $0,8\text{mm}$ gefordert. Um im Hinblick auf den späteren Konzeptvergleich (siehe Kapitel 5.6, S. 126) nur fertigungstechnisch umsetzbare Konzepte anzubieten, muss in solchen Fällen die ermittelte Wandstärke $t(WK)$ durch die höhere und herstellbare Wandstärke $t(WK)_{min}$ ersetzt werden. Dies kann entsprechende Auswirkung auf die Bauteilkosten sowie des –gewichts (siehe Kapitel 5.5, S. 125) mit sich bringen und somit die finale Festlegung eines Werkstoffkonzepts entscheidend beeinflussen.

Ein weiteres Beispiel soll die Berücksichtigung fertigungstechnischer Obergrenzen aufzeigen. Hierzu sei angenommen, dass aus Funktionsgründen eine Wandstärke $t(WK) = 7\text{mm}$ erforderlich ist. Aus Gründen der Herstellbarkeit kann in diesem Fall die maximale Bauteilwandstärke $t(WK)_{max}$ jedoch nur 6mm betragen, auch wenn der Bauraum damit

noch nicht vollständig ausgefüllt wird. Dies führt dazu, dass die Bauteilfunktion mit diesem Werkstoff nicht erfüllt werden kann, was zum Ausschluss desselbigen für den weiteren Auswahlprozess führt.

5.4 Ermittlung der Auswahllinien gleicher Masse für rechteckige Hohlprofile

Werkstoffe weisen je nach Sorte und Belastungsart verschiedene Werkstoffkennwerte (WK) auf. Je höher dieser Performancekennwert für einen speziellen Belastungsfall ist, desto geringer muss die Bauteilwandstärke t bzw. das Bauraumfüllverhältnis $\frac{t}{H}$ aus der Transferfunktion sein, um die geforderte Bauteilanforderung zu erfüllen. Zusammen mit der jeweiligen Werkstoffdichte ρ ergibt sich somit der notwendige Massebedarf m zur Funktionserfüllung einer jeden Komponente. Um aus beliebig vielen Werkstoffen, je nach vorliegender Bauteilbelastung, den leichtesten identifizieren zu können, werden in der Literatur Werkstofflinien gleichen Massebedarfes (vgl. Kapitel 2.3.4.2, S. 54) zur grafischen Selektion verwendet. Im Folgenden soll gezeigt werden, wie diese Auswahllinien für rechteckige Hohlprofile, zuerst allgemein und anschließend lastfallspezifisch, ermittelt und verwendet werden können.

5.4.1 Allgemeine Vorgehensweise

Um die Masse eines rechteckigen Hohlprofils in Abhängigkeit des Seitenverhältnisses Q , dem Wandstärkenverhältnis $\frac{t}{H}$, der Höhe H , der Länge L sowie der Dichte ρ zu beschreiben, wird die Massengleichung

$$m\left(\frac{t}{H}, \rho\right) = \left(2(Q+1)\frac{t}{H} - 4\left(\frac{t}{H}\right)^2\right)H^2L\rho \quad (5-16)$$

benötigt. Möchte man zudem unterschiedliche Profilkonzepte auf einer einheitlichen Basis miteinander vergleichen, so sind die äußeren Bauraumbegrenzungen als konstant anzunehmen. Lediglich die werkstoffabhängigen Parameter, wie das notwendige Wandstärkenverhältnis $\frac{t}{H}$ zur Funktionserfüllung sowie die Dichte ρ , beeinflussen die Veränderung der Bauteilmasse. Wobei zu berücksichtigen ist, dass sich das Wandstärkenverhältnis $\frac{t}{H}$ nur indirekt, über die Residuumsfunktion (Formel (5-6), S. 101) für einen bestimmten Werkstoffkennwert WK , eines vorgegebenen Bauraum-Last-Verhältnis, ermitteln lässt. Als relevanter Betrachtungsbereich zur Untersuchung der Massenentwicklung,

je nach Art der Bauteilbelastung, lassen sich ganz allgemein die Wertebereiche für die Dichte ρ zwischen 10 und 100.000 $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ und für die Werkstoffkennwerte WK zwischen $WK_0(t_{voll})$ (Mindestanforderung) und einer beliebigen Obergrenze WK_{OG} festlegen.

Der jeweilige Einsatz einer frei zu wählenden Menge logarithmisch verteilter Datenpunkten (z.B. je 200 Werte) innerhalb der definierten WK - und ρ -Bereiche, liefern somit die Eingangsdaten zur Aufstellung einer Massenmatrix mit 40.000 verschiedenen Ergebniskombinationen, welche sich in Form einer Lösungsfläche darstellen lässt (Abbildung 5-11).

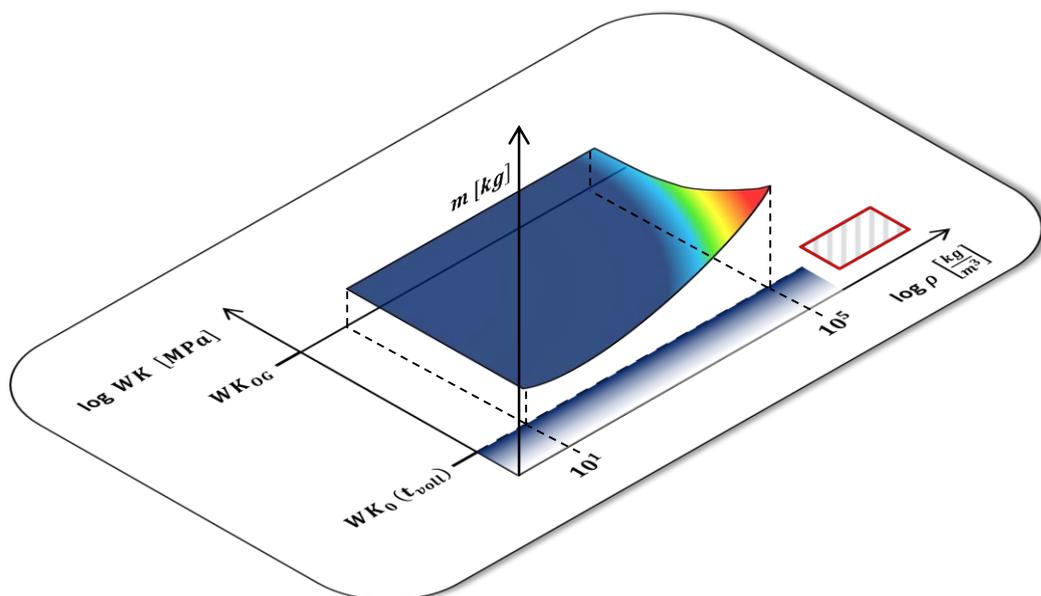


Abbildung 5-11: Exemplarische Darstellung einer Lösungsfläche der Masse ohne Bezug auf einen speziellen Lastfall für 200 logarithmisch verteilte Werte von WK und ρ in einem festgelegten Wertebereich

Der Wertebereich für die Dichte ρ wurde an dieser Stelle bewusst groß gewählt, um zu zeigen, dass der Lösungsraum grundsätzlich von beliebiger Größe ausgebildet sein kann und dieser lediglich durch die Verfügbarkeit realer Werkstoffe beschränkt wird.

Diese dreidimensionale Fläche enthält dabei alle möglichen Lösungen für die Bauteilmasse eines Hohlprofils, mit allen denkbaren Kombinationen hinsichtlich des Bauraumfüllgrades und Einsatzwerkstoffs, für einen bestimmten Lastfall. Aus diesem Grund ist die Ermittlung dieser lastspezifischen Zusammenhänge für jede Belastungsart (siehe Kapitel 5.4.2), als zielführender Vorgang für eine systematische Materialauswahl, anzustreben. Ein Werkstoff aus einer beliebigen Materialdatenbank kann somit exakt einem Datenpunkt dieser Lösungsfläche

zugeordnet werden. Dieser beinhaltet die dazugehörige Information der notwendigen Wandstärke sowie des daraus resultierenden Massebedarfs eines rechteckigen Hohlprofils, unter Berücksichtigung der gestellten Funktionsanforderungen.

Ein Schnitt dieser Lösungsfläche mit einer Ebene konstanter Masse, auf beliebiger Höhe, führt zu einer Auswahllinie, welche zur Bewertung der Werkstoffeignung auf Basis der bekannten zweidimensionalen Werkstoffschaubilder (vgl. Abbildung 2-47 und Abbildung 2-49) genutzt werden kann (Abbildung 5-12).

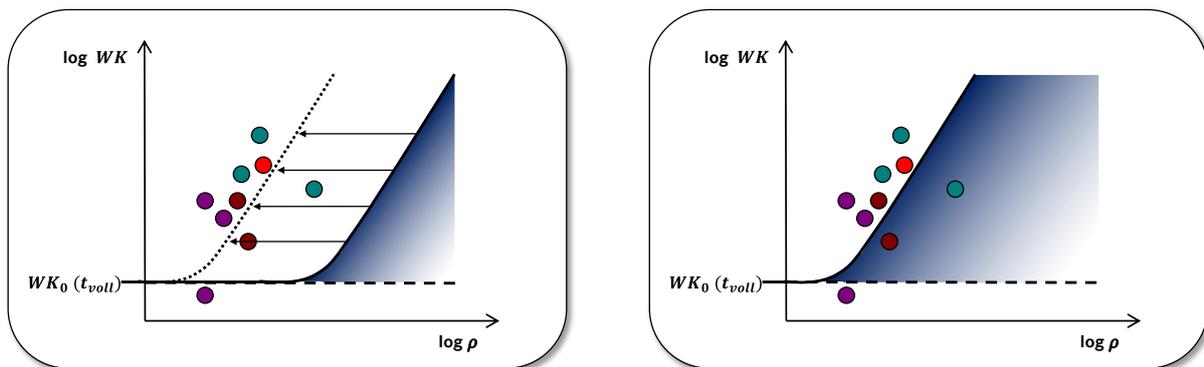


Abbildung 5-12: Parallelverschiebung der Auswahllinie (links) und die daraus resultierende Reduktion der interessanten Werkstoffe (rechts)

Die beliebige parallel Verschiebung dieser Auswahllinie nach links im zweidimensionalen Auswahlschaubild (Abbildung 5-12 links), ist mit einer Verschiebung der Schnittebene von konstanter Masse im dreidimensionalen Schaubild (vgl. Abbildung 5-11) gleich zu setzen und reduziert die Anzahl interessanter Einsatzwerkstoffe auf eine kleine Menge (Abbildung 5-12 rechts).

5.4.2 Lastfallspezifische Vorgehensweise

Aufbauend auf dem vorangegangenen Kapitel 5.4.1, welches die allgemeingültige Herleitung der Werkstoffauswahllinien unter Berücksichtigung von Funktion und Gewicht enthält, soll im Rahmen dieses Abschnitts die jeweils lastfallspezifische Ermittlung erfolgen. Während der interessante Wertebereich für die Dichte ρ lastfallunabhängig übernommen werden kann ($\rho = 10 - 100.000 \frac{Kg}{m^3}$), müssen die relevanten Intervalle für die Werkstoffkennwerte $WK_{0(t_{voll})}$ (Mindestanforderung) und WK_{OG} (beliebig wählbare Obergrenze) individuell auf die Bauraum- und Lastverhältnisse angepasst werden. Die nachfolgenden Unterkapitel sollen anhand eines geometrisch einheitlichen Fallbeispiels zeigen, wie anhand der allgemeinen

Vorgehensweise zur Bestimmung der Auswahllinien gleicher Masse für rechteckige Hohlprofile, die lastspezifischen Verläufe, für ein individuelles Beanspruchungsszenario, ermittelt werden können. Abbildung 5-13 stellt die hierfür verwendeten konstanten (schwarz) und variablen (rot) Eingangsparameter dar.

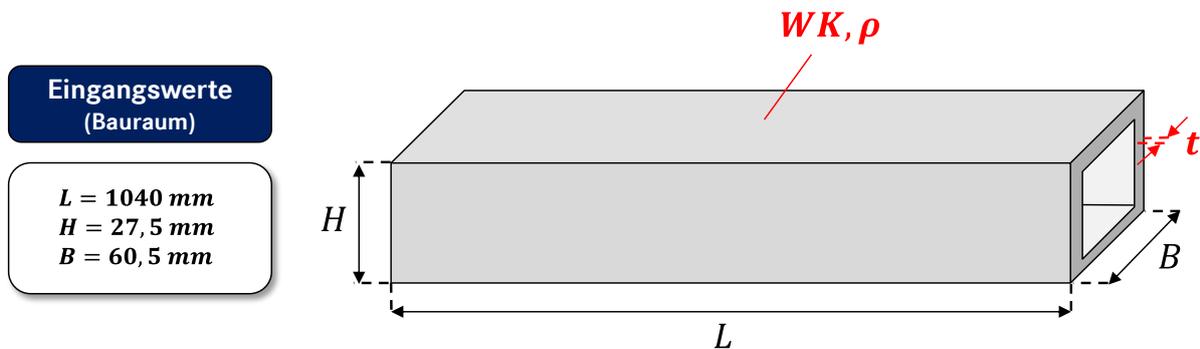


Abbildung 5-13: Die konstanten Eingangswerte des Bauraums zur lastspezifischen Herleitung der Linien gleicher Masse für beliebig viele Werkstoffe

Über den zuvor beschriebenen Umweg der Transferfunktionen (vgl. Kapitel 5.3, S. 101) lassen sich somit, je nach Belastungsart (vgl. Abbildung 4-8, S. 88) und Zielgröße (vgl. Abbildung 5-4 bzw. Abbildung 5-5, S. 99), auf Basis einer beliebigen Menge an WK - und ρ -Werten, die dazugehörigen Lösungsflächen für die Bauteilmassen m (vgl. Kapitel 5.4.1, S. 106) bestimmen. Ein Schnitt der selbigen auf konstantem Z-Niveau führt anschließend zur Visualisierung der gesuchten, lastfallspezifischen Auswahllinien gleichen Massebedarfs.

5.4.2.1 Zug- oder Drucksteifigkeit

Im Falle einer Zug- oder Druckbeanspruchung mit einer Kraft von $F_{z/d} = 10 \text{ kN}$, bei einer maximal zulässigen Längenänderung $\Delta L = 1 \text{ mm}$ in Längsrichtung des Profils, resultiert eine zu berücksichtigende Lastanforderung hinsichtlich der Bauteilsteifigkeit von $S_{z/d} = 10 \frac{\text{kN}}{\text{mm}}$. Selbige findet innerhalb der zugehörigen Belastungsgleichung (vgl. Abbildung 5-4, S. 99)

$$E \left(\frac{t}{H} \right) = \frac{S_{z/d} L}{H^2} \left(2(Q + 1) \frac{t}{H} - 4 \left(\frac{t}{H} \right)^2 \right)^{-1} \quad (5-17)$$

gemeinsam mit den bekannten Bauraumfaktoren Berücksichtigung. Unter Annahme einer vollständigen Bauraumausfüllung, lässt sich somit die Mindestanforderung an den Werkstoff $E_0(t_{voll}) = 6.251 \text{ MPa}$ ermitteln. Ein sinnvolles Betrachtungsintervall im Rahmen dieser

Beanspruchung bewegt sich demnach zwischen diesem Mindestwert sowie der gewählten Obergrenze $E_{OG} = 250.000 \text{ MPa}$ und deckt damit den Wertebereich aller in Frage kommenden Konstruktionswerkstoffe ab. Die daraus abgeleitete Lösungsfläche der Bauteilmassen ist in Abbildung 5-14 logarithmisch dargestellt.

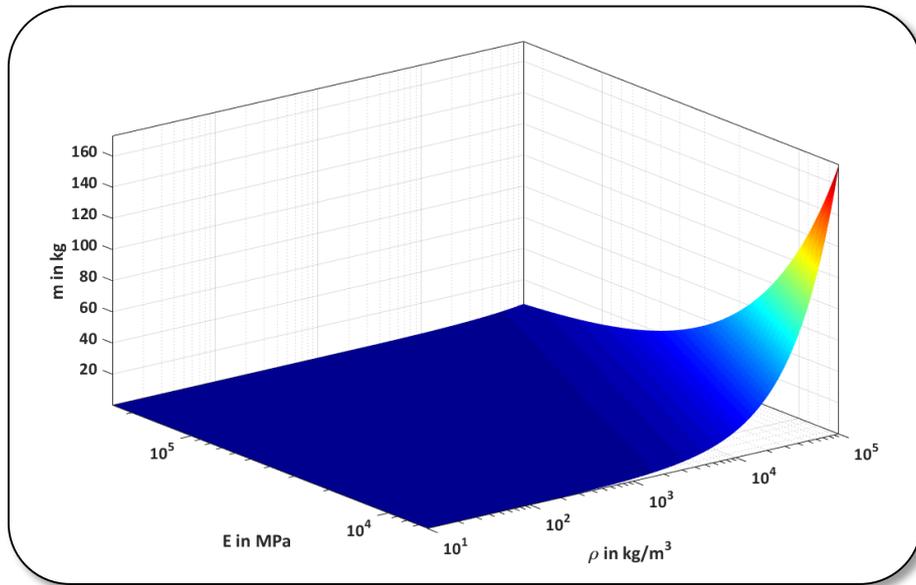


Abbildung 5-14: Die 3D-Lösungsfläche der Masse im Falle der geforderten Zug- bzw. Drucksteifigkeit

Die gesuchten Auswahllinien, zur Visualisierung jener Lösungen mit identischem Massebedarf, lassen sich anschließend durch einen Schnitt auf beliebiger Höhe der Z-Achse erzeugen. Für den frei gewählten Wert $m = 1,5 \text{ kg}$ entsteht das in Abbildung 5-15 dargestellte Schnittbild der Lösungsfläche.

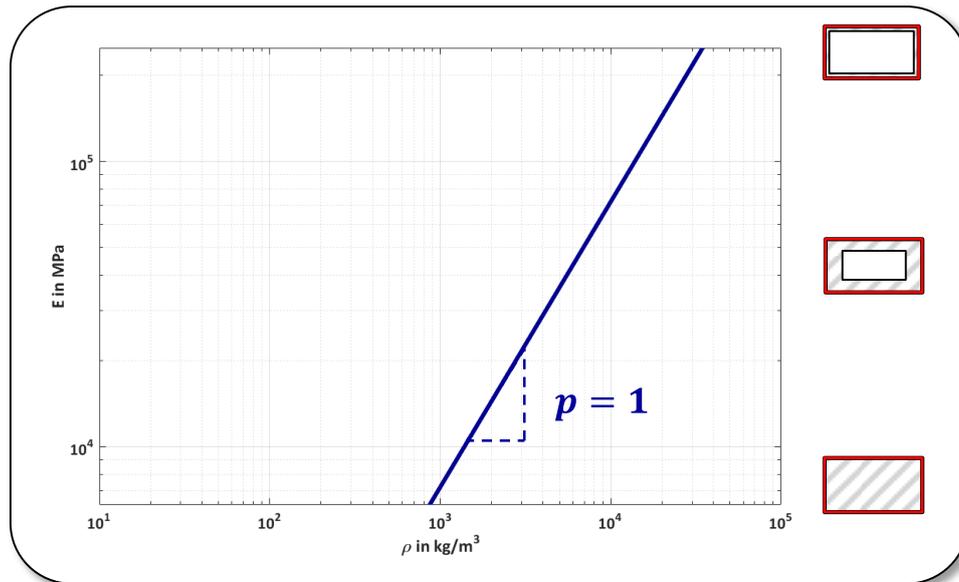


Abbildung 5-15: 2D-Ansicht des Schnittbildes der 3D-Lösungsfläche für den ausgewiesenen Belastungsfall der Zug- oder Drucksteifigkeit bei einer Masse von $m = 1,5 \text{ kg}$ sowie schematische Darstellung der Bauraumfüllung auf Basis des notwendigen Grenzmaterials bei $E_0(t_{voll}) = 6.251 \text{ MPa}$

Die zum Vorschein tretende Auswahllinie ist eine Gerade, welche sich, ausgehend von einer Mindestanforderung E_0 , zu jeder Zeit mit der Steigung $p = 1$ beschreiben lässt.

Der beste Werkstoff in diesem Belastungsfall ist somit möglichst weit links der parallel verschiebbaren Auswahllinie mit der Steigung 1, innerhalb der doppelt-logarithmischen E - ρ -Diagramme (vgl. Abbildung 2-38, S. 56), zu finden.

5.4.2.2 Zug- oder Druckfestigkeit

Bei der Auslegung eines zug- bzw. druckbelasteten Hohlprofils gegen Versagen, gilt es der auftretenden Maximalkraft von bspw. $F_{z/d} = 50 \text{ kN}$ mit einer definierten Sicherheit (Annahme hier: $S_v = 2$) entgegen zu wirken. Gemeinsam mit den bauraumbeschreibenden Kennwerten werden diese Faktoren in der dazugehörigen Belastungsgleichung (vgl. Abbildung 5-5, S.99)

$$\sigma_{z/d} \left(\frac{t}{H} \right) = \frac{F_{z/d} S_v}{Q H^2} \left(2(Q+1) \frac{t}{H} - 4 \left(\frac{t}{H} \right)^2 \right)^{-1} \quad (5-18)$$

zueinander ins Verhältnis gesetzt. Die Annahme einer vollständigen Bauraumfüllung liefert in diesem Fall einen Wert für die Werkstoffmindestanforderung von $\sigma_{z/d 0(t_{voll})} = 60,1 \text{ MPa}$. Ein interessanter Analysebereich geht somit aus dieser Mindestanforderung sowie einer beliebig gewählten Obergrenze von bspw. $\sigma_{z/d OG} = 4.000 \text{ MPa}$ hervor, um den Kennwertbereich

aller gängigen Einsatzwerkstoffe abzudecken. Die daraus resultierende Lösungsfläche ist in Abbildung 5-16 dargestellt.

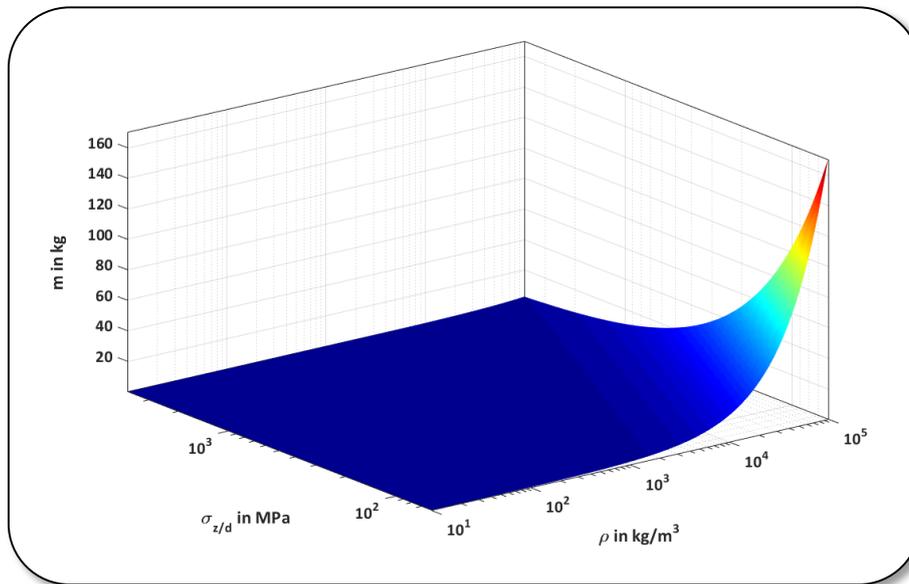


Abbildung 5-16: Die 3D-Lösungsfläche der Masse im Falle der geforderten Zug- bzw. Druckfestigkeit

Durch die Annahme einer einheitlichen Bauteilmasse von $m = 2 \text{ kg}$ ergibt sich, für den Fall der Zug- oder Druckfestigkeit eines Bauteils, das in Abbildung 5-17 dargestellte Schnittbild in Form einer Linie gleicher Werkstoffeffizienz.

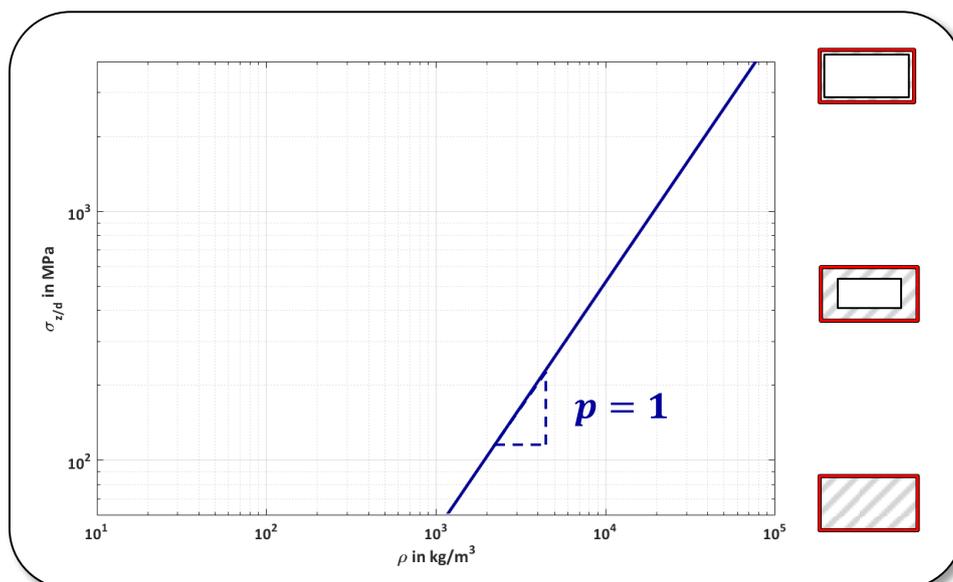


Abbildung 5-17: 2D-Ansicht des Schnittbildes der 3D-Lösungsfläche für den ausgewiesenen Belastungsfall der Zug- oder Druckfestigkeit bei einer Masse von $m = 2 \text{ kg}$ sowie schematische Darstellung der Bauraumfüllung auf Basis des notwendigen Grenzmaterials bei $\sigma_{z/d 0 (t_{voll})} = 60,1 \text{ MPa}$

Wie bereits bei der Auswertung für die Zug- und Drucksteifigkeit (vgl. Abbildung 5-15), geht aus der Festigkeitsauslegung ebenfalls eine Gerade mit der konstanten Steigung $p = 1$ für die Niveaulinie hervor.

5.4.2.3 Knicksteifigkeit

Insbesondere bei der Auslegung eines druckbelasteten Bauteiles ist jedoch meist nicht die festigkeitsbedingte Versagensgrenze der limitierende Faktor. Je nach Schlankheitsgrad führt häufig schon eine unzureichende Erfüllung des Stabilitätskriteriums zum Ausknicken der Komponente. Demnach gilt es auch diesen Spezialfall im Rahmen der systematischen Materialauswahl zu berücksichtigen. Ist neben einer kritischen Knickkraft (z.B.: $F_k = 10 \text{ kN}$) und einer einzuhaltenden Sicherheit gegen Auskicken (Annahme hier: $S_v = 4$) auch ein Einspannverhältnis von $\beta = 1$ (für Fall 2, vgl. [Ashb05]) gegeben, so lässt sich die hierfür geltende Belastungsgleichung (vgl. Abbildung 5-4, S. 99)

$$E \left(\frac{t}{H} \right) = \frac{12 F_k \beta^2 L^2 S_v}{\pi^2 Q H^4} \left(1 - \left(1 - \frac{2t}{QH} \right) \left(1 - 2 \frac{t}{H} \right)^3 \right)^{-1} \quad (5-19)$$

gemeinsam mit den zu Beginn festgelegten Bauraumkennwerten, für beliebige Werte der Wandstärke t , lösen. Der relevante Untersuchungsraum lässt sich dabei zwischen der Mindestanforderung $E_0(t_{voll}) = 41.808 \text{ MPa}$ (volle Bauraumfüllung) sowie der Obergrenze $E_{OG} = 250.000 \text{ MPa}$ für gängige Konstruktionswerkstoffe festlegen und liefert die in Abbildung 5-18 dargestellte dreidimensionale Ergebnisfläche für die Masse.

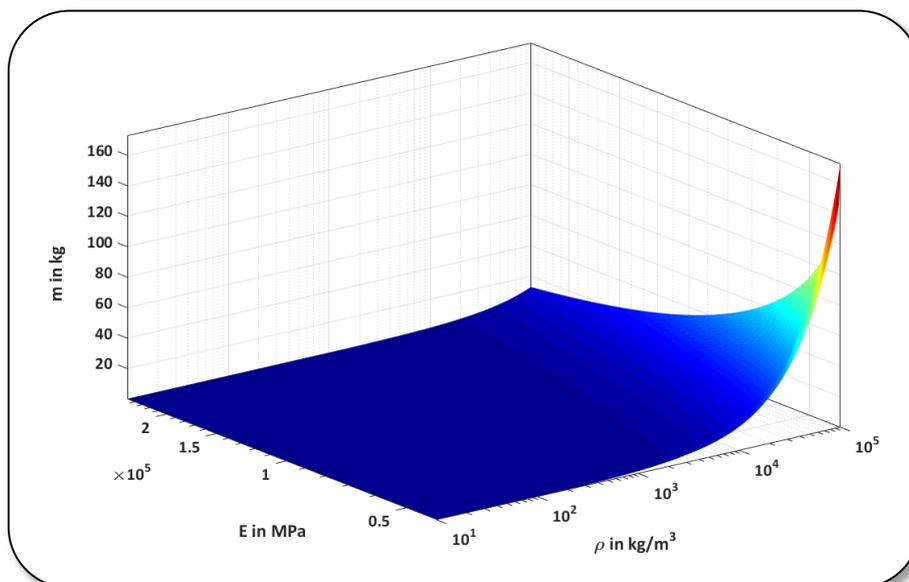


Abbildung 5-18: : Die 3D-Lösungsfläche der Masse im Falle der geforderten Knicksteifigkeit

Eine Detailanalyse mit Hilfe eines Schnittbildes, z.B. auf der frei gewählten Höhe des Massewerts $m = 3 \text{ kg}$, führt zu einem erkennbar gekrümmten Kurvenverlauf in der E - ρ -Ebene (Abbildung 5-19).

Werkstoffe, die in diesem Anwendungsfall bei gleichen Eingangsrandbedingungen eine geringere Bauteilmasse als 3 kg benötigen, sind links der blauen Auswahl Linie zu finden. Schwerere Lösungen befinden sich rechts davon. Zusätzlich lässt sich feststellen, dass insbesondere im Bereich nahe der ρ -Achse (bei $E_0(t_{voll}) = 41.808 \text{ MPa}$) der Einfluss auf die Steigungsänderung auf die Niveaulinie (blau) am größten ist und sich mit abnehmendem Bauraumfüllverhältnis immer weiter der roten Linie mit der Steigung $p = 1$ annähert. Der Einfluss des Trägheitsmoments $I_k(t)$ (vgl. Abbildung 5-1, S. 96) schlägt sich somit sichtbar auf die Entwicklung der Niveaulinie nieder.

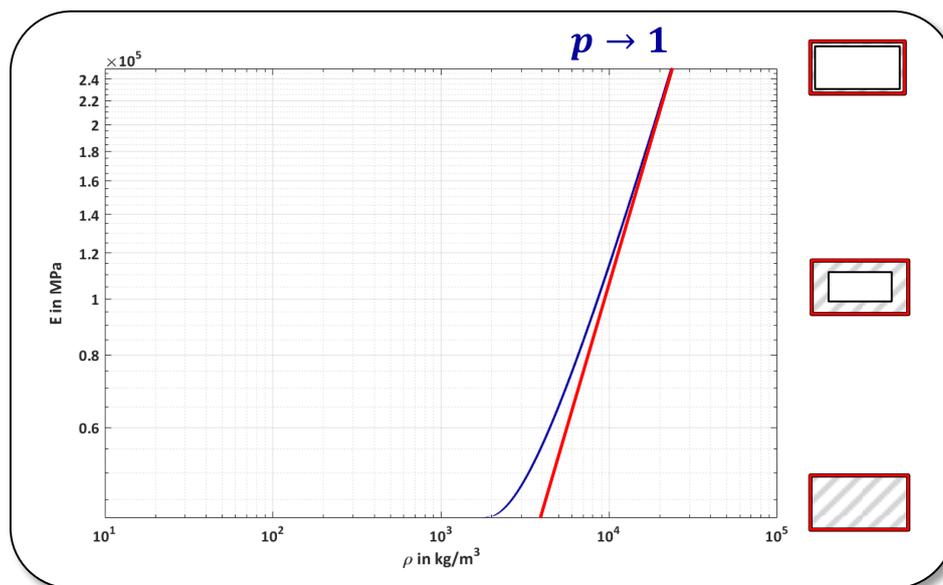


Abbildung 5-19: 2D-Ansicht des Schnittbildes der 3D-Lösungsfläche für den ausgewiesenen Belastungsfall der Knicksteifigkeit bei einer Masse von $m = 3 \text{ kg}$ sowie schematische Darstellung der Bauraumfüllung auf Basis des notwendigen Grenzmaterials bei $E_0(t_{voll}) = 41.808 \text{ MPa}$

5.4.2.4 Biegesteifigkeit

Im Falle einer Biegebelastung mit der Kraft $F_b = 350 \text{ N}$, bei einer maximal zulässigen Durchbiegung von $\delta = 1,5 \text{ mm}$, resultiert eine zu erbringende Steifigkeitsanforderung von $S_b = 233,33 \frac{\text{kN}}{\text{mm}}$ für das Strukturbauteil. Selbige findet innerhalb der zugehörigen Belastungsgleichung (vgl. Abbildung 5-4, S. 99)

$$E\left(\frac{t}{H}\right) = \frac{12 S_b L^3}{C Q H^4} \left(1 - \left(1 - \frac{2t}{Q H}\right) \left(1 - 2\frac{t}{H}\right)^3\right)^{-1} \quad (5-20)$$

gemeinsam mit den bekannten Bauraumkenngrößen sowie dem Faktor C , zur Berücksichtigung der Lagerbedingungen (hier: $C = 48$ für eine beidseitige Lagerung, vgl. [Ashb11]) Verwendung. Die Mindestanforderung an einen Werkstoff berechnet sich somit zu $E_0(t_{voll}) = 52.151 \text{ MPa}$ bei vollständiger Bauraumausnutzung. Gemeinsam mit der gewählten Obergrenze $E_{OG} = 250.000 \text{ MPa}$ führt dies zu der in Abbildung 5-20 dargestellten Antwortfläche für die Masse.

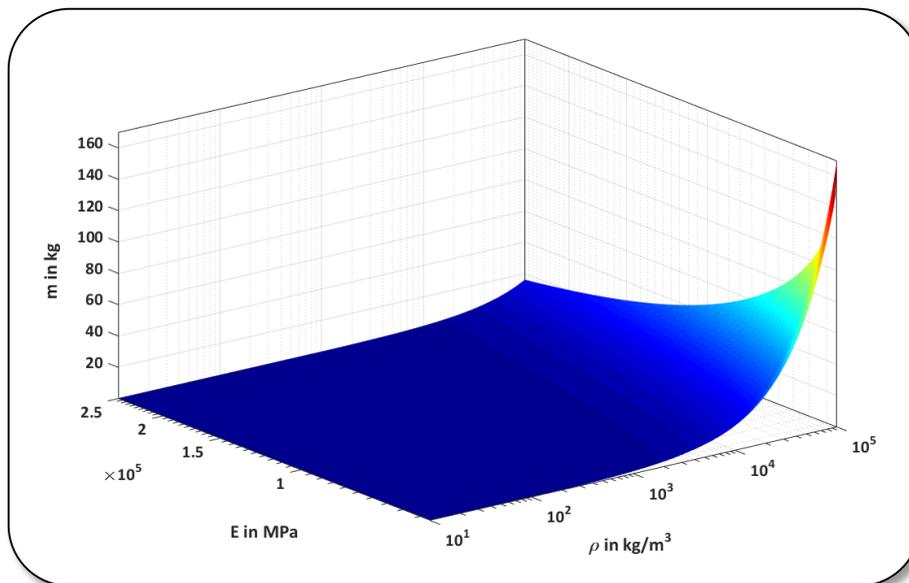


Abbildung 5-20: Die 3D-Lösungsfläche der Masse im Falle der geforderten Biegesteifigkeit

Die Annahme einer beliebigen konstanten Bauteilmasse innerhalb des abgebildeten Bereichs der Z-Achse (z.B.: $m = 4 \text{ kg}$), führt zu der gesuchten Auswahllinie (blau) gleicher Eignung (Abbildung 5-21), für den beschriebenen Lastfall der Biegesteifigkeit.

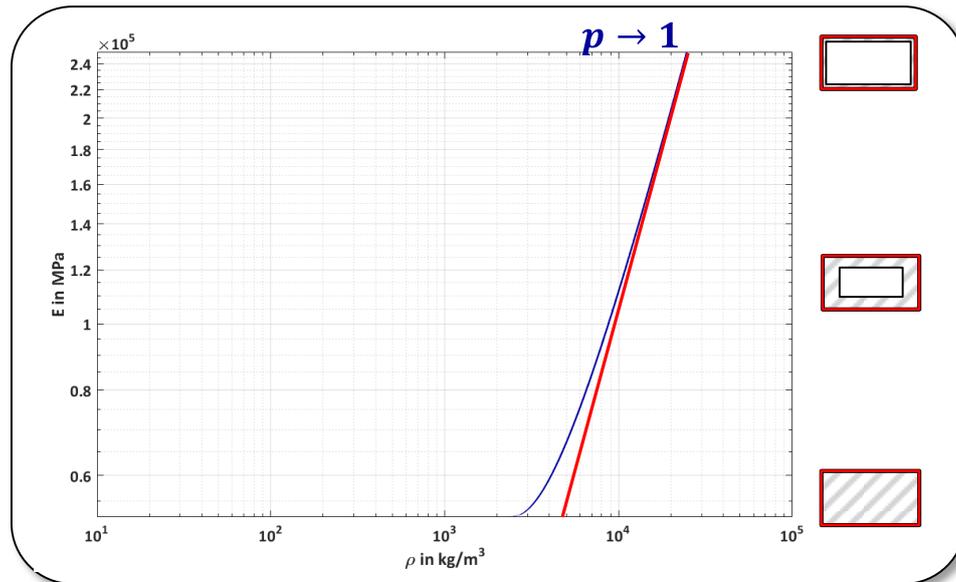


Abbildung 5-21: 2D-Ansicht des Schnittbildes der 3D-Lösungsfläche für den ausgewiesenen Belastungsfall der Biegesteifigkeit bei einer Masse von $m = 4 \text{ kg}$ sowie schematische Darstellung der Bauraumfüllung auf Basis des notwendigen Grenzmaterials bei $E_0(t_{voll}) = 52.151 \text{ MPa}$

Materialien, die unter diesen Randbedingungen eine geringere Bauteilmasse als 4 kg benötigen, sind links der blauen Auswahl Linie zu finden. Schwerere Lösungen befinden sich rechts davon. Ebenso lässt sich, wie bereits bei der Analyse des Stabilitätskriteriums unter Knickbeanspruchung, auch im Belastungsfall der Biegesteifigkeit, eine von $E_0(t_{voll})$ ausgehende Steigungsänderung ($p = 0$ nach $p = 1$) der Niveaulinie, in Abhängigkeit zum Bauraumfüllgrad, erkennen. Aufgrund der identischen Trägheitsmomente $I_b(t) = I_k(t)$ (vgl. Abbildung 5-1, S. 96) unterscheiden sich die beiden Kurven lediglich in der Höhe ihres Startwertes $E_0(t_{voll})$, jedoch nicht in ihrer Art des Kurvenverlaufs.

5.4.2.5 Biegefestigkeit

Bei der Auslegung eines biegebelasteten Hohlprofils gegen Werkstoffversagen gilt es einem vorherrschenden maximalen Biegemoment (z.B.: $M_b = 100 \text{ Nm}$) mit einer vorgegebenen Sicherheit (Annahme hier: $S_v = 2$) stand zu halten. Die geltenden Gesetzmäßigkeiten des Bauteilverhaltens werden derweil über die zugehörige Belastungsgleichung (vgl. Abbildung 5-5, S.99)

$$\sigma_b \left(\frac{t}{H} \right) = \frac{6 M_b S_v}{Q H^3} \left(1 - \left(1 - \frac{2 t}{Q H} \right) \left(1 - 2 \frac{t}{H} \right)^3 \right)^{-1} \quad (5-21)$$

in Abhängigkeit zu den relevanten Bauraumkenngrößen beschrieben. Mit Hilfe der Residuumsfunktion lassen sich anschließend, für eine beliebige Anzahl an Werten für die Dichte ρ und maximal zulässige Werkstoffspannungen σ_b , die zugehörigen Bauteilmassen ermitteln und in einer dreidimensionalen Lösungsfläche darstellen (Abbildung 5-22). Der hierfür geeignete Suchraum befindet sich in diesem Fall zwischen der Werkstoffmindestanforderung bei voller Bauraumaufüllung von $\sigma_{b0(t_{voll})} = 262,3 \text{ MPa}$ sowie einer gewählten Obergrenze $\sigma_{bOG} = 4.000 \text{ MPa}$.

Ein Z-Schnitt innerhalb des dargestellten Diagrammbereichs der Masse (z.B.: $m = 3$) liefert jene Lösungen mit demselben Bauteilgewicht in Form einer blau dargestellten Kurve (Abbildung 5-23).

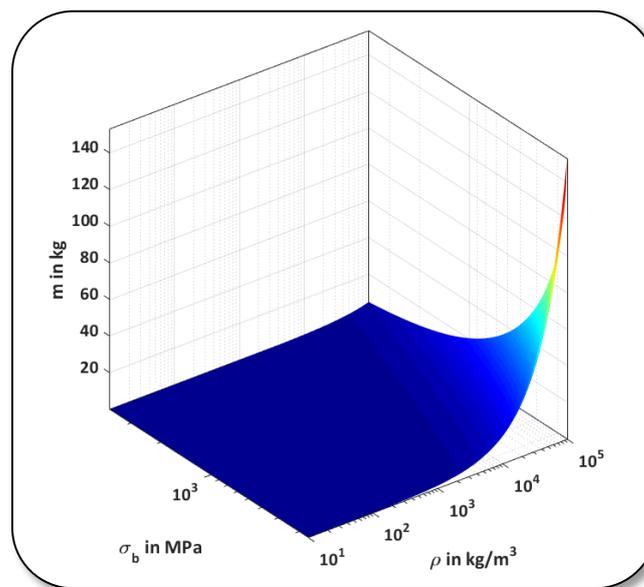


Abbildung 5-22: Die 3D-Lösungsfläche der Masse im Falle der geforderten Biegefestigkeit

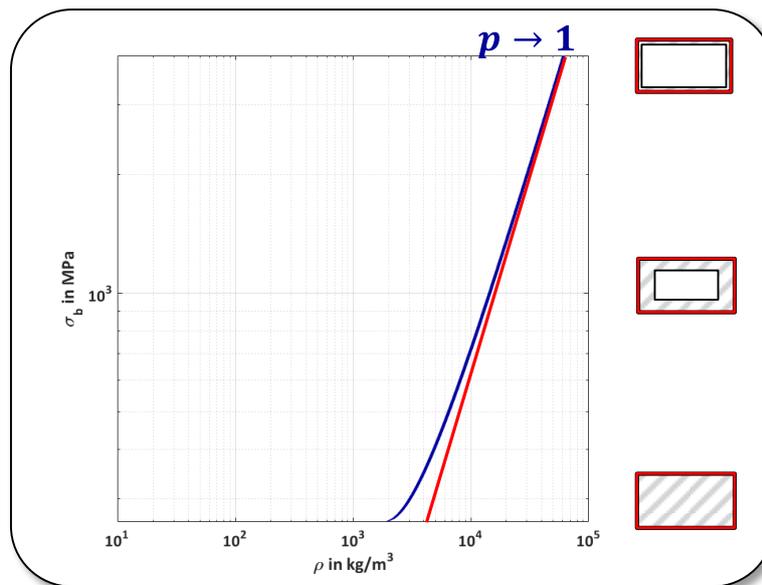


Abbildung 5-23: 2D-Ansicht des Schnittbildes der 3D-Lösungsfläche für den ausgewiesenen Belastungsfall der Biegefestigkeit bei einer Masse von $m = 3 \text{ kg}$ sowie schematische Darstellung der Bauraumfüllung auf Basis des notwendigen Grenzmaterials bei $\sigma_{b0}(t_{\text{voll}}) = 262,3 \text{ MPa}$

Demnach befinden sich die Werkstoffe für Bauteillösungen die ein geringeres Gewicht als 3 kg aufweisen links der blauen Niveaulinie und die schwereren entsprechend rechts davon. Wie bereits bei der Betrachtung Knickbelastung und der Biegesteifigkeit lässt sich auch im Fall der Biegefestigkeit derselbe kontinuierliche Kurvenverlauf, mit einer Annäherung der Steigung p von 0 nach 1, ausmachen.

5.4.2.6 Torsionssteifigkeit

Im Falle einer Torsionsbelastung mit einem Moment $M_t = 175 \text{ Nm}$, bei einem maximal zulässigen Verdrehwinkel von $\varphi = 2^\circ$, resultiert eine zu erbringende Steifigkeitsanforderung von $S_T = 5.013 \frac{\text{Nm}}{\text{rad}}$ für das Strukturbauteil. Selbige findet innerhalb der zugehörigen Belastungsgleichung (vgl. Abbildung 5-4, S. 99)

$$G\left(\frac{t}{H}\right) = \frac{S_T L}{H^4} \left(\frac{2}{3} \left((Q+1) \left(\frac{t}{H}\right)^3 - 2 \left(\frac{t}{H}\right)^4 \right) + 2 \frac{(Q-\frac{t}{H})^2 (1-\frac{t}{H})^2}{Q+1-2\frac{t}{H}} \frac{t}{H} \right)^{-1} \quad (5-22)$$

gemeinsam mit den bekannten Bauraumkenngrößen Berücksichtigung. Die Mindestanforderung an einen Werkstoff berechnet sich somit bei voller Bauraumausfüllung zu $G_0(t_{\text{voll}}) = 17.815 \text{ MPa}$. Gemeinsam mit der gewählten Obergrenze $G_{OG} = 100.000 \text{ MPa}$ führt dies zu der in Abbildung 5-20 dargestellten Lösungsfläche für die Masse.

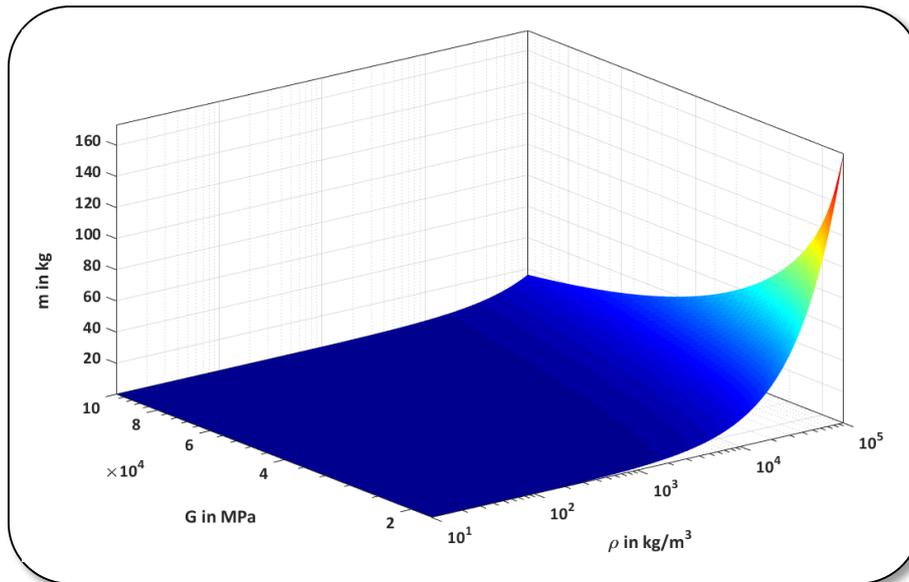


Abbildung 5-24: Die 3D-Lösungsfläche der Masse im Falle der geforderten Torsionssteifigkeit

Die Annahme einer konstanten Bauteilmasse von $m = 2 \text{ kg}$ führt in diesem Fall zu dem in Abbildung 5-25 dargestellten Schnittbild, welches den Kurvenverlauf der entsprechenden Auswahllinie gleicher Werkstoffeignung repräsentiert. Werkstoffe die einen geringeren Massebedarf als $m = 2 \text{ kg}$ aufweisen, befinden sich demnach links der Auswahllinie. Schwerere Lösungen sind rechts davon zu finden.

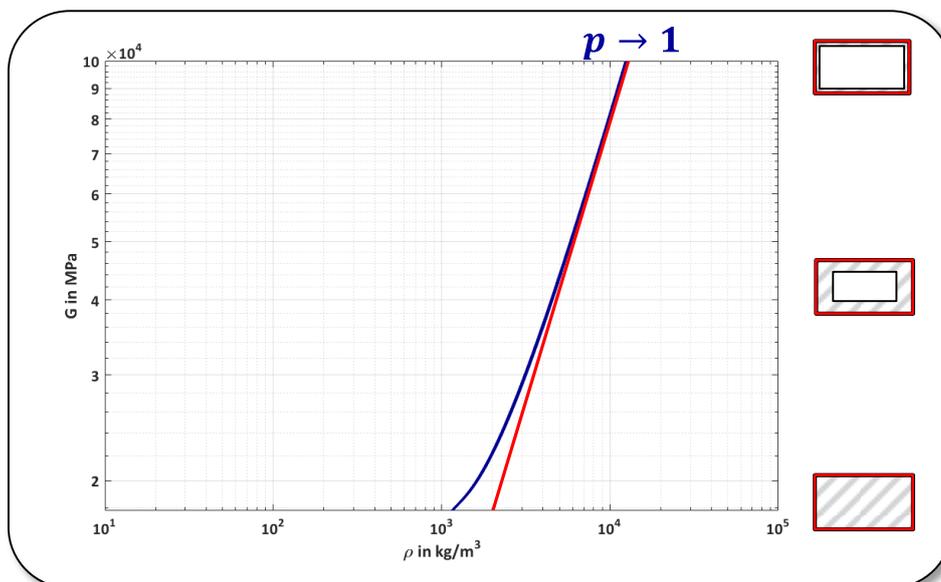


Abbildung 5-25: 2D-Ansicht des Schnittbildes der 3D-Lösungsfläche für den ausgewiesenen Belastungsfall der Torsionssteifigkeit bei einer Masse von $m = 2 \text{ kg}$ sowie schematische Darstellung der Bauraumfüllung auf Basis des notwendigen Grenzmaterials bei $G_0(t_{\text{voll}}) = 17.815 \text{ MPa}$

Bei genauerer Betrachtung der Niveaulinie nahe der Mindestanforderung G_0 lässt sich ein Wechsel des Steigungsanstiegs erkennen. Ausgehend von einer Anfangssteigung nimmt der Kurvenverlauf bis zu einer gewissen, reduzierten Bauraumfüllung ab und nähert sich anschließend für abnehmende Wandstärken kontinuierlich der Steigung $p = 1$ an. Dieser Verlauf lässt sich auf die Beschreibung des Torsionsverhaltens mit dem Approximationsansatz nach Marshall [Mars72], [RiOD03], vom Vollprofil zum dickwandigen und anschließend dünnwandigen Hohlprofil, zurückführen (vgl. Kapitel 5.1, S. 95). Demnach kann das Material im inneren eines Profils zunehmend schlechter genutzt werden und führt somit ab einem gewissen Füllverhältnis des Bauraums zu einer rapiden Eignungsabnahme (siehe Abbildung 5-25 nahe der ρ -Achse).

5.4.2.7 Torsionsfestigkeit

Bei der Auslegung eines torsionsbelasteten Hohlprofils gegen Werkstoffversagen muss zu jederzeit sichergestellt sein, dass das Bauteil einem aufgebracht Torsionsmoment (z.B.: $M_t = 500 Nm$) mit einer vorgegebenen Sicherheit (Annahme hier: $S_v = 3$) standhält. Die Beschreibung des Bauteilverhaltens erfolgt dabei auf Basis der zugehörigen Belastungsgleichung (vgl. Abbildung 5-5, S.99)

$$\tau_t \left(\frac{t}{H} \right) = \frac{M_t S_v \left(H \frac{t}{H} \left(2H \left(2Q + 1 - 2 \frac{t}{H} \right) + 2 \left(H^2 \left(Q - \frac{t}{H} \right) \left(1 - \frac{t}{H} \right) \right) \right) \right)}{2H \left(Q + 1 - 2 \frac{t}{H} \right) \frac{\left(\frac{t}{H} \right)^3 \left(2H \left(Q + 1 - 2 \frac{t}{H} \right) \right)}{3} + H \left(4 \left(H^2 \left(Q - \frac{t}{H} \right) \left(1 - \frac{t}{H} \right) \right)^2 \frac{t}{H} \right)} \quad (5-23)$$

in Abhängigkeit zu den relevanten Bauraumkenngrößen. Der interessante Untersuchungsraum befindet sich in diesem Beispiel zwischen der Mindestanforderung $\tau_{t0(t_{voll})} = 124,9 MPa$ und der gewählten Obergrenze von $\tau_{tOG} = 3.000 MPa$. Die daraus resultierende Lösungsfläche ist in Abbildung 5-26 zu sehen.

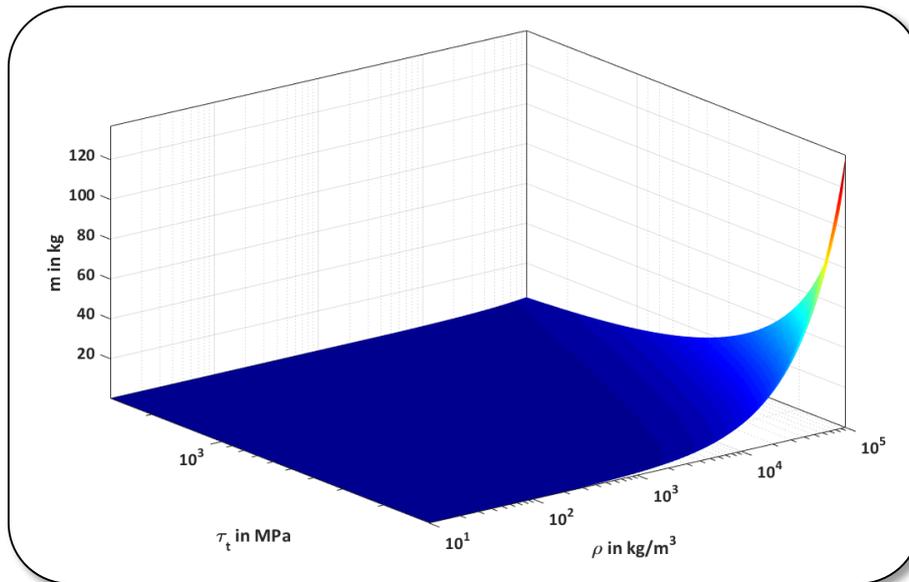


Abbildung 5-26: Die 3D-Lösungsfläche der Masse im Falle der geforderten Torsionsfestigkeit

Um die Auswahllinien gleicher Werkstoffeynung zu visualisieren, wird ein Schnittbild auf konstantem Z-Niveau (hier: $m = 2 \text{ kg}$) erzeugt (Abbildung 5-27).

Lösungen die unter diesem Belastungsfall eine geringere Masse als 2 kg aufweisen, sind links der Linie gleichen Masseniveaus (blau) zu finden. Zudem lässt sich auch hier eine Annäherung der Kurve an die Steigung 1 für abnehmende Bauraumfüllverhältnisse ausmachen. Abweichend zum Kurvenverlauf der Torsionsteifigkeit, lässt sich bei der –festigkeit jedoch kein Wechsel der Steigungszuwachsrichtung nahe der vollen Bauraumausfüllung erkennen.

Dies lässt sich auf die Beschreibung des Widerstandsmoments nach Marshall [Mars72], [RiOD03] zurückführen (vgl. Kapitel 5.1, S. 95), welches durch entsprechende Parameterergänzungen den zuvor erzeugten Effekt des Trägheitsmomentes (siehe Steifigkeitsformulierung, Kapitel 5.4.2.6) wieder neutralisiert.

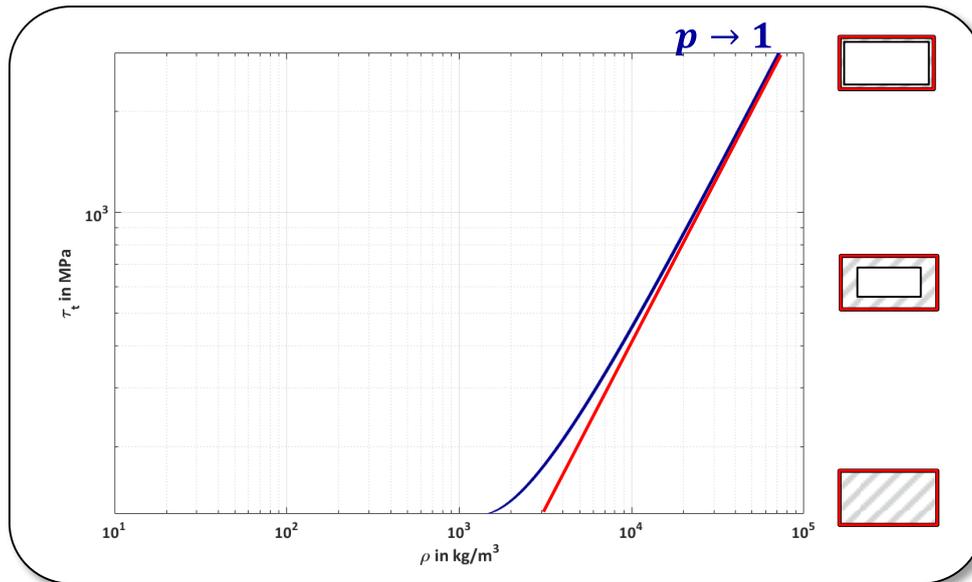


Abbildung 5-27: 2D-Ansicht des Schnittbildes der 3D-Lösungsfläche für den ausgewiesenen Belastungsfall der Torsionsfestigkeit bei einer Masse von $m = 2 \text{ kg}$ sowie schematische Darstellung der Bauraumfüllung auf Basis des notwendigen Grenzmaterials bei $\tau_{t0}(t_{voll}) = 124,9 \text{ MPa}$

5.4.2.8 Zusammenfassung der Erkenntnisse

Die aus den vorangegangenen Kapiteln hergeleiteten, lastfallspezifischen Schnittbilder gleicher Masse bieten die Möglichkeit zur Identifizierung des leichtesten Profilwerkstoffs auf Basis einer beliebig wählbaren Materialdatenbank, welche über die notwendigen Kennwerte (siehe Kapitel 2.3.6, S. 62) zum Eigenschaftsabgleich verfügt. Zudem lässt sich für alle trägheitsmomentabhängigen Lastfälle, ausgehend von der zu bestimmenden Werkstoffmindestanforderung $WK_0(t_{voll})$ (Gerade mit der Steigung $p = 0$), mit abnehmendem Bauraumfüllverhältnis, eine Annäherung der Auswahllinie gleichen Masseniveaus an eine Gerade mit der Steigung $p = 1$ erkennen (Abbildung 5-28).

Die Ausprägung der Kurvensteigung hängt dabei allein vom Einfluss der querschnittsbeschreibenden Parameter B und H auf das Trägheitsmoment ab. Jene sorgen somit je nach Gewichtung für einen größeren oder kleineren Anstieg des Trägheitsmoments bei Variation der inneren Wandstärke. Ein anschauliches Beispiel hierfür liefert ein Fall, in dem die Fläche der äußeren Bauraumbegrenzung konstant bleibt und lediglich die Parameter B und H miteinander vertauscht werden. Auf Grund des hohen Einflusses im Falle einer Biegebelastung würde eine sehr viel schnellere bzw. langsamere (je nach Anfangszustand) Annäherung des Steigungsverlaufs an $p = 1$ resultieren, während bei einer Torsionsbelastung die Steigungsverläufe vor und nach der Bauraumvariation identisch wären.

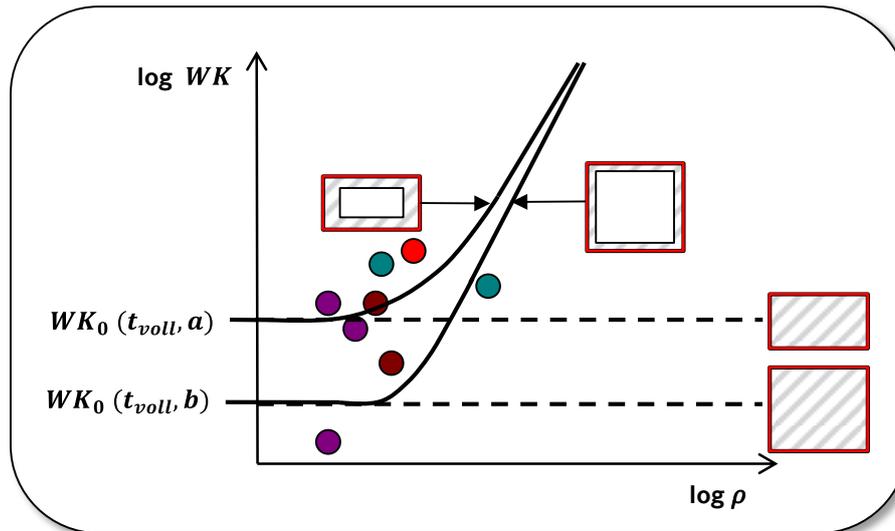


Abbildung 5-28: Schematische Darstellung des Verlaufs der Werkstoffauswahlkurven in Folge einer Veränderung des Trägheitsmoments

Da bei Zug- und Druckbelastungen der Position der Werkstoffanordnung keinerlei Bedeutung zu Teil wird, bleiben jene von diesem Steigungsverlauf unberührt, was sich durch den direkten Übergang der Steigung 0 zur Steigung 1 in den dazugehörigen Schaubildern kennzeichnet (vgl. Abbildung 5-15, S. 111 und Abbildung 5-17, S. 112). Jedoch unabhängig von der Art des Lastfalls haben alle Parameter einer beliebigen Belastungsgleichung die Möglichkeit, durch ihre Variation die Höhe der Werkstoffmindestanforderung $WK_0(t_{voll})$ zu beeinflussen. Weitere Detailauswertungen zu den lastfallspezifischen Kurvenverläufen mit dem Fokus auf das Steigungsverhalten können dem Anhang (ab S. 170) entnommen werden.

Während diese Vorgehensweise aus wissenschaftlicher Sicht große Vorzüge bietet, um vereinfacht angenommen Strukturbauteilen (also rechteckigen Hohlprofilen) jederzeit den geeignetsten Leichtbauwerkstoff zu zuweisen, so verhindern einige Randbedingungen aus der industriellen Praxis den dortigen vollumfänglichen Einsatz. Hierzu zählt bspw. die fehlende, automatisierte Einbindung komplexer Kurvenfunktionen innerhalb verfügbarer Softwarepakete zur Materialauswahl, was einen aufwendigen, manuellen Prozess durch das Übereinanderlegen gleich großer Bildausschnitte erfordert. Gepaart mit der fortwährenden Variation der Last- und Bauraumanforderungen entlang des Entwicklungsprozesses, stellt diese Arbeitsmethode ein unzumutbares Verhältnis von Aufwand zu Nutzen für den Bauteilentwickler dar.

Unter der Berücksichtigung der Gegebenheit, dass insbesondere bei Strukturbauteilen des Karosserierohbaus überwiegend dünnwandige Lösungen zum Einsatz kommen, entfernt sich der praxisrelevante Auswahlbereich dieser exakten Vorgehensweise für eine Vielzahl von Bauteilen vom variationsempfindlichen Anfangsbereich der Auswahlkurven. Somit bestünde die Möglichkeit die komplexe Formulierung der Linien gleicher Massen (Abbildung 5-29 links) durch die beiden Ersatzgeraden mit den Steigungen $p = 0$ und $p = 1$ zu ersetzen (Abbildung 5-29 rechts).

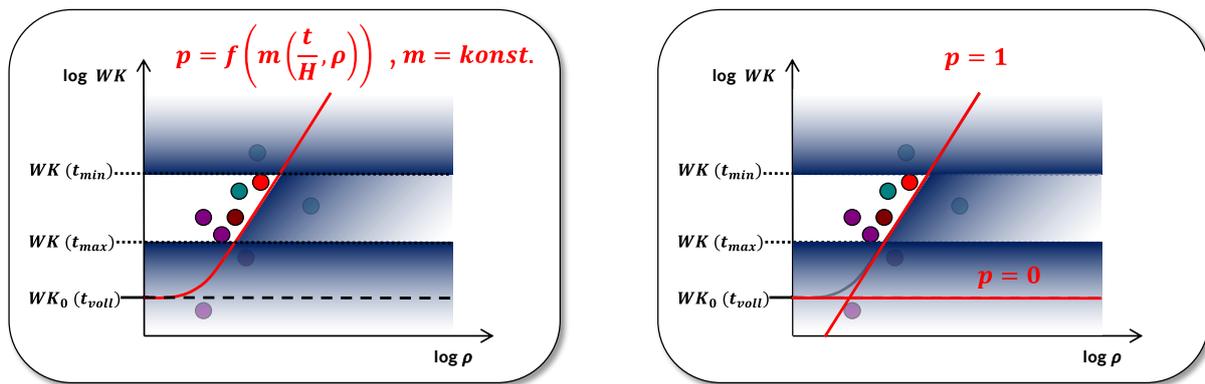


Abbildung 5-29: Vereinfachte Berücksichtigung (rechts) der komplexen Auswahlkurven gleicher Massen (links) für rechteckige Hohlprofile

Diese Vorgehensweise würde selbst bei ständiger Variation der Bauraum- und Lastanforderungsprofile eine schnelle Vorauswahl an interessanten Einsatzwerkstoffen für den jeweiligen Belastungsfall ermöglichen.

Um jedoch Fehlentscheidungen im Rahmen des Konzeptvergleichs (siehe Kapitel 5.6, S. 126), bei hohen Bauraumfüllverhältnissen, durch Vereinfachung der Ansätze vorzubeugen (bspw. bei kleinen Bauteilen), sollen fortfolgend weiterhin die exakten Formulierungen Berücksichtigung finden. Um dabei dennoch die angestrebte Benutzerfreundlichkeit bei der Werkstoffauswahl für den Anwender zu gewährleisten, sollen auf Basis dieser exakten Werte eigene Auswahlshaubilder für jenen spezifischen Anwendungsfall in der Fahrzeugstrukturbauteilentwicklung entworfen werden. Die Selektion anhand von Funktions- und Gewichtseigenschaften, wie in den klassischen Auswahlshaubildern, stellen dabei jedoch nur einen Teilaspekt des Gesamtgefüges einer vollumfänglichen und systematischen Werkstoffauswahl dar. Für einen gesamtheitlichen Konzeptvergleich ist die zusätzliche Berücksichtigung der Bauteilkosten sowie der anfallenden Leichtbaumehrkosten notwendig (Kapitel 5.5), um eine finale Werkstoffentscheidung treffen zu können.

5.5 Berücksichtigung der Bauteilkosten

Wohlwissend dass die Materialkosten K_m nur unter bestimmten Randbedingungen als dominante Größe der Herstellkosten K_h im Automobilssektor, für eine erste Abschätzung der Bauteilkosten K_b , herangezogen werden können, dienen diese dennoch häufig als erster Anhaltswert in der frühen Phase der Entwicklung (vgl. Kapitel 2.3.2, S. 46).

Die einhergehenden Mehraufwendungen im Falle einer exakten Kalkulation hemmen jene Vorgehensweise ebenso wie die hohe Volatilität der Bauteilgeometrie in dieser frühen Phase der Entwicklung, welche ebenfalls einen großen Einfluss auf die Fertigungskosten haben kann.

Besteht dennoch die Möglichkeit zu diesem Zeitpunkt bereits genauere Werte zu beschaffen, können diese problemlos mit denen in dieser Arbeit vereinfachten Kostenannahmen ausgetauscht werden. Das Vorgehensmodell zur systematischen Werkstoffauswahl behält dabei unabhängig von der angewandten Methodik zur Kalkulation der Bauteilkosten jederzeit uneingeschränkte Gültigkeit. Wichtig ist lediglich, dass die formelseitige Formulierung der Kosten in Abhängigkeit der Bauteilwandstärke t geschieht. Nur so ist es möglich die Einflüsse, der durch Bauraum- und Lastvariationen hervorgerufenen Änderungen der funktionstauglichen Bauteilwandstärken, auch kostenseitig zu bewerten.

Im Falle der vereinfachten Annahme gilt es die Kosten pro Kilogramm für jeden Werkstoff innerhalb der zum Einsatz kommenden Werkstoffdatenbank (vgl. Abbildung 5-2, S. 97), zusätzlich zu den bereits genannten funktionsrelevanten Werkstoffkennwerten, zu ergänzen.

Während sich die tatsächlich benötigten Massen m verschiedener Bauteilkonzepte, auf Basis des notwendigen Bauraumfüllverhältnisses $\frac{t}{H}(WK)$ (vgl. Kapitel 5.3, S. 101) sowie der zugehörigen Dichten ρ , für eine beliebige Anzahl an Werkstoffen ermitteln lassen, errechnen sich die Bauteilkosten

$$K_b = K_m * m\left(\frac{t}{H}, \rho\right) \quad (5-24)$$

durch die Multiplikation mit dem jeweils zugehörigen Wert für die Materialkosten K_m . Dies ermöglicht einen sehr viel genaueren Vergleich der verschiedenen Werkstoffkosten, da entsprechende Kostendifferenzen (ΔK_b) zwischen zwei Konzepten konkret ausgewiesen werden können. Als Vergleichsbasis dient hierzu in der industriellen Praxis immer das

kostengünstigste Konzept ($K_{b\ min}$) mit dem die Funktionstauglichkeit erzielt werden kann. Davon ausgehend werden die notwendigen Mehrkosten

$$\Delta K_b = K_b - K_{b\ min} \quad (5-25)$$

sowie die dadurch jeweils erreichbaren Mindergewichte

$$\Delta m = m(K_{b\ min}) - m(K_b) \quad (5-26)$$

für alle n -Werkstoffkonzepte berechnet. Die Leichtbaumehrkosten K_l ergeben sich somit durch

$$K_l = \frac{\Delta K_b}{\Delta m} \quad (5-27)$$

in Relation zum günstigsten Material. Sonderfälle stellen jene Lösungen dar, die sowohl teurer als auch schwerer als die Vergleichsbasis sind. Sie sind für die Materialentscheidung in der Regel uninteressant. Für alle anderen Lösungen gilt es die entsprechenden Mehrkosten mit dem oberen Grenzwert der zulässigen Leichtbaumehrkosten abzugleichen und somit die rein auf Funktion und Gewicht basierende Leistungsbewertung der Werkstoffe (vgl. Kapitel 5.4, S. 106) durch die zusätzliche Berücksichtigung des Kostenfaktors zu erweitern. Die Verwendung der Auswahllinien gleicher Massen innerhalb der Auswahltaubilder (vgl. Abbildung 5-29, S. 124) wird somit hinfällig, da der direkte Konzeptvergleich inklusive Bauteilkosten zwischen beliebige vielen Werkstoffkonzepten erfolgen kann. Dies führt letztendlich dazu, dass die Grenzen zwischen Werkstoffvorauswahl, -feinauswahl und -entscheidung (vgl. Abbildung 4-1, S. 81) zunehmend verschwimmen. Die zulässigen Mehrkosten können dabei je nach Fahrzeugbaureihe sowie der Position des Bauteils innerhalb des Fahrzeugs (Leichtbauzonen) (vgl. 2.3.7.1, S. 66) berücksichtigt werden, was mitunter zu überraschenden Konzeptwechslern führen kann.

5.6 Materialentscheidung auf Basis eines variablen Konzeptvergleichs

Um letztendlich eine geeignete Materialauswahl treffen zu können, gilt es alle notwendigen Daten die für eine Werkstoffentscheidung von Relevanz sind zu sammeln und dem Bauteilentwickler, in aufbereiteter Form, zur Verfügung zu stellen. Zusammenfassend zählen hierzu in erster Linie die zur Funktionserfüllung notwendige und herstellbare Wandstärke t (Kapitel 5.3, S. 101), die Bauteilmasse m (Kapitel 5.4, S. 106) sowie die damit verbundenen

Kosten K_b und Leichtbaumehrkosten K_l (Kapitel 5.5, S. 125). Aufgrund der volatilen Anforderungssituation der bauraum- und lastbeschreibenden Parameter entlang des Entwicklungsprozesses von Fahrzeugstrukturbauteilen (vgl. Kapitel 2.2.1, S. 34), gilt es diese Kennzahlen jedoch nicht nur für einen statischen Zustand, sondern für die gesamte Bandbreite eines vorherrschenden Schwankungsbereichs, aufzuzeigen. Die dadurch entstehenden Kurvenverläufe für jedes Werkstoffkonzept lassen sich in einem gemeinsamen Diagramm (Abbildung 5-30) abtragen und dienen somit der systematischen Analyse der kritischen Grenzbereiche eines variierenden Anforderungsparameters, der ggf. zum Werkstoffwechsel führen kann.

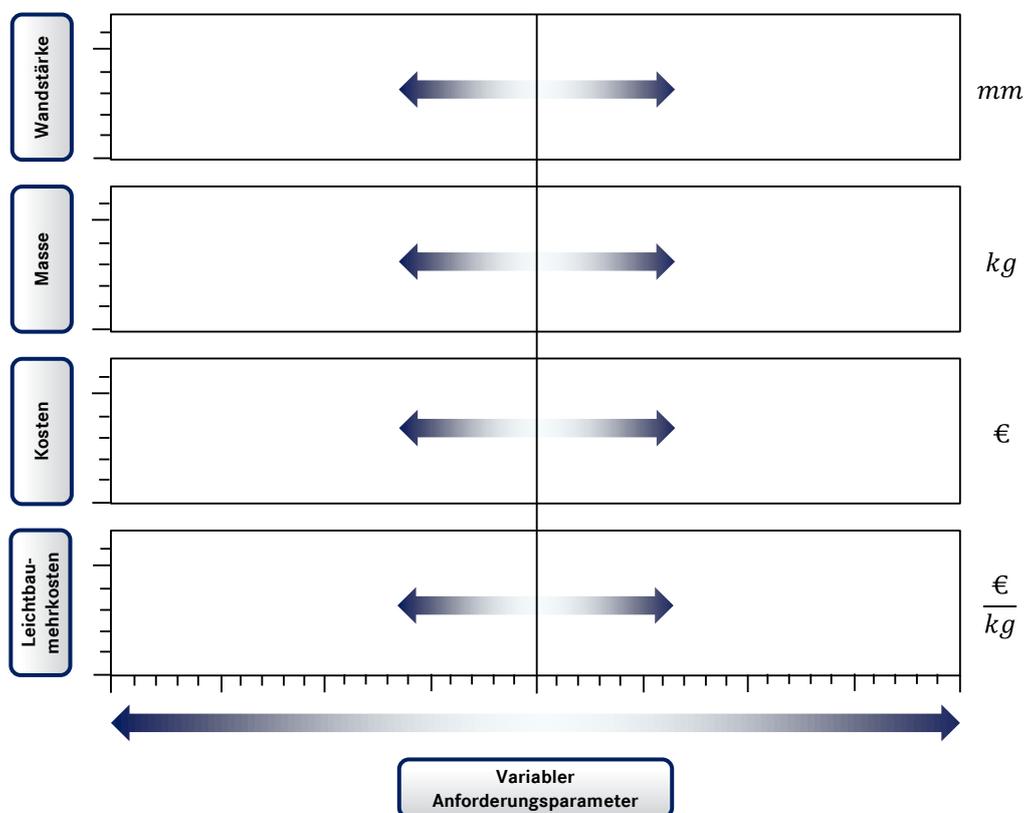


Abbildung 5-30: Darstellung aller relevanten Kennwerte über den Variationsbereich eines beliebigen Anforderungsparameters zur systematischen Werkstoffauswahl

Durch die direkte Kopplung an eine Werkstoffdatenbank ist eine automatisierte Versorgung der in Abbildung 5-30 dargestellten Kenngrößen, für beliebig viele Materialien, möglich. Eine ständige Anpassung der WK_0 -Linie, zur Vorauswahl der relevanten Werkstoffe bei variierenden Eingangsparametern, ist durch diese Vorgehensweise nicht mehr nötig. Aufgrund der fortlaufenden Berechnung der Mindestwandstärken für alle Materialien innerhalb einer vorliegenden Datenbank, lassen sich Werkstoffe die selbst bei voller

Bauraumfüllung den Anforderungen nicht gerecht werden direkt von der Materialauswahl ausschließen und tauchen somit in der Verlaufsdarstellung der vorgestellten Diagramme (vgl. Abbildung 5-30) erst gar nicht auf.

Im Rahmen der nachfolgenden Validierung soll der Werkstoffpool aus Gründen der Übersichtlichkeit möglichst klein gehalten werden. Für die Auswertung an einem Computer ist die Größe der Werkstoffdatenbank jedoch unbegrenzt.

6 Validierung der theoretischen Ansätze auf Basis eines praktischen Fallbeispiels

Nach der theoretischen Herleitung der notwendigen Hilfsmittel für eine systematische Werkstoffauswahl von Fahrzeugstrukturbauteilen in der frühen Phase, gilt es abschließend deren Einsatzfähigkeit im praktischen Umfeld zu überprüfen. In Anlehnung an den in Kapitel 4 (S. 81) vorgestellten Prozessablauf, gilt es hierzu im ersten Schritt die stabilen und instabilen Anforderungen einer Komponente zusammenzutragen, bevor sie unter Verwendung lastfallspezifischer Transferfunktionen für die systematische Werkstoffauswahl, durch die vereinfachte Annahme rechteckiger Hohlprofile, übersetzt werden können. Auf Basis beliebig vieler Werkstoffkonzepte ist es somit möglich, anschließend alle funktionstauglichen Konzepte hinsichtlich ihrer Kosten und ihres Gewichts miteinander zu vergleichen und je nach Zielstrategie das geeignetste, unter Berücksichtigung der variablen Eingangsparameter, auszuwählen.

Je nach Auswirkung eines stabilen Anforderungsparameters auf einen bestehenden Werkstoffpool, kann die daraus resultierende Voreinschränkung durchaus groß ausfallen. Die angenommene Forderung einer gewissen Mindestdehnung von bspw. 2%, um einem abrupten Versagensfall vorzubeugen, schließt bspw. die gesamte Werkstoffgruppe der technischen Keramiken für die weitere Suche aus. Da der Fokus dieser Arbeit jedoch vor allem auf der Berücksichtigung der instabilen Anforderungsprofile beruht, soll die vergleichsweise einfache und in der Literatur ausführlich beschriebene Auswahlmethode anhand stabiler Anforderungsparameter in den Hintergrund rücken.

Zur Abbildung einer reduzierten Werkstoffdatenbank wurden daher für die nachfolgenden Fallbeispiele jeweils zwei Materialien der Werkstoffgruppen Aluminium, Stahl und Werkzeugstahl willkürlich gewählt und repräsentieren die, für die rechnerische Nutzung, beliebig große Datenbank. Die Kennwerte und Werkstoffbezeichnung entstammen der Materialauswahlsoftware des CES-Selectors[®] (Version 2016) und können bei Bedarf entsprechend nachgeschlagen werden (siehe [WWW17]). Firmenspezifische Datenbanken beinhalten ggf. abweichende Kennwerte und führen damit zu anderen Ergebnissen, weswegen der Hauptaugenmerk auf der methodischen Vorgehensweisen sowie der anschließenden Ergebnisinterpretation liegen soll.

6.1 Fallbeispiel Schließstrebe

Die Strukturkomponente „Schließstrebe“ befindet sich im Vorbau des betrachteten Fahrzeugrohbaus. Sie verläuft dabei von links nach rechts und schließt den vorderen Bereich der Karosserie über dem Kühler (Abbildung 6-1).

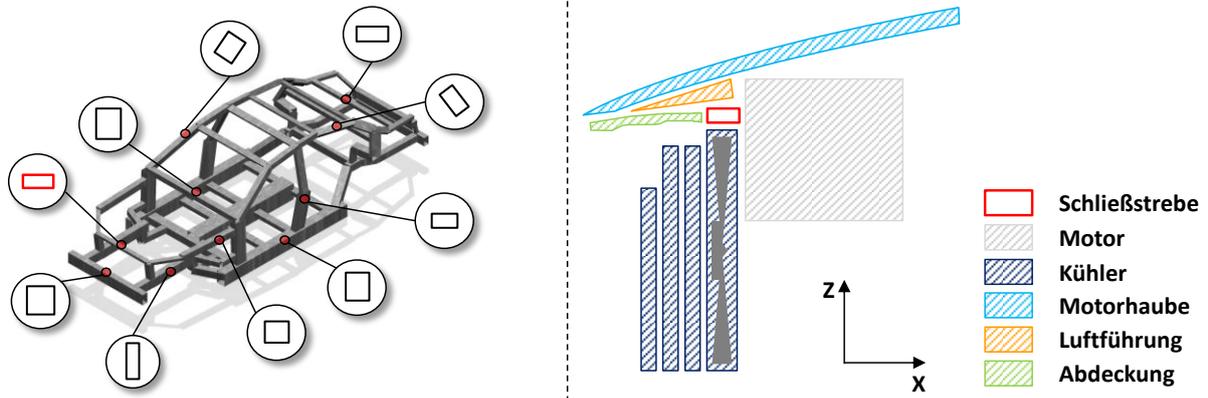


Abbildung 6-1: Vereinfachte Darstellung eines Fahrzeugrohbaus anhand rechteckiger Hohlprofile in der frühen Entwicklungsphase (links) sowie eine Schnittdarstellung mit den bauraumbeeinflussenden Komponenten der auszulegenden Schließstrebe (rechts)

Anhand des Schnittbildes (Abbildung 6-1 rechts) lässt sich ein erster Eindruck dafür gewinnen, welche umliegenden Komponenten einen primären Einfluss auf die Größe des Bauteilquerschnitts der Schließstrebe ausüben.

6.1.1 Startbedingungen

Die begrenzende Hüllgeometrie in der sich das Strukturbauteil aufhalten darf, ergibt sich unter Einhaltung der Mindestabstände zu den Umgebungskomponenten, auf Basis einer ersten vorläufigen Packageaufteilung zu $B = 60,5 \text{ mm}$, $H = 27,5 \text{ mm}$ und $L = 1040 \text{ mm}$. Aus funktioneller Sicht trägt die Strebe einen Teil zur Erfüllung eines vorgegebenen globalen Torsions- und Biegesteifigkeitsziels bei, welches zu einem Großteil aus dem Fahrverhalten resultiert (vgl. Kapitel 2.1.6.2, S. 24). Durch die Analyse bestehender Fahrzeuge mit ähnlichem strukturellen Aufbau lässt sich der Lastfall der Biegesteifigkeit als auslegungsrelevante Komponentenlast bestimmen (Abbildung 6-2).

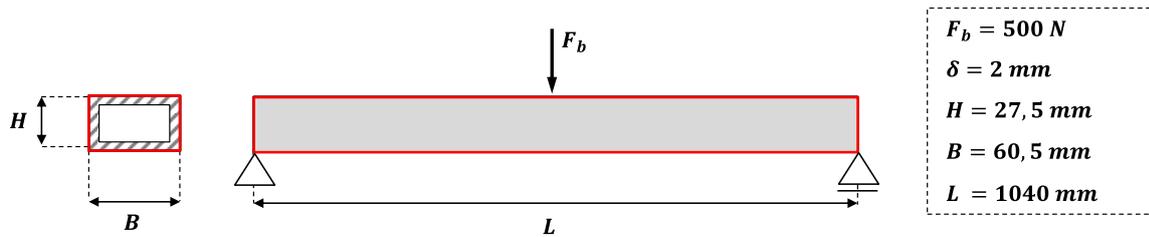


Abbildung 6-2: Relevante Randbedingungen der Schließstrebe bei der Auslegung auf Biegesteifigkeit

Basierend auf den Auswertungen mehrerer Schnittlasten der besagten Komponente innerhalb vergleichbarer Vorgängerfahrzeuge (vgl. Kapitel 4.2, S. 86) ist die Interpolation der Startbedingungen für die Biegebelastung mit $F_b = 500 \text{ N}$, bei einer zulässigen Durchbiegung von $\delta = 2 \text{ mm}$ möglich. Zusätzlich sind aufgrund der Position des Bauteils (vgl. Abbildung 2-44, S. 67) bis zu $15 \frac{\text{€}}{\text{kg}}$ Mehrkosten zu Leichtbauzwecken gestattet.

6.1.2 Systematische Materialauswahl bei instabilem Anforderungsprofil

Jene Startbedingungen lassen sich fortfolgend für die systematische Bestimmung des geeignetsten Werkstoffs sowie der damit verbundenen Wandstärke nutzen. Aufgrund der häufigen Änderungsaufkommen in der frühen Phase der Entwicklung variieren diese Randbedingungen jedoch fortwährend, was die Wahl des geeignetsten Werkstoffs erschwert. Unter Verwendung des vorgeschlagenen Schaubildes aus Kapitel 5.6 (S. 126), lassen sich bei Variation eines Parameters die Entwicklungstrends der Wandstärken, Bauteilgewichte, Bauteilkosten sowie Leichtbaukosten darstellen und ermöglichen somit eine transparente Bewertung der Werkstoffeignung bei variierenden Eingangsgrößen. Nachfolgend soll diese Vorgehensweise anhand verschiedener, praxisnaher Szenarien für die sechs ausgewählten Werkstoffe der reduzierten Materialdatenbank (Abbildung 6-3) durchgeführt werden.

| | E in GPa | ρ in $\frac{kg}{m^3}$ | K_m in $\frac{\epsilon}{kg}$ |
|--|--------------|----------------------------|--------------------------------|
| ■ Aluminum, 8090, T85 1 | 82,0 | 2540 | 12,10 |
| ■ Aluminum, 2024, T35 10/T35 11 | 75,9 | 2770 | 2,31 |
| ■ Low alloy steel, AISI 5140, annealed | 213 | 7850 | 0,53 |
| ■ Low alloy steel, AISI 9310 | 211 | 7850 | 1,09 |
| ■ Tool steel, Molybdenum alloy, AISI M4 (high speed) | 227 | 7900 | 7,01 |
| ■ Tool steel, Molybdenum alloy, AISI M1 (high speed) | 219 | 7820 | 5,21 |

Abbildung 6-3: Notwendige Werkstoffkenngrößen für den Konzeptvergleich im Falle der Biegesteifigkeit

6.1.2.1 Szenario 1: Änderung des Außenhautdesigns (Höhe H)

Das Marketing und der Vertrieb prognostizieren hohe Verkaufszahlen von zukünftigen Fahrzeugen mit SUV²⁶-artigen Designzügen. Ausgehend vom beschriebenen Grundscenario (vgl. Abbildung 6-1 rechts, S. 130) wird daher von der Designabteilung ein neuer Vorschlag für die Fahrzeugaußenhaut generiert. Jener sieht unter anderem eine Erhöhung der Motorhaube im vorderen Bereich vor, welche sich auf die Schließstrebe mit einem Zuwachs von 10 mm in Z-Richtung auswirkt (Abbildung 6-4).

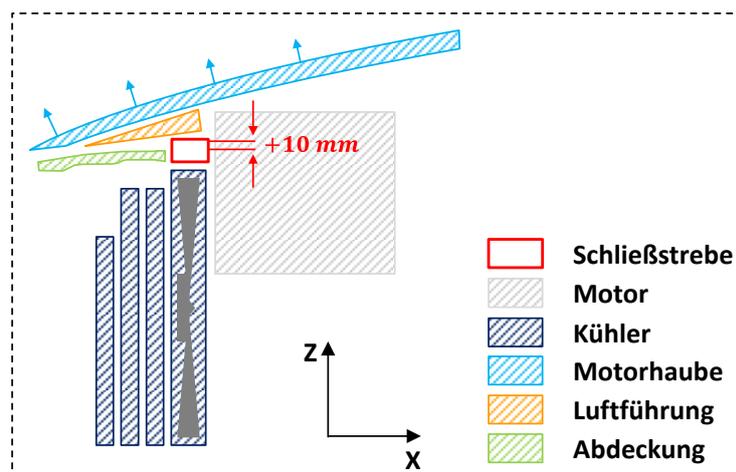


Abbildung 6-4: Die Änderung des Außenhautdesigns bewirkt eine Erhöhung der Motorhaube und somit einen Bauraumzuwachs für die Schließstrebe

²⁶ Sports Utility Vehicle

Die Umsetzung dieser zusätzlichen Bauteilhöhe macht eine erneute Überprüfung der Werkstoffeignung notwendig. Zwischen dem Startwert $H = 27,5 \text{ mm}$ (A) und dem neuen Wert $H = 37,5 \text{ mm}$ (H) ergeben sich somit, für die sechs Werkstoffe aus der Materialdatenbank, die in Abbildung 6-5 dargestellten Kurvenverläufe der auswahlrelevanten Kennzahlen.

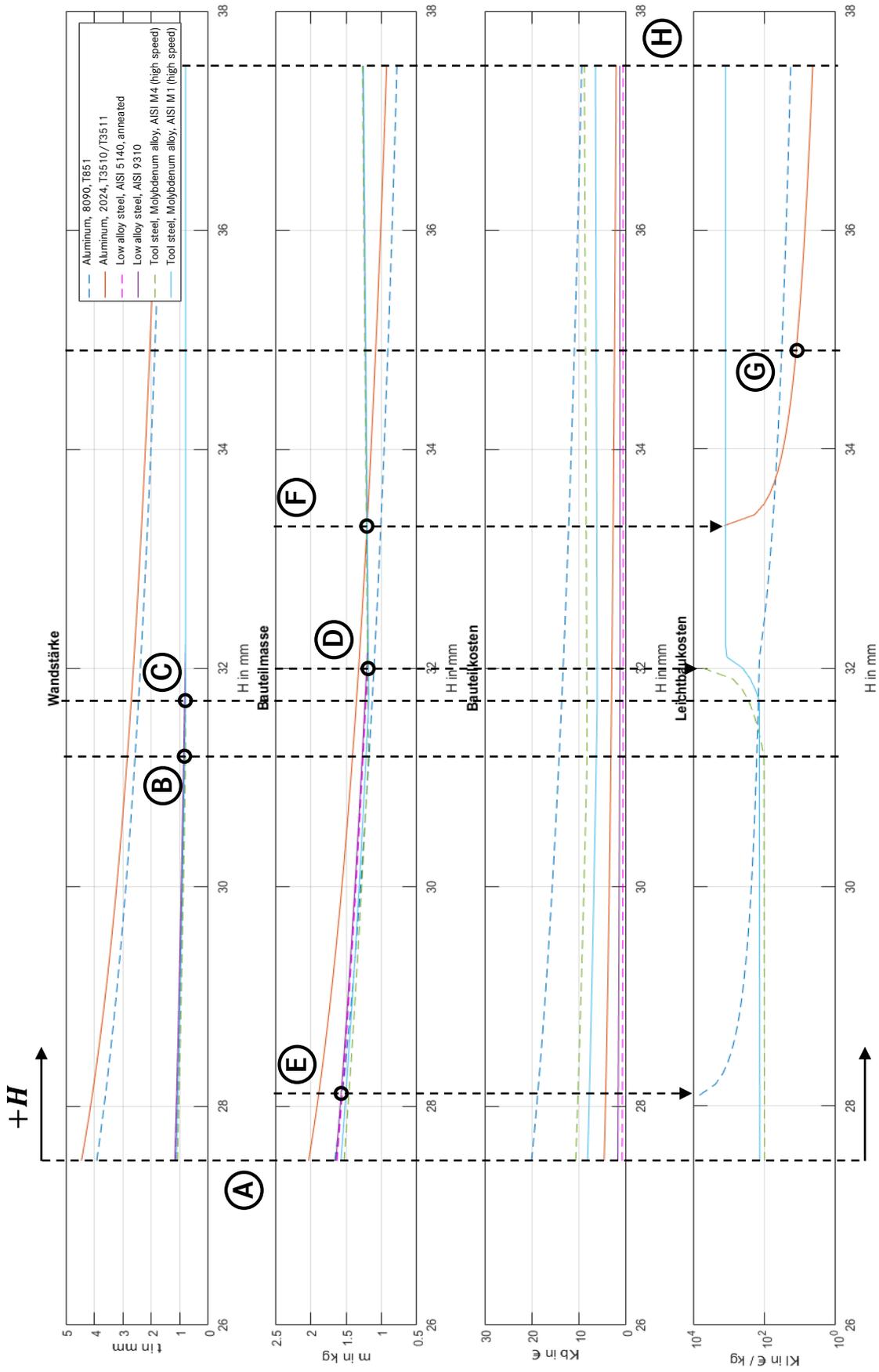


Abbildung 6-5: Verhalten der sechs Materialkonzepte innerhalb des Variationsbereichs $H = 27,5 \text{ mm}$ bis $H = 37,5 \text{ mm}$

Es lässt sich erkennen, dass die pinke Stahllösung in diesem Beispiel das günstigste Konzept über den gesamten Variationsbereich darstellt und somit die Vergleichsbasis für die Ermittlung der Leichtbaukosten bildet. Lösungen, die unter dem Einsatz bestimmter Mehrkosten ein leichteres Bauteilgewicht mit sich bringen, sind demnach im untersten Diagramm (Abbildung 6-5) ersichtlich. Die fehlende Darstellung der lila Stahllösung lässt sich dabei auf die erforderlichen Mehrkosten trotz eines notwendigen Zusatzgewichts zurückführen und ist somit für die Auswahl des geeignetsten Werkstoffs nicht von Interesse.

Die beiden Werkzeugstahllösungen offerieren zu Beginn (A) mit $\sim 100 \frac{\text{€}}{\text{kg}}$ (grün) und $\sim 135 \frac{\text{€}}{\text{kg}}$ (blau) ein reduziertes Bauteilgewicht, jedoch zu sehr hohen Mehrkosten. Mit zunehmender Höhe steigen selbige zum Teil exorbitant an. Markante Punkte zeichnen sich zusätzlich bei (B) $H \approx 31,2 \text{ mm}$ (grün) und (C) $H \approx 31,7 \text{ mm}$ (blau) ab. Hier werden die kleinstmöglichen herstellbaren Werte für die Wandstärke der jeweiligen Materialkonzepte erreicht, was bei weiterem Anstieg der Höhe eine Überdimensionierung zur Folge hat. Dies führt aufgrund der anhaltenden Reduktionsmöglichkeit des Vergleichswerkstoffes (pinker Stahl) zu einem signifikanten Anstieg der zugehörigen Leichtbaukosten der Werkzeugstähle. Ab einem Wert von $H \approx 32 \text{ mm}$ (D) bricht die grüne Lösungskurve sogar ab, da sie selbst bei einer Investition von $\geq 5330 \frac{\text{€}}{\text{kg}}$ kein leichteres Bauteilkonzept als die pinke Stahllösung erzielen kann. Indessen stagniert das blaue Werkzeugstahlkonzept bei einer Höhe von $\sim 32,2 \text{ mm}$ aufgrund des dortigen Erreichens der Mindestwandstärke des Vergleichswerkstoffes (pinker Stahl) und läuft für steigende Werte der Höhe auf einem konstanten Plateau von $\sim 1218 \frac{\text{€}}{\text{kg}}$ für die Leichtbaukosten aus.

Derweil liefert keiner der Aluminiumwerkstoffe zur Starthöhe $H = 27,5 \text{ mm}$ (A) eine leichtere Bauteillösung. Erst ab Werten von (E) $H \approx 28,1 \text{ mm}$ (blau) und (F) $H \approx 33,3 \text{ mm}$ (orange) sind Leichtbaukonzepte denkbar. Während die Kosten hierfür zu Beginn zum Teil noch höher als die Werkzeugstahllösungen ausfallen, gewinnen sie mit ansteigender Bauteilhöhe zunehmend an Bedeutung. Bei der Grenzhöhe von $H = 37,5 \text{ mm}$ (H) lassen sich somit Leichtbaukosten von $\sim 18,40 \frac{\text{€}}{\text{kg}}$ (blau) und von $\sim 4,41 \frac{\text{€}}{\text{kg}}$ (orange) ausweisen. Basierend auf den zu anfangs ausgewiesenen, zulässigen Leichtbaumehrkosten von $15 \frac{\text{€}}{\text{kg}}$ (vgl. Kapitel 6.1.1, S. 130), geht somit die orangefarbige Aluminiumlösung mit einer Wandstärke von $t \approx 1,7 \text{ mm}$

als am geeignetsten hervor. Es gilt jedoch zu beachten, dass jene sehr nahe an einer Konzeptgrenze liegt. Wird durch weitere Variationen wiederum eine Anspannung des Bauteilanforderungsprofils erzeugt, können die zulässigen Leichtbaukosten schnell überschritten werden und die pinke Stahllösung ist erneut die bessere Wahl. Im Falle einer Höhenänderung liegt diese Grenze bei $H \approx 34,7 \text{ mm}$ (G). Bis zu diesem Wert ist eine Aluminiumlösung (orange) zu Leichtbaukosten von ca. $15 \frac{\text{€}}{\text{kg}}$, bei einer zugehörigen Wandstärke von $t \approx 2,1 \text{ mm}$, umsetzbar und anzustreben.

6.1.2.2 Szenario 2: Verblockung eines größeren Motors (Breite B)

Um innerhalb des Kompaktsegments sportlichere Fahrzeugvarianten abbilden zu können, soll ab der kommenden Generation ein leistungsstärkerer Motor aus einem höherklassigen Fahrzeugmodell vorgehalten werden. Dies führt aufgrund der größeren Bauweise zur Einschränkung des Bauraums der umliegenden Bauteile. Der Einfluss schlägt sich dabei mit einer notwendigen Reduktion der Breite B von 10 mm auf die Schließstrebe nieder (Abbildung 6-6).

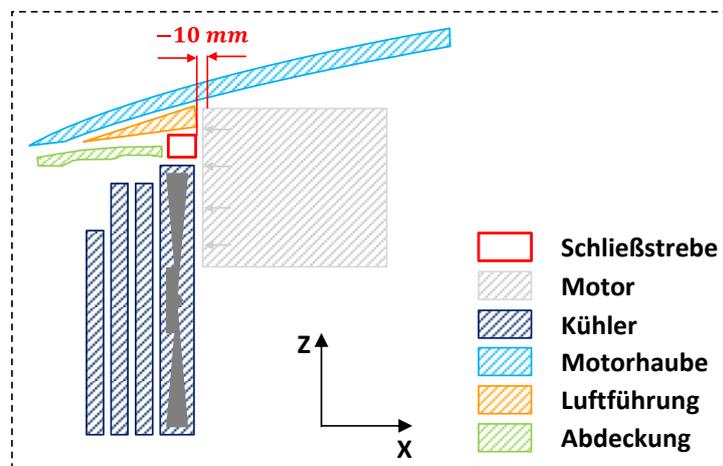


Abbildung 6-6: Die Verblockung eines größeren Motors bewirkt eine Reduktion des Bauraums für die Schließstrebe

Ausgehend von der Bauteilbreite aus Szenario 1 mit $B = 60,5 \text{ mm}$ (A) ergibt sich somit ein Endbreite von $50,5 \text{ mm}$ (B), auf welche es die Werkstoffeignung zu überprüfen gilt. Die Auswahlkripte liefern unter diesen Randbedingungen die in Abbildung 6-7 dargestellten Kurvenverläufe.

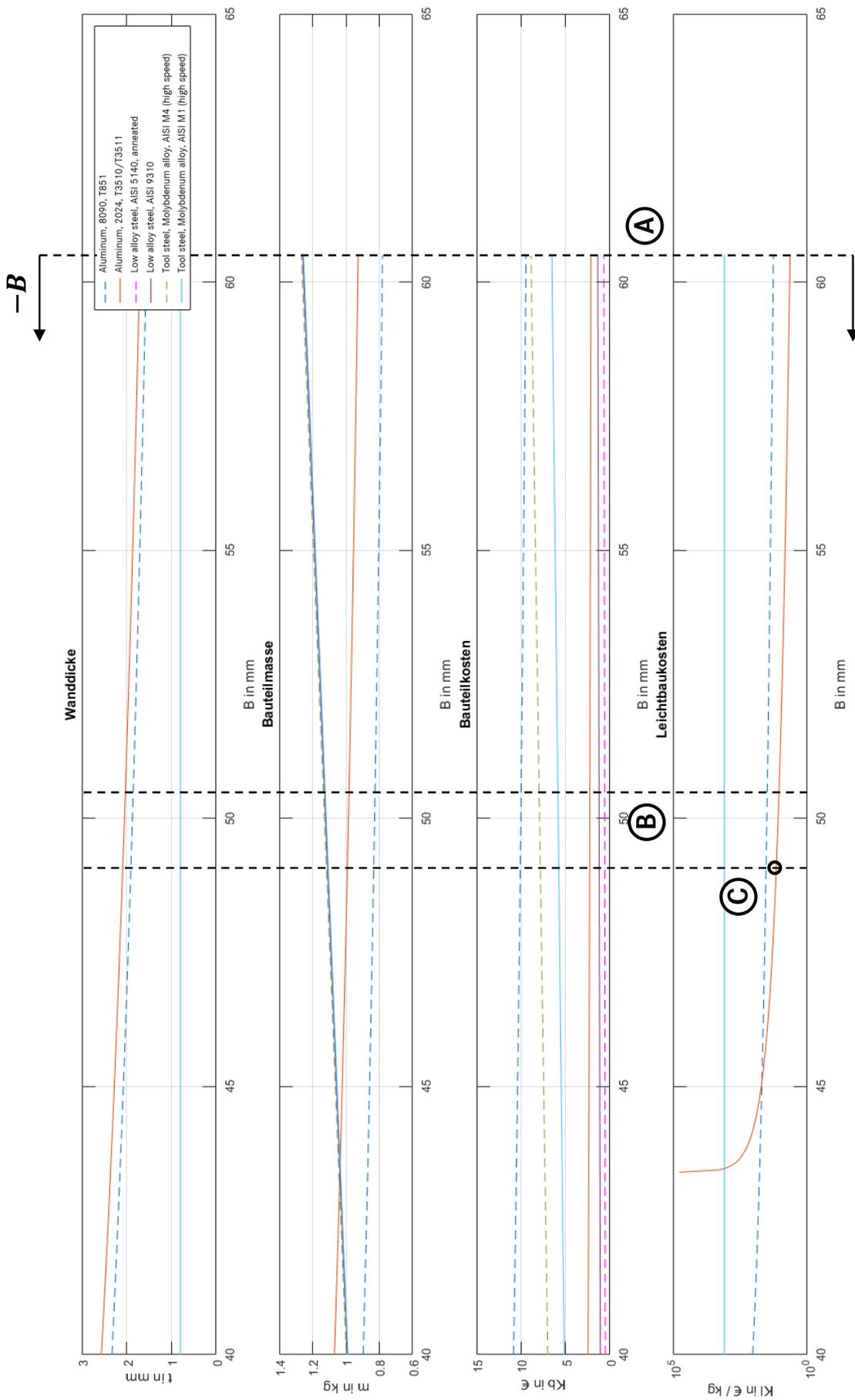


Abbildung 6-7: Verhalten der sechs Materialkonzepte innerhalb des Variationsbereichs $B = 60,5 \text{ mm}$ bis $B = 50,5 \text{ mm}$

Durch die Reduktion des Bauraums steigt die Wandstärke des orangenen Aluminiumprofils von anfänglich $\sim 1,7 \text{ mm}$ (A) bis auf $\sim 2,0 \text{ mm}$ (B) an, um die Funktion weiterhin zu gewährleisten. Daraus resultiert gleichermaßen ein Anstieg des Bauteilgewichts sowie der –kosten. Anders bei der pinken Stahllösung, die aufgrund der erreichten Mindestwandstärke innerhalb des Variationsbereichs auf konstantem Kosten- und Gewichtsniveau bleibt. Dadurch erhöhen sich die aufzuwendenden Leichtbaukosten des orangenen Aluminiummaterials zur Vergleichsbasis des pinken Stahlwerkstoffs mit sinkender Breite B fortwährend. Dennoch bleibt sie auch nach der Reduktion der Bauteilbreite um 10 mm (B) als Zielkonzept bestehen, da die aufzuwendenden Leichtbaukosten mit $\sim 11,31 \frac{\text{€}}{\text{kg}}$ noch immer unterhalb des zulässigen Grenzwerts von $15 \frac{\text{€}}{\text{kg}}$ liegen. Eine Überschreitung wäre erst ab einer Bauteilbreite von $B \leq 48,8 \text{ mm}$ (C) der Fall.

6.1.2.3 Szenario 3: Erhöhung des Radeinschlags (Länge L)

Um den Wendekreis des geplanten Fahrzeugs zu reduzieren, soll der durch die Lenkbewegung hervorgerufene Radeinschlag um wenige Grad erhöht werden. Dies erfordert eine Anpassung der Positionierung der Längsträger und Z-Streben in Richtung Fahrzeugmitte, um eine Kollision mit dem dynamischen Reifen- und Räderpackage zu vermeiden. Im Falle der in Abbildung 6-8 dargestellten Situation bewirkt dieser Einzug eine Gesamtminderung der Länge L von 40 mm der betrachteten Schließstrebe.

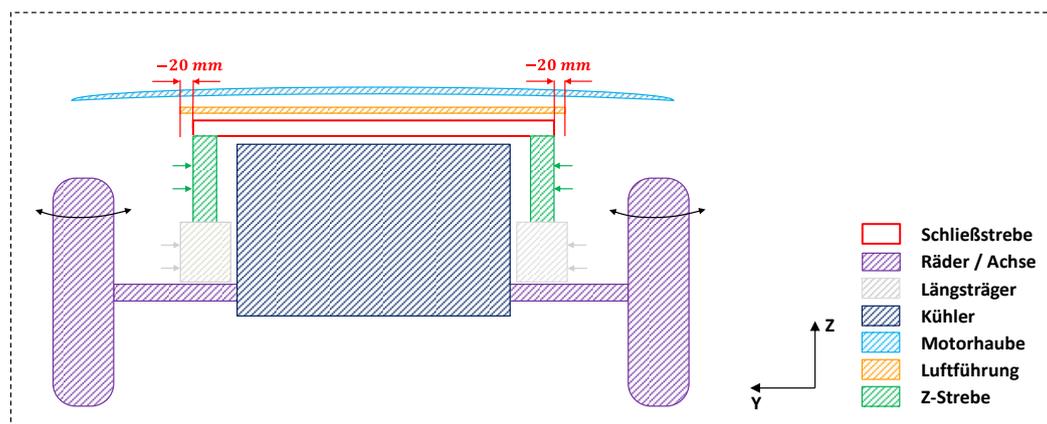


Abbildung 6-8: Die Erhöhung des Radeinschlags bewirkt eine Reduktion des Maßes zwischen den beiden Längsträgern und somit eine Verkürzung der Schließstrebe

Ausgehend von der Belastung aus Szenario 2 (A) ergeben sich für diese Variation der Bauteillänge die in Abbildung 6-9 dargestellten Kurvenverläufe, für die bekannten Materialien der reduzierten Werkstoffdatenbank.

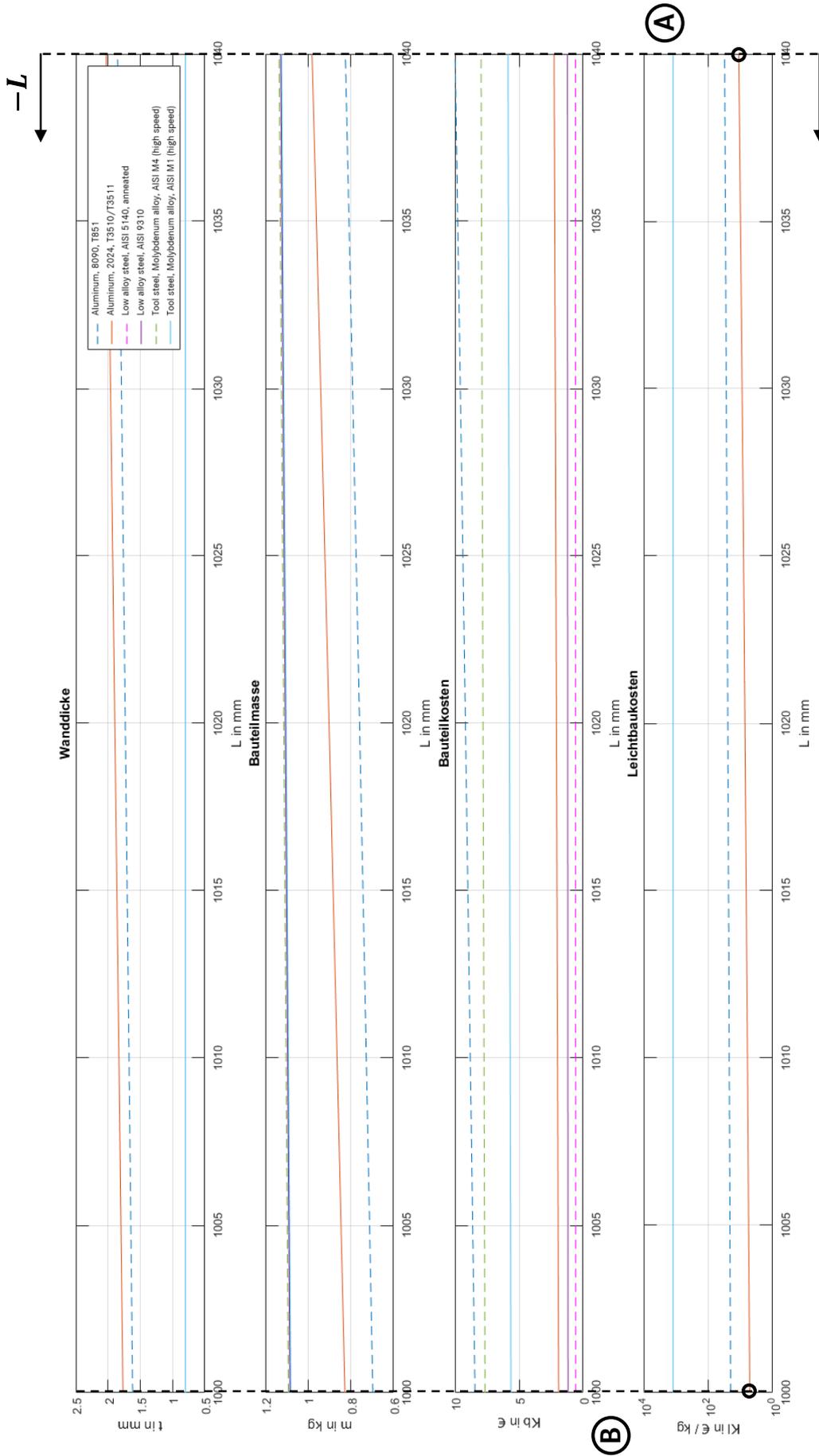


Abbildung 6-9: Verhalten der sechs Materialkonzepte innerhalb des Variationsbereichs $L = 1040 \text{ mm}$ bis $L = 1000 \text{ mm}$

Es lässt sich dabei erkennen, dass über die gesamte Bandbreite der Änderung lediglich drei der übrigen fünf Materialkonzepte eine Leichtbaualternative, im Vergleich zur günstigsten Lösung (pinker Stahl), bieten. Da die orangene Aluminiumlösung fortwährend die geringsten Mehrkosten jener Varianten offeriert und gleichzeitig keinerlei Schnittpunkte zu den anderen beiden Konzeptkurven aufweist, stellt sie innerhalb dieses Variationsbereichs jederzeit die geeignetste Alternativlösung dar. Zudem sinken die notwendigen Mehraufwendungen mit abnehmender Bauteillänge zunehmend. Dieser Effekt bekräftigt die Substitution des pinken Stahl- mit dem orangenen Aluminiumwerkstoff, da selbiger bei Erreichung der maximalen Längenreduktion (B) nur noch eine Wandstärke von $\sim 1,8 \text{ mm}$ und Leichtbaumehrkosten von $\sim 5,19 \frac{\text{€}}{\text{kg}}$ aufweist.

6.1.2.4 Szenario 4: Unsicherheit bzgl. der exakten Fahrzeugmasse (Last F)

Verschiedene Ausstattungspakete führen zu unterschiedlichen Gesamtgewichten eines Fahrzeugs. Diese Unsicherheit bzgl. der Fahrzeugmasse spiegelt sich, je nach Position und Lastverteilung des Gesamtsystems, in einem Variationsbereich für die Bauteilbelastung der betroffenen Komponentenanforderungsprofile wider. Im Falle der Schließstrebe bewegt sich dieser zu erwartende Belastungskorridor in diesem Fahrzeug zwischen dem Ecktyp mit $F = 450 \text{ N}$ (B) und der Vollausstattungsvariante mit $F = 550 \text{ N}$ (C). Die Auswirkungen auf die verfügbaren Werkstoffe lassen sich wiederum mit Hilfe des dazugehörigen Konzeptschaubildes (Abbildung 6-10) aufzeigen.

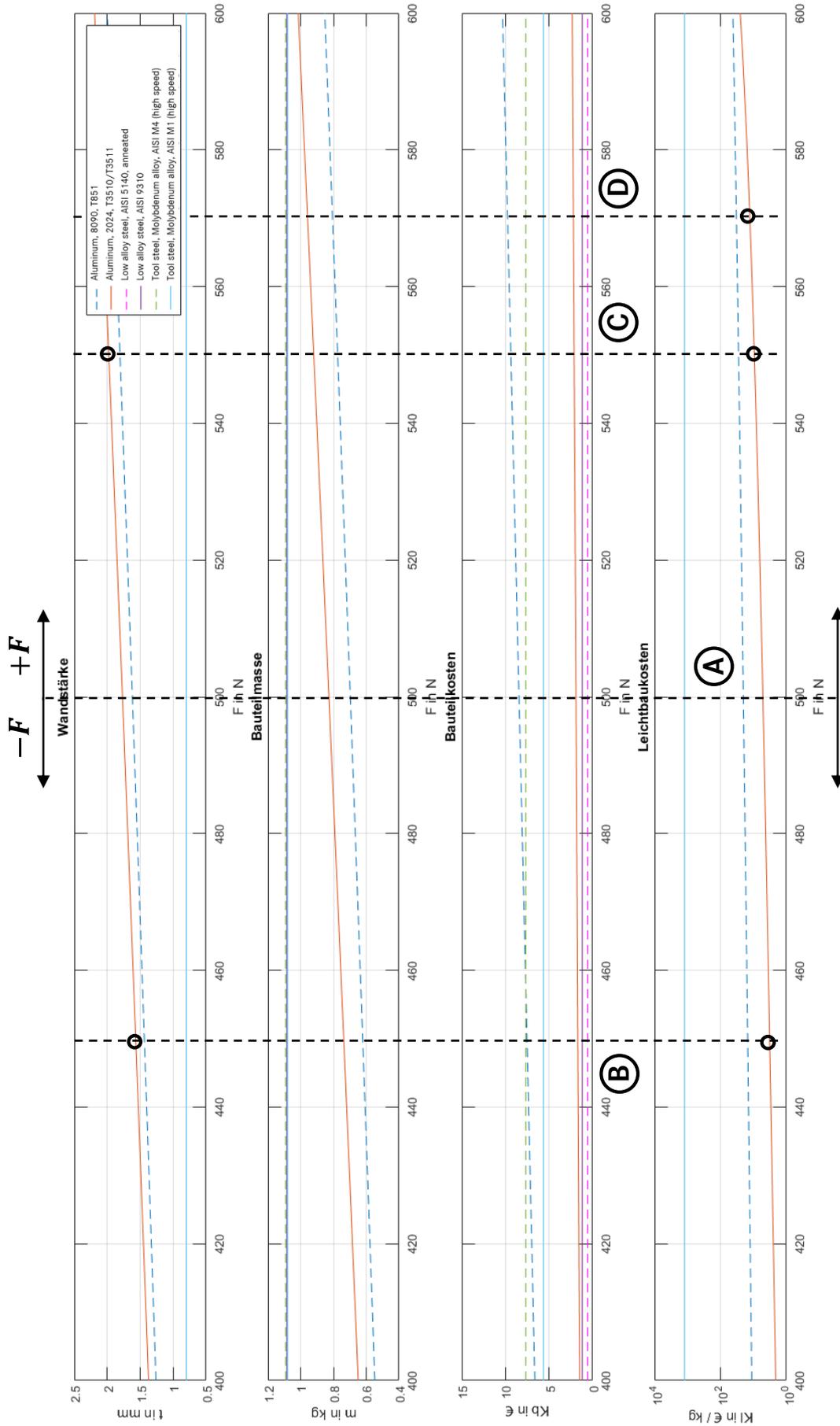


Abbildung 6-10: Verhalten der sechs Materialkonzepte innerhalb des Variationsbereichs $F = 450$ N bis $F = 550$ N

Ausgehend von der vorangegangenen Belastungssituation aus Szenario 3 (A), lässt sich, auch im Falle der angedeuteten unteren (B) und oberen (C) Grenzwerte, keine Veränderung hinsichtlich der Leichtbaualternativen, im Vergleich zur pinken Stahllösung, feststellen. Das orangefarbige Aluminiumkonzept stellt dabei zu jederzeit die Lösung mit den geringsten Leichtbaumehrkosten dar und bewegt sich im vorgegebenem Intervall zwischen Wandstärken von $\sim 1,6 \text{ mm}$ und $\sim 2,0 \text{ mm}$ sowie Leichtbauaufwendungen von $\sim 3,23 \frac{\text{€}}{\text{kg}}$ und $\sim 9,38 \frac{\text{€}}{\text{kg}}$. Entscheidend ist hierbei jedoch vor allem der kritischere Wert, da verschiedene Ausstattungskombinationen keine Rohbauvarianten hervorrufen sollen und dieser somit den auslegungsrelevanten Kennwert definiert. Erst außerhalb des Variationsbereichs wird ab einer Last von $F = 578 \text{ N}$ die zulässige Schwelle von $\sim 15 \frac{\text{€}}{\text{kg}}$ (D) an Leichtbaukosten, bei einer Wandstärke von $\sim 2,1 \text{ mm}$ überschritten, was einen Wechsel zur pinken Stahllösung mit sich bringen würde.

6.2 Diskussion der Ergebnisse

Die Durchführung der entwickelten Vorgehensweise zur systematischen Materialauswahl für die frühe Phase der Strukturbauteilentwicklung zeigt im Rahmen des praktischen Anwendungsbeispiels, wie die volatilen Bauraum- und Lastanforderungen zur Bestimmung des geeignetsten Werkstoffs eingebunden werden können. Insbesondere der Ansatz zur Ermittlung der belastungsabhängigen Mindestwandstärken für eine beliebige Anzahl an Werkstoffen schafft die Basis für einen kennzahlengestützten Konzeptvergleich. Hierbei werden die Gewichte und Kosten der vereinfacht angenommenen Fahrzeugstrukturbauteile bestimmt und ausgehend von der günstigsten, funktionstauglichen Lösung entsprechende Leichtbaumehrkosten ausgewiesen. Durch die Festlegung eines oberen Grenzwerts für jene Mehraufwendungen können somit, je nach Zielstrategie, auch andere Werkstoffe als der günstigste von Interesse sein, um die vorgegebenen Leichtbauziele zu erfüllen. Darüber hinaus ist auch die Berücksichtigung fertigungstechnischer Grenzwandstärken von essenzieller Bedeutung, um lediglich realistische Konzepte miteinander zu vergleichen. Es zeigt sich nämlich, dass abrupte Konzeptwechsel häufig dort auftreten, wo eine Reduktion des Anforderungsprofils, bis zur Erreichung der Mindestwandstärke des günstigsten Werkstoffs, stattfindet. Jede weitere Minderung des Anforderungsprofils kann somit nicht anhand einer Wandstärkenreduktion ausgeglichen werden, was sich als Vorteil für die übrigen

Werkstoffkonzepte auswirkt, da diese somit im Kosten- und Gewichtsvergleich schlagartig auf interessante Kennzahlenbereiche zusteuern.

Während das ausgewählte Beispiel der Schließstrebe einen spezifischen Anwendungsfall eines biegebelasteten Strukturbauteils mit vorgegebenem Steifigkeitsziel präsentiert, ist diese Vorgehensweise problemlos auf beliebige Belastungsarten (Zug, Druck, Knicken, Biegung, Torsion) mit dem dazugehörigen Auslegungsziel (Steifigkeit, Festigkeit) übertragbar.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Ziel des folgenden Kapitels ist es im Rahmen eines Resümees die Kernpunkte der Arbeit noch einmal kurz zusammenzufassen und die eingangs gestellten Forschungsfragen zu beantworten. Abschließend soll durch eine offene Diskussion der Arbeit ein Ausblick für mögliche Folgeaktivitäten gegeben werden.

7.1 Resümee

Die Entwicklung eines Vorgehensmodells zur systematischen Materialauswahl von Fahrzeugstrukturbauteilen liegt im allgegenwärtigen Fokus jeder Phase dieser Ausarbeitung. Beginnend mit der Klärung des Forschungsbedarfs (Kapitel 1) erfolgt eine drauf basierende Analyse der relevanten Themenfelder in Forschung und Technik (Kapitel 2). Aus einer Fülle angrenzender Teilgebiete lassen sich dabei insbesondere die Anforderungsklä- rung- sowie der Prozessablauf in der Fahrzeugstrukturbauteilentwicklung als essenzielle Bestandteile einer systematischen Werkstoffauswahl identifizieren. Hintergrund ist deren substanzieller Einfluss auf die Eingangsgrößen und deren Eintrittszeitpunkte innerhalb des Entwicklungsprozesses, was auf die Aussagegüte einer Werkstoffauswahl mitunter starke Auswirkungen haben kann. Die Analyse der vorherrschenden Ist-Situation führt zu der Erkenntnis, dass die starke Beeinflussung der Strukturkomponenten untereinander eine ständige Anpassung der Bauteilanforderungsprofile bedingt (Kapitel 3). Gerade in der frühen Phase der Fahrzeugentwicklung lassen sich somit keine exakten Last- und Bauraumvorgaben definieren und fixieren, was die klassische Vorgehensweise zur systematischen Materialauswahl jedoch verlangt. Dies ist einer von vielen Gründen weswegen sich in der praktischen Anwendung bislang vor allem erfahrungsbasierte Ansätze durchgesetzt hatten, welche sich in den bekannten Stahl-Schalen- und Aluminium-Spaceframe-Bauweisen wiederfinden.

Aktuell zeichnet sich jedoch der vermehrte Einsatz der Multi-Material-Bauweise ab, um dem ansteigenden Fahrzeuggewicht, durch positionsgerechte Bestimmung des geeignetsten Werkstoffs, entgegenzuwirken und somit die, durch zunehmende Mehrinhalte, ansteigende Gewichtsspirale umzukehren. Darauf aufbauend lässt sich eine systematische Werkstoffauswahl von Fahrzeugstrukturbauteilen, bei vorherrschendem, volatilen Anforderungsprofil allerdings nur dann umsetzen, wenn die Auswirkung einer

Anforderungsänderung auf das Bauraumfüllverhältnis transparent bestimmt werden kann. Erste rudimentäre Ansätze hierzu liefert die Fachliteratur unter dem Begriff der systematischen Werkstoffauswahl in begrenztem Bauraum (vgl. Kapitel 2.3.8, S. 71). Die dort auffindbaren Formulierungen des Bauteilquerschnitts bieten bislang jedoch keine Möglichkeit das Strukturbauteilverhalten, im Falle einer auftretenden Anforderungsvariation in der frühen Entwicklungsphase, vereinfacht abzubilden. Ausgehend von dieser Ansammlung an Defiziten lassen sich die notwendigen Handlungsmaßnahmen ableiten und in zwei separate Themenfelder unterteilen.

Das erste Gebiet (prozessorientiert) adressiert dabei die Klärung der Bauraum- und Lastanforderungsprofile sowie deren Bereitstellung zur systematischen Werkstoffauswahl innerhalb des Strukturbauteilentwicklungsprozesses (Kapitel 4). Um die, zumeist auf Gesamtfahrzeugebene eintreffenden, Rohanforderungen für die systematische Werkstoffauswahl eines jeden Strukturbauteils aufzubereiten, werden diese unter Berücksichtigung des V-Modells schrittweise bis auf Komponentenebene heruntergebrochen. Abhängig von der Art der Anforderungen erfolgt die Zergliederung dabei spezifisch, um zur jeweiligen Komponentenanforderung zu gelangen. Während sich die Lastanforderungen abhängig vom entsprechenden Lastfall sowie der vorherrschenden Fahrzeugstruktur entlang der Kraftpfade ausbreiten und sich somit auf die vorhandenen Strukturkomponenten verteilen, erfolgt die Ermittlung der Komponentenbauraumanforderungen unter der konkurrierenden Verteilung des verfügbaren Platzangebots der Disziplinen Design, Package und Rohbau (Kapitel 4.1). Nach erfolgter Determination der geeignetsten Werkstoffe für jede Komponente, kann anschließend die Funktionsabsicherung auf System-, Disziplin- und Gesamtfahrzeugebene erfolgen (Bottom-Up). In mehreren Iterationsschleifen wird die Anforderungsaufteilung so lange variiert, bis eine aus Gesamtfahrzeugsicht stimmige Zuweisung der Belastungen vorliegt, was zu volatilen Anforderungsprofilen der einzelnen Strukturkomponenten entlang des Entwicklungsprozesses führt. Durch Versionierung dieser Kombinationen aus Bauraum- und Lastanforderungen lassen sich für jede Komponente, bei unterschiedlichen Fahrzeugstrukturen und -größen, entsprechende Erfahrungsprofile anlegen, die bei der Auslegung von ähnlichen bzw. geringfügig abgewandelten Baureihen als erste Eingangsgrößen in der frühen Entwicklungsphase fungieren können (Kapitel 4.2). Bei der Suche nach einer Möglichkeit den Anspannungsgrad, bestehend aus Last- und Bauraumanforderung, mit den Voraussetzungen an die Bauteilfunktion ins Verhältnis zu

setzen, erweist sich der Ansatz zur systematischen Materialauswahl in begrenztem Bauraum nach Wanner [Wann10] als geeignetste Basis für die Beschreibung des Bauteilverhaltens. Die dabei vorgesehene Kompensation eines Anforderungsanstiegs durch einen Wandstärkezuwachs (Bauraumfüllung von außen nach innen) entspricht dabei dem typischen Vorgehen in der automobilen Praxis. Jedoch verhindern die lediglich auf runde Hohlprofile ausgelegten mathematischen Formulierungen die direkte Verwendung dieses Ansatzes für Fahrzeugstrukturbauteile. Eine detaillierte Analyse eines typischen Rohbauteilstrukturteils führt zu der Erkenntnis, dass sich vielmehr der Querschnitt eines rechteckigen Hohlprofils zur vereinfachten Abbildung in der frühen Phase eignet (Kapitel 4.3).

Dementsprechend widmet sich der zweite Teil (Kapitel 5) der Arbeit der Erweiterung dieses Ansatzes (methodenorientiert), mit dem Ziel der Entwicklung eines Vorgehensmodells zur systematischen Materialauswahl von Fahrzeugstrukturbauteilen in der frühen Phase der Strukturbauteilentwicklung, unter Berücksichtigung jener zuvor abgeleiteten, variablen Anforderungsprofile und repräsentiert damit den eigentlichen Kern der Forschungsaktivitäten. Die komplexen Terme, welche bei der Erweiterung des Ansatzes für rechteckige Hohlprofile entstehen (Kapitel 5.1 und 5.2) führen dazu, dass sich die Wandstärke t als gesuchte, freie Variable nicht ohne weiteres vom Rest der Gleichungen separieren lässt. Erst der Umweg über die jeweils zugehörige Residuumsfunktion (Transferfunktion) liefert das Ergebnis für die benötigte Wandstärke, bei gegebener Eingangsbelastung und vorgegebenem Werkstoff (Kapitel 5.3). Die Durchführung dieser Vorgehensweise für beliebig viele Dichte- (ρ) und Werkstoffkennwerte (WK) liefert je nach Lastfall eine spezifische, dreidimensionale Lösungsfläche für die Bauteilmasse (Kapitel 5.4). Unabhängig von der Art des Werkstoffpools lässt sich damit jedem beliebigen Material eine zugehörige Lösungsmasse auf dieser Fläche zuweisen. Dementsprechend führt ein Schnitt der Fläche bei konstanter Masse zu einer Kurve gleicher Werkstoffeffizienz und kann somit in die zweidimensionale Darstellung der Auswahl diagramme nach Ashby [Ashb11] überführt werden, um durch Parallelverschiebung den leichtesten Werkstoff innerhalb einer Materialdatenbank ausfindig zu machen. Da jedoch, gerade in industriellen Anwendungen, dem Kostenfaktor eine nicht zu vernachlässigende Priorität hinsichtlich der Entscheidung des geeignetsten Einsatzwerkstoffs zukommt, muss jener Aspekt ebenfalls in der Auswahllogik einer systematischen Vorgehensweise zur Werkstoffauswahl Berücksichtigung finden (Kapitel 5.5). Die Bereitstellung der wandstärkeabhängigen

Bauteilkosten K_b eröffnet somit letztendlich die Möglichkeit beliebig viele funktionstaugliche und herstellbare Bauteilkonzepte (Material + Wandstärke), hinsichtlich deren individuellen Kosten- und Gewichtsbedarfs, miteinander zu vergleichen und auf Wunsch strategische Zielsetzungen (wie z.B. zulässige Bauteilmehrkosten) im Rahmen der Werkstoffentscheidung zu berücksichtigen. Die Abbildung all dieser entscheidungsrelevanten Kennwerte, über das vorherrschende Variationsspektrum eines Anforderungsparameters, ermöglicht dem Entwickler eine visuelle Darstellung der kritischen Konzeptgrenzen und unterstützt ihn somit bei der Festlegung des geeignetsten Konstruktionswerkstoffs (Kapitel 5.6).

Kapitel 6 stellt darüber hinaus, anhand verschiedener Szenarien in der frühen Entwicklungsphase eines realen Strukturbauteils (Schließstrebe), die Anwendbarkeit des erarbeiteten Vorgehensmodells im Rahmen einer abschließenden Validierung vor.

7.2 Beantwortung der Forschungsfragen

Ausgehend von den zu Beginn sehr allgemein formulierten Forschungsfragen in Kapitel 1, lassen sich selbige durch eine detaillierte Untersuchung der betreffenden Themengebiete aus Forschung und Technik (Kapitel 2) sowie der darauffolgenden Analyse der dort vorherrschenden Defizite entsprechend schärfen (Kapitel 3). Die themenspezifische Ausarbeitung der Lösungsansätze spiegeln derweil Kapiteln 4 (prozessual) und 5 (methodisch) wider und münden in der Validierung des Ansatzes anhand eines realen Fallbeispiels (Kapitel 6).

Im Folgenden soll zu jeder einzelnen Forschungsfrage eine explizite Stellungnahme und Diskussion erfolgen.

F1-a: Wie muss ein Materialauswahlprozess für Fahrzeugstrukturbauteile gestaltet sein, um deren variierende Bauraum- und Lastanforderungen berücksichtigen zu können?

Der klassische, vierphasige Auswahlprozess, auf Basis eines stabilen Anforderungsprofils (vgl. Abbildung 2-35, S. 50), muss hierzu um die Berücksichtigung eines instabilen Profils in der ersten Phase erweitert werden (vgl. Abbildung 4-1, S. 81). Zur Abschätzung der Auswirkungen einer Änderung auf die Werkstoffauswahl, ist in diesem Rahmen zudem die Identifizierung des jeweiligen Verhältnisses aus Bauraum und Last, zu jedem Änderungszeitpunkt im Entwicklungsprozess, notwendig. Jene erfolgt aus methodischer Sicht über die Herleitung der

sogenannten Transferfunktionen, welche je nach Belastungsart und -höhe die benötigte Wandstärke für ein spezifisches Material liefern und somit die relevanten Eingangsdaten für einen systematischen Konzeptvergleich hinsichtlich Bauteilkosten und -gewicht dem Prozess bereitstellen.

F1-b: Wie können die variierenden Eingangsgrößen aus einem vorliegenden Gesamtfahrzeuglastenheft abgeleitet und in ein Komponentenlastenheft überführt werden?

Während sich ganz allgemein das V-Modell zur Zergliederung der Gesamtfahrzeug- in Komponentenanforderungen als zielführend erweist (vgl. Kapitel 2.1.3, S. 13), bedarf es je nach Anforderungsart einer spezifischen Adaption desselbigen, mit dem Ziel der anteilmäßigen Aufgabenzuordnung eines jeden Strukturbauteils. Im Falle der Bauraumzuweisung ist eine konkurrierende Aufteilung des verfügbaren Bauraums zwischen den Disziplinen Design, Package und Rohbau anzustreben (vgl. Kapitel 4.1.1, S. 82). Bei Lastanforderungen ist vielmehr eine anteilmäßige Aufteilung der Gesamtlasten auf die Komponenten entlang eines Lastpfads vorzusehen (Kapitel 4.1.2, S. 84). Eine anschließende Versionierung, dieser über die Zeit variierenden Anforderungen, eröffnet zudem die Möglichkeit für vergleichbare Folgebaureihen einen entsprechenden Variationsbereich als erste Startbedingung ableiten und annehmen zu können (vgl. Kapitel 4.2, S. 86).

F2-a: Wie kann der Ansatz zur systematischen Werkstoffauswahl innerhalb eines begrenzten Bauraums, mit einer Füllstrategie von außen nach innen, für den Einsatz in der frühen Phase der Strukturbauteilentwicklung ertüchtigt werden?

Basierend auf einer umfassenden Analyse verschiedener Strukturbauteile (vgl. Kapitel 4.3, ab S. 89), resultiert das rechteckige Hohlprofil als geeignetste geometrische Form zur vereinfachten Abbildung jener Komponenten in der frühen Phase der Entwicklung. Aus diesem Grund liegt der Schlüssel zur Ertüchtigung des Ansatzes, mit einer Bauraumfüllung von außen nach innen (nach Wanner [Wann10]), in der erfolgten Erweiterung der bislang nur auf runde Hohlprofile und Sandwichstrukturen ausgelegten formelseitigen Beschreibungen hin zu rechteckigen Hohlprofilen (siehe Kapitel 5). Die Auswirkungen von Breiten- und Höhenänderungen des verfügbaren Bauraums, auf die aus Funktionssicht notwendige Mindestwandstärke, lassen sich somit problemlos und nachvollziehbar abbilden.

F2-b: Wie lässt sich dieser Ansatz zur systematischen Werkstoffauswahl innerhalb eines begrenzten Bauraums auf alle relevanten Grundbelastungsarten (Zug, Druck, Knicken, Biegung, Torsion) übertragen und sich anhand entsprechender physikalischer Beziehungen mathematisch formulieren?

Grundsätzlich führen immer die Kombinationen aus lastfallspezifischer Belastungsgleichung $BG(A)$ bzw. $BG(I)$ sowie der zugehörigen Fläche $A(t)$ bzw. dem Trägheitsmoment $I(t)$, in Abhängigkeit zur Wandstärke t , zur mathematischen Formulierung $BG(t)$, welche das Verhältnis zwischen dem verfügbarem Bauraum, der eingehenden Last sowie der zur Funktionserfüllung notwendigen Materialstärke eines Strukturbauteils beschreibt (vgl. Kapitel 5.1, S. 95). Um bei gegebenem, volatilen Bauraum- und Lastanforderungsprofil, für beliebig viele Werkstoffe, die Mindestwandstärken ermitteln zu können, muss demnach in allen Belastungsgleichungen $BG(t)$ der Wandstärkenparameter t separiert werden, sodass die Wandstärke $t(BG)$ in Abhängigkeit zur jeweiligen Bauteilbelastung ausgedrückt werden kann. Diese Aufgabe ist jedoch aufgrund der Komplexität der erforderlichen geometrischen Profilbeschreibung des rechteckigen Hohlprofils nicht trivial und verhindert eine einfache Umstellung der formelseitigen Beziehungen. Die Lösung der Gleichungen erfolgt aus diesem Grund über den Umweg der zugehörigen Residuumsfunktionen, welche gleichermaßen die sogenannten Transferfunktionen, zur Aufbereitung der variablen Anforderungen für die systematische Werkstoffauswahl, repräsentieren (vgl. Kapitel 5.3, S. 101).

F3-a: Wie können sowohl die Bauteilkosten als auch das Bauteilgewicht in der frühen Phase der Strukturbauteilentwicklung, trotz variierender Anforderungen, möglichst exakt ermittelt und für die Auswahl eines Materialkonzepts genutzt werden?

Die Möglichkeit die zur Funktionserfüllung notwendige Wandstärke t für jede Belastungsart bestimmen zu können bildet die Basis, um gemeinsam mit der gegebenen Dichte ρ eines beliebigen Werkstoffs, die zugehörige Bauteilmasse des rechteckigen Hohlprofils, mit Hilfe der Massengleichung $m\left(\frac{t}{H}, \rho\right)$, zu ermitteln (vgl. Kapitel 5.4, S. 106). Aufgrund des dominanten Einflusses der Materialkosten K_m auf die Herstellkosten K_h im Automobilsektor, lassen sich selbige häufig zur ersten Abschätzung der Bauteilkosten K_b in der frühen Entwicklungsphase verwenden. Das Produkt aus funktionstauglicher Bauteilmasse sowie dem entsprechenden

Materialpreis pro Kilogramm führen somit zu einer ersten Abschätzung des Bauteilpreises (Kapitel 5.5, S. 125).

F3-b: Wie lassen sich zulässige Leichtbaumehrkosten im Rahmen eines Vergleichs verschiedener Materialkonzepte frühzeitig berücksichtigen und die Auswirkungen variierender Anforderungen auf die Bauteilkosten darstellen?

Nachdem bekannt ist wie für beliebig viele Materialkonzepte die Bauteilkosten K_b und -gewichte m ermittelt werden können, ist im nächsten Schritt ein Vergleich dieser Kennwerte zwischen den verschiedenen Materialien möglich, um den geeignetsten Werkstoff für den jeweiligen Anwendungsfall systematisch zu ermitteln. Die günstigste, funktionstaugliche Lösung dient in der Regel als allgemeine Vergleichsbasis (vgl. Kapitel 5.6, S. 126). Alle weiteren Konzepte offerieren Gewichtseinsparungen für einen entsprechenden Bedarf an Leichtbaumehrkosten K_l . Lösungen die höhere Kosten und Gewichte als die Basislösung benötigen, werden somit direkt ausgeschlossen. Abhängig von der Höhe der zulässigen Leichtbaumehrkosten verschieben sich die Konzeptegnungsgrenzen entlang des Variationsbereichs eines volatilen Eingangsparameters und lassen sich zur vereinfachten Identifizierung in einem Diagramm (vgl. Abbildung 5-30, S. 127) grafisch darstellen.

F3-c: Wie können fertigungstechnische Randbedingungen bereits in der frühen Phase der Strukturbauteilentwicklung im Rahmen der Werkstoffauswahl berücksichtigt werden?

Die Berücksichtigung fertigungstechnischer Grenzwallstärken findet dadurch statt, dass bei Unterschreitung einer bspw. aus herstellungstechnischen Gründen erforderlichen Mindestwandstärke $t(WK)_{min}$ weiterhin die höhere Grenzwallstärke angenommen wird, auch wenn aus Funktionssicht eine geringere umsetzbar wäre (vgl. Kapitel 5.3, ab S. 105). Dies führt folglich bei zunehmendem Bauraum- bzw. abnehmenden Lastanforderungen zu einer ansteigenden Überdimensionierung des jeweiligen Materialkonzepts, was zum Teil immense Auswirkungen auf den Kosten- und Gewichtsvergleich entlang des variablen Anforderungsbereichs haben kann und daher im Rahmen der Auswahldiagramme direkt Berücksichtigung findet (vgl. z.B. Abbildung 6-5, S. 134). Bei Überschreitung einer aus herstellungstechnischen Gründen maximalen Wandstärke $t(WK)_{max}$, kann die Funktionstauglichkeit des Bauteils mit dem jeweiligen Werkstoff nicht mehr gewährleistet

werden, weswegen jenes Konzept vom weiteren Auswahlprozess entsprechend ausgeschlossen wird.

F3-d: Wie können die Ergebnisse aus einer systematischen Materialauswahl in einem volatilen Anforderungsumfeld grafisch aufbereitet werden, um den Bauteilentwickler bei der Materialentscheidung bestmöglich zu unterstützen?

Um dem Bauteilentwickler vorherrschende Auswahl-situationen möglichst übersichtlich aufzubereiten, müssen alle für eine systematische Werkstoffauswahl notwendigen Entscheidungsparameter entlang des Variationsbereichs dargestellt werden. Hierzu wurde im Rahmen dieser Arbeit ein auf Matlab-Skripten basierendes „Auswahl-Cockpit“ in Anlehnung an das Grundkonzept in Abbildung 5-30 (S. 127) erstellt, welches die Verläufe der erforderlichen Wandstärken, Gewichte, Kosten sowie Leichtbaumkosten, über einen frei wählbaren Variationsparameter und beliebig viele Werkstoffe, darstellt (vgl. z.B. Abbildung 6-5, S. 134). Dem Entwickler ist es somit möglich innerhalb eines vorgegebenen Variationsbereichs kritische Konzeptgrenzen frühzeitig zu identifizieren und daraus entsprechende Schlussfolgerungen für seine Materialauswahl abzuleiten (vgl. Kapitel 6.1, ab S. 132).

7.3 Ausblick

Die Ausrichtung des Gesamtkonzepts dieser Arbeit widmet sich vorrangig der Beschreibung wie, sowohl methodisch als auch prozessual, bei der systematischen Materialauswahl von Fahrzeugstrukturbauteilen in der frühen Phase der Entwicklung vorgegangen werden muss, um zum geeignetsten Einsatzwerkstoff zu gelangen. Während die hierzu notwendige Grundvoraussetzung, durch die Definition jedes einzelnen Komponentenanforderungsprofils, in Kapitel 4.1 genau beschrieben ist, bietet vor allem die über längere Zeiträume durchzuführende Aufzeichnung der selbigen (Kapitel 4.2) das Potential, für Folgebaureihen immer genauere Startbedingungen auszuloten. Was im Umkehrschluss einen direkten Anstieg der Aussagegüte, bereits zu Beginn der Entwicklung, bedeuten würde. Die Fähigkeit einer automatisierten Registrierung jeder Parameteränderung entlang des gesamten Entwicklungsprozesses (wie bspw. nach [ToNa16] und [ToNa17]) bietet daher bislang noch ungeahnte Möglichkeiten bzgl. der Prognosegenauigkeit von Bauteilanforderungsprofilen in ähnlichen Folgebaureihen, innerhalb der frühen Phase der Entwicklung.

Die daran anknüpfende, geometrische Vereinfachung der realen Fahrzeugstrukturbauteile durch rechteckige Hohlprofile ermöglicht zwar die Bestimmung der benötigten Wandstärke und des geeignetsten Materials sowie eine schnelle Iterationen bei variierenden Anforderungsprofilen, schränkt jedoch den Einsatzzeitpunkt aufgrund dieser Modellbildung für die frühe Entwicklungsphase (vgl. Kapitel 4.3) ein. Ein denkbarer Ansatz zur Erweiterung ist die rechnergestützte Bereitstellung der wandstärkeabhängigen Trägheitsmomente $I(t)$ für beliebige, parametrisch aufgebaute Querschnittsgeometrien in einem CAD-Programm. Zur Ermittlung der notwendigen Mindestwandstärke bei gegebenem Last- und Bauraumanforderungsprofil, müssten hierzu die skriptbasierenden Transferfunktionen (vgl. Kapitel 5.3) eine direkte Schnittstelle zur Information des Trägheitsmoments im CAD-Modell erhalten, um die entsprechenden Residuumsfunktionen lösen zu können.

Um dem Anwender eine grafische Auswahlmöglichkeit des leichtesten Werkstoffs in den klassischen zweidimensionalen Auswahldiagrammen nach Ashby [Ashb11] bieten zu können, wurden für alle Grundbelastungsarten eines rechteckigen Hohlprofils die Herleitung der zugehörigen Lösungsflächen der Bauteilmasse beschrieben (vgl. Kapitel 5.4.2). Ein Schnitt dieser Flächen bei konstanter Masse führt zu Auswahlkurven mit zum Teil variierenden Steigungsverläufen. Bislang lassen sich jedoch nur Auswahllinien mit konstanter Steigung innerhalb der Materialauswahlsoftware CES-Selector[®] berücksichtigen. Dieser offene Punkt wurde bereits an das Unternehmen Granta Design herangetragen und ist laut Herstelleraussage als neues Feature für die Version 2017 vorgesehen.

Da im Falle der Materialauswahl von Fahrzeugstrukturbauteilen nicht nur der singuläre Gewichtsaspekt, sondern auch die damit einhergehenden Bauteilkosten (vgl. Kapitel 5.5), für eine finale Materialentscheidung von zentraler Bedeutung sind, bildet die Ermittlung der jeweiligen Verhältnisse zueinander den Grundstein für einen transparenten Konzeptvergleich (vgl. Kapitel 5.6). Insbesondere bei variierenden Anforderungsprofilen sind dabei die resultierenden Konzeptgrenzen innerhalb eines Variationsbereichs von entscheidendem Interesse, um den geeignetsten Werkstoff zu identifizieren. Das vorgestellte Vorgehensmodell sieht hierfür bislang immer eine separate Betrachtung eines einzelnen variierenden Eingangsparameters vor. Eine denkbare Erweiterung wäre demnach die gleichzeitige Berücksichtigung mehrerer Variationsparameter (multidimensionale Darstellung).

Die Vorgehensweise in dieser Arbeit adressiert zudem vor allem die Ermittlung des geeignetsten Werkstoffs auf Komponentenebene. Um die Tauglichkeit im gesamten Strukturverbund des Fahrzeugs bewerten zu können, ist die anschließende Überprüfung einer vorhandenen Füge­technik der jeweiligen Bauteilschnittstellen (vgl. [KaMV15], [KaBV16], [KaVS13]) sowie der damit verbundenen Gewichts- und Kostenentwicklung auf System- und Gesamtfahrzeugebene als zielführend anzusehen, was nicht im Fokus dieser Ausarbeitung lag.

Es lässt sich somit abschließend festhalten, dass das ausgearbeitete Vorgehensmodell zur systematischen Werkstoffauswahl von Fahrzeugstrukturbauteilen einen ersten Ansatz bietet, um insbesondere die in der frühen Phase des Fahrzeugentwicklungsprozesses auftretenden Last- und Bauraumänderungen, im Rahmen der Materialauswahl, zu berücksichtigen. Dies ermöglicht dem Entwickler bereits zu einem sehr frühen Zeitpunkt eine erste Tendenz bzgl. des Materialkonzepts, auf einer transparenten Entscheidungsbasis, abzugeben. Die in diesem Kapitel aufgeführten Ansatzpunkte zum Ausbau der Vorgehensweise sollen dabei als Impulsgeber für potentielle Folgearbeiten sowie daran anknüpfende Forschungsvorhaben fungieren.

Literaturverzeichnis

- [AAAB13] Achleitner, A., Antony, P., Ascher, F., Berger, E., et al. in Braess, H.-H., Seiffert, U.: Vieweg-Handbuch Kraftfahrzeugtechnik, Formen und neue Konzepte, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2013, S. 119-220
- [AlBu11] Albers, A., Burkardt, N. in Henning, F., Moeller, E.: Handbuch Leichtbau, Methoden, Werkstoffe, Fertigung, Systemleichtbau – ganzheitliche Gewichtsreduzierung, Carl Hanser Verlag, München Wien, 2011, S. 115-132
- [AnDa85] Anselm, D., Danner, M.: Crash-Reparaturversuche – Eine Entwicklung des Allianz Zentrums für Technik, Allianz Versicherungs-AG, München, 1985
- [Andr80] Andreasen, M.M.: Machine Design Methods Based on a Systematic Approach, Dissertation, Lund University, Sweden, 1980
- [AsBC02] Ashby, M. F., Bréchet, Y., Cebon, D.: Selection Strategies for Materials and Processes, ADVANCED ENGINEERING MATERIALS 2002 Volume 4 Issue 6, WILEY-VCH Verlag, Weinheim, 2002, S. 327-334
- [Ashb05] Ashby, M. F.: Material Selection in Engineering Design, Butterworth-Heinemann, Oxford, 2005
- [Ashb11] Ashby, M. F.: Material Selection in Engineering Design, Butterworth-Heinemann, Oxford, 2011
- [BaDM02] Baskin, D. M., Dinda, S., Moore, S. M.: A Simple Approach to Selecting Automotive Body-in-White Primary-Structural Materials, International Body Engineering Conference & Exhibition and Automotive & Transportation Technology Conference, Paris, 2002
- [BBEG13] Braess, H.-H., Breitling, T., Ehlers, C., Grawunder, N., et al. in Braess, H.-H., Seiffert, U.: Vieweg-Handbuch Kraftfahrzeugtechnik, Produktentstehungsprozess, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2013, S. 1133-1219

- [BeNM13] Beutner, E., Neukirchner, H., Maas, G., et al.: Virtuelle Produktentwicklung, Vogel Buchverlag, Würzburg, 2013
- [Bern75] Bernst, R.: Werkstoffe im wissenschaftlichen Gerätebau, Eigenschaften und Wahl der Konstruktionswerkstoffe sowie Probleme der Dimensionsstabilität der Bauteile, Akademische Verlagsgesellschaft Geest & Portig, Leipzig, 1975
- [BGHH13] Braess, H.-H., Goßmann, H., Hamm, L., Herpel, T., et al. in Braess, H.-H., Seiffert, U.: Vieweg-Handbuch Kraftfahrzeugtechnik, Aufbau, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2013, S. 497-630
- [BiHa10] Biermann, J., Hartmann, B.: Maßgeschneiderte Fahrzeugkonzepte für Elektroantriebe, Institut für Kraftfahrzeuge, RWTH Aachen Universität, 2010
- [BiHS13] Birkert, A., Haage, S., Straub, M.: Umformtechnische Herstellung komplexer Karosserieteile, Auslegung von Ziehanlagen, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2013
- [BlCh09] Blessing, L., Chakrabarti, A.: DRM, a Design Research Methodology, Springer, Dordrecht, 2009
- [BöBö15] Böge, A., Böge, W.: Handbuch Maschinenbau, Grundlagen und Anwendungen der Maschinenbau-Technik, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2015
- [BuBu05] Budinski, K. G., Budinski, M. K.: Engineering Materials, Properties and Selection, Prentice Hall, Upper Saddle River, 2005
- [Conr13] Conrad, K.-J.: Grundlagen der Konstruktionslehre, Carl Hanser Verlag, 2013, München
- [Cros94] Cross, N.: Engineering Design Methods. Strategies for Product Design, Wiley, Chichester, 1994
- [CZWZ11] Cui, X., Zhang, H., Wang, S., Zhang, L., et al.: Design of lightweight multi-material automotive bodies using new material performance indices of

- thin-walled beams for the material selection with crashworthiness consideration, *Materials and Design* 32, Elsevier, 2011, S. 815-821
- [DaDa13] Dankert, J., Dankert, H.: *Technische Mechanik, Statik, Festigkeitslehre, Kinematik/Kinetik*, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2013
- [Daim12] Daimler AG: *MDS Handbuch Fahrzeug, MDS Prozessmanagement*, Sindelfingen, 2012
- [Diet15] Dietrich, S.: *Randbedingungen und Querschnittsformen, Vorlesungsskript*, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2015
- [DIN66905] Deutsches Institut für Normung (DIN): *DIN 66905, Projektwirtschaft – Projektabwicklung – Begriffe*, Beuth-Verlag, Berlin, 1997
- [DIN9004] Deutsches Institut für Normung (DIN): *DIN EN ISO 9004-1, Qualitätsmanagement und Elemente eines Qualitätsmanagementsystems*, Beuth-Verlag, Berlin, 1994
- [DiSc09] Dieter, G. E., Schmidt, L. C.: *Engineering Design*, McGraw-Hill, New York, 2009
- [EdHo08] Eder, W.E., Hosnedl, S.: *Design Engineering, A Manual for Enhanced Creativity*, CRC Press, Boca Raton, 2008
- [Eger16] Eger, F.: *Einfluss von Design und Package auf die Anforderungen von Fahrzeugstrukturbauteilen*, Masterarbeit, Universität Stuttgart/ Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V./ Daimler AG, Stuttgart Sindelfingen, 2016
- [EGGH13] Ellenrieder, G., Gänsicke, T., Goede, M., Herrmann, H. G. in Friedrich, H. E.: *Leichtbau in der Fahrzeugtechnik, Die Leichtbaustrategien*, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2013, S 43–118
- [EhKi90] Ehrlenspiel, K., Kiewert, A.: *Ingenieur-Werkstoffe im technischen Fortschritt, Die Werkstoffauswahl als Problem der Produktentwicklung im Maschinenbau*, VDI-Berichte Nr. 797, VDI-Verlag, München Düsseldorf, 1990

- [EhMe13] Ehrlenspiel, K., Meerkamm, H.: Integrierte Produktentwicklung, Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit, Carl Hanser Verlag, München Wien, 2013
- [EiRZ14] Eigner, M., Roubanov, D., Zafirov, R.: Modellbasierte virtuelle Produktentwicklung, Springer Vieweg, Berlin Heidelberg, 2014
- [EiSc13] Eichseder, W., Schöneburg, R. in Friedrich, H. E.: Leichtbau in der Fahrzeugtechnik, Anforderungen an den Leichtbau im Fahrzeug, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2013, S 119–175
- [EiFK13] Ellenrieder, G., Friedrich, H. E., Kienzle, S. in Friedrich, H. E.: Leichtbau in der Fahrzeugtechnik, Leichtbaukonzepte für heute und morgen, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2013, S 767–818
- [EsAs03] Esawi, A., Ashby, M.: Cost estimates to guide pre-selection of processes, Materials and Design 24, The American University in Cairo, Mechanical Engineering Department, Cairo, Cambridge University Engineering Department, Engineering Design Centre, Cambridge, 2003, S. 605-616
- [EsHa13] Esch, F.-R., Hanisch, J. in Esch, F.-R.: Strategie und Technik des Automobilmarketing, Maßnahmen umsetzen, Automobile durch Automobildesign markenspezifisch gestalten, Springer Gabler, Wiesbaden, 2013, S. 97-127
- [Fara14] Farag, M. M.: MATERIALS and PROCESS SELECTION for ENGINEERING DESIGN, Taylor & Francis Group, Boca Raton, 2014
- [FeGr13] Feldhusen, J., Grote, K.-H., et al.: Pahl/Beitz Konstruktionslehre, Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung, Springer Vieweg, Berlin Heidelberg, 2013
- [FeLa98] Feldhusen, J., Lashin, G.: Prozessketten für die virtuelle Produktentwicklung in virtueller Umgebung, Top-Down Konstruktion auf der Basis von 3D-CAD – Ansätze und Voraussetzungen für den Einsatz im Maschinenbau, VDI-Berichte 1435, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1998, S 277–301

- [Fisc95] Fischer, D. R.: Entwicklung eines objektorientierten Informationssystems zur optimierten Werkstoffauswahl, Dissertation, Universität Stuttgart, Springer, Berlin Heidelberg, 1995
- [FKNS13] Friedrich H. E., Krishnamoorthy, S. K., Nehuis, F., Sánchez Ruelas, J. G., et al. in Friedrich, H. E.: Leichtbau in der Fahrzeugtechnik, Anforderungsmanagement und Werkzeuge für Leichtbauweisen auf dem Weg zum Multi-Material-Design, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2013, S 177–198
- [Form13] Form, T.: Fahrzeugelektronik, Vorlesungsskript, Technische Universität Braunschweig, 2013
- [Fren99] French, M.J.: Conceptual Design For Engineers, Springer, Heidelberg, 1999
- [Fris90] Frisch, B. in Schuster, H. J.: Handbuch des Wissenschaftstransfers, Neue Werkstoffentwicklungen als Schlüsseltechnologien, Werkstoffe – Geschichte, Grundlagen, Einleitung, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1990, S. 667 – 671
- [FrKr13] Friedrich H. E., Krishnamoorthy, S. K. in Friedrich, H. E.: Leichtbau in der Fahrzeugtechnik, Leichtbau als Treiber von Innovationen, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2013, S 1–30
- [FTKK08] Friedrich, H. E., Treffinger, P., Kopp, G., Knäbel, H. in Schindler, V., Sievers, I.: Forschung für das Auto von morgen, Aus Tradition entsteht Zukunft, Werkstoffe und Bauweisen ermöglichen neue Fahrzeugkonzepte, Springer, Berlin Heidelberg, 2008, S. 301-348
- [FuLi13] Fuchs, J., Lienkamp, M.: KAROSSERIE UND PACKAGE, TECHNOLOGIE UND ARCHITEKTUR FÜR ELEKTRIFIZIERTE FAHRZEUGE, ATZ, Springer, Wiesbaden, 2013, S. 164-170
- [GäGo13] Gänsicke, T., Goede, M. in Friedrich, H. E.: Leichtbau in der Fahrzeugtechnik, Die Technische Motivation, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2013, S 31–42

- [Gess01] Gessner, K.: Package-Features für die Kommunikation in den frühen Phasen der Automobilentwicklung, Dissertation, Technischen Universität Berlin Maschinenbau und Produktionstechnik, 2001
- [GöBS13] Göpfert, I., Braun, D., Schulz, M.: Automobillogistik, Stand und Zukunftstrends, Springer Gabler, Wiesbaden, 2013
- [Grand13] Grande, M.: 100 Minuten für Konfigurationsmanagement, Kompaktes Wissen nicht nur für Projektleiter und Entwickler, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2013
- [Gros86] Grosch, J.: Werkstoffauswahl im Maschinenbau, Expert Verlag, Sindelfingen, 1986
- [Groß00] Große, A. in Dietz, P.: Methodische Ansätze zur Werkstoffauswahl, Mitteilungen aus dem Institut für Maschinenwesen der Technischen Universität Clausthal Nr. 25, Institut für Maschinenwesen, Technische Universität Clausthal, 2000, S. 29-32
- [GuKr10] Gusig, L., Kruse, A., et al.: Fahrzeugentwicklung im Automobilbau, aktuelle Werkzeuge für den Praxiseinsatz, Carl Hanser Verlag, München, 2010
- [HaNB02] Haberfellner, R., Nagel, P., Becker, M.: Systems Engineering – Methodik und Praxis, Verlag Industrielle Organisation, Zürich, 2002
- [Hari99] Harig, H. in Harig, H., Langenbach, C. J.: Neue Materialien für innovative Produkte, Entwicklungstrends und gesellschaftliche Relevanz, Springer, Heidelberg, 1999, S.39-43
- [Harz14] Harzheim, L.: Strukturoptimierung, Grundlagen und Anwendungen, Europa-Lehrmittel, Haan-Gruiten, 2014
- [Hein11] Heine, B.: Werkstoffprüfung, Ermittlung von Werkstoffeigenschaften, Carl Hanser Verlag, München, 2011

- [Herr13] Herrmann, H.-G.: Leichtbausysteme 1 & 2 (Vorlesungsskript), Universität Saarbrücken, 2013
- [Huch07] Hucho, W.-H. in Braess, H.-H., Seiffert, U.: Automobil Design und Technik, Design und Aerodynamik – Wechselspiel zwischen Kunst und Physik, Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 2007, S. 227 - 248
- [Illg78] Illgner, K. H.: Werkstoffauswahl für den Konstrukteur, VDI-Z 121 Nr. 10 (II), 1978, S. 1027-1030
- [Joha13] Johannsen, H.: Unfallmechanik und Unfallrekonstruktion, Grundlagen der Unfallaufklärung, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2013
- [KaBV16] Kaspar, J., Bähre, D., Vielhaber, M.: Material Selection Based on a Product and Production Engineering Integration Framework, 26th CIRP Design Conference – Creative Design Products and Production Systems Procedia CIRP Vol. 50, Stockholm 2016, S. 2-7
- [KaKV17] Kaspar, J., Kaiser, R., Vielhaber, M.: Bauteilübergreifende systematische Werkstoffauswahl leichtbaugetriebener Fahrzeugstrukturen – Ein ganzheitlicher Ansatz, 15. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik 2017, Duisburg, 2017, S. 369-378
- [KaMV15] Kaiser, R., Martini, T., Vielhaber, M.: Einfluss der Fügetechnik auf die Materialauswahl von Strukturbauteilkonzepten mit baureihenübergreifend einheitlichen Schnittstellen, 13. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik 2015, Clausthal, 2015, S. 249-256
- [KaWV16] Kaiser, R., Wicht, D., Vielhaber, M.: Integration of a systematical material selection into the dynamic development process of vehicle structure parts, 14th International Design Conference, Dubrovnik, 2016, S. 261-270
- [KaVi16] Kaspar, J., Vielhaber, M.: Cross-Component Systematic Approach for Lightweight and Material-Oriented Design, 11th NordDesign 2016 Vol. 1, Trondheim, 2016, S. 332-341

- [KaVS13] Kampker, A., Vallée, D., Schnettler, A.: Elektromobilität, Grundlagen und Zukunftstechnologien, Springer-Verlag, Heidelberg, 2013
- [KBSF12] Krishnamoorthy, S. K., Beeh, E., Schöll, R., Friedrich, H. E.: Methodik zur Karosserieentwicklung mittels Topologieoptimierung, Tagung Faszination Karosserie und Fahrzeugkonzepte, Wolfsburg, 2012
- [Kehl14] Kehl, A.: Interdisziplinäre Strukturoptimierung von Frontendkonzepten im Automobilrohbau, Masterarbeit, Universität Paderborn / Daimler AG, Paderborn Sindelfingen, 2015
- [Kell13] Kellner, P.: Zur systematischen Bewertung integrativer Leichtbau-Strukturkonzepte für biegebelastete Crashträger, Dissertation, Cuvillier Verlag, Göttingen, 2013
- [Klei13] Klein, B.: Leichtbau-Konstruktion, Berechnungsgrundlagen und Gestaltung, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2013
- [KIEV08] Klette, G., El-Hussein, T., Vajna, S.: TEAMCENTER EXPRESS – kurz und bündig, EDM/PDM Grundlagen und Funktionen sicher erlernen, Vieweg + Teubner, Wiesbaden, 2008
- [KoBM11] Kopp, G., Burkardt, N., Majić, N. in Henning, F., Moeller, E.: Handbuch Leichtbau, Methoden, Werkstoffe, Fertigung, Leichtbaustrategien und Bauweisen, Carl Hanser Verlag, München Wien, 2011, S. 57-76
- [Köni12] Königs, S. F.: Konzeption und Realisierung einer Methode zur templategestützten Systementwicklung, Dissertation, TU Berlin, 2012
- [Krau06] Kraus, W.: Fahrzeugdesign, Fahrzeugdesign und alternative Antriebskonzepte, ATZ, Wiesbaden, 2006
- [Krau07] Krause, W. in Braess, H.-H., Seiffert, U.: Automobildesign und Technik, Grundsätzliche Aspekte des Automobildesign, Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 2007, S. 41-76

- [Krög02] Kröger, M.: Methodische Auslegung und Erprobung von Fahrzeug-Crashstrukturen, Dissertation, Fachbereich Maschinenbau Universität Hannover, 2002
- [Kure11] Kurek, R.: Karosserie-Leichtbau in der Automobilindustrie, Vogel, Würzburg, 2011.
- [LHWG13] Lesnik, R., Handt, S., Wunderlich, H.-P., Göckeritz, O., et al. in „Die neue S-Klasse von Mercedes-Benz“, DESIGN, Stilsicher, ATZ Extra, Springer, Wiesbaden, 2013, S. 32-39
- [Lind16] Lindemann, U.: Handbuch Produktentwicklung, Carl Hanser Verlag, München, 2016
- [Lüdk00] Lüdke, B.: Funktionaler Karosserie-Leichtbau, Von den Anforderungen an die Rohkarosserie zu den Anforderungen an die Rohkarosseriewerkstoffe. VDI Berichte Bd. 1543, Düsseldorf, 2000, S. 115
- [Maie15] Maier, T.: Fahrzeug-Design (Vorlesungsskript), Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design, Universität Stuttgart, 2015
- [Mars72] Marshall, J.: Aspects of torsion of structural rectangular hollow sections, PhD Thesis, University of Strathclyde, Department of Civil Engineering, Glasgow, 1972
- [Mart15] Martini, T.: Systematische Materialauswahl in der Entwicklung von Fahrzeugstrukturbauteilen, Masterarbeit, Universität des Saarlandes / Daimler AG, Saarbrücken Sindelfingen, 2015
- [MaSv99] Malmqvist, J., Svensson, D.: A Design Theory Based Approach Towards Including QFD Data In Product Models, Proceedings of the 1999 ASME Design Engineering Technical Conferences, Las Vegas Nevada, 1999
- [MaWa09] Macey, S., Wardle, G.: H-POINT, THE FUNDAMENTALS OF CAR DESIGN & PACKAGING, Design Studio Press, Pasadena Culver City, 2009

- [MiAR92] Mischok, P., Alber, S., Robb, D. in „Datenverarbeitung in der Konstruktion'92 – CAD im Fahrzeugbau und im Transportwesen“: Anwendung neuer CA-Techniken im Automobildesign der BMW AG, VDI-Berichte 993.2, VDI Verlag, Düsseldorf, 1992, S.141-157
- [PaBe93] Pahl, G., Beitz, W.: Konstruktionslehre, Methoden und Anwendung, Springer, Berlin, 1993
- [Pasi02] Pasini, D.: A new theory for modelling the mass efficiency of material, shape and form, Dissertation, University of Bistol, Department of Mechanical Engineering, Bristol, 2002
- [Pasi06] Pasini, D.: Shape transformers for material and shape selection of lightweight beams, Materials and Design 28, McGill University, Department of Mechanical Engineering, Montreal, 2006, S. 2071-2079
- [PBFG07] Pahl, G., Beitz, W., Feldhusen, J., Grote, K. H.: Pahl/Beitz Konstruktionslehre, Grundlagen, Springer, Berlin Heidelberg, 2007
- [PfSc14] Pfeifer, T., Schmitt, R.: Masing Handbuch Qualitätsmanagement, Carl Hanser Verlag, München Wien, 2014
- [PoLi11] Ponn, J., Lindemann U.: Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte, Systematisch von Anforderungen zu Konzepten und Gestaltlösungen, Springer, Berlin Heidelberg, 2011
- [Pugh90] Pugh, S.: Total Design Integrated Methods for Successful Product Engineering, Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 1990
- [Rees05] Reese, J.: Der Ingenieur und seine Designer, Entwurf technischer Produkte im Spannungsfeld zwischen Konstruktion und Design, Springer, Berlin Heidelberg, 2005
- [Reut07] Reuter, M.: Methodik der Werkstoffauswahl, Der systematische Weg zum richtigen Material, Carl Hanser Verlag, München, 2007

- [Reut14] Reuter, M. in Moeller, E., et al.: Handbuch Konstruktionswerkstoffe, Auswahl, Eigenschaften, Anwendung, Methoden der Werkstoffauswahl, Carl Hanser Verlag, München Wien, 2014, S. 7-140
- [RHPK08] Roschinski, A., Hanis, G., Penzkofer, H.-J., Kerner, M., et al.: Die Fahrzeugarchitektur, Eleganz, Dynamik und Komfort, Springer, Wiesbaden, 2008, S. 22-28
- [RiOD03] Ridley-Ellis, D., Owen, J., Davies, G.: Torsional behaviour of rectangular hollow sections, Journal of Constructional Steel Research 59, Elsevier, Nottingham, 2003, S. 641-663
- [RPSJ16] Rother, K., Pohl, W., Schneider, D., Jankowski, U. in Tecklenburg, G.: Karosseriebautage Hamburg 2016, Effiziente rechnerunterstützte Entwicklung von Karosseriekonzepten, 14. ATZ-Fachtagung, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2016, S. 95-108
- [Sahr11] Sahr, C.: Methodische Vorgehensweise der Werkstoffauswahl für die Karosserieentwicklung in Multi-Material-Bauweise, Dissertation, Forschungsgesellschaft Kraftfahrzeugwesen Aachen FKA, RWTH Aachen, 2011
- [Schl12] Schlecht, A.: Minimierung der Schwingungsempfindlichkeit von Kraftfahrzeugvorderachsen, Dissertation, Fakultät für Maschinenwesen der Technischen Universität München, München, 2012
- [Schm10] Schmid, T.: FCM – Fast Concept Modeller©, Optimization of full vehicle concepts using Beam models: New possibilities for model creation with Fast Concept Modeller, 7th Weimar Optimization and Stochastic Days 2010, Weimar, 2010
- [ScPu00] Schmidt, W., Puri, W.: SYSTEMATISCHE ENTWICKLUNG GEWICHTSOPTIMIERTER BAUTEILE, 11. SYMPOSIUM „DESIGN FOR X“, Schnaittach, 2000, S. 37-40

- [Schr08] Schrenk, F.: DIE FRÜHZEIT DES MENSCHEN, Der Weg zum Homo sapiens, Verlag C. H. Beck, München, 2008
- [Seeg05] Seeger, H.: Design technischer Produkte, Produktprogramme und –Systeme, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2005
- [Seeg14] Seeger, H.: Basiswissen Transportation-Design, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2014
- [SeGo08] Seiffert, U., Gotthard, R.: Virtuelle Produktentstehung für Fahrzeug und Antrieb im Kfz, Prozess, Komponenten, Beispiele aus der Praxis, Vieweg + Teubner, Wiesbaden, 2008
- [SKFS13] Steck, A., Kiessling, G., Feuerbach, M., Singer, N. in „Die neue S-Klasse von Mercedes-Benz“: DMU-PROZESS UND PACKAGING, Digitale Referenz, ATZ Extra, Springer, Wiesbaden, 2013, S. 26-31
- [Skol14] Skolaut, W.: Maschinenbau, Ein Lehrbuch für das ganze Bachelor-Studium, Springer Vieweg, Berlin Heidelberg, 2014
- [SRMK11] Sohmshtetty, R., Ramachandra, R., Mariappasamy, R., Karuppaswamy, S.: Material Selection During Early Design Phase Using Simplified Models, SAE Int. J. Mater. Manuf. Volume 4 Issue 1, 2011, S. 759-770
- [Stae06] Staeves, J.: Integration Werkstoffe, Werkstoffauswahl und Werkstofffreigabe in der Karosserieentwicklung, BMW Groupe, N.N., 2006
- [StRö00] Steinhilper, W., Röper, R.: Maschinen- und Konstruktionselemente 1, Konstruktionselemente des Maschinenbaus, Springer, Berlin, 2000
- [ToNa16] Toepfer, F., Naumann, T.: MANAGEMENT OF VEHICLE ARCHITECTURE PARAMETERS, INTERNATIONAL DESIGN CONFERENCE - DESIGN 2016, Dubrovnik, 2016, S. 1679 - 1688

- [ToNa17] Toepfer, F., Naumann, T.: Parameter Management, a Novel Approach in Systems Engineering, 6th International Conference on Research into Design – IcoRD’17, Guwahati, 2017, S. 383-395
- [Ulri11] Ulrich, F.: Strukturierte Bleche im PKW-Bereich, Studienarbeit, Institut für Werkstoffe und Produktionsforschung, Brandenburgische Technische Universität Cottbus, Cottbus, 2011
- [VDI2206] Verein Deutscher Ingenieure: VDI-Richtlinie 2206 – Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme, Beuth Verlag, Berlin, 2004
- [VDI2221] Verein Deutscher Ingenieure: VDI-Richtlinie 2221 – Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte, Beuth Verlag, Berlin, 1993
- [VDI2225a] Verein Deutscher Ingenieure: VDI-Richtlinie 2225, Blatt 1 – Konstruktionsmethodik, Technisch-wirtschaftliches Konstruieren, Vereinfachte Kostenermittlung, Beuth Verlag, Berlin, 1997
- [VDI2225b] Verein Deutscher Ingenieure: VDI-Richtlinie 2225, Blatt 2 – Konstruktionsmethodik, Technisch-wirtschaftliches Konstruieren, Tabellenwerk, Beuth Verlag, Berlin, 1998
- [VHHM04] Versteegen, G., Heßeler, A., Hood, C., Missling, C., et. al.: Anforderungsmanagement, Formale Prozesse, Praxiserfahrungen, Einführungsstrategien und Toolauswahl, Springer, Berlin Heidelberg, 2004
- [Wann10] Wanner, A.: Minimum-weight materials selection for limited available space, Materials and Design 31, Karlsruhe Institute of Technology (KIT), Institut für Werkstoffkunde I, Karlsruhe; 2010, S. 2834-2839
- [Wied07] Wiedemann, J.: Leichtbau, Elemente und Konstruktion, Springer, Berlin Heidelberg, 2007
- [WiJV16] Wittel, H., Jannasch, D., Voßiek, J.: Roloff/Matek Maschinenelemente Formelsammlung, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2016

-
- [WiUS2016] Wilde, H.-D., Urban, T., Strating, A.: Body Structures based on Audi's Modular Longitudinal Architecture, Strategies in Car Body Engineering 2016, Bad Nauheim, Automotive Circle, 2016
- [WMJV09] Wittel, H., Muhs, D., Jannasch, D., Voßiek, J.: Roloff/Matek Maschinenelemente, Tabellenbuch, Springer Vieweg + Teubner, Wiesbaden, 2009
- [Zell12] Zeller, P.: Handbuch Fahrzeugakustik, Grundlagen, Auslegung, Berechnung, Versuch, Vieweg+Teubner, Wiesbaden, 2012

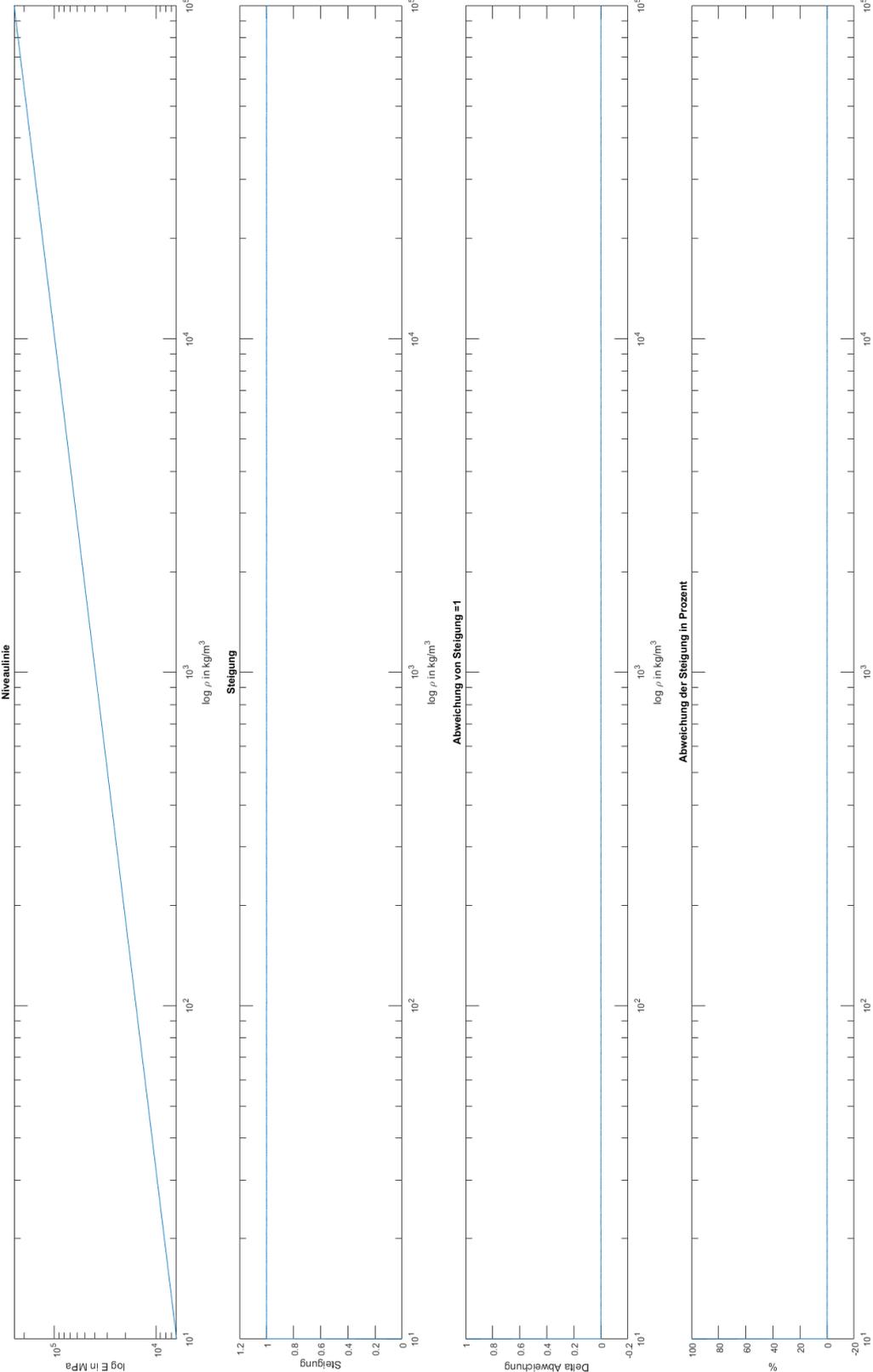
Internetquellen

- [WWW1] Daimler, Unternehmensgeschichte, <https://www.daimler.com/konzern/tradition/geschichte/1885-1886.html>, letzter Aufruf: 04.11.2016
- [WWW2] MB PKW, <http://mbpkw.de/mercedes-benz-pkw-produktionsorganisation/>, letzter Aufruf: 26.10.2016
- [WWW3] Die Kürzel der Zukunft, <http://www.autobild.de/artikel/vw-baukasten-familie-im-ueberblick-3902458.html>, letzter Aufruf: 26.10.2016
- [WWW4] GLC unter Strom, <http://www.autobild.de/artikel/mercedes-elc-2018-vorschau-7158617.html>, letzter Aufruf: 26.10.2016
- [WWW5] VW plant Elektrooffensive gegen Dieselkrise, <http://www.managermagazin.de/unternehmen/autoindustrie/volkswagen-vw-will-25-prozent-e-autos-bis-2025-a-1088231.html>, letzter Aufruf: 26.10.2016
- [WWW6] http://www.auto-news.de/webcore/data/content/Auto_Article_EXT/16193_1139492102282.jpg, letzter Aufruf: 26.10.2016
- [WWW7] <http://carblueprints.info/blueprints/mercedes-benz/mercedes-300-sl.gif>, letzter Aufruf: 26.10.2016
- [WWW8] OECD, International Transport Forum, Road Safety Annual Report 2016, <http://www.itf-oecd.org/road-safety-annual-report-2016>, letzter Aufruf: 24.08.2016
- [WWW9] The Official OMG Systems Modelling Language, <http://www.omgsysml.org>, letzter Aufruf: 07.11.2016

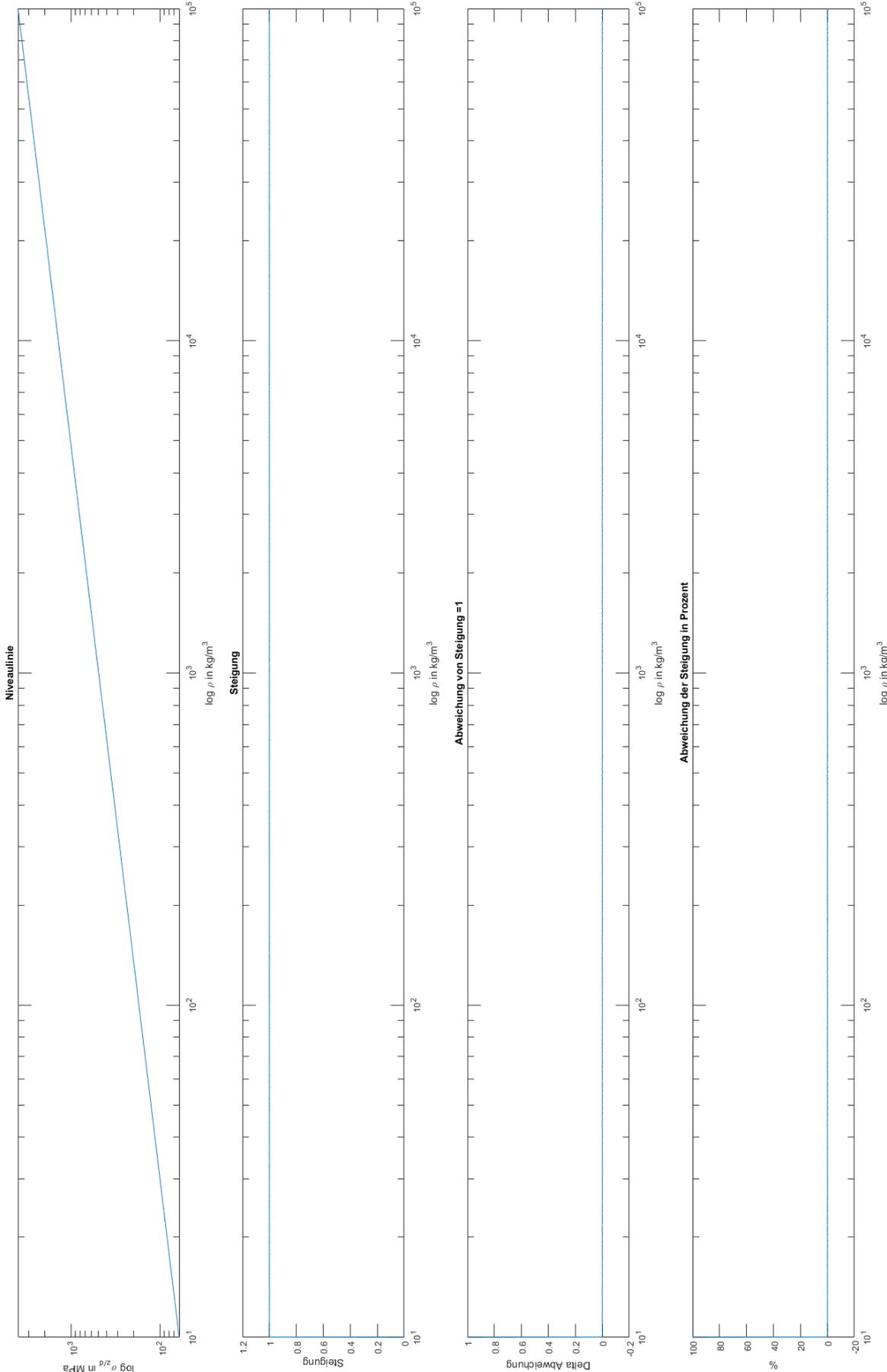
- [WWW10] CONTACT SOFTWARE, <https://www.contact-software.com/de/news/contact-gruendet-fast-concept-modelling-simulation-gmbh.html>, letzter Aufruf: 07.11.2016
- [WWW11] SFE CONCEPT, http://www.sfe-tec.de/software_concept.html, letzter Aufruf: 29.10.2016
- [WWW12] DASSAULT SYSTEMS, <http://www.3ds.com/de/produkte-und-services/catia/>, letzter Aufruf: 29.10.2016
- [WWW13] SIEMENS, https://www.plm.automation.siemens.com/de_de/products/nx/, letzter Aufruf: 29.10.2016
- [WWW14] DAIMLER, Global Media Site, <http://media.daimler.com/marsMediaSite/de/instance/ko/Start.xhtml?oid=4836258>, letzter Aufruf: 29.10.2016
- [WWW15] Die EU-Verordnung zur Verminderung der CO₂ – Emissionen von Personenkraftwagen, http://www.bmub.bund.de/fileadmin/bmu-import/files/pdfs/allgemein/application/pdf/eu_verordnung_co2_emissionen_pkw.pdf, letzter Aufruf: 01.11.2016
- [WWW16] BMW 7er (2016): Motoren, Preise und Marktstart, Münchner Luxusklasse, <http://www.autobild.de/artikel/bmw-7er-2016-motoren-preise-und-marktstart-5482573.html>, letzter Aufruf: 02.11.2016
- [WWW17] GRANTA DESIGN, MaterialUniverse, <http://www.grantadesign.com/products/ces/data.htm>, letzter Aufruf: 16.11.2016
- [WWW18] StahlDatSX, <https://www.stahldaten.de/de/startseite/>, Aufruf: 16.11.2016
- [WWW19] M-Base Engineering + Software, Campus die Kunststoffdatenbank, <http://www.m-base.de/de/produkte/campus.html>, Aufruf: 16.11.2016

Anhang

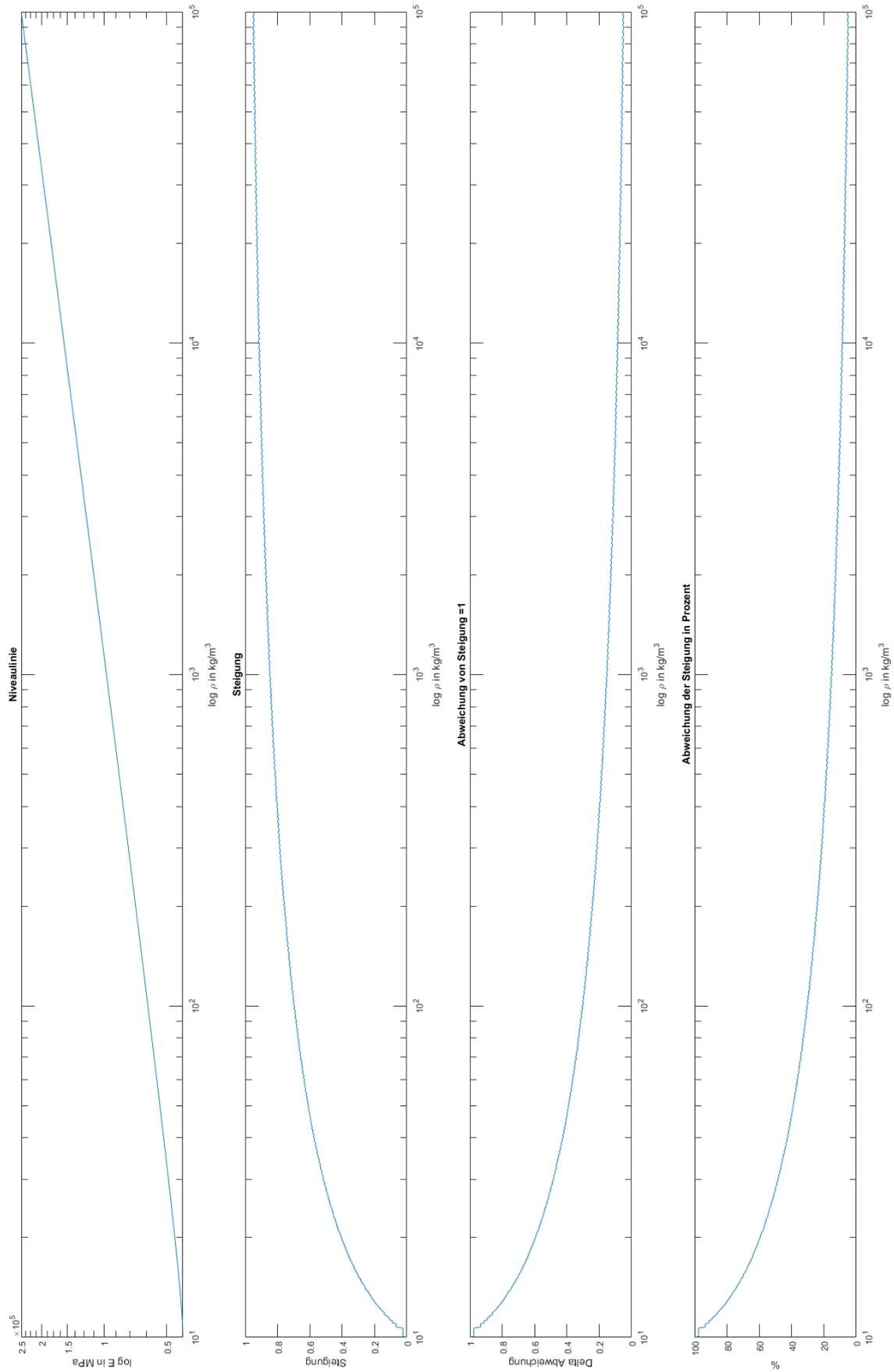
A.1 Detaillauswertung der Niveaulinie bei Zug- bzw. Drucksteifigkeit



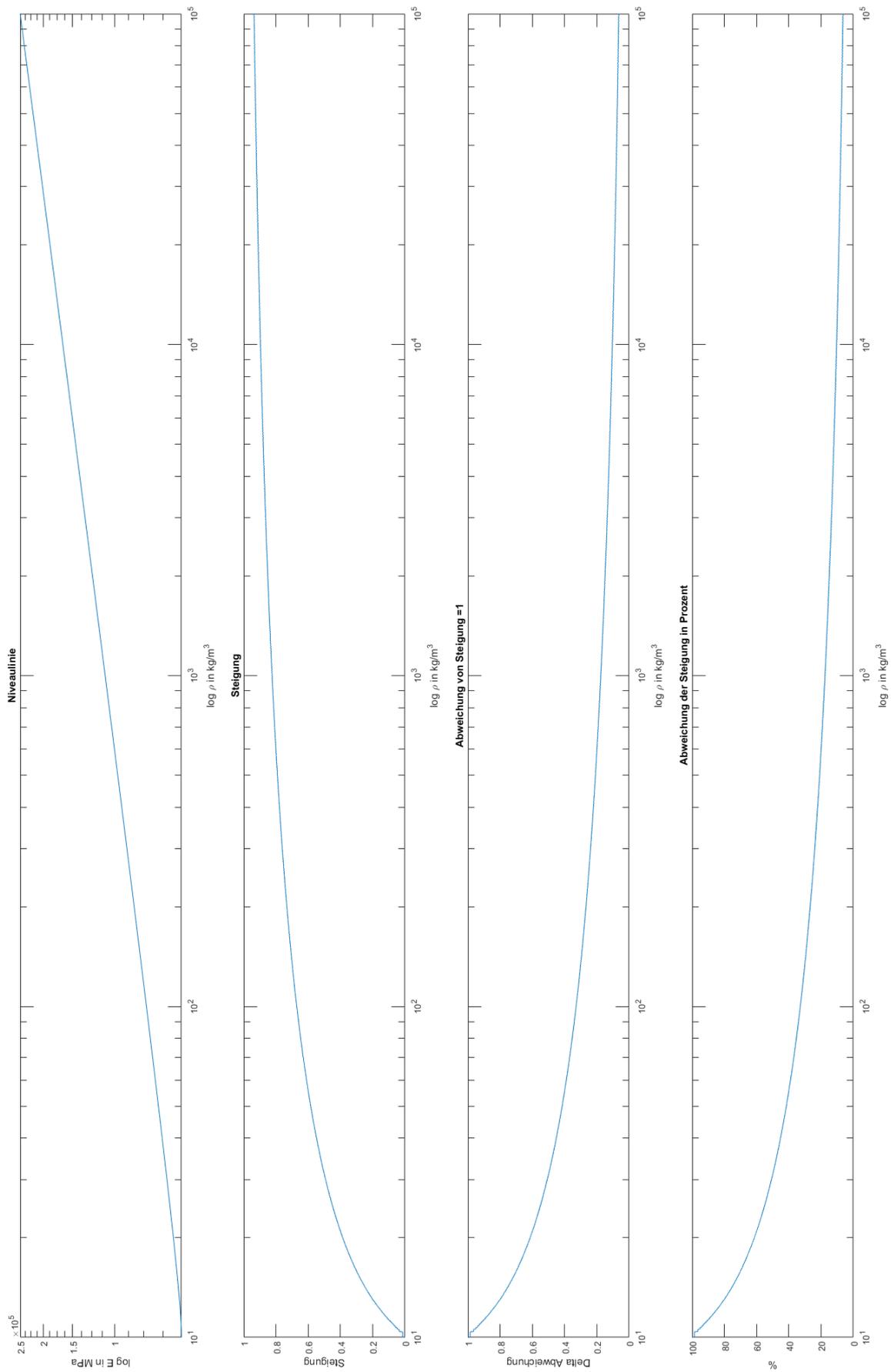
A.2 Detaillauswertung der Niveaulinie bei Zug- bzw. Druckfestigkeit



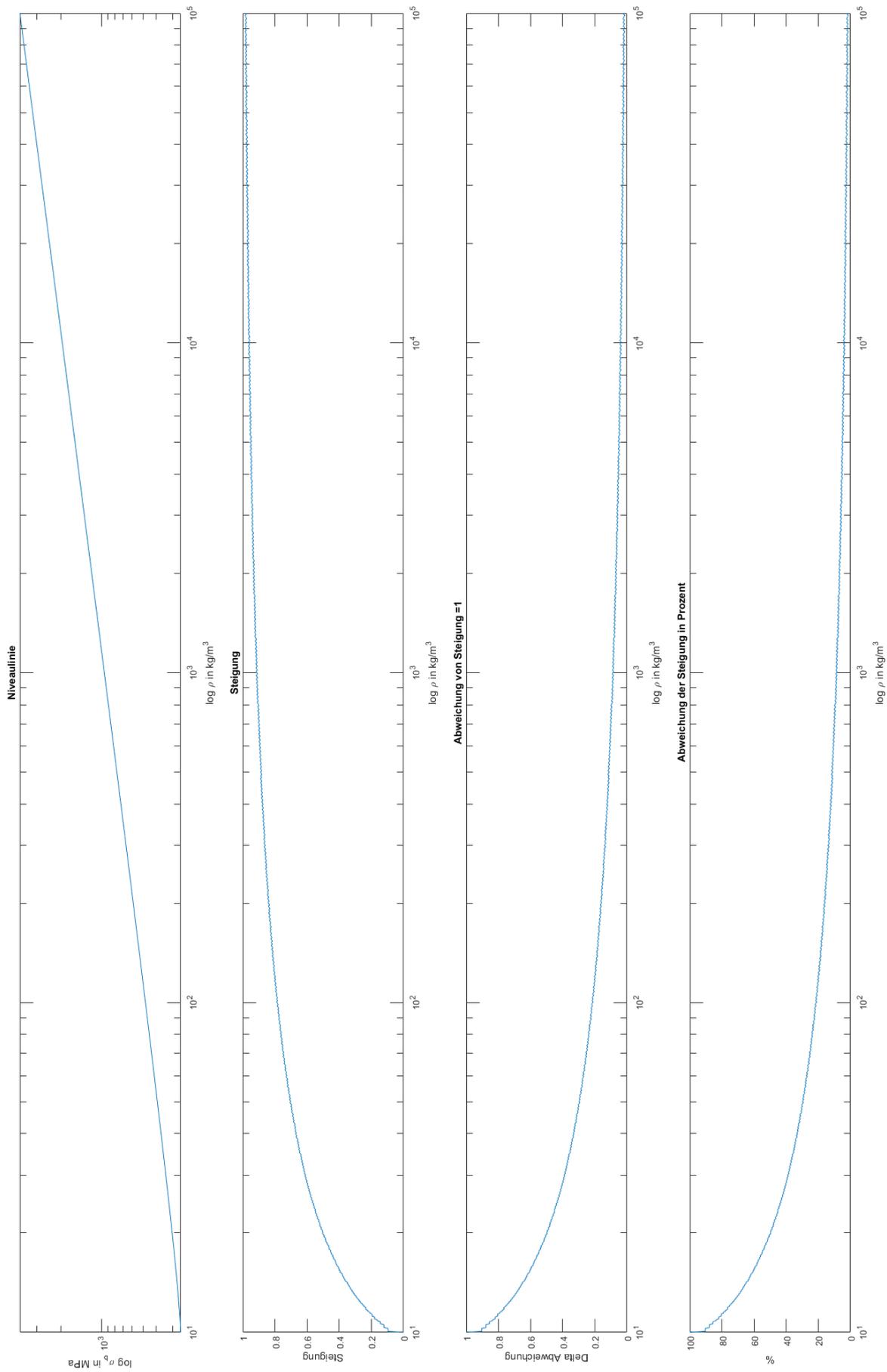
A.3 Detaillauswertung der Niveaulinie bei Knicksteifigkeit



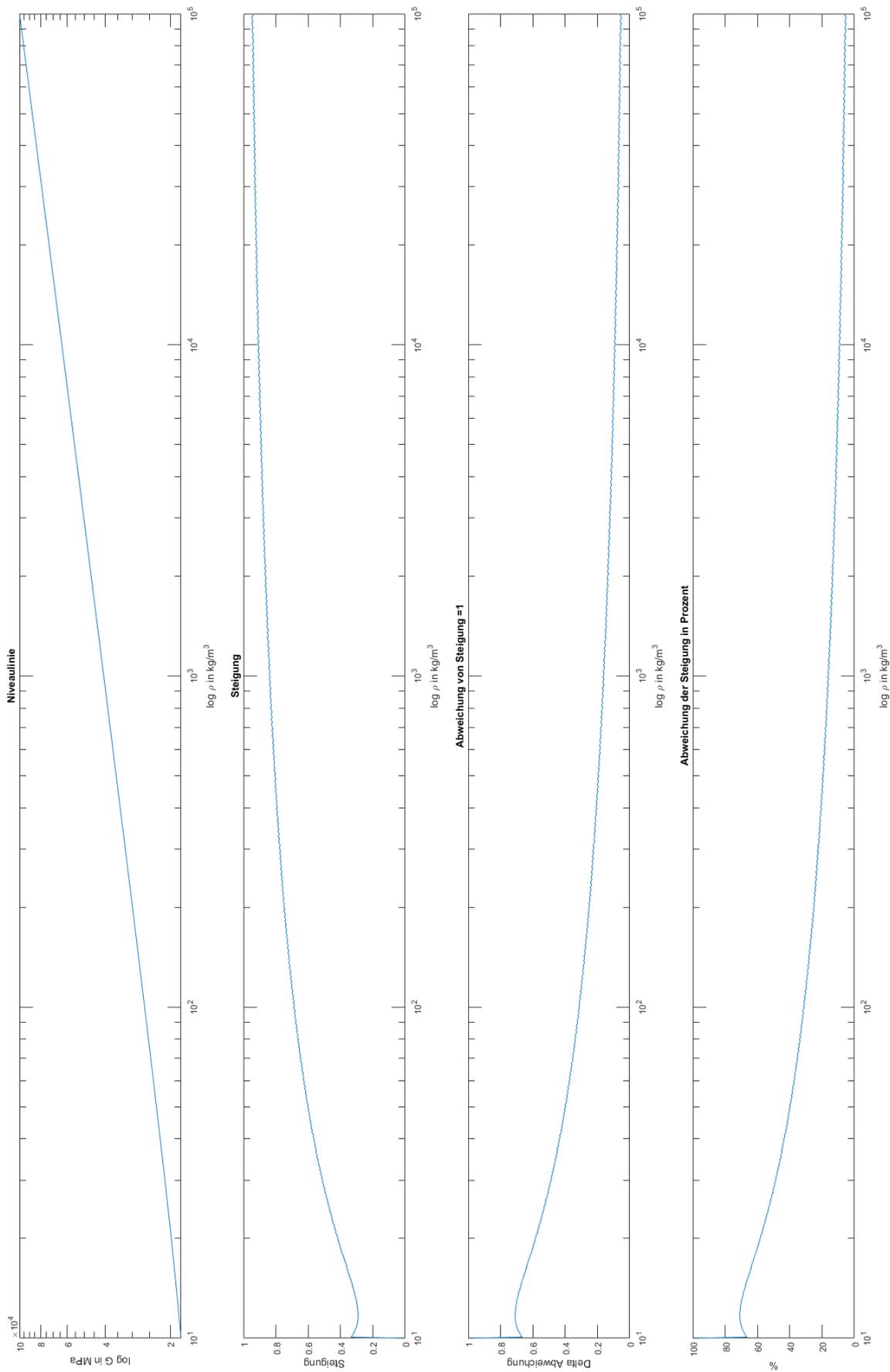
A.4 Detaillauswertung der Niveaulinie bei Biegesteifigkeit



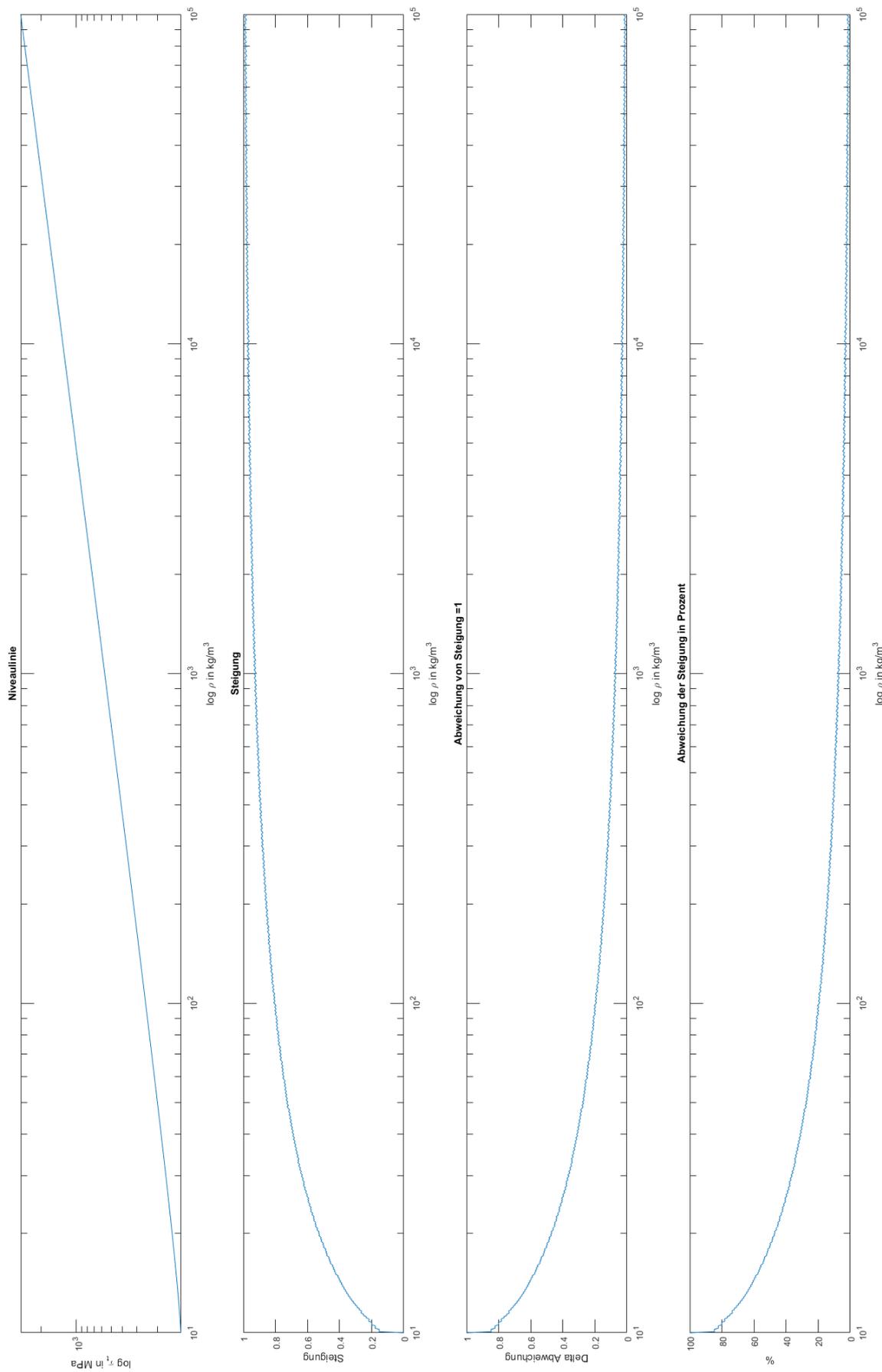
A.5 Detaillauswertung der Niveaulinie bei Biegefestigkeit



A.6 Detaillauswertung der Niveaulinie bei Torsionssteifigkeit



A.7 Detaillauswertung der Niveaulinie bei Torsionsfestigkeit



Abkürzungsverzeichnis

| | |
|-------|--|
| ASF | AUDI Space-Frame |
| CAD | Computer-Aided Design |
| CATIA | CAD-Software |
| CES | Cambridge Engineering Selector |
| DIN | Deutsches Institut für Normung |
| DOORS | Dynamic Object Oriented Requirements System |
| DS I | Deskriptiv Study I |
| DS II | Deskriptiv Study II |
| ESL | Equivalent Static Loads |
| EVA | Electric Vehicle Architecture |
| FCM | Fast Concept Modeller |
| FEM | Finite-Elemente-Methode |
| FVK | Faserverbundkunststoff |
| HoQ | House of Quality |
| ISO | International Organization for Standardization |
| MEB | Modularer Elektrifizierungsbaukasten |
| MFA | Mercedes Front-wheel Drive Architecture |
| MLB | Modularer Längsbaukasten |
| MQB | Modularer Querbaukasten |

| | |
|-------|--|
| MRA | Mercedes Rear-wheel Drive Architecture |
| NVH | Noise-Vibration-Harshness / Geräusch-Vibration-Rauheit |
| NX | CAD-Software |
| OEM | Original Equipment Manufacturer |
| PDM | Produktdatenmanagement |
| PKEA | Planen, Konzipieren, Entwerfen und Ausarbeiten |
| PLM | Produktlebenszyklusmanagement |
| PS | Preskriptiv Study I |
| RC | Research Clarification |
| SFB | Steifigkeit, Festigkeit, Betriebsfestigkeit |
| SFE | Eigenname für einen Konzeptmodellierer der Firma SFE-Tec |
| SOP | Start Of Production |
| SysML | Systems Modeling Language |
| Z1-3 | Zusammenbaustufe 1-3 |

Symbol- und Formelverzeichnis

| | |
|------------|---|
| A | Querschnittsfläche |
| A_{max} | Maximale Querschnittsfläche |
| a_n | Untergrenze des Bauraumfüllverhältnisses |
| B | Äußere Breite |
| b | Innere Breite |
| b_n | Obergrenze des Bauraumfüllverhältnisses |
| C | Lagerbedingung |
| c_n | Arithmetisches Mittel zwischen a_n und b_n |
| E | Elastizitätsmodul |
| E_0 | Mindestanforderung an den Elastizitätsmodul |
| F | Kraft |
| F_a | Äußere Kraft |
| F_b | Biegekraft |
| F_d | Druckkraft |
| F_i | Innere Kraft (Schnittkraft) |
| $F_{in.m}$ | n -te Schnittkraft in der m -ten Iterationsschleife |
| F_k | Knickkraft |
| F_z | Zugkraft |
| G | Schubmodul |

| | |
|--------------|---|
| G_0 | Mindestanforderung an den Schubmodul |
| H | Äußere Höhe |
| h | Innere Höhe |
| I | Trägheitsmoment |
| I_b | Trägheitsmoment bei Biegung |
| I_k | Trägheitsmoment bei Knicken |
| I_{max} | Maximales Trägheitsmoment |
| I_p | Polares Trägheitsmoment |
| I_t | Trägheitsmoment bei Torsion |
| I_Y | Trägheitsmoment um die Y-Achse |
| I_Z | Trägheitsmoment um die Z-Achse |
| K_b | Bauteilkosten |
| $K_{b\ min}$ | Günstigste Bauteillösung |
| K_l | Leichtbaukosten |
| K_m | Materialkosten |
| L | Äußere Länge |
| M | Moment |
| M_b | Biegemoment |
| M_i | Inneres Moment (Schnittmoment) |
| $M_{in.m}$ | n -tes Schnittmoment in der m -ten Iterationsschleife |
| M_t | Torsionsmoment |

| | |
|--------------|--|
| m | Masse |
| p | Steigung |
| Q | Seitenverhältnis $\frac{B}{H}$ |
| $R_{p0,2}$ | 0,2%-Dehngrenze |
| R_m | Zugfestigkeit |
| r | Residuumsfunktion |
| S | Steifigkeit |
| S_v | Sicherheitsbeiwert gegen Versagen |
| S_z | Zugsteifigkeit |
| t | Wandstärke |
| t_1 | Wandstärke bei vollständiger vertikaler Profilfüllung |
| t_2 | Wandstärke bei vollständiger horizontaler Profilfüllung |
| WK | Platzhalter für einen |
| WK_0 | Mindestanforderung an einen beliebigen Werkstoffkennwert |
| β | Knickfall nach Euler |
| ΔF_i | Variationsbereich einer Schnittkraft im Entwicklungsprozess |
| ΔK_b | Kostendifferenz zwischen zwei Bauteilen |
| ΔL | Längenänderung |
| Δm | Gewichtsdifferenz |
| ΔM_i | Variationsbereich eines Schnittmomentes im Entwicklungsprozess |

| | |
|---------------------|---|
| δ | Durchbiegung |
| ε | Dehnung |
| ρ | Dichte |
| ρ_{eff} | Effektive Dichte (immer $\leq \rho$) |
| σ | Normalspannung |
| σ_b | Biegespannung |
| σ_{b0} | Mindestanforderung an die Biegespannung |
| σ_d | Druckspannung |
| σ_{d0} | Mindestanforderung an die Druckspannung |
| σ_z | Zugspannung |
| σ_{z0} | Mindestanforderung an die Zugspannung |
| $\sigma_{zulässig}$ | Zulässige Normalspannung |
| τ | Schubspannung |
| τ_t | Torsionsschubspannung |
| τ_{t0} | Mindestanforderung an die Torsionsschubspannung |
| $\tau_{zulässig}$ | Zulässige Schubspannung |
| φ | Verdrehwinkel |
| ψ_A | Formtransformator von A |
| ψ_I | Formtransformator von I |