



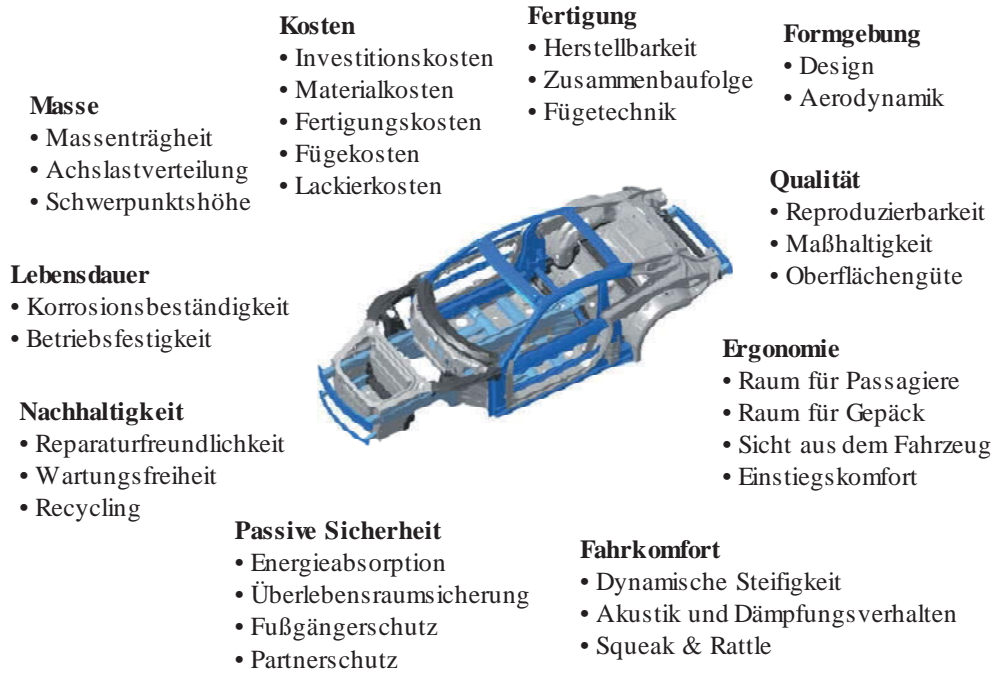
# 1 Einleitung

Die individuelle Mobilität bietet für viele Menschen einen erheblichen Zugewinn an Lebensqualität sowie Flexibilität und ist darüber hinaus ein wichtiger Baustein für die wirtschaftliche Prosperität einer Gesellschaft. Fahrzeuge sind sowohl in Industrieländern als auch zunehmend in aufstrebenden Schwellenländern, wie China und Brasilien, als Massenverkehrsmittel etabliert [37, 56]. Aufgrund schwindender fossiler Brennstoffreserven und dadurch steigender Energiepreise sowie eines deutlich gestiegenen Umweltbewusstseins im Zuge der Diskussionen um Treibhauseffekt und anthropogene Klimaerwärmung rücken Kraftstoffverbrauch und CO<sub>2</sub>-Emissionen immer stärker in den Fokus [153, 159]. Eine deutliche Senkung des Kraftstoffverbrauchs avanciert zunehmend zum Gradmesser der sozialen Akzeptanz in der Gesellschaft – insbesondere bei leistungsstarken Automobilen im Premiumsegment.

Der Kraftstoff- bzw. Energieverbrauch eines Kraftfahrzeugs ist bei Vernachlässigung der Nebenabtriebe beispielsweise für elektrische Verbraucher, Hydraulik und Klimaanlage vom Wirkungsgrad des Motors und des Antriebsstrangs sowie von den Fahrwiderständen abhängig (vgl. Bild A.1 und Tabelle A.1 im Anhang A1). Während der Luftwiderstand unabhängig von der Fahrzeugmasse ist, sind Rollwiderstand, Beschleunigungswiderstand und Steigungswiderstand proportional zur Masse des Fahrzeugs [27, 96]. Wachsende Komfort- und Qualitätsansprüche der Kunden sowie das steigende Sicherheitsniveau haben die Masse von Fahrzeugen in den letzten Jahrzehnten deutlich ansteigen lassen [154, 231]. Die Umkehrung der Gewichtsspirale bei Kraftfahrzeugen durch wirtschaftlichen Leichtbau ist Voraussetzung für den Einsatz kleinerer und sparsamerer Motoren. Neben der Batterietechnik wird der Leichtbau zur Schlüsseltechnologie für die Umsetzung voll alltagstauglicher Elektrofahrzeuge mit kundenfreundlichen Reichweiten und bezahlbaren Batteriegrößen. Leichtbau trägt durch Verbesserung des Leistungsgewichts und Reduzierung der Massenträgheit zusätzlich zur Steigerung von Längs- und Querdynamik eines Fahrzeugs bei.

Als größte Baugruppe eines Automobils trägt der Karosserierohbau zusammen mit dem Tür- und Deckel-Rohbau sowie weiteren Struktur-Anbauteilen mit etwa 20 bis 30 % zur Fahrzeugmasse bei. Neben der Aufnahme von Aggregaten und Betriebslasten stellt der Karosserierohbau Raum für Passagiere und Gepäck bereit und schützt die Insassen beim Unfall [7, 27]. Im Kontext steigender Kundenerwartungen und verschärfter gesetzlicher Vorschriften sind die vielfältigen Anforderungen an moderne Fahrzeugkarosserien deutlich gestiegen, Bild 1.1.

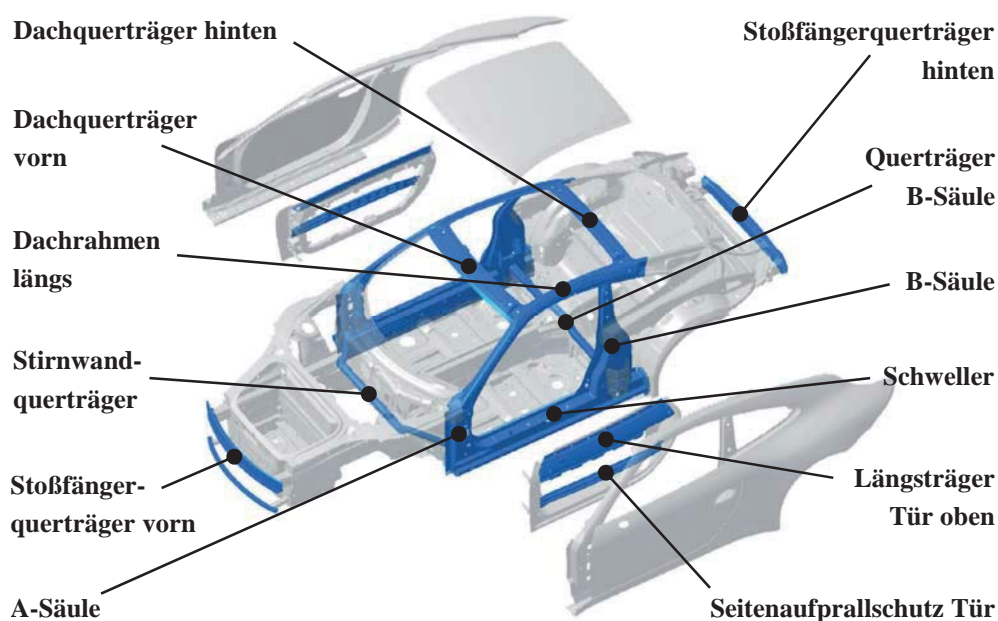
Bei der Konstruktion und Auslegung der Karosserie müssen Kompromisse zwischen gegenläufigen Anforderungen eingegangen werden. Ein Zielkonflikt besteht beispielsweise zwischen einer niedrigen Fahrzeugmasse und dem Streben nach niedrigen Herstellungskosten [151]. Weitere Zielkonflikte existieren zwischen Ergonomie, passiver Sicherheit und Masse-reduktion: Große Querschnitte bei A-Säule und Schweller verbessern die Formstabilität der Fahrgastzelle oder führen bei gleicher Leistungsfähigkeit im Crash zu einer niedrigeren Fahrzeugmasse. Im Hinblick auf die Sicht aus dem Fahrzeug wird jedoch eine möglichst schlanke A-Säule [66] und bezüglich des Einstiegskomforts ein niedriger Schweller [69] gefordert.



**Bild 1.1** Überblick über die Vielfalt der Anforderungen an Fahrzeugkarosserien, unter Verwendung von [19, 26, 28, 55, 198, 246]

## 1.1 Zielsetzung und Vorgehensweise

Die vorliegende Arbeit konzentriert sich – unter Berücksichtigung konstruktiv-technologischer und wirtschaftlicher Aspekte – auf die systematische Untersuchung biegebelasteter Träger, die beim Crash einen hohen Verformungswiderstand und ein gezieltes Energieaufnahme- und Verformungsverhalten aufweisen müssen, Bild 1.2.



**Bild 1.2** Übersicht über biegebelastete, crashrelevante Träger eines Automobils



Die bei einem Fahrzeugcrash auftretenden Belastungen, in deren Folge es zu Beuleffekten und schließlich zum Kollabieren eines Trägerquerschnitts kommen kann, bewirken ein komplexes Deformationsverhalten. Daher ist eine hinreichend genaue Ermittlung des Leichtbaupotenzials verschiedener Leichtbauwerkstoffe mittels Massebedarfskennzahlen, die die Dichte in Relation zur Steifigkeit oder Festigkeit setzen, nicht möglich. Die reine Substitution von hochfestem Stahl durch Leichtbauwerkstoffe, wie Aluminium, Magnesium oder Faser-Kunststoff-Verbunde (FKV), führt bei biegebelasteten Crashträgern, anders als bei flächigen Bauteilen, nicht zwangsläufig zu einer Massereduktion.

Im Rahmen dieser Arbeit soll das konstruktive Leichtbaupotenzial neuartiger Hybridbauweisen, die die Vorteile verschiedener Werkstoffe in einem Bauteil vereinen, im Vergleich zu konventionellen Bauformen für biegebelastete Crashträger bewertet werden. Untersucht werden nicht nur Hybridbauweisen, die Gegenstand aktueller Forschungsprojekte sind, sondern auch deren Weiterentwicklung mittels Werkstoffsubstitution sowie ein neuartiges Leichtbau-Strukturkonzept, das im Rahmen dieser Arbeit erstmals vorgestellt wird. Zur ersten Abschätzung des wirtschaftlichen Leichtbaupotenzials dienen Leichtbaumerkmale für im Crash biegebelastete Träger, die anhand strukturmechanischer und werkstofflicher Grundlagenbetrachtungen herausgearbeitet werden.

Mit Hilfe von 3-Punkt-Biege-Simulationen geometrisch einfacher, masse- und abmessungsgleicher Trägerprofile kann die Leistungsfähigkeit einer großen Anzahl verschiedener Leichtbau-Strukturkonzepte objektiv verglichen werden. Durch systematische Variation von Werkstoff und Bauweise soll nachgewiesen werden, dass das Leichtbaupotenzial integrativer Hybridbauweisen deutlich größer sein kann als bei einer reinen Werkstoffsubstitution.

Über die Tragfähigkeits- und Wirtschaftlichkeitsanforderungen hinaus müssen neuartige Leichtbau-Strukturkonzepte alle prozessseitigen Anforderungen an den automobilen Karosseriebau erfüllen. Durch eine systematische Analyse des Produktlebenszyklus von der Entwicklung (E) über die Produktion (P), den Vertrieb (V) und die Fahrzeugnutzung (N) bis hin zum Recycling (R) soll ein umfassendes Anforderungsprofil erarbeitet werden. Die Bewertung neuartiger Hybridbauweisen anhand dieser Anforderungen soll die Herausforderungen bei der Umsetzung in Serienfahrzeugen aufzeigen.

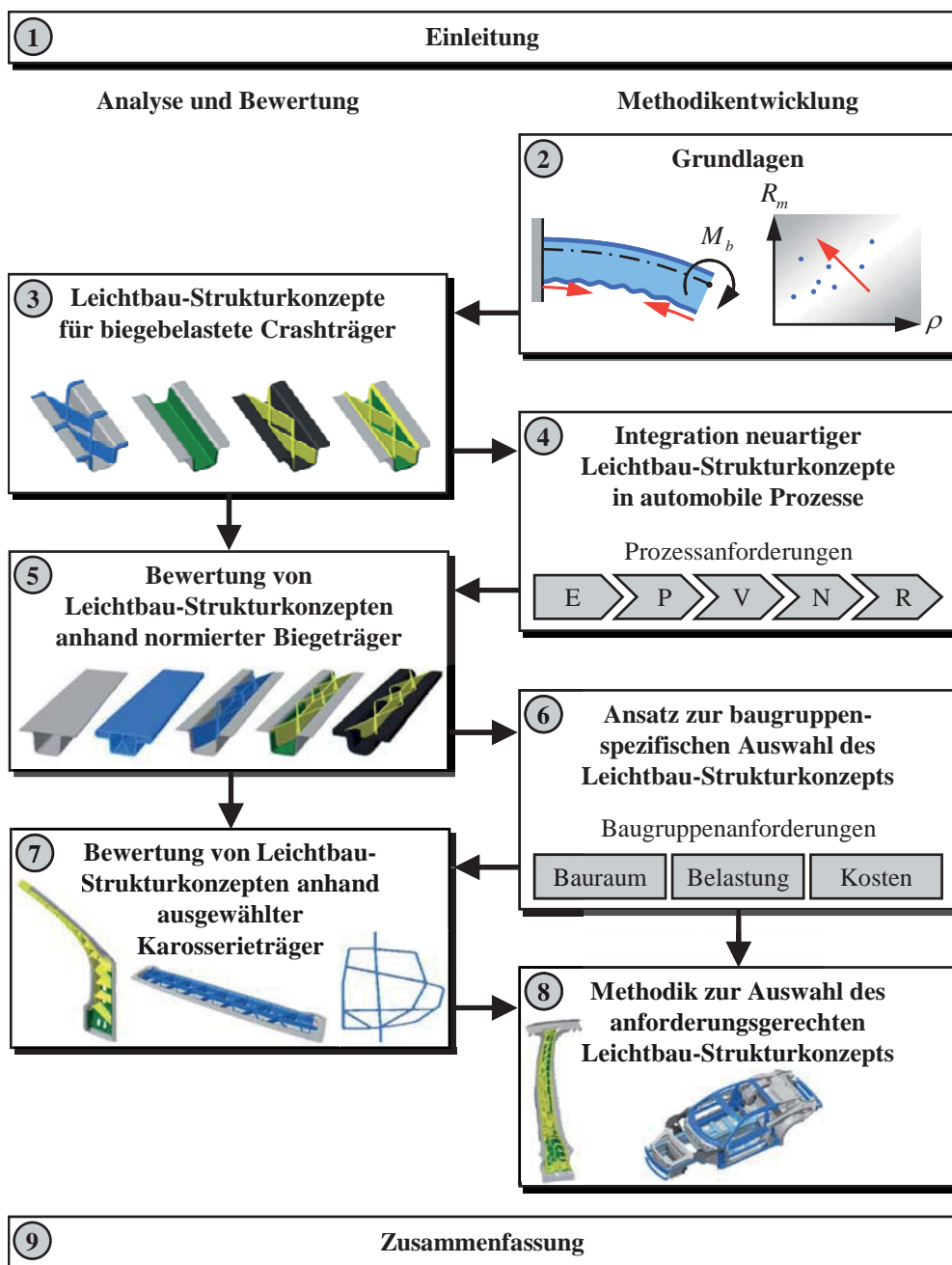
Als Grundlage für die Entwicklung einer Methodik zur Auswahl des Leichtbau-Strukturkonzepts soll folgender Ansatz dienen: Keines der Leichtbau-Strukturkonzepte ist für alle biegebelasteten Crashträger zugleich optimal geeignet und bietet das höchste wirtschaftliche Leichtbaupotenzial. Stattdessen hängt das bestgeeignete Leichtbau-Strukturkonzept maßgeblich vom spezifischen Anforderungsprofil einer Karosseriebaugruppe ab. Anhand folgender Karosseriebaugruppen werden neuartige Leichtbau-Strukturkonzepte im Wettbewerb mit konventionellen Leichtbaukonzepten erstmals systematisch bewertet:

- A-Säule eines Cabrios mit dem Lastfall Dacheindrückung,
- Dachquerträger eines Sports Utility Vehicle mit dem Lastfall Dacheindrückung,
- Schweller eines Cabrios mit den Lastfällen Seitenaufprall Pfahl, Seitenaufprall Barriere sowie dynamische Biege- und Torsionssteifigkeiten.



Ziel der Bewertungen ist der Nachweis, dass neuartige Hybridbauweisen für biegebelastete Crashträger hinsichtlich Leichtbau- und Wirtschaftlichkeitsaspekten unter bestimmten Voraussetzungen Vorteile gegenüber Bauweisen nach dem Stand der Technik bieten.

Auf Basis der Bewertungsergebnisse soll erstmals eine Methodik zur anforderungsgerechten Auswahl des Leichtbau-Strukturkonzepts für biegebelastete Crashträger eines Fahrzeugs entwickelt werden. Dazu sind allgemeingültige Zusammenhänge zwischen dem baugruppenspezifischen Anforderungsprofil und dem wirtschaftlichen Leichtbaupotenzial konkurrierender Leichtbau-Strukturkonzepte zu ermitteln. Die erarbeitete Systematik soll die allgemeingültigen Zusammenhänge auf andere biegebelastete Karosserieträger übertragen. Mit Hilfe eines umfassenden Bauweisen-Vergleichs am Beispiel einer B-Säule ist die Methodik zu validieren. Bild 1.3 zeigt den Aufbau der Arbeit in Form eines Flussdiagramms.



**Bild 1.3:** Aufbau der Arbeit



Im Kontext steigender Sicherheits- und Leichtbauanforderungen einerseits und kürzerer Entwicklungszeiten mit sinkender Hardwareabsicherung andererseits ist eine parallele Untersuchung mehrerer Leichtbaukonzepte während des Serienentwicklungsprozesses kaum möglich. Die hier zu erarbeitende Systematik soll bereits in der frühen Phase der Entwicklung noch vor der konstruktiven Umsetzung konkreter Konzepte eine anforderungsorientierte Auswahl des optimalen Leichtbau-Strukturkonzepts ermöglichen. Dadurch kann gezielt das bestmöglich geeignete Leichtbau-Strukturkonzept ausgewählt und im Wettbewerb mit einem konventionellen Konzept untersucht werden. Die vorliegende Arbeit leistet somit einen Beitrag zur praxisgerechten Integration neuartiger Leichtbau-Strukturkonzepte in den Entwicklungs- und Auslegungsprozess einer Fahrzeugkarosserie und zur Verkürzung des Produktentstehungsprozesses.

## 1.2 Stand der Wissenschaft

Nach dem Stand der Wissenschaft existieren zahlreiche Methoden und Ablaufschemata zur systematischen Werkstoffauswahl, aber nur wenige Ansätze zur vergleichenden Bewertung der Leistungsfähigkeit von Leichtbau-Strukturkonzepten.

### Methoden zur Werkstoffauswahl

Bei ASHBY, dessen Lehrbuch „Materials Selection in Mechanical Design“ als international anerkanntes Standardwerk im Bereich der Werkstoffauswahl gilt, stehen Werkstoff-Eigenschafts-Schaubilder im Mittelpunkt [8]. Die Werkstoffauswahl nach ASHBY eignet sich vorrangig für eine grundsätzliche Vorauswahl der Werkstoffgruppe.

Aufbauend auf der Vorgehensweise von ASHBY beschreibt REUTER [202, 203] eine Methodik zur systematischen Werkstoffauswahl und ordnet diese in den Konstruktionsprozess ein. Eine ähnliche Vorgehensweise schlagen sowohl ERLENSPIEL und KIEWERT [67] als auch GROSCH [90] vor. In Tabelle 1.1 werden die Vorgehensmodelle in die Konstruktionsmethodik eingeordnet. GROBE [91], MANTWILL [164] und FISCHER [75] integrieren die systematische Werkstoffauswahl in den Konstruktionsprozess durch den Aufbau von Werkstoffdatenbanken, die dem Konstrukteur als wissensbasiertes Informationssystem dienen. Eine Vorgehensweise zur systematischen Kunststoffauswahl beschreiben BRINKMANN [31] und KRAMER [148]. WEDDIGE [248] fokussiert seine Werkstoffauswahl auf den Werkstoff Stahl. ILLGNER [124] legt den Schwerpunkt der Werkstoffauswahl auf ein iteratives Verfahren, das lokale Einflüsse, wie thermische und korrosive Belastungen, die die Bauteilhaltbarkeit beeinflussen, mitberücksichtigt. Außerdem bezieht er wirtschaftliche Aspekte durch eine wertanalytische Betrachtung in den Werkstoffauswahlprozess mit ein [125].

In der industriellen Praxis erfolgt die Werkstoffauswahl meist in einem interdisziplinären Prozess zwischen Entwicklung, Produktion, Vertrieb und Controlling des Fahrzeugherstellers





in Zusammenarbeit mit Werkstofflieferanten. Als Ideengeber für die Serienentwicklung dienen dabei eigene Erfahrungen, Wettbewerbsanalysen, Entwicklungen aus Vorentwicklungs- und Forschungsabteilungen sowie Forschungseinrichtungen und Lieferanten.

**Tabelle 1.1** Vorgehensweisen zur Werkstoffauswahl und deren Einordnung in die Konstruktionsmethodik

VDI 2221 [242]	Phase I	Phase II	Phase III	Phase IV
PAHL [189]	Klären der Aufgabenstellung	Konzipieren	Entwerfen	Ausarbeiten
REUTER [202, 203]	Ermittlung der Materialanforderungen	Vorauswahl geeigneter Werkstoffe	Feinauswahl und Bewertung (Analyse)	Evaluierung und Validierung von Produkteigenschaften, Werkstoffentscheidung
EHRENSPIEL/ KIEWERT [67]	Klärung der Anforderungen an den Werkstoff	Suche nach möglichen Werkstoffen	Ermittlung der Eigenschaften von Werkstoffalternativen	Gegenüberstellung der Eigenschaften von Werkstoffalternativen
ASHBY [8]	Umwandlung der Anforderungen	Vorauswahl anhand der Randbedingungen	Aufstellen einer Rangfolge mit Hilfe der Zielvorgaben	Beschaffung weiterer Informationen, finale Werkstoffauswahl
GROSCH [90]	Bauteilbezogene und werkstoffbezogene Anforderungsmatrix	Werkstoffauswahl mit Optimierung	Prüfung der Erfüllung von Anforderungen, Vergleich der Lösungen	Festlegung von Werkstoff und Fertigungsverfahren

Bereits in der frühen Phase der Entwicklung können die Eigenschaften prinzipieller Lösungen vor Beginn der konstruktiven Umsetzung mit Hilfe von Ähnlichkeitskennzahlen vergleichend bewertet werden [48, 146, 205, 219]. Bezogen auf die Werkstoffauswahl werden Ähnlichkeitskennzahlen in Form von normierten spezifischen Werkstoffkennzahlen, wie beispielsweise Massebedarfskennzahlen, genutzt. Diese werden unter anderem von HERTEL [107], KLEIN [138] und DEGISCHER [46] hergeleitet und von BRAESS [27] und DAVIES [45] auf Karosseriewerkstoffe angewendet. BRÜDGAM [35], FRIEDRICH [79] und LÜDKE [161] ordnen diese Massebedarfskennzahlen als Leichtbaukriterien einer funktional gegliederten Karosserie zu. Die Zuordnungen werden jedoch nicht begründet und sind teilweise unterschiedlich. Daher wird in dieser Arbeit eine eigene Zuordnung der Massebedarfskennzahlen zu funktional gegliederten Karosseriebaugruppen vorgenommen, die sich an den auslegungsrelevanten Lastanforderungen orientiert. Weitere Studien zur Werkstoffauswahl für Karosseriebaugruppen mittels spezifischer Werkstoffkennzahlen sind in [43, 72, 73] veröffentlicht.

SAHR [214] entwickelt eine Vorgehensweise zur systematischen Materialauswahl unter Berücksichtigung der Anforderungen einer Fahrzeugkarosserie. Anhand von sechs Bewertungskriterien werden die physikalischen Anforderungen der Bauteile den Materialeigenschaften gegenübergestellt. Das für biegebelastete Träger wichtigste Auswahlkriterium ist die Formstabilität, die häufig auch als strukturelle Integrität bezeichnet wird. Die Bewertung der strukturellen Integrität erfolgt mit Hilfe der spezifischen Zugfestigkeit konkurrierender Werkstoffe ohne Berücksichtigung unterschiedlicher Bauweisen und Integrationsmöglichkeiten.



Diese Methode zur Materialauswahl wird im Rahmen des europäischen SuperLIGHT-Car-Projekts angewendet [215, 216, 241].

Statt den optimalen Werkstoff für ein Bauteil zu suchen, hat DURST eine Methodik zur Auswahl des Bauteils entwickelt, das sich strukturell am besten für den Einsatz von FKV eignet [55]. Um die Anisotropie der FKV auszunutzen, wird die Mehrachsigkeit der Spannungszustände von Karosseriebauteilen mit Hilfe einer Anisotropie-Analyse untersucht. Obwohl ausschließlich Steifigkeitslastfälle berücksichtigt werden, wird mit dem vorderen Dachquerträger ein vorrangig auf Crash auszulegender Träger ausgewählt.

Die Konzeptauswahl mit Hilfe der Methoden zur Werkstoffauswahl ist für biegebelastete Crashtäger aufgrund der fehlenden Berücksichtigung der Bauweise, der angestrebten Deformationskinematik und weiterer lösungsdefinierender Anforderungen nicht hinreichend.

### **Systematischer Vergleich verschiedener Leichtbaukonzepte**

BRÜGGEMANN [36] untersucht Schwellerprofile aus Stahlblech mit fünf verschiedenen Arten der Verstärkung: Polyurethanschaumstoff, Aluminiumschaumstoff, Stahlhohlkugeln, Kunststoffeinleger aus Polyamid und Stahl-Schottblech. Mit einer Reduktion der Intrusion des Pfahls um 10 bis 13 % gegenüber einem unverstärkten Schweller ist die Verbesserung des Verformungsverhaltens aller Verstärkungsvarianten ähnlich hoch. Eine Bewertung des Leichtbaupotenzials durch einen Vergleich zwischen der Höhe des Leistungszuwachses und dem Mehrgewicht findet nicht statt. In einer experimentellen und numerischen Untersuchung unverstärkter und schaumstoffverstärkter Hohlprofile weisen ZAREI et al. [254] für den Lastfall der Dreipunktbiegung eine Massereduktion von 28 % bei gleicher Energieaufnahme nach.

BRÖCKERHOFF [32, 33] und WALLENTOWITZ [245] führen Untersuchungen zu Schweller und Bodenstruktur einer Fahrzeugkarosserie mit dem Ziel durch, die Intrusionen beim seitlichen Pfahlaufprall zu reduzieren. Dazu werden zahlreiche Stahlblech-Konzepte unterschiedlicher Festigkeitsstufen mit und ohne Stahlblech-Verstärkung bei Vernachlässigung der Serienfähigkeit betrachtet. Durch höhere Festigkeiten und belastungsangepasste Wanddicken im Schweller sowie durch Sandwichblech anstelle von monolithischem Stahlblech im Boden wird die Intrusion um 16 % reduziert.

HENN [104] und HIRT [109] entwickeln eine innenhochdruckumgeformte (IHU) B-Säule, die als Tailor Welded Tube und Tailor Rolled Tube mit zwei verschiedenen Stahlgüten ausgeführt wird. Die erzielte Massereduktion von 30 bis 50 % bei Leistungsgleichheit im IIHS-Barrieren-Seitencrash muss jedoch aufgrund der niedrigen Festigkeiten der Referenz-B-Säule in Stahl-Schalenbauweise, die nicht mehr dem Stand der Technik entspricht, relativiert werden. TOUSEN et al. [233] zeigen rechnerisch ein hohes Potenzial zur Reduktion der Intrusionen beim Seitencrash durch Einsatz von Patch-Verstärkungen aus kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff (CFK) in den Flanken einer Stahl-B-Säule auf. Die Leistungsfähigkeit einer B-Säule im Seitencrash untersuchen auch PAN et al. [190] mit dem Ergebnis, dass eine B-Säule aus Tailor Welded Blank eine Massereduktion von 28 % gegenüber der



Referenz-B-Säule mit konstanten Wanddicken erreicht. Dies zeigt das konstruktive Leichtbaupotenzial durch belastungsangepasste Wanddicken.

Die A-Säule eines offenen Fahrzeugs wird von LIEDTKE [160] in Stahl-FKV-Hybridbauweise experimentell untersucht. Durch flächiges Verstärken der Stahlblechschalen mit CFK und aramidfaserverstärktem Kunststoff (AFK) wird bei Entfall des Verstärkungsrohres eine Massereduktion von 12 % erreicht. Die Hybridisierung des Verstärkungsrohres durch Umflechten bewirkt dagegen bei etwa gleichem Lastniveau keine signifikante Massereduktion gegenüber der Stahl-Referenz. AGREN [3] vergleicht bei der Entwicklung des Saab 9.3 Cabrios fünf A-Säulen-Konzepte aus Stahl und Aluminium. Eine qualitative Bewertung zeigt einen direkten Zusammenhang zwischen Massezunahme und Leistungszuwachs bei der quasi-statischen Dacheindrückung, sodass keine funktionale Abhängigkeit abgeleitet werden kann.

Anhand eines A-Säulen-Knotens untersucht WENDT [250] rechnerisch die Torsionssteifigkeit einer Fahrzeugkarosserie in Abhängigkeit von der Knotengestaltung. Dazu variiert Wendt Hauptwerkstoff (Stahl und Aluminium), Bauweise (Guss und Blech), Art der Verstärkung (keine, Blech, Gussrippen, Kunststoff-Insert und Strukturschaumstoff) sowie Wanddicken. Das Verhältnis von Steifigkeit zu Masse ist für die mit einem Kunststoff-Insert verstärkten Aluminiumblech-Varianten am besten, für unverstärkte Stahlblech-Knoten am schlechtesten. Die für eine A-Säule auslegungsrelevanten Crashlastfälle werden jedoch nicht untersucht.

URBAN [240] legt einen vorderen Stoßfängerquerträger aus gewebeverstärktem Kunststoff auf unterschiedliche Anforderungsszenarien aus. Das erste Konzept aus CFK erzielt eine höhere Belastbarkeit als das Referenz-System aus glasfasermattenverstärktem Thermoplast (GMT) und verhält sich bei niedrigen Relativgeschwindigkeiten vollkommen reversibel. Während mit dem ersten Konzept keine Massenreduktion erzielt wird, erzielt das zweite Konzept durch Reduktion der Anforderungen auf die US-Zulassungsbestimmungen ohne Berücksichtigung der Verbraucherschutzanforderungen eine Massereduktion von 56 %. HOSSEINZADEH et al. [113] führen eine parametrische Studie zum Stoßfängerquerträger eines Automobils durch, in der hochfestes Sheet Molding Compound (SMC) als Alternative zu GMT empfohlen wird.

PRZYBILLA [199] entwickelt einen Konstruktionskatalog für Leichtbaukastenträger. Gezielte Parametervariationen von Querrippen, Längsrippen und Trennwänden auf die Biege- und Torsionssteifigkeit des Trägers zeigen, dass die meisten Verstärkungsmaßnahmen die Masse überproportional erhöhen gegenüber der Reduzierung der Durchbiegung. BROCKING [34] betrachtet vereinfachte Knotenstrukturen aus faserverstärkten Kunststoffen. Durch Variation verschiedener Parameter, wie Wanddicke, Rippen und Laminataufbau, werden die Auswirkungen auf die Eigenschaften der FKV-Strukturen untersucht und Konstruktionshinweise abgeleitet. Weitere Untersuchungen zur Knotensteifigkeit ohne Bezugnahme auf das Leichtbaupotenzial finden sich bei MENKING [168] und ADAM [2].

Nach dem Stand der Wissenschaft existieren kaum bauweisen- und werkstoffübergreifende Untersuchungen zur systematischen Bewertung des Leichtbaupotenzials verschiedener Leichtbau-Strukturkonzepte für im Crash biegebelastete Karosserieträger. Ein Vergleich zwischen verschiedenen integrativen Hybridbauweisen findet ebenfalls nicht statt.





## 2 Grundlagen

In Übereinstimmung mit [46, 138, 141, 251] wird im Rahmen dieser Arbeit unter Leichtbau die Minimierung der Masse bei unveränderter struktureller Leistungsfähigkeit und Anforderungserfüllung oder eine Verbesserung der Leistungsfähigkeit ohne Massezuwachs verstanden.

### Definition „Leichtbauprinzipien“

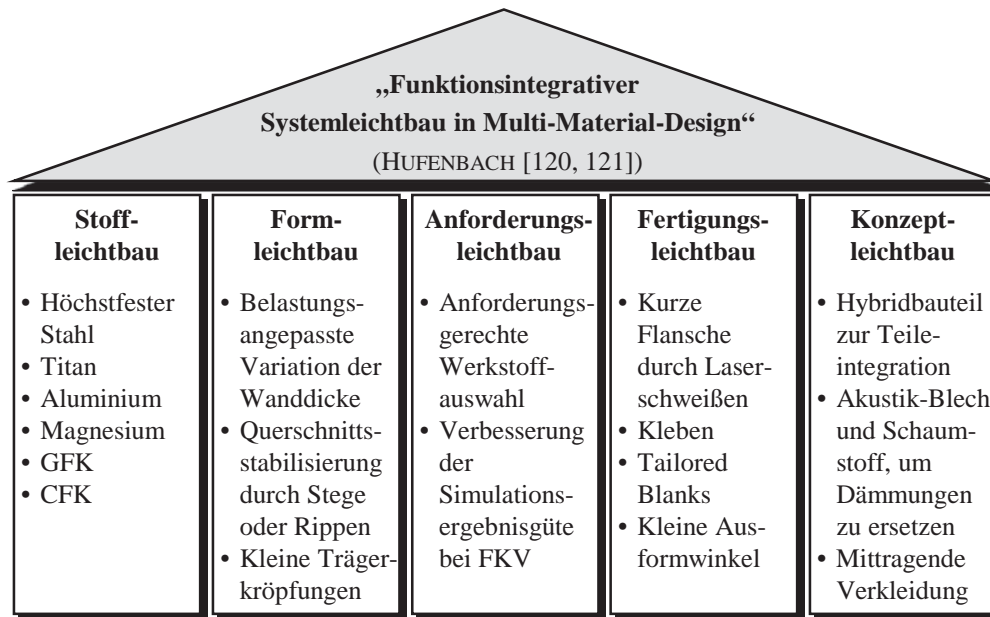
Bei der Entwicklung von Leichtbau-Komponenten können unterschiedliche Wege beschritten werden, die meist als Leichtbaustrategien oder Leichtbauprinzipien bezeichnet werden. Die in der Literatur genannten drei bis sechs Leichtbauprinzipien sind weder inhaltlich noch begrifflich einheitlich. Im Rahmen dieser Arbeit werden folgende fünf Leichtbauprinzipien unterschieden:

- **Stoffleichtbau / Werkstoffleichtbau / Werkstoffsubstitution**  
Die Substitution eines Werkstoffs A durch einen Werkstoff B mit geringerer Dichte oder einer besseren spezifischen Werkstoffeigenschaft führt zu einer Massereduktion [27, 79, 83, 97, 99, 106, 138, 141, 153, 167, 221].
- **Formleichtbau / Gestaltleichtbau / Strukturleichtbau / Konstruktiver Leichtbau**  
Durch belastungsangepasste konstruktive Gestaltung wird die Masse reduziert [27, 79, 83, 97, 99, 106, 117, 138, 141, 167, 221].
- **Anforderungsleichtbau / Bedingungsleichtbau**  
Die Massereduktion geschieht durch kritisches Hinterfragen und Infragestellen überhöhter Anforderungen oder durch genauere Kenntnis der bauteilbezogenen Lastanforderungen bzw. durch höhere Ergebnisgüte von Simulationen, in deren Folge Bauteile präziser ausgelegt und die geeigneten Werkstoffe zielgerichtet ausgewählt werden können [27, 79, 97, 99, 106, 141, 167, 221].
- **Fertigungsleichtbau**  
Werkstoff- und funktionsgerechte Fertigungs- und Fügeverfahren verbessern das Verhältnis zwischen Leistungsfähigkeit und Masse [83, 99, 106, 138, 153].
- **Konzeptleichtbau**  
Die Änderung der Anordnung von Komponenten, der Wechsel der Bauweise oder die gezielte Funktions- und Teileintegration bewirken eine konzeptbedingte Massereduktion [27, 79, 97, 99, 106, 153, 221].

Weitere in der Literatur genannte Leichtbauprinzipien, wie etwa Verbundleichtbau und Modulleichtbau, können in Abhängigkeit ihrer Ausprägung oftmals dem Fertigungs- oder Konzeptleichtbau zugeordnet werden. Die Anwendung aller fünf Leichtbauprinzipien in Form des „Funktionsintegrativen Systemleichtbaus in Multi-Material-Design“ [120, 121] ist der



Schlüssel zum nachhaltigen und wirtschaftlichen Leichtbau nach dem Leitsatz: „Der richtige Werkstoff in der richtigen Bauweise an der richtigen Stelle“[99, 231]. Bild 2.1 veranschaulicht die Leichtbauprinzipien mit Beispielen.



**Bild 2.1** Beispiele für die Leichtbauprinzipien im Systemleichtbau, unter Verwendung von [20, 99, 131]

Zur Umsetzung des funktionsintegrativen Systemleichtbaus für biegebelastete Träger und Säulen einer Fahrzeugkarosserie werden im Folgenden die wissenschaftlichen Grundlagen beschrieben. Die strukturmechanischen Grundlagen dienen mittels Verformungs- und Versagensanalysen biegebelasteter Träger zur Herleitung der wichtigsten Aspekte des Formleichtbaus. Die Potenziale des Stoffleichtbaus werden dabei durch Massebedarfskennzahlen auf Basis werkstofflicher Grundlagen herausgearbeitet.

### Definition „Fertigungstechnologie“

Eine Fertigungstechnologie definiert das Herstellungsverfahren eines Bauteils mit allen zeit- und kostenrelevanten Fertigungsprozessen vom Werkstoff bzw. Halbzeug bis zum fertigen Bauteil. Kurze Zykluszeiten der einzelnen Prozessschritte von der Bauteilfertigung über das Beschichtungskonzept bis hin zu prozesssicheren Fügeverfahren legen im Fertigungsleichtbau die Grundlage für die wirtschaftliche Umsetzung biegebelasteter Leichtbauträger.

### Definition „Bauweise“

Der Aufbau bzw. die Bauweise eines Trägers beeinflusst nicht nur dessen Wirtschaftlichkeit in Abhängigkeit von der Stückzahl, sondern aufgrund unterschiedlicher geometrischer Gestaltungsmöglichkeiten auch das Leichtbaupotenzial (Form- und Konzeptleichtbau). Allgemein können folgende prinzipielle Bauweisen unterschieden werden [119]: