

Waldemar Michel

Leichtbaukonzepte im Automobilbau

Grundlegung und ausgewählte Ergebnisse

Habilitationsschrift

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek: Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de/> abrufbar.

Dieses Werk sowie alle darin enthaltenen einzelnen Beiträge und Abbildungen sind urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsschutz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlanges. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen, Auswertungen durch Datenbanken und für die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronische Systeme. Alle Rechte, auch die des auszugsweisen Nachdrucks, der fotomechanischen Wiedergabe (einschließlich Mikrokopie) sowie der Auswertung durch Datenbanken oder ähnliche Einrichtungen, vorbehalten.

Copyright © 2018 Diplom.de
ISBN: 9783961163267

Waldemar Michel

Leichtbaukonzepte im Automobilbau

Grundlegung und ausgewählte Ergebnisse

I Vorwort

Als ich im Rahmen meiner beiden Fahrzeugtechnik-Studiums an der Technischen Fachhochschule Esslingen sowie an der Technischen Universität Graz die Diplomarbeit beziehungsweise die Masterarbeit auf dem Gebiet "Leichtbau im Automobilbereich" anfertigte und anschließend an der Sunderland University im gleichen Bereich promovierte, konnte ich noch nicht ahnen, dass ich mich noch ein Mal so intensiv mit derselben Thematik auseinandersetzen werde.

Die vorliegende Ausarbeitung entstand auf einer berufsbegleitenden Basis während meiner Tätigkeit bei Johnson Controls GmbH. Die Fachwissenschaftliche Betreuung übernahm die Brunel University London in England.

Ein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater, Prof. Dr.-Ing. Meidenbach, der mir zu jeder Zeit mit Rat und Tat zur Seite stand und zahlreiche zielführende Anregungen zu meiner Arbeit brachte.

Ich danke meiner lieben Frau Olga für ihre wertvolle Unterstützung und absolutes Verständnis, dass wieder viele Abende und Wochenenden entgegen der familiären Planung verbracht werden mussten, um den Erfolg meiner weiteren wissenschaftlichen Arbeit sicherzustellen.

Vom tiefsten Herzen danke ich meinen beiden Töchtern: Xenia und Lisa, die wieder, analog zu meiner Promotionszeit, auf das Beisein ihres Vaters verzichten mussten, jedoch mit vollem Verständnis und ausserordentlicher Geduld auf freie Minute warteten, um die Vaterliebe zu genießen.

[Unterschrift]

Bad Mergentheim, den

Waldemar Michel

„Wer nicht an die Zukunft denkt, wird auch keine haben“.

John Galsworthy

II Kurzfassung

Mit dem Leichtbau beschäftigen sich derzeit annähernd alle führenden Automobilhersteller. Die Hauptursachen dafür sind die limitierten Rohstoffe sowie der globale Klimawandel. Die beiden Herausforderungen „zwingen“ Fahrzeugingenieure dazu, ihre Zukunftsstrategien neu auszurichten und Alternativkonzepte zu erarbeiten.

Der Leichtbau in der Automobilindustrie heißt nicht zwangsläufig leicht, wie der Ausdruck dies zu verstehen geben mag. Er hat aber bei der Gewichtsoptimierung eine zentrale Rolle. Die Gewichtsoptimierung eines Automobils erfordert fundierende Fachkenntnisse auf dem Gebiet der Materialkunde, Entwicklungs- und Produktionsverfahren sowie der Fahrzeugsicherheit. Es wäre zu einfältig, traditionelle Stähle durch leichtere Aluminium, Magnesium oder deren Legierungen zu ersetzen: Nur durch die Anwendung von qualifizierten Design,- und Berechnungsmethoden sowie mittels gezielter Topologieoptimierung können Ingenieure bestmögliche Konzepte entwickeln. Des Weiteren sollen Produktionskosten genau berechnet werden, da beispielsweise **CFK** und **GFK** zwar deutlich leichter als Stahl und Aluminium sind, benötigen allerdings in der Herstellung ein Mehrfaches an Energie. Somit gilt der Leichtbau als wichtiger Bestandteil künftiger Fahrzeuge: Speziell in Hinsicht auf die Emissionswerte, die permanent eingeschränkt werden und ohne Gewichtsreduzierung nur bedingt erreichbar sind.

In der vorliegenden Arbeit wird die Disziplin „Leichtbaukonzepte im Automobilbau“ ausführlich vorgestellt und diskutiert. Der erste Kapitel enthält aktuellen Stand der Technik, der auf entsprechender Literatur-, Internet- und Patentrecherche beruht. Eine Werkstoffübersicht metallischer und nichtmetallischer Materialien folgt im zweiten Kapitel. Hierbei wird der Schwerpunkt auf technische Kunststoffe sowie auf Faserverbundstoffe gerichtet. Anhand einer detaillierten Grundlagenuntersuchung aktueller Fahrzeugkonzepte werden potentielle Gewichtsoptimierungen unter der Berücksichtigung von Alternativmaterialien analysiert und bewertet. Die Zusammenfassung und Durchsprache über die ausgearbeiteten Erkenntnisse sind einem der weiteren Kapiteln zu entnehmen.

Die zu verfolgende Zielsetzung dabei ist es, neuartige Materialien, Querschnittsprofile sowie Designkonzepte verschiedener Bauteile zu entwerfen und numerisch zu verifizieren. Beispiele lassen sich an Fahrgastzelle, Säulen sowie Türen aufzeigen. Dazu sind entsprechende mathematische Modelle zu erstellen, die es ermöglichen, schnell und effektiv potentielle Optimierungen sowohl am Einzelteil als auch an Baugruppe beziehungsweise am fertigen Produkt oder System vorzunehmen. Des Weiteren ist der Einsatz von Leichtbaumaterialien und Werkstoffen hinsichtlich technischer Machbarkeit sowie Sicherheitsanforderungen an ein Fahrzeug zu betrachten und zu simulieren.

Schliesslich sollen die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit durch einen Vergleich mit den gegenwärtigen Erkenntnissen aus der Forschung und Industrie zu neuen Ideen im Sinne der Leichtbauweise und Alternativkonzepte anregen. Die finale Zusammenstellung kann für Lernzwecke im Rahmen einer universitären Tätigkeit sowie als praktischer Schulungsinhalt in der Industrie benutzt werden.

III Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig und ohne fremde Hilfe beziehungsweise unerlaubte Hilfsmittel angefertigt, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und die den benutzten Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Unterschrift Waldemar Michel

IV Personen und Adressen

Personen

Betreuer: Prof. Dr. Iain McPherson
Brunel University, England
Institut für Fahrzeugtechnik & Materialwissenschaften

Habilitand: Herr Dr.-Ing., Meng (TU), Dipl.-Ing. (FH), Waldemar Michel

Adressen

Brunel University
Institut für Fahrzeugtechnik & Materialwissenschaften
8008 London
England

V Inhaltsverzeichnis

| | | |
|------------|---|-----------|
| I | VORWORT | 2 |
| II | KURZFASSUNG | 4 |
| III | EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG | 6 |
| IV | PERSONEN UND ADRESSEN | 7 |
| V | INHALTSVERZEICHNIS | 8 |
| VI | ZEICHEN UND ABKÜRZUNGEN | 14 |
| 1 | EINLEITUNG | 15 |
| 1.1 | Problemstellung und Motivation | 15 |
| 1.2 | Zielsetzung der Arbeit | 18 |
| 1.3 | Aufbau der Arbeit..... | 19 |
| 2 | STAND DER TECHNIK | 20 |
| 2.1 | Einblick in die Automobilgeschichte | 20 |
| 2.1.1 | Historischer Überblick | 20 |
| 2.1.2 | Technologische Fortschritte | 22 |
| 2.1.3 | Traditioneller Leichtbau..... | 25 |
| 2.1.4 | Aktuelle Beispiele in Serie | 26 |
| 2.2 | Leichtbauprinzipien im Automobilbau | 29 |
| 2.2.1 | Prinzipien der Entwurfsphase | 29 |
| 2.2.2 | Prinzipien der Konstruktionsphase | 30 |
| 2.2.3 | Prinzipien der Fertigungsphase..... | 32 |
| 2.3 | Zukunftsstrategien von Leichtbau im Automobilwesen | 33 |
| 2.3.1 | Trend von Leichtbaumaterialien | 34 |
| 2.3.2 | Trend von Leichtbaukonzepten | 34 |

| | | |
|------------|---|-----------|
| 2.3.3 | Trend von Fertigungsprozessen..... | 35 |
| 2.3.4 | Trend von Leichtbaustrategien..... | 35 |
| 2.4 | Schlussfolgerung aus Stand der Technik..... | 37 |
| 3 | FAHRZEUGEINTEILUNG UND AUFBAU | 39 |
| 3.1 | Fahrzeugeinteilung | 39 |
| 3.1.1 | Lastkraftwagen | 40 |
| 3.1.2 | Omnibusse | 40 |
| 3.1.3 | Personenkraftwagen..... | 40 |
| 3.2 | Fahrzeugaufbau | 41 |
| 3.2.1 | Schematischer Aufbau..... | 41 |
| 3.2.1.1 | Aufbau Fahrgestell | 42 |
| 3.2.1.2 | Aufbau Karosserie..... | 43 |
| 3.2.1.3 | Aufbau Antriebsstrang | 44 |
| 3.2.2 | Funktionale technische Anforderung | 45 |
| 3.2.3 | Funktionale Sicherheitsanforderung..... | 46 |
| 3.3 | Definition relevanter Begriffe | 47 |
| 3.3.1 | Normung und Standardisierung | 47 |
| 3.3.2 | Produkt und Produktprogramm | 48 |
| 3.3.3 | Variante und Variantenverschlüsselung | 50 |
| 3.3.4 | Variantenvielfalt und Komplexität | 52 |
| 3.4 | Schlussfolgerung aus Fahrzeugeinteilung..... | 54 |
| 4 | MATERIALKUNDE UND WERKSTOFFE..... | 56 |
| 4.1 | Teilgebiete von Materialkunde | 56 |
| 4.2 | Einführung und Übersicht | 57 |
| 4.2.1 | Historischer Überblick..... | 57 |
| 4.2.2 | Definition von Werkstoffen | 58 |
| 4.2.3 | Anforderungen an Werkstoffe | 59 |
| 4.2.3.1 | Technische Eigenschaften..... | 59 |
| 4.2.3.2 | Verarbeitung bei der Fertigung | 60 |
| 4.2.3.3 | Kosten und Wirtschaftlichkeit..... | 60 |
| 4.2.4 | Mikroskopie von Werkstoffen | 61 |

| | | |
|------------|---|-----------|
| 4.2.5 | Aufbau von Werkstoffen..... | 62 |
| 4.2.5.1 | Mikrostrukturen | 62 |
| 4.2.5.2 | Bindungsarten..... | 65 |
| 4.2.5.3 | Hauptvalenzbindungen..... | 68 |
| 4.3 | Metallische Werkstoffe | 71 |
| 4.3.1 | Die Eisengruppe | 71 |
| 4.3.2 | Die Rohstoffe der Eisengruppe | 72 |
| 4.3.3 | Eigenschaften von Eisenwerkstoffen..... | 73 |
| 4.3.3.1 | Eisen-Kohlenstoff-Legierungen..... | 73 |
| 4.3.3.2 | Eisen-Kohlenstoff-Diagramm | 74 |
| 4.3.3.3 | Einteilung der Eisenwerkstoffe..... | 76 |
| 4.3.3.4 | Wirkung der Eisenbegleiter..... | 77 |
| 4.3.4 | Stahlgruppen | 80 |
| 4.3.4.1 | Einteilung der Stähle | 80 |
| 4.3.4.2 | Bezeichnung von Stählen | 84 |
| 4.3.5 | Mechanische Eigenschaften | 85 |
| 4.3.5.1 | Elastische und plastische Verformung | 86 |
| 4.3.5.2 | Verformbarkeit metallischer Werkstoffe | 87 |
| 4.3.5.3 | Verfestigung metallischer Werkstoffe..... | 89 |
| 4.4 | Potentielle Alternativmaterialien | 90 |
| 4.4.1 | Nichteisenmetalle | 90 |
| 4.4.1.1 | Normgerechte Bezeichnung der Nichteisenmetalle..... | 91 |
| 4.4.1.2 | Kupfer und Kupferlegierungen | 91 |
| 4.4.1.3 | Nickel und Nickellegierungen | 92 |
| 4.4.1.4 | Aluminium und Aluminiumlegierungen..... | 93 |
| 4.4.1.5 | Magnesium und Magnesiumlegierungen..... | 94 |
| 4.4.1.6 | Titan und Titanlegierungen | 95 |
| 4.4.2 | Kunststoffe | 96 |
| 4.4.2.1 | Geschichte des Kunststoffes | 96 |
| 4.4.2.2 | Bezeichnungen und Begriffe..... | 98 |
| 4.4.2.3 | Kunststoff-Werkstoffe | 98 |
| 4.4.2.4 | Gemeinsame Eigenschaften..... | 100 |
| 4.4.2.4.1 | Äußere Merkmale | 100 |
| 4.4.2.4.2 | Physikalische Eigenschaften | 101 |
| 4.4.2.5 | Aufbau und strukturelle Einflüsse | 102 |
| 4.4.2.5.1 | Aufbauformen..... | 102 |

| | | |
|------------|--|------------|
| 4.4.2.5.2 | Strukturelle Einflüsse | 104 |
| 4.4.2.6 | Einsatzmöglichkeiten und -grenzen | 105 |
| 4.4.2.7 | Kunststoffsorten | 105 |
| 4.4.2.7.1 | Duromere | 106 |
| 4.4.2.7.2 | Plastomere | 107 |
| 4.4.3 | Verbundwerkstoffe..... | 109 |
| 4.4.3.1 | Einteilung der Verbundwerkstoffe | 109 |
| 4.4.3.2 | Funktionsprinzip der Verbundwerkstoffe | 110 |
| 4.4.3.3 | Festigkeitsprinzip der Verbundwerkstoffe..... | 111 |
| 4.4.3.4 | Verstärkungsfasern | 112 |
| 4.4.3.4.1 | Glasfasern..... | 112 |
| 4.4.3.4.2 | Aramidfasern..... | 115 |
| 4.4.3.4.3 | Kohlenstoff-Fasern | 118 |
| 4.4.3.4.4 | Entwicklungsaussichten von Kohlenstoff-Fasern..... | 121 |
| 4.4.3.4.5 | Naturfaser | 122 |
| 4.4.3.4.6 | Fasern im Vergleich..... | 123 |
| 4.4.3.4.7 | Anisotropie der Faser | 123 |
| 4.4.3.4.8 | Faser- und Füllstoffgehalt | 125 |
| 4.4.3.4.9 | Bestimmung der Faserfestigkeit..... | 126 |
| 4.4.3.4.10 | Allgemeiner Vergleich der Faser | 127 |
| 4.4.3.4.11 | Preisübersicht verschiedener Faserarten | 127 |
| 4.4.3.5 | Matrixsysteme | 128 |
| 4.4.3.5.1 | Funktion der Matrix und Matrixarten..... | 128 |
| 4.4.3.5.2 | Thermoplastische Matrix..... | 130 |
| 4.4.3.5.3 | Duroplastische Matrix | 131 |
| 4.5 | Schlussfolgerung aus Materialien und Werkstoffe | 132 |
| 5 | LEICHTBAUKONZEPTE IM AUTOMOBILBAU | 134 |
| 5.1 | Ausgangssituation und Zielsetzung | 134 |
| 5.1.1 | Beschreibung der Ausgangssituation | 135 |
| 5.1.2 | Zielsetzung der Forschungsstudie | 136 |
| 5.2 | Konzeptbewertung aktueller Fahrzeugkarosserien..... | 136 |
| 5.2.1 | Fahrzeugkarosserie allgemein | 136 |
| 5.2.1.1 | Fahrzeugaufbauten | 137 |
| 5.2.1.2 | Crashanforderungen | 138 |

| | | |
|------------|---|------------|
| 5.2.2 | Aktueller Leichtbau im Serieneinsatz | 140 |
| 5.2.2.1 | Kunststofftrend im Fahrzeugbau | 141 |
| 5.2.2.2 | Emissionesentwicklung in Deutschland | 141 |
| 5.2.2.3 | Belastungsarten einer Fahrzeugkarosserie | 142 |
| 5.2.2.4 | Vereinfachtes Belastungsmodell..... | 143 |
| 5.2.2.5 | Physikalische Gesetzmäßigkeiten | 144 |
| 5.2.2.5.1 | Definition von Kräften | 144 |
| 5.2.2.5.2 | Definition von Momenten | 146 |
| 5.2.2.5.3 | Definition von Beschleunigungen | 147 |
| 5.2.2.5.4 | Definition von mechanischen Spannungen | 148 |
| 5.2.2.5.5 | Definition von Elastizität..... | 153 |
| 5.2.2.5.6 | Definition von Widerstandsmomenten..... | 156 |
| 5.2.3 | Allgemeine Automobil-Normen..... | 162 |
| 5.2.3.1 | Frontalaufprall | 162 |
| 5.2.3.2 | Seitenaufprall | 162 |
| 5.2.3.3 | Fussgängerschutz..... | 163 |
| 5.2.4 | Auslegungskriterien von Fahrzeugkarosserien | 163 |
| 5.2.4.1 | Auslegung Vorderwagen | 166 |
| 5.2.4.2 | Auslegung Fahrgastzelle | 169 |
| 5.2.4.3 | Realisierte Beispiele..... | 170 |
| 5.3 | Forschungskonzept „Innovative B-Säule“ | 172 |
| 5.3.1 | Funktion- und Lastendokumentation | 172 |
| 5.3.2 | Beschreibung der Komponentenprofile | 173 |
| 5.3.2.1 | Definition der Schnittstellen im Fahrzeug | 173 |
| 5.3.2.2 | Auslegung der Lebensdauer..... | 174 |
| 5.3.2.3 | Klimatische Bedingungen | 174 |
| 5.3.2.4 | Komponentenspezifische Anforderungen..... | 174 |
| 5.3.3 | Entwicklungsmethodik | 175 |
| 5.3.3.1 | Einleitung | 176 |
| 5.3.3.2 | Wesentliche Bausteine | 176 |
| 5.3.3.3 | Auslegung der B-Säule im CAD..... | 177 |
| 5.3.3.3.1 | Rahmenbedingungen | 178 |
| 5.3.3.3.2 | Bauraumuntersuchung | 180 |
| 5.3.3.3.3 | Schnittstellenanalyse | 181 |
| 5.3.3.3.4 | Design der B-Säule | 182 |
| 5.3.3.4 | Aufbau Prototyp | 194 |
| 5.3.3.4.1 | Zeitlicher Verlauf Entwicklung | 195 |

| | | |
|------------|---|------------|
| 5.3.3.4.2 | Prototypenmanagement | 197 |
| 5.3.3.4.3 | Nomenklatur von Prototypenarten..... | 197 |
| 5.3.3.5 | Erprobung B-Säule..... | 199 |
| 5.3.3.5.1 | Erprobung Materialien | 199 |
| 5.3.3.5.2 | Erprobung Einzelteile | 201 |
| 5.3.3.5.3 | Erprobung Prototypen | 202 |
| 5.3.4 | Zusammenfassung zum innovativen Ansatz | 202 |
| 5.3.5 | Vorstellung neuartiger B-Säule | 203 |
| 5.3.5.1 | Konzeptvorstellung innovative Fahrgastzelle | 204 |
| 5.3.5.1.1 | Ansatz der Innovation..... | 204 |
| 5.3.5.1.2 | Designentwurf | 205 |
| 5.3.5.1.3 | Werkstoffauswahl | 206 |
| 5.3.5.2 | Dokumentation innovativer Fahrgastzelle | 207 |
| 5.3.5.2.1 | Parametriertes Model der Fahrgastzelle | 207 |
| 5.3.5.2.2 | Konzeptidee der Innovation | 208 |
| 5.3.5.2.3 | Auswahl geometrische Profile..... | 209 |
| 5.3.5.3 | Konzeptionelle Auslegung B-Säule..... | 210 |
| 5.3.5.3.1 | Bauraumuntersuchung und Modellabbildung | 210 |
| 5.3.5.3.2 | Betrachtung unterschiedlicher Profile..... | 211 |
| 5.3.5.3.3 | Topologische Optimierung..... | 213 |
| 5.3.5.3.4 | Realisierung numerischer Simulation | 215 |
| 5.3.5.3.5 | Herstellverfahren und Kostenbewertung | 216 |
| 5.3.5.3.6 | Konzeptionelle Bewertung | 217 |
| 5.3.5.3.7 | Weitere Optimierungspotentiale | 219 |
| 5.4 | Schlussfolgerung aus alternative Fahrzeugkonzepte..... | 221 |
| 6 | ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK | 223 |
| 7 | QUELLENVERZEICHNIS..... | 226 |
| 8 | ABBILDUNGSVERZEICHNIS..... | 234 |
| 9 | TABELLENVERZEICHNIS..... | 237 |
| 10 | FORMELVERZEICHNIS..... | 238 |
| 11 | ANHANG | 239 |

VI Zeichen und Abkürzungen

| | |
|-----------------------|---|
| ABS | Anti-Blockier-System |
| CAD | Computer Aided Desing |
| CFK | Kohlenfaserverstaerkter Kunststoff |
| CMVSS | Canadian Motor Vehicle Safety Standards |
| CO₂ | Kohlenstoffdioxid |
| DIN | Deutsches Institut für Normen |
| ECE | Economics Commission for Europe |
| ESP | Elektronisches Stabilitäts-Programm |
| ENCAP | European New Car Assessment Program |
| FMVSS | Federal Motor Vehicle Safety Standard |
| GFK | Glasfaserverstaerkter Kunststoff |
| IAA | Internationale Automobil Ausstellung |
| ISO | International Organization for Standardization |
| LKW | Last-Kraft-Wagen |
| NCAP | New Car Assessment Program |
| PDM | Produkt Daten Management |
| PEP | Produktentstehungsprozess |
| PSE | Periodensystem der Elemente |
| PKW | PersonenKraftWagen |
| PU | Poly-Urethan |
| REFA | Verband für Arbeitsgestaltung, Betriebsorganisation und Unternehmensentwicklung. |
| SMC | Sheet Moulding Compounding (Pulververbundwerkstoffe) |

1 Einleitung

Durch die vorangeschrittene Produkt- und Technologieentwicklung in den letzten Jahrzehnten stieg der Bedarf an natürlichen Rohstoffen enorm. Daher ist eine sparsame Anwendung vorliegender Ressourcen heute extrem wichtig. Darüber hinaus rückt die Problematik des Klimawandels in den Fokus der Weltorganisation für Klimaschutz, die eine sofortige Begrenzung der Treibhausgase fordert. Einen wichtigen Beitrag zur Reduktion der Emissionen soll die Automobilindustrie leisten. Durch die Optimierung des Kraftstoffverbrauchs kann nämlich neben der Rohstoffeinsparung auch der CO₂-Ausstoß herabgesenkt werden. Eine wesentliche Maßnahme hierzu ist die Verringerung des Fahrzeuggewichts: Die Gewichtseinsparung von 100 kg eines mittelgrossen Fahrzeugs ergibt eine Kraftstoffreduzierung von circa 0,3 Liter auf 100km. Daher richtet die Automobilindustrie ihren Fokus neben der Optimierung von Motorverbrennungsprozessen sowie fahrzeugaerodynamischen Eigenschaften auf die Leichtbaukonzepte und deren Technologien.

1.1 Problemstellung und Motivation

In April 2009 wurde durch das Europäische Parlament eine Verordnung zur Minderung von CO₂-Emissionen bei den neuen Personenkraftwagen verabschiedet. Diese Verordnung schafft einen verbindlichen Rechtsrahmen und bietet der Automobilindustrie eine solide Planungssicherheit. Ein wesentlicher Aspekt für die Fahrzeugproduzenten hierbei ist die CO₂-Ausstoßgrenze, die ab 2020 nur noch 95 g/km betragen darf. Dies entspricht einem Verbrauch von 3,6 Liter beim Diesel- und 4,2 Liter beim Ottomotor auf 100 km Entfernung [1].

Somit unterstützen die neuen Europäischen Vorgaben die Wettbewerbsfähigkeit der Deutschen Automobilindustrie zu steigern, da die Zukunft des modernen Automobilbaus sowohl in Europa als auch weltweit den effizienten Fahrzeugen gehört. Die Effizienz der modernen Fahrzeuge basiert auf den Kohlenstoffdioxid- und Schadstoffemissionen, die automatisch zum Leichtbau führen [2].

Die Leichtbauanforderungen für die Produkte der Automobilindustrie können mittels folgender Prinzipien beschrieben und realisiert werden:

- der Werkstoffleichtbau,
- der Konstruktionsleichtbau,
- der Systemleichtbau.

Bei dem *Werkstoffleichtbau* werden gängige Werkstoffe durch neue beziehungsweise veränderte Werkstoffe oder Materialien ersetzt. Die Alternativwerkstoffe bewirken bei den gleichen oder sogar verbesserten mechanischen Eigenschaften eine gleichzeitige Gewichthsoptimierung. Als Beispiel hierfür können Verbundwerkstoffe oder Substitution von Metallen durch entsprechende technische Kunststoffe genannt werden [3].

Bei dem *Konstruktionsleichtbau* werden unterschiedliche Materialien in Form einer Schichtanordnung eingesetzt, so dass neben einer Materialeinsparung auch eine Gewichtsreduktion des Bauteils erzielt werden kann. Daher ist die Wahl geeigneter Füge- und Fertigungsverfahren von großer Bedeutung, die darüber hinaus unter einer engen Abstimmung mit dem Werkstoffleichtbau erfolgen soll. Denn meistens können die geforderten Eigenschaften einer Baugruppe erst durch das Zusammensetzen aus Werkstoff, Konstruktion und Fügetechnik realisiert werden. Als Referenz wird hier auf die Herstellung von Automobilkarosserien hingewiesen: Wenn diese noch vor zwanzig Jahren vorwiegend nur geschweißt wurden, findet heute nahezu ausschließlich mechanisches Fügen statt, um die Werkstoffeigenschaften auch im Fügebereich beizubehalten [2].

Bei dem *Systemleichtbau* werden nicht mehr die einzelnen Komponenten, sondern ein gesamtes System betrachtet. In Ausnahmefällen können durchaus bestimmte Bauteile auch schwerer werden. Dies hängt von dem Einsatz und der wirkenden Last ab. Der generelle Ansatz für den Systemleichtbau wird immer öfters direkt aus der Natur abgeleitet. Eines der Idealbeispiele hierfür stellt das Spinnweben dar [2].

Somit treiben die Aspekte der Umweltpolitik sowie der Energieeinsparung den Leichtbau voran und erwarten neben den Leichtbauwerkstoffen den Einsatz von Leichtbaukonzepten und Leichtbautechnologien gleichzeitig. Aus meiner persönlichen Erfahrung und Beobachtung über die letzten 12 Jahre, insbesondere während der Anfertigung verschiedener wissenschaftlicher Ausarbeitungen¹, wird der Fokus von den Entwicklungsingenieuren jedoch sehr oft auf nur eines der Leichtbauprinzipien gerichtet. Die strengen wirtschaftlichen und zeitlichen Projektvorgaben mögen die Ursachen für eine vereinfachte Vorgehensweise sein. Daher wird das Augenmerk der vorliegenden Ausarbeitung auf die neusten Entwicklungen und Potentiale im Werkstoffleichtbau sowie Konstruktionsleichtbau gerichtet und durch die Ansätze aus dem Systemleichtbau ergänzt. In Anbetracht der Vielfalt werkstofftechnischer Entwicklungsansätze zur Leichtbauthematik werden jedoch nur bestimmte Beispiele dargelegt und beschrieben.

Ein weiteres Ziel des wissenschaftlichen Werkes ist eine angestrebte nebenberufliche Professur mit dem Ziel, all die mehrjährigen Erfahrungen aus der Industrie und Wissenschaft an die jüngere Generation weiterzugeben.

¹ Die Leichtbauthematik wurde von mir bereits im Rahmen des Fachhochschulstudiums an der Technischen Fachhochschule Esslingen bearbeitet und in der entsprechenden Abschlussarbeit dokumentiert. Darüber hinaus erfolgten die Abschlussarbeit meines Studiums an der Technischen Universität Graz sowie die Promotion an der Technischen Universität Sunderland ebenfalls auf dem Gebiet des Leichtbaus.

1.2 Zielsetzung der Arbeit

Die Konstruktionsanforderungen an die modernen Fahrzeuge in Bezug auf Leichtbau werden immer grösser. Daher verspricht grundsätzlich der Einsatz von Alternativwerkstoffen und Materialien wie Aluminium, Magnesium, CFK und GFK große Möglichkeiten und technische Fortschritte. Heute ist es aber immer noch üblich, dass Leichtbaukonzepte mit hoher Steifigkeit und Festigkeit intuitiv durch Produktentwickler definiert werden. Dabei steht ihnen eine zahlreiche Auswahl an Werkzeugen zur Verfügung, die bei der Realisierung neuer Ideen große Unterstützung leisten: Neben der Anwendung von Hochleistungsrechnern und numerischen Methoden der Mechanik wird häufig auf topologische Optimierung einzelner Komponente samt Baugruppen zurückgegriffen, um diese mit den Ergebnissen experimenteller Analysen gegenüberzustellen und abzugleichen. Des Weiteren spielen die Erkenntnisse bereits abgeschlossener Programme eine wesentliche Rolle bei der Auslegung von Alternativkonzepten und Technologien. Hierzu liegen folgende Aspekte zu Grunde: Zeitlicher Aufwand für die Neuentwicklung, numerische Konzeptabsicherung mit einer abschließenden Verifizierung im Labor, sowie eine professionelle Überzeugung potentieller Nutzer. All diese Aufwändungen treiben die Produktentstehungskosten in die Höhe, die bei der aktuellen Markt- und Wettbewerbssituation meistens nur bedingt realisierbar sind. Daher bevorzugt die Automobilindustrie eher die Modifikation eines bestehenden Produkts vor der Investition in die Neuentwicklung mit der Ausnahme bei Elektrifizierung von Fahrzeugen.

In der vorliegenden Arbeit werden Leichtbauakkonzepte im aktuellen Automobilbau analysiert und bewertet. Bei der Bewertung sind auch realitätsnahe wirtschaftliche Aspekte darzustellen. Darüber hinaus folgt die Ausarbeitung alternativer Leichtbauansätze, wodurch die Erfüllung der angekündigten Emissionsauflagen und technischen Sicherheitsanforderungen sicherzustellen ist. Die Zielsetzung dabei ist es, traditionelle Materialien durch leichtere Werkstoffe zu ersetzen und unter Berücksichtigung intelligenter Querschnittsprofile und Bauteilgeometrien den Einsatz zu simulieren. Die Ergebnisse der Ausarbeitung sollen dokumentiert und dem akademischen Standard entsprechend dargelegt werden.

1.3 Aufbau der Arbeit

Im ersten Abschnitt der vorliegenden Arbeit wird Stand der Technik vorgestellt, der in vier Unterkapiteln aufgeteilt ist. Im ersten davon folgt ein kurzer Rückblick auf die Historie der Automobilindustrie. Der zweite Unterkapitel beschreibt die Leichtbauprinzipien und danach wird dem Leser über die Leichtbauansätze moderner Fahrzeugindustrie berichtet. Der abschließende Unterkapitel beschreibt die potentiellen Zukunftsstrategien im Automobilbau.

Im zweiten Abschnitt wird auf die wesentlichen Materialien der Automobilindustrie eingegangen. Zuerst folgt die Übersicht traditioneller Werkstoffe, die sowohl metallische als auch nicht metallische Eigenschaften aufweisen. Des Weiteren werden Alternativmaterialien allgemein vorgestellt und ein potentieller Einsatz anhand von definierten Beispielen diskutiert. Dabei ist es wichtig, dass sowohl die Funktion als auch die Sicherheitsanforderungen betroffener Bauteile berücksichtigt werden.

Im weiteren Abschnitt der Habilitationsschrift folgt die Ausarbeitung alternativer Fahrzeugkonzepte und Technologien. Eine der wesentlichen Zielsetzungen dabei ist es, mittels physikalischer Zusammenhänge sowie technischer Materialeigenschaften einen bestmöglich geeigneten Leichtbauansatz für Fahrzeugkonzepte zu entwerfen. Das „**Multy Material Design**“, **MMD**, wird bei der Konzeptdefinition und Bauteilauslegung zu Grunde gelegt. Das Kernprinzip der gewählten Vorgehensweise besteht darin, den Schwerpunkt auf leichte Materialien und Werkstoffe als Kombination mit intellegenten Querschnittsprofilen und darauf angepassten Bauteilgeometrien zu richten. Sowohl Einzelteile als auch Baugruppen werden numerisch abgebildet und unter Berücksichtigung technischer Spezifikation der Automobilindustrie simuliert und näher dargelegt. Die Endergebnisse werden in der Zusammenfassung festgehalten und kommentiert.

2 Stand der Technik

Im aktuellen Kapitel wird nach dem allgemeinen Leichtbau in der modernen Fahrzeugindustrie recherchiert und ein Aufschluss über die Automobilgeschichte gegeben. Darüber hinaus folgt eine detaillierte Übersicht traditioneller Materialien und Fahrzeugkonzepte aus dem heutigen Automobilbau. Der Fokus liegt jedoch auf den für Leichtbau relevanten Aspekten. Die Ergebnisse werden in der „Schlussfolgerung aus dem Stand der Technik“ dokumentiert und näher erläutert.

2.1 Einblick in die Automobilgeschichte

Auf kaum eine andere industrielle Innovation sind wir als Menschen heute so angewiesen, wie auf das Automobil. Als Automobil wird jenes Fahrzeug betrachtet, das sich ohne den Aufwand von Schienen und Muskelkraft eigenständig fortbewegen kann. Neben den traditionellen Kraftwagen mit Verbrennungsmotor zählen auch Elektrofahrzeuge und Automobile mit Dampftrieb dazu. Die Letzteren spielen allerdings in der Zwischenzeit eher eine untergeordnete Rolle [4].

2.1.1 Historischer Überblick

Die Historie des Automobilbaus geht auf das Jahr 1674 zurück, in dem ein holländischer Physiker, Christian Huygens, eine Kolbenmaschine mit Pulverantrieb entwarf. Somit gilt Huygens als Erfinder des Kolbenmotors, mit dem die meisten gewöhnlichen Autos heute noch immer angetrieben werden. Danach tat sich auf dem Automobilssektor über längeren Zeitraum nicht wirklich viel. Erst in 1769 wurde eine weitere Innovation realisiert: Der Dampfwagen [4]. Das Gefährt des französischen Artillerieoffiziers Nicolas Joseph Gugnot stellte nicht wirklich ein typisches Fahrzeug dar, sondern eher einen Lastkarren. Eine geräumige Ladefläche wurde mit drei mächtigen Holzrädern bewegt, wobei der große Dampfkessel vor dem Vorderrad hing und den Dampfwagen antrieb. Das Konzept konnte ausschließlich nur zur Kanonnenförderung an die Front eingesetzt werden (**Abbildung 1**) [5]. Der Wagen vom Cugnot war relativ schwer zu lenken, die Maschine blieb alle paar Minuten stehen, und die Geschwindigkeit betrug maximal nur 4 Kilometer pro Stunde.



Abbildung 1: Dampfwagen von Cugnot

In Literaturquellen wird angegeben, dass der Wagen eine Betonmauer rammte und Cugnot somit für den ersten Autounfall der Automobilgeschichte verantwortlich sei [5].

Der Cugnots Dampfwagen wird als Pionier im Automobilbau angesehen, der sich aus eigener Kraft fortbewegen konnte. Später hatten die durch Dampftechnologie angetriebenen Kraftfahrzeuge allerdings keine Möglichkeit mehr am Wettbewerb mit einem Verbrennungsmotor mithalten: Zu hohes Fahrzeuggewicht, zu aufwendige und zu kostenlastige Antriebstechnologie waren die wesentlichen Kriterien gegen dieses Konzept [5].

Im Jahre 1839 wurde das erste Elektrofahrzeug vom Schotten, Robert Anderson gebaut. Einundzwanzig Jahre später, im 1860 patentierte der Franzose Etienne Lenoir einen Gasmotor. 1876 meldete Nikolaus August Otto die Fertigstellung des Viertaktmotors [5].

Die Entwicklung vom heutigen Automobil began mit der Patentanmeldung eines dreirädriges Fahrzeugs mit Gasmotor (**Abbildung 2**). Die Nummer 37 435 scheint im ersten Augenblick nicht unbedingt bekannt zu sein, die Historiker der Automobilgeschichte wissen aber, dass unter dieser Nummer Carl Benz am 29. Januar 1886 das Patent auf seinen Motorwagen erhielt.



Die erste offizielle Überlandfahrt mit dem „Benz Patent-Motorwagen Nr 3“ von Betha Benz im Frühjahr 1888 ging in die Historie der Fahrzeugindustrie ein [6].

Abbildung 2: Carl Benz mit 81 auf seinem 1886 entwickelten Motorwagen

Kurze Zeit darauf folgten Fahrzeuge von Gottlieb Daimler, Wilhelm Maybach und Siegfried Marcus, die mittels eines Benzinmotors angetrieben wurden. Zwischen 1894 und 1902 produzierte allerdings Benz als Erster ein Serienauto. Gleichzeitig wurde die Daimler-Motoren-Gesellschaft gegründet, die einen Kutschenwagen mit einer Spitzengeschwindigkeit von 16 km/h entwickelte. 1897 realisierte Rudolf Diesel den ersten Dieselmotor. 1889 kam von den Österreichischen Herstellern Gräf & Stift das erste Automobil mit Frontantrieb, das 1900 in Wien patentiert wurde. Im darauf folgenden Jahr konnte die Marke von 100 km/h dank eines Elektroautos von Camille Jenatzy erreicht werden [6].

Beim starken Konkurrenzdruck unter den verschiedenen Antriebstechniken für Automobile konnte sich schließlich der Benzinmotor durchsetzen, dessen Gründe heute noch immer aktuell sind: Die Technologie des Motors ist inzwischen stark vorangeschritten, das Erdöl als Kraftstoff verfügt über eine recht hohe spezifische Energie, wodurch das Auto eine große Reichweite hat. Ausserdem war der Kraftstoff damals noch außergewöhnlich günstig. Die Grundmechanik des historischen Automobils blieb bis heute fast unverändert, wobei über die Jahre unzählige Innovationen hinzu kamen [6].

2.1.2 Technologische Fortschritte

- 1900 folgte das Patent für Frontantrieb. Als Frontantrieb wird im Fahrzeugwesen die Zusammensetzung des Vorderradantriebs mit dem Frontmotor bezeichnet: Die Motorleistung wird hierbei direkt auf die Vorderachse übertragen [6].
- 1901 wurde Scheibenbremse patentiert. Bei der Scheibenbremse wird die Verzögerung mittels einer auf Radnabe befestigten Bremscheibe und durch den im Bremssattel positionierten Bremsklotz mit Bremsbelegen erzeugt [7].
- 1903 entwarf Mary Anderson Scheibenwischer. Die Funktion der Scheibenwischer besteht darin, die Front- und Heckscheibe zu reinigen und den Fahrzeuginsassen bessere Sicht nach außen sicherzustellen [6].

- 1913 startete Henry Ford mit der Fließbandproduktion. Der wesentliche Vorteil einer Massenproduktion liegt in den größeren Stückzahlen, die zu deutlich günstigeren Herstellkosten produziert werden konnten. In Deutschland konnte die Fließbandproduktion erst im Jahre 1924 realisiert werden. Als erstes Automobil vom Fließband war der Opel 4PS [9].
- 1933 wurde der Drehkolbenmotor erfunden, bei dem die Bauteile nur Drehbewegung ausführen. Dieser Motor ist dank seiner robusten Bauart sehr verbreitet. Nachteilig ist jedoch intensive Abdichtung und Schmierung [10].
- 1940 wurde das erste Automatikgetriebe vorgestellt. Das Konzept eines Automaten besteht darin, dass die Schaltgänge in einer direkten Abhängigkeit von der Fahrzeuggeschwindigkeit und von der durch Fahrer eingeforderten Fahrleistung automatisch gesteuert werden [10].
- 1948 folgte das Patent für Radialreifen. Das Konzept eines Radialreifens baut auf einer klaren Trennung der Funktion im Unterbau. Die radial positionierten Karkaslagen sorgen für besseres Einfedern und die senkrecht eingebaute gummierte Cordfäden ermöglichen verstärkte Haftung auf Nässe [11].
- 1951 wurden zwei weitere Innovationen vorgestellt: Benzindirekteinspritzung sowie Servolenkung. Durch die Direkteinspritzung konnten die Eigenschaften des Verbrennungsmotors deutlich verbessert werden. Die Servolenkung trägt enormen Beitrag zur leichteren Steuerung des Fahrzeugs [12].
- 1963 wurde der Wankelmotor entwickelt. Bei einem Wankelmotor wird die Verbrennungsenergie ohne den Umweg einer Hubbewegung direkt in eine Drehbewegung umgesetzt. Der wesentliche Vorteil dieser Bauweise sind die wenigen beweglichen Bauteile. Das ungünstige Verhältnis zwischen der Oberfläche und dem Brennraumvolumen kann aber zum hohen Wärmeverlust führen [12].