

Masterarbeit

Aylin Keskin

Nachhaltige Konzepte für den Einsatz multipler Werkstoffe im Automobilbau

*Fakultät Technik und Informatik
Department Maschinenbau und Produktion*

*Faculty of Engineering and Computer Science
Department of Mechanical Engineering and
Production Management*

Aylin Keskin

**Nachhaltige Konzepte für den Einsatz
multipler Werkstoffe im Automobilbau**

Masterarbeit eingereicht im Rahmen der Masterprüfung

im Studiengang Nachhaltige Energiesysteme im Maschinenbau
am Department Maschinenbau und Produktion
der Fakultät Technik und Informatik
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Erstprüfer: Prof. Dr.-Ing. habil. Frank Helmut Schäfer
Zweitprüfer: Prof. Dr.-Ing. Olaf Friedrich

Abgabedatum: 17.10.2017

Zusammenfassung

Aylin Keskin

Thema der Masterthesis

Nachhaltige Konzepte für den Einsatz multipler Werkstoffe im Automobilbau

Stichworte

Leichtbau, Kraftstoffverbrauch, Crashverhalten, Faserverbundwerkstoffe, Sandwichplatten, Energieabsorptionsvermögen, Beul- und Biegesteifigkeit, Lebenszyklusanalyse

Kurzzusammenfassung

Die vorliegende Arbeit zeigt die technische Motivation für den Einsatz multipler Werkstoffe auf. Neben den vorteilhaften Eigenschaftsprofilen werden bestehende und zukünftige Anwendungen für die Automobilindustrie erläutert und bewertet. Im Rahmen des Life-Cycle-Assessment wird die Nachhaltigkeit des Einsatzes von multiplen Werkstoffen abgeschätzt und auf Optimierungspotenziale für eine höhere Energieeffizienz aufmerksam gemacht.

Aylin Keskin

Title of the paper

Sustainable concepts for the use of multiple materials in the automotive industry

Keywords

lightweight design, fuel consumption, crash behaviour, fibre reinforced plastic, sandwich plates, energy absorption capacity, bending and buckling stiffness, life cycle assessment

Abstract

This paper deals with the technical motivation for the use of multiple materials. Besides the beneficial profile of properties, existing and future applications in the automotive industry are explained and assessed. The sustainability of those applications is evaluated in the context of a life-cycle-assessment and potentials of optimization for a higher energy efficiency are clarified.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen bedanken, die mich während der Anfertigung dieser Arbeit unterstützt haben. Diese Arbeit hat mein Interesse in dem Fachbereich der innovativen Leichtbautechnologien verstärkt.

Mein ganz besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. F. H. Schäfer für die Überlassung des Themas, für seine ausgiebige Unterstützung und für das Korrekturlesen dieser Arbeit.

Weiterhin danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. O. Friedrich für die Übernahme der Zweitkorrektur.

Herrn Dr. A. Eggert möchte ich für die Ermöglichung einer kostenfreien Teilnahme am VDI-Kongress „Kunststoffe im Automobilbau“ danken.

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichenverzeichnis	III
Abkürzungsverzeichnis	IV
Abbildungsverzeichnis	V
1 Einleitung.....	1
2 Technische Motivation	3
2.1 Senkung des Energiebedarfs und des Kraftstoffverbrauchs.....	3
2.2 Verbesserung der aerodynamischen Eigenschaften	5
2.3 Verbesserung der Fahrdynamik.....	5
2.4 Verbesserung des Crashverhaltens.....	7
2.4.1 Crashfall-Eignung von Werkstoffen	8
2.4.2 Crashverhalten von multiplen Werkstoffen	10
3 Multi-Material-Design-Konzepte	11
3.1 Fügeverfahren für Kunststoff-Metall-Verbindungen.....	11
3.1.1 Formschlüssige, stoffschlüssige und hybride Fügeverfahren	12
3.1.2 Thermisches Direktfügen	16
Verbundfestigkeit im Vergleich zu anderen Fügeverfahren:	17
Steigerung der Haftfestigkeit durch hybride Fügeverfahren:.....	19
Einschätzung der Energieeffizienz	21
3.2 Anwendungsbeispiele aus der Automobilindustrie.....	22
3.2.1 Faserverstärkte Kunststoff-Metall-Verbunde	22
Cockpit- und Frontendträger aus einem CFK-Aluminium-Verbund.....	24
Räder aus einem CFK-Aluminium-Verbund und aus Voll-CFK.....	24
Strebe aus einem faserverstärkten Kunststoff-Stahl-Verbund	26
MMD-Bauteile mit einem Schaumkern	28
3.2.2 Nicht-faserverstärkter Kunststoff-Metall-Verbunde.....	32

3.2.3	TRIBOND®-Werkstoff der ThyssenKrupp AG	Fehler! Textmarke nicht definiert.
4	Life-Cycle-Assessment	40
4.1	Grundlagen des Life-Cycle-Assessment	40
4.2	Ökologische Gesichtspunkte verschiedener Werkstoffe	42
4.2.1	Rohstoffgewinnung	43
4.2.2	Herstellung der Produkte	44
4.2.3	Ökologische Gesichtspunkte der Nutzungsphase	46
4.2.4	Ökologische Gesichtspunkte im End-of-Life und im Recycling	49
4.2.5	ökologische Gesichtspunkte im gesamten Lebenszyklus	51
4.2.6	Auswertung des Life-Cycle-Assessment	54
4.3	Optimierungspotenziale	55
5	Fazit und Ausblick	56
6	Literatur- und Quellenverzeichnis	58

Formelzeichenverzeichnis

Zeichen	Einheit	Bezeichnung
a	m/s^2	Fahrzeugbeschleunigung
A	m^2	Fahrzeugquerschnittsfläche
c_R	–	Rollwiderstandskoeffizient
c_w	–	Widerstandsbeiwert
$E \cdot I$	$N \cdot mm^2$	Biegesteifigkeit
F	N	Widerstandskraft
F_R	N	Rollwiderstandskraft
F_L	N	Luftwiderstandskraft
F_B	N	Beschleunigungswiderstandskraft
F_S	N	Steigungswiderstandskraft
G	kg/m^2	Flächengewicht
g	m/s^2	Erdbeschleunigung
m	kg	Fahrzeugleergewicht
P	W	Leistung
R_m	MPa	Zugfestigkeit
T_S	K	Schmelztemperatur
v	m/s	Fahrzeuggeschwindigkeit
W_{abs}	J	Energieabsorptionsvermögen
w_{abs}	J/kg	Spezifisches Energieabsorptionsvermögen
α	$^\circ$	Steigungswinkel
α_{th}	$1/K$	Thermischer Wärmeausdehnungskoeffizient
ε	–	Bruchdehnung
λ	m^2K/W	Wärmeleitfähigkeit
ρ	kg/m^3	Dichte
σ	MPa	Normalspannung
τ	MPa	Zugscherfestigkeit

Abkürzungsverzeichnis

CFK	Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff
DEC	Dessicative and Evaporative Cooling
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
FR	Fuel Reduction
FRV	Fuel Reduction Value
FVK	Faserverbundkunststoff
GFK	Glasfaserverstärkter Kunststoff
HFH	HydroFormed Hybrids
HVM	Haftvermittler
IHU	Innenhochdruckumformen
MMD	Multi-Material-Design
LCA	Life-Cycle-Assessment
LCC	Life-Cycle-Costing
MBW	Mangan-Bor-Stahl
NVH	Noise Vibration Harshness
PAN	Polyacrylnitril
PMH	Polymer-Metall-Hybrid
RTM	Resin Transfer Moulding

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1:	Vereinfachte Darstellung des Einspurmodells.....	6
Abbildung 2.2:	Passive Sicherheit nach Béla Barényi - steife Fahrgastzelle und verformbare Knautschzonen.....	7
Abbildung 2.3:	Zusammenhang zwischen Bruchdehnung und Zugfestigkeit eines Werkstoffes zur Beurteilung des Crashverhaltens.....	9
Abbildung 3.1:	schematische Darstellung der formschlüssigen und stoffschlüssigen Verbindungstechniken für Kunststoff-Metall-Bauteile.....	13
Abbildung 3.2:	Einfluss der hybriden Fügetechnik auf die Verbundeigenschaften im Vergleich zu den alleinig eingesetzten Fügeverfahren.....	15
Abbildung 3.3:	Zugscherfestigkeit eines V2A-PA6GF30-Verbundes im beschleunigten Klimatest nach PV 1200.....	18
Abbildung 3.4:	Oberflächenstruktur des metallischen Grundwerkstoffes erzeugt durch Pinschweißen (links) und Elektronenstrahlstrukturieren (rechts).....	19
Abbildung 3.5:	Zugscherfestigkeiten eines V2A - Polyamid 6 – Verbundes bei verschiedenen Oberflächenvorbehandlungen.....	20
Abbildung 3.6:	mechanische Belastung von verschiedenen Werkstoffen.....	22
Abbildung 3.7:	Energieabsorptionsvermögen von CFK, Stahl, CFK-Stahl-Hybrid.....	23
Abbildung 3.8:	links: Cockpitträger, rechts: Frontendträger aus Aluminium mit kohlefaserverstärkter Polyamidverstärkung.....	24
Abbildung 3.9:	MMD-Räder aus CFK-Aluminium, Hersteller links: BMW [33], rechts: ThyssenKrupp und Maxion in Zusammenarbeit.....	25
Abbildung 3.10:	Voll-CFK-Räder, Hersteller links: BMW, rechts: Porsche.....	26
Abbildung 3.11:	MMD-Strebe aus einem Kunststoff-Metall-Verbund in Sandwichbauweise.....	27
Abbildung 3.11:	Entwicklung des Energieabsorptionselements an der Strebe.....	27
Abbildung 3.13:	Unterschied des Flächenträgheitsmoment und der Masse zwischen einem Vollmaterial und einem Werkstoff mit einem Schaumkern.....	28
Abbildung 3.14:	spezifisches Energieabsorptionsvermögen in Abhängigkeit der Schaumdichte.....	29
Abbildung 3.15:	Deformationsverhalten in Abhängigkeit von der Dichte des eingesetzten Schaumkerns.....	30
Abbildung 3.16:	Deformationsverhalten in Abhängigkeit des Trägermaterials, Trägermaterial links: DC04, rechts: V2A.....	30
Abbildung 3.17:	Spannungsverteilung und Deformation in Abhängigkeit von der konstruktiven Gestaltung des Rahmens.....	31
Abbildung 3.18:	schematischer Aufbau des Kunststoff-Stahl-Verbunds in Sandwichbauweise.....	32

Abbildung 3.19:	Einordnung von Aluminium und LITECOR unterschiedlicher Materialdicken und -zusammensetzungen nach der Biegesteifigkeit und des Flächengewichts mit der Referenz von Stahl.....	33
Abbildung 3.20:	Einsatzpotenzial des Werkstoffs LITECOR in der Fahrzeugkarosserie.....	34
Abbildung 3.21:	Crashverhalten eines Fahrzeugs aus größtenteils LITECOR-Werkstoffen bei einem Frontaufprall.....	35
Abbildung 3.22:	Kostenvergleich zwischen Aluminium, Stahl und LITECOR.....	36
Abbildung 3.23:	schematische Darstellung der Sandwichbauweise des TRIBOND®-Werkstoffs der ThyssenKrupp AG.....	37
Abbildung 3.24:	Verformbarkeit in Form von Biegewinkel der einzelnen Materialien in Abhängigkeit von der Zugfestigkeit.....	38
Abbildung 3.25:	Schichtaufbau der Tribond-Werkstoffe, links: Tribond 1200; rechts: Tribond 1400.....	38
Abbildung 3.26:	Deformationsverhalten von Tribond 1200 und Tribond 1400 im Vergleich zu bisher eingesetzten konventionellen Stählen.....	39
Abbildung 3.27:	Empfohlener Einsatz der TRIBOND-Werkstoffe in der Fahrzeugkarosserie.....	39
Abbildung 4.1:	Verfahren der Ökobilanz nach DIN EN ISO 14040.....	41
Abbildung 4.2:	Primärenergiebedarf für die Gewinnung verschiedener Rohstoffe.....	43
Abbildung 4.3:	Treibhauspotenzial bei der Gewinnung verschiedener Rohstoffe.....	44
Abbildung 4.4:	Primärenergiebedarf bei der Werkstoffherstellung.....	45
Abbildung 4.5:	Treibhauspotenzial verschiedener Werkstoffe bei ihrer Herstellung.....	45
Abbildung 4.6:	Primärenergiebedarf für die Nutzung verschiedener Werkstoffe und Fahrzeugantriebe bei einer Laufleistung von 150.000 km.....	47
Abbildung 4.7:	Primärenergiebedarf für die Nutzung verschiedener Werkstoffe und Fahrzeugantriebe bei einer Laufleistung von 250.000 km.....	48
Abbildung 4.8:	Treibhauspotenzial der Nutzung verschiedener Werkstoffe und Fahrzeugantriebe bei einer Laufleistung von 150.000 km.....	48
Abbildung 4.9:	Treibhauspotenzial der Nutzung verschiedener Werkstoffe und Fahrzeugantriebe bei einer Laufleistung von 250.000 km.....	49
Abbildung 4.10:	Primärenergiebedarf für das End-of-Life verschiedener Werkstoffe.....	50
Abbildung 4.11:	Treibhauspotenzial verschiedener Werkstoffe beim End-of-Life.....	50
Abbildung 4.12:	Primärenergiebedarf für die Nutzung verschiedener Werkstoffe und Antriebe bei einer Laufleistung von 150.000 km.....	52
Abbildung 4.13:	Treibhauspotenzial der Nutzung verschiedener Werkstoffe und Antriebe bei einer Laufleistung von 150.000 km.....	52

Abbildung 4.13: Primärenergiebedarf für die Nutzung verschiedener Werkstoffe und Antriebe bei einer Laufleistung von 250.000 km

Abbildung 4.15: Treibhauspotenzial der Nutzung verschiedener Werkstoffe und Antriebe bei einer Laufleistung von 250.000 km

1 Einleitung

Die zunehmende Bedeutung der Ressourcenschonung und die damit verbundene notwendige Senkung des Kraftstoffverbrauchs in der Automobilindustrie und nicht zuletzt das Ziel Emissionen anthropogener Treibhausgase zu senken, führen zu dem Bestreben das Gewicht eines Fahrzeugs einzusparen und damit die Energieeffizienz in der Nutzung des Fahrzeugs zu steigern. Diese zeichnet sich darin aus, den Energiebedarf für den Antrieb des Fahrzeugs und damit den Kraftstoffverbrauch zu senken und bei alternativen Antrieben die Reichweite zu steigern [1].

Besonders von der Politik werden Automobilhersteller unter Druck gesetzt, energieeffizientere Autos herzustellen: die aus dem EU-Parlament stammende neueste Verordnung (EG) Nr. 443/2009 vom 23. April 2009 schreibt vor, dass CO₂-Emissionen von neu zugelassenen Fahrzeugen europäischer Automobilhersteller ab 2020 auf durchschnittlich unter 95 Gramm pro Kilometer gesenkt werden müssen [2]. Zum Vergleich liegt dieser Wert in Deutschland im Jahr 2016 bei 127,4 Gramm CO₂ pro Kilometer [3].

Gegenteilig zur gewünschten Gewichtsersparnis führen erhöhte Sicherheitsanforderungen an Fahrzeuge und moderne Zusatzfunktionen, die mit dem Entwicklungsfortschritt immer wichtiger werden, zu einer Erhöhung des Fahrzeugleergewichts. Vor allem in Zeiten alternativer Antriebe, die durch schwere Batterien das Gewicht des Fahrzeugs erhöhen, ist ein Ausgleich in Form einer Gewichtseinsparung notwendig. Eine optimale Ersparnis des Fahrzeuggewichts bei gleichzeitiger Erfüllung dieser Anforderungen, kann weitestgehend durch Konzepte des Leichtbaus realisiert werden. Idealerweise eignen sich hierfür vor allem multiple Werkstoffe wie Kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe (kurz: CFK), welche bezogen auf ihr Bauteilgewicht äußerst gute mechanische Eigenschaften vorzuweisen haben. Außerdem ermöglichen diese Werkstoffe im Vergleich zu herkömmlichen Materialien wie Stahl oder Aluminium eine höhere Formfreiheit bei der Konstruktion des Fahrzeugs, wodurch idealerweise geringere Strömungswiderstände und somit hohe Geschwindigkeiten bei gleichbleibender Motorleistung erreicht werden können. Zudem ermöglichen diese Werkstoffe bei richtigem Einsatz eine bessere Fahrdynamik und

eine erhöhte Crashesicherheit bei gleichzeitiger Gewichtseinsparung [4]. Ob und inwiefern multiple Werkstoffe herkömmliche Materialien ersetzen und als eine Lösung für eine höhere Energieeffizienz von Fahrzeugen gelten können, wird in dieser Arbeit thematisiert.

Zunächst soll die technische Motivation für den Einsatz multipler Werkstoffe in der Automobilindustrie näher erläutert werden. Neben der allgemeinen Gewichtsreduktion von Fahrzeugen bieten multiple Werkstoffe spezielle Vorzüge hinsichtlich der Aerodynamischen Eigenschaften, der Fahrdynamik und des Crashverhaltens.

Entgegen dieser vielen Vorzüge, welche multiple Werkstoffe gegenüber anderen Materialien mitbringen, weisen sie auch enorme Schwachstelle auf, vor allem in der Herstellung und im Recycling. Ob ihr Einsatz überhaupt noch als nachhaltig gelten kann, und wie groß der Ausmaß des Optimierungsbedarfs ist, soll in der vorliegenden Arbeit anhand einer Lebenszyklusanalyse, einer ganzheitlichen Betrachtung der Energieumwandlungsprozesse in allen Phasen des Lebenszyklus, deutlich werden. Zudem soll hier die Frage geklärt werden, ob und inwiefern der Einsatz multipler Werkstoffe eine Energieeffizienzsteigerung von Fahrzeugen bewirken kann.

In Hinblick auf die Schwächen von multiplen Werkstoffen, sollen im Anschluss nachhaltige Konzepte zur Steigerung der Energieeffizienz erläutert und diskutiert werden. Hierzu zählen neben den eigentlichen Herstellungs- und Recyclingverfahren auch Konzepte, die zur Effizienzsteigerung der Anlage selbst dienen.

2 Technische Motivation

Neben dem politischen Interesse energieeffizientere Fahrzeuge herzustellen, welches durch den Einsatz multipler Werkstoffe zwecks einer Gewichtseinsparung am Fahrzeug realisiert werden kann, sind im ingenieurwissenschaftlichen Kontext vor allem technische Motivationen für den Einsatz dieser Materialien relevant. Abgesehen von dem primären Ziel, den gewichtsabhängige Energiebedarf für den Antrieb und somit den Kraftstoffverbrauch durch eine Gewichtseinsparung zu senken, bieten multiple Werkstoffe gegenüber herkömmlichen Materialien weitere technische Vorzüge, wie zum Beispiel ein besseres Crashverhalten, eine bessere Aerodynamik und eine agilere Fahrdynamik. Diese Vorteile sollen im Folgenden näher erläutert werden [4].

2.1 Senkung des Energiebedarfs und des Kraftstoffverbrauchs

Aufgrund ihrer sehr guten gewichtsspezifischen mechanischen Eigenschaften können multiple Werkstoffe eine Einsparung von Material und somit von Fahrzeuggewicht begünstigen. Mit der geringeren Fahrzeugmasse verringern sich auch der für den Antrieb erforderliche Energiebedarf und der infolge der Nutzung entstehende Kraftstoffverbrauch. Dieser Zusammenhang wird im Folgenden erläutert: um eine gewünschte Fahrgeschwindigkeit konstant zu halten oder zu überschreiten, ist es notwendig, dass das Fahrzeug vereinfacht die Summe der auf ihn wirkenden Einzelwiderstandskräfte überschreitet. Hierzu zählen die Rollwiderstandskraft F_R , die Luftwiderstandskraft F_L , die Beschleunigungswiderstandskraft F_B und die Steigungswiderstandskraft F_S :

$$F_{Ges} = F_R + F_L + F_B + F_S \quad (2.1)$$

Dabei gelten für die Einzelwiderstände folgende Zusammenhänge:

$$F_R = c_R \cdot m \cdot g \cdot \cos(\alpha) \quad (2.2)$$

$$F_L = \frac{\rho_{Luft}}{2} \cdot v^2 \cdot c_w \cdot A \quad (2.3)$$

$$F_S = m \cdot g \cdot \sin(\alpha) \quad (2.4)$$

$$F_B = m \cdot a \quad (2.5)$$

Die Größe α kennzeichnet hier den Steigungswinkel, der im Falle einer Steigung auftritt. Aus den Gleichungen (2.2) bis (2.5) wird ersichtlich, dass die Einzelwiderstände von der Fahrzeugmasse abhängige Größen sind und somit der Gesamtwiderstand auch von dem Fahrzeuggewicht abhängig ist. Die Luftwiderstandskraft beinhaltet zwar nicht die Fahrzeugmasse in ihrer Gleichung, jedoch kann durch die Verringerung der Querschnittsfläche A Gewicht am Fahrzeug eingespart werden.

Die Massenabhängigkeit äußert sich auch in der für das Erreichen und Überwinden der Fahrgeschwindigkeit benötigten Leistung, welche sich vereinfacht aus dem Gesamtwiderstand multipliziert mit der Fahrzeuggeschwindigkeit, ergibt:

$$P_{Ges} = F_{Ges} \cdot v \quad (2.6)$$

Eine geringere Fahrzeugmasse bringt demnach eine geringere, zu erreichende Gesamtleistung mit sich. Damit sinken die für die Fortbewegung erforderlichen Energieumwandlungen und somit auch der Kraftstoffverbrauch [5].

Bei alternativen Antrieben ermöglichen eine Senkung des Fahrzeugleergewichts und die damit einhergehende Verringerung der Einzelwiderstände eine Reichweitensteigerung. Auch dieser Zusammenhang ist grundsätzlich physikalisch zu erklären: die Fortbewegung einer geringeren Masse erfordert weniger Energie [6]. Bei einer Energiezufuhr in ursprünglicher Menge kann das Fahrzeug also eine höhere Reichweite erreichen. Dies wird am Beispiel des VW E-Golfs deutlich: bei einer Gewichtsreduktion von 10% kann die Reichweite um ca. 10 km im Vergleich zur

Referenz gesteigert werden. Eine Verringerung des Luftwiderstandes um 10% bringt weitere 5 km und eine Verringerung des Rollwiderstandes bringt ebenfalls 5 km Reichweitensteigerung [4].

2.2 Verbesserung der aerodynamischen Eigenschaften

Der Einsatz multipler Werkstoffe in Fahrzeugen kann die aerodynamischen Eigenschaften, häufig auch Windschlüpfigkeit genannt, erheblich verbessern.

Die Aerodynamischen Eigenschaften eines Fahrzeugs äußern sich in der Luftwiderstandskraft, welche bereits im vorherigen Unterkapitel eingeführt wurde und spielen mit größer werdenden Fahrgeschwindigkeiten eine zunehmende Rolle, da diese quadratisch in die Luftwiderstandskraft einhergehen [7].

Eine Verringerung der Luftwiderstandskraft und die damit verbundene Verbesserung der aerodynamischen Eigenschaft des Fahrzeugs wird nicht nur durch die Reduktion der Querschnittsfläche erzielt, sondern auch durch die konstruktive Form des Fahrzeugs, welche sich durch den Strömungswiderstandsbeiwert, dem c_w -Wert, äußert. Multiple Werkstoffe, vor allem multiple Kunststoffe erlauben aufgrund von Fertigungsverfahren wie dem Spritzgießen im Vergleich zu herkömmlichen Werkstoffen eine erhöhte Formfreiheit bei der Konstruktion des Fahrzeugs, so dass durch eine ideale Form geringere Strömungswiderstände und somit geringere Luftwiderstände erreicht werden können, welche gemäß der Gleichung (2.3) einen geringen Kraftstoffverbrauch ermöglichen. Bei alternativen Antrieben haben verbesserte aerodynamische Eigenschaften den Vorteil der Reichweitensteigerung. Zudem können die geringen Luftwiderstände, ganz gleichgültig um welche Art es sich bei dem Antrieb handelt, eine Steigerung der Geschwindigkeit begünstigen, ohne dass hierfür eine erhöhte Motorleistung, welche in der Regel die Fahrzeugmasse erhöht, notwendig ist [8].

2.3 Verbesserung der Fahrdynamik

Weiterhin ermöglicht eine allgemeine Gewichtsersparnis und die damit einhergehende geringe Massenträgheit des Fahrzeugs eine bessere Fahrdynamik, sprich eine

bessere Agilität und erhöhte Sportlichkeit. Diese äußert sich unter anderem in einer besseren Kurvenlage: nach dem Einspurmodell erhöht sich gemäß Gleichung (2.8) mit steigender Fahrzeugmasse die resultierende Kraft, welche das Fahrzeug zur Außenseite der Kurve zieht. Die Haftung der Vorderachse mit dem Boden geht verloren und es kommt zum Untersteuern [4].

$$F_{Res} = m \cdot v \cdot (\dot{\psi} + \dot{\beta}) \quad (2.7)$$

Dieses Verhalten wird anhand des Einspurmodells in Abbildung 2.1 gezeigt.

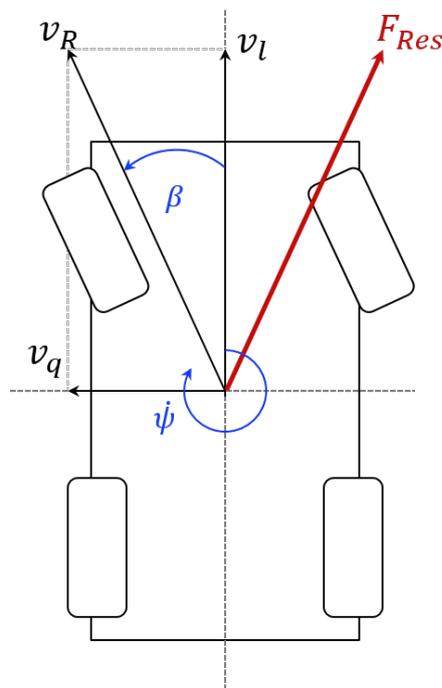


Abbildung 2.1: vereinfachte Darstellung des Einspurmodells

Die durch die Massenträgheit hervorgerufenen Fliehkräfte bewirken zudem das Wankmoment, welches sich mit zunehmender Masse erhöht und für eine Instabilität der Fahrdynamik sorgt [8].

Zudem wirkt sich eine Gewichtseinsparung positiv im Bremsverhalten aus: eine geringere Trägheit infolge geringerer Fahrzeugmasse verkürzt dem Bremsweg und erhöht somit die Agilität des Fahrzeugs. Für eine verbesserte Fahrdynamik reicht allein

eine reine Gewichtseinsparung jedoch nicht aus. Eine optimale Gewichtsverteilung der Fahrzeugmasse, sprich der möglichst tief liegende Massenschwerpunkt, sollte nicht vernachlässigt werden. Die Gewichtseinsparung sollte demnach im Bereich der Front, des Hecks und des Daches erfolgen. So bleibt der tief liegende Massenschwerpunkt des Fahrzeugs erhalten. Das Einhalten der richtigen Schwerpunktlage ist beispielsweise wichtig, damit das Fahrzeug im Falle von starkem Seitenwind statisch stabil bleibt [4].

2.4 Verbesserung des Crashverhaltens

Das Crashverhalten eines Fahrzeugs variiert je nachdem, in welchem Bereich der Karosserie welche Art des Materials eingesetzt wird. Mit dem korrekten Einsatz können multiple Werkstoffe die Crashesicherheit des Fahrzeugs erhöhen. Die Anforderungen an die Crashesicherheit beruhen auf dem Konzept der passiven Sicherheit, welche erstmals im Jahre 1951 von Béla Barényi (1907-1997) für Daimler-Benz entwickelt wurde. Das sogenannte „Fundamentalprinzip der passiven Sicherheit nach Béla Barényi definiert eine optimale Sicherheit durch eine steife Fahrgastzelle und verformbare Knautschzonen, die den größten Teil der beim Aufprall frei werdenden Energie absorbieren und diese somit kaum an die Fahrgastzelle übertragen [9].



Abbildung 2.2: Passive Sicherheit nach Béla Barényi - steife Fahrgastzelle und verformbare Knautschzonen

Nach Barényi sind die Knautschzonen definiert als ein „Bereich mit hoher Deformationsfähigkeit auf hohem Energie- oder Kraftniveau“ und die Fahrgastzelle als ein „Bereich mit hoher Festigkeit auf möglichst hohem Duktilitätsniveau“. Die

Maßnahmen zur passiven Sicherheit sind neben der Karosserietechnik auch von den eingesetzten Werkstoffen abhängig. Je nachdem, welche Materialien an welchen Stellen der Karosserie eingesetzt werden, müssen dementsprechend angepasste Crashfall-Konzepte zum Einsatz kommen, da jedes Material eine andere Crashfall-Eignung aufweist [4].

2.4.1 Crashfall-Eignung von Werkstoffen

Metalle werden aufgrund ihrer günstigen Eigenschaften in einer Unfallsituation anderen Materialien vorgezogen. Sie besitzen ein sogenanntes Nachtragsverhalten, d.h. dass selbst nach einer infolge eines Unfalls eintretenden plastischen Verformung der Strukturverbund der Karosserie erhalten bleibt. Diese erwünschte Eigenschaft wird durch die verhältnismäßig leichtere Verformbarkeit und zudem durch die Fähigkeit große Energiemengen im Falle von Überlast zu absorbieren, ermöglicht. Bei vielen multiplen Werkstoffen wie beispielsweise Faserverbundwerkstoffe fehlen diese Eigenschaften, wodurch es öfter und einfacher zum Versagen in einer Unfallsituation kommt.

Die Beurteilung der Eignung von bestimmten Werkstoffen für eine Unfallsituation kann durch den in Abbildung 2.3 gezeigten Zusammenhang zwischen der Bruchdehnung und Zugfestigkeit indiziert werden.

Deutlich ist, dass kohlefaserverstärkte Kunststoffe und Aluminiumlegierungen verglichen mit Stählen eine geringere Bruchdehnung bei geringerer Zugfestigkeit aufweisen. Sie besitzen damit eine geringere Festigkeit bei geringerer Verformbarkeit. Dies ist oft der Grund, weshalb Aluminium im Leichtbau nur eingeschränkt und bis zu einem gewissen Maß eingesetzt werden kann. Eine besonders geringe Bruchdehnung von 10% bei einer Zugfestigkeit von 500 MPa weist vor allem Aluminium der 7xxx-Serie auf, welches aufgrund seiner geringen Dichte immer häufiger als Leichtbauwerkstoff vorgezogen wird [4].

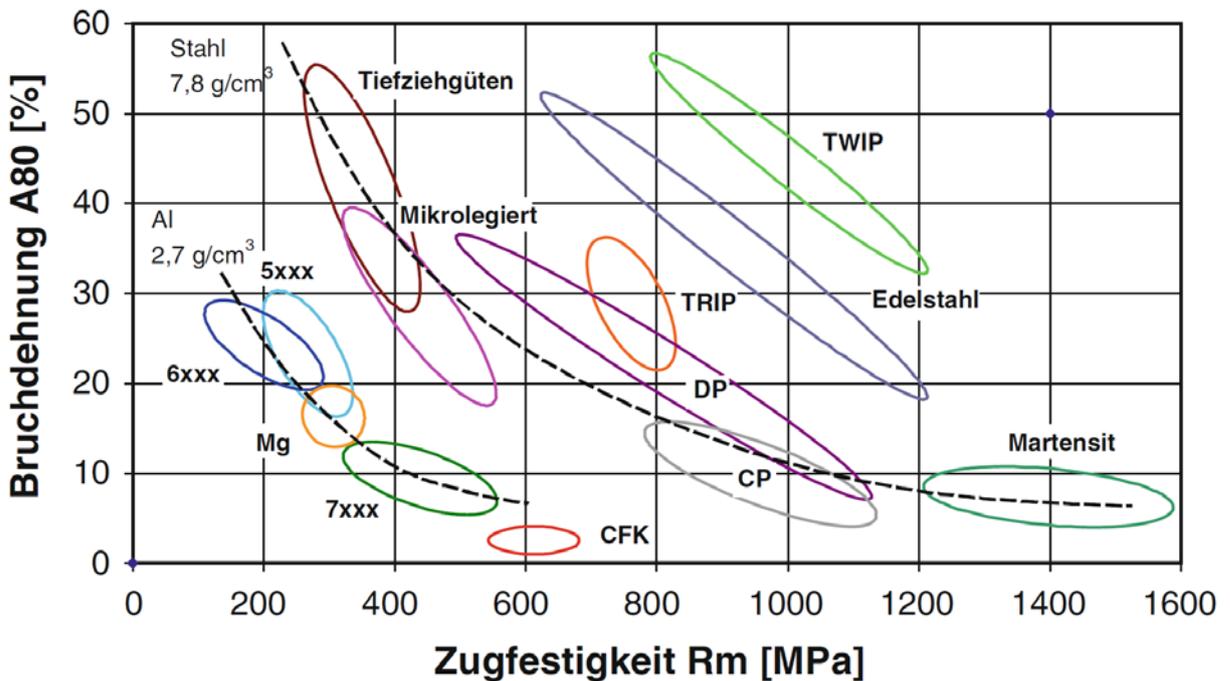


Abbildung 2.3: Zusammenhang zwischen Bruchdehnung und Zugfestigkeit eines Werkstoffes zur Beurteilung des Crashverhaltens [4]

Ähnlich verhalten sich kohlefaserverstärkte Kunststoffe mit einer sehr geringen Bruchdehnung von kleiner 2%, welche durch die nicht plastisch verformbaren und damit sehr spröde brechenden Kohlefasern zustande kommt. Dass es überhaupt zur Bruchdehnung kommt, liegt an der verformbaren Kunststoffmatrix, welche im Allgemeinen die wesentlichen Eigenschaften des Verbundes bestimmt. So ist es ein Unterschied, ob es sich um eine thermoplastische oder eine duroplastische Matrix handelt. Duroplaste sind aufgrund der engmaschigen Vernetzung ihrer Molekülketten nicht verformbar und brechen damit sehr spröde. Thermoplaste hingegen sind bei Wärmezufuhr deformierbar und besitzen demnach eine höhere Bruchdehnung. Insgesamt ist die Bruchdehnung aber immer noch nicht ausreichend hoch, so dass CFK sich nicht als optimaler Werkstoff für einen Crashfall eignet. In Hinsicht auf die Unfälleignung spricht die äußerst geringe Bruchdehnung auch in diesem Fall gegen einen Einsatz von CFK [10].

Um den Erhalt des Strukturverbundes in einer Crashsituation zu gewährleisten, bietet sich eine optimale Gestaltung durch den kombinierten Einsatz aus steifen und duktilen Materialien, besonders an Stellen, die stark beansprucht werden. Durch diese Art der

lokale Verstärkung kann das Beulverhalten bei Druckbeanspruchungen verringern [11].

Hierbei spielen die Anforderungen an die Fügechnik eine wichtige Rolle: Die Festigkeit der Fügestelle muss so groß wie die des Grundbauteils sein, ansonsten stellen sie in einem Crashfall Schwachstellen dar. Oft werden die Fügstellen von metallischen Hybridbauteilen, beispielsweise Aluminium-Stahl-Verbindungen, zusätzlich zum eigentlichen Fügeverfahren mittels Strukturklebern verstärkt. Auf weitere Verbindungstechniken multipler Werkstoffe wird in Kapitel 3 näher eingegangen.

2.4.2 Crashverhalten von multiplen Werkstoffen

Eine Gewichtseinsparung bei konstanter Crashesicherheit kann durch die Substitution von Stahl durch hochfeste Stähle erzielt werden, welche durch ihre Festigkeitseigenschaften eine Reduktion der Wandstärke und somit Materialersparnis zulassen. Das Energieabsorptionsverhalten und somit das Crashverhalten von beiden Werkstoffen bei verschiedenem Gewicht bleibt dabei konstant [12]. Die Ursache hierfür liegt in der auf die Masse bezogenen Energieabsorptionsfähigkeit der Werkstoffe, welche bei hochfestem Stahl um 20% größer ist als bei herkömmlichen Stählen. Hochfeste Stähle bilden auf dieser Grundlage eine optimale Alternative hinsichtlich der Gewichtseinsparung. In anderen Bereichen der Karosserie jedoch ist der Einsatz von CFK besser geeignet. Inwiefern die Kombination einzelner Materialien in einem Hybridbauteil Vorteile auf die Crashperformance des Fahrzeugs hat, wird im nächsten Kapitel ausführlicher behandelt [13, 14].

3 Multi-Material-Design-Konzepte

Das Konzept des Multi-Material-Designs (kurz: MMD) gehört zum systematischen Leichtbau, eine Kombination aus konstruktivem und werkstofflichem Leichtbau. Grundgedanke ist es, Kombinationen aus verschiedenen Werkstoffen zu verwenden, um jeweils ihre werkstofflichen Stärken stellenweise in einem Bauteil zu vereinen und dabei idealerweise Gewicht von bis zu 40% je nach Bauteil einzusparen [12]. Diese Grundlage wird besonders bei dem Einsatz solcher Werkstoffe zwecks Verbesserung der Crashperformance deutlich. In diesem Fall wird neben der Gewichtsersparnis eine ideale Nutzung der mechanischen Eigenschaften verschiedener Werkstoffe angestrebt, die sich günstig auf das Crashverhalten des Fahrzeugs auswirken. Da das Crashverhalten vor allem von der Karosserie charakterisiert wird und diese zudem 30% des Fahrzeuggesamtgewichts ausmacht, sind Automobilhersteller bestrebt, besonders in diesem Bereich des Fahrzeugs MMD-Konzepte einzusetzen [13].

Bei multiplen Werkstoffen kann es sich um die Kombination verschiedener Metalle oder Kunststoffe untereinander handeln oder aber um Metall-Kunststoff-Verbindungen. Neben kostentechnischen Gründen werden die Kombinationsmöglichkeiten je nach Zweck des Bauteils ausgewählt [14].

Im Folgenden werden die wesentlichen Inhalte von MMD-Konzepten in Hinblick auf die Fügetechnik und auf die hierfür relevanten Haftungstheorien behandelt. Weiterhin werden einige Anwendungsbeispiele aus der Automobilindustrie aufgezeigt. Aufgrund ihres besonders großen Zukunftspotenzials in der Automobilindustrie wird es sich hierbei hauptsächlich um Kunststoff-Metall-Verbindungen handeln.

3.1 Fügetechniken für Kunststoff-Metall-Verbindungen

Aufgrund der unterschiedlichen Materialeigenschaften stellen multiple Werkstoffe eine Herausforderung für die bisher bestehenden Fügetechniken dar. Bereits bei der Konstruktion sind die unterschiedlichen Materialeigenschaften wie thermischer Wärmeausdehnungskoeffizient α_{th} , Schmelztemperatur T_s , Wärmeleitfähigkeit λ zu berücksichtigen, damit vor allem in der Fertigung keine Schäden wie beispielsweise Verzüge auftreten [15]. Diese sind vor allem bei hohen thermischen

Beanspruchungen, beispielsweise während des Lackierprozesses üblich. Da die Schadensursache solcher Schäden in den stark unterschiedlichen thermischen Wärmeausdehnungskoeffizienten der Werkstoffe liegt, spricht man hier von der sogenannten Delta-Alpha-Problematik. Die hohen Temperaturen bewirken je nach Material eine unterschiedliche Wärmeausdehnung, die sich in einer Relativbewegung der verschiedenen Werkstoffe zueinander äußert [16].

Weiterhin ist darauf zu achten, dass die Krafteinleitung im Bereich der Fügestelle weitestgehend homogen erfolgt, um die Fasern des Kunststoffverbundes nicht zu beschädigen. Abgesehen von diesen Schwierigkeiten bringen Metall-Kunststoff-Bauteile aufgrund ihrer stark variierenden Werkstoffeigenschaften wesentlich mehr Schwierigkeiten mit sich als metallische Hybridstrukturen. Diese weisen zwar auch Unterschiede in ihren Materialeigenschaften auf, diese sind jedoch im Vergleich zu Metall-Kunststoff-Bauteilen deutlich kleiner. Außerdem erfolgt die Haftung zwischen metallischen Werkstoffen wesentlich unkomplizierter als bei Metall-Kunststoff-Verbunden [14].

3.1.1 Formschlüssige, stoffschlüssige und hybride Fügetechnik

Bei der formschlüssigen Verbindungstechnik wird die Haftfestigkeit des Verbundes durch die geschickte Umspritzung oder aber Durchspritzung des Kunststoffes an dem Metall ermöglicht, zum Beispiel über Nieten oder Clinchen. Vorteile dieses Verfahrens sind die geringen Kosten und die kurzen Prozesszeiten [17]. Problematisch an dieser Verbindungstechnik ist jedoch, dass durch das Clinchen oder Nieten Schäden in der Faserstruktur des Kunststoffverbundes auftreten können, welche sich negativ auf die mechanischen Eigenschaften auswirken. Gerade die Verbindungsstellen in Form von Nieten etc. stellen ohnehin Schwachstellen dar, die sich vor allem auf die Crashperformance des Fahrzeugs negativ auswirken können. Da die Krafteinleitung hier punktuell erfolgt, kann es bei sehr hohen dynamischen Überlastungen wie es in einer Crashsituation der Fall ist, dazu kommen, dass die Haftfestigkeit vollständig verloren geht und es zu einer Auflösung des Verbundes kommt. Des Weiteren können durch die Kunststoffverformungen infolge von Alterungsprozessen Spalte zwischen den Grundwerkstoffen entstehen, die zum einen eine instabile Verbindung und zum

anderen eine Korrosion des metallischen Werkstoffs begünstigen können. Insgesamt lassen sich die Stärken der jeweiligen Werkstoffe im Verbund durch eine formschlüssige Verbindung nicht vollständig ausnutzen [14, 18].

Um eine bessere Haftfestigkeit des Verbundes zu erzielen, kommen oft Haftvermittler zum Einsatz, die vor allem an mechanisch stark beanspruchten Stellen als eine Verstärkung dienen. Bei dieser Art der Verbindungstechnik spricht man von einem stoffschlüssigen Verbund. Da hier der Klebstoff flächig zwischen den beiden Grundwerkstoffen aufgetragen wird, ermöglicht diese Verbindungstechnik eine homogene Krafteinleitung und somit eine gleichmäßige Spannungsverteilung, die sich vorteilhaft auf die mechanische Belastbarkeit und somit auf das Crashverhalten des hybriden Bauteils auswirkt. Dank der fehlenden Spannungsspitzen kann zudem eine Beschädigung der Faserstruktur bei faserverstärkten Kunststoffen weitestgehend verhindert werden [17]. Das Prinzip der formschlüssigen und stoffschlüssigen Verbindungstechniken wird in Abbildung 3.1 schematisch dargestellt.

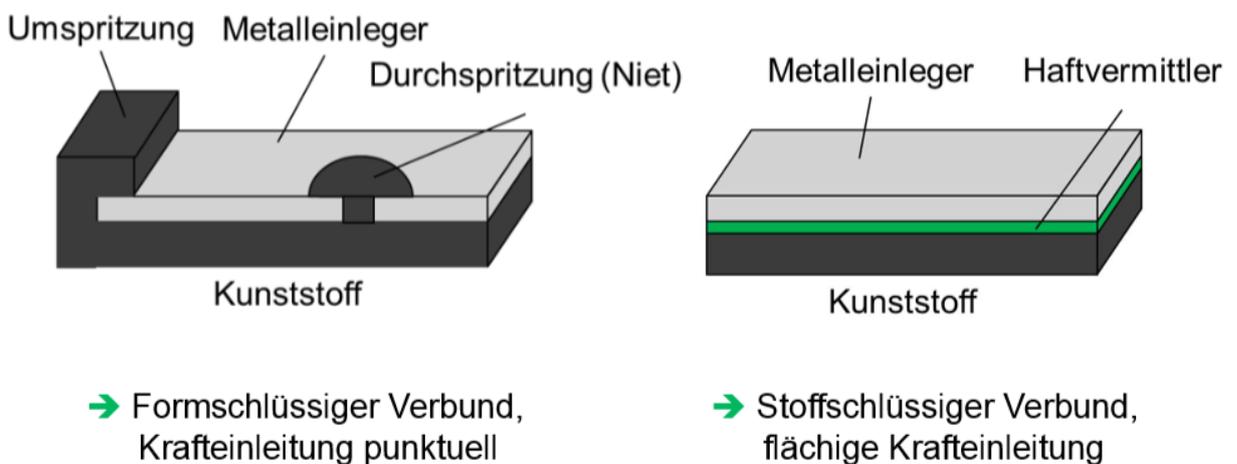


Abbildung 3.1: schematische Darstellung der formschlüssigen und stoffschlüssigen Verbindungstechniken für Kunststoff-Metall-Bauteile [20]

Um die Haftfestigkeit des Verbundes zu steigern, werden formschlüssige und stoffschlüssige Fügeverfahren miteinander kombiniert. Man spricht von hybriden Fügeverfahren oder aber Hybridfügen. In diesem Kontext wird der formschlüssige

Anteil der Verbindung oft so gestaltet, dass die Oberflächen der Grundwerkstoffe angeraut bzw. strukturiert werden. So lässt sich auf Grundlage der mechanischen Adhäsion die Haftung zwischen den Grundwerkstoffen erhöhen. Doch eine Kombination der Fügeverfahren bewirkt nicht automatisch eine Erhöhung der Verbundfestigkeit [19].

Bei hybriden Fügeverfahren, bei dem der formschlüssige Anteil des Fügeverfahrens keine Oberflächenbehandlung beinhaltet, sondern über Nieten oder Clinchen erfolgt, kann und darf die Maximalkraft sinken. Dabei ist es nur wichtig, dass es zu einem Anstieg des Energieabsorptionsvermögens des Verbundes und somit zur Verbesserung der Crashperformance kommt. Solange die Verringerung der Maximalkraft vergleichsmäßig zum Anstieg des Energieabsorptionsvermögens prozentual gering ist, kann nicht von einer Verschlechterung der Verbundeigenschaft gesprochen werden. Dieses Verhalten, den die Kombination aus formschlüssiger und stoffschlüssiger Fügeverfahren auf die Verbundeigenschaften haben kann, wird in Abbildung 3.2 deutlich. In diesem Fall soll der austenitische Stahl V2A mit der Aluminiumlegierung AA6181A verbunden werden. Dabei soll der Verbund formschlüssig über Halbhohlstanznieten, stoffschlüssig über den Epoxidharzklebstoff EP208 und hybrid über die Kombination der beiden genannten Verfahren erfolgen. Es handelt sich um eine Zugscherprobe mit einer Überlappungslänge von 16 mm. Aus dem Diagramm geht hervor, dass das Kleben eine deutlich höhere Maximalkraft und höheres Energieabsorptionsvermögen als das Halbhohlstanznieten zulässt. Eine Kombination der beiden Fügeverfahren weist hingegen eine Verringerung der Maximalkraft bei einem gleichzeitigen Anstieg des Energieabsorptionsvermögens bewirkt [18,19].

Entgegen diesem Verhalten, gibt es auch Beispiele, bei denen die hybride Fügeverfahren eine Erhöhung der Verbundfestigkeit aufweist. Diese werden im nächsten Unterkapitel behandelt.

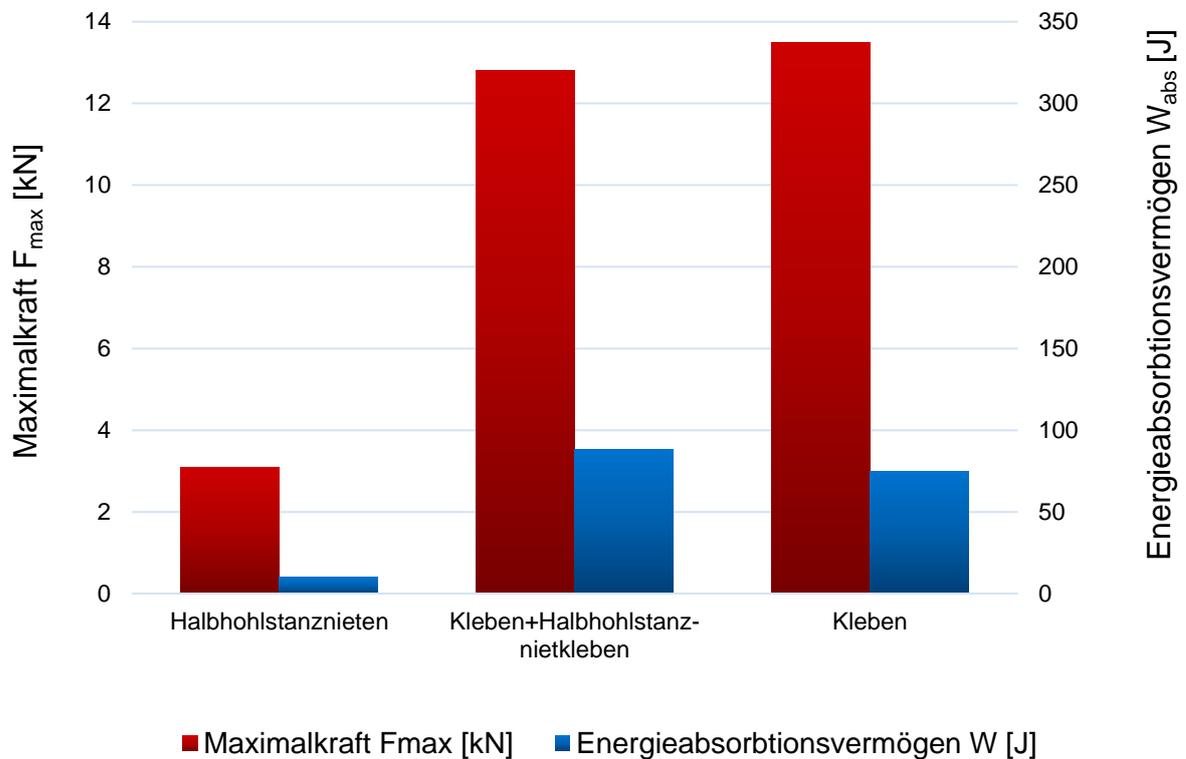


Abbildung 3.2: Einfluss der hybriden Fügeverfahren auf die Verbundeigenschaften im Vergleich zu den allein eingesetzten Fügeverfahren; eigene Darstellung nach [19]

Bisher galten hybride Fügeverfahren als Schlüsseltechnologie für die Verbindungen von hybride Mischstrukturen, vor allem für Metall-Kunststoff-Verbunde werden sie als die optimale Fügeverfahren für eine gute Verbundfestigkeit gesehen. Trotz der vielen positiven Eigenschaften, die die Kombination aus formschlüssiger und stoffschlüssiger Verbindungstechnik mit sich bringt, gibt es wesentliche Nachteile, die mit diesem Fügeverfahren einhergehen wie etwa lange Prozesszeiten, die sich vor allem durch die Vorbehandlung und der Aushärtung der Fügestelle ergeben. Besonders die Vorbehandlung ist sehr aufwändig und kostenintensiv, da eine absolute Sauberkeit der Fügeoberfläche notwendig ist um Delaminationen zu verhindern [9]. Das Risiko der Delamination ist bei hybriden Fügeverfahren besonders groß, zum einen durch die mechanische Beeinträchtigung der Faserstruktur durch Stanzen oder Clinchen bei der formschlüssigen Verbindung, zum anderen durch die starken Unterschiede in der

Steifigkeit und Festigkeit zwischen der Grundwerkstoffoberfläche und dem Klebstoff. Auch erhöhte Schadstoffemissionen, kompliziertes Recycling und die damit verbundene schwierige Werkstofftrennung, die die Nachhaltigkeit dieser Füge-technik beeinträchtigen, sprechen gegen dieses Fügeverfahren [21]. Aus diesen Gründen kommen immer mehr nachhaltigere Fügekonzepte zum Einsatz, die gleichzeitig eine höhere Haftfestigkeit und weitere Verbesserungen für das Verbundbauteil mit sich bringen. Die Funktionsprinzipien vieler Fügeverfahren, die in Zukunft vermehrt in der Automobilindustrie eingesetzt werden sollen, basieren auf der Grundlage des thermischen Direktfügens, die im Folgenden erläutert werden soll [14].

3.1.2 Thermisches Direktfügen

Beim thermischen Direktfügen werden die Grundwerkstoffe aus Metall und Kunststoff unter Zufuhr von Wärme aneinander gepresst, sodass sich bei einem bestimmten Temperatur- und Druckniveau zwischen den aneinander liegenden Körpern zwischenmolekulare Kräfte in Form von elektromagnetischen Dipolen ausbilden und somit ein Metall-Kunststoff-Verbund entsteht. Grundlage hierfür ist die zur spezifischen Adhäsionstheorie gehörende Polarisierungstheorie von De Bruyne. Diese besagt, dass eine elektrische Polarität in der chemischen Struktur der Grundwerkstoffe eine Dipol-Dipol-Wechselwirkung zwischen den Molekülen des jeweils benachbarten Kontaktkörpers ermöglichen kann, so dass es zu einem Verbund der Grundwerkstoffe kommt. Hierzu müssen die für jeden Fall spezifischen Rahmenbedingungen wie Temperatur, Druck und ein Kontaktabstand von unter 0,5 nm [22] eingehalten werden. Die Temperatur muss dabei oberhalb der Schmelztemperatur des Kunststoffs liegen, damit dieser einen fließfähigen Zustand erreicht und so die Oberfläche des metallischen Grundwerkstoffs benetzen kann. Je höher die elektrische Polarität des Kunststoffs ist, in anderen Worten je höher das Dipolmoment der Kunststoffmoleküle ist, desto stärker sind die wirkende Adhäsionskraft und damit auch die Verbundfestigkeit zwischen den Grundwerkstoffen. Die Polarität eines Stoffs lässt sich dabei primär von der funktionellen Gruppe in der chemischen Struktur aufzeigen [23, 24, 25].

Bei Kunststoff-Metall-Verbunden hängt die Verbundfestigkeit primär von dem chemischen Aufbau des Kunststoffs bestimmt. Je asymmetrischer die Anordnung der Kunststoffmoleküle ist und je unsymmetrischer die Elektronegativität der Atome ist, desto stärker ist die Bindung zu den Molekülen im Metall. Der Grund hierfür ist, dass solche Kunststoffe Ladungsverschiebungen in ihrer Strukturformel aufweisen, die eine Dipol-Dipol-Wechselwirkung zum metallischen Grundwerkstoff begünstigen [g]. Weiterhin ist die Haftfestigkeit von dem Aggregatzustand des Kunststoffs abhängig: je fließfähiger der Kunststoff ist, desto eher gehen die beweglichen Kunststoffmoleküle eine Wechselwirkung mit den metallischen Molekülen ein, so dass die Haftfestigkeit nach dem Aushärten der Fügestelle höher ist. Die Haftfestigkeit lässt sich weiterhin durch eine Vorbehandlung der metallischen Oberfläche erhöhen, in dem diese eine Formstruktur erhält und so zusätzlich den Verbund formschlüssig verstärkt [14].

Verbundfestigkeit im Vergleich zu anderen Fügeverfahren:

Um eine Vorstellung darüber zu bekommen, inwiefern dieses Verfahren konkurrenzfähig gegenüber anderen Fügeverfahren ist, sollen im Folgenden die durch das thermische Verfahren und durch einfache Klebtechnik zustande kommenden jeweiligen Haftfestigkeiten eines Metall-Kunststoff-Verbunds miteinander verglichen werden. Bei den sich überlappenden Grundwerkstoffen handelt es sich um einen austenitischen Stahl (V2A) und um glasfaserverstärktes Polyamid (Polyamid 6 GF 30), als Klebstoff wird Epoxidharz eingesetzt. In der folgenden Versuchsauswertung wird die Haftfestigkeit des Verbundes anhand der Zugscherfestigkeit beurteilt und zudem in Abhängigkeit des Kunststoff-Alterungsprozesses durchgeführt. Der Alterungsprozess wird künstlich durch einen beschleunigten Kurzzeittest simuliert. Dabei handelt es sich um die Prüfvorschrift PV 1200 der Volkswagen AG, bei der das Klima zyklisch gewechselt wird, um die mechanische, elastostatische und werkstoffliche Reaktion der Bauteile auf den Wechsel der Temperatur, des Luftdrucks und der Luftfeuchtigkeit zu analysieren. Nach der genannten Prüfvorschrift wird in einem Zyklus die Temperatur alle zwei Stunden zwischen -40°C und 80°C gewechselt, vier Stunden lang konstant gehalten bis dann wieder die Temperatur gewechselt wird. Ein Zyklus beträgt demnach zwölf Stunden. Für die $2 \times 20 \times 80$ mm großen

Grundwerkstoffe, deren Überlappung 20 mm lang ist, ergeben sich folgende Zugscherfestigkeiten [14]:

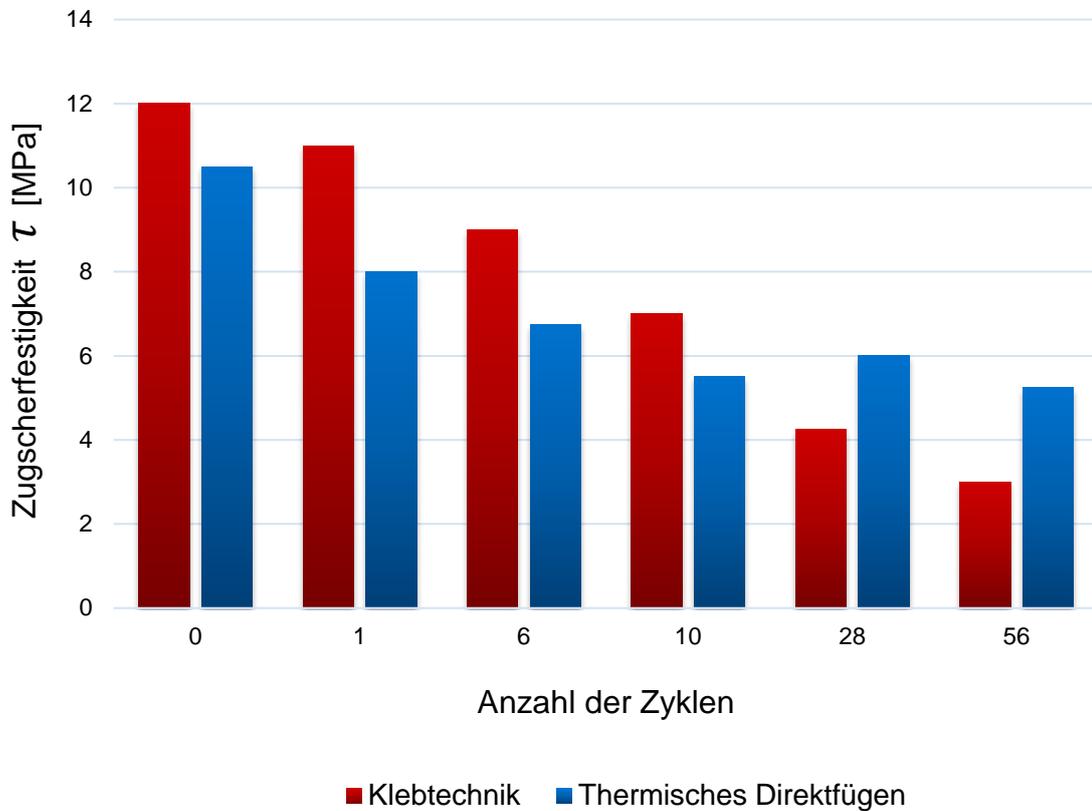


Abbildung 3.3: Zugscherfestigkeit eines V2A-PA6GF30-Verbundes im beschleunigten Klimatest nach PV 1200; eigene Darstellung nach [14]

Deutlich ist die Verringerung der Zugscherfestigkeit bei der Klebtechnik nach 10 Zyklen. Zudem tritt nach 56 Zyklen mit diesem Verfahren eine Unterwanderungskorrosion auf. Die Ursache hierfür liegt in den Relativbewegungen bzw. Spannungen zwischen dem Metall und dem Klebstoff, die wiederum auf die stark variierenden Wärmeausdehnungskoeffizienten zurückzuführen sind (Delta-Alpha-Problematik). Durch diese Spannungen kommt es im Klebstoff zu rissartigen Schäden, die Feuchtigkeit einlagern. Dadurch, dass an diesen Stellen Sauerstoffmangel vorherrscht, kommt es zur Unterwanderungskorrosion. Dieses Problem tritt bei dem thermischen Direktfügen nicht auf, vielmehr steigt bei diesem Verfahren die Zugscherfestigkeit. Der Grund ist, dass Polyamid wesentlich duktiler als Epoxidharz

ist und die Relativbewegungen bzw. Spannungen kompensieren und sogar aufnehmen kann. Des Weiteren hat Polyamid hygroskopische Eigenschaften und kann durch die Aufnahme von Wasser das Material erweichen lassen, wodurch zudem die Steifigkeit des Werkstoffs sinkt und die Zugscherfestigkeit steigt [17].

Steigerung der Haftfestigkeit durch hybride Fügeverfahren:

Auf Grundlage der mechanischen Adhäsion lässt sich die Haftfestigkeit eines Verbunds durch eine Oberflächenbehandlung des metallischen Grundwerkstoffs steigern. Hierzu kann die Oberflächenstruktur des Metalls durch beispielsweise Pinschweißen oder Elektronenstrahlstrukturieren derart gestaltet werden, dass der fließfähige Kunststoff beim Fügevorgang diese Formen benetzt und diese eine mechanische Befestigung zwischen den beiden Grundwerkstoffen bilden. Auch eine Mattierung der Oberfläche durch beispielsweise Sandstrahlen kann zu einer verbesserten Haftung führen.

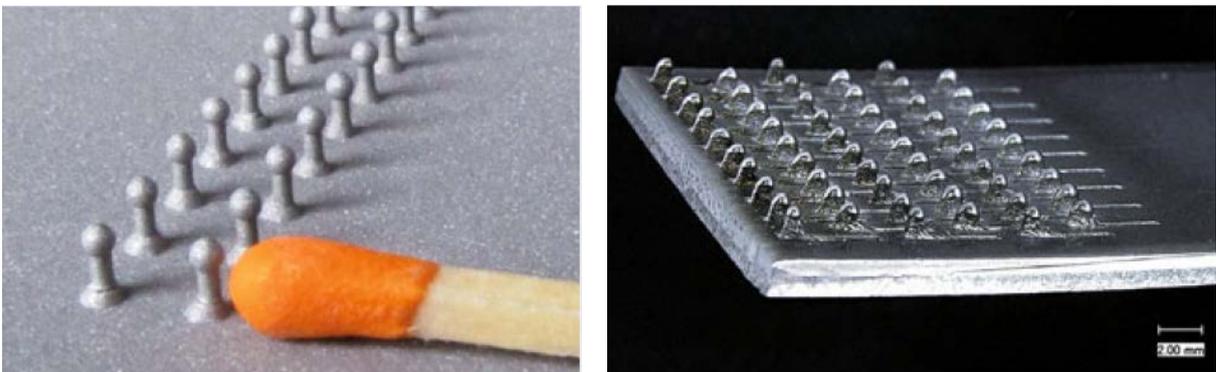


Abbildung 3.4: Oberflächenstruktur des metallischen Grundwerkstoffs erzeugt durch Pinschweißen (links) und Elektronenstrahlstrukturieren (rechts) [14]

Gerade bei Kunststoffen, deren Moleküle aufgrund ihrer chemischen Struktur keine starken Bindungen mit den Metallmolekülen eingehen können, ist eine weitere Erhöhung der Haftfestigkeit und somit Stärkung des Verbundes durch einen zusätzlichen formschlüssigen Verbund vorteilhaft. Inwiefern eine Oberflächenbehandlung die Haftfestigkeit eines Verbundes beeinflussen kann, zeigt die Abbildung 3.5 anhand von nur schwach polarem Polyamid 6. Dabei wird eine unbehandelte Oberfläche und jeweils eine Oberfläche, die durch Sandstrahlen,

Elektronenstrahlstrukturieren und Pins-schweißen behandelt wurde hinsichtlich ihres Einflusses auf die Zugscherfestigkeit miteinander verglichen. Aus dem Diagramm geht hervor, dass eine Oberflächenbehandlung mittels Pin-Schweißen die höchste Verbundfestigkeit ermöglicht, gefolgt von Oberflächenbehandlungen durch Elektronenstrahlstrukturieren und Sandstrahlen. So lässt sich durch eine Oberflächenbehandlung mittels Pin-Schweißen eine um das 20-fach höhere Zugscherfestigkeit erzielen als mit einer unbehandelten Fläche möglich ist.

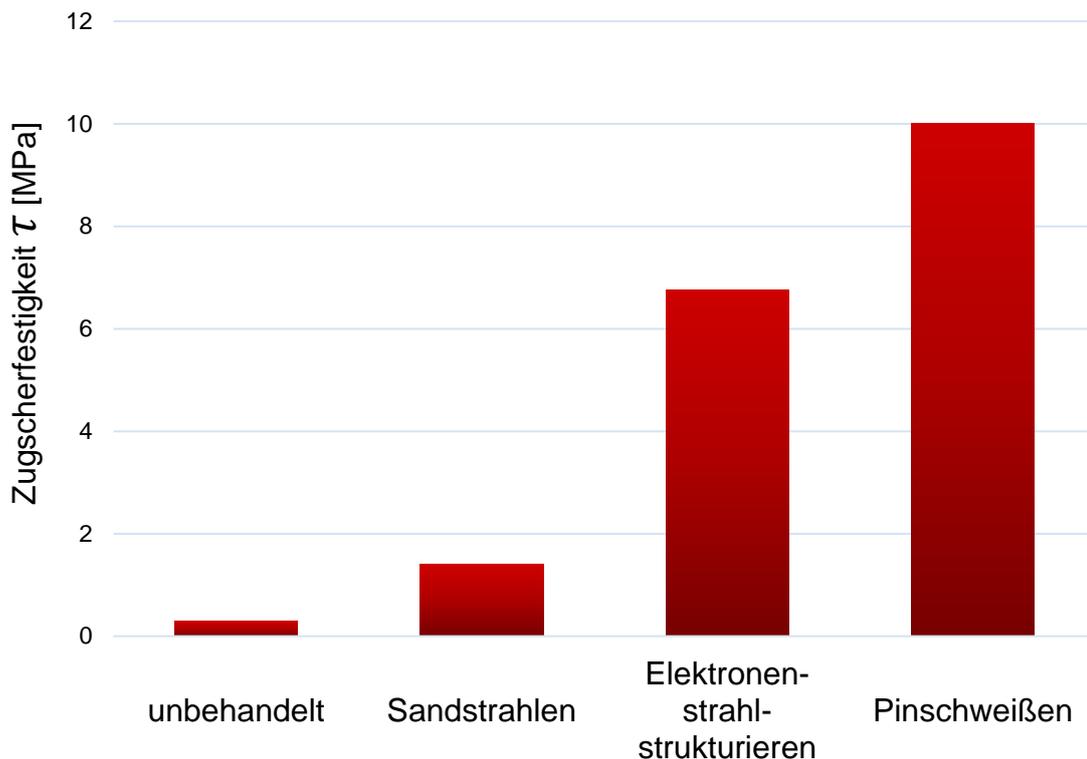


Abbildung 3.5: Zugscherfestigkeiten eines V2A - Polyamid 6 – Verbundes bei verschiedenen Oberflächenvorbehandlungen; eigene Darstellung nach [17]

Durch optimale Oberflächenbehandlung lassen sich also für ein Metall-Kunststoff-Verbund auch Kunststoffe qualifizieren, die in der Theorie hierfür ungünstige chemische Eigenschaften besitzen [17].

Einschätzung der Energieeffizienz

Vor allem aus umwelttechnischer und energetischer Sicht bietet das thermische Direktfügen gegenüber der konventionellen Klebtechnik bedeutsame Vorteile. Die Emission von Schadstoffen wird durch den Verzicht auf Klebstoff deutlich gesenkt, zudem entfällt das Problem des Recyclings, da Thermoplaste beliebig wiederaufschmelzbar sind. Die Wiederaufschmelzbarkeit von Thermoplaste bringt weiterhin den Vorteil der unkomplizierten Werkstofftrennung mit sich. Bei dem Einsatz eines Klebstoffs ist eine Werkstofftrennung wesentlich komplizierter und kostenintensiver. Die Kosten spielen auch in Hinsicht auf die Prozesszeit eine wichtige Rolle: das thermische Direktfügen ermöglicht durch die schnelle Aushärtung der Fügestelle in wenigen Sekunden eine äußerst geringe Prozesszeit. Direkt nach dem Aufschmelzen bildet sich eine Haftfestigkeit des Verbundes aus, wohingegen beim Fügevorgang mit dem Klebstoff hierfür bestenfalls 2 bis 3 Minuten benötigt werden [26]. Allerdings bietet die Klebtechnik den wesentlichen Vorteil, dass nahezu alle unterschiedlichen Materialien miteinander verbunden werden können, beim thermischen Direktfügen hingegen ist ausschließlich für thermoplastische Kunststoffe gedacht. Die Tabelle 3.1 stellt diese wesentlichen Vor- und Nachteile der jeweiligen Verbindungstechnik zusammenfassend gegenüber [17, 20].

Tabelle 3.1: Zusammenfassung und Gegenüberstellung der wichtigsten Vor- und Nachteile des thermischen Direktfügens und der Klebtechnik

Thermisches Direktfügen	Klebtechnik
+ geringere Schadstoffemissionen	- hohe Schadstoffemissionen
+ kurze Prozesszeiten	- längere Prozesszeiten
+ Recycling entfällt praktisch	- Recycling schwierig
+ bessere Werkstofftrennung möglich	- komplizierte und umweltschädliche Methoden zur Werkstofftrennung
+ selbst nach Alterung gute Festigkeiten	- Alterung negativ für Haftfestigkeit
- nur für thermoplastische Kunststoffe	+ auf nahezu alle Materialien anwendbar

3.2 Anwendungsbeispiele aus der Automobilindustrie

Im Folgenden werden Anwendungsbeispiele für MMD-Konzepte aus der Automobilindustrie aufgeführt erläutert. Zudem soll das Zukunftspotenzial dieser Konzepte für den Einsatz in der Automobilindustrie eingeschätzt und gegenüber konventionellen Anwendungen abgewogen werden.

3.2.1 Faserverstärkte Kunststoff-Metall-Verbunde

Die in Kapitel 2 angesprochenen Vorteile von Kunststoff-Metall-Bauteilen sollen im Folgenden erläutert werden. Immer häufiger werden faserverstärkte Kunststoffe mit Metallen in einem Verbundbauteil vereint. Ein Beispiel hierfür ist die B-Säule, die zwecks Erhöhung der Steifigkeit mit FVK verstärkt wird.

Welche Vorteile der Einsatz solch eines Hybridbauteils bietet, zeigt die Abbildung 3.6. Hier werden die Ergebnisse einer Untersuchung von dynamisch beanspruchten dünnwandigen, quadratischen CFK-Metall-Rohren deutlich. Im linken Bild handelt es sich um eine geringe und gleichförmige Belastung, im rechten Bild um starke, abrupte Belastung, zu vergleichen mit einer Unfallsituation. Dargestellt sind von links nach rechts: CFK-Metall-Hybridbauteil im unbelasteten Zustand, verformtes Metallbauteil, verformtes CFK-Stahl-Hybrid, verformtes CFK Aluminium-Hybrid).

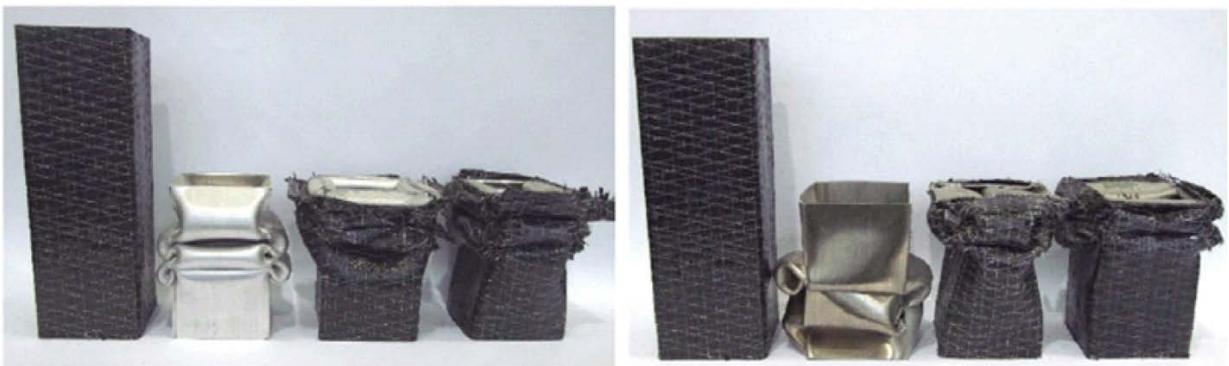


Abbildung 3.6: mechanische Belastung von verschiedenen Werkstoffen [27]

Im Vergleich zu den deformierten Metallbauteilen weisen die Hybridbauteile eine geringere Deformation auf. Daraus ergibt sich, dass eine Hybridisierung von CFK mit Stahl oder Aluminium die Duktilität des Bauteils verringern kann.

Auch das Energieabsorptionsvermögen des Bauteils ändert sich mit einer Hybridisierung. Die Abbildung 3.7 zeigt anhand des Kraft-Weg-Verhaltens der Bauteile einen Anstieg des Energieabsorptionsvermögens durch die Hybridisierung von Stahl. Dargestellt sind die Kraft-Weg-Verläufe von CFK, Stahl und dem CFK-Stahl-Verbund. Zusätzlich soll die kumulierte Kurve aus den Kraft-Weg-Verläufen von Stahl und CFK verdeutlichen, dass die Hybridisierung beider Werkstoffe weitaus größere Lasten (um 80% höher) tragen kann als die Summe aus Stahl und CFK [27,28,29].

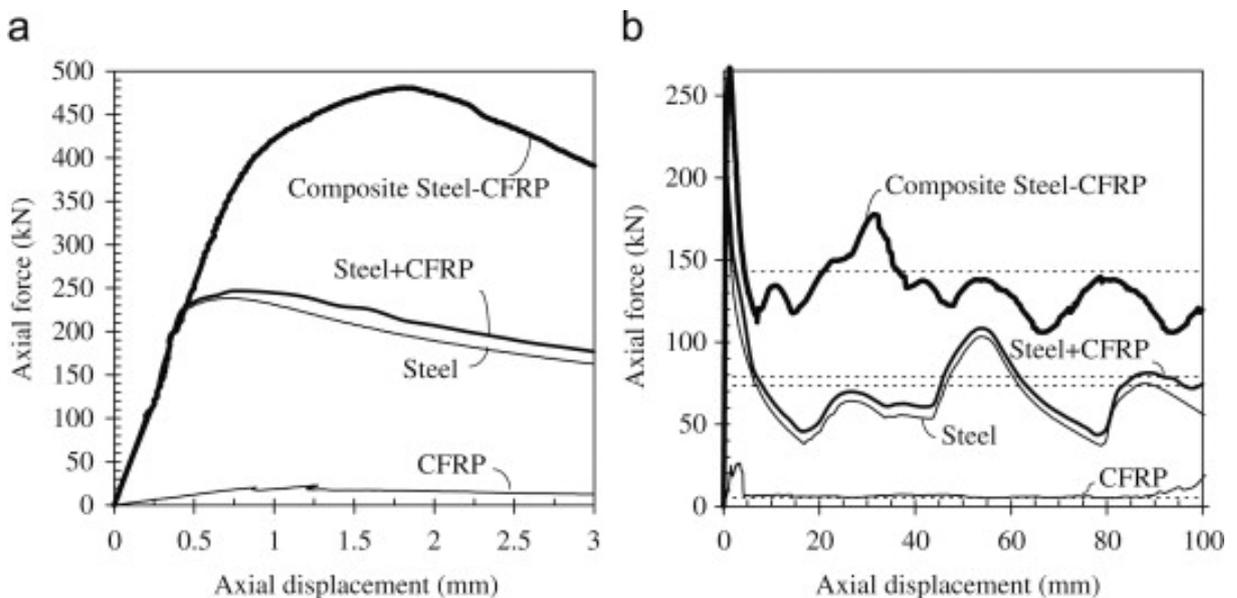


Abbildung 3.7: Energieabsorptionsvermögen von CFK, Stahl, CFK-Stahl-Hybrid [28]

Die Untersuchungsergebnisse zeigten selbst bei Kräften von 475 kN keinerlei Delaminationen in der CFK-Struktur der verformten Hybridbauteile. Auch die Verbindung von CFK und Stahl weist keine Auflösung auf [27].

Weitere Untersuchungen in Bezug auf das Energieabsorptionsvermögen wurden von Liedtke durchgeführt. In den Versuchen wurden eine A-Säule und ein Energieabsorptionselement zu Zwecken der Gewichtseinsparung hybridisiert. Die Ergebnisse zeigten bei der A-Säule eine Gewichtseinsparnis von 12% bei gleich bleibendem Energieabsorptionsvermögen, bei dem Energieabsorptionselement hingegen konnte bei gleicher Energieabsorption eine Gewichtseinsparung von 35%

erzielt werden. Die Hybridisierung von Bauteilen durch faserverstärkte Kunststoffe lässt demnach bei gleicher Crashperformance eine Gewichtsreduzierung zu [30].

Cockpit- und Frontendträger aus einem CFK-Aluminium-Verbund

Dieses Potenzial ist auch der Automobilindustrie seit langem bekannt, weshalb immer mehr Bauteile hybridisiert werden. Bekannt sind unter anderem die von der Daimler AG in Zusammenarbeit mit der ElringKlinger AG hergestellten Cockpitträger und Frontendträger aus Aluminium, verstärkt mit faserverstärktem Polyamid an versagenskritischen Stellen.



Abbildung 3.8: links: Cockpitträger, rechts: Frontendträger aus Aluminium mit kohlefaserverstärkter Polyamidverstärkung [31]

Neben dem Gewichtsvorteil von 20 bis 30 Prozent, die diese Träger gegenüber ihren Vorgängern aus konventionellen Werkstoffen mit sich bringen, bieten sie eine erhöhte Biege- und Beulsteifigkeit, die sich positiv auf das Crashverhalten auswirken. Die Mischbauweise von Cockpit- und Frontendträgern ist mittlerweile unter den Automobilherstellern weit verbreitet [31].

Räder aus einem CFK-Aluminium-Verbund und aus Voll-CFK

Bauteile, die hingegen noch nicht sehr verbreitet sind, sind zum Beispiel MMD-Räder aus CFK und Metall. Diese sollen laut zahlreichen Automobilherstellern ein hohes Zukunftspotenzial in Bezug auf verbesserte Fahrdynamik bei gleichzeitiger Gewichtsersparnis besitzen. Zum Beispiel bringen die von ThyssenKrupp und Maxion

in Zusammenarbeit hergestellten MMD-Räder aus einem CFK-Aluminium-Verbund gegenüber ihren Vorgängern aus Aluminium einen Gewichtsvorteil von bis zu 40% mit sich. Das unter anderem am Rad-Ring eingesparte Gewicht ermöglicht eine Senkung des Massenträgheitsmoments, wodurch eine spontanere Fahrbeschleunigung und -bremsung begünstigt wird [32]. Das MMD-Rad ist in Abbildung 3.9 zu sehen, zusammen mit dem Rad von BMW, welcher ebenfalls aus einer CFK-Aluminium-Verbund besteht. Letzterer spart gegenüber der konventionellen Variante 25% des Gewichts ein [33].



Abbildung 3.9: MMD-Räder aus CFK-Aluminium, Hersteller links: BMW [33], rechts: ThyssenKrupp und Maxion in Zusammenarbeit [34]

Um noch mehr Gewicht einzusparen, setzen die genannten und auch andere Hersteller wie Porsche auf Voll-CFK-Räder, die in Deutschland erst seit neuestem zugelassen sind. Anfang 2018 sollen die ersten Voll-CFK-Räder von Porsche für den Einsatz im Porsche 911 Turbo S auf den Markt kommen, auch wenn die Voll-CFK-Variante gegenüber der MMD-Variante wesentliche Nachteile mit sich bringt. Beispielsweise leiten Räder aus Voll-CFK im Vergleich zur Aluminiumvariante schwieriger die entstehende Wärme ab. Hierzu sollen entsprechende Kühlsysteme in Form von Kanälen eingesetzt werden, um eine lokale Überhitzung zu vermeiden. Weiterhin ist es bei der CFK-Variante schwieriger entstehende Risse zu erkennen.

Hierzu setzt sich der TÜV mit neuen Überwachungsmethoden auseinander, bei denen Ultraschallgeräte zum Einsatz kommen, so dass Risse im Material unmittelbar erkennbar sind.



Abbildung 3.10: Voll-CFK-Räder, Hersteller links: BMW [35], rechts: Porsche [36]

Die Hersteller werben für die Voll-CFK-Räder mit einer verbesserten Fahrdynamik, die sich durch die Gewichtsreduzierung ermöglichte Spontanität beim Bremsen und Beschleunigen äußert und mit der Senkung des Kraftstoffverbrauchs, wobei dieser aus kostentechnischer Sicht bei dem Preis eines Satzes von ca. 15.000 Euro (Stand: Ende 2017) vergleichsmäßig gering ist [36].

Strebe aus einem faserverstärkten Kunststoff-Stahl-Verbund

Als eine weitere Anwendung multipler Werkstoffe gilt die aus einem faserverstärkten Kunststoff-Metall-Verbund bestehende Strebe, die von der Daimler AG seit Februar 2017 in SLS AMG-Fahrzeugen eingesetzt wird. Aufgrund der hohen Kosten von CFK sollen die Bauteile erst ab 2020 in Großserie gehen.

Die MMD-Strebe besteht aus einem Stahlband von wenigen Millimetern Schichtdicke und wird zunächst von einer Glasfaserlage umschlossen und anschließend von kohlefaserverstärktem Kunststoff aus Epoxidharz nach dem automatisierten PulBraiding-Verfahren mit einer Geschwindigkeit von einem Meter pro Minute

umflochten. Abschließend wird das Bauteil erneut durch eine Glasfaserlage ummantelt. Die schematische Darstellung der in Sandwichbauweise aufgebauten Strebe ist in Abbildung 3.11 zu sehen.

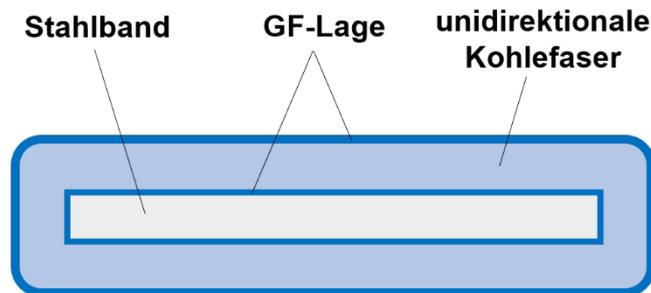


Abbildung 3.11: MMD-Strebe aus einem Kunststoff-Metall-Verbund in Sandwichbauweise

Die aus dem Kunststoff-Metall-Verbund bestehende Strebe zeigt ein Gewicht von 3 kg auf, ihr Vorgänger aus Stahl wog 9,4 kg. Demnach bringt die Hybridisierung dieser Strebe einen Gewichtsvorteil von 68% mit sich. Zudem geht mit ihnen ein Kostenvorteil einher, da die vorherigen Energieabsorptionselemente aus Stahl bestanden und mit Klebstoff befestigt werden mussten. Nach dem Stand der Technik werden stattdessen Buchsen verwendet, die eine Gewichtsreduzierung zulassen. In Zukunft soll jedoch eine Faserverstärkung an den versagenskritischen Stellen als Energieabsorptionselement dienen. Das Loch soll lediglich durch Metall gestützt werden. Die beschriebene Entwicklung des Energieabsorptionselements an der Strebe ist in Abbildung 3.12 dargestellt [37].



Abbildung 3.12: Entwicklung des Energieabsorptionselements an der Strebe [34]

MMD-Bauteile mit einem Schaumkern

Ein weiteres Potenzial Gewicht einzusparen und dabei die spezifische Energieabsorption einzelner Bauteile im Fahrzeug zu steigern, wird Schaum befüllten Materialien zugesprochen. Dabei werden Schäume aus Kunststoff oder Metall von zwei Deckschichten in Sandwichbauweise umschlossen. Im Allgemeinen ermöglicht ein Sandwichaufbau durch den Einsatz eines Werkstoffs geringerer Dichte ein höheres auf das Gewicht bezogenes Flächenträgheitsmoment [4]. Dieser Zusammenhang wird in Abbildung 3.13 deutlich.

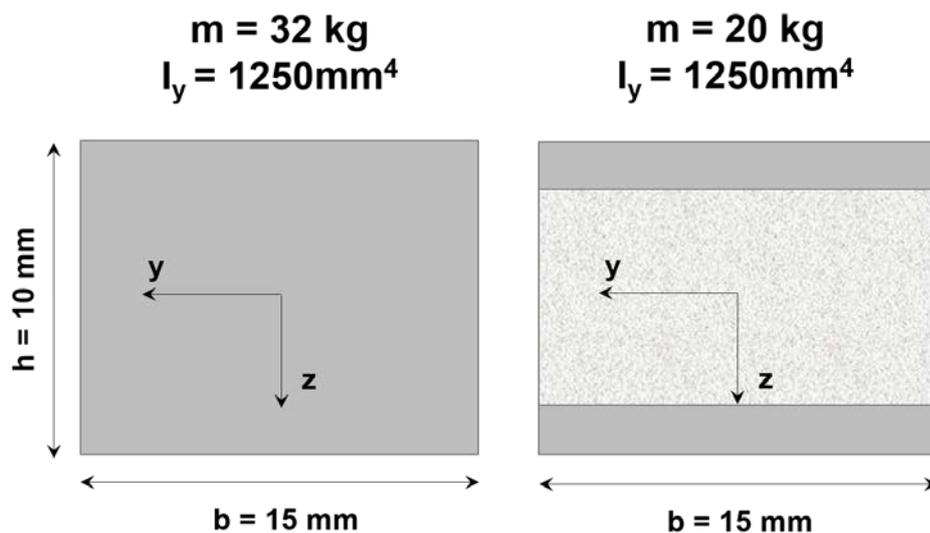


Abbildung 3.13: Unterschied des Flächenträgheitsmoment und der Masse zwischen einem Vollmaterial und einem Werkstoff mit einem Schaumkern

Demnach ermöglicht der Einsatz von Schaummaterial bei geringerem Bauteilgewicht eine gleich große Beul- und Biegesteifigkeit und eignet sich für versagenskritische Bauteile am Fahrzeug. Die Motivation Schäume gezielt in mechanisch stark beanspruchten Bauteilen zu verwenden, wird am Beispiel des Seiten-Pfahlaufpralls deutlich. Die bei dieser hohen Crashlast frei werdende Energiemenge äußert sich durch eine starke Intrusion, die an der Krafteinleitungsstelle am größten ist. Um eine gleichmäßigere Deformation und somit eine geringere Intrusion zu gewährleisten, muss das Energieabsorptionsvermögen des Bauteils erhöht werden. Hierzu werden die Träger mit Schaum befüllt. Zusätzlich wird der Rahmen ringförmig gestaltet, so

dass die frei werdende Energie über den Rahmen hinweg abgebaut werden kann [4, 38].

Untersuchungen des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) und der Fa. Dow Automotive zeigen, dass das spezifische Energieabsorptionsvermögen bei Werkstoffen, die einen Schaumkern besitzen größer ist als bei unbefüllten Werkstoffen. Dabei steigt das spezifische Energieabsorptionsvermögen mit der Dichte des Schaummaterials. Dieses Ergebnis ist in Abbildung 3.14 dargestellt.

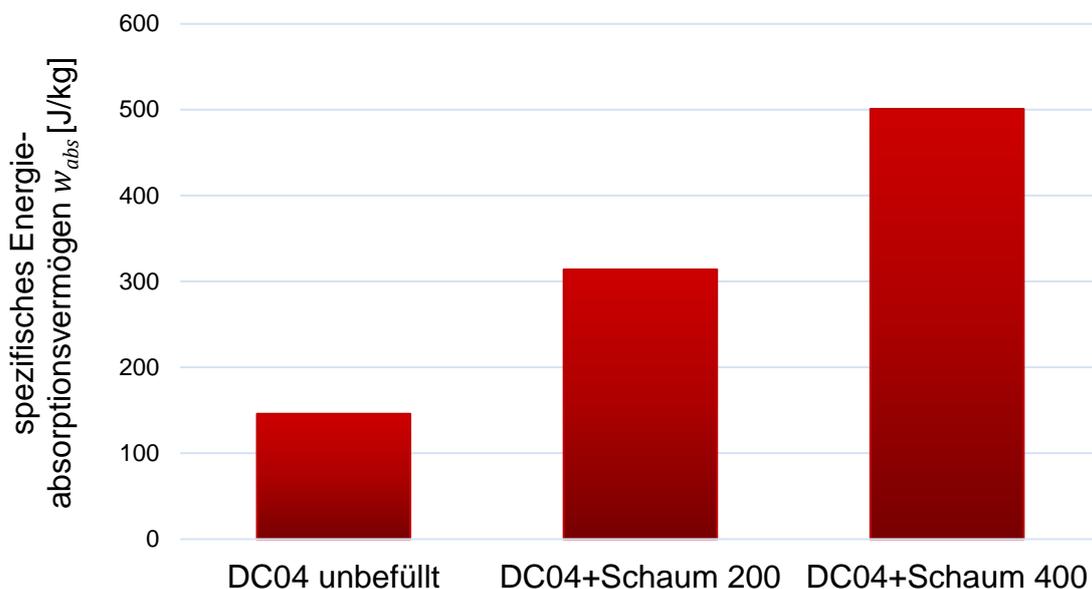


Abbildung 3.14: spezifisches Energieabsorptionsvermögen in Abhängigkeit der Schaumdichte; eigene Darstellung nach [38]

Durch eine Befüllung des Rahmenträgers mit Schaum der Dichte 400 kg/m^3 lässt sich im Vergleich zu einem Hohlträger ein um das dreifach höhere spezifisches Energieabsorptionsvermögen erreichen.

Das spezifische Energieabsorptionsvermögen der Schaumdichten unterschiedlicher Dichte äußert sich auch in dem Deformationsverhalten der Bauteile. Die Abbildung 3.15 zeigt, dass die Biegung an der Krafteinleitungsstelle bei geringeren Schaumdichten am höchsten ist. Eine solche starke Biegung ist in Hinsicht auf die Intrusion unerwünscht, vielmehr wird eine gleichmäßige Biegung angestrebt, wie sie bei der Schaumdichte 400 kg/m^3 der Fall ist.

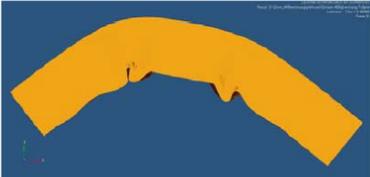
Schaumdichte [kg/m ³]	Simulation	Versuch
200	 <p>Quelle: Metallhybrid-Strukturen (M. Zimmermann, M. Kriescher)</p>	 <p>Quelle: Meilensteinbericht AP4100</p>
400	 <p>Quelle: Metallhybrid-Strukturen (M. Zimmermann, M. Kriescher)</p>	 <p>Quelle: Meilensteinbericht AP4100</p>

Abbildung 3.15: Deformationsverhalten in Abhängigkeit von der Dichte des eingesetzten Schaumkerns [38]

Das Deformationsverhalten hängt weiterhin von dem eingesetzten Trägermaterial ab. Vergleicht man das Trägermaterial aus kaltgewalztem Feinblech DC04 mit dem austenitischen Stahl V2A hinsichtlich des Energieabsorptionsvermögens und des Deformationsverhaltens, weist letzterer bei gleicher Ausgangsgeometrie und gleicher Schaumdichte ein um 60% höheres Energieabsorptionsvermögen auf. Aufgrund seiner höheren Festigkeit war die Druckseite bei diesem Material verstärkt mit Falten gekennzeichnet (Abbildung 3.16). Als Lösungsansatz bietet sich die Möglichkeit unterschiedliche Werkstoffe an jeweils Zug- und Druckseite einzusetzen. Dabei sollte der Werkstoff auf der Druckseite des Bauteils eine höhere Streckgrenze aufweisen, der Werkstoff auf der Zugseite sollte duktil sein, um die Dehnung instand halten zu können.



Abbildung 3.16: Deformationsverhalten in Abhängigkeit des Trägermaterials, Trägermaterial links: DC04, rechts: V2A [38]

Die zusätzlich zur Befüllung der Bauteile mit Schaum erwähnte Möglichkeit der Crashperformance durch eine ringförmige Gestaltung des Rahmens vereint das Konzept des MMD mit dem konstruktiven Leichtbaugedanken. Die krümmungsstetige Abrundung der Ecken im Vergleich zur herkömmlichen Form des Rahmens bietet eine Verbesserung der elastostatischen Stabilität des Bauteils bei hohen Crashlasten. Im Rahmen einer Untersuchung des DLR ermöglichte die ringförmige Gestaltung des Bauteils eine Senkung der Intrusionstiefe bei gleichzeitiger Gewichtseinsparung. Dabei konnte die Deformation bei einem frontalen Pfahlaufprall um 35% und bei einem seitlichen Pfahlaufprall um 7,6% verringert werden. Abbildung 3.17 verdeutlicht diesen Zusammenhang anhand der Spannungsverteilung und Deformation im Bereich der Krafteinleitungsstelle [38].

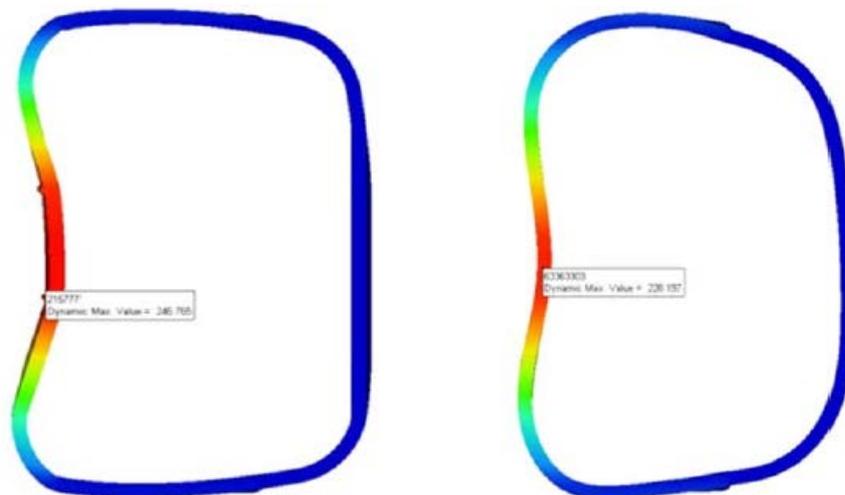


Abbildung 3.17: Spannungsverteilung und Deformation in Abhängigkeit von der konstruktiven Gestaltung des Rahmens [38]

Die Vielfalt von Schaum befüllten Werkstoffen steigt mit dem Trend des Multi-Material-Designs. So kann es sich bei dem Kern auch beispielsweise um metallische Schäume und bei dem Trägermaterial um kohlefaserverstärkte Kunststoffe handeln. Diese werden vor allem aus Gründen der guten Beul- und Biegeeigenschaften eingesetzt, die sich gezielt auf das entsprechende Bauteil abstimmen lassen. Dieses ist durch die variierbaren Porositäten zwischen 75 und 90% bei Zellgrößen zwischen 0,4 und 5,0 mm möglich. Weitere Vorteile, die für den Einsatz in Fahrzeugen sprechen sind eine geringe Wärmeleitfähigkeit und ein gutes Schallabsorptionsvermögen. Auch Wärmeübertragungseigenschaften und das Schallabsorptionsvermögen sind durch

die variable Zellstruktur einstellbar. Offenzellige Metallschäume werden unter anderem an der A-Säule oder an den Crashboxen verwendet, wobei sie vielfältig einsetzbar sind. Dünne Sandwichplatten mit Schaumkerne, die aus Kunststoff bestehen, werden häufig in Bauteilen wie Heckspoiler eingesetzt [39].

3.2.2 Nicht-faserverstärkter Kunststoff-Metall-Verbunde

Auch Kunststoff-Metall-Verbunde, bei denen der Kunststoff nicht faserverstärkt ist, bieten gegenüber rein metallischen oder rein aus Kunststoff bestehenden Materialien werkstoffliche Vorteile. Diese sollen am Beispiel des LITECOR®-Werkstoffs, einem von der ThyssenKrupp AG patentierten Werkstoff deutlich werden.

Bei diesem Werkstoff handelt es sich um einen Kunststoff-Stahl-Verbund in Sandwichbauweise, wobei die innere Schicht aus einem thermoplastischen Compound geringer Dichte ($\rho=1,03 \text{ kg/m}^3$) mit einer Schichtdicke von 0,3 bis 1,0 mm und die beiden äußeren Schichten aus Stahldeckblechen mit einer Schichtdicke von je 0,2 bis 0,3 mm Dicke bestehen. Da dieser Werkstoff individuell für verschiedene Bauteile im Fahrzeug eingesetzt wird und die mechanischen Anforderungen je nach dem unterschiedlich sind, variieren auch die Materialdicken der Schichten. Dabei hat der Kunststoff den größten Einfluss auf die Beul- und Biegesteifigkeit, bereits kleine Unterschiede in der Schichtdicke veranlassen eine überproportionale Änderung dieser mechanischen Eigenschaften.

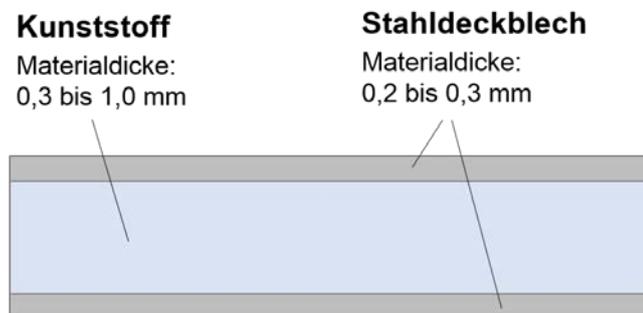


Abbildung 3.18 schematischer Aufbau des Kunststoff-Stahl-Verbunds in Sandwichbauweise

Durch die Vereinigung von Kunststoff und Stahl im LITECOR-Werkstoff ergibt sich eine hohe Beul- und Biegesteifigkeit bei gleichzeitiger Gewichtseinsparung und bietet neben einem alternativen Leichtbauwerkstoff eine nachweislich auf das Fahrzeuggewicht bezogene verbesserte Crashperformance [40].

Der thermische Wärmeausdehnungskoeffizient des LITECOR-Werkstoffs ist bei Betriebstemperaturen von -40°C bis 90°C mit einer infinitesimal kleinen Abweichung identisch mit denen von herkömmlichen Stahlvollblechen. Hiermit entfällt die Alpha-Delta-Problematik und die Integration des Werkstoffs in MMD-Bauteile aus Stahlvollblech kann deutlich unkomplizierter erfolgen. Auch erübrigt sich das Problem der Korrosion, da die beiden Stahlschichten einer elektrolytischen Verzinkung unterzogen werden [41].

Das Diagramm 3.19 zeigt die Einordnung der Materialien Aluminium und LITECOR mit unterschiedlichen Materialdicken und Materialdickenzusammensetzungen je nach Biegesteifigkeit in Prozent und Flächengewicht in kg pro Quadratmeter und ermöglicht damit einen direkten Vergleich zum Referenzwerkstoff Stahl [40].

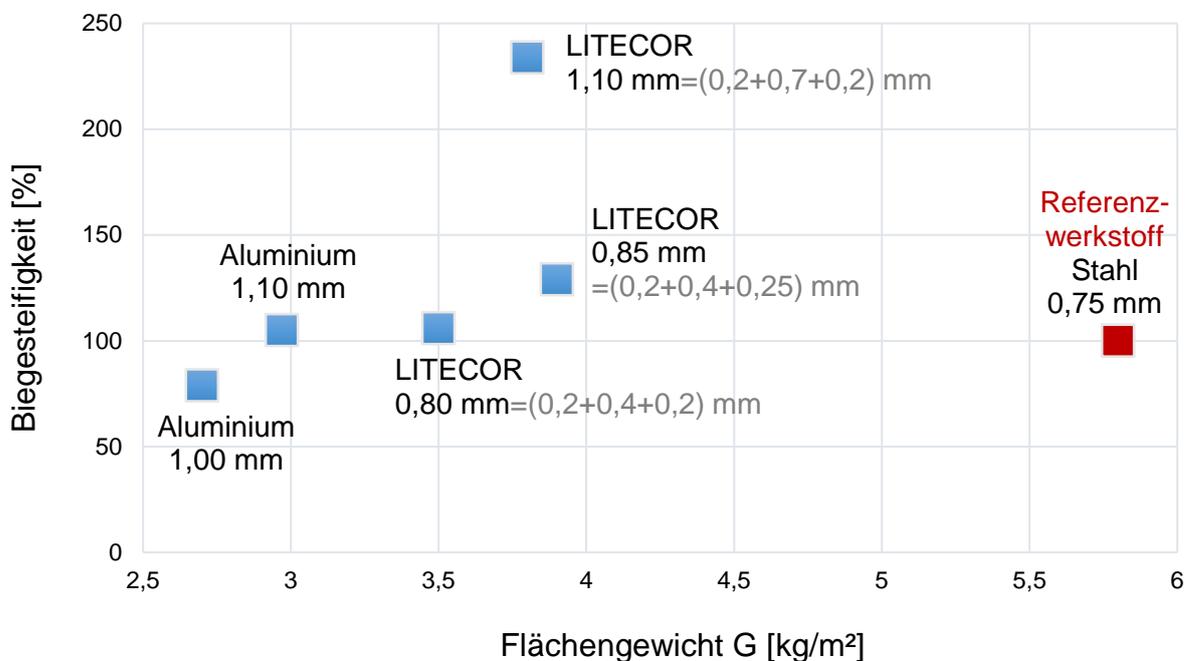


Abbildung 3.19: Einordnung von Aluminium und LITECOR unterschiedlicher Materialdicken und -zusammensetzungen nach der Biegesteifigkeit und des Flächengewichts mit der Referenz von Stahl; eigene Darstellung nach [40,41]

Bei den gleichen Materialdicken von 1,10 mm weist LITECOR bei einer Materialdickenzusammensetzung von 0,70 mm Kunststoff und je 0,20 mm Stahldeckblech eine doppelt so hohe Biegesteifigkeit wie Aluminium auf. Zwar ist das Flächengewicht bei LITECOR höher, jedoch ist dieses immer noch wesentlich geringer als das von Stahl. Außerdem geht es bei diesem Werkstoff primär um die Verbesserung der mechanischen Eigenschaften, die beispielsweise eine bessere Crashperformance erlauben bei gleichzeitiger Gewichtseinsparung [21]. Eine weitere Besonderheit dieses Werkstoffs ist, dass dieser an konventionellen Anlagen gefertigt werden kann, an denen auch herkömmliche Stahlbleche gefügt werden. Bisher wurde der Werkstoff in der Motorhaube der Sonderserie VW Polo R WRC eingesetzt und ermöglichte eine Gewichtseinsparung von 2 kg gegenüber den Serienfrontklappen. Doch neben großflächigen Außenhautanwendungen wie beispielsweise in Türen oder Frontklappen, ist dieser Werkstoff nach der Potenzialanalyse von ThyssenKrupp für insgesamt 14 Bauteile in der Karosserie geeignet. Dabei beinhaltet diese Analyse abgesehen von den Festigkeitsberechnungen, Crashsimulationen und Noise-Vibration-Harshness (NVH)-Berechnungen. Die empfohlenen Einsatzbereiche im Fahrzeug sind in Abbildung 3.20 dargestellt [41].

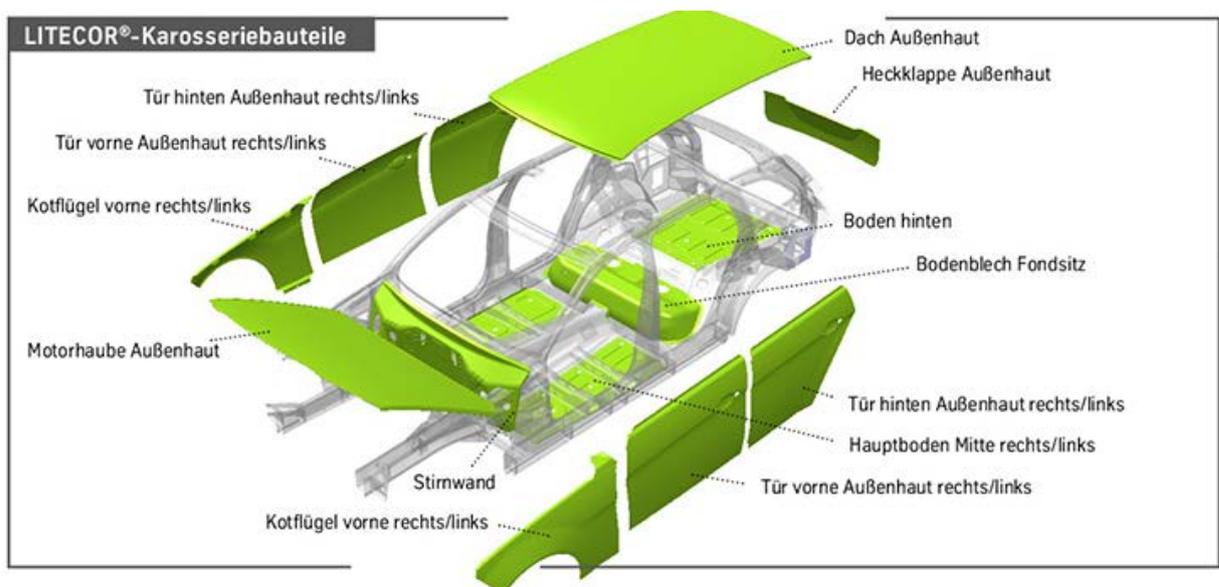


Abbildung 3.20: Einsatzpotenzial des Werkstoffs LITECOR in der Fahrzeugkarosserie [41]

Bauteile aus LITECOR werden nach hybriden Verbindungstechniken gefügt. Dabei wird das Widerstandspunktschweißen mit herkömmlicher Klebtechnik kombiniert. Auch wenn die Verbindungstechnik speziell ist, kann sie an einer herkömmlichen Schweißanlage erfolgen.

Weiterhin wird in der Potenzialanalyse das Crashverhalten von LITECOR-Werkstoffen nach den wichtigsten Crashlastfällen untersucht. Dabei sollen die Anforderungen der passiven Sicherheit, nämlich eine steife Fahrgastzelle und verformbare Knautschzonen zu gewährleisten, eingehalten werden. Ein Beispiel hierfür ist in Abbildung 3.21 anhand des Frontaufpralls eines Fahrzeugs aus größtenteils LITECOR-Werkstoffen zu sehen [41].

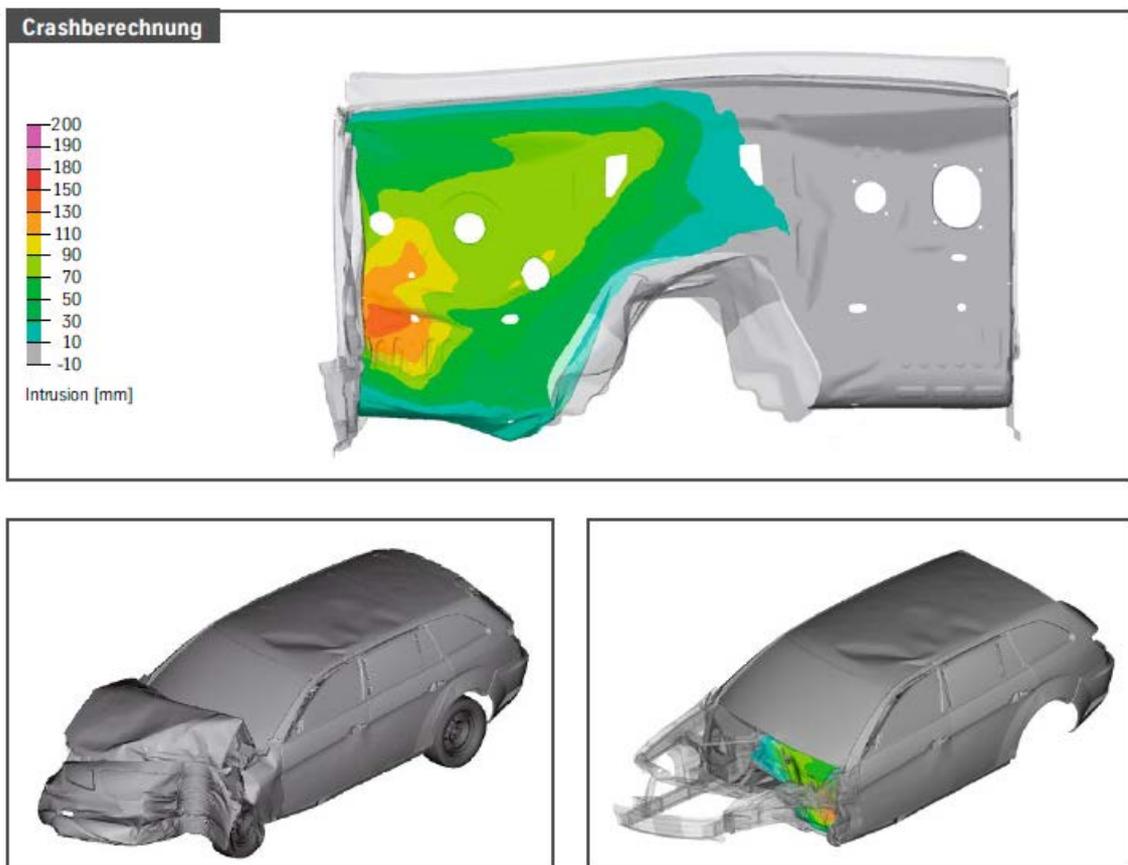


Abbildung 3.21: Crashverhalten eines Fahrzeugs aus größtenteils LITECOR-Werkstoffen bei einem Frontaufprall [23]

Hinsichtlich des Crashverhaltens ergibt die Potenzialanalyse zwar keine Verbesserung der Crasheigenschaften durch den Einsatz von LITECOR, jedoch werden die

Anforderungen der passiven Sicherheit genauso erfüllt wie mit herkömmlichen Werkstoffen und das bei einer Gewichtsersparnis von 20%. Insofern kann von einer Verbesserung einer auf das Fahrzeuggewicht bezogenen Crashperformance gesprochen werden. Um diese zu erreichen empfiehlt der Hersteller höherfesten Stahl als Werkstoff für die äußeren Schichten zu verwenden, da diese bessere Eigenschaften der Energieabsorption besitzen und zugleich dem Verbund eine gewisse Stabilität verleihen. Dabei wird die äußere Außenschicht oft stärker dimensioniert, um beispielsweise im Falle von Hagel den Anforderungen der Beulfestigkeit zu genügen. Dafür wird Material an der nach Innen zeigenden Außenschicht eingespart [40,41].

Ein wichtiger Aspekt, der für den Einsatz von LITECOR-Werkstoffen spricht sind die geringen Kosten. Gegenüber Aluminium bringt diese Werkstoffsorte einen kostentechnischen Vorteil von bis zu 30% mit sich. Die Abbildung 3.22 veranschaulicht den Vergleich zwischen Aluminium, Stahl und LITECOR in Hinsicht auf die Materialkosten [41, 42].

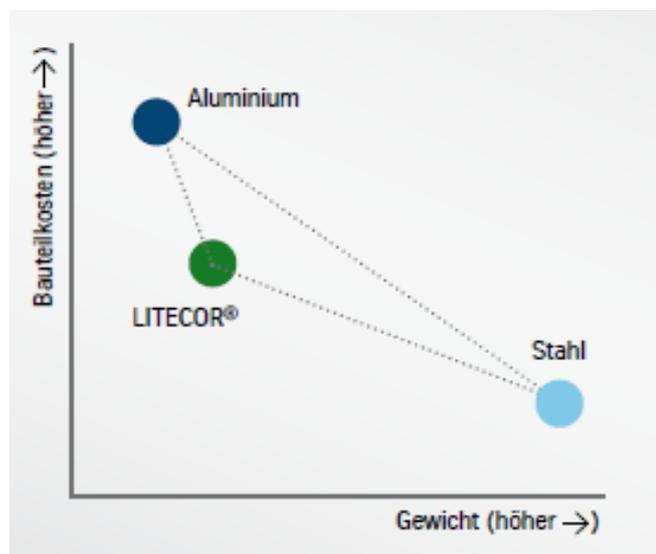


Abbildung 3.22: Kostenvergleich zwischen Aluminium, Stahl und LITECOR [41]

Insgesamt handelt es sich bei LITECOR um einen Werkstoff, der aufgrund seiner sehr guten Materialeigenschaften bei gleichzeitig geringen Kosten ein hohes Zukunftspotenzial in der Automobilindustrie hat [42]

3.2.3 Stahlverbunde in Sandwichbauweise

Ein Beispiel für den Einsatz von Stahlverbunden im Automobilbau soll am Beispiel der TRIBOND®-Werkstoffen der ThyssenKrupp AG deutlich werden. Wie der Name bereits andeuten lässt, handelt es sich um einen Verbund warmumgeformter Stähle in Sandwichbauweise aus drei Schichten: die innere Schicht besteht aus dem Mangan-Bor-Stahl (kurz MBW) MBW®1500, einem höchstfestem Stahl, umgeben von den äußeren Schichten aus dem duktilem Stahl MBW®500. Die jeweiligen Zahlen kennzeichnen die Zugfestigkeit, die Abkürzung MBW steht für Mangan-Bor-Stähle [43].

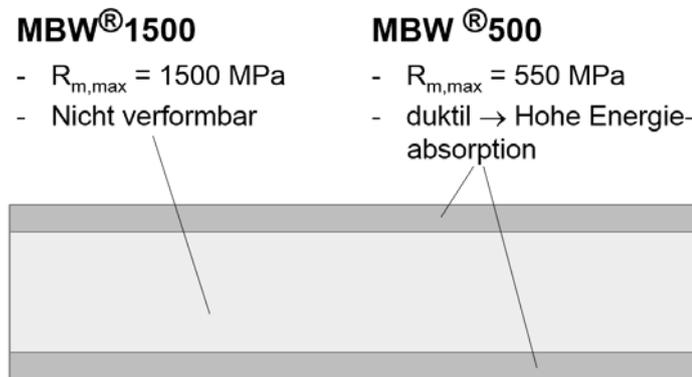


Abbildung 3.23: schematische Darstellung der Sandwichbauweise des TRIBOND®-Werkstoffs der ThyssenKrupp AG

Abgesehen von der Gewichtsersparnis von bis zu 1,3 kg pro Fahrzeug, die der Einsatz von TRIBOND für die B-Säule eines Fahrzeugs bringen kann, sprechen die verbesserten mechanischen Eigenschaften für den Einsatz dieses Werkstoffs. Durch die Vereinigung von höchstfestem und duktilem Stahl hat dieses Material die Fähigkeit vergleichsweise hohe Energiemengen in beispielsweise Crashsituationen aufzunehmen und weist gleichzeitig eine dafür hohe Festigkeit auf. Bislang wurde für die B-Säule vieler Fahrzeughersteller MBW®1500 eingesetzt. Dieses Material hat nicht eine solch hohe Fähigkeit, Energie zu absorbieren, vielmehr wird die Energie an anliegende Bauteile weitergeleitet [44, 45, 46].

Eine Kategorisierung der Stähle und der Stahlverbunde nach Verformbarkeit und Zugfestigkeit ist in Abbildung 3.24 zu sehen.

Aus der Abbildung ist ersichtlich, dass die TRIBOND-Werkstoffe im Vergleich zu höherfesten Stählen eine besonders hohe Verformbarkeit ermöglichen. So können Verformbarkeiten erreicht werden, die sich bislang nur mit einem Stahl geringerer Zugfestigkeit, beispielsweise durch MBW 500 ermöglichen ließ.

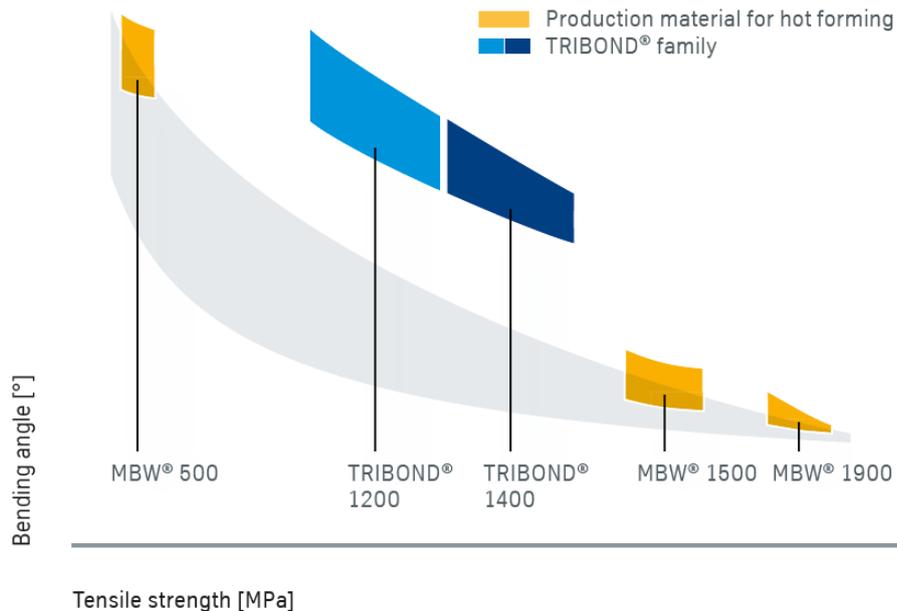


Abbildung 3.24: Verformbarkeit in Form von Biegewinkel der einzelnen Materialien in Abhängigkeit von der Zugfestigkeit [44]

Die Werkstoffeigenschaften werden in erster Linie von den eingesetzten Materialien im Sandwich und deren Schichtdicken bestimmt. Die Abbildung 3.25 zeigt den Schichtaufbau beider TRIBOND-Varianten.

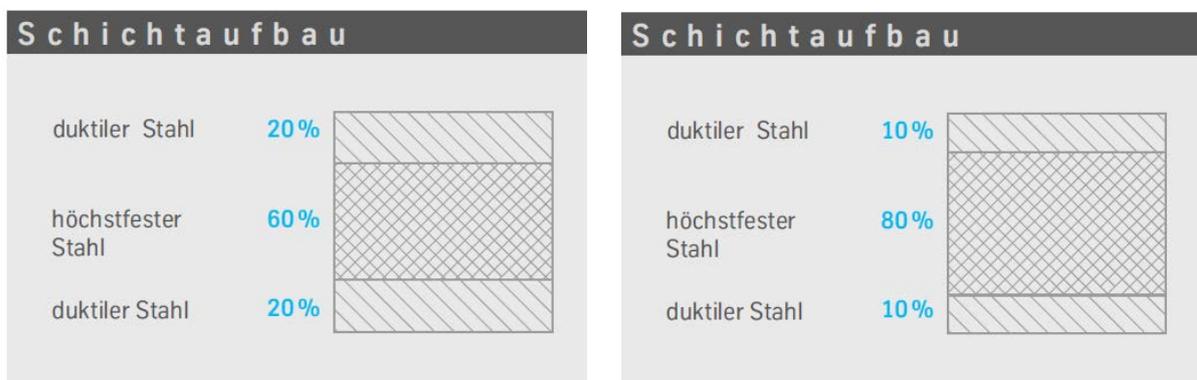


Abbildung 3.25: Schichtaufbau der Tribond-Werkstoffe, links: Tribond 1200; rechts: Tribond 1400 [46]

Je nach Bauteilanforderungen und den aus den jeweiligen Schichtaufbauten resultierenden Werkstoffeigenschaften variiert das Einsatzgebiet der Werkstoffe in der Karosserie. Das Deformationsverhalten des einzelnen Werkstoffs lässt eine grobe Charakterisierung der Werkstoffeigenschaften in Hinsicht auf das Crashverhalten erkennen. Abbildung 3.26 zeigt einen Einblick in das Deformationsverhalten der jeweiligen Tribond-Werkstoffe und vergleicht dieses mit denen von bisher eingesetzten konventionellen Stählen.



Abbildung 3.26: Deformationsverhalten von Tribond 1200 und Tribond 1400 im Vergleich zu bisher eingesetzten konventionellen Stählen [46]

Die gute Verformbarkeit von Tribond 1200 weist auf ein hohes Energieabsorptionsvermögen hin. Aus diesem Grund eignet sich dieser Werkstoff vor allem für Bauteile, die in einem Crashfall eine hohe Energieaufnahme aufnehmen müssen, um die passive Sicherheit gewährleisten zu können. Tribond 1400 hingegen eignet sich aufgrund seiner hohen Biegesteifigkeit für den Einsatz in Bauteilen der Fahrgastzelle. Diese einzelnen Bereiche, für die der Hersteller den Einsatz der jeweiligen Tribond-Werkstoffe empfiehlt, sind in Abbildung 3.27 dargestellt. [46].

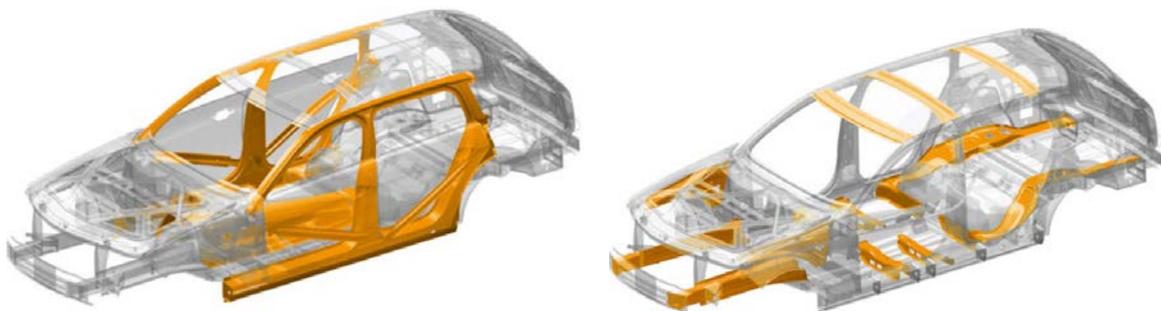


Abbildung 3.27: Empfohlener Einsatz der TRIBOND-Werkstoffe in der Fahrzeugkarosserie [49]

4 Life-Cycle-Assessment

Dieses Kapitel bietet mit der Methode des Life-Cycle-Assessment (LCA), oft auch Umwelt- oder Ökobilanz genannt, eine ganzheitliche Betrachtung der Energieumwandlung in allen Phasen des Produktlebenszyklus. Diese ist vor allem bei innovativen Leichtbaumaterialien wichtig, da hier häufig die durch den Einsatz der Werkstoffe erzielte Energieeffizienz während der Nutzung des Fahrzeugs im Vordergrund steht und die freigesetzten Emissionen während der restlichen Lebenszyklusphasen oft vernachlässigt werden. Diese tragen jedoch in einer nicht zu vernachlässigenden Menge zum Treibhauseffekt bei [47]. Bereits bei herkömmlichen Fahrzeugkonzepten setzt ein üblicher Roboter 50 Tonnen CO₂-Emissionen während der Produktion einer Fahrzeuggeneration frei. Für die Herstellung des Roboters werden wiederum 7 Tonnen CO₂-Emissionen freigesetzt. Dazu kommen 16 Tonnen CO₂-Emissionen durch Beheizung, Belüftung und Beleuchtung der Hallenfläche, auf der der Roboter während seiner gesamten Laufzeit steht. Im Vergleich hierzu kommt es bei innovativen Konzepten zu höheren Emissionen bei der Herstellung und Verarbeitung der Werkstoffe. Diese Tatsache zeigt, dass hinsichtlich der Energieeffizienz während des Lebenszyklus Optimierungspotenzial besteht [48].

Insgesamt soll dieses Kapitel zur kritischen Betrachtung und Hinterfragung der Energieeffizienz von innovativen Fahrzeugkonzepten anregen, welche oftmals von vornherein als nachhaltig wahrgenommen werden.

4.1 Grundlagen des Life-Cycle-Assessment

Das Life-Cycle-Assessment ermöglicht eine ökologische und energetische Bewertung und Abwägung der Energieeffizienz eines Fahrzeugkonzepts unter Berücksichtigung aller Umwelt- und Schadeinflüsse, die während des gesamten Lebenszyklus auftreten. Hierzu zählen alle Schritte von der Rohstoffgewinnung, der Verarbeitung und Herstellung der Werkstoffe bis hin zum End-of-Life, also zur Entsorgung bzw. Recycling des Produkts [47]. Bei Ökobilanzen, die auf deutschen Angaben basieren, werden häufig sogar die Stoff- und Energieströme berücksichtigt, die beim Schifftransport der Werkstoffe aus dem Ausland zu- und abgeführt werden. Oft werden

auch die Umwelteinflüsse berücksichtigt, die beim Betrieb des für die Fertigung eingesetzten Roboters auftreten [49].

Ziel dieser Methode ist es, die Energieeffizienz einer Anlage oder eines Prozesses einschätzen zu können und die aus der Auswertung errungenen Erkenntnisse für eine Prozessoptimierung zwecks Nachhaltigkeit und Umweltschutz zu nutzen. [48]

Das prinzipielle Vorgehen des Life-Cycle-Assessment ist in DIN EN ISO 14040 und 14044 festgelegt und wird in der folgenden Abbildung dargestellt.

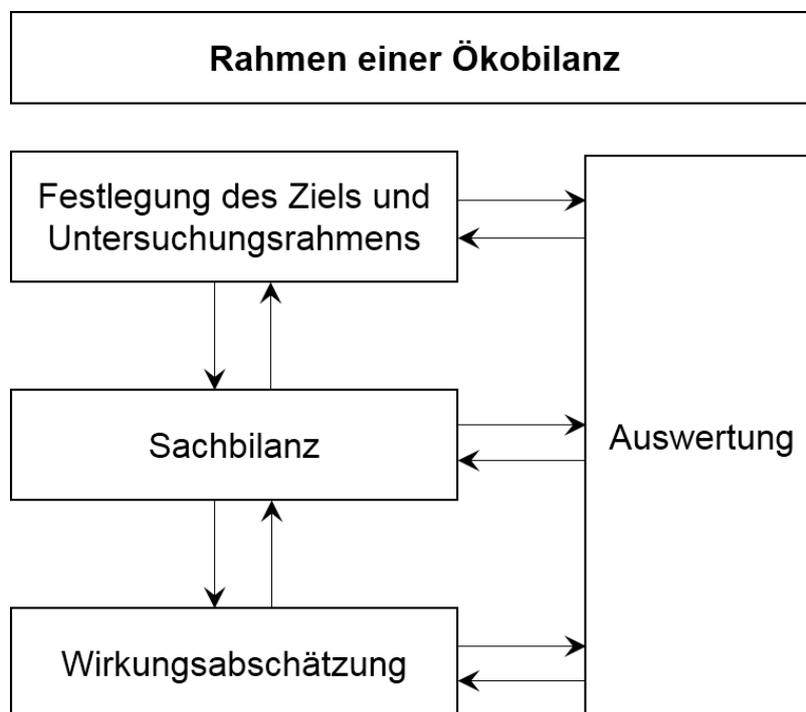


Abbildung 4.1: Verfahren der Ökobilanz nach DIN EN ISO 14040

Im ersten Schritt wird der Zweck der Ökobilanz festgelegt. Zudem werden Annahmen (z.B. die Emissionen beim Schifftransport zu berücksichtigen) und betrachtete Systemgrenzen („from cradle to factory gate“, „well-to-wheel“ oder „from cradle to grave“) des zu untersuchenden Systems geregelt. Die Betrachtungsmethode „from cradle to factory gate“ (dt. „von der Wiege bis zum Fabrikator“) beinhaltet den Lebensweg des bereits hergestellten Produkts bis zum Verlassen der Fabrik. Die

Methode „well-to-wheel“ berücksichtigt alle Energieumwandlungen von der Gewinnung der mechanischen Energie bis zur Nutzung der kinetischen Energie. Beim „from cradle to grave“ handelt es sich um die Betrachtung des gesamten Lebensweges, von der Gewinnung der Rohstoffe bis zur Entsorgung bzw. zum Recycling der Werkstoffe. Dieser Betrachtungsrahmen erfüllt den Zweck der ganzheitlichen Betrachtung des Life-Cycle-Assessment am ehesten [47, 50].

Die Sachbilanz bildet den Kern der Ökobilanz. Hierzu gehören alle zu- und abgeführten Stoff- und Energieströme der einzelnen Phasen des Lebenszyklus. Zu den zugeführten Stoff- und Energieströmen zählen beispielsweise Werkstoffe und elektrische Energie, zu den abgeführten Stoff- und Energieströmen hingegen Abfälle, Emissionen und thermische Energie.

Nach der Ermittlung dieser Größen, wird im Rahmen der Wirkungsabschätzung ihr Einfluss auf die Umwelt abgeschätzt. Unter anderem wird der Einfluss der freigesetzten Gase auf den Treibhauseffekt und auf das Ozonloch eingeschätzt und bewertet [49, 50].

Im letzten Schritt werden alle wesentlichen Daten zur Auswertung genutzt. Je nach anfänglicher Festlegung des Ziels, kann die Auswertung Schwachstellen aufdecken oder Optimierungspotenziale beinhalten [47].

4.2 Ökologische Gesichtspunkte verschiedener Werkstoffe

Im Folgenden werden die abgeführten Stoffmengen in Form von Emissionen (hier nur CO₂ berücksichtigt) und die zugeführten Energiemengen für die einzelnen Phasen des Produktlebenszyklus verschiedener in einer Fahrzeuggeneration eingesetzter Werkstoffe dargestellt und kurz erläutert. Aus diesen Daten wird zum Schluss abgeschätzt, inwieweit verschiedene Werkstoffe durch ihre Herstellung, Verarbeitung und Nutzung die Umwelt belasten. Dies ermöglicht eine Abschätzung der Nachhaltigkeit verschiedener Werkstoffeinsätze.

Die Bereitstellung der erforderlichen Primärenergie in den einzelnen Phasen des Produktzyklus erfolgt durch fossile Energieträger, wodurch es zur Freisetzung von

Treibhausgasen, unter anderem CO₂ kommt. Aus diesem Grund verhält sich das Treibhauspotenzial der einzelnen Materialien nahezu proportional zum Primärenergiebedarf. CFK weist je nach Einsatz und Anwendung ein variierendes Materialverhalten auf, damit schwanken Primärenergiebedarf und Treibhauspotenzial dieses Werkstoffes ebenfalls. Wichtig ist, hier zwischen unidirektionalem und quasiisotropem CFK zu unterscheiden, da diese sehr verschiedene Eigenschaften besitzen und sich wie zwei ganz unterschiedliche Materialien verhalten, auch wenn es sich bei beiden um Kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe handelt [49].

4.2.1 Rohstoffgewinnung

Bei der Rohstoffgewinnung für CFK bringen Kohlestofffasern aus Polyacrylnitril (kurz: PAN) den größten energetischen Aufwand und damit das größte Treibhauspotenzial mit sich. Ein Grund hierfür ist, dass Hochtemperaturkonzepte zum Einsatz kommen, welche generell mit erhöhter Energie verbunden sind: unter anderem sei hier die Carbonisierung bei Temperaturen zwischen 1500°C und 1800°C zu nennen (dieser Schritt erfolgt immer identisch), oder aber die Nachbehandlung der Fasern für das Erreichen der gewünschten Materialeigenschaften, welche bei Temperaturen zwischen 2000 und 3000°C stattfindet [49].

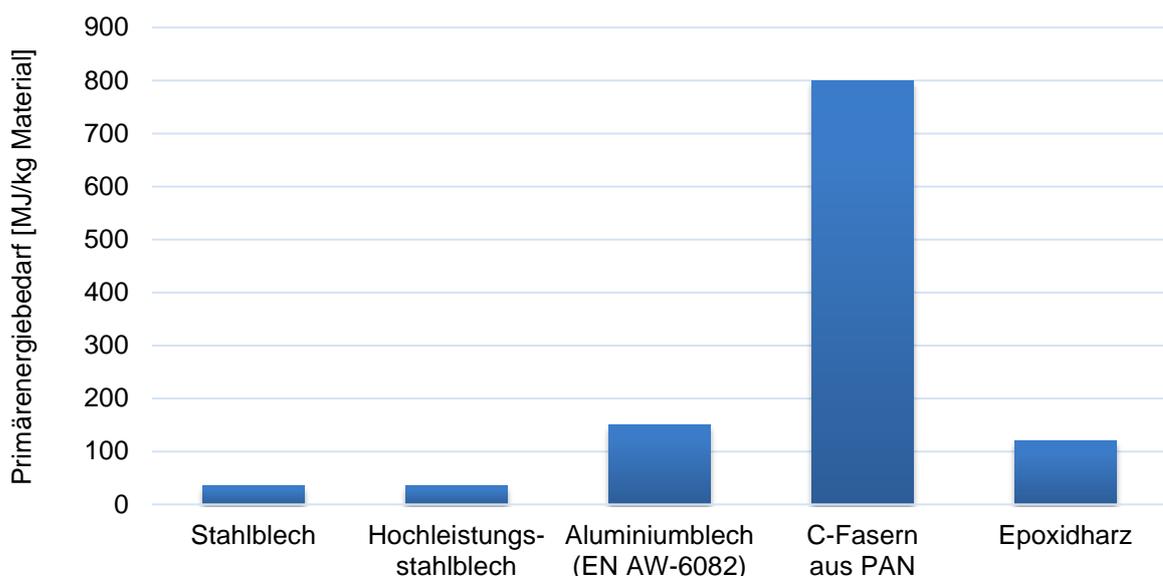


Abbildung 4.2: Primärenergiebedarf für die Gewinnung verschiedener Rohstoffe

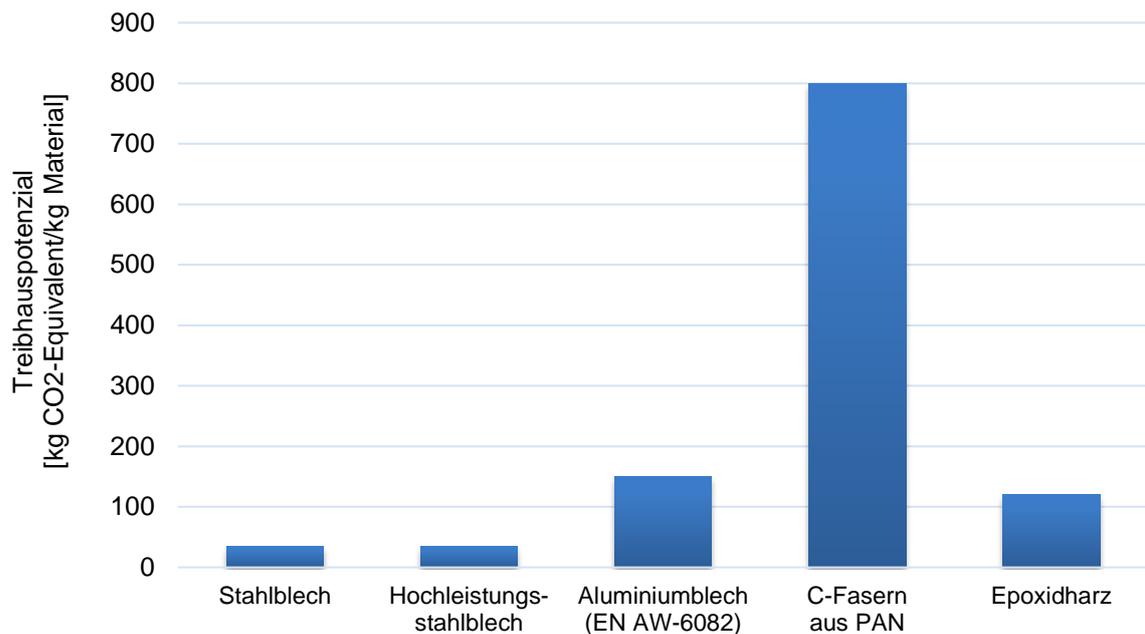


Abbildung 4.3: Treibhauspotenzial bei der Gewinnung verschiedener Rohstoffe

4.2.2 Herstellung der Produkte

Die Diagramme 4.4 Und 4.5 zeigen verschiedene Bauteilgewichte der Werkstoffe, die für die identische Funktion notwendig ist. Deutlich ist, dass CFK, besonders die quasiisotrope Variante, bei der Herstellung einen sehr hohen Primärenergiebedarf aufweist, und das obwohl viel weniger Material eingesetzt wird. Dies ist unter anderem durch die bisher noch relativ unerforschten und optimierungsbedürftigen, energieintensiven Herstellungsprozesse begründet. Somit zeigt CFK auch bei der Herstellung einen im Vergleich zu den herkömmlichen Werkstoffen höheren Primärenergiebedarf und damit eine für die Umwelt schädlichen Einfluss.

Anders sieht es bei dessen Treibhauspotenzial aus: bei einem optimalen Herstellungsprozess sind die bei der Herstellung von CFK unidirektional freigesetzten Treibhausgase so gering wie bei der Herstellung von Stahl bzw. Hochleistungsstahl. Dies gilt jedoch nur für die unidirektionale Variante; die quasiisotrope Variante verursacht nach wie vor einen im Vergleich zu den anderen Werkstoffen höheren Schaden für die Umwelt.

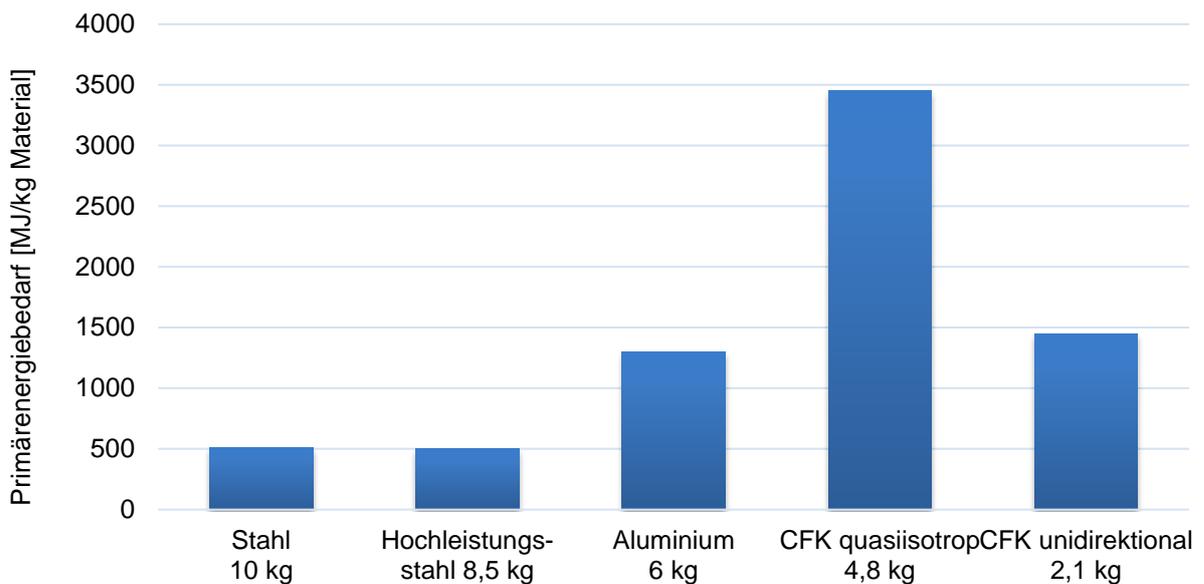


Abbildung 4.4: Primärenergiebedarf bei der Werkstoffherstellung

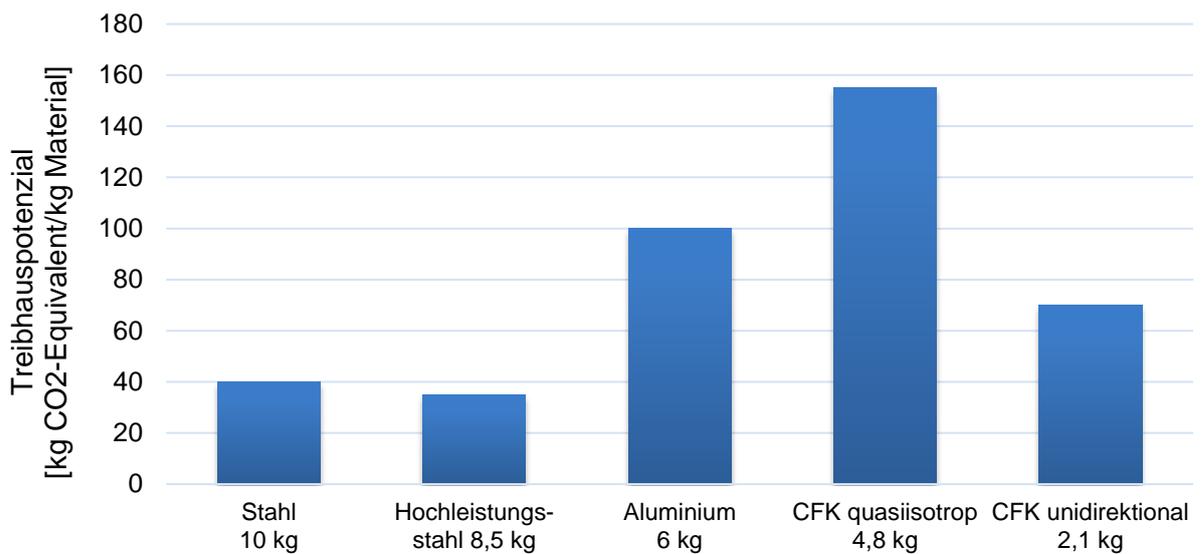


Abbildung 4.5: Treibhauspotenzial verschiedener Werkstoffe bei ihrer Herstellung

In dieser Studie wird angenommen, dass die Materialeigenschaften von Hochleistungsstahl auf die optimale Auswahl der Legierungselemente zurückzuführen ist, nicht jedoch auf den Temperaturverlauf während des Herstellungsprozesses. Dieser sei dem des herkömmlichen Stahls ähnlich. Daraus folgt auch, dass kein signifikanter Unterschied zwischen der Energiebereitstellung von Stahl und Hochleistungsstahl besteht [49].

4.2.3 Ökologische Gesichtspunkte der Nutzungsphase

Der Energieaufwand und das Treibhauspotenzial in der Nutzung des Fahrzeugs basieren auf der Kraftstoffverbraucheinsparung, die der jeweilige Werkstoff bietet. Die Ersparnis der Primärenergie und der CO₂-Emission lässt sich durch sogenannte Minderverbrauchsfaktoren, auch Fuel Reduction Value (FRV) genannt, ermitteln. Mit Hilfe dieser Größe lassen sich verschiedene Werkstoffe hinsichtlich ihrer Energieeffizienz vergleichen. Dabei gilt Stahl als Referenzwerkstoff.

Der Minderverbrauchsfaktor gibt den Kraftstoffverbrauch pro 100 km Laufstrecke und 100 kg Gewicht an und ist abhängig von dem Wirkungsgrad des Verbrennungsmotors: Für Ottomotoren sind Minderverbrauchsfaktoren von 0,35 l/(100 km • 100 kg) und für Dieselmotoren Werte von 0,28 l/(100 km • 100 kg) üblich.

Die Multiplikation des Minderverbrauchsfaktors mit der Gewichtseinsparung, die durch den Einsatz des bestimmten Werkstoffs erzielt wird, ergibt den sogenannten Minderverbrauch (FR). Dieser gibt die Kraftstoffersparnis an. Beispielhaft ergibt sich der für ein mit einem Dieselmotor angetriebenen Fahrzeug aus unidirektionalem CFK zu [51,52]:

$$FR = m_{Einsparung} \cdot FRV \quad (4.1)$$

$$= (2,1 - 10) \text{ kg} \cdot 0,28 / (100 \text{ km} \cdot 100 \text{ kg}) = -0,022 \text{ kg} / 100 \text{ km}$$

Die Einsparungen, die sich aus dem Einsatz der jeweiligen Werkstoffe ergeben, sind in den folgenden Diagrammen dargestellt. Der Vollständigkeit halber werden die in der Automobilindustrie üblichen Fahrleistungen von 150.000 km (Volkswagen AG) und 250.000 km (Daimler AG) betrachtet [53,54]. Die Diagramme 4.6 und 4.7 zeigen, dass der Primärenergiebedarf für die Bereitstellung von Kraftstoff für Fahrzeuge aus Stahl am höchsten ist, gefolgt von Hochleistungsstahl und Aluminium. Fahrzeuge aus unidirektionalem CFK hingegen weisen den geringsten Primärenergiebedarf für ihre Kraftstoffbereitstellung auf, die Kraftstoffeinsparung ist hier am höchsten. Auch die Diagramme 4.8 und 4.9, welche das Treibhauspotenzial der einzelnen Werkstoffe

darstellen, zeigen dieses Verhalten: Fahrzeuge aus Stahl verursachen die höchsten Emissionen in der Nutzung. Auch die Emissionen, die während des Raffinerie-Prozesses zur Kraftstoffbereitstellung ausgestoßen werden, sind bei diesem Werkstoff am höchsten. Die geringsten Emissionen, die sowohl in der Nutzung, als auch durch den Raffinerie-Prozess ausgestoßen werden, weist unidirektionaler CFK auf. Die Emissionen liegen bei 150.000 km zwischen 25 und 30 kg CO₂. Der Einsatz von Stahl bringt mit 115 bis 125 kg CO₂ einen 4 bis 4,5 größeren Wert. Dieses Verhalten zeigt sich ebenfalls bei einer Fahrleistung von 250.000 km. Hier weist Stahl einen um den Faktor 4,2 bis 4,8 größeren Wert im Treibhauspotenzial auf. Das Verhältnis wächst also mit der Fahrleistung minimal linear [49].

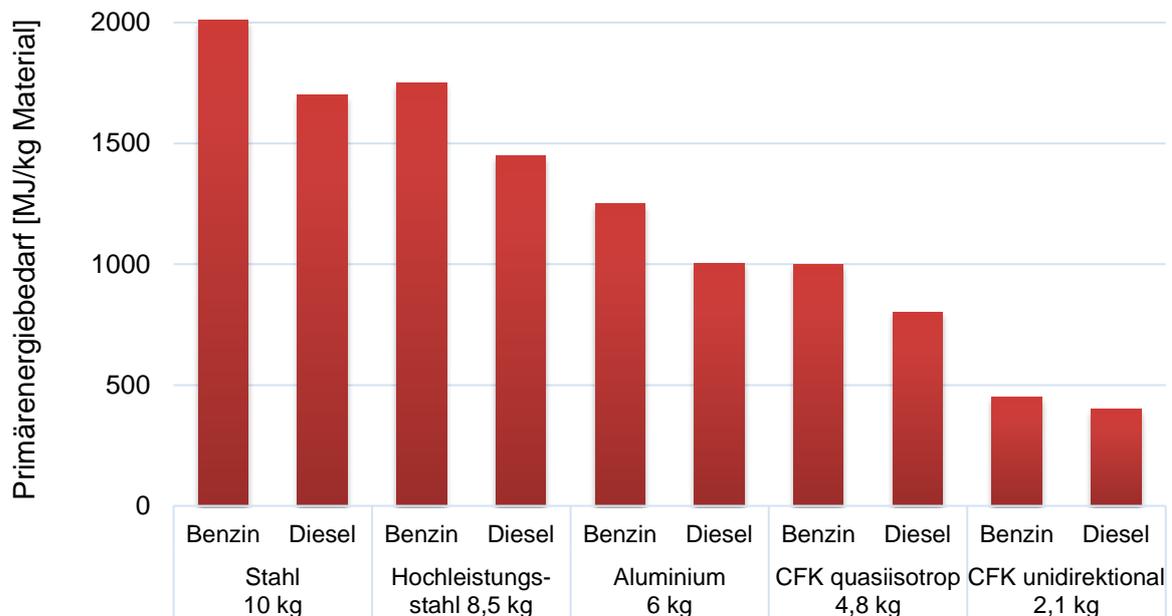


Abbildung 4.6: Primärenergiebedarf für die Nutzung verschiedener Werkstoffe und Fahrzeugantriebe bei einer Laufleistung von 150.000 km

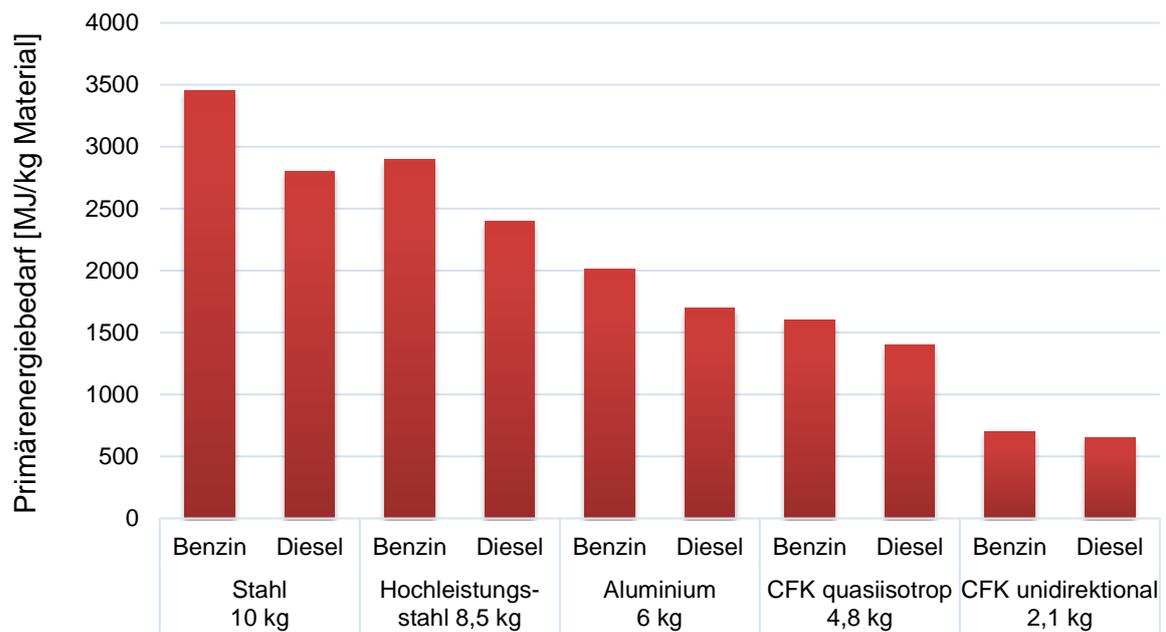


Abbildung 4.7: Primärenergiebedarf für die Nutzung verschiedener Werkstoffe und Fahrzeugantriebe bei einer Laufleistung von 250.000 km

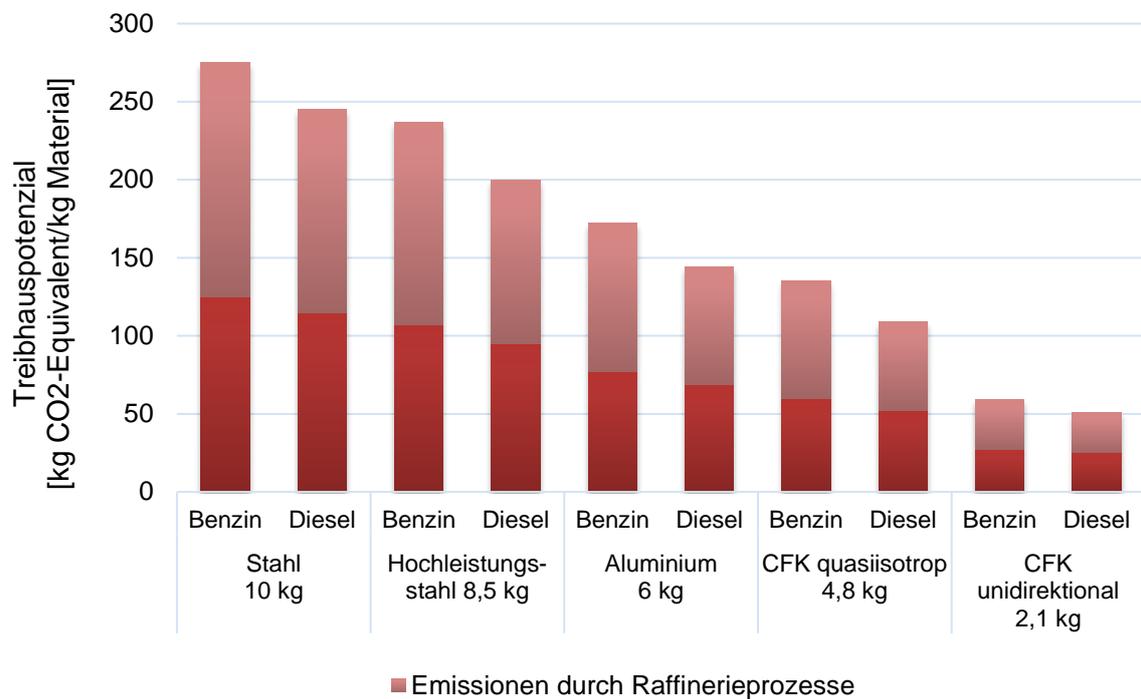


Abbildung 4.8: Treibhauspotenzial der Nutzung verschiedener Werkstoffe und Fahrzeugantriebe bei einer Laufleistung von 150.000 km

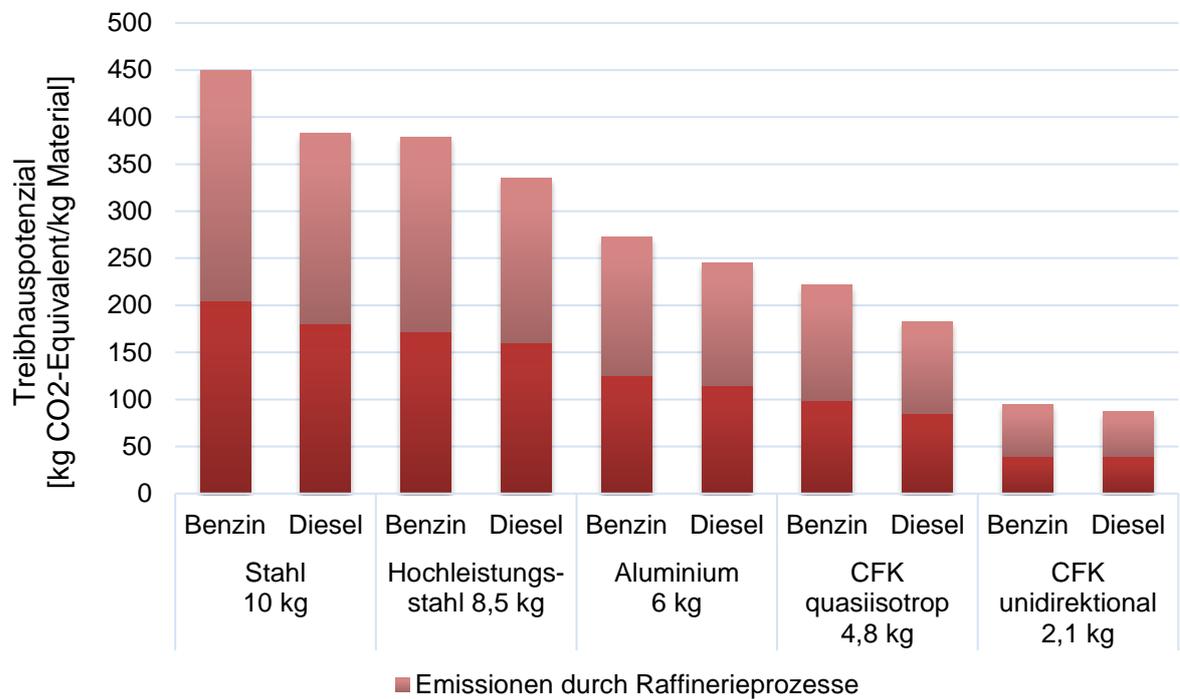


Abbildung 4.9: Treibhauspotenzial der Nutzung verschiedener Werkstoffe und Fahrzeugantriebe bei einer Laufleistung von 250.000 km

4.2.4 Ökologische Gesichtspunkte im End-of-Life und im Recycling

Im letzten Abschnitt des Lebenszyklus, dem sogenannten End-of-Life, werden durch die Wiederverwertung der eingesetzten Werkstoffe Primärenergie und Treibhauspotenzial zur Herstellung neuer Werkstoffe eingespart. So kann die nächste Herstellung der Werkstoffe sowohl energetisch als auch ökologisch weitestgehend entlastet werden.

Die Diagramme 4.10 und 4.11 zeigen jeweils den Primärenergiebedarf und das Treibhauspotenzial, welche durch das Recycling Werkstoffe eingespart werden können. Die Einsparung dieser Größen ist durch ein negatives Vorzeichen gekennzeichnet und kann zur jeweiligen Größe in der Herstellungsphase des Lebenszyklus addiert werden [50].

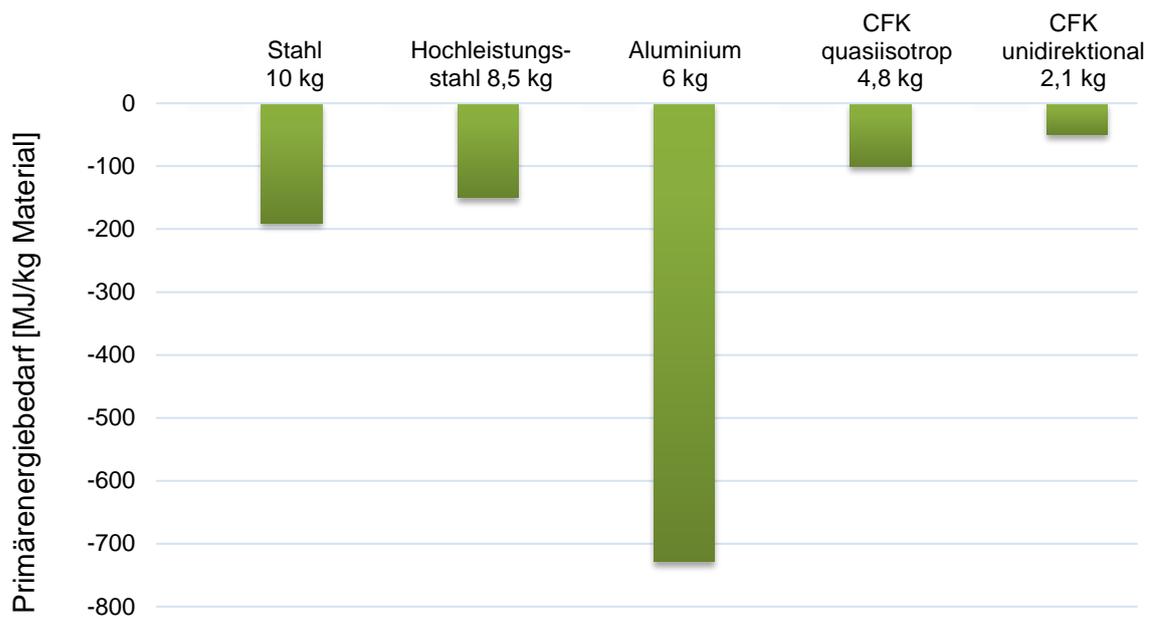


Abbildung 4.10: Primärenergiebedarf für das End-of-Life verschiedener Werkstoffe

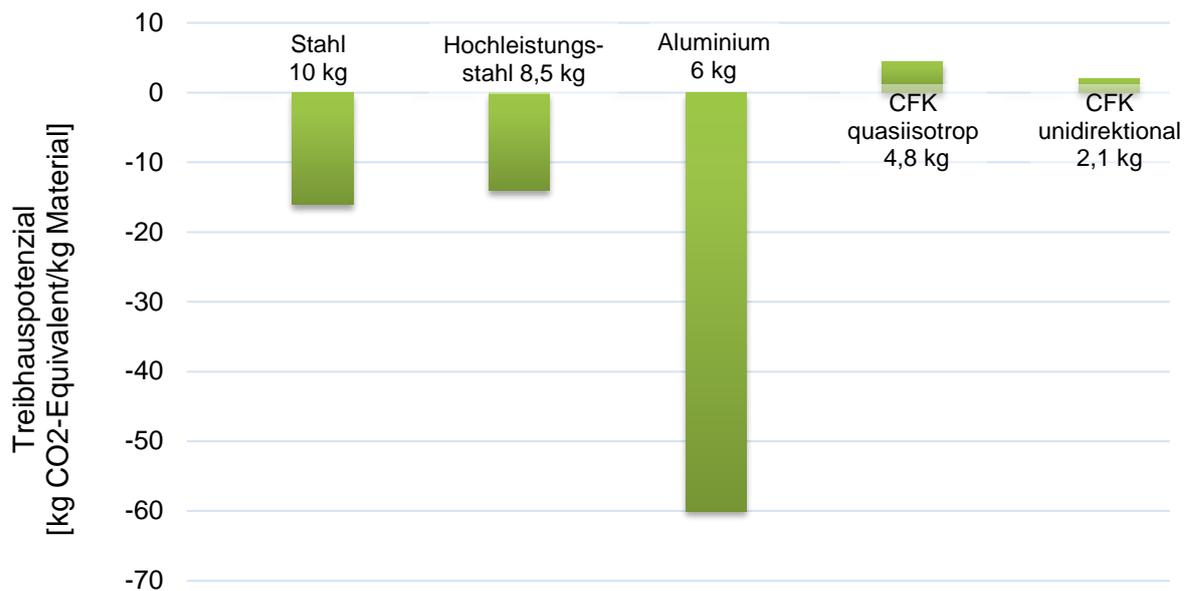


Abbildung 4.11: Treibhauspotenzial verschiedener Werkstoffe beim End-of-Life

Die größte Ersparnis, sowohl hinsichtlich der Primärenergie, als auch in Hinsicht auf das Treibhauspotenzial, bringt Aluminium mit sich. Generell besteht bei Aluminium eine Rezyklierungsrate von 95%. Im Allgemeinen lassen sich metallische Werkstoffe, hier Stahl, Hochleistungsstahl und Aluminium im Gegensatz zu CFK uneingeschränkt wiederverwerten ohne einen qualitativen Verlust aufzuweisen [49].

4.2.5 ökologische Gesichtspunkte im gesamten Lebenszyklus

Die Betrachtung des gesamten Lebenszyklus ergibt sich aus der Addition der einzelnen Abschnitte des Lebenszyklus und ermöglicht eine ökologische und energetische Bewertung unterschiedlicher Fahrzeugkonzepte. Die folgenden Darstellungen zeigen den Primärenergiebedarf und das Treibhauspotenzial für verschiedene Werkstoffe und Antriebe, wieder werden hier die Fahrleistungen von 150.000 km bzw. 250.000 km berücksichtigt

Die Diagramme 4.12 bis 4.15 verdeutlichen den besonders hohen Primärenergiebedarf für den Einsatz und Treibhauseffekt von quasiisotropen CFK. Diese Art von CFK eignet sich aus energetischer Sicht nicht für den Einsatz in Fahrzeugen. Die unidirektionale Variante von CFK hingegen weist einen, wenn auch nur wenig, geringeren Primärenergiebedarf als Stahl, Hochleistungsstahl und Aluminium auf. Den größten energetischen Nachteil bringt CFK in seiner Herstellung und seinem Recycling. Hier kann kaum Energie für den Primärenergiebedarf eingespart werden, zum Treibhauspotenzial trägt die Wiederverwertung sogar nachteilig bei. Die Herstellung und das Recycling bilden somit wichtige Stellschrauben zur Steigerung der Energieeffizienz für den Einsatz von CFK. Den Vorteil des Recyclings nutzt besonders Aluminium, aber auch die Wiederverwertung der anderen metallischen Werkstoffe wirkt sich vorteilhaft auf ihre Energieeffizienz aus.

Bei einer Fahrleistung von 250.000 km wird die hohe Energieeffizienz von unidirektionalem CFK deutlich. Verglichen mit der Fahrleistung von 150.000 km, wird bei der Fahrleistung von 250.000 km der Vorteil des Einsatzes von unidirektionalem CFK deutlicher. Bei einer Fahrleistung von 250.000 km kommt, gegenüber der Fahrleistung von 150.000 km, der Vorteil mehr zum Vorschein [49].

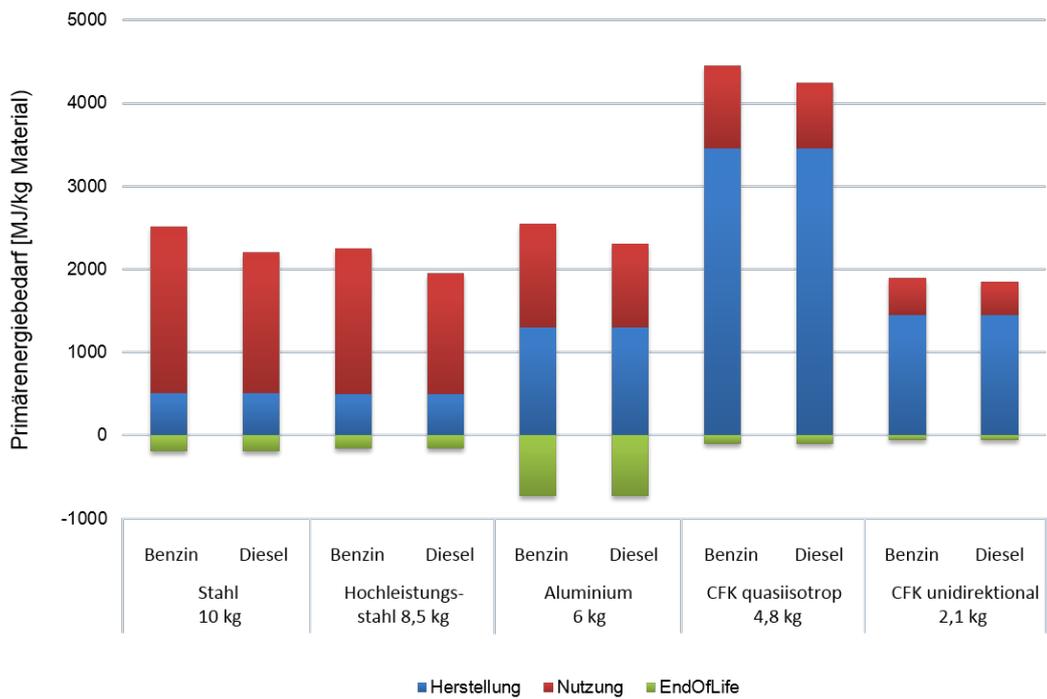


Abbildung 4.12: Primärenergiebedarf für die Nutzung verschiedener Werkstoffe und Antriebe bei einer Laufleistung von 150.000 km

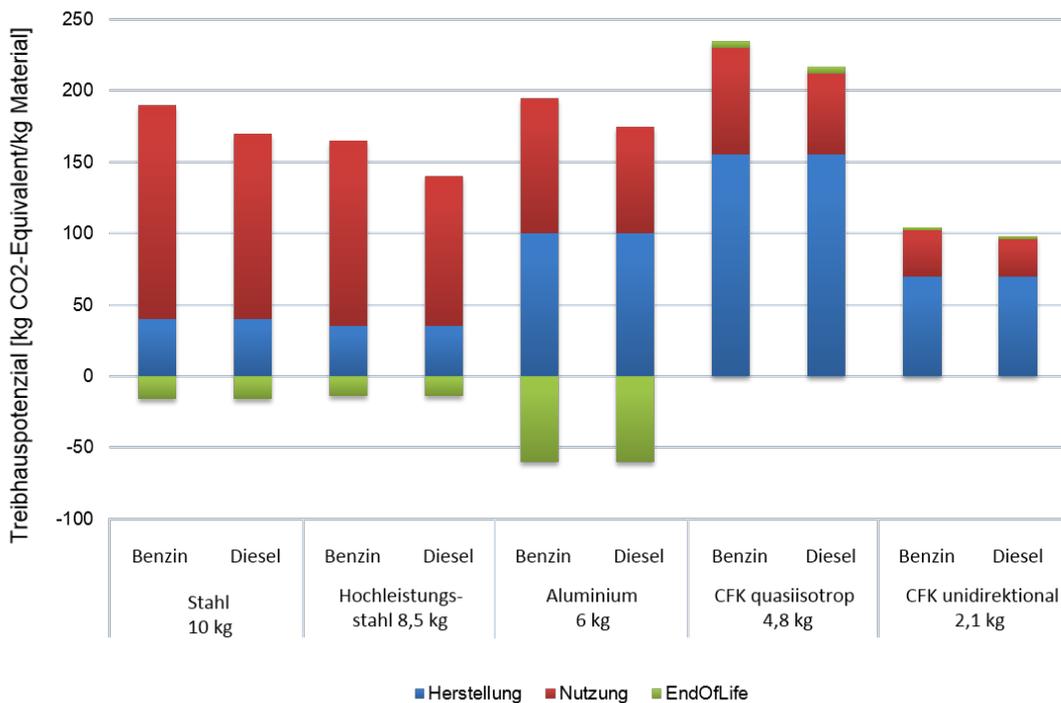


Abbildung 4.13: Treibhauspotenzial der Nutzung verschiedener Werkstoffe und Antriebe bei einer Laufleistung von 150.000 km

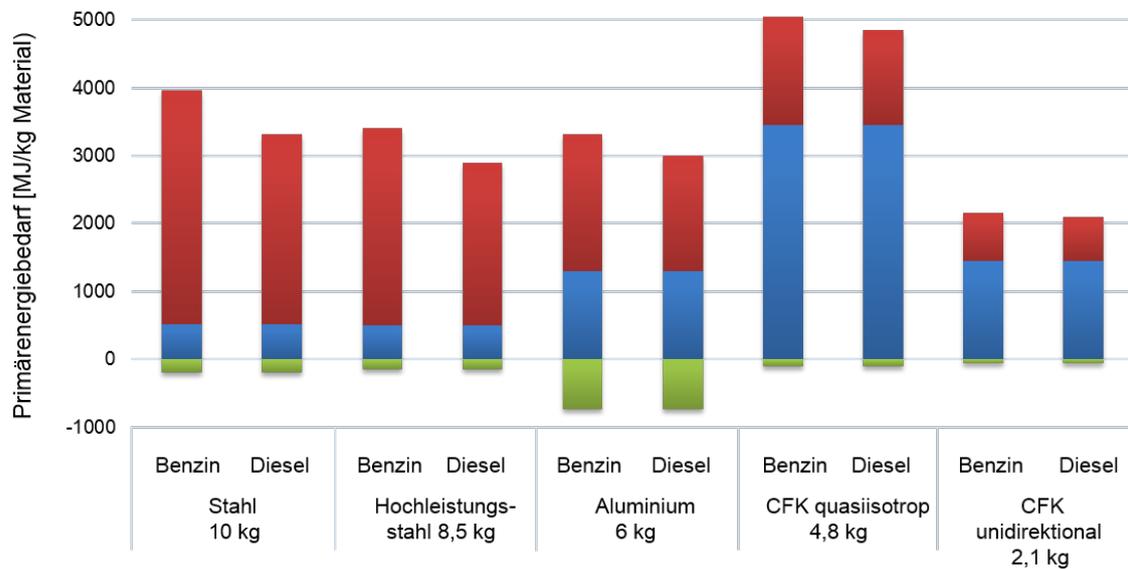


Abbildung 4.14: Primärenergiebedarf für die Nutzung verschiedener Werkstoffe und Antriebe bei einer Laufleistung von 250.000 km

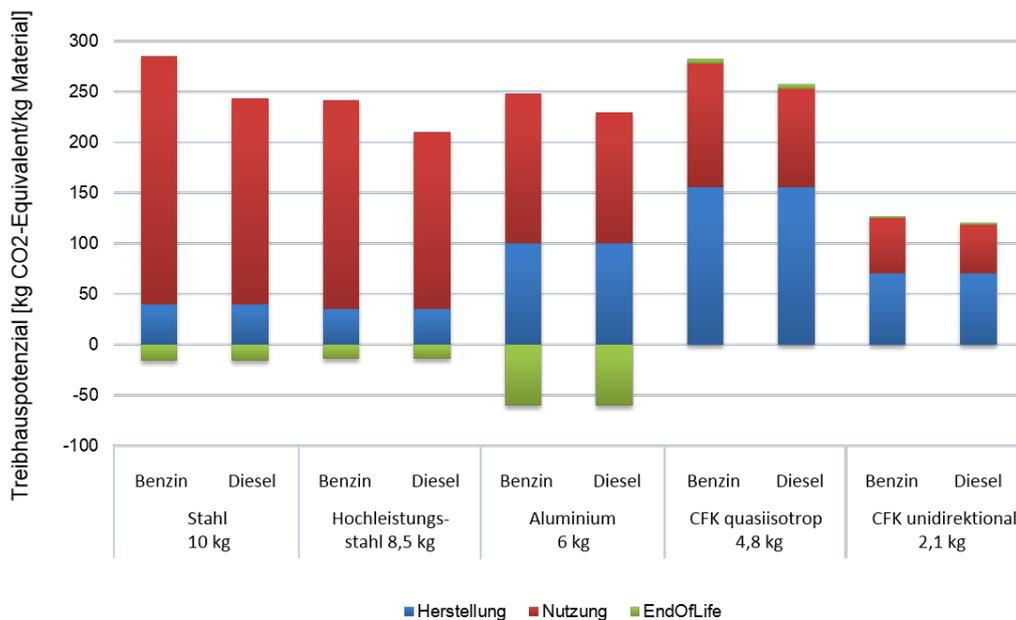


Abbildung 4.15: Treibhauspotenzial der Nutzung verschiedener Werkstoffe und Antriebe bei einer Laufleistung von 250.000 km

4.2.6 Auswertung des Life-Cycle-Assessment

Den geringsten Energieaufwand und das geringste Treibhauspotenzial bei der Gewinnung der Rohstoffe und in der Herstellung weist Stahl auf, gefolgt von Aluminium. Von den untersuchten Materialien weist CFK den größten Energieaufwand in seiner Herstellung auf, wobei dieser durch den Einsatz von Presuorfasern verringert werden kann. CFK besitzt in seiner Herstellung somit den höchsten massenspezifischen Primärenergiebedarf, Stahl hingegen den niedrigsten.

Bei der Nutzung hingegen, weist der Einsatz von CFK eine hohe Energieeffizienz auf, die metallischen Werkstoffe hingegen eine geringere Energieeffizienz.

Bei der Wiederverwertung bringt besonders Aluminium Vorteile mit sich. Die Rezyklierungsrate von 95% wirkt sich positiv auf den gesamten Produktlebenszyklus aus. Auch bei Stahl und Hochleistungsstahl kann durch das Recycling Energie eingespart werden. Bei beiden CFK-Werkstoffen hingegen kann ein sehr kleiner Anteil an Primärenergie eingespart werden. Bei allen metallischen Werkstoffen kann durch das Recycling Treibhausgase eingespart werden, die bei der nächsten Herstellung der Bauteile ausgestoßen würden. Bei CFK hingegen kommt es durch das energieaufwendige Recycling zu einer kleinen Erhöhung des Treibhauspotenzials.

Im Allgemeinen ist die Energieeffizienz je nach Betrachtung der Fahrleistung variabel. Während die Herstellung und das Recycling der Werkstoffe konstante Prozesse sind, ist die Nutzung von der variierbaren Fahrleistung abhängig. Erstreckt sich die Nutzungsphase nur über eine sehr geringe Fahrleistung, so können sich die metallischen Werkstoffe als nachhaltiger erweisen. Ab wann sich welcher Werkstoff energetisch rentiert und als nachhaltig bezeichnet werden kann, muss für jede Fahrleistung einzeln betrachtet werden.

Den gesamten Lebenszyklus betrachtend, lohnt sich der Einsatz von „nachhaltigen“ Werkstoffen, zu dem CFK oft automatisch zugeordnet wird, nicht immer. Bis zu einer Laufleistung von 150.000 km gibt es keinen signifikanten Unterschied zwischen Hochleistungsstahl und unidirektionalem CFK hinsichtlich der Energieeffizienz.

Bei einer höheren Laufleistung jedoch, lohnt sich der Einsatz von unidirektionalem CFK aus energetischer Sicht am meisten, selbst wenn die Herstellung und das Recycling der Werkstoffe nicht optimiert werden würde [49].

Ob es sich wirtschaftlich rentiert CFK einzusetzen kann mit Hilfe der Life-Cycle-Costing (LCC) beantwortet werden. Diese Methode ist ein Pendant zum LCA und bietet mit der ganzheitlichen, wirtschaftlichen Betrachtung aller Produktlebenszyklusabschnitte eine Abwägung, ob und inwiefern sich der Einsatz eines Produktes ökonomisch lohnt [55].

4.3 Optimierungspotenziale

Die Ergebnisse der Lebenszyklusanalyse verdeutlichen besonders für faserverstärkte Kunststoffe die Notwendigkeit energieeffizienter Herstellverfahren. Diese in der Nutzung sehr energiesparenden Werkstoffe weisen in ihrer Herstellung und Verarbeitung einen im Vergleich zu Herstellverfahren metallischer Werkstoffe erhöhten Energieverbrauch und hohe Treibhausemissionen auf und sind daher stark optimierungsbedürftig.

Immer öfter werden zukünftige Herstellungsverfahren darauf ausgelegt, mehrere Fertigungsschritte zu einem Prozessschritt zusammenzufassen. Neben der Einsparung des Energiebedarfs für die Herstellung ermöglichen derartige Verfahren eine Reduktion der Zykluszeit [56, 57]. Einige Beispiele für solche Verfahren sind das einstufige In-Mould-Impregnation-Verfahren, die Hydroform-Hybridtechnologie.

Bei dem In-Mould-Impregnation-Verfahren finden die Fertigungsschritte Erwärmung, Imprägnierung und Umformung finden gleichzeitig in einem Prozessschritt statt, weshalb dieses Verfahren auch als das sogenannte einstufige Direktverfahren bekannt ist [58]. Bei der PMH-Technologie, die erstmals von der Daimler AG eingesetzt wird, kommen zwei innovative Fertigungsverfahren zum Einsatz: Innenhochdruck-Umformen (IHU) und Spritzgießen. Für diese innovative Leistung erhält der Automobilhersteller 2013 von der internationalen Gesellschaft für Kunststofftechnik e.V. den Grand Innovation Award. Hauptsächlich werden mit dieser Technologie Frontendträger und Cockpitträger hergestellt [59].

5 Fazit und Ausblick

Die zunehmende Bedeutung der Ressourcenschonung, die damit verbundene notwendige Senkung des Kraftstoffverbrauchs eines Fahrzeugs und nicht zuletzt das Ziel Emissionen anthropogener Treibhausgase zu senken, führen zu dem Bestreben das Gewicht eines Fahrzeugs zu reduzieren. Die mit dem Entwicklungsfortschritt zunehmenden Kunden- und Sicherheitsanforderungen sollen dabei stets erfüllt werden. Letztere zeichnen sich durch hohe Zugfestigkeiten bei hohen Bruchdehnungen aus, die bei einer Gewichtserparnis nicht durch Voll-Werkstoffe erreicht werden können. Diese würden entweder eine Gewichtserhöhung (Stahl) oder eine zu geringe Bruchdehnung (CFK) verursachen.

Als Lösung werden Multi-Material-Design-Konzepte angewandt. Der Grundgedanke dabei ist es, Kombinationen aus verschiedenen Werkstoffen zu verwenden, um jeweils ihre werkstofflichen Stärken stellenweise in einem Bauteil zu vereinen, so dass gleichzeitig Material und somit Gewicht eingespart werden kann. Neben dem Ziel, die Crashperformance zu verbessern, bringt der Einsatz multipler Werkstoffe durch die Einsparung von Gewicht Sekundäreffekte wie die Senkung des Kraftstoffverbrauchs, die Verbesserung der aerodynamischen Eigenschaften durch konstruktive Formfreiheit und die Verbesserung der Fahrdynamik mit sich. Letztere äußert sich durch spontanes Beschleunigen und Bremsen.

Durch den Einsatz multipler Werkstoffe lässt sich das für die Crashperformance charakteristische spezifische Energieabsorptionsvermögen steigern. Die Hybridisierung von Metall durch faserverstärkten Kunststoff und der Aufbau eines Verbundes in Sandwichbauweise zeigen einen Anstieg des spezifischen Energieabsorptionsvermögens. Die Sandwichbauweise ermöglicht durch den Einsatz eines Kernmaterials geringer Dichte eine Gewichtserparnis bei gleich bleibendem Flächenträgheitsmoment. Die Biege- und Beulsteifigkeiten eines solchen Bauteils sind demnach besser. Weiterhin bieten Sandwichstrukturen, die mit einem Schaumkern versehen sind ein hohes Energie- und Schallabsorptionsvermögen und eine geringe Wärmeleitfähigkeit. Außerdem ist das Eigenschaftsprofil durch die variierbare Porosität des Schaums durch chemische Prozesse einstellbar, wodurch die

Werkstoffe je nach Anwendung abgestimmt werden können. Durch die Variabilität der Schichtdicken können Eigenschaftsprofile auf die gewünschten Bauteilanforderungen abgestimmt werden.

Die unterschiedlichen Werkstoffe können durch formschlüssige und/oder stoffschlüssige Verbindungen zu einem Verbund gefügt werden. Die gängigste Form, Verbindungen zwischen Werkstoffen zu schaffen erfolgt über Klebstoffe. Ein hohes Zukunftspotenzial wird dem thermischen Direktfügen zugeschrieben. Dieses Verfahren bietet im Vergleich zur Klebtechnik geringere Schadstoffemissionen, kurze Prozesszeiten, eine bessere Werkstofftrennung und eine selbst nach Alterung gute Verbundfestigkeit.

Eine energetische Bewertung der Werkstoffe im Rahmen des Life-Cycle-Assessment zeigt zwar, dass der Einsatz multipler Werkstoffe im Automobilbau im Gesamten nachhaltiger ist, jedoch bringt dieser gegenüber konventionellen Konzepten erhöhte Schadstoffemissionen in der Herstellung und im Recycling mit sich. Ansätze zur energetischen Optimierung der Herstellverfahren von multiplen Werkstoffen zeichnen sich durch die Zusammenfassung mehrerer Fertigungsschritte zu einem einzigen Prozessschritt und somit durch die Verkürzung der Prozesszeiten aus.

Zukünftige Untersuchungen sollten demnach Möglichkeiten zur Steigerung der Energieeffizienz von Fertigungsverfahren behandeln. Auch sollte angestrebt werden, Recyclingverfahren zu entwickeln, die zum einen geringere Treibhausgasemissionen verursachen und zum anderen durch eine höhere Rezyklierungsrate Einsparungen der Primärenergie für den nächsten Herstellungsprozess der Werkstoffe ermöglichen. Um das Problem der Rezyklierbarkeit zu vermindern, sollte der Einsatz von biobasierten Kunststoffen in Betracht gezogen werden.

6 Literatur- und Quellenverzeichnis

- [1] Kaiser, O.S.; Krauss, O.; Seitz, H.: Kurzanalyse Nr. 17: Ressourceneffizienz im Leichtbau. VDI Zentrum Ressourceneffizienz Publikationen. 2016.
- [2] Amtsblatt der Europäischen Union. Verordnung (EG) Nr. 443/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. April 2009 zur Festsetzung von Emissionsnormen für neue Personenkraftwagen im Rahmen des Gesamtkonzepts der Gemeinschaft zur Verringerung der CO₂-Emissionen von Personenkraftwagen und leichten Nutzfahrzeugen. 2009.
- [3] Kraftfahrt-Bundesamt. Pressemitteilung Nr. 19/2017 – Fahrzeugzulassungen im Dezember 2016 – Jahresbilanz. Thomsen, D. C. 2017.
- [4] Friedrich, H.E.: Leichtbau in der Fahrzeugtechnik. ATZ/MTZ-Fachbuch. Springer Vieweg. Wiesbaden. 2017.
- [5] Haken, K.-L.: Grundlagen der Kraftfahrzeugtechnik. Hanser Verlag. München. 2015.
- [6] Herzog, K.: Vorlesungsskript Kraftfahrzeugantriebe. Energiebedarf eines Kraftfahrzeugs. Technische Hochschule Mittelhessen. Gießen. 2015.
- [7] Braess, H.-H.: Handbuch Kraftfahrzeugtechnik. Springer Vieweg. Wiesbaden. 2013.
- [8] Ersoy, M. Fahrwerkhandbuch: Grundlagen-Fahrdynamik- Fahrverhalten - Komponenten -Elektronische Systeme-Fahrerassistenz-Autonomes Fahren- Perspektiven. Springer Fachmedien. Wiesbaden. 2017.
- [9] Kramer, F.: Passive Sicherheit von Kraftfahrzeugen. Grundlagen-Komponente-Systeme. Springer Vieweg. Wiesbaden. 2017.
- [10] Grellmann, W.; Seidler, S.: Kunststoffprüfung. Carl Hanser Verlag München Wien, 2005.
- [11] Flemming, M.; Roth, S.: Crashverhalten von Faserverbundwerkstoffen und –strukturen. Springer-Verlag Berlin. Heidelberg. 2003.
- [12] Flügge, W.: Vortrag Füge-technische Herausforderungen beim Multi-Material-Design. Salzgitter Mannesmann Forschung. Dresden. 2015.

- [13] Skarics, R.: Wie das Leergewicht durch Extras steigen kann. Heise-online. 2015. Online-Artikel. <https://www.heise.de/autos/artikel/Die-Zubehoerfalle-Wie-Extras-das-Leergewicht-beeinflussen-2787540.html>; abgerufen am 18.07.2017; 17:38.
- [14] Scheik, S.: Thermisches Direktfügen von Metall und Kunststoff – Eine Alternative zur Klebtechnik? Hrsg. Siebenpfeiffer, W.: Leichtbau-Technologien im Automobilbau. Springer Vieweg. Wiesbaden. 2014.
- [15] Menzel, S.; Landgrebe, D.; Mayer, B.; Falzen von Baugruppen aus FVK und Metall. Fraunhofer IWU. EFB Forschungsbericht. Hannover. 2016.
- [16] Dietrich, R.: Delta-Alpha-Problematik bei 1K Mischbauklebungen aus Stahl, Aluminium und Faserverbundwerkstoffen. BMW AG. Hrsg.: Intelligente Transport und Verkehrssysteme und –dienste Niedersachsen e.V. Wolfsburg. 2014.
- [17] Küsters, K.: Hylight – Innovative Hybrid-Leichtbautechnologie für die Automobilindustrie. Institut für Kunststoffverarbeitung Aachen. 2011.
- [18] Butthoff, H.: Hybridtechnologien – Fügetechnik für die Fertigung der Zukunft. Abschlussbericht erstellt für BMBF/DLR vom IGZ-Kompetenzzentrum Fügetechnik an der SLV-Halle GmbH. Halle. 2005.
- [19] Disse, T.; Maciej, M.; Meschut, G.: Kleben und Hybridfügen von Leichtbaustrukturen für den Automobilbau. Hrsg. Adhäsion Kleben & Dichten. 2004
- [20] Sahr, C.; Berger, L.; Lesemann, M.; Urban, P.; Goede, M.: Systematische Werkstoffauswahl für die Karosserie des Super-Light Car. Wiesbaden 2010.
- [21] Heymann, K.: Metallisierung Handbuch für Theorie und Praxis, Eugen G. Leuze Verlag D-7968 Saulgau württe, 1991.
- [22] Flock, D.: Wärmeleitungsfügen hybrider Kunststoff-Metall-Verbindungen. Univ. Dissertation an der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen. 2011.
- [23] Gleich, H.: Zusammenhang zwischen Oberflächenenergie und Adhäsionsvermögen von Polymerwerkstoffen am Beispiel von PP und PBT und deren Beeinflussung durch die Niederdruck-Plasmatechnologie. Univ. Dissertation an der Universität Duisburg-Essen, Abteilung Maschinenbau. Duisburg. 2004.
- [24] Achereiner, F.: Verbesserung von Adhäsionseigenschaften verschiedener Polymerwerkstoffe durch Gasphasenfluorierung. Univ. Dissertation an der Universität Erlangen-Nürnberg. Erlangen. 2009.

- [25] Nikolova, D.: Charakterisierung und Modifizierung der Grenzflächen im Polymer-Metall-Verbund. Unv. Dissertation an der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg. Halle. 2005.
- [26] Lohse, H.: Kleben von Verbundwerkstoffen. Welche Kriterien müssen eingehalten werden? In: Adhasion – Kleben und Dichten. Springer Fachmedien Wiesbaden. 2010.
- [27] Li, Y.; Lin, Z., Jiang, A.; Chen, G.: Use of high strength steel sheet for lightweight and crashworthy car body, Materials and Design 24, 2003.
- [28] Tai, Y.S.; Huang, M.Y.; Hu, H.T.: Axial compression and energy absorption characteristics of high-strength thin-walled cylinders under impact load, Theoretical and Applied Fracture Mechanics. 2004.
- [29] Bambach, M.; Elchalakani, M.; Zhao, X.: Composite steel-CFRP SHS tubes under axial impact, Composite Structures 87. 2009.
- [30] Liedtke, B.: Faserverbundkunststoff-/Metall-Hybridstrukturen im PKW-Rohkarosseriebau, unv. Dissertation an der Technischen Hochschule Aachen. 2002.
- [31] <https://www.elringklinger.de/de/unternehmen/einblicke/kunststoff-leichtbauteile-fuer-die-karosserie>; abgerufen am 24.08.2017, 17:44
- [32] Pressemeldung der ThyssenKrupp AG vom 19.06.2015, ThyssenKrupp Carbon Components und Maxion Wheels kooperieren bei Leichtbau-Rädern. <https://www.thyssenkrupp.com/de/newsroom/pressemeldungen/press-release-47384.html>
- [33] Becker, H.: BMW Innovation Day – Carbon Fiber Components On Display. BMW Blog. 2014. <http://www.bmwblog.com/2014/02/24/bmw-innovation-day-carbon-fiber-components-display/>; abgerufen am 28.09.2017; 15:23
- [34] Vink, D.: Hybridleichtbau ist nicht aufzuhalten. 2016. Online-Artikel: <http://industrieanzeiger.industrie.de/themen/leichtbau/hybridleichtbau-ist-nicht-aufzuhalten/#slider-intro-2>; abgerufen am 29.09.2017; 14:47
- [35] BMW Voll-CFK-Rad. Online-Artikel: <https://www.motor-talk.de/news/hitze-ist-schlimmer-als-ein-bordstein-t4924364.html>; abgerufen am 28.09.2017; 16:13
- [36] Das geflochtene Carbon-Rad für den Porsche 911 Turbo S. Online-Artikel: <http://autophorie.de/2017/08/18/porsche-carbon-rad/> abgerufen am 28.09.2017; 19:44

- [37] AVK Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe. Pressemitteilung vom 28.11.2016. Vier Preisträger erhalten Innovationspreise der AVK. <http://industrieanzeiger.industrie.de/themen/leichtbau/hybridleichtbau-ist-nicht-aufzuhalten/#slider-intro-2>; abgerufen am 30.09.2017
- [38] Kriescher, M.; Roettiger, J.: Vortrag Einsatzmöglichkeiten von Stahl-Hybrid-Strukturen im Crashfall. DLR Institut für Fahrzeugkonzepte. VDI Konferenz Stahl im PKW. Essen. 2012.
- [39] Quadbeck, P.: Offenzellige Metallschäume. Informationsblatt des Fraunhofer-Instituts für Fertigungstechnik und angewandte Materialforschung (IFAM). Dresden.
- [40] Böger, T.; Middelhaue, O.: Die neue Art, leicht zu bauen. ThyssenKrupp techforum. Ausgabe 1. Hrsg.: ThyssenKrupp AG, Corporate Center Technology, Innovation & Quality. Essen. 2013.
- [41] ThyssenKrupp InCar plus. Einsatzpotenzial von Litecor in der Karosserie. Springer Vieweg Wiesbaden. 2014.
- [42] Schaal, S.: Leichtbau im Auto - Weshalb Stahl noch nicht zum alten Eisen gehört. Wirtschaftswoche Online. Online-Artikel: <http://www.wiwo.de/unternehmen/auto/leichtbau-im-auto-ein-sandwich-aus-stahl-und-plastik/11168212-2.html>; abgerufen am 27.09.2017; 13:02.
- [43] Kreuzer, M.: Steer-By-Wire trifft Tribond-Stahl: thyssenkrupp lud zum Driving Event. 2017. Online-Artikel: <https://www.mobilegeeks.de/artikel/thyssenkrupp-steer-by-wire/>; abgerufen am 10.10.2017; 18:58.
- [44] ThyssenKrupps TriBond – ein Gewinner. Welt der Fertigung. Online-Artikel: <http://www.weltderfertigung.de/archiv/jahrgang-2015/ausgabe-maerz-2015/thyssenkrupps-tribond--ein-gewinner.php>; abgerufen am 10.10.2017; 21:56.
- [45] ThyssenKrupp Steel Europe AG: Tribond - Produktinformation für hochfesten und hochduktilen Werkstoffverbund. Version 01. 2016.
- [46] ThyssenKrupp Steel Europe AG: Tribond – hochfest und hochduktil. Maßgeschneiderter Werkstoff für die Warmumformung. 2015.
- [47] DIN EN ISO 14040:2009-11. Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen (ISO 14040:2006).
- [48] Schacht, M.: Ganzheitliche Betrachtung – Energie- und CO₂-Reduzierung in der Herstellung der Karosserie. Hrsg: Tecklenburg, G.: Karosseriebautage Hamburg. 13. ATZ-Fachtagung. Springer Fachmedien. Wiesbaden. 2014.

- [49] Geiger, R.: Leichtbau in Mobilität und Fertigung – Ökologische Aspekte. Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA. Stuttgart. 2012.
- [50] Kaltschmitt, M.: Umweltbewertung für Ingenieure: Methoden und Verfahren. Springer Vieweg. Berlin. 2015.
- [51] Stichling, J.; Hasenberg, V.: Recycling im Automobil-Leichtbau. PE International. Leinfelden-Echterdingen. 2010.
- [52] S. Knöfel · E. Schüler-Hainsch Forschung und Entwicklung, Daimler AG, Sindelfingen, Deutschland.
- [53] Umweltbericht 2002. DaimlerChrysler auf dem Weg zu einer nachhaltigen Mobilität. Herausgegeben. v. Daimler AG. Stuttgart. 2002.
- [54] Der Golf. Umweltprädiat – Hintergrundbericht. Hrsg. Volkswagen AG. Wolfsburg.
- [55] Günther, E.; Will, G.: Life Cycle Costing und Life Cycle Assessment – eine übersicht bestehender Konzepte und deren Anwendung am Beispiel von Abwasserpumpstationen. Diplomarbeit. Technische Universität Dresden. 2006.
- [56] Reddemann, J: Beitrag zum energieeffizienten Einsatz von Thermoplast-CFK im Automobilbau, Unv. Dissertation Universität Erlangen-Nürnberg. 2016.
- [57] Reddemann, J.; Seifert, H.: Energieeffiziente Herstellung von Thermoplast-CFK Bauteilen im einstufigen Direktverfahren. VDI Kongress Kunststoffe im Automobilbau. Mannheim. 2017.
- [58] ElringKlinger AG. Kunststoff-Leichtbauteile für die Karosserie. Hart im Nehmen. Online-Artikel: <https://www.elringklinger.de/de/unternehmen/einblicke/kunststoff-leichtbauteile-fuer-die-karosserie>; abgerufen am 17.05.2017; 19:06.
- [59] Pressemitteilung der Daimler AG vom 18.10.2013. Weltweit führend bei Polymermetallhybrid-Technologie: Mercedes-Benz Werk Hamburg erhält hohe Auszeichnungen für wegweisendes Produktionsverfahren.

A Anhang

Die in diesem Abschnitt vorliegenden Inhalte sind keine von mir selbst erbrachten Leistungen. Es handelt sich hierbei um Daten- und Informationsblätter von kenntlich gemachten Produktherstellern.