

# Leichtbau in der Nutzfahrzeugindustrie

eine Studie des Lehrstuhls für Konstruktion im Maschinen- und Apparatebau  
der Technischen Universität Kaiserslautern

Dr.-Ing. Nicole Stephan



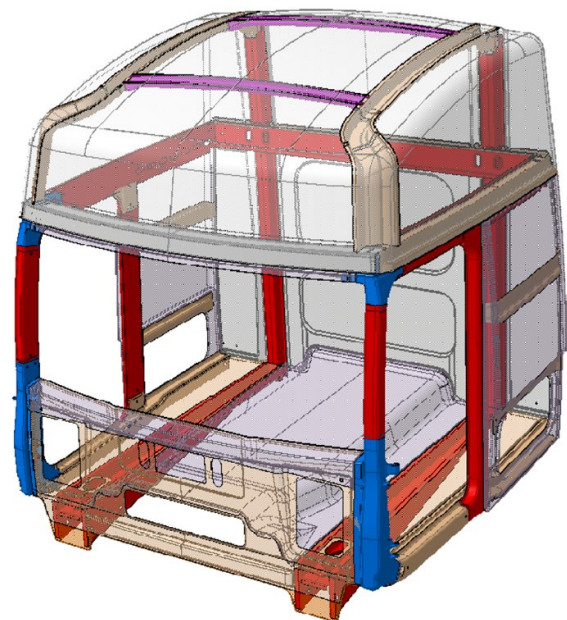
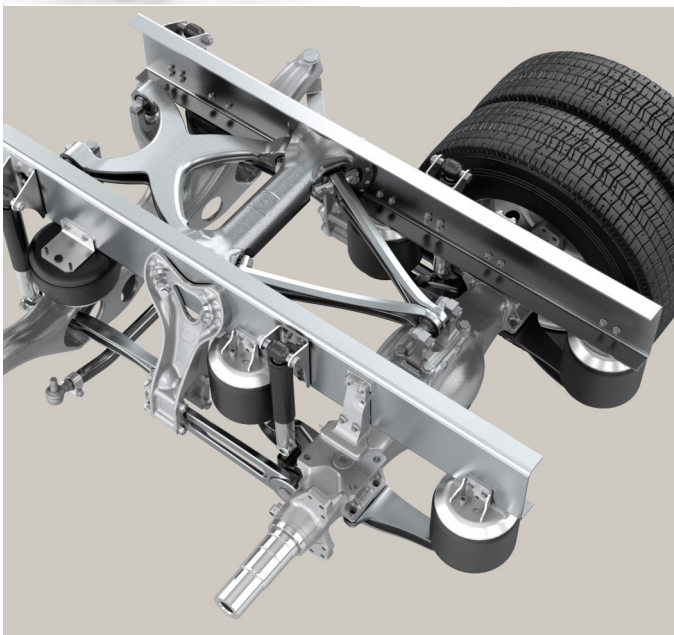
**commercial vehicle alliance**  
kaiserslautern



**TECHNISCHE UNIVERSITÄT  
KAISERSLAUTERN**



**KIMA**  
Lehrstuhl für Konstruktion im  
Maschinen- und Apparatebau



Im Auftrag des

**CVC Südwest**

Gefördert durch:



**Rheinland-Pfalz**  
Wachstum durch Innovation

Version 1.1



**S**teigende Dieselpreise, die Forderung nach CO<sub>2</sub>-Reduktion und die gesetzlich vorgeschriebene Euro 6-Abgasnormen zwingen die Hersteller von Lastkraftwagen und Trailern schon seit Jahren dazu, sich mit der Reduzierung des Fahrzeuggewichts auseinanderzusetzen.

„Leichtbau“ ist die Herausforderung, der sich die Branche stellen muss. Industrie, Forschung und Entwicklung befassen sich mit Werkstoffen, mit denen sich das Fahrzeuggewicht verringern lässt, ohne dadurch Sicherheit und Stabilität einzubüßen und die Produktionskosten in die Höhe zu treiben. Aufgrund steigender Stahlpreise und verschärfter Emissionsvorschriften beschäftigen sich inzwischen auch Land- und Baumaschinenhersteller mit alternativen Werkstoffen. Grund genug für den CVC, das Leitprojekt „Alternative Werkstoffe der Zukunft“ aufzusetzen, in dem Lkw-, Sonderfahrzeug- und Hersteller mobiler Arbeitsmaschinen mit Zulieferunternehmen und Wissenschaft zusammenarbeiten.

Gerade kleine und mittelständische Zulieferbetriebe partizipieren und profitieren im CVC vom Wissensaustausch mit den Herstellern und anderen Zulieferunternehmen. Es gibt inzwischen zahlreiche Beispiele dafür, dass mittelständische Zulieferunternehmen Innovationen bei den im CVC engagierten Herstellern befördert haben oder den CVC als Plattform für den Markteintritt und das Wachstum mit innovativen Produkten nutzen konnten.



Dr. Barbara Jörg,  
Geschäftsführerin der CVC Südwest GmbH



## AUSGANGSSITUATION

**S**owohl Politik als auch Kunden verlangen hierzulande von den Nutzfahrzeugh Herstellern nach Fahrzeugen, die ökologisch und ökonomisch auf höchstem Niveau rangieren. Hintergrund sind u.a. die gesetzlichen Regelungen, die regelmäßig erneuert werden und die Hersteller zum Handeln zwingen.

Die Einführung der Euro-6-Schadstoffnorm erfordert ab diesem Jahr erheblich geringere Emissionen bei Diesel-Lastkraftwagen. Im Vergleich zu der Euro-5-Norm müssen der Partikel ausstoß um 66% auf 10 mg/kWh und die Stickoxide um 80% auf 400 mg/kWh reduziert werden. Auch die Hersteller von mobilen Arbeitsmaschinen stehen einer verschärften Abgasgesetzgebung gegenüber. Die in diesem Bereich relevante Richtlinie TIER 4 final beschränkt ab 2014 die zulässigen Grenzwerte für Partikel ausstoß und Stickoxide auf nur noch 10% der noch 2010 zulässigen Werte. [1,2] Diese gesetzlichen Vorgaben erfordern technische Maßnahmen wie z. B. eine Abgasrückführung und

Abgasnachbehandlung. Diese zusätzlichen Komponenten, die einerseits die Emission von Partikeln, Feinstaub und Stickoxiden reduzieren, führen andererseits zu einer Gewichtszunahme von bis zu 400 kg und somit auch zu einer Erhöhung des Kraftstoffverbrauchs und damit verbunden zu einer Steigerung des klimaschädlichen CO<sub>2</sub>-Ausstoßes. [3,4] Der CO<sub>2</sub>-Ausstoß kann auch mit Hilfe alternativer Antriebskonzepte reduziert werden, wodurch aber in der Regel wieder das Fahrzeuggesamtgewicht ansteigt.

Neben der Forderung nach umweltfreundlichen, kraftstoffsparenden Fahrzeugen rücken auch die Senkung der Betriebskosten und die Steigerung der Nutzlast immer weiter in den Vordergrund. Auch die Anforderungen hinsichtlich Sicherheit und Komfort nehmen weiter zu. Der Einsatz neuer Sicherheitstechniken bzw. Komfortausstattungen führt i.d.R. jedoch auch zu einer Erhöhung des Gesamtgewichts und damit zu einem höheren Kraftstoffverbrauch. Um die Effizienz der Fahrzeuge unter den genannten Bedingungen beizubehalten, muss das entstandene

Mehrgewicht ausgeglichen oder noch besser zur Steigerung der Effizienz verringert werden. Dies lässt sich nur durch umfangreiche Leichtbaumaßnahmen realisieren. In der Regel ist eine Optimie-

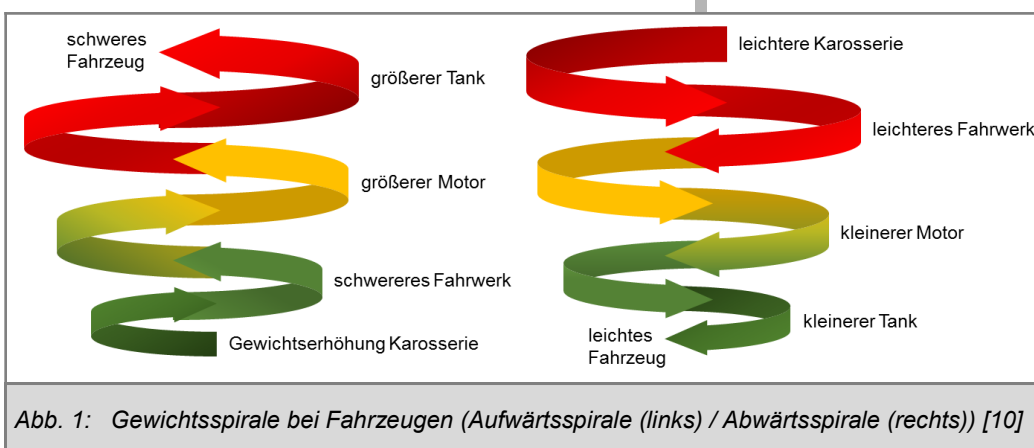


Abb. 1: Gewichtsspirale bei Fahrzeugen (Aufwärtsspirale (links) / Abwärtsspirale (rechts)) [10]

## AUSGANGSSITUATION

rung der tragenden Struktur alleine nicht ausreichend. Großes bieten auch Leichtbaumaßnahmen an ungefederten Massen und rotierenden Elementen, z.B. des Motors und Antriebsstranges oder aber auch großen und schweren Bauteilen, wie z.B. des Motorblocks [5]. Hierbei ist zu beachten, dass die alleinige Materialsubstitution nicht ausreichend ist, sondern auch Fertigungs- und Fügeverfahren und konstruktive Maßnahmen berücksichtigt werden müssen.

Obwohl die Nutzfahrzeugbranche bereits begonnen hat, ihre Produkte den Forderungen anzupassen, bleiben ungenutzte Potentiale, die bei künftigen Entwicklungen berücksichtigt werden sollten. Der Einsatz verschiedener Leichtbaumaßnahmen kann die Nutzfahrzeughersteller bei der Bewältigung der o.g. Herausforderungen unterstützen. Die Möglichkeiten Bauteile effektiver zu gestalten, reichen von konstruktiven Leichtbaumaßnahmen über Funktionsintegration bis hin zu dem Einsatz alternativer Werkstoffe. Branchenübergreifend ist gemäß der Studie „Lightweight, heavy impact“ beim Einsatz von Leichtbaumaterialien mit einem jährlichen Wachstum von 8% zu rechnen. Nach Aussage von verschiedenen Experten ist der Leichtbau somit als branchenübergreifende Schlüsseltechnologie zur Erhaltung und Stärkung des Wettbewerbsvorsprung anzusehen. [5,6]

Zwar findet bereits eine Vernetzung zwischen den verschiedenen Industriebranchen statt, je-

doch sollte diese zum Erreichen der oben genannten Ziele deutlich ausgebaut und gestärkt werden [6]. Da sich die Automobilbranche schon seit geraumer Zeit mit dem Thema beschäftigt, ist es von Vorteil auf deren Wissen zurückzugreifen und erprobte Anwendungen in der Nutzfahrzeugindustrie zu adaptieren. Einige dieser Ideen wurden auch bereits in der Nutzfahrzeugindustrie erfolgreich umgesetzt und führten zur Verbesserung der entsprechenden Komponenten. Im Vordergrund standen dabei die Konstruktion und deren Optimierung nach leichtbautechnischen Aspekten, sowie der Einsatz alternativer Werkstoffe.

Eine Umfrage unter den CVC-Mitgliedern zeigte, dass in den vertretenen Unternehmen zwar großes Interesse an leichtbauspezifischen Themen besteht, aber vielfach noch relativ geringe Kompetenzen in den Unternehmen vorhanden sind. Des Weiteren zeigte dieselbe Befragung, dass auch bei Leichtbaukonstruktionen nach wie vor Stahl der am meisten verwendete Werkstoff ist. Kunststoffe oder Verbundwerkstoffe und selbst Aluminium werden in den befragten Unternehmen bislang nur zu einem relativ geringen Anteil verwendet.

Die folgende Studie soll einen Überblick über die Möglichkeiten im Bereich des Leichtbaus bei LKW und mobilen Arbeitsmaschinen, wie z.B. Traktoren oder Kränen, geben und über bereits umgesetzte Beispiele informieren.

Der Begriff Leichtbau lässt sich nach WIEDEMANN wie folgt definieren:

*„Leichtbau ist zunächst eine Absichtserklärung: aus funktionalen oder ökonomischen Gründen das Gewicht zu reduzieren oder zu minimieren, ohne die Tragfähigkeit, die Steifigkeit oder andere Funktionen der Konstruktion zu schmälern oder, was schließlich dasselbe bedeutet: die Tragfunktionen ohne Gewichtszunahme zu verbessern.“ [7]*

Diese Definition verdeutlicht, dass durch leichtbaugerechtes Konstruieren keine negative Beeinträchtigung der Konstruktion hinsichtlich Sicherheit und Funktion erfolgen darf. Um trotz der genannten Herausforderungen eine Gewichtoptimierung erzielen zu können, wird in der Fahrzeugindustrie auf verschiedene, sich meist ge-

genseitig beeinflussende Leichtbauansätze zurückgegriffen. Neben den Leichtbaustrategien spielen die gewählten Leichtbauweisen und Leichtbauprinzipien eine entscheidende Rolle. Auch die Leichtbauökonomie hat einen großen Einfluss auf das Leichtbaupotential. [10]

Bei den Leichtbaustrategien kann zwischen

- Anforderungs-/Bedingungsleichtbau,
- Werkstoffleichtbau,
- Konzeptleichtbau, konstruktiver Leichtbau,
- Form- / Strukturleichtbau
- Fertigungs- / Fügeleichtbau

unterschieden werden.

In der Spezifikations- und Konzeptphase bieten sich die Leichtbauweisen „Anforderungsleichtbau“ und „Konzeptleichtbau“ an. In der Gestaltungsphase hingegen kommen die Möglichkeiten des konstruktiven Leichtbaus (Strukturleichtbau), des Werkstoffleichtbaus und des Fertigungsleichtbaus

zum Tragen. Um das Leichtbaupotential vollständig ausschöpfen zu können, sollten optimaler Weise alle Strategien Berücksichtigung finden.

Ziel des *Anforderungsleichtbaus* ist eine möglichst frühzeitige, präzise und zielgerichtete Definition der erforderlichen Anforderungen. Durch z.B. genauere Festlegung der Lastfälle und äußeren Einflussfaktoren, kritisches Hinterfragen

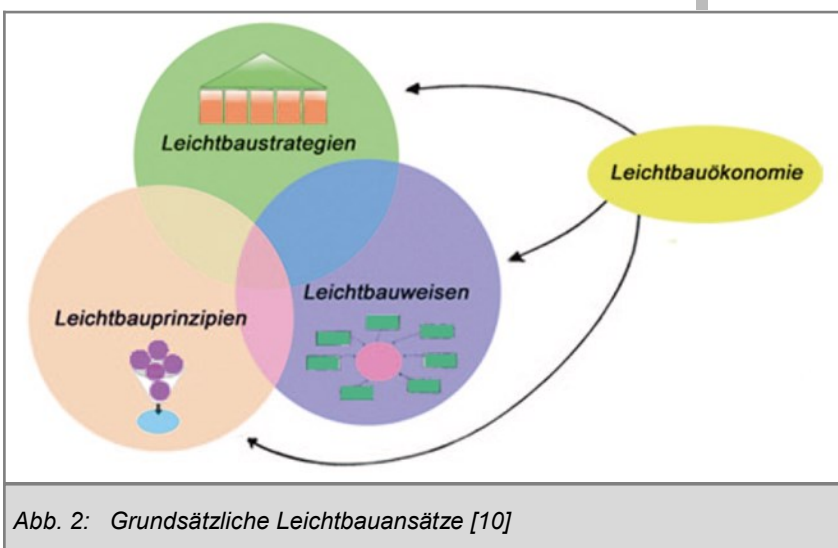


Abb. 2: Grundsätzliche Leichtbauansätze [10]

## GRUNDLAGEN

der erforderlichen Funktionalitäten, Einsatzgebiete etc. können bislang überhöhte Anforderungen verringert und somit eine Massereduktion erzielt werden. [75,76]

Beim *Werkstoffleichtbau* geht es um den Einsatz alternativer und hochfester Materialien. Der Werkstoff bestehender Bauteile wird dabei durch ein Material mit verbesserten Eigenschaften ersetzt. Optimal ist die Anwendung von Stoffen mit geringerer Dichte im Vergleich zum Ausgangsstoff, da auf diesem Weg eine direkte Gewichtsreduktion stattfindet. Alternativ können auch hochfeste Materialien eingesetzt und somit die Wandstärke verringert werden. Um die gleichen Eigenschaften z.B. hinsichtlich ertragbarer Belastungen und geforderter Randbedingungen zu erfüllen ist bei dieser Leichtbauweise i.d.R. jedoch eine Geometrieänderung erforderlich. Darüber hinaus ergeben sich durch die Materialsubstitution oftmals auch Änderungen der bislang angewandten Bearbeitungs- und Maschinentechнологien. [7,8,9,10] Gewichtsoptimierte Leichtbaukonstruktionen las-

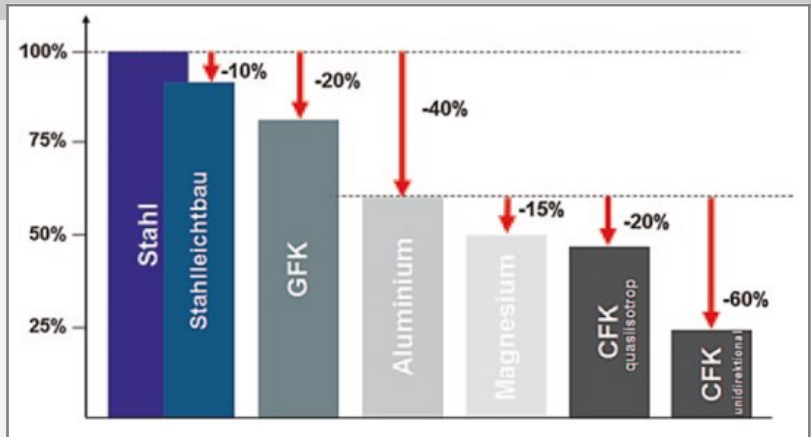


Abb. 4: Gewichtseinsparpotential durch Werkstoffsubstitution [10]

sen sich jedoch in der Regel nicht ausschließlich durch die Substitution von Materialien mit geeigneten gewichtsspezifischen Eigenschaften erzielen, sondern erfordern das Zusammenspiel verschiedener Leichtbaukonzepte.

Der *Konzeptleichtbau / konstruktiver Leichtbau* befasst sich z.B. in erster Linie mit der Funktionsintegration von Bauteilen, aber auch mit der richtigen Anordnung von Komponenten und Auswahl der richtigen Leichtbauweise. Ziel dabei ist, dass eine minimale Bauteilanzahl möglichst viele Funktionen übernimmt. Auch die Weiterhin sollen die unterschiedlichen Komponenten ideal aufeinander abgestimmt werden, weshalb neben der

eigentlichen Konzeption z.B. auch die eingesetzten Werkstoffe und geeigneten Fertigungsverfahren mit berücksichtigt werden müssen. [7,8,75]

Beim *Formleichtbau / Strukturleichtbau* wird

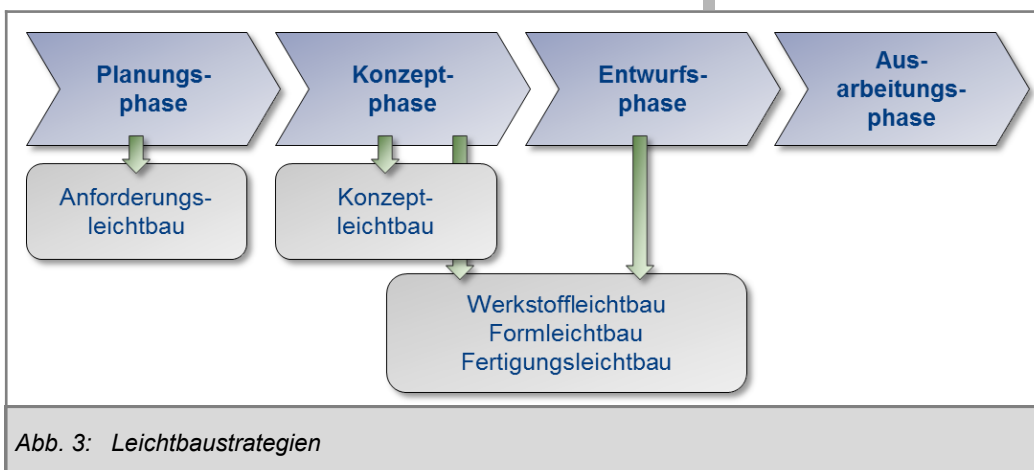
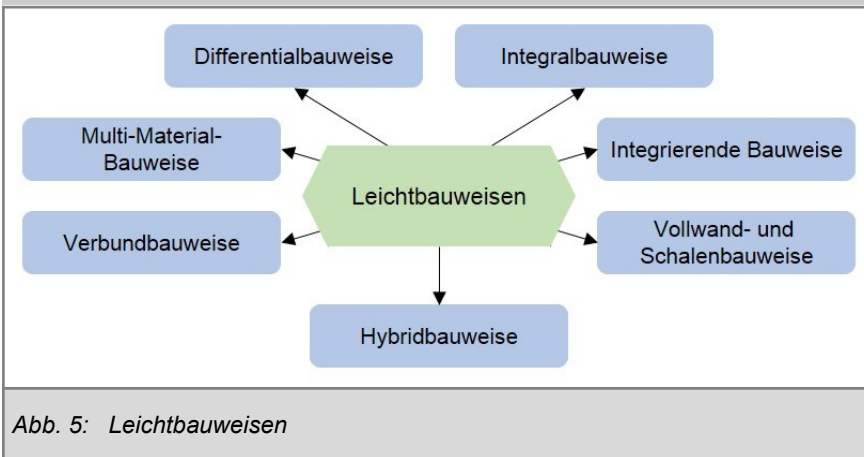


Abb. 3: Leichtbaustrategien



## GRUNDLAGEN



wie z.B. Schrauben, Nieten durch moderne Fügeverfahren, wie z.B. Kleben, Laserschweißen kann durch die Reduktion von montagebedingte Materialanhäufungen zur Gewichts-minderung. [7,8,10,14]

Abb. 5: Leichtbauweisen

Beim *Formleichtbau / Strukturleichtbau* wird das Bauteil auf eine optimale Ausnutzung der Konstruktion untersucht. Ziel ist es, einen möglichst idealen Kraftfluss in der Leichtbaukonstruktion zu erlangen. Möglichkeiten hierzu bieten moderne Berechnungsverfahren, wie z.B. Topologieoptimierung, bei der mit Hilfe eines FE-Modells die günstigste Bauteilform unter den gegebenen Belastungen ermittelt wird. Dadurch können Teile mit geringer Beanspruchung geschwächt und Komponenten mit hohen Spannungen verstärkt werden, was zu einem idealen Kraftfluss im Bauteil führt. [7,8,11]

Unter *Fertigungs- /Fügeleichtbau* versteht man alle Maßnahmen zur Gewichtsreduktion, die durch den Produktionsprozess beeinflusst werden können. Als Beispiel kann die Herstellung von maßgeschneiderten Blechen (Tailored Blanks) oder Doppellagenblechen (Bonded Blanks) genannt werden. Durch diese Fertigungsverfahren lassen sich in einem Bauteil die Wanddicken variieren, so dass die Bauteile hinsichtlich des Beanspruchungsverlaufes optimiert werden können. Auch die Substitution herkömmlicher Fügeverfahren, wie z.B. Schrauben, Nieten durch moderne Füge-

Ein wichtiger Punkt bei Leichtbaukonstruktionen spielt die gewählte Bauweise. Je nach Anwendungsfall, Fertigungsmöglichkeiten aber auch Anforderungen an Sicherheit, Reparaturmöglichkeiten oder Kosten können verschiedene Bauweisen geeignet sein. Bei tragenden Strukturen wird üblicherweise zwischen den folgenden Leichtbauweisen unterschieden: [8]

- Differentialbauweise
- Integralbauweise
- Integrierende Bauweise
- Vollwand- und Schalenbauweise
- Leichtbauweisen auf Werkstoffebene (Verbund-, Hybrid-, Multi-Materialbauweise)

Bei der *Differentialbauweise* werden die meist einfach gestalteten Einzelteile durch verschiedene Fügeverfahren, wie z.B. Nieten, Kleben verbunden. Dadurch lassen sich entsprechend der Anforderungen in den verschiedenen Bauteilbereichen optimale Werkstoffe einsetzen. Durch dieses Vorgehen lässt sich jedoch, z.B. auf Grund der Notwendigkeit von Materialdopplungen etc. keine optimale Gewichtsreduktion erreichen. Darüber hinaus besteht bei der Verwendung verschiedener Materialien an den Kontaktstellen eine

## GRUNDLAGEN

erhöhte Korrosionsgefahr. Vorteile dieser Bauweise sind die guten fail-safe-Eigenschaften, die gute Recyclebarkeit, die einfachen Formwerkzeuge sowie die Möglichkeit einzelne Teile im Versagensfall leicht auszutauschen. [6,8,11]

Die *Integralbauweise* stellt das Gegenteil der Differenzialbauweise dar. Ziel ist es, eine Komponente aus einem Bauteil und somit einem Werkstoff, der alle Anforderungen erfüllt, aufzubauen. Durch dieses Verfahren wird die Anzahl an Schnittstellen erheblich reduziert, wodurch sich Gewichtseinsparungen, insbesondere bei ähnlichen Werkstoffanforderungen im gesamten Bauteil, erzielen lassen. Durch die Übernahme mehrerer Funktionen ergeben sich jedoch Anforderungen an die Leichtbaukonstruktion, die i. d. R. zu einem Werkstoffkompromiss führen, so dass gewichtsoptimale Lösungen mit dieser Bauweise meist nicht erreicht werden können. Nachteilig an der Bauwei-

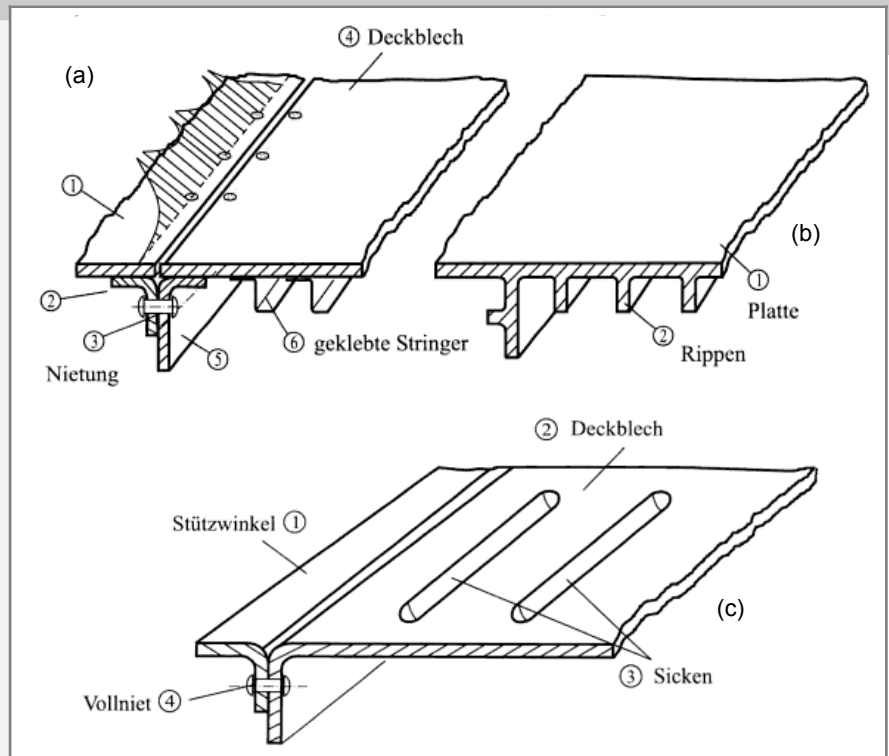


Abb. 7: Differential (a)- und Integralbauweise (b) sowie integrierende Bauweise (c) [8]

se sind weiterhin der einseitige Werkstoffeinsatz, der höhere Fertigungsaufwand sowie die erheblich schlechteren fail-safe-Eigenschaften der Bauteile, z.B. bei Rissausbreitung. [6,8,11]

Die *integrierende Bauweise* stellt eine Kombination der beiden zuvor genannten Bauweisen dar. Dabei wird versucht die Vorteile der Methoden zu vereinen, indem die Integration der Bauteile beschränkt wird und gezielt Schnittstellen eingebaut werden. Dadurch kann der jeweils ideale Leichtbauwerkstoff eingesetzt und die Austauschbarkeit einzelner Abschnitte ermöglicht werden. Darüber hinaus wird auch eine Rissausbreitung verhindert und Kerbprobleme unterbunden. [8,11]

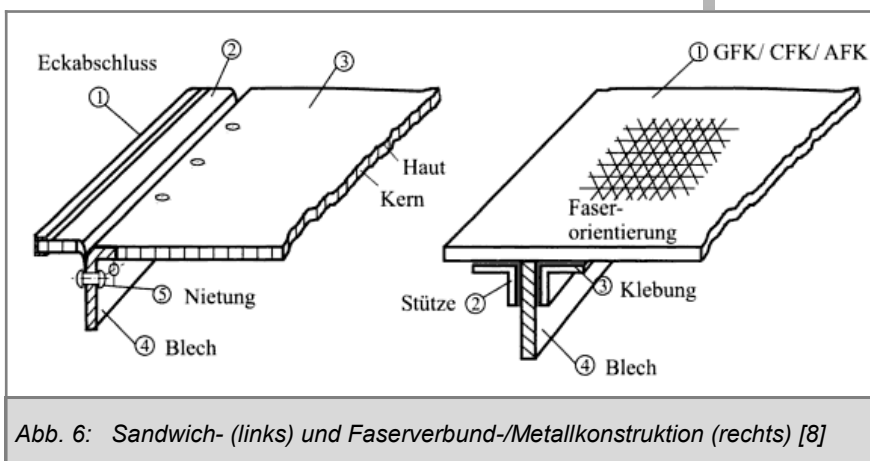


Abb. 6: Sandwich- (links) und Faserverbund-/Metallkonstruktion (rechts) [8]

## GRUNDLAGEN

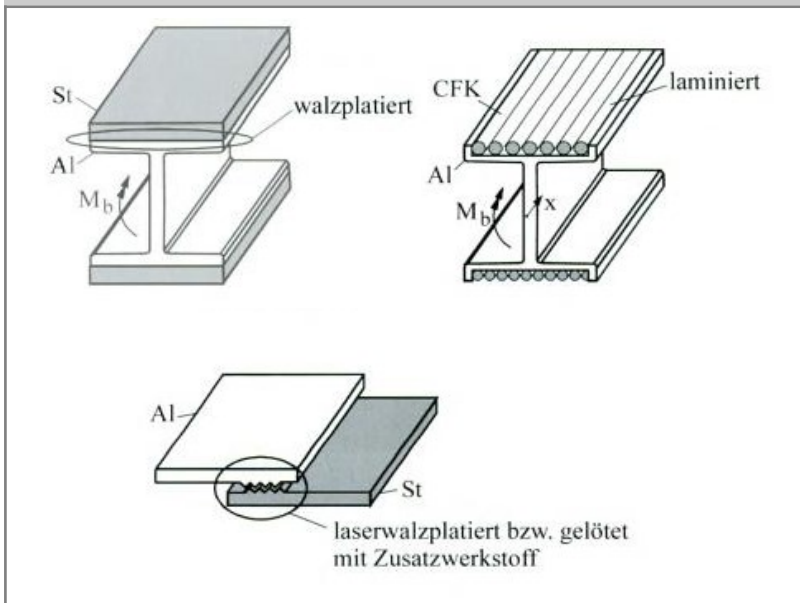


Abb. 8: Verbundaufbauten für Nfz-Rahmenstrukturen [8]

Zu den Leichtbauweisen auf Werkstoffebene zählen z.B. *Verbundbauweisen* in Form von Sandwich- und Faserverbundkonstruktionen. Für die Fahrzeugindustrie sind u.a. sog. Mischaufbauten (Blechprofile belegt mit in Harz eingebetteten Fasersträngen) von Bedeutung. Auf Grund der aufwändigen Fertigung findet diese Bauweise i.d.R. nur bei geringeren Stückzahlen Anwendung. Weiterhin gehört zu den Leichtbauweisen auf Werkstoffebene die *Hybridbauweise*. Bei dieser Bauweise wird durch Umformen ein Leichtmetallwerkstoff mit einer weiteren Werkstoffkomponente verbunden. Nachteilig wirkt sich bei dieser Bauweise der hohe Fertigungsaufwand sowie die teilweise schlechteren Reparaturmöglichkeiten aus. Die dritte nennenswerte Leichtbauweisen auf Werkstoffebene ist das

sog. *Multi-Material-Design*, bei der für jedes Bauteil ein auf die Anforderungen abgestimmter Werkstoff eingesetzt wird. Durch diese Leichtbauweise, die neben der Auswahl geeigneter Werkstoffe und Fertigungsverfahren auch konstruktive Maßnahmen berücksichtigt, kann das Leichtbaupotenzial optimal ausgeschöpft werden. Aufgrund der verschiedenen zu berücksichtigenden Aspekte stellt gerade diese Leichtbauweise große Herausforderungen an die Entwicklung. [6,8]

Weiterhin müssen bei Leichtbaukonstruktionen verschiedene Leichtbauprinzipien berücksichtigt werden. Da diese neben der Gewichtsreduktion auch anderen Eigenschaften, wie z.B. die dynamische Sicherheit eines Bauteils betrachten,

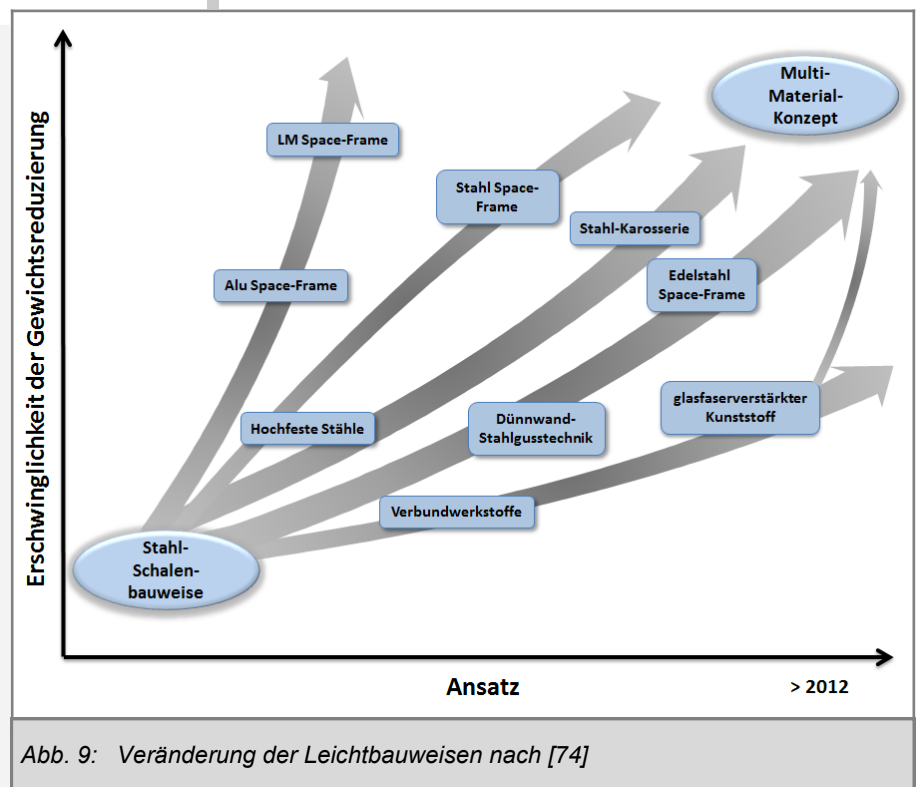


Abb. 9: Veränderung der Leichtbauweisen nach [74]

## GRUNDLAGEN

spielen hier auch andere Parameter, wie z.B. Form, Topologie, Dimensionen etc. eine Rolle. [10]

Neben den genannten Methoden sind auch wirtschaftliche Aspekte bei Leichtbaukonstruktionen, die sog Leichtbauökonomie nicht zu vernachlässigen. Oftmals entscheiden gerade die Kosten darüber, ob eine Leichtbaukonstruktion umgesetzt wird. Bezogen auf die Kosten und den Leichtbaugrad wird vielfach zwischen den Leichtbauklassen Sparleichtbau, Ökoleichtbau und Zweck- und Ultraleichtbau unterschieden. [7,10,73] Hauptziel des Sparleichtbaus ist die direkte Reduzierung der Kosten, z.B. durch Senkung des Materialaufwandes oder der Herstellkosten durch Verwendung alternativer Materialien. Der Ökoleichtbau dient der indirekten Kosteneinsparung, z.B. geringerer Energieverbrauch und somit geringere Betriebskosten während des Produktlebens infolge eines geringeren Gesamtgewichtes. Beim Zweck-

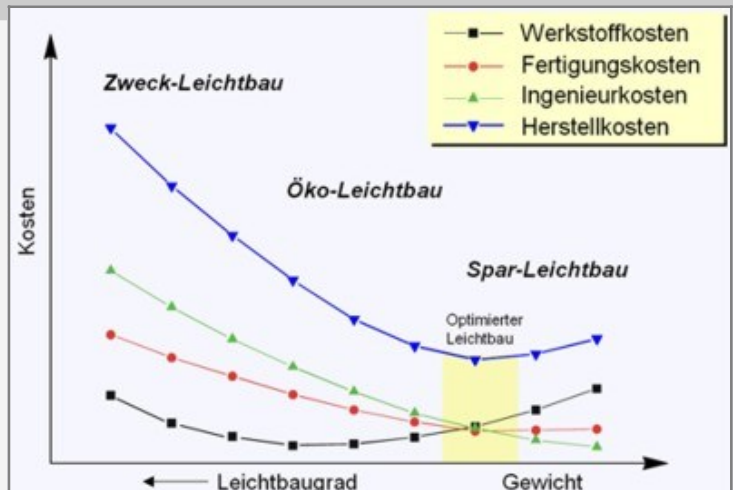


Abb. 11: Zusammenhang zwischen Kosten und Gewicht [73]

leichtbau spielt der Kostenaspekt hingegen eine untergeordnete Rolle. Im Fokus dieser Leichtbauklasse steht die Erfüllung der geforderten Funktion. Bei Ultraleichtbau ist nur das Erreichen des maximal möglichen Leichtpotentials, unabhängig von den dadurch verursachten Kosten von Bedeutung. [7,10,11]

Gerade in der industriellen Praxis ist aufgrund der gegebenen technischen und wirtschaftlichen Randbedingungen das maximal mögliche Leichtbaupotential meist nicht vollständig ausreizbar. In der

Regel ist davon auszugehen, dass ein zu hoher Leichtbaugrad eine Kostenexplosion zur Folge hat, so dass nur ein optimierter Leichtbau realisiert werden kann. Ursächlich für den exponentiellen Kostenanstieg sind u.a.: [8]

- Steigende Ingenieurkosten (bei Leichtbaukonstruktionen um das 5-10-fache höher, auf Grund umfangreicher Berechnungen, aufwändigem Design etc.)





Branche	Zulässige durchschnittliche Mehrkosten
Raumfahrt 	bis zu 5.000 EUR/kg
Verkehrsflugzeuge 	bis zu 500 EUR/kg
Automobilindustrie 	2 - 10 EUR/kg
Lkw's / Schienenfahrzeuge 	1 - 3 EUR/kg

Abb. 10: branchenspezifisch akzeptierte Leichtbaumehrkosten [10]

## GRUNDLAGEN

- Steigende Werkstoffpreise  
(St/Al/GFK/CFK = 1/3/10/100 €/kg)
- Steigende Fertigungskosten  
(ca. Faktor 3 höher auf Grund höherer  
Werkzeug- und Prozesskosten)

Daher sollte eine Optimierung der Konstruktion auch immer in Hinblick auf Kosten erfolgen, um die Rentabilität des Produktes zu gewährleisten. [8] Je nach Branche werden unterschiedliche zulässige Mehrkosten gebilligt. Während in der Luftfahrt bis zu 500 €/kg Mehrkosten vertretbar sind, werden in der Nutzfahrzeugbranche nur bis zu 3 €/kg akzeptiert.

Ein wichtiger Faktor, der insbesondere auch die für die Entwicklung zur Verfügung stehenden Mittel beeinflusst, sind die Stückzahlen. Bezogen auf das Jahr 2011 hat die Fahrzeugindustrie in Deutschland gemäß der International Organization of Motor Vehicle Manufacturers 5,8 Mio. PKW produziert. In der Nutzfahrzeugbranche hingegen wurden lediglich knapp 440.000 Fahrzeuge produziert, wobei nur wiederum 164.150 Fahrzeuge den schweren LKW zuzuordnen sind, das entspricht in etwa einem Anteil von 2,8% verglichen mit der PKW-Anzahl. [12]

Im Automobilbereich können somit die Entwicklungskosten auf eine deutlich höhere Anzahl an Produkten umgelegt werden, wodurch einen höherer Entwicklungsaufwand gerechtfertigt wird. Das ist auch der Grund, weshalb sich die Auto-

mobilerhersteller bereits seit längerer Zeit intensiv mit der Herstellung leichtbaugerechter Fahrzeuge auseinandergesetzt haben und über ein hohes Maß an Wissen verfügen.

Für die Nutzfahrzeugindustrie ergibt sich daraus der Vorteil, dass sie PKW-Entwicklungen auf ihre Systeme übertragen können. Das reduziert den Entwicklungsaufwand und ermöglicht den Einsatz innovativer Technologien im eigenen Bereich. Eingesparte Kosten durch die Adaption bestehender Varianten können zudem in die Entwicklung neuer Produkte investiert werden.

Jedoch lassen sich nicht alle Erkenntnisse der Automobilbranche einfach in die Nutzfahrzeugindustrie übertragen, da die Anforderungen an die jeweiligen Produkte teilweise erheblich voneinander abweichen. So sind z.B. auf Grund der verschiedenen Einsatzzwecke auch deutliche Unterschiede zwischen den Branchen hinsichtlich der zu ertragenden Belastungen (Kräfte, Lebensdauer etc.) ersichtlich, wodurch evtl. andere Bauweisen erforderlich sind.

Weitere zu berücksichtigende Faktoren ergeben sich aus den verschiedenen Kundenwünschen. Personenkraftwagen müssen einen geringen Verbrauch aufweisen und über ein hohes Maß an Komfort verfügen. Zudem legen die Fahrer hohen Wert auf entsprechendes Fahrverhalten und -dynamik. Zwar wird auch von den Nutzfahrzeugen ein geringer Verbrauch verlangt, um die

## GRUNDLAGEN

Betriebskosten zu minimieren, zusätzlich wird aber auch Wert auf eine hohe Nutzlast gelegt um Transportwege einsparen zu können. Anstelle der Höchstgeschwindigkeit eines Fahrzeugs ist hier der effiziente Betrieb bei einer konstanten Geschwindigkeit von Bedeutung. Die Komfortansprüche sind bei Nutzfahrzeugen hingegen sehr unterschiedlich. Während Langstrecken-LKW über ein hohes Maß an Komfort verfügen sollten, spielt dieser bei Kurzstrecken-LKW oder gar bei

mobilen Arbeitsmaschinen eine weniger wichtige Rolle.

Der Vergleich der Branchen zeigt, dass zwar beide den gleichen Grundsatz verfolgen, die Details aber sehr stark variieren. Daher ist es für die Nutzfahrzeugbranche notwendig, eigene Konzepte für leichtere Fahrzeuge zu entwickeln, um den Anforderungen ihrer Kunden gerecht zu werden.

	Nutzfahrzeug/ mobile Arbeitsmaschine	Personenkraftfahrzeug
Einsatzzweck	Verrichten von Arbeitsprozessen, Mobilität	Mobilität
Stückzahl/Jahr (2011)	439.185 Schwere Nutzfahrzeuge:164.150 Leichte Nutzfahrzeuge: 275.035	5.871.918
Aufbau	Einfacher, modularer Aufbau	Komplexer Aufbau
Ausstattung	Nutzfahrzeuge:+++ mobile Arbeitsmaschine:+	+++++
Flexibilität	Mittel/hoch	Niedrig/mittel
Zuverlässigkeit	Laufleistung bis auf 1,7 Mio km	Laufleistung im Durchschnitt auf 250.000 km ausgelegt
Antrieb	Auslegung auf Effizienz	Auslegung auf Höchstgeschwindigkeit und Beschleunigungsvermögen
Kraftstoffverbrauch	Niedriger Kraftstoffverbrauch essentiell	Zunehmen Bedeutung von günstigem Kraftstoffverbrauch
Belastung	Hoch bis extrem hoch	Mittel bis hoch
Primäres Ziel Leichtbauweise	Maximale Nutzlast Geringer Verbrauch	Geringer Verbrauch

Abb. 12: Unterschiede Nutzfahrzeug-/Automobilindustrie [13]

## LEICHTBAUWERKSTOFFE

Die Auswahl des Werkstoffes steht in direktem Zusammenhang mit der konstruktiven Ausarbeitung der Leichtbauteile und ist daher für die Entwicklung von großer Bedeutung. Die Anzahl der bei Leichtbaukonstruktionen eingesetzten Werkstoffe ist in den letzten Jahren deutlich gestiegen. Während früher fast ausschließlich (hochfeste) Stähle und Aluminium eingesetzt wurden, haben mittlerweile, wenn auch in erheblich geringerem Ausmaß, Magnesium- und Titanlegierungen sowie Verbundwerkstoffe in der Fahrzeugindustrie Anwendung gefunden.

Auf Grund der bei Nutzfahrzeugen üblicherweise auftretenden hohen Belastungen, ist es wichtig, ein geeignetes Material zu finden, das diesen Anforderungen gerecht wird. Hilfreich ist dabei die Orientierung an den Werkstoffkriterien, die im Leichtbau eine große Rolle spielen [8]. Hierzu zählt in erster Linie die Dichte des Materials. Es

bietet sich an, ein Bauteil, das über eine geringe Masse verfügen soll, aus einem Material mit geringer Dichte zu konstruieren, um so unnötiges Gewicht zu vermeiden. Allerdings darf das leichte Material weder die Funktion noch die Sicherheit der Konstruktion negativ beeinflussen. Um dies sicherzustellen, muss der Werkstoff über geeignete mechanische Eigenschaften hinsichtlich Festigkeit und Steifigkeit verfügen. Soll plastische Verformung vermieden werden, sind ein hoher Elastizitätsmodul und eine hohe Streckgrenze erforderlich, muss Bruch verhindert werden, ist eine hohe Zugfestigkeit zu wählen. Optimal ist es, wenn alle drei Größen einen hohen Wert haben. Da jedoch die Anforderungen an die Bauteile unterschiedlich sind, sollte, um das Bauteilgewicht gering zu halten, nur auf die geforderten Größen hin ausgelegt werden.

Weitere wichtige Werkstoffeigenschaften sind u.a. Temperaturbeständigkeit, Festigkeit, Ver-

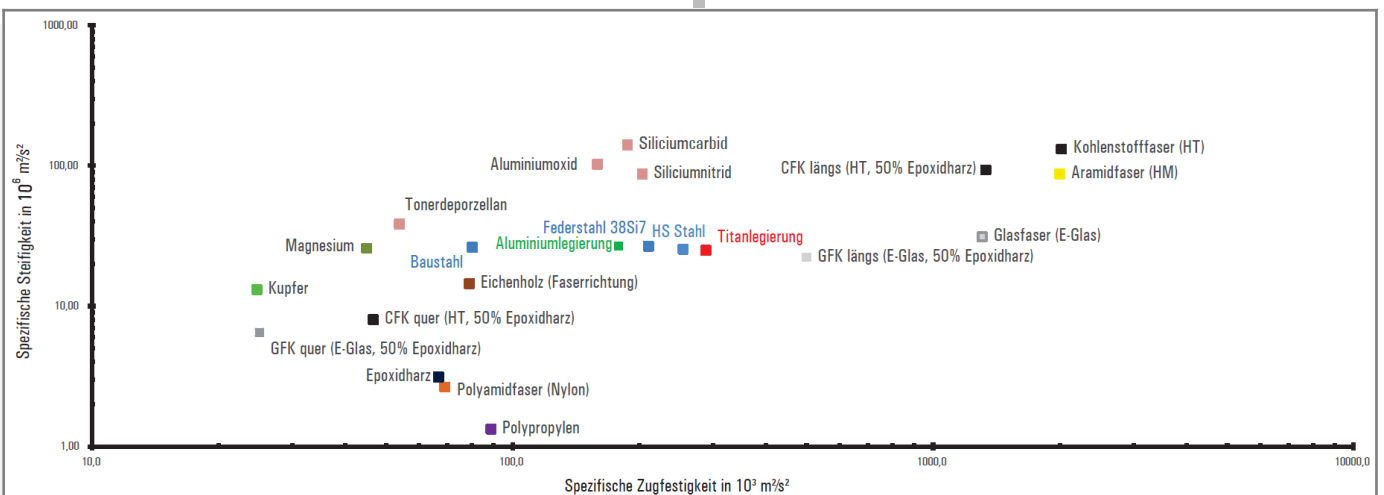


Abb. 13: Spezifische Zugfestigkeit und Steifigkeit verschiedener Werkstoffe [6]

## LEICHTBAUWERKSTOFFE

hohe Elastizität die Umformbarkeit bei der Verarbeitung.

Auch bei Aluminium lassen sich die Eigenschaften durch die Zugabe von Legierungselementen wie z.B. Kupfer, Magnesium oder Zinn variieren. Aluminiumlegierungen werden in Knetlegierungen, die durch Ur- und Umformen (z.B. Strangpressen) und Gusslegierungen, die durch reines Urformen, wie Sandguss, hergestellt werden, unterteilt. Gusslegierungen weisen nur Zugfestigkeiten von bis zu 260 MPa auf, wohingegen Knetlegierungen bis zu 2-fach höhere Zugfestigkeiten erreichen. Von Vorteil am Einsatz von Aluminium ist die hohe Oxidationsbereitschaft. Die Oberfläche reagiert mit dem in der Luft vorhandenen Sauerstoff und bildet eine dünne Oxidschicht. Diese schützt das Bauteil vor Korrosion und macht eine zusätzliche Oberflächenbehandlung

überflüssig. Weiter positive Eigenschaften von Aluminium sind die einfache Verarbeitbarkeit, die gute Wärmeabfuhr, das im Vergleich zu anderen metallischen Werkstoffen höhere Crash-Energievermögen, die gute Recyclingfähigkeit sowie gute Reparaturmöglichkeiten verglichen mit z.B. Faserverbundwerkstoffen.

In der Fahrzeugindustrie ist der Einsatz von Aluminium nicht mehr weg zu denken. Während beim Fahrwerk, Motor und Getriebe vorwiegend Aluminiumgusslegierungen eingesetzt werden, kommen in der Karosserie und dem Aufbau überwiegend Walz- und Strangpresselemente zum Einsatz. Weitere Anwendungsbeispiele insbesondere für kleinere Komponenten aus Aluminium sind Ausgleichsbehälter, Saugrohre, Kraftstofftanks, Luftbehälter sowie Seiten- und Unter-

fahrschutz. Durch Einsatz von Aluminiumschäumen besteht zudem die Möglichkeit sehr leichte, selbsttragende Konstruktionen oder Versteifungsstrukturen aufzubauen. Schaumaluminium ist ein hochporöser Aluminiumwerkstoff mit zellulärer Struktur mit einer Dichte von 0,3-0,7 g/cm<sup>3</sup> und aufnehmbaren Spannungen bis zu 25 MPa (bevorzugt

	Stahl	Aluminium	Magnesium	Titan
Dichte [g/cm <sup>3</sup> ]	7,85	2,7	1,74	4,5
E-Modul [MPa]	210.000	70.000	45.000	110.000
Streckgrenze [MPa]	180-750	10-350	100-150	200-400
Zugfestigkeit [MPa]	300-1250	40-500	170	300-900
Wärmeausdehnungskoeffizient [K <sup>-1</sup> ]	45*10 <sup>-8</sup>	23,5*10 <sup>-8</sup>	25*10 <sup>-8</sup>	8,7*10 <sup>-8</sup>
Schmelztemperatur [°C]	1536	2050	649	1668
Durchschnittspreis [€/kg]	1-1,30	1,85-2,00	3-5	30

Abb. 15: Vergleich metallischer Werkstoffe



## LEICHTBAUWERKSTOFFE

Druck) bei einem E-Modul von 8–10 GPa. [5,8,9,18,19,20,28]

Ein weiterer metallischer Leichtbauwerkstoff ist Magnesium. Es besitzt eine Dichte von  $1,74\text{g/cm}^3$  und ist damit über 30 % leichter als Aluminium, bei nahezu gleicher Duktilität, Streckgrenze und Zähigkeit. Dennoch eignet sich dieser Werkstoff nur bedingt für Konstruktionen in der Fahrzeugindustrie. Problematisch bei Magnesium ist die hohe Reaktionsbereitschaft, vor allem mit Sauerstoff. Im Gegensatz zu Aluminium, das außen eine dünne Oxidschicht bildet, korrodiert Magnesium interkristallin, was ohne äußerlich sichtbare Anzeichen zu einem plötzlichen Versagen der Komponente führt. Weiterhin weist Magnesium eine geringe Bruchdehnung auf und ist daher für crash-relevante Bauteile weniger geeignet. Die Anfälligkeit des Materials bei Kerben im Bauteil, macht die Konstruktion zudem aufwändiger. Magnesium wird daher in der Fahrzeugbranche im Vergleich zu Stahl und Aluminium eher selten eingesetzt. Dennoch kann Magnesium in einer geeigneten Legierungsform zu enormen Gewichtsreduktionen beitragen. Elemente wie Zink, Mangan und Aluminium können die relevanten Eigenschaften, wie Zähigkeit, Korrosionsbeständigkeit und Festigkeit erhöhen. Das ermöglicht den Einsatz von Magnesiumkomponenten als Gussteile im Motor- oder Fahrwerksbereich. So stellt BMW derzeit das Kurbelgehäuse für Sechszylinder-Otto-Motoren aus einem Aluminium-Magnesium-Verbund her. Im Vergleich zu einem

Gehäuse aus Lamellengraphit spart diese Methode 40 % an Masse ein. Allerdings müssen die Zylinderlaufbahnen weiterhin aus Aluminium gefertigt werden, da Magnesium den Kräften im Motorraum nicht standhalten kann. Verglichen mit den Gussbauteilen ist die Anzahl der Bauteile aus Magnesiumknetlegierungen aktuell noch sehr gering. Neue bzw. optimierte Verarbeitungsprozesse und neue Legierungsentwicklungen zeigen aber ein großes Potential für die Zukunft. [7,8,10,20,21,22,23]

Titan ist der vierte, für Leichtbaukomponenten interessante Werkstoff. Die Dichte liegt mit  $4,5\text{g/cm}^3$  über der von Aluminium und Magnesium, entspricht dafür aber nur 60 % der Stahldichte. Titan zeichnet sich durch sehr hohe Festigkeitswerte und eine gute Korrosionsbeständigkeit aus. Insbesondere die Zugfestigkeit von reinem Titan reicht bis 750 MPa, Legierungen erreichen bis zu 1850 MPa. Damit übertrifft Titan sogar die Werte der hochfesten Stähle. Beim Einsatz von Titan muss das Verhalten der Festigkeitswerte in Bezug auf die Temperatur beachtet werden. Mit steigender Temperatur sinkt die Festigkeit und der Werkstoff versprödet durch die Aufnahme von Sauerstoff, Stickstoff und Wasserstoff, so dass Bauteile aus Titan nicht für alle Einsatzgebiete geeignet sind. Auch bei Bauteilen, die eine hohe Steifigkeit verlangen, sollte Titan, da es einen geringen E-Modul hat, nicht verwendet werden. Neben Reintitan werden häufig auch Titanlegierungen verwendet. Diese verfügen nicht nur über

## LEICHTBAUWERKSTOFFE

schleiß, Korrosionsbeständigkeit etc. Da diese beiden Werte miteinander verknüpft sind, ist es wichtig, den Einsatzbereich des Fahrzeugs möglichst genau spezifizieren zu können, um die geforderte Laufleistung einzuhalten.

Die Fertigung ist bei leichtbaugerechtem Konstruieren ein entscheidender Aspekt, weshalb der Werkstoff für die gewählten Verfahren geeignet sein muss. Häufig werden für Leichtbauwerkstoffe eine gute Schweißbarkeit und Formbarkeit gefordert, um den Fertigungsprozess zu vereinfachen.

Neben den genannten mechanischen Eigenschaften darf der wirtschaftliche Aspekt nicht vernachlässigt werden. Eine Verteuerung des Produkts sollte weitestgehend vermieden werden. Um das zu gewährleisten, müssen Aufwand und Nutzen, die durch den Einsatz leichterer Werkstoffe entstehen, genau analysiert werden. So kann beispielsweise aus einem leichteren Werkstoff, dessen Kilopreis höher ist, ein geringerer Verbrauch resultieren, was im Endeffekt zu einer Kosteneinsparung für den Endverbraucher führt. [5,8]

Die Vielzahl der genannten Kriterien und Anforderungen an heutige Fahrzeuge ist mit einem Material alleine nicht umsetzbar [15]. Durch geeignete Mischbauweisen (Multi-Material-Design) kann die

- Niedrige Dichte  $\rho$
- Gute Festigkeitseigenschaften, d.h. hohe Fließgrenze  $R_{eH}$ , hohe Bruchfestigkeit  $R_m$  bei ausreichender Dehnung
- Hoher Elastizitätsmodul  $E$
- Gute fail-safe-Eigenschaften, d.h. hohe Dauerfestigkeit  $s_A$ , hohe Bruchzähigkeitskennwerte  $K_{Ic}$  bzw.  $K_c$
- Gute Temperaturbeständigkeit (bei Plus- und Minusgraden)
- Niedriger Wärmeausdehnungskoeffizient  $\alpha$
- Leichte Formbarkeit durch Kalt- und Warmformgebungsverfahren
- Gute Schweißbarkeit
- Akzeptabler Preis pro Kilogramm

Abb. 14: Leichtbaurelevante Werkstoffeigenschaften [8]

Leistungsfähigkeit der Bauteile erheblich gesteigert werden, jedoch sollte, auch auf Grund der bei Materialkombinationen aufwändigeren Verbindungstechniken, komplexeren Simulationen sowie schwierigerem Recycling, für jede Konstruktion individuell entschieden werden, welche Aspekte inwieweit berücksichtigt werden müssen. Der folgende Abschnitt gibt einen Überblick über die Eigenschaften ausgewählter Leichtbauwerkstoffe.

### Metallische Werkstoffe

Von je her kommt metallischen Werkstoffen beim leichtbaugerechten Gestalten eine hohe Bedeutung zu. Auch heute noch besitzen metallische Werkstoffe, insbesondere Stahl und Aluminium, den größten Marktanteil unter den Leichtbauwerkstoffen und werden auch weiterhin eine zentrale Rolle bei Leichtbauanwendungen und -konstruktionen einnehmen. [9]

## LEICHTBAUWERKSTOFFE

Auch wenn vielfach versucht wurde, Komponenten aus Stahl durch Bauteile aus anderen Werkstoffen zu ersetzen, bleibt dieser trotz relativ hoher Dichte ( $7,85\text{g/cm}^3$ ) auf Grund seiner guten Verarbeitbarkeit, Reparaturfreundlichkeit, hervorragend modifizierbaren Eigenschaften und der langjährigen Erfahrungen der vorherrschende Leichtbauwerkstoff in der Fahrzeugindustrie. Durch den Einsatz von Legierungselementen sowie gesteuerten Gefügeumwandlungen können Härte und Festigkeit gesteigert oder die Korrosionsbeständigkeit verbessert werden. Gerade hochfeste Stähle haben in den letzten Jahren eine enorme Entwicklung durchlaufen und erreichen heutzutage eine Zugfestigkeit von über  $1000\text{MPa}$  bei guten Verformungseigenschaften. Als Beispiele sind Dualphasenstähle zu nennen, die durch spezielles Glühen bei Raumtemperatur ein Gefüge aus ferritischen und martensitischen Anteilen aufweisen. Complex-Phasen-Stähle besitzen zusätzlich noch bainitische Anteile. Daneben existieren unter anderem TRIP-Stähle, die über einen Restaustenitanteil verfügen, Martensitphasenstähle, die maximale Festigkeiten von  $1400\text{MPa}$  erreichen und die tiefstentkohlten IF-Stähle. Die Kombination aus hoher Festigkeit mit guter Verformbarkeit macht hochfeste Stähle besonders für crash-relevante Bauteile interessant. Zusätzlich lassen sich durch die guten Festigkeitseigenschaften Komponenten dünnwandiger konstruieren und führen so automatisch zu einer Gewichtseinsparung.

Wie wichtig Stahl nach wie vor für die Fahrzeugbranche ist, zeigt das Beispiel des VW Golf 7, der in Großserie gefertigt wird. Der Anteil hoch bis höchstfester Stähle macht bei der Herstellung des Fahrzeugs  $80\%$  aus. Der Einsatz von Aluminium oder Magnesium wird auf Grund einer damit einhergehenden Verteuerung des Produktes vermieden.

Für den Einsatz von Stahl spricht zudem der ökologische Aspekt. Stahl lässt sich gut recyceln und verbraucht auch in der Herstellung und Verarbeitung wenig Energie im Vergleich zu anderen Metallen, wie z.B. Aluminium. Kosten können daher nicht nur während der Konstruktion sondern im gesamten Produktlebenszyklus eingespart werden. [5,8,9,16,17]

Wegen seiner geringen Dichte ( $2,7\text{g/cm}^3$ ) und auf Grund vergleichbarer Fertigungs- und Fügeverfahren, ist Aluminium, neben Stahl einer der wichtigsten metallischen Leichtbauwerkstoffe in der Fahrzeugindustrie. Verglichen mit hochfesten Stählen ist jedoch auch die Festigkeit niedriger. Bauteile, die aus Aluminium gefertigt werden, müssen daher stärker dimensioniert werden. Generell lässt sich jedoch feststellen, dass das Verhältnis von Festigkeit zu Gewicht bzw. Steifigkeit zu Gewicht bei Aluminiumlegierungen mit anderen Metallen, wie z.B. hochfestem Stahl vergleichbar ist. Der niedrige Elastizitätsmodul ist vorteilhaft für die Konstruktion von Bauteilen, die Stößen ausgesetzt sind. Zudem vereinfacht die

## LEICHTBAUWERKSTOFFE

eine höhere Zugfestigkeit, sondern besitzen auch ein höheres Verhältnis von Dauerfestigkeit zu Zugfestigkeit als Stahl. Da Titan jedoch aus wirtschaftlicher Sicht unattraktiv erscheint, wird es trotz der guten Eigenschaften eher selten eingesetzt. Bisherige Anwendungen von Titanbauteilen lassen sich hauptsächlich im Antriebsbereich, z.B. bei Ventilen, im Fahrwerksbereich sowie bei Abgasanlagen finden. [8,20]

## Nichtmetallische Werkstoffe

Nichtmetallische Werkstoffe haben in der Fahrzeugindustrie in den letzten Jahren stetig an Bedeutung gewonnen. Nach wie vor wird der Großteil der Kunststoffbauteile im Interieur eingesetzt. Reine Kunststoffe sind für tragende Bauteile weitestgehend uninteressant und werden daher auf Grund ihrer geringen Festigkeitswerte nur in nichttragenden und sicherheitstechnisch nicht relevanten Bauteilen, wie Verkleidungen oder Kanistern, eingesetzt. Hinzu kommt das klimabe-

	Aluminium	Magnesium	Titan	Stahl	
Ökonomisches Prinzip					<b>Legende:</b> Kriterium wird vollständig erfüllt Kriterium wird nahezu vollständig erfüllt Kriterium wird teilweise erfüllt Kriterium wird ansatzweise erfüllt Kriterium wird nicht erfüllt
Optimaler Leichtbau					
Geringe Dichte					
Hohe Zuverlässigkeit					
Zugfestigkeit					
Streckgrenze					
E-Modul					
Formbarkeit					
Schweißbarkeit					
Wärmeausdehnungskoeffizient					

Abb. 16: ausgewählte Eigenschaften metallischer Werkstoffe hinsichtlich ihrer Eignung in der Nfz-Industrie [13]

## LEICHTBAUWERKSTOFFE

dingte Werkstoffverhalten, was eine zuverlässige Auslegung erschwert. [8]

Im Exterieur spielen Kunststoffe bei PKWs aufgrund der hohen Anforderungen an z.B. Crash-Verhalten, Energieabsorption, Temperaturbeständigkeit (im Motorraum) noch eine deutlich geringere Rolle. In Kombination mit anderen Materialien, d.h. als faserverstärkte Kunststoffe können jedoch auch nichtmetallische Werkstoffe die hohen Anforderungen teilweise erfüllen. Aktuell erzielen Faserverbundwerkstoffe einen noch eher geringen Marktanteil bei Leichtbauanwendungen, besitzen aber, aufgrund ihrer hervorragenden Verhältnisse von Festigkeit zu Dichte, den spezifisch einstellbaren Eigenschaftsprofilen sowie der kontinuierlichen Verbesserung der Produktions-

technik ein starkes Wachstumspotential [5,24]. Neben einer geringen Dichte und sehr guten Festigkeitseigenschaften sind das hohe Energieabsorptionsvermögen und somit Crasheigenschaften, sowie die Eröffnung neuer Gestaltungsmöglichkeiten positive Eigenschaften der Faserverbundwerkstoffe. Auf Grund der im Vergleich zu den metallischen Werkstoffen grundlegend anderen Eigenschaften, wie z.B. Anisotropie oder Inhomogenität, ist eine Substitution erheblich aufwändiger als z. B. bei einer Stahl-Aluminium-Substitution.

Als Matrix, also als Grundstoff, der die Temperatur- und Medienbeständigkeit festlegt, werden in der Fahrzeugindustrie vor allem Duroplaste und Thermoplaste verwendet. Thermoplaste sind im

	Polyethylen-terephthalat (PET)	Polyoxymethylen (POM H)	Polybutylen-terephthalat (PBT)	Polycarbonat (PC)	Polyamid 6 (PA 6)	Polyvinylchlorid (PVC)
Optimaler Leichtbau						
Geringe Dichte						
Hohe Festigkeit						
Streckgrenze						
E-Modul						
Chemische Beständigkeit						
Verwendung in Fahrzeugen	Spritzgussteile, Rollen, Räder	Tanks, Zahnräder	Gehäuse, Stecker	Gehäuse, Nockenscheiben	Ölfilter, Behälter, Zahnräder	Rohre, Kabelisolation

Abb. 17: ausgewählte Eigenschaften unverstärkter Kunststoffe [84, 85, 86, 87, 88]

## LEICHTBAUWERKSTOFFE

Vergleich zu Duroplasten recyclebar und reparierbar und weisen eine hohe Alterungsbeständigkeit sowie ein gutes Umformverhalten auf. In diese Matrix werden Fasern in möglichst belastungsgerechter Weise eingebettet. Je nach Anordnung können die Festigkeitseigenschaften des unverstärkten Materials bis zu 2 Größenordnungen gesteigert werden. Als Fasern haben sich Glasfasern bewährt. Kohlenstofffasern, die in einem energieaufwendigen und damit sehr kostenintensiven Prozess hergestellt werden, eignen sich meist nur für Spezialanwendungen bzw., für den Rennsportbereich. Daneben werden zur Verstärkung noch Aramidfasern (organische Chemiefasern) eingesetzt. Verwendet werden aramidfaserverstärkte Kunststoffe in erster Linie bei Bauteilen, die hohen Belastungen standhalten müssen.

Den oben genannten Vorteilen von Faserverbundwerkstoffe gegenüber konventionellen

Stahllegierungen stehen aber auch Nachteile, wie z.B. geringere Temperaturbeständigkeit, kurze Erprobungszeiten, aufwändige Herstellung, hohen Kosten gegenüber. [5,8,24,25,26] Aufgrund der großen gestalterischen Freiheit kommen Faserverbundwerkstoffe jedoch bereits in einigen Bereichen der Fahrzeugindustrie zum Einsatz. Dazu zählen z.B. Karosserie- und Verkleidungsteile, Fahrerkabinen, Fronthauben und Kofferraumdeckel, aber auch Funktionsbauteile wie Bremsscheiben, Blattfedern und Fahrwerke. Die Karosserie- und Verkleidungsteile werden dabei häufig durch das sog. Harzinjektionsverfahren RTM, hergestellt, mit dem Leichtbauteile relativ kostengünstig in hohen Stückzahlen mit kurzen Zykluszeiten gefertigt werden können. Strukturbauteile und besonders Crash-Komponenten werden, trotz des großem Absorptionsvermögens, jedoch meist noch aus hochfesten Stählen gefertigt, da diese für eine Serienproduktion besser geeignet sind. [25,26]

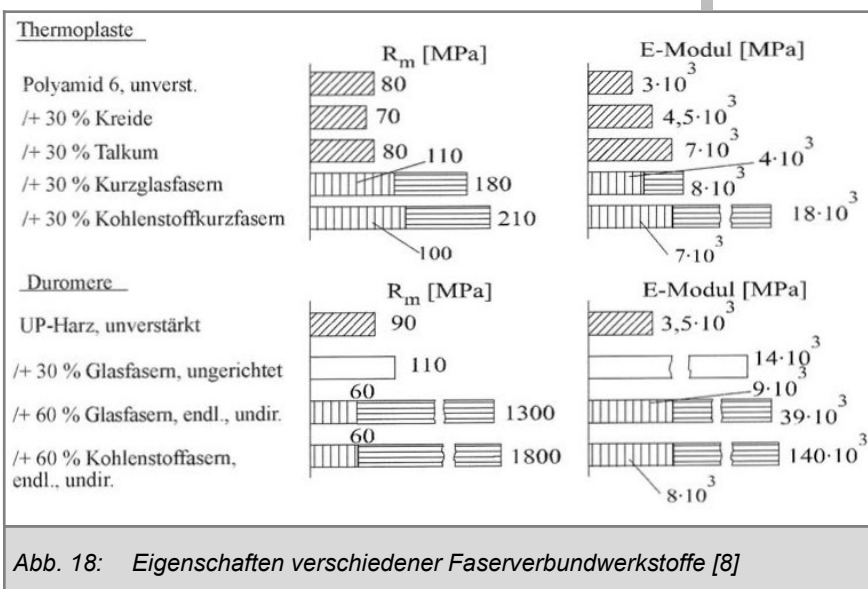


Abb. 18: Eigenschaften verschiedener Faserverbundwerkstoffe [8]

Auch in der Nutzfahrzeugindustrie wurde bereits das Potential der Faserverbundwerkstoffe genutzt. So hat die Firma Lamilux einen kohlefaserverstärkten Kunststoff entwickelt, der für Sandwich-Deckschichten von LKW-Aufbauten verwendet wird und somit eine Gewichtsreduktion von bis zu 2t am LKW erreicht. [27] Das Beispiel verdeutlicht das hohe Einsparpotential, das mit dem Einsatz von faserver-

## LEICHTBAUWERKSTOFFE

stärkten Kunststoffen einhergeht. Da die Entwicklung und Herstellung der Werkstoffe aber nach wie vor aufgrund unzureichender Automatisierung mit hohen Kosten und großem Aufwand verbunden ist, haben sich diese Werkstoffe in Großserien bislang nicht durchgesetzt. Eine weitere wichtige Voraussetzung ist jedoch auch, dass die gesamte Entwicklungs- und Prozesskette auf die besonderen Belange der Faserverbundwerkstoffe ausgerichtet ist. Dies beginnt beim optimalen Strukturkonzept und endet bei der Qualitätssicherung. Des Weiteren fehlt es vielen Konstrukteuren an Erfahrung hinsichtlich der Konstruktion und Berechnung von Faserverbundbauteilen. Weitere Schwierigkeiten sind bei der Verarbeitung zu sehen. Neben hochautomatisierten Techniken zur Verarbeitung fehlt es auch Fachkräften und an Qualifizierungskonzepten. Der hohe Aufwand, der aktuell

schon betrieben wird, sowie die steigenden Kundenforderungen nach niedrigen Betriebskosten von Fahrzeugen deuten allerdings darauf hin, dass der Anteil an Kunststoffen in den nächsten Jahren steigen wird und sie zu einem unverzichtbaren Material in der Fahrzeugindustrie heranwachsen lässt. [5,24]

	Epoxidharz (EP-Harz)	CFK (EP-Harz mit C-Faser)	Polyester- harz (UP-Harz)	GFK (UP-Harz mit Glasfaser)	
Optimaler Leichtbau					<b>Legende:</b> Kriterium wird vollständig erfüllt Kriterium wird nahezu vollständig erfüllt Kriterium wird teilweise erfüllt Kriterium wird ansatzweise erfüllt Kriterium wird nicht erfüllt
Geringe Dichte					
Hohe Zuverlässigkeit					
Zugfestigkeit					
Zug-E-Modul					
Wärmeausdehnungskoeffizient		-		-	

Abb. 19: ausgewählte Eigenschaften faserverstärkter Kunststoffe [84, 85, 86, 87, 88]

## LEICHTBAUBEISPIELE

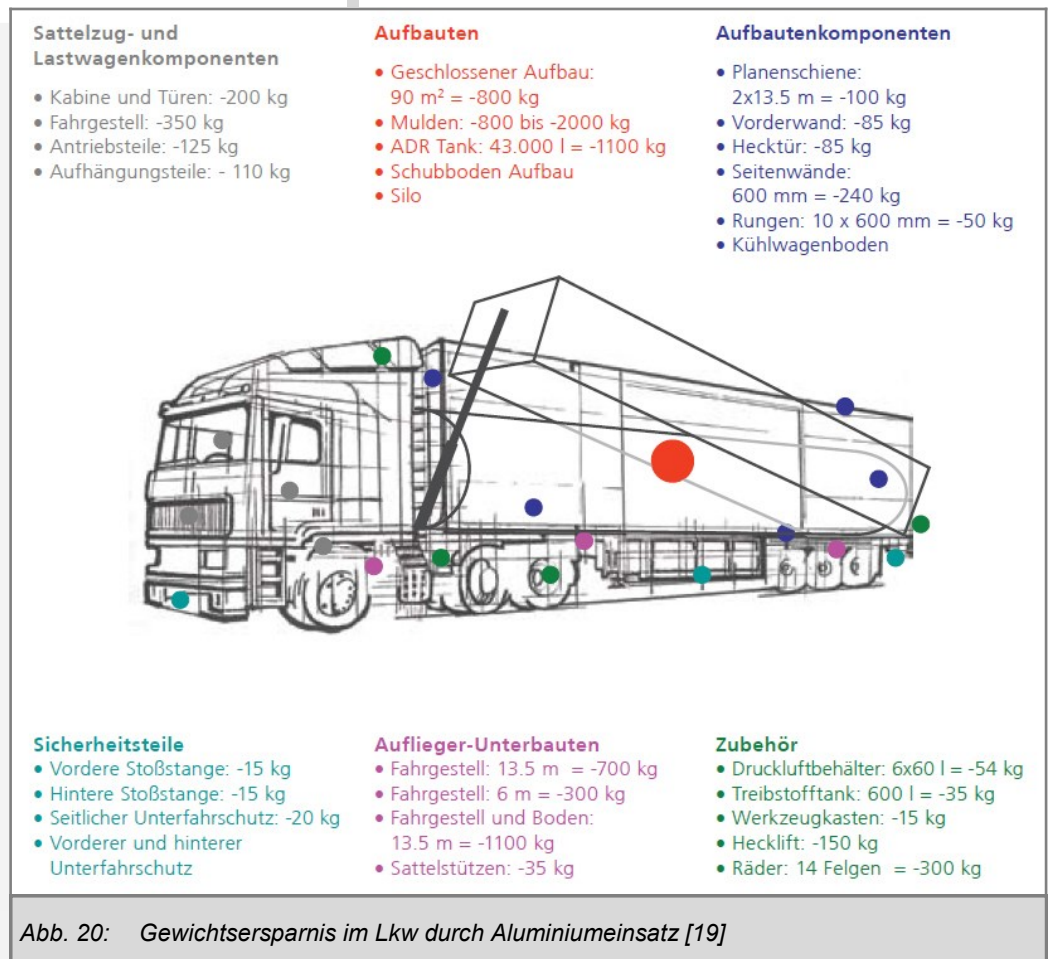
**N**eben neuen, emissionsmindernden Antriebslösungen stehen in der Nutzfahrzeugindustrie vermehrt auch Leichtbauanwendungen im Fokus der Betrachtung. Insbesondere der Einsatz der Werkstoffe „hochfester Stahl“ und „Aluminium“ ist auf Grund der ihrer Eigenschaften in der Nutzfahrzeugindustrie von besonderer Bedeutung.

Gerade für größere Serien ist Stahl, aufgrund der hervorragenden Verarbeitungs- und Recyclingmöglichkeiten, weiterhin der wirtschaftlichste Werkstoff. Während bei Stahl je Kilogramm Gewichtreduktion mit ca. 2

Euro Mehrkosten zu rechnen ist, verursacht der Einsatz von Aluminium Mehrkosten von 10-12 Euro je Kilogramm Gewichtserparnis und einen ca. 4-mal so hohen Energieaufwand wie bei der Herstellung von hochfesten Stählen. Andererseits lassen sich gemäß dem Gesamtverband der Aluminiumindustrie bei Sattelzügen alleine „durch die Werkstoffsubstitution bei der Fahrerkabine, bei Rah-

men und Querträgern, Naben, Rädern, Motorenteilen und dem Getriebegehäuse bis zu mehreren Tonnen Gewicht einsparen und entsprechend höhere Nutzlasten realisieren“ und somit die Transporteffizienz steigern. [18,77]

Auch der Einsatz von nichtmetallischen Werkstoffen steigt in der Nutzfahrzeugindustrie an. Allerdings ist der Einsatz gewöhnlicher Kunststoffe noch weitaus verbreiteter als der von faserverstärkten Kunststoffen. Hauptanwendungsfelder herkömmlicher Kunststoffe sind bspw. Verkleidungsteile, Abdeckungen, Radkästen, Tanks etc.





## LEICHTBAUBEISPIELE

Die meisten Leichtbauansätze im Bereich Nutzfahrzeuge lassen sich bei LKW finden. Bei mobilen Arbeitsmaschinen wurden bislang, auch aufgrund der noch höheren Lastanforderungen an die Bauteile, der geringeren Stückzahlen etc. deutlich weniger Leichtbaumaßnahmen durchgeführt. Im Folgenden wird, teilweise getrennt nach Anwendungsbereich ein Auszug neuer, leichtbauorientierter Entwicklungen bei LKW und mobilen Arbeitsmaschinen vorgestellt.

## LKW

## Aufbau

Hohe Gewichtseinsparungen lassen sich u.a. beim Aufbau erzielen. So können z.B. je nach Fahrzeugart durch Aufbauten aus Aluminium bis zu 2 Tonnen Gewicht gegenüber herkömmlichen Bauweisen eingespart werden. [29] Somit lässt sich durch konsequenten Aluminiumeinsatz das Gewicht einer Sattelzugmaschine mit Auflieger um bis zu drei Tonnen reduzieren. Durch eine

Gewichtersparnis von „nur“ 1.500 kg lässt sich bei 3/4-Beladung und einer jährlichen Fahrleistung von 100.000 km der CO<sub>2</sub>-Ausstoß um 5,8 Tonnen reduzieren. [30]

Gerade für LKW-Aufbauten bieten sich jedoch Faserverbundwerkstoffe an. Bei kleineren Nutzfahrzeugen, wie z.B. Transportern sind Leichtbau-Kofferaufbauten schon standardmäßig erhältlich. So bietet z.B. die Rapid Leichtbau-GmbH Sandwich-Leichtbaukoffer bestehend aus einem Polypropylen-Wabenkern und glasfaserverstärkten Polypropylen-Deckschichten für zahlreiche Transporter an. [31]

Für große LKW-Aufbauten hat die Firma Laminux zwei Carbon- und Glasfaser-Composites entwickelt, die als Flachbahnen mit bis zu 3,2 m Breite gefertigt werden können und somit als Deckschichten bei Sandwichelementen für Seitenwände sowie Dächer und Böden von Aufbauten einsetzbar sind. Dadurch lässt sich das Gewicht gegenüber Stahl und Aluminium um bis zu 50% bei



Abb. 21: Anwendungsbeispiele für Kunststoffteile

## LEICHTBAUBEISPIELE

einer bis zu viermal höheren Zugfestigkeit verringern. Für diesen innovativen Verbundwerkstoff wurde das Unternehmen auf der letzten IAA Nutzfahrzeuge mit dem „European Frost & Sullivan Award for New Product Innovation“ ausgezeichnet. Nach Unternehmensangaben besteht durch die neu entwickelten Platten die Möglichkeit das Gesamtgewicht eines LKW um rund 2.000 kg und somit den Kraftstoffverbrauch um etwa 20 Prozent zu reduzieren. [27,32,33]

Neben dem Aufbau gibt es aber auch weitere Komponenten die für den Leichtbau von großer Relevanz sind. Hierzu zählen u.a. das Fahrwerk, der Antriebsstrang und die Kabine.

### Fahrwerk

Auf der IAA 2012 stellte Magna einen Leichtbau-rahmen aus Stahl für Sattelzugmaschinen vor. Bei dem für Langstreckentransporte ausgelegte Stahl-Monocoque-Rahmen konnte das Gewicht, bei gleichbleibender, teilweise sogar verbesserter Leistungsfähigkeit, um 30% gegenüber einem herkömmlichen Leiterraum reduziert werden. Durch die Integration eines speziellen Tanksystems kann die Treibstoffmenge auf bis 1500 Liter Diesel erhöht werden. [35] Auf dem 6. Grazer Nutzfahrzeug Workshop im Mai 2014 stellte Magna das Konzept für einen weiteren Sattelzug-Leichtbau-rahmen mit einer in der Monoco-



Abb. 22: LKW-Aufbau mit Faserverbundwerkstoffen der Fa. Lamilux [34]

questruktur integrierten Einzelradaufhängung an der Vorderachse vor. [89]

Im Rahmen des Projektes Trailtech hat sich der Stahlkonzern Arcelor Mittal ebenfalls zum Ziel gesetzt ein Chassis für Sattelaufleger zu entwickeln, welches 30% leichter als die Referenzstruktur ist und 20% weniger Fertigungskosten verursacht. Durch den Einsatz von hochfestem, mikrolegiertem Stahl konnte das Fahrwerksgewicht sogar um 39% gesenkt werden. Weiterhin konnten die Materialkosten auf Grund des geringeren Materialbedarfs (mögliche Reduktion der Wandstärke der Längs- und Querträger um mindestens die Hälfte) um 29% verringert werden. Nach Unternehmensangaben bietet das Fahrwerk bei gleicher technischer Leistungsfähigkeit wie das Referenzfahrwerk eine Kraftstoffeinsparung von 0,4-0,6l /100 km. Bei einer angenommen Fahrleistung von 150.000 km/Jahr könnte der CO<sub>2</sub>-Ausstoß somit um jährlich 900 kg verringert werden. Darüber hinaus führt der Kraftstoff-

## LEICHTBAUBEISPIELE



Im Rahmen eines Forschungsprojektes wurde von Gratz Engineering ein Fahrgestell für leichte LKW (Gewichtsklasse 5,5-12 t) entwickelt, bei dem die üblichen durchgängigen Starrachsen durch ein Leichtbau-Fahrgestell mit Zentralrohr und Einzelradaufhängung ersetzt werden. Durch die geringeren ungefederten Massen (bei Einzelradaufhängung federt das Achsgetriebe und die Achsbrücke nicht

Abb. 23: LKW-Leichtbaurahmen von Magna [36]

minderverbrauch bei der angegebenen Laufleistung zu einer Einsparung von ca. 4500 € je Fahrzeug. [37,38]

mit) kann, neben der Erhöhung des Fahrkomforts, der Einbauraum verringert und somit Platz für andere Komponenten geschaffen werden. Die Nachteile des aufwendigen Konzeptes, wie z.B. höhere Kosten der Einzelradaufhängung im Vergleich zur Starrachse können durch die möglichen Gewichtseinsparungen und großer Variabilität hinsichtlich Fahrdynamik und Radaufhängungsgrößen wieder relativiert werden. [41]

Aktuelle Entwicklungen im Bereich Sattelaufleger berücksichtigen auch den Einsatz von Faserverbundwerkstoffen. Das Unternehmen TTT The Team Composite AG hat zusammen mit Partner aus Forschung, Entwicklung und Produktion einen Carbon-Trailer entwickelt, der, auf Grund seines geringen Eigengewichts und seiner aerodynamischen Form den Dieserverbrauch um bis zu 25 % verringern und 2015 seine Serienreife erreichen soll. [39]

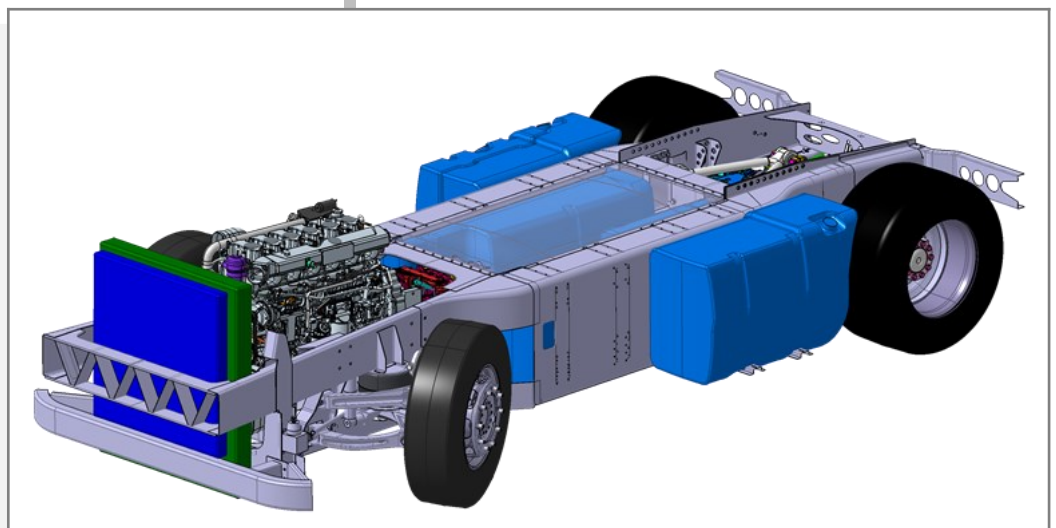


Abb. 24: LKW-Leichtbaurahmen von Magna [89]

## LEICHTBAUBEISPIELE

Im Rahmen des Forschungsprojektes „intelligenter Trailer in Leichtbauweise“ (I-Trail) wird aktuell von der Forschungsgesellschaft Kraftfahrwesen mbH Aachen (fka) dem Institut für Kraftfahrzeuge (ika) und der Wecon GmbH einen bahnverladbaren Leichtbau-Megatrailer entwickelt. Neben dem Aufbau und der Evaluierung eines fahrbereiten Aufliegerprototyps werden auch Konzepte zur Dämpfungsregelung und Energierückgewinnung sowie mögliche Assistenzfunktionen untersucht. [40]

Auf der letzten IAA Nutzfahrzeuge stellte ZF ebenfalls einige Entwicklungen im Bereich Leichtbau für Nutzfahrzeuge vor. Hierzu zählt z.B. die Vorderachsen-Einzelradaufhängung IS 80 TF für schwere LKW, mit der, im Vergleich zu einer aktuellen, lenkergeführten Luftfeder-Starrachse ein

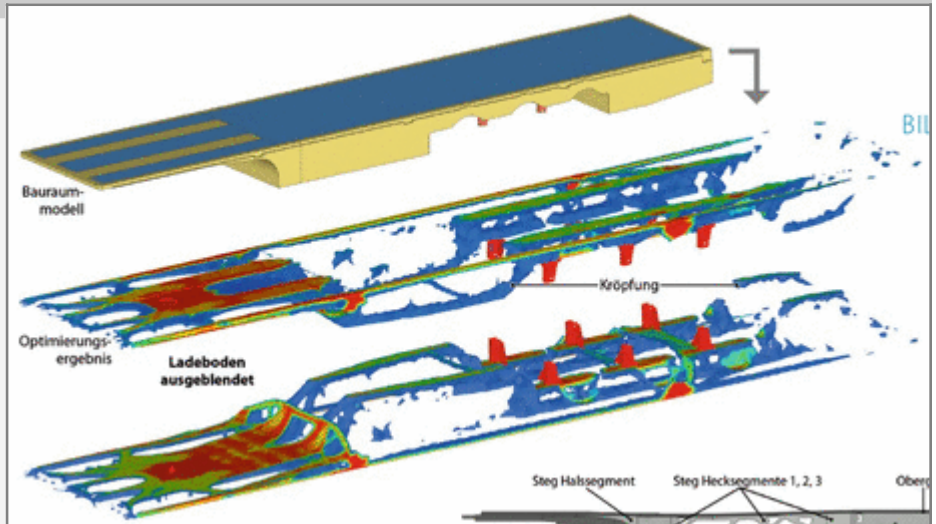


Abb. 26: Topologieoptimierung eines Trailers [40]

Masse von ca. 40 kg eingespart werden kann. Nach Unternehmensinformationen kann dies durch „eine Weiterentwicklung des Achsschenkelträger-Prinzips“ erzielt werden. Dazu werden die Querlenker verlängert und direkt mit dem Achsschenkelbolzen verbunden. Die Kombination mit einem Federträger zur Abstützung der Federkräfte ermöglicht die Einsparung des Achsschenkelträgers. [42]

Auch der Vierpunktlenker in Hohlgussausführung von ZF weist auf Grund seiner Funktionsvielfalt ein hohes Leichtbaupotential auf. Da er mehrere Aufgaben, nämlich die Längs- und Querführung der Achse sowie die Wankstabilisierung erfüllt, können andere, bisher erforderliche Bauteile entfallen. Um noch mehr Gewicht einsparen zu können, strebt ZF den Einsatz von Faserverbundwerkstoffen für die

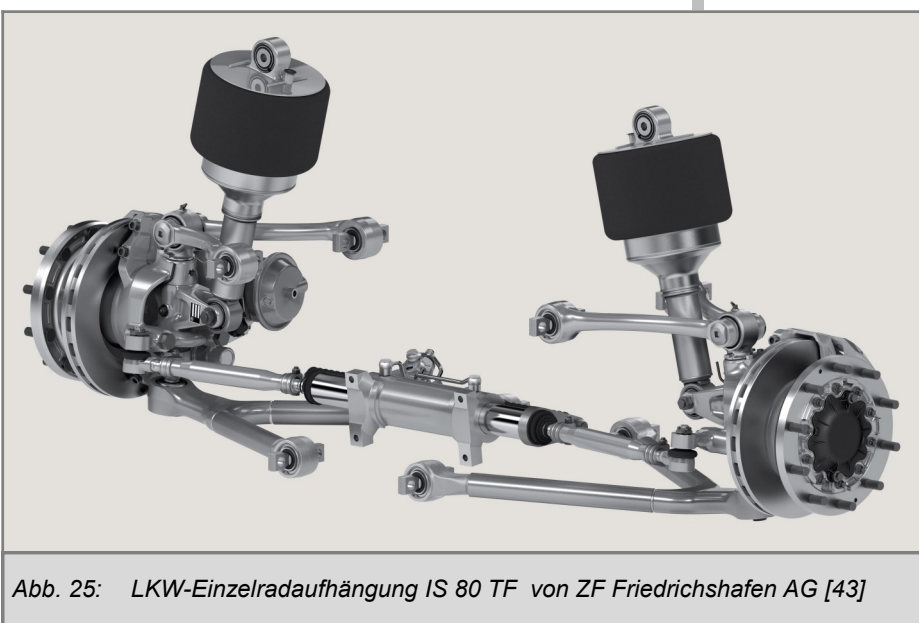


Abb. 25: LKW-Einzelradaufhängung IS 80 TF von ZF Friedrichshafen AG [43]

## LEICHTBAUBEISPIELE

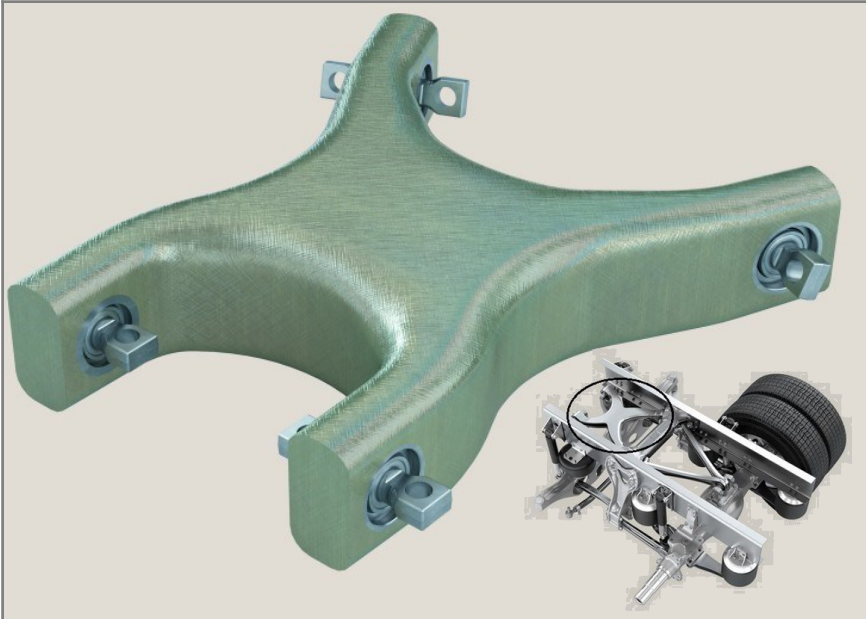


Abb. 27: Vierpunktklenker aus GFK von ZF [45,46]

Eine weitere Einsparung um ca. 12 kg pro Achse ist durch den Einsatz von Lkw-Luftfedern mit einem innovativen Kolben aus Kunststoff möglich. Der Hersteller dieses Systems, die ContiTech AG konnte nach eigenen Angaben durch die Verwendung eines glasfaserverstärkten Polyamids und geeigneter Simulationsverfahren bis zu 75% Gewicht im Vergleich zu herkömmlichen Stahlkolben einsparen. [49]

ses Bauteil an. Im Rahmen einer Konzeptstudie wurde der Vierpunktklenker mit GFK nachgebaut und „im Vergleich zur Gussvariante um rund 25 Prozent, das entspricht etwa 11 Kilogramm, leichter“ gemacht. [44]

Die Verbindung zwischen Trailer und Zugmaschine erfolgt über sog. Sattelkupplungen, die nicht nur einen Teil des Trailergewichtes, sondern auch erhebliche Kräfte z.B. bei Beschleunigungs- oder Abbremsvorgängen oder Kurvenfahrten aufnehmen müssen. Um das Gewicht dieser Kupplungen zu reduzieren, setzen z.B. SAF-HOLLAND oder auch IVECO auf Aluminium als Leichtbaumaterial, wodurch Gewichtseinsparungen von rund 40 kg ermöglicht werden. [47,48]

Auch die bei schweren LKW noch üblichen Blattfedern aus Stahl an der Vorderachse der Zugmaschine können durch solche aus faserverstärktem Kunststoff substituiert werden. Auf IAA 2011 wurde von dem Unternehmen IFC ein Prototyp für 40-Tonner vorgestellt. Mit einem Gewicht von 17 kg ist dieses Bauteil um fast 75 % leichter als sein Pendant aus Stahl. Nach Unternehmensangaben weist die GFK-Blattfeder „gegenüber einer



Abb. 28: Blattfedern aus faserverstärktem Kunststoff [51]

## LEICHTBAUBEISPIELE

*Blattfeder aus Stahl nicht nur beim Gewicht und der Umweltverträglichkeit, sondern auch in allen anderen relevanten Belangen erhebliche Vorteile auf. Denn GFK-Blattfedern sind auch wirtschaftlicher, komfortabler und haltbarer.“ [50]*

Sofern bei den Rädern und Achsschenkeln noch keine Leichtbau-Komponenten verbaut werden, bietet sich auch hier enorme Einsparpotentiale. In den letzten Jahren gewannen aluminiumlegierte Felgen bei Nutzfahrzeugen an Bedeutung und sind als Standard anzusehen. Bei einem 22,5 Zoll -Rad kann bei Aluminiumfelgen, im Vergleich zu Stahlfelgen, trotz der erforderlichen Radlasten von bis zu 5000 kg eine Masse von rund 50% eingespart werden [52]. Im Vergleich zu den Rädern haben sich die Radträger in den vergangenen Jahren kaum verändert. Ein neuer Ansatz, bei dem Aluminium auch bei Achsschenkeln eingesetzt werden, verspricht eine weitere Reduktion um ca. 2 kg [62]. Auch durch den Einsatz von Super-Single-Reifen lässt sich, neben der Verdopplung der Laufleistung, im Vergleich zur Zwillingbereifung an Gewicht (bis zu 130kg/Achse) sparen [53]. Um die Vorteile dieser Bereifung optimal nutzen zu können, sind jedoch speziell angepasste Rahmen erforderlich. Darüber hinaus erschwert die fehlende Redundanz die Akzeptanz auf dem Markt.

### Antriebsstrang

Auch im Bereich des Antriebes sind die Entwicklungen sehr vielfältig. Sie reichen von der Material-Substitution einzelner Komponenten bis hin zu völlig neuen Motor-Konzepten. So werden z.B. mittlerweile Zylinderkopfhauben und Ölwanne aus besonders widerstandsfähigem Kunststoff gefertigt, die auch den hohen mechanischen Beanspruchungen in Nutzfahrzeugen standhalten. Durch den Einsatz von Ölwanne aus DuPont™ Zytel®, einem Polyamid 6.6 mit 35 % Glasfaseranteil ist nach Aussage des Unternehmens EirringKlinger eine Gewichtsersparnis von bis zu 50 Prozent bezogen auf die üblichen Aluminium-Druckguss-Bauteile sowie eine Verringerung des Geräuschpegels um ca. 2 dB möglich. Darüber hinaus können in eine Kunststoff-Ölwanne Funktionen oder Anbauteile, z.B. Anschlüsse zum Einfüllen oder Absaugen, aber auch Sensoren zur Messung des Ölstandes oder der -qualität einfacher integriert werden. [78, 79, 80]

Weitere Bauteile bei LKW-Motoren bei denen aktuell bereits Kunststoffe eingesetzt werden, sind z.B. Ladeluft- und Ölsaug-Module. Auf Grund der hohen Temperaturen (bis zu 200°C) und Drücke (bis 25 bar bei Kaltstart) in diesem Fahrzeugbereich sind mechanisch und thermisch hoch belastbare Kunststoffe erforderlich. Die Daimler-Tochter Detroit Diesel Corporation setzt bei den Hochleistungsdiesel-LKW-Motoren DD13 und DD15 bereits Ladeluftrohre aus Polyamid

## LEICHTBAUBEISPIEL

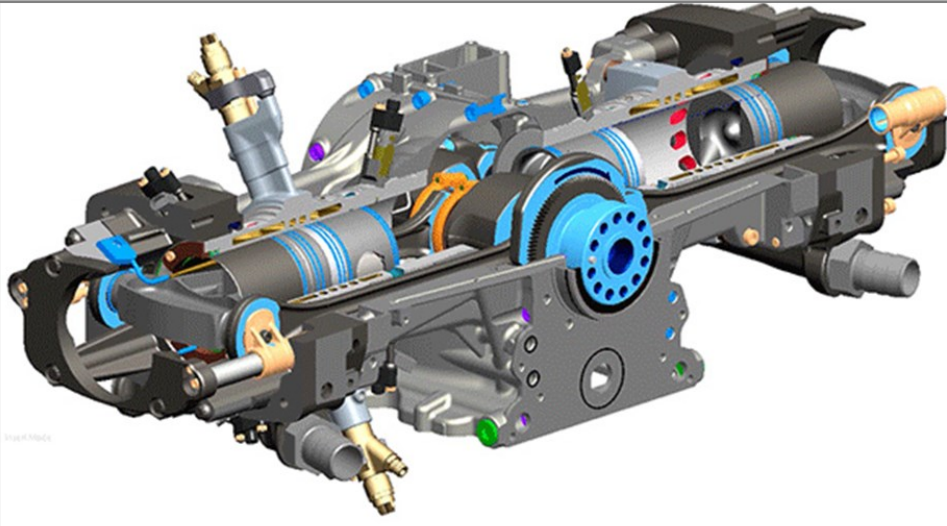


Abb. 29: Opoc®-Motor [82]

(PA) Ultramid A3W2G6 von ElringKlinger in Serie ein. Durch die Materialsubstitution konnte bei diesen Bauteilen eine Gewichtsreduktion von 1,8 kg (entspricht ca. 50 Prozent) im Vergleich zum Aluminiumvorgänger erzielt werden. Auch das Ölsaugmodul dieser Motoren, in dem neben dem Ölsaugstutzen und der Öldruckleitung auch ein Rückschlagventil integriert ist, wird aus einem speziellen Polyamid, dem sog. Ultramid A3WG7 gefertigt. Durch die Materialsubstitution und die Integration mehrerer Funktionen ist eine weitere Gewichtersparnis von ca. 0,8 kg (entspricht ca. 50 Prozent) möglich. [81]

Aber nicht nur einzelne, kleinere Bauteile des Antriebsstranges werden optimiert, sondern auch komplett neue Motorkonzepte erarbeitet. Der amerikanische Lkw- und Motorenhersteller Navistar z.B. will in Kooperation mit dem Unternehmen Ecomotors einen neuen Zweitakt-Motor bis zur Serienreife weiterentwickeln. Erfinder des mit verschiedenen Brennstoffen betreibbaren Zweitakt-Motors EM 100 D ist Prof. Peter Hofbauer,

ehemaliger Chef der VW-Motorenentwicklung. Bei diesem sog. Opoc®-Motor liegen die Zylinder einander gegenüber und die Kolben bewegen sich aufeinander zu und voneinander weg. Daher wird das neue Prinzip als Opoc - Opposed Pistons / Opposed Cylinders bezeichnet.

Als Vorteile werden von dem Unternehmen u.a. das im Vergleich zum Viertaktmotor um ca. 50% geringere Gewicht und der geringere Verbrauch angegeben. Auch die Schadstoffmengen sind nicht größer als bei herkömmlichen Viertaktmotoren. Darüber hinaus ist nach Aussage des Herstellers der neue Motor ca. 20% günstiger als ein herkömmlicher Motor und benötigt einen bis zu 30% geringeren Bauraum. [82,83]

### Kabine

Bei den Nutzfahrzeugenkabinen waren in den letzten Jahren ebenfalls leichtbautechnische Optimierungen zu verzeichnen. Die EDAG Group hat im Rahmen des Projektes „Lightcab“ ein modulares Kabinenkonzept entwickelt, bei dem durch Anwendung des Multi-Material.Design und unter Berücksichtigung moderner Entwicklungs- und Produktionsmethoden Gewichteinsparungspotentiale von bis zu 25 % erreicht werden konnten. Bei diesem Konzept kommen unterschiedlichste Werkstoffe, wie z.B. partiell gehärtete höchstfeste

## LEICHTBAUBEISPIELE

Stahlbleche, Elemente aus Stahl-Dünnwandguss und Verbundwerkstoffen zum Einsatz., die über verschiedene Fügeverfahren wie z.B. wie Kleben, Nieten, Schrauben und Laserlöten mit einander verbunden werden. [54]

Ein weiteres Beispiel für Leichtbau-Kabinen wird anhand des Fahrerhauses des Mercedes-Benz Econic ersichtlich. Es ist in Aluminium-Leichtbauweise gefertigt und erfüllt die europäische Crashtest-Norm ECE R29/2. Durch das Fahrerhaus mit einem Rahmen in selbsttragender Alu-Space-Cage-Bauweise und einer Außenverkleidung aus glasfaserverstärktem Kunststoff

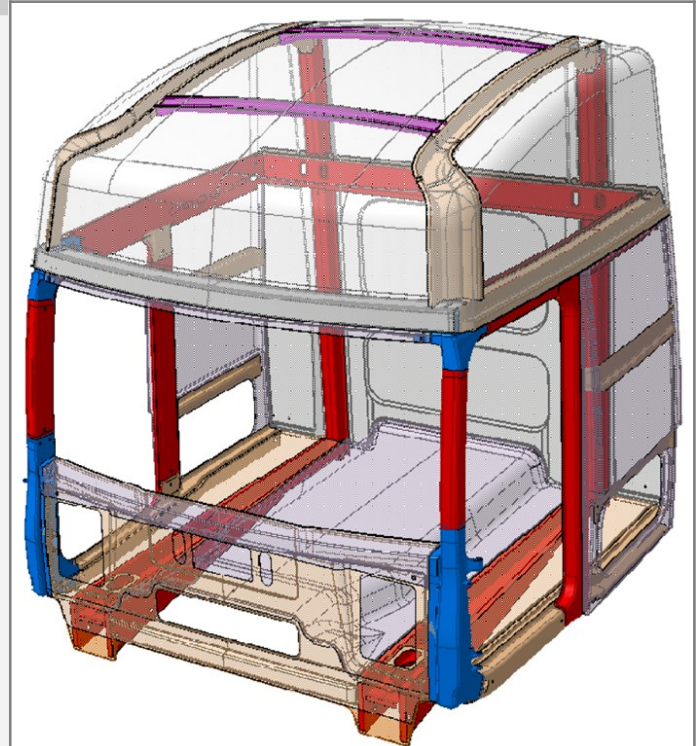


Abb. 31: EDAG-Light-Cab [55]



Abb. 30: LKW-Kabinen in Leichtbauweise [58]

konnten bis zu 300 Kilogramm gegenüber einem herkömmlichen Fahrerhaus eingespart werden. Für weitere Fahrzeuge wie z.B. Zetros, Actros werden einzelne Bauteile, wie z.B. die Hochdachkabine, Dachablage etc. ebenfalls aus GFK angefertigt. Darüber hinaus wird für den Unimog der komplette Fahrerhaus-Rohbau in CFK-Bauweise mit lokalen Metallverstärkungen angeboten. [56,57,58]

Auch von ZF wurden auf der letzten IAA Nutzfahrzeuge eine Leichtbaukomponente für Kabinen vorgestellt. Bei dem Kabinen-Dämpfungsmodul LCM ersetzt eine Balgfeder aus GFK die sonst übliche Stahlfeder und übernimmt gleichzeitig die Funktion des Gehäuses. Durch das leichtere Material und



## LEICHTBAUBEISPIELE



Abb. 32: Leichtbau-Kabinendämpfungsmodul LCM von ZF [59]

wurde und zu 20 % aus CFK und 80 % aus nachwachsenden Flachsfasern besteht, wiegt lediglich 13,8 kg und ist somit der aktuell leichteste Lkw-Sitz der Welt. Vergleichbare Sitze aus Stahl wiegen zwischen 30 - 50 kg. Neben dem Einsatz leichterer Materialien konnte bei diesem Sitzkonzept durch Funktionsintegration auch die Anzahl der Bauteile um 75 % reduziert werden. [60]

die Einsparung des Außenrohrs kann das Gewicht um ca. 30% verringert werden. [44]

Im Interieur der Kabinen hat sich in den letzten Jahren ebenfalls vieles hinsichtlich Leichtbau verbessert. Neben z.B. geschäumten Konsolen, die mittlerweile Standard sind, gibt es auch beträchtliche Fortschritte im Bereich Sitze. Die Zuliefererfirma Grammer stellte auf der IAA zwei neue Leichtbau-Beifahrersitzkonzepte aus hochfestem Stahl und faserverstärktem Kunststoff vor. Um die Gewichtsreduktion von min. 40% gegenüber handelsüblichen Statiksitzen erzielen zu können, wurde bei beiden Sitzen wurden die Funktionsvielfalt auf das mögliche Minimum reduziert. Das Modell aus Faserverbund-Werkstoff, das gemeinsam mit der IFA Technologies GmbH entwickelt

die Einsparung des Außenrohrs kann das Gewicht um ca. 30% verringert werden. [44]



Abb. 33: Leichtbau-LKW-Sitz aus faserverstärktem Kunststoff (links) und hochfesten Stahl (rechts) [61]

## LEICHTBAUBEISPIELE

### Land- und Baumaschinen

Landmaschinen zeichnen sich im Vergleich zu den bislang beschriebenen Nutzfahrzeugen nochmals durch geringe Stückzahlen aus. Aus diesem Grund greift man in dieser Branche oftmals auf herkömmliche Werkstoffe zurück und vermeidet aus Kostengründen die Entwicklung mit alternativen Werkstoffen. Aber auch in diesem Industriezweig rückt das Thema Leichtbau immer mehr in den Vordergrund, da neben den gesetzlichen Vorschriften (Tier4 final Emissionsvorschrift) in den letzten Jahren auch der Aspekt der Bodenschonung erheblich mehr Berücksichtigung fand.

Da Landmaschinen in der Regel in einem breiterem Anwendungsspektrum eingesetzt werden, ist es schwieriger als bei herkömmlichen Nutzfahrzeugen ein optimales Leichtbaukonzept umzusetzen. Vor allem aufgrund der stark unterschiedlichen Lastfälle, werden die Maschinen so konstru-

iert, dass sie universell einsetzbar sind, was natürlich dem Leichtbauaspekt entgegenwirkt. Dennoch soll auch in diesem Bereich die Nutzlast maximiert werden. Bestehende Stahlkonstruktionen werden nach Möglichkeit aus Aluminium neu konstruiert um Gewicht einzusparen. Außerdem wird häufig auf hochfesten Stähle zurück gegriffen. Dadurch können sie schlanker gestaltet werden, was zu einer Gewichtsreduktion führt. Verschiedene Möglichkeiten Leichtbau bei Landmaschinen, z.B. durch unterschiedliche Rahmenkonzepte bei Traktoren umzusetzen, wurden im Rahmen der Osnabrücker Leichtbautage vorgestellt. Zusätzlich wird üblicherweise versucht, die Fahrzeuge, z.B. mittels moderner Berechnungsmethoden genauer auf die Lastfälle auszuliegen und überdimensionierte Komponenten zu reduzieren. Ein weiterer Ansatz ist die Auslagerung von Komponenten die während des Transports nicht benötigt werden. Bei einem Pump-tankwagen kann beispielsweise die Pumpstation

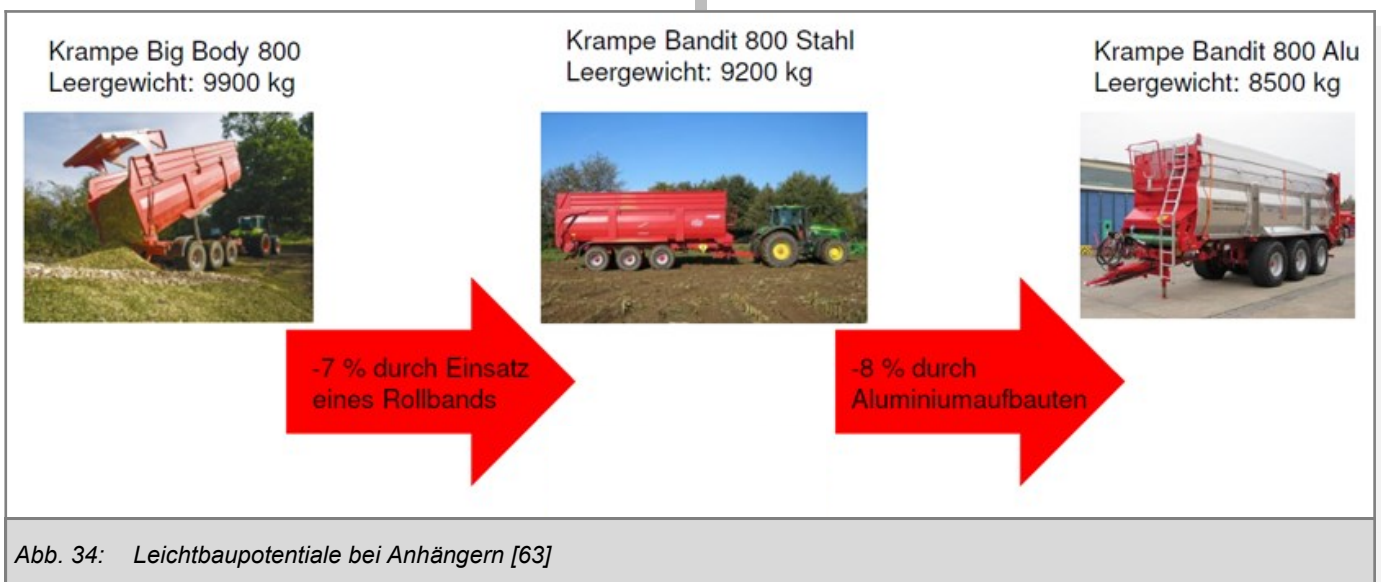


Abb. 34: Leichtbaupotentiale bei Anhängern [63]

## LEICHTBAUBEISPIELE

## ■ Haltestangen aus Kohlefaser

- Umfangreiche Versuche an skalierten Prüfkörpern
- Dimensionierung der Anschlussstelle aus Stahl
- Erste Prototypen...



Abb. 35: CFK-Haltestangen bei Gittermastkränen [66]

durch eine externe Befüllstation ersetzt werden, wodurch alleine die bewegte Masse um 22% verringert werden kann. [63,64]

Baumaschinen werden in ähnlicher Stückzahl wie Landmaschinen gefertigt. Auch in diesem Industriebereich kommt dem Thema Leichtbau aufgrund immer höherer Traglastforderungen bei gleichzeitig größtmöglicher Bodenschonung und geringerem Schadstoffausstoß eine immer größere Bedeutung zu. Jedoch spielt auch hier, aufgrund der geringen Stückzahlen, das Verhältnis zwischen Aufwand und Nutzen eine wichtige Rolle und lässt wenig Spielraum für Experimente. Als Beispiel für Leichtbau bei mobilen Arbeitsmaschinen lässt sich u.a. der von Thyssen Krupp leichtbaugerecht entwickelte. Zum Bau von Staudämmen eingesetzte Kabelkran „Three Gorges“, der Lasten bis zu 30 t über große Distanzen horizontal und vertikal bewegen muss, nennen. Die Anforderungen, die an einen solche Kran gestellt

forderungen, die an einen solche Kran gestellt werden, wie z.B. hohe Tragfähigkeiten bei gleichzeitiger Entlastung der Lager und Fundamente erfordern die Berücksichtigung verschiedener Leichtbauansätze. So wurden z.B. Komponenten, wie Winden, die u.a. die Laufkatze verfahren, aus der beweglichen Baugruppe ausgelagert und am Mastfuß befestigt, wodurch eine Ermöglichten eine Gewichtsreduzierung der bewegten Masse erreicht werden konnte. [65]

Liebherr setzt im Kranleichtbau neben hoch- und höchstfesten Feinkornbaustählen auch auf Faser-verbundwerkstoffe. So werden z.B. Haltestangen aus CFK angefertigt, die im Vergleich zu ihrem Stahl-Pendant bei gleichem Querschnitt und höheren Zugfestigkeiten nur etwa ein Drittel des Gewichtes aufweisen und somit längere Auslegerkombinationen und höhere Tragfähigkeiten ermöglichen. Ferner müssen die CFK-Haltestangen, auf Grund der größeren Ermüdungsfestigkeit nicht ausgetauscht werden. Werden darüber hinaus auch die am Auslegerkopf angebrachten Seilrollen aus CFK gefertigt, können pro Seilrolle weitere 11 kg im Vergleich zu Rollen aus Gusspolyamid eingespart werden. Im Zusammenhang mit den CFK-Haltestangen ermöglicht diese Gewichtsreduktionen am Auslegerkopf auf Grund des großen Hebelarms eine Verlängerung des Auslegers um neun Meter. [66,67]

## LEICHTBAUBEISPIELE

Ein weiteres Beispiel für Leichtbau bei Baumaschinen ist das durch das BMBF geförderte Verbundprojekt „Ultraleichtbau bei mobilen Arbeitsmaschinen“. Im Rahmen dieses Projektes wurden Autobetonpumpen mit Betonverteilmästen nach leichtbaugerechten Aspekten entwickelt, mit dem Ziel die Funktionalität u.a. hinsichtlich Tragfähigkeiten Reichweite, Verstellgeschwindigkeit etc. zu verbessern. Da diese Maschinen sowohl in stationärer, als auch mobiler Ausführung erhältlich sind, war es wichtig, das Gewicht minimal zu halten. Neben optimierten konstruktiven Auslegung mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode wurden auch alternative Werkstoffe angewandt. Durch die Verwendung von hochfesten Baustählen in Kombination mit Aluminiumschaum konnten Profile mit hoher Systemsteifigkeit und -dämpfung entwickelt werden. Auch andere Materialkombinationen wie z.B. Stahl-Kunststoff oder CFK-Kunststoff wurden für den Einsatz bei Betonförderleitungen bis zur Se-



Abb. 37: Leichtbau bei Betonpumpen [68]

rienreife entwickelt. Diese und weitere Maßnahmen ermöglichten die Entwicklung eines Betonverteilmast, der bei gleichbleibendem Gesamtgewicht eine größere Reichweite erzielt. [68,69,70]

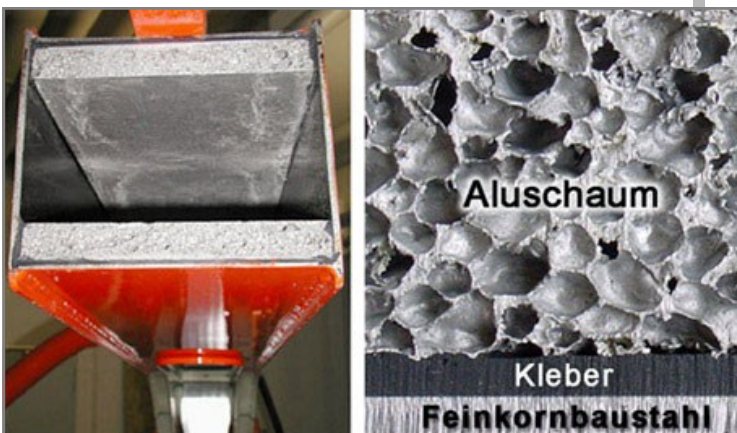


Abb. 36: Metallschaumverstärkung eines Kastenträgers [68]

## ZUSAMMENFASSUNG

**D**urch neue gesetzliche Regelungen bzgl. geringen Schadstoffemissionen muss auch die Nutzfahrzeugindustrie ihre Produkte leichtbautechnisch optimieren. Auch die immer geringer werdenden Vorräte an fossilen Energiequellen bei gleichzeitiger Steigerung des Güterverkehrs zeigen die Notwendigkeit eines geringeren Kraftstoffverbrauchs oder einer Erhöhung der Nutzlast. Um einen emissionsärmeren und transporteffizienteren Straßengüterverkehr zu ermöglichen, sind daher leichtere Fahrzeuge unumgänglich. [84], [85] Auch bei mobilen Arbeitsmaschinen ist die Forderung nach leichteren und damit effizienteren und umweltschonenderen Maschinen vorhanden. Durch höheren Komfort und bessere Sicherheitssysteme steigt das Gewicht der Fahrzeuge jedoch in der Regel zunächst an. Daher kann der Leichtbau als eine der Schlüsseltechnologien für künftige, innovative Entwicklungen angesehen werden.

Um jedoch innovative Konzepte und Lösungen im Bereich Leichtbau und Alternative Werkstoffe erarbeiten zu können, ist auf Grund des großen Themenspektrums gerade bei KMU die Zusammenarbeit mit anderen Unternehmen oftmals unerlässlich. Auf Grund der starken Konzentration von Nutzfahrzeugherstellern und -zulieferern in Rheinland-Pfalz und dem Südwesten Deutschlands sowie dem Standort des Landestechnologieschwerpunktes „Zentrum für Nutzfahrzeugtechnologie“ an der TU Kaiserslautern bietet sich

in dieser Region der systematische Auf- und Ausbau sowie die Etablierung eines Leichtbau-Netzwerks für die Nutzfahrzeugindustrie an.

Eine Analyse der Konkurrenzsituation hat gezeigt, dass es in Deutschland zwar zahlreiche Netzwerke der Automobilindustrie und/oder Werkstofftechnik gibt, diese sich aber mit Ausnahme des Cluster Nutzfahrzeuge Schwaben e.V., das jedoch hauptsächlich als regionales Branchennetzwerk fungiert und keine konkreten Projekte bearbeitet, auf die Automobilbranche fokussieren. Die Besonderheiten der Nutzfahrzeugindustrie werden in keinem der etablierten Zentren explizit berücksichtigt, obwohl Leichtbau auch in der Nutzfahrzeugindustrie immer mehr in den Fokus rückt und großes Potential bietet. Dies bietet dem CVC somit die Möglichkeit einen industriellen Schwerpunkt im Bereich Leichtbau und alternative Werkstoffe für Nutzfahrzeuge und Sondermaschinen in Rheinland-Pfalz zu schaffen und als Alleinstellungsmerkmal des CVC zu etablieren.

Im Vergleich zur Land- und Baumaschinenbranche ist die LKW-Industrie auf Grund ihrer engeren Zusammenarbeit und der größeren Stückzahlen schon etwas weiter fortgeschritten, bietet aber dennoch noch ausreichend Optimierungspotential. Da hohe Entwicklungskosten vermieden werden müssen, bietet es sich an, das Wissen der Automobilbranche zu adaptieren und in den eigenen Bereich zu übernehmen. Besonders die Ver-

## ZUSAMMENFASSUNG

wendung alternativer Werkstoffe, die bereits im Pkw-Bereich Anwendung findet, kann auch für Nutzfahrzeuge in Betracht gezogen werden, insbesondere da auf diesem Gebiet in den letzten Jahren die Entwicklungen vorangeschritten sind.

Da der Einsatz alternativer Werkstoffe im Fahrzeugbau tendenziell steigend ist, ist davon auszugehen, dass in den kommenden Jahren die Materialkosten sinken und die Fertigungsmöglichkeiten steigen werden. Dadurch können auch Verbundwerkstoffe in der Nutzfahrzeugindustrie zu einem attraktiven Substituenten für herkömmliche Stoffe werden. Trotz alledem ist auch das Entwicklungspotenzial von Stahl noch lange nicht an seiner Grenze. Besonders hochfeste Stähle sind wirtschaftliche Leichtbau-Werkstoffe. Durch Einsatz modernster Stahlsorten und Bauweisen, wie z.B. Tailored Blanks und TailorRolled Products oder auch durch die Substitution von Stahl durch Aluminium lassen sich auch heute noch erhebliche Leichtbaupotenziale in der Nutzfahrzeugindustrie erzielen.

Neben der Verbesserung einzelner Werkstoffe durch Legierungselemente und spezielle Wärmebehandlungsverfahren sowie der Umsetzung konstruktiver Leichtbaupotentiale durch z.B. Space-Frame-Bauweisen ist gerade der gesamtheitliche, auf den jeweiligen Lastfall zugeschnittene Ansatz in Form des Multi-Material-Designs von erheblicher Bedeutung. Diese Bauweise, bei der unterschiedlichste Materialien miteinander kombiniert

werden, besitzt das größte Leichtbau- und folglich auch das größte CO<sub>2</sub>-Reduzierungspotential. Besondere Herausforderungen sind gerade bei Multimaterialverbunden in den Füge- und Fertigungstechniken zu sehen. Bei der Anwendung leichtbaugerechter Konzepte und Leichtbauweisen darf jedoch die Sicherheit der Fahrzeuge nicht gemindert werden, weshalb veränderte Komponenten neu ausgelegt werden müssen.

Die in der vorliegenden Studie aufgezeigten Beispiele stellen deutlich dar, welche Möglichkeiten in der Nutzfahrzeugbranche bestehen, um Fahrzeuge leichter zu gestalten. Diese gilt es weiterzuentwickeln und zu verbessern. Zusätzlich sollten bislang ungenutzte Potentiale analysiert und ausgeschöpft werden, um eine optimale Konstruktion mit minimalem Gewicht zu erzielen. Auch wenn leichtbaugerechtes Gestalten mit einem derzeit hohen Kostenaufwand verbunden ist, so überwiegt der langfristige Nutzen für Kunden, Unternehmen und Umwelt. Zudem können Entwicklungskosten durch die Adaption bestehender Konzepte aus der Automobilindustrie minimiert werden. Auf diese Weise kann Leichtbau auch in der Nutzfahrzeugbranche angewendet werden. Somit können gesetzliche Forderungen und Kundenansprüche erfüllt werden und der Branche weiterhin hohe Gewinne garantieren.

## LITERATURVERZEICHNIS

- [1] BOSCH REXROTH AG: *Abgasgesetzgebung – Der Fahrzeughersteller in der Pflicht*. URL: [http://www.boschrexroth.de/business\\_units/brm/de/Trends\\_und\\_Themen/TIER-4-final/index.jsp](http://www.boschrexroth.de/business_units/brm/de/Trends_und_Themen/TIER-4-final/index.jsp). Abruf: 06.03.14
- [2] BOSCH REXROTH AG: *TIER 4 final: Die Grenzwerte ab 2014 auf einen Blick*. URL: [http://www.boschrexroth.de/business\\_units/brm/de/Trends\\_und\\_Themen/TIER-4-final/downloads/2013\\_Emission-Limits\\_Tier-Stage\\_de.pdf](http://www.boschrexroth.de/business_units/brm/de/Trends_und_Themen/TIER-4-final/downloads/2013_Emission-Limits_Tier-Stage_de.pdf). Abruf: 06.03.14
- [3] UMWELTBUNDESAMT: *Schwere Nutzfahrzeuge*. URL: <http://www.umweltbundesamt.de/themen/verkehr-laerm/emissionsstandards/schwere-nutzfahrzeuge>. Abruf: 10.03.14
- [4] ARAL CARD TRUCK: *Euro 6 – Top oder Flop?* URL: [http://www.aralcardtruck.de/no\\_cache/news/aral-cardtruck-news/aral-cardtruck-news-detail/cHash/54bf908f52b3a0babf88c92331908ede/article/euro-6-top-oder-flop/](http://www.aralcardtruck.de/no_cache/news/aral-cardtruck-news/aral-cardtruck-news-detail/cHash/54bf908f52b3a0babf88c92331908ede/article/euro-6-top-oder-flop/). Abruf: 07.03.14
- [5] EMOBIL BW: *Leichtbau in Mobilität und Fertigung – Chancen für Baden-Württemberg*. e-mobil BW GmbH – Landesagentur für Elektromobilität und Brennstoffzellentechnologie Baden-Württemberg. (2012)
- [6] HEUSS, R., MÜLLER, N., VAN SINTERN, W., ET. AL.: *Lightweight, heavy impact*. McKinsey&Company, (2012).
- [7] WIEDEMANN, J.: *Leichtbau - Elemente und Konstruktion*. 3. Auflage, Springer-Verlag, Heidelberg (2007).
- [8] KLEIN, B.: *Leichtbau-Konstruktion*. 10. Auflage, Springer-Verlag, Heidelberg (2013).
- [9] EMOBIL BW: *Spanende Bearbeitung von Leichtbauwerkstoffen – Einführung und Überblick*. e-mobil BW GmbH – Landesagentur für Elektromobilität und Brennstoffzellentechnologie Baden-Württemberg (2012).
- [10] HORST, E.: *Leichtbau in der Fahrzeugtechnik*. ATZ/MTZ Fachbuch, Springer Verlag, Heidelberg (2013).
- [11] RIEG, F.; STEINHILPER R.: *Handbuch Konstruktion*. Carl Hanser Verlag, München (2012).
- [12] OICA: *2011 Production statistics*. International Organization of Motor Vehicle Manufacturers. URL: <http://www.oica.net/category/production-statistics/2011-statistics/>, Abruf: 16.09.2013
- [13] CHANDRALINGAM, S.: *Leichtbauwerkstoffe für Nutzfahrzeuge und mobile Arbeitsmaschinen*. Studienarbeit, Lehrstuhl für Konstruktion im Maschinen- und Apparatebau, Technische Universität Kaiserslautern, 2013
- [14] DEILER, G.: *Anwendungspotenziale und Prozessgrenzen für die umformtechnische Herstellung von steifigkeitsoptimierten Bauteilen aus Doppellagenblech*. FAZ, Band 173, 12/2002.
- [15] WESTKÄMPER, E.: *Einführung in die Fertigungstechnik*. 6. Auflage, Springer-Verlag. Berlin (2004).
- [16] ROOS, E.; MAILE, K.: *Werkstoffkunde für Ingenieure - Grundlagen, Anwendung, Prüfung*. 4. Auflage, Springer-Verlag, Heidelberg (2011).
- [17] BARTOS, R.: *Stahl für nachhaltige Mobilität*. Stahl-Zentrum, URL: <http://www.stahl-online.de/index.php/themen/stahlanwendung/mobilitaet/>. Abruf: 01.03.14
- [18] EAA: *Aluminium im Nutzfahrzeugbau*. European Aluminium Association AISBL. URL: [http://www.alueurope.eu/wp-content/uploads/2011/09/Aluminium-im-Nutzfahrzeugbau\\_Rev1\\_Bookmarks.pdf](http://www.alueurope.eu/wp-content/uploads/2011/09/Aluminium-im-Nutzfahrzeugbau_Rev1_Bookmarks.pdf). Abruf: 16.09.2013

## LITERATURVERZEICHNIS

- [19] EAA: *Vorwärts mit Aluminium—leicht, stark und gewinnbringend*. European Aluminium Association AISBL, 2007. URL: [http://www.alueurope.eu/wp-content/uploads/2011/09/Moving-up-to-aluminium\\_de1.pdf](http://www.alueurope.eu/wp-content/uploads/2011/09/Moving-up-to-aluminium_de1.pdf). Abruf: 01.03.14
- [20] BAYER, F.: *Leichtbau im Fahrzeugbau „Leichte Metalle“, Fertigungsverfahren und Potenziale für die Automobilbranche*. In: Weyrich, M.: *Technologien der Fertigungsautomatisierung - Seminarreihe zu ausgewählten Forschungsthemen der industriellen Anwendung*, Siegen URL: [https://wiki.zimt.uni-siegen.de/fertigungsautomatisierung/index.php/Leichtbau\\_im\\_Fahrzeugbau%E2%80%9ELeichte\\_Metalle%E2%80%9C,\\_Fertigungsverfahren\\_und\\_Potenziale\\_f%C3%BCr\\_die\\_Automobilbranche#Magnesium](https://wiki.zimt.uni-siegen.de/fertigungsautomatisierung/index.php/Leichtbau_im_Fahrzeugbau%E2%80%9ELeichte_Metalle%E2%80%9C,_Fertigungsverfahren_und_Potenziale_f%C3%BCr_die_Automobilbranche#Magnesium) Abruf: 01.03.14
- [21] BECK, A.: *Magnesium und seine Legierungen*. Springer-Verlag, Berlin (2001).
- [22] ULRICH, K.: *Potenzial neuer Magnesiumlegierungen für den Leichtbau in der Verkehrstechnik, in Entwicklungen in der Oberflächentechnik in Theorie und Praxis*“. Neuss: Tagungsband, 03 2007.
- [23] GORYANY, V.; MAUK, P.; MYRONOVA, O.: *Magnesium als Leichtbauwerkstoff—Eigenschaften, Anwendungen, Entwicklungspotential*. Giesserei-Rundschau 53 (2006).
- [24] LÄSSIG, R.; EISENHUT, M.; MATHIAS, A. ET.AL.: *Serienproduktion von hochfesten Faserverbundteilen - Perspektiven für den deutschen Maschinen- und Anlagenbau*. Roland Berger Strategy Consultants (2012).
- [25] WITZMANN, M.: *Leichtbau im Fahrzeugbau, Einsatzgebiete für Faserverbundwerkstoffe (GFK,CFK)*. In: Weyrich, M.: *Technologien der Fertigungsautomatisierung - Seminarreihe zu ausgewählten Forschungsthemen der industriellen Anwendung*, Universität Siegen, URL: [http://wiki.zimt.uni-siegen.de/fertigungsautomatisierung/index.php/Leichtbau\\_im\\_Fahrzeugbau\\_Einsatzgebiete\\_f%C3%BCr\\_Faserverbundwerkstoffe\\_%28GFK,CFK%29#Literatur-\\_und\\_Quellenverzeichnis](http://wiki.zimt.uni-siegen.de/fertigungsautomatisierung/index.php/Leichtbau_im_Fahrzeugbau_Einsatzgebiete_f%C3%BCr_Faserverbundwerkstoffe_%28GFK,CFK%29#Literatur-_und_Quellenverzeichnis). Abruf: 27.02.14
- [26] SCHÜRMAN, H.: *Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden* 2. Aufl., Springer-Verlag, Berlin/ Heidelberg (2007).
- [27] BRÜNGLINGHAUS, C.: *Lamilux für Kohlefaserverbundwerkstoff ausgezeichnet*. ATZlive (20.09.12), URL: <http://vortraege.atzlive.de/Aktuell/Nachrichten/1/16660/Lamilux-fuer-Kohlefaserverbundwerkstoff-ausgezeichnet.html>, Abruf: 01.03.14
- [28] FELDWEG, A.: *Aluminium – Ein Leichtmetall mit Schwergewicht*. URL: [http://www.alu-star.com/pdf/AluStar\\_Warum\\_Aluminium.pdf](http://www.alu-star.com/pdf/AluStar_Warum_Aluminium.pdf). Firmenschrift. Abruf: 27.02.14
- [29] HEIDRICH, W.: *Aluminium im Verkehrswesen: Mit Leichtigkeit bewegen*. Gesamtverband der Aluminiumindustrie e.V., URL: <http://www.aluinfo.de/index.php/aluminium-im-verkehrssektor.html>. Abruf: 27.02.14
- [30] WENER, A.: *Leichtmetall in Nutzfahrzeugen - Alles spricht für Aluminium*. Gesamtverband der Aluminiumindustrie e.V. (2004).
- [31] RAPID LEICHTBAU GMBH: *Produkte – Fahrzeugbau*. Firmeninfo URL: <http://www.rapid-leichtbau.de/produkte>. Abruf: 27.02.14
- [32] ERTEL, M.: *Frost & Sullivan verleiht LAMILUX Auszeichnung für neuen Kohlefaserverbundwerkstoff*. Lamilux Composites GmbH, Presseinformation (2012) <http://www.lamilux.de/unternehmen/media/aktuelle-news/detailansicht/article/frost-sullivan-verleiht-lamilux-auszeichnung-fuer-neuen-kohlefaserverbundwerkstoff.html>. Abruf: 19.02.14



## LITERATURVERZEICHNIS

- [33] PUDENZ, K.: IAA Nfz 2012: *Carbon- und glasfaserverstärkte Kunststoffe für die Nutzfahrzeug-Konstruktion*. URL: <http://www.lightweight-design.de/index.php;do=show/site=lwd/sid=1028422270531d9a8357e32553047893/alloc=135/id=16450>. Abruf: 01.03.14
- [34] PUDENZ, K.: *Lamilux: GFK-Bahnen in Dächern und Böden von Nutzfahrzeugen*. 2011. URL: <http://www.lightweight-design.de/index.php;do=show/site=lwd/sid=421813581531d94615f7fb991204006/alloc=135/id=13336>. Abruf: 01.03.14
- [35] MAGNA: „All About Efficiency“: *Magna Auf Der IAA 2012 - Leichtbaurahmen und Hybridtechnologie – Automobilzulieferer zeigt Innovationen für Nutzfahrzeuge*. Pressemitteilung (19.09.2012) URL: <http://www.magna.com/de/kompetenzen/karosserie--fahrwerksysteme/news-gallery/news/2012/09/19/pressemitteilung---all-about-efficiency-magna-auf-der-iaa-2012>. Abruf: 01.03.14
- [36] NOLTE, M.: *Magna präsentiert LKW-Leichtbaurahmen und neue Hybridtechnologie*. INSIDE AUTOMOTIVE, 2012. URL: <http://inside-automotive.de/magna-prasentiert-lkw-leichtbaurahmen-und-neue-hybridtechnologie/>. Abruf: 04.03.14
- [37] ARCELOR MITTAL: *The next generation road trailer chassis has arrived*. Pressemitteilung (03.2013) URL: <http://industry.arcelormittal.com/news/march/trailtech>. Abruf: 04.03.14
- [38] ITASSE, S.: *Leichtbausystem für Auflieger basiert auf mikrolegierten Stählen*, 2012. URL: <http://www.maschinenmarkt.vogel.de/themenkanaele/konstruktion/werkstoffe/articles/360530/>. Abruf: 28.02.14
- [39] TTT: *Leicht. Effizient. Umweltfreundlich! – Kühlsattelaufleger*. Broschüre. TTT The Team Composite AG URL: [http://www.theteam-hamburg.de/pdf/TheTeam\\_Messebrochuere\\_09-2010.pdf](http://www.theteam-hamburg.de/pdf/TheTeam_Messebrochuere_09-2010.pdf). Abruf: 05.03.14
- [40] HAMACHER, M.; ECKSTEIN, L.; HOLZ, K.: *Intelligenter Trailer in Leichtbauweise*. Lightweight Design, Volume 6, Issue 4, pp 42-47, August 2013.
- [41] INGELFINGER, D.; LIEDKE, M.: *Leichtbau-Fahrgestell mit Einzel-Radaufhängung für leichte LKW*. ATZ September 2012, URL: [http://www.gratz.de/fileadmin/user\\_upload/PDFs/ULTC\\_Sonderdruck\\_ATZ.pdf](http://www.gratz.de/fileadmin/user_upload/PDFs/ULTC_Sonderdruck_ATZ.pdf). Abruf: 27.02.14
- [42] WENZEL, T.: *Neue Lkw-Einzelradaufhängung IS 80 TF von ZF*. Presseinformation (03.07.12) URL: [http://www.zf.com/media/media/de/document/corporate\\_2/press\\_3/press\\_kits\\_1/2012\\_zf\\_technical\\_press\\_conference\\_pre\\_iaa/tx2012-07-03\\_12\\_Independent-Suspension\\_IS80TF\\_e.pdf](http://www.zf.com/media/media/de/document/corporate_2/press_3/press_kits_1/2012_zf_technical_press_conference_pre_iaa/tx2012-07-03_12_Independent-Suspension_IS80TF_e.pdf). Abruf: 27.02.14
- [43] ZF FRIEDRICHSHAFEN AG: *ZF-Fachpresse-Konferenz zur IAA 2012*. Pressemappe. URL: [http://www.zf.com/media/media/img\\_1/corporate/press/press\\_kits/2012\\_zf\\_technical\\_press\\_conference\\_pre\\_iaa\\_1/2012-07-03\\_12\\_Einzelradaufhaengung\\_IS80TF\\_ZF.jpg](http://www.zf.com/media/media/img_1/corporate/press/press_kits/2012_zf_technical_press_conference_pre_iaa_1/2012-07-03_12_Einzelradaufhaengung_IS80TF_ZF.jpg). Abruf: 08.01.14
- [44] WENZEL, T.: *Weniger Kilos für Schwergewichte - ZF forciert Leichtbau für Nutzfahrzeuge*. Presseinformation (03.07.12) URL: [http://www.zf.com/media/media/de/document/corporate\\_2/press\\_3/press\\_kits\\_1/2012\\_zf\\_technical\\_press\\_conference\\_pre\\_iaa/tx2012-07-03\\_07\\_Lightweight-Design\\_e.pdf](http://www.zf.com/media/media/de/document/corporate_2/press_3/press_kits_1/2012_zf_technical_press_conference_pre_iaa/tx2012-07-03_07_Lightweight-Design_e.pdf). Abruf: 08.01.14
- [45] ZF FRIEDRICHSHAFEN AG: *ZF-Fachpresse-Konferenz zur IAA 2012*. Pressemappe. URL: [http://www.zf.com/media/media/img\\_1/corporate/press/press\\_kits/2012\\_zf\\_technical\\_press\\_conference\\_pre\\_iaa\\_1/2012-07-03\\_07-2\\_Vierpunktenker\\_GFK\\_ZF.jpg](http://www.zf.com/media/media/img_1/corporate/press/press_kits/2012_zf_technical_press_conference_pre_iaa_1/2012-07-03_07-2_Vierpunktenker_GFK_ZF.jpg). Abruf: 08.01.14

## LITERATURVERZEICHNIS

- [46] ZF FRIEDRICHSHAFEN AG: *ZF-Fachpresse-Konferenz zur IAA 2012*. Pressemappe. URL: [http://www.zf.com/media/media/img\\_1/corporate/press/press\\_kits/2012\\_zf\\_technical\\_press\\_conference\\_pre\\_iaa\\_1/2012-07-03\\_07-1\\_Nkw\\_Achsmodule\\_Hinterachse\\_ZF.jpg](http://www.zf.com/media/media/img_1/corporate/press/press_kits/2012_zf_technical_press_conference_pre_iaa_1/2012-07-03_07-1_Nkw_Achsmodule_Hinterachse_ZF.jpg). Abruf: 08.01.14
- [47] SAH HOLLAND: *Holland Fwal-E Serie*. Firmeninfo: URL <http://ww1.safholland.de/sites/germany/de/products/fifthwheels/fwalseries/Seiten/default.aspx>. Abruf: 01.03.14
- [48] IVECO: *Zugmaschinen für den Tank- und Siloeinsatz*. Firmeninfo. URL: [http://web.iveco.com/austria/collections/catalogues/Documents/tutti%20prodotti/Stralis/Iveco\\_Stralis\\_fuer\\_Tank\\_und\\_Siloeinsatz.pdf](http://web.iveco.com/austria/collections/catalogues/Documents/tutti%20prodotti/Stralis/Iveco_Stralis_fuer_Tank_und_Siloeinsatz.pdf). Abruf: 01.03.14
- [49] CONTITECH AG: *Weniger Gewicht, mehr Fahrkomfort - Air Spring Systems*. Pressemitteilung (09.12). URL: [https://www.contitech.de/pages/news/aktuelles/120706\\_fahrkomfort\\_de.html](https://www.contitech.de/pages/news/aktuelles/120706_fahrkomfort_de.html). Abruf: 10.03.14
- [50] IFC COMPOSITE GMBH: *GFK-Blattfedern*. Firmeninformation. URL: <http://www.ifc-composite.de/index.php?id=9>. Abruf: 08.01.14
- [51] SCHROETER, S.: *Schwere Lastkraftwagen mit leichten Federn*, URL: <http://stefanschroeter.com/index.php/anzug/3-deutsch/340-schwere-lastkraftwagen-mit-leichten-federn.html>, 02.12.2011. Abruf: 08.01.14
- [52] OTTO FUCHS KG: *Das Rad für schwere Jungs—die Fuchsfelge für den LKW*. Produktinformation. URL: <http://www.fuchsfelge.de/index.php?id=350>. Abruf: 10.03.14
- [53] MICHELIN: *Michelin X One XDN 2 Grip*. Produktinformation. URL: [http://www.michelintransport.com/ple/front/document.DocumentRepositoryServlet?codeDocument=2465&codeRepository=MICH\\_PLOE&codeRubrique=FichesN](http://www.michelintransport.com/ple/front/document.DocumentRepositoryServlet?codeDocument=2465&codeRepository=MICH_PLOE&codeRubrique=FichesN). Abruf: 01.03.14
- [54] EDAG: *Die Zukunft im Nutzfahrzeugbereich ist leicht und elektrisch*. Pressemeldung, URL: <http://www.edag.de/pr/press/newsmeldung/article/41/die-zukunft-im-nutzfahrzeugbereich-ist-leicht-und-elektrisch.html?cHash=7c23268e1bf2f4ab9c9c04219f0caad6&type=98>. Abruf: 23.09.2013
- [55] EDAG: *Leichte Kabine für schwere Fahrzeuge*. In: CVCnews (2012), Nr. 1, S. 38-40
- [56] MERCEDES BENZ: *Der Mercedes-Benz Econic*. - URL: [www.mercedes-benz.de/econic](http://www.mercedes-benz.de/econic). Aktualisierungsdatum: 13.01.2011.
- [57] ENZ, J.; SIGOLOTTO, C.: *Vom Flugzeugbau über den Unimog zu Premiumfahrzeugen*. ACE GmbH URL: [http://www.carbon-composites.eu/sites/carbon-composites.eu/files/anhaenge/gruppen/12/08/29/02\\_v\\_af\\_07.pdf](http://www.carbon-composites.eu/sites/carbon-composites.eu/files/anhaenge/gruppen/12/08/29/02_v_af_07.pdf). Abruf: 01.03.14
- [58] KRÜGER, J.; DOLLE, N.: *FVK-Anwendungen bei Daimler - Lessons Learned*. URL: [http://www.carbon-composites.eu/sites/carbon-composites.eu/files/anhaenge/gruppen/12/08/29/02\\_v\\_af\\_08.pdf](http://www.carbon-composites.eu/sites/carbon-composites.eu/files/anhaenge/gruppen/12/08/29/02_v_af_08.pdf). Abruf: 01.03.14
- [59] ZF FRIEDRICHSHAFEN AG: *ZF-Fachpresse-Konferenz zur IAA 2012*. Pressemappe. URL: [http://www.zf.com/media/media/img\\_1/corporate/press/press\\_kits/2012\\_iaa/IAA12\\_7-3\\_Leichtbaumodule\\_LCM\\_ZF.jpg](http://www.zf.com/media/media/img_1/corporate/press/press_kits/2012_iaa/IAA12_7-3_Leichtbaumodule_LCM_ZF.jpg). Abruf: 27.02.14
- [60] IFA ROTORION: *IFA und Grammer präsentieren den leichtesten LKW-Sitz der Welt*. Presseinformation (18.09.2012). URL: [http://ifa-rotorion.com/fileadmin/user\\_upload/Strang5\\_Presse/2012/2012\\_0918/PM\\_IFA\\_und\\_Grammer\\_praesentieren\\_den\\_leichtesten\\_Lkw-Sitz\\_18.09.2012.pdf](http://ifa-rotorion.com/fileadmin/user_upload/Strang5_Presse/2012/2012_0918/PM_IFA_und_Grammer_praesentieren_den_leichtesten_Lkw-Sitz_18.09.2012.pdf). Abruf: 24.02.14

## LITERATURVERZEICHNIS

- [61] IFA ROTORION: *Grammer-Sitz*. Pressefoto(18.09.2012). [http://ifa-rotorion.com/fileadmin/user\\_upload/Strang5\\_Presse/2012/2012\\_0918/Grammer-Sitz\\_20120918.JPG](http://ifa-rotorion.com/fileadmin/user_upload/Strang5_Presse/2012/2012_0918/Grammer-Sitz_20120918.JPG). Abruf: 24.02.14
- [62] TIROVIC, MARKO: *Development of a lightweight wheel carrier for commercial vehicles*. In: International Journal of Vehicle Design (2012), Nr. 60, S. 138-154.
- [63] DALLMANN, K.; METKER, C.; RIECHMANN, T.: *Leichtbau - Definition und Methodik*. In: Osnabrücker Leichtbautag Zusammenfassung des studentischen Rahmenprogramms, 2012 URL: <https://my.hs-osnabrueck.de/ecs/fileadmin/users/708/upload/Rahmenprogramm.pdf>. Abruf: 23.09.2013
- [64] FINKE, J.; GUDDAS, H.; DUNEKACKE, H.; HILWERS, A.: *Leichtbau – Potential durch spezialisierte Maschinenkonfigurationen*. In: Osnabrücker Leichtbautag, Zusammenfassung des studentischen Rahmenprogramms, 2012, S. 73-101. URL: <https://my.hs-osnabrueck.de/ecs/fileadmin/users/708/upload/Rahmenprogramm.pdf>. Abruf: 23.09.2013
- [65] HARTLEB, J.; PLISCHKE, C.; SCHNEIDER, F. ET AL.: *Leichtbau im Schwermaschinenbau*. In: Thyssen Krupp techforum (2004) Nr. 6
- [66] STREITZ, H.: *Innovationen im Kranbau – Leichtbau: Der richtige Werkstoff an der richtigen Stelle*. Dresden, Technische Universität, Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik, 16. Internationales Dresdner Leichtbausymposium, 2012.
- [67] LIEBHERR: *Liebherr-Innovation: Werkstoff Kohlefaser*. Pressemitteilung (17.02.2012) URL: <http://www.hebezeuge-foerdermittel.de/liebherr-innovation-werkstoff-kohlefaser/2012/02/17>. Abruf: 12.03.14
- [68] BENCKERT, H., GELIES, S.: *Betonverteilmaste-Flexibilität und Leichtbau*. In: 2.Fachtagung Baumaschinentechnik, Forschung, Entwicklung, Innovation, 2004
- [69] GELIES, S.: *Ultraleichtbau bei mobilen Arbeitsmaschinen*. URL: [http://www.produktionsforschung.de/verbundprojekte/vp/index.htm?VP\\_ID=627](http://www.produktionsforschung.de/verbundprojekte/vp/index.htm?VP_ID=627). Abruf: 08.01.14
- [70] SEIDEL, K.; LESEMANN, M.: *Leichtbau durch Multi-Material-Design*. 3. HyperWorks Users Meeting für Hochschulen URL: <http://www.ika.rwth-aachen.de/forschung/veroeffentlichung/2008/11-21/8sd0027.pdf>. Abruf: 07.01.2014
- [71] MAGAGNATO, M.-K.; KRAUS, K.: *Analyse von Leichtbaupotentialen bei Nutzfahrzeugen und mobilen Arbeitsmaschinen*. Studienarbeit, Lehrstuhl für Konstruktion im Maschinen- und Apparatebau, Technische Universität Kaiserslautern, 2013
- [72] PÜTZ, A.: *Analyse der Einsatzmöglichkeiten alternativer Werkstoffe in der CVT - Industrie*. Bachelorarbeit, Lehrstuhl für Konstruktion im Maschinen- und Apparatebau, Technische Universität Kaiserslautern, 2013[]
- [73] IUL: *Fertigungstechnik und Leichtbau*. Institut für Umformtechnik und Leichtbau, Technische Universität Dortmund. URL: [www.leichtbau.de](http://www.leichtbau.de). Abruf: 06.03.14
- [74] KOPP, G.; BEEH, E.; GOEDE, M.; ET.AL: *Super Light Car – lightweight construction thanks to a multi-material design and function integration*. In: European Transport Research Review, Volume 1, Issue 1 (2009).
- [75] KELLNER, P.: *Zur systematischen Bewertung integrativer Leichtbau-Strukturkonzepte für biegebelastete Crashträger*. Cuvillier Verlag, Göttingen (2014).

## LITERATURVERZEICHNIS

- [76] SCHINDLER, C.: *Leichtbau im SPNV aus Sicht der Konstruktionsmethodik*. In ZEV Rail, 04/2006.
- [77] WINTERMANN, J.: *Neue Stähle machen die Autos schlanker*. 2013. URL: <http://www.welt.de/sonderthemen/stahl-report/article120702776/Neue-Staehle-machen-die-Autos-schlanker.html>. Abruf: 02.04.2014
- [78] ELRINGKLINGER AG: *Truck-Ölwannen aus Kunststoff haben es in sich*. In: Move—Das Mitarbeitermagazin der ElringKlinger-Gruppe (2013), Nr. 5, S. 32-34
- [79] BENDL, K.: *Kunststoff ersetzt Metall*. (04.09.2012) URL: <http://www.automobil-industrie.vogel.de/leichtbau-technologie/kunststoff/articles/376061/>. Abruf: 27.04.2014
- [80] DANEYROLE, R.: *Neuer Euro-6-Lkw-Motor: In Zusammenarbeit mit DuPont realisiert Scania sein erstes Ölwanne-modul aus thermoplastischem Kunststoff*. Pressemitteilung (06/2012). URL: [http://wip-kunststoffe.de/wip/fileadmin/user\\_upload/news\\_downloads/3\\_DuPo\\_1\\_01.pdf](http://wip-kunststoffe.de/wip/fileadmin/user_upload/news_downloads/3_DuPo_1_01.pdf). Abruf: 28.04.2014
- [81] PUDENZ, K.: *Lkw-Motoren mit Ladeluft- und Ölsaug-Modul aus Kunststoff*. (11.06.2012). URL: <http://www.springerprofessional.de/lkw-motoren-mit-ladeluft--und-oelsaug-modul-aus-kunststoff--16074/3952922.html#>. Abruf: 15.04.14
- [82] EcoMOTORS: *The opoc® Engine*. Firmeninformation. URL: <http://www.ecomotors.com/opoc-overview>. Abruf: 28.04.14
- [83] SEIWER, M.: *US-Konzern macht revolutionären Zweitakt-Motor serienreif*. (22.02.2011) URL: <http://www.wiwo.de/unternehmen/kooperation-navistar-ecomotors-us-konzern-macht-revolutionaeren-zweitakt-motor-serienreif/5245852.html>. Abruf: 15.04.14
- [84] KERN GMBH: *Werkstoff-Datenblätter Technische Kunststoffe und deren Eigenschaften*. Firmeninformation, URL: <http://www.kern-gmbh.de/index.html?/kunststoff/service/werkstoffe/eigenschaften/datenblatt.htm>. Abruf: 15.04.2014
- [85] BONNET, M.: *Kunststoffe in der Ingenieur Anwendung: Verstehen und zuverlässig auswählen*. 1. Auflage, Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden (2009)
- [86] ELSNER, P.; EYERER, P. ET AL.: *Kunststoffe Eigenschaften und Anwendungen*. 8. Auflage, Springer-Verlag, Heidelberg (2012)
- [87] AVK-INDUSTRIEVEREINIGUNG VERSTÄRKT KUNSTSTOFFE E.V.: *Handbuch Faserverbundkunststoffe: Grundlagen, Verarbeitung, Anwendungen*. 4. Auflage, Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden (2010)
- [88] BERGMANN, W.: *Werkstofftechnik 1: Struktureller Aufbau von Werkstoffen - Metallische Werkstoffe - Polymerwerkstoffe - Nichtmetallisch-anorganische Werkstoffe*. 7. Auflage, Hanser, München, (2013)
- [89] SCHWARZ, G.: *Leichtbaurahmen für Sattelzugfahrzeuge mit Einzelradaufhängung an der Vorderachse als integraler Bestandteil der Monocoquestruktur*. 6. Grazer Nutzfahrzeug Workshop. 16. 05 2014

**Herausgeber:**

Commercial Vehicle Cluster-Nutzfahrzeug GmbH  
Europaallee 3-5  
67657 Kaiserslautern

**Inhalte und Redaktion:**

Technische Universität Kaiserslautern  
Lehrstuhl für Konstruktion im Maschinen-und Apparatebau (KIMA)  
Dr.-Ing. Nicole Stephan

**Gestaltung:**

Technische Universität Kaiserslautern  
Lehrstuhl für Konstruktion im Maschinen-und Apparatebau (KIMA)  
Dr.-Ing. Nicole Stephan

Erscheinungsjahr 2014

© Copyright liegt bei den Herausgebern.

Alle Rechte vorbehalten. Dieses Werk ist einschließlich seiner Teile urheberrechtlich geschützt. Für die Richtigkeit der Herstellerangaben wird keine Gewähr übernommen.

Der Commercial Vehicle Cluster wird gefördert aus Mitteln der Europäischen Union.