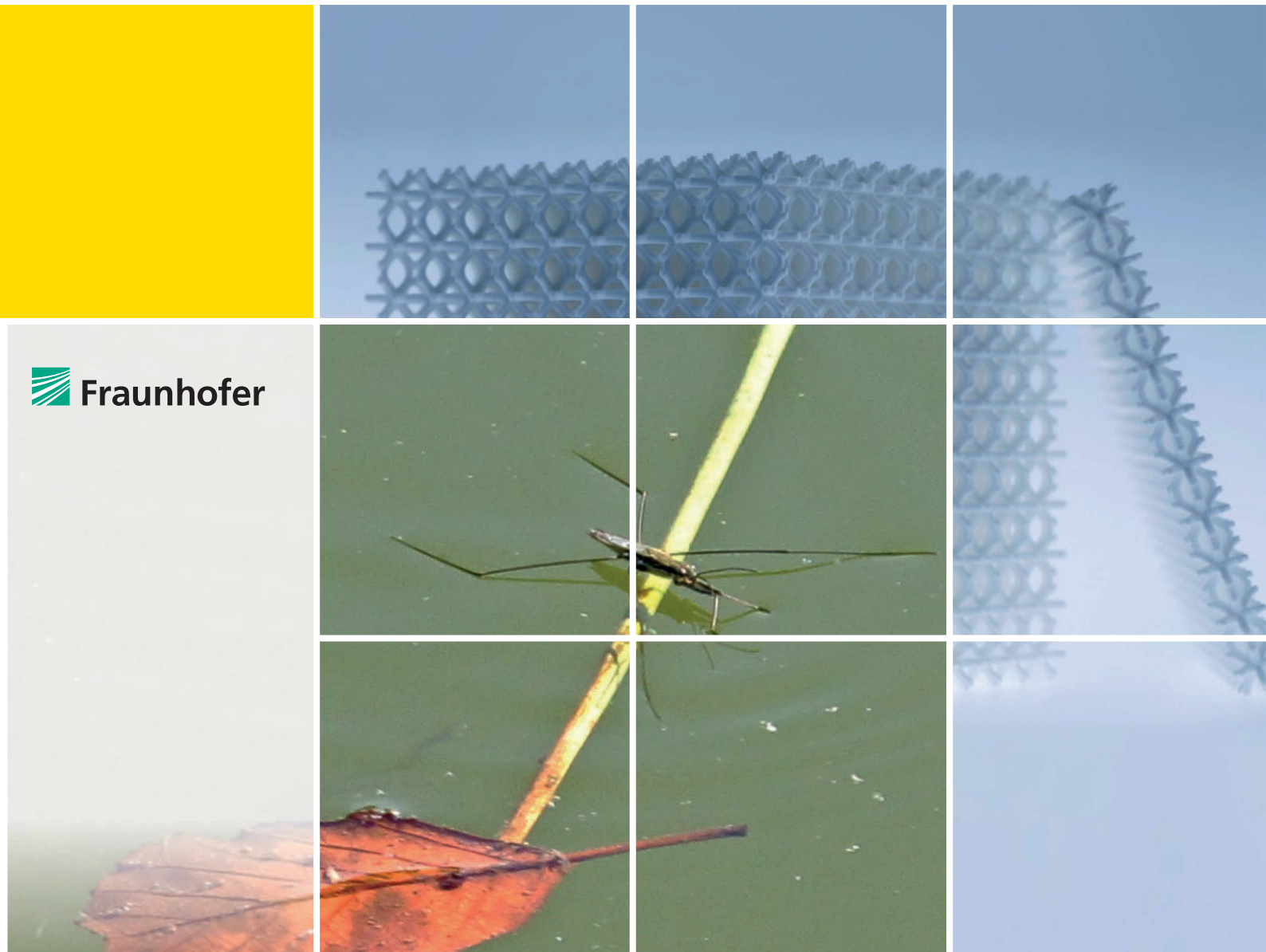


# LEICHTBAU IN MOBILITÄT UND FERTIGUNG

Ökologische Aspekte



 **Fraunhofer**



Baden-Württemberg



# LEICHTBAU IN MOBILITÄT UND FERTIGUNG

## Ökologische Aspekte

e-mobil BW GmbH - Landesagentur für Elektromobilität und Brennstoffzellentechnologie

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA

Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP

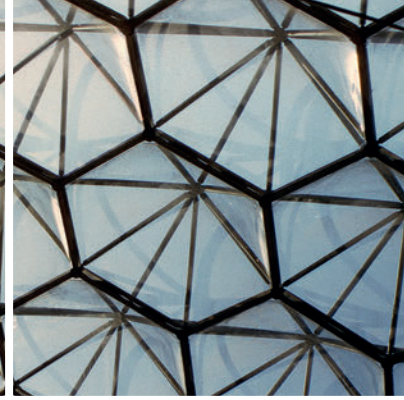
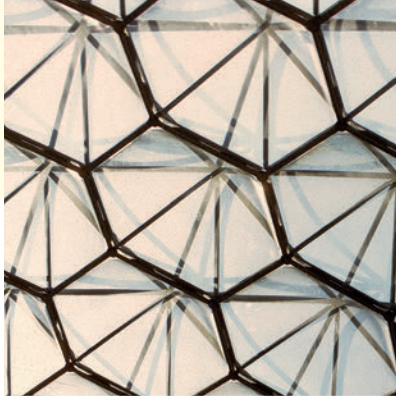
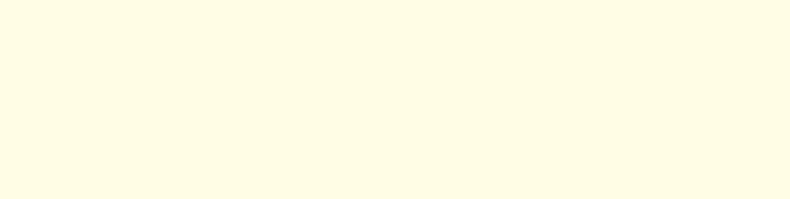
Fraunhofer-Institut für Toxikologie und Experimentelle Medizin ITEM

Ministerium für Finanzen und Wirtschaft Baden-Württemberg

Ministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst Baden-Württemberg

# INHALT

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Vorwort</b>   | <b>4</b>  |
| <b>Kernergebnisse</b>                                      | <b>5</b>  |
| <b>1 Einleitung</b>  | <b>6</b>  |
| <b>2 Technologische Aspekte</b>                            | <b>9</b>  |
| <b>3 Ökologische Aspekte</b>                               | <b>17</b> |
| 3.1 Ökologische Auswirkungen der Herstellungsphase         | 19        |
| 3.2 Herstellung der Leichtbauteilvarianten                 | 22        |
| 3.3 Ökologische Auswirkungen der Nutzungsphase             | 26        |
| 3.4 Ökologische Auswirkungen des End of Life/ Recycling    | 30        |
| 3.5 Ökologische Auswirkungen des Lebenszyklus              | 32        |
| 3.6 Zusammenfassung  | 37        |
| <b>4 Gesundheitliche Aspekte</b>                           | <b>38</b> |
| 4.1 Überblick über gesundheitliche Aspekte am Arbeitsplatz | 38        |
| 4.2 Arbeitsplatzbeurteilung in der Produktion              | 42        |
| 4.3 Zusammenfassung  | 49        |
| <b>5 Fazit</b>   | <b>50</b> |
| <b>Literaturverzeichnis</b>                                | <b>52</b> |
| <b>Abbildungsverzeichnis</b>                               | <b>62</b> |
| <b>Experteninterviews</b>                                  | <b>64</b> |



# VORWORT

Im Fahrzeug-, Maschinen- und Anlagenbau, der Bauindustrie sowie der Medizintechnik wird Leichtbau als eine der bedeutendsten Zukunftstechnologien angesehen, die auch für kleinere und mittlere Unternehmen gute Marktchancen bietet.

Baden-Württemberg hat beste Voraussetzungen, dieses Potenzial auszuschöpfen: eine wichtige Grundlage für eine schnelle Umsetzung von Leichtbautechnologien in bezahlbaren und kundenorientierten Produkten ist eine enge Verzahnung von Industrie und Wissenschaft, wie sie für den Leichtbau-Standort Baden-Württemberg kennzeichnend ist.

Vor dem Hintergrund der zunehmenden Bedeutung von Energie- und Ressourceneffizienz werden Leichtbautechnologien über technische und ökonomische Gesichtspunkte hinaus betrachtet.

Nur im Abgleich ökologischer und ökonomischer Aspekte können moderne Technologien sich in den verschiedenen Anwendungsfeldern durchsetzen und gesellschaftliche Akzeptanz finden.

In der vorliegenden Studie wird das Thema Nachhaltigkeit im Leichtbau unter den Gesichtspunkten Ökologie und Gesundheit untersucht. Neben der Ökobilanz, bei der die Auswirkungen auf die Umwelt betrachtet werden, spielen auch gesundheitliche Aspekte der Herstellung und Nutzung von Leichtbauprodukten eine wichtige Rolle.

Die Studie soll gerade kleinen und mittleren Unternehmen den Einstieg in neue Leichtbautechnologien erleichtern, indem Sie die Komplexität der ganzheitlichen Bilanzierung für Leichtbau darstellt und auf mögliche Herausforderungen im Arbeits- und Gesundheitsschutz hinweist.



Dr. Nils Schmid MdL  
Stellvertretender Ministerpräsident und  
Minister für Finanzen und Wirtschaft Baden-Württemberg

A handwritten signature in black ink that reads "Nils Schmid".



Franz Loogen  
Geschäftsführer e-mobil BW

A handwritten signature in black ink that reads "Franz Loogen".

# KERNERGEBNISSE

Leichtbau bietet in vielen Produkten sehr große Energieeinsparpotenziale. Je leichter beispielsweise ein Fahrzeug ist, desto weniger Energie wird während der Nutzungsphase benötigt. Durch den geringeren Materialverbrauch entsteht zusätzlicher ökologischer Nutzen.

Leichtbau ist Grundvoraussetzung für die Funktionsfähigkeit bestimmter Produkte (Bsp. Flugzeug) und deren Alltagstauglichkeit (erhöhte nutzbare Reichweite rein elektrisch betriebener Autos). Darüber hinaus ermöglicht Leichtbau technologische und wirtschaftliche Verbesserungen, wodurch häufig Wettbewerbsvorteile generiert werden.

Die Herstellung von Kohlenstofffasern ist sehr energieintensiv. Von den untersuchten Leichtbaumaterialien besitzt Stahl in der Herstellung den geringsten Energieaufwand, gefolgt von Aluminium.

Durch leichtere Bauteile wird der ökologische Impact in der Nutzungsphase verringert. Beim untersuchten fiktiven Karosseriebauteil erreicht die Kohlenstofffaservariante das größte Leichtbaupotenzial und verbraucht in dieser Phase die geringste Menge Energie, gefolgt von Aluminium und Stahl.

An die Phasen Herstellung und Nutzung schließt sich das Lebensende als letzte Phase im Lebenszyklus der Bauteilvarianten an. Hier weisen alle drei Werkstoffe eine positive Energiebilanz auf. Durch stoffliches Recycling fließt bei den metallischen Werkstoffen Stahl und Aluminium ein Teil des materiellen Aufwandes zurück in den Kreislauf. Beim Kohlenstofffaserverbund ist aktuell noch von einer thermischen Verwertung auszugehen. Hier kann die bei der Verbrennung frei werdende Energie weiter genutzt werden.

Es existiert erheblicher Forschungsbedarf zur Reduktion des Energieeinsatzes in der Herstellung, Fertigung und dem Recycling faserverstärkter Bauteile.

Eine allgemeingültige Empfehlung zur Bevorzugung eines bestimmten Leichtbaumaterials kann nicht gegeben werden. Der sinnvolle Einsatz von Leichtbauwerkstoffen hängt stark von den Rahmenbedingungen, z.B. Einsatzort und Belastung des Bauteils, Fahrzeugklasse, Kraftstoffverbrauch oder Fahrzeugfahrleistung ab. Konkrete Aussagen können daher nur fallspezifisch vorgenommen werden. Durch die frühzeitige, entwicklungsbegleitende Analyse der verfügbaren Design-Optionen und Bauteilvarianten können geeignete Lösungen ermittelt und somit der Mehrwert und das volle Potenzial der Leichtbautechnologien ausgeschöpft werden.

Die Arbeitssicherheit in der Produktion ist für alle drei Werkstoffvarianten handhabbar. Bei den kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen ergibt sich eine kompliziertere Expositionssituationsbetrachtung als bei den Metallen, die aufwendigere Schutzmaßnahmen erfordert.

Karosserieleichtbau ist eine Möglichkeit zur Reduktion des Fahrzeuggewichts. Weitere Leichtbaupotenziale bieten beispielsweise auch Antriebstrang und Interieur. Durch zunehmende Komfort- und Sonderausstattungen werden Leichtbaumaßnahmen jedoch oft kompensiert.

## Kapitel 1

# EINLEITUNG

„Leichtbau - eine Forderung unserer Zeit“. Unter dieser Überschrift veröffentlichte der Stuttgarter Bauingenieur und Leichtbaupionier Fritz Leonhardt vor über 70 Jahren in der Zeitschrift „Die Bautechnik“ einen Aufsatz, der als Meilenstein des Leichtbaus gilt.<sup>1</sup>

Leichtbau ist aktueller denn je. Im Kontext der Verknappung der Ressourcen müssen diese effizienter genutzt werden. Leichtbau bietet eine Möglichkeit der gesteigerten Ressourceneffizienz. Einerseits durch direkte Materialeinsparungen der Leichtbauprodukte, andererseits durch Energieeinsparungen in der Nutzungsphase dieser Produkte. Leichtbau wird häufig als eine Schlüsseltechnologie betrachtet und kann als „Technologie statt Verzicht“<sup>2</sup> verstanden werden. Ziel des Leichtbaus ist meist die Reduzierung bewegter Massen. Daraus ergeben sich technische, ökonomische und ökologische Chancen. Dies bezieht sich auf vielfältige Anwendungen:

Die Reduktion des Fahrzeuggewichts führt neben einem geringeren Kraftstoffverbrauch auch zu mehr Fahrspaß und kürzeren Bremswegen und auch zu einem Zugewinn an Sicherheit.

Zitat Dr. Stefan Kienzle [Group Research & Advanced Engineering Lightweight, Materials, Manufacturing, Daimler AG]:

*„Gerade im Bereich der Elektromobilität kommen durch Komponenten wie Batterie und Leistungselektronik Mehrgewichte ins Fahrzeug. Dieses hat wiederum Einfluss auf das Fahrverhalten und die Auslegung des Fahrzeugs. Daher gibt es gerade auch im Bereich Elektromobilität ein Bedarf an intelligenten Leichtbaulösungen.“*

Auch im Maschinen- und Anlagenbau bietet der Leichtbau neben einer Erhöhung der Ressourceneffizienz signifikante technologische Chancen. Beispielsweise ergeben sich große Möglichkeiten zur Performancesteigerung: Leichtere Maschinenteile können ihre Bewegungsrichtung schneller ändern und ermöglichen dadurch eine höhere Produktivität. Ein weiteres Beispiel sind Kräne in Leichtbauweise. Sie können durch ihr geringeres Eigengewicht höhere Lasten tragen. So konnten beispielsweise Autokräne vergleichbaren Betriebsgewichtes ihre Traglast von 140 t (1975) auf 800 t (1987) steigern.<sup>3</sup> Der aus dem Leichtbau resultierende Technologievorsprung kann entscheidende Wettbewerbsvorteile gegenüber Mitbewerbern verschaffen.

1 {Weber 2011 #37}

2 {Bauernhansl 10.02.2012 #20}

3 {Henning 2011 #1}

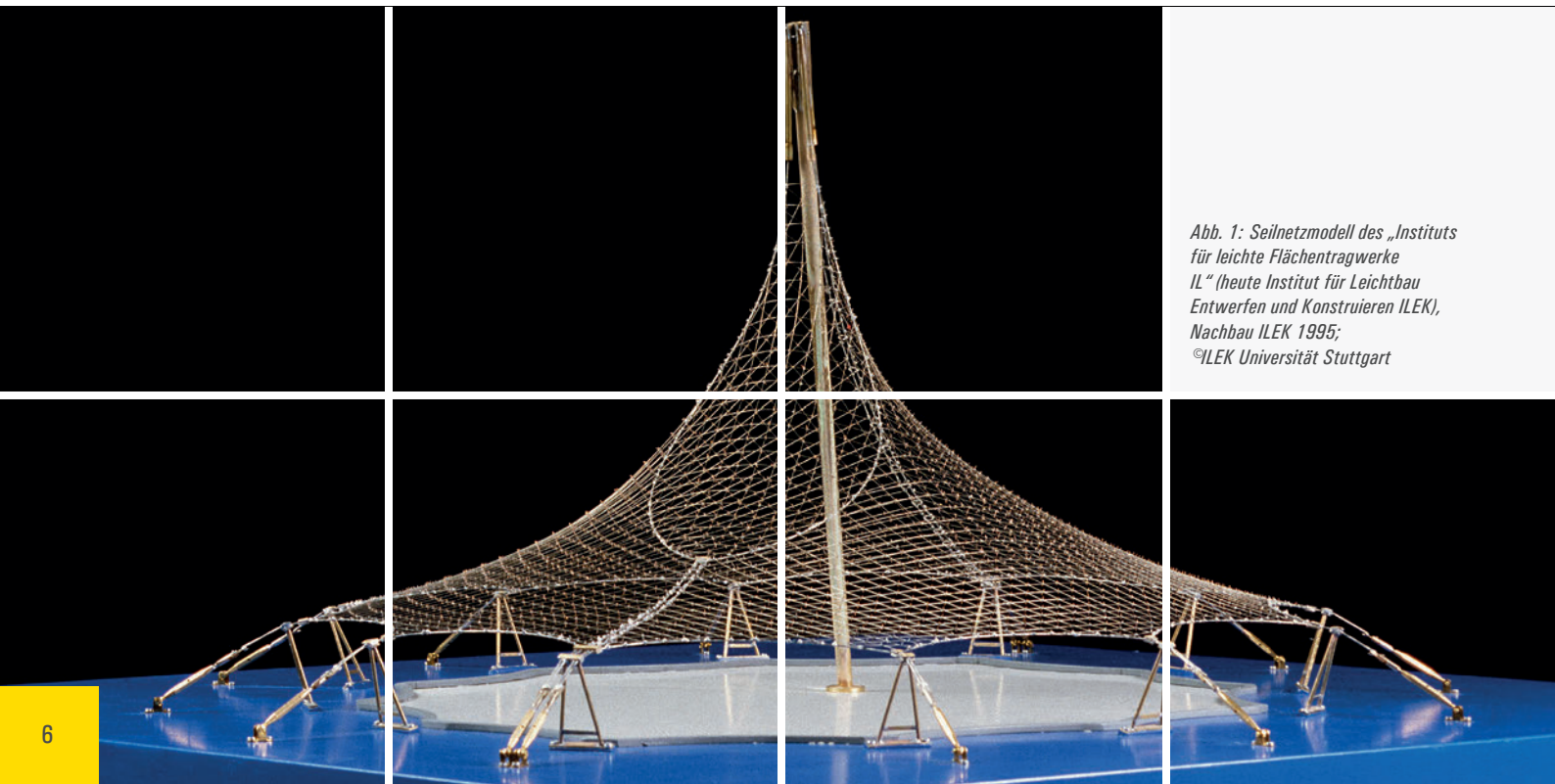


Abb. 1: Seilnetzmodell des „Instituts für leichte Flächentragwerke IL“ (heute Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren ILEK), Nachbau ILEK 1995; ©ILEK Universität Stuttgart

Auch weitere Branchen, wie etwa Architektur und Bau sowie die Medizintechnik, sehen große Potenziale im Leichtbau. Neue Gestaltungsmöglichkeiten und eine Steigerung der Ressourceneffizienz sind nur zwei der möglichen Vorteile.



Abb. 2: VW XL1, Konzeptfahrzeug eines 1-Liter Automobils, 795kg Gesamtgewicht, CFK Karosserie; © Volkswagen Aktiengesellschaft

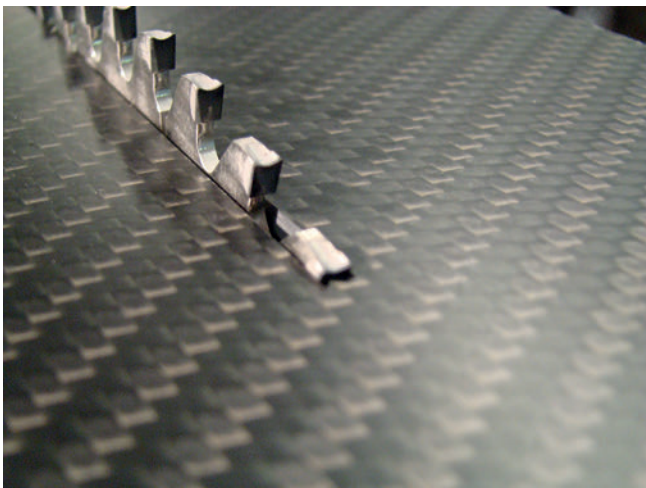


Abb. 3: spanende Bearbeitung von CFK; ©Fraunhofer IPA

Um Leichtbautechnologien ökologisch sinnvoll einzusetzen, muss jedoch immer die Ökobilanz des gesamten Lebenszyklus betrachtet werden. Die durch Leichtbau erzielte Energieeinsparung in der Nutzungsphase kann beispielsweise durch eine besonders energieintensive Herstellungsphase egalisiert werden.

Das Ziel dieser Studie ist es, einen unabhängigen Überblick über die ökologischen Aspekte des Leichtbaus zu geben. Es soll herausgearbeitet werden, welcher Werkstoff für welche Anwendungen ökologisch sinnvoll ist. Es werden die Auswirkungen des Leichtbaus auf Mensch und Umwelt beleuchtet. Neben den Energie- und Materialbedarfen werden daher auch die gesundheitlichen Aspekte untersucht, die sich aus dem Einsatz von Leichtbauwerkstoffen ergeben. Damit soll diese Studie gerade kleinen und mittleren Unternehmen eine Orientierung geben, welche Chancen Leichtbau bieten kann und welche Anforderungen hinsichtlich Arbeitsplatzgestaltung und Nachhaltigkeit zu beachten sind.

Die Studie untergliedert sich in drei Hauptteile. Es wird eine Einführung in den Leichtbau gegeben und unterschiedliche Leichtbauwerkstoffe, -verfahren und -konstruktionsweisen vorgestellt. Die Datengrundlage hierzu basiert auf Literaturrecherchen und der Expertise des Fraunhofer-Instituts für Produktionstechnik und Automatisierung IPA auf dem Gebiet des Leichtbaus. Ergänzt werden diese Erkenntnisse durch Interviews von Leichtbauexperten aus Wirtschaft und Forschung, wovon sich Zitate auszugsweise im Text wiederfinden.

Im zweiten Abschnitt wird eine Ökobilanzierung durchgeführt und mithilfe der Software GaBi simuliert. Hierbei wird ein fiktives Karosserieteil in den drei aktuell relevantesten Leichtbauwerkstoffvarianten Hochleistungsstahl, Aluminium und kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff über dessen gesamten Lebenszyklus betrachtet. Die Analyse der ökologischen Aspekte innerhalb dieser Studie wird durch das Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP, Abteilung Ganzheitliche Bilanzierung (GaBi), vorgenommen.



## Kapitel 1

Der dritte Teil behandelt die gesundheitlichen Aspekte der Verarbeitung von Leichtbauwerkstoffen und gibt konkrete Hinweise zu Arbeitsschutz und Arbeitsplatzgestaltung. Es wird eine Abschätzung der Relevanz der Gefährdungspotenziale getroffen, auf Basis von Studien und Expertenwissen des Fraunhofer-Instituts für Toxikologie und Experimentelle Medizin ITEM.



Abb. 4: BMW 3, Montage Produktionsstart; © BMW AG

## Kapitel 2

# TECHNOLOGISCHE ASPEKTE

Leichtbau kann mit unterschiedlichen Methoden erreicht werden. Grundsätzlich lässt sich Leichtbau in konstruktiven Leichtbau, werkstofflichen Leichtbau und Leichtbau über Produktionsverfahren unterteilen. In dieser Studie werden die Leichtbauwerkstoffe fokussiert.

Wird Leichtbau durch Materialsubstitution erreicht, so handelt es sich um werkstofflichen Leichtbau. Dem Weltmarkt für Leichtbauwerkstoffe wird für 2030 ein Volumen von 300 Mrd. € prognostiziert.<sup>4</sup>

Metalle werden seit vielen Jahrzehnten als Leichtbauwerkstoffe eingesetzt. Sie besitzen sehr hohe Steifigkeiten und können durch Zugabe von Legierungselementen und Wärmebehandlung in ihren Eigenschaften an die jeweiligen Anforderungen angepasst werden.<sup>5</sup> Die wichtigsten Leichtbaumetalle Stahl und Aluminium werden im Rahmen dieser Studie betrachtet. Auf die weiteren Leichtbaumetalle, wie beispielsweise Titan oder Magnesium, wird im Rahmen dieser Studie nicht näher eingegangen.



Abb. 5: Porsche 911, Leichtbaukarosserie mit intelligentem Werkstoffmix;  
© Porsche AG

**Stähle** sind Werkstoffe mit dem Element Eisen als Hauptbestandteil. Je nach Art und Menge der Nebenbestandteile, auch Legierungselemente genannt, kann eine große Bandbreite von Eigenschaften eingestellt werden. „Die derzeit genutzten ca. 2000 verschiedenen Stähle stellen also nur einen kleinen Teil der möglichen Eisenlegierungen dar.“<sup>6</sup> Bei der Legierungsauswahl spielen beispielsweise Forderungen

nach Ressourcenverfügbarkeit, Kaltumformbarkeit, Verarbeitbarkeit, Beschichtbarkeit und Umweltverträglichkeit eine Rolle.<sup>7</sup> Die nachhaltige Nutzung des Stahls wird durch einen Recyclingkreislauf erreicht. Stahl lässt sich hervorragend recyceln. Der recycelte Stahl steht dabei ohne Qualitätsverlust erneut als hochwertiges Ausgangsmaterial zur Verfügung. Somit ist mehrmaliges Recycling problemlos möglich. Beim massebezogenen Primärenergiebedarf benötigt Stahl deutlich weniger Energie als Nichteisenmetalle, Kunststoffe, Aluminium und Kohlenstofffaserverbundwerkstoffe.<sup>8</sup>

Kennzeichnend für Stahl sind seine hohe Festigkeit und Bruchzähigkeit im Vergleich mit weiteren metallischen Werkstoffen. Durch Härten kann die Festigkeit weiter gesteigert werden. Dieser Effekt beruht auf Phasenumwandlungsvorgängen auf atomarer Ebene und unterschiedlichen Kristallgitterstrukturen. Generell ergibt sich die Vielfältigkeit des Stahls durch eine große Anzahl an kristallografischen Gefügen und Legierungselementen. Durch Kombination mehrerer Gefüge innerhalb einer Stahlsorte entstehen sogenannte Mehrphasenstähle. Diese werden etwa für Feinbleche in Automobilkarosserien eingesetzt. Bei sogenanntem TRIP - Stahl (TRansformation Induced Plasticity) erfährt der unverformte Blechrohling eine Festigkeitssteigerung während des Umformprozesses in der Kaltpresse. Möglich wird dies durch eine teilweise Umwandlung des Gefügebestandteils Restaustenit in die härtere martensitische Struktur. Noch höhere Festigkeiten lassen sich generieren, wenn die Stahlerzeugnisse warm umgeformt werden, etwa durch Presshärten.<sup>9</sup>

Die Entwicklung von höher- und höchstfesten Stählen macht den klassischen Konstruktionswerkstoff Stahl als Leichtbauwerkstoff attraktiv. Diese Stähle gleichen ihre relativ hohe Dichte von  $7,85 \text{ g/cm}^3$  durch sehr hohe Festigkeitswerte aus und erreichen damit gewichtsbezogene Zugfestigkeiten, die vergleichbar mit denen anderer Leichtbaumetalle sind, wie beispielsweise Aluminium oder Titan. Zusätzliches Leichtbaupotenzial kann beim Korrosionsschutz, etwa durch Verzinken<sup>10</sup> oder die Verwendung von nichtrostendem Stahl<sup>11</sup>, gewonnen werden. Auch bei der Oberflächenversiegelung kann Gewicht durch dünnere Lackschichten reduziert werden.

4 {Heuss 01/2012 #38}

5 {Henning 2011 #1: 220}

6 {Henning 2011 #1: 193}

7 {Henning 2011 #1: 193}

8 {Henning 2011 #1: 1230}

9 {Henning 2011 #202}

10 {vae 2012 #13}

11 {WZV/SVZ 2012 #26}

## Kapitel 2

Zitat Oliver Hoffmann [Leiter Anwendungstechnik, Thyssen Krupp Steel Europe AG] auf die Frage, welche „Sorten“ des Werkstoffes im Rahmen des Themas Leichtbau verstärkt nachgefragt werden:

*„Das sind ganz klar die höherfesten Stähle. Wir entwickeln kontinuierlich die „advanced high strength steels“, also Mehrphasenstähle, weiter. Im Bereich der Kaltumformung bewegen wir uns in Festigkeitsbereichen von bis zu 1200 MPa. Im Bereich der warmumgeformten Stähle nähern wir uns der 2000er Grenze - und das bei komplexen Bauteilen.“*

Leichtbaulösungen in Stahl bieten meist die kostengünstigste Alternative. Auch deshalb besitzt Hochleistungsstahl mit Abstand den größten Marktanteil unter den Leichtbauwerkstoffen. Allein in den Sparten Automotive, Wind und Aviation wurden 15,3 Mio. t hochfester Stähle umgesetzt (2010).<sup>12</sup>

**Aluminium** ist nach Stahl das am häufigsten verwendete Gebrauchsmetall. Dessen geringe Dichte von  $2,7 \text{ g/cm}^3$ <sup>13</sup> prädestiniert Aluminium für Leichtbauanwendungen. In den Bereichen Automotive, Wind und Aviation betrug der Materialeinsatz 5,1 Mio. t (2010), mit einem prognostizierten Wachstum von 6% werden im Jahre 2030 etwa 16,9 Mio. t umgesetzt.<sup>14</sup>



Abb. 6: Die Aluminium Rohkarosserie des neuen Mercedes-Benz SL wiegt 110 Kg weniger als die des Vorgängers und ist 20% steifer; © Daimler AG

Zitat Wolfgang Heidrich [GDA-Referent für Maschinenbau, Gesamtverband der Aluminiumindustrie e.V., Düsseldorf]:

*„Aluminium ist auch langfristig auf stark wachsendem Kurs, da Leichtbau immer relevanter wird. Während es früher Fahrzeugen der Premiumklasse vorbehalten war, erhält der Werkstoff aktuell auch vermehrt in der Mittelklasse Einzug. Dieser Trend wird sich weiter fortsetzen.“*

Da reines Aluminium ein relativ weiches Metall ist, werden die mechanischen Eigenschaften durch Zugabe von Legierungselementen deutlich gesteigert. „Die Mechanismen der Festigkeitssteigerung durch Legierungsbildung sind dabei gelöste Atome der Legierungsmetalle (Substitutionsmischkristallverfestigung) oder durch Wärmebehandlung erzeugte Ausscheidung feinsten Phasenpartikel (Ausscheidungshärtung), z. T. auch in Verbindung mit plastischer Verformung erhöhte Verformungsverfestigung ... Man unterscheidet naturharte und aushärtbare Legierungen.“<sup>15</sup>

Ein Beispiel aushärtbarer Legierungen, wie sie für Blechformteile im Automobilleichtbau eingesetzt werden, besitzen die Hauptlegierungselemente Magnesium (Mg) und Silizium (Si). Sie sind in der Legierungsgruppe Al-MgSi (EN AW-6xxx) zusammengefasst.

Zitat Wolfgang Heidrich [GDA-Referent für Maschinenbau, Gesamtverband der Aluminiumindustrie e.V., Düsseldorf]:

*„Für die Karosserieaußenhaut werden beispielsweise neue Bleche mit höherer Festigkeit bei gleichbleibender Umformbarkeit verstärkt nachgefragt. Zudem muss natürlich ein gutes Crashverhalten gegeben sein, idealerweise bei immer dünneren Blechstärken. Diese Werkstoffvarianten werden kontinuierlich weiterentwickelt und bieten auch für die Zukunft noch große Potenziale. Zudem bieten einige Aluminiumlegierungen die Option, komplett auf Korrosionsschutz zu verzichten, was ökologisch als auch unter Leichtbauaspekten weiteres Potenzial bietet.“*

Die Gewinnung von Reinaluminium aus dem Mineral Bauxit ist sehr energieintensiv. Aluminium kann jedoch gut recycelt werden. Je nach Qualität des regenerierten Aluminiumschrotts ist das Sekundäraluminium teilweise von geringerer Werkstoffqualität.

<sup>12</sup> {Heuss 01/2012 #38}

<sup>13</sup> {Henning 2011 #1}

<sup>14</sup> {Heuss 01/2012 #38}

<sup>15</sup> {Henning 2011 #1: 226}

**Kunststoffe** besitzen deutlich geringere Dichten als die meisten metallischen Werkstoffe ( $0,8 - 1,4 \text{ g/cm}^3$ , in Ausnahmen bis  $2,2 \text{ g/cm}^3$ ) und unterscheiden sich in ihren Eigenschaften deutlich von diesen. Kunststoffe spielen im Karosserieleichtbau hauptsächlich im Werkstoffverbund mit Fasern oder Metallen eine Rolle. Es gibt auch Prototypen, welche reinen Kunststoff für Karosserieteile nutzen [Bild: smart forvision].



Abb. 7: smart forvision; © Daimler AG



Abb. 8: Multifunktionale Kunststoff-Leichtbau-Komfortsitze im smart forvision; © Daimler AG

Kunststoffe unterteilen sich nach Struktur und Bildungsmechanismus in drei Hauptgruppen:<sup>16</sup>

Thermoplaste sind schmelzbar und ab einer bestimmten Temperatur plastisch verformbar. Dies wird durch ihre Struktur aus linearen und verzweigten Kettenmolekülen möglich. Thermoplaste sind durch erneutes Aufschmelzen wiederverwendbar, wobei das Recyclat schlechtere Werkstoffeigenschaften als Neumaterial aufweist. Diese Abwertung der Werkstoffeigenschaften wird auch als Downcycling bezeichnet.

Elastomere setzen sich aus schwach vernetzten Kettenmolekülen zusammen, was ihnen elastische Eigenschaften verleiht. Je nach Grad der Vernetzung der Moleküle untereinander besteht ein fließender Übergang zwischen Thermoplasten und Elastomeren.<sup>17</sup> Während vernetzte Elastomere nicht schmelzbar sind, sind thermoplastische Elastomere unter Wärmezufuhr plastisch verformbar.

Duroplaste bestehen aus dreidimensional vernetzten Kettenmolekülen. Dadurch werden oft hohe Festigkeiten und eine gute Resistenz gegen äußere Einflüsse erreicht. Duroplaste sind allerdings nicht recycelbar, da sie unschmelzbar sind. Sie können nach ihrer Nutzung z.B. geshreddert oder thermisch verwertet werden. Aufgrund ihres sehr guten Langzeitverhaltens und hoher Festigkeiten werden sie gerne in hochfesten Faserverbundwerkstoffen eingesetzt.

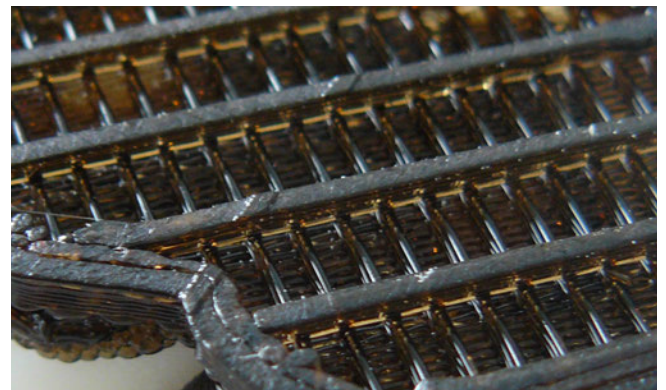


Abb. 9: Kunststoffleichtbau Struktur, hergestellt mittels Fused Deposition Modelling (FDM-Verfahren), © Fraunhofer IPA, Fischer, A.

16 {Henning 2011 #1: 313}

17 {Henning 2011 #1: 313}

## Kapitel 2

**Verbundwerkstoffe** bieten die Möglichkeit, durch Kombination einzelner Werkstoffe auf spezielle Anwendungen maßgeschneidert zu werden. Für den Leichtbau bietet die Untergruppe der **Faserverbundwerkstoffe** hervorragende Lösungen, da sich viele Faserwerkstoffe durch eine sehr hohe Festigkeit auszeichnen.

Paradoxon der Faserform:<sup>18</sup>

*„Ein Werkstoff in Faserform hat in Faserrichtung eine vielfach größere Festigkeit als dasselbe Material in anderer Form. Je dünner die Faser ist, umso größer ist die Festigkeit.“*

So lassen sich eine Vielzahl unterschiedlicher Fasern mit Kunststoffen, Metallen oder keramischen Werkstoffen kombinieren. Hierbei werden durch die Fasern Festigkeit und weitere Funktionalitäten eingebracht, während der einbettende Matrixwerkstoff der Formgebung und dem Schutz der Fasern dient.<sup>19</sup> Faserverbundwerkstoffe sind seit vielen Jahren im Einsatz, beispielsweise in den Rotoren moderner Windkraftanlagen, im Flugzeug- und Schiffsbau oder in Sportgeräten. Mengemäßig besitzen unter den Faserwerkstoffen Glasfasern heute einen Marktanteil von weit über 90%.<sup>20</sup> Etwa 2.000.000 t wurden 2011 in Europa verarbeitet, während der weltweite Bedarf an Kohlenstofffasern im selben Jahr zwischen 35.000 t und 37.000 t lag.<sup>21</sup> Aufgrund ihres extremen Leichtbaupotenzials werden im Rahmen dieser Studie die kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffe (CFK) tiefergehend beleuchtet. Auf eine ausführliche Betrachtung anderer Verstärkungsfasern wurde im Hinblick auf den Gesamtumfang der Studie verzichtet, obwohl einige von ihnen ebenfalls für Leichtbauanwendungen geeignet sind.

Zitat Prof. Michael R. Buchmeiser; [Leiter Institut für Polymerchemie (ipoc), Universität Stuttgart; Direktor Institut für Textilchemie und Chemiefasern Denkendorf (ITCF)]:

*„CFK besitzt aktuell das höchste Leichtbaupotenzial, bedingt durch die sehr geringe Dichte und die herausragenden Werkstoffeigenschaften der Kohlenstofffaser! Es gibt andere Fasern, die ähnliche Eigenschaften haben, jedoch aufgrund anderer Eigenschaftsprofile gegenüber Kohlenstofffasern abfallen. Glasfaserverstärkte Kunststoffe bieten ähnliche Eigenschaften, sind jedoch durch das höhere Gewicht der Glasfaser schwerer. Es gibt polymere Fasern, deren Eigenschaften bezüglich Reißfestigkeit und E-Modul eine Standardkohlenstofffaser bei weitem toppen. Aramidfaser beispielsweise, oder PBO- Fasern bieten hier deutlich bessere Werte, wobei die Aramide noch zu teuer sind und das preislich vergleichbare PBO aktuell noch ein schlechtes UV- Verhalten und eine geringe Stabilität gegenüber Feuchtigkeit besitzt. Hier muss weiter geforscht und gearbeitet werden!“*

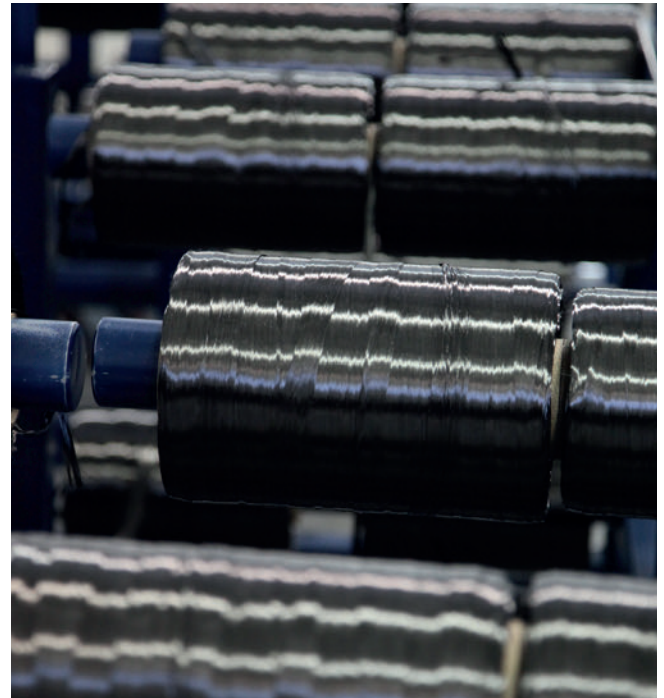


Abb. 10: Kohlenstofffaserspulen bei SGL Automotive, Carbon Fibre Moses Lake; © BMW AG

18 {Griffith 1920 #40}

19 {e-mobil BW GmbH 2012 #34}

20 {Mathes 2012 #41}

21 {Mathes 2012 #41}



Abb. 11: Qualitätsprüfung an einer Preform Maschine für CFK Komponenten;  
© BMW AG

Die **Kohlenstofffaser** besitzt eine extrem hohe Festigkeit und Steifigkeit bei geringer Bruchdehnung und wird deshalb bei extremen Leichtbauanwendungen eingesetzt. Bei der Herstellung wird eine kohlenstoffhaltige Precursorfaser unter hohen Temperaturen (1500 - 1800°C) carbonisiert. Dabei werden, bis auf das Kohlenstoffgerüst, die restlichen Atome abgespalten. Bei der energieintensiven Carbonisierung verliert der Precursor einen Teil seines Gewichtes und wird zur Kohlenstofffaser. Anschließend kann das Eigenschaftsprofil der Faser bei Temperaturen bis 3000°C zu höheren Festigkeiten oder höheren Steifigkeiten eingestellt werden.<sup>22</sup> Die Dichte variiert je nach Fasertyp um 1,8 g/cm<sup>3</sup> bei Zugfestigkeiten zwischen 3000 und 6000 MPa. Die Herstellung ist sehr energieintensiv. Die Precursorfasern bestehen größtenteils aus erdölbasiertem Polyacrylnitril (PAN), wobei es auch Bestrebungen gibt, Fasern auf Basis nachwachsender Rohstoffe als Precursoren zu verwenden.

Beim Leichtbau bieten Kohlenstofffaserverbundkunststoffe große Möglichkeiten. Diese bestehen aus mindestens zwei Materialien, den lasttragenden Kohlenstofffasern sowie einem formgebenden Matrixmaterial. Neue Herstellungsverfahren öffnen das Tor zur Serienproduktion und die Industrie verspricht sich von Kohlenstofffaserverbundwerkstoffen sehr große Leichtbaupotenziale. Daraus resultierend wird ein starkes Wachstum des weltweiten CFK Absatzes vorausgesagt. McKinsey prognostiziert, bezogen auf den Kohlenstofffaserverbrauch, 17% durchschnittliches jährliches Wachstum und einen Materialverbrauch von 500.000 t im Jahr 2030, bezogen auf die Branchen Automotive, Wind und Aviation.<sup>23</sup>

Zitat Raman Chaudhari [Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie ICT]:

*„Wir sehen einen hohen Stellenwert der kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffe (CFK) im Leichtbau. Auch gerade im Automobilbereich wird verstärkt auf diesem Gebiet geforscht. Heute wird allerdings noch nicht das ganze Potenzial des Werkstoffes genutzt. Wir erwarten hier in den nächsten zwei bis drei Jahren einige Neuheiten und eine weitere Zunahme der Aktivitäten im Leichtbau. Wir verzeichnen forschungsseitig eine steigende Anzahl von Anfragen auf dem Gebiet der CFK-Fertigung. Bis 2020 sehen wir eine weiter wachsende Bedeutung des Werkstoffes CFK.“*

Je nach Aufgabe und Beanspruchungsart des Bauteils kann CFK quasiisotrop oder unidirektional ausgelegt und hergestellt werden. Beim unidirektionalen CFK liegen die Fasern parallel orientiert in einer Richtung vor. Diese Konstruktionsweise nutzt die Fasereigenschaften optimal, ist jedoch aufgrund der Anisotropie nur bei bestimmten Bauteilbelastungen und Geometrien möglich. Quasiisotropes CFK wird eingesetzt, wenn Bauteile in mehrere Lastrichtungen mechanisch beansprucht werden. Quasiisotrope CFK-Bauteile weisen in der Ebene invariante, d. h. gleiche Eigenschaften auf, was durch mehrere Schichten mit unterschiedlicher Faserorientierung erreicht wird. Das Leichtbaupotenzial ist geringer als bei unidirektionalem CFK. Als Matrixmaterial kommen duroplastische oder thermoplastische Werkstoffe zum Einsatz.

22 {Ehrenstein 2006 #4}

23 {Heuss 01/2012 #38}

## Kapitel 2



Abb. 12: CFK Karosserie, BMW i3 Concept; © BMW AG



Abb. 13: BMW i3 Concept, Elektrofahrzeug mit CFK Karosserie; © BMW AG

Als Matrixmaterial wird im Rahmen dieser Studie Epoxidharz untersucht, ein duroplastischer Kunststoff, welcher aufgrund seiner hervorragenden Eigenschaften in vielen Kohlenstofffaserverbundbauteilen eingesetzt wird.

Zitat Raman Chaudhari [Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie ICT]:

*„Von Seiten der Industrie sind aktuell verstärkt Matrixmaterialien auf Epoxidharzbasis für die CFK-Fertigung gefragt. Forschungsseitig ist eine Zunahme der polyurethanbasierten Matrixsysteme zu verzeichnen. Wir entwickeln auch Verfahren zur Verarbeitung thermoplastbasierte Matrixsysteme, welche zukünftig für neue Anwendungen und Recycling von CFK interessant sind. Ein Forschungsschwerpunkt liegt darin, Werkstoffe sowie Prozesse für eine schnelle Fertigung zu optimieren.“*

Epoxidharze eignen sich beispielsweise für eine Verarbeitung im Resin-Transfer-Moulding-Verfahren (RTM), welches momentan für die CFK-Herstellung häufig eingesetzt wird, da hier komplexe CFK-Strukturen bei hoher Oberflächenqualität für Serienanwendungen wirtschaftlich gefertigt werden können.<sup>24</sup> Hierbei werden die Fasern oder textilen Halbzeuge in einer Form platziert, die Form geschlossen und anschließend das flüssige Harz in die Form injiziert. Der flüssige Kunststoff durchtränkt das Textil und härtet in einer chemischen Reaktion aus. Es existieren mehrere RTM-Methoden (Hochdruck-Compression RTM-Verfahren, HP-CRTM; Hochdruck-Injektion RTM-Verfahren, HP-IRTM), die momentan weiterentwickelt werden, um die Produktionsschritte (z.B. Injektion, gleichmäßiges Imprägnieren) zu beschleunigen, dadurch die Produktionszeiten zu verkürzen und damit die Wirtschaftlichkeit der RTM-Fertigung zu erhöhen.

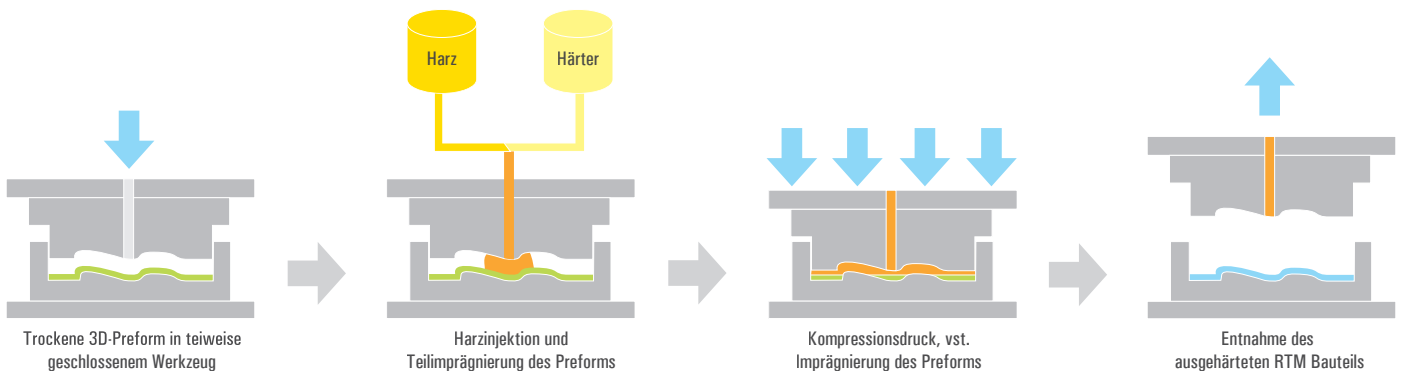


Abb. 14: Hochdruck-Compression RTM-Verfahren (HP-CRTM)<sup>25</sup>; eigene Darstellung

<sup>24</sup> {ACE Advanced Composite Engineering GmbH 03.12.2012 #126}

<sup>25</sup> {Fraunhofer ICT, Chaudhari}

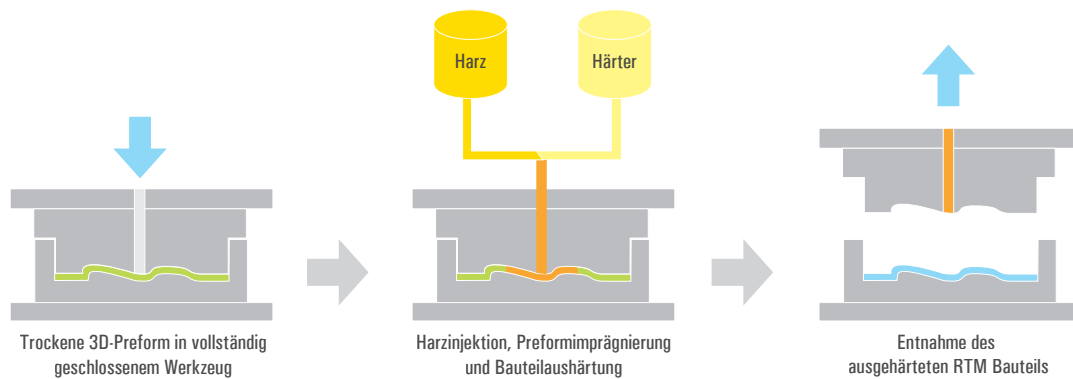


Abb. 15: Hochdruck-Injektion RTM-Verfahren (HP-IRTM)<sup>26</sup>; eigene Darstellung

Zur Integration der RTM-Verfahren für die automobilen Mittel- und Großserienproduktion werden derzeit zwei neue Prozessvarianten, das sogenannte Compression-RTM und das Hochdruckinjektion-RTM-Verfahren, näher untersucht und weiterentwickelt. Beide Prozesse konzentrieren sich auf die Herstellung von Hochleistungsfaserverbundwerkstoffen mit einer schnellstmöglichen Harzinjektion bei vollständiger Imprägnierung der textilen Faserverstärkungsstrukturen durch die Verwendung hochreaktiver Harzsysteme. Hieraus ergibt sich eine drastische Reduzierung der bisher üblichen Zykluszeiten. Im Compression-RTM-Prozess wird das Harz schnell über die Oberfläche des Preforms injiziert, welches sich in einer definiert geöffneten Werkzeugform befindet. Nach dem Injektionsvorgang, wird die Werkzeugform geschlossen und das Preform auf Grund des aus den Schließkräften der Hydraulikpresse resultierenden hohen Werkzeuginnendrucks sowohl kompaktiert als auch gleichzeitig imprägniert. Im Hochdruckinjektion RTM-Verfahren wird das Preform, welches sich bereits in einer komplett geschlossenen Werkzeugform befindet, durch einen signifikant hohen Harzinjektionsdruck imprägniert. Der hohe Injektionsdruck führt zu einer zeitlichen Verkürzung der Imprägnierung. Nach der vollständigen Benetzung härtet das Bauteil aus und kann entnommen werden. Anschließend kann eine Nachbearbeitung des Bauteils erforderlich sein, etwa ein Kantenschleifen. In den Abbildungen 14 und 15 sind die beiden beschriebenen RTM-Prozessfolgen schematisch dargestellt.

Optimierungspotenziale bestehen beispielsweise in der Optimierung der Material- und Prozessparameter, um dabei das Harz schnell und gleichmäßig zu verteilen und somit die Imprägnierungsphase zu verkürzen. Es besteht weiterhin Bedarf einer Optimierung hinsichtlich der Materialausnutzung, um eine wirtschaftliche Umsetzung des Verfahrens zu gewährleisten.<sup>27</sup> Die Menge des Verschnittmaterials variiert je nach Bauteil und Anwendung.

Bei anderen Methoden des Leichtbaus werden die Leichtbauprinzipien vom Designer und Konstrukteur als ausschlaggebende Gestaltungsrichtlinien zu Grunde gelegt. Um einen Einblick zu geben, werden im Folgenden beispielhaft einzelne Ansätze des konstruktiven Leichtbaus vorgestellt:

Die Integralbauweise strebt Leichtbau durch Funktionsintegration (Anschraubpunkte, Versteifungen, integrierte Elektronik) an und hat zum Ziel, die Struktur aus einem Stück herzustellen. Hierdurch kann das Gewicht bauteilabhängig weiter verringert werden: „Integrale Gussbauteile aus Magnesium bieten Gewichtseinsparpotenziale von mehr als 60% gegenüber Teilen in Differentialbauweise.“<sup>28</sup> Zudem lassen sich durch integrierte Funktionen völlig neue Produkte erschaffen, wie im Bild unten dargestellt. Generative Fertigungsverfahren erlauben Formen element- oder schichtweise additiv aufzubauen.<sup>29</sup>

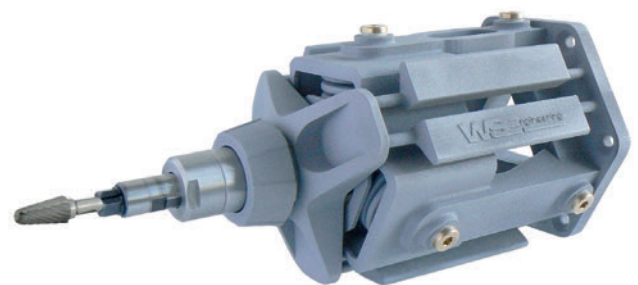


Abb. 16: Druckluftspindel Werkzeug in Integralbauweise hergestellt als ein Bauteil mittels generativer SLS Verfahren; © WSEngineering

26 {Fraunhofer ICT, Chaudhari}

27 {Raman Chaudhari 25.08.2012 #58}

28 {e-mobil BW GmbH 2012 #34}

29 {Verein Deutscher Ingenieure e.V., Düsseldorf 2009 Dezember 2009 #42: 3}



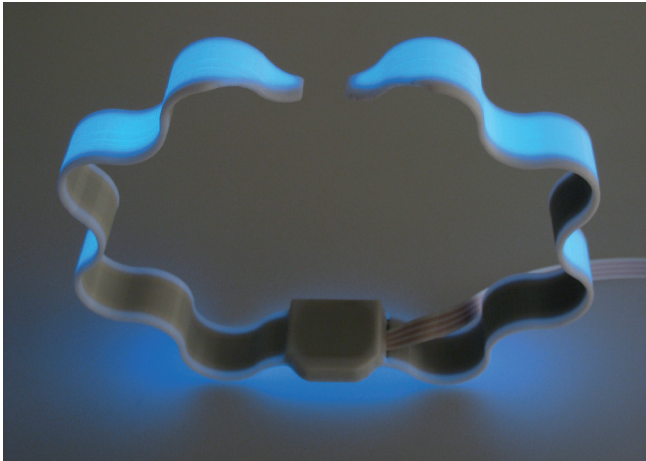


Abb. 17: Leichtbau durch Bauteilintegration von EL-Folie, Steuerung und Elektronik, generativ produziert im FDM-Verfahren; © Fraunhofer IPA, Fischer, A.

Demgegenüber stehen eine teilweise aufwendigere Fertigung, wie etwa komplexere Formen zur Herstellung der Gussbauteile und teilweise Einschränkungen der Materialvariationen im Bauteil. Unter ökologischen Gesichtspunkten ist ein deutlich erhöhter Recyclingaufwand erforderlich, da die Funktionsbauteile vor dem stofflichen Recycling demontiert werden müssen. Auch die Reparaturfreundlichkeit ist nicht immer gegeben, sodass teilweise der Austausch des gesamten Bauteiles erforderlich ist.

Die Kombination mehrerer Leichtbauweisen und Werkstoffe führt zum Multi-Material-Design, das den konstruktiven Leichtbau mit dem werkstofflichen Leichtbau verknüpft.<sup>30</sup> Hierbei wird der ideale Werkstoff für jedes Bauteil verwendet. Die unterschiedlichen Werkstoffe, wie etwa Aluminium, Magnesium, Stahl, Kunststoff oder Faserverbundwerkstoffe werden durch unterschiedliche Fertigungsverfahren wie Kleben, Gießen, Drucken, Umformen oder Pressen miteinander verbunden. Der Materialmix ermöglicht durch eine Vielzahl an wählbaren Parametern ein großes Leichtbaupotenzial. Beim Automobil ist „ein Drittel Gewichtsreduktion realistisch“.<sup>31</sup> Dieser Variantenreichtum erfordert jedoch großes Know-how in der Konstruktion und der Auswahl geeigneter Fügeverfahren. Zu berücksichtigen sind hier unterschiedliche Materialeigenschaften der Werkstoffe, wie beispielsweise Korrosionsverhalten oder thermische Ausdehnung.

Während der Betriebsphase gilt das Credo, je leichter ein Fahrzeug ist, desto ökologischer ist es zu bewegen. Zur Optimierung des Gesamtgewichts sind alle Bauteile des Fahrzeugs zu betrachten und deren Notwendigkeit zu hinterfragen. Der Einsatz eines Reifenreparatursets, anstelle des Reserverades oder der Verzicht auf Komfortzubehör, wie beispielsweise das Schiebedach, kann mitunter eine enorme Gewichtsersparnis bewirken, ohne die Fahrzeugsicherheit zu reduzieren.

Für eine ganzheitliche Ökobilanzierung müssen jedoch neben der Nutzungsphase auch die anderen Phasen des Lebenszyklus betrachtet werden.

## Audi A3

Karosseriematerialien  
Materials in the body structure  
04/12

- Ultrahochfeste Stähle (warmumgeformt)**  
Ultra-high strength steels (hot-formed)
- Höchstfeste Stähle**  
Higher strength steels
- Hochfeste Stähle**  
High-strength steels
- Weiche Stähle**  
Soft steels
- Aluminium-Blech**  
Sheet aluminium
- Aluminium-Profil**  
Aluminium section

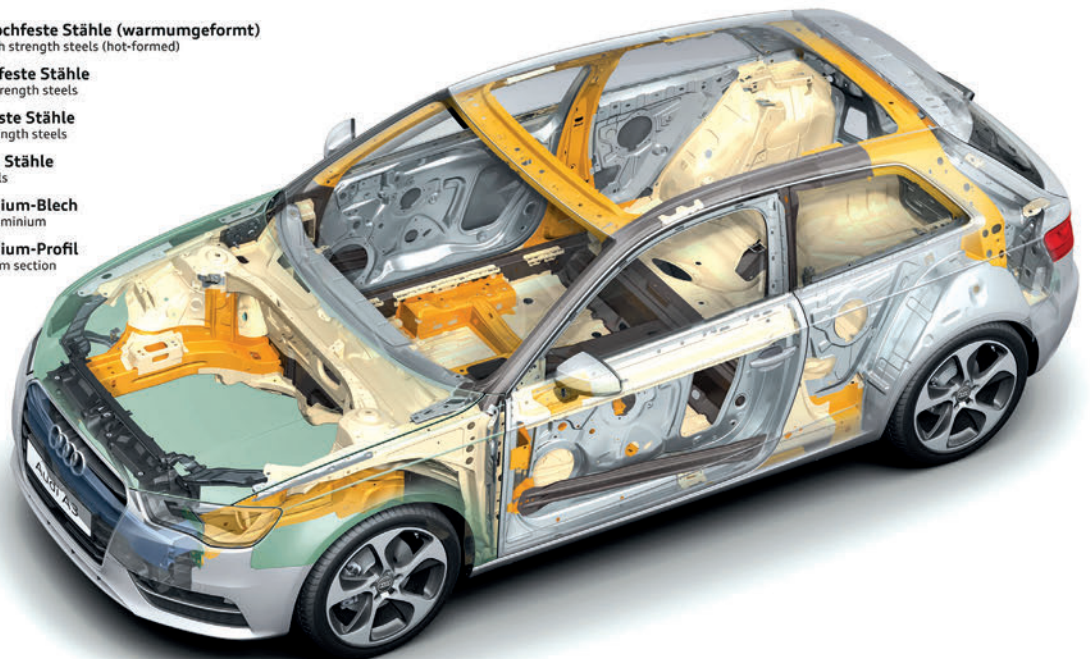


Abb. 18: AUDI A3 Karosseriematerialien; © AUDI AG

30 {e-mobil BW GmbH 2012 #34}

31 {Dick 2012 #25}

## Kapitel 3

# ÖKOLOGISCHE ASPEKTE

Wie im Vorwort und in der Einleitung beschrieben, werden im Rahmen dieser Studie die ökologischen Aspekte des Leichtbaueinsatzes untersucht. Die Studie zielt inhaltlich darauf ab, insbesondere KMU den Einstieg in die ökologische Betrachtung des Leichtbaus zu erleichtern, und ist unter dieser Vorgabe zu verstehen und zu lesen. Neben einer Einführung in die Ökobilanzierung, welche die grundlegenden Aspekte der umweltlichen Bilanzierung vorstellt, werden die durch Ökobilanzen gewonnenen Ergebnisse und ihr Verwendungspotenzial dargestellt. Die hier beschriebene Ökobilanzstudie ist in Anlehnung an die Ökobilanznormen ISO 14040 sowie 14044 erstellt. Der Untersuchungsrahmen umfasst die relevanten Vorder- sowie Hintergrundsysteme, unter der Annahme, dass diese in Deutschland stattfinden. Innerhalb der Systemgrenzen werden die Produktion, die Nutzung sowie das Lebensende modelliert (Vordergrundsystem) – basierend auf Datensätzen der Datenbank und Software GaBi, welche die Vorketten, wie beispielsweise die Energiebereitstellung Deutschlands, berücksichtigen (Hintergrundsystem). Das Software- und Datenbanksystem GaBi 5 ist ein in Industrie und Wissenschaft gleichermaßen anerkanntes und genutztes ingenieurwissenschaftliches Werkzeug zur ökologischen Bilanzierung von Produkten und Prozessen entlang deren Lebenszyklus. Hervorzuheben ist die hohe Industrierelevanz und Belastbarkeit der Hintergrunddaten. Mit der operativen Unterstützung durch die Software und Datenbank GaBi können die Lebenszyklen der Werkstoffvarianten realitätsnah ökologisch abgebildet werden. Da bei der Modellierung ausschließlich GaBi verwendet wurde, ist die Transparenz, Konsistenz sowie Aktualität der verwendeten Daten sichergestellt. Als funktionelle Einheit, die den Nutzen des zu untersuchenden Produkts quantifiziert und damit Vergleiche mit anderen Produkten erst ermöglicht, ist für die vorliegende Studie beispielhaft ein Karosseriebauteil im Automobilbereich unterschiedlicher Materialien bei vergleichbaren technischen Eigenschaften und Funktion definiert. Die ökologischen Aspekte werden durch lebenszyklusübergreifende Ökobilanzen der Bauteilvarianten aus Stahl, Aluminium und kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff untersucht. Im Rahmen dieser Studie werden die Ergebnisse der ökologischen Betrachtung hinsichtlich Primärenergiebedarf und Treibhauspotenzial (GWP) je Bauteil dargestellt. Die Nutzung von Aluminium und Stahl ist im Mobilitätsbereich seit Jahrzehnten etabliert. Daraus resultiert auch die gute Datenlage zur ökobilanziellen Abbildung der Verarbeitung dieser Werkstoffe. Der Großserieneinsatz von CFK befindet sich derzeit in der Einführungsphase. Unterschiedliche Qualitätsanforderungen an die Kohlenstofffasern für unterschiedliche technische Einsatzzwecke spiegeln sich auch in den Umweltprofilen für die Herstellung von CFK wieder. Diese Situation wird durch die Angabe von Bandbreiten bei der Ergebnisdarstellung für die jeweiligen Wirkungskategorien berücksichtigt.

### EINFÜHRUNG IN DIE ÖKOBILANZ

Ökobilanzen bauen auf dem Lebenszyklusgedanken auf. Um die ökologischen Auswirkungen von Leichtbauanwendungen in ihrer Gesamtheit zu erfassen, sollte daher eine Betrachtung über den gesamten Lebensweg eines Produkts erfolgen. Der gesamte Lebenszyklus des Produkts – hier ein aus unterschiedlichen Leichtbaumaterialien gefertigtes Karosseriebauteil mit daraus resultierenden unterschiedlichen Gewichten, jedoch mit gleichbleibender Funktion – setzt sich aus den Phasen Herstellung, Nutzung und Lebensende zusammen. Die Lebenszyklusbetrachtung erfordert die Einbeziehung aller Vorketten. So lässt sich die Herstellungsphase beispielsweise in die Unterphasen Rohstoffabbau, Herstellung von Vorprodukten und in die eigentliche Produktherstellung unterteilen, die Phase Lebensende in die Unterphasen Recycling und Entsorgung.

Zitat Dr. Wolfgang Becker [Group Research & Advanced Engineering Lightweight, Materials, Manufacturing, Daimler AG]:

*„Bei den ökologischen Aspekten sehen wir eine Differenzierung in drei Gebiete: Der erste Aspekt, die Herstellung der Leichtbaumaterialien. Zweitens die Herstellung und der Betrieb des Fahrzeuges, alles was in unseren Fabriken passiert, sowie die Nutzung durch unseren Kunden. Der letzte Punkt ist das Recycling des Fahrzeuges. Diese drei Felder sind noch nicht gemeinsam optimiert und technologisch ausgereizt. Als Beispiel sei hier das CFK genannt. Für die Produktion der Kohlenstofffaser können regenerativer Energien eingesetzt werden, wodurch mit minimalstem CO<sub>2</sub>-Ausstoß produziert werden kann. In der Nutzungsphase entstehen durch bestes Leichtbaupotenzial positive Effekte für den Kunden. Beim Recycling müssen weitere Potenziale erschlossen werden – hier steht vor allem das stoffliche Recycling im Vordergrund; Speziell bei den Faserverbundwerkstoffen muss es gelingen, das relativ teure Fasermaterial zurückzugewinnen und in den Fertigungsprozess zurückzuführen.“*

# Kapitel 3

Vornehmliche Ziele einer Ökobilanz sind die Analyse des Lebenszyklus eines Produkts zum Aufdecken ökologischer Schwachstellen und der ökologische Vergleich alternativer Produkte oder Systeme auf Basis einer vergleichbaren Funktionserfüllung, beschrieben durch die sogenannte funktionelle Einheit. Die funktionelle Einheit der vorliegenden Studie ist als ein Karosseriebauteil unterschiedlicher Materialien bei gleicher Funktion im Automobilbereich definiert. Im Rahmen dieser Studie sollen die ökologischen Potenziale der betrachteten Leichtbaumaterialien aufgezeigt werden. Der Inhalt und Ablauf der Ökobilanzierung ist in den Normen DIN EN ISO 14040/14044 standardisiert.

Die Sachbilanz stellt die Grundlage der ökologischen Analyse dar. In die Sachbilanz werden alle eingehenden Stoff- und Energieströme (z.B. Materialbedarf und Stromverbrauch) sowie ausgehenden Emissions- und Abfallströme des untersuchten Systems aufgenommen. Die ermittelten Sachbilanzdaten werden anschließend in ein Sachbilanzmodell übertragen. Basierend auf diesen Informationen lassen sich später die verursachten Umweltwirkungen im Rahmen der Wirkungsabschätzung berechnen. Die Wirkungsabschätzung dient der Informationsverdichtung der Sachbilanzergebnisse.

Ziel der Wirkungsabschätzung ist es, die Menge der Sachbilanzdaten auf ein leicht verständliches, übersichtliches und aussagekräftiges Maß von Indikatoren zu reduzieren und darzustellen. Hierzu werden Emissionen, die gleiche Wirkungen auf die Umwelt aufweisen, in Wirkungskategorien zusammengefasst. Alle Emissionen, die Einfluss auf den Treibhauseffekt haben, werden beispielsweise der Wirkungskategorie „Treibhauspotenzial“ zugeordnet. Es tragen u.a. Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>)-, Methan-Emissionen (CH<sub>4</sub>) und das als Lachgas bekannte Distickstoffmonoxid (N<sub>2</sub>O) zum Treibhauspotenzial bei.

Die in der Datenbank hinterlegten Daten basieren auf jahrelanger Forschung im Rahmen von Industriekooperationen und öffentlich geförderten Projekten und werden regelmäßig aktualisiert. In den Datenbanken sind Umweltprofile von Prozessen hinterlegt. Beispielsweise sind dies häufig benötigte Prozesse, wie die länderspezifische Stromversorgung (z.B. das Umweltprofil der deutschen Strombereitstellung) oder Transportprozesse (z.B. LKW- oder Schifftransporte). Zusätzlich sind auch spezialisiertere Produktionstechnologien, wie z.B. die Kohlenstofffaserproduktion für CFK und Umformprozesse aus der Automobilindustrie vorhanden, die direkt zur Ökobilanzierung des untersuchten Karosseriebauteils angewandt werden können.

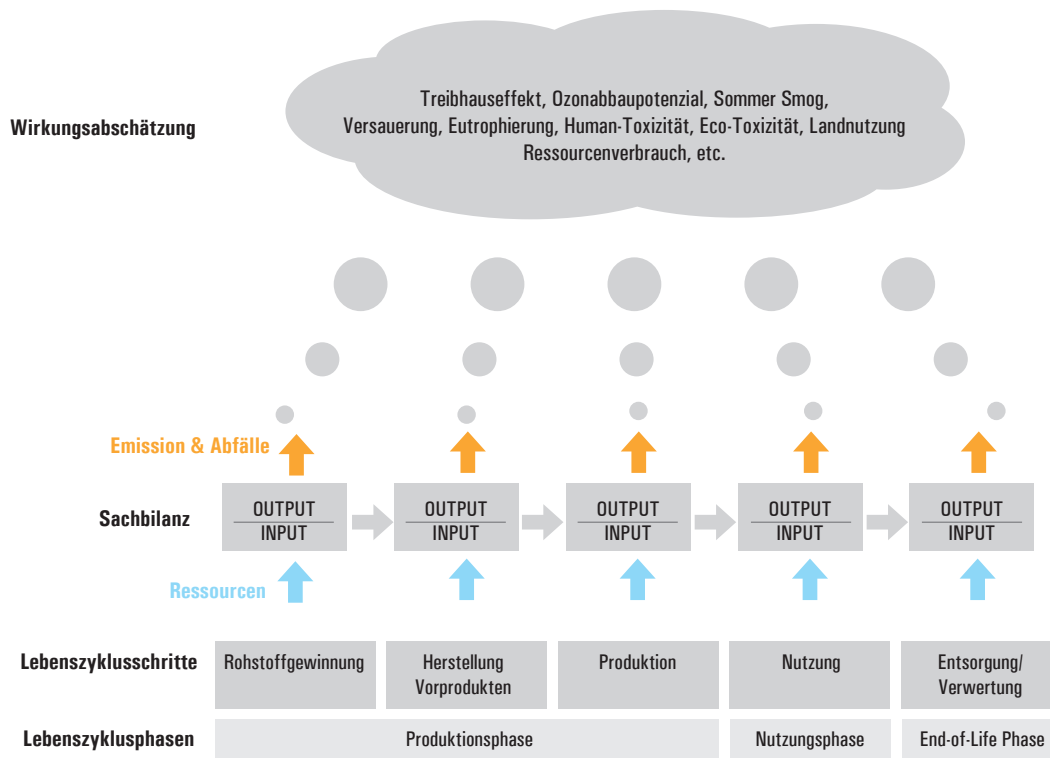


Abb. 19: Schema einer Ökobilanzuntersuchung<sup>32</sup>; eigene Darstellung

Zusätzliche Ökobilanzdaten, die beispielsweise Zukunftspotenziale der Leichtbaumaterialien umfassen und noch nicht in der GaBi-Datenbank abgebildet sind, werden im Rahmen dieser Studie modelliert.

Zur Erfassung der Umweltauswirkungen der Nutzungsphase wird zusätzlich auf ein bereits entwickeltes Nutzungsphasenmodell zurückgegriffen, das den Betrieb von konventionellen benzin- und dieselbetriebenen Fahrzeugen auf Basis des Neuen Europäischen Fahrzyklus (NEFZ) sowie des Handbuchs für Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs (HBEFA 3.1) vergleichend abbildet.<sup>33</sup>

## UNTERSUCHTE MATERIALIEN UND BAUTEILGEWICHTE

Vor der Beschreibung der einzelnen Lebenszyklusphasen Herstellung, Nutzung und Lebensende sowie der Zusammenfassung der Resultate über den gesamten Lebenszyklus werden die untersuchten Materialien und angenommenen Bauteilgewichte vorgestellt.

Für automobiler Anwendungen kommen Bleche aus Stahl zum Einsatz, die den Anforderungen der Autoindustrie entsprechen. Häufig werden hier korrosionsbeständige feuerverzinkte Stahlbleche verwendet. Aluminiumbleche werden bevorzugt in der Form von Legierungen der Typen EN AW-60XX eingesetzt. Die Kohlenstofffasern für den CFK-Werkstoff werden aus Polyacrylnitril (PAN) hergestellt, als Matrix für die Kohlenstofffasern dient Epoxidharz. Für die Ökobilanzmodellierung werden Datensätze verwendet, die diesen Vorgaben entsprechen. Je nach Wahl des Werkstoffes sind verschiedene Gewichtseinsparpotenziale möglich. Ausgehend von einem Stahlstrukturbauteil (feuerverzinkter Stahl für den automobilen Einsatz), das als Referenz für die weitere Betrachtung der Leichtbaupotenziale fungiert und für das ein Gewicht von 10 kg angenommen wird, wird die Dimensionierung der übrigen Werkstoffvarianten vorgenommen. Durch den Einsatz von Hochleistungsstahl sind Gewichtsreduktionen von 10 - 20% möglich.<sup>34</sup> In dieser Studie wird von einer Gewichtseinsparnis von 15% ausgegangen. Für Aluminium wird eine Gewichtseinsparung gegenüber dem Referenzbauteil aus Stahl von 40% angenommen. Für quasiisotropes CFK, das durch die Orientierung der Kohlenstofffasern in vier Lastrichtungen gleichartige mechanische Eigenschaften für alle Lastrichtungen aufweist, wird im Vergleich zum Referenzbauteil aus Stahl von einem Gewichtseinsparpotenzial von 52% ausgegangen. Für unidirektional ausgelegtes CFK, das optimierte mechanische Eigenschaften in

eine Lastrichtung besitzt, wird ein Gewichtseinsparpotenzial von 79% veranschlagt.<sup>35,36</sup> Durch die vorgenommene Materialauswahl ergeben sich die folgenden Gewichte der Bauteilvarianten:

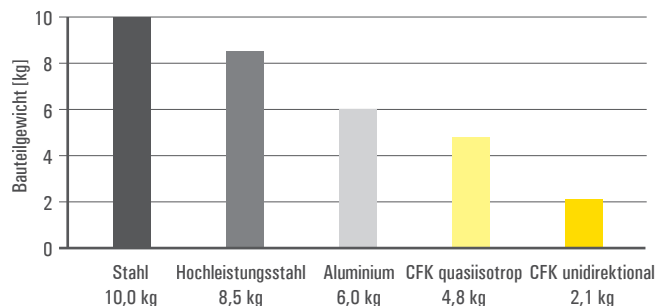


Abb. 20: Gewichte der Leichtbauteilvarianten<sup>37</sup>

Die im Rahmen dieser Studie durchgeführten Ökobilanzen konzentrieren sich auf die Auswertung des Primärenergiebedarfs (Primärenergiebedarf unterer Heizwert, im Folgenden abkürzend als Primärenergiebedarf bezeichnet), der bei den Bauteilvarianten während ihres Produktlebenswegs auftritt, und auf die Umweltwirkungskategorie „Treibhauspotenzial“. Darüber hinaus existieren noch eine Vielzahl von weiteren Wirkungskategorien, die jedoch im Rahmen dieser Studie nicht betrachtet werden.

### 3.1 ÖKOLOGISCHE AUSWIRKUNGEN DER HERSTELLUNGSPHASE

Wie im Kapitel „Einführung in die Ökobilanz“ beschrieben, werden bei der Durchführung einer Ökobilanz alle Vorketten in die Betrachtung einbezogen. Das bedeutet, dass sich die Herstellungsphase in die Unterphasen Rohstoffabbau, Herstellung von Vorprodukten und in die eigentliche Produktherstellung unterteilt. Dabei müssen sowohl die eigentlichen Vorprodukte der betrachteten Karosseriebauteilvarianten als auch die Vorketten der Energiebereitstellung für die Produktherstellung berücksichtigt werden. Bei dem in dieser Studie verwendeten Beispiel werden alle Herstellungsunterphasen auf Basis von deutschen Prozessdaten abgebildet. So basieren beispielsweise die benötigte elektrische und thermische Energie zur Herstellung der Bauteilvarianten sowie die Energiebereitstellung, wie zu Beginn des Kapitels 3 beschrieben, auf deutschen Angaben. Auch die notwendigen Transporte zur Werkstoffherstellung sind im Datensatz berücksichtigt (z.B. Schifftransport nach Deutschland).

33 {Baumann 2010 #91}

34 {Schröder 3/2004 #77}

35 {Renkl 17.11.2011 #76}

36 {Durst 16.11.2011 #96}

37 {Fraunhofer IBP, GaBi Datenbank}

# Kapitel 3

## VORPRODUKTE

Für die ökologische Abbildung der Herstellung der betrachteten Bauteilvarianten ist die Einbeziehung der Werkstoffvorketten notwendig. Es müssen alle Vorprodukte beginnend vom Rohstoffabbau (z.B. Kohleabbau) berücksichtigt werden. Dabei werden länderspezifische Umweltprofile der Verarbeitungsprozesse, die entlang der Vorkette anfallen, verwendet.

Wie einleitend geschildert, wird bei den durchgeführten Ökobilanzen der Primärenergiebedarf sowie die Umweltwirkungskategorie Treibhauspotenzial dargestellt. Die Abbildungen 21 und 22 zeigen diese Kennwerte. Der Ablauf der Herstellungsprozesse unterscheidet sich bei den metallischen Werkstoffen Stahl und Aluminium zum CFK. Wie zu Beginn des Kapitels „Ökologische Aspekte“ beschrieben, unterscheidet sich die Qualität der Datenlage für die verwendeten Materialien. Da die Prozessführung der Kohlenstofffaserherstellung variabel ist und je nach benötigter Faserqualität signifikante Unterschiede aufweist und sich dies entsprechend auf die Ökobilanz auswirkt, werden die für die Kohlenstofffaserproduktion genannten Kennwerte in Bandbreiten angegeben. Eine ausführlichere Beschreibung der verwendeten Umweltprofile für die Materialien Stahl, Aluminium und CFK folgt im Anschluss an die folgende Tabelle.

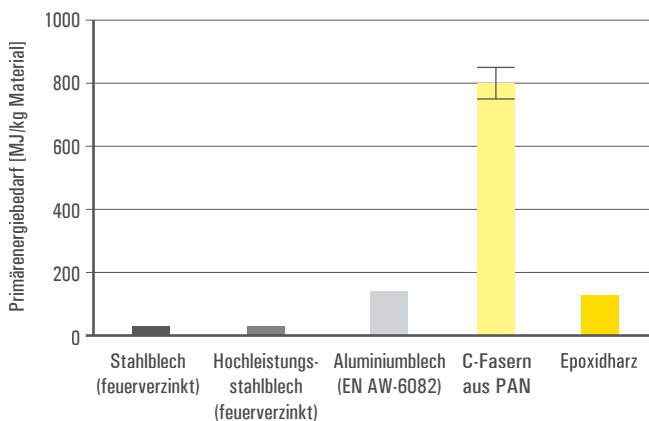


Abb. 21: Primärenergiebedarf<sup>38</sup>

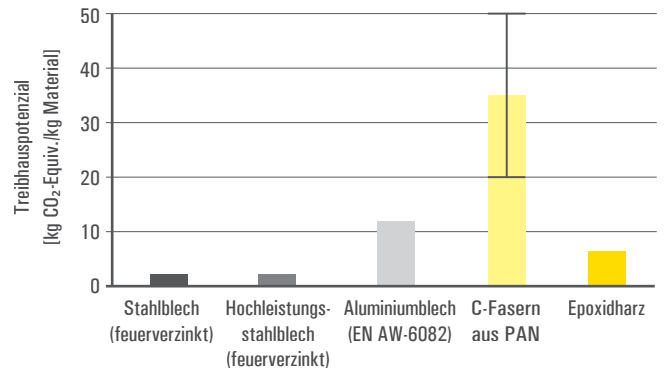


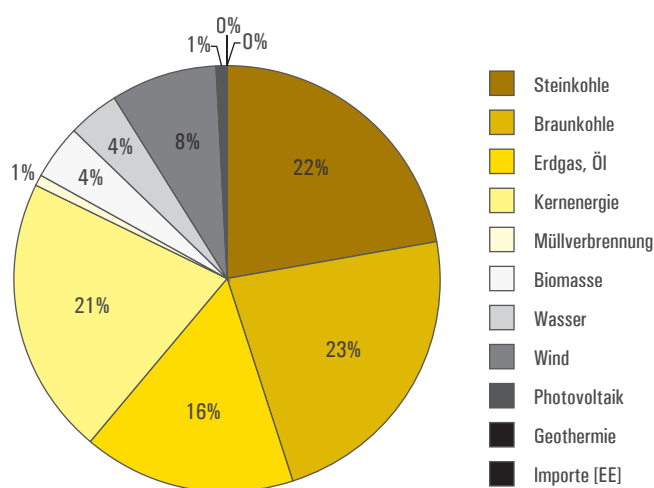
Abb. 22: Treibhauspotenzial<sup>39</sup>

Aus den obigen Diagrammen sind die gegenüber Stahl deutlich höheren Primärenergiebedarfs- und Treibhauspotenzialwerte je kg eingesetzten Materials von Aluminium und v. a. von kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff zu erkennen. Aufgrund der großteils fossilbasierten Energiebereitstellung gehen die Primärenergiebedarfe oft mit dem Treibhauspotenzial einher, wodurch Aluminium und CFK die höchsten Emissionswerte pro kg Material aufweisen. Da allerdings nicht nur die Produktion, sondern auch die restlichen Lebenszyklusphasen in die Ökobilanz eingehen, werden der Produktion später die Vorteile in der Nutzungsphase sowie ggf. Gutschriften am Lebensende durch die entsprechenden Recyclingpotenziale gegengerechnet (vgl. Kapitel Ökologische Auswirkungen des Lebenszyklus, Abbildung 41ff).

38 {Fraunhofer IBP, GaBi Datenbank}

39 {Fraunhofer IBP, GaBi Datenbank}

Die Bereitstellung der benötigten elektrischen und thermischen Energie für alle Herstellungsprozesse beruht auf deutschen Energiemixen. Als Beispiel für einen angewandten Energiemix ist der deutsche Strommix aus dem Jahr 2010 dargestellt.<sup>40</sup>



Anteil reg. Energien: ~ 17%

Abb. 23: Strommix Deutschland 2010<sup>41</sup>

Die thermische Energiebereitstellung für die Verarbeitungsprozesse entlang der Vorkette wird an die jeweilige Prozesstechnik angepasst. Sie kann beispielsweise auf Basis von Erdgas, Erdöl oder mit elektrischer Energie erfolgen.

## STAHL

Die bei der Modellierung angewandte Produktionsvorkette des feuerverzinkten Stahlblechs, aus dem im Anschluss das in der Studie betrachtete Bauteil hergestellt wird, umfasst die Produktionsprozesse für ein feuerverzinktes Stahlblech in einem deutschen Stahlwerk. Für die Stahlproduktion ist der Abbau der für Stahl benötigten Rohstoffe notwendig. In Deutschland wird das Eisenerz überwiegend aus Kanada, Brasilien und Australien importiert. Steinkohle wird v. a. aus Kanada importiert.<sup>42</sup>

## ALUMINIUM

Für Aluminiumbleche werden bevorzugt Aluminiumlegierungen der Typen EN AW-60XX eingesetzt. Die Modellierung der Produktionsvorkette erfolgt auf Basis der Legierung EN AW-6082 (AlSi1MgMn). Aluminium wird aus dem Rohstoff Bauxit hergestellt. Hier werden für die ökologische Abbildung weltweite Rohstoffabbaubedingungen verwendet. Zur Herstellung dieser Legierung sind zwei Produktionspfade relevant. So kann Aluminium bereits während der Herstellung des Primäraluminiums (direkt aus dem Rohstoff Bauxit hergestellt, ohne Verwendung von recyceltem Aluminium) legiert werden. Alternativ kann das Primäraluminium, das bereits in Form von Barren vorliegt, nochmals eingeschmolzen werden und währenddessen mit den Legierungselementen angereichert werden.<sup>43</sup>

## KOHLENSTOFFFASERVERSTÄRKTER KUNSTSTOFF

Der Werkstoff CFK wird aus Kohlenstofffasern und Epoxidharz hergestellt. Die Kohlenstofffasern werden aus Polyacrylnitril (PAN) hergestellt. Der Herstellungsprozess besteht aus zwei Schritten. Zunächst erfolgt eine Stabilisierung der PAN-Faser bei ca. 200 - 300°C. Danach schließt sich die Carbonisierung unter Abwesenheit von Sauerstoff bei einer Temperatur von 1500 - 1800°C an. Diese Prozessschritte erfolgen bei allen Bauteilarten unabhängig vom Faseraufbau und späteren Einsatzzweck des Bauteils identisch. Danach folgt eine Nachbehandlung, während der ein Einstellen der Fasereigenschaften vorgenommen wird, diese erfolgt je nach gewünschten Eigenschaften bei unterschiedlichen Temperaturniveaus und -verläufen. Die Temperaturen liegen zwischen 2000 - 3000°C.<sup>44</sup> Aus diesem Prozessschritt resultieren unterschiedliche Energiebedarfs- und Treibhauspotenzialwerte, die in den obigen Diagrammen zum Primärenergiebedarf und Treibhauspotenzial der C-Faserherstellung durch Bandbreiten berücksichtigt sind.

Die Epoxidharzherstellung ist ein großindustriell bewährter Prozess. Epoxidharz wird aus Bisphenol A unter Zugabe von Epichlorhydrin hergestellt. Der Ökobilanzdatensatz bezieht flüssige und feste Epoxidharze mit ein.

40 {Nitsch 08/2009 #60}

41 {Nitsch 08/2009 #60}

42 {Fraunhofer IBP, GaBi Datenbank}

43 {Fraunhofer IBP, GaBi Datenbank}

44 {Henning 2011 #1}

# Kapitel 3

## 3.2 HERSTELLUNG DER LEICHTBAUTEILVARIANTEN

Die Herstellungsphase der betrachteten Bauteilvarianten unterscheidet sich je nach verwendetem Werkstoff. Für die sehr junge CFK-Großserienproduktion ist im Vergleich zu den betrachteten, etablierten metallischen Herstellungsverfahren ein erhebliches Optimierungspotenzial zu erwarten. Unterschiedliche Herstellungsprozesse und zu erwartende Skaleneffekte begründen die Schwankungsbreite des CFK-Materials in den Diagrammen bezüglich des Energiebedarfs (vgl. Abbildung 24) und Treibhausgasemissionen der CFK-Materialien (vgl. Abbildung 25). Daneben spielen die materialspezifischen mechanischen Eigenschaften eine Rolle. Denn für die gleiche Funktion ergeben sich je nach Material unterschiedliche Bauteileigenschaften (z.B. Bauteilgeometrie) und ein unterschiedliches Bauteilgewicht (vgl. Abbildung 20). Wird dieses Bauteilgewicht mit den massenspezifischen Kennwerten aus den Abbildungen 21 und 22 multipliziert und die für die Bauteilherstellung nötigen Primärenergieaufwendungen bzw. resultierenden Emissionen addiert, ergeben sich die bauteilspezifischen Werte für Primärenergie und Treibhauspotenzial. Die Unsicherheiten bei der CFK-Bauteilproduktion sind in den folgenden Diagrammen als Bandbreiten entsprechend dargestellt.

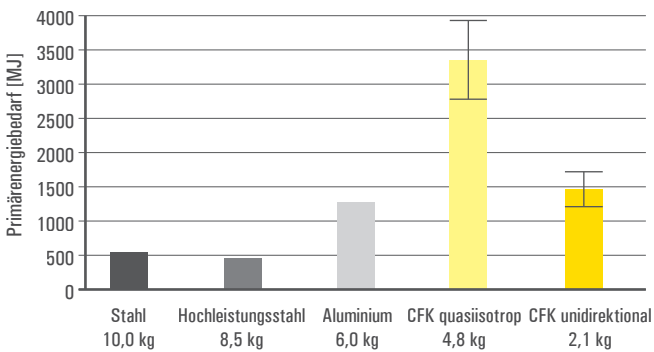


Abb. 24: Primärenergiebedarf der Herstellung der Leichtbauteilvarianten<sup>45</sup>

Obwohl das Stahlbauteil mehr als das Doppelte gegenüber dem quasiisotropen und knapp fünf mal so viel gegenüber dem unidirektionalen CFK-Bauteil wiegt, weist es aufgrund des geringeren massenspezifischen Primärenergiebedarfs (vgl. Abbildung 24) und seinem energieärmeren Herstellungsverfahren einen geringeren Primärenergiebedarf in der Herstellung auf.

Das Aluminiumbauteil liegt bezüglich Masse und spezifischem Energiebedarf zwischen den Stahl- und CFK-Bauteilvarianten. Die Herstellung des Bauteils aus Hochleistungsstahl besitzt den geringsten Primärenergiebedarf, während quasiisotropes CFK den höchsten Primärenergiebedarf in der Herstellung aufweist. Ob CFK unidirektional oder quasiisotrop eingesetzt werden kann, hängt von Funktion bzw. der Belastungssituation des jeweiligen Bauteils ab. Diese beiden Fälle stellen das obere/untere Maximum dar.

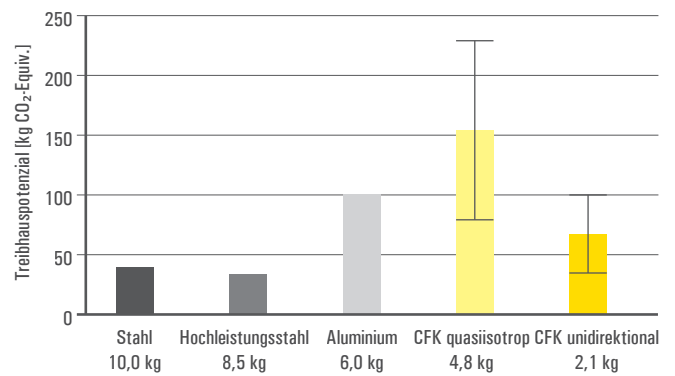


Abb. 25: Treibhausgasemissionen der Herstellung der Leichtbauteilvarianten<sup>46</sup>

Die Ergebnisse zum bauteilspezifischen Treibhauspotenzial ähneln denen des bauteilspezifischen Primärenergiebedarfs. Auch hier zeigt Stahl, explizit Hochleistungsstahl, im Vergleich zu den anderen Varianten die geringsten Treibhausgasemissionen in der Herstellung. Die Treibhausgasemissionen der CFK-Bauteile weisen eine sehr große Bandbreite auf, sie liegen je nach Verarbeitung deutlich über oder teilweise unter den Alternativen. Bei einer Herstellung unter optimalen Prozessbedingungen (minimaler Primärenergiebedarf bei der C-Faserherstellung, optimale Materialausnutzung) des CFK-Bauteils kann die quasiisotrope Variante verringerte Treibhausgasemissionen gegenüber dem Aluminiumbauteil aufweisen. Das Treibhauspotenzial der Herstellung der unidirektionalen CFK-Bauteilvariante liegt tendenziell unter dem von Aluminium und befindet sich bei optimalen Prozessbedingungen (minimaler Primärenergiebedarf bei der C-Faserherstellung, optimale Materialausnutzung und zudem geringstmöglicher Materialeinsatz) in der Größenordnung von Stahl bzw. sogar Hochleistungsstahl.

45 {Fraunhofer IBP, GaBi Datenbank}

46 {Fraunhofer IBP, GaBi Datenbank}

## Herstellung Bauteil aus Stahl

GaBi 5 Prozessplan: Referenzgrößen

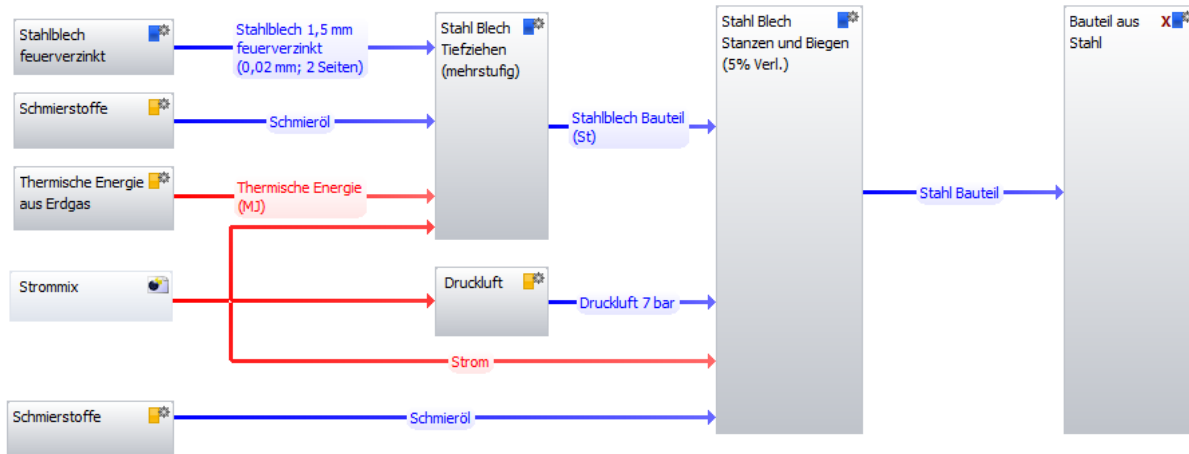


Abb. 26: Plan der Herstellung des Stahlbauteils<sup>47</sup>

## STAHL

Die Herstellung der Stahl- und Hochleistungsstahlbauteilvarianten basiert auf der gleichen Prozesstechnik. Das vorhandene Vorprodukt in Form eines Stahlblechs wird durch Blechumformprozesse zum endgültigen Bauteil weiterverarbeitet. Durch die vorgenommenen Umformprozesse erhält das Bauteil seine gewünschte Geometrie und die erwünschten mechanischen und technischen Eigenschaften. Die Datensätze basieren auf Prozessdaten von Automobilherstellern. Die Umformprozesstechnik beinhaltet die notwendigen Umformstufen mit sich anschließenden Stanz- und Biegeprozessen. Für die Umformprozesse werden elektrische und thermische Energie sowie Tiefziehemotionen (Schmierstoffe) benötigt. In Abbildung 26 ist beispielhaft der Plan aus dem verwendeten Ökobilanzmodell der Stahlbauteilvarianten dargestellt.

Auf Grundlage des Herstellungsplans werden die Sachbilanzierung und die sich anschließende Wirkungsabschätzung durchgeführt. Es ergeben sich die folgenden Diagramme.

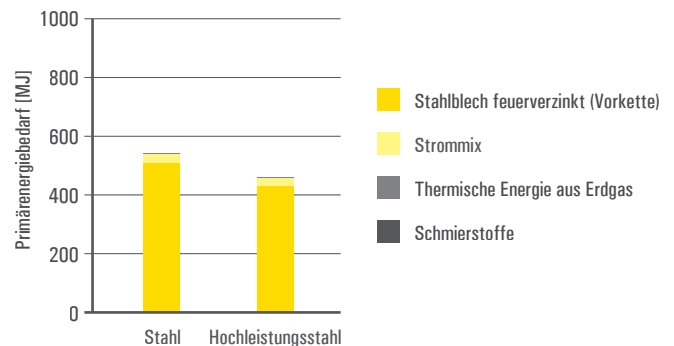


Abb. 27: Primärenergiebedarf der Herstellung der Stahlbauteile<sup>48</sup>

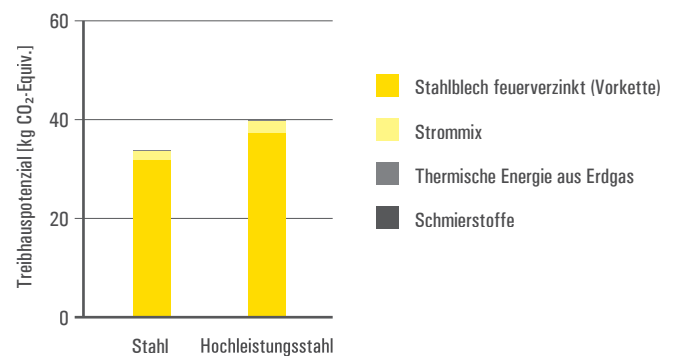


Abb. 28: Treibhauspotenzial der Herstellung der Stahlbauteile<sup>49</sup>

47 {Fraunhofer IBP, GaBi Datenbank}

48 {Fraunhofer IBP, GaBi Datenbank}

49 {Fraunhofer IBP, GaBi Datenbank}



## Kapitel 3

Aus den Diagrammen 27 und 28 ist erkennbar, dass das Hochleistungsstahlbauteil aufgrund seines geringeren Gewichts die geringeren Umweltlasten aufweist. Hier wird vorausgesetzt, dass der Energieaufwand zur Herstellung der Hochleistungsstahlbleche sich nicht signifikant von der konventionellen Stahlblechherstellung unterscheidet und die optimierten Werkstoffeigenschaften der Hochleistungsstahlbleche durch unterschiedliche Legierungen und durch einen vom Energiebedarf her ähnlichen Temperaturverlauf hervorgerufen werden. Bei beiden Stahlbauteilvarianten stammen die maßgeblichen Umweltlasten aus der Vorkette der Stahlblechherstellung. Der für die elektrische Energiebereitstellung der Umformprozesse benötigte Strommix ist außerdem relevant. Der thermische Energiebedarf und vor allem die Schmierstoffe spielen aus ökologischer Sicht nur eine geringe Rolle.

### ALUMINIUM

Die Herstellung der Aluminiumbauteilvariante basiert, ähnlich wie die Herstellung der zuvor beschriebenen Stahlbauteilvarianten, auf in der Automobilindustrie bewährter Prozesstechnik. Ausgehend vom Vorprodukt in Form eines Aluminiumblechs erfolgt die Weiterverarbeitung durch Umformprozesse zum Endprodukt. Die Datensätze basieren auf Prozessdaten der Automobilindustrie. Die Umformprozesstechnik beinhaltet, analog zur Stahlbauteilvariante, die notwendigen Umformstufen mit sich anschließenden Stanz- und Biegeprozessen.

Die Sachbilanzierung und die sich anschließende Wirkungsabschätzung ergeben für Aluminium die folgenden Diagramme.

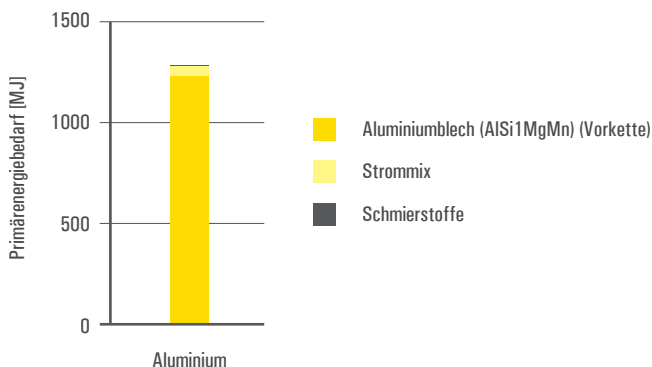


Abb. 29: Primärenergiebedarf der Herstellung des Aluminiumbauteils<sup>50</sup>

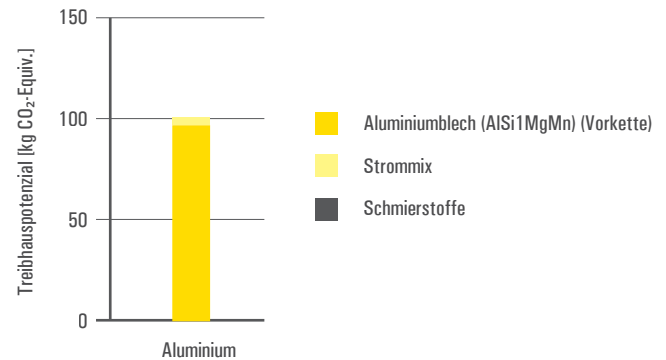


Abb. 30: Treibhauspotenzial der Herstellung des Aluminiumbauteils<sup>51</sup>

Aus beiden Diagrammen ist ersichtlich, dass die maßgeblichen Lasten sowohl beim Primärenergiebedarf als auch beim Treibhauspotenzial aus der Vorkette der Aluminiumblechherstellung stammen. Als zweite relevante Einflussgröße zeigt sich der für die elektrische Energiebereitstellung der Umformprozesse benötigte Strommix. Die Schmierstoffbereitstellung ist dagegen nur geringfügig ökologisch relevant.

### KOHLENSTOFFFASERVERSTÄRKTE KUNSTSTOFFE

Unterschiedliche Qualitätsanforderungen an die Kohlenstofffasern für unterschiedliche technische Einsatzzwecke spiegeln sich auch in den Ökopprofilen für die Herstellung von CFK wider.

Dies wird durch die Angabe von Bandbreiten in der Ergebnisdarstellung zu den jeweiligen Wirkungskategorien berücksichtigt. So werden anhand verschiedener Szenarien die Bandbreiten des Primärenergiebedarfs und der Treibhausgasemissionen bei der CFK-Herstellung dargestellt.

Die unidirektionalen und quasiisotropen CFK-Bauteilvarianten werden jeweils unter der Verwendung von zwei Szenarien berechnet. So wird im minimalen Szenario von einem minimalen Primärenergiebedarf (750 MJ/kg Faser, siehe Abbildung 21) und Treibhauspotenzial (20 kg CO<sub>2</sub>-Equiv./kg Faser, siehe Abbildung 22) bei der Kohlenstofffaserherstellung ausgegangen, sowie ein minimaler Kohlenstofffaserbedarf (maximale massenbezogene Materialausnutzung von 95%), sowie ein minimaler Epoxidharzbedarf (maximale massenbezogene Materialausnutzung von 95%) vorausgesetzt. Das maximale Szenario umfasst

50 {Fraunhofer IBP, GaBi Datenbank}

51 {Fraunhofer IBP, GaBi Datenbank}

dagegen einen maximalen Primärenergiebedarf (850 MJ/kg Faser, siehe Abbildung 23) und Treibhauspotenzial (50 kg CO<sub>2</sub>-Equiv./kg Faser, siehe Abbildung 24) bei der Kohlenstofffaserherstellung, sowie einen maximalen Kohlenstoffbedarf (minimale massenbezogene Materialausnutzung von 75%), sowie einen maximalen Epoxidharzbedarf (minimale massenbezogene Materialausnutzung von 80%).

Aus den Ergebnissen beider Szenarien lassen sich Bandbreiten der ökologischen Auswirkungen der quasiisotropen und unidirektionalen CFK-Bauteilvarianten ableiten.

Auf Basis der Herstellungspläne des Ökobilanzmodells werden die Ökobilanzschritte der Sachbilanzierung und Wirkungsabschätzung durchgeführt. Daraus ergeben sich die folgenden Ergebnisse.

In den Diagrammen sind, wie bereits erläutert, für beide Bauteilvarianten jeweils minimale und maximale Szenarien abgebildet. Bei allen Szenarien ist deutlich erkennbar, dass die Kohlenstofffaserherstellung die mit Abstand wichtigste Einflussgröße auf die ökologischen Auswirkungen darstellt.

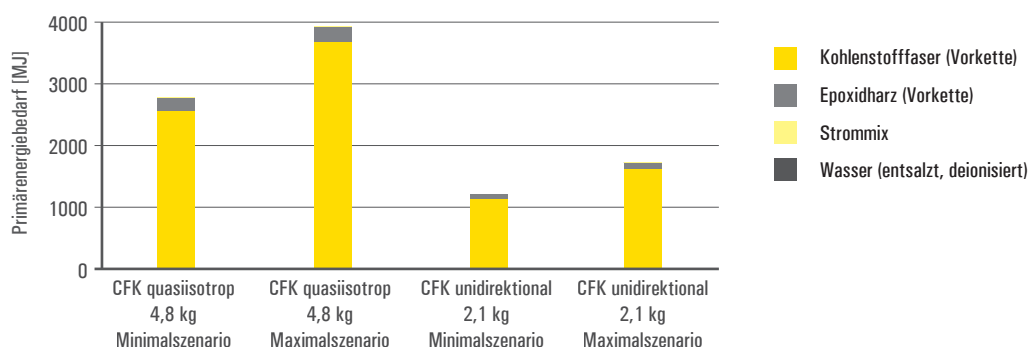


Abb. 31: Primärenergiebedarf der Herstellung der CFK-Bauteile<sup>54</sup>

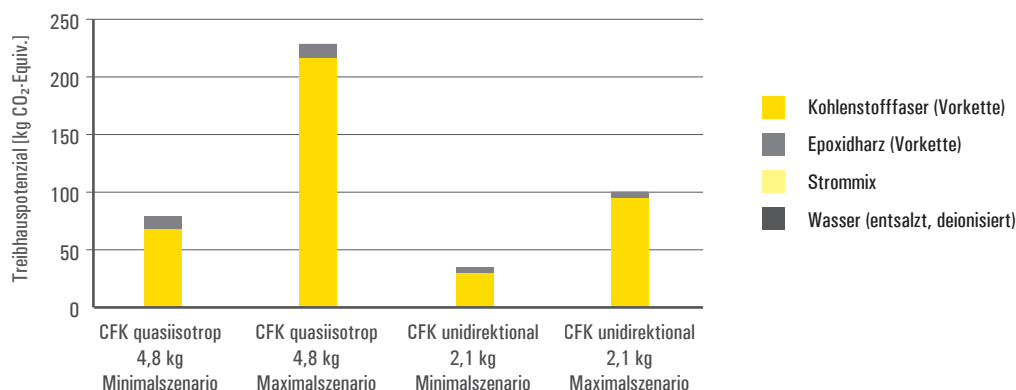


Abb. 32: Treibhauspotenzial der Herstellung der CFK-Bauteile<sup>55</sup>

54 {Fraunhofer IBP, GaBi Datenbank}

55 {Fraunhofer IBP, GaBi Datenbank}

# Kapitel 3

Zitat Prof. Michael R. Buchmeiser (Leiter Institut für Polymerchemie (ipoc), Universität Stuttgart; Direktor Institut für Textilchemie und Chemiefasern Denkendorf (ITCF)):

*„Herkömmliche Kohlenstofffasern werden hergestellt aus Polyacrylnitril (PAN) Precursorfasern und sind somit erdölbasiert und vergleichsweise energieintensiv. Die Herstellungskosten von Kohlenstofffasern aus neu errichteten Anlagen bewegen sich aktuell um 20€/kg. Die großen OEM's sind allerdings nur bereit 17€/kg zu bezahlen und wollen mittel- bis langfristig auf maximal 11 €/kg kommen, was neue Lösungen erfordert. Der sehr energieintensive Prozess der Herstellung schlägt aufgrund der hohen Energiekosten auf den ökonomischen Aspekt durch. Wir brauchen deshalb Verfahren und Prozesse die ökologischer und somit ökonomischer sind als die Existierenden! Mehr als die Hälfte der Kosten einer Kohlenstofffaser entstehen durch die Precursorfaser, wodurch sich sehr starke Bestrebungen ergeben hier alternative Fasertypen zu entwickeln, eines unserer Forschungsgebiete am ITCF Denkendorf. Wir beschäftigen uns mit sogenannten „green-carbon-fibres“, also Kohlenstofffasern aus nachwachsenden Rohstoffen wie etwa Lignin, Cellulose und auch bio-based Ethylen. Diese natürlichen Precursorfasern erlauben im anschließenden Carbonisierungsprozess höhere Prozessgeschwindigkeiten als PAN-basierte, was zu einer weiteren signifikanten Energie- und somit Kostenersparnis der „green-carbon-fibres“ führt.“*

Das Epoxidharz weist ebenfalls einen großen Anteil am Primärenergiebedarf auf und trägt zum Treibhauspotenzial in erheblichem Maße bei. Der Einfluss des Strommixes und v. a. des Prozesswassers sind gegenüber den zwei Vorkettenprozessen der Kohlenstofffaser- und Epoxidharzherstellung verschwindend gering.

## 3.3 ÖKOLOGISCHE AUSWIRKUNGEN DER NUTZUNGSPHASE

Für die untersuchten Bauteilvarianten ist die Verwendung als PKW-Bauteil vorgesehen. Die Kraftstoffverbrauchseinsparungen und die sich daraus ergebenden Einsparungen an Kohlendioxidemissionen werden durch sogenannte Minderverbrauchs-faktoren berechnet. Minderverbrauchs-faktoren werden in Studien angewandt, in denen eine oder mehrere Leichtbauvarianten mit einer Referenzvariante, die dem Stand der Technik entspricht, verglichen werden. Im Fall der hier durchgeführten Studie werden die Leichtbauvarianten aus Hochleistungsstahl, Aluminium, quasiisotropem CFK und unidirektionalem CFK mit der Referenzvariante aus Stahl verglichen. Über die Minderverbrauchs-faktoren werden Kraftstoffverbrauchsdifferenzen zum Referenzwert, in diesem Fall der Stahlbauteilvariante, dargestellt. Die Einsparungen, die durch Sekundäreffekte hervorgerufen werden, sind in den Minderverbrauchs-faktoren berücksichtigt.<sup>56</sup> Beispielsweise genügt leichteren Fahrzeugen für dieselbe Fahrleistung eine geringere Antriebsleistung. Die Minderverbrauchs-faktoren werden auf Grundlage des Neuen Europäischen Fahrzyklus (NEFZ) ermittelt. Der gewichts-abhängige Energiebedarf, der sich ergibt, basiert auf Berechnungen zur Fahrphysik. Beispielsweise finden hier Rollreibung und Luftwiderstand Berücksichtigung. Um aus den auftretenden Energiebedarfswerten die Kraftstoffverbräuche zu ermitteln, sind Kenntnisse zu den Wirkungs-graden der Verbrennungsmotoren notwendig. Auf Basis von mittleren Wirkungsgraden für benzinbetriebene Saugmotoren, benzinbetriebene Turbomotoren und dieselbetriebene Turbomotoren und unter Verwen-dung der auf dem NEFZ basierenden Energiebedarfswerte erfolgt dann die Berechnung der Minderverbrauchs-faktoren. Es ergeben sich die folgenden Minderverbrauchs-faktoren:

| Kraftstoff | Anpassung                | Minderverbrauchs-faktor<br>(Arithmetisches Mittel)<br>[l/(100 km * 100 kg)] |
|------------|--------------------------|---|
| Benzin     | Neue Getriebeübersetzung | 0,32  |
|            | Austausch des Motors     | 0,39  |
| Diesel     | Neue Getriebeübersetzung | 0,29  |
|            | Austausch des Motors     | 0,26  |

Abb. 33: Minderverbrauchs-faktoren<sup>57</sup>

56 {Koffler 2010 #75}

57 {Koffler 2010 #75}

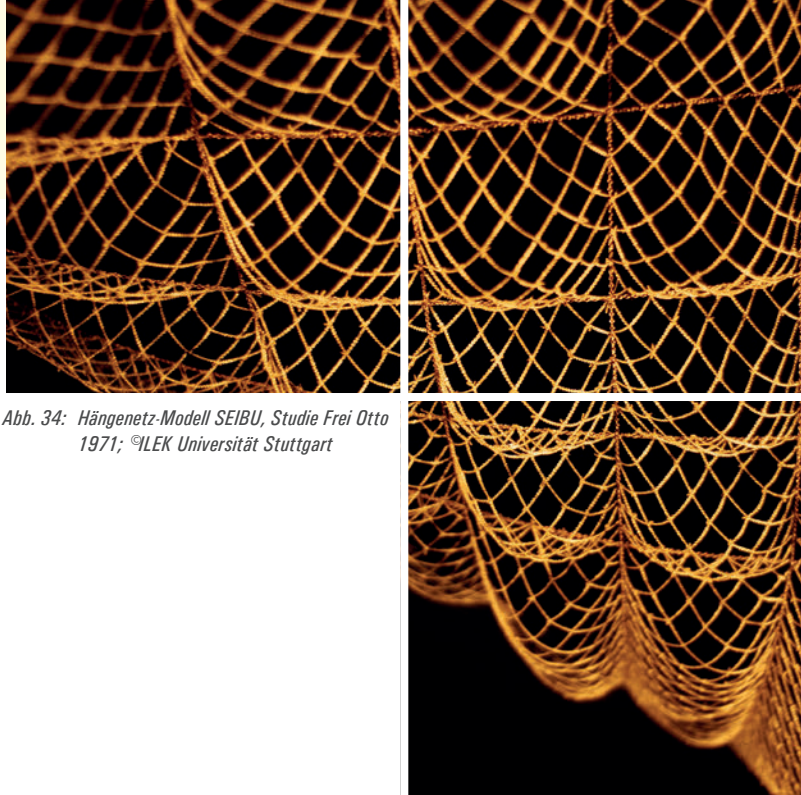


Abb. 34: Hängenetz-Modell SEIBU, Studie Frei Otto 1971; ©LEK Universität Stuttgart

Aus der Abbildung 33 ist erkennbar, dass die Minderverbrauchsfaktoren bei benzinbasiertem Antrieb größere Werte aufweisen als bei dieselbasiertem Antrieb. Dies ist durch die höhere Effizienz von Dieselmotoren zu begründen.

Als übliche Minderverbrauchsfaktoren haben sich die Werte 0,35 l/(100 km\*100 kg) für Benzin und 0,28 l/(100 km\*100 kg) für Diesel bewährt.<sup>58</sup> Diese Werte kommen auch in dieser Studie zum Einsatz.

Die gewichtsspezifische Verbrauchseinsparung (Minderverbrauch) ergibt sich aus folgender Formel:

$$\text{Minderverbrauch} = \text{Gewichtsdifferenz} \cdot \text{Minderverbrauchsfaktor}$$

$$\text{Gewichtsdifferenz} = \text{Gew.}(\text{Leichtbauteil}) - \text{Gew.}(\text{Referenzbauteil})$$

So ergibt sich z.B. für die Aluminiumvariante in einem benzinbetriebenen Fahrzeug folgender Minderverbrauch:

$$\text{Minderverbrauch} = \frac{(6,0 \text{ kg} - 10,0 \text{ kg}) \cdot 0,35 \text{ l}}{(100 \text{ km} \cdot 100 \text{ kg}) \cdot 0,01} = -0,014 \text{ l}/100 \text{ km}$$

Die aus dem Minderverbrauch resultierende Einsparung an Kohlendioxidemissionen ergibt sich aus der chemischen Zusammensetzung der Kraftstoffe Benzin und Diesel. Die Kohlendioxidemissionen erhöhen oder verringern sich also im selben Maße wie der Kraftstoffverbrauch.

Auf Basis der Verbrauchswerte der Leichtbauteilvarianten, die aus der Verwendung der Minderverbrauchsfaktoren resultieren, werden der Primärenergiebedarf und die Treibhausgasemissionen ermittelt. Dabei werden zwei Fahrleistungsszenarien betrachtet, Szenarien über 150.000 km und 250.000 km. Die beiden Szenarien richten sich nach in der Automobilindustrie üblichen Annahmen. Die Volkswagen AG nimmt für Ökobilanzen eine Fahrleistung von 150.000 km an, die Ökobilanzen der Daimler AG basieren auf einer Fahrleistung von 250.000 km.<sup>59, 60</sup>

58 {Koffler 2010 #75}

59 {Volkswagen AG Dezember 2010 #79}

60 {Daimler AG 2012 #71}

# Kapitel 3

Der Primärenergiebedarf bildet den aus dem bauteilspezifischen Kraftstoffverbrauch resultierenden Energiebedarf ab, der u. a. bei der Erdölförderung und bei den sich anschließenden Aufbereitungsprozessen in Raffinerien entsteht.

Die Treibhausgasemissionen treten u. a. in Form von Kohlendioxidemissionen größtenteils bei der Kraftstoffverbrennung während des Fahrbetriebs auf. Außerdem entstehen Treibhausgasemissionen bei der Rohölförderung und Kraftstoffaufbereitung, d. h. bei Raffinerieprozessen.

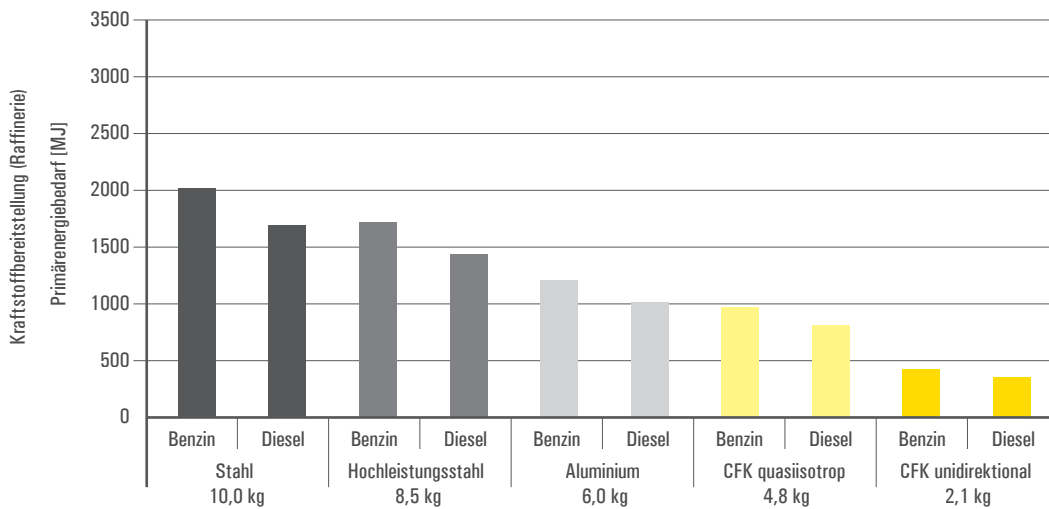


Abb. 35: Primärenergiebedarf der Nutzungsphase der Bauteilvarianten (Fahrleistung: 150.000 km)<sup>61</sup>

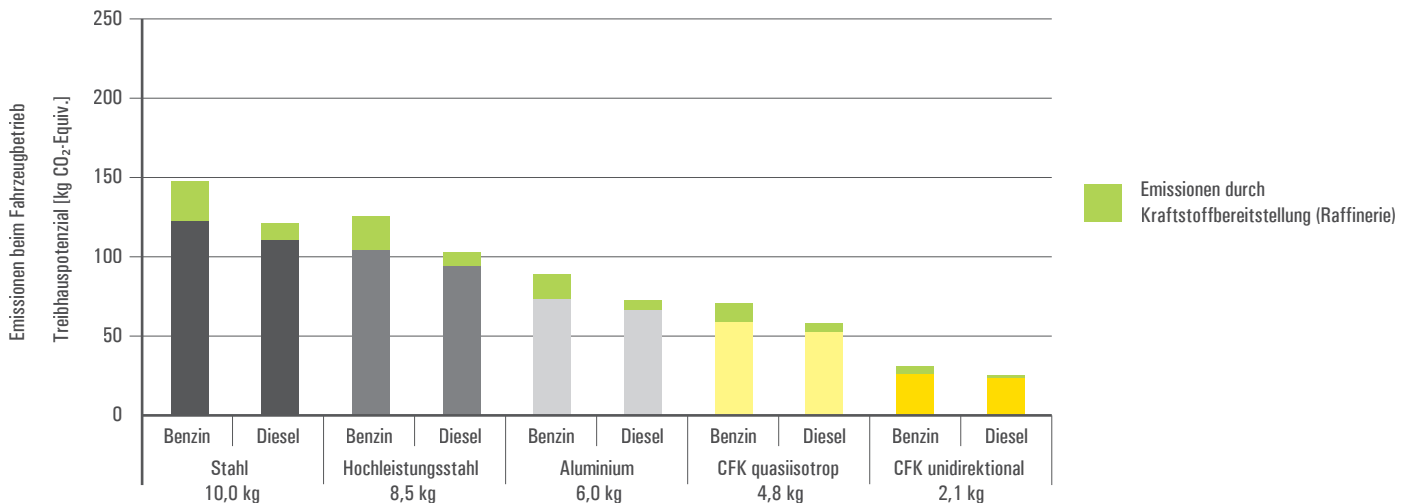


Abb. 36: Treibhauspotenzial der Nutzungsphase der Bauteilvarianten (Fahrleistung: 150.000 km)<sup>62</sup>

61 {Fraunhofer IBP, GaBi Datenbank}

62 {Fraunhofer IBP, GaBi Datenbank}

Der Kraftstoffbedarf und damit sowohl der Primärenergiebedarf als auch die resultierenden Treibhausgasemissionen sind vom zurückgelegten Weg des Fahrzeugs abhängig. Aufgrund der höheren Fahrleistung beim Fahrleistungsszenario über 250.000 km tritt daher gegenüber dem 150.000 km-Szenario ein erhöhter Primärenergiebedarf auf.

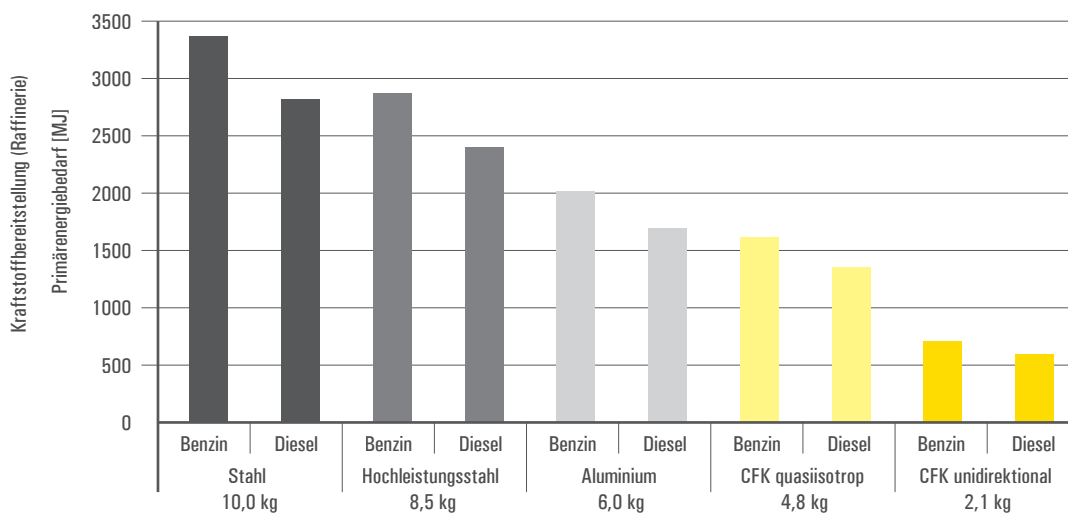


Abb. 37: Primärenergiebedarf der Nutzungsphase der Bauteilvarianten (Fahrleistung: 250.000 km)<sup>63</sup>

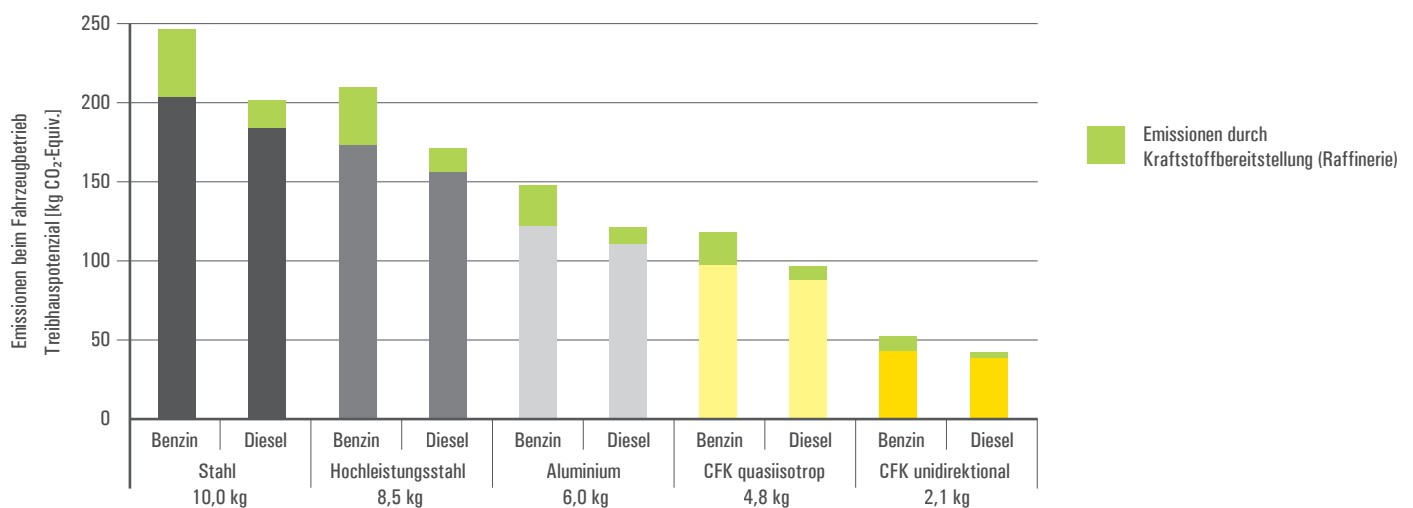


Abb. 38: Treibhauspotenzial der Nutzungsphase der Bauteilvarianten (Fahrleistung: 250.000 km)<sup>64</sup>

63 {Fraunhofer IBP, GaBi Datenbank}

64 {Fraunhofer IBP, GaBi Datenbank}

# Kapitel 3

## 3.4 ÖKOLOGISCHE AUSWIRKUNGEN DES END OF LIFE/ RECYCLING

An die Phasen Herstellung und Nutzung schließt sich das Lebensende (engl. End of Life, EoL) als letzte Phase im Lebenszyklus der Bauteilvarianten an. Für die Metallbauteilvarianten wird das Lebensende durch sogenannte Recycling-Potenziale beschrieben. Der Aufbau der Recycling-Potenziale wird in den Unterkapiteln zu Stahl und Aluminium ausführlich geschildert. Die angewandte Methodik zur Bildung von Recycling-Potenzialen wird anhand des stofflichen Recyclings von Stahl dargestellt. Für CFK wird eine thermische Verwertung angenommen. Die Verwertungsstrategien für CFK werden ebenfalls im dazugehörigen Unterkapitel beschrieben. Recycling-Potenziale weisen negative Werte auf, da durch stoffliches Recycling beispielsweise Primärmaterial zur Herstellung neuer Produkte eingespart werden kann. Bei der thermischen Verwertung kann durch die Verbrennung des anfallenden Produkts Energie gewonnen werden, die Energie aus anderen Ressourcen ersetzen kann. Die verschiedenen Recycling-Methoden führen durch die Einsparung von Ressourcen und Primärenergie zu einer Entlastung des Ökosystems, ausgedrückt durch den Primärenergiebedarf und das Treibhauspotenzial. Die folgenden Abbildungen zeigen den Primärenergiebedarf und die Treibhausgasemissionen der Bauteilvarianten auf. Bei negativen Werten wird eine sogenannte Gutschrift gegeben. Die Werte des Primärenergiebedarfs und der Treibhauspotenziale für beide CFK-Varianten werden jeweils in Bandbreiten dargestellt, da CFK in verschiedenen Qualitäten und damit mit verschiedenen Heizwerten vorliegen kann.

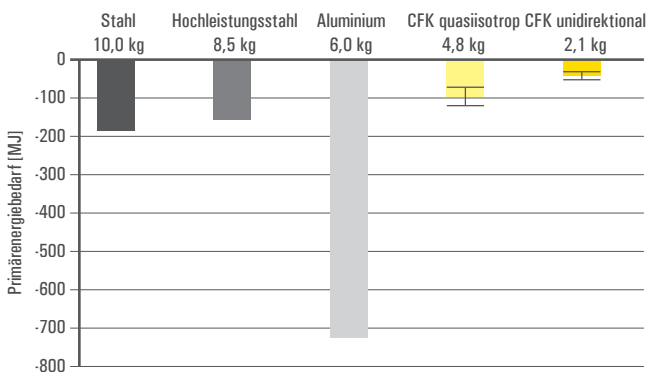


Abb. 39: Primärenergiebedarf des Lebensendes der Bauteilvarianten<sup>65</sup>

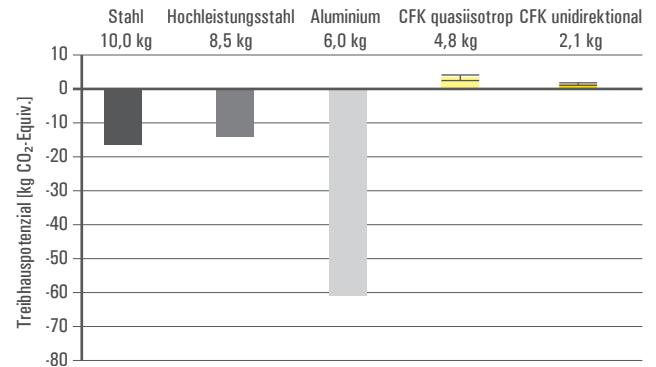


Abb. 40: Treibhauspotenzial des Lebensendes der Bauteilvarianten<sup>66</sup>

### STAHL

Stahl wird in großen Mengen benötigt – kann aber aufgrund seiner vielen, für das Recycling günstigen und positiven Eigenschaften zu einem großen Anteil wiederverwertet werden. Global betrachtet fielen im Jahr 2010 ungefähr 530 Mio. t Stahlschrott an. In Deutschland fallen ca. 19 Mio. t Schrottrezyklat an.<sup>67</sup> Deutsche Stahlprodukte bestehen zu erheblichem Anteil aus Recyclingmaterial, wobei hier auf die verschiedenen Stahltypen und -arten mit einhergehenden unterschiedlichen Recycling-Anteilen hingewiesen werden muss. Vom weltweit erzeugten Rohstahl werden bereits heute ca. 50% auf Schrottbasis erschmolzen.<sup>68</sup> Durch die Rezyklierung können das benötigte Ausgangsmaterial Eisenerz, Zuschlagstoffe, die Schlackebildner Kalziumkarbonat und -karbit, sowie für die Stahlherstellung benötigte Energieträger und Transportprozesse eingespart werden. Zudem reduzieren sich durch die Kreislaufführung des Stahls aus der Produktion resultierende Emissionen und Abfälle (Schlacke) sowie andere Auswirkungen auf die Umwelt.

Das Recycling-Potenzial beschreibt den ökologischen Wert des rezyklierten Materials in der Technosphäre, d. h. in der technisierten Welt des Menschen. Der ökologische Wert besteht in der Verringerung zukünftiger Umweltfolgen, da das rezyklierte Material im Gegensatz zu natürlichen Vorkommen des Materials nicht mehr aufkonzentriert werden muss. Diese Vermeidung einer material- und energieintensiven Neuproduktion von Stahl mit einhergehenden Umweltfolgen wird

65 {Fraunhofer IBP, GaBi Datenbank}  
 66 {Fraunhofer IBP, GaBi Datenbank}  
 67 {Albrecht 2007 #103}  
 68 {Henning 2011 #1}

durch das ermittelte Potenzial beschrieben. Daher weist es einen negativen Wert auf, der mit der sich anschließenden Stahlproduktion verrechnet werden kann.

Der dem Recycling-Potenzial zugrunde liegende Ökobilanz-Prozess berücksichtigt die länderspezifische Situation, d. h. Recyclingquoten, Recyclingverluste und heutige Recyclingtechnologien in Deutschland.

Das Recycling-Potenzial beschreibt die Einsparungen an Primärmaterial und damit verbundene Energie und Umweltlasten. Dadurch ergeben sich in den Abbildungen 39 und 40 Einsparungen für den Primärenergiebedarf und das Treibhauspotenzial.

Zitat Oliver Hoffmann [Leiter Anwendungstechnik, Thyssen Krupp Steel Europe AG]:

*„Ein ökologischer Aspekt des Werkstoffes Stahl, den ich hervorheben möchte, ist die uneingeschränkte Recyclingfähigkeit. Wir recyceln ohne Qualitätsverlust und das bei geringem Energieaufwand. Ein weiterer ökologischer Vorteil von Stahl gegenüber alternativen Leichtbauwerkstoffen liegt im geringen Energiebedarf und damit – je nach Strommix – und auch in einer geringeren CO<sub>2</sub>-Emission in der Herstellung. Zusätzlich erreichen wir ökologische Ziele durch das Leichtbaupotenzial, das nach wie vor in diesem Werkstoff steckt. Wir haben aktuell schon sehr hochwertige Stahlgüten im Portfolio. Diese werden noch nicht flächendeckend im Karosseriebau eingesetzt, hier bestehen noch weitreichende Möglichkeiten. Darüber hinaus entwickeln wir neue Stähle, welche noch höheres Leichtbaupotenzial besitzen. Für alle - auch für die neuen - Güten gilt: geringer Energieaufwand in der Herstellung und uneingeschränkte Recyclingfähigkeit.“*

## ALUMINIUM

Mengenmäßig ist die Erzeugung von reinem Aluminium und seinen Legierungen verglichen mit Stahl weitaus niedriger. Im Jahr 2004 wurden ca. 1,37 Mio. t Aluminium in Deutschland hergestellt – nahezu aus gleichen Anteilen primärem Hüttenaluminium (670.000 t) und Sekundäraluminium (700.000 t).<sup>69</sup> Aufgrund der zu Stahl vergleichsweise

hohen Energieintensität sind die Recycling-Quoten sehr hoch. Weltweit wird etwa ein Drittel des aktuellen Aluminiumbedarfs heute aus Sekundäraluminium gedeckt. Etwa drei Viertel des jemals produzierten Aluminiums ist heute noch in Gebrauch.<sup>70</sup>

Auch für Aluminium wird ein in GaBi modelliertes Recycling-Potenzial angewandt, das den ökologischen Wert des rezyklierten Materials in der Technosphäre beschreibt. Die Berechnung und Modellierung des Recycling-Potenzials für Aluminium beruht auf der gleichen methodischen Vorgehensweise wie beim oben erläuterten Recycling-Potenzial von Stahl.

Zitat Jörg H. Schäfer [GDA-Referent für Ökologie und Nachhaltigkeit, Gesamtverband der Aluminiumindustrie e.V., Düsseldorf]:

*„Aluminium ist komplett recyclefähig! Die aktuell geforderte Recyclingraten für Aluminium liegen bei 95% und hier hat die Industrie auch in den letzten Jahren bewiesen, dass sie versteht damit umzugehen. Wir haben momentan eher zu wenig Schrott und würden gerne mehr haben.“*

## CFK

Das Recycling von kohlenstoffaserverstärkten Kunststoffen steht momentan im Fokus der wissenschaftlichen Forschung und technologischer Untersuchungen (z.B. CFK Valley Stade Recycling GmbH & Co. KG), wird aber bisher noch nicht großindustriell angewandt. Es existieren verschiedene Recyclingstrategien und -möglichkeiten, allerdings befinden sich die meisten davon noch im Entwicklungsstadium. Die Entsorgungsarten und -wege gliedern sich folgendermaßen:<sup>71</sup>

- Werkstofflich (mechanisches Recycling, z.B. Shreddern)
- Rohstofflich (chemisches Recycling, z.B. Pyrolyse, Hydrierung, Hydrolyse)
- Thermisch (Energierückgewinnung über Heizwert)
- Deponie (Ablagerung).

69 {Albrecht 2007 #103}

70 {Henning 2011 #1}

71 {Flemming 1996 #101}



## Kapitel 3

Als momentaner Stand der Technik für großindustrielle Prozesse kann die thermische Verwertung von CFK angesehen werden.<sup>72</sup> Eine mögliche werkstoffliche Verwertung wird als Down-Cycling betrachtet. Das bedeutet, dass von einer Qualitätsminderung des Rezyklats gegenüber dem Ausgangsstoffverbund ausgegangen wird. Chemische Verfahren können (noch) nicht als gesicherte Verwertungsmöglichkeit angesehen werden, Pyrolyseverfahren gelten jedoch als erfolgsversprechend.<sup>73</sup>

Zitat Prof. Michael R. Buchmeiser (Leiter Institut für Polymerchemie (ipoc), Universität Stuttgart; Direktor Institut für Textilchemie und Chemiefasern Denkendorf (ITCF)):

*„Kohlenstofffasern erfüllen aus konstruktiver Sicht das Anforderungsprofil für einen Leichtbauwerkstoff ideal, da sie eine Kombination herausragender Eigenschaften besitzen: Sie besitzen eine sehr geringe Dichte und herausragende Festigkeitswerte. Dennoch stellt die Kohlenstofffaser hier nicht der Weisheit letzten Schluss dar, da sich auch einige Herausforderungen ergeben, wie etwa die schlechte Faser-Matrix Haftung in den Griff zu bekommen, hohen Taktzeiten in der Produktion zu verkürzen sowie die Fragestellung des Recyclings zu lösen.“*

Die Lagerung in einer Deponie wird im Rahmen der Betrachtungen für diese Studie als Möglichkeit des Lebensendes ausgeschlossen, da sowohl das Material als auch dessen Energie ungenutzt bliebe.

Die Modellierung des CFK-Recyclings beinhaltet die Verbrennung und thermische Energierückgewinnung über den Heizwert in einer Müllverbrennungsanlage mit Kraftwärmekopplung. Da hier eine Vielzahl an Stoffen verbrannt wird, kann keine gesicherte Zuordnung der entstehenden Emissionen erfolgen. Die Bestimmung der gewonnenen Energie basiert auf dem Heizwert von CFK, der in der Größenordnung von Braunkohle liegt.<sup>74</sup> Für den Heizwert wird folglich eine Bandbreite von 15 bis 25 MJ/kg CFK angegeben und ein Mittelwert von 20 MJ/kg CFK festgelegt. Diese Energie wird eingespart, da sie nicht durch eine andere Energieform bereitgestellt werden muss. Dies führt zu einer umweltlichen Entlastung und wird in der Ökobilanzierung, wie beim Stahl- und Aluminiumrecycling bereits beschrieben, als Gutschrift bezeichnet.

### 3.5 ÖKOLOGISCHE AUSWIRKUNGEN DES LEBENSZYKLUS

Durch Aufsummieren der einzelnen Lebenszyklusphasen ergeben sich die Lebenszyklusbeiträge der untersuchten Strukturbauteile für den gesamten Lebenszyklus. Die Ergebnisse der untersuchten Bauteilvarianten sind in Abbildung 41 und 42 für den Primärenergiebedarf und das Treibhauspotenzial dargestellt. Es werden die sehr unterschiedlichen Anteile der Lebenszyklusphasen an den Umweltbeiträgen der einzelnen Strukturbauteile deutlich.

Die Beiträge der konventionellen Stahlvariante werden aufgrund des höheren Bauteilgewichts und des damit verbundenen höheren bauteilspezifischen Kraftstoffverbrauchs von der Nutzungsphase dominiert. Die Beiträge der Bauteilherstellung spielen nur eine untergeordnete Rolle. Durch den Einsatz des Hochleistungsstahlbauteils und der damit einhergehenden Gewichtsreduzierung können die Beiträge der Nutzungsphase deutlich gesenkt werden. Die zusätzlichen Aufwendungen in der Bauteilherstellung sind dabei von nur geringer Bedeutung. Die aus dem Recycling resultierenden Gutschriften wirken sich kaum auf den gesamten Lebenszyklus des Stahlbauteils aus.

Bei der Aluminiumvariante des Strukturbauteils sind bereits deutliche Verlagerungen der Beiträge innerhalb der einzelnen Lebenszyklusphasen erkennbar. So können hier durch die Einsparungen im Bauteilgewicht gegenüber der Stahlvariante die Beiträge der Nutzungsphase gesenkt werden. Gleichzeitig ist eine Zunahme der Beiträge der Bauteilherstellung zu erkennen, d. h. die Relevanz der Bauteilherstellung nimmt zu. Über den gesamten Lebenszyklus liegen die Beiträge des Aluminiumbauteils in einer vergleichbaren Größenordnung zur Bauteilvariante Stahl. Werden die potenziellen Gutschriften für das Materialrecycling berücksichtigt, so kann der Einsatz der Aluminiumvariante unter den getroffenen Annahmen (vgl. Abbildung 20) zu einer Verringerung des Primärenergiebedarfs und der Treibhausgasemissionen des Bauteillebenszyklus führen.

Bei den CFK-Bauteilvarianten sind deutlich höhere Beiträge der Herstellungsphase erkennbar. Wie im Kapitel Herstellung der Leichtbauteilvarianten beschrieben, sind die Beiträge der CFK-Bauteilherstellung zudem aufgrund der noch schlechten Datenlage mit großen Bandbreiten behaftet. Gleichzeitig können aber durch den Einsatz von CFK die höchsten Gewichtseinsparungen erzielt werden. Diese wirken sich wiederum vorteilhaft auf den Kraftstoffverbrauch und dadurch auf die

72 {Flemming 1996 #101}

73 {Kümmeth 26.04.2011 #110}

74 {Flemming 1996 #101}

Beiträge der Nutzungsphase aus. So sind mit Hilfe der CFK-Bauteilvarianten die höchsten Einsparungen beim Kraftstoffverbrauch möglich. Weiterhin wird am Beispiel der CFK-Bauteile deutlich, dass nicht nur die Werkstoffauswahl, sondern auch die dem Einsatzort entsprechende verwendete Technologie (quasiisotrop bzw. unidirektional) und damit die Werkstoffausnutzung von hoher Bedeutung für die Umweltbilanz sein kann.

Wird ein Bauteil aus CFK hergestellt, dessen Anforderungen die Verwendung von unidirektional ausgelegtem CFK und damit einer optimalen Werkstoffausnutzung ermöglichen, können bei einer Fahrleistung von 150.000 km des untersuchten Fahrzeugs vergleichbare Ergebnisse zum Hochleistungsstahlbauteil erreicht werden.

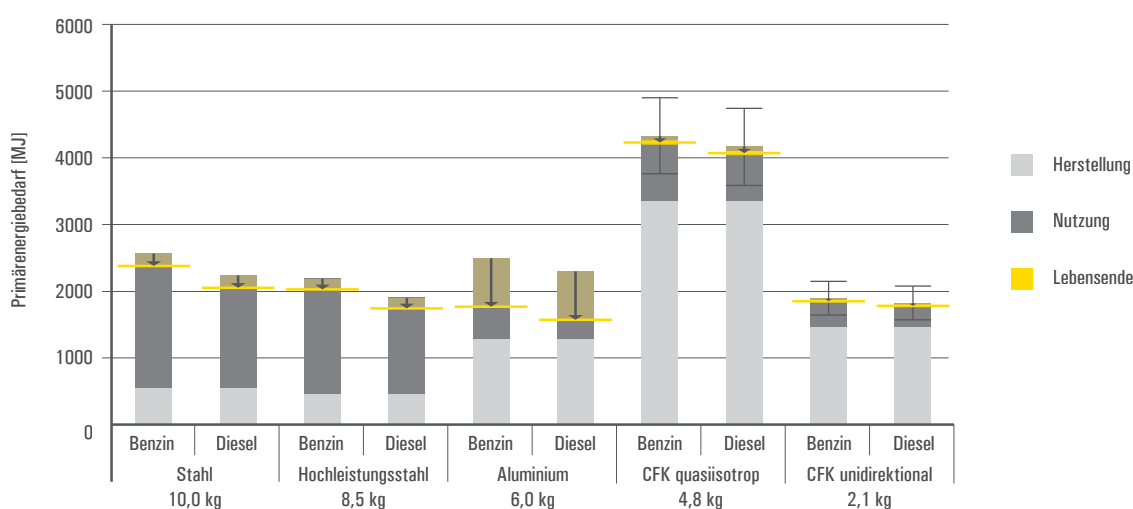


Abb. 41: Primärenergiebedarf des Lebenszyklus der Bauteilvarianten (Fahrleistung: 150.000 km)<sup>75</sup>

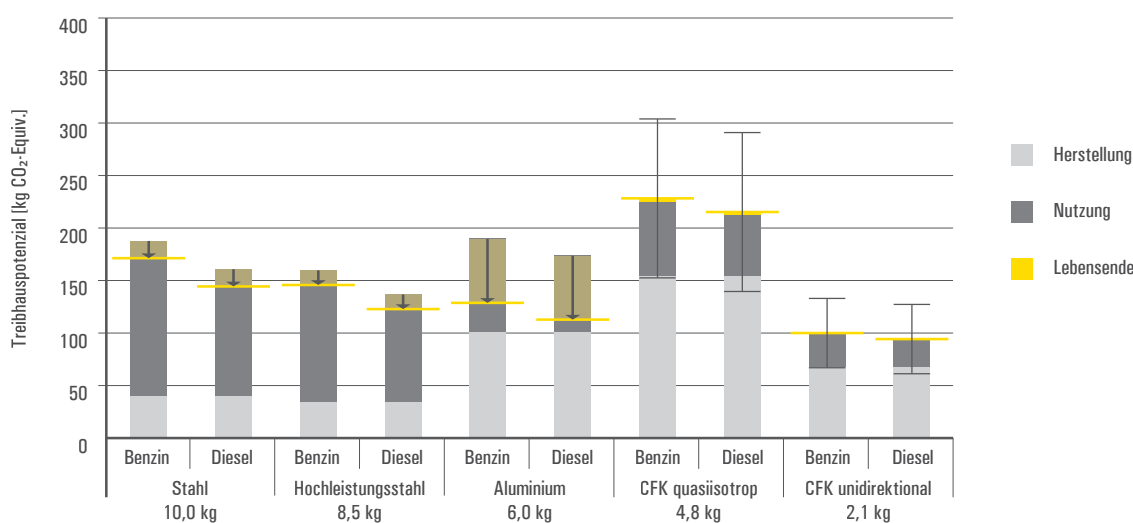


Abb. 42: Treibhauspotenzial des Lebenszyklus der Bauteilvarianten (Fahrleistung: 150.000 km)<sup>76</sup>

75 {Fraunhofer IBP, GaBi Datenbank}

76 {Fraunhofer IBP, GaBi Datenbank}

Da die Vorteile der CFK-Bauteile gegenüber den anderen untersuchten Varianten in der stärksten Gewichtsreduktion und der damit verbundenen Kraftstoffeinsparungen liegen, wird das Einsparpotenzial der CFK-Bauteile durch hohe Gesamtfahrleistungen weiter gesteigert (vgl. Abbildungen 43 und 44). Die Recycling-Potenziale stellen, wie im Kapitel Ökologische Auswirkungen des End of Life/ Recycling beschrieben, mögliche Gutschriften am Produktlebensende dar und sind daher getrennt zu den Umweltauswirkungen von Herstellung und Nutzung dargestellt (negative Beiträge bei einer Senkung der Umweltauswirkungen durch das Lebensende, positive Beiträge bei einer Erhöhung der Umweltauswirkungen durch das Lebensende).

Die vorgestellten Beispiele machen deutlich, dass die getroffenen Rahmenbedingungen der Untersuchung von entscheidender Bedeutung sind. Wird die Gesamtfahrleistung der Fahrzeuge erhöht und statt der vorherigen 150.000 km von einer Gesamtfahrleistung von 250.000 km ausgegangen, so nimmt die Relevanz der Nutzungsphase zu, wodurch sich die Aussagen der Umweltbilanz ändern können. In diesem Fall wäre der Einsatz des Aluminiumbauteils im Vergleich zum Stahlbauteil in beiden Fahrzeugtypen auch ohne die Verrechnung von Recyclinggutschriften vorteilhaft (vgl. Abbildung 43ff).

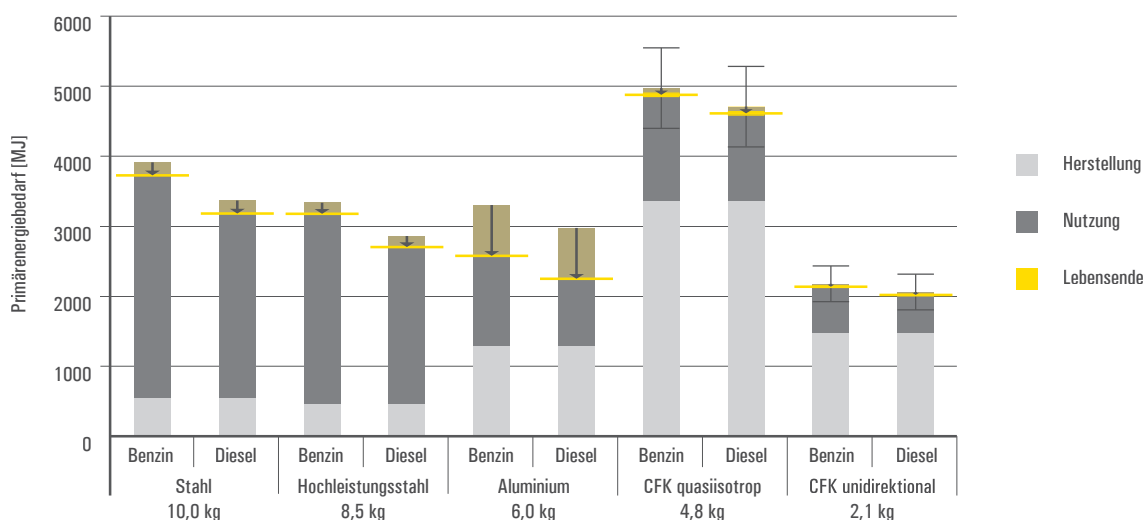


Abb. 43: Primärenergiebedarf des Lebenszyklus der Bauteilvarianten (Fahrleistung: 250.000 km)<sup>77</sup>

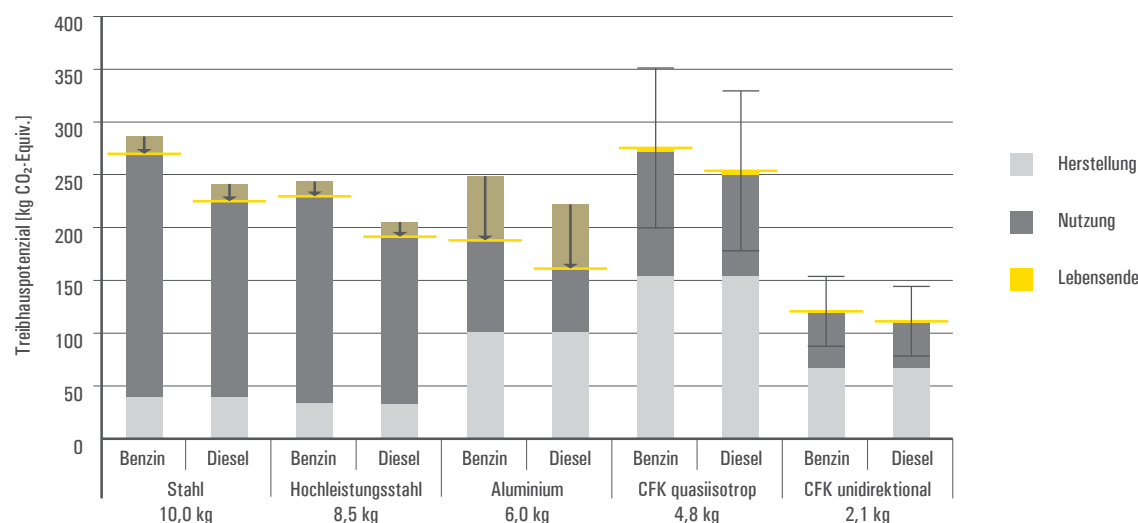


Abb. 44: Treibhauspotenzial des Lebenszyklus der Bauteilvarianten (Fahrleistung: 250.000 km)<sup>78</sup>

77 {Fraunhofer IBP, GaBi Datenbank}

78 {Fraunhofer IBP, GaBi Datenbank}

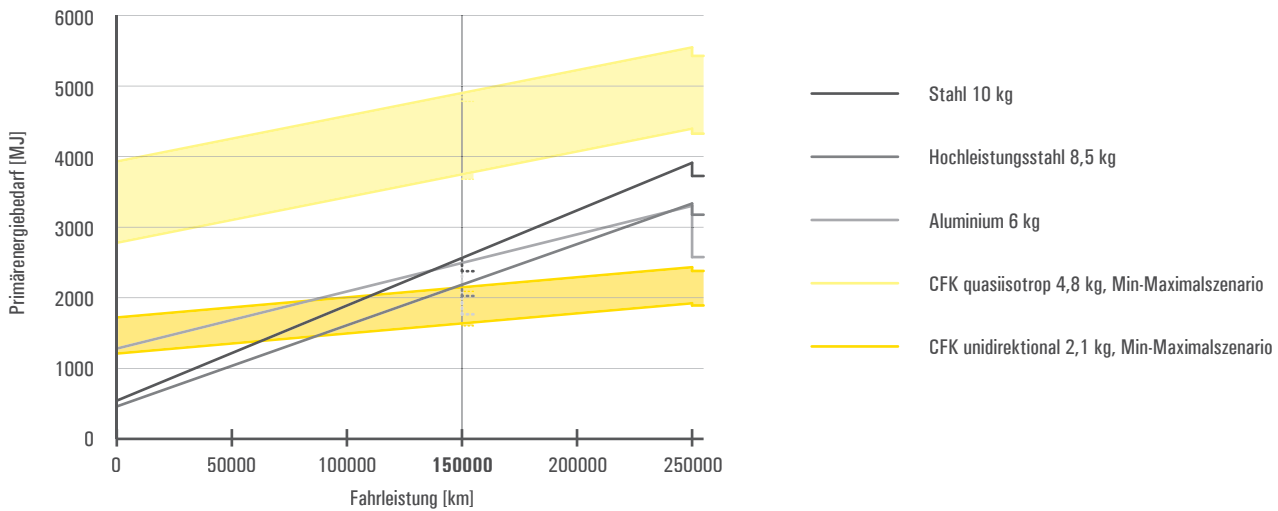


Abb. 45: Primärenergiebedarf des Lebenszyklus der Bauteilvarianten Stahl, Hochleistungsstahl, Aluminium, sowie CFK quasiisotrop und unidirektional (Fahrleistung: 250.000 km, benzinbetrieben)<sup>79</sup>

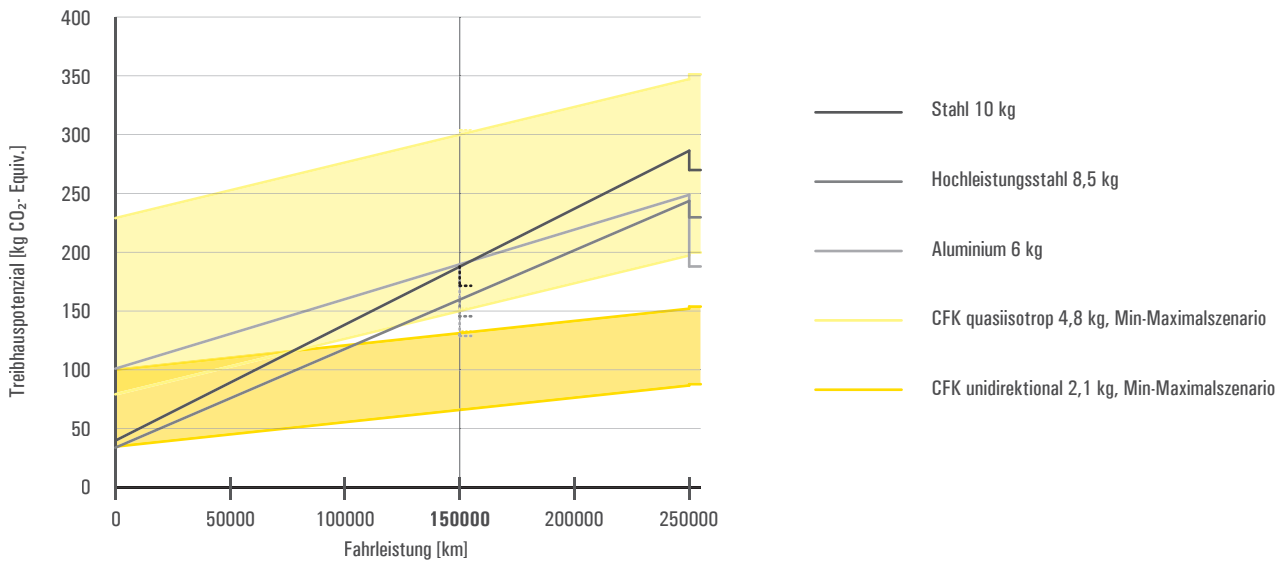


Abb. 46: Treibhauspotenzial des Lebenszyklus der Bauteilvarianten Stahl, Hochleistungsstahl und Aluminium, sowie CFK quasiisotrop und unidirektional (Fahrleistung: 250.000 km, benzinbetrieben)<sup>80</sup>

Neben Blockschaubildern, welche die Beiträge der Lebenszyklusphasen in aufsummierter Form wiedergeben, ist vor allem die Darstellung sogenannter Lebenszykluskurven für ökobilanzielle Abbildungen im Automobilbereich üblich. In dieser Studie werden die Lebenszykluskurven der Bauteilvarianten mit einer Nutzungsphase in einem benzinbetriebenen Fahrzeug dargestellt. Die Fahrleistung wird mit 250.000 km veranschlagt, die Steigung der Kurven ist aber identisch zum 150.000 km-Szenario, nur der absolute Beitrag der Nutzungsphase steigt durch die höhere Fahrleistung an.

Für den ökologischen Vergleich zweier Bauteilvarianten aus verschiedenen Materialien bietet sich die Analyse und Darstellung des „Break-Even-Point“ dieser Bauteilvarianten über die Laufleistung der Fahrzeuge an (vgl. Abbildungen 45 und 46). Der Break-Even-Point beschreibt in diesem Fall den Punkt (Kilometerstand), an dem sich die höheren Beiträge der Herstellung einer Bauteilvariante gegenüber der konventionellen Stahl-Variante amortisieren. Je früher dieser Punkt eintritt, desto sicherer sind die möglichen Einsparpotenziale der Variante einzuschätzen.

79 {Fraunhofer IBP, GaBi Datenbank}

80 {Fraunhofer IBP, GaBi Datenbank}

Aufgrund des Einsatzes unterschiedlicher Werkstoffe und Materialien sind bei dieser Darstellung ebenfalls alle Beiträge der Lebenszyklusphasen über den gesamten Lebenszyklus inklusive des Lebensendes zu berücksichtigen. Jedoch erleichtert die Darstellung des Break-Even-Point die Einschätzung, ob die erforderliche Fahrleistung unter realen Nutzungsbedingungen erreicht werden kann.

Im vorliegenden Beispiel ergibt sich für das Aluminiumbauteil nach ca. 137.000 km der Break-Even-Point zum konventionellen Stahlbauteil. Der Break-Even-Point zum Hochleistungsstahlbauteil wird erst nach ca. 240.000 km erreicht. Auch hier kann die Kreislaufschließung durch Recycling der betrachteten Werkstoffe einen zusätzlichen Mehrwert leisten.

Die Darstellung der CFK-Bauteilvarianten erfolgt über Bandbreiten. Die Bandbreiten ergeben sich durch die Abbildung eines Minimal- und eines Maximalszenarios, die aus der Faserherstellung und aus bauteilabhängigen Materialverlusten in der Produktion resultieren. Bei der Betrachtung des Primärenergiebedarfs fällt auf, dass die relative Bandbreite kleiner ist als bei der Darstellung des Treibhauspotenzials. Dieser Unterschied resultiert aus dem elektrischen Energiebedarf, der von der Faserherstellung verursacht wird. So unterscheidet sich der Primärenergiebedarf der Strombereitstellung zwischen Minimal- und Maximalszenario weniger stark, da der Primärenergiebedarf nichtregenerative als auch regenerative Primärenergie beinhaltet. Beispielsweise sinkt bei einem steigenden Anteil erneuerbarer Energien an der Strombereitstellung der Primärenergiebedarf weniger stark als das Treibhauspotenzial, da die nichtregenerative Primärenergie durch regenerative Primärenergie ersetzt wird. Daher ist die relative Bandbreite des Primärenergiebedarfs geringer als die des Treibhauspotenzials. Der Break-Even-Point hängt analog zur Bandbreitenbetrachtung ebenfalls von der betrachteten Umweltauswirkung (Primärenergiebedarf oder Treibhauspotenzial) ab.

Ergänzend zur eigenen Analyse werden an dieser Stelle die Kernergebnisse weiterer verfügbarer Leichtbaustudien vorgestellt. Diese wurden ebenfalls mit der GaBi-Software und -Datenbank erstellt. Die Datenbasis ist daher gut vergleichbar.

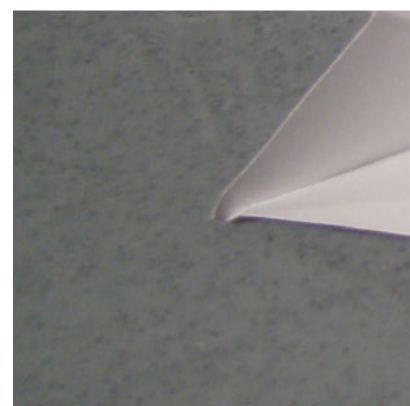
Eine aktuelle Betrachtung von Leichtbaukonzepten von Cockpitquerträgern erfolgt in dem von der Daimler AG veröffentlichten Umwelt-Zertifikat für die B-Klasse.<sup>81</sup> In dieser Untersuchung werden zwei alternative Leichtbaukonzepte mit der bisherigen konventionellen Variante verglichen. Die konventionelle Variante des Cockpitquerträgers besteht aus Stahl. Bei den beiden Leichtbaukonzepten handelt es sich um eine geschweißte Aluminiumvariante und eine Hybrid-Aluminiumhochdruck/Polymervariante. Für die Nutzungsphase wird eine Fahrleistung von 250.000 km angenommen. Die Hybrid-Aluminium/Polymervariante weist über den betrachteten Lebenszykluszeitraum der Herstellung und Nutzung ein um 10 % geringeres Treibhauspotenzial als die Stahlvariante des Cockpitquerträgers auf, die Aluminiumvariante besitzt ein nahezu identisches Treibhauspotenzial wie die Stahlvariante.

Ein weiteres Beispiel, welches die Bauteil- und Funktionsabhängigkeit der Umweltprofile von Leichtbau aufzeigt, findet sich im Umweltprofil der damaligen DaimlerChrysler AG von 2002.<sup>82</sup> Hier werden Ökobilanzen von zwei funktionsverschiedenen Bauteilen durchgeführt. So werden ein Kotflügel und ein Integralträger (ein Träger, der Motor und Karosserie verbindet) jeweils in einer Stahl- und Aluminiumvariante miteinander verglichen. Dargestellt ist hier der Primärenergieverbrauch der einzelnen Varianten. Betrachtungszeitraum ist wieder die Herstellungs- und Nutzungsphase. Die Aluminiumkotflügelvariante besitzt einen geringeren Energieverbrauch als die Kotflügelvariante aus Stahl. Betrachtet man hingegen den Primärenergiebedarf der Integralträgervarianten, so weist der Stahlintegralträger einen geringeren Primärenergieverbrauch als der Aluminiumintegralträger auf.

Es ist festzuhalten, dass keine generellen Aussagen zum Umweltprofil verschiedener Leichtbauvarianten möglich sind. Vielmehr besteht eine große Abhängigkeit von der Funktion, die das Bauteil ausführen soll und von der anvisierten Nutzungsdauer des Bauteils.

81 {Daimler AG #70}

82 {Daimler AG 2012 #71}



### 3.6 ZUSAMMENFASSUNG

Eine allgemeingültige Aussage über die Bevorzugung eines Leichtbaumaterials kann nicht getroffen werden. Der ökologisch sinnvolle Einsatz von Leichtbauwerkstoffen im Fahrzeug hängt immer stark von den Rahmenbedingungen, z.B. Einsatzgebiet, Fahrzeugklasse, Kraftstoffverbrauch oder Fahrzeugfahrleistung ab. Da alle Werkstoffe Vor- und Nachteile haben, können konkrete Aussagen nur fallspezifisch vorgenommen werden. Jedoch können durch die frühzeitige, entwicklungsbegleitende Analyse der verfügbaren Design-Optionen und Bauteilvarianten geeignete Lösungen ermittelt und somit der Mehrwert und das volle Potenzial der verschiedenen Leichtbautechnologien ausgeschöpft werden.

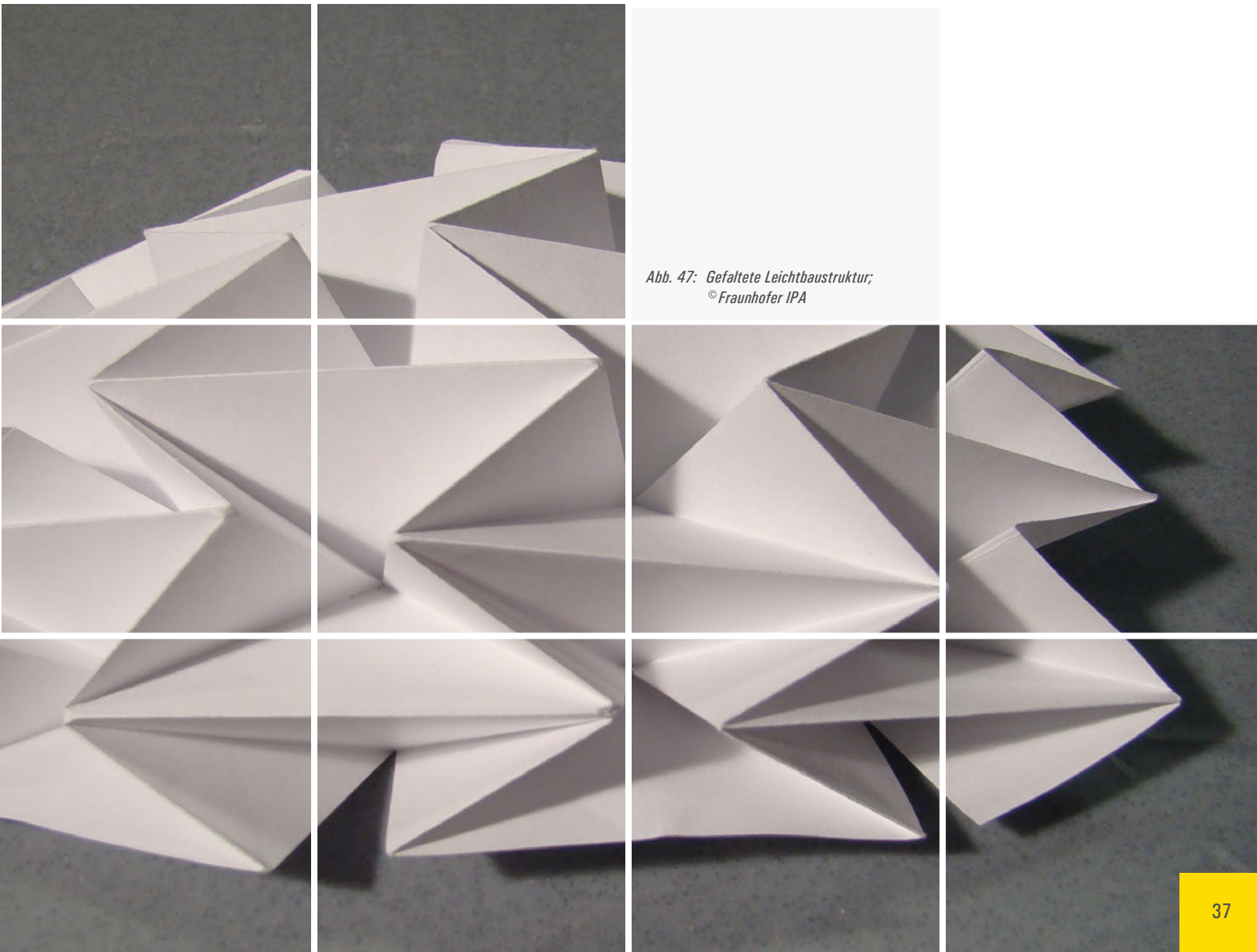


Abb. 47: Gefaltete Leichtbaustruktur;  
© Fraunhofer IPA

## Kapitel 4

# GESUNDHEITLICHE ASPEKTE

### 4.1 ÜBERBLICK ÜBER GESUNDHEITLICHE ASPEKTE AM ARBEITSPLATZ

Im Rahmen dieser Studie sollen auch die relevanten Gefährdungspotenziale am Arbeitsplatz beim Einsatz von Stahl, Aluminium und kohlenstoffaserverstärktem Kunststoff abgeschätzt werden.

Die potenzielle Gefährdung betrifft in erster Linie beruflich Beschäftigte, die bei der Herstellung der Bauteile mit den Ausgangskomponenten/Rohstoffen in Kontakt kommen oder bei der Bearbeitung der Bauteile Schweiß-, Schleif- und Polierarbeiten durchführen.

Der Verbraucher hat in der Regel nur mit dem Endprodukt Kontakt, das keine Schadstoffe emittiert. Ausnahme bilden Heimwerkertätigkeiten wie Reparaturen, bei denen die gleichen Vorsichtsmaßnahmen wie bei der Produktion zu beachten sind. Im Folgenden soll nur die berufliche Exposition als relevant angesehen und unter den Bedingungen am Arbeitsplatz betrachtet werden.

Welche Gefahren können bei der Bearbeitung der drei genannten Leichtbaumaterialien auftreten?

1. Beim Stahl und Aluminium ist dies eine mögliche inhalative Wirkung über Staubaerosole (teilweise inhalierbar), die bei der Verarbeitung (Schweißen, Schleifen, Polieren) dieser Metalle entstehen.

2. Bei CFK kann eine inhalative Exposition durch Kohlenstoffasern auftreten. Diese werden heute im technischen Prozess jedoch meist mit Faserdurchmessern hergestellt (5-10  $\mu\text{m}$ ), die eine Inhalation in die tiefe Lunge ausschließen. Es besteht daher nur die Depositionsmöglichkeit in den oberen Atemwegen. Als zweite Komponente können Atmosphären mit flüchtigen Substanzen (z.B. Aceton, Styrol) bei der Herstellung des Faserverbundbauteils entstehen, wie diese auch aus der Kunststoffindustrie bekannt und handhabbar sind.

Die Gefährdungsabschätzung bei der Entstehung von Stäuben innerhalb einer Produktionsschiene muss drei mögliche Expositionspfade betrachten, den dermalen, den oralen und den inhalativen Pfad.

Eine dermale Aufnahme von Partikeln ist bei Einhaltung der am Arbeitsplatz vorgesehenen Schutzmaßnahmen vernachlässigbar. Bei einer Kontamination der Haut mit Partikeln ist eine relevante Penetration durch die Haut nicht zu erwarten.<sup>83</sup> Dies wurde experimentell auch für die sehr kleinen Nanopartikeln bestätigt.

Eine orale Aufnahme von Partikeln ist bei Einhaltung der am Arbeitsplatz vorgesehenen generellen Schutzmaßnahmen (TRGS 500; BAuA 2008) vernachlässigbar. Aufgenommene schwerlösliche Partikel werden nicht oder in vernachlässigbarer Menge durch die Darmwand aufgenommen und innerhalb von wenigen Tagen vollständig ausgeschieden.

Die inhalative Aufnahme ist bei potenziell Aerosole bildenden Substanzen der relevanteste Pfad und wird bei Arbeitsplatzszenarien am intensivsten untersucht. Dieses Kapitel bezieht sich daher hauptsächlich auf die Inhalation.

Definition eines Staubaerosols:

1. Als Staub werden feinkörnige bzw. feinfaserige Teilchen einer festen Substanz bezeichnet, die abgelagert sind oder sich in einem Gas oder einer Flüssigkeit im Schwebezustand befinden.
2. Für arbeitsmedizinische Belange ist der im Trägergas Luft dispergierte Staub von Bedeutung (Staubaerosol).

Staub ist auch in der natürlichen Umwelt vorhanden. Der weitaus größere Teil entsteht jedoch durch künstliche Quellen wie Feuerstätten und Industrieanlagen, vorwiegend beim Zerkleinern, Mahlen und Umfüllen in Stoffumwandlungsprozessen. Viele industrielle Zwischen- und Endprodukte sind staubförmiger Natur und können bei ihrer Verwendung in die Luft dispergiert werden. Trotz großer Erfolge in der Staubbekämpfung ist die Exposition auch gegenüber relativ nicht-toxischen Stäuben von volkswirtschaftlicher Bedeutung. Bei Staubkonzentrationen, welche die physiologischen Reinigungsprozesse im Atemtrakt überlasten, können durch den reinen „Partikeleffekt“, d. h. ohne dass eine besondere chemisch oder molekular bedingte Toxizität hinzukommt, starke gesundheitliche Beeinträchtigungen entstehen (historische Beispiele dafür gibt es im Bergbau, im Hüttenwesen, in Gießereien, in der Bau-, Baustoff- und chemischen Industrie).<sup>84</sup>

83 {Menzel 2004 #112}

84 {Universität Rostock - Institut für Arbeitsmedizin 1998 #102}

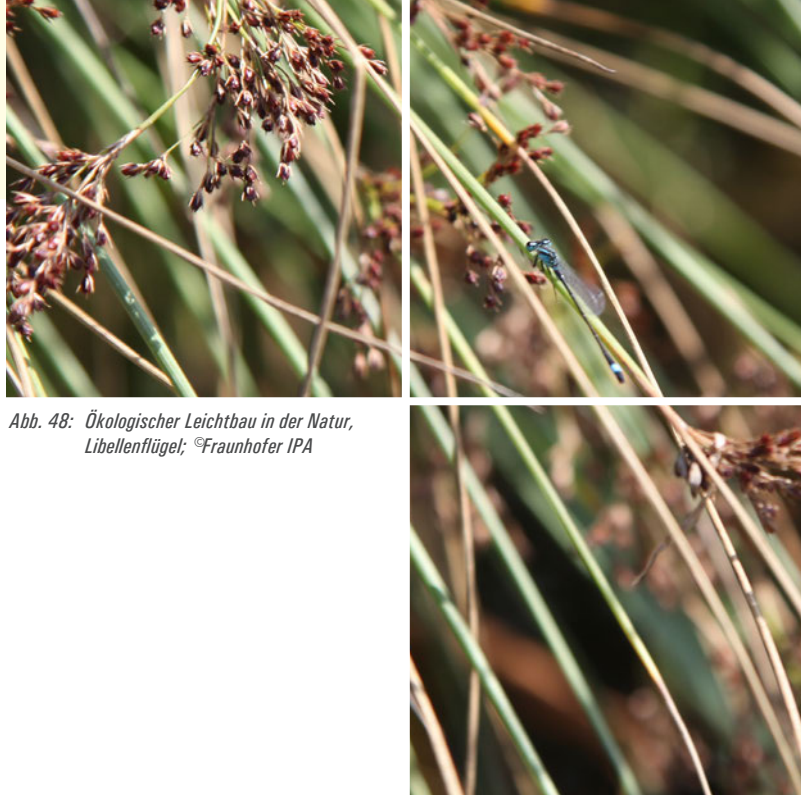


Abb. 48: Ökologischer Leichtbau in der Natur, Libellenflügel; ©Fraunhofer IPA

## RISIKOBEWERTUNG FÜR DIE INHALATIVE AUFNAHME

### Modellrechnungen

Die Abscheidung inhalierbarer Staubaerosole im Respirationstrakt am Arbeitsplatz wird durch die Aerosolkonzentrationen und den mittleren Massenmedian des aerodynamischen Durchmessers (MMAD) bestimmt. Da die Deposition von Partikeln abhängig vom MMAD in der Nase (Sedimentation, Impaktion), dem tracheobronchialen Bereich (Impaktion) oder der tiefen Lunge (Diffusion) stattfindet, ist die Charakterisierung des MMAD maßgeblich, um die in den verschiedenen Bereichen retinierten Partikelmassen prädiktiv berechnen zu können. Für schwerlösliche Stäube, die keine stoffspezifische Toxizität zeigen (sogenannte Inertstäube), lassen sich bei bekannten Werten der Aerosolkonzentration und des MMAD (vom Menschen inhalierbares Aerosol:  $MMAD < 4 \mu m$ ) die Lungenbelastungen berechnen, die sich nach gegebenen Expositionszeiten in der Lunge ergeben. Es handelt sich dabei um die in der Lunge retinierten Partikelmassen; diese erhält man aus der über die Expositionsdauer mit einer Depositionsrate von ca. 5% deponierten Masse, von der der Clearanceanteil subtrahiert wird (Clearance = physiologische Selbstreinigung der Lunge mittels effektiver Fresszellen, der alveolären Makrophagen).

Falls die retinierten Partikelmassen so klein bleiben (Rattenmodell:  $< 0,7 \text{ mg/Lunge}$ ; Humanmodell: ca.  $0,7 \text{ g/Lunge}$ ), dass sie durch die physiologische Clearancekapazität beherrschbar sind, werden keine persistierenden Lungenschädigungen beobachtet. Im Gegensatz dazu kann ein Überladungseffekt ("overload") der Makrophagen-vermittelten Lungenclearance mittel- bis langfristig zu Lungenschädigungen führen. Überladung beginnt bei der Ratte bei ca.  $1 \text{ mg/g Lunge}$  bzw.  $1 \mu\text{g/g Lunge}$  (bei angenommener spez. Dichte=1).<sup>85</sup> Die Volumenangabe ist präziser, weil die Makrophagenüberlastung mechanistisch am besten durch das zu bewältigende Partikelvolumen beschrieben wird.

## GLOSSAR ZU FACHBEGRIFFEN

|                   |   |
|-------------------|---|
| Aerodynamisch     | Auf das Bewegungsverhalten in Luft bezogen  |
| Aerosol           | Im Medium Luft feinverteilter Staub   |
| Aerosolkonzentr.  | Menge Staub pro Volumen; Angabe in $\text{mg}/\text{m}^3$   |
| Clearance         | Reinigung   |
| Deposition        | Abscheidung   |
| Depositionsrate   | Abscheidungsrate: 5% Dep.-Rate z.B. bedeutet, dass 95% des eingeatmeten Aerosols wieder ausgeatmet wird, 5% verbleiben in der Lunge; vgl. Raucher |
| Dispersion        | Verteilung, Zerstäubung   |
| Diffusion         | Ausbreitung durch Gaskräfte   |
| Exposition        | Belastung des Atemtrakts durch Aussetzen ggü. einem Aerosol   |
| Granulär          | Ungleichmäßig kugelförmig geformt   |
| Impaktion         | Abscheidung aufgrund von Trägheitskräften   |
| Inhalierbar       | Die tiefe Lunge (Lungenbläschen) erreichend   |
| Massenmedian      | Mittlerer Partikeldurchmesser einer Durchmesserverteilung, bezogen auf die Masse der Partikel   |
| Respirationstrakt | Atmungsapparat (Nase, Kehlkopf, Luftröhre, Lunge → Bronchien, Lungenbläschen)   |
| Retention         | Verbleiben von Partikeln in der Lunge (abgeschiedener Anteil minus Clearance-Anteil)  |
| Retinieren        | Zurückbleiben (siehe Retention)   |

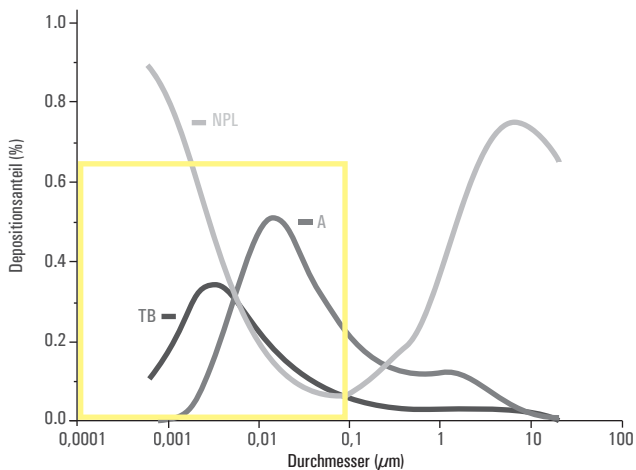


## Kapitel 4

In folgenden Schritten kann eine Risikobewertung für Stäube am Arbeitsplatz vorgenommen werden:

- Bestimmung der Aerosolkonzentration am Arbeitsplatz
- Bestimmung der Partikelgrößenverteilung mit einem Kaskadenimpaktor zur Ermittlung des MMAD
- Bestimmung der Depositionsrate nach inhalativer Aufnahme, z.B. mit Hilfe des MPPD model v 2.11<sup>86</sup>
- Bestimmung von Mittelwerten der Arbeitsschichtkonzentrationen an verschiedenen Arbeitsplätzen; Bestimmung der Jahresmittelwerte dieser Arbeitsplatzkonzentrationen
- Abgleich mit Maximalwerten aus Modellen, die keine gesundheitlichen Schäden zur Folge haben.

Die aktuellen Massenmediane des aerodynamischen Durchmessers (MMAD) sind abhängig von der jeweils vorliegenden Expositionssituation und können daher nicht generell für eine Partikelprobe angegeben werden. Bei Inhalationsexperimenten hängen die MMAD stark von den verwendeten Techniken der Aerosolgeneration und deren Dispersions-effizienz ab. Für Arbeitsplatzszenarien bedeutet das entsprechend, dass jeweils Impaktormessungen zur Ermittlung des aktuellen MMAD nötig sind, um realistische Depositionsraten verwenden zu können.



A = Alveolar- oder Lungenbläschenbereich; TB = Tracheobronchial- oder Luftröhren-/Bronchienbereich; NPL = Nasen-/Rachen-/Kehlkopfbereich

Abb. 49: Depositionsraten von Partikeln im humanen Respirationstrakt<sup>87</sup>

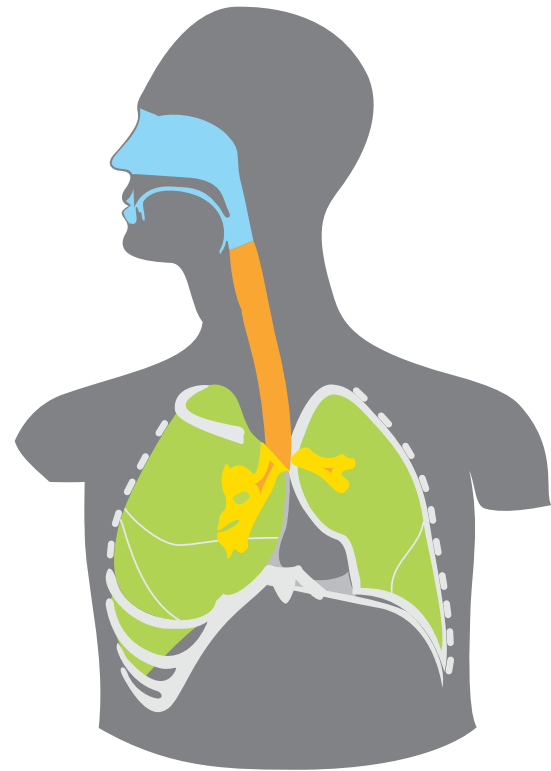


Abb. 50: menschliche Atemwege<sup>88</sup>

### PARTIKELSTÄUBE

Partikelstäube treten am Arbeitsplatz

- bei der Verwendung von Partikelpulver-Bulkmaterialien in der Produktion oder
- bei der mechanischen Bearbeitung (z.B. Schneiden, Schleifen, Schweißen) von Bauteilen auf. So ist beispielsweise bei der spanenden Bearbeitung von Kohlenstofffaserverbund-Werkstoffen die Freisetzung von Trockenstäuben zu beachten. Beim Schweißen von Metallen treten ebenfalls, oftmals, sehr feine, nanoskalige Schweißstäube auf.

86 {Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieuhygiene (Netherlands) #119}

87 {Human respiratory tract model 1994 #118}

88 {Human respiratory tract model 1994 #118}

In den Technischen Regeln für Gefahrstoffe (TRGS 900) sind vom Bundesministerium für Arbeit Allgemeine Staubgrenzwerte festgelegt worden:

- A-Staub mit Partikelgrößen  $< 10 \mu\text{m}$  für alveolengängige, d. h. bis in die Lungenbläschen gelangende Partikelstäube; Grenzwert: **3 mg/m<sup>3</sup>**
- E-Staub mit Partikelgrößen  $> 10 \mu\text{m}$ , für einatembare Partikelstäube; Grenzwert: **10 mg/m<sup>3</sup>**

Entsprechende Werte mit Empfehlungscharakter wurden auch von der Kommission zur Festsetzung maximaler Arbeitsplatzkonzentrationen (MAK-Kommission) festgelegt.

- A-Staub mit Partikelgrößen  $< 10 \mu\text{m}$  für alveolengängige, d. h. bis in die Lungenbläschen gelangende Partikelstäube; Grenzwert: **1.5 mg/m<sup>3</sup>**
- E-Staub mit Partikelgrößen  $> 10 \mu\text{m}$ , für einatembare Partikelstäube; Grenzwert: **4 mg/m<sup>3</sup>**

## FASERSTÄUBE

Eine Belastung durch Partikelstäube ist grundsätzlich von der Belastung durch Faserstäube zu unterscheiden. Fasern zeigen eigenständige Toxizitätsmechanismen, dabei ist neben der Biopersistenz vor allem die Länge, Dicke und die Rigidität (Starrheit) der freigesetzten Fasern von Bedeutung. Nach den Kriterien der Weltgesundheitsorganisation sind insbesondere Fasern mit Längen über  $10 \mu\text{m}$ , Durchmessern kleiner  $3 \mu\text{m}$  und Länge-Durchmesser-Verhältnissen größer als 3:1 (WHO-Fasern) aufgrund ihrer mechanischen Einwirkungen auf das Lungengewebe als kritisch zu bewerten, wie dies auch für das allgemein bekannte Asbest zutrifft.<sup>89</sup>

Derzeit gibt es keine gesicherten Erkenntnisse für krebserzeugende Eigenschaften von Kohlenstofffasern die im technischen Prozess meist mit Faserdurchmessern von  $5\text{-}10 \mu\text{m}$  hergestellt werden. Beim Umgang mit diesen bisher nicht krebverdächtigen Fasermaterialien sind daher zunächst die Mindeststandards der Arbeitshygiene der TRGS 500 zu beachten.<sup>90</sup>

## AUSZUG AUS DER CHECKLISTE ZUR TRGS 500

- *Staubende Arbeitsstoffe werden in geschlossenen Behältern (Silos, Bunkern, Transportbehältern, Säcken usw.) aufbewahrt und gelagert.*
- *Schüttware und offene Container werden abgedeckt.*
- *Ablagerungsmöglichkeiten für Staub werden durch bauliche Maßnahmen soweit wie möglich reduziert (z.B. Träger abgeschragt, keine textilen Oberflächen, Nischen verkleidet).*
- *Die Höhe von Abwurf-, Füll- und Schüttstellen wird so weit wie möglich verringert und wenn nötig, mit flexiblen, staubdichten Umhüllungen versehen.*
- *Freisetzung von Stäuben wird durch sachgerechte Arbeitstechniken vermieden.*
- *Staubablagerungen werden verhindert bzw. regelmäßig entfernt.*
- *Ausreichende Lüftung und geeignete Luftführung wird gewährleistet.*
- *Bei Reinigungsarbeiten wird Staub nicht unnötig aufgewirbelt. Das heißt z.B. es wird nicht mit Druckluft abgeblasen, sondern mit geeigneten Staubsaugern gesaugt oder feucht gewischt.*
- *Schneidwerkzeuge werden gewartet und wenn nötig, geschärft.*
- *Bei Tätigkeiten mit Staubentwicklung im Freien arbeiten die Arbeitnehmer mit dem Rücken zum Wind.*
- *Entleerte Säcke werden im Wirkungsbereich einer Staubabsaugung zusammengelegt, gebündelt und gepresst.*
- *Arbeitskleidung wird von Straßenkleidung getrennt aufbewahrt und nicht ausgeschüttelt oder abgeblasen, sondern gewaschen.*
- *Schutzbrille und ggf. geeignete Atemschutzmaske werden bei kurzzeitiger starker Staubentwicklung oder bei Überkopfarbeiten zur Verfügung gestellt und getragen. Bei der Auswahl kann das Sicherheitsdatenblatt bzw. Auskunft des Lieferanten helfen.*
- *Die Pausenverpflegung wird außerhalb des Arbeitsbereiches aufbewahrt. Es wird nicht im Arbeitsbereich gegessen, getrunken, geraucht oder geschnupft. Hierfür werden Pausen- oder Bereitschaftsräume aufgesucht.*
- *Es gibt eine Waschelegenheit mit sauberen Handtüchern.*
- *Hautschutz-, Hautreinigungs- und Hautpflegemittel und eine verständliche Gebrauchsanleitung liegen an der Waschelegenheit aus.*

89 {LUBW Landesanstalt für Umwelt 08/2010 #114}

90 {Ausschuss für Gefahrstoffe 2009 #104}

## Kapitel 4

### NEUERE ENTWICKLUNGEN

Schwerlösliche Stäube führen bei Überladung der Lunge zu einer Beeinträchtigung der Selbstreinigungsfähigkeit. Unter Berücksichtigung weiterer (Rand-)Bedingungen wird abgeleitet, dass ein Staub der Dichte  $1 \text{ g/cm}^3$  bei chronischer Exposition am Arbeitsplatz zu einer Überschreitung der kritischen Makrophagen-Belastung durch partikuläre Fremdkörper beim Menschen führt, wenn die Luftkonzentration größer als  $0,8 \text{ mg/m}^3$  ist.

Zurzeit wird in deutschen wissenschaftlichen Kreisen die Frage der krebserzeugenden Wirkung granulärer biobeständiger Stäube ohne bekannte spezifische Toxizität (GBS) intensiv diskutiert. Diese Stäube beinhalten auch Schweiß- und Schleifstäube, wie sie auch bei der Bearbeitung von Leichtbaukomponenten auftreten können. Die Diskussion könnte in eine drastische Absenkung des Allgemeinen Staubgrenzwertes von derzeit  $3 \text{ mg/m}^3$  für die alveolengängige Fraktion münden. Im Juli 2011 hat die Senatskommission zur Prüfung gesundheitsschädlicher Arbeitsstoffe der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die alveolengängige Staubfraktion des Allgemeinen Staubgrenzwertes einen abgesenkten Wert von  $0,3 \text{ mg/m}^3$  für eine Dichte von  $1 \text{ kg/m}^3$  vorgeschlagen. Er soll geeignet sein, einer kanzerogenen Wirkung durch hohe Konzentrationen dieser Stäube vorzubeugen. Auswirkungen hätte eine solche Neufestsetzung auch auf die bei der Ver-/Bearbeitung von Leichtbaukomponenten entstehenden Schweiß- und Schleifstäube. Alle diese Stäube gehören in die Klasse der granulären oder auch isometrisch genannten Staubtypen „unregelmäßig rund“ geformten Feinstäube.<sup>91</sup>

### EPIDEMIOLOGIE

Direkte Bewertungen der Auswirkungen von Staubexpositionen am Arbeitsplatz sind durch die Auswertung der Beobachtungen an Kollektiven möglich. Solche Daten sind jedoch in der Regel schwer verfügbar. Beispiele, in denen solche Expositions-Effekte-Daten über lange Zeiträume erhoben werden konnten, gibt es aus den Minenindustrien (Kohlebergbau, Erzabbau) sowie aus bestimmten Industrien, z.B. an Hartmetallarbeitsplätzen. Hier geht es im Wesentlichen um den Einsatz von Wolframcarbid und Kobalt und ein mögliches kanzerogenes Risiko. „Hartmetalle sind aufgrund ihrer besonderen Eigenschaften wie hohe

Härte und Verschleißfestigkeit ein wichtiger Verbundwerkstoff und werden heute vielseitig verwendet. Es gibt Hinweise auf eine Gesundheitsgefährdung durch Hartmetallaerosole für den Menschen“.<sup>92</sup>

Aus der Aluminiumherstellung ist die Aluminiumstaublunge als Berufserkrankung bekannt.<sup>93</sup> Ursache ist eine Exposition gegenüber Aluminiumpulver bei dessen Herstellung, beim Feinstampfen und Mischen oder durch Schmelzrauche von Bauxit bei der Aluminiumgewinnung und Korundherstellung. Die durch hochgradige Schrumpfungstendenz gekennzeichnete diffuse Lungenfibrose führt frühzeitig nach kurzer Expositions- und Entwicklungszeit zu schweren Beeinträchtigungen der Lungen- und Kreislauffunktion.<sup>94</sup>

Dieses Risiko ist im Stadium der Herstellung von Aluminium-Leichtmetallbauteilen nicht mehr gegeben. Hier gilt die im Folgenden dargestellte Risikobewertung für Inhalation von schwerlöslichen, relativ nicht-toxischen Feinstäuben.

Allerdings besteht bei den meisten epidemiologischen Studien die Gefahr einer die Bewertung störenden Kreuzexposition gegenüber anderen, oft unbekanntem Aerosolquellen.

### 4.2 ARBEITSPLATZBEURTEILUNG IN DER PRODUKTION

#### STAHL

Als nichttoxischer Stoff weist Stahl keine direkte Gefährdung auf. In der Produktion können durch unterschiedliche Weiterverarbeitungsverfahren allerdings partikuläre Fraktionen auftreten.

Die bei schweißtechnischen Arbeiten entstehenden partikelförmigen Emissionen Schweißrauche sowie Gase bestehen aus Gefahrstoffen mit teilweise unterschiedlichen gesundheitsschädlichen Wirkungen. Es sind Stoffgemische, deren chemische Zusammensetzungen und Konzentrationen von den eingesetzten Werkstoffen und den angewendeten Verfahren abhängig sind. Die Partikelgrößenverteilungen können im Bereich der alveolengängigen Staubfraktion (A-Staub) als auch der einatembaren Staubfraktion (E-Staub) liegen. Auch können ultrafeine Partikel, d. h. Nanopartikel mit Durchmessern  $< 100 \text{ nm}$  auftreten.

91 {Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA) 2011 #115}

92 {Bochmann 2008 #120}

93 {Ärztlicher Sachverständigenbeirat "Berufskrankheiten" 2009 #47}

94 {Universität Rostock - Institut für Arbeitsmedizin - 1998 #49}

Entsprechend ihrer Wirkungen werden diese eingeteilt in:

- atemweg- und lungenbelastende Stoffe:  
z.B. Eisenoxide, Aluminiumoxid
- toxische oder toxisch-irritative Stoffe:  
z.B. Fluoride, Manganoxid, Kupferoxid, Aldehyde (beim Löten mit kolophonium-haltigen Flussmitteln)
- krebserzeugende Stoffe: z.B. Chrom(VI)-Verbindungen, Nickeloxide.

Möhlmann berichtete über das Auftreten von Ultrafeinstäuben beim Elektrodenhandschweißen von hochlegierten Stählen, die ein gesundheitliches Risiko darstellen können.<sup>95</sup>

Die mechanische Behandlung von Stahloberflächen führt zur Partikelfreisetzung, deren Größe einen weiten Bereich (Ultrafeinstaub- bis Feinstaubgrößenbereich) umfasst. Diese Stäube bestehen im Wesentlichen aus dem behandelten Leichtbaumaterial, das in verschiedenem Grade mit den Schleifmaterialien (Korund, Carborund) kontaminiert sein kann. Generell handelt es sich um schwerlösliche Stäube, die nicht spezifisch toxisch, sondern generell als Partikel Toxizität induzieren können.

## ALUMINIUM

Aluminiumstäube treten beim Schleifen, Bürsten und Polieren von Aluminium oder Aluminiumlegierungen sowie beim Aluminiumschweißen auf.

In den „Richtlinien zur Vermeidung der Gefahren von Staubexplosionen beim Schleifen, Bürsten und Polieren von Aluminium und seinen Legierungen“,<sup>96</sup> wird als wesentliche Maßnahme zur Minderung gefährlicher Konzentration auf das Nassverfahren zur Überführung in ungefährliche Aluminiumschlämme hingewiesen.<sup>97</sup>

Beim Schweißen von Aluminium, beispielsweise mit dem Metall-Inertgas- oder dem Wolfram-Inertgas-Schweißen, sind die Beschäftigten einer nicht unerheblichen Menge aluminiumhaltiger Rauche ausgesetzt, die über die Atemwege in den Körper gelangen können. Aufgrund der unklaren Lage untersuchten Arbeitsmediziner der Universität Mainz, der Berufsgenossenschaft der Feinmechanik und Elektrotechnik sowie eines großen deutschen Automobilbauers Ausmaß und Wirkung der Schadstoffbelastung an Schweißarbeitsplätzen. Die Langzeitstudie

umfasst drei Querschnittstudien und wurde an zwei Gruppen (Schweißer- und Kontrollgruppe) durchgeführt. Das Kriterium für die Aufnahme in die Schweißergruppe war eine Mindestdauer des Al-Schweißens von zwei Jahren. Es erfolgten die Bewertung der Exposition, medizinische Untersuchungen sowie neurologische Testverfahren.

Bei den untersuchten Aluminiumschweißern zeigten sich zwischen den beiden Kollektiven ausgeprägte Unterschiede in der Aluminiumbelastung. Im Automobilbau ergaben sich deutlich geringere mediane Gesamtstaubbelastungen als im Bereich des Schienenfahrzeugbaus sowie des Spezialfahrzeugbaus. Vermehrte Grenzwertüberschreitungen waren insbesondere bei den Aluminiumschweißern aus dem Schienen- und Spezialfahrzeugbau zu beobachten. Die Ergebnisse des Ambient Monitoring spiegelten sich auch im Biomonitoring wider. Anamnesticke Hinweise auf manifeste aluminiuminduzierte Erkrankungen ergaben sich in den beiden Kollektiven nicht. Bei den Lungenfunktionsuntersuchungen ergaben sich keine eindeutigen Hinweise auf ein gehäuftes Auftreten restriktiver Ventilationsstörungen bei den Aluminiumschweißern. Bei synoptischer Bewertung sämtlicher anamnestischer Angaben und klinischer Untersuchungsbefunde über den gesamten Beobachtungszeitraum kann aus den Untersuchungsergebnissen keine neurotoxische Wirkung aluminiumhaltiger Schweißrauche für das untersuchte Kollektiv abgeleitet werden.

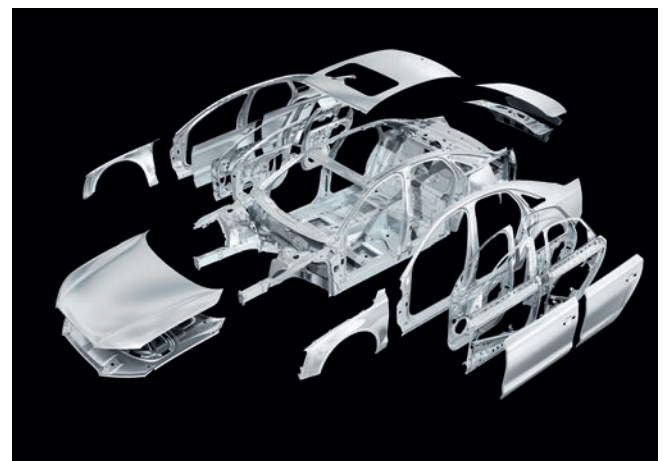


Abb. 51: AUDI A8 Aluminium Space-Frame Karosserie; ©AUDI AG

95 {Möhlmann 2005 #52}

96 {Fachausschuss „Eisen und Metall I“ der BGZ 1990 #53}

97 {Fachausschuss „Eisen und Metall I“ der BGZ 1990 #53}

## Kapitel 4

Unter Berücksichtigung der Ergebnisse des Forschungsprojektes sind die Atemwege als primäres Zielorgan aluminiumhaltiger Schweißrauche anzusehen. Bei Bewertung der hierzu vorliegenden Literatur und Projektergebnisse kann eine Neurotoxizität der aluminiumhaltigen Schweißrauche der jeweiligen Arbeitsplätze nicht belegt werden. Unter den Gesichtspunkten der Primärprävention ist eine Optimierung der Arbeitsplätze anzustreben. Neben geeigneten Absaugvorrichtungen ist insbesondere die Verwendung fremdbelüfteter Helme zu fordern. Auch bezüglich der UV-bedingten Beschwerden ist eine Expositionsminimierung anzustreben.<sup>98,99,100,101,102</sup>

In Ergänzung zu den obigen Ergebnissen aus Studien der Berufsgenossenschaft werden einige spezielle Aspekte zur Aluminium-Toxizität dargestellt, die nach Aluminium-Exposition beim Menschen Effekte auf das Nervensystem und die Gehirnfunktion beschreiben. Hiervon sind gesunde Personen bzw. nicht-beruflich Exponierte jedoch nicht betroffen, sondern nur spezielle Untergruppen:

- Personen mit chronisch verminderter Nierenfunktion (Beispiel: Dialysepatienten)
- Beruflich Exponierte, die über lange Zeit hohe Konzentrationen von Aluminium-Feinfraktionen einatmeten (Al-Pulver für Feuerwerk → Lungenfibrose)<sup>103</sup>

Aus metallischem, elementarem Aluminium kann durch Einwirkung nicht-oxydierender Säuren (z.B. Salzsäure des Magens) gelöstes Aluminium in Form von  $Al_3^+$ -Ionen entstehen. Die Resorption nach dermalen oder oraler Aufnahme in Form von  $Al_3^+$ -Ionen ist bei Mensch und Ratte eher gering (< 1 %) und wird durch Löslichkeit, pH-Wert und die jeweilige chemische Spezies bestimmt. Nach Aufnahme von Aluminium beim Menschen erfolgt die Exkretion im Wesentlichen über den Urin. Nach peroraler Applikation wurden nach 13 Tagen 83 % im Urin und nur 2 % im Kot nachgewiesen. Die Halbwertszeit lag bei 6 Monaten oder länger.<sup>104</sup> Die Verteilung von  $Al_3^+$ -Ionen erfolgt über das Blut und betrifft die Weichorgane und Knochen. Wegen der Tendenz zur Bildung schwerlöslicher Phosphate gilt Aluminium als sogenannter Knochensucher. Toxikologisch gelten Al-Serumwerte von 10  $\mu g/l$  als normal.

Werte > 60 mg/l werden als Indiz einer Al-Exposition betrachtet, bei > 200  $\mu g/l$  werden klinische Symptome wahrscheinlich. Insgesamt wird die akute Toxizität für Aluminium als gering eingeschätzt, ebenso das neurotoxische Potenzial für den Menschen. In früherer Zeit hat berufliche Exposition bei Auftreten hoher Al-Konzentrationen zu toxischen Effekten geführt: Fibrose.<sup>105</sup>

Nach Inhalation werden die höchsten Aluminiumwerte beim Menschen in der Lunge gefunden. Toxikologisch spielt die Aluminiumaufnahme nur in der Arbeitsmedizin eine Rolle. Hier kann Aluminium, z.B. in Form von Aluminiumoxidpartikeln, fibrotische Reaktionen auslösen, was nicht einen aluminiumtypischen Effekt, sondern einen partikeltypischen Effekt darstellt; evtl. spielt dabei eine Mischkontamination mit Silikaten eine Rolle (Shaversche Krankheit). Es gibt allerdings kaum Fallstudien, die über klinische Befunde nach beruflicher Exposition gegenüber Aluminiumstaub berichten. Ein Beispiel ist das Auftreten von pulmonärer Granulozytose nach Inhalation von Aluminiumstaub.<sup>106</sup>

### KOHLENSTOFFFASERVERSTÄRKTER KUNSTSTOFF

Beim kohlenstofffaserverstärkten Kunststoff müssen sowohl die Ausgangsstoffe Kohlenstofffaser und Epoxidharz betrachtet werden, als auch der Verbundwerkstoff. Zudem werden Hilfsstoffe in der Produktion eingesetzt, beispielsweise Lösemittel wie Aceton.

Nach Gefahrstoffverordnung - GefStoffV bzw. GHS-Verordnung ist die in Kohlenstofffasern enthaltene Kohlenstoffmodifikation Graphit nicht als gefährlicher Stoff einzustufen und daher auch nicht kennzeichnungspflichtig. Weitere Informationen sind auch in der Gestis-Stoffdatenbank zu finden.<sup>107</sup>

Da es sich bei den Epoxidharzen um reaktive Kunstharze handelt, die akute Hautreizungen und allergische Kontaktekzeme auslösen können, sind beim Umgang unbedingt ausreichende Schutzmaßnahmen (Schutzkleidung zur Vermeidung von Hautkontakt, gute Raumlüftung) zu beachten.<sup>108</sup>

98 {Kiesswetter 2007 #105}

99 {Rossbach 2006 #106}

100 {Spiegel-Ciobanu 2004 #107}

101 {Spiegel-Ciobanu 03/2005 #108}

102 {VMBG - Vereinigung der Metall-Berufsgenossenschaften 2004 #117}

103 {World Health Organisation 1997 #65}

104 {World Health Organisation 1997 #65}

105 {World Health Organisation 1997 #65}

106 {Chen 1978 #66}

107 {Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) 2012 #48}

108 {Ausschuss für Gefahrstoffe 02/2000 #124}



Abb. 52: BMW Werk Landshut, Vorbereitung eines CFK Bauteils für Wasserstrahlschneiden; © BMW AG

Bei der mechanischen Bearbeitung von CFK entstehen Partikel- und Faserstäube, die gefährdungsrelevante Eigenschaften haben. Außerdem müssen bei der Betrachtung des Gefährdungspotenzials auch die möglicherweise gefährlichen Eigenschaften der weiteren im Verbund vorkommenden Materialien (Trennmittel, Reinigungs- und Lösemittel) berücksichtigt werden. Obwohl es bisher keine gesicherten Erkenntnisse für krebserzeugende Eigenschaften von Kohlenstofffasern gibt, sollte sich der konkrete Umgang mit diesen Materialien an den Technischen Regeln für Gefahrstoffe (TRGS) orientieren.

Bei der spanenden Bearbeitung von Kohlenstofffaserverbundwerkstoffen ist die Freisetzung von Partikelstäuben zu beachten. In den technischen Regeln für Gefahrstoffe (TRGS 900) sind allgemeine Staubgrenzwerte für alveolengängige, d. h. bis in die Lungenbläschen gelangende Partikelstäube (A-Staub mit Partikelgrößen unter  $10 \mu\text{m}$ ) und für einatembare Partikelstäube (E-Staub mit Partikelgrößen über  $10 \mu\text{m}$ ) festgelegt. Damit soll diesen stofflich unspezifischen Wirkungen auf die Atmungsorgane, die alle unlöslichen Stäube zeigen können, vorgebeugt werden. Durch technischen Arbeitsschutz, z.B. durch Erfassung bzw. Absaugen der Stäube am Entstehungsort ist sicherzustellen, dass der Allgemeine Staubgrenzwert von  $3 \text{ mg/m}^3$  für alveolengängige Stäube (A-Stäube) nicht überschritten wird. Für einatembare Stäube (E-Stäube) ist ein Grenzwert von  $10 \text{ mg/m}^3$  einzuhalten.

Eine Belastung durch Faserstäube kann, wie oben für die Partikel beschrieben, durch mechanische Bearbeitung und bei der Herstellung der Faserverbundbauteile auftreten. Derzeit gibt es keine gesicherten Erkenntnisse für krebserzeugende Eigenschaften von Kohlenstofffasern. Beim Umgang mit diesen bisher nicht krebverdächtigen Fasermaterialien sind daher zunächst die Mindeststandards der Arbeitshygiene der TRGS 500<sup>109</sup> zu beachten. Das Gefährdungspotential anderer Verstärkungsfasern wird im Rahmen dieser Studie nicht näher beleuchtet.

Beim Umgang mit Partikel- und Faserstäuben steht aus Sicht des Arbeitsschutzes die Staubvermeidung bzw. die Staubreduzierung im Vordergrund. Im Betrieb sind grundsätzlich technische Lösungen (Einhausungen, Absaugungen) den organisatorischen und persönlichen Maßnahmen vorzuziehen. Die konkreten Maßnahmen sind vom Arbeitgeber im Rahmen der Gefährdungsbeurteilung zu ermitteln und festzulegen. Dabei soll er sich von der Fachkraft für Arbeitssicherheit und dem Betriebsarzt beraten und unterstützen lassen.

Bereits in den 80er Jahren des letzten Jahrhunderts wurde das toxische Potenzial von verschiedenen CFK-Partikelfractionen untersucht und ein Ranking zwischen Aluminiumoxid ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ - inert) und kristallinem Quarz (Positivkontrolle) in *in vitro* und *in vivo* Tests vorgenommen.

Generell war die beobachtete CFK-Toxizität geringer als die von Quarz, allerdings zeigten in einem Versuch vier von sechs CFK-Messreihen eine größere Toxizität als die Negativkontrolle  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .<sup>110</sup> Dabei handelte es sich um Kohlenstofffaser-Epoxid-Verbundwerkstoffe, von denen nach mechanischer Zerkleinerung respirable Fraktionen gesammelt und dann im intratrachealen Instillationstest bei der Ratte untersucht wurden. Die histopathologischen Befunde waren geringer als bei dem als Positivkontrolle mitgeführten Quarz (fibrogen; Herkunft nicht angegeben).

Kohlenstofffasern mit  $1-4 \mu\text{m}$ , d. h. respirablem Durchmesser wurden von Warheit et al. (1994) im Rattentest untersucht. Dies ist für einen adäquaten Ansatz im Inhalationstest notwendig, während die industriell hergestellten Kohlenstofffasern gezielt mit nicht-respirablen Durchmessern von  $5-10 \mu\text{m}$  produziert werden. Sie stellten dosisabhängige, nicht persistierende Effekte, wie den Einstrom von Entzündungszellen fest, die sich in der Erholungsphase nach Ende der Exposition wieder normalisierten. In der Wirkung wurden die Stärke von Quarz- oder Asbeststäuben nicht erreicht.

Bei einem Inhalationstest mit Ratten über 16 Wochen gegenüber Kohlenstofffasern ( $3,5 \mu\text{m}$  Durchmesser) wurden keine substanzbezogenen Effekte (z.B. Fibrose) beobachtet.<sup>111</sup> Am Arbeitsplatz zeigten Kohlenstofffasern keine offensichtlichen toxischen Wirkungen. Wegen nicht ausreichender Datenlage wurde aber für respirable Kohlenstofffasern ein Wert von 1 Faser/ml als Arbeitsplatzgrenzwert vorgeschlagen.<sup>112</sup>

109 {Ausschuss für Gefahrstoffe 2009 #104}  
 110 {Luchtel 1989 #67}  
 111 {Waritz 1998 #68}  
 112 {Ross #109}

## Kapitel 4

Bei der Gefährdungsabschätzung bei der CFK-Herstellung spielen auch weitere Komponenten, wie die Matrixmaterialien (z.B. Epoxidharze) und Hilfsstoffe, wie Lösungs- oder Trennmittel eine Rolle. Aufgrund der Vielzahl verschiedener Chemikalien, die in der Faserverbundfertigung eingesetzt werden, werden im Folgenden einige häufig verwendete Materialien beispielhaft betrachtet.

Epoxidharze stellen reaktive Kunstharze dar, die akute Hautreizungen und allergische Kontaktekzeme auslösen. Von den Berufsgenossenschaften wurden vor einigen Jahren die Arbeitskreise "Handschuhe für Beschichtungssysteme" und "Windkraft" initiiert, um diese Problematik im Umgang mit Epoxidharzen zu behandeln und Lösungswege aufzuzeigen. Laut Angaben der Berufsgenossenschaften gehören Epoxidharze mit zu den häufigsten Ursachen für Hauterkrankungen (Allergien), die bis zur Berufsunfähigkeit führen können.

Bei Arbeiten mit Epoxidharz-Produkten sind ein guter Hautschutz und eine gute Hautpflege (Hautschutzplan) unbedingt erforderlich. Hautpflegemittel tragen dazu bei, dass die Haut in einem guten Zustand bleibt und sich nach einer Hautbelastung schneller regeneriert. Auch das Tragen von Schutzkleidung, Schutzhandschuhen und ggf. Atemschutz ist unverzichtbar. Aufgrund der Gefahr von Spritzern ist eine Schutzbrille zu tragen. Bei größerer Spritzgefahr kann auch ein Gesichtsschutzschild notwendig sein.

Zusätzlich zur normalen Arbeitskleidung (lange Hose, langärmeliges Hemd oder T-Shirt) können je nach Tätigkeit Einweg-Overalls, Schürzen, Überzieher, Ärmelschoner o. ä. notwendig sein. Unbedeckte Hautstellen sind so weit wie möglich zu vermeiden, auch bei heißem Wetter. Kleidungsstücke, die mit Epoxidharz verunreinigt wurden, sind umgehend zu wechseln.

Beim Umgang mit lösemittelfreien Epoxidharz-Produkten müssen dicke Schutzhandschuhe aus Nitril oder Butylkautschuk getragen werden. Bei Verwendung von Lösemitteln oder lösemittelhaltigen Produkten sind auch auf die Lösemittel abgestimmte Handschuhe auszuwählen.

Beispielsweise wurden Handschuhe mit einer Vielzahl von Epoxidharzen in verschiedenen Mischungen getestet. Schwerpunkt bildeten Epoxidharzmischungen, die im Bereich Bauwirtschaft und Windkraft am häufigsten eingesetzt werden. Bei den Tests zeigte sich, dass einzig die Materialien Nitril und Butyl eine ausreichende Beständigkeit aufweisen. Naturlatex ist nicht in jedem Fall geeignet! Die Beständigkeit

ist abhängig von der Epoxidharz-Rezeptur. Außerdem wurde bestätigt, was andere Studien in der Vergangenheit immer wieder aufgezeigt haben: Nitril ist nicht gleich Nitril! Entscheidend sind Schichtstärke, Schichtaufbau und die Zusammensetzung der Nitril-Mischung.<sup>113</sup>

Ergänzend können relativ einfache Maßnahmen dazu beitragen, die Risiken eines Hautkontaktes zu vermeiden, wie beispielsweise das sauber halten von Griffen und Stielen von Werkzeugen oder das Reinigen des Arbeitsbereichs nach Beendigung der Arbeiten.<sup>114</sup>

Bei der Verarbeitung lösemittelbasierter Epoxidharze kann die Verwendung von Atemschutz notwendig sein. Dämpfe (z.B. flüchtige Härter) können Reizungen der Atemwege und der Augen hervorrufen. In einigen Fällen können die Atemwege von einer Allergie betroffen sein. Die Allergie kann sich durch asthmaähnliche Symptome äußern. Die Lösemittel in Epoxidharz-Produkten können durch Einatmen und/oder Hautkontakt ins Blut oder ins Gehirn gelangen. Dies kann zu Schwindelgefühl, Brechreiz und anderen gesundheitlichen Beeinträchtigungen führen.

Als leicht flüchtiges Lösungsmittel wird Aceton (das beispielsweise auch in Nagellackentfernern Verwendung findet) zu Reinigungszwecken verwendet. Aceton reizt die Augen und führt bei wiederholtem Kontakt zu spröder und rissiger Haut. Dämpfe können Schläfrigkeit und Benommenheit verursachen. Aceton kann im Extremfall zu Herzrhythmusstörungen mit Herz-Kreislauf-Versagen führen. Der Arbeitsplatzgrenzwert beträgt 1200 mg/m<sup>3</sup>. Da Acetondämpfe mit Luft ein explosionsfähiges Gemisch bilden können, dürfen dabei nur ex-geschützte Be-/ Entlüftungsgeräte verwendet werden. Auch hier sind das Tragen von Schutzkleidung, Schutzhandschuhen, Schutzbrillen und ggf. Atemschutz unbedingt erforderlich.

Grundsätzlich ist vor der Verwendung von Atemschutz zu prüfen, ob sich die Lösemittelbelastungen durch technische Maßnahmen (Lüftung, Absaugung) so weit reduzieren lassen, dass die Arbeitsplatzgrenzwerte eingehalten werden. Ist dies nicht möglich und muss Atemschutz getragen werden, sind Atemschutzgeräte mit Filtern gegen organische Gase und Dämpfe (A-Filter, Kennfarbe braun) zu verwenden. Empfehlenswert sind Gebläse unterstützte Atemschutzgeräte. Bei der Spritzapplikation werden feine Aerosole freigesetzt; es sind Kombinationsfilter vom Typ A2P2 oder umgebungsluftunabhängige Atemschutzgeräte (z.B. Schlauchgeräte) zu verwenden.

113 {BG Bau Berufsgenossenschaft der Bauwirtschaft 05/2010 #121}

114 {Holz-Berufsgenossenschaft #116}

Übliche Gefahrstoffkennzeichnung von Harzen und Härtern für Epoxidharze:



Abb. 53: Gefahrenklasse: Sensibilisierung der Haut, schwere Augenschädigung/  
Augenreizung<sup>115</sup>



Abb. 55: Gefahrenklasse: Entzündbare Flüssigkeiten, Entzündbare Feststoffe,  
Selbsterhitzungsfähige Stoffe und Gemische<sup>117</sup>



Abb. 54: Gefahrenklasse: Ätz- und Reizwirkung auf die Haut, Sensibilisierung der  
Haut, schwere Augenschädigung/Augenreizung<sup>116</sup>



Abb. 56: Gefahrenklasse: Langfristig gewässergefährdend<sup>118</sup>

115 {Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) #125}

116 {Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) #125}

117 {Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) #125}

118 {Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) #125}



## Kapitel 4

### HYGIENEMASSNAHMEN:

- *Berührung mit Augen, Haut und Kleidung vermeiden!*
- *Einatmen von Dämpfen vermeiden!*
- *Nach Arbeitsende und vor Pausen Hände und andere verschmutzte Körperstellen gründlich reinigen.*
- *Stoff-/Produktreste sofort von der Haut entfernen und die Haut möglichst schonend, beispielsweise mit einem sauberen Tuch oder einem Papierhandtuch und anschließend mit Wasser und milder Seife reinigen, anschließend sorgfältig abtrocknen.*
- *Hautpflegemittel nach der Hautreinigung verwenden (rückfettende Creme).*
- *Lösungen auf der Haut abwaschen, nicht eintrocknen lassen.*
- *Bei der Arbeit keinen Arm- oder Handschmuck tragen.*
- *Straßen- und Arbeitskleidung getrennt aufbewahren!*

### SCHUTZMASSNAHMEN BEI HOHEM EXPOSITIONSRISIKO GEGENÜBER KOHLENSTOFFFASERN

Die Abbildung 57 zeigt ein optimales Schutzregime, wie es bei experimentellen toxikologischen Arbeiten mit lungengängigen Kohlenstofffasern oder Kohlenstoffnanoröhren Standard ist. Entsprechender optimaler Schutz wird bei entsprechendem Expositionsrisiko gegenüber Carbonfaser-Aerosolen empfohlen. Bei der Herstellung der Verbundwerkstoffe werden regulär nicht-respirable Kohlenstofffasern mit Faserdurchmessern über  $5\mu\text{m}$  eingesetzt. Bei laufender Exposition ist die Kammer unter leichtem Unterdruck geschlossen, die Abluft wird effizient abgeführt. Der Mitarbeiter trägt einen Overall incl. Kapuze, Laborschuhe incl. Überschuhe, Handschuhe incl. Unterarmgamaschen sowie eine Staubmaske P3, hier bei der Wartung und beendeter Exposition. Bei nötiger technischer Arbeit in der laufenden Exposition wird Vollmaske mit Zufuhr gefilterter Luft getragen (Standard am Fraunhofer-Institut für Toxikologie und Experimentelle Medizin ITEM, Hannover).



Abb. 57: Sicherheitsmaßnahmen bei Expositionsgefahr gegenüber Carbonfaser- oder Kohlenstoffnanoröhren-Aerosolen; ©Fraunhofer ITEM

Das US-Arbeitsministerium hat in seinem Occupational Health & Safety (OHS)-Blatt Nr. 28 die empfohlenen Schutzmaßnahmen bei der Arbeit mit Kohlenstofffasern/CFK zusammengefasst und insbesondere folgende Regeln hervorgehoben:

- *Schädliche Effekte gehen aus von*
  - *der Reizwirkung von Kohlenstofffasern/Bruchstücken auf die Haut und Schleimhäute*
  - *den Lösungsmitteln, die bei der Herstellung von CFK benutzt werden (flüchtige, entflammbare, reizende LM) → Haut-, Augen- und Atemwegsreizung*
- *Schutz von Augen und Atemtrakt gegen Carbonfaser-Exposition<sup>19</sup>*

### 4.3 ZUSAMMENFASSUNG

Stahl und Aluminium sind toxikologisch keine kritischen Stoffe. Ihre Stäube sind eher in die Gruppe der „Inertstube“ einzugruppieren, für welche die Regeln für schwerlösliche Stäube anzuwenden sind (Gesamtstaubgrenzwerte: < 10 mg/m<sup>3</sup>; Feinstaubgrenzwert: < 6 mg/m<sup>3</sup>).

Bei CFK ergibt sich gegenüber Hochleistungsstahl und Aluminium eine komplexere Expositions Betrachtung, die jedoch beherrschbar ist.

Bei der Herstellung der Faserverbundwerkstoffe werden regulär nicht-respirable Kohlenstofffasern (Faserdurchmesser > 5 μm) eingesetzt. Durch Sägen, Fräsen, Schleifen oder Polieren entstehen Stäube, die lungengängige Feinfraktionen enthalten können. Eine Freisetzung freier Fasern mit der Folge eines faserspezifischen Toxizitatspotenzials ist am Arbeitsplatz bei mechanischer Bearbeitung jedoch nicht zu erwarten. Infolgedessen handelt es sich Mischstube granulären Typs.

Gesondert sind die verwendeten organischen Stoffe wie beispielsweise Aceton, Styrol und Epoxidharze zu betrachten. Hier können im Stadium der Bauteilherstellung Expositionsszenarien entstehen, die wegen allergischer/toxischer Risiken sorgfältig zu überwachen sind.

Alle drei Stoffe lassen sich bei Beachtung bestehender Vorsichtsmaßregeln und einer effektiven Absaugung sicher am Arbeitsplatz verwenden. Naturgemäß lassen sich bei den beiden Metallen die Gefährdungspotenziale leichter überblicken und vielleicht auch beherrschen. Es geht hier im Wesentlichen um die Expositionsminimierung gegenüber Partikel aerosolen.

Bei CFK ergibt sich eine kompliziertere Expositionssituations Betrachtung, die aufwendigere Schutzmaßnahmen erfordert. Dies stellt Arbeitsschutztechnisch kein Neuland dar und ist handhabbar.

#### **ÜBERBLICK:**

*Gefährdungsabschätzung für Hochleistungsstahl, Aluminium und CFK*

#### **HOCHLEISTUNGSSTAHL**

- *Ergebnis der Prozessschritte: Schweißen, thermisches Schneiden, thermisches Spritzen und Löten stellen das größte Expositionsrisiko dar*
- *Arbeitsschutzmaßnahmen schließen eine nach Stand der Technik möglichst effektive Abscheidung von Schweißrauch aerosolen ein; alveolengängige Partikel entstehen im Wesentlichen beim Schweißen und thermischen Schneiden (TRGS 528, Februar 2009).*

#### **ALUMINIUM**

- *Ergebnis der Prozessschritte: Schweißen, Schleifen, Bürsten und Polieren von Aluminium oder Aluminiumlegierungen stellen das größte Expositionsrisiko dar*
- *Arbeitsschutzmaßnahmen schließen eine nach Stand der Technik möglichst effektive Abscheidung von auftretenden Aluminiumstaub aerosolen ein: Nassverfahren bei der Bearbeitung von Werkstoffen bzw. Trockenabscheidung (letztere möglichst nicht am Arbeitsplatz, sondern in einem separaten Raum).*

#### **CFK**

- *Ergebnis der Prozessschritte: Schleifen, Schneiden und Polieren von CFK stellen das größte Expositionsrisiko dar; Schutz gegen granuläre und faserförmige Aerosole muss gewährleistet sein*
- *Arbeitsschutzmaßnahmen schließen eine nach Stand der Technik möglichst effektive Abscheidung von auftretenden Staub aerosolen ein: Effektive Staubabsaugung bzw. Trockenabscheidung; Partikelstäube: Mund-/Nasenschutz mit Halbmaske, Benutzung von Overalls, Handschutz*
- *Der beim Schleifen von Faserverbundwerkstoffen entstehende Staub enthält kleinste Filament-Partikel, die ähnlich der Asbest-Faser im Verdacht stehen, Krebs zu erregen und zudem Juckreiz verursachen können. Daher ist bei derartigen Arbeiten immer ein Atemfilter und entsprechende Kleidung zu tragen. Der Staub ist mit dem Staubsauger zu entfernen, nicht mit der Druckluftpistole in der ganzen Werkstatt zu verteilen!*

## Kapitel 5

# FAZIT

Leichtbau wird die Zukunft in Mobilität und Fertigung durch neue Materialien, neue Verfahren und Produkte bedeutend mitgestalten. Die ökologischen Aspekte werden hierbei eine wichtige Rolle spielen.

Es wurde gezeigt, dass unter ökologischen Gesichtspunkten keine allgemeingültige Empfehlung für einen der drei untersuchten Leichtbauwerkstoffe gegeben werden kann. Vielmehr muss von Fall zu Fall entschieden werden. Mithilfe einer ganzheitlichen Betrachtung „von der Wiege bis zur Bahre“ können hier die optimalen Verfahren, Werkstoffe und Methoden ermittelt werden. Zudem spielen bei der Werkstoffauswahl eine Vielzahl weiterer Parameter eine entscheidende Rolle.

In der Produktionsphase wird ein großer Teil der eingesetzten Primärenergie für die Rohstoffgewinnung benötigt. Hierbei sind Kohlenstofffasern am energieintensivsten. Große Einsparpotenziale bestehen hier vor allem in der Verwendung weniger energieintensiver Precursorfaser, etwa aus Kunststoffen auf Basis nachwachsender Rohstoffe. Zudem bieten die Weiterverarbeitungsverfahren noch Optimierungsbedarf.

Bei den metallischen Leichtbauwerkstoffen benötigt die Herstellung des Primäraluminiums mehr Energie als die Stahlherstellung. Die grundlegenden Herstellungsverfahren sind bereits ausgereift und versprechen eher einen kleineren ökologischen Nutzen. Große Stellhebel liegen hier in einer weiteren Steigerung der Leichtbaugüte durch Materialforschung und verbesserte Werkstoffeigenschaften.

Die größte Gewichtseinsparung kann mit CFK erreicht werden, gefolgt von Aluminium und Hochleistungsstahl. Ob der höhere Energieaufwand in der Herstellung durch die Energieeinsparung in der Nutzungsphase amortisiert werden kann, ist von verschiedenen Faktoren abhängig, wie beispielsweise der Bauteilfunktion und der Nutzungsdauer.

Das Recycling der metallischen Leichtbauwerkstoffe Stahl und Aluminium ist technisch gelöst und besitzt in den Industrienationen eine funktionierende Infrastruktur. Stahl kann ohne Qualitätsverlust beliebig oft recycelt werden und etwa 75 % des gesamten jemals produzierten Aluminiums ist noch in Gebrauch. CFK wird größtenteils thermisch verwertet. Es gibt mehrere Ansätze und erste Anlagen im industriellen Maßstab, welche eine Wiederverwendung der Kohlenstofffaser erlauben. Hierbei handelt es sich jedoch um „downcycling“, die Recyclate sind von geringerer Qualität als die Ausgangsstoffe. Die Weiterentwicklungen des CFK-Recycling ist eine wichtige Voraussetzung für eine Nutzung des Werkstoffes im Massenmarkt und sollte entsprechend vorangebracht werden.

Die gesundheitlichen Aspekte in der Produktion stellen für den Arbeitsschutz kein Neuland dar und sind für alle drei untersuchten Werkstoffe handhabbar. Hierbei erfordert der Umgang mit kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen allerdings aufwendigere Maßnahmen als mit Aluminium und Stahl.

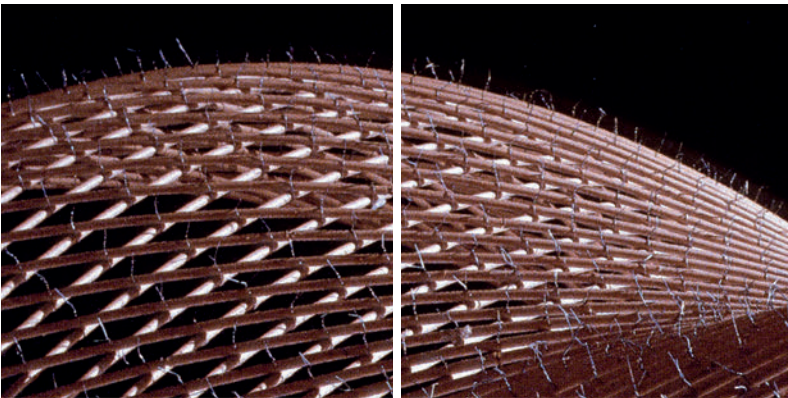
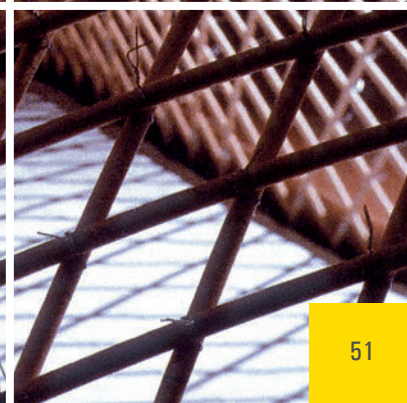
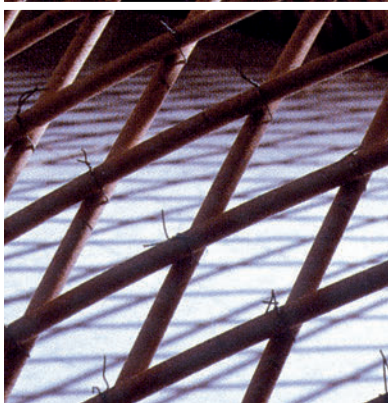
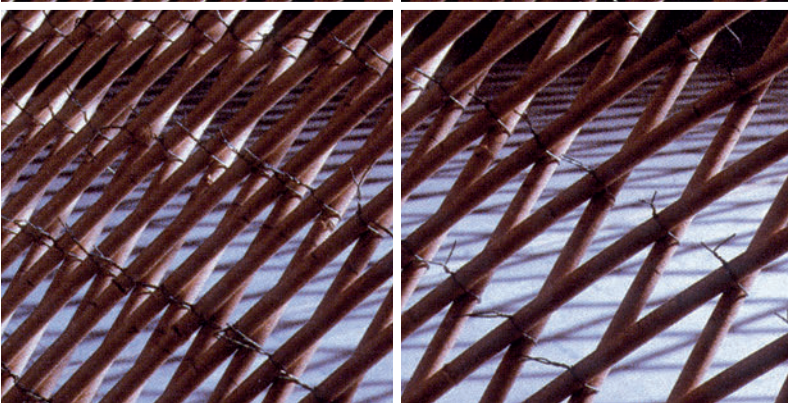
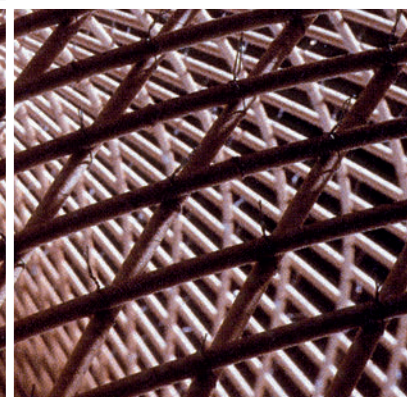
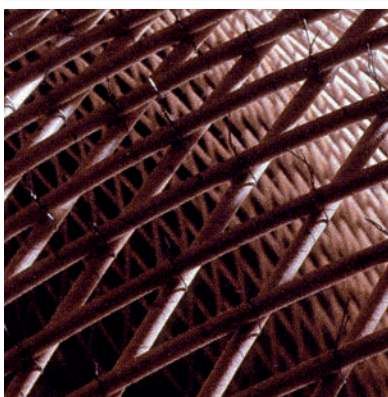
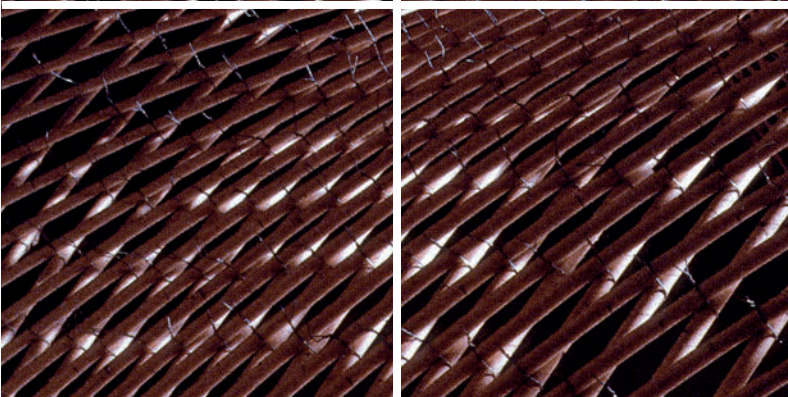


Abb. 58: Modell zur Entwicklung des japanischen Pavillons Expo 2000 Hannover; Sihgeru Ban, Berater Frei Otto; ©LEK Universität Stuttgart



# LITERATURVERZEICHNIS

## **ACE Advanced Composite Engineering GmbH 03.12.2012 – [www.ace-composite.de](http://www.ace-composite.de)**

ACE Advanced Composite Engineering GmbH (2012):  
[www.ace-composite.de](http://www.ace-composite.de).

Hg. v. ACE Advanced Composite Engineering GmbH. Online verfügbar unter ACE Advanced Composite Engineering GmbH, zuletzt aktualisiert am 03.12.2012.

## **Albrecht 2007 – Nachhaltige rohstoffnahe Produktion**

Albrecht, S.; Eyerer, P.; Woidasky, J.; Hirth, T. (2007):  
Nachhaltige rohstoffnahe Produktion. Abschlussbericht des Vorhabens "Analyse, Bewertung und Dokumentation von Forschungsschwerpunkten für den Themenbereich "Nachhaltig wirtschaften in rohstoffnahen Produktionssystemen"" im Rahmenprogramm "Forschung für Nachhaltigkeit" des BMBF.

Hg. v. Fraunhofer ICT. Stuttgart: Fraunhofer-IRB-Verl.  
ISBN: 978-3-8167-7302-3

## **Ameling, Endemann 2007 – Ressourceneffizienz**

Ameling, Dieter; Endemann, Gerhard (2007):  
Ressourceneffizienz: Gute Argumente für Stahl. Resource efficiency - good arguments for steel.  
In: stahl und eisen 2007 (8), S. 1–9.

## **ANJILVEL, ASGHARIAN 1995 – A Multiple-Path Model of Particle**

ANJILVEL, SATISH; ASGHARIAN, BAHMAN (1995):  
A Multiple-Path Model of Particle Deposition in the Rat Lung.  
In: Toxicol Sci 28 (1), S. 41–50.  
DOI: 10.1093/toxsci/28.1.41

## **Architektenkammer Baden-Württemberg 2011 – Architekten und Stadtplaner in Baden-Württemberg**

Architektenkammer Baden-Württemberg (2011):  
Architekten und Stadtplaner in Baden-Württemberg.  
Hintergrundinformation. Unter Mitarbeit von Michael Schuler. Hg. v. Architektenkammer Baden-Württemberg. Stuttgart. Online verfügbar unter [http://www.akbw.de/fileadmin/download/Freie\\_Dokumente/Berufspolitik/Wirtschaft\\_und\\_Statistik/](http://www.akbw.de/fileadmin/download/Freie_Dokumente/Berufspolitik/Wirtschaft_und_Statistik/).

## **Ärztlicher Sachverständigenbeirat "Berufskrankheiten" 2009 – Merkblatt zur Berufskrankheit Nummer 4106**

Ärztlicher Sachverständigenbeirat "Berufskrankheiten" (2009):  
Merkblatt zur Berufskrankheit Nummer 4106. "Erkrankungen der tieferen Atemwege und der Lungen durch Aluminium und seine Verbindungen".

Hg. v. Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin. Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin. Online verfügbar unter [http://www.baua.de/de/Themen-von-A-Z/Berufskrankheiten/pdf/Merkblatt-4106.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=1](http://www.baua.de/de/Themen-von-A-Z/Berufskrankheiten/pdf/Merkblatt-4106.pdf?__blob=publicationFile&v=1), zuletzt aktualisiert am 12.02.2010, zuletzt geprüft am 02.10.2012.

## **Ausschuss für Gefahrstoffe 02/2000 – Technische Regeln für Gefahrstoffe**

Ausschuss für Gefahrstoffe (2000):  
Technische Regeln für Gefahrstoffe. Sensibilisierende Stoffe. TRGS 540. Hg. v. Bundesministerium für Arbeit und Sozialordnung im Bundesarbeitsblatt (BArbBl.). Online verfügbar unter [http://www.gewerbeaufsicht.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/16495/5\\_540.pdf](http://www.gewerbeaufsicht.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/16495/5_540.pdf).

## **Ausschuss für Gefahrstoffe 2009 – Technische Regeln für Gefahrstoffe**

Ausschuss für Gefahrstoffe (2009):  
Technische Regeln für Gefahrstoffe. Schweißtechnische Arbeiten. TRGS 500. Hg. v. BAuA. BAuA. Online verfügbar unter <http://www.baua.de/de/Themen-von-A-Z/Gefahrstoffe/TRGS/pdf/TRGS-500.pdf>, zuletzt geprüft am 29.11.2012.

## **Baden-Württemberg 14.05.2012 – Betriebe, Beschäftigte**

Baden-Württemberg, Statistisches Landesamt (2012):  
Betriebe, Beschäftigte, Entgelte und Umsatz im Verarbeitenden Gewerbe nach Beschäftigtengrößenklassen in ausgewählten Wirtschaftszweigen - Statistisches Landesamt Baden-Württemberg. Statistisches Landesamt Baden-Württemberg. Online verfügbar unter [http://www.statistik.baden-wuerttemberg.de/ProdGew/Landesdaten/VG-GK\\_BBEU.asp](http://www.statistik.baden-wuerttemberg.de/ProdGew/Landesdaten/VG-GK_BBEU.asp), zuletzt aktualisiert am 14.05.2012, zuletzt geprüft am 30.05.2012.

### **Bargel 2005 – Werkstoffkunde**

Bargel, Hans-Jürgen (2005):

Werkstoffkunde. Mit 85 Tabellen.

9. Aufl. Berlin ;, Heidelberg ;, New York: Springer. Online verfügbar unter <http://www.worldcat.org/oclc/254421321>.

ISBN: 978-3540261070

### **Bauernhansl 10.02.2012 – Technologie statt Verzicht**

Bauernhansl, Thomas (2012):

"Technologie statt Verzicht".

In: VDI Nachrichten 2012, 10.02.2012. Online verfügbar unter <http://www.vdi-nachrichten.com/artikel/Technologie-statt-Verzicht/57239/1>, zuletzt geprüft am 05.06.2012.

### **Bauernhansl 28.04.2012 – Zukunft der Industrie**

Bauernhansl, Thomas (2012):

Zukunft der Industrie. „Moderne Fabriken müssen flexibel sein“.

In: FAZ, 28.04.2012. Online verfügbar unter <http://www.faz.net/aktuell/beruf-chance/arbeitswelt/zukunft-der-industrie-moderne-fabriken-muessen-flexibel-sein-11723856.html>, zuletzt geprüft am 05.06.2012.

### **Baumann, Held 2010 – Development of a methodical approach**

Baumann, Michael; Held, Michael (2010):

Development of a methodical approach for the description of the use phase of electric vehicle concepts in LCA.

Hg. v. Fraunhofer IBP - Abt. Ganzheitliche Bilanzierung. Online verfügbar unter [http://www.lbp-gabi.de/refbase/files/166\\_Baumann+Held2011.pdf](http://www.lbp-gabi.de/refbase/files/166_Baumann+Held2011.pdf).

### **Berufsgenossenschaft Rohstoffe und chemische Industrie 2012 – Gefahrenpiktogramme**

Berufsgenossenschaft Rohstoffe und chemische Industrie (2012):

Gefahrenpiktogramme.

Online verfügbar unter <http://www.bgrci.de/praevention/fachwissen/gefährstoffe/ghs/inhalt-von-ghs/kennzeichnung/>, zuletzt geprüft am 28.11.2012.

### **BG Bau Berufsgenossenschaft der Bauwirtschaft 05/2010 – Praxisleitfaden für den Umgang**

BG Bau Berufsgenossenschaft der Bauwirtschaft (2010):

Praxisleitfaden für den Umgang mit Epoxidharzen.

Hg. v. Berufsgenossenschaft der Bauwirtschaft. Berlin. Online verfügbar unter <http://www.bgbau-medien.de/html/pdf/bau676.pdf>, zuletzt aktualisiert am 14.03.2012, zuletzt geprüft am 29.11.2012.

### **Bochmann, Gabriel et al. 01/2008 – Hartmetallarbeitsplätze**

Bochmann, F.; Gabriel, S.; Hahn, J. U.; Hartwig, A.; Mittenzwei, V.; Rocker, M. (2008):

Hartmetallarbeitsplätze: Exposition und Bewertung. Gefahrstoffexposition

(68). Online verfügbar unter [http://www.dguv.de/ifa/de/pub/grl/pdf/2008\\_003.pdf](http://www.dguv.de/ifa/de/pub/grl/pdf/2008_003.pdf).

### **Boyle 1996 – Renewable energy**

Boyle, Godfrey (1996):

Renewable energy. Power for a sustainable future.

Oxford: Oxford University Press in association with the Open University. Online verfügbar unter <http://www.worldcat.org/oclc/56471644>.

ISBN: 0-19-926178-4

### **Broek, Singh et al. 2012 – Karosserie und Leichtbau Hand**

Broek, Cees Ten; Singh, Harry; Hillebrecht, Martin (2012):

Karosserie und Leichtbau Hand in Hand.

In: ATZ 114 (05), S. 368–377.

### **Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) (Hg.) – Das Global Harmonisierte System GHS**

Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) (Hg.):

Das Global Harmonisierte System (GHS) in der EU. die neue Einstufung und Kennzeichnung nach CLP-Verordnung (EG) Nr. 1272/2008.

1) Einstufung und Kennzeichnung. Online verfügbar unter <http://www.baua.de/de/Publikationen/Poster/GHS-01.pdf>, zuletzt geprüft am 30.11.2012.

**Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) 2012 – BAuA**

Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) (2012): BAuA - Einstufung und Kennzeichnung. Hg. v. Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA). Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA). Online verfügbar unter <http://www.baua.de/de/Themen-von-A-Z/Gefahrstoffe/Einstufung-und-Kennzeichnung/Einstufung-und-Kennzeichnung.html>, zuletzt aktualisiert am 02.10.2012, zuletzt geprüft am 02.10.2012.

**Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) 2012 – Technische Regeln für Gefahrstoffe TRGS**

Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) (2012): Technische Regeln für Gefahrstoffe (TRGS). Hg. v. Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA). Online verfügbar unter [www.baua.de/trgs](http://www.baua.de/trgs), zuletzt geprüft am 01.10.2012.

**CELC European Scientific Committee – Flax and Hemp fibres**

CELC European Scientific Committee:  
Flax and Hemp fibres: a natural solution for the composite industry.

**Chen, Monnat et al. 1978 – Aluminum induced pulmonary granulomatosis**

Chen, W. J.; Monnat, R. J.; Chen, M.; Mottet, N. K. Keyword££Adult Keyword££Aluminum/adverse effects/analysis Keyword££Granuloma/chemically induced/pathology Keyword££Humans Keyword££Lung/analysis/pathology Keyword££Lung Diseases/chemically induced/pathology Keyword££Male (1978): Aluminum induced pulmonary granulomatosis. In: Hum. Pathol. 9 (6), S. 705–711. PubMed ID: 730152

**Daimler AG – Umwelt- Zertifikat für die neue B-Klasse**

Daimler AG:  
Umwelt- Zertifikat für die neue B-Klasse. Life cycle. Hg. v. Mercedes-Benz Cars Daimler AG. Stuttgart.

**Daimler AG 2012 – Umweltbericht 2002**

Daimler AG (2012): Umweltbericht 2002. DaimlerChrysler auf dem Weg zu einer nachhaltigen Mobilität. Hg. v. Daimler AG. Stuttgart.

**Degischer, Lüftl 2009 – Leichtbau**

Degischer, Hans-Peter; Lüftl, Sigrid (2009): Leichtbau. Prinzipien, Werkstoffauswahl und Fertigungsvarianten. Weinheim: Wiley-VCH. Online verfügbar unter <http://www.worldcat.org/oclc/501317085>. ISBN: 978-3-527-32372-2

**Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V. (DUGV) – BG-Regel**

Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V. (DUGV): BG-Regel. Schleifen, Bürsten und Polieren von Aluminium. Vermeiden von Staubrändern und Staubexplosionen. Hg. v. Carl Heymanns Verlag. Köln. Online verfügbar unter <http://publikationen.dguv.de/dguv/pdf/10002/bgr109.pdf>, zuletzt geprüft am 29.11.2012.

**DGUV 30.03.2009 – Projekt-Nr**

DGUV (2009): Projekt-Nr. VMBG001. Studie zur Toxizität von aluminiumhaltigen Schweißrauch im Bereich des zentralen Nervensystems und der Atemwege. Hg. v. DGUV Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung. Online verfügbar unter <http://www.dguv.de/ifa/de/pro/pro1/vmbg001/index.jsp>, zuletzt aktualisiert am 30.03.2009, zuletzt geprüft am 02.10.2012.

**Dick, Winterhagen 2012 – Ein Drittel Gewichtsreduktion ist realistisch**

Dick, Michael; Winterhagen, Johannes (2012): "Ein Drittel Gewichtsreduktion ist realistisch". Der scheidende Audi-Technikvorstand Dick sieht Leichtbau als das zentrale Thema - Neuer Q7 soll 350 Kilo leichter werden. In: Automobilwoche 06/2012 (13), S. 15, zuletzt geprüft am 12.06.2012.

**DIN - Deutsches Institut für Normung e.V. Oktober 2006 – Umweltmanagement**

DIN EN ISO 14044, Oktober 2006:  
Umweltmanagement - Ökobilanz - Anforderungen und Anleitungen (ISO 14044:2006).

**DIN - Deutsches Institut für Normung e.V. Oktober 2006 – Umweltmanagement**

DIN EN ISO 14040, Oktober 2006:  
Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen (ISO 14040:2006).

### **Duden Fremdwörterbuch 2001**

Dudenredaktion (2001):  
Duden Fremdwörterbuch.  
7. Aufl. Mannheim: Dudenverlag.  
ISBN: 3-411-04057-2

### **Durst 16.11.2011 – Die Audi Leichtbaustrategie**

Durst, Karl (2011):  
Die Audi Leichtbaustrategie.  
Mobilität der Zukunft. Würzburg, 16.11.2011.

### **Ehrenstein 2006 – Faserverbund-Kunststoffe**

Ehrenstein, Gottfried W. (2006):  
Faserverbund-Kunststoffe. Werkstoffe, Verarbeitung, Eigenschaften.  
2. Aufl. München [u.a.]: Hanser. Online verfügbar unter <http://www.worldcat.org/oclc/162248593>.  
ISBN: 978-3-446-22716-3

### **e-mobil BW GmbH 2012 – Leichtbau in Mobilität und Fertigung**

Rommel, Steve; Geiger, Raphael; Schneider, Ralph; Fischer, Andreas; Schneider, Marco; Großmann, Michael et al. (2012):  
Leichtbau in Mobilität und Fertigung. Chancen für Baden-Württemberg.  
2000. Aufl. Unter Mitarbeit von Steve Rommel, Raphael Geiger, Ralph Schneider, Andreas Fischer, Marco Schneider, Michael Großmann et al. Hg. v. e-mobil BW GmbH. Stuttgart. Online verfügbar unter [www.e-mobilbw.de](http://www.e-mobilbw.de), zuletzt geprüft am 24.07.2012.

### **Fachagentur Nachwachsender Rohstoffe e.V. (Hg.) 2008 – Gültzower Fachgespräche Band 26**

Fachagentur Nachwachsender Rohstoffe e.V. (Hg.) (2008):  
Gültzower Fachgespräche Band 26. Studie zur Markt- und Konkurrenz-situation bei Naturfasern und Naturfaser Werkstoffen (Deutschland und EU).  
Unter Mitarbeit von Michael Carus, Christian Gahle, Cezar Pendarovski, Dominik Vogt, Sven Ortmann und Franjo Grohenthern. Gültzow. Online verfügbar unter [www.fnr.de](http://www.fnr.de).

### **Fachagentur Nachwachsender Rohstoffe e.V. (Hg.) 2010/2011 – Jahresbericht 2010/2011**

Fachagentur Nachwachsender Rohstoffe e.V. (Hg.) (2010/2011):  
Jahresbericht 2010/2011. Fachagentur Nachwachsender Rohstoffe e.V.  
Gültzow-Prüzen. Online verfügbar unter [www.fnr.de](http://www.fnr.de).

### **Fachagentur Nachwachsender Rohstoffe e.V. (Hg.) 2011 – nachwachsende Rohstoffe**

Fachagentur Nachwachsender Rohstoffe e.V. (Hg.) (2011):  
nachwachsende Rohstoffe - Spitzentechnologie ohne Ende.  
Fachagentur Nachwachsender Rohstoffe e.V. Gültzow-Prüzen. Online verfügbar unter [www.fnr.de](http://www.fnr.de).

### **Fachagentur Nachwachsender Rohstoffe e.V. (Hg.) 2012 – Pflanzen für Industrie und Energie**

Fachagentur Nachwachsender Rohstoffe e.V. (Hg.) (2012):  
Pflanzen für Industrie und Energie.  
5. Aufl. Unter Mitarbeit von Ralf Pude, Antje Werner und Katja Gödeke. Fachagentur Nachwachsender Rohstoffe e.V. Online verfügbar unter [www.fnr.de](http://www.fnr.de).

### **Fachausschuss „Eisen und Metall I“ der BGZ 1990 – BGR 109**

Fachausschuss „Eisen und Metall I“ der BGZ (1990):  
BGR 109. Berufsgenossenschaftliche Regeln für Sicherheit und Gesundheit bei der Arbeit.  
BG-Regeln. Hg. v. BGFE Berufsgenossenschaft der Feinmechanik und Elektrotechnik. BGFE Berufsgenossenschaft der Feinmechanik und Elektrotechnik. Köln. Online verfügbar unter [http://www.novusair.com/tl\\_files/files/gesetzliches/BGR%20109%20Richtlinien%20zur%20Vermeidung%20der%20Gefahren%20von%20Staubexplosionen.pdf](http://www.novusair.com/tl_files/files/gesetzliches/BGR%20109%20Richtlinien%20zur%20Vermeidung%20der%20Gefahren%20von%20Staubexplosionen.pdf), zuletzt aktualisiert am 13.12.2005, zuletzt geprüft am 02.10.2012.

### **Flemming, Ziegmann et al. 1996 – Faserverbundbauweisen**

Flemming, Manfred; Ziegmann, Gerhard; Roth, Siegfried (1996):  
Faserverbundbauweisen. Halbzeuge und Bauweisen.  
Berlin [u.a.]: Springer.  
ISBN: 978-3540606161

### **Fraunhofer ICT 2012 – Duromere RTM-Verfahren RTM**

Fraunhofer ICT (2012):  
Duromere RTM-Verfahren (RTM). Verfahren.  
Fraunhofer ICT. Online verfügbar unter <http://www.ict.fraunhofer.de/de/komp/PE/hfv/rtm.html>, zuletzt geprüft am 29.11.2012.

### **Griffith 1920 – The phenomena of rupture**

Griffith, A. A. (1920):  
The phenomena of rupture and flow in solids. London.



### **Handbuch Leichtbau 2011**

Henning, Frank; Moeller, Elvira (2011):  
Handbuch Leichtbau. Methoden, Werkstoffe, Fertigung.  
München: Hanser, Carl. Online verfügbar unter <http://www.worldcat.org/oclc/706900686>.  
ISBN: 978-3-446-42267-4

**Dr. Ruth Heuss, Dr. Nicolai Müller et al. 01/2012 – Lightweight**  
Heuss, Ruth; Müller, Nicolai; Van Sintern, Wolff; Starke, Anne;  
Tschiesner, Andreas (2012):

Lightweight, heavy impact. How carbon fiber and other lightweight materials will develop across industries and specifically in automotive.  
Hg. v. McKinsey&Company.

### **Holz-Berufsgenossenschaft 07/2000 – BGI 729**

Holz-Berufsgenossenschaft (2000):  
BGI 729. Faserverstärkte Polyesterharze Handhabung und sicheres Arbeiten.  
(bisher ZH 1/729). Hg. v. DGUV Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung. DGUV Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung. Online verfügbar unter <http://publikationen.dguv.de/dguv/pdf/10002/bgi729.pdf>.

### **Human respiratory tract model 1994**

ICRP (1994):  
Human respiratory tract model for radiological protection. A report of a Task group of the International commission on radiological protection. Oxford ;, New York ;, Tokyo: Pergamon.  
ISBN: 9780080411545

### **INDUSTRIEMAGAZIN 14.02.2012 – 100 Millionen Euro Investitionen**

INDUSTRIEMAGAZIN (2012):  
100 Millionen Euro Investitionen: Voestalpine Automotive expandiert mit Leichtstahl-Auftrag.  
Hg. v. INDUSTRIEMAGAZIN - Das Magazin für Ihren unternehmerischen Erfolg. INDUSTRIEMAGAZIN. Online verfügbar unter [http://www.industriemagazin.net/home/artikel/aid/9578/p/1/100\\_Millionen\\_Euro\\_Investitionen/Voestalpine\\_Automotive\\_expandiert\\_mit\\_Leichtstahl-Auftrag?analytics\\_from=g\\_search\\_articles&highlight=27842](http://www.industriemagazin.net/home/artikel/aid/9578/p/1/100_Millionen_Euro_Investitionen/Voestalpine_Automotive_expandiert_mit_Leichtstahl-Auftrag?analytics_from=g_search_articles&highlight=27842), zuletzt geprüft am 02.10.2012.

### **Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA) 2011 – Maßstäbe zur Beurteilung der Wirksamkeit**

Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA) (2011):  
Maßstäbe zur Beurteilung der Wirksamkeit von Schutzmaßnahmen. Grenzwerte in Deutschland.  
Institut für Arbeitsschutz der DGUV (IFA). [www.dguv.de](http://www.dguv.de). Online verfügbar unter <http://www.dguv.de/ifa/de/fac/nanopartikel/beurteilungsmassstaebe/index.jsp>, zuletzt geprüft am 29.11.2012.

### **Johne 2012 – Wettbewerb der Karosseriewerkstoffe**

Johne, P. (2012):  
Wettbewerb der Karosseriewerkstoffe. Leichtbau ist derzeit das beherrschende Thema in der Automobilindustrie. Auf welchem Wege die Leichtbau-Ziele erreicht werden sollen, ist derzeit noch offen. Im Karosseriebereich ist das Einsparpotenzial am größten.  
In: bbr Bänder Bleche Rohre 04/2012 (04/2012), S. 60–62. Online verfügbar unter <http://www.bbr.de/index.cfm?pid=1646&pk=119003>, zuletzt geprüft am 12.06.2012.

### **Kiesswetter, Schäper et al. 2007 – Longitudinal study on potential neurotoxic**

Kiesswetter, E.; Schäper, M.; Buchta, M.; Schaller, K. H.; Rossbach, B.; Scherhag, H. et al. (2007):  
Longitudinal study on potential neurotoxic effects of aluminium: I. Assessment of exposure and neurobehavioural performance of Al welders in the train and truck construction industry over 4 years.  
In: Int Arch Occup Environ Health 81 (1), S. 41–67.  
DOI:10.1007/s00420-007-0191-2  
PubMed ID: 17522885

### **Klein 2009 – Leichtbau-Konstruktion**

Klein, Bernd (2009):  
Leichtbau-Konstruktion. Berechnungsgrundlagen und Gestaltung ; mit Tabellen.  
8. Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner.  
ISBN: 978-3-8348-0701-4

### **Knauer 2012 – Unvermeidliche Leichtigkeit**

Knauer, Michael (2012):

Unvermeidliche Leichtigkeit. Großserienhersteller wie Ford kalkulieren derzeit, welche Diät sich für ein Modell lohnt und welche (noch) zu teuer ist.

In: Automobilwoche (19).

### **Koffler, Rohde-Brandenburger 2010 – On the calculation of fuel**

Koffler, Christoph; Rohde-Brandenburger, Klaus (2010):

On the calculation of fuel savings through lightweight design in automotive life cycle assessments.

In: Int J Life Cycle Assess 15 (1), S. 128–135.

DOI: 10.1007/s11367-009-0127-z

### **Kümmeth 26.04.2011 – CFK-Recycling**

Kümmeth, Michael (2011):

CFK-Recycling. Wie tauglich ist die Pyrolyse zur Schließung des CFK-Stoffkreislaufs?

Hg. v. MaschinenMarkt. Online verfügbar unter <http://www.maschinenmarkt.vogel.de/themenkanaele/konstruktion/werkstoffe/articles/312969/>, zuletzt geprüft am 29.11.2012.

### **Lörcks 2005 – Biokunststoffe**

Lörcks, Jürgen (2005):

Biokunststoffe. Pflanzen Rohstoffe Produkte.

Hg. v. Fachagentur Nachwachsender Rohstoffe e.V. Fachagentur Nachwachsender Rohstoffe e.V. Online verfügbar unter [www.fnr.de](http://www.fnr.de).

### **LUBW Landesanstalt für Umwelt 08/2010 – Nanomaterialien**

LUBW (2010):

Nanomaterialien: Toxikologie/Ökotoxikologie.

Hg. v. Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg LUBW Landesanstalt für Umwelt. <http://www.lubw.baden-wuerttemberg.de>. Online verfügbar unter <http://www.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/62024/U10-S05-N10.pdf?command=downloadContent&filename=U10-S05-N10.pdf>, zuletzt geprüft am 29.11.2012.

### **Luchtel, Martin et al. 1989 – Response of the rat lung**

Luchtel, D. L.; Martin, T. R.; Boatman, E. S. (1989):

Response of the rat lung to respirable fractions of composite fiber-epoxy dusts.

In: Environ. Res. 48 (1), S. 57–69. Online verfügbar unter <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168583X04000606>.

PubMed ID: 2914567

### **Mathes 2012 – Faserverbund-Kunststoffe-mehr als nur Carbon..**

Mathes, Volker (2012):

Faserverbund-Kunststoffe-mehr als nur Carbon.. Faserverstärkte Kunststoffe oder neudeutsch "Composites" sind in aller Munde und unter ihnen besonders der "schwarze Werkstoff" CFK. Was aber sind Composites und CFK genau? Und was ist ihr Potenzial? Eine nüchterne Einschätzung.

In: Industrieanzeiger (20), S. 42–44.

### **Menzel, Reinert et al. 2004 – Investigations of percutaneous uptake**

Menzel, F.; Reinert, T.; Vogt, J.; Butz, T. (2004):

Investigations of percutaneous uptake of ultrafine TiO<sub>2</sub> particles at the high energy ion nanoprobe LIPSION.

In: Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms 219-220, S. 82–86.

DOI: 10.1016/j.nimb.2004.01.032

### **Möhlmann 2005 – Vorkommen ultrafeiner Aerosole an Arbeitsplätzen**

Möhlmann, Carsten (2005):

Vorkommen ultrafeiner Aerosole an Arbeitsplätzen

(Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft, 65). Online verfügbar unter [http://www.dguv.de/ifa/de/pub/grl/pdf/2005\\_196.pdf](http://www.dguv.de/ifa/de/pub/grl/pdf/2005_196.pdf), zuletzt aktualisiert am 17.11.2005, zuletzt geprüft am 02.10.2012.

### **Monash University 02/2009 – Use of carbon fibre composites**

Monash University (2009):

Use of carbon fibre composites - OHS information sheet number 28.

Hg. v. Monash University. Online verfügbar unter <http://www.monash.edu.au/ohs/topics/info-sheets/carbon-fibres.html>.

### **Nitsch, Wenzel et al. 08/2009 – Langfristszenarien und Strategien**

Nitsch, Joachim; wenzel, Bernd; DLR, Stuttgart; Ingenieurbüro für neue Energien, Tetlow (2009):

Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau erneuerbarer Energien in Deutschland. Leitszenario 2009.

400. Aufl. Unter Mitarbeit von Wolfhart Dürrschmidt, Uwe Nestle, Michael Van Mark und (Keine Angabe). Hg. v. Naturschutz und Reaktorsicherheit Bundesministerium für Umwelt. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Online verfügbar unter [http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/leitszenario2009\\_bf.pdf](http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/leitszenario2009_bf.pdf), zuletzt geprüft am 29.11.2012.

**Nordrhein-Westfalen, Ministerium für Arbeit 14.03.2006 – Kom-Net Wissensdatenbank**

Nordrhein-Westfalen; Ministerium für Arbeit, Integration und Soziales (2006):

KomNet Wissensdatenbank. KomNet Dialog 13809 : Welche Vorschriften sind beim Umgang mit CFK-Werkstoffen zu beachten?

Hg. v. Integration und Soziales Ministerium für Arbeit. Nordrhein-Westfalen, Ministerium für Arbeit, Integration und Soziales. Düsseldorf. Online verfügbar unter <http://komnet.nrw.de/ccnxtg/frame/ccnxtg/danz?zid=public&did=13809&lid=DE&bid=BAS&>, zuletzt aktualisiert am 14.03.2006, zuletzt geprüft am 02.10.2012.

**Oberdörster 1995 – Lung particle overload**

Oberdörster, G. (1995):

Lung particle overload: implications for occupational exposures to particles.

In: Regul. Toxicol. Pharmacol. 21 (1), S. 123–135.

DOI: 10.1006/rtp.1995.1017

PubMed ID: 7784625

**Pickering 2006 – Recycling technologies for thermoset composite**

Pickering, S.J (2006):

Recycling technologies for thermoset composite materials—current status.

In: Composites Part A: Applied Science and Manufacturing 37 (8), S. 1206–1215.

DOI: 10.1016/j.compositesa.2005.05.030

**Pimenta, Pinho 2011 – Recycling carbon fibre reinforced polymers**

Pimenta, Soraia; Pinho, Silvestre T. (2011):

Recycling carbon fibre reinforced polymers for structural applications: Technology review and market outlook.

In: Waste Management 31 (2), S. 378–392.

DOI: 10.1016/j.wasman.2010.09.019

**Piñero-Hernanz, García-Serna et al. 2008 – Chemical recycling of carbon fibre**

Piñero-Hernanz, Raúl; García-Serna, Juan; Dodds, Christopher; Hyde, Jason; Poliakoff, Martyn; Cocero, María José et al. (2008):

Chemical recycling of carbon fibre composites using alcohols under subcritical and supercritical conditions.

In: The Journal of Supercritical Fluids 46 (1), S. 83–92.

DOI: 10.1016/j.supflu.2008.02.008

**Prof. Dr. Jürgen Fleischer 01.03.2012 – Automatisierte Produktionsprozesse und -anlagen**

Prof. Dr. Jürgen Fleischer (2012):

Automatisierte Produktionsprozesse und -anlagen für den hybriden Leichtbau. 18. Nationales Symposium SAMPE Deutschland e.V. SAMPE. KIT. Karlsruhe, 01.03.2012.

**Raman Chaudhari 25.08.2012 – Telefoninterview RTM Technologie**

Raman Chaudhari, Fraunhofer ICT Pfinztal (2012):

Telefoninterview RTM Technologie.

Fraunhofer IBP, Stuttgart Leinfelden, 25.08.2012. telefonisch an Peter Brandstetter Raphael Geiger Michael Baumann. mp3.

**Renkl 17.11.2011 – Anlagentechnik für eine großserienfähige RTM-Produktion**

Renkl, Josef (2011):

Anlagentechnik für eine großserienfähige RTM-Produktion.

Fachtagung Carbon Composites 17.11.11. Messe Augsburg. Augsburg, 17.11.2011.

**Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieuhygiene (Netherlands), CIIT Centers for Health Research – Multiple path particle dosimetry model**

Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieuhygiene (Netherlands); CIIT Centers for Health Research:

Multiple path particle dosimetry model : A model for human and rat airway particle dosimetry.:

Bilthoven, The Netherlands : National Institute for Public Health and the Environment (RIVM); Research Triangle Park, N.C. : CIIT Centers for Health Research.

### **Ross, Lockey 1992 – HEALTH EFFECTS OF MAN-MADE FIBRES**

Ross, Clara S.; Lockey, James E. (1992):  
HEALTH EFFECTS OF MAN-MADE FIBRES.  
Hg. v. International Labour Organization. INTERNATIONAL LA-  
BOUR ORGANISATION. Online verfügbar unter [http://www.ilo.org/safework\\_bookshelf/english?content&nd=857170112](http://www.ilo.org/safework_bookshelf/english?content&nd=857170112).

### **Rossbach, Buchta et al. 2006 – Biological monitoring of welders exposed**

Rossbach, Bernd; Buchta, Mark; Csanády, György A.; Filser, Johannes G.; Hilla, Wolfgang; Windorfer, Klaus et al. (2006):  
Biological monitoring of welders exposed to aluminium.  
In: Toxicol. Lett. 162 (2-3), S. 239–245.  
DOI: 10.1016/j.toxlet.2005.09.018  
PubMed ID: 16280209

### **Schlott – Die Gewichtsspirale ist durchbrochen**

Schlott, Stefan:  
"Die Gewichtsspirale ist durchbrochen".  
Interview mit Rohde-Brandenburger.

### **Schlott 2012 – BMW-Werk Landshut startet Carbonproduktion**

Schlott, Stefan (2012):  
BMW-Werk Landshut startet Carbonproduktion.  
In: ATZ produktion (021), S. 84–87, zuletzt geprüft am 26.06.2012.

### **Schröder 3/2004 – Ausgekochter Stahl für das Auto**

Schröder, Tim (2004):  
Ausgekochter Stahl für das Auto von morgen.  
Fazination Forschung. Hg. v. Max-Planck Forschung.

### **ScienceDirect.com**

ScienceDirect.com - Waste Management - Recycling carbon fibre reinforced polymers for structural applications: Technology review and market outlook.  
Online verfügbar unter <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X10004976>, zuletzt geprüft am 29.06.2012.

### **Spath (Hg.) 2010 – Green Office**

Spath, Dieter (Hg.) (2010):  
Green Office. Ökonomische und ökologische Potenziale nachhaltiger Arbeits- und Bürogestaltung.  
1. Aufl. Wiesbaden: Gabler.  
ISBN: 978-3-8349-2390-5

### **Spiegel-Ciobanu, Herrmann 03/2005 – Aus der Arbeitsschutzforschung**

Spiegel-Ciobanu, Vilia-Elena; Herrmann, J. (2005):  
Aus der Arbeitsschutzforschung - Aluminiumschweißen - eine Nervensache? Toxizität von aluminiumhaltigen Schweißrauchen.  
Hg. v. BG. BG. Online verfügbar unter <http://www.bpuvzdigital.de/DIEBG.03.2005.156>.

### **Spiegel-Ciobanu, Letzel et al. 2004 – Aluminium-Schweißen**

Spiegel-Ciobanu, Vilia-Elena; Letzel, Stephan; Hilla, Wolfgang; Zschiesche, Wolfgang (2004):  
Aluminium-Schweißen: Inhalative Belastung und Prävention.  
Hg. v. Norddeutsche Metall-Berufsgenossenschaft. Hannover. Online verfügbar unter [http://www.bghm.de/fileadmin/user\\_upload/Arbeits-schuetzer/Fachinformationen/Schweissen/aluminiumschw.pdf](http://www.bghm.de/fileadmin/user_upload/Arbeits-schuetzer/Fachinformationen/Schweissen/aluminiumschw.pdf).

### **Universität Rostock - Institut für Arbeitsmedizin - 1998 – Berufliche Belastung und Beanspruchung**

Universität Rostock - Institut für Arbeitsmedizin - (1998):  
Berufliche Belastung und Beanspruchung durch nichttoxische Stäube.  
Hg. v. Universität Rostock. Institut für Arbeitsmedizin. Online verfügbar unter <http://arbmed.med.uni-rostock.de/pdf/Staubexposition.pdf>, zuletzt aktualisiert am 17.07.2001, zuletzt geprüft am 02.10.2012.

### **Verein Deutscher Ingenieure e.V., Düsseldorf 2009 Dezember 2009 – VDI 3404; Generative Fertigungsverfahren Rapid-Technologien**

Nationale Norm VDI 3404, Dezember 2009:  
VDI 3404; Generative Fertigungsverfahren Rapid-Technologien (Rapid Prototyping) Grundlagen, Begriffe, Qualitätskenngrößen, Liefervereinbarungen, zuletzt geprüft am 04.09.2012.

**VMBG - Vereinigung der Metall-Berufsgenossenschaften 2004 – Studie zur Toxizität von aluminiumhaltigen**

VMBG - Vereinigung der Metall-Berufsgenossenschaften (2004): Studie zur Toxizität von aluminiumhaltigen Schweißrauch im Bereich des zentralen Nervensystems und der Atemwege. Hg. v. DGUV Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung. DGUV Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung. Online verfügbar unter <http://www.dguv.de/ifa/de/pro/pro1/vmbg001/index.jsp>, zuletzt aktualisiert am 29.11.2012.

**voe, swz 2012 – Stahlleichtbauweise setzt sich durch**

voe; swz (2012):  
Stahlleichtbauweise setzt sich durch.  
In: stahl und eisen 132 (4), S. 118.

**Volkswagen AG Dezember 2010 – Der Golf**

Volkswagen AG (2010):  
Der Golf. Umweltprädikat – Hintergrundbericht.  
Hg. v. Volkswagen AG. Wolfsburg.

**Volkswagen AG Dezember 2010 – Ein sparsamer Charakter**

Volkswagen AG (2010):  
Ein sparsamer Charakter. Das Umweltprädikat für den Golf.  
Hg. v. Volkswagen AG. Wolfsburg.

**Warheit, Hansen et al. 1994 – Acute Inhalation Toxicity Studies**

Warheit, D. B.; Hansen, J. F.; Carakostas, M. C.; Hartsky, M. A. (1994):  
Acute Inhalation Toxicity Studies in Rats with a Respirable-Sized Experimental Carbon Fibre: Pulmonary Biochemical and Cellular Effects. In: Annals of Occupational Hygiene 38 (inhaled particles VII), S. 769–776.  
DOI: 10.1093/annhyg/38.inhaled\_particles\_VII.769

**Waritz, Ballantyne et al. 1998 – Subchronic inhalation toxicity of 3.5-microm**

Waritz, R. S.; Ballantyne, B.; Clary, J. J. (1998):  
Subchronic inhalation toxicity of 3.5-microm diameter carbon fibers in rats.  
In: J Appl Toxicol 18 (3), S. 215–223.  
PubMed ID: 9685051

**Weber 2011 – Fritz Leonhardt**

Weber, Christiane (2011):  
Fritz Leonhardt. "Leichtbau - eine Forderung unserer Zeit. Anregungen für den Hoch- und Brückenbau" ; zur Einführung baukonstruktiver Prinzipien im Leichtbau in den 1930er- und 1940er- Jahren.  
In: Fritz Leonhardt.  
[ISBN]: 3-86644-781-7

**Wiedemann 2007 – Leichtbau**

Wiedemann, Johannes (2007):  
Leichtbau.  
[New York]: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.  
ISBN: 3-540-33656-7

**Wissenschaftliche Dienste der deutschen Bundestages 06/2004 – Der aktuelle Begriff**

Wissenschaftliche Dienste des deutschen Bundestages (2004):  
Der aktuelle Begriff. - Nachhaltigkeit -.  
Unter Mitarbeit von Arne Bartol und Erwin Herkommer. Hg. v. deutscher Bundestag. deutscher Bundestag. Online verfügbar unter <http://www.bundestag.de/bic/analysen/index.html>.

**World Health Organisation 1997 – Environmental Health Criteria 194**

World Health Organisation (1997):  
Environmental Health Criteria 194. Aluminium.  
Hg. v. UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME. International Labour Organisation; World Health Organisation. Geneva. Online verfügbar unter <http://www.inchem.org/documents/ehc/ehc/ehc194.htm>, zuletzt geprüft am 29.11.2012.

**World Health Organisation 2012 – World Health Organisation**

World Health Organisation (2012):  
World Health Organisation.  
Hg. v. World Health Organisation. Online verfügbar unter [www.who.int/en/](http://www.who.int/en/), zuletzt geprüft am 01.10.2012.

**WZV/SVZ 2012 – Leichtbaukonstruktion erhöht Lebensdauer**

WZV/SVZ (2012):  
Leichtbaukonstruktion erhöht Lebensdauer. Edelstahl Rostfrei in Schienenfahrzeugen.  
In: stahl und eisen 6/ 2012 (6), S. 105–106.



# ABBILDUNGSVERZEICHNIS

|           |   |    |
|-----------|---|----|
| Abb. S. 1 | Bambus Leichtbau Konstruktionen - conbou ©Wassilij Grod   |    |
| Abb. S. 3 | Ausschnitt des amerikanischen Pavillons „Biosphère“ von Buckminster Fuller Expo 1967 Montreal; ©ILEK Universität Stuttgart  |    |
| Abb. 1:   | Seilnetzmodell des „Instituts für leichte Flächentragwerke IL“ (heute Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren ILEK), Nachbau ILEK 1995; ©ILEK Universität Stuttgart | 6  |
| Abb. 2:   | VW XL1, Konzeptfahrzeug eines 1-Liter Automobils, 795kg Gesamtgewicht, CFK Karosserie; © Volkswagen Aktiengesellschaft  | 7  |
| Abb. 3:   | spanende Bearbeitung von CFK; ©Fraunhofer IPA   | 7  |
| Abb. 4:   | BMW 3, Montage Produktionsstart; © BMW AG   | 8  |
| Abb. 5:   | Porsche 911, Leichtbaukarosserie mit intelligentem Werkstoffmix; © Porsche AG   | 9  |
| Abb. 6:   | Die Aluminium Rohkarosserie des Mercedes-Benz SL wiegt 110 Kg weniger als die des Vorgängers und ist 20% steifer; © Daimler AG  | 10 |
| Abb. 7:   | smart forvision; © Daimler AG   | 11 |
| Abb. 8:   | Multifunktionale Kunststoff-Leichtbau-Komfortsitze im smart forvision; © Daimler AG   | 11 |
| Abb. 9:   | Kunststoffleichtbau Struktur, hergestellt mittels Fused Deposition Modelling (FDM-Verfahren), © Fraunhofer IPA, Fischer, A.   | 11 |
| Abb. 10:  | Kohlenstofffaserspulen bei SGL Automotive, Carbon Fibre Moses Lake; © BMW AG  | 12 |
| Abb. 11:  | Qualitätsprüfung an einer Preform Maschine für CFK Komponenten; © BMW AG  | 13 |
| Abb. 12:  | CFK Karosserie, BMW i3 Concept; © BMW AG  | 14 |
| Abb. 13:  | BMW i3 Concept, Elektrofahrzeug mit CFK Karosserie; © BMW AG  | 14 |
| Abb. 14:  | Hochdruck-Compression RTM-Verfahren (HP-CRTM); eigene Darstellung   | 14 |
| Abb. 15:  | Hochdruck-Injektion RTM-Verfahren (HP-IRTM); eigene Darstellung   | 15 |
| Abb. 16:  | Druckluftspindel Werkzeug in Integralbauweise hergestellt als ein Bauteil mittels generativer SLS Verfahren; © WSEngineering  | 15 |
| Abb. 17:  | Leichtbau durch Bauteilintegration von EL-Folie, Steuerung und Elektronik, produziert im FDM-Verfahren; © Fraunhofer IPA, Fischer, A.   | 16 |
| Abb. 18:  | AUDI A3 Karosseriematerialien; © AUDI AG  | 16 |
| Abb. 19:  | Schema einer Ökobilanzuntersuchung; eigene Darstellung  | 18 |
| Abb. 20:  | Gewichte der Leichtbauteilvarianten   | 19 |
| Abb. 21:  | Primärenergiebedarf   | 20 |
| Abb. 22:  | Treibhauspotenzial  | 20 |
| Abb. 23:  | Strommix Deutschland 201041   | 21 |
| Abb. 24:  | Primärenergiebedarf der Herstellung der Leichtbauteilvarianten  | 22 |
| Abb. 25:  | Treibhausgasemissionen der Herstellung der Leichtbauteilvarianten   | 22 |
| Abb. 26:  | Plan der Herstellung des Stahlbauteils  | 23 |
| Abb. 27:  | Primärenergiebedarf der Herstellung der Stahlbauteile   | 23 |
| Abb. 28:  | Treibhauspotenzial der Herstellung der Stahlbauteile  | 23 |
| Abb. 29:  | Primärenergiebedarf der Herstellung des Aluminiumbauteils   | 24 |
| Abb. 30:  | Treibhauspotenzial der Herstellung des Aluminiumbauteils  | 24 |
| Abb. 31:  | Primärenergiebedarf der Herstellung der CFK-Bauteile  | 25 |
| Abb. 32:  | Treibhauspotenzial der Herstellung der CFK-Bauteile   | 25 |
| Abb. 33:  | Minderverbrauchsfaktoren  | 26 |
| Abb. 34:  | Hängenetz-Modell SEIBU, Studie Frei Otto 1971; ©ILEK Universität Stuttgart  | 27 |
| Abb. 35:  | Primärenergiebedarf der Nutzungsphase der Bauteilvarianten (Fahrleistung: 150.000 km)   | 28 |
| Abb. 36:  | Treibhauspotenzial der Nutzungsphase der Bauteilvarianten (Fahrleistung: 150.000 km)  | 28 |
| Abb. 37:  | Primärenergiebedarf der Nutzungsphase der Bauteilvarianten (Fahrleistung: 250.000 km)   | 29 |
| Abb. 38:  | Treibhauspotenzial der Nutzungsphase der Bauteilvarianten (Fahrleistung: 250.000 km)  | 29 |
| Abb. 39:  | Primärenergiebedarf des Lebensendes der Bauteilvarianten  | 30 |

|  |    |
|--|----|
| Abb. 40: Treibhauspotenzial des Lebensendes der Bauteilvarianten   | 30 |
| Abb. 41: Primärenergiebedarf des Lebenszyklus der Bauteilvarianten (Fahrleistung: 150.000 km)  | 33 |
| Abb. 42: Treibhauspotenzial des Lebenszyklus der Bauteilvarianten (Fahrleistung: 150.000 km)   | 33 |
| Abb. 43: Primärenergiebedarf des Lebenszyklus der Bauteilvarianten (Fahrleistung: 250.000 km)  | 34 |
| Abb. 44: Treibhauspotenzial des Lebenszyklus der Bauteilvarianten (Fahrleistung: 250.000 km)   | 34 |
| Abb. 45: Primärenergiebedarf des Lebenszyklus der Bauteilvarianten Stahl, Hochleistungsstahl, Aluminium, sowie CFK quasiisotrop und unidirektional (Fahrleistung: 250.000 km, benzinbetrieben)   | 35 |
| Abb. 46: Treibhauspotenzial des Lebenszyklus der Bauteilvarianten Stahl, Hochleistungsstahl und Aluminium, sowie CFK quasiisotrop und unidirektional (Fahrleistung: 250.000 km, benzinbetrieben) | 35 |
| Abb. 47: Gefaltete Leichtbaustruktur; © Fraunhofer IPA   | 37 |
| Abb. 48: Ökologischer Leichtbau in der Natur, Libellenflügel; ©Fraunhofer IPA  | 39 |
| Abb. 49: Depositionsraten von Partikeln im humanen Respirationstrakt   | 40 |
| Abb. 50: menschliche Atemwege  | 40 |
| Abb. 51: AUDI A8 Aluminium Space-Frame Karosserie; ©AUDI AG  | 43 |
| Abb. 52: BMW Werk Landshut, Vorbereitung eines CFK Bauteils für Wasserstrahlschneiden; © BMW AG  | 45 |
| Abb. 53: Gefahrenklasse: Sensibilisierung der Haut, schwere Augenschädigung/Augenreizung   | 47 |
| Abb. 54: Gefahrenklasse: Ätz- und Reizwirkung auf die Haut, Sensibilisierung der Haut, schwere Augenschädigung/Augenreizung  | 47 |
| Abb. 55: Gefahrenklasse: Entzündbare Flüssigkeiten, Entzündbare Feststoffe, Selbsterhitzungsfähige Stoffe und Gemische   | 47 |
| Abb. 56: Gefahrenklasse: Langfristig gewässergefährdend  | 47 |
| Abb. 57: Sicherheitsmaßnahmen bei Expositionsgefahr gegenüber Carbonfaser- oder Kohlenstoffnanoröhren-Aerosolen; ©Fraunhofer ITEM  | 48 |
| Abb. 58: Modell zur Entwicklung des japanischen Pavillons Expo 2000 Hannover; Sihgeru Ban, Berater Frei Otto; ©ILEK Universität Stuttgart  | 51 |



# EXPERTENINTERVIEWS

Für die Studie „Leichtbau in Mobilität und Fertigung - Ökologische Aspekte“ wurde neben der Literaturrecherche eine Expertenbefragung durchgeführt, bei welcher die unten aufgeführten Experten interviewt wurden.

**Prof. Dr. rer. nat. habil. Michael R. Buchmeiser**

Leiter Institut für Polymerchemie (ipoc), Universität Stuttgart; Direktor Institut für Textilchemie und Chemiefasern Denkendorf (ITCF)

**Dipl.-Ing. Oliver Hoffmann**

Leiter Anwendungstechnik, Thyssen Krupp Steel Europe AG

**Dipl.-Ing. Wolfgang Heidrich**

GDA-Referent für Maschinenbau, Gesamtverband der Aluminiumindustrie e.V., Düsseldorf

**Dipl.-Ing. Jörg H. Schäfer**

GDA-Referent für Ökologie und Nachhaltigkeit, Gesamtverband der Aluminiumindustrie e.V., Düsseldorf

**Raman Chaudhari, M. Sc.**

Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie ICT; Polymer Engineering / Faserverbundwerkstoffe

**Dr. Stefan Kienzle**

Group Research & Advanced Engineering Lightweight, Materials, Manufacturing, Daimler AG

**Dr. Wolfgang Becker**

Group Research & Advanced Engineering Lightweight, Materials, Manufacturing, Daimler AG

## Impressum

### Herausgeber

e-mobil BW GmbH – Landesagentur für Elektromobilität und Brennstoffzellentechnologie Baden-Württemberg  
Ministerium für Finanzen und Wirtschaft Baden-Württemberg  
Ministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst Baden-Württemberg  
Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA  
Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP  
Fraunhofer-Institut für Toxikologie und Experimentelle Medizin ITEM

### Redaktion

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA  
Steve Rommel, Raphael Geiger, Ralph Schneider  
Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP  
Michael Baumann, Peter Brandstetter, Michael Held, Stefan Albrecht  
Fraunhofer-Institut für Toxikologie und Experimentelle Medizin ITEM  
Otto Creutzenberg, Clemens Dasenbrock

### Koordination Studie

e-mobil BW GmbH  
Anja Walter  
Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA  
Raphael Geiger

### Layout/Satz/Illustration

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA  
Andrea Elflein, Christiane Knöpfler, Kathrin Rochow, Jannis Breuninger  
TEAM STRUNZ | tswa.de  
Agentur für Marketing & Kommunikation  
Suzan Wheeler

### Fotos Umschlag

© Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA, Breuninger, J.

### Druck

Fraunhofer Informationszentrum IRB  
Nobelstraße 12  
70569 Stuttgart

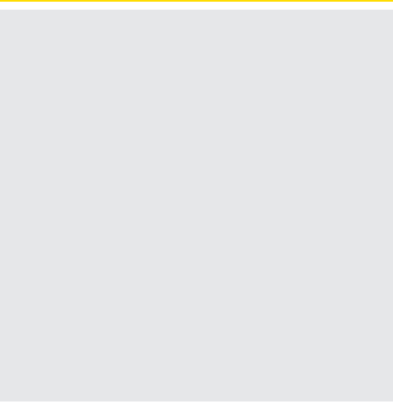
### Auslieferung und Vertrieb

e-mobil BW GmbH  
Leuschnerstraße 45  
70176 Stuttgart  
Telefon 0711 / 892385-0  
Fax 0711 / 892385-49  
E-Mail info@e-mobilbw.de  
www.e-mobilbw.de

Erscheinungsjahr 2012

© Copyright liegt bei den Herausgebern.

Alle Rechte vorbehalten. Dieses Werk ist einschließlich seiner Teile urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die über die engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes hinausgeht, ist ohne schriftliche Zustimmung des Herausgebers unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen sowie die Speicherung in elektronischen Systemen. Für die Richtigkeit der Herstellerangaben wird keine Gewähr übernommen.



**e-mobil BW GmbH**

Leuschnerstr. 45 | 70176 Stuttgart

Telefon: +49 711 892385-0

Telefax: +49 711 892385-49

info@e-mobilbw.de | www.e-mobilbw.de

