

Entwicklungstendenzen für den Einsatz von Leichtbauwerkstoffen im Fahrzeugbau und Auswirkungen auf das Recycling

Holger Lieberwirth und Thomas Krampitz

1.	Derzeitiger Stand.....	208
2.	Entwicklungstendenzen im Leichtbau	211
3.	Abschätzung einer Auswirkung auf das Recycling.....	214
4.	Quellen	216

Die Gewichtsspirale konnte gestoppt werden: Der konsequente Leichtbau – etwa mit modernen Kohlenstofffaser-Verbundwerkstoffen (CFK), faserverstärkten Thermoplasten oder CFK-Hybridwerkstoffen mit Polyurethan oder Hochleistungsstählen – ist neben den zu erzielenden Fortschritten in der Batterie- und Antriebstechnik ein wichtiger Baustein zur Erreichung attraktiver Reichweiten, Zuladung und Fahrdynamik [16].

Von der Nationalen Plattform Elektromobilität (NPE) wurde in diesem Zusammenhang das Forschungs- und Demonstrationszentrum für Ressourceneffiziente Leichtbaustrukturen der Elektromobilität (FOREL) initiiert, welches entsprechende Forschungsprojekte systematisch koordiniert und den vorwettbewerblichen, projektbezogenen Austausch aller beteiligten Partner fördert. Im Rahmen eines Technologiezentrums sollen die Entwicklungsergebnisse validiert und unterschiedliche Prozessketten langfristig zu einem umfassenden Netzwerk verknüpft werden.

Bei der Forschungs- und Entwicklungsarbeit liegt daher der Schwerpunkt darauf, Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde sowie Komponenten zu optimieren und neu zu entwickeln. In diesem Zusammenhang wird u.a. bereits bei der Werkstoff- und Verbundentwicklung über Wege zur Rezyklierung der Bestandteile nachgedacht. Der empfohlene Multi-Material-Ansatz, die immer höheren Material- und Verbindungsfestigkeiten bei sinkendem Gewicht, damit verbundene Verschiebungen im Material-Mix bei gleichzeitig vom Gesetzgeber vorgegebenen höheren stofflichen Verwertungsquoten, stellen Aufbereiter vor neue Herausforderungen. Dieser Aspekt gewinnt besondere Bedeutung dadurch, dass im Gegensatz zu anderen Technologien der Elektromobilität, wie z.B. der Batterietechnologie, der Leichtbau auch unmittelbar in den konventionellen Fahrzeugbau ausstrahlt, und sich mithin auch beim Altfahrzeugaufkommen in den kommenden Jahren sehr viel schneller und stärker bemerkbar machen wird.

1. Derzeitiger Stand

Nach Angaben des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) blieben in Deutschland in den letzten Jahren die Fahrzeugstilllegungen mit etwa 3,2 Millionen Fahrzeugen (2012) weitgehend konstant. Etwa 475.000 Tonnen Altfahrzeuge wurden verwertet. Das Durchschnittsalter der Altfahrzeuge im Jahr 2012 wurde im letzten Bericht mit etwa 14,5 Jahren beziffert [5].

Aus den jährlich erstellten Altfahrzeug-Verwertungsquoten des BMUB in Deutschland ist bereits heute eine Abnahme des Stahlgehaltes in Verbindung mit einer gleichzeitigen Zunahme von Kunststoffen in Altfahrzeugen erkennbar. Bei der Altfahrzeugverwertung reduzieren sich damit wirtschaftlich relevante Metallinhalte zur Verwertung. Die stoffliche Verwertung der Kunststoffe gewinnt an Bedeutung. Im Bericht des BMUB aus dem Jahr 2014 sind die Metallinhalte von Neufahrzeugen aus dem Jahr 2000 von 10 verschiedenen anonymisierten Fahrzeugherstellern aufgezeigt. Dies entspricht in etwa den derzeitig zur Verarbeitung anfallenden Fahrzeugen mit einem Alter von 14 Jahren. Bild 1 zeigt den Median, Quantil sowie die minimalen und maximalen Fe- und NE-Metallinhalte dieser Fahrzeuge [5].

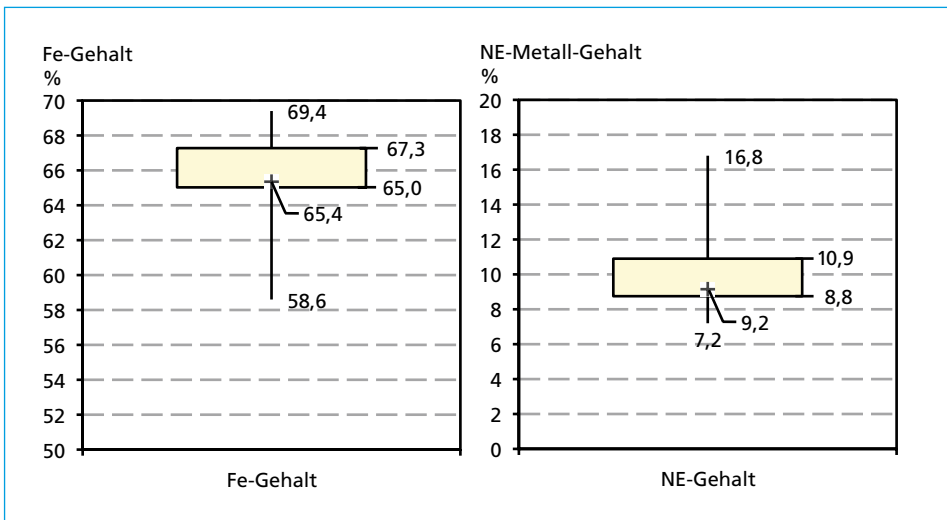


Bild 1: Boxplot-Darstellung der Metallgehalte von Fe- und NE-Metallen für verschiedene Fahrzeughersteller und ihre Neufahrzeuge des Jahres 2000 in Deutschland

Quelle: Kohlmeyer, R.: Jahresbericht über die Altfahrzeug-Verwertungsquoten in Deutschland im Jahr 2012, BMUB – Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, Referat/Division WR II 3, Fachgebiet/Section III 1.6

In Abhängigkeit von den Fahrzeugherstellern und der Fahrzeugklasse ergeben sich große Schwankungen in den Metall-Gehalten. Auffällig sind bereits zu diesem Zeitpunkt Fahrzeughersteller mit sehr niedrigen Metallinhalten von < 60 Prozent Gehalt an Fe-Metallen. NE-Metalle werden mit einem großen Schwankungsbereich zwischen 7 und 16 Prozent angegeben. Mit Zunahme von Elektronik und unter Verwendung von Leichtmetallen stellen diese Werkstoffe wirtschaftliche bedeutsame Wertstoffe bei der Aufbereitung dar.

Aktuell produzierte Modellreihen der Fahrzeughersteller werden überwiegend erst in einigen Jahren als Altfahrzeuge zur Verwertung anstehen. Allerdings entstehen bereits heute in der Produktions- und Nutzungsphase der Fahrzeuge (z.B. Fehlchargen oder Unfallwagen) nicht unerhebliche Stoffströme, die bei einer Produktions- und Verwertungsplanung zu berücksichtigen sind.

Bei Auswertung von Quellen fällt auf, dass die Angabe der Werkstoffgehalte zum Großteil prozentual erfolgt. Dies kann ohne Berücksichtigung des Fahrzeuggewichtes zu Fehleinschätzungen führen. Betrachtet man z.B. den VW Golf, dessen stoffliche Zusammensetzung und Leergewichte über mehrere Generationen hinweg, in Bild 2 dargestellt sind, so lässt sich dies gut nachvollziehen. Der prozentuale Gehalt an Fe- und NE-Metallen reduziert sich von Golf II über Golf V zu Modell Golf VII kontinuierlich. Jedoch führt erst das sinkende Fahrzeugleergewicht von Golf V zu Golf VII zu einer Reduktion der absoluten Menge verwertbarer Metallgehalte je Fahrzeug [2, 22]. Dieser Trend dürfte sich fortsetzen.

Mit einem durchschnittlichen Alter der Altfahrzeuge von 12 bis 15 Jahren liegt der derzeitige Fokus der Verwertung auf den Baujahren 2000 bis 2003. Damit rückt auch der im Beispiel dargestellte VW Golf V aus den Jahren 2003-08 ins Blickfeld. Wenn der Golf als Referenz dient, bedeutet dies, dass in den kommenden 5 Jahren der Peak des Metallaufkommens je Fahrzeug erreicht wird und danach mit sinkenden Fahrzeugleergewichten in Verbindung mit sinkenden Fe- und NE-Metallen, mit einem überproportionalen Rückgang der Gehalte verwertbarer metallischer Bestandteile gerechnet werden muss.

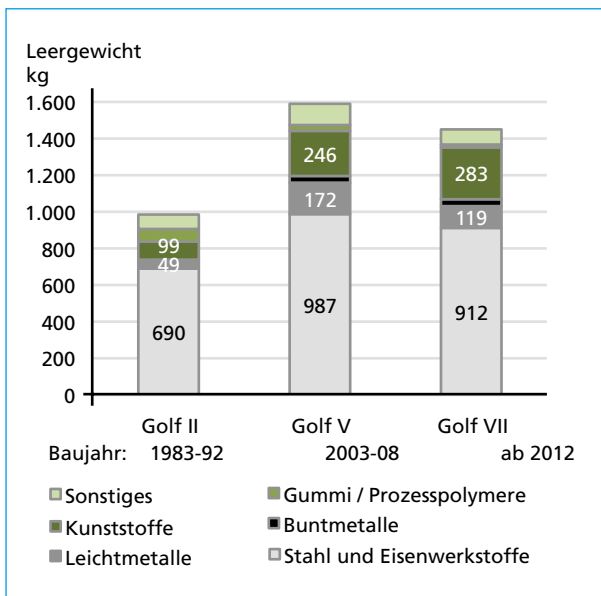


Bild 2:

Leergewicht inklusive Betriebsflüssigkeiten und stoffliche Zusammensetzung des VW-Golfs unterschiedlicher Baureihen

Quellen:

Goldmann, D.: Stand der Altfahrzeugverwertung – Entwicklung der letzten zwanzig Jahre und Perspektiven für die Zukunft. Thomé-Kozmiensky, K. J.; Goldmann, D. (Hrsg): Recycling und Rohstoffe, Band 2, Nietwerder: TK Verlag Karl Thome-Kozmiensky, 2009, S. 471 ff
VW-Konzern

Leichtere Fahrzeuge werden über u.a. durch strukturellen Leichtbau mit einem effizienteren Materialeinsatz in Verbindung mit Verwendung von Werkstoffen höherwertiger Eigenschaften ermöglicht.

Veränderungen in der Werkstoffauswahl zeigen sich am deutlichsten im Aufbau der Karosserie. Wiederum soll am Beispiel des VW Golf die Substitution von Stahl durch hochfeste adaptive Stahlwerkstoffe dargestellt werden (Bild 3). Bestand die Karosserie des Golf VI noch zu 34 Prozent aus Tiefziehstählen und zu 60 Prozent aus hoch- und höchstfesten Stählen (Rest 6 Prozent Vergütungsstahl), werden in der nächsten Generation des Golf VII nur noch 20 Prozent Tiefziehstähle und zu 52 Prozent gehärtete Vergütungsstähle eingesetzt (Rest 28 Prozent hochfester Stahl) [18, 21]. Diese Tendenz lässt sich auch bei anderen Fahrzeugherstellern erkennen und ist auf die Umsetzung einer konsequenten Leichtbauweise der Fahrzeuge zurückzuführen.

Der serienmäßige Einsatz von Leichtbaulösungen hängt sehr stark von den damit verbundenen Mehrkosten sowohl bei Material als auch Verarbeitung ab. Durch Leichtbauweisen mit modernen Stahlwerkstoffen sind bei einer Gewichtsreduktion von 5 bis 25 Prozent mit Mehrkosten von 20 bis 50 Prozent verbunden. Mit Aluminiumkonstruktionen lassen sich bei Mehrkosten von schätzungsweise 150 bis 250 Prozent Gewichtseinsparungen von etwa 50 bis 60 Prozent gegenüber Stahl realisieren. Für kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe mit unidirektionalen Gelege lassen sich mehr als 75 Prozent Gewichtseinsparungen gegenüber Stahl erzeugen. Dies ist allerdings nach Angaben einer Studie von Roland Berger mit Mehrkosten von bis zu 900 Prozent im Vergleich zu Stahl verbunden [7].

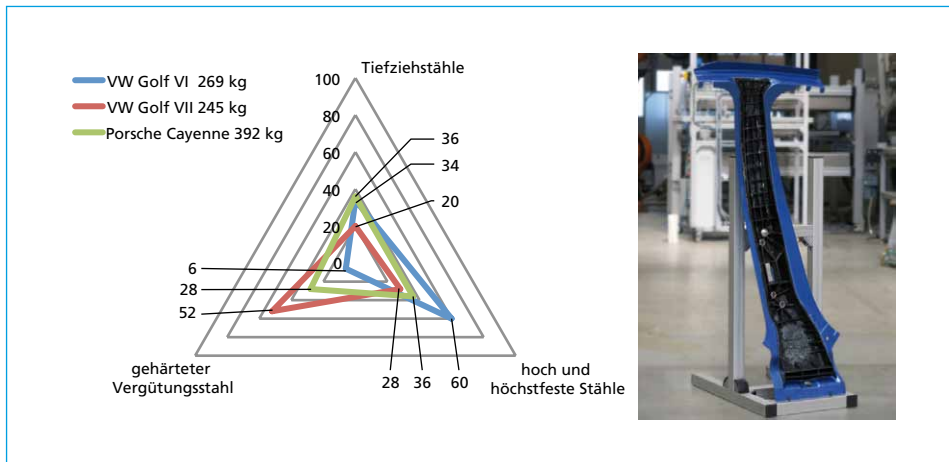


Bild 3: Stahlgüten in der Roh-Karosserie des VW Golf VI, VII und Porsche Cayenne, (links) B-Säulen-Demonstrator aus Vergütungsstahl mit faserverstärkten Thermoplast des ILK Dresden (rechts)

Quellen:

links:

Schwedler, O.; Jüttner, S.: Formhärten im Automobilbau – Wissenschaftliche Grundlagen, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Wolfsburg, 2013

Vogt, H.P.; Kefler, L.: Fahrzeugbau: Werkstoffe und Komponenten Fertigung Karosserie, Thyssen Krupp 2011

rechts:

Maaß, J.; Gude, M.: Composites Europe 2014: Wissenschaftler der TU Dresden stellen Neuentwicklungen vor, Höchstbelastete PKW-Karosseriestrukturen in Multi-Material-Design, 3D-Hybrid-Strukturen, ILK Dresden

Die rasant fortschreitende Fertigungsforschung für diese Verbundwerkstoffe geht mit fallenden Einsatzpreisen und einem vermehrten Einsatz einher. Dies ist sehr deutlich am Beispiel des BMW i3 mit einer Karosserie aus überwiegend kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff (CFK) nachzuvollziehen. Von einer Erweiterung der Leichtbaulösungen vom Premiummarkt in den Massenmarkt ist auszugehen. Mit industrieller Verfügbarkeit und Etablierung am Markt wird der Einsatz von Leichtbauwerkstoffen ansteigen [21, 18, 23]. Nach Angaben von VW sind Mehrkosten von 2,5 EUR pro kg Gewichtseinsparung akzeptabel. Dieser Wert könnte sich mit den restriktiveren Vorgaben für den CO₂ Flottenverbrauch zukünftig weiter erhöhen [18].

Zusammenfassend ist einzuschätzen, dass die Vielfalt der Einsatzstoffe sowie deren Kombination zunehmen werden. Zur Illustration dient eine B-Säule in Hybridbauweise mit Vergütungsstahl, versteift mit einem faserverstärkten thermoplastischen-Kunststoff, die am Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik (ILK) an der TU Dresden als Ergebnis eines Forschungsprojektes vorgestellt wurde (Bild 3) [9].

2. Entwicklungstendenzen im Leichtbau

Der konsequente Leichtbau von Fahrzeugen wird von zwei wichtigen Faktoren getrieben. Die Korrelation zwischen Energieverbrauch eines bewegten Fahrzeuges und dessen Gewicht ist nachgewiesen und führt zu großen Anstrengungen der Fahrzeugbauer, durch Gewichtsreduktion den Flottenverbrauch zu reduzieren (Flottenziel 95 g/km in der EU). Um den Verbrauch einer ganzen Flotte zu senken, ist allerdings der Leichtbau auch im Massenmarkt zu etablieren [1,14, 21]. Dies trifft ebenso für den relativ neuen Marktbereich der Elektromobile zu und wird durch mögliche Verbote von Verbrennungsmotoren in Großstädten in China oder die Zielstellung der Deutschen Bundesregierung von einer Million Elektrofahrzeugen in Deutschland im Jahr 2020 forciert [8, 15, 16].

Im Rahmen der national offenen Plattform FOREL wurde 2014 unter Federführung des ILK gemeinsam mit dem Laboratorium für Werkstoff- und Fügechnik (LWF, Universität Paderborn), dem Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (iwb, Technische Universität München) sowie dem Institut für Aufbereitungsmaschinen (IAM, Technische Universität Bergakademie Freiberg) eine Umfrage unter Entscheidern und Experten der Fahrzeugindustrie und Zulieferindustrie initiiert.

Anhand von Experteneinschätzungen sollten aktuelle Herausforderungen im Umgang mit Leichtbaustrukturen identifiziert werden. Es wurde ein möglichst ganzheitlicher Ansatz verfolgt. Die beteiligten Unternehmen lagen im Umsatz und Größe zwischen Start-Ups und hochspezialisierten Kleinbetrieben bis hin zu Zulieferern und Fahrzeugbauern aus der Automobilbranche. Letztere beeinflussen mit eigenen strategischen Ansätzen die Entwicklung zukünftiger Elektroautomobile ganz maßgeblich, was bei der Einordnung der entsprechenden Antworten besonders berücksichtigt werden sollte und im Vergleich interessante Rückschlüsse auf Entwicklungspotentiale zulässt. Für ein möglichst breites Meinungsspektrum wurden darüber hinaus Vertreter aus Unternehmen der Luft- und Raumfahrtbranche, von Herstellern für Chemie, Rohstoffe und

Halbzeuge, Elektronik sowie dem Maschinen- und Anlagenbau einbezogen. Insgesamt gaben etwa 240 Experten Einblick in ihre Einschätzungen zu aktuellen Entwicklungen im Fahrzeugbau.

Die Ergebnisse der Studie erlauben Schlussfolgerungen zur zukünftigen Gestaltung von Automobilen. Auch wenn die aktuell vom Fließband rollende Fahrzeuggeneration erst in mehreren Jahren in nennenswerten Stückzahlen als Altfahrzeuge zur Verwertung gelangt, sind deren Produktionsabfälle bereits jetzt im Umlauf. Daher sind die Ergebnisse bereits für aktuelle Planungen im Recycling wertvoll und finden rege Aufmerksamkeit auch bei großen Recyclingunternehmen.

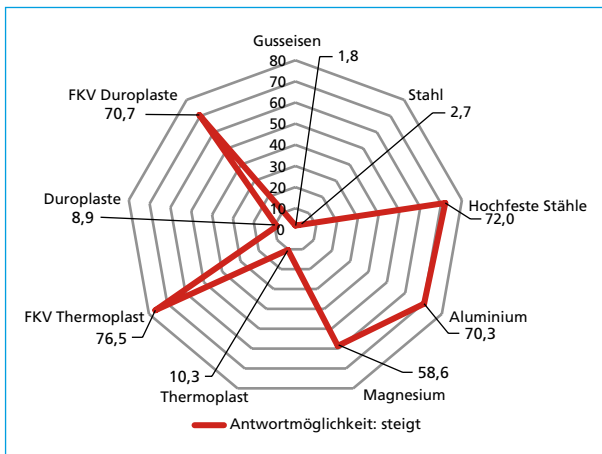


Bild 4:

Auswertung der FOREL-Studie zum Thema Entwicklung des zukünftigen Werkstoffeinsatzes im Fahrzeugbau, Darstellung der Antwortmöglichkeit *steigt*, alle Branchen (FKV Faserkunststoffverbund)

Die Befragten wurden gebeten, Fragen über den zukünftigen Einsatz von Werkstoffen für Leichtbaustrukturen zu beantworten. Aus den in Bild 4 dargestellten Antworten lassen sich folgende Aussagen ableiten:

- 1.) Die Substitution von Stahl und Gusseisen durch hochfeste Stähle nimmt weiter zu.
- 2.) Für Leichtmetalle wie Aluminium und das bisher nur in Nischen verwendete Magnesium werden große Zuwachsraten erwartet.
- 3.) Auf Seiten der Kunststoffe nimmt der Einsatz von Standardkunststoffen ab. Diese werden durch Faser-Kunststoff-Verbunde (FKV) mit verbesserten Eigenschaften ersetzt.
- 4.) Mit steigender Bedeutung dieser FKV wird auch die Anzahl der Einsatzstellen für diese Materialien drastisch zunehmen.
- 5.) Die Bedeutung von thermoplastisch faserverstärkten Kunststoffen nimmt im Fahrzeugbau zu.
- 6.) Thermoplastische Kunststoffe werden aus unterschiedlichen Matrixmaterialien wie Polyamid (PA6) oder Polypropylen (PP) in Verbindung mit unterschiedlichen Faserverstärkungen in Form von Glasfasern oder Kohlenstofffasern verstärkt.

Zu dem Bereich der metallischen Werkstoffe, in dem bereits heute die Vielfalt der eingesetzten Materialien die stoffliche Verwertung zu einer sehr anspruchsvollen Aufgabe macht, kommt künftig eine drastisch steigende Stoffvielfalt von faserverstärkten Kunststoffen hinzu.

Aus den bisher genannten Werkstoffen ist eine ganze Reihe von Kombinationsmöglichkeiten für Werkstoffverbunde erdenklich. Einerseits erfolgt die Kombination in Mischbauweise durch Fügen von zwei Werkstoffen mit Fügezone, bei dem jedes Material seine spezifischen Eigenschaften behält. Andererseits erfolgt die Kombination als hybrider Werkstoffverbund ohne Fügeelement (stoffschlüssige Verbindung) mit einem Eigenschaftsprofil, das sich aus dem Gesamtsystem ergibt [12].

In der durchgeführten FOREL-Umfrage wurde daraufhin nach Werkstoffkombinationen gefragt, die künftig für Leichtbaustrukturen eingesetzt werden. Mehrfachnennungen waren möglich. Kombinationsmöglichkeiten gleichartiger Stoffe wie Stahl-Stahl wurden bei der in Bild 5 dargestellten Auswertung nicht abgebildet.

Auf Grund der vielseitigen Verwendung von hochfestem Stahl waren auch die Kombinationen von Stahl mit anderen Werkstoffen stark vertreten. Dabei stellte der Werkstoffverbund Stahl-Leichtmetall die am häufigsten genannte Variante dar. Große Bedeutung erlangt zunehmend die Kombination Metall und Faserkunststoffverbund (FKV), wobei die Befragten die Kombination mit thermoplastischen Basismatrixwerkstoffen etwas häufiger wählten, als jene mit duroplastischer Matrix. Einige Befragte gaben auch die Kombination thermoplastischer mit duroplastischen faserverstärkten Werkstoffen an. Unter Berücksichtigung der Variantenvielfalt der Faserkunststoffverbunde, kann es auch zur Kombination kohlenstofffaserverstärkter duroplastischer CFK mit glasfaserverstärkten Thermoplasten (GFK) kommen, auch im Verbund mit Leichtmetall oder hochfesten Stählen. Offensichtlich wird keine Kombinationsmöglichkeit ausgeschlossen.

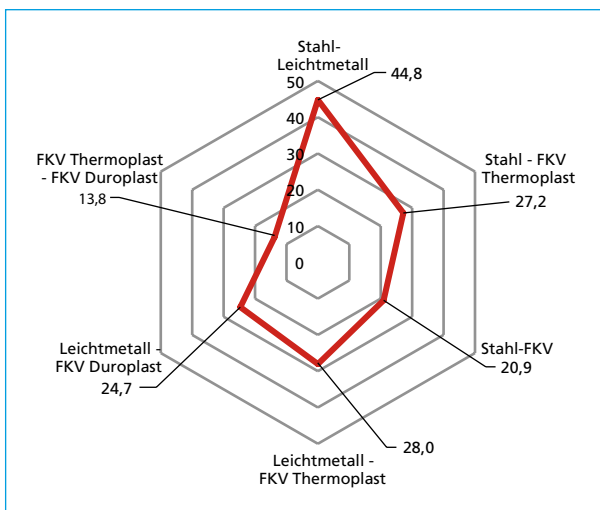


Bild 5:

Auswertung der FOREL-Studie zum Thema Kombination von Werkstoffen für Leichtbaustrukturen in Mischbauweise, alle Branchen

Klar erkennbar ist, dass es aus Sicht der Befragten nicht *den* Werkstoff der Zukunft gibt, sondern dass vielmehr eine Kombination sehr unterschiedlicher Werkstoffe zum Einsatz kommen wird [4].

Ein Beispiel für die beschriebene zukünftige Multi-Material-Bauweise in konsequenter Leichtbauweise stellt die Entwicklung des Demonstratorfahrzeugs InEco am Instituts für Leichtbau und Kunststofftechnik (ILK) der TU Dresden dar [23] (Bild 6).

Deutlich wird sowohl beim Super Light Car-Prototyp (SLC) als auch bei InEco-Demonstratorfahrzeug zum einen der gegenüber aktuellen Fahrzeuge wie dem VW Golf VII nochmals rückläufige Stahlanteil. Zum anderen ist jedoch auch erkennbar, dass die in beiden Fahrzeugen realisierten Konzepte einen völlig unterschiedlichen Materialmix einsetzen. Während beim SLC-Prototyp mehr als 50 Prozent der Karosserie als metallischen Werkstoffen besteht, sind dies beim InEco-Demonstratorfahrzeug weniger als 25 Prozent im Gesamtfahrzeug. Entsprechend unterschiedlich sollten sich auch die stofflichen Verwertungsstrategien beim Recycling gestalten.

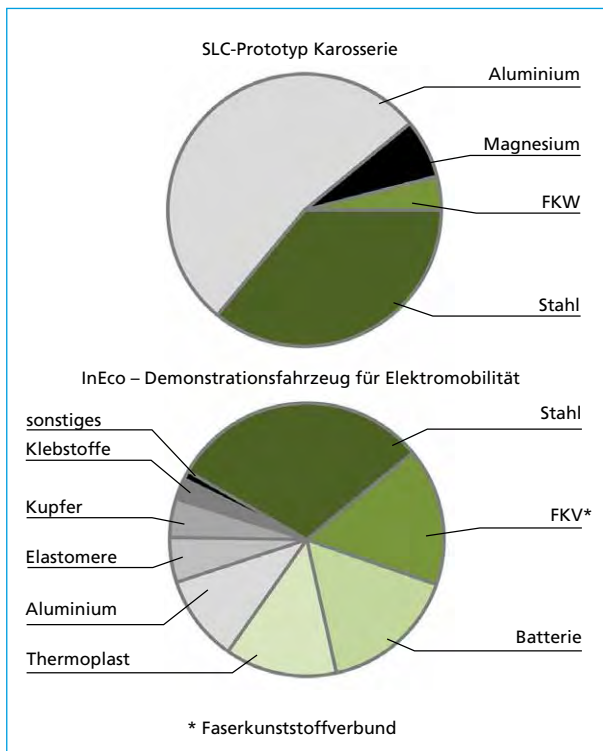


Bild 6:

Stoffliche Zusammensetzung von Fahrzeugstudien in konsequenter Leichtbauweise, oben: Super-Light-Car Prototyp (SLC) einer Karosserie (2011), unten: Demonstratorfahrzeug InEco des ILK als Elektrofahrzeug (2014)

Quellen:

oben: Vogt, H.P.; Keßler, L.: Fahrzeugbau: Werkstoffe und Komponenten Fertigung Karosserie, Thyssen Krupp 2011

unten: Werner, J.: Hochleistungsselektrofahrzeuge in Ultraleichtbauweise – das InEco Projekt, 17. Internationales Dresdner Leichtbausymposium Funktionsintegrativer Systemleichtbau in Multi-Material-Design, Juni 2013

3. Abschätzung einer Auswirkung auf das Recycling

Auf Grund der sich ändernden Rahmenbedingungen und der zunehmenden Umsetzung des Leichtbaus, werden sich Veränderungen sowohl in der Konstruktion der Fahrzeuge als auch in der stofflichen Zusammensetzung ergeben. Dies wird unweigerlich

Handlungsbedarf hinsichtlich der Recyclingverfahren und Verwertungskonzepte nach sich ziehen. Auf Grund des Einsatzes relativ *neuer* Werkstoffe, eines aus heutiger Sicht noch schwer planbaren Mengeneinsatzes und Verbauungszustands dieser Werkstoffe sowie neuartiger Verbundeigenschaften besteht hoher Forschungsbedarf zur Entwicklung geeigneter Aufbereitungsstrategien für das Recycling. Vor dem Hintergrund der Nachweispflicht für die Verwertbarkeit neuer Fahrzeugmodelle liegen die Forschungsschwerpunkte derzeit bei den Fahrzeugherstellern. Dies betrifft vor allem die Entwicklung von Aufbereitungs- und Verwertungskonzepten für kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe (CFK). Für die Altfahrzeugaufbereitung sowie deren Komponenten lassen sich zwei grundlegende Szenarien mit entsprechendem Forschungsbedarf ableiten:

- a) Bei Mitaufbereitung in der konventionellen Anlagentechnik
 - Verhalten im Zerkleinerungsraum und Zerkleinerungserfolg,
 - Verbundaufschluss,
 - Verschleißverhalten und Energiebedarf.
- b) Bei frühzeitiger Entnahme von Bauteilen mit kritischen oder wirtschaftlich interessanten Werkstoffen mit anschließender adaptiver Aufbereitung
 - Werkstoffidentifikation, sowohl der Matrixmaterialien als auch der Faserverstärkungen,
 - Demontagetechnologien und alternativer Verbundaufschluss,
 - Wiederverwertungsmöglichkeiten der Fasern.

In beiden Konzepten spielen Aufschluss- und Sortierprozesse eine entscheidende Rolle, da eine Anpassung bestehender und die Entwicklung neuer Sortierprozesse, insbesondere für die Trennung der Fasern oder faserhaltiger Stoffe, erfolgen muss. Die Sortierprodukte müssen mit geeigneten Methoden charakterisiert sowie der Aufschlussgrad gekennzeichnet werden. Dies trifft sowohl für FKV und deren Bestandteile als auch für Metallwerkstoffe in ihrer immer größer werdenden Eigenschaftsvielfalt zu.

Die massenhafte Verwertung faserverstärkter Kunststoffe ist über konventionelle Wege kaum möglich. Daher wird künftig deren Separation in Verbindung mit einer adaptiven Aufbereitung und geeigneten Verwertungskonzepten erforderlich. Hierzu gibt es derzeit eine Reihe von Forschungsansätzen, teilweise ganzheitlich mit Wiedereinsatz der Sekundärwerkstoffe (überwiegend Fasern).

Glasfaserverstärkte Kunststoffe werden bereits heute zur Verwertung in der Zementindustrie eingesetzt [17]. Für kohlefaserverstärkte Kunststoffe bietet die Pyrolyse eine Möglichkeit zur Faserrückgewinnung [11]. Ganzheitliche Forschungsansätze zur Rückgewinnung und Wiedereinsatz von Fasern verfolgen bereichsweise die Projekte MAI-Recycling (2012-2015) und ReLei (2014-2017) in Zusammenarbeit mit unterschiedlichen Industrie- und Forschungspartnern [3, 6].

Wirtschaftliche Potentiale ergeben sich hinsichtlich hochwertiger metallischer Einsatzstoffe wie Aluminium und dessen Legierungen oder den gezeigten hochfesten Stählen. Diese können bei einer separaten Verwertung höhere Erlöse erzielen als das bisherige

Stahlprodukt der Großshredder. Einige Einsatzstoffe wie hochfeste Stähle führen allerdings zur Erhöhung von Verschleiß und damit zur Verkürzung von Reparaturzyklen in Verbindung mit einem wirtschaftlichen Mehraufwand.

Bei der Zerkleinerung von kohlenstofffaserverstärkten Strukturen kann es zur Freisetzung von Kohlenstofffasern kommen, mit ungewünschten Folgen für Mensch, Maschine, Elektrotechnik und die Recyclingprodukte. Frei vorliegende Fasern können mitunter zu den Feinststäuben PM10 gezählt werden und bergen ggf. gesundheitliche Risiken. Nach Kriterien der Weltgesundheitsorganisation (WHO) sind insbesondere Fasern der Durchmesser $< 3 \mu\text{m}$ mit einem Faserlängen-/Faserdurchmesserverhältnis von mehr als 3:1 als kritisch einzuschätzen. Vereinzelt Fasern liegen mit einem Filamentdurchmesser von etwa 4 bis 6 μm in der Nähe dieses kritischen Bereiches. Eine Freisetzung kritischer Fasern nach einer mechanischen Bearbeitung von CFK-Materialien z.B. durch Spleißen konnte bisher allerdings noch nicht nachgewiesen werden. Da zerteilte CFK-Strukturen jedoch mitunter sehr scharfkantig sein können, Kohlenstofffasern elektrisch leitfähig sind und daher elektrische Schaltungen oder Schaltschränke beschädigen, ist ein sorgfältiger Umgang mit den Materialien z.B. durch entsprechende Absaug- und Filtereinrichtungen, die Vermeidung von direkten Hautkontakten sowie einer Querkontamination von Fasern in Sekundärprodukte dringend geboten. Insbesondere auch bei der Mitaufbereitung von CFK sind daher entsprechende Schutzvorkehrungen zu beachten [10, 13, 20].

Zusammenfassend ist die Änderung der Werkstoffzusammensetzung und -struktur viel komplexer und umfangreicher als bisher angenommen. Mit Zunahme *neuer* Werkstoffe wie faserverstärkter Kunststoffe und einer extrem wachsenden Vielzahl von Materialkombinationen in Mischbauweise ergeben sich daraus zwar neue wirtschaftliche Marktpotentiale aber auch wirtschaftliche und anlagentechnische Herausforderungen für das Recycling, an die frühzeitig eine Anpassung bestehender Aufbereitungs- und Verwertungskonzepte erfolgen sollte.

Dieses Forschungs- und Entwicklungsprojekt wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmenkonzept *Innovationen für die Produktion, Dienstleistung und Arbeit von morgen* (Förderkennzeichen 02PJ2760 – 02PJ2763) und mit Mitteln aus dem Energie- und Klimafonds gefördert und vom Projektträger Karlsruhe (PTKA) betreut. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

4. Quellen

- [1] Beckmann, P. et al.: Kosten und Potenziale der Vermeidung von Treibhausgasemissionen in Deutschland, Studie von McKinsey & Company, Inc., erstellt im Auftrag von BDI initiativ – Wirtschaft für Klimaschutz, McKinsey&Company,Inc., 2007
- [2] Goldmann, D.: Stand der Altfahrzeugverwertung – Entwicklung der letzten zwanzig Jahre und Perspektiven für die Zukunft. Thomé-Kozmiensky, K. J.; Goldmann, D. (Hrsg): Recycling und Rohstoffe, Band 2, Nietwerder: TK Verlag Karl Thome-Kozmiensky, 2009, S. 471 ff

- [3] Gude, M.; Stegelmann, M.: Forschungsprojekt *ReLei*: Recycling-Strategien für Leichtbaustrukturen in Elektrofahrzeugen, 2014 <http://plattform-forel.de/relei/>
- [4] Gude, M.: Technologieplattform FOREL als Sprungbrett für die Hightech-Industrie, 18. Internationales Dresdner Leichtbausymposium, Dresden Juni 2014
- [5] Kohlmeyer, R.: Jahresbericht über die Altfahrzeug-Verwertungsquoten in Deutschland im Jahr 2012, BMUB – Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, Referat/Division WR II 3, Fachgebiet/Section III 1.6
- [6] Kreibe, S.: MAI-Recycling Projektbeschreibung, im Rahmen MAI Carbon – Die Spitzencluster Initiative, <http://www.mai-carbon.de/index.php/en/cluster-organization/projects/mai-recycling>
- [7] Lässig, R. et al.: Serienproduktion von hochfesten Faserverbundbauteilen – Perspektiven für den deutschen Maschinen- und Anlagenbau, Studie, Roland Berger Strategy Consultants und VDMA, S.14, 2012
- [8] Leichtbaustudien – Markt- und Wertschöpfungskettenanalyse, 2. Workshop – Leichtbau-Strategie BW, 2014 im Haus der Wirtschaft, Stuttgart
- [9] Maaß, J.; Gude, M.: Composites Europe 2014: Wissenschaftler der TU Dresden stellen Neuentwicklungen vor, Höchstbelastete PKW-Karosseriestrukturen in Multi-Material-Design, 3D-Hybrid-Strukturen, ILK Dresden
- [10] Max, D.: CFK – Gefährdungspotenzial bei mechanischer Überbeanspruchung und bei Brand, Erste Erkenntnisse aus der Brandschutzforschung der Bundesländer, BrandSchutz, S. 428, Verlag W. Kohlhammer, Stuttgart, 06.2014, 68. Jahrgang,
- [11] Meines, D.; Eversmann, B.: Recycling von Carbonfasern. Thomé-Kozmiensky, K. J.; Goldmann, D. (Hrsg): Recycling und Rohstoffe, Band 7, Nietwerder: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2014, S. 371 ff,
- [12] Nestler, G.-J.: Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde – Status quo und Forschungsansätze, TU Chemnitz, 2012
- [13] o.V.: Bearbeitung von CFK Materialien – Orientierungshilfe für Schutzmaßnahmen bei der Bearbeitung von CFK Materialien, DGUV-Information, Berufsgenossenschaft Fachbereich Holz und Metall, FB HM-074, Mainz 2014
- [14] o.V.: Verordnung – EG - Nr. 715/2007 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 20. Juni 2007 über die Typgenehmigung von Kraftfahrzeugen hinsichtlich der Emissionen von leichten Personenkraftwagen und Nutzfahrzeugen – Euro 5 und Euro 6, 2007 (ABl. EU Nr. L 171, S.1), zuletzt geändert am 2008 (ABl. EU Nr. L 199, S. 1)
- [15] Plötz P, Gnann T., Kühn A, Wietschel M.: Markthochlaufszszenarien für Elektrofahrzeuge, Studie im Auftrag der acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften und der Arbeitsgruppe 7 der Nationalen Plattform Elektromobilität (NPE), Fraunhofer - Institut für System - und Innovationsforschung ISI, Karlsruhe 2014
- [16] Püschner, M.; Melzer, J.; Rother, A.: Fortschrittsbericht 2014 – Bilanz der Marktvorbereitung, Nationale Plattform Elektromobilität (NPE), Herausgeber: Gemeinsame Geschäftsstelle Elektromobilität der Bundesregierung (GGEMO), Berlin 2014
- [17] Ridzewski, Recycling von GFK und CFK, Leichtbau-Faserverbundkunststoffe, IMA Dresden, 2012
- [18] Schwedler, O.; Jüttner, S.: Formhärten im Automobilbau – Wissenschaftliche Grundlagen, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Wolfsburg, 2013
- [19] Trechow, P.: VDI-Autokongress – Leichtbau ist die Königsdisziplin, VDI-Nachrichten 08/2013
- [20] Unger, T.: Berichte der ADAC Unfallforschung, Schneidversuche für die Rettung am BMW i3 mit Carbon-Karosserie, Veröffentlichung in ADAC Motorwelt 9/2014, ADAC Unfallforschung im ADAC Technik Zentrum Landsberg/Lech

- [21] Vogt, H.P.; Keßler, L.: Fahrzeugbau: Werkstoffe und Komponenten Fertigung Karosserie, Thyssen Krupp 2011
- [22] VW-Konzern
- [23] Werner, J.: Hochleistungselektrofahrzeuge in Ultraleichtbauweise – das InEco Projekt, 17. Internationales Dresdner Leichtbausymposium Funktionsintegrativer Systemleichtbau in Multi-Material-Design, Juni 2013

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

Karl J. Thomé-Kozmiensky, Daniel Goldmann (Hrsg.):
Recycling und Rohstoffe – Band 8

ISBN 978-3-944310-20-6 TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky

Copyright: Professor Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. Karl J. Thomé-Kozmiensky
Alle Rechte vorbehalten

Verlag: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky • Neuruppin 2015
Redaktion und Lektorat: Professor Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. Karl J. Thomé-Kozmiensky,
Dr.-Ing. Stephanie Thiel, M.Sc. Elisabeth Thomé-Kozmiensky
Erfassung und Layout: Ginette Teske, Sandra Peters, Carolin Bienert, Janin Burbott,
Max Müller, Cordula Müller
Druck: Mediengruppe Universal Grafische Betriebe München GmbH, München

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funk- sendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürfen.

Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien, z.B. DIN, VDI, VDE, VGB Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden sein, so kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.