

VDI

Zentrum  
Ressourceneffizienz

VDI ZRE Publikationen: Kurzanalyse Nr. 3



# Kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe im Fahrzeugbau - Ressourceneffizienz und Technologien

März 2013

Kurzanalyse Nr. 3: Kohlenstoffaserverstärkte Kunststoffe im Fahrzeugbau - Ressourceneffizienz und Technologien; 3. Auflage 2016

Diese Kurzanalyse entstand im Auftrag der VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH und wurde durch die VDI Technologiezentrum GmbH erstellt.

Das Fachgespräch wurde in Kooperation mit der VDI-Fachgesellschaft „Materials Engineering“ durchgeführt.

Die Kurzanalyse wurde im Rahmen der Nationalen Klimaschutzinitiative des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit erstellt.

Herzlichen Dank an Prof. Dr. Heinz Voggenreiter für seine fachlichen Inputs zur Kurzanalyse und zum Fachgespräch.

Die Kurzanalysen des VDI ZRE geben einen Überblick über aktuelle Entwicklungen des Themas Ressourceneffizienz in Forschung und industrieller Praxis. Sie enthalten eine Zusammenstellung relevanter Forschungsergebnisse, neuer Technologien und Prozesse sowie Gute-Praxis-Beispiele. Damit verschaffen die Kurzanalysen einem breiten Publikum aus Wirtschaft, Forschung und Verwaltung einen Einstieg in ausgewählte Themenfelder der Ressourceneffizienz.

Autoren:

Dr. Heinz Eickenbusch, VDI Technologiezentrum GmbH

Dr. Oliver Krauss, VDI Technologiezentrum GmbH

Fachlicher Ansprechpartner:

Kerstin Drechsler, VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH

Redaktion:

VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH (VDI ZRE)

Bertolt-Brecht-Platz 3

10117 Berlin

Tel. +49 30-27 59 506-0

Fax +49 30-27 59 506-30

zre-info@vdi.de

www.ressource-deutschland.de

Satz und Gestaltung: Christian Maciejewski

Titelbild: © VDI ZRE

Druck: LASERLINE Druckzentrum Berlin KG, Scheringstraße 1, 13355 Berlin-Mitte

Gedruckt auf umweltfreundlichem Recyclingpapier.

Kohlenstofffaserverstärkte  
Kunststoffe im Fahrzeugbau -  
Ressourceneffizienz und Technologien

Kurzanalyse Nr. 3  
und Dokumentation des Fachgesprächs



# Inhaltsverzeichnis

1. EINLEITUNG	6
2. MARKTPOTENZIAL UND KOSTENENTWICKLUNG VON CFK	7
3. TECHNOLOGIEN FÜR DIE HERSTELLUNG VON CFK	14
Eigenschaften der Kohlenstofffaser	15
Herstellung von Kohlenstofffasern	16
Weiterverarbeitung von Kohlenstofffasern	19
4. ENTWICKLUNGS- UND ANWENDUNGSPOTENZIAL VON CFK IM FAHRZEUGBAU	22
Fertigungsverfahren	24
Modellierung und Simulation	32
Werkstoffprüfung und Qualitätssicherung	33
Serienproduktion von CFK im Automobilbau	35
5. RECYCLING VON CFK	38
6. BEDARF AN FORSCHUNG UND ENTWICKLUNG	43
7. PROGRAMM DES FACHGESPRÄCHS „KOHLENSTOFFFASERVERSTÄRKTE KUNSTSTOFFE IM FAHRZEUGBAU - RESSOURCENEFFIZIENZ UND TECHNOLOGIEN“	50
8. DOKUMENTATION DES FACHGESPRÄCHS „KOHLENSTOFFFASERVERSTÄRKTE KUNSTSTOFFE IM FAHRZEUGBAU - RESSOURCENEFFIZIENZ UND TECHNOLOGIEN“	51
9. ANHANG	59
Abbildungsverzeichnis	59
Fußnotenverzeichnis	60

## 1. EINLEITUNG

Carbon- bzw. kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe (CFK) gewinnen dank hervorragender mechanischer Eigenschaften bei geringem Gewicht kontinuierlich an Bedeutung. Nicht zuletzt mit Blick auf die Umwelt- und Klimaschutzpolitik wird es zukünftig einen Masseneinsatz im gesamten Leichtbausegment des Automobil-, Luftverkehrs- sowie Windenergiemarkts geben. Denn durch ihre Leichtbaueigenschaften, neuen Konstruktionsfreiräume und Möglichkeiten zur Funktionsintegration können CFK einen maßgeblichen Beitrag zur Ressourceneffizienz vor allem in der Nutzungsphase von Autos, Flugzeugen und anderen Produkten leisten. Allerdings ist die Herstellung kohlenstofffaserverstärkter Kunststoffe ressourcenintensiv und teuer. Um die Leichtbaupotenziale von CFK vollständig zu heben und industriell umzusetzen, sind daher noch erhebliche Anstrengungen in Forschung und Entwicklung zu leisten, die alle Stufen des Produktlebensweges von den Rohstoffen bis zum fertigen Bauteil und auch das hochwertige Recycling beziehungsweise die hochwertige Wiederverwertung betreffen.

Der Stand der Technik, die aktuellen technologischen Entwicklungen sowie weiterer Bedarf an Forschung und Entwicklung und Handlungsempfehlungen zur Steigerung der Ressourceneffizienz sind Gegenstand der vorliegenden Kurzanalyse. Die einzelnen Kapitel orientieren sich dabei am Produktlebensweg von CFK im Automobilbau.

Zur Vertiefung der Inhalte fand am 27. Februar 2013 in Augsburg ein Fachgespräch mit dem Titel „Kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe im Fahrzeugbau - Ressourceneffizienz und Technologien“ statt, zu dem das VDI Zentrum Ressourceneffizienz (VDI ZRE) gemeinsam mit der VDI Gesellschaft Materials Engineering (VDI-GME) eingeladen hatte. Das Ziel dieser Veranstaltung bestand darin, mit Experten entlang dem gesamten Produktlebensweg die größten Hürden für eine ressourceneffiziente Nutzung von CFK im Fahrzeugbau zu identifizieren und daraus Handlungsempfehlungen für die Akteure in der Forschung, Industrie

und Politik abzuleiten. Die insgesamt 22 Teilnehmer diskutierten Fragen zur Rohstoffsituation und ressourceneffizienten Herstellung von Kohlenstofffasern, zu den Chancen und Herausforderungen eines Einsatzes von CFK im Fahrzeugbau sowie zum CFK-Recycling und den Anwendungsmöglichkeiten recycelter Fasern. Eine Zusammenfassung der Ergebnisse des Fachgesprächs befindet sich im Anhang dieser Kurzanalyse.

## 2. MARKTPOTENZIAL UND KOSTENENTWICKLUNG VON CFK

Nach Angaben des Kompetenznetzwerks Carbon Composites e.V. (CCeV) wird der Bedarf an Kohlenstofffasern 2015 bereits die heute vorhandene Kapazität vollkommen beanspruchen. Die Anwendungsbereiche Industrie, Sport und Raumfahrt greifen bereits regelmäßig auf CFK zurück. Daneben stützen sich die viel versprechenden Marktprognosen zum CFK-Einsatz insbesondere auf die Windenergie und Luftfahrt. Die Strukturteile neuer Flugzeuge und insbesondere von Großflugzeugen werden in Zukunft bis zu 60 Prozent, bezogen auf das Flugzeug-Gesamtgewicht, aus CFK bestehen.<sup>1</sup> Auch für Windkraftanlagen im Leistungsbereich über fünf Megawatt werden größere, leichtere und stärkere Rotorblätter benötigt, deren strukturellen und mechanischen Anforderungen nur CFK gerecht werden kann. CCeV prognostiziert jährliche Wachstumsraten für den CFK-Markt von mindestens 13 Prozent, die auf erwartete steigende Absätze der Luftfahrtindustrie, aber auch der Automobilindustrie zurückzuführen sind.<sup>2</sup>

Eine von der Unternehmensberatung McKinsey durchgeführte Studie sieht den Markt für Kohlenstofffasern von 20.000 Tonnen im Jahr 2011 auf 500.000 Tonnen im Jahr

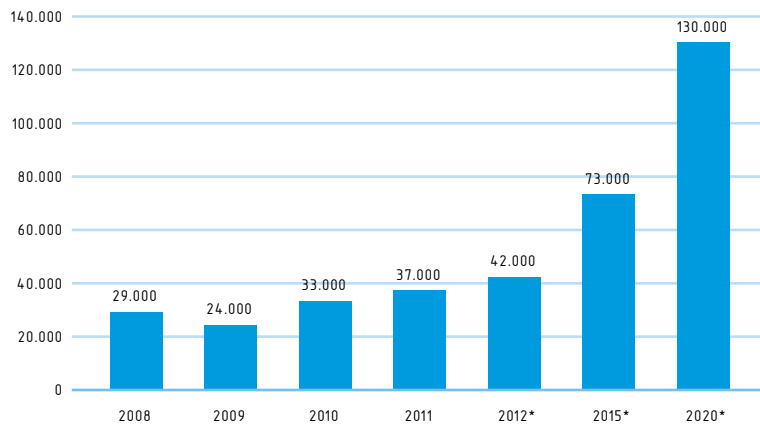
<sup>1</sup> Bernhard Jahn: Composites-Marktbericht 2011, Der globale CFK-Markt. Hrsg.: Carbon Composites e. V., September 2011; [http://www.carbon-composites.eu/sites/carbon-composites.eu/files/anhaenge/12/08/29/ccev-composites-marktbericht-2011\\_1.pdf](http://www.carbon-composites.eu/sites/carbon-composites.eu/files/anhaenge/12/08/29/ccev-composites-marktbericht-2011_1.pdf) (aufgerufen am 20.12.2013); Alfons Schuster: Composites-Marktbericht, Der CFK-Markt 2009/2010, Hrsg.: Carbon Composites e. V., September 2010; <http://www.carbon-composites.eu/sites/carbon-composites.eu/files/anhaenge/12/08/29/ccev-composites-marktbericht-2010.pdf> (aufgerufen am 20.12.2013)

<sup>2</sup> Birgit Niesing: Carbon in Serie. weiter.vorn 3.2012, [http://www.fraunhofer.de/de/publikationen/fraunhofer-magazin/2012/weitervorn\\_3-2012\\_Inhalt/weiter-vorn\\_3-2012\\_08.html](http://www.fraunhofer.de/de/publikationen/fraunhofer-magazin/2012/weitervorn_3-2012_Inhalt/weiter-vorn_3-2012_08.html) (aufgerufen am 20.12.2013)

2030 wachsen.<sup>3</sup> Der Marktbericht des Carbon Composites e.V. (CCeV), der auf einer anderen Datengrundlage als die oben genannte McKinsey-Studie beruht, nennt für das Jahr 2011 einen Weltjahresbedarf von 37.000 Tonnen Kohlenstofffasern. Für das Jahr 2020, weniger als ein Jahrzehnt später, wird ein Bedarf von circa 130.000 Tonnen – das 3,5-Fache – prognostiziert (vgl. Abb. 1).

Von diesen 130.000 Tonnen Kohlenstofffaser-Bedarf im Jahr 2020 werden etwa 42 Prozent auf Windenergieanlagen, sieben Prozent auf den Flugzeugbau und sechs Prozent auf den Automobilbereich entfallen. Damit steigt auch die Anwendung im Automobilbereich wie der Gesamtmarkt um etwa 15 Prozent jährlich bis 2020, so dass sich der Bedarf an Kohlenstofffasern zwischen 2010 und 2020 von 2000 Tonnen auf 8000 Tonnen vervierfachen würde.<sup>4</sup>

Steigender Absatz  
von CFK erwartet.



**Abb. 1: Globaler Bedarf von Kohlenstofffasern in Tonnen 2008 – 2020 (\* Schätzungen)<sup>5</sup>**

Das Angebot von Kohlenstofffasern für CFK wird dominiert

<sup>3</sup> Daniel Lenkeit: Zukunftswerkstoff CFK mit starkem Aufwind. Germany Trade&Invest, 23.03.2012, <http://www.gtai.de/GTAI/Navigation/DE/Trade/maerkte,did=543902.html?view=renderPdf> (aufgerufen am 20.12.2013)

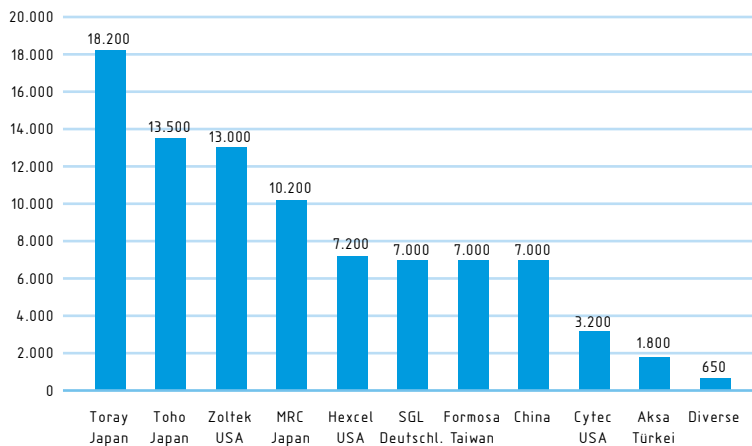
<sup>4</sup> Bernhard Jahn, Doris Karl: Composites-Marktbericht 2012, Der globale CFK-Markt. Hrsg.: Carbon Composites e. V., Oktober 2012; [http://www.carbon-composites.eu/sites/carbon-composites.eu/files/anhaenge/12/11/06/composites\\_marktbericht\\_2012\\_-\\_deutsch.pdf](http://www.carbon-composites.eu/sites/carbon-composites.eu/files/anhaenge/12/11/06/composites_marktbericht_2012_-_deutsch.pdf) (aufgerufen am 20.12.2013)

<sup>5</sup> Bernhard Jahn, Doris Karl: Composites-Marktbericht 2012, Der globale CFK-Markt. Hrsg.: Carbon Composites e. V., Oktober 2012; [http://www.carbon-composites.eu/sites/carbon-composites.eu/files/anhaenge/12/11/06/composites\\_marktbericht\\_2012\\_-\\_deutsch.pdf](http://www.carbon-composites.eu/sites/carbon-composites.eu/files/anhaenge/12/11/06/composites_marktbericht_2012_-_deutsch.pdf) (aufgerufen am 20.12.2013)



von Herstellern aus Japan (Toray, Toho, Mitsubishi Rayon [MRC]) und den USA (Zoltek, Hexcel). Der einzige deutsche Global Player ist SGL Carbon. Die Hersteller von Kohlenstofffasern bringen derzeit eine theoretische Gesamtkapazität von rund 90.000 Tonnen Kohlenstofffasern auf. Die größte installierte Kapazität für die Herstellung von Kohlenstofffasern findet sich mit rund 29 Prozent in den USA, gefolgt von Europa und Japan mit je 25 Prozent der Weltkapazität. China verfügt derzeit noch über einen kleinen Anteil von rund acht Prozent (vgl. Abb. 2). Dieser Anteil wird höchstwahrscheinlich in den nächsten Jahren deutlich zunehmen, da chinesische Kohlenstofffaser-Produzenten massive Kapazitätssteigerungen angekündigt haben.<sup>6</sup>

Hersteller aus USA und Japan dominieren.



**Abb. 2: Kohlenstofffaser-Kapazitäten nach Herstellern in Tonnen (2011)<sup>7</sup>**

In Zukunft könnte es zu Engpässen bei der Verfügbarkeit von Kohlenstofffasern kommen, die wie schon 2005/2006 zu temporären Preisanstiegen führen können. Ursache hier-

<sup>6</sup> Bernhard Jahn, Doris Karl: Composites-Marktbericht 2012, Der globale CFK-Markt. Hrsg.: Carbon Composites e. V., Oktober 2012; [http://www.carbon-composites.eu/sites/carbon-composites.eu/files/anhaenge/12/11/06/composites\\_marktbericht\\_2012\\_-\\_deutsch.pdf](http://www.carbon-composites.eu/sites/carbon-composites.eu/files/anhaenge/12/11/06/composites_marktbericht_2012_-_deutsch.pdf) (aufgerufen am 20.12.2013)

<sup>7</sup> Bernhard Jahn, Doris Karl: Composites-Marktbericht 2012, Der globale CFK-Markt. Hrsg.: Carbon Composites e. V., Oktober 2012; [http://www.carbon-composites.eu/sites/carbon-composites.eu/files/anhaenge/12/11/06/composites\\_marktbericht\\_2012\\_-\\_deutsch.pdf](http://www.carbon-composites.eu/sites/carbon-composites.eu/files/anhaenge/12/11/06/composites_marktbericht_2012_-_deutsch.pdf) (aufgerufen am 20.12.2013)

für ist vor allem eine mittelfristig begrenzte Produktionskapazität von Kohlenstofffasern, die aus Polyacrylnitrilfasern (PAN), einem erdölbasierten Precursor, mittels Pyrolyse hergestellt werden (siehe auch Abschnitt „Herstellung von Kohlenstofffasern“ Kapitel 3). Der Aufbau weiterer Produktionskapazitäten für PAN-Fasern, die durch Polymerisation von Acrylnitril entstehen, ist mit hohen Investitionskosten verbunden. Technologien zur Herstellung von Kohlenstofffasern aus anderen Precursormaterialien oder auf Basis biogener Rohstoffe werden mittelfristig noch nicht im industriellen Maßstab verfügbar sein (siehe Kapitel 6). Aufgrund der steigenden Nachfrage aus verschiedenen industriellen Anwendungsbereichen rechnen Marktbeobachter damit, dass im Zeitraum 2014/2015 der Bedarf an Kohlenstofffasern die verfügbare Menge übersteigen wird. So könnte bis 2019 eine Kapazitätslücke in der Kohlenstofffaser-Produktion von 70.000 Tonnen entstehen.<sup>8</sup> Problematisch ist dabei auch, dass die verfügbaren Produktionskapazitäten auf nur wenige Länder verteilt sind. Die drohende Gefahr einer nicht ausreichenden Verfügbarkeit könnte dazu führen, dass sich die Industrie bei der kostenintensiven Entwicklung von CFK-Produkten zurückhält. Möglichkeiten, dem entgegenzuwirken, bestehen neben dem Ausbau der Produktionskapazitäten auch in der Entwicklung von Herstellungsverfahren auf der Basis anderer Precursor-Materialien und von Technologien zum Recycling von CFK-Produkten.

Es gibt auch optimistische Prognosen, die sich in Absichtserklärungen von Unternehmen über geplante Kapazitätserweiterungen ausdrücken, wie sie der Composites-Marktbericht 2012 nennt:<sup>9</sup>

Engpass bei der Verfügbarkeit von Kohlenstofffasern möglich.

<sup>8</sup> Jeff Sloan: Carbon fiber market. CompositesWorld, 03.01.2011, <http://www.compositesworld.com/articles/carbon-fiber-market-cautious-optimism> (aufgerufen am 20.12.2013)

<sup>9</sup> Bernhard Jahn, Doris Karl: Composites-Marktbericht 2012, Der globale CFK-Markt. Hrsg.: Carbon Composites e. V., Oktober 2012; [http://www.carbon-composites.eu/sites/carbon-composites.eu/files/anhaenge/12/11/06/composites\\_marktbericht\\_2012\\_-\\_deutsch.pdf](http://www.carbon-composites.eu/sites/carbon-composites.eu/files/anhaenge/12/11/06/composites_marktbericht_2012_-_deutsch.pdf) (aufgerufen am 20.12.2013)

Unternehmen	Maßnahmen zur Kapazitätserweiterung
Toray (Japan)	Erhöhung der Kohlenstofffaser-Kapazität an seinen drei Standorten um ein Drittel (circa 6000 Tonnen) bis 2015
„Kompozit“/RosAtom (Russland)	Errichtung eines Werks mit einer Kapazität von 1.500 Tonnen pro Jahr bis Ende 2013
Taekwang Industrial Co., Ltd. (Ulsan, Südkorea)	Beginn der Kohlenstofffaser-Produktion im März 2012 nach einer Investition von 100 Millionen Euro
Hyosung (Südkorea)	Start der ersten kommerziellen Kohlenstofffaser-Produktionsanlage in Jeonju mit einer Kapazität von 2.000 Tonnen pro Jahr
Kemrock Industries and Exports Ltd. (Vadodara, Indien)	Inbetriebnahme einer Kohlenstofffaser-Anlage mit einer Kapazität von 400 Tonnen pro Jahr in 2011
Zoltek Corp. (USA)	Investition von zusätzlich 15 Millionen US-Dollar in die Errichtung einer Forschungsanlage in St. Peters Missouri, USA
Hohhot Haoyuan Carbon Fiber Co. Ltd (Mongolei)	Geplante Investition von rund zwei Milliarden US-Dollar in die Produktion von Kohlenstofffasern

**Tab. 1: Aktivitäten von Unternehmen zur Erweiterung der Produktionskapazität für Kohlenstofffasern<sup>10</sup>**

Die genannten Kohlenstofffaser-Mengen werden zu etwa 95 Prozent zu kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen verarbeitet. Im Jahr 2011 wurden 57.000 Tonnen CFK hergestellt, bis 2020 wird mit einem Anstieg auf 200.000 Tonnen gerechnet.<sup>11</sup> In Relation zu anderen Konstruktionswerkstoffen stellt das immer noch eine sehr geringe Produktionsmenge dar. Beispielsweise werden jährlich weltweit circa 1,3 Milliarden Tonnen Stahl produziert. Diese deutliche Differenz wird – neben anderen Faktoren – vor allem durch die hohen Kosten für CFK-Bauteile im Vergleich zu etablierten Werkstoffen verursacht.<sup>12</sup>

So ist davon auszugehen, dass die Automobilbranche in den kommenden Jahren vermehrt Kohlenstofffasern abnehmen wird, wenn eine deutliche Kostenreduktion bei der Herstellung und Verarbeitung von CFK erzielt werden kann. Umgekehrt könnten zu dieser Kostenreduktion größere Abnahmemengen der Automobil-, aber auch der Windenergiebranche beitragen. Derzeit kosten auf Basis von Kohlenstofffasern verarbeitete Komponenten etwa 30 bis 100 Euro

<sup>10</sup> Ebd.

<sup>11</sup> Ebd.

<sup>12</sup> Ralph Lässig et al.: Serienproduktion von hochfesten Faserverbundbauteilen. Hrsg.: Roland Berger, VDMA (September 2012), S. 13

pro Kilogramm je nach Ausführung.<sup>13,14</sup> Ein in der Funktion vergleichbares Referenzbauteil aus Stahlblech, wenn auch schwerer, kostet nach Berechnungen sowohl von Roland Berger (vgl. Abb. 3) als auch von McKinsey nur etwa ein Sechstel der CFK-Komponente.<sup>15,16</sup>

Nach einer Prognose von McKinsey werden sich die Mehrkosten von CFK bis zum Jahr 2030 dem Niveau von Aluminium annähern. Während Aluminium dann etwa 40 Prozent teurer als Stahl sein könnte, soll CFK unter günstigen Bedingungen gegenüber Stahl nur noch 90 Prozent statt bisher 570 Prozent der Kosten betragen.<sup>17</sup> Nach Berechnungen von Roland Berger wird für ein CFK-Bauteil bis zum Jahr 2020 eine Kostenreduktion von 30 Prozent gegenüber heute erreichbar sein (vgl. Abb. 4). Darin enthalten sind die um 40 Prozent gesunkenen Prozesskosten.<sup>18</sup> Volkswagen geht für eine Großserienproduktion in einer Kostenvision ohne genauen Zeitrahmen sogar von um 90 Prozent reduzierten Prozesskosten aus, so dass zusammen mit Material- und Lackkosten CFK-Werkstoffe insgesamt zwei Drittel preiswerter sein sollen als heutzutage.<sup>19</sup>

Es sei darauf hingewiesen, dass sich die genannten Kostenschätzungen für CFK auf duroplastische Harzsysteme beziehen. Bei Verwendung thermoplastischer Matrixmaterialien sind höhere Preise zu veranschlagen. Zudem hängen die Kosten auch sehr stark von der Faserqualität (Steifigkeit, Festigkeit) beziehungsweise Rovingqualität ab. Außerdem ergeben sich aufgrund der unterschiedlichen Fasern (endlos-, lang- und kurzfaserverstärkte Kunststoffe) und der großen Unterschiede im Gestaltungsaufwand (zum Beispiel

<sup>13</sup> Werner Bruckner: Mit Kostensenken wächst der CFK-Markt, in: VDI nachrichten, 25.05.2012, S. 8

<sup>14</sup> Ralph Lässig et al., Serienproduktion von hochfesten Faserverbundbauteilen. Hrsg.: Roland Berger, VDMA (September 2012), S. 15, [http://www.rolandberger.de/media/pdf/Roland\\_Berger\\_Serienproduktion\\_hochfester\\_Faserverbundbauteile\\_20120926.pdf](http://www.rolandberger.de/media/pdf/Roland_Berger_Serienproduktion_hochfester_Faserverbundbauteile_20120926.pdf) (aufgerufen am 20.12.2013)

<sup>15</sup> Ebd.

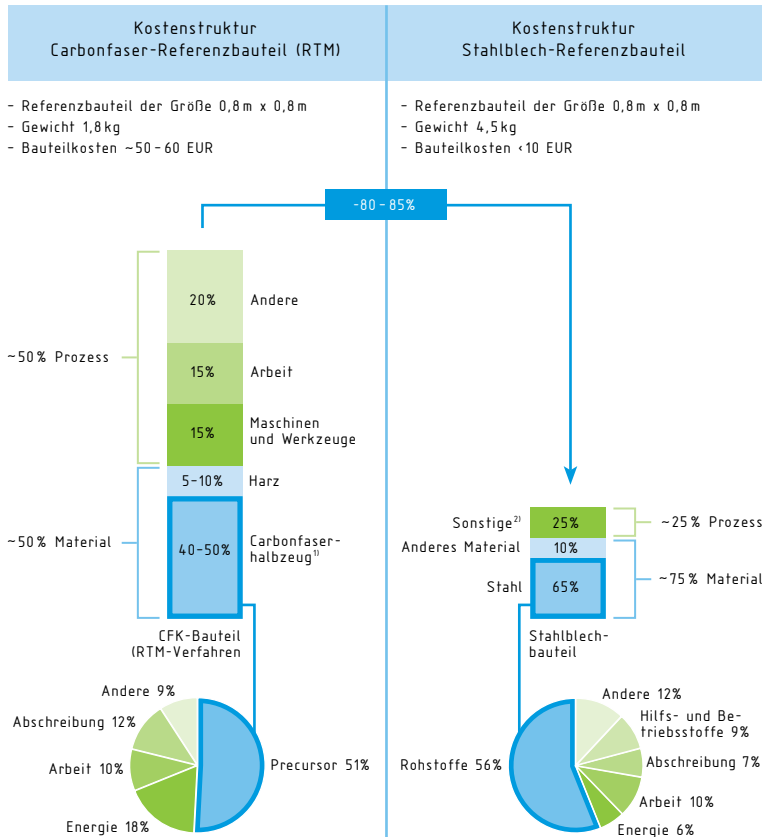
<sup>16</sup> Peter Trechow: Leichtbau wird Materialmix des Automobils massiv verändern, in: VDI nachrichten, 06.01.2012, S. 8

<sup>17</sup> Ebd.

<sup>18</sup> Ralph Lässig et al., Serienproduktion von hochfesten Faserverbundbauteilen. Hrsg.: Roland Berger, VDMA (September 2012), S. 18

<sup>19</sup> Michael Ziegler: CFK-Leichtbau im VW 1-Liter-Auto XL1. Automobil Industrie, 10.09.2012; <http://www.automobil-industrie.vogel.de/karosserie/articles/377463/> (aufgerufen am 20.12.2013)

Gelege, Gewebe, Geflechte, Gestricke oder Vliese) große Preisunterschiede für das jeweilige Bauteil.<sup>20</sup>



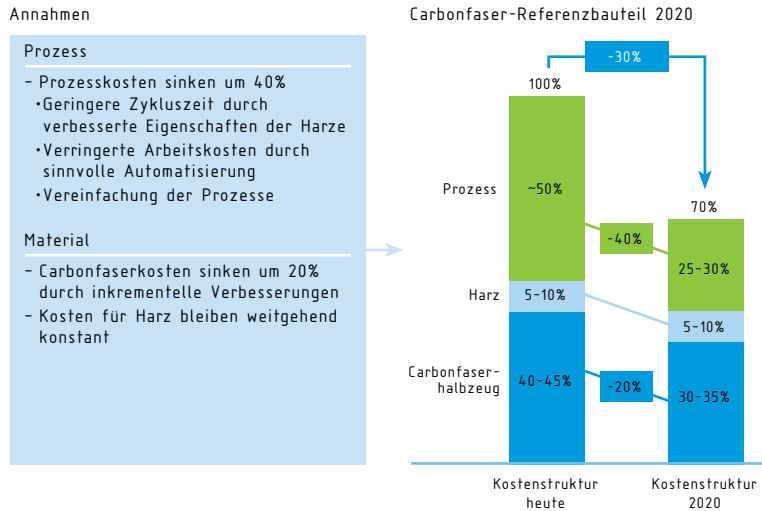
<sup>1)</sup>Textile Rollenware ohne weiteren Zuschnitt etc.

<sup>2)</sup>Split: Maschinen und Werkzeuge ca 5%; Arbeit ca. 12%; Andere ca. 8%

**Abb. 3: Kostenvergleich CFK versus Stahlblech heutzutage anhand eines Referenzbauteils<sup>21</sup>**

<sup>20</sup> Persönliche Mitteilung von Prof. Dr. H. Voggenreiter, DLR

<sup>21</sup> Ralph Lässig et al.: Serienproduktion von hochfesten Faserverbundbauteilen. Hrsg.: Roland Berger, VDMA (September 2012), S. 15



**Abb. 4: Kostensenkungspotenzial bis 2020 (Modellrechnung)<sup>22</sup>**

### 3. TECHNOLOGIEN FÜR DIE HERSTELLUNG VON CFK

Kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe bestehen aus Verstärkungsfasern, die in eine Kunststoffmatrix eingebettet sind. Die Eigenschaften der Fasern und des Matrixmaterials sowie die Art und Weise, in der beide Komponenten vereint werden, bestimmen die Eigenschaften des entstehenden CFK-Werkstoffs. Dabei sind die Fasern insbesondere für die hohen spezifischen Festigkeiten und Steifigkeiten von CFK verantwortlich. Allerdings zeichnen die Fasern und deren Vorstufen auch erheblich für den hohen Ressourcen- und Kostenaufwand des Verbundwerkstoffs verantwortlich (vgl. Abb. 3). Somit ergibt sich gerade bei der Faserherstellung und den dafür eingesetzten Rohstoffen ein besonders großer Hebel für mehr Ressourceneffizienz und damit zur Verbesserung der ökologischen und ökonomischen Wettbewerbsfähigkeit im Vergleich zu anderen Werkstoffen im Automobileichtbau.

Einen besonders großen Hebel für Ressourceneffizienz stellt die Faserherstellung dar.

<sup>22</sup> Ebd., S. 18

## Eigenschaften der Kohlenstofffaser

Einzelne Kohlenstofffasern weisen einen Durchmesser von circa fünf bis neun Mikrometern auf. Für die Weiterverarbeitung in technischen Anwendungen werden zunächst einige Tausend Einzelfasern zu Bündeln zusammengefasst, die als Roving bezeichnet werden. Diese Rovings werden auf Spulen gewickelt und können dann mit textiltechnischen Verfahren wie Weben oder Wirken weiterverarbeitet werden.<sup>23</sup> Bezogen auf das spezifische Gewicht liegen die Festigkeits- und Steifigkeitswerte der Kohlenstofffasern höher als die von Glas-, Metall- und Aramidfasern. Deshalb eignen sich Kohlenstofffasern besonders zur Verstärkung in Leichtbauanwendungen. Neben guten mechanischen Eigenschaften zeichnen sich Kohlenstofffasern durch eine geeignete Abrasions- und Korrosionsfestigkeit aus. Darüber hinaus sind sie elektrisch und thermisch sehr gut leitfähig.

Im Gegensatz zur Glasfaser sind die Eigenschaften der Kohlenstofffaser stark anisotrop. Die Fasern zeigen in Längsrichtung einen negativen Wärmeausdehnungskoeffizienten, sie dehnen sich beim Erwärmen nicht wie andere Materialien aus, sondern ziehen sich sogar geringfügig zusammen. Dieser nachteilige Effekt kann aber möglicherweise für Bauteilkonstruktionen gewinnbringend genutzt werden. Weitere Nachteile der Kohlenstofffaser umfassen die hygroskopischen Eigenschaften und einen relativ hohen Verschleiß bei Zerspanungs- und Schneidwerkzeugen.

Die Standzeiten von Werkzeugen zur spanenden Bearbeitung sind nicht nur abhängig vom Verschleiß. Vielmehr kommt es bereits bei einem geringen Verschleiß des Werkzeugs zu einer Wechselwirkung mit der ungeschnittenen Faser, die zu einer rapiden Verschlechterung der Oberfläche beziehungsweise der Bohrung im CFK führt.<sup>24</sup>

Insbesondere durch die Verstärkung von Thermoplasten mit Kohlenstofffasern wird gegenüber Glasfasern eine Verbesserung der mechanischen Eigenschaften erzielt, bei

<sup>23</sup> Wikipedia-Artikel „Kohlenstofffaser“ in der Version vom 21.10.2013, 22.13 Uhr, <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Kohlenstofffaser&oldid=123679608> (aufgerufen am 20.12.2013)

<sup>24</sup> Persönliche Mitteilung von Prof. Dr. H. Voggenreiter, DLR

gleichzeitig geringerem Gewicht. Zusätzlich erhöht die Kohlenstofffaser die thermische und elektrische Leitfähigkeit des Kunststoffs. Aufgrund der positiven Werkstoffigenschaften bei Festigkeit, Steifigkeit und Gewicht stellen kohlenstofffaserverstärkte, thermoplastische Bauteile auch eine Alternative zu Metallussteilen aus Aluminium oder Magnesium dar.

### Herstellung von Kohlenstofffasern

Bei der Herstellung von Kohlenstofffasern kommen hauptsächlich zwei verschiedene Verfahren zum Einsatz, die sich in erster Linie in den eingesetzten Vorstufen, den sogenannten Precursoren, unterscheiden. Dabei ist die industrielle Produktion von Kohlenstofffasern aus Polyacrylnitril (PAN) deutlich weiter verbreitet als die Herstellung aus Pechfasern (vgl. Abb. 5).<sup>25</sup>

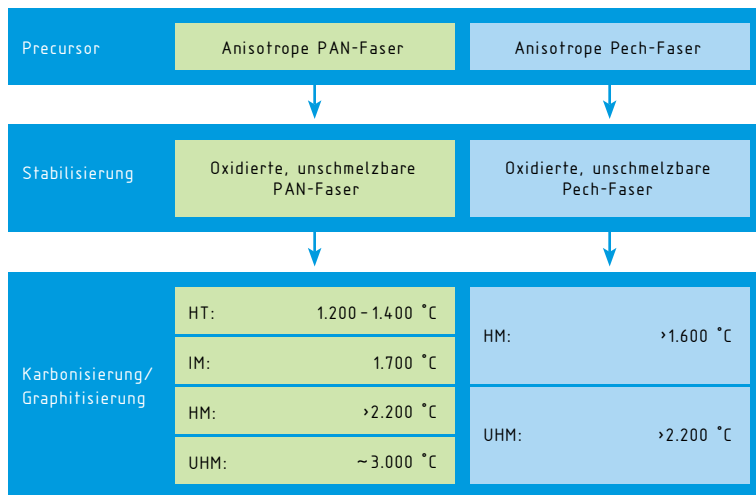
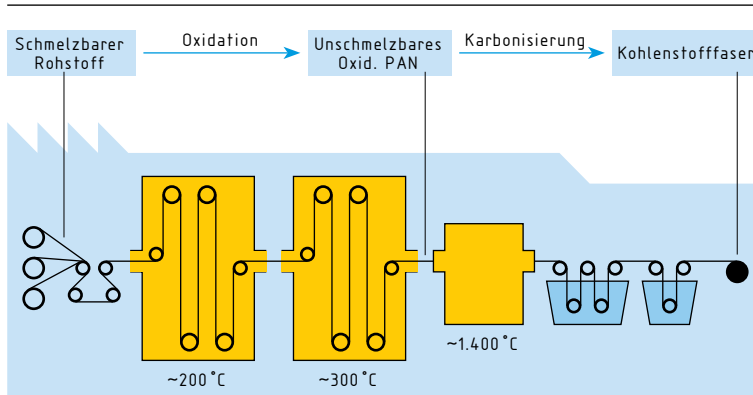


Abb. 5: Verschiedene Prozesswege zur Herstellung von Kohlenstofffasern<sup>26</sup>

<sup>25</sup> Bernd Wohlmann, AVK – Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe e.V.: Handbuch Faserverbundkunststoffe – Grundlagen, Verarbeitung, Anwendungen. Veröffentlicht 2009, 3. Auflage.

<sup>26</sup> Ebd.





**Abb. 6: Prinzipschema der Kohlenstofffaser-Herstellung<sup>27</sup>**

### Herstellung aus Polyacrylnitril (PAN)

Die Faserproduktion auf Basis von Polyacrylnitril erfolgt quasikontinuierlich und ist aufgrund der in einzelnen Prozessschritten erforderlichen hohen Temperaturen besonders energieintensiv. Der Precursor wird zunächst durch Oxidation stabilisiert und zu einer unschmelzbaren Faser aufbereitet. Anschließend erfolgt die Karbonisierung der Fasern bei hoher Temperatur. Dabei reagieren die Fasern nicht nur zu „molekularen Bändern“, sondern es bildet sich auch eine grafitartige Struktur aus. Es folgt eine Endbehandlung der Faseroberfläche, bevor die Fasern schließlich auf eine Spule aufgewickelt werden (vgl. Abb. 6). Abhängig von der Prozesstemperatur bei der Karbonisierung können auf diese Weise Kohlenstofffasern mit unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften hergestellt werden. Die verschiedenen Faserklassen unterscheiden sich vor allem in ihrer Zugfestigkeit und dem Zugmodul. Es wird zwischen hochfesten Fasern (HT), Zwischenmodulfasern (IM), Hochmodulfasern (HM) und Ultrahochmodulfasern (UHM) differenziert (vgl. Abb. 5 und 8). Um den hohen Energiebedarf zu senken, wird an der Entwicklung effizienterer Verfahren der Wärmezufuhr gearbeitet, beispielsweise auf der Basis eines Mikrowellen-Plasmas.<sup>28</sup>

<sup>27</sup> Bernd Wohlmann et al., Vortrag „Neue Entwicklungen auf dem Gebiet der Kohlenstofffaser“, 2010

<sup>28</sup> Bernd Wohlmann, AVK – Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe e.V.: Handbuch Faserverbundkunststoffe – Grundlagen, Verarbeitung, Anwendungen. Veröffentlicht 2009, 3. Auflage

## Herstellung aus Mesophasen-Pech

Kohlenstofffasern können auch aus technischen Kohlenwasserstoffgemischen wie Steinkohlenteer oder Petroleumpech hergestellt werden (pitch-basierte Verfahren). Die Ausgangsgemische werden zu Beginn des Prozesses in ein sogenanntes Mesophasen-Pech umgewandelt, das einen hohen flüssigkristallinen Anteil aufweist. In einem Spinnprozess bilden sich aus den Flüssigkristallen Fasern, die in axialer Richtung einen hohen Orientierungsgrad zeigen. Auch diese pech-basierten Precursoren werden durch einen Oxidationsprozess stabilisiert, bevor sie schließlich bei Temperaturen von über 1.600 °C (HM-Fasern) bis über 2.200 °C (UHM-Fasern) karbonisiert werden. Die auf diese Weise hergestellten Kohlenstofffasern weisen ein höheres Zugmodul als PAN-basierte Fasern auf, verfügen jedoch über eine geringere Zugfestigkeit.<sup>29</sup>

## Weiterverarbeitung von Kohlenstofffasern

Mit über 98 Prozent wird der weitaus größte Anteil der hergestellten Kohlenstofffasern in Verbundmaterialien mit unterschiedlichen Matrices verarbeitet, wovon wiederum 95 Prozent kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe ausmachen. Nur ein geringer Anteil kommt in Verbundwerkstoffen mit anderen Matrixmaterialien wie Kohlenstoff, Keramik oder Metall in sehr speziellen Anwendungen zum Einsatz.<sup>30</sup>

Als Verstärkungsmaterial für Kunststoffe dienen Kohlenstofffasern sowohl für Duroplaste (unter anderem Epoxid-, Polyester-, Vinylester-, Phenol-Formaldehyd-, Methacrylat- und Melaminharze sowie Polyurethane) als auch für Thermoplaste (gängige thermoplastische Werkstoffe sind beispielsweise Polyamid, Polypropylen, Polyetheretherketon, Polyphenylsulfid, Polysulfon und Polytetrafluorethen).

Ein wesentlicher Vorteil kohlenstofffaserverstärkter Kunststoffe mit thermoplastischer Matrix besteht darin, dass sie

<sup>29</sup> Ebd.

<sup>30</sup> Bernhard Jahn: Composites-Marktbericht 2012, Der globale CFK-Markt. Hrsg.: Carbon Composites e. V., Oktober 2012; [http://www.carbon-composites.eu/sites/carbon-composites.eu/files/anhaenge/12/11/06/composites\\_marktbericht\\_2012\\_-\\_deutsch.pdf](http://www.carbon-composites.eu/sites/carbon-composites.eu/files/anhaenge/12/11/06/composites_marktbericht_2012_-_deutsch.pdf) (aufgerufen am 20.12.2013)

nachträglich umformbar und verschweißbar sind. Da hier kein zeitaufwändiger Aushärtungs- und Vernetzungsprozess erfolgt, ist der Werkstoff unmittelbar nach dem Abkühlen der thermoplastischen Matrix zum Einsatz bereit. Allerdings erweicht die Matrix wieder, wenn sie einer zu hohen Temperatur ausgesetzt ist, was den Temperatureinsatzbereich von thermoplastischen CFK deutlich einschränkt.<sup>31</sup>

Duroplaste (hauptsächlich Epoxidharze) bilden die bislang am häufigsten eingesetzten Matrixwerkstoffe, deren Verarbeitung zu Halbzeugen allerdings arbeits- und zeitaufwändig ist. Die Aushärtezeiten der duroplastischen CFK liegen oft deutlich über denen der Spritzgießtechnik bei thermoplastischen CFK. Faserverstärkte Kunststoffe mit duroplastischer Matrix lassen sich nach dem Aushärten beziehungsweise dem Vernetzen der Matrix nicht mehr umformen. Sie können einen hohen Temperatureinsatzbereich aufweisen, insbesondere heißhärtende Systeme, die unter hohen Temperaturen aushärten. Vorteilhaft sind ihre vergleichsweise hohen Festigkeiten und Zähigkeiten.<sup>32</sup>

Bei der Fertigung von Halbzeugen wird zwischen kurzen und langen Fasern sowie Endlosfasern unterschieden. Während Kurz- und Langfasern beispielsweise zu Vliesen oder Schnittmatten verarbeitet werden, können aus Endlosfasern textile Halbzeuge wie Matten, Gewebe, Geflechte etc. hergestellt werden. Die mechanischen Eigenschaften der daraus gefertigten Verbundwerkstoffe hängen von der Länge und Bindung der Fasern ab sowie von deren Orientierung. So lässt sich etwa generell sagen, dass die Festigkeit und Schlagzähigkeit bei langen Fasern und starker Bindung höher sind als bei kurzen Fasern und schwacher Bindung.<sup>33</sup>

Neben den Grundkombinationen der Hauptkomponenten (Faser, Matrix) können weitere Elemente wie Füllstoffe und

<sup>31</sup> Sebastian Nöll: Carbon-Composites. Beratungs- und Informationssystem für Technologietransfer im Handwerk, 16.12.2010, <http://fachinfo.bistech.de/artikel/790/Carbon+Composite+%28CFK%29+-+Kohlefaserverbundwerkstoffe> (aufgerufen am 20.12.2013)

<sup>32</sup> Ebd.

<sup>33</sup> Schmidt, A.: Neue Fertigungsverfahren für die Großserienfertigung von Faserverbundwerkstoffen im Automobilbau. Knowledge Space des Lehrstuhls für Fertigungsautomatisierung und Montage, 13.02.2013, [http://wiki.zimt.uni-siegen.de/fertigungsautomatisierung/index.php?title=Neue\\_Fertigungsverfahren\\_f%C3%BCr\\_die\\_Gro%C3%9Ferienfertigung\\_von\\_Faserverbundwerkstoffen\\_im\\_Automobilbau&oldid=17780](http://wiki.zimt.uni-siegen.de/fertigungsautomatisierung/index.php?title=Neue_Fertigungsverfahren_f%C3%BCr_die_Gro%C3%9Ferienfertigung_von_Faserverbundwerkstoffen_im_Automobilbau&oldid=17780) (aufgerufen am 20.12.2013)

Additive hinzugefügt werden. Durch Füllstoffe lässt sich etwa das Gewicht bei vorgegebener Bauteildimension weiter reduzieren und durch chemische Additive beispielsweise die Brennbarkeit der Werkstoffe herabsetzen. Je nach Wahl von Verstärkungsfasern, Faserformen, Matrixmaterialien sowie Faser- und Füllstoffanteil entsteht also ein individuell für die jeweiligen Anforderungen konzipierter Werkstoff.<sup>34</sup>

Für die Weiterverarbeitung der Faserfilamente zu sogenannten Preforms kommen vielfach Verfahren aus der Textiltechnik zum Einsatz. Je nach Faser- und Matrixmaterial und abhängig vom Einsatzgebiet können durch diese Prozesse die mechanischen Eigenschaften des Bauteils sehr flexibel an die jeweiligen Anforderungen angepasst werden. Gleichzeitig ergibt sich durch die weitere Optimierung dieser Fertigungsschritte ein erhebliches Potenzial zur Kostensenkung, da etwa 50 Prozent der Herstellungskosten von Bauteilen aus Faserverbundkunststoffen auf den textilen Preformingprozess entfallen.<sup>35</sup> Für die Fertigung endlosfaserverstärkter Duroplasten werden die Fasern zunächst zu Prepregs verarbeitet. Dabei handelt es sich um mit Harz vorimprägnierte Fasermatten, die anschließend im Autoklaven ausgehärtet werden.

Um Composite-Bauteile wirtschaftlich, prozesssicher und ressourcenschonend zu produzieren, werden die Verarbeitungsschritte zunehmend automatisiert. Dazu gehören zum Beispiel unterschiedliche Ablegeprozesse, bei denen sowohl die Tape-Lege- als auch die Fiber-Placement-Technologie zum Einsatz kommen. Die bisherigen Tape-Laying- und Fiber-Placement-Anlagen ermöglichen es, pro Stunde etwa vier bis zwölf Kilogramm Prepregs zu legen. Zur Steigerung der Produktivität werden aber Legeraten von 100 bis 150 Kilogramm pro Stunde notwendig. Ein neuer, robotergestützter Fertigungsansatz verspricht einen bedeutenden Schritt hin zur Erfüllung der geforderten effektiven Legeraten. In dem Gemeinschaftsprojekt „Grofi“ des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) und des Werk-

<sup>34</sup> Mathes, V., Faserverbund-Kunststoffe – mehr als nur Carbon..., Industrieanzeiger Nr. 20/2012

<sup>35</sup> Gries, T.: Innovative Methoden zur hochproduktiven Fertigung textiler Preforms. Vortrag, InnoMateria, Köln, 15.03.2011

zeugmaschinenherstellers MAG Europe GmbH aus Göppingen scheint eine Erhöhung der Produktivität um das 10- bis 15-Fache erreichbar zu sein. Das System besteht aus autonomen, koordinierten Roboterplattformen, was flexiblere Prozesssteuerungen beziehungsweise Legeverfahren und vor allem die Parallelisierung der Ablege-, Wartungs- und Bestückungsprozesse ermöglicht.<sup>36</sup>

Für die Weiterverarbeitung nicht vorimprägnierter Preforms kommen vor allem Infiltrationsverfahren zum Einsatz. Dabei werden das vorgeformte Faserhalbzeug und das Matrixmaterial in einem entsprechenden Formwerkzeug zusammengebracht. Beim Resin Transfer Moulding (RTM) wird dafür ein geschlossenes Presswerkzeug verwendet (siehe dazu auch Abschnitt „Fertigungsverfahren“). Es gibt aber auch verschiedene vakuumunterstützte Infiltrationsverfahren, bei denen die Harzinjektion in einem offenen Werkzeug durch Anlegen eines Vakuums innerhalb einer geschlossenen Folie erfolgt, so dass allein der Atmosphärendruck auf das Bauteil wirkt. Beispiele hierfür sind der von EADS in Augsburg entwickelte Vacuum Assisted Process (VAP) oder das am DLR-Institut für Bauweisen- und Konstruktionsforschung in Stuttgart entwickelte Vacuum Assisted Resin Infusion-Verfahren (VARI).

Sowohl die Eigenschaften des Matrixmaterials als auch die Wahl des eingesetzten Verfahrens üben einen maßgeblichen Einfluss auf die erforderliche Wärmebehandlung und die Zeit, die zur Aushärtung benötigt wird, und damit auf die Produktionskosten und die erreichbaren Taktzeiten aus.

<sup>36</sup> Faserverbundtechnik für den Automobilbau, VDMA Nachrichten 02/2013

#### 4. ENTWICKLUNGS- UND ANWENDUNGSPOTENZIAL VON CFK IM FAHRZEUGBAU

Aufgrund ihrer überlegenen mechanischen Eigenschaften wird CFK-Werkstoffen ein großes Zukunftspotenzial als Leichtbauwerkstoff im Fahrzeugbau zugesprochen. Insbesondere Verbundwerkstoffe mit einem hohen Gehalt an Kohlenstoffendlosfasern bieten sich als Alternativmaterial für hochbelastbare Strukturen an, die bislang mit Stahl oder Aluminium realisiert werden. Dabei können die Endlosfasern in der Kunststoffmatrix gezielt in einer bestimmten Orientierung angeordnet werden, um dadurch eine besonders hohe Zug- oder Druckbelastbarkeit in einer bestimmten Richtung zu erreichen. Ein Höchstmaß an Ressourceneffizienz wird durch einen reduzierten Materialeinsatz bei optimaler Faserausnutzung (Faser möglichst in Lastrichtung gerichtet) und während des Betriebes des Fahrzeugs durch das reduzierte Gewicht erreicht.<sup>37</sup> CFK mit thermoplastischer Matrix bringen zudem weitere vorteilhafte Eigenschaften mit sich: So lassen sie sich gut umformen und mit anderen Materialien zu Hybridwerkstoffen kombinieren.

Derzeit kommen als Faserverbundwerkstoffe in Serienfahrzeugen jedoch größtenteils glasfaserverstärkte Kunststoffe zum Einsatz. CFK finden sich bislang fast ausschließlich im Motorsport und in Tuning-Anwendungen. Die Gründe dafür, dass CFK-Bauteile noch nicht in Großserienfahrzeugen eingesetzt werden, liegen zum einen in den hohen Materialkosten und zum anderen im Mangel an serientauglichen Herstellungsverfahren. Die Entwicklung und Realisierung effizienter Serienproduktionsverfahren für CFK bilden daher die entscheidenden Voraussetzungen für den kommerziellen Durchbruch dieses Werkstoffs im Automobilbau.

Die bisherigen Erfahrungen mit CFK aus der Luft- und Raumfahrtbranche lassen sich nicht direkt auf die Anforderungen und Kostenstrukturen im Automobilbau übertragen. Hier stehen vor allem hohe Taktraten und kurze, effiziente Wertschöpfungsketten im Vordergrund. Entsprechende automatisierte Prozesse bilden die Basis für die Einführung fa-

Matrixmaterial und eingesetztes Verfahren beeinflussen die Produktionskosten maßgeblich.

<sup>37</sup> Persönliche Mitteilung von Prof. Dr. H. Voggenreiter, DLR

serverbundgerechter Bauweisen, wie etwa die Entwicklung hochintegrierter Baugruppen (beispielsweise Monocoque) oder die Ausnutzung der anisotropen Struktur langfaserverstärkter Kunststoffe.

Neben den Fertigungsverfahren müssen aber auch geeignete Modellierungs- und Simulationswerkzeuge, Methoden zur zerstörungsfreien Prüfung und Qualitätskontrolle sowie Lösungen für die Verwertung von CFK-Materialien nach der Nutzungsphase bereitgestellt werden, um einen ressourceneffizienten Einsatz im Automobilbau zu ermöglichen. Allerdings gibt es heute noch keine geeigneten NDT-Verfahren (Non-Destructive Testing) und vor allem Bewertungsmethoden für einen oberflächlich unkritischen, im Volumen gegebenenfalls kritischen Schaden durch beispielsweise Delamination. Gerade in Werkstätten wird dies ein erhebliches Problem darstellen (gekoppelt mit Haftungsfragen).<sup>38</sup>

Zudem zeigt CFK bei stoßartigen Lastfällen, wie sie etwa bei einem Crash auftreten, ein sprödes Bruchversagen und kann nicht wie Metalle die Stoßenergie durch plastische Deformation aufnehmen. Für die Entwicklung crash- und impacttoleranter Strukturen bedarf es neben der Weiterentwicklung gekoppelter FE-Partikel-Methoden auch der Entwicklung neuer, duktilerer Matrixmaterialien. Ebenso müssen Reparaturverfahren entwickelt werden, die einerseits wirtschaftlich sind und andererseits den anisotropen Konstruktionsprinzipien gerecht werden.

Die werkstofflichen Eigenschaften des Verbundwerkstoffs werden durch die Wahl des Matrix- und Fasermaterials bestimmt. Daraus ergeben sich dann Anforderungen und Einschränkungen in puncto Verarbeitung: So stehen für kurz- und langfaserverstärkte Thermoplaste und Duroplaste bereits etablierte Spritzgieß- und Fließpressverfahren aus der Kunststofftechnik zur Verfügung, die für die Herstellung komplexer Bauteile in großen Stückzahlen geeignet sind. Im Gegensatz dazu können Bauteile aus den besonders stabilen endlosfaserverstärkten Kunststoffen bislang nicht im Großserienmaßstab produziert werden.

<sup>38</sup> Persönliche Mitteilung von Prof. Dr. H. Voggenreiter, DLR

Die Prozessdauer hängt auch vom Erstarrungsverhalten des Matrixmaterials ab. So lassen insbesondere thermoplastische Matrixsysteme, die sich durch rein physikalische Abkühlvorgänge verfestigen, deutlich kürzere Zykluszeiten und einen höheren Automatisierungsgrad zu, als es beim Aushärten der niedermolekularen Ausgangsprodukte von Duroplasten der Fall ist.<sup>39</sup> Für die stärkere Automatisierung der CFK-Produktion sind zudem weitere Entwicklungen in der Handhabungstechnik erforderlich.

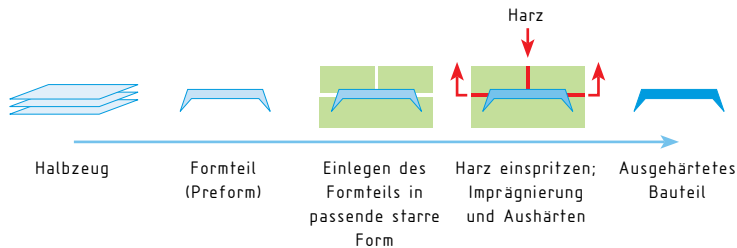
### Fertigungsverfahren

Die Technologien für die Herstellung von Bauteilen aus Faserverbundwerkstoffen sind für unterschiedliche Stückzahlen und Bauteilgeometrien geeignet und lassen sich in manuelle, teilautomatische und vollautomatische Verfahren unterteilen. Die teilautomatische Produktion von CFK-Bauteilen aus Prepregs im Autoklavverfahren kommt zwar im Flugzeugbau und in wenigen Nischenanwendungen im Automobilbau zum Einsatz, ist aber aufgrund der notwendigen manuellen Zwischenarbeitsschritte und der langen Aushärtungszeiten der verwendeten Harze nicht für den Serieneinsatz im Automobilbau geeignet.

Als besonders vielversprechend für eine breitere Einführung von CFK im Fahrzeugbau in der Großserie sind die Harzinjektionsverfahren und davon insbesondere das Resin Transfer Molding (RTM) zu nennen. Bei diesem Verfahren werden zunächst Endlosfasern als mehrschichtiges Gelege angeordnet, aufgeheizt und in die spätere Bauteilform gebracht. Diese sogenannten Preforms werden anschließend in das Formwerkzeug der RTM-Pressen eingelegt, in die dann das Harz mit weiteren Reaktionskomponenten eingespritzt wird. Das Reaktionsgemisch durchsetzt das Gewebe und härtet dann zur Matrix aus. Um diesen Vorgang zu beschleunigen, kann das Harz mit hohem Druck eingespritzt und die Presse zusätzlich evakuiert werden (vgl. Abb. 7 und 9).

<sup>39</sup> Drummer, D.; Müller, T.: „Thermoplastische Hochleistungsfaserverbunde stehen vor einer großen Renaissance“, intelligenter produzieren 3/2010, VDMA Verlag, 6 – 8.



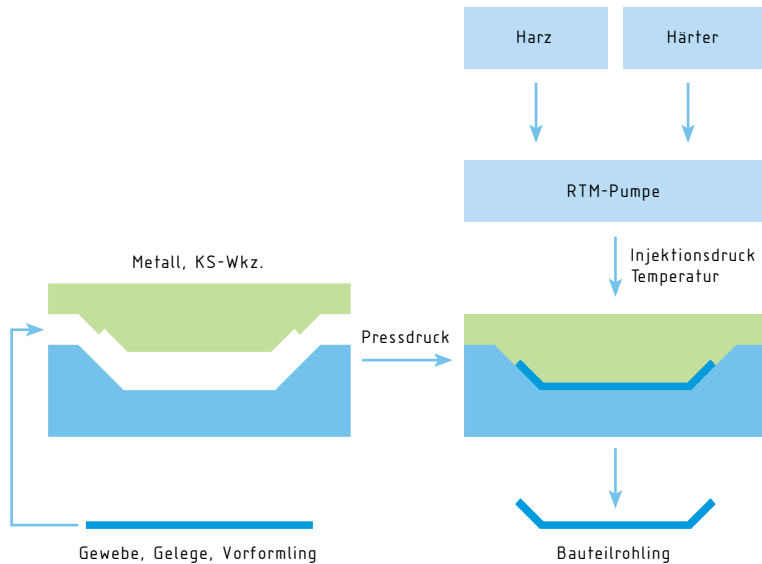


**Abb. 7: Schematischer Ablauf des RTM-Verfahrens.**<sup>40</sup>

Mit dem RTM-Verfahren lassen sich prinzipiell Zykluszeiten von wenigen Minuten erreichen, abhängig von der Aushärtungszeit des verwendeten Matrixmaterials und vom Automatisierungsgrad der Prozesskette. Um CFK-Bauteile künftig auch in großen Stückzahlen fertigen zu können, wird die RTM-Technik kontinuierlich weiterentwickelt. Beispielsweise wird am DLR-Zentrum für Leichtbauproduktionstechnologie (ZLP) in Stade im Rahmen des Projekts „Evo – Endkonturnahe Volumenbauteile“ eine Fertigungskette für die vollautomatisierte Produktion endlosfaserverstärkter Strukturbauteile aus CFK im RTM-Verfahren entwickelt. Durch ein automatisiertes Drapieren und das Einbringen fertiger Subpreforms soll ein endkonturnahes Preforming erreicht werden, das einen ressourceneffizienten Umgang mit dem Fasermaterial ermöglicht und keine Nachbearbeitung am fertigen Bauteil erfordert. Die anschließende Fasertränkung im RTM-Werkzeug wird durch einen flächigen Anguss und einen speziellen Temperprozess beschleunigt. Mit der integrierten Betrachtung des Gesamtprozesses soll eine hohe Prozesssicherheit erreicht und gleichzeitig die Verweildauer des Bauteils im Werkzeug minimiert werden (vgl. Abb. 9). Angestrebt werden Stückzahlen von 100.000 Stück pro Jahr bei Bauteilkosten von deutlich unter 80 € pro Kilogramm und einer Taktzeit von fünf Minuten.<sup>41</sup>

<sup>40</sup> M. Schneebauer, KraussMaffei Technologies GmbH, Vortrag thermocomp, Chemnitz, 29.06.2011

<sup>41</sup> Friedrich, M.: Perspektiven einer automatisierten RTM-Fertigung. Vortrag am Wissenschaftstag 2009, DLR Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik, Braunschweig, 30.09.2009

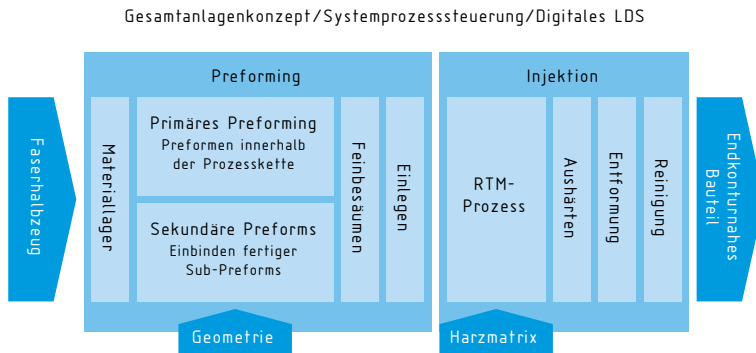


**Abb. 8: RTM-Prozess schematisch**<sup>42</sup>

An der Entwicklung neuer Prozessketten für eine ressourceneffiziente Produktion endlosfaserverstärkter Hochleistungsbauteile wird auch im Rahmen der DFG-Forschergruppe FOR 860 an der RWTH Aachen und dem Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT gearbeitet. Ziel ist es, durch Integration der Prozessschritte Preformen, Imprägnieren, Formen und Vernetzen Zykluszeiten von unter zehn Minuten bei einem Faservolumengehalt von über 50 Prozent zu erreichen.<sup>43</sup>

<sup>42</sup> Ch. Fuchs: Herstellung von CFK-Leichtbaukomponenten in Autoklav- und Injektionstechnik. TÜV Süd, undatiert, [http://www.tuev-sued.de/uploads/images/1134986798495817443325/24\\_fuchs\\_d.pdf](http://www.tuev-sued.de/uploads/images/1134986798495817443325/24_fuchs_d.pdf). Verfügbar über archive.org unter [https://web.archive.org/web/20071101035230/http://www.tuev-sued.de/uploads/images/1134986798495817443325/24\\_fuchs\\_d.pdf](https://web.archive.org/web/20071101035230/http://www.tuev-sued.de/uploads/images/1134986798495817443325/24_fuchs_d.pdf) (aufgerufen am 20.12.2013)

<sup>43</sup> Website der DFG-Forschergruppe 860. <http://www.for860.rwth-aachen.de> (aufgerufen am 20.12.2013)



**Abb. 9: Prozesskette für die vollautomatisierte Fertigung endkonturnaher Volumenbauteile aus CFK<sup>44</sup>**

Auch die Entwicklung serientauglicher Verfahren zur Produktion von Hochleistungsverbundwerkstoffen mit thermoplastischer Matrix wird in Deutschland vorangetrieben. Um die Vorteile der im Vergleich zu Duroplasten schnelleren Verfestigung auszunutzen, arbeiten Forscher am Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie ICT an sogenannten T-RTM-Prozessen (Thermoplast-Resin Transfer Molding), bei denen das thermoplastische Matrixsystem im Werkzeug in situ polymerisiert. Dadurch ergeben sich Vorteile hinsichtlich der Infiltration und Imprägnierung der Faserverstärkungsstrukturen sowie höhere Füllgrade. Mit verschiedenen Thermoplasten werden bei diesem Verfahren Zykluszeiten von wenigen Minuten erreicht.

### Organobleche

Als Organobleche werden vollständig imprägnierte und konsolidierte Halbzeuge aus thermoplastischer Matrix und eingelagerten Endlosfasergelegen oder -geweben bezeichnet. Sie weisen den höchsten Faseranteil und den größten Orientierungsgrad aller faserverstärkten Werkstoffe auf und können, ähnlich wie metallische Bleche, umgeformt und gefügt werden. Jedoch ist die Umformung von langfaserverstärkten Organoblechen durch die begrenzte Formbarkeit der Faserstruktur limitiert. Eine entlang der Lastpfade opti-

<sup>44</sup> M. Wiedemann (2011): CFK im Automobil – Ein weiter Weg? Beitrag beim 5. Fachkongress „Kunststofftrends im Automobil“, Wolfsburg, 28.09.2011

mierte Faserarchitektur ist bei großen Umformgraden nur sehr aufwändig zu realisieren.<sup>45</sup>

Organobleche erreichen vergleichbar hohe Festigkeiten wie metallische Bauteile, allerdings mit einem Gewichtsvorteil von über 50 Prozent gegenüber Aluminium. In der Flächensteifigkeit und beim Korrosionsverhalten sind sie metallischen Blechen sogar deutlich überlegen. Für die Matrixkomponente von Organoblechen werden meist Polyamide, Polypropylen oder auch thermoplastisches Polyurethan eingesetzt. Organobleche können umgeformt werden, indem sie auf die Schmelztemperatur der Thermoplastmatrix erhitzt und dann mit niedrigem Druck mitsamt dem enthaltenen Fasergewebe in die gewünschte Form gebracht werden. Die Investitionskosten für die erforderlichen Werkzeuge, etwa zum Tiefziehen, sind bei Organoblechen deutlich niedriger anzusetzen als bei metallischen Blechen.

Es besteht auch die Möglichkeit, Organobleche in Hybridbauteilen zu nutzen. Indem sie dort die sonst übliche metallische Komponente ersetzen, kann ein vollständig aus thermoplastischen Komponenten bestehendes Hybridbauteil gewonnen werden, bei dem das Problem unterschiedlicher Wärmeausdehnungskoeffizienten von metallischen und polymeren Bestandteilen nicht mehr auftritt.

Die potenziellen Anwendungsmöglichkeiten von Organoblechen und Hybridbauteilen im Fahrzeugbau sind vielfältig: beispielsweise bei Unterböden, Quer- und Längsträgern, Sitzschalen, Rückbankwänden, Crashelementen oder Türverkleidungen.<sup>46</sup> Bei einer entsprechend gefertigten Seitentür könnten bis zu 20 Prozent an Gewicht eingespart werden im Vergleich zur konventionellen Herstellung aus Stahlblech. Zusätzlich ergäben sich auch Möglichkeiten der Kosteneinsparung durch die Integration von Aufnahmen für Schlösser, Airbags, Lautsprecher, Fensterheber und Seitenspiegel direkt in das Bauteil. Noch vorteilhafter würde sich das Integrationspotenzial beim Instrumententafelträger auswirken. Eine weitere Anwendungsmöglichkeit ergibt

Für Organobleche und Hybridbauteile gibt es im Fahrzeugbau vielfältige Anwendungsmöglichkeiten.

<sup>45</sup> Persönliche Mitteilung von Prof. Dr. H. Voggenreiter, DLR

<sup>46</sup> Stock, A.; Egger, P.: Hybridteillfertigung: Organobleche verlassen das Hochpreissegment. *Composites World*, Februar 2011, 12 – 15

sich bei Trägermodulen für Panoramadächer aus thermoplastischen Hybridstrukturen.<sup>47</sup>

Es sei jedoch darauf hingewiesen, dass die Materialkosten bei Thermoplasten bis zu dreimal höher liegen können als bei Duroplasten. Neben der kürzeren Taktzeit können intelligente Integralstrukturen durch Nutzung der Schweißbarkeit des Materials diesen Kostennachteil kompensieren.<sup>48</sup>

Die Techniken zur Herstellung von Organoblechen und ihrer Einbindung in Hybridstrukturen werden in verschiedenen Richtungen mit dem Ziel weiterentwickelt, die Herstellung zu beschleunigen und die Ressourceneffizienz zu steigern. So haben Forscher an der Universität Erlangen-Nürnberg das sogenannte In-Mould-Forming-Verfahren entwickelt, bei dem die bislang getrennten Prozessschritte des Spritzgießens und Umformens in einem Werkzeug integriert werden. Damit können Hybridstrukturen aus Kunststoff und endlosfaserverstärktem Kunststoff schnell und kosteneffizient hergestellt werden. Im Rahmen eines DFG-geförderten Transferprojektes wurde zusammen mit Industriepartnern eine Lenksäulenbindung als Demonstrator mit diesem Verfahren realisiert.

Im Projekt „SpriForm“ des Bundesforschungsministeriums (BMBF) wurden die Vorteile des thermoplastischen Spritzgusses mit denen des Thermoformens kombiniert und Organobleche mit thermoplastischen Kunststoffstrukturen umspritzt. Auf diese Weise können besonders leichte Hybridbauteile mit komplexer Geometrie sowie sehr hoher Festigkeit und großem Energieabsorptionsvermögen gefertigt werden. Als Beispielanwendung wurde unter anderem ein Stoßfängerquerträger mit 20 Prozent Gewichtsreduzierung gegenüber Aluminium hergestellt, bei dem allerdings ein Glasfasergewebe und keine Kohlenstofffasern zur Verstärkung eingesetzt wurden.<sup>49</sup>

<sup>47</sup> Malek, T.: Noch leichter, noch belastbarer. *Plastverarbeiter*, Mai 2010, 38 – 39

<sup>48</sup> Persönliche Mitteilung von Prof. Dr. H. Voggenreiter, DLR

<sup>49</sup> Anja Jäschke: Funktionaler Leichtbau durch SpriForm. Bayern Innovativ, 23.06.2010, [http://www.automanager.de/BayernInnovativ/Zulieferer\\_Innovativ2010/jaeschke.php](http://www.automanager.de/BayernInnovativ/Zulieferer_Innovativ2010/jaeschke.php) (aufgerufen am 20.12.2013)

Einen weiteren interessanten Ansatz stellt die zusätzliche Modifikation von Organoblechen mit Kohlenstoffnanoröhren (CNT) dar, die im Teilprojekt CarboCar der BMBF-geführten Innovationsallianz Inno.CNT verfolgt wird. Ziel ist es hier, neben der Optimierung der Verstärkungsstruktur und mechanischen Beständigkeit eine Funktionsschicht zu entwickeln, die gleichzeitig die Textilstrukturen der Verstärkungsfasern verdeckt. Die durch die CNT verursachte elektrische Leitfähigkeit erlaubt zudem den Einsatz großserientauglicher elektrostatischer Lackier- oder Pulverbeschichtungsverfahren.<sup>50</sup>

### Weitere Entwicklungstrends

Um die Herstellungskosten von CFK-Bauteilen noch weiter zu senken und die Ressourceneffizienz zu erhöhen, wird an weiteren Produktionsprozessen und neuen Halbzeugen gearbeitet. Beispielsweise wurde am Faserinstitut Bremen e.V. gemeinsam mit Partnern aus Industrie und Forschung die sogenannte Organofolie entwickelt. Bei diesem neuartigen CFK-Halbzeug werden erstmals gerichtete Langfasern, die aus Recyclingprozessen oder endlosen Neufasern gewonnen werden, in einer Folienmatrix verarbeitet. Nach der Faserimprägnierung können aus diesem Material Bauteile im Tiefziehverfahren hergestellt werden. Der Gesamtprozess verläuft materialeffizient und ist für die Serienproduktion mit kurzen Zykluszeiten geeignet. Mit der Erweiterung des Verfahrens auf die Verwendung von Pyrolysefasern aus CFK-Abfällen wird es möglich, diese als hochwertigen Rohstoff für neue Produkte zu nutzen (siehe auch Recycling von CFK in Kapitel 5).<sup>51, 52</sup>

Auch am Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie in Aachen wird ein dort entwickeltes Verfahren weiter optimiert, mit dem CFK aus Endlosfasern und thermoplastischer Matrix vollautomatisch hergestellt werden können.

<sup>50</sup> CarboCar. [http://www.inno-cnt.de/de/backgrounder\\_carbocar.php](http://www.inno-cnt.de/de/backgrounder_carbocar.php) (aufgerufen am 20.12.2013)

<sup>51</sup> Angelika Rockel: Neuartiger Werkstoff: Organofolie für die Automobilindustrie. Informationsdienst Wissenschaft, 20.07.2009, <http://idw-online.de/de/news326597> (aufgerufen am 20.12.2013)

<sup>52</sup> Fischer, H.; Bäumer, R.: Organofolien aus recycelten Kohlenstofffasern – neue Wege für CFK-Halbzeuge in der Serienproduktion. Vortrag, ThermoComp, Chemnitz, 30.06.2011

Die Kohlenstofffasern in Form aufgewickelter Bänder werden hier in mehreren Lagen aufeinandergestapelt, dabei mit einem Laserstrahl kurz angeschmolzen und zusammengepresst, so dass sie zu einer festen Struktur verschmelzen. Die minimal dosierte, lokal eingebrachte thermische Energie trägt zu mehr Ressourceneffizienz bei und erfordert nur eine kurze Abkühlphase. Somit besteht auch mit diesem Verfahren die Möglichkeit, komplex geformte Bauteile in großen Stückzahlen zu produzieren.<sup>53</sup>

Wie bei anderen Leichtbauweisen, beispielsweise mit sehr dünnen Stahlblechen, sind auch bei CFK-Konstruktionen zusätzliche Dämpfungsmaßnahmen erforderlich, um Komforteinbußen im Bereich der Akustik zu vermeiden. Insbesondere zur akustischen Optimierung im Frequenzbereich über 400 Hertz müssen hierfür Teppiche, Schaummaterialien und Filze eingesetzt werden. Bei niedrigeren Frequenzen zeigen Verbundmaterialien wie CFK hingegen ein günstigeres Dämpfungsverhalten. Durch ihren mehrschichtigen Aufbau bieten sie zusätzliche konstruktionstechnische Möglichkeiten, lokale und globale Steifigkeitseigenschaften so einzustellen, dass sich zum Beispiel die Eigenschwingungsfrequenzen der Karosserie nicht mit den Anregungen von Motor und Fahrwerk überschneiden.<sup>54</sup>

## Modellierung und Simulation

Für den ressourceneffizienten Einsatz von CFK-Strukturen im Fahrzeugbau werden neue Modelle und Simulationsverfahren zur Bauteilauslegung entwickelt. Gegenüber den etablierten metallischen Werkstoffen weisen die CFK-Verbundwerkstoffe aufgrund ihrer Faserausrichtung anisotrope mechanische Eigenschaften auf, die sich auch in richtungsabhängigen Kennzahlen widerspiegeln. Darüber hinaus reagieren sie in unterschiedlicher Weise auf Umgebungsparameter wie Temperatur und Feuchtigkeit, bei der Materialermüdung, bei Beschädigung, beim Crashverhalten sowie

<sup>53</sup> Fertigungstechnik macht Kohlenstofffasern fit für die Serie. VDI Nachrichten, 23.02.2011

<sup>54</sup> Michael Reichenbach: CFK ist das bessere Material der Zukunft. ATZ online, undatiert, <http://www.atzonline.de/Aktuell/Interviews/35/225/CFK-ist-das-bessere-Material-der-Zukunft.html>. Verfügbar über archive.org unter <https://web.archive.org/web/20120303052914/http://www.atzonline.de/Aktuell/Interviews/35/225/CFK-ist-das-bessere-Material-der-Zukunft.html> (aufgerufen am 20.12.2013)

bei Akustik und struktureller Dämpfung. Die Modellbildung bei kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen muss dabei vor allem den komplexeren Aufbau aus verschiedenen Komponenten und die Verfahrenstechnik berücksichtigen. Denn die innere Struktur dieser Kunststoffe und die daraus resultierenden mechanischen Eigenschaften sind nicht nur von der Art, Länge und Morphologie der Fasern abhängig, sondern maßgeblich auch vom Fertigungsprozess. So sind zum Beispiel die Verteilung und Ausrichtung der Fasern durch das Preforming-Verfahren und die Art des Einbringens der Faser in die Matrix bestimmt. Diese Informationen müssen zunächst mit Fertigungssimulationen erfasst werden, bevor sie in Modelle zur Bauteilauslegung mit Finite-Elemente-Methoden (FEM) einfließen können. Dazu befinden sich verschiedene methodische Ansätze zur numerischen Simulation in der Entwicklung, für die noch zuverlässige Werkzeuge zur Verfügung gestellt werden müssen.<sup>55</sup>

Neben Anforderungen an die Lebensdauer stellt im Kontext der Automobilindustrie der Fahrzeugcrash das dominierende Auslegungskriterium für die Bauteildimensionierung dar. Insbesondere im Bereich der Crashsimulation besteht daher Forschungsbedarf, um mit Simulationsmodellen für Faserverbunde eine ähnlich hohe Prognosequalität bei akzeptablen Rechenzeiten zu erlangen, wie es bei Simulationsmodellen für metallische Werkstoffe heute bereits der Fall ist. Besonders im Hinblick auf den Leichtbau durch Misch- oder Hybridbauweise rücken werkstoffübergreifende Fügestellen verstärkt in den Fokus. Daher besteht auch hier der Bedarf, durch geeignete Modellierungstechniken das Deformations- und Versagensverhalten von Verbindungsstellen effizient in der Simulation abzubilden.<sup>56</sup> Im Rahmen des BMBF-geförderten Forschungsprojektes SIMO-TEX werden Schädigungsvorgänge auf der Mikro- und Me-soebene analysiert und modelliert, die Verstärkungsstruk

<sup>55</sup> M. Brune, H. Oppermann: Anforderungen an Simulationsmethoden für die Auslegung von CFK-Strukturen im Automobilbau. [http://www.carbon-composites.eu/sites/carbon-composites.eu/files/anhaenge/gruppen/12/08/29/02\\_v\\_af\\_13.pdf](http://www.carbon-composites.eu/sites/carbon-composites.eu/files/anhaenge/gruppen/12/08/29/02_v_af_13.pdf) (aufgerufen am 20.12.2013)

<sup>56</sup> Forschungsaktivitäten der Arbeitsgruppe Struktursimulation. <http://www.fast.kit.edu/lbt/3317.php> (aufgerufen am 20.12.2013)



tur erfasst und schließlich das effektive Materialverhalten des Verbundwerkstoffes auf der Makroebene berechnet.<sup>57</sup>

### Werkstoffprüfung und Qualitätssicherung

Die Verfügbarkeit geeigneter Methoden zur Werkstoffprüfung und Qualitätssicherung bildet eine Grundvoraussetzung für den Masseneinsatz von CFK im Automobilbau. Die Verfahren müssen den erheblichen Sicherheitsanforderungen von Fahrzeugen gerecht werden und sich in die auf hohe Stückzahlen ausgelegten Produktionsprozesse integrieren lassen. Neben einer In-line-Qualitätssicherung bei der Produktion von CFK-Bauteilen sind auch die Entwicklung von Methoden für die Werkstoffprüfung im Betrieb, die Bestimmung von Schadenstoleranzen und die Charakterisierung im Bereich der Materialentwicklung gefragt. Prüfmerkmale sind unter anderem Delaminationen, Faserbrüche/-risse und Impactschäden sowie Toleranzabweichungen in den Abmessungen der Faserverbundstruktur.

Hier bieten sich zerstörungsfreie Prüfverfahren (ZFP) an. Zu den vergleichsweise etablierten Methoden zur zerstörungsfreien Schadensdetektion in CFK-Bauteilen zählen die Ultraschallverfahren, die bereits in der Luft- und Raumfahrtindustrie zum Einsatz kommen. Auch die zerstörungsfreie Prüfung mit Hilfe von Mikrowellen und verschiedenen thermografischen Verfahren ist für den industriellen Einsatz von CFK geeignet.<sup>58</sup> Einen bedeutenden Trend in der zerstörungsfreien Messtechnik ergibt der zunehmende Einsatz der 2D- und 3D-bildgebenden Röntgen-Computertomografie (CT). Die durch die CT scanbare Bauteilgröße hängt von der gewünschten Auflösung im CT-Scan ab. Genauigkeiten im Bereich von fünf Mikrometern lassen sich heute nur auf Probenlevel generieren. Große Bauteile im Bereich von einem halben Meter können bei handhabbarer

<sup>57</sup> H. Oppermann: Zur Lebensdauerberechnung faserverstärkter Kunststoffe im Automobilbau. MP Materials Testing 07-08/2012, Seite 479 – 487

<sup>58</sup> Norbert Doktor: Mikrowellen gegen Materialfehler – neues Prüfverfahren soll industriell einsetzbar werden. Informationsdienst Wissenschaft, 02.11.2009, <http://idw-online.de/pages/de/news342046> (aufgerufen am 20.12.2013)

Datenmenge mit einer Auflösung von hundert Mikrometern analysiert werden.<sup>59</sup>

Mittlerweile sind erste CT-Anlagen für industrielle Anwendungen in der Werkstoffprüfung auf dem Markt verfügbar, die ein Objekt innerhalb von fünf bis zehn Minuten komplett scannen können. Da bei der CT-Messtechnik zurzeit noch die Geschwindigkeit der Datengewinnung bzw. -auswertung begrenzt ist, werden spezielle Softwarelösungen entwickelt, um eine automatisierte, prozessintegrierte Defekterkennung und -analyse zu ermöglichen.

Die zerstörungsfreie Prüfung von CFK-Bauteilen wird derzeit am häufigsten in der Luft- und Raumfahrttechnik angewandt. Der Einzug von CFK im Fahrzeugbau wird aber nur gelingen, wenn diese zerstörungsfreien Prüfverfahren an die Anforderungen der automatisierten Serienproduktion in der Automobilindustrie angepasst werden. Im Rahmen einer umfassenden Vergleichsstudie hat das Fraunhofer-Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren (IZFP) die Potenziale zukünftiger CFK-Prüftechniken herausgearbeitet. Demnach steht bei den etablierten Verfahren wie Ultraschall die Einführung der Sampling-Phased-Array-Methode im Vordergrund, während bei den röntgenbasierten Verfahren die Laminografie zu höheren Auflösungsvermögen und kürzeren Prüfzeiten beitragen soll. Als wichtigste integrale Verfahren werden die Wirbelstromtechnik und die Thermografie gesehen. Abhängig von den konkreten Prüfanforderungen können auch verschiedene Inspektionsmethoden miteinander kombiniert werden, zum Beispiel die Ultraschalltechnik für eine besonders schnelle Detektion, Röntgenverfahren für hohe Auflösungen und Eindringtiefen und die Thermografie für die Prüfung besonders großer Flächen und die Detektion von Delaminationen.<sup>60</sup>

### Serienproduktion von CFK im Automobilbau

In der Großserie haben aufwändige Herstellungsprozesse eine wirtschaftliche Fertigung bisher verzögert. Denn die

<sup>59</sup> Persönliche Mitteilung von Prof. Dr. H. Voggenreiter, DLR

<sup>60</sup> Fraunhofer IZFP: Leichter bauen durch zerstörungsfreie Prüfung. Innovation Report, Ausgabe 2-2011, Hrsg.: CFK-Valley Stade e.V.

Produktion von CFK-Hochleistungsbauteilen verläuft immer noch sehr personal- und ressourcenintensiv. Bei der Faserverarbeitung ist der Automatisierungsgrad zurzeit insbesondere für kurze Taktzeiten im Produktionsablauf noch zu gering und damit zu teuer. Deshalb werden im Automobilsektor bisher vor allem Leichtmetalle und hochfeste Stähle verwendet. Der Hauptmarkt für CFK liegt derzeit in der Nischenproduktion von Bauteilen für gehobene Fahrzeugklassen sowie von Luxus-, Super-Luxus- und Elektroautos und noch nicht im Massenmarkt. So fertigt etwa BMW bereits CFK-Dächer für die Modelle M3 und M6 im mittleren Serienmaßstab in einer eigens dafür entwickelten Produktionslinie in Landshut. Das nun serienmäßig im Sportcoupé M3 verbaute CFK-Dach wiegt mit einem Gewicht von nur 4,5 Kilogramm weniger als die Hälfte des herkömmlichen Fahrzeugdachs aus Stahl und ist dabei sehr verwindungssteif. Aufgrund seiner hohen Position wirkt sich die Gewichtsersparnis bei diesem Bauteil besonders positiv auf die Absenkung des Fahrzeugschwerpunktes und damit die Verbesserung der Fahrdynamik aus. Das CFK-Dach wird auf die Karosserie aufgeklebt und verleiht dem Fahrzeug eine gewebeartige Optik. Derzeit werden in der Landshuter Fertigungsanlage etwa 50 Bauteile pro Tag produziert.<sup>61, 62</sup>

CFK-Einsatz in größeren Volumensegmenten erst in zehn bis 15 Jahren erwartet.

Bei einfacheren Bauteilgeometrien können heutige Produktionsanlagen abhängig vom eingesetzten Fertigungsverfahren jährlich bis zu 100.000 CFK-Bauteile herstellen und somit eine Großserienproduktion im Automobilbau bedienen.<sup>63</sup> Der Einsatz von CFK in größeren Volumensegmenten von einer halben Million und mehr Autos pro Jahr wird allerdings erst in zehn bis 15 Jahren erwartet.<sup>64</sup>

Seit 2012 haben sich über 70 Partner aus Forschung und Industrie im BMBF-geförderten Spitzencluster MAI Car-

<sup>61</sup> Mobilität der Zukunft: CFK – ein Werkstoff der Zukunft. BMW-Pressemeldung, 02.07.2010, <http://www.7-forum.com/news/Mobilitaet-der-Zukunft-CFK-ein-Werkstoff-3420.html> (aufgerufen am 20.12.2013)

<sup>62</sup> Honsel, G.: Das Auto von der Rolle. *Technology Review*, 12/2010, 52 – 56

<sup>63</sup> Wolfgang Pester: Karbon in Großserie ist möglich. *Hannoversche Allgemeine*, 05.11.2012, <http://www.haz.de/Ratgeber/Auto-Verkehr/uebersicht/Karbon-in-Grossserie-ist-moeglich> (aufgerufen am 20.12.2013)

<sup>64</sup> Thomas Geiger: Karbon erobert die Großserie. *Frankfurter Rundschau*, 22.07.2011, <http://www.fr-online.de/auto/karbon-erobert-die-grossserie,1472790,8699664.html> (aufgerufen am 20.12.2013)

bon zusammengeschlossen, mit dem Ziel, die Leichtbaueigenschaften kohlenstofffaserverstärkter Kunststoffe für verschiedene Anwendungsfelder bis 2020 großindustriell nutzbar zu machen. In insgesamt elf Projekten wird an entscheidenden Sprunginnovationen entlang dem gesamten Produktlebensweg gearbeitet – von der Materialherstellung über die Fertigung bis zum Recycling. Dabei stehen die Entwicklung großserientauglicher Herstellungsverfahren sowie die Erschließung von Ressourceneffizienzpotenzialen durch effiziente Prozesse, die Erforschung alternativer Rohstoffe und die Schließung von Stoffkreisläufen im Fokus.<sup>65</sup>

Durch ein CFK-gerechtes Design kann das Potenzial dieser Leichtbauwerkstoffe erst vollständig erschlossen werden. Obwohl der CFK-Einsatz in der Fahrzeugindustrie noch am Anfang der Entwicklung steht, können zukünftig seine besonderen Werkstoffeigenschaften bei neuen Fahrzeugkonzepten genutzt werden. Chancen ergeben sich vor allem bei der Neuentwicklung rein elektrisch angetriebener Fahrzeuge, die nicht mehr als Konversionsfahrzeuge auf Basis bestehender Modelle und Plattformen von Autos mit Verbrennungsmotor realisiert werden. Durch den Wegfall systembestimmender Komponenten wie Verbrennungsmotor, Getriebe und Abgasstrang sowie die Notwendigkeit der Integration neuer Einheiten wie Batterie und Elektromotor entstehen völlig neue Anforderungen und auch Freiheiten beim Fahrzeugdesign.

Entlang der gesamten Wertschöpfungskette sind verstärkte Aktivitäten zu beobachten, CFK für den Einsatz in Serienfahrzeugen verfügbar zu machen und die Ressourceneffizienz der eingesetzten Verfahren zu verbessern. Von den Original Equipment Manufacturers (OEMs) werden dabei unterschiedliche Strategien verfolgt. So haben etwa BMW und SGL Carbon das Gemeinschaftsunternehmen SGL Automotive Carbon Fibers LLC gegründet, um in einem neu errichteten Werk in Moses Lake in den USA ab 2013 Kohlenstofffasern für die CFK-Karosserie des neuen Elektro-

<sup>65</sup> M.-A.-I Carbon – Webseite des Spitzenclustgers: <http://www.mai-carbon.de/index.php/de/> (aufgerufen am 20.12.2013)

fahrzeugs i3 zu produzieren.<sup>66</sup> Auch Volkswagen ist mit acht Prozent bei dem Kohlenstoffwerkstoff-Spezialisten SGL Carbon eingestiegen und plant mit dem Ein-Liter-Auto XL1 erstmals ein Fahrzeug mit vollständiger CFK-Karosserie.<sup>67</sup>

Während diese Fahrzeuge von Beginn an mit einem hohen CFK-Anteil konzipiert sind, arbeiten andere Hersteller an der schrittweisen Einführung von CFK-Komponenten vor allem in den höheren Fahrzeugklassen. Daimler hat mit der japanischen Toray Industries, dem weltweit größten Hersteller von Kohlenstofffasern, eine Partnerschaft vereinbart, um die Entwicklung der Prozesstechnik für die kostengünstige Fertigung von CFK-Bauteilen voranzutreiben, die in verschiedenen Baureihen zunehmend zum Einsatz kommen sollen.<sup>68</sup> Audi ist mit Voith, einem Spezialisten für Papierverarbeitung und faserverstärkte Kunststoffe, eine Kooperation eingegangen, um CFK und eventuell auch andere neue Leichtbau-Werkstoffe für die Großserienfertigung verfügbar zu machen.<sup>69</sup>

Zur Demonstration der Anwendungsmöglichkeiten von CFK hat Toray Industries das Konzeptfahrzeug „Teewave AR1“ entwickelt. Dabei handelt es sich um ein elektrisch angetriebenes Leichtbaufahrzeug mit einem im RTM-Verfahren hergestellten CFK-Monocoque, Motorhaube und Dach als integral kohlenstofffaserverstärkte Thermoplastbauteile sowie CFK-Crashelemente.<sup>70</sup>

<sup>66</sup> SGL Group und BMW Group: Neues Carbonfaserwerk wird in Moses Lake / USA errichtet. 06.04.2010, [http://www.sglgroup.com/cms/international/press-lounge/news/2010/04/04062010\\_p.html?\\_\\_locale=de](http://www.sglgroup.com/cms/international/press-lounge/news/2010/04/04062010_p.html?__locale=de) (aufgerufen am 20.12.2013)

<sup>67</sup> Volkswagen überrascht BMW. Manager Magazin, 01.03.2011, <http://www.manager-magazin.de/unternehmen/autoindustrie/0,2828,748364,00.html> (aufgerufen am 20.12.2013)

<sup>68</sup> Tom Grünweg: Die schwarze Zukunft des Autobaus. Spiegel online, 25.03.2011, <http://www.spiegel.de/auto/aktuell/0,1518,753000,00.html> (aufgerufen am 20.12.2013)

<sup>69</sup> Audi entwickelt neue Leichtbau-Werkstoffe. 17.02.2011, <http://www.pkwradar.de/news/audi/audi-entwickelt-neue-leichtbau-werkstoffe-8259/> (aufgerufen am 20.12.2013)

<sup>70</sup> „Soficar wir Toray Carbon Fibers Europe S.A.: Verbundwerkstofflösungen für die Automobilindustrie. CCEv NEWS, 11. Ausgabe, 1. Halbjahr 2012, S. 11

## 5. RECYCLING VON CFK

Um die Ressourceneffizienz des Einsatzes von CFK bewerten zu können, ist eine Betrachtung entlang dem gesamten Lebensweg erforderlich. Faserverbundwerkstoffe und insbesondere CFK weisen durch ihr geringes spezifisches Gewicht ein großes Potenzial zur Gewichtsreduzierung und damit auch zur Ressourceneinsparung während der Nutzungsphase auf. Dem steht aber unter Umständen ein deutlich höherer Energieaufwand für die Herstellung eines CFK-Bauteils im Vergleich zu Stahl und auch Aluminium gegenüber. Genaue Analysen der Energie- und Stoffströme zeigen allerdings, dass die Bilanzen für die verschiedenen Werkstofflösungen im Vergleich sehr stark vom Bauteil und vom verwendeten Materialsystem abhängen.<sup>71</sup>

Ein Vorteil von CFK hinsichtlich des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks gegenüber anderen Werkstoffen ergibt sich erst, wenn das Material vollständig recycelt werden kann. Allerdings sind die Technologien und Verfahren für das Recycling von CFK bisher nur in Ansätzen entwickelt. Die zentrale Herausforderung besteht dabei in der Trennung von Fasern und Matrixmaterial. Um die Ökobilanz von CFK-Bauteilen deutlich zu verbessern, wäre es notwendig, dass die mit hohem Energieaufwand hergestellten Lang- und Endlosfasern wiedergewonnen und erneut in einem hochwertigen Verbundwerkstoff eingesetzt werden könnten. Damit wäre es zum einen möglich, Engpässen bei der Verfügbarkeit von Primärfasern zu begegnen. Zum anderen könnte dadurch eine effiziente Kreislaufwirtschaft von CFK erreicht werden. Damit ließen sich auch die zukünftig weiter steigenden Quoten für stoffliches Recycling in der Altfahrzeug-Verordnung erfüllen. Die aktuell am weitesten fortgeschrittenen Ansätze sehen jedoch zunächst eine Zerkleinerung des Materials und damit auch der darin enthaltenen Fasern vor.

Weltweit gibt es erst einige wenige Aktivitäten im Bereich Forschung und Entwicklung zum stofflichen und chemi-

<sup>71</sup> M. Achternbosch, K.-R. Bräutigam, C. Kupsch, B. Reßler, G. Sardemann, „Analyse der Umweltauswirkungen bei der Herstellung, dem Einsatz und der Entsorgung von CFK- bzw. Aluminiumrumpfkomponten“, Wissenschaftliche Berichte FZKA 6879 des Forschungszentrums Karlsruhe 2003

schen Recycling von CFK-Bauteilen und CFK-Produktionsabfällen. In Deutschland ist hier in erster Linie die CFK Valley Stade Recycling GmbH & Co. KG zu nennen, die Anfang 2011 in Wischhafen die erste Recyclinganlage für CFK-Abfälle in Betrieb genommen und dafür im selben Jahr den ersten „Deutschen Rohstoffeffizienzpreis“ gewonnen hat.<sup>72</sup> Im CFK-Recycling-Center setzt man auf ein pyrolysebasiertes Verfahren zum Recycling von CFK-Materialien. Trockene Kohlenstofffaser-Reste, Prepreg-Materialien und End-of-Life-Bauteile werden hier zunächst sortiert und zerkleinert. Im anschließenden Pyrolyseprozess wird das Material auf 400 bis 1.000 °C erhitzt, so dass das Matrixmaterial verdampft. Da die ungeschützten Fasern nicht mit Sauerstoff in Kontakt kommen dürfen, findet der Prozess unter Schutzgas statt. Die Anlage verfügt für die Verarbeitung über eine Kapazität von rund 1.000 Tonnen CFK-Bauteilen und Produktionsabfällen pro Jahr. Die Anlage arbeitet energieeffizient und emissionsreduziert, da Prozessenergie rückgewonnen und unter anderem Solarenergie verwendet wird. Neben einer Kapazitätserweiterung plant das Unternehmen ein Forschungsprojekt zur Herstellung von Kohlenstofflangfasern durch Recycling. Die wiedergewonnenen Kurzfasern werden individuell nach Kundenwünschen konditioniert, oberflächenveredelt und als neue Produkte von der Schwesterfirma carboNXT vertrieben. Mit diesen relativ kurzen Fasern lassen sich zwar keine Fasermatten für hochwertige CFK-Bauteile herstellen, jedoch bieten sie sich für verschiedene andere Anwendungen an, vor allem als Verstärkungskomponenten in Kunststoffteilen oder beim Spritzguss von Leichtbauteilen im Maschinenbau sowie Innenverkleidungen. Weitere Einsatzfelder sind aufgrund der Leitfähigkeit des Materials Bauteile für die Fahrzeugelektronik. Die Recyclate fließen also zum Teil in die Fahrzeugneuproduktion.<sup>73</sup> Die recycelten Fasern sind deutlich kostengünstiger als vergleichbare neu produzierte Fasern

Recycling wichtiger  
Faktor für die  
Ökobilanz von CFK

<sup>72</sup> Karl Meyer Unternehmen CFK Valley Stade Recycling GmbH & Co. KG und carboNXT GmbH gewinnen „Deutschen Rohstoffeffizienz-Preis 2011“. CFK Valley Stade, ohne Datum, [http://www.cfk-recycling.com/index.php?id=144&tx\\_ttnews%5Btt\\_news%5D=13](http://www.cfk-recycling.com/index.php?id=144&tx_ttnews%5Btt_news%5D=13) (aufgerufen am 20.12.2013)

<sup>73</sup> Nachhaltiger Leichtbau für E-Autos; Sonnenenergie-Offizielles Fachorgan der Deutschen Gesellschaft für Sonnenenergie e. V. Ausg. 3/2012; URL: [http://www.sonnenenergie.de/index.php?id=30&no\\_cache=1&tx\\_ttnews%5Btt\\_news%5D=207](http://www.sonnenenergie.de/index.php?id=30&no_cache=1&tx_ttnews%5Btt_news%5D=207) (aufgerufen am 20.12.2013)

(20 bis 30 Prozent unter dem Preis für Neufasern).<sup>74, 75</sup>

Seit Ende 2010 lässt das Land Bayern in der Müllverbrennungsanlage in Burgau, Landkreis Günzburg, eine Entwicklungsstudie zur Modifikation der Anlage durchführen, mit dem Ziel einer möglichst hochwertigen Schließung des Stoffkreislaufes für CFK durch pyrolytisches Recycling. Dazu soll eine ressourcenschonende Recyclingprozesskette realisiert werden, die es ermöglicht, an den industriellen Bedarf angepasste CFK-Recyclingprodukte mit großem Durchsatz herzustellen.<sup>76</sup>

Unter dem Label „CompoCycle“<sup>77</sup> haben sich Unternehmen der Verbundwerkstoff- und der Entsorgungsindustrie zusammengesetzt, um ein Rücknahmesystem und eine damit verbundene Prozesskette aufzubauen, mit der alte Faser-verbundbauteile aufbereitet werden, um sie als Roh- und Brennstoff für die Zementherstellung einzusetzen. Dadurch ist zwar eine vollständige stoffliche und thermische Verwertung von CFK-Abfällen möglich; allerdings wird mit diesem Verfahren keine werkstoffliche Wiederverwertung hochwertiger Verbundwerkstoffe erreicht.<sup>78</sup>

### Recycling von CFK mittels Solvolyse

Chemische Recycling-Verfahren auf Basis einer Solvolyse werden neben den mechanischen beziehungsweise stofflichen und pyrolytischen Recycling-Ansätzen für kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe untersucht (vgl. Abb. 10). Dabei wird der Matrix-Kunststoff mittels eines reaktiven Lösungsmittels zu einem universell verwendbaren, flüssigen Recyclat aufgelöst und so von der Kohlenstofffaser getrennt. Auf diese Weise kann hier die Kohlenstofffaser zurückgewon-

<sup>74</sup> Startschuss für neue CFK-Recyclinganlage. K Zeitung online, 02.04.2012, <http://www.kzeitung.de/Startschuss+fuer+neue+CFK-Recyclinganlage/150/1085/35048/> (aufgerufen am 20.12.2013)

<sup>75</sup> Auch stabile Carbonfasern lassen sich wiederverwerten, Stuttgarter Zeitung, 04.01.2010

<sup>76</sup> M. Kümmeth: Wie tauglich ist die Pyrolyse zur Schließung des CFK-Stoffkreislaufs? MaschinenMarkt, 26.04.2011, <http://www.maschinenmarkt.vogel.de/themenkanale/konstruktion/werkstoffe/articles/312969/> (aufgerufen am 20.12.2013)

<sup>77</sup> Composite Recycling – Firmenwebseite: <http://www.compocycle.com> (aufgerufen am 20.12.2013)

<sup>78</sup> „Nachhaltigkeit von Faserverbundwerkstoffen – Betrachtung anhand ausgewählter Anwendungsbeispiele“, Arbeitskreis „Nachhaltigkeit“ der AVK – Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe e.V.



nen werden.<sup>79</sup> In einem Forschungsprojekt der University of Nottingham (UK), finanziert vom Flugzeugbauer Boeing, werden überkritische Fluide als Lösungsmittel eingesetzt, um einerseits die bei der thermischen Solvolyse verbundene Beschädigung der Fasern zu vermeiden und andererseits ein umweltschonendes Lösungsmittel zu verwenden. Auf diese Weise können auch Chemikalien aus der Polymermatrix wiedergewonnen werden.<sup>80</sup>

<sup>79</sup> Ch. Morin et al., "Near- and supercritical solvolysis of carbon fibre reinforced polymers (CFRPs) for recycling carbon fibers as a valuable resource", *J. of Supercritical Fluids* 66 (2012) 232 – 240

<sup>80</sup> CFK-Recycling: Boeing finanziert Uni Nottingham. KunststoffWeb, 04.11.2012, [http://www.kunststoffweb.de/ki\\_ticker/CFK-Recycling\\_Boeing\\_finanziert\\_Uni\\_Nottingham\\_t220709](http://www.kunststoffweb.de/ki_ticker/CFK-Recycling_Boeing_finanziert_Uni_Nottingham_t220709) (aufgerufen am 20.12.2013)

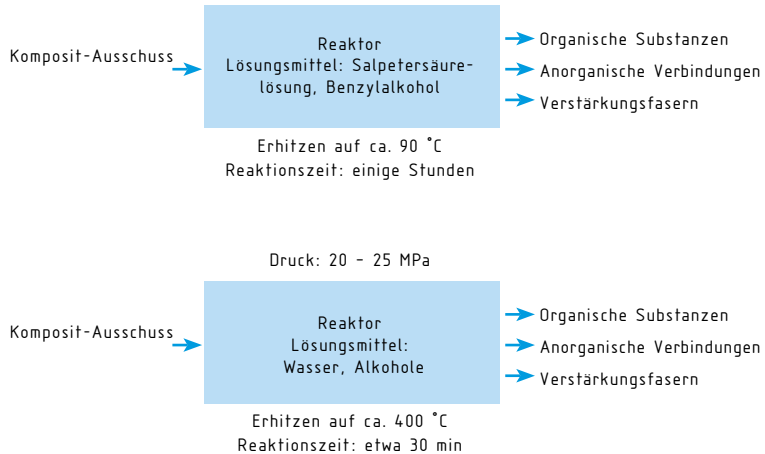
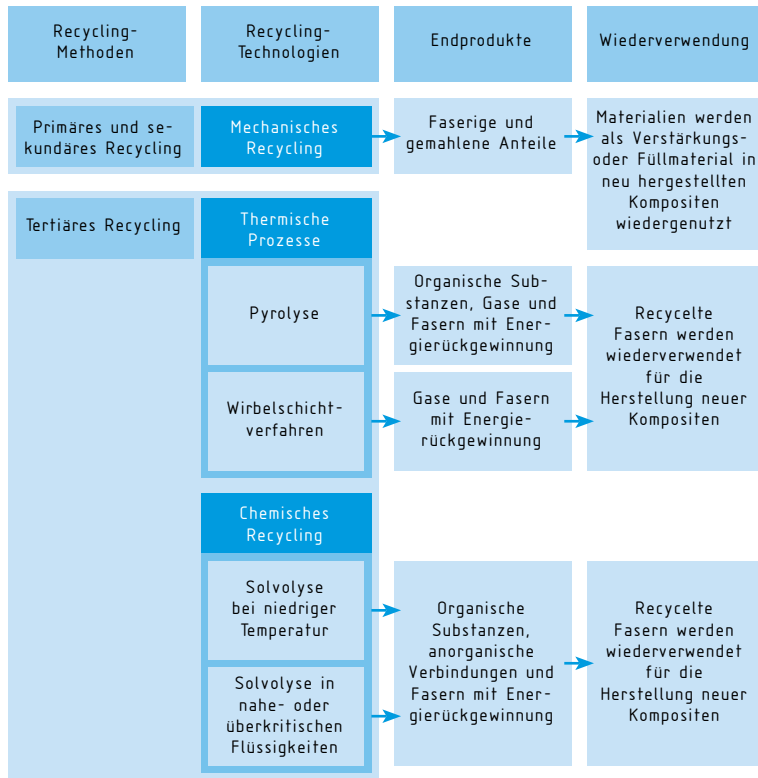


Abb. 10: Recycling-Technologien für CFK-Komposite<sup>81</sup>

<sup>81</sup> Ch. Morin et al.: Near- and supercritical solvolysis of carbon fibre reinforced polymers (CFRPs) for recycling carbon fibers as a valuable resource. J. of Supercritical Fluids 66 (2012) 232 - 240

## 6. BEDARF AN FORSCHUNG UND ENTWICKLUNG

Kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe gelten als aussichtsreiche Zukunftswerkstoffe für die Automobilbranche. Allerdings sind die bisherigen Herstellungsverfahren nicht kompatibel mit den Erfordernissen industrieller Fahrzeugfertigung. Hier sind neue Produktionskonzepte notwendig, die eine für die Serienproduktion mit kurzen Taktzeiten geeignete Produktivität ermöglichen. Um sich im Wettbewerb gegen andere Leichtbauwerkstoffe durchzusetzen, ist noch eine deutliche Kostensenkung der Fasern und Komposite erforderlich. Diese Ziele können nur erreicht werden, wenn neue automatisierte und vor allem ressourcenschonende Verfahren und Lösungsansätze entwickelt werden. Zudem sind bessere Tools für die werkstoffgerechte Auslegung und Qualitätssicherung (zerstörungsfreie Prüfverfahren) notwendig sowie hochwertige, industrietaugliche Recyclingverfahren.

Um sich im Wettbewerb gegen andere Leichtbauwerkstoffe durchzusetzen, ist eine deutliche Kostensenkung bei Fasern und Komponenten erforderlich.

Vom Rohstoff bis zum fertigen CFK-Bauteil sind folgende Verfahrens- und Produktionsschritte hinsichtlich Ressourceneffizienz, Produktivität und Kosten zu optimieren:

1. Gewinnung des Rohstoffes,
2. Herstellung des Vormaterials,
3. Herstellung der Kohlenstofffasern,
4. Herstellung des CFK-Verbundwerkstoffes,
5. Herstellung der Fertigteile.

Nach einer Studie von Roland Berger zur Serienproduktion hochfester Faserverbundbauteile treiben zahlreiche deutsche Maschinenbauer die Entwicklung der CFK-Technologien derzeit voran. Allerdings fehlt häufig die Kompetenz für den kompletten Produktionsgang und die systemische Integration aller seiner Teilprozesse. Diese übernehmen derzeit vor allem die großen Automobilhersteller als Betreiber der Produktionsanlagen. Längerfristig kann dies jedoch nur eine Übergangslösung darstellen. Für den Maschinenbau bieten sich hier Perspektiven als Hersteller spezieller

Komponenten oder von Komplettsystemen.<sup>82</sup> Jeder einzelne Schritt in der Wertschöpfungskette kann dazu beitragen, die Kosten-, Ressourcen- und Energiepotenziale zu verbessern.

Bislang dient Erdöl als Rohstoffquelle für die Herstellung des Vormaterials für Kohlenstofffasern, indem daraus Polyacrylnitril (PAN) gewonnen wird. Um langfristig von Erdöl als einziger Rohstoffquelle unabhängig zu werden, könnte die Herstellung von Kohlenstofffasern auf Basis nachwachsender Rohstoffe eine viel versprechende Alternative ergeben. Allerdings liegen derzeit weltweit nur wenige Forschungsarbeiten zur Entwicklung geeigneter Prozesse für die Kohlenstofffaser-Produktion aus nachwachsenden Rohstoffen wie Zellulose oder Lignin vor. Zwar lässt sich Lignin, das bei der Zellstoffherstellung als Nebenprodukt anfällt, reinigen und einschließlich Karbonisierung weiterverarbeiten (vgl. Abb. 12). Im Gegensatz zur Verarbeitung von PAN entsteht dabei jedoch zunächst keine hochorientierte Faserstruktur, so dass hier noch weiterer Forschungsbedarf besteht.<sup>83</sup>

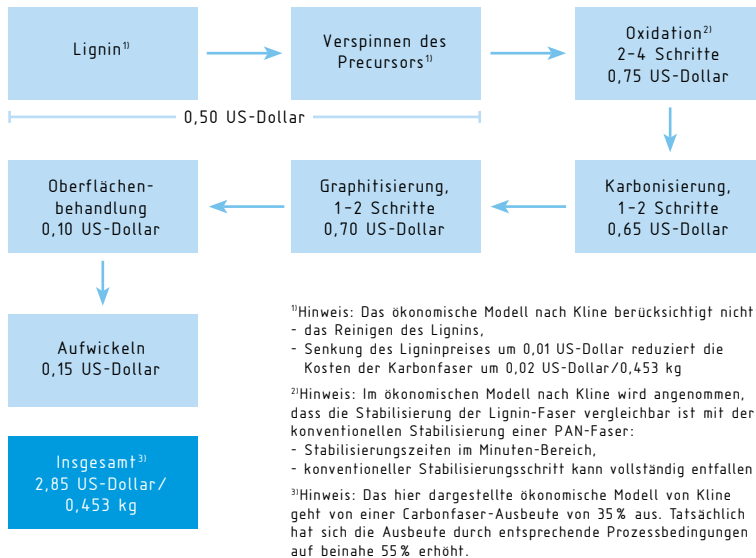
Die Umwandlung des Vormaterials, aktuell meistens PAN, zur Kohlenstofffaser erfolgt typischerweise in drei thermischen Prozessen. Dabei kommt es darauf an, dass alle Fasern die einzelnen Prozessschritte unter möglichst gleichen Bedingungen durchlaufen. Dazu müssen Temperaturen, Strömungen und Atmosphärenzusammensetzungen in den entsprechenden Anlagen homogen gehalten werden. Ebenso ist es notwendig, die einzelnen Prozessschritte präzise aufeinander abzustimmen. Dies betrifft sowohl die thermischen Prozesse, also das Oxidieren und Karbonisieren der Fasern, als auch die mechanischen Teilschritte des Gesamtprozesses wie das Abwickeln der PAN-Precursoren, den Fadenantrieb und das Aufspulen der fertigen Kohlenstofffasern. In Summe tragen diese Optimierungen nicht nur zu einer konstant hohen Fertigungsqualität, sondern auch zur

Alternative  
Rohstoffe sind  
zu erforschen.

<sup>82</sup> Ralph Lässig et al.: Serienproduktion von hochfesten Faserverbundbauteilen. Hrsg.: Roland Berger, VDMA (September 2012)

<sup>83</sup> Werner Bruckner: CFK: Hohe Kosten blockieren Durchbruch am Massenmarkt. VDI nachrichten, 25.05.2012, <http://www.ingenieur.de/Themen/Kunststoffe/CFK-Hohe-Kosten-blockieren-Durchbruch-am-Massenmarkt> (aufgerufen am 20.12.2013)

Verkürzung der Durchlaufzeiten und Erhöhung der Effizienz bei. Weitere Ressourceneinsparungen sind durch eine effiziente Anlagentechnik und zusätzliche Maßnahmen wie beispielsweise die Nutzung von Restwärme zu erzielen.<sup>84</sup>



**Abb. 11: Erste Versuche und Kostenberechnungen für den Herstellungsprozess von Kohlenstofffasern aus Lignin<sup>85</sup>**

Auch der daran anschließende Schritt in der Wertschöpfungskette, die Herstellung von Verbundwerkstoffen, ist von großer Bedeutung, da ein Großteil der Herstellungskosten in der Teilefertigung anfällt. Hier sind ausgereifte automatisierte Herstellungsprozesse und kürzere Bearbeitungszyklen erforderlich. Ebenso besteht noch Entwicklungsbedarf bei der Minimierung von Verschnitt und bei der Qualitätssicherung.<sup>86</sup>

In diesem Zusammenhang entwickeln beispielsweise auch

<sup>84</sup> Werner Bruckner: CFK: Hohe Kosten blockieren Durchbruch am Massenmarkt. VDI nachrichten, 25.05.2012, <http://www.ingenieur.de/Themen/Kunststoffe/CFK-Hohe-Kosten-blockieren-Durchbruch-am-Massenmarkt> (aufgerufen am 20.12.2013)

<sup>85</sup> Bernd Wohlmann et al., Vortrag „Neue Entwicklungen auf dem Gebiet der Kohlenstofffaser“, 2010

<sup>86</sup> Ebd.

BASF und die SGL Group gemeinsam ein thermoplastisches CFK, basierend auf einem reaktiven Polyamid-System in Kombination mit dafür geeigneten Kohlenstofffasern. Ziel ist eine gegenüber duroplastischen CFK deutlich schnellere Bauteilproduktion, wie sie für die Serienfertigung im Automobilbau erforderlich ist. Die beiden Unternehmen nutzen hierzu dünnflüssige, hochreaktive Caprolactam-Formulierungen. Wichtig ist dabei auch, dass eine gute Haftung zwischen Matrixsystem und Faser erfolgt. Dies soll durch eine geeignete Behandlung der Faseroberfläche sichergestellt werden.<sup>87</sup>

Auch für die CFK-Zerspanung fehlen neue, automatisierte Fertigungsprozesse, die die Produktion von Bauteilen aus CFK erleichtern – und damit auch deren Preise senken können. Bei der FEM-Simulation von Zerspanungsprozessen ist die Entwicklung eines neuen Werkstoffmodells erforderlich, das realitätsnah die Besonderheiten der Kohlenstofffaser berücksichtigt. Die Modelle von Metallen und kohlenstofffaserverstärkten Verbundwerkstoffen unterscheiden sich stark. Metalle zeigen Materialeigenschaften, die duktil und richtungsunabhängig (isotrop) sind. Demgegenüber ist die Kohlenstofffaser spröde und parallel zur Faser steifer als quer zur Faser (orthotrop). Zusätzlich verlaufen in CFK-Gelegen die Fasern unterschiedlicher Schichten in unterschiedliche Richtungen.<sup>88</sup>

Ein großer Bedarf an Forschung und Entwicklung besteht darüber hinaus bei geeigneten Recyclingverfahren für CFK. Sie haben vor allem die Rückgewinnung der Fasern aus den Verbundwerkstoffen nach deren Lebenszeit sowie aus Verschnittresten des Fertigungsprozesses zum Ziel, können jedoch auch auf Wiederverwertung der Matrixmaterialien abzielen. Als Partner im MAI Carbon Spitzencluster treiben beispielsweise das Bifa Umweltinstitut und das Fraunhofer-Institut für Bauphysik gemeinsam mit Industriepartnern die Entwicklung einer durchgehenden und automatisierba-

Für die CFK-Zerspanung fehlen neue, automatisierte Fertigungsprozesse.

<sup>87</sup> BASF und SGL entwickeln thermoplastisches CFK. MaschinenMarkt, MaschinenMarkt, 05.10.12, <http://www.maschinenmarkt.vogel.de/themenkanale/konstruktion/werkstoffe/articles/380691/> (aufgerufen am 20.12.2013)

<sup>88</sup> Iestyn Hartbich: Zerspaner nehmen CFK ins Visier. VDI nachrichten, 21.09.2012, <http://www.ingenieur.de/Themen/Werkstoffe/Zerspaner-nehmen-CFK-Visier> (aufgerufen am 20.12.2013)

ren Recycling-Prozesskette voran. Dazu gehören auch die vorgelagerten Schritte, also das Demontieren, Sortieren und gegebenenfalls Zerkleinern des Materials.<sup>89</sup>

Damit könnte zwar der Kohlenstofffaser-Stoffkreislauf geschlossen werden, aber es fehlt noch an innovativen Konzepten, um die Fasern effizienter und in besseren Qualitäten zurückzugewinnen. Ein möglicher neuer Technologieansatz könnte in der Rückgewinnung von Kohlenstofffasern durch Depolymerisation im Metallbad bestehen. Dabei wird flüssiges Zinn bei 400 bis 500 °C als Pyrolysemedium verwendet. Gegenüber bekannten Recyclingverfahren ergeben sich deutlich verkürzte Verweildauern im Reaktor und niedrigere erforderliche Reaktortemperaturen. Hieraus folgt eine verminderte thermische Belastung der Kohlenstofffasern. Weitere Vorteile sollten sich durch das flüssige Pyrolysemedium ergeben, da hier keine Vermischung mit den Reaktionsgasen erfolgt. Zudem erweist sich das Verfahren im Vergleich zu oxidativen Recyclingverfahren für die Fasern als schonender.<sup>90</sup>

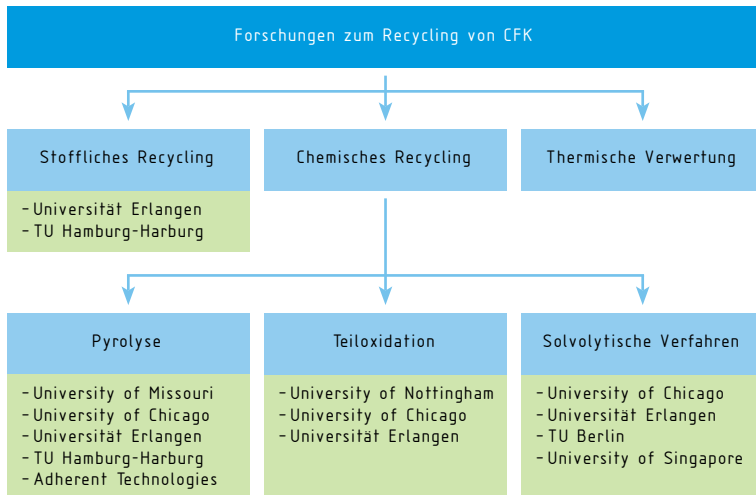
Innovative Konzepte werden erforscht, um die Fasern effizienter und in besserer Qualität zurück zu gewinnen.

Neben der Rückgewinnung von Kohlenstoffkurzfasern, gibt es auch erste Forschungsprojekte zur Herstellung von Kohlenstofflangfasern durch Recycling.

Für die Zukunft gilt es, die bestehenden Forschungsansätze und Entwicklungsarbeiten zum Recycling von CFK (vgl. Abb. 12) weiterzuentwickeln und auf ihre großtechnische und wirtschaftliche Eignung zu prüfen.

<sup>89</sup> MAI Recycling. Carbon Composites e.V., ohne Datum, <http://www.mai-carbon.de/index.php/de/cluster-organisation/projekte/mai-recycling> (aufgerufen am 20.12.2013)

<sup>90</sup> Mathias Tötzke: Untersuchungen zum Recycling von kohlefaserverstärkten Kunststoffen (CFK) durch Depolymerisation im Metallbad. Weißensee-Verlag 2005



**Abb. 12: Mögliche Recyclingverfahren für CFK und ausgewählte Forschungsaktivitäten in diesem Bereich<sup>91</sup>**

Neben der Herstellung und dem Recycling von CFK-Materialien sind insbesondere auch Lebenszyklusanalysen (LCA) der Werkstoffe selbst sowie verwendete Verbundwerkstoffe oder Werkstoffkombinationen etwa mit Stahl, Aluminium oder Titan von Bedeutung. Solche LCA geben dem Nutzer wichtige Entscheidungshilfen bei der Auswahl des wirtschaftlich und ökologisch sinnvollsten Materialsystems. Der Carbon Composites e.V. (CCeV) hat 2011 eine Projektgruppe gegründet, die sich spezifischen Aspekten von Lebenszyklen von CFK-Werkstoffen widmet.<sup>92</sup>

Zusammenfassend stellen sich die wichtigsten Themen in Forschung und Entwicklung wie folgt dar:

- Entwicklung neuer Harze mit geringeren Aushärtezeiten und besserer Zähigkeit (vor allem in Bezug auf das Crashverhalten),
- Entwicklung kostengünstigerer Fasern, gegebenenfalls aus biogenen Grundwerkstoffen,

<sup>91</sup> Ebd.

<sup>92</sup> Doris Karl: CFK Recycling in Forschung und Praxis. Automobil-Industrie, 08.10.2012, <http://www.automobil-industrie.vogel.de/leichtbau-technologie/kunststoff/articles/380963/index2.html> (aufgerufen am 20.12.2013)



- Entwicklung von Simulationssoftware, die ein faseroptimiertes Design und eine Topologieoptimierung erlaubt sowie eine Lebensdauerabschätzung ermöglicht,
- Entwicklung präziser und feldfähiger, zerstörungsfreier Prüfverfahren (ZfP) und Bewertungsmethoden,
- Erhöhung des Automationsgrades,
- Entwicklung eines standardisierten Tools zur Berechnung der Ökobilanz.

Schlussendlich werden CFK vor allem dort ressourceneffizient und mit ökonomischem Vorteil eingesetzt werden, wo die Mehrachsigkeit der Lastsituation minimal ausfällt. Dann kann die gegebene Anisotropie des Werkstoffs gezielt ausgenutzt werden und eine erzwungene „Isotropierung“ des Materials durch vielfache Faserwinkelüberlagerungen entfällt.

## 7. PROGRAMM DES FACHGESPRÄCHS „KOHLENSTOFF- FASERVERSTÄRKTE KUNSTSTOFFE IM FAHRZEUGBAU - RESSOURCENEFFIZIENZ UND TECHNOLOGIEN“

### **27. Februar 2013, Augsburg**

**Moderation:** Prof. Dr. Heinz Voggenreiter (Vorsitzender VDI-GME, Direktor DLR Institut für Bauweisen- und Konstruktionsforschung) und Dr. Martin Vogt (Leiter VDI ZRE GmbH)

**Top 1:** Begrüßung und Vorstellungsrunde

**Top 2:** Keynote-Vortrag, Günter Deinzer (Audi AG - Audi Leichtbau Zentrum)

**Top 3:** „CFK im Fahrzeugbau: Technologien und Ressourceneffizienz“, Ergebnisse einer Kurzanalyse des VDI ZRE, Dr. Oliver Krauss (VDI TZ GmbH)

**Top 4:** Moderierte Diskussion zu den Fragestellungen/Zielsetzungen aus Keynote- und Impulsvortrag; Schwerpunkt: Anwendung im Fahrzeugbau, effiziente Serienproduktionsverfahren

**Top 5:** Impulsvortrag zur Herstellung von Kohlenstofffasern. Andreas Wüllner (SGL Automotive Carbon Fibers GmbH & Co. KG)

**Top 6:** Moderierte Diskussion zu spezifischen Fragestellungen/Zielsetzungen bzgl. Rohstoffsituation bei Kohlenstofffasern, effiziente Faserherstellung, nachwachsende Faserrohstoffe

**Top 7:** Impulsvortrag zu Recycling, Lebenszyklusanalysen. Tim Rademacker (CFK Valley Stade Recycling GmbH & Co. KG)

**Top 8:** Moderierte Diskussion zu spezifischen Fragestellungen/Zielsetzungen bzgl. CFK-Recycling (aus Produktion und End-of-life), Anwendungsmöglichkeiten für recycelte Fasern, Lebenszyklusanalysen

**Top 9:** Abschlussdiskussion

**Top 10:** Zusammenfassung und Ausblick

## 8. DOKUMENTATION DES FACHGESPRÄCHS „KOHLENSTOFFFASERVERSTÄRKTE KUNSTSTOFFE IM FAHRZEUGBAU - RESSOURCENEFFIZIENZ UND TECHNOLOGIEN“

Am 27. Februar 2013 fand in Augsburg ein Fachgespräch zum Thema „Kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe im Fahrzeugbau - Ressourceneffizienz und Technologien“ mit 22 Teilnehmern aus Forschung, Industrie, Politik und fachlichen Netzwerken statt. In den drei Diskussionsblöcken des Fachgesprächs, zu dem das VDI Zentrum Ressourceneffizienz und die VDI-Gesellschaft Materials Engineering eingeladen hatten, wurden Ressourceneffizienzpotenziale bei der Kohlenstofffaserherstellung, der CFK-Bauteilproduktion, der Nutzung von CFK im Fahrzeugleichtbau und beim Recycling betrachtet. Somit konnten Handlungsfelder entlang der gesamten CFK-Wertschöpfungskette identifiziert werden.

Hinsichtlich der anwendungsbezogenen Herausforderungen lag der Fokus der Diskussion auf dem Fahrzeugbau. Es wurde aber bestätigt, dass neben dem bereits weit fortgeschrittenen CFK-Einsatz im Flugzeugbau und bei Windkraftanlagen auch in anderen Segmenten des Fahrzeugbaus, etwa bei Nutz- oder Schienenfahrzeugen, der Leichtbau mit kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen an Bedeutung gewinnt. Darüber hinaus besteht ebenfalls im Bauwesen ein zunehmendes Interesse an CFK. Solche Querverbindungen zu anderen Branchen könnten vor allem auch im Hinblick auf die werkstoffliche Weiterverwertung von CFK-Materialien interessant sein.

### Rohstoffsituation bei Kohlenstofffasern, effiziente Faserherstellung, nachwachsende Faserrohstoffe

Eine drohende Verknappung von Kohlenstofffasern oder Precursormaterialien wird von den Industrievertretern derzeit nicht gesehen. Zwar konzentriert sich die Precursorproduktion vor allem auf Akteure in den USA und in Japan. Die Zahl der Anbieter dort und in Europa erscheint aber groß genug, um keine marktverzerrenden Abhängigkeiten entstehen zu lassen. Kritischer wird dagegen die Abhängig-

keit von Ölpreis und Energiekosten eingeschätzt. Bei chinesischen Anbietern von Kohlenstofffasern wird davon ausgegangen, dass sie erst in einigen Jahren die Technologien so weit beherrschen, um konkurrenzfähig zu sein. Dann allerdings könnte China durch große Produktionskapazitäten und Preisdumping den Markt für Kohlenstofffasern massiv beeinflussen und versuchen, Wettbewerber aus dem Markt zu verdrängen.

Um die Verfügbarkeit von Kohlenstofffasern sicherzustellen, ist es nicht unbedingt notwendig, die Wertschöpfungskette vollständig in Deutschland zu haben. Wichtiger ist, dass die deutsche Industrie durch technologisches Know-how, Systemkompetenz und strategische Kooperationen Zugang zu den global verteilten Produktionskapazitäten erhält.

Der Aufbau weiterer Produktionskapazitäten zur Deckung des wachsenden Bedarfs an Kohlenstofffasern ist nur möglich, wenn tragfähige Kunden-Lieferanten-Beziehungen aufgebaut werden. Nur so können die mit den hohen Investitionen verbundenen Risiken getragen werden.

Um die Ressourceneffizienz bei der Herstellung von Kohlenstofffasern zu steigern, werden Entwicklungen in den folgenden drei Bereichen verfolgt:

1. Inkrementelle Verbesserungen der aktuell genutzten Technologien: Das einzige industriell bewährte Verfahren zur großvolumigen Herstellung hochwertiger Kohlenstofffasern stellt die Route über Polyacrylnitrilfasern (PAN) dar, die bei sehr hohen Temperaturen karbonisiert werden. In den nächsten zehn bis 15 Jahren wird dies durch keine grundlegend neue Technologie zu ersetzen sein.

An der Steigerung der Prozesseffizienz wird kontinuierlich gearbeitet. Es besteht aber noch großes Potenzial zur weiteren Einsparung von Ressourcen und Energie durch schrittweise Verbesserungen entlang der gesamten Herstellungskette. Hierzu gehören unter anderem effizienzoptimierte Prozesse, die Nutzung von Abwärme und Produktionsabfällen oder die Bereitstellung großer Mengen an benötigter thermischer Energie durch regenerativ erzeugten Strom.

2. Neue Technologien für die Faserherstellung: Für eine effizientere Aufheizung und Umwandlung der Ausgangsmaterialien in hochstabile Kohlenstofffasern werden Alternativen zu den herkömmlichen Öfen erforscht, bei denen Mikrowellen, Laser oder Plasma für den notwendigen Energieeintrag zum Einsatz kommen sollen. Diese Verfahren sind aber noch weit davon entfernt, industriell einsetzbar zu sein. Dennoch ist es wichtig, die Forschung hierfür verstärkt voranzutreiben.

3. Neue Precursors auf Basis nachwachsender Rohstoffe: Um die Abhängigkeit von erdölbasierten Ausgangsmaterialien für Kohlenstofffasern zu reduzieren, werden Ansätze zur Nutzung nachwachsender Rohstoffe wie zum Beispiel Zellulose oder Lignin erforscht. Derzeit werden mit solchen Precursors jedoch noch keine vergleichbaren mechanischen Kennwerte erreicht. Zudem sind die Prozesse noch nicht ausgereift und die Qualitätsschwankungen der daraus hergestellten Fasern für die industrielle Weiterverarbeitung in Verbundwerkstoffe fallen noch deutlich zu groß aus. Insgesamt befinden sich die Entwicklungen noch in einem frühen Forschungsstadium. Damit mittel- bis langfristig eine industriefähige Rohstoffalternative aufgebaut werden kann, sollten die bestehenden Forschungsaktivitäten in diesem Bereich intensiviert werden. Zudem ist noch zu klären, wie groß der Effekt der Nutzung nachwachsender Rohstoffe für die Herstellung von Kohlenstofffasern auf die Gesamtökobilanz ist, bei der – im Falle des Automobils – der Verbrauch fossiler Energierohstoffe und die damit verbundenen Emissionen während der Nutzungsphase dominieren.

### CFK-Anwendungen im Fahrzeugbau und effiziente Produktionsverfahren

Die Reduktion des Fahrzeuggewichts durch konstruktiven und werkstofflichen Leichtbau führt nicht nur unmittelbar zu Kraftstoffeinsparungen während der Nutzungsphase, sondern induziert durch Sekundäreffekte wie das Downsizing der Motoren oder eine kleinere Auslegung der Bremsen weiteres Einsparpotenzial für den Ressourceneinsatz, ohne dabei Einbußen hinsichtlich Fahrkomfort und Sicher-

heit hinnehmen zu müssen.

Um sich gegen andere Leichtbauwerkstoffe wie etwa Aluminium im Materialmix zukünftiger Fahrzeugmodelle durchsetzen zu können, sind eine deutliche Kostenreduktion und Steigerung der Ressourceneffizienz bei den Produktionsverfahren für kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe in Richtung Automatisierung erforderlich. Als wichtige Durchbruchstechnologien, die diesbezüglich noch weiterentwickelt werden müssen, wurden Injektionsverfahren wie das Resin Transfer Molding (RTM), das Direct Fibre Placement und das Nasspressverfahren genannt. Ebenso besteht noch Bedarf für Forschung und Entwicklung bei der Bauteilbearbeitung (zum Beispiel Wasserstrahlschneiden, Laserbearbeitung, Stanzen) und bei den Fügetechniken.

Generell ist bei der Konstruktion, Auslegung und Verfahrensentwicklung eine sorgfältige Abwägung zwischen hoher Materialeffizienz und hoher Produktivität erforderlich, da sich hier häufig technologische Zielkonflikte ergeben. Bei schnellen Verfahren entsteht meist eine relativ große Menge Verschnitt, während Prozesse, die sehr effizient mit den Fasern umgehen, wie beispielsweise Direct-Placement-Verfahren, einen viel geringeren Durchsatz aufweisen.

Ebenso wurde hervorgehoben, dass eine frühzeitige bereichsübergreifende Zusammenarbeit, etwa mit Designern und Produktentwicklern, notwendig ist, um die Ressourceneffizienzpotenziale durch den Einsatz von CFK zu realisieren.

Als zentraler innovativer Ansatz bei der Entwicklung von CFK-Komponenten für den Fahrzeugbau sollte die Funktionsintegration noch intensiver verfolgt werden. Hier besteht ein großes Potenzial für CFK, sich weitere Vorteile hinsichtlich Materialeffizienz und Kosten gegenüber etablierten Werkstoffen zu verschaffen. Dazu müssen die Werkzeuge und Methoden für eine werkstoffgerechte 3D-Bauteilauslegung bereitgestellt werden.

Von besonderer Bedeutung für die Beschleunigung und Effizienzsteigerung der Prozesse zur Herstellung von CFK-

Bauteilen ist auch die Weiterentwicklung der verwendeten Matrixmaterialien. Zum einen können die klassischen durerbasierten Harze hinsichtlich ihrer Fließeigenschaften und Aushärtungszeiten noch weiter verbessert werden. Für große Chemieunternehmen sind solche Optimierungen häufig uninteressant, weil die Produktionsmengen vergleichsweise klein ausfallen. Hier ist es notwendig, dass die verschiedenen verteilten Aktivitäten zur Formulierung verbesserter Harze vor allem auch von mittelständischen Unternehmen stärker gebündelt werden und eine noch bessere Vernetzung mit den industriellen Anwendern erreicht wird.

Als nächster bedeutender Entwicklungsschritt wird die Einführung von Thermoplasten als Matrixkomponente für CFK gesehen. Vorteile sind hier vor allem kürzere Zykluszeiten aufgrund der schnelleren Aushärtung, bessere Integrationsmöglichkeiten und die Umformbarkeit dieser Materialien. Allerdings bestehen noch eine Reihe von Herausforderungen. Die Verarbeitungsprozesse, wie etwa das Lackieren oder Umformen, stellen hohe Anforderungen an die Temperatur- und Medienbeständigkeit der Thermoplaste. Aber auch die Belastungen in der Nutzungsphase erfordern eine Materialqualität, die mit thermoplastischer Matrix derzeit kaum erreicht und auch nur mit besonders teuren Thermoplasten realisierbar sein wird. Welche thermoplastischen Matrixmaterialien sich für CFK im Automobilbau durchsetzen werden, ist noch offen.

Als sehr wichtig wurde auch die Weiterentwicklung der Tools für die Modellierung und Simulation von CFK-Bauteilen hervorgehoben. Vor allem die für den Automobilbau besonders relevante Simulation des Crashverhaltens ist für CFK-Werkstoffe noch nicht ausgereift, dies gilt insbesondere für große Bauteile. Hinzu kommt, dass die besonderen Eigenschaften von CFK, die etwa durch die Orientierung der Fasern entstehen, in den entsprechenden Modellen noch nicht abgebildet werden. So wird zwar das Design von CFK-Bauteilen schon mit kontinuierlich verbesserten Simulationstools optimiert, jedoch kann noch keine anisotrope Topologieoptimierung erfolgen, so dass Gewichtsreduktionspotenziale von CFK bei der Auslegung und die damit

verbundene Steigerung der Ressourceneffizienz noch nicht voll ausgeschöpft werden können.

Seit 2012 wird die serienreife Entwicklung von CFK im Rahmen des Spitzenclusters MAI Carbon vom BMBF gefördert. Ziel der Clusteraktivitäten ist es, die Entwicklung der Verfahren und Technologien so weit voranzutreiben, dass bis zum Jahr 2020 CFK für den Automobilbau und andere Branchen großindustriell hergestellt und genutzt werden können. An den elf Projekten, die viele der diskutierten Aspekte - von der Faserherstellung über die serientaugliche Bauteilfertigung bis zum Recycling - betreffen, sind insgesamt über 70 Partner aus Industrie und Forschung beteiligt.

Abschließend wurde diskutiert, dass aktuelle „Leuchtturmprojekte“ wie neue Elektro- oder Hybridautos mit vollständiger CFK-Karosserie notwendig sind, um die Technologieentwicklung voranzutreiben. CFK-Werkstoffe und die dazugehörigen Verfahren sind zu qualifizieren sowie werkstoffgerechte Konstruktionsweisen weiterzuentwickeln. Dies wird am Beispiel der von BMW entwickelten Elektrofahrzeuge i3 und i8 deutlich, die eine vollständig aus CFK gefertigte Karosserie aufweisen werden. Es ist jedoch zu erwarten, dass, wie beispielsweise bei Audi, kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe in der Pkw-Serienfertigung zunächst in kleineren Komponenten in höherklassigen Modellen eingeführt werden und der CFK-Anteil im Materialmix schrittweise erhöht wird.

### CFK-Recycling, Anwendungsmöglichkeiten für recycelte Fasern, Lebenszyklusanalysen

Derzeit werden unterschiedliche Optionen zum CFK-Recycling studiert. Mit pyrolytischer Trennung von Faser und Matrix sowie anschließender Aufbereitung ist es heute bereits möglich, hochwertige Kohlenstofffasern unterschiedlicher Längen und Qualitäten durch Recycling zu gewinnen. Daraus können verschiedene Recyclingprodukte wie Vliese, Stapelfasern und auch langfaserverstärkte Verbundwerkstoffe hergestellt werden.

Es besteht vor allem ein Imageproblem solcher Sekun-



därfasermaterialien, denen industrielle Anwender, ohne tatsächlich die Spezifikationen genau zu kennen, generell eine schlechtere Qualität im Vergleich zu Primärfasern unterstellen. Um Recyclingfasern konsequent in die Wertschöpfungskette einzubeziehen und den Stoffkreislauf tatsächlich zu schließen, ist es notwendig, diese Vorurteile zu überwinden. Von der Industrie müssen Anwendungen gefunden werden, in denen recycelte Fasern als vollwertiger Werkstoff ohne Kompromisse bezüglich der Qualität einsetzbar sind.

Wesentlicher Nachteil der Pyrolyse ist, dass dabei das Matrixmaterial vollständig verloren geht und nicht in den Stoffkreislauf zurückgeführt wird. Dies stellt eine prinzipielle Grenze der maximal erreichbaren Recyclingquote für CFK mit diesem Verfahren dar. Andere technische Lösungen zur Trennung von Faser und Matrix durch chemische Verfahren befinden sich in der Entwicklung, sind aber noch nicht industriell einsetzbar. Die dahingehenden Aktivitäten in Forschung und Entwicklung sollten verstärkt werden. Es wird aber davon ausgegangen, dass für die nächsten zehn Jahre die Pyrolyse und anschließende Faseraufbereitung den effizientesten und am besten geeigneten Prozess für das CFK-Recycling im industriellen Maßstab darstellen wird.

Mit zunehmendem Einsatz von CFK in verschiedenen Anwendungen nimmt auch der Anteil von zu recycelndem Material aus Produkten nach ihrer Nutzung („End of Life“) in Relation zu häufig unverharzten Produktionsabfällen zu. Dies stellt große Herausforderungen an die Sortierung und den Recyclingprozess selbst. In diesem Kontext wurde darauf hingewiesen, dass auch das Recycling und insbesondere die Sortierung einen erheblichen Energiebedarf aufweisen können, der sich negativ auf die Gesamtökobilanz von CFK auswirkt. So verläuft beispielsweise der oft sehr weite Transport sehr großer Einzelteile zur Recyclinganlage (wie etwa das Seitenleitwerk eines Verkehrsflugzeugs) nach ihrer Demontage sehr energieaufwändig. Um diesen Abschnitt des Stoffkreislaufs energetisch zu verbessern, werden derzeit technische Lösungen für die Zerkleinerung solcher Bauteile vor Ort entwickelt. Ebenso ist es notwendig,

die Anforderungen des Recyclings nach der Nutzungsphase bereits im Produktdesign zu berücksichtigen.

Vollständige Lebenszyklusanalysen können helfen, die Ansätze zu identifizieren, mit denen die größten Steigerungen der Ressourceneffizienz bei der Produktion und Nutzung kohlenstofffaserverstärkter Kunststoffe zu erzielen sind. Zwar überwiegt bei der Anwendung im Automobil der Ressourcenverbrauch während der Nutzungsphase, jedoch nimmt die Bedeutung des Ressourceneinsatzes bei der Produktion zu, je leichter die eingesetzten Materialien werden. Ein zentrales Problem besteht darin, dass Ökobilanzen zu verschiedenen Werkstoffen oder Technologien nicht miteinander vergleichbar sind. Es gilt in diesem Bereich, die Kompatibilität der Standards und Randbedingungen herzustellen.

## 9. ANHANG

### Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Globaler Bedarf von Kohlenstofffasern in Tonnen 2008 – 2020  
(\* Schätzungen)

Abb. 2: Kohlenstofffaser-Kapazitäten nach Herstellern in Tonnen (2011)

Abb. 3: Kostenvergleich CFK versus Stahlblech heutzutage anhand eines Referenzbauteils

Abb. 4: Kostensenkungspotenzial bis 2020 (Modellrechnung)

Abb. 5: Verschiedene Prozesswege zur Herstellung von Kohlenstofffasern

Abb. 6: Prinzipschema der Kohlenstofffaser-Herstellung

Abb. 7: Schematischer Ablauf des RTM-Verfahrens

Abb. 8: RTM-Prozess schematisch

Abb. 9: Prozesskette für die vollautomatisierte Fertigung endkonturnaher Volumenbauteile aus CFK

Abb. 10: Recycling-Technologien für CFK-Komposite

Abb. 11: Erste Versuche und Kostenberechnungen für den Herstellungsprozess von Kohlenstofffasern aus Lignin

Abb. 12: Mögliche Recyclingverfahren für CFK und ausgewählte Forschungsaktivitäten in diesem Bereich

Tab. 1: Aktivitäten von Unternehmen zur Erweiterung der Produktionskapazität für Kohlenstofffasern

## Fußnotenverzeichnis

- <sup>1</sup> Bernhard Jahn: Composites-Marktbericht 2011, Der globale CFK-Markt. Hrsg.: Carbon Composites e. V., September 2011; [http://www.carbon-composites.eu/sites/carbon-composites.eu/files/anhaenge/12/08/29/ccev-composites-marktbericht-2011\\_1.pdf](http://www.carbon-composites.eu/sites/carbon-composites.eu/files/anhaenge/12/08/29/ccev-composites-marktbericht-2011_1.pdf) (aufgerufen am 20.12.2013); Alfons Schuster: Composites-Marktbericht, Der CFK-Markt 2009/2010, Hrsg.: Carbon Composites e. V., September 2010; <http://www.carbon-composites.eu/sites/carbon-composites.eu/files/anhaenge/12/08/29/ccev-composites-marktbericht-2010.pdf> (aufgerufen am 20.12.2013)
- <sup>2</sup> Birgit Niesing: Carbon in Serie. weiter.vorn 3.2012, [http://www.fraunhofer.de/de/publikationen/fraunhofer-magazin/2012/weitervorn\\_3-2012\\_Inhalt/weiter-vorn\\_3-2012\\_08.html](http://www.fraunhofer.de/de/publikationen/fraunhofer-magazin/2012/weitervorn_3-2012_Inhalt/weiter-vorn_3-2012_08.html) (aufgerufen am 20.12.2013)
- <sup>3</sup> Daniel Lenkeit: Zukunftswerkstoff CFK mit starkem Aufwind. Germany Trade&Invest, 23.03.2012, <http://www.gtai.de/GTAI/Navigation/DE/Trade/maerkte,did=543902.html?view=renderPdf> (aufgerufen am 20.12.2013)
- <sup>4</sup> Bernhard Jahn, Doris Karl: Composites-Marktbericht 2012, Der globale CFK-Markt. Hrsg.: Carbon Composites e. V., Oktober 2012; [http://www.carbon-composites.eu/sites/carbon-composites.eu/files/anhaenge/12/11/06/composites\\_marktbericht\\_2012\\_-\\_deutsch.pdf](http://www.carbon-composites.eu/sites/carbon-composites.eu/files/anhaenge/12/11/06/composites_marktbericht_2012_-_deutsch.pdf) (aufgerufen am 20.12.2013)
- <sup>5</sup> Bernhard Jahn, Doris Karl: Composites-Marktbericht 2012, Der globale CFK-Markt. Hrsg.: Carbon Composites e. V., Oktober 2012; [http://www.carbon-composites.eu/sites/carbon-composites.eu/files/anhaenge/12/11/06/composites\\_marktbericht\\_2012\\_-\\_deutsch.pdf](http://www.carbon-composites.eu/sites/carbon-composites.eu/files/anhaenge/12/11/06/composites_marktbericht_2012_-_deutsch.pdf) (aufgerufen am 20.12.2013)
- <sup>6</sup> Bernhard Jahn, Doris Karl: Composites-Marktbericht 2012, Der globale CFK-Markt. Hrsg.: Carbon Composites e. V., Oktober 2012; [http://www.carbon-composites.eu/sites/carbon-composites.eu/files/anhaenge/12/11/06/composites\\_marktbericht\\_2012\\_-\\_deutsch.pdf](http://www.carbon-composites.eu/sites/carbon-composites.eu/files/anhaenge/12/11/06/composites_marktbericht_2012_-_deutsch.pdf) (aufgerufen am 20.12.2013)
- <sup>7</sup> Bernhard Jahn, Doris Karl: Composites-Marktbericht 2012, Der globale CFK-Markt. Hrsg.: Carbon Composites e. V., Oktober 2012; [http://www.carbon-composites.eu/sites/carbon-composites.eu/files/anhaenge/12/11/06/composites\\_marktbericht\\_2012\\_-\\_deutsch.pdf](http://www.carbon-composites.eu/sites/carbon-composites.eu/files/anhaenge/12/11/06/composites_marktbericht_2012_-_deutsch.pdf) (aufgerufen am 20.12.2013)
- <sup>8</sup> Jeff Sloan: Carbon fiber market. CompositesWorld, 03.01.2011, <http://www.compositesworld.com/articles/carbon-fiber-market-cautious-optimism> (aufgerufen am 20.12.2013)
- <sup>9</sup> Bernhard Jahn, Doris Karl: Composites-Marktbericht 2012, Der globale CFK-Markt. Hrsg.: Carbon Composites e. V., Oktober 2012; [http://www.carbon-composites.eu/sites/carbon-composites.eu/files/anhaenge/12/11/06/composites\\_marktbericht\\_2012\\_-\\_deutsch.pdf](http://www.carbon-composites.eu/sites/carbon-composites.eu/files/anhaenge/12/11/06/composites_marktbericht_2012_-_deutsch.pdf) (aufgerufen am 20.12.2013)

- <sup>10</sup> Ebd.
- <sup>11</sup> Ebd.
- <sup>12</sup> Ralph Lässig et al.: Serienproduktion von hochfesten Faserverbundbauteilen. Hrsg.: Roland Berger, VDMA (September 2012), S. 13
- <sup>13</sup> Werner Bruckner: Mit Kostensenken wächst der CFK-Markt, in: VDI nachrichten, 25.05.2012, S. 8
- <sup>14</sup> Ralph Lässig et al., Serienproduktion von hochfesten Faserverbundbauteilen. Hrsg.: Roland Berger, VDMA (September 2012), S. 15, [http://www.rolandberger.de/media/pdf/Roland\\_Berger\\_Serienproduktion\\_hochfester\\_Faserverbundbauteile\\_20120926.pdf](http://www.rolandberger.de/media/pdf/Roland_Berger_Serienproduktion_hochfester_Faserverbundbauteile_20120926.pdf) (aufgerufen am 20.12.2013)
- <sup>15</sup> Ebd.
- <sup>16</sup> Peter Trechow: Leichtbau wird Materialmix des Automobils massiv verändern, in: VDI nachrichten, 06.01.2012, S. 8
- <sup>17</sup> Ebd.
- <sup>18</sup> Ralph Lässig et al., Serienproduktion von hochfesten Faserverbundbauteilen. Hrsg.: Roland Berger, VDMA (September 2012), S. 18
- <sup>19</sup> Michael Ziegler: CFK-Leichtbau im VW 1-Liter-Auto XL1. Automobil Industrie, 10.09.2012; <http://www.automobil-industrie.vogel.de/karosserie/articles/377463/> (aufgerufen am 20.12.2013)
- <sup>20</sup> Persönliche Mitteilung von Prof. Dr. H. Voggenreiter, DLR
- <sup>21</sup> Ralph Lässig et al.: Serienproduktion von hochfesten Faserverbundbauteilen. Hrsg.: Roland Berger, VDMA (September 2012), S. 15
- <sup>22</sup> Ebd., S. 18
- <sup>23</sup> Wikipedia-Artikel „Kohlenstofffaser“ in der Version vom 21.10.2013, 22.13 Uhr, <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Kohlenstofffaser&oldid=123679608> (aufgerufen am 20.12.2013)
- <sup>24</sup> Persönliche Mitteilung von Prof. Dr. H. Voggenreiter, DLR
- <sup>25</sup> Bernd Wohlmann, AVK – Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe e.V.: Handbuch Faserverbundkunststoffe – Grundlagen, Verarbeitung, Anwendungen. Veröffentlicht 2009, 3. Auflage.
- <sup>26</sup> Ebd.
- <sup>27</sup> Bernd Wohlmann et al., Vortrag „Neue Entwicklungen auf dem Gebiet der Kohlenstofffaser“, 2010
- <sup>28</sup> Bernd Wohlmann, AVK – Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe e.V.: Handbuch Faserverbundkunststoffe – Grundlagen, Verarbeitung, Anwendungen. Veröffentlicht 2009, 3. Auflage
- <sup>29</sup> Foto: SGL Carbon, [http://www.sglgroup.com/cms/international/press-lounge/photo-archive/index.html?\\_\\_locale=en](http://www.sglgroup.com/cms/international/press-lounge/photo-archive/index.html?__locale=en) (aufgerufen am 20.12.2013)

- <sup>30</sup> Ebd.
- <sup>31</sup> Bernhard Jahn: Composites-Marktbericht 2012, Der globale CFK-Markt. Hrsg.: Carbon Composites e. V., Oktober 2012; [http://www.carbon-composites.eu/sites/carbon-composites.eu/files/anhaenge/12/11/06/composites\\_marktbericht\\_2012\\_-\\_deutsch.pdf](http://www.carbon-composites.eu/sites/carbon-composites.eu/files/anhaenge/12/11/06/composites_marktbericht_2012_-_deutsch.pdf) (aufgerufen am 20.12.2013)
- <sup>32</sup> Sebastian Nöll: Carbon-Composites. Beratungs- und Informationssystem für Technologietransfer im Handwerk, 16.12.2010, <http://fachinfo.bistech.de/artikel/790/Carbon+Composite+%28CFK%29++Kohlefaserverbundwerkstoffe> (aufgerufen am 20.12.2013)
- <sup>33</sup> Ebd.
- <sup>34</sup> Schmidt, A.: Neue Fertigungsverfahren für die Großserienfertigung von Faserverbundwerkstoffen im Automobilbau. Knowledge Space des Lehrstuhls für Fertigungsautomatisierung und Montage, 13.02.2013, [http://wiki.zimt.uni-siegen.de/fertigungsautomatisierung/index.php?title=Neue\\_Fertigungsverfahren\\_f%C3%BCr\\_die\\_Gro%C3%9Ferienfertigung\\_von\\_Faserverbundwerkstoffen\\_im\\_Automobilbau&oldid=17780](http://wiki.zimt.uni-siegen.de/fertigungsautomatisierung/index.php?title=Neue_Fertigungsverfahren_f%C3%BCr_die_Gro%C3%9Ferienfertigung_von_Faserverbundwerkstoffen_im_Automobilbau&oldid=17780) (aufgerufen am 20.12.2013)
- <sup>35</sup> Mathes, V., Faserverbund-Kunststoffe – mehr als nur Carbon..., Industrieanzeiger Nr. 20/2012
- <sup>36</sup> Gries, T.: Innovative Methoden zur hochproduktiven Fertigung textiler Preforms. Vortrag, InnoMateria, Köln, 15.03.2011
- <sup>37</sup> Faserverbundtechnik für den Automobilbau, VDMA Nachrichten 02/2013
- <sup>38</sup> Persönliche Mitteilung von Prof. Dr. H. Voggenreiter, DLR
- <sup>39</sup> Persönliche Mitteilung von Prof. Dr. H. Voggenreiter, DLR
- <sup>40</sup> Drummer, D.; Müller, T.: „Thermoplastische Hochleistungsfaserverbunde stehen vor einer großen Renaissance“, intelligenter produzieren 3/2010, VDMA Verlag, 6 – 8.
- <sup>41</sup> M. Schneebauer, KraussMaffei Technologies GmbH, Vortrag thermo-comp, Chemnitz, 29.06.2011
- <sup>42</sup> Friedrich, M.: Perspektiven einer automatisierten RTM-Fertigung. Vortrag am Wissenschaftstag 2009, DLR Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik, Braunschweig, 30.09.2009
- <sup>43</sup> Ch. Fuchs: Herstellung von CFK-Leichtbaukomponenten in Autoklav- und Injektionstechnik. TÜV Süd, undatiert, [http://www.tuev-sued.de/uploads/images/1134986798495817443325/24\\_fuchs\\_d.pdf](http://www.tuev-sued.de/uploads/images/1134986798495817443325/24_fuchs_d.pdf). Verfügbar über archive.org unter [https://web.archive.org/web/20071101035230/http://www.tuev-sued.de/uploads/images/1134986798495817443325/24\\_fuchs\\_d.pdf](https://web.archive.org/web/20071101035230/http://www.tuev-sued.de/uploads/images/1134986798495817443325/24_fuchs_d.pdf) (aufgerufen am 20.12.2013)
- <sup>44</sup> Website der DFG-Forschergruppe 860. <http://www.for860.rwth-aachen.de> (aufgerufen am 20.12.2013)

- <sup>45</sup> M. Wiedemann (2011): CFK im Automobil – Ein weiter Weg? Beitrag beim 5. Fachkongress „Kunststofftrends im Automobil“, Wolfsburg, 28.09.2011
- <sup>46</sup> Persönliche Mitteilung von Prof. Dr. H. Voggenreiter, DLR
- <sup>47</sup> Stock, A.; Egger, P.: Hybridteillfertigung: Organobleche verlassen das Hochpreissegment. Composites World, Februar 2011, 12 – 15
- <sup>48</sup> Malek, T.: Noch leichter, noch belastbarer. Plastverarbeiter, Mai 2010, 38 – 39
- <sup>49</sup> Persönliche Mitteilung von Prof. Dr. H. Voggenreiter, DLR
- <sup>50</sup> Anja Jäschke: Funktionaler Leichtbau durch SpriForm. Bayern Innovativ, 23.06.2010, [http://www.automanager.de/BayernInnovativ/Zulieferer\\_Innovativ2010/jaeschke.php](http://www.automanager.de/BayernInnovativ/Zulieferer_Innovativ2010/jaeschke.php) (aufgerufen am 20.12.2013)
- <sup>51</sup> CarboCar. [http://www.inno-cnt.de/de/backgrounder\\_carbocar.php](http://www.inno-cnt.de/de/backgrounder_carbocar.php) (aufgerufen am 20.12.2013)
- <sup>52</sup> Angelika Rockel: Neuartiger Werkstoff: Organofolie für die Automobilindustrie. Informationsdienst Wissenschaft, 20.07.2009, <http://idw-online.de/de/news326597> (aufgerufen am 20.12.2013)
- <sup>53</sup> Fischer, H.; Bäumer, R.: Organofolien aus recycelten Kohlenstofffasern – neue Wege für CFK-Halbzeuge in der Serienproduktion. Vortrag, ThermoComp, Chemnitz, 30.06.2011
- <sup>54</sup> Fertigungstechnik macht Kohlenstofffasern fit für die Serie. VDI Nachrichten, 23.02.2011
- <sup>55</sup> Michael Reichenbach: CFK ist das bessere Material der Zukunft. ATZ online, undatiert, <http://www.atzonline.de/Aktuell/Interviews/35/225/CFK-ist-das-bessere-Material-der-Zukunft.html>. Verfügbar über archive.org unter <https://web.archive.org/web/20120303052914/http://www.atzonline.de/Aktuell/Interviews/35/225/CFK-ist-das-bessere-Material-der-Zukunft.html> (aufgerufen am 20.12.2013)
- <sup>56</sup> M. Brune, H. Oppermann: Anforderungen an Simulationsmethoden für die Auslegung von CFK-Strukturen im Automobilbau. [http://www.carbon-composites.eu/sites/carbon-composites.eu/files/anhaenge/gruppen/12/08/29/02\\_v\\_af\\_13.pdf](http://www.carbon-composites.eu/sites/carbon-composites.eu/files/anhaenge/gruppen/12/08/29/02_v_af_13.pdf) (aufgerufen am 20.12.2013)
- <sup>57</sup> Forschungsaktivitäten der Arbeitsgruppe Struktursimulation. <http://www.fast.kit.edu/lbt/3317.php> (aufgerufen am 20.12.2013)
- <sup>58</sup> H. Oppermann: Zur Lebensdauerberechnung faserverstärkter Kunststoffe im Automobilbau. MP Materials Testing 07-08/2012, Seite 479 – 487
- <sup>59</sup> Norbert Doktor: Mikrowellen gegen Materialfehler – neues Prüfverfahren soll industriell einsetzbar werden. Informationsdienst Wissenschaft, 02.11.2009, <http://idw-online.de/pages/de/news342046> (aufgerufen am 20.12.2013)
- <sup>60</sup> Persönliche Mitteilung von Prof. Dr. H. Voggenreiter, DLR

- <sup>61</sup> Fraunhofer IZFP: Leichter bauen durch zerstörungsfreie Prüfung. Innovation Report, Ausgabe 2-2011, Hrsg.: CFK-Valley Stade e.V.
- <sup>62</sup> Mobilität der Zukunft: CFK – ein Werkstoff der Zukunft. BMW-Presse-meldung, 02.07.2010, <http://www.7-forum.com/news/Mobilitaet-der-Zukunft-CFK-ein-Werkstoff-3420.html> (aufgerufen am 20.12.2013)
- <sup>63</sup> Honsel, G.: Das Auto von der Rolle. Technology Review, 12/2010, 52 – 56
- <sup>64</sup> Wolfgang Pester: Karbon in Großserie ist möglich. Hannoversche Allgemeine, 05.11.2012, <http://www.haz.de/Ratgeber/Auto-Verkehr/Uebersicht/Karbon-in-Grossserie-ist-moeglich> (aufgerufen am 20.12.2013)
- <sup>65</sup> Thomas Geiger: Karbon erobert die Großserie. Frankfurter Rundschau, 22.07.2011, <http://www.fr-online.de/auto/karbon-erobert-die-grossserie,1472790,8699664.html> (aufgerufen am 20.12.2013)
- <sup>66</sup> M-A-I Carbon – Webseite des Spitzenclustgers: <http://www.mai-carbon.de/index.php/de/> (aufgerufen am 20.12.2013)
- <sup>67</sup> SGL Group und BMW Group: Neues Carbonfaserwerk wird in Moses Lake / USA errichtet. 06.04.2010, [http://www.sglgroup.com/cms/international/press-lounge/news/2010/04/04062010\\_p.html?\\_\\_locale=de](http://www.sglgroup.com/cms/international/press-lounge/news/2010/04/04062010_p.html?__locale=de) (aufgerufen am 20.12.2013)
- <sup>68</sup> Volkswagen überrascht BMW. Manager Magazin, 01.03.2011, <http://www.manager-magazin.de/unternehmen/autoindustrie/0,2828,748364,00.html> (aufgerufen am 20.12.2013)
- <sup>69</sup> Tom Grünweg: Die schwarze Zukunft des Autobaus. Spiegel online, 25.03.2011, <http://www.spiegel.de/auto/aktuell/0,1518,753000,00.html> (aufgerufen am 20.12.2013)
- <sup>70</sup> Audi entwickelt neue Leichtbau-Werkstoffe. 17.02.2011, <http://www.pk-wrader.de/news/audi/audi-entwickelt-neue-leichtbau-werkstoffe-8259/> (aufgerufen am 20.12.2013)
- <sup>71</sup> „Soficar wir Toray Carbon Fibers Europe S.A.: Verbundwerkstofflösungen für die Automobilindustrie. CCEV NEWS, 11. Ausgabe, 1. Halbjahr 2012, S. 11
- <sup>72</sup> M. Achternbosch, K.-R. Bräutigam, C. Kupsch, B. Reßler, G. Sardemann, „Analyse der Umweltauswirkungen bei der Herstellung, dem Einsatz und der Entsorgung von CFK- bzw. Aluminiumrumpfkomponten“, Wissenschaftliche Berichte FZKA 6879 des Forschungszentrums Karlsruhe 2003
- <sup>73</sup> Karl Meyer Unternehmen CFK Valley Stade Recycling GmbH & Co. KG und carboNXT GmbH gewinnen „Deutschen Rohstoffeffizienz-Preis 2011“. CFK Valley Stade, ohne Datum, [http://www.cfk-recycling.com/index.php?id=144&tx\\_ttnews%5Btt\\_news%5D=13](http://www.cfk-recycling.com/index.php?id=144&tx_ttnews%5Btt_news%5D=13) (aufgerufen am 20.12.2013)



- <sup>74</sup> Nachhaltiger Leichtbau für E-Autos; Sonnenenergie-Offizielles Fachorgan der Deutschen Gesellschaft für Sonnenenergie e. V. Ausg. 3/2012; URL. [http://www.sonnenenergie.de/index.php?id=30&no\\_cache=1&xttnews%5Btt\\_news%5D=207](http://www.sonnenenergie.de/index.php?id=30&no_cache=1&xttnews%5Btt_news%5D=207) (aufgerufen am 20.12.2013)
- <sup>75</sup> Startschuss für neue CFK-Recyclinganlage. K Zeitung online, 02.04.2012, <http://www.k-zeitung.de/Startschuss+fuer+neue+CFK-Recyclinganlage/150/1085/35048/> (aufgerufen am 20.12.2013)
- <sup>76</sup> Auch stabile Carbonfasern lassen sich wiederverwerten, Stuttgarter Zeitung, 04.01.2010
- <sup>77</sup> M. Kümmerle: Wie tauglich ist die Pyrolyse zur Schließung des CFK-Stoffkreislaufs? MaschinenMarkt, 26.04.2011, <http://www.maschinenmarkt.vogel.de/themenkanale/konstruktion/werkstoffe/articles/312969/> (aufgerufen am 20.12.2013)
- <sup>78</sup> Composite Recycling – Firmenwebseite: <http://www.compocycle.com> (aufgerufen am 20.12.2013)
- <sup>79</sup> „Nachhaltigkeit von Faserverbundwerkstoffen – Betrachtung anhand ausgewählter Anwendungsbeispiele“, Arbeitskreis „Nachhaltigkeit“ der AVK – Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe e.V.
- <sup>80</sup> Ch. Morin et al., “Near- and supercritical solvolysis of carbon fibre reinforced polymers (CFRPs) for recycling carbon fibers as a valuable resource”, J. of Supercritical Fluids 66 (2012) 232 – 240
- <sup>81</sup> CFK-Recycling: Boeing finanziert Uni Nottingham. KunststoffWeb, 04.11.2012, [http://www.kunststoffweb.de/ki\\_ticker/CFK-Recycling\\_Boeing\\_finanziert\\_Uni\\_Nottingham\\_t220709](http://www.kunststoffweb.de/ki_ticker/CFK-Recycling_Boeing_finanziert_Uni_Nottingham_t220709) (aufgerufen am 20.12.2013)
- <sup>82</sup> Ch. Morin et al.: Near- and supercritical solvolysis of carbon fibre reinforced polymers (CFRPs) for recycling carbon fibers as a valuable resource. J. of Supercritical Fluids 66 (2012) 232 – 240
- <sup>83</sup> Ralph Lässig et al.: Serienproduktion von hochfesten Faserverbundbauteilen. Hrsg.: Roland Berger, VDMA (September 2012)
- <sup>84</sup> Werner Bruckner: CFK: Hohe Kosten blockieren Durchbruch am Massenmarkt. VDI nachrichten, 25.05.2012, <http://www.ingenieur.de/Themen/Kunststoffe/CFK-Hohe-Kosten-blockieren-Durchbruch-am-Massenmarkt> (aufgerufen am 20.12.2013)
- <sup>85</sup> Werner Bruckner: CFK: Hohe Kosten blockieren Durchbruch am Massenmarkt. VDI nachrichten, 25.05.2012, <http://www.ingenieur.de/Themen/Kunststoffe/CFK-Hohe-Kosten-blockieren-Durchbruch-am-Massenmarkt> (aufgerufen am 20.12.2013)
- <sup>86</sup> Bernd Wohlmann et al., Vortrag „Neue Entwicklungen auf dem Gebiet der Kohlenstofffaser“, 2010
- <sup>87</sup> Ebd.

- <sup>88</sup> BASF und SGL entwickeln thermoplastisches CFK. MaschinenMarkt, MaschinenMarkt, 05.10.12, <http://www.maschinenmarkt.vogel.de/themenkanale/konstruktion/werkstoffe/articles/380691/> (aufgerufen am 20.12.2013)
- <sup>89</sup> Iestyn Hartbich: Zerspaner nehmen CFK ins Visier. VDI nachrichten, 21.09.2012, <http://www.ingenieur.de/Themen/Werkstoffe/Zerspanernehmen-CFK-Visier> (aufgerufen am 20.12.2013)
- <sup>90</sup> MAI Recycling. Carbon Composites e.V., ohne Datum, <http://www.mai-carbon.de/index.php/de/cluster-organisation/projekte/mai-recycling> (aufgerufen am 20.12.2013)
- <sup>91</sup> Mathias Tötze: Untersuchungen zum Recycling von kohlefaserverstärkten Kunststoffen (CFK) durch Depolymerisation im Metallbad. Weißensee-Verlag 2005
- <sup>92</sup> Ebd.
- <sup>93</sup> Doris Karl: CFK Recycling in Forschung und Praxis. Automobil-Industrie, 08.10.2012, <http://www.automobil-industrie.vogel.de/leichtbautechnologie/kunststoff/articles/380963/index2.html> (aufgerufen am 20.12.2013)



VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH (VDI ZRE)  
Bertolt-Brecht-Platz 3  
10117 Berlin  
Tel. +49 30-27 59 506-0  
Fax +49 30-27 59 506-30  
zre-info@vdi.de  
www.ressource-deutschland.de

Im Auftrag des:



Bundesministerium  
für Umwelt, Naturschutz  
und nukleare Sicherheit



NATIONALE  
**KLIMASCHUTZ**  
INITIATIVE