



## Hybridbauteile aus CFK und Aluminiumdruckguss

Aluminium- und CFK-Bauteile im BMW i3

VON DANIEL SCHWARZ, MARCEL BECKER, WALTER LEIS, ANDREAS HÄGER UND LOTHAR KALLIEN, AALEN

Frühere Arbeiten beschäftigten sich mit faserverstärkten Gusslegierungen. So wurde in [1] über eine Verstärkung von Magnesium-Lithium-Legierungen durch Kohlenstofffasern mit hohen spezifischen Festigkeiten berichtet. Dabei wurden die Faserkörper mit der schmelzflüssigen Legierung druckinfiltriert.

Neue Arbeiten [2, 3] stellen erste Untersuchungen vor, die sich nicht nur mit kraftschlüssigen Verbindungen, wie Schraub- und Nietverbindungen zwischen Metall und CFK (kohlefaserverstärkte Kunststoffe), sondern auch mit stoffschlüssigen Verbindungen, wie dem Umgießen von CFK mittels Aluminiumdruckguss, befassen. Beim Umgießen wurden

die Kunststofffasern mit der Aluminiumgusslegierung infiltriert, um neben der stoffschlüssigen auch eine formschlüssige Verbindung herzustellen. Darüber hinaus wurden auch Übergangsstrukturen untersucht [4, 5], um grundlegende Kenntnisse über die Gestaltung, Auslegung und das Versagensverhalten zu erhalten.

### Durchführung der Untersuchungen

Bei der hier beschriebenen Studie wurden CFK-Lamine in eine Druckgießform eingelegt und mit einer Aluminiumlegierung umgossen. Die CFK-Lamine waren harzummüllt und sollten durch die geringe Wanddicke, die im Druckgießprozess möglich ist, nur unwesentlich thermisch belastet werden [6].

Im Detail wurde die Realisierbarkeit des Umgießens von CFK-Prepregs des Typs

### KURZFASSUNG:

Der anhaltende Trend zum Leichtbau fordert innovative Werkstoffverbunde. In der Vergangenheit wurden Bauteile, die aus CFK (kohlefaserverstärkte Kunststoffe) und Aluminium bestehen, bevorzugt geklebt, genietet oder verschraubt. Daraus resultierende Nachteile sind die aufwendige Vorbehandlung der Kleboberflächen sowie die zusätzliche Gewichtserhöhung bei Niet- und Schraubverbindungen.

In der hier beschriebenen Studie wurden CFK-Lamine in eine Druckgießform eingelegt, mit einer Aluminiumlegierung umgossen und untersucht.

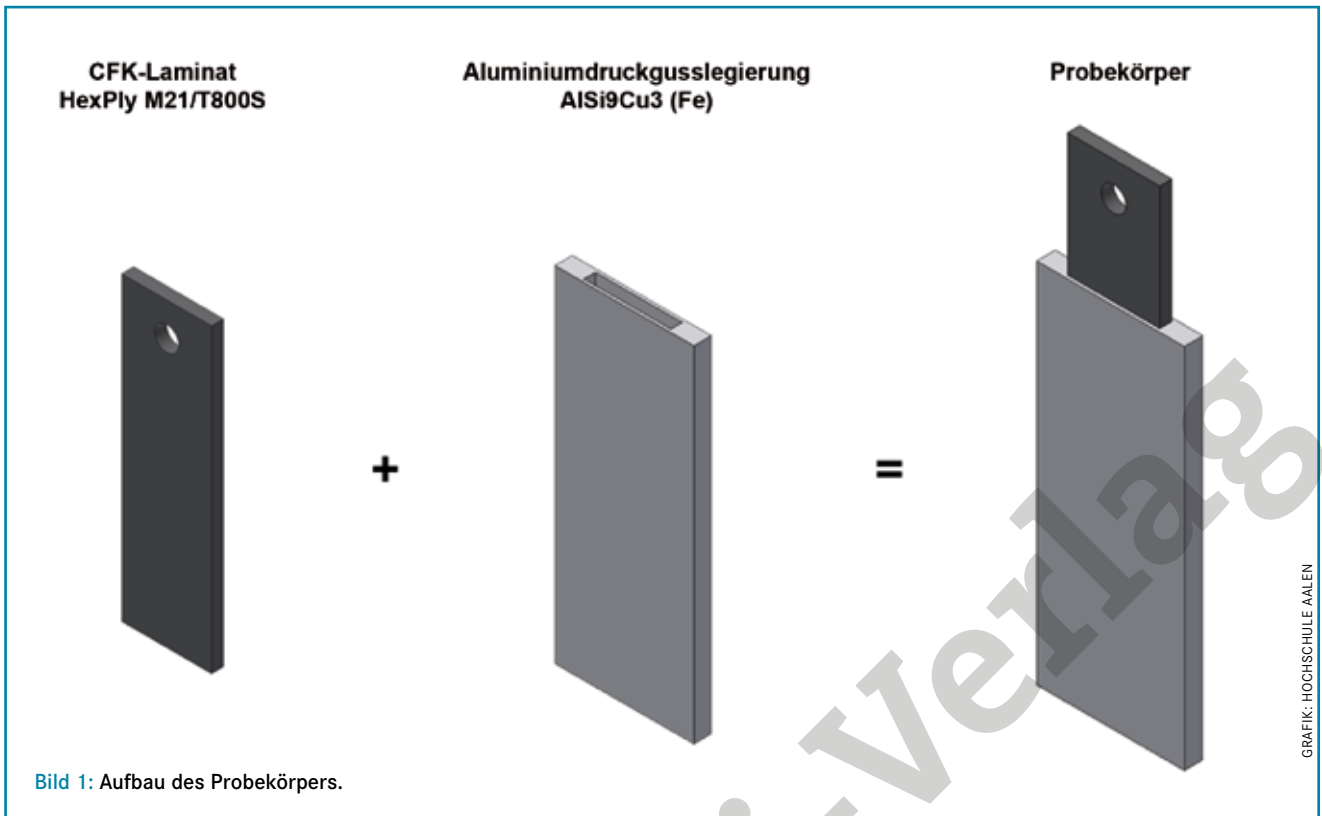


Bild 1: Aufbau des Probekörpers.

GRAFIK: HOCHSCHULE AALEN

HexPly M21/T800S [7, 8] mit der Aluminiumdruckgusslegierung AlSi9Cu3(Fe) untersucht. Das Bauteilgewicht wird im Vergleich zu alternativen Fügetechniken nicht weiter erhöht. Bild 1 zeigt den Aufbau des gegossenen Probekörpers.

Ziel war es, die CFK-Lamine (Dicke: 4 mm) sowohl formschlüssig als auch rein kraftschlüssig zu umgießen. Zu diesem Zweck wurden vier unterschiedlich bearbeitete CFK-Lamine (Bild 2) festgelegt.

Zur Erreichung einer formschlüssigen Verbindung zwischen CFK und Aluminium wurden die in Bild 2 gezeigten Bohrungen (Durchmesser 6 mm) in die CFK-Lamine eingebracht (die im oberen Bereich aller CFK-Lamine befindliche Bohrung mit 8,1 mm Durchmesser diente bei späteren Pull-out-Tests zur Aufnahme an der Prüfmaschine, um die eingespannten Probekörper zusätzlich zur Einspannbacke zu sichern). Durch das Druckgießen wurde so ein Formschluss erzielt. Bei den CFK-Laminen ohne Bohrung wurde eine rein kraftschlüssige Verbindung hergestellt. Diese resultiert aus der Klemmkraft des erstarrten Aluminiums und der daraus hervorgehenden Haftreibung.

Die mit Grafitlack besprühten Oberflächen der Proben sollten hinsichtlich der elektrochemischen Kontaktkorrosion zwischen CFK und Aluminium näher untersucht werden.

Darüber hinaus wurden die Wanddicke der CFK-Lamine und die Kolbenge-



Bild 2: Variierende CFK-Lamine, 4 mm dick: a) ohne Bohrung, b) mit 1 Bohrung, c) mit 2 Bohrungen, d) mit Grafitlack besprühter Oberfläche (die obere große Bohrung dient zur Einspannung im späteren Zugversuch).

FOTO: HOCHSCHULE AALEN

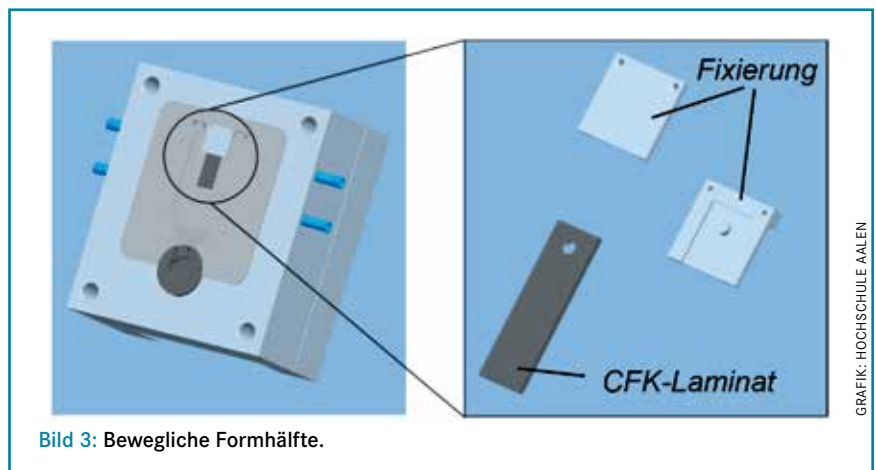


Bild 3: Bewegliche Formhälfte.

GRAFIK: HOCHSCHULE AALEN

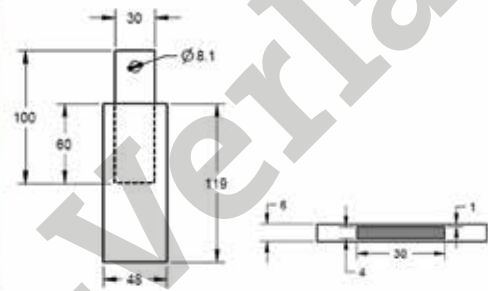
**Tabelle 1:** Durchschnittswerte der 4-mm-Proben aus dem Pull-out-Test. Die Spannungen sind auf die Querschnittsfläche des CFK-Laminats bezogen.

Probe	CFK-Variante	Kolbengeschwindigkeit in m/s	Durchschnittliche Maximalkraft in kN	Durchschnittliche Scherkraft in kN	Durchschnittliche Haftreibung in kN	Durchschnittliche Spannung in MPa
Serie 9	keine Bohrung		13,9	0,0	13,9	116,1
Serie 10	1 Bohrung	4	18,0	4,0	14,0	149,8
Serie 11	2 Bohrungen		24,3	10,3	14,0	202,2
Serie 12	lackbesprüht		8,7	0,0	8,7	72,8
Serie 13	keine Bohrung		10,9	0,0	10,9	90,9
Serie 14	1 Bohrung	2	15,3	4,4	10,9	127,6
Serie 15	2 Bohrungen		21,0	10,1	10,9	175,0
Serie 16	lackbesprüht		6,7	0,0	6,7	55,7

FOTO: HOCHSCHULE AALEN

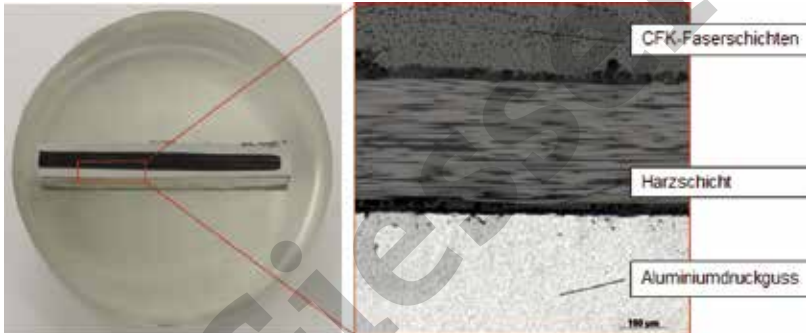


**Bild 4:** CFK-Aufnahme im Werkzeug.



**Bild 5:** Probekörper mit Abmessungen.

GRAFIK: HOCHSCHULE AALEN



**Bild 6:** Schliffbild CFK-Al-Verbund.

FOTO: HOCHSCHULE AALEN



**Bild 7:** CT-Aufnahme des Verbundes.

FOTO: HOCHSCHULE AALEN

schwindigkeit im Druckgießprozess (2 m/s und 4 m/s) variiert.

Die Druckgießversuche wurden mit dem in Bild 3 gezeigten Druckgießwerkzeug durchgeführt. Während des Druckgießprozesses wurden die CFK-Laminat mit einer Aufnahme zentral in der Druckgießform fixiert (Bild 3 und Bild 4) und mit Aluminium mit einer Wanddicke von 1 mm umgossen. Insgesamt wurden 48 Probekörper (Bild 5) mit den genannten variierenden Parametern auf einer Kaltkammerdruckgießmaschine

mit einer Schließkraft von 4 MN hergestellt.

### Untersuchungsergebnisse

Äußerlich wiesen die Probekörper keine Schädigung des Laminats auf. Um die innere Schädigung des CFK-Laminats zu analysieren, wurden 3-D-Computertomographieaufnahmen und Schliffbilder erstellt. Speziell im Übergangsbereich zwischen CFK und Aluminium entstanden minimale Poren. Dies kann auf die ther-

mische Belastung des im CFK-Laminat befindlichen Harzes zurückzuführen sein. Bilder 6 und 7 zeigen ein Schliffbild und die CT-Aufnahme einer Probe. Die im Druckgießwerkzeug eingebauten Druck- und Temperatursensoren wiesen Drücke von bis zu 1000 bar beim Nachverdichten des Bauteils sowie maximale Formtemperaturen von ca. 460 °C während des Formfüllens im Bereich des CFK-Laminats auf.

Die Untersuchung der Verbindungsfestigkeit zwischen CFK und Aluminium

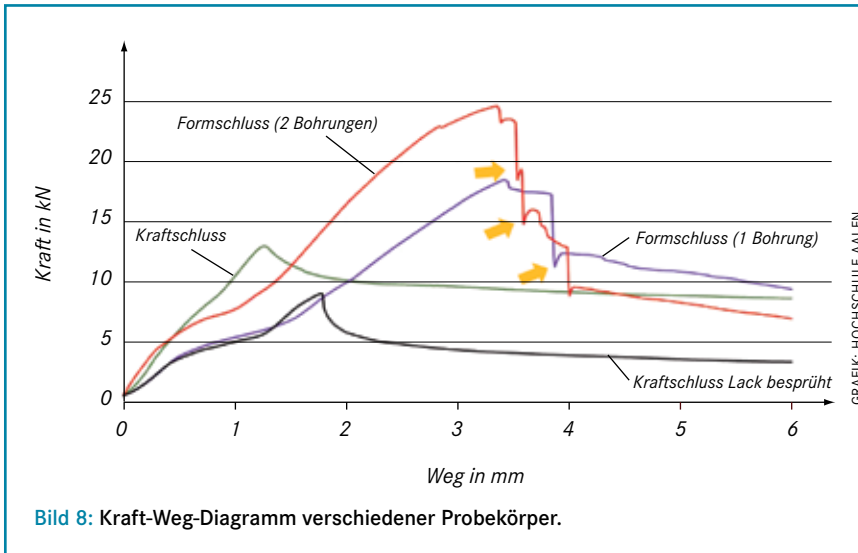


Bild 8: Kraft-Weg-Diagramm verschiedener Probekörper.

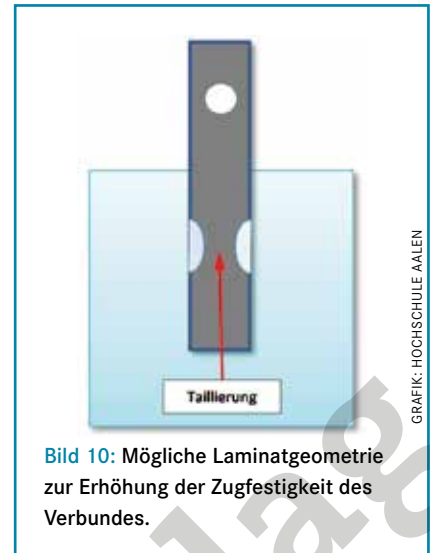


Bild 10: Mögliche Laminatgeometrie zur Erhöhung der Zugfestigkeit des Verbundes.

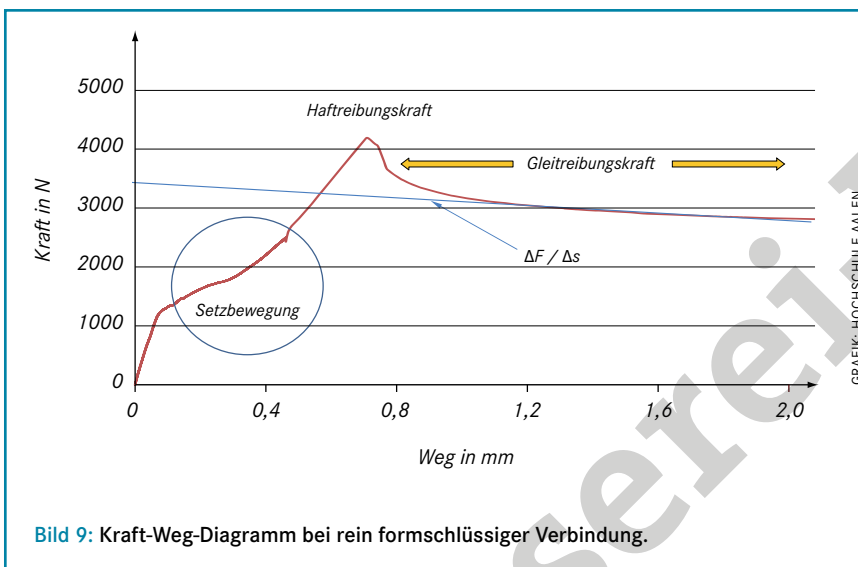


Bild 9: Kraft-Weg-Diagramm bei rein formschlüssiger Verbindung.

fand mit Pull-out-Tests statt. Hierfür wurden die Probekörper in eine Zugprüfmaschine eingespannt und die maximale notwendige Kraft zum Trennen der Verbindung ermittelt. Beispielhaft zeigt das Kraft-Weg-Diagramm (Bild 8) die Messwerte einiger Proben.

Deutlich ist zu erkennen, dass Probekörper, deren CFK-Laminat mit Bohrungen versehen wurden, eine höhere Verbindungsfestigkeit gegenüber bohrungslosen Laminaten aufwiesen. Des Weiteren zeigten Probekörper, deren CFK-Einlege-teile keine Bohrungen aufwiesen, eine gleichmäßigere Gleitreibung nach Erreichen der maximalen Zugkraft. Hingegen waren bei Proben mit Bohrungen unregelmäßigere Gleitreibungskurven zu erkennen. Die im Kraft-Weg-Diagramm mit gelben Pfeilen markierten Peaks sind auf eine Abtrennung der durch die Bohrung entstandenen Formverbindungen zurückzuführen. Vor jeder Abtrennung kam es zu einer Setzbewegung mit anschließendem Anstieg der Kraft zum Abtrennen der formschlüssigen Verbindungen. Im An-

schluss fiel die Kraft entsprechend der Gleitreibung ab.

Zusammengefasst konnten für alle 22 untersuchten Probekörper mit einer CFK-Laminatdicke von 4 mm die in Tabelle 1 aufgeführten maximalen Kräfte erreicht werden.

Die im Anschluss durchgeführte Berechnung der Zugfestigkeit, welche auf die ursprüngliche Querschnittsfläche von 120 mm<sup>2</sup> der CFK-Laminat bezogen wurde, ergab maximale Spannungen von bis zu 200 MPa. Ebenfalls konnten die für die Abtrennung der Verbindungsstifte notwendigen Scherkräfte ermittelt werden. Der Anstieg durch das Abscheren der eingegossenen Verbindungsstifte betrug durchschnittlich 5 kN pro Stift.

### Zusammenfassung

Die Untersuchungen belegen klar, dass ein Umgießen von CFK-Laminaten im Druckgießverfahren grundsätzlich möglich ist. Die Anbindung der beiden Werkstoffe ist dabei sehr gut und die thermi-

sche Belastung der CFK-Laminat ist auf Grund der sehr kurzen Erstarrungs- und Abkühlzeit im Druckgießverfahren sehr gering, da die Gusswanddicke an den CFK-Laminatflächen nur 1 mm betrug.

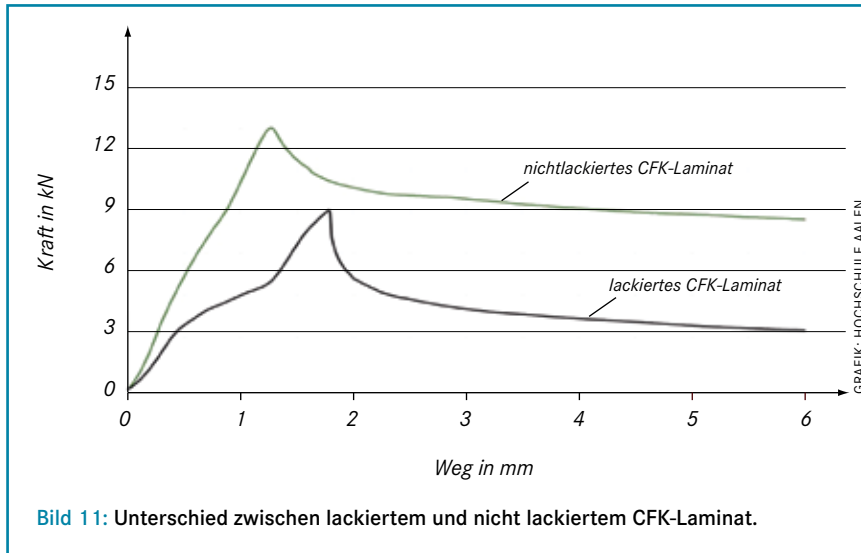
Bei den Pull-out-Versuchen konnten Maximalkräfte von bis zu 24 kN erreicht werden. Bezieht man die Kraft auf die Querschnittsfläche des Laminats (120 mm<sup>2</sup>), entspricht dies einer Spannung von ca. 200 MPa.

Die vom Aluminiumdruckguss umschlossene Mantelfläche beträgt bei den 4 mm dicken Laminaten 4080 mm<sup>2</sup>. Die Reibungskraft bei Gleitreibung im Pull-out-Test ist proportional zur Normalkraft, mit der die beiden Werkstoffe durch das Schrumpfen der Aluminiumlegierung zusammengedrückt werden. Unbekannt sind die Reibungszahlen  $\mu$  für Haft- und Gleitreibung.

Aus der Änderung der Zugkraft während des Pull-out-Tests kann auf den Pressdruck geschlossen werden, da die umschlossene Fläche um 68 mm<sup>2</sup> pro mm Gleitweg abnimmt ( $\Delta F = \text{Kraftänderung} / \Delta s = \text{Wegänderung}$ , Bild 9). Dieser Anpressdruck aus Pressfläche und Kraftänderung pro Fläche beträgt damit  $300 \text{ N} / 60 \text{ mm}^2 = 5 \text{ MPa}$ . Daraus kann die erforderliche umgebende Fläche des CFK-Laminates berechnet werden, wenn man die maximale Zugfestigkeit des Laminats von 1000 MPa erreichen wollte.

Die Kraft zum Abscheren des mitgegossenen Verbindungsstifts beträgt im Durchschnitt 5 kN. Da die Stifte bei 6 mm Durchmesser eine Querschnittsfläche von ca. 27 mm<sup>2</sup> aufweisen, ist für das Abscheren der Aluminiumverbindung (Zugfestigkeit angenommen mit 240 MPa) eine Spannung von ca. 185 MPa erforderlich.

Anstelle der Stifte könnte durch eine Taillierung des CFK-Laminats die Pull-out-Kraft erheblich gesteigert werden, da die



**Bild 11:** Unterschied zwischen lackiertem und nicht lackiertem CFK-Laminat.

Zugfestigkeit des Laminats ca. 1000 MPa beträgt (Bild 10). Ein Vergleich der Gleitreibungskräfte bei lackierten und nicht lackierten CFK-Körpern (Bild 11) ergab einen Unterschied des Faktors 2., d. h., der Reibungsbeiwert mit Lackierung ist nur halb so hoch wie ohne Lackierung.

B. Eng. Daniel Schwarz, M.Sc. Marcel Becker, Dipl.-Phys. Walter Leis, Dipl.-Ing. Andreas Häger und Prof. Dr.-Ing. Lothar Kallien, Hochschule Aalen

#### Literatur:

- [1] Kudela, S.; Schweighofer, A.; Schemme, K.: *Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde*. Symposium der Deutschen Gesellschaft für Materialkunde, Chemnitz, 1993. S. 25-32.
- [2] *Canadian Metallurgical Quarterly* 33 (1994), [Nr. 3], S. 255-258.
- [3] Clausen, J.: *E. Lange Folienpräsentation: CFK-Aluminium-Übergangsstrukturen*. Fraunhofer IFAM, Bremen, 2013.
- [4] *Giesserei* 101 (2014), [Nr. 11], S. 74-77.
- [5] DFG Forschergruppe 1224 „Schwarz-Silber“. [www.for-schwarzsilber.de](http://www.for-schwarzsilber.de), Zugriff: 27. Mai 2015.
- [6] *Leitwerkstoff Gelege: Prepreg-CFK HexPly M21/T800S*. Institut für Materialforschung Aalen, Aalen, 2014.
- [7] *Technical data sheet T800S*. Toray Carbon Fibres America, INC., Santa Ana, <http://www.toraycfa.com/pdfs/T800H-DataSheet.pdf>.
- [8] *Product data HexPly M21*. Hexcel Corporation, Stanford, USA, 2007.

© Giesserei-V