

# SPECIAL:

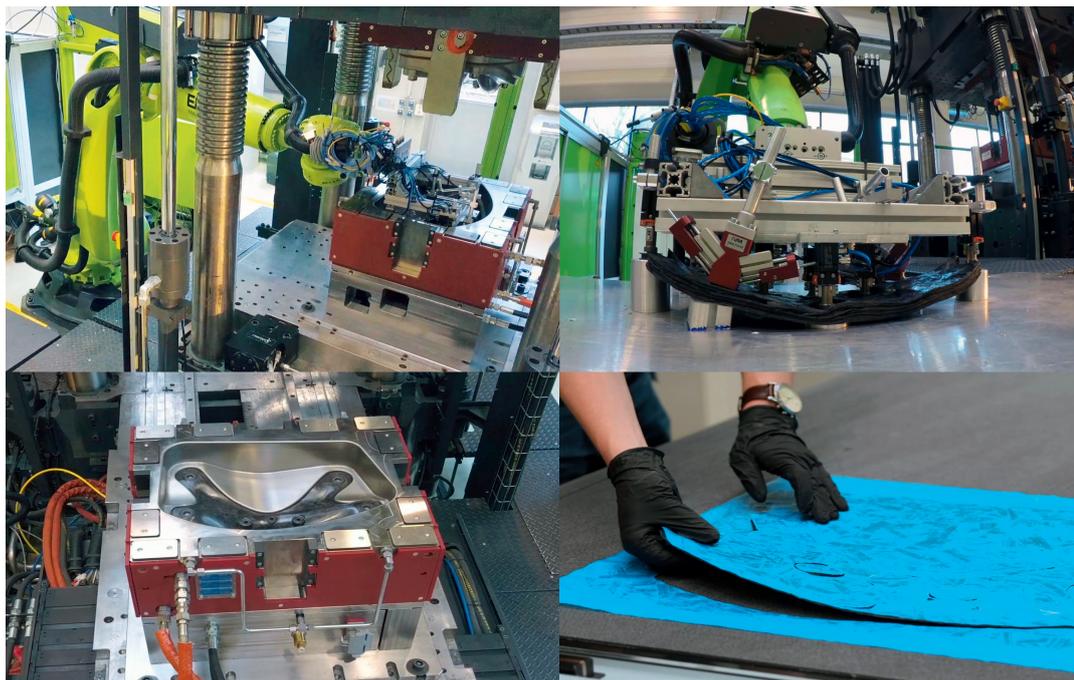
## Verbundwerkstoffe

[FAHRZEUGBAU] [MEDIZINTECHNIK] [VERPACKUNG] [ELEKTRO&ELEKTRONIK] [BAU] [KONSUMGÜTER] [FREIZEIT&SPORT] [OPTIK]

# „Zero-Waste“-Konzept für Carbon-SMC

## Forschungsprojekt zeigt Recyclingpotenzial für Composite-Leichtbau auf

Composite-Werkstoffe sind für viele Anwendungen oft der Schlüssel zum Leichtbau. Die große Herausforderung dieser Hybridmaterialien ist jedoch das Recycling. Die Wiederverwertung von lang- und endlosfaserverstärkten Werkstoffen ist noch nicht gelöst. Wenn überhaupt, kommt bislang nur ein Downcycling infrage. Vier Forschungspartner haben es sich deshalb zum Ziel gesetzt, im Rahmen eines „Zero-Waste“-Projekts eine neue Presstechnik zu entwickeln.



Für die Herstellung der Versuchsbauteile kam eine von Engel entwickelte SMC-Fertigungszelle mit einer Maschine des Typs Engel v-duo 700 und einem Knickarmroboter easix KR35 zum Einsatz. (© Engel)

Ob Automobil, Flugzeugbau, Teletro-  
nik, Bau oder technische Anwendungen – die unterschiedlichsten Branchen verlangen nach immer leichteren Bauweisen und gleichzeitig immer höheren Bauteileigenschaften. Der naheliegende Einsatz von Composite-Werkstoffen scheitert oft an der ungelösten Recyclingfrage. Drei Unternehmen – die Engel

Austria GmbH, St. Valentin, die Alpex Technologies GmbH, Mils, beide Österreich, und die US-amerikanische Hexcel Corporation mit Sitz in Stamford/Connecticut – arbeiteten gemeinsam mit der Johannes Kepler Universität in Linz an einer Lösung.

Im Fokus der Forschungsarbeit stand die Herstellung kohlenstofffaserverstärk-

ter Sheet Molding Compounds (SMC) im Heißpressverfahren, kurz als Carbon- oder C-SMC-Technologie bezeichnet. Der einstufige Prozess gilt sowohl in voll- als auch teilautomatisierter Ausführung als besonders kosteneffizient. Kritische Bereiche werden dabei durch unidirektional faserverstärkte Prepregs lokal und lastpfadgerecht verstärkt. »

Das Projekt, das von der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) gefördert wurde, setzt auf verschiedenen Ebenen an. Es geht um den Einsatz von Recyclingmaterialien, geringere Mengen an Kohlefaserabfall, eine kostenoptimierte Fertigung und eine höhere Materialeffizienz. Material nur dort verwenden, wo es die Belastung und die Sicherheitsvorschriften erfordern, lautet die Devise.

### Von der Idee zum Automobilbauteil

Das Verarbeitungskonzept für die Herstellung von Faserverbundlösungen mit einem Hauptaugenmerk auf der Abfallreduktion (Zero Waste) wurde zunächst auf Laborebene validiert, sowohl mit Carbon-Recyclingfasern als auch mit SMC-Schnittabfällen. Um die Implementierung in der Großserie zu ermöglichen, wurde von Beginn an ein vollautomatisiertes Pressverfahren favorisiert. Als Fallstudie verdeutlicht ein Getriebequerträger fürs Automobil die Umsetzbarkeit und das Marktpotenzial der Innovation besonders gut (**Bild 1**).

Das Strukturbauteil, das klassisch aus Aluminium besteht, wurde aus Carbon-SMC unter Zero-Waste-Prämisse entwickelt. Die Bauteilanforderungen kamen von einem führenden OEM, und das Bauteildesign wurde materialgerecht optimiert. Während der Produktentstehung erarbeiteten die Entwicklungspartner An-

sätze für die Prozess- und Struktursimulation. Essenzielle Prozessdaten konnten sie zuvor über Versuchsbauteile ermitteln. Damit wurde der Entwicklungsaufwand reduziert und die Prozesssicherheit erhöht.

Bei der Optimierung der Bauteiltopologie zu Beginn des Projekts ging es vor allem darum, den neuen Prozess an die Besonderheiten des Materials anzupassen. Es kamen unterschiedliche SMC-Halbzeuge von Hexcel, die teilweise noch im Entwicklungsstadium sind, sowie verschiedene Sandwich-Architekturen zum Einsatz. Als Referenzmaterial diente HexMC-i 2000, eine kommerziell erhältliche Carbon-SMC-Variante. Insgesamt wurde die Machbarkeit anhand von vier unterschiedlichen Materialien evaluiert (**Bild 2**):

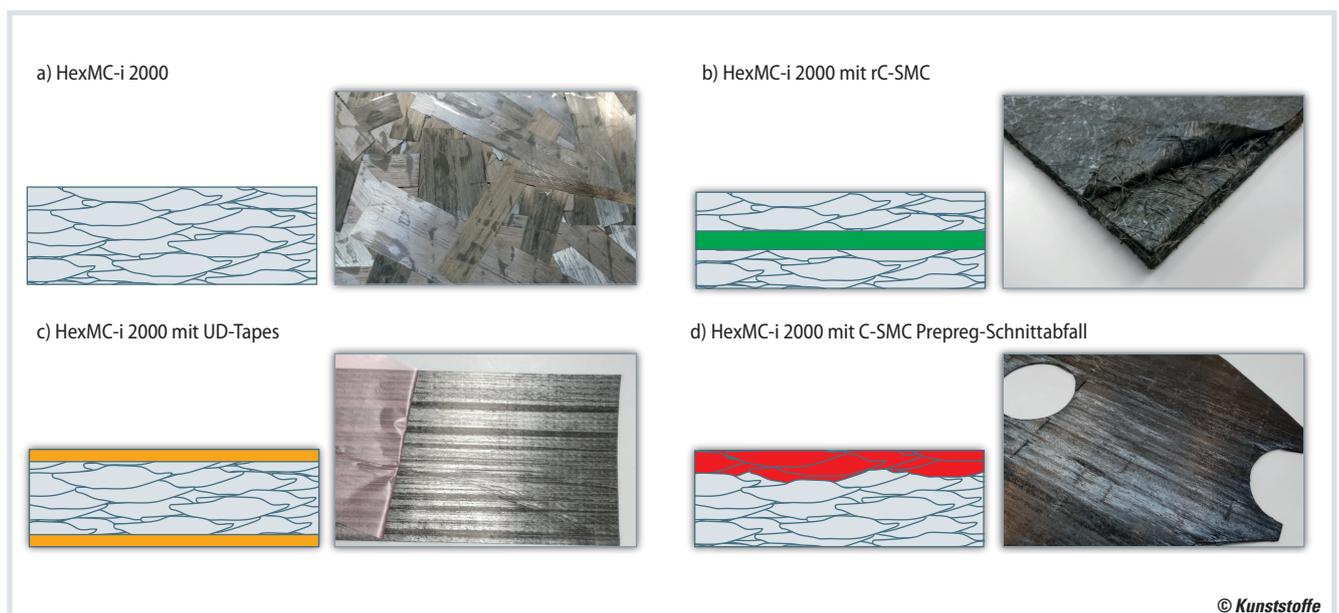
- HexMC-i 2000 wird als primäres C-SMC bezeichnet. Es besteht aus rechteckig geschnittenen Plättchen (50 x 8 mm) von endlosfaserverstärkten, unidirektionalen (UD) Carbonfaser-Prepregs. Die Plättchen haben im Sheet Molding Compound eine zufällige Orientierung.
- rC-SMC wird als sekundäres C-SMC bezeichnet und enthält rezyklierte Carbonfasern des amerikanischen Anbieters Carbon Conversions, die in einer Prepreg-Linie bei Hexcel mit Epoxidharz versehen werden. Die Carbonfasern weisen eine ungeordnete Struktur auf, ähnlich konventionellem GF-SMC.



**Bild 1.** Die Fallstudie Getriebequerträger macht das Marktpotenzial der Zero-Waste-Entwicklung deutlich. Aus C-SMC (im Bild) wiegt das Bauteil nur halb so viel wie aus Aluminium

(© Engel)

- UD-Tapes mit Epoxidharzmatrix wurden aus primären, unidirektionalen Carbonfaser-Prepregs gewonnen und zur lokalen Verstärkung von HexMC-i 2000 verwendet, das aus dem gleichen Material besteht.
  - C-SMC Prepreg Byproduct wird aus dem UD-Prepreg HexPly M77 (Schnittabfall aus der industriellen Serienfertigung von Automobilbauteilen) gewonnen. Im Anlieferzustand handelt es sich um Tapes, die im Abstand von 50 mm eingeschnitten sind. Mit diesem Material lassen sich definierte Faserorientierungen der Plättchen in die Bauteilarchitektur integrieren.
- Alle Materialien wurden mit demselben Epoxidharz (Typ: Hexcel M77) vorimprä-



© **Kunststoffe**

**Bild 2.** Die Versuche wurden mit unterschiedlichen Materialien durchgeführt. Als Referenzmaterial diente HexMC-i 2000, eine kommerziell erhältliche Carbon-SMC-Variante (Quelle: Johannes Kepler Universität)

niert. Dieses Harzsystem vernetzt bei 150 °C in rund 2 min und ist deswegen für Automobil-Anwendungen besonders geeignet.

### Vollautomatisierter Prozess in der SMC-Fertigungszelle

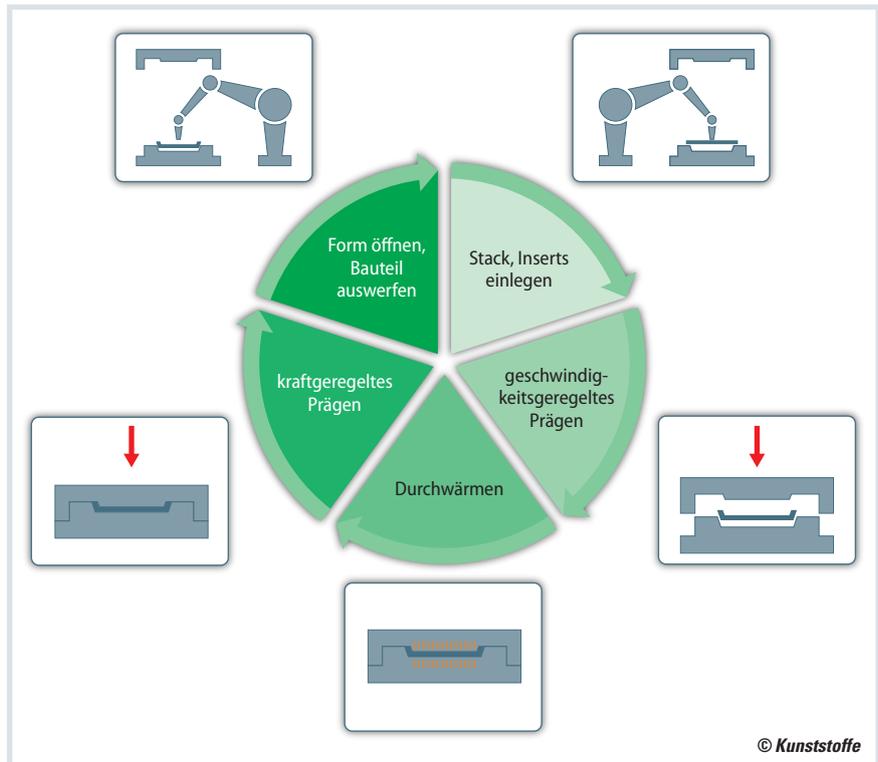
Für die Herstellung der Versuchsbauteile (Bild 3) kam eine von Engel entwickelte, vollautomatisierte SMC-Fertigungszelle mit einer Spritzgießmaschine mit Prägefunktion (Typ: Engel v-duo 700) und einem Knickarmroboter (Typ: Engel easix KR35) zum Einsatz (Titelbild). Die Zuschnitte wurden auf einem NC-gesteuerten Schneidetisch vorbereitet, gravimetrisch angepasst und gemeinsam mit den Aluminium-Inserts für die Befestigungspunkte in die Form eingebracht (Bild 4). Das Werkzeug stammt von Alpex, einem Anbieter von Tooling-Systemen für die Herstellung von Composite-Bauteilen.

Verpresst wurde das Carbon-SMC mit einer Schließkraft von 5000 kN. Der resultierende Werkzeuginnendruck lag im Bereich von 200 bis 300 bar. Bei einer Bauteildicke von 8 mm und maximalen Dimensionen von 520 x 340 x 100 mm wurden Bauteilgewichte von 1270 bis 1280 g gemessen. Die Zykluszeit betrug 180 s. Dabei fand das eigentliche Verpressen des Materials nach einer 15 s langen Kompressionsphase bei 8 bar Werkzeuginnendruck statt. Die UD-Tapes wurden vor dem Einlegen des Stacks in der Form positioniert.

### Validierung des Zero-Waste-Konzepts

Zur Validierung des Zero-Waste-Konzepts wurden die Strukturbauteile entsprechend den Anforderungen des OEMs im Labor auf einer servohydraulischen Prüfmaschine (Typ: MTS Damper Test System; Hersteller: MTS Systems Corporation, Eden Prairie, USA) mechanisch geprüft. Dabei bildete der Bauteilprüfstand die Anbindungspunkte der realen Karosserie ab. Die Kräfteinleitung erfolgte über den Kolben eines Getriebe-Dummys. Mithilfe einer Kraftmessdose wurden die Verschiebung und die Reaktionskraft ermittelt.

Das Komponentenverhalten unter monotonen, quasistatischen Belastungen wurde mittels eines kritischen Lastpfads in Z-Richtung mit einer Prüfschwindigkeit von 2 mm/min überprüft.



**Bild 3.** Im optimierten C-SMC-Pressverfahren findet das eigentliche Verpressen des Materials nach einer ca. 15 s langen Kompressionsphase statt (Quelle: Engel)

|                               | Industriereferenz | Zero-Waste-Ansatz |        |
|-------------------------------|-------------------|-------------------|--------|
|                               | Alu-Druckguss     | C- SMC            | rC-SMC |
| Gewicht [g]                   | 2500              | 1280              | 1270   |
| Gewichtseinsparpotenzial [%]  | -                 | 49                | 50     |
| kritischer Lastpfad (-Z) [kN] | > 21              | 26                | 30     |
| Performance [%]               | -                 | +26               | +30    |

**Tabelle 1.** Der Material- bzw. Technologievergleich zwischen Aluminiumdruckguss und Carbon-SMC bestätigt den Erfolg des Zero-Waste-Konzepts (Quelle: Engel)

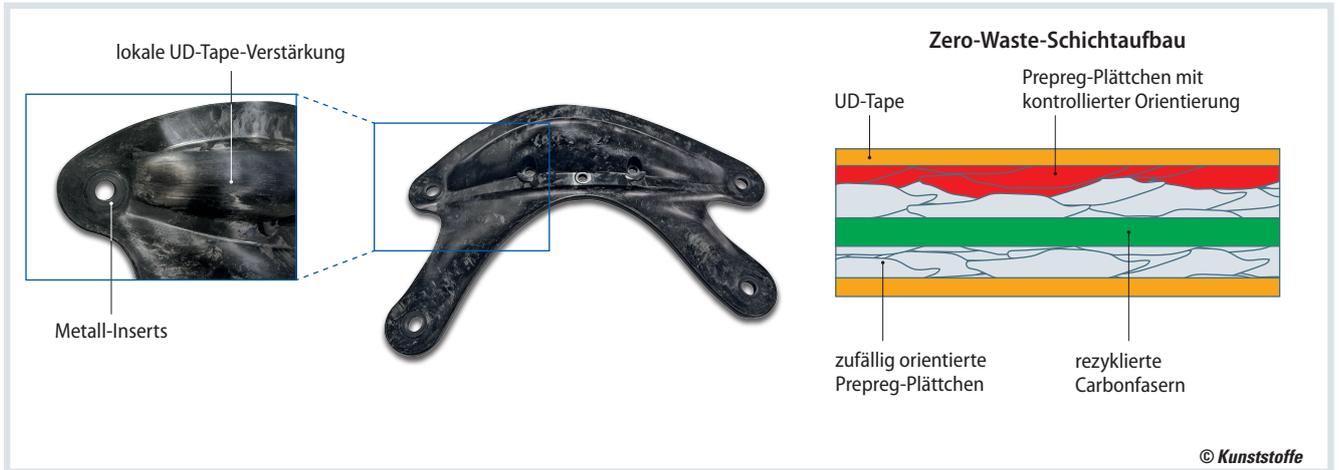
Um die unter Einsatzbedingungen zu erwartende Lebensdauer abzuschätzen, wurden entlang der kritischen Z-Richtung zyklische Ermüdungstests durchgeführt (Bild 5). Diese Tests fanden bei Raumtemperatur unter sinusförmiger Beanspruchung (5 Hz) sowohl verschiebungskontrolliert als auch kraftkontrolliert statt.

### Pressprozess optimiert

Bereits die ersten Untersuchungen halfen, den Prozessablauf mit der neuen SMC-Verarbeitungstechnologie zu optimieren. Dass die Fasern gebunden in Form von Plättchen statt als Bündel bzw. geschnittene Rovings vorliegen, verändert das Verarbeitungsverhalten im Vergleich zum konventionellen Carbon-SMC-Prozess maßgeblich. Erst nach einer

definierten Durchheizzeit fällt die Viskosität der Matrix so weit ab, dass die Plättchen voneinander abgleiten können. Im optimierten Prozess wird daher vor dem eigentlichen Verpressen das System für eine Dauer von rund 15 s mit einem geringen Druck von ca. 8 bar beaufschlagt, bis der Stack eine Kerntemperatur von mindestens 60 °C erreicht. Zudem wird die Presskraft erhöht, um das Material beim anschließenden Verpressen zum Fließen zu bringen.

Eine Grafik veranschaulicht den Verlauf des Werkzeuginnendrucks über die Härtingszeit. Das Referenzmaterial ist grün, das Recyclingmaterial orange dargestellt (Bild 6). Während der Durchwärmzeit ist der Werkzeuginnendruck noch gering. Beim parallelitätsgeregelten Verpressen zeigt sich ein Druckmaximum, »



**Bild 4.** Die Zero-Waste-Sandwichstruktur wurde lokal mit einem UD-Tape verstärkt. Für die Befestigungspunkte wurden Aluminium-Inserts in die Form eingebracht (Quelle: Johannes Kepler Universität)

## Die Autoren

**Gernot Schweizer MSc.** ist Entwicklungsingenieur im Technologiezentrum für Leichtbau-Composites der Engel Austria GmbH in St. Valentin/Österreich; gernot.schweizer@engel.at

**Dr.-Ing. Norbert Müller** leitet das Technologiezentrum für Leichtbau-Composites von Engel in St. Valentin; norbert.mueller@engel.at

**DI Philipp S. Stelzer** ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Polymer Product Engineering (IPPE) an der Johannes Kepler Universität in Linz/Österreich; philipp.stelzer@jku.at

**Univ.-Prof. Dr. Zoltán Major** ist Vorstand des IPPE in Linz; zoltan.major@jku.at

## Dank

Die Forschungsarbeiten wurden im Rahmen des Projekts Zero-Waste unter Leitung von Univ.-Prof. Dr. Zoltán Major im Institut für Polymer Product Engineering an der Johannes Kepler Universität in Linz/Österreich durchgeführt. Das Projekt wurde von der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) aus Mitteln des Klima- und Energiefonds gefördert und im Rahmen des Energieforschungsprogramms 2016 mit der KLI.EN-Nummer KR16VE0F13251 durchgeführt.

## Service

### Digitalversion

➤ Ein PDF des Artikels finden Sie unter [www.kunststoffe.de/2020-02](http://www.kunststoffe.de/2020-02)

das trotz exakter Regelung einer konstanten Schließkraft von 5000 kN rasch wieder abfällt. Hier wirkt sich am Drucksensor die Konversion des flüssigen Harzes zum steifen und festen Bauteil auf das Messergebnis aus. Im weiteren Verlauf der Aushärtereaktion steigt der Druck erneut an, was in erster Linie auf die thermische Ausdehnung des C-SMC zurückzuführen ist. Gegen Zyklusende gleichen sich die Druckkurven aufgrund des identischen Matrixmaterials an.

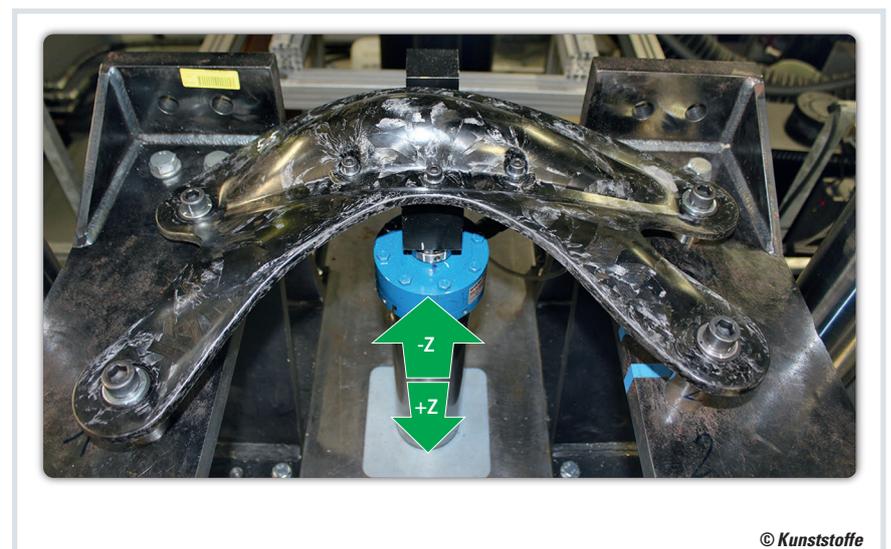
### Benchmark mit unterschiedlichen Materialien

In einer weiteren Versuchsreihe wurden die vier untersuchten Materialkonfigura-

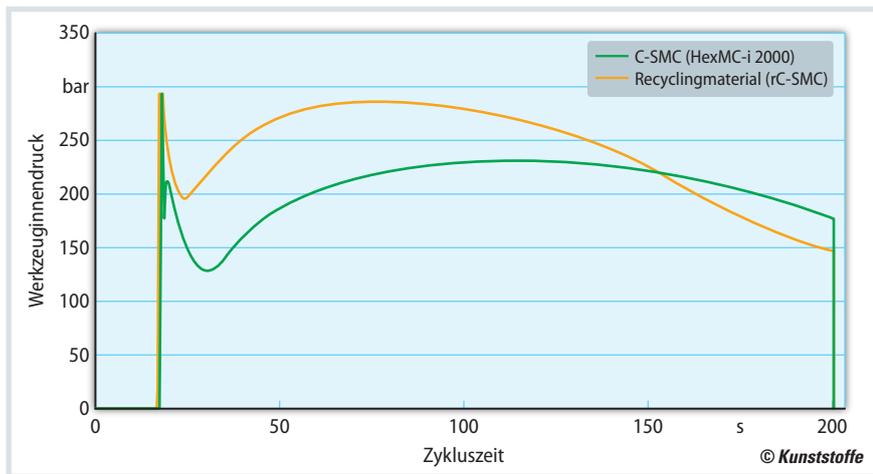
tionen miteinander verglichen. Die Bauteiltests wurden auf einer Getriebe-Dummy-Prüfvorrichtung durchgeführt. Die Vergleichsgrößen auf Basis der quasistatischen Bauteiltests waren die lineare Steifigkeit, die Sekantensteifigkeit zum Kraftmaximum und die Bruchlast (**Bild 7**).

Obwohl es sich bei den Messwerten um technische Kennwerte handelt, die nur für die bauteilspezifische Prüfanordnung gelten, lassen sie Vergleiche zwischen den Probekörper- und Materialvarianten zu. Die Ergebnisse werden auf die Materialkonfiguration HexMC-i 2000 normiert, bei der alle drei Kennwerte den Wert 1 bzw. 100% erhalten (**Bild 2a**).

Mit der Verwendung von recycelten Carbonfasern (**Bild 2b**) bzw. von se-



**Bild 5.** Entsprechend den Anforderungen des OEMs wurden die Strukturbauteile auf einer servohydraulischen Prüfmaschine mechanisch geprüft. Z wurde als kritische Lastrichtung deklariert (© Johannes Kepler Universität)



**Bild 6.** Bei der Herstellung des Getriebequerträgers wurde der Werkzeuginnendruck über die gesamte Härtungszeit gemessen (Quelle: Engel)

kundärem C-SMC aus industriellem UD-Prepreg-Schnittabfall (**Bild 2d**) in einem Schichtaufbau mit primärem C-SMC konnten mindestens ebenso gute Eigenschaften erzielt werden wie mit dem primären Referenzmaterial HexMC-i 2000 (**Bild 2a**). Damit wurde ein wichtiges Ziel des Zero-Waste-Konzepts erreicht. Auf die untersuchte Art und Weise kann – ohne nennenswerten Leistungsverlust an den Bauteilen – der Carbonfaser-Abfall erheblich verringert werden.

Mit der Verwendung von UD-Tapes (**Bild 2c**) und kontrollierter Orientierung der Plättchen (**Bild 2d**) ließ sich die Steifigkeit erhöhen und deren Standardabweichung auf weniger als die Hälfte reduzieren. Die Bauteilfestigkeit verbesserte sich

dadurch jedoch nicht. Ausschlaggebend für die Bruchfestigkeit waren jeweils die Einspannung und, wo vorhanden, die Festigkeit der Bindenähte. Hier trat eine starke Streuung auf (Variationskoeffizient von 10 bis 20 %), die kaum mit einem alternativen Lagenaufbau oder einer Variation bei der Prozessführung korrelierte.

**Gewichtseinsparung von rund 50 Prozent**

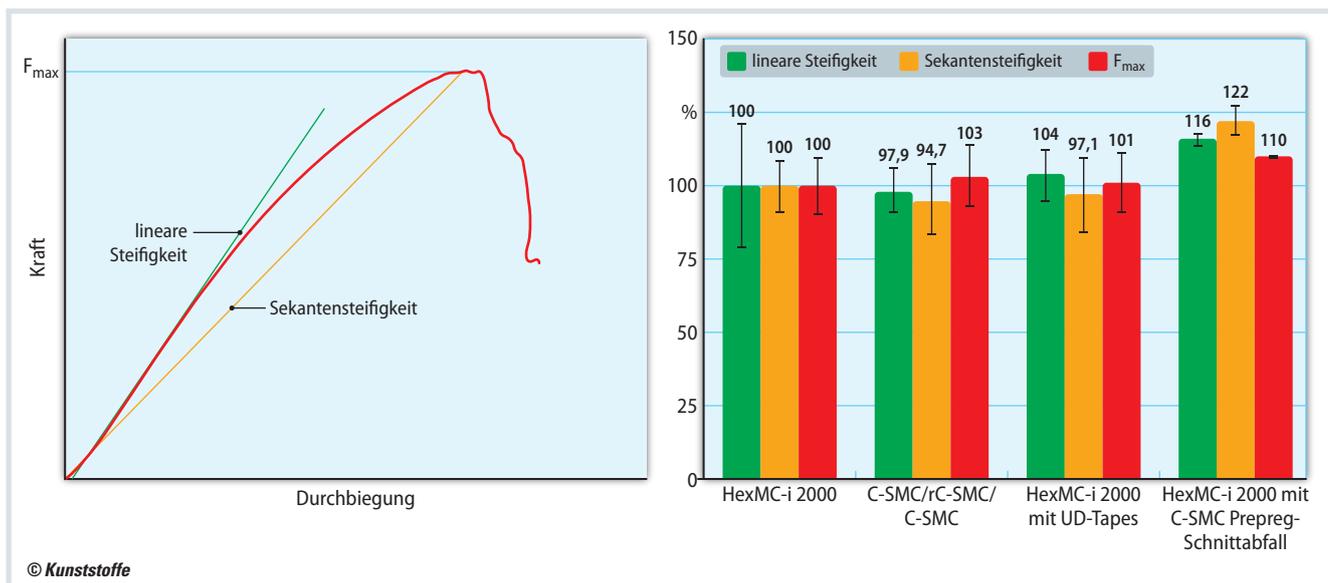
Alle Varianten erfüllen die für die spezifische Anwendung geforderte minimale Bruchlast von 21 kN, wobei Maximalwerte von über 26 kN erzielt werden, wie ein Material- und Technologievergleich am Beispiel des Getriebequerträgerbauteils

zeigt (**Tabelle 1, siehe S. 27**). Das primäre C-SMC-Material wie auch das Recycling-C-SMC erfüllen die quasistatischen Bauteilanforderungen (Steifigkeit, Festigkeit) des Automobilherstellers. Damit kann das Zero-Waste-Konzept als Beitrag zur Erhöhung des Recyclinganteils in lasttragenden Komponenten angewendet werden.

Die Bauteiltests belegen, dass die Bruchlasten in der kritischen Beanspruchungsrichtung weit über den Anforderungen von 21 kN liegen. Dynamische Lebensdauertests der Getriebequerträger zeigen nach drei Millionen Zyklen keine Schädigung des C-SMC-Materials, was die potenzielle Eignung dieser Materialien für strukturelle Anwendungen in Fahrzeugen herausstellt. Weiterer Optimierungsbedarf besteht jedoch bei der Einbindung der Aluminium-Inserts. Gegenüber dem Aluminium-Bauteil konnte eine Gewichtseinsparung von rund 50 % erzielt werden.

**Prägefunktion erfolgsentscheidend**

Entscheidend für den Erfolg bei der Herstellung der Versuchsbauteile war die Nutzung der Prägemöglichkeiten an der Engel-Maschine v-duo 700, wobei eine präzise kraft- und parallelitätsgeregelte Durchwärm- und Verpressphase erreicht wurde. Dies führt zu einer reproduzierbar hohen Bauteilqualität, die das Potenzial dieser Materialklasse vollständig offenbart. ■



**Bild 7.** In einer weiteren Versuchsreihe wurden die vier untersuchten Materialkonfigurationen miteinander verglichen. Die Vergleichsgrößen waren die lineare Steifigkeit, die Bruchlast (F<sub>max</sub>) und die Sekantensteifigkeit zum Kraftmaximum (Quelle: Johannes Kepler Universität)