



Im Tailored Fiber Placement lastpfadgerecht abgelegtes Recyclingstapelfaserhybridgarn: Das Garn wird dabei in mehreren Schichten auf eine Polyamidfolie aufgestickt und kann anschließend unter Druck vollständig konsolidiert werden (© IKT)

Kohlenstofffasern im Kreislauf halten

Recycling zu Stapelfaser-Hybridgarn verringert Eigenschaftsverluste

Faserverstärkte Kunststoffe weisen sehr gute gewichtsspezifische Eigenschaften auf, allerdings auch Schwächen hinsichtlich einer funktionierenden Kreislaufwirtschaft. Eine neuartige Kombination von Verarbeitungsprozessen erlaubt den Wiedereinsatz von Fasern und Matrix, ohne dabei die mechanischen Eigenschaften drastisch zu verändern.

Faser-Kunststoff-Verbunde (FKV) verfügen aufgrund ihrer spezifischen mechanischen Eigenschaften über ein hervorragendes Leichtbaupotenzial [1–4]. Dies reduziert den Einsatz fossiler Treibstoffe und schont damit nicht nur den Geldbeutel, sondern auch die Umwelt [5, 6]. So positiv der Nutzen in Hinblick auf die Gebrauchsphase ist, bestehen dennoch Schwierigkeiten z.B. in Bezug auf Wiederverwendung, Reparatur und Recycling. Gerade FKV mit duromerer Matrix sind hiervon besonders betroffen [3, 7]. Das Recycling von FKV ist in der Regel mit „Downgrading“, also einer Verschlechterung der Eigenschaften verbunden [3, 4, 7], weil die Verstärkungsfasern nicht wieder in den üblichen Faserkunststofftech-

nologien zum Einsatz kommen, sondern lediglich als Zusatzstoffe in anderen Kunststoffformgebungsprozessen oder in textiler Form ohne Orientierung z.B. als Vliese verarbeitet werden [7–9].

Recyclingkonzepte für FKV

Für FKV wird im Rahmen vieler Studien (z.B. [7, 10]) für die nächsten Jahre ein deutliches Wachstum prognostiziert. Im Zuge dessen gilt es, sich bereits frühzeitig um die Problematik des Recyclings der verwendeten Werkstoffe zu kümmern.

Energetisches Recycling, also die Rückgewinnung der gespeicherten Energie durch Verbrennen, ist grundsätzlich möglich, jedoch aus ökologischer und

ökonomischer Sicht unbefriedigend [7, 8]. Etabliert ist hingegen im Falle einer thermoplastischen Matrix oder bei Sheet Molding Compounds (SMC) die Verwendung des Faser-Matrix-Verbunds als Füllstoff für gering belastete Kunststoffteile. Ehrenstein [3] spricht in diesem Zusammenhang vom sogenannten Partikelrecycling.

Für alle weiteren Recyclingverfahren ist eine sortenreine Trennung von Faser und Matrix erforderlich. Dabei ist die Trennung von glasfaserverstärkten Kunststoffen aufgrund des geringen Preises der Glasfasern nicht zwangsläufig wirtschaftlich sinnvoll. Kohlenstofffasern (C-Fasern) hingegen erfordern eine energieintensive Herstellung, was sich in hohen »

Preisen widerspiegelt. Hier lohnt sich die Wiedergewinnung auch wirtschaftlich. Gegenwärtig wird die Pyrolyse, also die Verbrennung unter Sauerstoffausschluss, bereits industriell zur Rückgewinnung von C-Fasern genutzt. Dabei wird der Matrixwerkstoff vollständig verbrannt und somit energetisch verwertet. Die Kohlenstofffasern bleiben nach der Pyrolyse in ihrem ursprünglichen Eigenschaftsprofil, jedoch mit begrenzter Faserlänge zurück. Alternative Verfahren zur Pyrolyse stellen unter anderem die Solvolyse oder die Hydrolyse dar [3, 7, 8].

Die sortenreinen C-Fasern können anschließend wieder in neuen Bauteilen verarbeitet werden. Da sie jedoch nicht mehr in endloser Form vorliegen, sondern je nach Herkunft unterschiedlich kurz sind, lassen sich viele der etablierten Verarbeitungsverfahren nicht mehr einsetzen. Die Weiterverarbeitung ist derzeit

Die Autoren

Jochen Wellekötter, M.Sc., ist wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Abteilung Verarbeitungstechnik des Instituts für Kunststofftechnik (IKT) der Universität Stuttgart; jochen.wellekoetter@ikt.uni-stuttgart.de

Stephan Baz, M.Sc., ist wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Abteilung Stapelfasertechnologien der Deutschen Institute für Textil- und Faserforschung (DITF) Denkendorf.

Johannes Schwingel, M.Sc., ist wissenschaftlicher Mitarbeiter im Bereich Faserverbund- und Struktursimulation des Institut für Flugzeugbau (IFB) der Universität Stuttgart.

Prof. Dr.-Ing. Christian Bonten leitet das IKT seit 2010.

Prof. Dr.-Ing. Götz T. Gresser leitet das DITF seit 2014.

Prof. Dr.-Ing. Peter Middendorf leitet das IFB seit 2012.

Dank

Besonderer Dank gilt der Baden-Württemberg-Stiftung für die Finanzierung dieses Projekts.

Service

Literatur & Digitalversion

Das Literaturverzeichnis und ein PDF des Artikels finden Sie unter www.kunststoffe.de/6636873

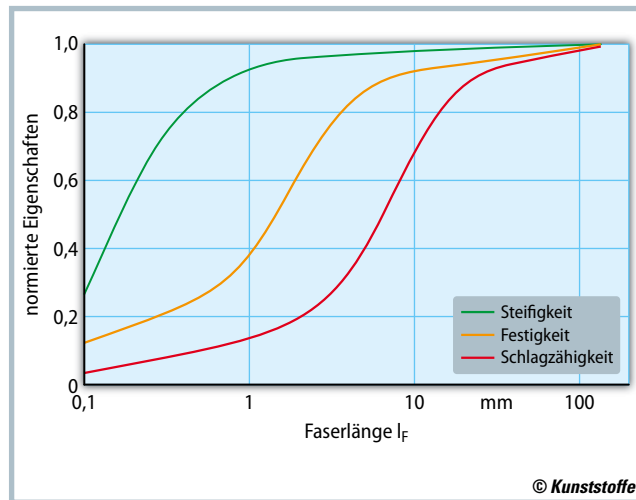


Bild 1. Normierte Eigenschaften von Faser-Kunststoff-Verbunden in Abhängigkeit von der Faserlänge

(Quelle: IKT/[11])



Bild 2. RecyComp-Projekt: Aufgabenbereiche der beteiligten Institute (Quelle: IKT, IFB, DITF)

auf die Verwendung als Zusatzstoffe beim Spritzgießen oder die Verarbeitung als Vliesstoff beschränkt [9].

Neuer Ansatz für das Recycling

Bei den zuvor vorgestellten Recyclingkonzepten muss von einer Verminderung der Eigenschaften gegenüber dem Neuteil ausgegangen werden. Dies ist vor allem durch die deutliche Reduzierung der in Krafrichtung wirksamen Faserlänge (kürzere Fasern, schlechtere Orientierung) begründet. Thomason [11] hat bereits 2002 gezeigt, dass die Faserlänge Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften eines FKV-Bauteils hat. Demnach bewirkt bei Faserlängen unter 100 mm jeder zusätzliche Millimeter deutliche Eigenschaftsverbesserungen in Hinblick auf Steifigkeit, Festigkeit und Schlagzähigkeit (**Bild 1**), was faserschonende Recyclingkonzepte erforderlich macht. Gleichzeitig bietet sich beim Einsatz von FKV durch

die anisotropen Eigenschaften der Fasern eine Optimierung der Faserorientierung auf den vorliegenden Lastfall eines Bauteils an [1–4, 12]. Dies kann durch die bislang praktizierte Verarbeitung von C-Fasern als Vliesstoff aufgrund seiner isotropen Struktur nur mangelhaft realisiert werden. Eine zusätzliche Verbesserung der Ressourceneffizienz entsteht durch die Bauteilherstellung mit Funktionsintegration in einem Schritt, also dem Anspritzen von beispielsweise Krafteinleitungselementen und Rippen [1–4, 12].

Die Forschungsinstitute Institut für Kunststofftechnik (IKT) und Institut für Flugzeugbau (IFB) der Universität Stuttgart sowie die Deutschen Institute für Textil und Faserforschung (DITF), Denkendorf, arbeiten gemeinsam am Projekt RecyComp (**Bild 2**). Dieses soll die Verfahrensgrundlagen für deutlich in Bezug auf ihre mechanischen und Gebrauchseigenschaften verbesserte Recyclingbauteile schaffen.

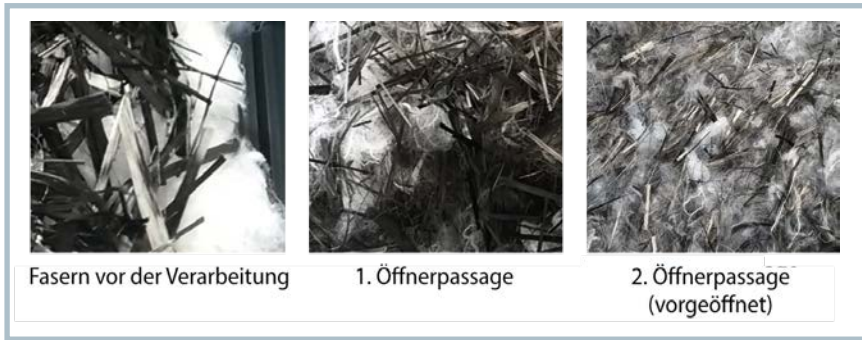


Bild 3. Mischen der Fasern: sogenannte Öffnung und Durchmischung von Fasern aus recyceltem Polyamid 6 (rPA6) und Kohlenstofffasern im Laufe von mehreren Durchgängen (© IKT)

Stapelfaser-Hybridgarn aus Recycling-Material

Liegen die C-Fasern aufgrund des bereits beschriebenen Trennungsprozesses sortenrein vor, so lassen sie sich über textile Prozesse weiterverarbeiten. Im Gegensatz zur sonst üblichen Verarbeitung wird hier ein Konzept vorgestellt, in dem die Fasern orientiert und ohne drastische Längeneinkürzung zu einem Stapelfaser-Hybridgarn verarbeitet werden. Hierfür werden durch Pyrolyse wiedergewonnene C-Fasern mit Thermoplast-Matrixfasern zunächst in einem textilen Öffnungsaggregat (Hersteller: Dilo Group, Eberbach) geöffnet und durchmischt (**Bild 3**).

Die Matrixfasern werden dafür zuvor aus recyceltem Polyamid (rPA) ersponnen, texturiert und zu sogenannten Stapelfasern (auf eine bestimmte Länge geschnittene Fasern) geschnitten. Die geöffneten und durchmischten Faserflocken werden mittels sogenannter Kardier-Verfahren auf einer Krempel zu einem Faserband verarbeitet.

In einem anschließenden Spinnprozess auf einem an den DITF entwickelten Umwindespinnntester werden die Faser-

bänder durch einen Verzug im Streckfeld in Prozessrichtung weiter orientiert, auf Endfeinheit verstreckt und in der Spinnzone mit einem Filament aus rPA umwunden und dann auf Spulen aufgerollt (**Bild 4**).

Lastpfadgerechte Gestaltung durch Tailored Fiber Placement

Das Tailored Fiber Placement (TFP, „maßgeschneidertes Faserablegen“) stellt eine effiziente Methode zur Herstellung hybrider Preforms dar. Vorteilhaft ist dabei, dass sich die Fasern in beliebiger Orientierung ablegen und dabei auch äußerst kleine Radien realisieren lassen. Am IFB wird in diesem Zusammenhang an einer Verbesserung der Ablegestrategie geforscht, um vollständig lastpfadgerecht ausgelegte Bauteile zu realisieren und den Materialverbrauch zu verringern. Die durch eine Simulation gewonnenen Hauptlastpfade geben Hinweise darauf, wo die Bauteile lokal zu verstärken sind. Dazu werden die Hauptlastpfade in Stickbahnen übersetzt und das Hybridgarn entsprechend abgelegt. Dies geschieht auf einer 4-Kopf-Stickmaschine (Hersteller: Tajima Group, Kasugai/Japan). »



Bild 4. Spulen des fertigen Stapelfaser-Hybridgarns aus recycelten C- und PA-Fasern (© DITF)

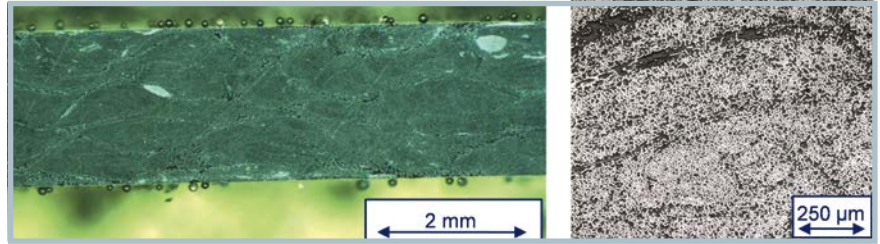


Bild 5. Schlifffbilder einer vollständig konsolidierten Testplatte mit acht UD-Lagen (© IKT, IFB)

Funktionsintegration durch Hinterspritzen

Die im TFP entstandenen hybriden Preforms lassen sich auf einer Plattenpresse zu fertigen Bauteilen pressen, wobei die Matrixfasern unter Temperatureinfluss aufschmelzen und die Kohlenstofffasern umschließen. Aufgrund der guten Durchmischung von C- und Matrixfasern kann eine gute Benetzung realisiert werden. Zusätzlich erlaubt die Gestaltungsfreiheit des Spritzgießens deutlich komplexere Bauteile mit zusätzlicher Funktionsintegration. Hierzu wird der hybride Preform in das Spritzgießwerkzeug einer Spritzgießmaschine (Typ: Allrounder 520S 1600-400, Hersteller: Arburg GmbH + Co KG, Loßburg) eingelegt und mit Matrixwerkstoff hinterspritzt. Die Matrix besteht dabei ebenfalls aus recyceltem thermoplastischem Werkstoff (TP-Rezyklat), der mit recycelten C-Fasern verstärkt werden kann.

Um sortenreine Recyclingware zu garantieren, wurde im Rahmen des hier vorgestellten Projekts am IKT Polyamid-Neuware (PA6: Ultramid B3S und PA66: Ultramid A3W der BASF SE, Ludwigshafen) recycelt. Hierfür wurden zunächst Zugstäbe vom Typ1A nach DIN EN ISO 527-2 auf die oben angegebene Spritzgießmaschine gefertigt. Diese wurden anschließend auf einer Schneidemühle (Typ: FZK280, Hersteller: Fellner & Ziegler GmbH, Frankfurt am Main) zu Mahlgut zerkleinert. Die Recyclingware wurde anschließend mit einem Anteil Neuware vermischt und auf einem Doppelschne-

ckenextruder (Typ: ZSK25, Hersteller: Coperion GmbH, Stuttgart) zu neuem Granulat aufbereitet. Zur Verbesserung der Matrixqualität wurden im Compoundierprozess zusätzlich Glas- oder recycelte C-Fasern eingearbeitet.

Ergebnisse: textiltechnische Eigenschaften

Im Projekt wurden Hybridgarne hergestellt, bestehend aus C-Fasern, die von ELG, Coseley/England, aus Produktionsabfällen wiedergewonnen worden waren, und aus am DITF erzeugten rPA6-Fasern (Ultramid B3S der BASF SE). Der Kohlenstoffanteil der Hybridgarne beträgt 58Vol.-% bei einer Garnfeinheit von 800 tex. Die mittlere Faserlänge der C-Fasern im Garn liegt bei 22 mm. Die mittlere Faserlänge der C-Fasern vor der Verarbeitung lag bei 40 mm. Die C-Fasern werden somit um etwa die Hälfte eingekürzt. Eine Verbesserung der Krempel zur Verringerung der Fasereinkürzung ist Teil weiterer Forschungsprojekte. Die Orientierung der C-Fasern in den Hybridgarnen ist sehr hoch, da durch das Umwindespinnverfahren die Fasern im Garnkern nahezu parallel und in Garmlängsrichtung orientiert vorliegen. Die Zugfestigkeit des Garns ist mit 130 N ausreichend für die Verarbeitung im TFP-Prozess.

Verarbeitungs- und Gebrauchseigenschaften

Neben der textiltechnischen Charakterisierung wurden außerdem die Verarbei-

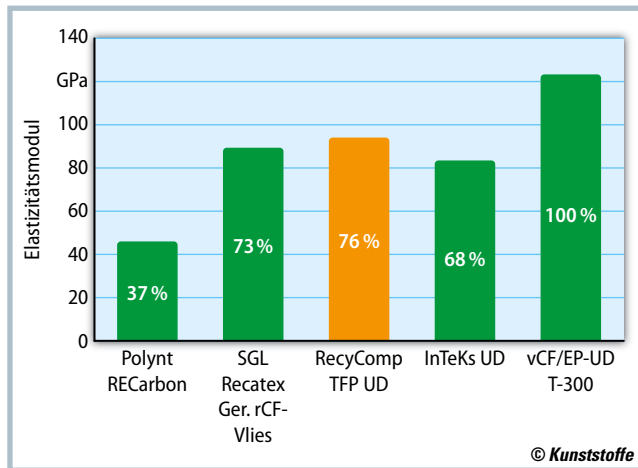
| Bezeichnung | Formelzeichen | Wert | Standardabweichung |
|-------------------------|------------------|------|--------------------|
| E-Modul 0° [GPa] | $E_{ }$ | 93,8 | 2,05 |
| Zugfestigkeit 0° [GPa] | $\sigma_{ }$ | 1075 | 72,5 |
| E-Modul 90° [GPa] | E_{\perp} | 6,7 | 0,35 |
| Zugfestigkeit 90° [GPa] | σ_{\perp} | 50,2 | 3,3 |
| Schubmodul G [GPa] | G | 4,8 | 0,25 |

Tabelle 1. Ermittelte mechanische Eigenschaften von Zugstäben mit 0°/90°-Orientierung

(Quelle: IFB, IKT)

Bild 6. E-Modul verschiedener Recycling-Materialien aus unterschiedlichen Projekten im Vergleich zur Original-T300-Faser (vCF/EP-UD T-300)

(Quelle: IKT)



Fazit und Ausblick

Das Recycling von FKV wird in Zukunft eine bedeutende Rolle spielen. Ein neuer Ansatz ist, die recycelten C-Fasern zu einem Recycling-Stapelfaser-Hybridgarn zu verarbeiten, im Tailored Fiber Placement lastpfadgerecht und strukturoptimiert abzulegen und in einem anschließenden Konsolidierungsschritt simultan umzuformen sowie mit Kunststoff zu hinterspritzen. Erste Ergebnisse deuten auf ein vielversprechendes Konzept hin, in dem die C-Fasern sich optimal im Bauteil orientieren lassen und hohe Faserlängen erzielt werden. Auch für den Matrixwerkstoff können grundsätzlich Recyclingwerkstoffe verwendet und dessen Eigen-



Bild 7. Lastpfadoptimiertes Demonstratorbauteil mit Kraffteinleitungselementen und Rippenstruktur (© IKT)

schaften wiederum durch die Zugabe von Fasern verbessert werden. Hierzu eignet sich insbesondere ein einstufiger Verarbeitungsprozess, um die Fasern möglichst schonend einzuarbeiten. ■

tungs- und Gebrauchseigenschaften des Garns für das Tailored Fiber Placement untersucht. Hierzu wurden zunächst die optimalen Parameter wie Stichlänge und -geschwindigkeit sowie minimal mögliche Radien für das TFP ermittelt. Anschließend wurden flächige Stickmuster gestickt und auf einer Plattenpresse (Hersteller: Maschinenfabrik Lauffer GmbH & Co. KG, Horb am Neckar) gepresst. **Bild 5** zeigt eine mikroskopische Aufnahme einer Platte. Deutlich ist die gute Durchmischung von C-Fasern und Matrix erkennbar.

Aus diesen Platten wurden Zugstäbe nach DIN EN ISO 527-5 in 0°, 45° und 90° zur Faserrichtung gefräst. Die Zugstäbe wiesen dabei einen durchschnittlichen Faservolumengehalt von 47,7% auf (relative Standardabweichung 0,01). **Tabelle 1** zeigt die resultierenden mechanischen Eigenschaften. Die Werte liegen dabei unter den für FKV mit Kohlenstofffasern erzielbaren, aber deutlich über den übli-

cherweise für langfaserverstärkte Thermoplaste sowie gängige Aluminium-Legierungen (ca. 75 GPa) erreichten Werten [4]. **Bild 6** zeigt einen Vergleich zu anderen Projekten, in denen Recyclingfasern erfolgreich und im Hinblick auf ihre mechanischen und Gebrauchseigenschaften optimiert eingesetzt werden. Das hier im Projekt erreichte Niveau von 76% des E-Moduls eines Unidirektional-Verbunds gegenüber einem mit neuen Kohlenstoff-Fasern ist bislang unerreicht.

Bild 7 zeigt außerdem ein aus dem Hybridgarn gefertigtes Demonstratorbauteil, in dem die C-Fasern lastpfadgerecht abgelegt (**Titelbild**) und mit einem recyclingfaserverstärkten Recyclingkunststoff zur Funktionsintegration hinterspritzt wurden. Der zum Hinterspritzen verwendete Kunststoff wurde dabei bis zu siebenfach wiederverwertet und sowohl mit Recyclingkohlenstofffasern als auch Glasfasern verstärkt.