

# Dreidimensionale Faserskelette

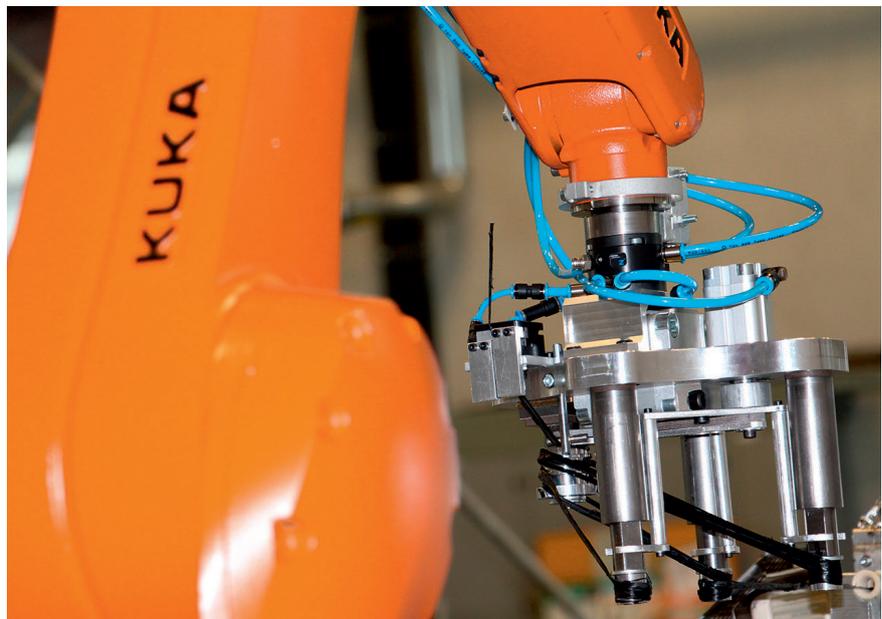
## Lokale Endlosfaserverstärkung durch die 3D-Skelett-Wickeltechnik

Thermoplastische Spritzgießbauteile können durch lokale Endlosfasern in Verbindung mit metallischen Lasteinleitungselementen gezielt verstärkt werden. Dadurch sind sie auch für strukturelle Anwendungen wie zum Beispiel Querlenker und Getriebeträger geeignet. Für einen großserientauglichen Prozess wurde eine 3D-Wickeltechnik erprobt.

Endlosfaserverstärkte Strukturbauteile aus thermoplastischen Materialien sind am Markt bekannt und können durch großserienfähige Fließpress- oder Spritzgießprozesse gefertigt werden. Zu ihrer Herstellung werden üblicherweise vorimprägnierte Gelege oder Gewebe (z.B. unidirektionale Tapes oder Organobleche) eingesetzt, die in ein formgebendes Werkzeug eingelegt und anschließend umpresst bzw. umspritzt werden. Soll der Einsatz der verwendeten Endlosfaserverstärkungen jedoch nur lokal und mit gezielter Faserausrichtung ausgeführt werden, müssen die flächigen Tapes und Organobleche vor der Verarbeitung entsprechend der Bauteilgeometrie und den Lastpfaden drapiert bzw. umgeformt werden. Je komplexer die Struktur, desto schwieriger lassen sich flächige Verstärkungshalbzeuge verformen und Bauteile damit gestalten.

Das Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie ICT, Pfinztal, befasst sich seit mehreren Jahren mit der lokalen Endlosfaserverstärkung struktureller Leichtbaukomponenten. Betrachtet werden insbesondere großserienfähige Prozesse wie beispielsweise das Thermoplast-Spritzgießen. Die dafür entwickelte 3D-Skelett-Wickeltechnik (3DSW) bietet die Möglichkeit, hochbelastbare, masseoptimierte Faserverbund-Wickelstrukturen („Faserskelette“) in einem roboterbasierten Herstellungsprozess zu realisieren. Neben einer Vielzahl an verschiedenen Faser-Matrix-Kombinationen und lastorientiert ausgerichteten Endlosfasern lassen sich dabei auch metallische Lasteinleitungselemente in den Spritzgießprozess integrieren.

Im Gegensatz zum etablierten Faserwickeln („Filament Winding“), bei dem Endlosfasern zur Herstellung von Hohlkörpern (z.B. Wellen, Walzen, Drucktanks etc.)



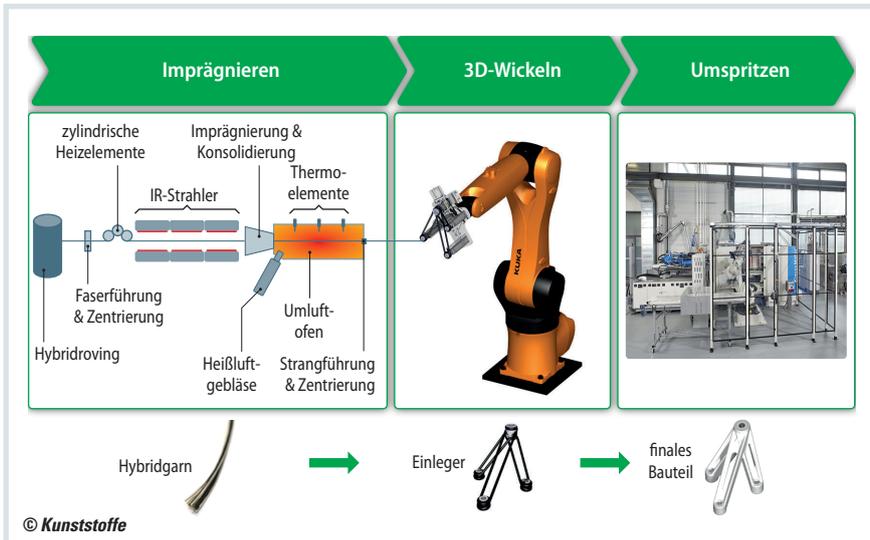
Roboterbasiertes Faserwickeln von komplexen Spritzgießeinlegern: Mit flächigen Verstärkungshalbzeugen lassen sich die komplexen Konturen nicht oder nur mit hohem Aufwand drapieren

(© Fraunhofer ICT)

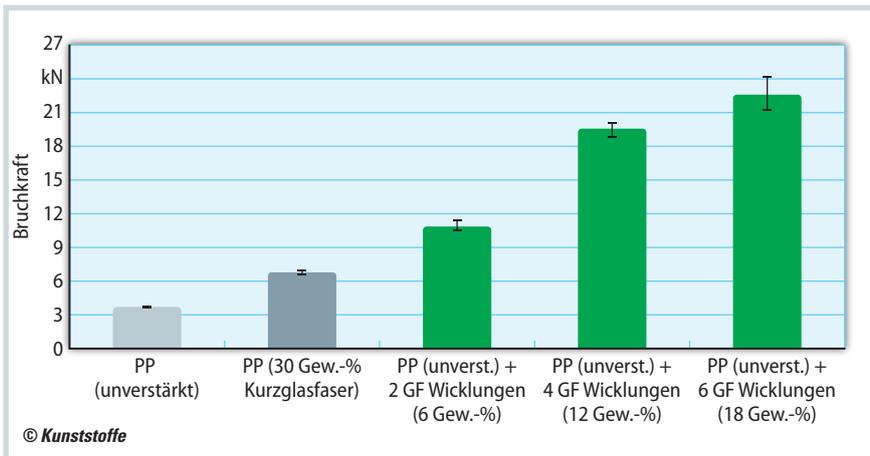
flächendeckend um rotationssymmetrische Wickeldorne gewickelt werden [1, 2], beschränken sich die Endlosfaserverstärkungen in der 3DSW ressourcenschonend auf die belasteten Bauteilbereiche entlang der Hauptlastpfade. Bauteile mit einer lastpfadoptimierten lokalen Endlosfaserverstärkung bieten im Gegensatz zu Bauteilen mit volumetrischer Kurz- oder Langfaserverstärkung signifikante Vorteile bei den spezifischen mechanischen Eigenschaften. Dazu zählen etwa höhere Bauteilsteifigkeit und -festigkeit sowie geringere Kriechneigung bei hohen Temperaturen oder permanenter Belastung. Gleichzeitig kann das Leichtbaupotenzial deutlich gesteigert werden, da gering belastete Bauteilbereiche unverstärkt bleiben bzw. mit sehr geringen Fasergehalten ausgeführt werden können.

### Der 3D-Skelett-Wickelprozess

Die Prozesskette der 3DSW lässt sich in die drei wesentlichen Prozessschritte Imprägnieren, 3D-Wickeln und Umspritzen einteilen (**Bild 1**). Im ersten Prozessschritt (Imprägnieren) werden Hybridgarne, bestehend aus thermoplastischen Filamenten (z.B. PP, PA 6, PPS) und Verstärkungsfasern (z.B. Glas- oder Kohlenstofffasern), durch eine Heizstrecke mit mehreren Heizzonen gezogen. Dabei werden die Thermoplastfilamente durch kurzweilige Infrarotstrahlung über ihre Schmelztemperatur hinaus erwärmt. Die finale Imprägnierung der Verstärkungsfasern findet im Anschluss an die IR-Heizzonen in einer beheizten Düse statt. Die benötigte Abzugskraft und -geschwindigkeit werden durch einen 6-Achs-Industrieroboter »



**Bild 1.** Die dreistufige Prozesskette der 3D-Skelett-Wickeltechnik. Ein 6-Achs-Industrieroboter platziert das schmelzflüssige Hybridgarn um die Lasteinleitungselemente (Quelle: Fraunhofer ICT)



**Bild 3.** Bruchkräfte einer einfachen Zugschleufe mit Polypropylen (PP) in Abhängigkeit der Wicklungszahl. Mit sechs Endlosfaserwicklungen lässt sich die Bruchkraft bereits um 500 % steigern (Quelle: Fraunhofer ICT)

realisiert (**Titelbild**). Der Roboter nimmt das Wickelwerkzeug auf und wickelt darauf das schmelzflüssige Hybridgarn um Lasteinleitungselemente, indem er das Wickelwerkzeug dreidimensional vor der Zentrierungsöse manipuliert. Bevor der Wickelprozess starten kann, werden Metallinserts (Knoten- und Lasteinleitungselemente) am Wickelwerkzeug fixiert und das Hybridgarn am Wickelwerkzeug pneumatisch geklemmt. Nach Ablauf des 3D-Wickelprozesses und Abkühlung der Polymermasse bilden die metallischen Inserts gemeinsam mit den gewickelten Hybridgarnen eine Skelett-Struktur. Der so hergestellte Faser-Skelett-Einleger entspricht der lokalen Endlosfaserverstärkung entlang der Hauptlastpfade des Bauteils und kann anschließend an die Spritzgießmaschine übergeben werden,

um die finale Bauteilgeometrie abzubilden (Umspritzen).

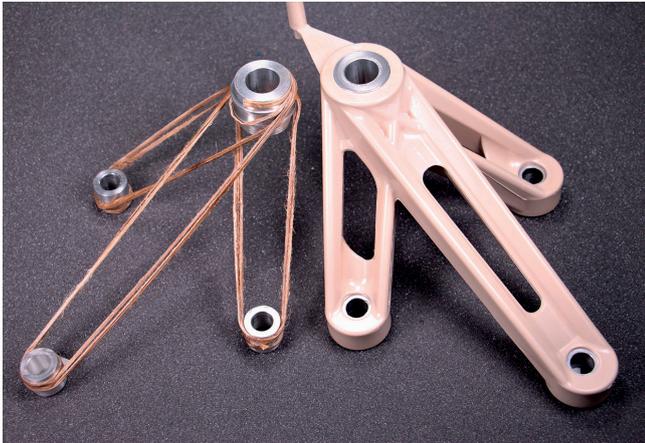
### Testkomponenten zur Material- und Prozesscharakterisierung

Um neue Materialien auf ihre Verarbeitbarkeit überprüfen zu können, kommen am Fraunhofer ICT zwei generische Strukturkomponenten zum Einsatz, bei denen sich angreifende Lasten über integrierte metallische Lasteinleitungselemente direkt auf die Endlosfaserverstärkung übertragen lassen (**Bild 2**). Diese in 3DSW hergestellten Faser-Skelett-Einleger werden umspritzt und anschließend hinsichtlich ihrer mechanischen Eigenschaften charakterisiert. Einfache Zugschleifen liefern dabei insbesondere Erkenntnisse zur Zugfestigkeit in Abhängigkeit von Wick-

lungszahlen bei unterschiedlichen Materialkombinationen. Die Materialkennwerte, die in solchen Versuchen ermittelt werden, bilden die Grundlage für strukturmechanische Simulationsmodelle, die bei der Konstruktion neuer Strukturbauteile zum Einsatz kommen. Mittels FEM-basierter Simulationsmethoden werden lastoptimierte Geometrien ermittelt, wie sie die masseoptimierte Gestaltung der Wickelstrukturen bzw. Strukturbauteile vorgibt. Außerdem wird die FEM-Simulation zur lastgerechten Dimensionierung der Strukturbauteile genutzt. In der Entwicklung befindliche Modelle zur Simulation der unter Last auftretenden Verformungen und Materialauslastungen sollen bei der Konstruktion und Auslegung dieser Bauteile zukünftig helfen.

Sind die Lastangriffspunkte in ihrer Ebene versetzt, lassen sich die auftretenden Kräfte nicht durch einfache Schlaufenverbindungen abbilden. Das führt zu Herausforderungen bei der Herstellung im Wickelprozess und bei der Kraftübertragung im finalen Hybridbauteil. So ist beispielsweise die Grenzflächenfestigkeit zwischen dem thermoplastischen Faserskelett und metallischen Lasteinleitungselementen bei einem schrägen Kraftangriff ein entscheidendes Kriterium für die Funktionsfähigkeit der Strukturkomponente. Am Fraunhofer ICT kommt zur Verbesserung der Grenzflächenfestigkeit eine neuartige nanoporöse Haftschiicht zum Einsatz. Bei ihr wird das Verfahren Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition (PECVD) verwendet, um eine nanoporöse  $\text{SiO}_2$ -Schicht auf den metallischen Lasteinleitungselementen abzuscheiden [3]. Erst durch diesen, dem Wickelverfahren vorgelagerten Prozessschritt lassen sich die metallischen Lasteinleitungselemente im anschließenden 3D-Wickelprozess und beim Spritzgießen an die Kunststoffmatrix anbinden.

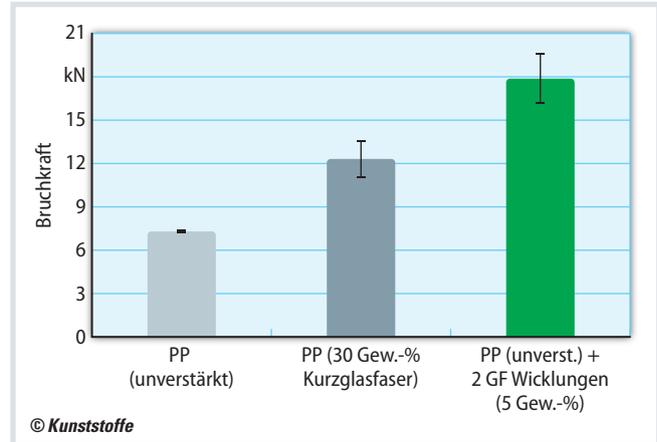
Mit den Erkenntnissen aus den durchgeführten Untersuchungen können zukünftig Strukturkomponenten anhand von Topologieoptimierungen mit lokalen Endlosfaserverstärkungen lastgerecht verstärkt werden. Dadurch lassen sich angreifende Kräfte mit geringem Fasergehalt übertragen und somit das große Leichtbaupotenzial der Komponente ausschöpfen. Die durch die lokalen Endlosfasern bedingte hohe Dimensionsstabilität, die stark reduzierte Kriechneigung und die sehr gute Kraftübertragung erlauben es, thermoplastische Komponenten auch in Hoch-



**Bild 2.** Demonstrator einer dreidimensionalen Strukturkomponente mit metallischen Lasteinleitungselementen, anhand derer sich Lasten direkt auf die Endlosfaserverstärkung übertragen lassen (© Fraunhofer ICT)

temperaturbereichen anzuwenden, weshalb am Fraunhofer ICT auch Hochtemperaturwerkstoffe wie Polyphenylensulfid (PPS) mit diesem Verfahren verarbeitet werden.

Belastet man einfache Schlaufenverbindungen auf Zug, so kann man einen Zusammenhang zwischen zunehmender Wicklungsanzahl und erreichbarer Bruchkraft feststellen (**Bild 3**). Mit sechs Endlosfaserwicklungen in Verbindung mit unverstärktem Polypropylen (PP) lässt sich die maximale Bruchkraft um über 500 % im Vergleich zur unverstärkten Referenzprobe steigern. Bei Probekörpern mit sechs Wicklungen beträgt der Gesamtfasergehalt 18 Gew.-%. Ein Probekörper mit 30 Gew.-% Kurzglasfasern weist im Vergleich zur unverstärkten Referenzprobe lediglich eine Bruchkraftsteigerung um circa 80 % auf. Auch bei komplexeren 3D-Komponenten lässt sich die Bruchkraft durch die Integration lokaler Endlosfaserverstärkungen deutlich erhöhen (**Bild 4**). Durch das Umspritzen eines Faserskeletts mit 2 Wicklungen in Verbindung mit unverstärktem PP ist beispielsweise die Bruchkraft im Vergleich zur unverstärkten Referenzprobe um 147 % höher. Dabei tragen lediglich zusätzliche 5 Gew.-% Endlosfasern zur Erhöhung des Bauteilgewichts bei. ■



**Bild 4.** Bruchkräfte einer generischen 3D-Strukturkomponente mit Polypropylen (PP) können durch gewickelte Endlosfaserverstärkungen deutlich gesteigert werden (Quelle: Fraunhofer ICT)

## Die Autoren

**Björn Beck, M. Sc.**, und **Jonathan Haas, M. Eng.**, sind als wissenschaftliche Mitarbeiter am Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie ICT, Pfinztal, tätig. **Hussam Tawfik, M. Sc.**, ist Absolvent am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) und fertigte bis April 2019 seine Masterarbeit am Fraunhofer ICT, Pfinztal, mit der beschriebenen Technologie an.

bjoern.beck@ict.fraunhofer.de

jonathan.haas@ict.fraunhofer.de

## Service

### Literatur und Digitalversion

➤ Ein PDF des Artikels finden Sie unter [www.kunststoffe.de/2019-09](http://www.kunststoffe.de/2019-09)

### English Version

➤ Read the English version of the article

in our magazine *Kunststoffe international* or at [www.kunststoffe-international.com](http://www.kunststoffe-international.com)



10. – 12.09.2019:  
Halle 9, Stand A39



16. – 23.10.2019:  
Halle 14, Stand A19

**Pressensysteme,  
so individuell wie  
Ihre Ansprüche.**

RUCKS Maschinenbau GmbH  
Auestraße 2, 08371 Glauchau  
Telefon: 037 63/60 03-0, E-Mail: [info@rucks.de](mailto:info@rucks.de)  
[www.rucks.de](http://www.rucks.de)

