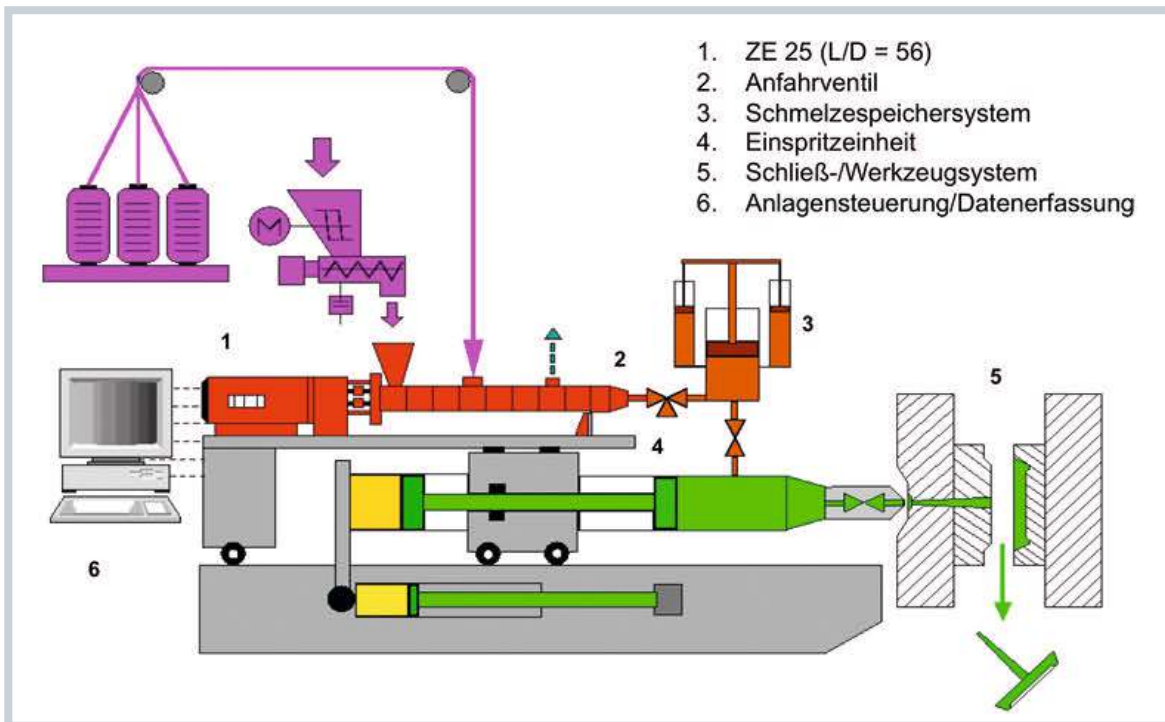


**Spritzgießcompoundieren.** Ein modifiziertes Verfahrenskonzept zur einstufigen Aufbereitung und Formgebung von Jutefasercomposites erzielt herausragende Compositeigenschaften. Diese resultieren aus einer konsequenten Optimierung des Schneckenkonzepts und insbesondere aus der Realisierung eines Inline-Dampfdruckaufschlussverfahrens zur vollständigen Faservereinzelung.



**Bild 1.** Der Spritzgießcompounder vereint den kontinuierlichen Prozess der Formmasseaufbereitung mit dem diskontinuierlichen Prozess der Formgebung

(Bilder: IKT)

# Feuchte vereinzelt Naturfasern

**STEPHAN A. WIDMAYER  
 HANS-GERHARD FRITZ  
 CHRISTIAN BONTEN**

**D**urch das ausgeprägte Umweltbewusstsein in der Gesellschaft ist die Akzeptanz von Alternativprodukten, die auf regenerativen Ausgangsstoffen basieren, in den letzten Jahren deutlich gestiegen. Bei Faserverbundkunststoffen besteht z. B. seit längerem die Intention, die Glasfaserarmierung durch Naturfasern zu ersetzen. Besonderes Interesse an einer solchen Werkstoffgruppe zeigt die Automobilindustrie, die als stoffspezifische Vorteile die niedrige Faserdichte, ein verbessertes Dämpfungsver-

mögen und Crashverhalten sowie eine gute Recyclingfähigkeit der Naturfasercomposites schätzt. Dass die Marktdurchdringung dieser Verbundwerkstoffe trotzdem eher gering ist, liegt an den oft unbefriedigenden mechanischen Werkstoffkennwerten, die ihre Ursachen in einer unzureichenden Compositeaufbereitung und -formgebung haben.

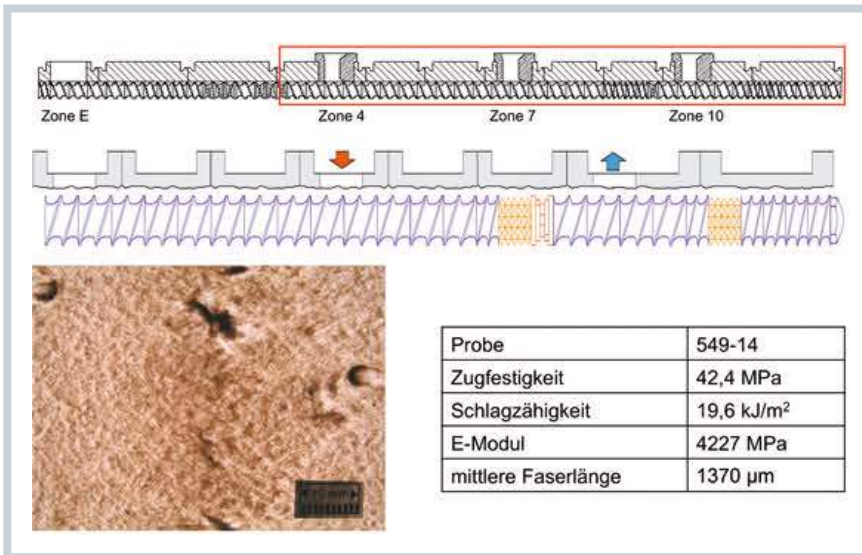
Vor diesem Hintergrund hat das Institut für Kunststofftechnik (IKT) der Universität Stuttgart ein modifiziertes Verfahrenskonzept entwickelt, um naturfaserverstärkte Thermoplaste mit herausragenden mechanischen Eigenschaften zu erzeugen. Diese Technologie vereint die Aufbereitung der Formmasse und den Formgebungsschritt unter Verwendung eines Spritzgießcompounders zu einem Einstufenverfahren.

## Zweischneckenextruder ersetzt Schneckenkolben-Plastifizieraggregat

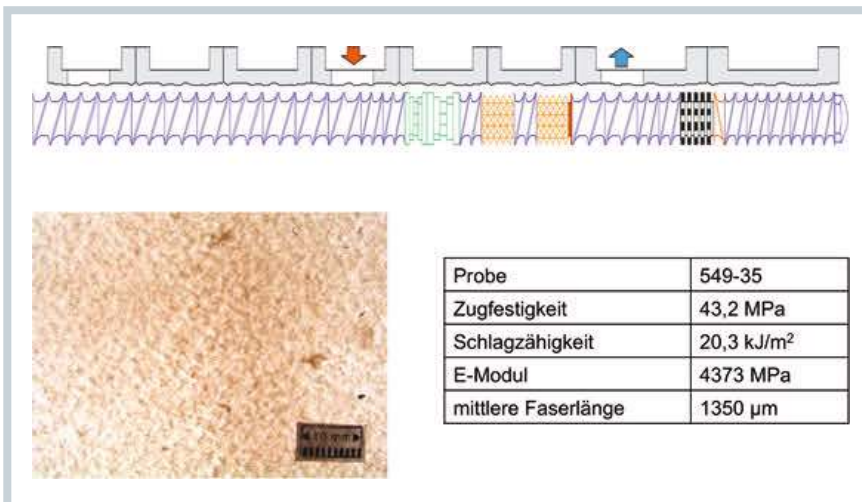
Für die Verfahrensentwicklung wurde ein Spritzgießcompounder (Typ: IMC 200; Hersteller: KraussMaffei Technologies GmbH, München) eingesetzt, dessen Maschinenkonzept den Ersatz des herkömmlichen Schneckenkolben-Plastifizieraggregats durch einen gleichsinnig drehenden Zweischneckenextruder vorsieht (**Bild 1**). Ein zusätzliches Schmelzespeichersystem und eine Spritzzyklereinheit ermöglichen eine Adaption des kontinuierlichen Formmasseaufbereitungs- und des diskontinuierlichen Formgebungsprozesses.

Durch eine konstruktive Neugestaltung dieser Komponenten, verbunden mit ei- ➔

**ARTIKEL ALS PDF** unter [www.kunststoffe.de](http://www.kunststoffe.de)  
 Dokumenten-Nummer KU111213



**Bild 2. Schneckenfunktionszonen am Beispiel der Variante SK 3: Zwischen Aufschmelzzone und den Schneckenelementen für Druckaufbau und Schmelzaustrag sind die Faserhomogenisierungszonen angeordnet. Die mechanischen Kennwerte resultieren aus Messungen an Normzugstäben**



**Bild 3. Die Geometrie der Schneckenvariante SK 5 intensiviert die Vorvereinzelnung der Fasern. Trotz einer etwas geringeren mittleren Faserlänge sind die Composite-Kennwerte bemerkenswert gut**

ner Verlagerung der Schmelzkanäle in die Zylinderwandungen, ist das „First in, first out“-Prinzip der Schmelzeführung verwirklicht. Dies erhöht vor allem bei Großanlagen die Wirtschaftlichkeit, weil Farb- und Stoffwechsel schneller vonstatten gehen [1]. Eine integrierte, mit dem Zwischenspeicher interagierende Schmelzdruckregelung stellt sicher, dass der stationär betriebene Zweischnckenextruder stets gegen einen konstanten Werkzeugwiderstand anarbeitet; dies ist eine wichtige Voraussetzung für eine zeitunabhängige thermische und mischtechnische Schmelzhomogenität.

Weitere wichtige Komponenten für die Funktion der Gesamtanlage stellen das Anfahrventil, die Bolzenverschlussdüse und das Hochdruckventil dar. Letzteres gewährleistet während der Einspritz- und

Nachdruckphase eine strikte Trennung von Plastifizier- und Einspritzeinheit. Unmittelbar vor dem Anfahrventil und der Verschlussdüse sind ein Inline- und ein Online-Kapillarrheometer installiert [2, 3]. Damit können prozesszeitkonform ermittelbare rheologische Kennwerte für die Beurteilung und Überwachung der Materialqualität herangezogen werden – ein wichtiger Aspekt, da dafür nun auch die Betreiber derartiger Anlagen verantwortlich zeichnen. Der Spritzgießcompounder ermöglicht es, sowohl konventionelle Spritzgießprozesse als auch sequenzielle und simultane Spritzprägeprozesse zu fahren.

Als Matrixmaterial wurde ein PP-Blockcopolymer (Typ: Sabic 412MN40) eingesetzt. Dessen Oberflächenspannung und Viskositätsfunktion erlauben sowohl

eine gute Faserbenetzung als auch die Übertragung hoher Schubspannungen, die für eine zuverlässige Auflösung von Faserclustern und Vereinzeln von Fasern erforderlich sind. Als Verstärkungsmedium finden Jutfasern (Typ: Tossa 100) Verwendung, die als leicht gezwirnte Garne mit einer Feinheit von 1000 tex und Rovingcharakter vorliegen und damit eine einfache Handhabung und gute Dosierbarkeit ermöglichen.

### Wechselwirkungen zwischen Fasern und Matrix

Die Fasern werden nach einer Röstprozedur aus den Stängeln der Jutepflanze als Faserbündel („technische Fasern“) herausgelöst. Diese bestehen aus Elementarfasern, die mit Pektin und Lignin miteinander verklebt sind. Dadurch besitzen die Faserbündel viele interlamellare Grenzschichten und weisen eine geringere Festigkeit als die Elementarfasern auf. Bedingt durch die hohe thermische Sensitivität der eingebauten Hemicellulose setzt ab 190 °C eine thermische Faserschädigung ein, die einen Abfall der mechanischen Fasereigenschaften verursacht.

Die Grenzschicht zwischen Matrix und Faser bestimmt in hohem Maße die mechanischen Eigenschaften des Composites. Um die Wechselwirkungen zwischen Fasern und Matrix zu verstärken, wird ein Haftvermittler (Typ: Fusabond P MD-353D; Hersteller: DuPont) zuzugibt. Hierbei handelt es sich um ein mit Maleinsäureanhydrid (MAH) gepfropftes niedermolekulares Polypropylen (PP-g-MAH). Die auf PP-Makroradikale aufgepfropften MAH-Gruppen können mit den Hydroxylgruppen der Naturfasern unter Abspaltung von Wasser kovalente Bindungen eingehen. Die zusätzliche Ausbildung von Wasserstoffbrückenbindungen zwischen den Pfropfungsmolekülen und den OH-Gruppen der Faserflächen erhöht die Faser-Matrix-Haftung weiter.

### Auch die Faservereinzelnung entscheidet über die Bauteilqualität

Die Naturfasercomposites wurden mit einem Zweischnckenextruder (Typ: ZE 25; L/D-Verhältnis = 56; Hersteller: Krauss-Maffei Berstorff GmbH) aufbereitet, der drei Faserzufuhr- bzw. Entgasungsöffnungen in den Zylinderzonen 4, 7 und 10 aufweist. Die zur Prozessoptimierung eingesetzten Schneckenvarianten sind stets nach dem gleichen Grundkonzept entworfen

(Bild 2). Im ersten Extruderabschnitt werden Matrix- und Additivpolymer aufgeschmolzen und homogenisiert. Die folgenden Faserhomogenisierungszonen sind der Schlüssel für eine hohe Schmelzequalität. Den Abschluss bilden Elemente für den Druckaufbau und Schmelzeustrag.

Für die Auflösung und Homogenisierung der Fasercluster haben sich bei Naturfasern exzentrische, zu Blöcken arrangierte Multikämmelemente bewährt [4], die die Fasern schonend separieren. Daraus hergestellte Musterplatten ( $s = 0,5 \text{ mm}$ ) lassen im Durchlicht noch einige wenige Fasercluster erkennen. Die notierten mechanischen Kennwerte (Bild 2) resultieren aus Messungen an Normzugstäben, die mit einem 8-fach-Werkzeug auf dem Spritzgießcompounder hergestellt wurden.

Im folgenden Optimierungsschritt (SK 5) intensivieren zwei fördernde Knetblöcke die Vorvereinzelung der Fasern. Ein Blister stellt die Totalfüllung der zweiten Kämmelementesektion sicher, und ein abgestautes Zahnscheibenmischteil soll die Faserverteilung homogenisieren. Nun sind keine ausgeprägten Fasercluster mehr erkennbar. Aufgrund fehlender Kerbwirkungseffekte und einer besseren Faservereinzelung ist die Schlagzähigkeit geringfügig gestiegen. Trotz einer im Vergleich zur SK 3-Version etwas geringeren mittleren Faserlänge ergeben sich noch bemerkenswert gute Festigkeitseigenschaften (Bild 3). Dies belegt, dass im Fall von Naturfasern neben der Faserlänge im Bauteil auch die Faservereinzelung während des Aufbereitungsschritts über die

Bauteilqualität und die Verstärkungswirkung der Fasern entscheidet.

### Schneckenkonzept weiterentwickelt

Werden die technischen Jutfasern während des Compoundierschritts nicht vollständig aufgeschlossen, so verbleiben im Bauteil Faserbündelsequenzen. Diese Faser-Faser-Haftung ist deutlich schwächer als die durch den Haftvermittler intensivierten Faser-Matrix-Wechselwirkungen. Im Versagensfall wird der Rissverlauf deshalb nicht nur entlang der Faser-Matrix-Grenzschicht, sondern auch durch die Grenzschichten der Elementarfasern in einem Faserbündel gehen. Die Verstärkungswirkung ist dann nicht von den übertragbaren Kräften zwischen Matrix und Faser abhängig, sie wird vielmehr von den Wechselwirkungen zwischen den Fasern bestimmt. Die Vereinzelung der Fasern eliminiert somit eine systembedingte Schwachstelle.

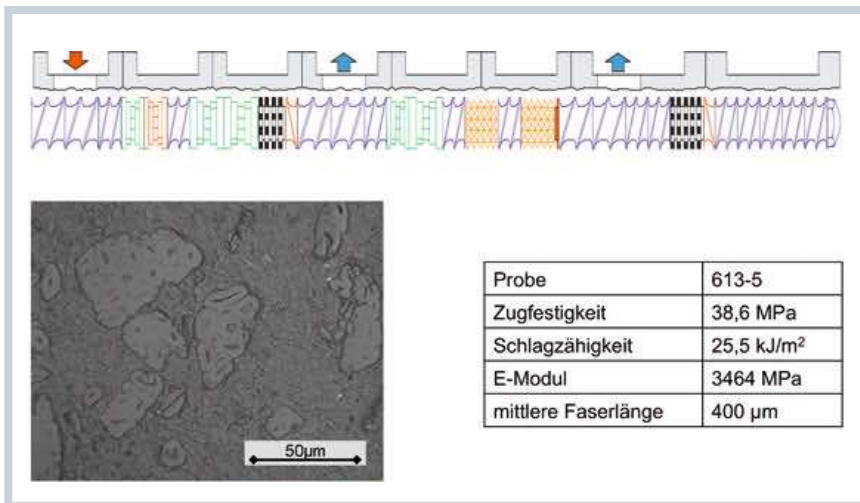
Folglich müssen für eine optimale Aufbereitung von Naturfasercomposites drei Forderungen erfüllt werden:

- eine homogene Faserverteilung,
- große mittlere Faserlängen und
- eine vollständige Filamentisierung der Faserbündel zu Elementarfasern.

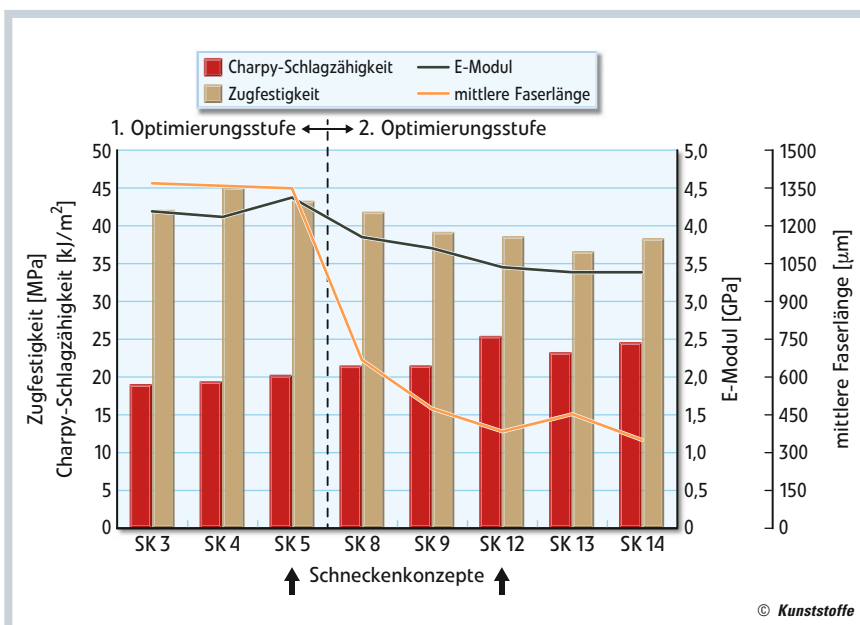
Die Faservereinzelung kann auf zwei verschiedenen Wegen erreicht werden: zum einen durch eine Weiterentwicklung des Schneckenkonzepts, zum anderen durch eine adäquate Vorbehandlung der Faserbündel.

Ausgehend von dem Schneckenkonzept SK 5 wurde deshalb in mehreren Folgeschritten die Anordnung der Schneckenenelemente modifiziert und so der mechanische Energieeintrag – also die auf die Fasern einwirkenden Kräfte – kontinuierlich erhöht. Die zunehmende Faservereinzelung zeigt sich in einem sukzessiven Anstieg der dynamischen Werkstoffeigenschaften. Gleichzeitig fallen jedoch die Festigkeitswerte und der E-Modul merklich ab, weil die Faserlängen dabei schrumpfen. Die Schneckenversion SK 12 (Bild 4) stellt das Optimum dieser Entwicklung dar (Bild 5), ohne dass dieses Konzept aber in der Lage wäre, eine perfekte Faserbündelfilamentisierung zu initiieren.

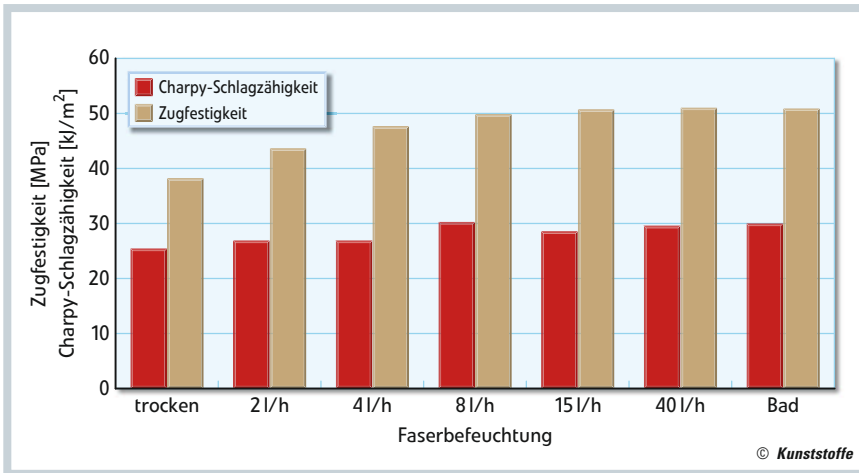
Die Vorbehandlung der Fasern soll die Vereinzelung der Faserbündel während des Compoundierschritts erleichtern – ohne drastische Einkürzung der Faserlängen. Als Präparationsmittel hat sich Wasser bewährt. Der praktizierte Faserdirekteinzug erweist sich auch hier als vorteilhaft. Je nach angestrebtem Befeuchtungsgrad →



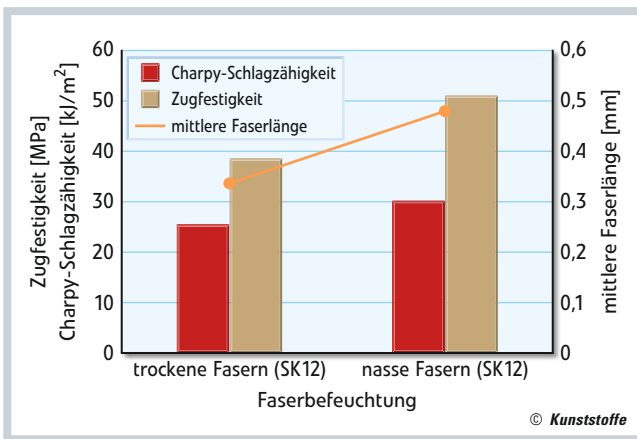
**Bild 4.** Die Schneckenvariante SK 12 ermöglicht hohe Schlagzähigkeitswerte bei reduzierter Zugfestigkeit



**Bild 5.** Die Grafik zeigt die mechanischen Kennwerte und mittleren Faserlängen von Jutfaser-Composites, die mit unterschiedlichen Schneckenvarianten generiert wurden



**Bild 6. Unterschiedliche Faserbefeuchtungsgrade wirken sich messbar auf die mechanischen Composite-Eigenschaften von Proben aus (sämtlich generiert mit der Schneckenversion SK 12)**



**Bild 7. Die mechanischen Kennwerte und mittleren Faserlängen im Bauteil (Schneckenvariante SK 12) lassen eine klare Abhängigkeit von der Faservorbehandlung erkennen**

können die Jute-Rovings mit Wassernebel besprüht (Wasserstrom 2 bis 40 l/h) oder durch ein Wasserbad geführt werden. Die weiteren Prozessschritte entsprechen denen der Naturfasercompositeherstellung. Es empfiehlt sich, dabei einen zusätzlichen Entgasungsschacht nach der Vereinzelungszone zu installieren, um überschüssiges Wasser extrahieren und damit sicherstellen zu können, dass die weiteren Prozessschritte ungestört ablaufen.

**Befeuchten verbessert die Vereinzelung und die mechanischen Eigenschaften**

Das Befeuchten der Fasern beeinflusst den Prozess in mehrfacher Hinsicht positiv. Bei der Einarbeitung der Fasern im Extruder verdampft das im Jutegarn enthaltene Wasser oder bleibt bei einem entsprechenden Systemdruck als Flüssigkeit erhalten. Bei einer spontanen Druckentlastung kommt es zu einem schlagartigen Sieden mit einer explosionsartigen Volumenvergrößerung. Die Faserbündel werden dadurch regelrecht aufgesprengt. Zudem dringt das Wasser in die Zellstruk-

tur der Faser ein und bewirkt damit einen Quellungsvorgang normal zur Faserachsrichtung. Diese Quellung schwächt die intra- und intermolekularen Kräfte in den Faserbündeln. Schließlich kann das eingebrachte Wasser auch als thermischer Schutzfilm auf der Faseroberfläche wirken, was eine geringere thermische Faserschädigung zur Folge hat.

Mit zunehmender Wasserbeladung der Jute-Rovings steigen die Schlagzähigkeit und die Zugfestigkeit stetig an, bis im Wasserbad Maximalwerte erreicht werden (Bild 6). Der synchrone Anstieg der beiden mechanischen Kennwerte ist deshalb bemerkenswert, weil sich bei der vorgenommenen Schneckenoptimierung im Allgemeinen ein reziproker Verlauf von Schlagzähigkeit und Zugfestigkeit zeigte.

Dies lässt darauf schließen, dass die Befeuchtung neben der Faservereinzelung auch die mittlere Restfaserlänge positiv beeinflusst. Der Effekt der Faservereinzelung wurde anhand von Schlißproben der Fasercomposites untersucht. Alle Schlißproben von Composites, die mit der Schneckenversion SK 12 unter Verwendung feuchter Fasern generiert wurden,

lassen eine sehr homogene Faserverteilung und eine nahezu perfekte Auflösung der Faserbündel bis auf Elementarfaserniveau erkennen.

**Fazit**

Ein Vergleich der Zugfestigkeit und der Schlagzähigkeit von Jutefasercomposites, die mit trockenen und nassen Fasern unter sonst identischen Anlagen- und Prozessparametern hergestellt wurden, macht die Vorteile einer Nassfaserverarbeitung offenkundig (Bild 7). Allein durch die Befeuchtung der Naturfasern konnte die Schlagzähigkeit von 25,1 auf 30,2 kJ/m² erhöht werden, was einer Steigerung von über 20 % entspricht. Rechnet man die durch die Weiterentwicklung des Schneckenkonzepts erzielte Verbesserung hinzu, so ergibt sich eine Gesamtsteigerung der Schlagzähigkeit von über 50 %. Auch die Zugfestigkeit konnte gegenüber dem Einbringen trockener Fasern um 34 % auf 51 MPa angehoben werden. Ferner war eine Erhöhung des Elastizitätsmoduls von 3400 auf 3760 MPa zu verzeichnen, die Bruchdehnung nahm von 4,9 auf 4,0 % ab.

Das Befeuchten der Fasern erleichtert und intensiviert offensichtlich die Faservereinzelung. Gleichzeitig ergeben sich größere Restfaserlängen. Beide Effekte zusammen bewirken eine Anhebung der quasi-statischen und dynamischen Compositeigenschaften. ■

**LITERATUR**

- DE 10 2008 027 051.2: Spritzeinheit, FiFo-ShotPot für Spritzgießcompounder. (2008) Fritz, H.G.; Widmayer, S.; Ramm, A.
- Widmayer, S.: Generierung und Optimierung von Jutefasercomposites im Einstufenverfahren mittels eines Spritzgießcompounders. Dissertation, Institut für Kunststofftechnik Stuttgart 2011
- Ramm, A.: Reaktive Kunststoffaufbereitungs- und -formgebungsprozesse als Einstufenverfahren unter Verwendung eines Spritzgießcompounders. Dissertation, Institut für Kunststofftechnik Universität Stuttgart 2011
- Ruch, J.; Fritz, H.G.; Abendschein, M.: Kämmelemente mit von der Evolventenfläche zurückspringender Oberflächenstruktur. WO 03/031152 A1 (2009)

**DIE AUTOREN**

DR.-ING. STEPHAN WIDMAYER, geb. 1975, ist seit 2007 Mitarbeiter der Abteilung Verfahrensentwicklung IMC der KraussMaffei Technologies GmbH, München.

PROF. DR.-ING. HANS-GERHARD FRITZ, geb. 1939, war bis 2010 Leiter des Instituts für Kunststofftechnik (IKT) der Universität Stuttgart.

PROF. DR.-ING. CHRISTIAN BONTEN, geb. 1969, ist seit 2010 Leiter des IKT; info@ikt.uni-stuttgart.de