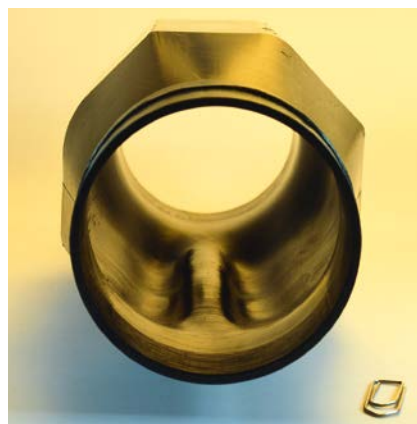


Gezielt geritzt, vertrackt verstärkt

Innendruckumformung von Rohren aus Faser-Thermoplast-Verbunden

Ein unidirektional faserverstärktes thermoplastisches Band bildet die Grundlage für ein effizientes Verfahren zur Herstellung komplexer, nichtprismatischer Faserverbund-Hohlkörper. Endlosfaserverstärkte Kreisrohre dienen als Ausgangshalbzeug und werden zu komplexen Geometrien umgeformt.



Umformung aus einem Kreisrohr mit 30% Umfangsänderung im Umformbereich: Die Rohrenden wurden nicht umgeformt und zur Abdichtung genutzt. Die Sicke ist vollständig ausgeformt (© TU Darmstadt)

Das hohe Leichtbaupotenzial von Faser-Thermoplast-Verbunden (FTV) lässt sich durch belastungsgerechte Bauteilquerschnitte noch effektiver nutzen: Bei Lastfällen aus Biege- und/oder Torsionsmomenten sind Hohlprofile aufgrund ihrer hohen Flächenmomente optimal für den Leichtbau. Die Herstellung von FTV-Hohlkörpern basiert vorwiegend auf der Flechttechnik oder auf der Umformung flächiger Halbzeuge.

Mit der Flechttechnik sind komplexe Konturen ohne konkave Profildabschnitte automatisiert herstellbar [1]. Nachteilig ist jedoch die ausgeprägte Faserwelligkeit des Geflechts, die die Steifigkeiten und Festigkeiten reduziert und sich insbesondere ungünstig auf das Ermüdungsverhalten der Lamine auswirkt.

Der Weg über flächige Halbzeuge wie Organobleche, kombiniert mit dem Spritzgießen, zeichnet sich durch kurze Prozesszeiten aus. Jedoch erfordert die Umformung flächiger Halbzeuge zu geschlossenen Profilen eine nachträgliche Verschweißung in Profillängsrichtung. Die

Kraftübertragung erfolgt dadurch nicht durchgängig über die hochfesten Fasern, sondern in der Schweißnaht über die unverstärkte Matrix. Solche FTV-Hohlkörper ertragen daher hohe Temperaturen und Langzeitbelastungen nur bedingt, insbesondere wenn die Belastungen kombiniert auftreten (Bild 1).

Eine Umformung aus einem Kreis-Ausgangsquerschnitt bietet hingegen die Möglichkeit, geschlossene Querschnitte mit durchgängiger Faserverstärkung, also ohne nachträgliche Verschweißung, herzustellen. Um Basisrohre aus ondulationsfreien UD-Schichten mit beliebiger, definierter Faserorientierung zu produzieren, existieren effiziente Verfahren (Bild 2).

Umformung endlosfaserverstärkter Kreisrohre

Die Endlosfaserverstärkung bringt für die Umformung in beliebige Geometrien zweierlei Probleme mit sich: Zum einen fehlt den Fasern plastisches Verformungs-

vermögen, zum anderen sind die Verformungen in den verschiedenen Raumrichtungen miteinander gekoppelt; das Spektrum möglicher Zielgeometrien wird dadurch begrenzt. Um die Restriktionen bei der Kreisrohrumformung zu überwinden, wurde am Fachgebiet Konstruktiver Leichtbau und Bauweisen an der TU Darmstadt ein Verfahren entwickelt, das es ermöglicht, endlosfaserverstärkte Kreisrohre durch Innendruck auch in nichtprismatische Hohlprofile umzuformen.

Segmentierung der Faserverstärkung

Das Verfahren zur Innendruckumformung von FTV-Kreisrohren basiert auf einem speziell entwickelten segmentierten UD-Bandhalbzeug. Um eine starke Umformung zu erreichen und zudem die umzuformenden Bereiche von denjenigen zu entkoppeln, die unverformt bleiben sollen, erhalten die Prepreg-Bänder Einschnitte quer zur Faserrichtung. Die thermoplastische Matrix bietet dabei den Vorteil, dass sich die Band-

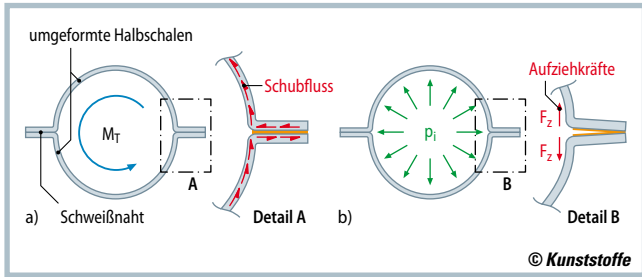


Bild 1. Schweißnaht als Schwachstelle von Hohlprofilen aus flächigen Halbzeugen: a) bei Torsionsbelastung überträgt die unverstärkte Matrix die Kraft durch Schub; b) bei Innendruckbelastung oder einer Ovalisierung des Querschnitts entstehen Aufziehkräfte, die das Versagen in der Schweißnaht begünstigen (Quelle: TU Darmstadt)

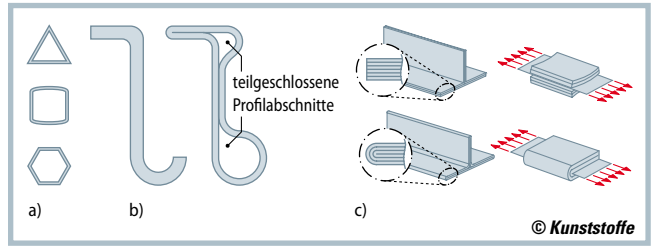


Bild 2. Vorteile der Profile auf Basis eines endlosfaserverstärkten Kreisrohrs: a) die Umformung in nahezu beliebige andere Profilquerschnitte mit Endlosfaserverstärkung ist möglich; b) die Integration von teilgeschlossenen Profilabschnitten steigert die Torsionssteifigkeit erheblich; c) bei offenen Profilen werden Delaminationen infolge des Randeffects am geschnittenen Rand vermieden (Quelle: TU Darmstadt)

abschnitte am Einschnitt verschweißen lassen, sodass ein wickelbares UD-Band erhalten bleibt; dies ermöglicht die Weiterverarbeitung in automatisierten Ablege- oder Wickelstationen.

Durch die Einschnitte entstehen Segmente, die während der Umformung, wenn die Verarbeitungstemperatur oberhalb der Schmelztemperatur der thermoplastischen Matrix liegt, gegeneinander abgleiten können. Dadurch wird zum einen eine quasi-plastische Verformung des UD-Halbzeugs auch in Faserlängsrichtung ermöglicht und zum anderen die gerichtete Faserorientierung während der Umformung aufrechterhalten (Bild 3).

Einschnitt-Positionen anpassen

Die Einschnitte durchtrennen die Fasern und unterbrechen den Kraftfluss, sodass das Laminat geschwächt wird. Am Ein-

schnitt wird der tragende Bruttoquerschnitt des Bauteils auf einen geringeren Nettoquerschnitt reduziert. Die Belastung müssen dort die Nachbarschichten übernehmen, woraus für diese eine höhere Spannung resultiert. Die Normalspannungen in den auslaufenden Schichten werden über Schubspannungen in die Nachbarschicht geleitet (Bild 4). Mechanisch gesehen entspricht die Überlappung der Segmentenden mit der Nachbarschicht einer Überlappungsklebung mit einem thermoplastischen Kleber. Die Höhe der maximalen Kraftübertragung an den Segmentenden ist daher im Wesentlichen von der verbleibenden Überlappungsfläche nach der Umformung abhängig.

Versuche zeigten, dass sich die Festigkeit des umgeformten, segmentierten Laminats nur wenig verringert, wenn die Überlappung der Segmentenden größer als die werkstoffimma-

nente kritische Überlappungslänge $l_{U,krit}$ gewählt wird (Bild 5a und b) [2]. Selbstverständlich ist dafür zu sorgen, dass die Einschnitte der einzelnen Schichten im Wandaufbau nicht übereinander zu liegen kommen. Eine Versuchsreihe bestätigte dies: Spannungsüberhöhungen in den durchgehenden Schichten ließen sich durch eine angepasste Schnittanordnung effektiv reduzieren, wenn die Segmentenden in Laminatdickenrichtung räumlich getrennt angeordnet wurden (Bild 5c).

Die mechanischen Eigenschaften lassen sich weiter verbessern, wenn sich die Einzelschichten an den Einschnitten bereits vor der Umformung überlappen. Durch die Umformung wird die Überlappungslänge lediglich reduziert – bleibt aber ohne Lücken innerhalb der Einzelschicht erhalten (Bild 6). Liegt die Überlappungslänge nach der Umformung oberhalb der kritischen Überlappungslänge ->

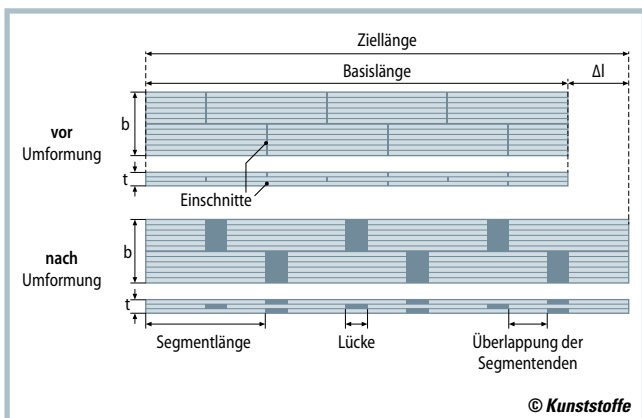


Bild 3. UD-Band mit Einschnitten für die quasi-plastische Umformung: Schematisch dargestellt ist ein dreischichtiges Band vor dem Verlegen (oben) und nach der Umformung (unten) jeweils in Draufsicht b und Seitenansicht t . Das Auseinandergleiten der Segmente an den Einschnitten ermöglicht eine quasi-plastische Längenänderung (Quelle: TU Darmstadt)

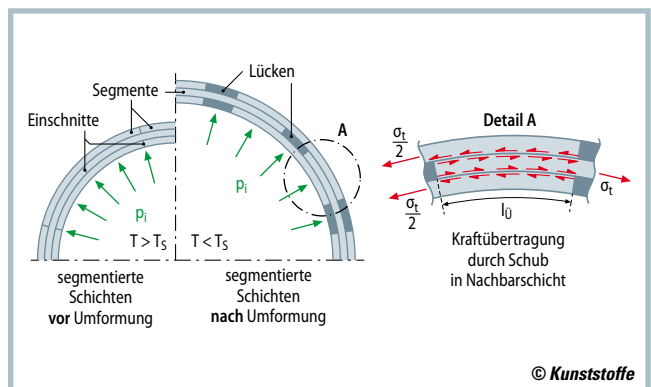


Bild 4. Aufweitung eines Rohrabschnitts durch Innendruckbelastung: Wenn die Umformtemperatur größer ist als die Thermoplast-Schmelztemperatur, gleiten die Segmente an den Einschnitten auseinander und das Rohr weitet sich auf. In der konsolidierten Rohrwand werden im Überlappungsbereich der Segmentenden tangentielle Zugspannungen über Schub in benachbarte Schichten übertragen (Quelle: TU Darmstadt)

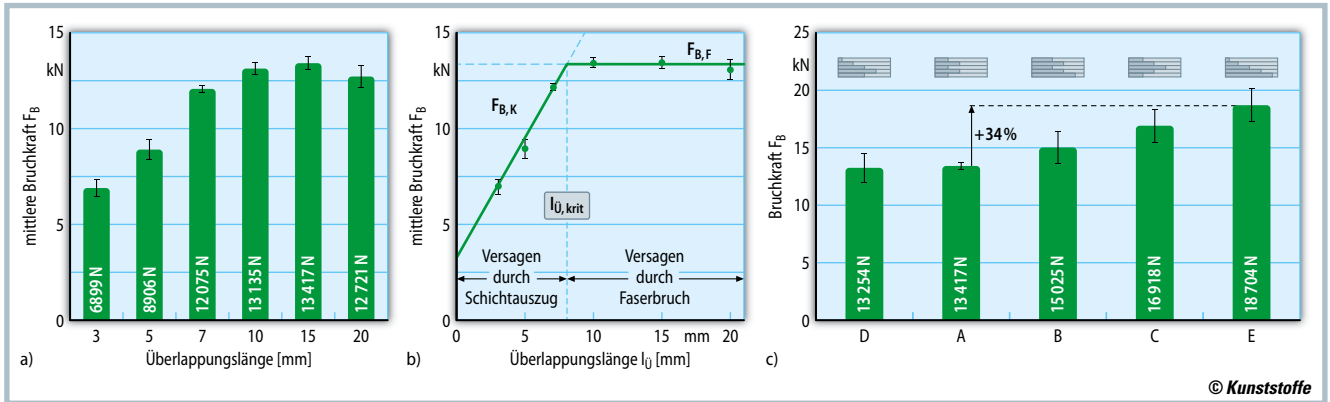


Bild 5. a) Versuchsergebnisse zur Abhängigkeit der Bruchlast F_B von der Überlappungslänge l_{ij} ; b) unterhalb der kritischen Überlappungslänge $l_{ij,krit}$ tritt Versagen durch Schichtauszug auf, oberhalb versagt das Fügeglied durch Faserbruch; c) Ergebnisse der Versuchsreihe zur Ermittlung der Abhängigkeit der Bruchlast F_B von der Schnittanordnung (Quelle: TU Darmstadt)

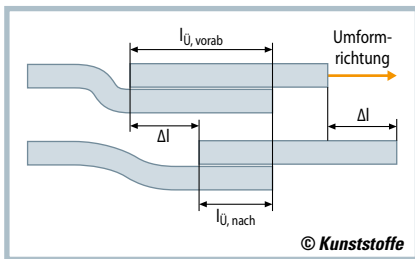


Bild 6. Überlappung der Einzelschichten vor der Umformung: Nach der Umformung bleibt die Überlappung l_{ij} in der Einzelschicht erhalten, wodurch Festigkeiten in Größenordnung einer nicht unterbrochenen Endlosfaserverstärkung möglich sind (Quelle: TU Darmstadt)

jedoch als aufwendig. Gelingt es, segmentierte UD-Bänder mit Vorab-Überlappung automatisiert herzustellen, wird sich das Potenzial der Umformung auf Basis segmentierter UD-Bänder erheblich steigern lassen.

Tiefungsversuch an flächigen Probekörpern

Aus der Segmentierung der Faserverstärkung folgen veränderte Umformmechanismen gegenüber der Umformung mit endlosfaserverstärkten Ausgangshalbzeugen. Diese Mechanismen und ihre Auswirkungen auf die Laminateneigenschaften wurden in Umformversuchen analysiert (**Bild 7**) und dafür als Versuchsaufbau der hydraulische Tiefungsversuch gewählt. Bei diesem Versuchsaufbau liegt –

im Gegensatz zum Tiefziehversuch – während der Umformung ein zweiachsiger Zugspannungszustand vor, da das Nachrutschen des Materials in die Umformzone vermieden wird. Somit wird sowohl die scheinbare Plastizität in Faserlängsrichtung als auch die ohnehin bei hohen Temperaturen vorhandene Plastizität in Faserquerrichtung genutzt. Anhand dieser Tiefungsversuche ließ sich nachweisen, dass sich die Segmentierung der Faserverstärkung dazu eignet, endlosfaserverstärkte Faser-Thermoplast-Verbunde durch quasi-plastische Formänderung umzuformen.

Als zusätzlicher Umformmechanismus tritt in der Nachbarschicht im Bereich der sich öffnenden Einschnitte eine Querdehnungsüberhöhung auf (**Bild 8**). Der Mechanismus entspricht einer lokal begrenzten Fasersperrung innerhalb der

ge, so sind Festigkeiten im Bereich der durchgängigen Endlosfaserverstärkung zu erwarten.

Erste Vorversuche bestätigten diese Annahmen. Die Herstellung der UD-Bänder mit Vorab-Überlappung erwies sich

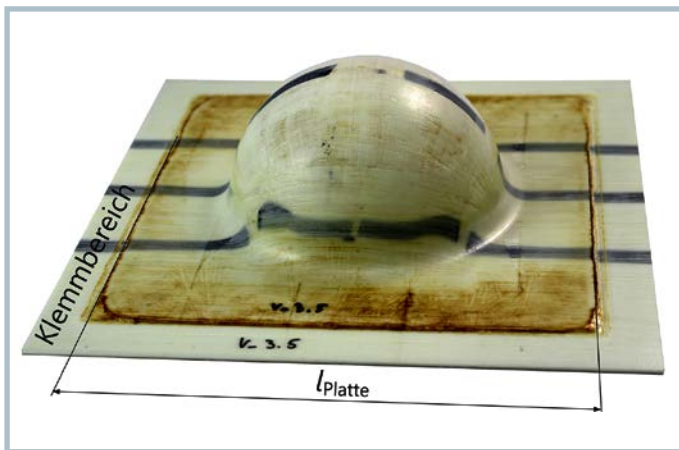


Bild 7. Probekörper nach Umformung im Tiefungsversuch: Die Zielgeometrie ist vollständig abgeformt. Der nicht geklemmte Plattenbereich zeigt Verfärbungen durch Oxidation (© TU Darmstadt)

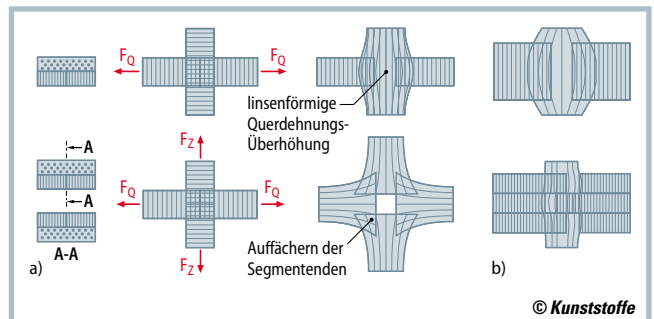


Bild 8. Auswirkungen der Querdehnungsüberhöhung auf die Faserorientierung: a) wenn der Einschnitt einer Schicht auf einer nicht eingeschnittenen Nachbarschicht liegt, ergibt sich eine linsenförmige Faserwinkeländerung der Nachbarschicht (oben). Fallen die Einschnitte benachbarter Segmente zusammen, so fächern sich die Segmentenden auf und es entstehen Fehlstellen (unten). b) Je breiter die Einschnitte sind, desto stärker ändert sich die Faserorientierung in der Nachbarschicht (Quelle: TU Darmstadt)

Einzelschicht mit leichten Faserwinkeländerungen. Diese stellen sich in Abhängigkeit von der Länge der sich öffnenden Einschnitte ein.

Hohlprofile auf Basis des Kreisrohrs

Basierend auf den Grundlagenuntersuchungen zum Umformen mit segmentierter Faserverstärkung folgte in der nächsten Stufe die Entwicklung eines Innendruckumform-Prozesses (IDU) für FTV-Kreisrohre [2]. Der Gesamtprozess umfasst die Auslegung und die Herstellung der segmentierten UD-Zuschnitte, die Herstellung der Basisrohre sowie die Umformung in ein komplexes Hohlprofil. Dazu wurde eine Versuchsanlage im Labormaßstab konstruiert und in Betrieb genommen. Mit dieser Anlage war es möglich, Hohlprofile mit einer Umfangsänderung von über 30% herzustellen und die Abhängigkeit des Prozesses von den Umformparametern und der Laminatkonfiguration des Basisrohrs zu bestimmen.

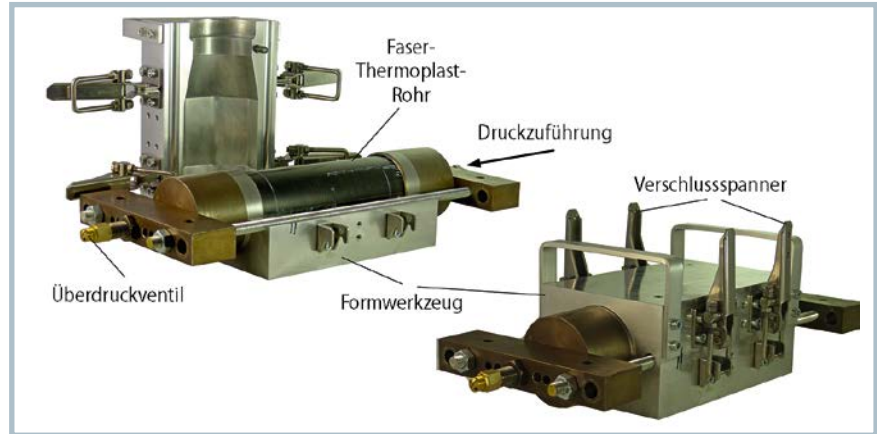


Bild 9. Das zweiteilige Innendruckumform-Versuchswerkzeug. Das FTV-Rohr ist auf den Trägerrahmen montiert und wird nach dem Aufheizen in das Formwerkzeug eingelegt (links). Durch Druckerhöhung nach Schließen des Werkzeugs (rechts) weitet sich das Rohr und das Laminat wird gegen die Kavität gepresst (© TU Darmstadt)

Als Prototypengeometrie für den Versuchsbetrieb wurde ein Oktagon mit unterschiedlichen Eckradien gewählt (**Titelbild**). Die Rohrenden wurden nicht umgeformt, sodass eine doppelt gekrümmte Übergangskontur zwischen den En-

den und dem Umformbereich entstand. Die Umformzone liegt zentrisch zur Rohrachse und weist zusätzlich eine Längssicke auf.

Kernstück der modularen Versuchsanlage ist ein Trägerrahmen, auf dem »

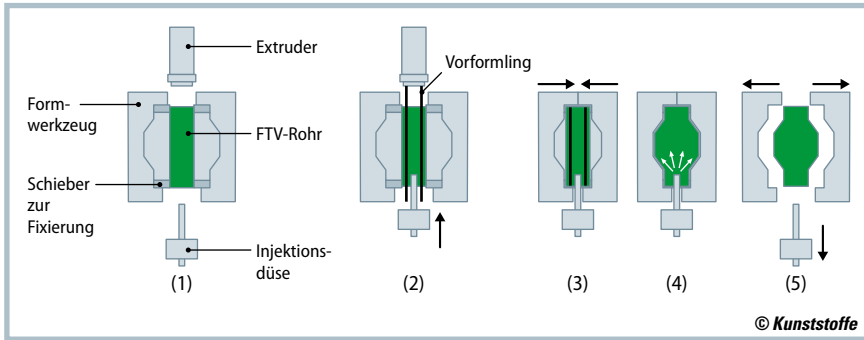
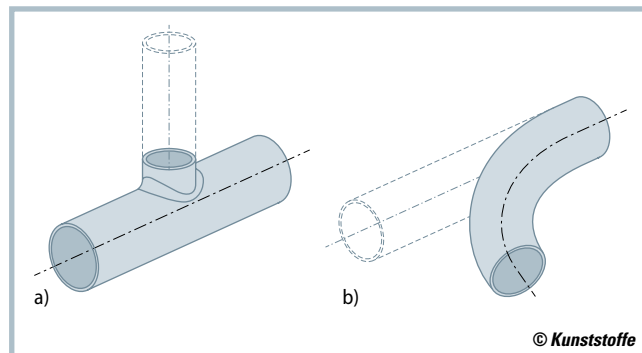


Bild 10. Schematische Darstellung einer vollautomatisierten Herstellung komplexer FTV-Hohlkörper im modifizierten Blasformverfahren: (1) das erwärmte FTV-Rohr wird in das konstant temperierte Formwerkzeug eingelegt; (2) ein unverstärkter Schlauch wird ins Innere des Rohrs extrudiert, die Injektionsdüse fährt ein; (3) das Werkzeug wird geschlossen und (4) der Innendruck gesteigert. Der Blasformschlauch weitet sich auf und presst das FTV-Rohr an die Werkzeugwandung. (5) Das Formwerkzeug wird geöffnet und der umgeformte Hohlkörper entnommen (Quelle: TU Darmstadt)

Bild 11. Anwendungsgebiete für Innendruckumform-Bauteile: a) T-Stück; b) Rohrbögen ohne Ovalisierung im Krümmungsradius (Quelle: TU Darmstadt)



das FTV-Rohr montiert wird. Das FTV-Rohr wird mitsamt Trägerrahmen im Heißluftofen aufgeheizt. Um zu verhindern, dass das Rohr kollabiert, wenn der verwendete Thermoplast die Schmelztemperatur erreicht, stabilisiert ein niedriger Innendruck das Rohr bereits beim Aufheizen. Nach Erreichen der Umformtemperatur wird der Trägerrahmen in das zweiteilige Formwerkzeug eingelegt und der Innendruck gesteigert (**Bild 9**).

Prozess- und anwendungstechnische Potenziale

Das IDU-Verfahren besitzt großes Potenzial zur Umsetzung in der Großserie. Die Herstellung der segmentierten Faserwicklung und die Herstellung der Basisrohre sind prinzipiell vom Gesamtprozess unabhängig und können in ausgelagerten Prozessen erfolgen. Die Einschnitte lassen sich vor der Basisrohrherstellung, direkt im Anschluss an die Halbzeugfertigung, mit Messerwalzen oder getakteten Stanzmessern einbringen. Für die Herstellung der Basisrohre eignen sich das

TER-Schleuderverfahren oder das Profilarmierungsziehen, zwei ebenfalls am Fachgebiet Konstruktiver Leichtbau und Bauweisen entwickelte Fertigungsverfahren zur Herstellung von endlosfaserverstärkten Thermoplastrohren [3, 4, 5].

Besonderes Potenzial zur serientauglichen Herstellung der Hohlkörper vermuten die Mitarbeiter des Fachgebiets in der Kombination mit dem Extrusionsblasformen. Das aufgeheizte FTV-Basisrohr lässt sich automatisiert in das Blasformwerkzeug einlegen. Anschließend wird der unverstärkte Thermoplastschlauch ins Innere der aufgeheizten Faserwicklung extrudiert. Durch die Beaufschlagung des Vorformlings mit Innendruck weitet sich dieser auf und drückt das Laminat des Basisrohrs gegen die innere Kontur des Blaswerkzeugs (**Bild 10**).

Der Vorformling sorgt für die Druckdichtigkeit während des Umformvorgangs und sollte aus einem zum Polymer des Basisrohrs kompatiblen Kunststoff hergestellt sein, damit eine Schweißverbindung zwischen Liner und Faserwicklung entsteht. Durch Anpassung der Wanddickenverteilung im Vorformling lassen sich konstante Wanddicken im Zielbauteil realisieren. Zudem bietet sich die Möglichkeit, durch einen kombinierten Spritzgieß- und Blasformprozess Funktionselemente direkt im Formwerkzeug anzupritzen.

Zusammenfassung

Mit der Entwicklung des IDU-Verfahrens wurde die Grundlage für einen wirtschaftlichen Fertigungsprozess zur Herstellung komplexer Hohlprofile mit umlaufenden Verstärkungsfasern geschaffen. Das Potenzial dieses Verfahrens liegt in der Vielfalt realisierbarer Zielgeometrien und Anwendungen (**Bild 11**).

Neben beliebigen, nichtprismatischen Profilquerschnitten bietet sich z.B. die Möglichkeit, stark gekrümmte Profile wie Rohrbögen herzustellen. Die Ovalisierung des Rohrquerschnitts im Krümmungsradius bei nachträglicher Biegung ließe sich so verhindern. Es ist ebenso möglich, in lokal begrenzten Abschnitten umzuformen und die Segmentierung der Verstärkungsfasern auf die Umformzone zu begrenzen. Dadurch könnten beispielsweise Funktionselemente integriert oder Öffnungen im Bereich von Kabelführungen lokal verstärkt werden. ■

Die Autoren

Dr.-Ing. Christoph Schmidt war von 2010 bis 2015 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet „Konstruktiver Leichtbau und Bauweisen“ der Technischen Universität Darmstadt; christoph.schmidt@weberit.de

Prof. Dr. Helmut Schürmann ist seit Januar 1994 Leiter des Fachgebiets „Konstruktiver Leichtbau und Bauweisen“ an der Technischen Universität Darmstadt; Helmut.Schuermann@klub.tu-darmstadt.de

Service

Literatur & Digitalversion

Das Literaturverzeichnis und ein PDF des Artikels finden Sie unter www.kunststoffe.de/1339328