

Geformte Pultrusionsprofile

Faltenfreie Umformung pultrudierter Hohlprofile durch lokales Streckbiegen

Pultrusionsprofile sind typischerweise preiswert, stabil – und eindimensional. Das lokale Streckbiegen stellt einen neuen Ansatz zur Umformung thermoplastischer Pultrusionsprofile dar.

Vergleich der Faltenbildung an einem mittels lokalem Streckbiegen hergestellten Prüfkörper (oberes Profil) gegenüber einem mittels Ziehbiegen hergestellten Prüfkörper (unteres Profil)

© Fraunhofer ICT



Die Pultrusion ist ein preiswertes Verfahren zur Herstellung von Faserverbundstrukturen. Kostensensible Branchen wie die Automobilindustrie zeigen daher großes Interesse daran, Pultrusionsprofile als lokale Verstärkung von Strukturkomponenten einzusetzen. In gewissen Fällen ist es auch denkbar, Strukturkomponenten überwiegend aus Pultrusionsprofilen aufzubauen. Häufig erfordert die typischerweise eindimensionale Geometrie der Pultrusionsprofile jedoch aufwendig zu fertigende Verbindungselemente oder Kompromisse im Bauteildesign.

Durch den Einsatz thermoplastischer Matrixwerkstoffe, beispielsweise mittels Schmelzpultrusion oder reaktiver Thermoplastpultrusion, wird eine nachträgliche Umformung von Pultrusionsprofilen denk-

bar. Dies bietet Potenzial zur Überwindung der genannten Hindernisse und damit auch zur Erweiterung des Einsatzbereichs von Pultrusionsprofilen. Bislang fehlen jedoch Fertigungsverfahren, die eine lokale und flexible Umformung der Profile bei Einhaltung grundsätzlicher Qualitätsansprüche ermöglichen.

Im Rahmen des Projekts Unist-HIM entwickelt das Fraunhofer ICT gemeinsam mit dem Fraunhofer Project Center for Composite Research am Ulsan National Institute for Science and Technology (FPC@Unist) sowie mit den weiteren koreanischen Partnern Large Co. Ltd., LG Hausys Ltd., Katech, SKC und Dyetec Fertigungsverfahren zur Umformung von thermoplastisch imprägnierten Faserverbundhalbzeugen, die entweder als Hohl-

körper (Hollow Intermediate Material, HIM) oder in Sandwich-Bauweise (Sandwich Intermediate Material, SIM) vorliegen. Der Fokus des Fraunhofer ICT liegt hierbei auf der Umformung pultrudierter Rohrprofile mit unidirektionaler (UD) Faserorientierung, die bei geringer Masse und geringem Materialeinsatz hohe Widerstandsmomente bzw. Steifigkeiten bieten.

Diesen Vorteil mit geometrischer Flexibilität zu kombinieren, indem die lokale und flexible Umformung der Profile ermöglicht wird, ist die Zielsetzung des „lokalen Streckbiegens“.

Das Prinzip des lokalen Streckbiegens

Die Entwicklung des lokalen Streckbiegens beruht auf einer Analyse der mecha-

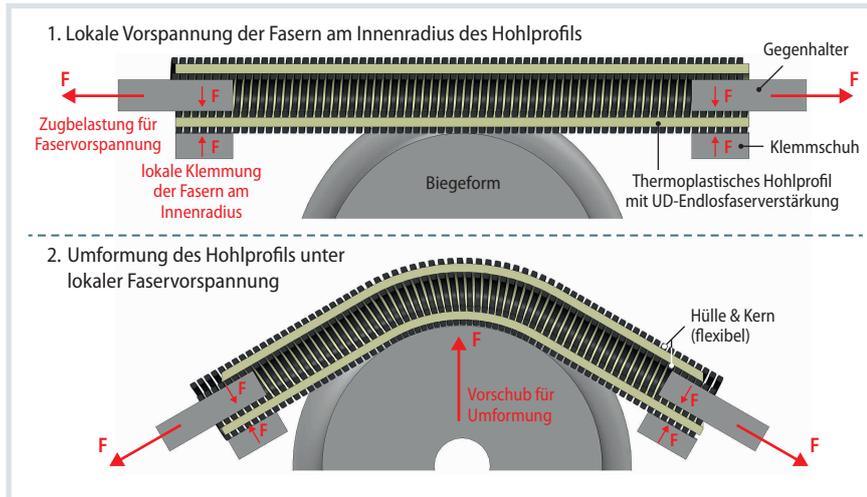


Bild 1. Schematische Darstellung des lokalen Streckbiegens Quelle: Fraunhofer ICT; Grafik: © Hanser

nischen Spannungen, die beim Umformen bzw. Biegen von Profilen auftreten: Zugspannungen am Außenradius und Druckspannungen am Innenradius. Letztere verursachen typischerweise Faltenbildung, die sich negativ auf die mechanischen und optischen Eigenschaften des Profils auswirkt.

Beim lokalen Streckbiegen (**Bild 1**) werden diese Druckspannungen eliminiert, indem die am Innenradius befindlichen Endlosfasern während des Umformprozesses selektiv vorgespannt werden. Dazu werden diese bereits vor der Erwärmung des Profils mithilfe spezieller Klammern lokal geklemmt und auf Zug belastet. Diese Zugbelastung bleibt über den gesamten Umformprozess (Erwärmung, Umformvorgang, Abkühlung) aufrechterhalten, sodass die Endlosfasern am Innenradius gestrafft bleiben und eine Faltenbildung an dieser Stelle vermieden wird.

Die übrigen, nicht vorgespannten Endlosfasern werden während des Umformvorgangs durch einen Kern und eine Hülle (jeweils flexible Biegefedern aus Metall) geführt, sodass auch weitere typische Schädigungsmechanismen wie das Kollabieren des Profilquerschnitts oder Zwischenfaserbrüche vermieden werden. Da die Länge der Endlosfasern konstant bleibt, müssen diese während des



Bild 2. Mittels lokalem Streckbiegen umgeformtes Hohlprofil © Fraunhofer ICT

Umformvorgangs aneinander abgleiten, sodass die Enden des Profils nach der Umformung schräg auslaufen.

Validierung des Ansatzes und Untersuchung von Prozessparametern

In ersten Vorversuchen konnte die Wirkungsweise des oben beschriebenen Ansatzes anhand von Biegeversuchen auf einem automatisierten Prüfstand gezeigt werden. Hierbei wurden pultrudierte Rohrprofile mit 330 mm Länge, 20 mm Außendurchmesser und 3 mm Wanddicke aus einer PETg-Matrix mit 60 Gew.-% UD-Glasfaserverstärkung mithilfe lokalen Streckbiegens umgeformt. Bei einem Biegeradius von 93 mm ließen sich die Profile nahezu ohne Faltenbildung bis zu einem Innenwinkel von ca. 130° biegen (**Bild 2**).

Die Verwendung des Kerns und der Hülle verhinderten auch das Kollabieren des Querschnitts sowie Zwischenfaserbrüche. Die bei der Umformung entstehenden schrägen Enden wurden nach dem Umformprozess entfernt. Durch die mechanische Klemmung der am Innenradius befindlichen Endlosfasern entstehen an den Enden Wanddicken- »

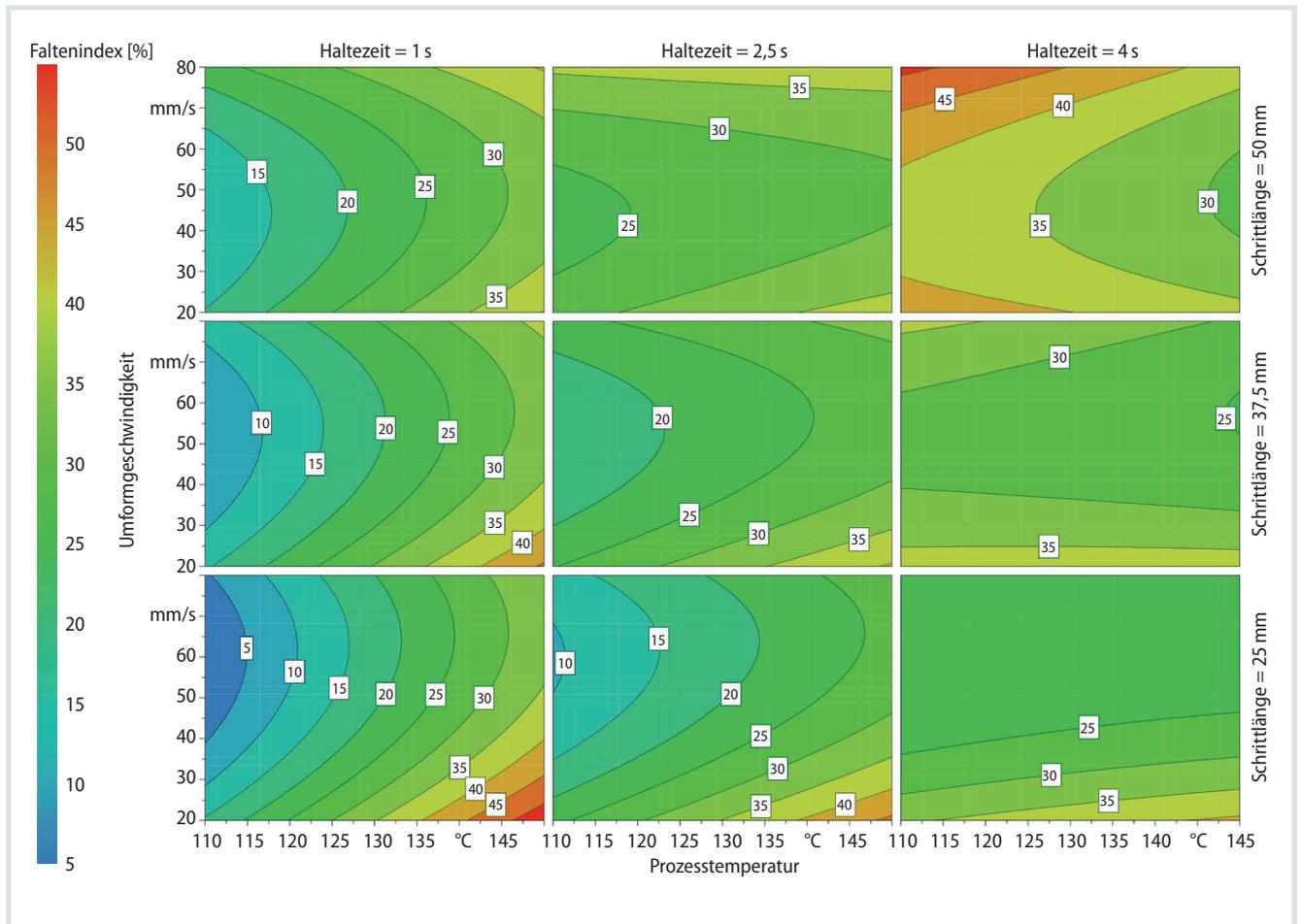


Bild 3. Konturplot der DoE-Studie: Einfluss der betrachteten Prozessparameter auf die Faltenbildung Quelle: Fraunhofer ICT; Grafik: © Hanser

schwankungen. Diese ziehen sich jedoch nicht durch das gesamte Profil hindurch, sondern sind ab einem Abstand von 40–50 mm zum Profilende nicht mehr zu erkennen.

Um den Prozess des lokalen Streckbiegens besser verstehen zu können, wurde der Einfluss einiger zentraler Prozessparameter auf das Biegeergebnis im Rahmen einer DoE-Studie (Design of Experiments) analysiert. Hierzu wurden die oben beschriebenen Prüfkörper (Biegeradius: 93 mm, Innenwinkel: 130°) mit variierten Prozessparametern hergestellt.

Neben der Prozesstemperatur (Temperatur des Profils bei Beginn des Umformvorgangs) wurde dabei insbesondere die Umformbewegung untersucht. Aus den Vorversuchen ist bekannt, dass eine schrittweise Umformbewegung einen stabileren Prozess sowie eine deutlich geringere Faltenbildung ermöglicht als eine kontinuierliche Umformbewegung. Ein kontrolliertes Abgleiten der Endlosfasern gelingt nur durch schrittweises Umformen. Folglich wurden auch

die Schrittlänge (Vorschubweg je Umformschritt), die Umformgeschwindigkeit (Geschwindigkeit mit der die Umformschritte erfolgen) und die Haltezeit (Pause zwischen zwei aufeinanderfolgenden Umformschritten) variiert.

Als zentrales Qualitätsmerkmal der umgeformten Profile wurde die Faltenbildung betrachtet. Um diese zerstörungsfrei quantifizieren zu können, wurden die Prüfkörper bei konstanter Beleuchtung aus verschiedenen definierten Perspektiven fotografiert. Die Beleuchtung wird hierbei von faltigen Oberflächen anders reflektiert als von glatten Oberflächen. Dieser Effekt wurde genutzt, um mithilfe einer Bildverarbeitungssoftware den Anteil faltiger Oberflächen an der Gesamtoberfläche des Profils zu berechnen.

Der auf diese Weise ermittelte Wert wird als „Faltenindex“ bezeichnet und in Prozent angegeben. 0% entspricht hierbei einem ideal faltensfreien Profil, wohingegen 100% einem Profil entspricht, das an jeder Stelle Falten aufweist. Neben der Faltenbildung wurden als weitere Quali-

tätsmerkmale auch die Querschnittsverformung sowie die mechanischen Eigenschaften der Prüfkörper betrachtet.

Die Ergebnisse der DoE-Studie (**Bild 3**) liefern in Bezug auf die hier untersuchten UD-Rohrprofile aus PETg/GF60 klare Empfehlungen zur Minimierung der Faltenbildung. Die optimale Prozesstemperatur liegt demnach am unteren Ende des erfassten Temperaturbereichs (110–150°C). In diesem Zusammenhang ist jedoch anzumerken, dass bei geringen Prozesstemperaturen zum Teil geometrische Beeinträchtigungen der Prüfkörper festgestellt wurden. Insbesondere der Innenwinkel von 130° kann unter diesen Bedingungen häufig nicht erreicht werden, da das vergleichsweise hohe Widerstandsmoment eines „kühlen“ Profils der Umformbewegung entgegenwirkt.

Ein guter Kompromiss stellt sich bei etwa 130°C ein. Überdies wird die Reduzierung der Faltenbildung durch eine Umformbewegung begünstigt, die sich aus vielen kleinen Schritten und geringen Haltezeiten zusammensetzt. Die gerings-

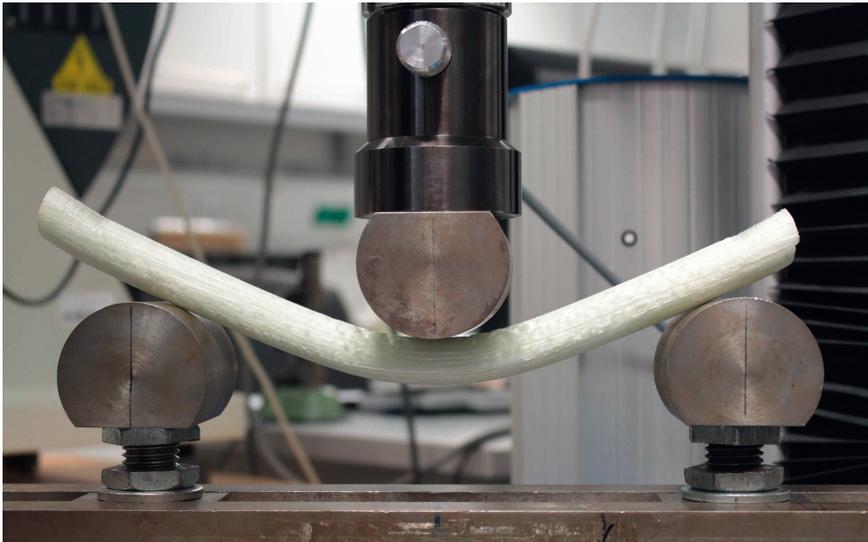


Bild 4. Prüfaufbau zur 3-Punkt-Biegung an gebogenen Prüfkörpern © Fraunhofer ICT

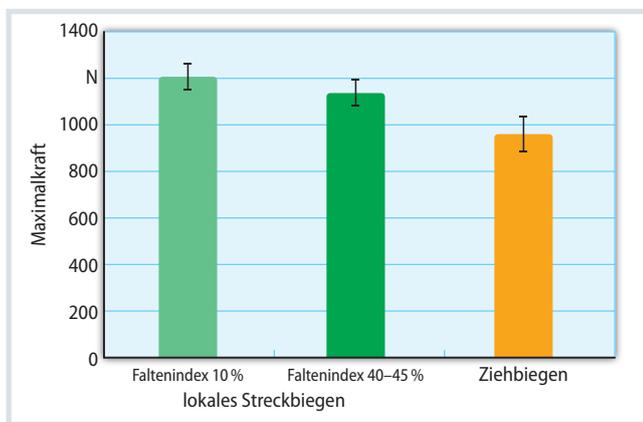


Bild 5. Messwerte aus 3-Punkt-Biegeversuchen: Einfluss der Faltenbildung auf die mechanischen Eigenschaften gebogener Profile

Quelle: Fraunhofer ICT;

Grafik: © Hanser

ten Faltenindizes ergeben sich bei der kürzesten untersuchten Haltezeit (1 s) sowie bei der kleinsten untersuchten Schrittlänge (25 mm). Letzteres bedingt eine entsprechend hohe Anzahl an Umformschritten. Die Umformgeschwindigkeit liegt hierbei idealerweise im oberen Mittelfeld des erfassten Geschwindigkeitsbereichs bei etwa 60 mm/s.

Die untersuchten Prozessparameter zeigen keinen signifikanten Einfluss auf die Querschnittsverformung des Profils, da diese durch den Kern und die Hülle weitgehend unterbunden werden.

Mechanischer Einfluss der Faltenbildung

Im Hinblick auf die mechanischen Eigenschaften der Prüfkörper sind gewisse Einflüsse der Prozessparameter erkennbar. So liefern diejenigen Parametereinstellungen, die eine minimale Faltenbildung ermöglichen, auch die höchste mechanische Belastbarkeit. Prüfkörper mit einem

Faltenindex von 40–45% weisen im 3-Punkt-Biegeversuch (**Bild 4**) eine um 6,1% geringere Bruchkraft auf als solche mit einem Faltenindex von 10%.

Noch deutlicher wird der Einfluss der Faltenbildung auf die mechanischen Eigenschaften im Vergleich zwischen dem lokalen Streckbiegen und dem für Metallrohre gut geeigneten Ziehbiegen. Letzteres Verfahren wurde in dieser Untersuchung mit einer kommerziell erhältlichen Biegeform (Art.-Nr.: 581240, Hersteller: Rems GmbH & Co KG, Waiblingen) durchgeführt. Anders als bei Metallrohren üblich wurde das Ziehbiegen jedoch nicht als Kaltumformverfahren, sondern mit einer Prozess Temperatur von 130°C durchgeführt. Dabei entstehen vereinzelt besonders tiefe Falten (**Titelbild**), die im lokalen Streckbiegen nicht zu beobachten sind.

Ein Vergleich des Faltenindex ist an dieser Stelle nicht sinnvoll, da dieser zwar die Verbreitung der Falten (Anteil der faltigen Oberfläche) erfasst, nicht aber deren Tiefe. Aufgrund dieser tiefen Falten liegt

die Bruchkraft der mittels Ziehbiegen hergestellten Profile bei der 3-Punkt-Biegung um 20,5% niedriger als die der mittels lokalem Streckbiegen angefertigten Prüfkörper (**Bild 5**).

Fazit

Das lokale Streckbiegen stellt einen neuen Ansatz zum lokalen, faltenfreien Umformen von thermoplastischen UD-Hohlprofilen dar. Im aktuellen Entwicklungsstand ist der Anwendungsbereich beschränkt auf kleine Umformungen mit einfachen Geometrievorgaben. Es wird erwartet, dass durch Optimierungen im Bereich der Klemmsysteme und der Prozessführung sowie durch angepasste Materialsysteme auch komplexere Geometrien realisiert und Vollprofile verarbeitet werden können. ■

Die Autoren

Jonathan Haas, M. Eng., ist als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie ICT, Pfingsttal, tätig;
jonathan.haas@ict.fraunhofer.de

Bernard Bose, B. Sc., studiert am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) und arbeitet seit Juni 2019 als studentische Hilfskraft am Fraunhofer ICT an der beschriebenen Technologie.

Dank

Das Unist-HIM Projekt wird durch das Core Industrial Technology Development Program (Fördernummer: 10060281) gefördert, das vom südkoreanischen Ministerium für Handel, Industrie und Energie (Ministry of Trade, Industry and Energy of Korea – MOTIE), in diesem Fall vertreten durch das Korea Evaluation Institute of Industrial Technology (KEIT), finanziert wird.

Service

Digitalversion

- Ein PDF des Artikels finden Sie im Internet unter www.kunststoffe.de/2020-12

English Version

- Read the English version of the article in our magazine *Kunststoffe international* or at www.kunststoffe-international.com