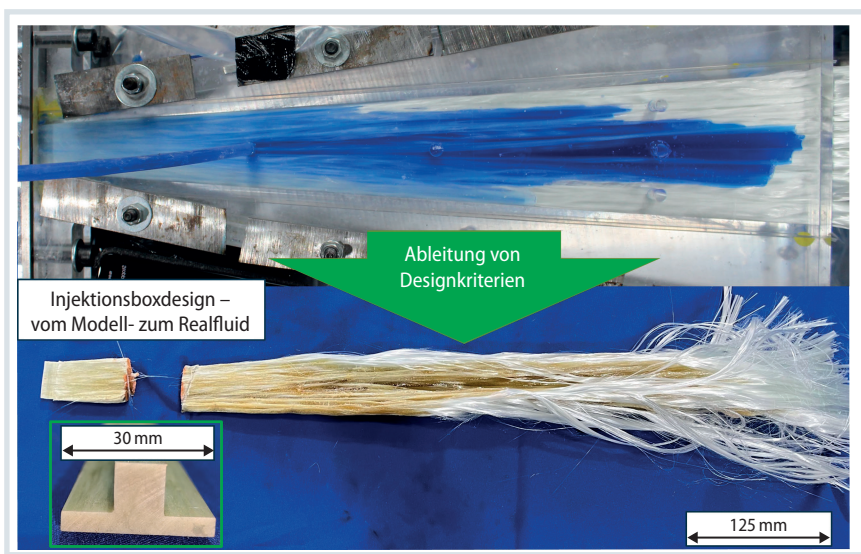


Auslegungsrichtlinien für Injektionsboxen

Gewusst wie: Injektionsboxdesign für die Pultrusion

Aufgrund der hohen Imprägnierqualität löst die Injektionsbox (I-Box) das seit Jahrzehnten etablierte Harzbadverfahren nach und nach ab. Bisher basierte die Konstruktion der I-Boxen allerdings auf dem Erfahrungsschatz des jeweiligen Anwenders, da Auslegungsrichtlinien fehlten. In einem Forschungsvorhaben entwickelte das IKV praktische Designkriterien.



Wie aus Fasern Profile werden: Am IKV in Aachen wurden Designkriterien entwickelt, mit denen I-Boxen für einen neuen Anwendungsfall ausgelegt werden können. © IKV

Die Pultrusion ist ein kontinuierlicher Prozess zur Herstellung von endlosfaserverstärkten Kunststoffprofilen. Pultrusionsprofile finden vielfältig Anwendung beim Bau von Windkraftanlagen, sowie in der Bau- und Automobilbranche in Form von Fensterprofilen oder Querträgern [1 - 3]. Das konsolidierte Profil wird mit Greifern durch ein formgebendes Werkzeug gezogen. Dem Werkzeug kommt zusätzlich die Aufgabe zu, die für die Aushärtungsreaktion benötigte Energie zuzuführen. Dem vorgeschaltet ist ein Harzbad oder eine Injektionsbox (I-Box). Beide Verfahrensvarianten stellen die vollständige Imprägnierung der Faserhalbzeuge mit dem flüssigen Matrixmaterial sicher. Das Harzbadverfahren ist das seit Jahrzehnten in der Industrie etablierte Verfahren, wird aber nach und nach von der Injektionsboxtechnologie abgelöst. I-Boxen

bieten diverse Vorteile hinsichtlich der Harzverweilzeit, der Emission schädlicher Komponenten und der Imprägnierqualität [4 - 7].

Funktionsprinzipien der I-Box

In den vergangenen Jahren wurden verschiedenste Bauformen und Funktionsprinzipien für I-Boxen untersucht [8,9]. Neben der Verbesserung der mechanischen Eigenschaften der Pultrusionsprofile liegt der Fokus der Injektionsboxentwicklung auf der Simulation des Strömungsprofils in der I-Box. Hier konnten für spezifische Anwendungsfälle und Prozesskonfigurationen Modelle entwickelt werden [10 - 12]. Dennoch existieren keine allgemeingültigen Auslegungsrichtlinien für Injektionsboxen, die ein gezieltes Injektionsboxdesign ermöglichen. Die Konstruktion neuer

I-Boxen beruht hauptsächlich auf dem Erfahrungswissen des Verarbeiters. Bei neuen Geometrien führt dies häufig zu Nachbearbeitungen der I-Box, damit eine vollständige Imprägnierung des Profils sichergestellt werden kann. Daher werden Designkriterien beziehungsweise Konstruktionsrichtlinien benötigt, um Verarbeitern insbesondere KMU den Einsatz von I-Boxen zu ermöglichen. Dadurch kann das Kostenrisiko durch einen iterativen Fertigungsprozess der I-Box minimiert werden. Ziel eines kürzlich abgeschlossenen Forschungsvorhabens war es daher, Designkriterien für Injektionsboxen zu erarbeiten.

Entwicklung von Fertigungs- und Designparametern

Am Institut für Kunststoffverarbeitung an der RWTH Aachen (IKV) wurden im Rahmen des Forschungsvorhabens „Injektionsbox Design“ Untersuchungen des Strömungsfeldes in I-Boxen mithilfe von Sichtinjektionsboxen, mit einem rechteckigen Profilquerschnitt, aus PMMA und nicht reaktiven Fluiden durchgeführt. Hopmann et al. [13, 14] beschreiben den Einfluss der Prozessparameter-Abzugsgeschwindigkeit, Faservolumengehalt (FVG) und Fluidviskosität auf das Strömungsfeld in der I-Box. In weiterführenden Untersuchungen wurden der horizontale und vertikale Öffnungswinkel variiert und der Einfluss auf das resultierende Strömungsfeld analysiert. Zusammenfassend ist festzuhalten, dass größere Öffnungswinkel zu einem geringeren und dem finalen Querschnitt näheren Druckaufbau führten. Kleinere Öffnungswinkel verkürzten insbesondere für geringe

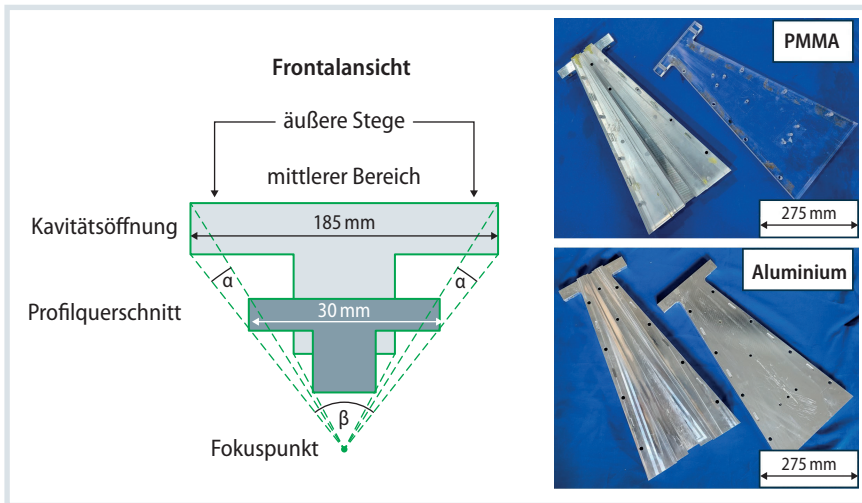


Bild 1. Für die Versuche wurden Injektionsboxkavitäten für ein T-Profil aus Aluminium und PMMA gefertigt. © Grafik: Hanser; Quelle: IKV

Abzugsgeschwindigkeiten die mittlere Harzverweilzeit in der I-Box. Bei zu geringen Öffnungswinkeln $< 1^\circ$ konnte die vollständige Imprägnierung jedoch nicht sichergestellt werden.

Zur Beschreibung der Injektionsboxkavität ist die Definition der Öffnungswinkel an den äußeren Rändern des finalen Querschnitts eine hinreichende Bedingung. Ausgehend vom finalen Profilquerschnitt und den gewählten Öffnungswinkeln wird die Kavitätsöffnung bestimmt. Eine ebene Unterseite ohne Öffnungswinkel vermeidet einen übermäßigen Abfluss des Fluids entgegen der Abzugsrichtung. Allgemein ist eine möglichst frühe Verteilung des Fluides über den gesamten Querschnitt vorteilhaft. So kann eine Fluidverteilung unter hohem Druck vermieden werden, welche potenziell zu Rovingverschiebungen führt. Die sich verjüngende Injektionsboxkavität führt in Abhängigkeit der Öffnungswinkel und Geometrie zu einer lokal divergierenden Kompression der Halbzeuge. Für eine gleichmäßige Imprägnierung des gesamten Querschnitts, mit einer homogenen Verteilung des lokalen FVG, sollte eine gleichmäßige Kompression der Halbzeuge über dem Querschnitt berücksichtigt werden.

Die anhand eines Rechteckprofils erarbeiteten Auslegungskriterien werden genutzt, um die Injektionsboxgeometrie für ein T-Profil zu bestimmen. Die Übertragung auf komplexe Pultrudate dient der Validierung der gewonnen Erkenntnisse. **Bild 1, links** zeigt schematisch den Aufbau der I-Box. Es wird der vertikale Öffnungswinkel $\alpha = 2,5^\circ$ für die Oberseite und der horizontale Öffnungswinkel \gg

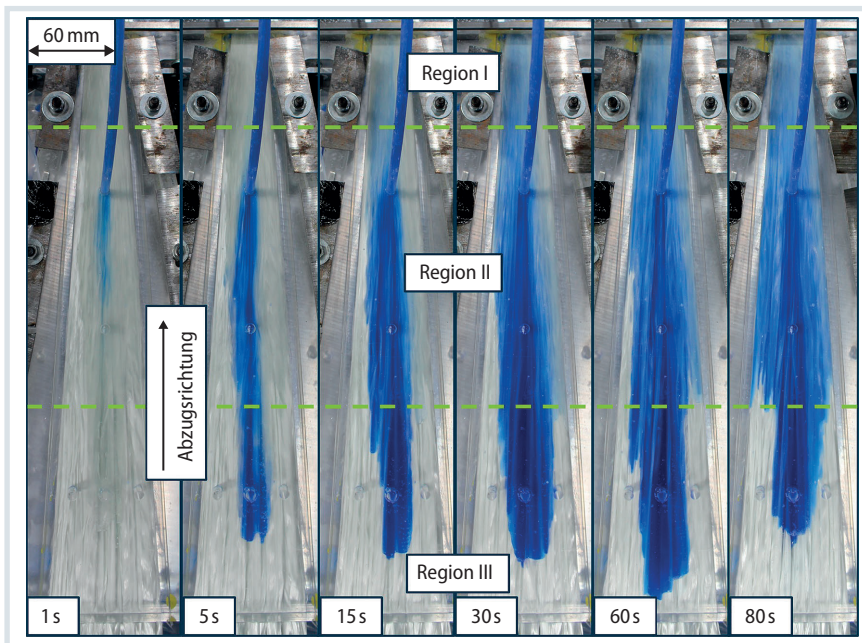


Bild 3. Strömungsfeldentwicklung in der I-Box: Durch das transparente PMMA und das farbige Fluid sind Strömungen und Füllungen gut nachvollziehbar. © IKV

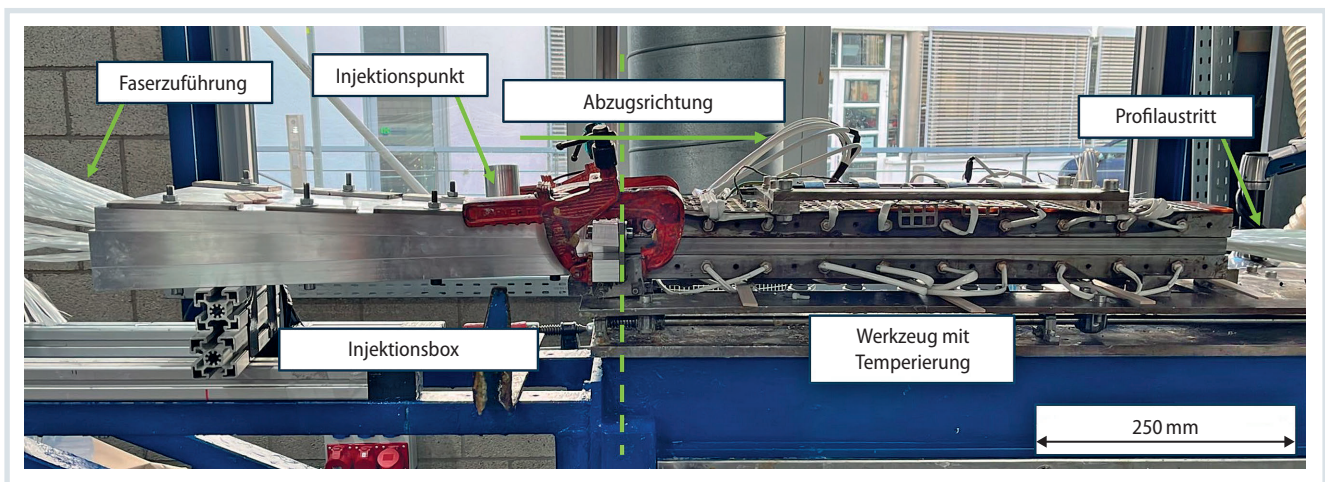


Bild 2. Aufbau des Pultrusionsprozesses mit Injektionsbox © IKV

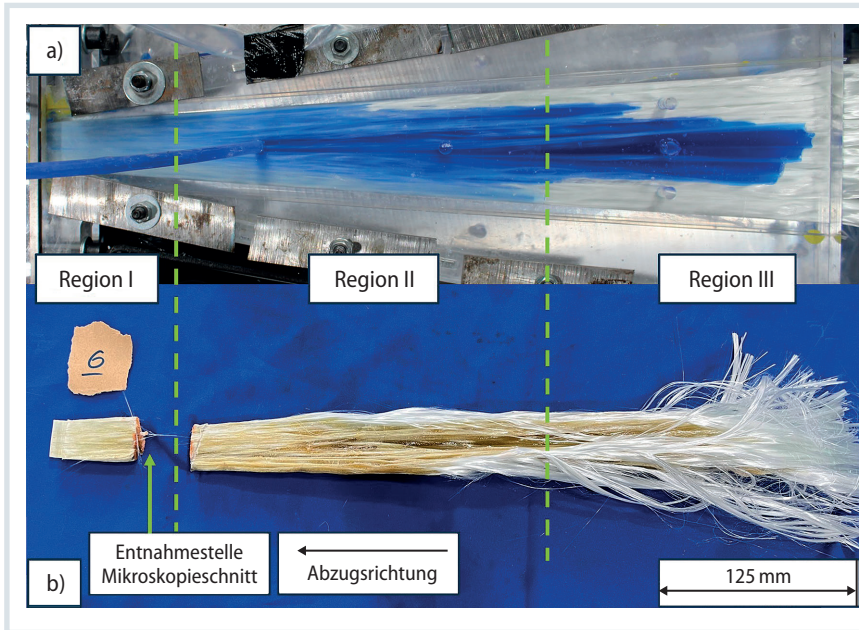


Bild 4. Vergleich der Strömungsfelder in der Sichtinjektionsbox und bei der PUR-Pultrusion © IKV

$\beta = 5^\circ$ für die seitlichen Elemente gewählt. In den durchgeführten Versuchen mit rechteckiger I-Box konnte ein guter Kompromiss zwischen Druckaufbau und mittlerer Harzverweilzeit in der I-Box erzielt werden. Die I-Box wurde mit einem Injektionspunkt konstruiert, um Rückschlüsse auf das resultierende Strömungsfeld ziehen zu können. Aufgrund dieser Konfiguration ist eine ungleichmäßige Füllung der Stegbereiche und dem mittleren Profilbereich zu erwarten, da die Fasern in den Stegen stärker komprimiert werden.

Charakterisierung des Strömungsfeldes und der Imprägnierqualität

Um das Strömungsfeld und die Imprägnierqualität zu untersuchen, wurden für die bestimmte Geometrie eine transparente Sichtinjektionsbox aus PMMA und eine I-Box aus Aluminium gefertigt (**Bild 1, rechts**). Die Sichtinjektionsbox ermöglicht die Untersuchung des entstehenden Strömungsfeldes. Als Testfluid wurde ein Modellfluid nach Hopmann et al. [13, 14] mit vergleichbarer Viskosität ($\eta \approx 263$ mPas) zu einem für die Pultru-

sion typischen Polyurethan verwendet.

Bild 2 zeigt die I-Box mit dem angeflanschten Werkzeug.

Für alle durchgeführten Versuche wurden die Glasfaserrovings StarRov 090 4.800 tex, der Johns Manville Europe GmbH verwendet. Die Versuche wurden mit 60 % Faservolumengehalt (FVG), einer Abzugsgeschwindigkeit von $v_{\text{Abzug}} = 0,4$ m/min durchgeführt. Für die Herstellung des konsolidierten Profils wurde zur Untersuchung der Imprägnierqualität das Polyurethan (PUR) System Baydur PUL 20PL20, mit Desmodur 10PL02 der Firma Covestro verwendet ($\eta \approx 310$ mPas). Die Injektion des PUR-Systems erfolgte mit einer Niederdruckdosieranlage des Typs Eldomix 101, der Firma Hilger und Kern GmbH. Für die Faserführung wurde eine gleichmäßige Verteilung der Rovings über den gesamten Querschnitt mit lokal konstanten Faservolumengehalt berücksichtigt.

Das farbige Fluid macht das Strömungsfeld sichtbar

Bild 3 zeigt die Entwicklung des Strömungsfeldes des Modellfluides über der Zeit, nach einem Wechsel der Fluidfarbe von farblos zu blau. Die Imprägnierung kann in die Regionen I bis III unterteilt werden. Es ist zu erkennen, dass zunächst der mittlere Bereich entgegen der Strömungsrichtung gefüllt wird. Nach 15 bis 30 s ist das blau eingefärbte Fluid bis in die Region I der I-Box geflossen

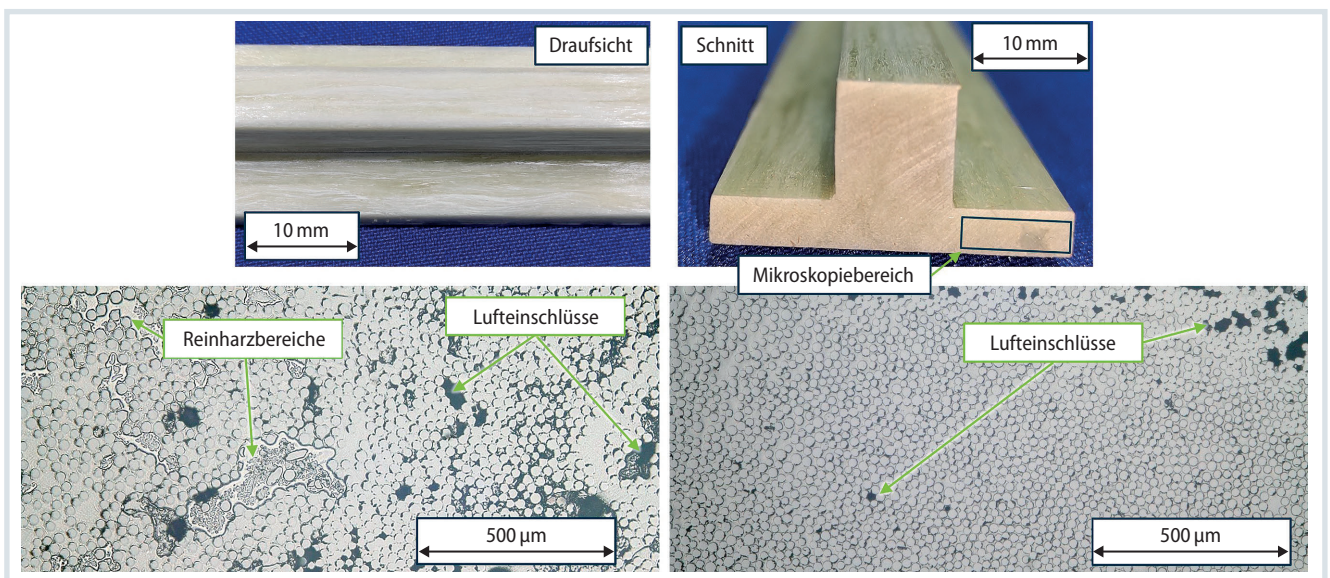


Bild 5. Aufnahmen vom Stegbereich des hergestellten Profils und Mikroskopieaufnahmen aus der Injektionsbox (links unten) und dem Profil (rechts unten) © IKV

(vgl. Bild 3). Hier erfolgt eine Verteilung des Fluids in die äußeren Bereiche des T-Profils. Ausgehend von der Fluidverteilung in der Region I erfolgt eine Rückströmung des Fluids bis in Region II. Nach etwa 60 s bildet sich eine quasi-stabile Fließfront aus. Es ist deutlich zu erkennen, dass im mittleren Bereich des T-Profils, in den injiziert wird, über die gesamte Zeit eine größere Rückflusslänge erreicht wird. In Region III sind Lücken zwischen den Rovings zu erkennen. In diesem Bereich kann lediglich eine Makroimprägnierung der Rovings stattfinden, da kein ausreichender Druck aufgebaut wird. Insgesamt weist die I-Box das erwartete konstruktiv bedingt ungleichmäßige Strömungsfeld auf. Die stärkere Kompression der Halbzeuge in den Stegbereichen verhindert eine gleichmäßige Fluidverteilung, bis ein ausreichender Druck nahe des finalen Profilquerschnittes aufgebaut wird.

In Region I ist der Kompressionsbereich zu erkennen, in dem eine Differenzierung der einzelnen Rovings nicht möglich ist und der für die vollständige Imprägnierung notwendige Druck aufgebaut wird. Für Region II können die Rovings optisch klar voneinander unterschieden werden. Das Strömungsfeld weist eine Verdrängung der Rovings am Injektionspunkt auf. Diese ist in der Sichtinjektionsbox an dem deutlich dunkleren Fluidbereich in der Profilmitte zu erkennen. Entgegen der Abzugsrichtung sind vermehrt Luftblasen zu erkennen, welche durch den steigenden Druck nahe des finalen Profilquerschnittes aus den Rovings und dem Fluid verdrängt werden. Die Sichtinjektionsbox zeigt, wie die geometrische Kompression zur Verbesserung der Mikroimprägnierung beiträgt.

Für einen qualitativen Vergleich wurde das Material in der I-Box ausgehärtet, dazu wurde zum Abschluss des Versuchs der Abzug und die Matrixzufuhr gestoppt. Das „eingefrorene“ Strömungsprofil weist Ähnlichkeit mit dem in der Sichtinjektionsbox beobachteten Strömungsprofil auf, siehe **Bild 4**. Der Rückfluss im mittleren Profildbereich überschreitet, wie im nicht reaktiven Versuch, den in den Randbereichen und weist eine ähnliche Verdrängung der Rovings am Injektionspunkt auf. Die Regionen I und II können auch im ausgehärteten Zustand differenziert werden, so ist der Übergang von Region I nach II

durch die abgeschlossene Makroimprägnierung gekennzeichnet.

In der Draufsicht und Schnittansicht des hergestellten T-Profils in **Bild 5** ist oben zu erkennen, dass die eingesetzte Werkzeugtechnik scharf ausgeformte Kanten und eine vollständige Füllung über dem Querschnitt des Profils ermöglicht. Makroskopisch kann eine vollständige Imprägnierung festgestellt werden. Rundungen und Überstände an den Ecken des Profils sind auf die modulare Werkzeugtechnik zurückzuführen und bei gängigen Werkzeugkonzepten für die Serienfertigung nicht zu erwarten. Zur Analyse der Imprägnierqualität wurden Schnitte aus dem fertigen Profil und aus der I-Box (vgl. Bild 4) entnommen. Bild 5 zeigt unten Mikroskopieaufnahmen des Querschnittes in der I-Box (links) und des fertigen Profils (rechts). In der I-Box sind Reinharzbereiche und Lufteinschlüsse zwischen den Fasern zu erkennen. Die Verteilung von Fasern und Harz ist vergleichsweise inhomogen, wohingegen im Profil eine homogene Verteilung vorliegt. Das fertige Profil weist eine gute Mikroimprägnierung auf. Die in Anzahl und Größe reduzierten Lufteinschlüsse im Profil bestätigen die Beobachtungen an den Sichtinjektionsboxen: Luft wird entgegen der Produktionsrichtung aus dem Fluid verdrängt und nicht als Poren mitgezogen.

Fazit zum Injektionsboxdesign

Das Injektionsboxdesign weist das im Vergleich zum Rechteckprofil erwartete Strömungsprofil, sowohl für das Modellfluid als auch das reaktive Fluid, auf. Es wurde dargelegt, dass ein funktionales Injektionsboxdesign aus den Untersuchungen mit dem Modellfluid abgeleitet werden kann und eine vollständige Mikroimprägnierung erreicht wird. Aus der Wahl der Öffnungswinkel ergibt sich die Kompression der Rovings und das resultierende Strömungsfeld, so können Verweilzeit und Druckaufbau in der Injektionsbox beeinflusst werden. Außerdem ist eine gleichmäßige Kompression über dem Querschnitt zu berücksichtigen, um eine gleichmäßige Harzverteilung über dem Querschnitt zu realisieren. Darüber hinaus konnte im Rahmen des Forschungsvorhabens ein diversifiziertes Wissen über die Strömungsvorgänge in I-Boxen erarbeitet werden. ■

Info

Text

Felix Flammer, M. Sc., ist wissenschaftlicher Mitarbeiter im Fachbereich Pultrusion am Institut für Kunststoffverarbeitung an der RWTH Aachen (IKV);

felix.flammer@ikv.rwth-aachen.de

Dominik Foerges, M. Sc., ist Leiter der Abteilung Faserverstärkte Kunststoffe und Polyurethane am IKV.

Dr.-Ing. Kai Fischer ist wissenschaftlicher Direktor für den Bereich Leichtbau am IKV

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christian Hopmann ist Leiter des IKV und Inhaber des Lehrstuhls für Kunststoffverarbeitung der Fakultät für Maschinenwesen der RWTH Aachen.

Dank

Das IGF-Forschungsvorhaben 21090 N der Forschungsvereinigung Kunststoffverarbeitung wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Allen Institutionen und den Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschusses gilt unser Dank.

Literatur & Digitalversion

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

English Version

Read the English version of the article in our magazine *Kunststoffe international* or at

www.kunststoffe-international.com