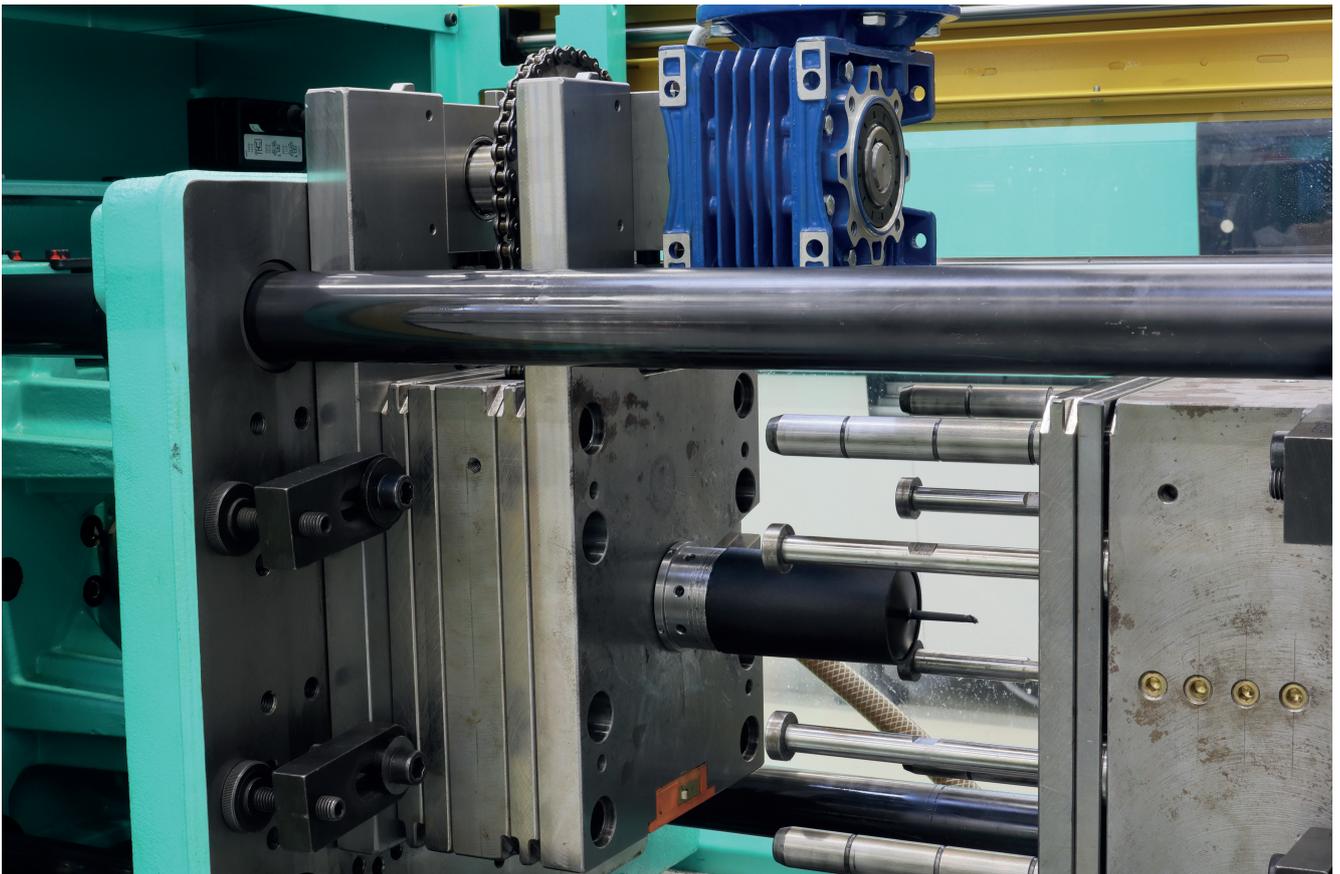


Werkzeugsystem mit drehendem Kern verbessert mechanische Eigenschaften

Auslegungsmethodik für innendruckbelastete Bauteile

Innendruckbelastungen sind typisch für faserverstärkte Kunststoffbauteile. Durch einen drehenden Werkzeugkern kann die Faserorientierung beim Spritzgießen gezielt beeinflusst und damit die Berstdruckfestigkeit von Bauteilen erhöht werden. Eine neu entwickelte Simulationsmethodik ermöglicht es, diese veränderte Faserorientierung bei der Auslegung zu berücksichtigen.



Praktische Umsetzung eines Werkzeugsystems mit drehendem Kern. © Hochschule Osnabrück

Beim Spritzgießen faserverstärkter Kunststoffe entsteht, bedingt durch die vorliegenden Strömungsbedingungen, eine Schichtstruktur, bei der die Fasern in den Randbereichen in Fließrichtung und im Kern quer zur Fließrichtung orientiert sind [1, 2]. Die daraus resultierenden anisotropen mechanischen Eigenschaften führen dazu, dass die Bauteilstabilität von der Lage des

Anspritzpunkts abhängt [3]. Längliche rotationssymmetrische Bauteile unter Innendruckbelastung werden üblicherweise aufgrund von Fertigungsrestriktionen in axialer Richtung gefüllt, sodass der Großteil der Fasern auch in diese Richtung orientiert ist. Die Innendruckbelastungen führen hierbei jedoch zu hohen Spannungen in tangentialer Richtung – damit unterscheiden sich die

Faserausrichtung und die Hauptbelastungsrichtung und das Material wird nicht optimal genutzt.

An dieser Stelle setzt das Werkzeugsystem mit drehendem Kern (**Bild 1**) an [4–6]. Die Rotation des Werkzeugkerns führt aufgrund der Relativbewegung im Werkzeug zu einer Scherung der Schmelze in tangentialer Richtung. Diese Scherung überlagert sich mit der ein-

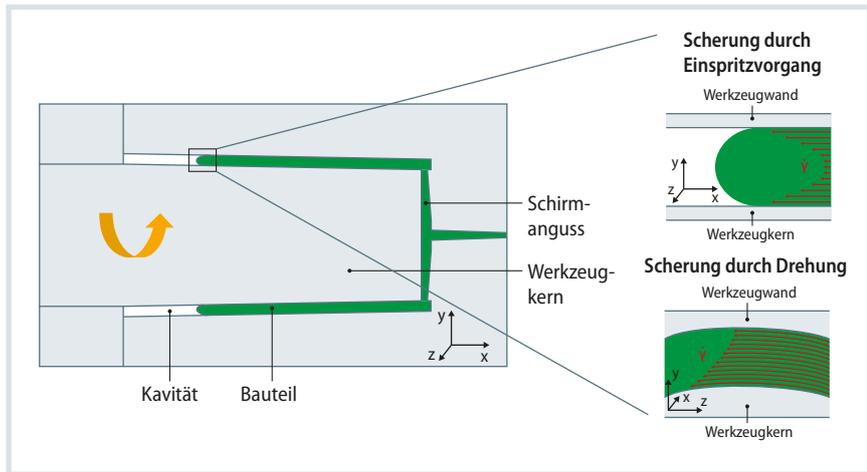


Bild 1. Die Überlagerung der einspritzinduzierten axialen mit der tangentialen Scherung beeinflusst aufgrund der Rotation die Faserausrichtung gezielt in tangentialer Richtung.

Quelle: Hochschule Osnabrück; Grafik: © Hanser

spritzinduzierten Scherung in Fließrichtung und bewirkt, dass Verstärkungsfasern – abhängig vom Verhältnis zwischen einspritz- und rotationsinduzierter Scherung – umorientiert werden können. Die hierdurch beeinflusste Faserorientierung wirkt sich positiv auf die mechanischen Eigenschaften aus und verbessert die Berstdruckfestigkeit [6, 7].

Um das Potenzial dieses Herstellungsprozesses nutzen zu können, muss die Faserorientierung auch in der Struktursimulation berücksichtigt werden. Nach aktuellem Stand der Technik [8] wird bei der Auslegung kurzfaserverstärkter Bauteile die Faserorientierung

aus der Spritzgießsimulation als Eingangsgröße zur Berechnung der anisotropen Eigenschaften verwendet. Beim Werkzeugsystem mit drehendem Kern ist dies nicht möglich, weil der Einfluss der Relativbewegung auf die Faserorientierung bisher noch nicht simuliert werden kann. Aus diesem Grund hat das Labor für Kunststoff-CAE und Faserverbundkunststoffe der Hochschule Osnabrück in Kooperation mit der RIA-Polymers GmbH und der Helmut Sundermeier GmbH eine Auslegungsmethodik entwickelt, die unter Verwendung von Messdaten für die Faserorientierung eine erste Abschätzung der Bauteileigenschaften ermöglicht.

Messung der Faserorientierung

Um den Einfluss der Rotation auf die Faserorientierung zu quantifizieren, wurde der becherförmige Demonstrator (**Titelbild**) mit einer Länge von 100 mm, einem Außendurchmesser am Fließwegende von 57 mm und einer variablen Wanddicke zwischen 1,5 und 3,5 mm bei variierenden Drehzahlen untersucht. Die mathematische Beschreibung der Faserorientierung erfolgt hierbei über den Faserorientierungstensor [9], der unter anderem durch die Auswertung von Schlibfbildern [10, 11] bestimmt werden kann. Bei diesen sind die Fasern in der Schlibfebene als Ellipsen sichtbar, deren Ausprägung von der Ausrichtung der Fasern im Raum abhängig ist. Die Hauptachsen und der Neigungswinkel der Ellipsen können mit Bildauswertungsalgorithmen bestimmt werden und dienen zur Berechnung des Orientierungstensors. Mittels dieser Schlibfbildmethode wurden die Faserorientierung in der Fließwegmitte analysiert und die mittleren Orientierungsanteile sowie der Verlauf der Orientierung über der Wanddicke bestimmt.

Bei einem kurzfaserverstärkten Polypropylen (PP-GF50, Typ: Rialene P100 SGF50; Hersteller: RIA-Polymers) kann der tangentiale Orientierungsgrad mit zunehmender Drehzahl signifikant gesteigert werden (**Bild 2 links**). Bei einer Wanddicke von 2,5 mm ist eine Erhöhung des tangentialen Orientierungsgrads von »

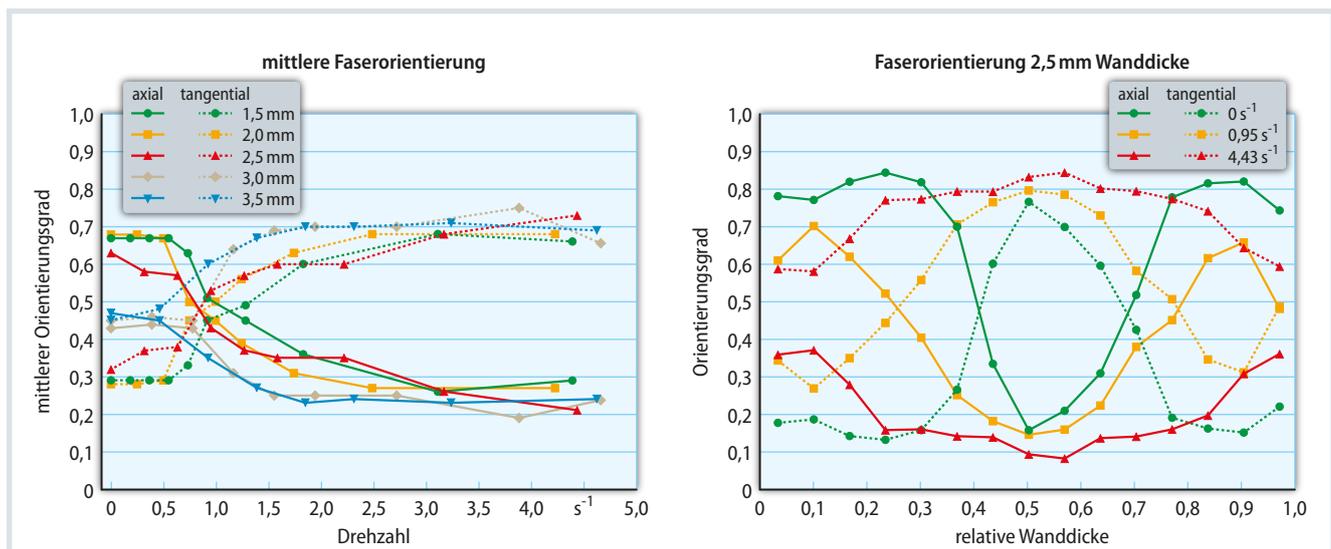


Bild 2. Durch den rotierenden Werkzeugkern kann der tangentiale Orientierungsanteil nahezu unabhängig von der Wanddicke erhöht werden (links). Bei entsprechend hohen Drehzahlen dominieren die tangentialen Fasern die Mikrostruktur über die gesamte Dicke (rechts).

Quelle: Hochschule Osnabrück; Grafik: © Hanser

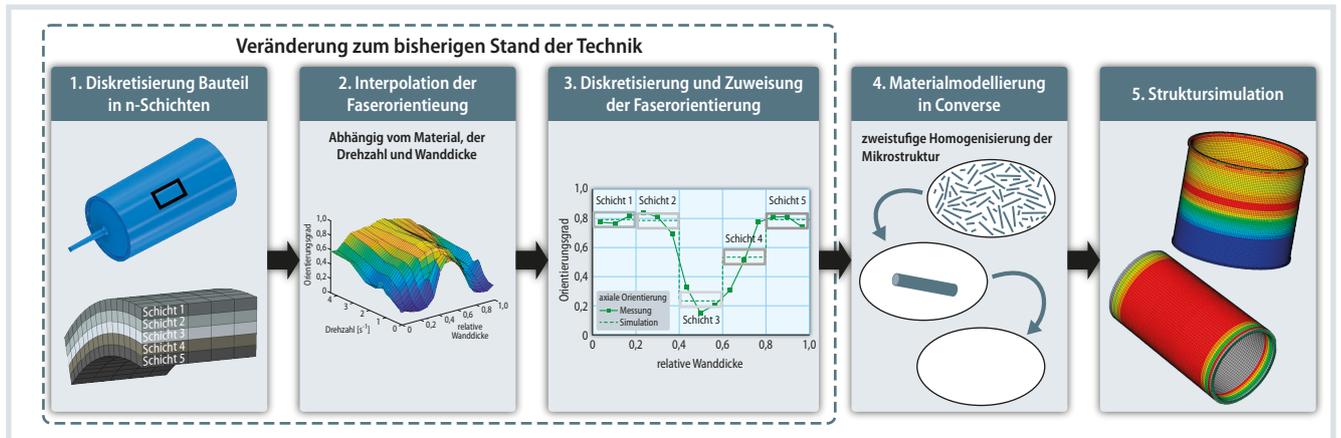


Bild 3. Die schichtweise Zuordnung der gemessenen Faserorientierungen ermöglicht mithilfe von Converse und S-Life-Plastics die anisotrope Struktursimulation gedrehter Bauteile. Quelle: Hochschule Osnabrück; Grafik: © Hanser

0,32 auf 0,73 möglich. In dem Verlauf über der relativen Wanddicke (**Bild 2 rechts**) zeigt sich, wie sich die lokale Mikrostruktur verändert. Bei ungedrehten Proben ist der bekannte Schichtaufbau, bestehend aus Rand- und Mittelschicht, deutlich sichtbar. Bei einer Rotation mit $0,95 \text{ s}^{-1}$ wird die Mittelschicht deutlich verbreitert. Eine weitere Erhöhung der Drehzahl führt dazu, dass keine wirkliche Schichtstruktur mehr vorhanden ist und der tangentialer Orientierungsgrad über der gesamten Wanddicke die Mikrostruktur dominiert.

Diese Informationen liegen jetzt für alle Messpunkte vor und ermöglichen es, den Orientierungsverlauf für weitere Drehzahlen und Wanddicken zu interpolieren und nach entsprechender Diskretisierung in die Simulation zu übertragen.

Die Stufen der Simulationsmethodik

Für die Entwicklung der Simulationsmethodik wurden die Softwares Converse für die Materialmodellierung und S-Life Plastics für die Festigkeitsberechnung (Part Engineering) verwendet, da diese eine offene Datenstruktur anbieten. In Kombination mit der Struktursimulationssoftware Abaqus (Dassault Systèmes) ist es somit möglich, die gemessene Faserorientierung zu berücksichtigen und mit anisotropen Materialkarten aus Converse erste strukturmechanische Simulationen durchzuführen.

Die neue Simulationsmethodik (**Bild 3**) unterscheidet sich durch die manuelle Zuweisung der Faserorientierung deutlich vom bisherigen Stand der Technik für die Simulation von kurzfaserverstärk-

ten Spritzgussteilen [8]. Hierfür muss das Bauteil zu Beginn in n-Schichten unterteilt werden, die einen konstanten Anteil an der Gesamtwanddicke haben sollten. Auf Basis vorliegender Messwerte kann jetzt für eine vorgegebene Drehzahl der Verlauf der Faserorientierung über der Wanddicke interpoliert werden. Unter der Annahme, dass die Faserausrichtung ausschließlich in axialer oder tangentialer Richtung liegt, werden jeder der n-Schichten die für die mikromechanische Berechnung notwendigen Tensorkomponenten der Faserorientierung zugewiesen.

Im Anschluss können die gleichen Materialkarten aus Converse verwendet werden, die auch bei der Auslegung von normalen Spritzgussteilen zum Einsatz kommen. Zuletzt erfolgen die eigentliche Struktursimulation und die Festigkeitsauswertung mit S-Life Plastics unter Verwendung eines spannungsbasierten Tsai-Hill-Kriteriums [8], das den lokalen Orientierungszustand berücksichtigt.

Die Methodik wurde anhand von Berstdruckprüfungen an dem PP-GF50 validiert (**Bild 4**), an denselben Messpunkten wie die Faserorientierungsmessungen. Die Prüfergebnisse belegen die durch die Umorientierung der Fasern verursachte signifikante Steigerung der Festigkeit. Diese nimmt mit zunehmender Drehzahl zu und kann für alle Wanddicken um über 100% gesteigert werden. Bei einer Wanddicke von beispielsweise 2,5 mm kann die Festigkeit von 57,5 bar auf 120,2 bar erhöht werden.

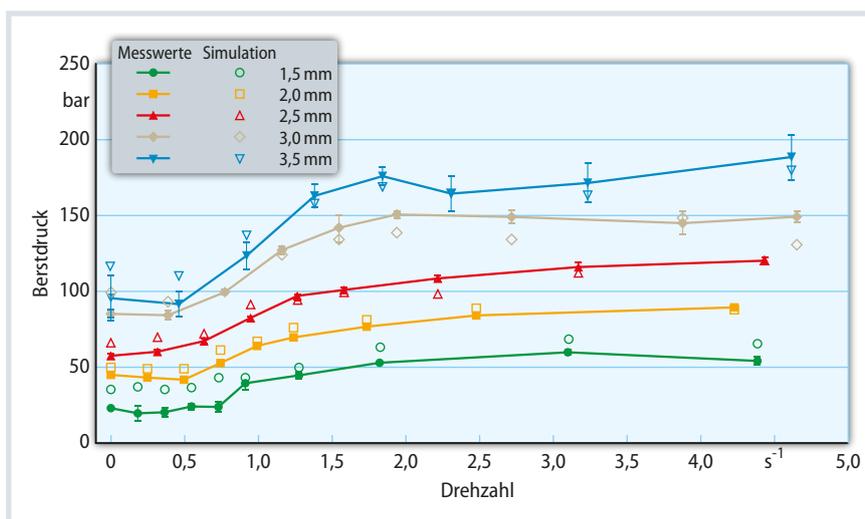


Bild 4. Die Anwendung der Simulationsmethodik ermöglicht es erstmals, die aufgrund der Rotation des Werkzeugkerns gesteigerte Berstdruckfestigkeit auch bei der Auslegung neuer Bauteile zu berücksichtigen. Quelle: Hochschule Osnabrück; Grafik: © Hanser

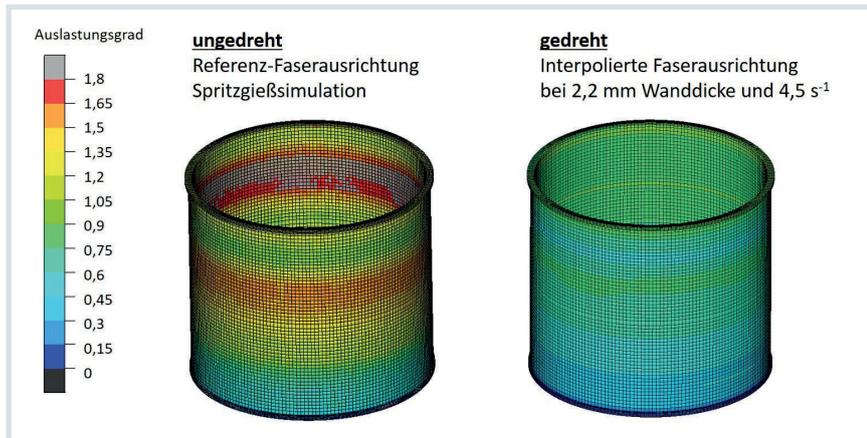


Bild 5. Dieser Anwendungsfall zeigt eine deutliche Reduzierung des Auslastungsgrads durch die Fertigung mit einem drehenden Kern. © Hochschule Osnabrück

Die Anwendung der Simulationstechnik bei der Berechnung der Berstdruckprüfungen demonstriert, dass die Festigkeitssteigerungen hiermit gut abgebildet werden. Zudem ist es möglich, Materialarten mit diesen einfachen Bauteilprüfungen zu kalibrieren, die dann bei der Auslegung weiterer innen-druckbelasteter Bauteile zum Einsatz kommen.

Übertragung in die Praxis druckbelasteter Bauteile

Die erste praktische Anwendung der Auslegungsmethodik war ein druckbelastetes Bauteil aus dem Mobilitätssektor (Bild 5). Bei dem hier dargestellten Lastfall wirken bei einer Temperatur von 80 °C Drücke in verschiedenen Höhen entlang des Bauteils von innen und außen, wobei der Maximaldruck bei 23 bar liegt. Hierfür wurden eine Referenz mit der Faserorientierung aus der Spritzgießsimulation (ungedreht) sowie ein Bauteil mit einer interpolierten Faserausrichtung bei 2,2 mm Wanddicke und einer Drehzahl von 4,5 s⁻¹ gerechnet. Mittels des Tsai-Hill-Kriteriums wurde der anisotrope Auslastungsgrad berechnet, der bei Werten größer 1 Versagen prognostiziert.

Da laut Anforderungsprofil bei dem Bauteil ein Sicherheitsfaktor von 2 vorzusehen ist, würde das ungedrehte Bauteil den Beanspruchungen mit einer Auslastung von 1,8 nicht standhalten. Durch das Drehen des Werkzeugkerns kann die Materialauslastung um 50 % auf 0,9 reduziert werden.

Fazit

Durch ein Werkzeugsystem mit drehendem Kern lässt sich die Faserorientierung im Bauteil signifikant beeinflussen und die Berstdruckfestigkeit innendruckbelasteter Bauteile erheblich steigern. Für das hier untersuchte PP-GF50 konnte gezeigt werden, wie mit zunehmender Drehzahl der axiale Orientierungsanteil ab- und der tangentialer zunimmt. Diese Veränderung der Faserorientierung führt zu einer von der Wanddicke nahezu unabhängigen Steigerung der Berstdruckfestigkeit von über 100 %.

Um die veränderte Faserorientierung bei der Auslegung von Bauteilen berücksichtigen zu können, wurde eine Simulationstechnik entwickelt und an Berstdruckversuchen eines Demonstrators validiert. Die Übertragung der Methodik auf ein Praxisbauteil zeigt, dass auf diese

Weise Bauteile entwickelt werden können, die im konventionellen Spritzgießverfahren den Anforderungen nicht gerecht würden. Dies verdeutlicht das große Potenzial des Herstellungsverfahrens sowie die praktische Relevanz der Auslegungsmethodik. ■

Info

Autoren

Prof. Dr.-Ing. Thorsten Krumpholz ist seit 2012 Leiter des Labors für Kunststoff-CAE und Faserverbundkunststoffe an der Hochschule Osnabrück; t.krumpholz@hs-osnabrueck.de

Philipp Land, M.Sc. ist seit 2016 wissenschaftlicher Mitarbeiter im Labor für Kunststoff-CAE und Faserverbundkunststoffe an der Hochschule Osnabrück.

Dank

Das Projekt (FKZ: ZF4153410TA9) wird vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) im Rahmen des Programms „Zentrales Innovationsprogramm Mittelstand (ZIM)“ gefördert. Das Gemeinschaftsprojekt der Hochschule Osnabrück, der RIA-Polymers GmbH, Zimmern o.R., und der Helmut Sundermeier GmbH, Hüllhorst, wird von Uwe Becker, Geschäftsführer der MKS-Kunststoffspritzguss GmbH, Lüdenscheid, beratend begleitet. Dank gilt zudem der Arburg GmbH + Co KG, Loßburg, für das Überlassen einer Spritzgießmaschine für die Untersuchungen und der Part Engineering GmbH, Bergisch Gladbach, für die Unterstützung bei der Umsetzung der Simulation.

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



Kunststoffe.de

Das Portal der Kunststoffindustrie!

