

Viskositätsmessung. Mit einer speziellen Düse wird das Viskositätsverhalten der Kunststoffschmelze direkt auf der Spritzgießmaschine bestimmt. Im Gegensatz zur MFI-Messung (melt flow index) bildet dieses Verfahren das Fließverhalten über einen großen Schergeschwindigkeitsverlauf ab. Auch Fließanomalien von hochgefüllten Kunststoffcompounds können mit der Messdüse ermittelt werden.

Rheologische Daten direkt an der Maschine bestimmen

CHRISTIAN GORNIK

Die Viskosität ist als das Verhältnis zwischen der Schubspannung und der Schergeschwindigkeit definiert. Wird eine ebene Platte über eine Flüssigkeit gezogen, so stellt sich ein Geschwindigkeitsprofil in dieser Flüssigkeit ein. Des Weiteren ist eine Kraft für die Bewegung der Platte erforderlich, die um so größer ist, je größer die Viskosität und der Geschwindigkeitsgradient, die so genannte Schergeschwindigkeit, sind. Während Wasser eine Viskosität von 1 mPas hat, liegt die Viskosität

von typischen Kunststoffschmelzen um den Faktor 10 000 bis eine Million höher. Kunststoffe zeigen übli-

cherweise strukturviskoses Verhalten. Ihre Viskosität ist nicht konstant, sondern hängt neben der Temperatur hauptsächlich von der Schergeschwindigkeit ab. Der Zusammenhang zwischen Schergeschwindigkeit, Temperatur und Viskosität wird mit einem Viskosimeter bestimmt. Für niedrige Schergeschwindigkeiten ($0,1$ bis ca. 10 s^{-1}) werden Platte-Platte- oder Kegel-Platte-Viskosimeter und für hohe Schergeschwindigkeiten üblicherweise Hochdruckkapillarrheometer verwendet.

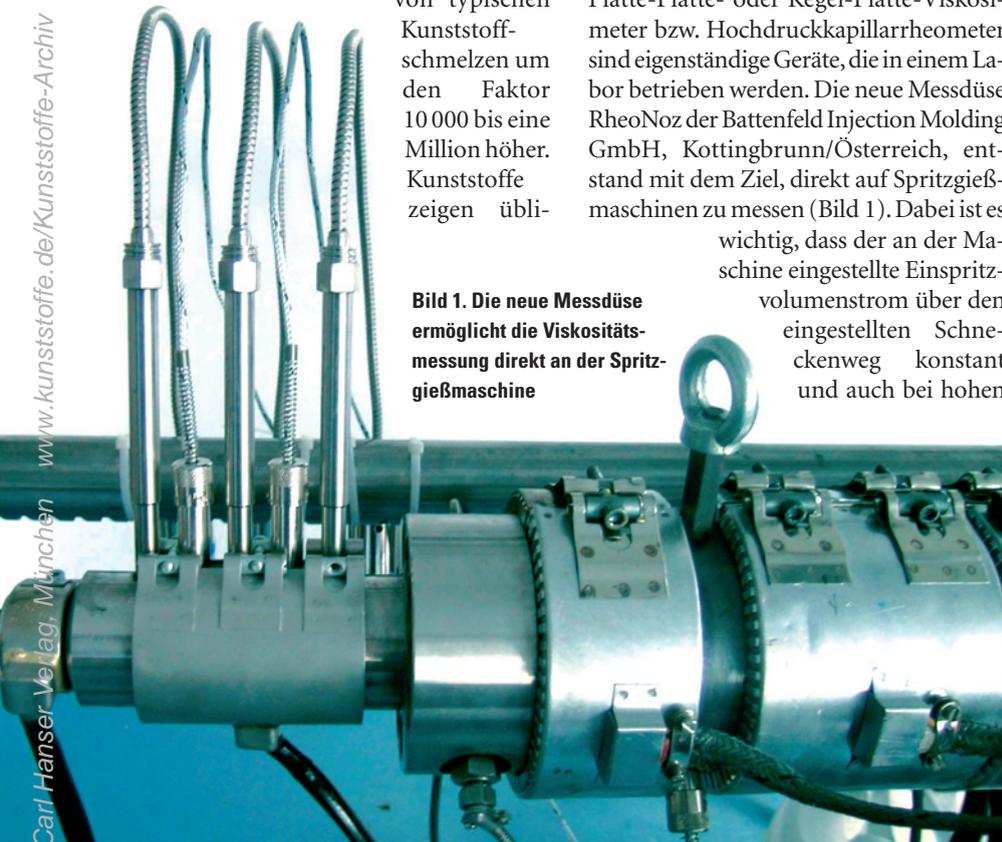
Prinzip der Messdüse

Platte-Platte- oder Kegel-Platte-Viskosimeter bzw. Hochdruckkapillarrheometer sind eigenständige Geräte, die in einem Labor betrieben werden. Die neue Messdüse RheoNoz der Battenfeld Injection Molding GmbH, Kottlingbrunn/Österreich, entstand mit dem Ziel, direkt auf Spritzgießmaschinen zu messen (Bild 1). Dabei ist es wichtig, dass der an der Maschine eingestellte Einspritzvolumenstrom über den eingestellten Schneckenweg konstant und auch bei hohen

Drücken ohne Schwankungen durchfahren wird.

Die Viskositätsmessung nutzt die Tatsache, dass beim Volumenstrom durch die Rheologie-Messdüse ein Druckabfall entlang der Messstrecke entsteht. Je höher der Druckabfall bei gleichem Volumenstrom, desto schwerer fließend ist die

Bild 1. Die neue Messdüse ermöglicht die Viskositätsmessung direkt an der Spritzgießmaschine



i	Hersteller
<p>Battenfeld Injection Molding GmbH Wiener Neustädter Straße 81 A-2542 Kottlingbrunn Österreich Tel. +43 (0) 22 52/4 04-0 Fax +43 (0) 22 52/4 04-1062 www.sms-k.com</p>	

Kunststoffschmelze, und desto höher ist die Viskosität. Entlang der Messstrecke sind drei Druck- und zwei Temperatursensoren angebracht. Damit wird der Druckabfall entlang der Messstrecke gemessen. Die Einlaufdruck-Korrektur (Bagley-Korrektur) entfällt; sie ist notwendig, wenn nur der Einlaufdruck gemessen wird.

Während eines Einspritzvorgangs wurden fünf verschiedene Volumenströme und damit fünf verschiedene Schergeschwindigkeiten aufgenommen (Bild 2). Zur statistischen Absicherung sollten die Versuche mit derselben Einstellung dreimal wiederholt werden. Dazu muss lediglich neu aufdosiert und wieder mit demselben Geschwindigkeitsprofil durch die Düse gespritzt werden. Langwierige Reinigungsvorgänge und Wartezeiten für das vollständige Aufschmelzen des Kunststoffs entfallen. Bei jeder Messung muss überprüft werden,

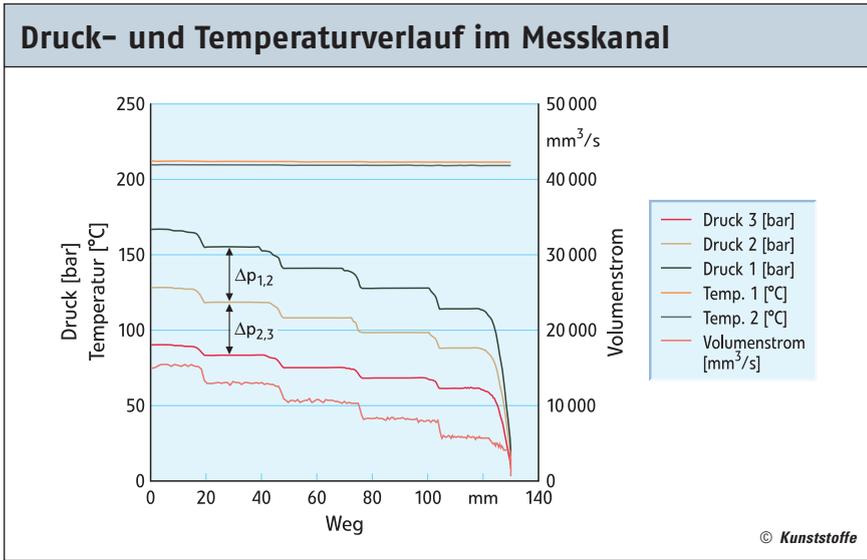


Bild 2. Drücke und Temperaturen in den Messstellen der rheologischen Messdüse bei verschiedenen Volumenströmen für Polypropylen RF825MO (Hersteller: Borealis)

ob der Druckabfall über die Messstrecke linear ist. Die Differenzdrücke zwischen den Sensoren 1 und 2 bzw. 2 und 3 sind dann gleich groß. Ist dies nicht der Fall, so liegt neben der Temperatur- auch eine Druckabhängigkeit der Viskosität vor. Auch diese Abhängigkeit lässt sich mit der neuen Düse bestimmen. Des Weiteren ist zu überprüfen, ob die Erwärmung der Schmelze entlang der Messstrecke aufgrund von Dissipation innerhalb bestimmter Grenzen bleibt. Die Differenz zwischen den beiden Temperaturen T_1 und T_2 sollte kleiner als $1\text{ }^\circ\text{C}$ sein. Bild 3 zeigt die bei drei unterschiedlichen Temperaturen gemessenen Viskositätskurven.

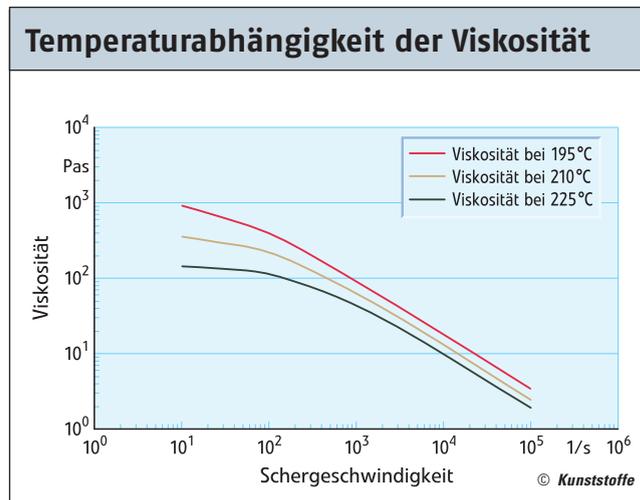


Bild 3. Viskositätskurven bei drei verschiedenen Temperaturen für Polypropylen RF825MO (Hersteller: Borealis)

Einflüsse auf die Messgenauigkeit

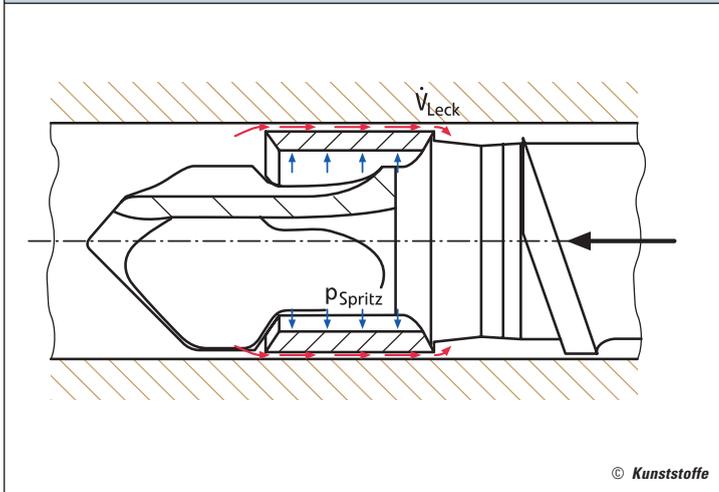


Bild 4. Leckströmung über den Sperring beim Einspritzen

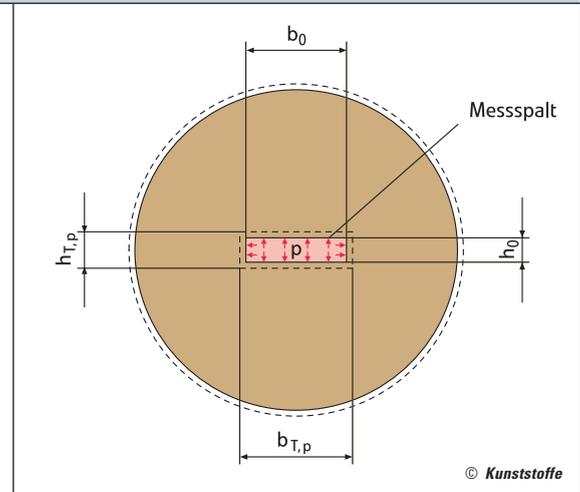


Bild 5. Die Vergrößerung des Messspalts aufgrund der thermischen und elastischen Ausdehnung (h_0, b_0 : Höhe/Breite des Messspalts bei Umgebungsbedingungen; $h_{T,p}, b_{T,p}$: Höhe/Breite des Messspalts bei Messdruck und -temperatur)

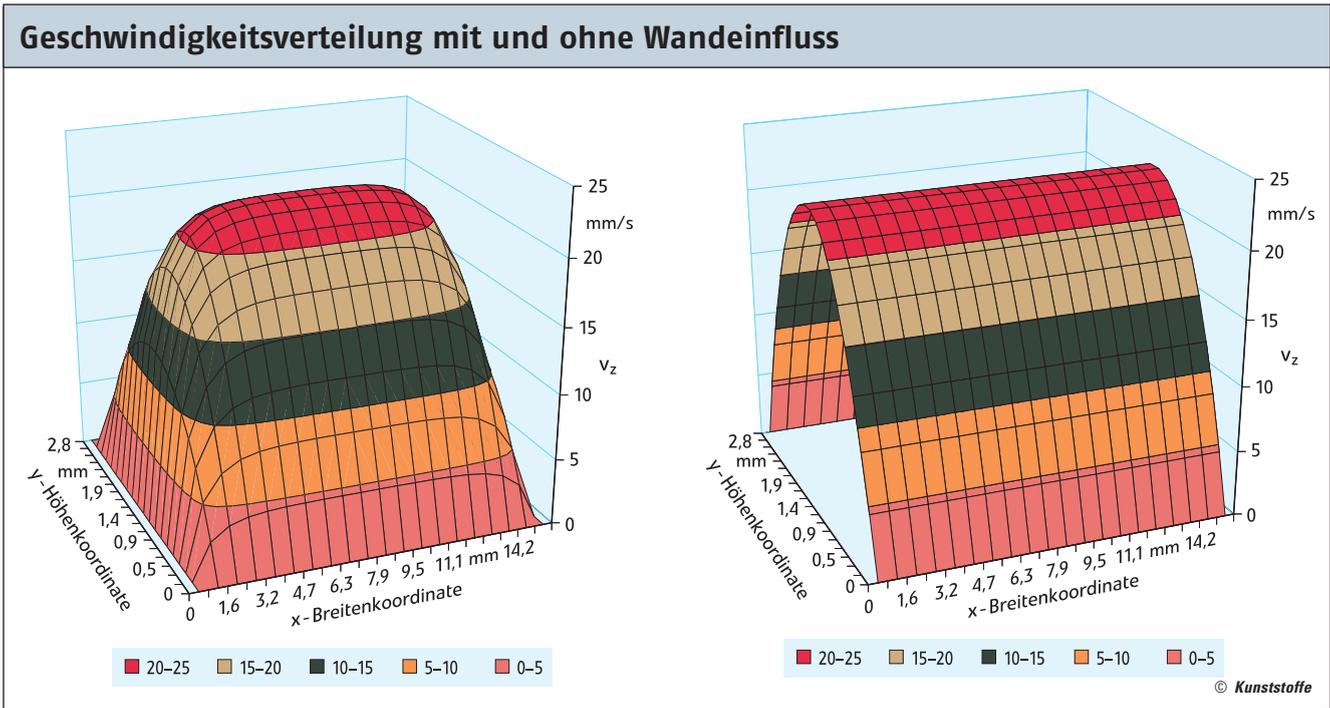


Bild 6. Reale Strömung mit (links) und ohne (rechts) Berücksichtigung der seitlichen Wandeinflüsse und Strömung, wie sie für die Berechnung zugrunde gelegt wird

dem Sperring gegenüber dem Volumenstrom durch die Düse aber meist vernachlässigbar gering. So liegt beispielsweise der Leckvolumenstrom bei einem Schneckendurchmesser von 40 mm und einem Druck von 500 bar üblicherweise unter 0,01 cm³/s.

Die Geometrie des Messspalts wird bei Raumtemperatur vermessen, und diese Messwerte werden für die Berechnungen herangezogen. Bei der Messung ändern sich die Abmaße aufgrund der thermischen Ausdehnung geringfügig. Hinzu kommt, dass sich der Messkanal der Messdüse unter Innendruck elastisch verformt. Diese Einflüsse der thermischen Ausdehnung und der elastischen Verformung auf den ermittelten Viskositätswert liegen jedoch bei

unter 1 % und können daher meist vernachlässigt werden (Bild 5). Wichtig im Zusammenhang mit den Abmessungen des Messspalts ist der Einfluss, den die seitlichen Wände auf die Strömung ausüben (Bild 6).

Da bei der realen Strömung aufgrund des Einflusses der Seitenwand bei gleichem Druckgradienten ein geringer Volumenstrom vorliegt, muss dies in Form eines Korrekturfaktors bei der Berechnung der Schergeschwindigkeit berücksichtigt werden. In einer ersten Auswertung der Messdaten wird die so genannte scheinbare Schergeschwindigkeit berechnet, die dann mit der „Weißberg-Rabinowitsch“-Methode auf die tatsächliche Schergeschwindigkeit umgerechnet werden kann.

Einfluss des Drucks auf die Viskosität

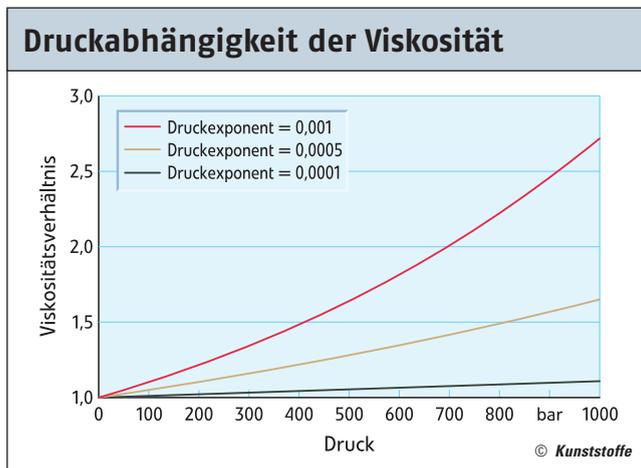
Die zwischen den drei Druckaufnehmern gemessenen Werte für den Druckabfall werden miteinander verglichen. Liegen die Werte nicht auf einer Geraden, so liegt eine ausgeprägte Druckabhängigkeit der Viskosität vor [1, 2]. Durch eine Drosseldüse nach dem Messkanal kann das Druckniveau im Messkanal eingestellt werden. Somit werden bei gleichen Volumendurchsätzen, aber unterschiedlichen Absolutdrücken Messungen durchgeführt. Ist der Druckabfall entlang der Messstrecke bei unterschiedlichen Druckniveaus verschieden, so liegt eine Druckabhängigkeit der Viskosität vor. Diese wird mit einem Exponentialansatz beschrieben:

$$\eta(p) = \eta_{p=0} \cdot e^{\kappa \cdot p}$$

Der Exponent κ liegt üblicherweise zwischen 10⁻³ und 10⁻⁴ bar⁻¹. Bei einer Steigerung des Druckniveaus um 1000 bar entspricht dies einem Viskositätsanstieg um einen Faktor zwischen 1,1 und 2,7 (Bild 7).

Bei der herkömmlichen Simulation des Werkzeugfüllvorgangs wirkt sich die Vernachlässigung der Druckabhängigkeit der Viskosität auf das Ergebnis kaum aus. Denn auch bei Messungen mit dem gängigsten Rheometer, dem Hochdruck-Kapillarrheometer, herrschen ähnliche Drücke, wie sie beim realen Spritzgießen

Bild 7. Verhältnis der Viskosität bei verschiedenen Drücken zur Viskosität beim Druck Null unter Berücksichtigung der Druckabhängigkeit



© 2005 Carl Hanser Verlag, München www.kunststoffe.de/Kunststoffe-Archiv Nicht zur Verwendung in Intranet- und Internet-Angeboten sowie elektronischen Verteilern

prozess im Werkzeug auftreten. Beim Dünnwandspritzgießen und beim Spritzgießen von Mikroformteilen können die Viskositätsmessung und die Berücksichtigung der Druckabhängigkeit jedoch die Qualität des Simulationsergebnisses sehr wohl beeinflussen.

Bestimmung von Fließanomalien

Die meisten Kunststoffe haften bei der Strömung durch eine Düse oder in einem Werkzeug an der Wand. Beim Durchströmen der Messdüse haben also die wandnahen Schmelzbereiche die Geschwindigkeit Null. Bei manchen Polymeren, beispielsweise PVC-U, sowie bei Kunststoffen mit inkorporierten Schmierstoffen tritt unter bestimmten Fließbedingungen ein Wandgleiten auf [3, 4]. Das Gleitfilmmodell geht davon aus, dass eine Zweischichtenströmung vorliegt, wobei die äußere Schicht an der Wand haftet, die jedoch so niedrigviskos ist, dass man von einem Gleitfilm sprechen kann. Beim Mooney-Modell gehen die Schichtdicke sowie die Viskosität im Gleitfilm gegen Null. Das Reibmodell von Uhlund beschreibt das Fließen nicht wandbenetzender Flüssigkeiten mittels Coulombscher Reibung zwischen Schmelze und Düsenwand. Bei Kunststoffen, die zum Wandgleiten neigen, liegt unter der kritischen Schubspannung τ_{krit} ein wandhaftendes Fließverhalten vor, während bei Schubspannungen über τ_{krit} Wandgleiten auftritt. Durch auswechselbare Einsätze in der Messdüse lässt sich das Fließverhalten mit unterschiedlichen Kanaltiefen bestimmen (Bild 8).

Verhalten gefüllter Kunststoffcompounds

Auch bei hochgefüllten Kunststoffcompounds, wie beispielsweise Holz-Kunststoff-Compounds oder Feedstocks, tritt

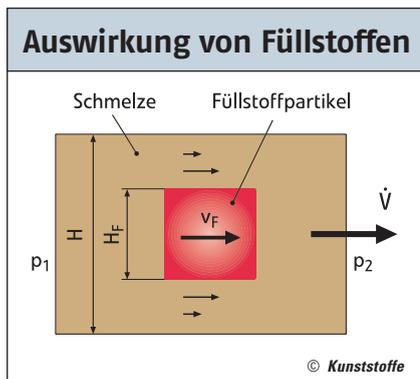


Bild 10. Modell zur Beschreibung des Fließverhaltens von gefüllten Kunststoffschmelzen

das Wandgleiten auf [5]. Feedstocks kommen beim Pulverspritzgießen (PIM, powder injection moulding) zum Einsatz und setzen sich aus einem Bindersystem und einem Metall- oder Keramikpulver zusammen. Das Bindersystem besteht meist aus einer Polymer-Wachs-Mischung. Dies verbessert einerseits die Fließeigenschaften des Feedstocks und erlaubt es andererseits, den Binder nach dem Spritzgießen einfach auf thermischem Wege zu entfernen (Entbindern).

Fließt das System durch eine Düse, so ist je nach Auslassquerschnitt ein höherer oder niedrigerer Druck erforderlich. Der Druckabfall entlang eines Fließwegs mit gleich bleibenden Abmessungen ist jedoch gleich. Durch den Druck verdichtet sich das Gesamtsystem (Bild 9). Da jedoch die Pulverteilchen bei den im Spritzgießpro-

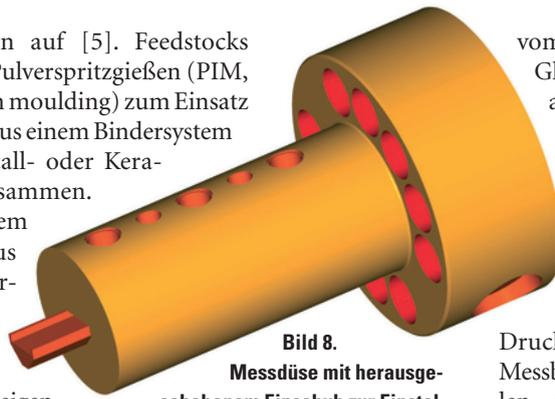


Bild 8. Messdüse mit herausgeschobenem Einschub zur Einstellung unterschiedlicher Kanaltiefen

vom Scher- zum Gleitfließen auch vom Absolutdruck ab. An der Rheo-Noz lassen sich durch eine Drosseldüse unterschiedliche Druckniveaus im Messbereich einstellen, so dass diese Fließanomalie von Feedstocks für das

Pulverspritzgießen messbar ist.

Bei gefüllten Kunststoffen ist bei der Interpretation der Messergebnisse zu beachten, dass die Strömungsverhältnisse in der Schmelze aufgrund der Füllstoffe im Vergleich zu ungefüllten Kunststoffen abweichen. Ein einfaches Modell verdeutlicht die Auswirkung von Füllstoffen auf die Geschwindigkeitsverteilung. Den Berechnungen wird ein Newtonsches Stoffverhalten zugrunde gelegt. Als Füllstoff

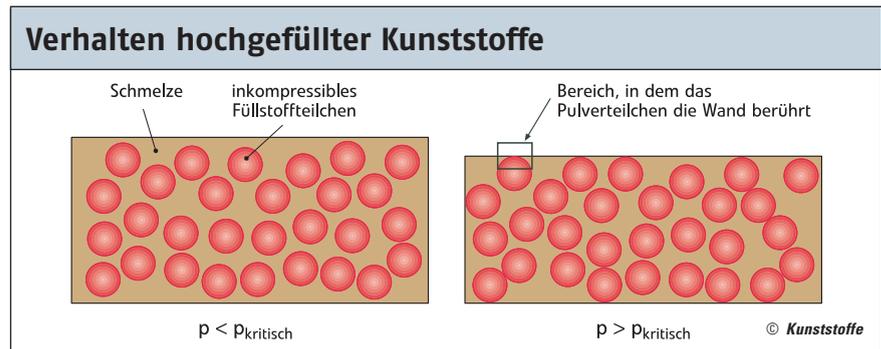
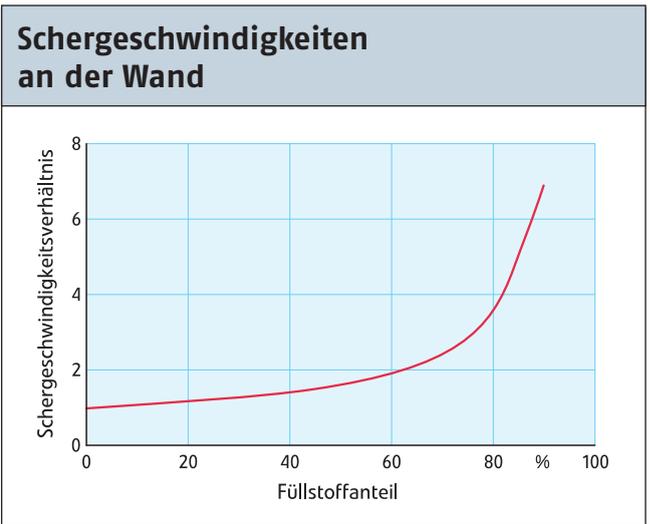
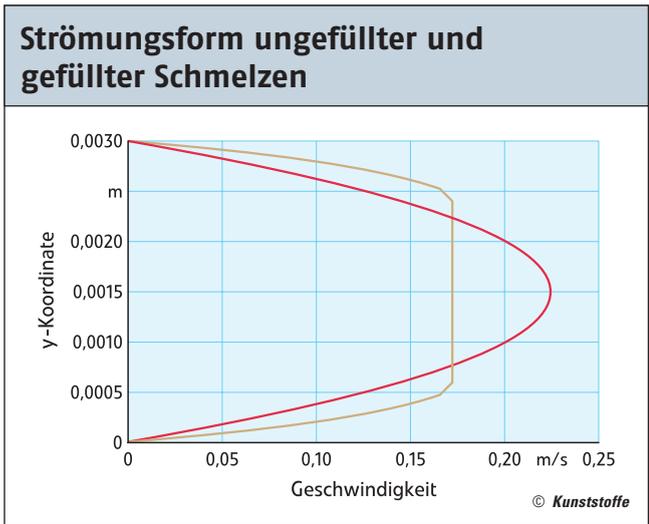


Bild 9. Hochgefüllter Kunststoff bei geringem Druck (links) und bei hohem Druck (rechts). Die Anzahl der direkten Kontaktstellen der Füllstoffteilchen mit der Wand nimmt mit steigendem Druck zu

zess vorherrschenden Drücken als inkompressibel betrachtet werden können, wird nur der Binder verdichtet. Die Pulverteilchen rücken somit nicht nur näher zusammen, sondern bilden auch mehr Kontaktstellen zur Düsen- bzw. Werkzeugwand aus. In diesen Kontaktstellen kann nun nicht mehr vom Wandhaften der Schmelze ausgegangen werden. Die Schergeschwindigkeit zwischen den wandnahen Pulverteilchen steigt mit abnehmendem Abstand zur Wand. Es bildet sich ein Schmierfilm aus, bis das Polymer die entstehenden Schubspannungen nicht mehr übertragen kann. Die wandnahen Pulverteilchen berühren nun direkt die Wand. In diesen Bereichen liegt Coulombsche Reibung vor, während in den benachbarten Bereichen nach wie vor das Wandhaften des Polymers auftritt. Bei gefüllten Systemen hängt also der Übergang

wird ein festes Partikel, dessen Höhe $H_F = \phi H$ ist, in der Kanalhöhe H angenommen (Bild 10).

Darin ist ϕ der Füllstoffanteil. Da das Füllstoffpartikel unbeschleunigt in der Strömung treibt, wirkt in der Grenzfläche zwischen Füllstoffpartikel und Schmelze keine Schubspannung. Damit ist auch die Schergeschwindigkeit an dieser Stelle gleich Null. Mit dieser Randbedingung errechnet man die Geschwindigkeit des Partikels. Bei Viskositätsmessungen werden der Druckabfall und der Volumenstrom gemessen, und daraus wird die Viskosität abgeleitet, wobei allerdings die Strömungsform 1 zugrunde gelegt wird. Tatsächlich liegt jedoch in dem dargestellten Modell die Strömungsform 2 (Bild 11) vor. Es kommt daher zu einer Schergeschwindigkeitsüberhöhung im Vergleich zum ungefüllten System (Bild 12).



Zusammenfassung

Die Messwerte der RheoNoz können als Eingangsgrößen für die Füllsimulation von Spritzgießwerkzeugen dienen. Neben der Bestimmung der Viskositätskurve für Kunststoffe gestattet es die rheologische Messdüse aufgrund ihrer konstruktiven Gestaltung auch, Fließanomalien von hochgefüllten Kunststoffcompounds, z. B. Holz-Kunststoff-Compounds oder Feedstocks für das Pulverspritzgießen, zu bestimmen. ■

DANK

Die Ergebnisse wurden im Rahmen des Projekts „Verbesserungen an Plastifiziereinheiten von Spritzgießmaschinen“ erarbeitet. Projektpartner ist das Institut für Kunststoffverarbeitung an der Montanuniversität Leoben, Österreich. Der Autor dankt Univ.-Prof. Dr.-Ing. Günter R. Langecker und Dr. Gernot Zitzenbacher für die gute Zusammenarbeit, der Borealis GmbH, Linz, für die Bereitstellung von Testmaterial sowie dem österreichischen Forschungs-

förderungsfonds der gewerblichen Wirtschaft für die finanzielle Unterstützung.

LITERATUR

- 1 Laun, H. M.: Praktische Rheologie der Kunststoffe und Elastomere. VDI Gesellschaft Kunststofftechnik 1991
- 2 Beiermeister, B.: In-line Rheometrie beim Spritzgießen – Ein Beitrag zur kontinuierlichen Qualitätserfassung. Beitrag zum 13. Stuttgarter Kunststoff-Kolloquium 1993
- 3 Friesenbichler, W.: Ermittlung von rheologischen Kenndaten für wandgleitende PVC-U Mischungen und ihre Anwendung für Düsenberechnungen beim Extrudieren. Dissertation an der Montanuniversität Leoben 1992
- 4 Gornik, C.; Bleier, H.: Läuft wie geschmiert. Kunststoffe 93 (2003) 4, S. 72–74
- 5 Kukla, C.; Langecker, G. R.; Friesenbichler, W.; Djuretsek, I.: Rheology of Feedstocks. Vortrag, PIM Konferenz 2004

DER AUTOR

DIPL.-ING. CHRISTIAN GORNIK, geb. 1974, studier-

te Kunststofftechnik an der Montanuniversität Leoben und arbeitet seit 2000 in der Anwendungstechnik der Battenfeld Injection Molding GmbH, Kottlingbrunn.

SUMMARY PLAST EUROPE

Determining Rheological Data Directly at the Machine

VISCOSITY MEASUREMENT. A special nozzle is used to determine the viscosity behaviour of the plastic melt directly on the injection moulding machine. Unlike melt flow index (MFI) measurement, this method presents the flow behaviour across a large shear-rate profile. The measurement nozzle can also determine flow anomalies in highly filled plastic compounds.

NOTE: You can read the complete article by entering the document number **PE103219**