

# Verstreckung messen, Schaum verbessern

## *Inline-Dehnrheometer ermöglicht Verstreckung treibmittelbeladener Schmelzen*

Während die Schmelze im Extruder und im Werkzeug primär auf Scherung belastet wird, kommt es bei der Schaumextrusion beim Aufschäumen des Kunststoffes zu einer biaxialen Dehnbeanspruchung des Materials. Übliche zur Materialcharakterisierung herangezogene Kennwerte, wie z. B. die Scherviskosität oder die Schmelze-Massefließrate, lassen folglich keine Rückschlüsse auf die Schäumbarkeit eines Kunststoffes zu. Ein auf Basis eines iterativen Verfahrens entwickelter Fließkanal führt zu einer konstanten biaxialen Verstreckung der Schmelze und eröffnet als Inline-Dehnrheometer neue Möglichkeiten hinsichtlich der Materialcharakterisierung unter Verarbeitungsbedingungen.

**K**unststoffverarbeitungstechnologien wie die Schaumextrusion versprechen neben Kosten- und Ressourcenersparnissen auch verbesserte Produkteigenschaften. So zeichnen sich geschäumte Kunststoffe durch eine hohe Dämm- und Isolationswirkung aus. Je nach verwendetem Kunststoff und eingesetztem Treibmittel können die Schaumprodukte in ihrem Eigenschaftsprofil (u.a. Härte, Flexibilität, Dichte) variieren. Besonders wichtig ist das Erreichen einer möglichst feinporigen und homogenen Zellstruktur, da durch feinzellige Schaummorphologien höhere mechanische Eigenschaften (z.B. Druckfestigkeit) der geschäumten Produkte erreicht werden. Die Zellstruktur hängt von einer Vielzahl verschiedener Prozess- und Materialparameter ab. Zum Erzielen kleiner Zellstrukturen sollte beispielsweise der Deformationswiderstand des Kunststoffes groß genug sein, um ein starkes Anwachsen der Zellen zu verhindern. Der Deformationswiderstand wird sowohl von der lokalen Deformationsgeschwindigkeit, der Deformationsgeschichte als auch von der Temperatur beeinflusst [1]. Die dehnreologischen Eigenschaften und deren Charakteristik sind jedoch stark vom molekularen Polymeraufbau, dessen Verzweigungsgrad und der Molmassenverteilung abhängig. So nimmt die Dehnviskosität bei höheren Dehnraten der Schmelze üblicherweise ab, kann allerdings je nach Polymeraufbau sogar zu ei-

ner Dehnverfestigung führen [2, 3, 4]. Obwohl die Dehnviskosität somit einer der wichtigsten Kennwerte für die Beurteilung der Verschäumbarkeit von Kunststoffen darstellt, fehlt bislang ein umfassendes Verständnis über die Wechselwirkung zwischen der Molekularstruktur des verwendeten Kunststoffes und den resultierenden Schaumeigenschaften in der Schaumextrusion. Zudem weisen zahlreiche Kunststoffe (insbesondere Polyester) eine unzureichende Schmelzefestigkeit auf, sodass die beim Schäumen auftretenden hohen Schmelzedeformationen häufig zum Kollabieren der Zellwände führen.

Diesem unerwünschten Effekt kann meist nur über die Modifikation der Kunststoffe auf molekularer Ebene oder speziell entwickelte Additive begegnet werden. Bei der Verifikation dieser Verbesserung liefert ein Schäumversuch jedoch nur eine qualitative statt einer quantitativen Aussage. Zudem besteht aus wirtschaftlicher Sicht der Bedarf, die Kosten für die Herstellung der Schaumprodukte unter Einsatz bestehender Anlagentechnik stetig zu reduzieren und Produktentwicklungen effizient voranzutreiben, um z.B. auf neue Anforderungen der Kunden reagieren zu können. Zusammenfassend können zahlreiche Kunststoffe nur unter Berücksichtigung enger Prozessgrenzen oder unter Nutzung von modifizierten Materialien sowie Additiven verschäumt werden. Die Produktentwicklung und die

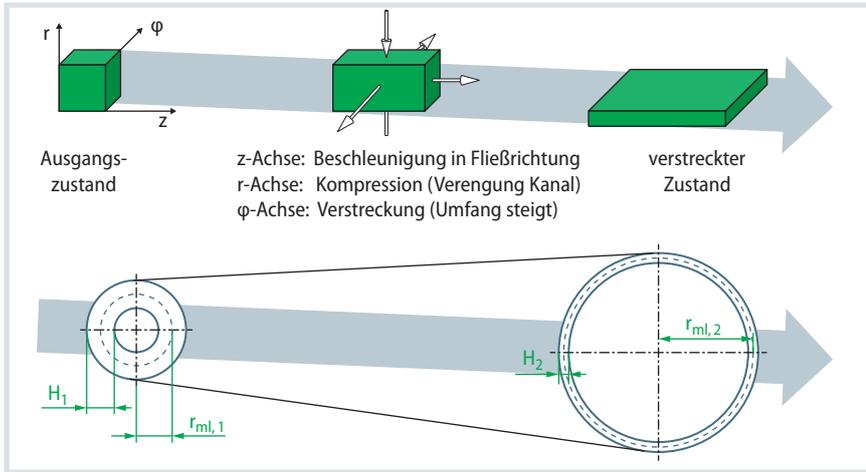
Ermittlung eines geeigneten Prozessfensters ist jedoch häufig ein langwieriger, iterativer Prozess.

Die Entwicklung einer praktikablen Messmethodik im Bereich der Dehnrheologie sowie die Vertiefung des Prozess- und Materialverständnisses zum Einfluss der Dehnrheologie auf die Schaumherstellung soll zukünftig eine bedarfsgerechte Prozess- und Materialanpassung beim Verarbeiter und eine Substitution von Additiven oder Materialmodifikationen ermöglichen.

### *Iterativ-analytische Berechnung einer Rheometergeometrie*

Mit dem Ziel, eine Rheometergeometrie zu bestimmen, die den beim Schäumen auftretenden biaxialen Verstreckungsprozess nachbilden kann, wurde am IKV eine iterativ-analytische Auslegungsmethodik für ein neuartiges Dehnrheometer entwickelt. Dieses ist dem Schaumextruder nachgeschaltet und ermöglicht eine prozessintegrierte dehnreologische Materialcharakterisierung. Der Lösungsansatz basiert auf der Idee, die Schmelze in einem ringspaltförmigen Fließkanal sowohl in Fließ- als auch in Umfangsrichtung zu beschleunigen (**Bild 1**).

Die Beschleunigung in Fließrichtung erfolgt durch eine sinkende Höhe des Fließkanals. Gleichzeitig erfolgt die Beschleunigung in Umfangsrichtung durch eine Aufweitung des Fließkanals. Um eine



**Bild 1.** Biaxiale Deformation eines Volumenelements und schematische Darstellung des Ein- und Austrittsquerschnitts des Rheometers Quelle: IKV, Grafik: © Hanser

annähernd konstante und äquibiaxiale Dehnrate zu erreichen, muss die Geometrie an die lokalen Geschwindigkeiten angepasst werden. Dazu ist eine Berechnungsvorschrift notwendig. Diese basiert auf der Methode der repräsentativen Größen und zerlegt einen komplexen Fließkanal in eine Anzahl (i) analytisch lösbarer Ringspaltsegmente (RSE). Unter der Annahme einer isothermen, laminaren, stationären Strömung und einer mittels Potenzgesetz beschreibbaren Strukturviskosität wird die Rheometergeometrie iterativ bestimmt. Unter Berücksichtigung der Verstreckung quer zur Fließrichtung und unter Vorgabe der gewünschten Querdehnrate  $\dot{\epsilon}_q$  wird der Radius der Mittellinie  $r_{(m,i)}$  des Fließkanals als Funktion der Rheometerlänge  $z$  bestimmt. Für  $\dot{\epsilon}_q$  wird vereinfachend angenommen, dass Gleichung 1 gilt (siehe nebenstehenden Kasten).

Mit dem Wert von  $r_{(m, \text{Auslass})}$  am Auslass als Designvariable kann  $r_{(m,i)}$  für alle

Ringspaltsegmente stromaufwärts bestimmt werden. Die Berücksichtigung der Verstreckung in Fließrichtung erfolgt anhand der Höhe  $h_i$  des Fließkanals an der jeweiligen diskreten Stelle des Fließwegs. Unter Vorgabe der gewünschten Längsdehnrate  $\dot{\epsilon}_{l,i}$  werden die Höhen  $h_i$  des Fließkanals als Funktion der Rheometerlänge  $z$  bestimmt. Für  $\dot{\epsilon}_l$  wird vereinfachend angenommen, dass der Zusammenhang in Gleichung 2 gilt (siehe nebenstehenden Kasten). Mithilfe der Solver-Funktion des Kalkulations-

programms Excel von Microsoft wird die quadrierte Fehlersumme von Soll- und Ist-Werten von  $\dot{\epsilon}_i$  durch Anpassung aller  $h_i$  minimiert. Hierbei werden automatisch die Verweilzeiten und Radien  $r_{(m,i)}$  angepasst. Die Außen- und Innenwand des Fließkanals mit biaxialer Verstreckwirkung setzen sich somit aus einzelnen Punkten der Ringspaltsegmente zusammen. Jeder Punkt auf dem Fließkanal wird über eine r- und eine z-Koordinate (Radius und Rheometerlänge) definiert. Der Abstand zweier benachbarter Punkte ergibt sich wiederum aus der Vorgabe der Gesamtlänge des Rheometers sowie der Anzahl der Ringspaltsegmente.

Der Auslegung liegt eine Auflösung von 50 Ringspaltsegmenten und eine vorgegebene Dehnrate von  $3 \text{ s}^{-1}$  zugrunde. Die Wahl der Dehnrate erfolgte in Hinblick auf den Gesamtdruckverlust sowie in Anlehnung an die Literatur. Typische Dehnraten in der Schaumextrusion werden mit bis zu  $9 \text{ s}^{-1}$  abgeschätzt, wobei sich die treibmittelbeladene Schmelze am Werkzeugaustritt um den Faktor 20 bis 50 ausdehnt [1, 6].

In **Bild 2** sind die Veränderung der Fließkanalkontur der ersten 20 mm des Dehnrheometers dargestellt, welche durch die iterativ-analytische Auslegungsmethodik bestimmt wurde. »

**Gleichung 1**

$$\dot{\epsilon}_{q,i} = \frac{\Delta \text{Umfang}}{\Delta \text{Zeit}} = \frac{\text{relative Änderung des Umfangs zum RSE } (i+1)}{\text{mittlere Verweilzeit im RSE } i}$$

**Gleichung 2**

$$\dot{\epsilon}_{l,i} = \frac{\Delta \text{Geschwindigkeit}}{\Delta z} = \frac{\text{Änderung d. mittl. Geschwindigkeit zu RSE } (i+1)}{\text{Länge des RSE } i}$$



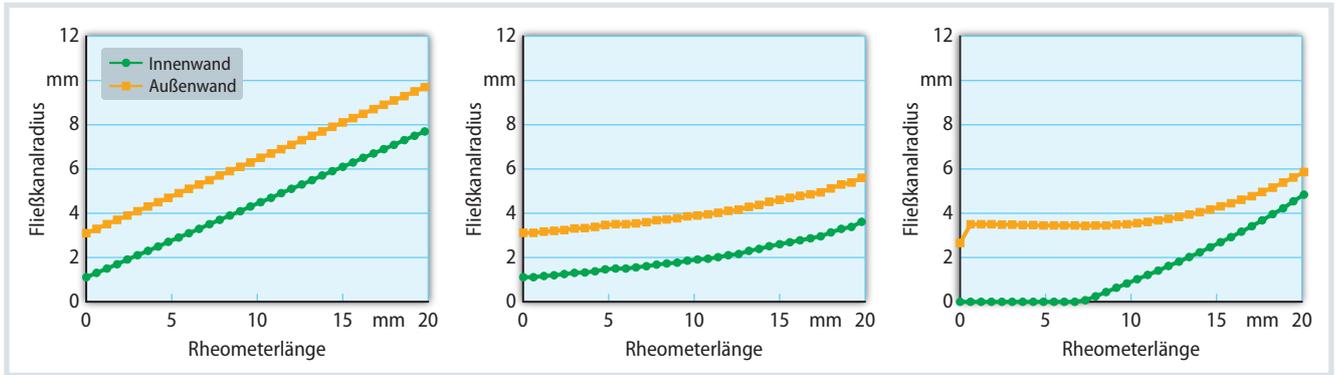
# Kunststoff eCampus

Individuelle Weiterbildung  
für Ihre Mitarbeiter

Jetzt kostenlose Demoversion testen!

Erster Kurs: Werkstoffkunde I

www.Kunststoff-eCampus.de



**Bild 2.** Entwicklungsschritte bis zur Fließkanalkontur mit biaxialer Verstreckwirkung: Ausgangsfließkanalkontur (links), Fließkanal nach Umfangsoptimierung (Mitte), Fließkanal nach Umfangs- und Höhenoptimierung (rechts) Quelle: IKV, Grafik: © Hanser

Ausgehend von dem linearen Verlauf der Außen- und Innenwand der Ausgangsfließkanalkontur (links), führt die Umfangsoptimierung bei konstanter Fließkanalhöhe zu einer Zunahme des mittleren Fließkanalradius (Mitte). Die Kombination aus Umfangs- und Höhenoptimierung führt zu einer Abnahme der Fließkanalhöhe bei zeitgleicher Zunahme des mittleren Fließkanalradius (Diagramm, rechts) und somit theoretisch zu einer biaxialen Dehnung der Schmelze. Die ersten 7 mm des Fließkanals werden aufgrund der konstanten Fließkanalhöhe bei der Überführung in ein Werkzeugkonzept nicht berücksichtigt. Die sich ergebende Messstrecke/Fließkanalkontur des Dehnrheometers ist schematisch in **Bild 3** dargestellt, wobei auch der errechnete Druckverlust aufgeführt ist.

Zur Ermittlung der biaxialen Dehnviskosität und somit zur prozessnahen Materialcharakterisierung wird der Gesamtdruckverlust an drei Positionen mit Druckaufnehmern längs der Messstrecke während des Extrusionsvorgangs kontinuierlich erfasst. Dieser kumulierte Gesamtdruckverlust setzt sich aus einem Scher- sowie einem Dehnungsanteil zusammen (vgl. **Bild 3**).

Der Druckverlust der Scherviskosität ist stark von der Fließkanalgeometrie abhängig und kann in jedem Ringspaltsegment mit der Formel für ein Breitschlitzwerkzeug nach [5] bestimmt und vom Gesamtdruckverlust subtrahiert werden. Der sich ergebende Druckverlust der Dehnung ( $\Delta p_{dehn}$ ) kann gemäß folgender Gleichung bestimmt werden und muss bei konstanten Dehngeschwindigkeiten linear sein:

$$\Delta p_{dehn} = \Delta p_{mess} - \Delta p_{scher}$$

Aus dem ermittelten Druckverlust der Dehnung kann so mit der bei der Auslegung vorgegebenen Dehnrate ( $\dot{\epsilon}$ ), die Dehnviskosität  $\eta(\dot{\epsilon})$  nach nachfolgender Gleichung bestimmt werden:

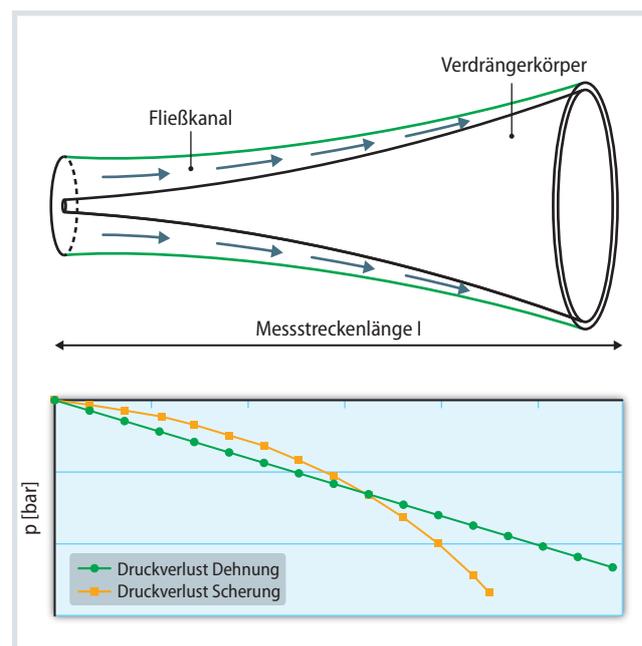
$$\eta(\dot{\epsilon}) = \frac{\Delta p_{dehn}}{\dot{\epsilon}}$$

### Überprüfung der Auslegungsmethodik

Zur Überprüfung der auf vereinfachten Annahmen basierenden Auslegungsmethodik, wurde das „reale“ Verhalten von Schmelze simuliert. Hierzu wurde die Open-Source-Strömungssimulationssoftware OpenFOAM eingesetzt. Aus dem Vergleich von Simulation und iterativ-analytischer Lösung werden Korrekturfak-

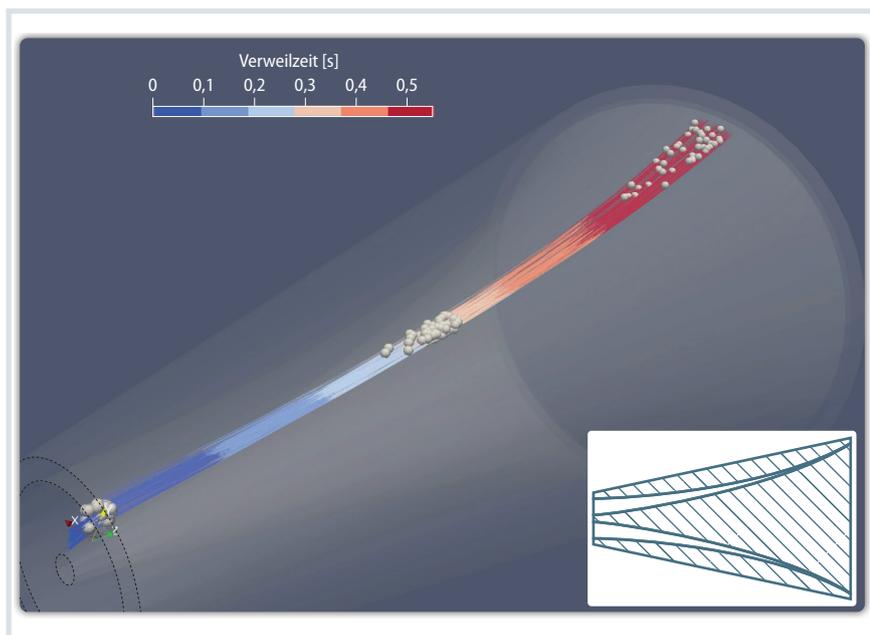
toren der Dehnraten und der Druckverluste für die Berechnungsmethode bestimmt. In **Bild 4** ist die biaxiale Verstreckwirkung des Fließkanals visualisiert. Zur einfachen Veranschaulichung ist hierbei die durch die Fließkanalkontur hervorgerufene biaxiale Verstreckung anhand der Deformation am Einlass zugegebenen Volumenelemente (Partikelwolke) längs des Fließkanals dargestellt. Für die Verweilzeiten 0 s, 0,25 s und 0,5 s sind die Partikel dargestellt, für die Zwischenbereiche nur deren Bahnen.

Am Fließkanaleintritt (Verweilzeit = 0 s) liegt eine ideal kugelförmige Partikelwolke vor. Durch die Verstreckung in Umfangs- und Extrusionsrichtung sind die Partikel bereits in der Mitte des Fließkanals (nach ca. 0,25 s) flächig angeordnet, wobei an dieser Stelle eine größere Ausdehnung in Extrusions- als in Umfangs-



**Bild 3.** Schematische Darstellung der Messstrecke des Dehnrheometers (oben); errechneter Druckverlust durch Scherung und Dehnung auf Basis der Auslegungsmethodik (unten)

Quelle: IKV, Grafik: © Hanser



**Bild 4.** Darstellung der vom iterativ-analytisch ausgelegten Fließkanal ausgehenden biaxialen Verstreckwirkung Quelle: IKV, Grafik: © Hanser

richtung sichtbar wird. Am Ende des Fließkanals ist die Ausdehnung der Partikelwolke in Extrusionsrichtung fast doppelt so groß wie die Ausdehnung in Umfangsrichtung. Es zeigt sich, dass die Schmelze durch die ermittelte Fließkanalgeometrie sowohl in Längs- also auch in Querrichtung gedehnt wird und somit in der betrachteten Fließkanalkontur eine biaxiale Verstreckung vorliegt.

### Fazit und Ausblick

Mit einer am IKV entwickelten iterativ-analytischen Auslegungsmethodik ist die Auslegung eines Dehnrheometers erfolgt, welches in Zukunft zur prozessintegrierten Bestimmung der zum Schäumen wichtigen biaxialen dehnreologischen

Materialeigenschaften herangezogen werden kann. In einem ersten Auslegungsschritt wurde eine Fließkanalgeometrie zur Umsetzung des neuartigen Dehnrheometerkonzepts exemplarisch für eine biaxiale Dehnrate von  $3 \text{ s}^{-1}$  bestimmt. Im zweiten Schritt erfolgte eine Strömungssimulation mit dem Ziel, die Auslegungsmethodik zu validieren. Gezeigt werden konnte, dass die Volumenelemente der Schmelze durch die ermittelte Fließkanalgeometrie sowohl in Längs- also auch in Querrichtung gedehnt werden. Zur Erzielung einer äquibiaxialen Verstreckung wird das Fließkanaldesign zukünftig iterativ weiterentwickelt und anschließend in ein Werkzeugkonzept zur Montage an der Schaumextrusionsanlage überführt. ■

## Die Autoren

**Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christian Hopmann** ist Inhaber des Lehrstuhls für Kunststoffverarbeitung der RWTH Aachen und Leiter des Instituts für Kunststoffverarbeitung (IKV) in Industrie und Handwerk an der RWTH Aachen.

**Nicolas Reinhardt, M.Sc.**, arbeitet seit 2017 als wissenschaftlicher Mitarbeiter im Bereich Schaumextrusion am IKV; Nicolas.Reinhardt@ikv.rwth-aachen.de

**Malte Schön, M.Sc.**, arbeitet seit 2016 als wissenschaftlicher Mitarbeiter im Bereich Extrusionswerkzeuge und Computer Aided Engineering (CAE) und seit 2021 im Bereich der Schneckenmaschinen am IKV.

**Leonie Alexandra Frings, B.Sc.**, hat ihre Bachelorarbeit zur Fließkanalauslegung mit biaxialer Verstreckwirkung am IKV geschrieben.

**Dr.-Ing. Martin Facklam** ist seit 2019 Abteilungsleiter der Extrusion und Kautschuktechnologie am IKV.

### Dank

Das IGF-Vorhaben 21302 N der Forschungsvereinigung Kunststoffverarbeitung wird 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.

## Service

### Literatur & Digitalversion

- Das Literaturverzeichnis und ein PDF des Artikels finden Sie unter [www.kunststoffe.de/onlinearchiv](http://www.kunststoffe.de/onlinearchiv)

# Kunststoffe.de

Das Portal der Kunststoffindustrie!

