

# Mischvorgänge sichtbar gemacht

## Experimentelle Ermittlung der Strömungsvorgänge an Knetelementen

In additiver Fertigung hergestellte Variationen von Knetelementen eines gleichläufigen Doppelschneckenextruders zielen darauf ab, den verfahrenstechnischen Nutzen zu erhöhen. Ein transparentes Gehäuse erlaubt die computerunterstützte Quantifizierung der Strömungsvorgänge, woraus sich elementspezifische Eigenschaften ableiten lassen.

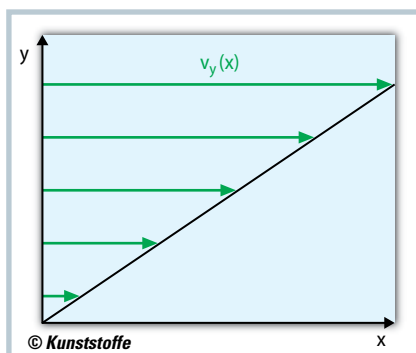
Der gleichläufige dichtkämmende Doppelschneckenextruder hat besondere Bedeutung bei der Aufbereitung von Polymeren mit Zusatzstoffen. Um ein optimales Mischergebnis bei möglichst geringen Kosten (hoher Durchsatz, geringer Energieeinsatz) zu erzielen, wird bis zum einzelnen Mischelement hin optimiert. Im Folgenden wird dargestellt, wie das dispersive Mischverhalten von Knetelementen durch das Erhöhen von Dehnströmungsanteilen bei simultaner Reduktion der Scherbelastung verbessert wird.

### Theoretische Vorbetrachtung

Die Schergeschwindigkeit eines in x-Richtung bewegten Fluids ist definiert als:

$$\dot{\gamma}_x = \frac{dv_x}{dy}$$

Im Fall einer einfachen Plattenströmung kann für ein Newton'sches Fluid ein linearer Geschwindigkeitsverlauf angenommen werden (**Bild 1**).



**Bild 1.** Schematische Darstellung einer Scherströmung (Bilder: IKT)

Im gleichläufigen Doppelschneckenextruder treten an zwei Stellen die größten Schergeschwindigkeiten auf: zum einen im Scherspalt zwischen dem rotierenden Kamm und der stillstehenden Gehäuseinnenwand, zum anderen im Zwickelspalt zwischen den beiden rotierenden Knetelementen. Diese Schergeschwindigkeiten liegen im Bereich von bis zu mehreren Tausend Reziprossekunden [1, S. 42].

Die Dehngeschwindigkeit eines Fluids ist definiert als:

$$\dot{\epsilon}_x = \frac{dv_x}{dx}$$

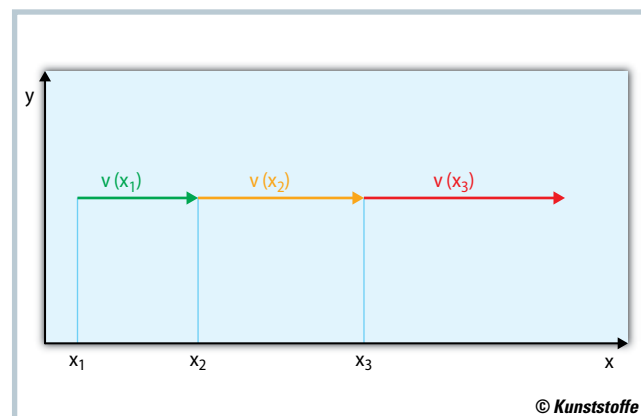
Folglich wirkt jede Geschwindigkeitszunahme entlang des Strömungswegs dehnend auf das Fluid. In **Bild 2** ist eine solche Geschwindigkeitszunahme entlang des Strömungswegs veranschaulicht.

Dehnströmungen treten überall dort auf, wo Strömungsquerschnitte verengt werden. Damit ein inkompressibles Fluidvolumen (die Polymerschmelze wird hier

vereinfacht als inkompressibel angenommen) durch einen konvergenten Querschnitt strömen kann, ist eine Geschwindigkeitszunahme entlang des Weges notwendig. Es gilt die Kontinuitätsgleichung. So ergeben sich beispielsweise beim Durchlaufen des sich schließenden Zwickels wie auch beim Eintritt des Fluids in den Kammspalt hohe Dehnraten. Bei Knetelementen ist keine klare Trennung der genannten Strömungsformen gegeben. Scher- und Dehnströmungen überlagern sich [2, S. 2.18].

### Profilvariation

Eine neue konstruktive Vorgehensweise erlaubt die beliebige Modifikation des Winkels zwischen der Flanke des Profils des Knetelements und der Gehäuseinnenwand. Darüber hinaus ist es damit möglich, die Breite des Kamms zu reduzieren. Dadurch werden die Scherspaltlänge und die Scherbelastung des Fluids kleiner. Wichtig ist dabei, dass auch mit dieser konstruktiven Vorge-



**Bild 2.** Schematische Darstellung einer Dehnströmung

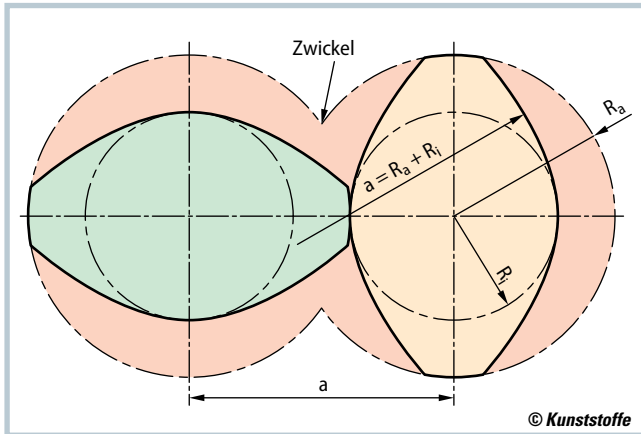


Bild 3. Zweigängiges Erdmengerprofil

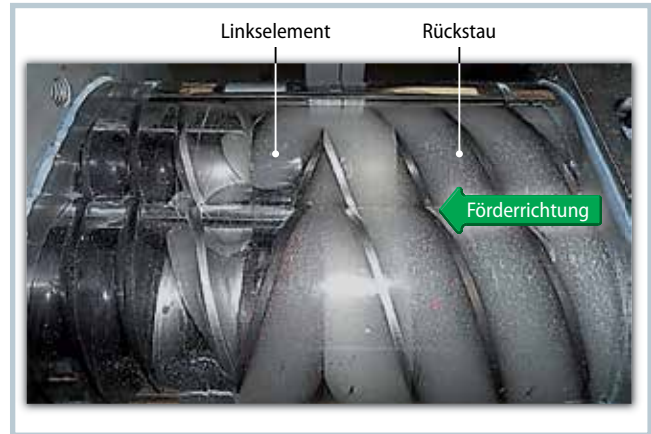


Bild 4. Rückstau vor einem Linkelement im ZSK58 mit transparentem Gehäuse

hensweise die Elemente trotz großer Formenvielfalt weiterhin dichtkämmernd bleiben.

In den hier dargestellten Experimenten wurde die klassische zweigängige Knetelement-Geometrie nach Erdmenger (Bild 3) modifiziert. Dabei wurden in den Varianten zwei der vier Flanken – jeweils diagonal gegenüberliegend – verändert. Die vorgenommenen Veränderungen sind – verglichen mit den geometrischen Variationsmöglichkeiten – eher gering. Die Erdmengergeometrie dient als Referenz der Versuchsreihe.

Besonders schnell und kostengünstig lassen sich die Elementprototypen mittels „Fused Deposition Modelling“ herstellen. Letzteres bezeichnet ein „Additive Manufacturing“-Verfahren, bei dem das Werkstück schichtweise aus einem schmelzfähigen Kunststoff (hier ABS) hergestellt wird.

### Transparentes Gehäuse macht Fluidbewegung sichtbar

Die Versuche wurden mit einer Modellflüssigkeit an einem Doppelschneckenextruder durchgeführt (Typ: ZSK58, Hersteller: Coperion GmbH, Stuttgart), bei dem ein Teil des Gehäuses transparent ausgeführt ist (Bild 4). Die Modellflüssigkeit ist ein angedicktes Glycerin, wobei diskrete Polyethylen-Partikel als Marker dienen.

Das transparente Gehäuse ermöglicht es, die Fluidbewegung im Verfahrensteil mit einer Hochgeschwindigkeitskamera (300 Bilder/s) zu erfassen, quantitativ auszuwerten und darzustellen. Die Strömung wird bei Drehzahlen zwischen

50 U/min und 120 U/min ausgewertet. Dabei wird der Doppelschneckenextruder sowohl vollgefüllt als auch teilgefüllt betrieben. Wie in Bild 5 dargestellt, beschränkt sich die Breite des Beobachtungsbereichs auf den Achsabstand  $a$  der Schneckenwellen. Als Lichtquelle dienen LED-Streifen, die den Beobachtungsbereich umrahmen und dadurch Streulichteffekte weitestgehend vermeiden.

Als experimentelle Methode der Strömungsvisualisierung wird eine „2D-Particle-Tracking-Velocimetry“ (PTV) gewählt. Die dritte Dimension wird zur Gehäuseinnenwand hin approximiert. Um die Viskosität des Fluids konstant im Bereich von 40 Pas zu halten, ist eine angepasste Temperierung notwendig.

Die erfassten Videos werden in Einzelbilder zerlegt und entsprechend den Anforderungen der Verfolgungssoftware Image J bearbeitet. Durch das Verfolgen der einzelnen Partikel über den Bildersta-

pel ergeben sich Richtung und Betrag der Geschwindigkeitsvektoren im instationären Strömungsfeld. Die Daten der Vektoren werden mithilfe der Software Matlab visualisiert. Daraus lassen sich Ergebnisse ermitteln, die zu einem besseren Verständnis der Transportvorgänge an den untersuchten Flanken sowie den daraus resultierenden Eigenschaften führen. Neben der Betrachtung von mehreren Knetelementen (Beobachtungsbereich in Bild 5), ermöglichen insbesondere Detailbetrachtungen der Strömungsvorgänge an einem einzelnen Knetelement weiterführende Aussagen.

### Quantifizierung der Strömungsvorgänge

In Bild 6 ist diese Detailbetrachtung am Beispiel einer konventionellen Geometrie nach Erdmenger bei einer Drehzahl » von 75 U/min abgebildet. Die Förderrich-

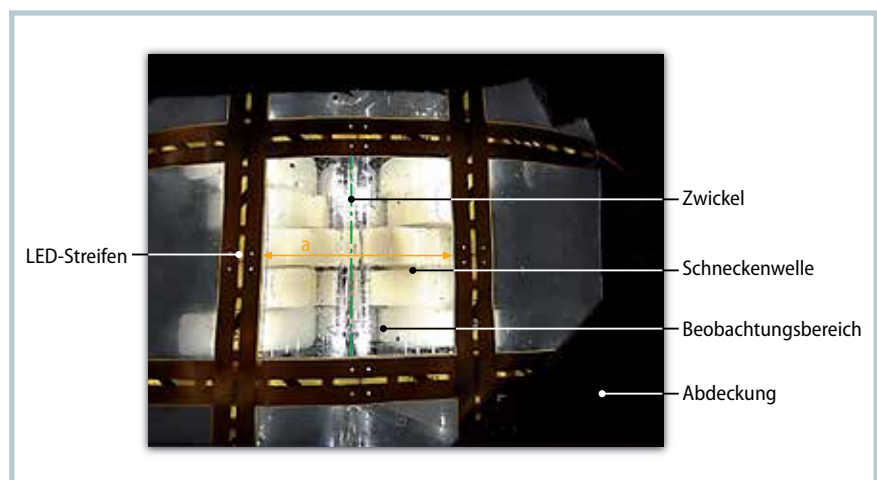
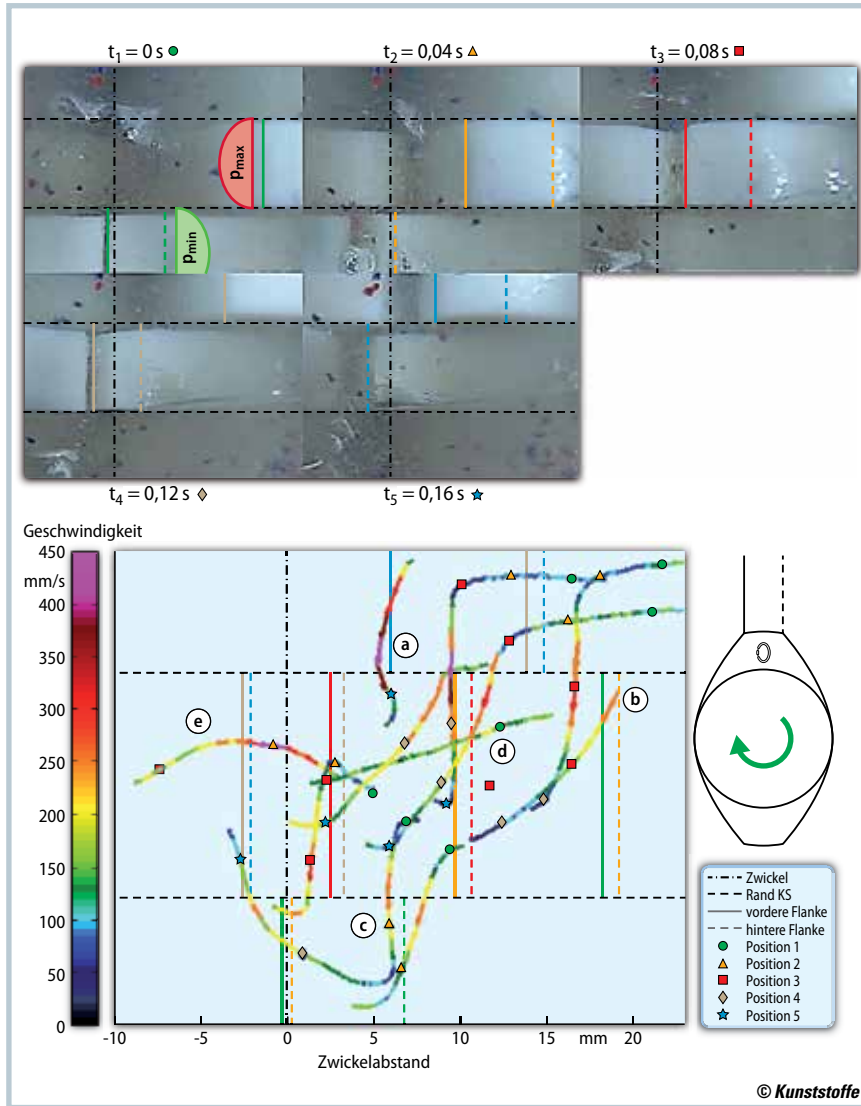


Bild 5. Beobachteter Schneckenabschnitt mit Beleuchtung und Abdeckung



**Bild 6.** Strömungsvorgänge an einer einzelnen Standardknetscheibe

Die Strömung ist von unten nach oben gerichtet, wobei direkt am oberen Bildrand ein Linkelement anschließt. Nur die aufdrehende Welle ist dargestellt und die Blickrichtung von oben auf die Welle gerichtet. Diese dreht sich, wie anhand des Originalbilds erkennbar, von rechts nach links. Die vordere Kante eines Knetscheibenkamms ist mit einer durchgezogenen Linie dargestellt, während die hintere Kante durch eine gestrichelte Linie abgebildet ist.

Verschiedenfarbige Markierungspunkte zeigen die Partikelposition bei definierten Schneckenstellungen. Stimmt die Farbe eines Markers mit der einer Kammlinie überein, so ist derselbe Zeitpunkt dargestellt. Zwischen den einzelnen Positionen liegt jeweils ein Zeitraum von 40 ms. Vergleichbare Trajektorien sind zu Gruppen zusammengefasst, wo-

bei die folgende Unterteilung vorgenommen ist (die Gruppierung bezieht sich auf die mittlere Knetscheibe):

- Partikel treten weit hinter dem Kamm in den Knetscheibenbereich ein.
- Partikel treten nah hinter dem Kamm in den Knetscheibenbereich ein.
- Partikel treten vor dem Kamm aus dem Knetscheibenbereich aus.
- Partikel treten in den Kammspalt ein (jeweils bei Position 3).
- Partikel laufen durch den sich schließenden Zwickel.

Die axiale Strömung entgegen der Förderichtung korreliert hauptsächlich mit der distributiven Mischwirkung (kinematische Verteilvorgänge [1, S.177]). Die erkennbare, druckinduzierte, axiale Geschwindigkeitszunahme bei den Trajektorien a, b und c wirkt aber auch geringfügig dispersiv, da eine Dehnströmung vorliegt.

Gemäß der Bernoulli'schen Gleichung resultieren negative Druckgradienten in einer Geschwindigkeitszunahme. Der negative Druckgradient ergibt sich im vorliegenden Beispiel aus der gegenförmenden Wirkung des sich anschließenden Linkelements sowie der Addition der lokalen Druckextrema zweier benachbarter Knetscheiben. Aufgrund der konvergenten Geometrie zwischen Knetscheibenflanke und Gehäusewand befindet sich vor einer schiebenden Flanke ein lokales Druckmaximum.

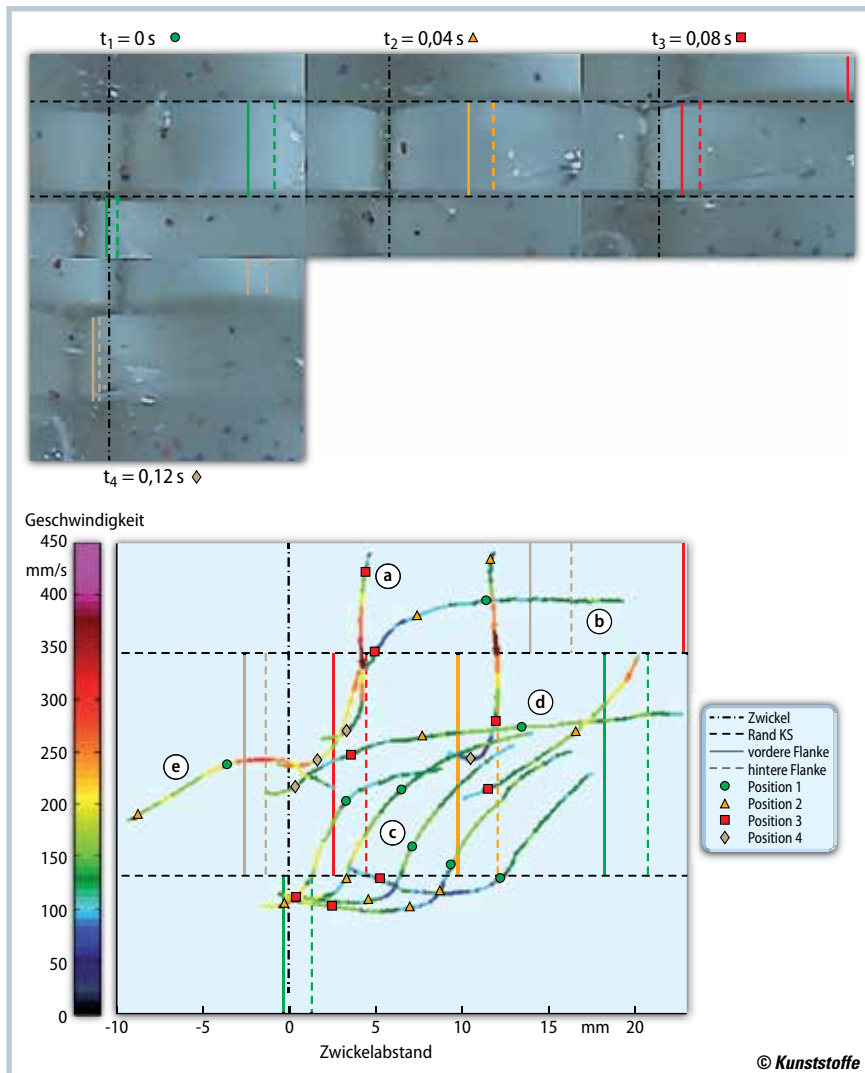
Hinter einer ziehenden Flanke liegt hingegen ein Druckminimum [1, S.335]. Dieser Unterdruck sorgt dafür, dass die Trajektorien b mit der Flanke mitgezogen werden und damit flacher verlaufen als die Trajektorien a. Die Bewegung entgegen der Rotationsrichtung (z.B. Eindrehen der Trajektorien a) ist durch kleine ortsfeste Wirbel unmittelbar nach der Stirnkante zu erklären.

Die Geschwindigkeitszunahme beim Durchlaufen des Zwickels (Trajektorien e) zeigt die erzeugten Dehnraten in diesem Bereich der Knetelemente.

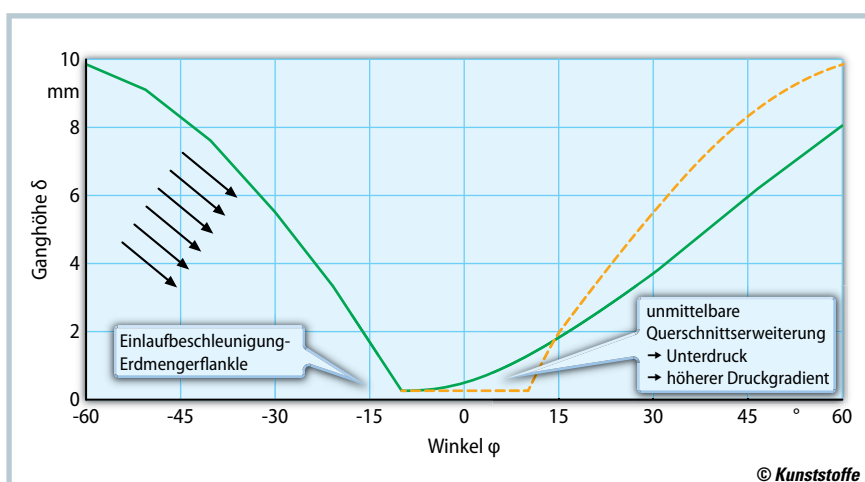
In **Bild 7** ist die entsprechende Betrachtung für eine modifizierte Geometrie dargestellt. Die neuartige Flanke zeigt in Rotationsrichtung. Da der Kamm schmäler ist, liegen die gleichfarbigen Linien jeweils deutlich näher zueinander. Die zugrundeliegenden Versuchsbedingungen der beiden Darstellungen (**Bilder 6 und 7**) sind äquivalent.

Bei vergleichender Betrachtung wird deutlich, dass bereits geringfügige Veränderungen am Knetelement zu eindeutigen Unterschieden im Strömungsbild führen. Die gravierendsten Differenzen sind bei den Trajektorien c zu erkennen. Sowohl Austrittswinkel als auch Austrittsgeschwindigkeit weichen stark voneinander ab.

Um die Vorgänge an den Flanken hinsichtlich der Dehnströmungen zu beurteilen, ist weiterhin die relative Geschwindigkeit des Fluides in Richtung des Kammspalts (Spiel zwischen Gehäusewand und Knetscheibenkamm) zu ermitteln (Trajektorie d). Es ergibt sich eine minimal verbesserte Einlaufbeschleunigung in den Kammspalt, falls die veränderte Flanke entgegen der Drehrichtung der Schneckenwelle zeigt. Das ist durch einen Diffusor-Effekt zu erklären. Der Effekt wird durch einen deutlich schmaleren Kamm erzielt. Daher schließt sich unmittelbar an



**Bild 7.** Strömungsvorgänge an einer einzelnen modifizierten Knetscheibe (s. o.)



**Bild 8.** Veranschaulichung der Diffusor-Geometrie

die engste Stelle eine Querschnittserweiterung an. In **Bild 8** ist die Ganghöhe  $\delta$  über dem Winkel  $\varphi$  der abgewinkelten Gehäuseinnenwand aufgetragen. Die „Diffusor-Geometrie“ ist erkennbar. Die

sich anschließende Querschnittserweiterung sorgt für einen höheren Druckgradienten, wodurch eine stärkere Geschwindigkeitszunahme entlang des Strömungswegs beobachtet werden kann.

## Die Autoren

**Matthias Uhrig** ist Student der Universität Stuttgart und hat im Rahmen seiner Bachelor-Arbeit am IKT an diesem Projekt mitgearbeitet.

**Dr.-Ing. Michael Kroh** ist seit 2011 Leiter der Abteilung Werkstofftechnik am Institut für Kunststofftechnik der Universität Stuttgart;

michael.kroh@ikt.uni-stuttgart.de  
**Prof. Dr.-Ing. Christian Bonten** ist seit 2010 Leiter des Instituts für Kunststofftechnik der Universität Stuttgart.

**Dipl.-Ing. Peter Munkes** ist seit 2010 Leiter der Abteilung Forschung und Entwicklung der Coperion GmbH, Stuttgart.

**Dr.-Ing. Ralf Kühn** ist seit 1998 Mitarbeiter in der Abteilung Forschung und Entwicklung der Coperion GmbH, Stuttgart.

## Service

### Literatur & Digitalversion

- Das Literaturverzeichnis und ein PDF des Artikels finden Sie unter [www.kunststoffe.de/837845](http://www.kunststoffe.de/837845)

### English Version

- Read the English version of the article in our magazine *Kunststoffe international* or at [www.kunststoffe-international.com](http://www.kunststoffe-international.com)

## Fazit und Ausblick

Als Fazit lässt sich festhalten, dass der Versuchsaufbau einschließlich der FDM-Prototypen eine schnelle und kostengünstige Methode darstellt, um Strömungs- und Transportvorgänge an den Elementen eines gleichläufigen Doppelschneckenextruders quantitativ zu untersuchen. Die erkannte Tendenz der Diffusor-Wirkung verspricht eine Optimierung der Dehnraten bei der Einlaufbeschleunigung in den Kammspalt. Zeigt die modifizierte Flanke in Rotationsrichtung, ist jedoch bei der durchgeführten Versuchsreihe keine Verbesserung von Dehnströmungen zu erkennen.

Über diesen Versuchsaufbau hinaus sollen Untersuchungen auch an metallenen Elementgeometrien mit Thermoplastschmelze durchgeführt werden, um die Geometrievarianten abschließend zu beurteilen. ■