

Barrierschnecken. Das Aufschmelzen ist eine der Hauptaufgaben des Extruders. Die Länge der Aufschmelzzone, eine entscheidende Kenngröße für die Leistung eines Extruders und damit die Qualität der Schmelze, ist jedoch aufgrund der Vielzahl an Einflussgrößen nur schwer vorhersagbar.

Plastifizierzone virtuell auslegen

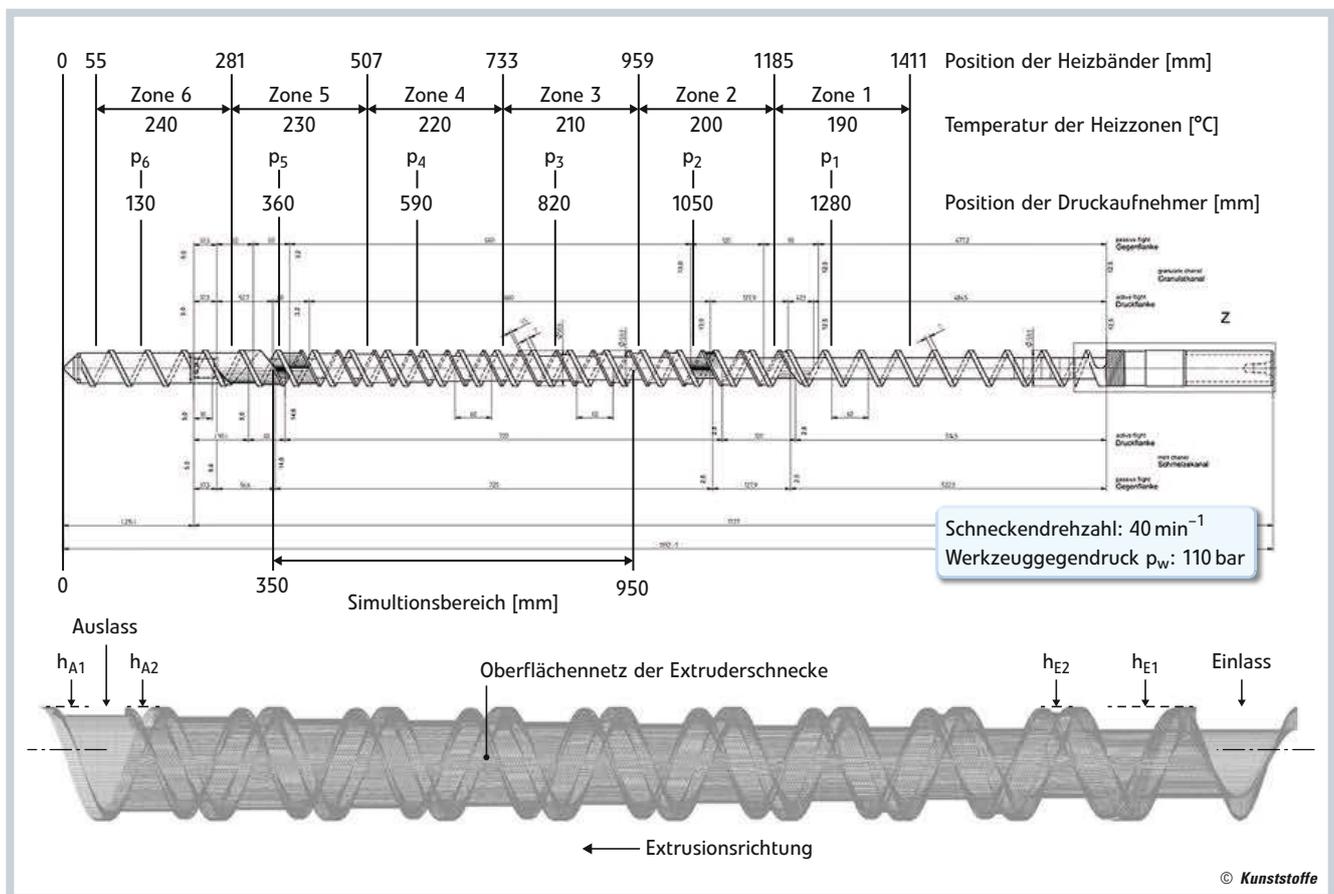


Bild 1. Betriebsparameter und Schneckengeometrie der Barrierschnecke (Konstruktionsskizze [oben] und Simulationsmodell [unten])

**CHRISTIAN HOPMANN
SEBASTIAN GRAMMEL**

Die Auslegung von Extruderschnecken für die Kunststoffverarbeitung stellt trotz jahrzehntelanger Erfahrungen noch immer eine Herausforderung dar. Denn weder sind alle Einflüsse der Schneckengeometrie auf die Vorgänge im Einschneckenextruder bekannt, noch existieren zuverlässige mathematisch-physikalische Modelle, die in Auslegungsrechnun-

gen oder -simulationen eingesetzt werden können. Ein Beispiel hierfür ist die Abbildung des Aufschmelzprozesses in der Aufschmelzzone eines konventionellen Einschneckenplastifizierextruders, bei dem eine Herausforderung darin besteht, ein Zwei-Phasen-System aus Feststoffbett und Schmelze zu modellieren. Weiterhin ist die korrekte Beschreibung und Messung der Materialeigenschaften und Zustände bei diesem Phasenwechsel schwierig. Am Institut für Kunststoffverarbeitung (IKV) an der RWTH Aachen wird deshalb eine Simulationemethode basierend auf Strömungsberechnungen entwickelt. Mit Anwendung dieser Methodik lässt sich der Einfluss der Schneckengeometrie und der Prozessgrößen auf den Aufschmelzvorgang analysie-

ARTIKEL ALS PDF unter www.kunststoffe.de
 Dokumenten-Nummer KU111400

ren. Hierdurch kann die optimale Aufschmelzlänge bestimmt und die Leistung des Extruders gesteigert sowie die Schmelzqualität verbessert werden. Durch die virtuelle Auslegung lassen sich kürzere Entwicklungszeiten erzielen.

3D-Modellierung des Aufschmelzverhaltens

Um das Aufschmelzen eines Feststoffbetts in einer Strömungssimulation zu berücksichtigen, wird ein Ansatz gewählt, bei dem das Feststoffbett als ein Fluid mit sehr hoher Viskosität betrachtet wird. Die Höhe des Viskositätswerts nimmt insbesondere Einfluss auf die Form des Feststoffbetts sowie auf die numerische Stabilität der Rechnung [1]. In diesen Simulationen wird die Viskosität des Feststoffbetts zu 200 000 Pas definiert. Die Erhaltungsgleichungen für Masse, Impuls und Energie der Strömungsmechanik werden anhand des numerischen Näherungsverfahrens der Finiten Volumen Methode gelöst. Dazu wird das Softwareprogramm Fluent der Ansys Inc., Canonsburg/USA, eingesetzt. Die Lösungsgleichungen werden unter stationären und nicht-isothermen Bedingungen gelöst. Die in der Realität durch Reibung entstehende Wärme wird im Modell durch die Berechnung der viskosen Reiberwärmung innerhalb einer Flüssigkeit berücksichtigt. Zur Umsetzung der Schneckenrotation dient die kine-

Modellspezifikationen	Parameter
Gangtiefe (Feststoffkanal) h_{E1} / h_{M1} [mm]	13 / 3,2
Gangtiefe (Schmelzekanal) h_{E2} / h_{M2} [mm]	2,5 / 14
Spaltweite des Barriere- stegs [mm]	0,7
Schneckenspiel [mm]	0,1
Durchmesser [mm]	60
Schneckenlänge [D]	11
Durchsatz [kg/h]	37,3
Drehzahl [min^{-1}]	40

**Tabelle 1. Modell-
spezifikationen der
Extruderschnecke**

mathe Umkehr. Das bedeutet, dass die Schneckenoberfläche im Absolutsystem keine Freiheitsgrade besitzt, während die Zylinderoberfläche mit einer Rotationsgeschwindigkeit gleich der Schneckendrehzahl, allerdings in entgegengesetzter Richtung, bewegt wird.

Das Aufschmelzverhalten wird in der Plastifizierzone einer Barrierschnecke untersucht. Dazu kommt ein vollständig dreidimensionales Berechnungsmodell zum Einsatz. Zur Erstellung des Berechnungsmodells wird der helix-förmige Schneckenkanal in einem CAD-Programm (Typ: Gambit, Hersteller: Ansys Inc., Canonsburg/USA) abgebildet und anschließend durch Anwendung entsprechender Vernetzungsalgorithmen in eine endliche Anzahl von Volumenelementen unterteilt (Vernetzung). Für jedes dieser Volumenelemente wird eine gesuchte Strömungsgröße durch das Näherungsverfahren berechnet. Die Anzahl der Volumenelemente bestimmt die Genauigkeit des Rechenergebnisses sowie die Rechenzeit. Insgesamt werden ca. 2 Mio. Elemente benötigt, um eine ausreichende Genauigkeit zu erzielen, welche in vorangehenden Untersuchungen [2] bestimmt wurde. Hierfür ergeben sich Rechenzeiten von ca. 30 h auf einem leistungsstarken Rechnersystem (acht Kerne, je 2,66 GHz; 92 GB Arbeitsspeicher). **Bild 1 oben** zeigt die Kons- →

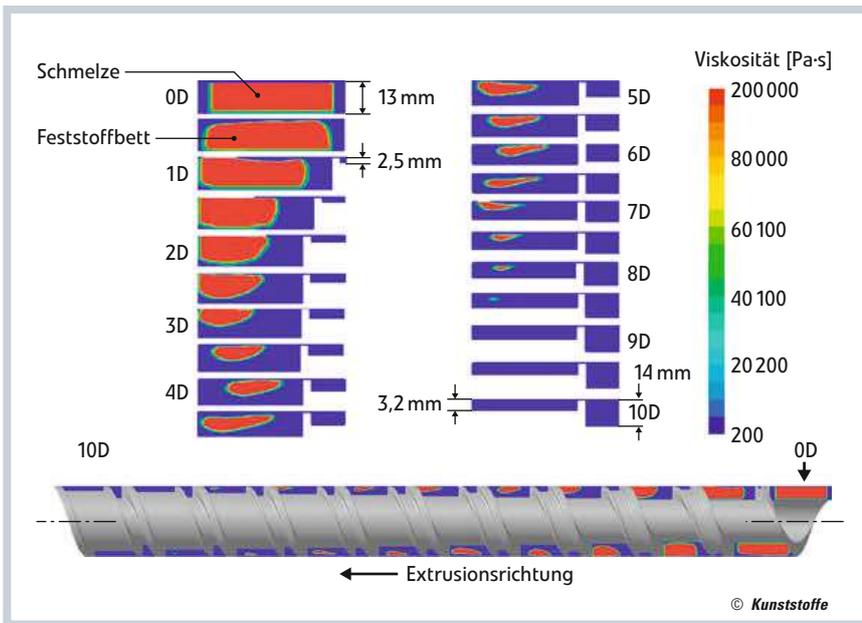


Bild 2. Analyse der Lage und Form des Feststoffbets (Bilder: IKV)

truktionskizze der verwendeten Barrierschnecke sowie den Simulationsbereich. In **Bild 1 unten** ist das Oberflächennetz der Extruderschnecken dargestellt. Eine detaillierte Übersicht der Simulationsparameter (Betriebsparameter und Schneckenengeometrie) ist in **Tabelle 1** zusammengefasst.

Als Material wird ein Polypropylen betrachtet (Typ: Moplen HP456J, Hersteller: Basell Polyolefine GmbH, Wessling). Die Beschreibung des Materialverhaltens erfolgt über eine Implementierung temperaturabhängiger Kenndaten für die Dichte, die Viskosität, die Wärmeleitfähigkeit und die Wärmekapazität. Die Strukturviskosität des Materials wird anhand des Carreau-Ansatzes beschrieben.

Die Verifikation der Simulationsmethodik erfolgt über einen Vergleich des simulierten mit dem experimentell ermittelten Druckverlauf über der Extruderschnecke. Dazu wird der Druck an sechs Positionen eines Einschneckenextruders ($L/D = 27$, $D = 60$ mm, Oerlikon Barmag GmbH & Co. KG, Remscheid) gemessen. Die Betriebsparameter Zylindertemperatur, Schneckenrehzahl, der Gegendruck am Werkzeug, die Schneckenengeometrie sowie die Position der Druckaufnehmer sind in **Bild 1 oben** dargestellt. Desweiteren wird zur Verifikation des errechneten Aufschmelzverhaltens das bekannte Aufschmelzmodell von Maddock [3] aus der Literatur herangezogen.

Analyse des Aufschmelzverhaltens

Die Form und Lage des Feststoffbets kann über eine Betrachtung der Viskositätsverteilung im Schneckenkanal analysiert werden. In der Auswertung wird ein Schnitt durch die Schneckenengeometrie parallel zur Förderrichtung gelegt. Die Viskositätsverteilung in den sich daraus ergebenden Querschnitten zeigt das Auf-

schmelzverhalten im Schneckenkanal (**Bild 2**). Die in Rot gekennzeichneten Bereiche entsprechen dem Feststoffbett. Die in Blau gekennzeichneten Bereiche bilden den Schmelzeanteil ab. Die Aufschmelzbilder zeigen das charakteristische Aufschmelzbild in einer Barrierschnecke, bei der die Feststoffbett- und Schmelzeförderung durch den Barriesteg getrennt wird. Die berechnete Form und Lage des Feststoffbets deutet auf die charakteristischen Aufschmelzmechanismen von Maddock [3] und Tadmor [4] hin. In **Bild 3** ist der Schmelzmasseanteil bezogen auf die Gesamtmasse entlang der Schneckenlänge dargestellt. Auf diese Weise kann eine Aufschmelzlänge von 8,4 D bestimmt werden.

Anhand von Bahnlinien im Schneckenkanal lässt sich der Einfluss der Umströmung des Feststoffbets sowie das Phänomen der Ausbildung eines Schmelzewirbels in der Nähe der aktiven Flanke beob-

achten und analysieren. **Bild 4** zeigt einen Abschnitt des Schneckenmodells in verschiedenen Darstellungen. Darstellung a) zeigt das Feststoffbett im Schneckenkanal in dreidimensionaler Betrachtungsweise, während die Darstellungen b) – e) drei Bahnlinien im Schneckenkanal aus vier verschiedenen Ansichten (jeweils um 90° gedreht) visualisieren. Die drei Bahnlinien starten von unterschiedlichen Startpositionen. Die rot gekennzeichnete Bahnlinie startet in der Nähe der aktiven Flanke. Aufgrund der Bildung eines Schmelzewirbels übt ein Partikel entlang dieser Bahnlinie eine spiralförmige Bewegung aus. Ein solches Partikel besitzt immer eine Strömungskomponente in Kanalarichtung und eine weitere Komponente abhängig von der Position des Partikels entweder entgegen (Zylindermantelfläche) oder mit der Förderrichtung (Schneckenrund), sowie in Richtung der Zylindermantelfläche (in der Nähe des Feststoffbets)

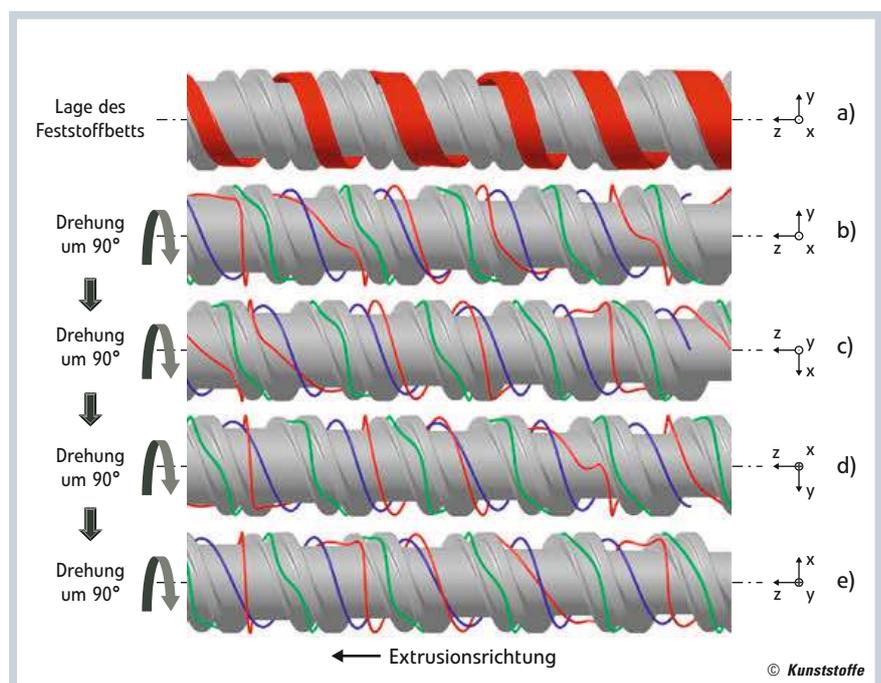


Bild 4. Strömungsanalyse anhand von Bahnlinien

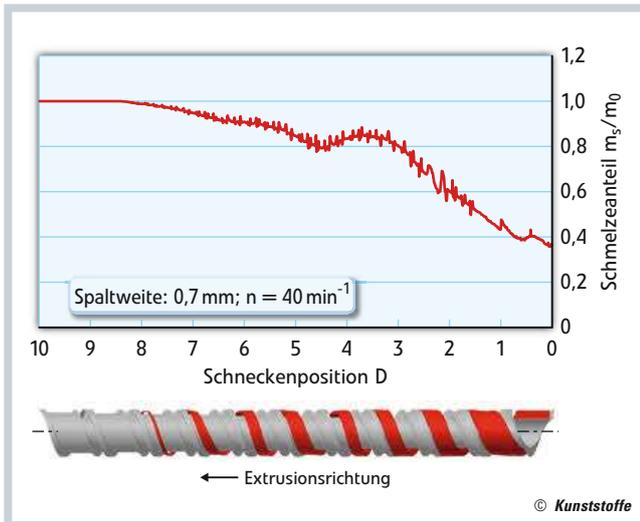


Bild 3. Vorhersage der Aufschmelzlänge und Aufschmelzleistung

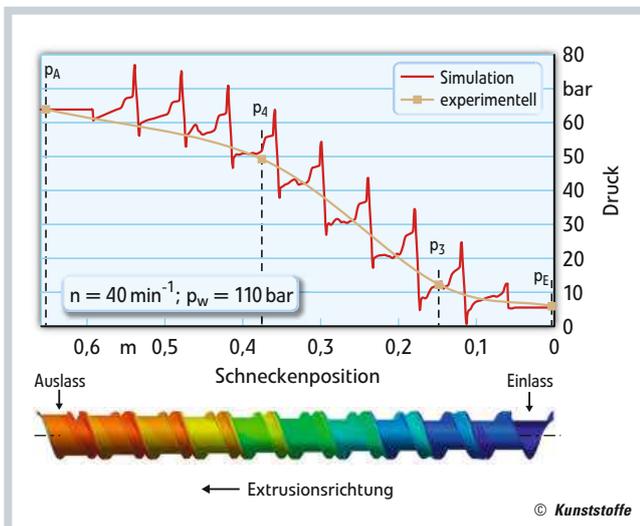


Bild 5. Verifikation der Simulationemethodik anhand des Druckverlaufs

oder des Schneckenrands (in der Nähe der aktiven Flanke). Die grün gekennzeichnete Bahnlinie startet im Schmelzkanal der Barrierschnecke. Da dieser Kanal ausschließlich mit Schmelze gefüllt ist, bildet sich im gesamten Kanal ein Schmelzewirbel aus, sodass diese Bahnlinie spiralförmig die gesamte Kanalbreite und -tiefe durchströmt. Die blau gekennzeichnete Bahnlinie startet im Feststoffbett. Durch die hohe Viskosität des Feststoffbetts bildet sich in diesem Bereich eine Blockströmung mit wenigen Querströmungen aus, sodass ein Partikel entlang dieser Bahnlinie kaum seine Position verändert. Die Verweilzeit der Partikel ist unterschiedlich. Um das gesamte Schneckenmodell zu durchströmen, benötigen sie entlang der blauen Bahnlinie 24,5 s, der grünen Bahnlinien 29,9 s und der roten Bahnlinie 45,8 s.

In **Bild 5** ist der berechnete und der gemessene Druckverlauf über die Schneckenlänge aufgetragen. Der Druck p_E bzw. p_A an der Einlass- und Auslassfläche des Modells werden als Randbedingung vorgegeben und in den Technikumsversuchen ermittelt. An den Positionen p_3 und p_4 wird der Druck in der Simulation berechnet und zur Verifikation der Simulationsergebnisse herangezogen. Ein Vergleich der berechneten Drücke mit denen aus der Praxis zeigt mit einer Abweichung unter 1 % für den Druckaufnehmer p_3 und ca. 3 % für den Druckaufnehmer p_4 eine gute Übereinstimmung. →

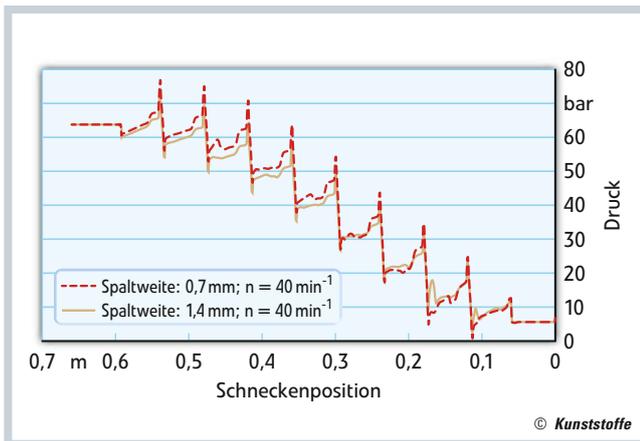


Bild 6. Einfluss der Spaltweite des Barrierestegs auf den Druckverlauf

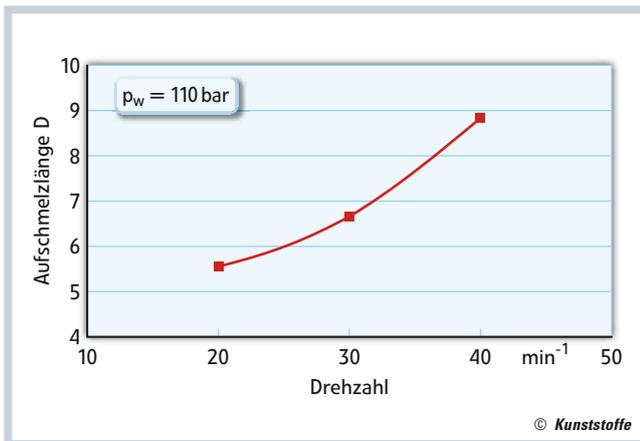


Bild 7. Einfluss der Schneckendrehzahl auf die Aufschmelzlänge

Der Einfluss der Spaltweite des Barrierestegs auf den Druckverlauf ist in **Bild 6** für die unterschiedlichen Spaltweiten von 0,7 mm und 1,4 mm dargestellt. Darin wird ersichtlich, dass der Druck im Schneckenkanal insgesamt mit abnehmender Spaltweite in einem Bereich zwischen 3 bis 5 bar zunimmt. Diese Druckzunahme ergibt sich durch die Verringerung der Verlustströmung über dem Barrierespalt mit kleiner werdender Spaltweite.

Bild 7 zeigt, welchen Einfluss eine Drehzahländerung auf die Aufschmelzlänge hat. Darin wird deutlich, dass bei steigender Schneckendrehzahl die Aufschmelzlänge zunimmt.

Fazit und Ausblick

Die Entwicklung einer numerischen Methode zur dreidimensionalen Beschreibung des Aufschmelzverhaltens in einem konventionellen Einschneckenplastifizierextruder mit einem Programm für Strömungsberechnungen konnte erfolgreich realisiert wer-

den. Die Berechnungsergebnisse liefern dreidimensionale Einblicke über das Aufschmelzverhalten in einem Einschneckenextruder und bestätigen bisherige Aufschmelzmodelle aus der Literatur und experimentelle Untersuchungsergebnisse.

Wünschenswert für die Zukunft ist ein Programm mit Struktur- und Fluidlöser, sodass sowohl die Gleichungen der Strömungs- als auch die der Kontinuumsmechanik in einem Volumenbereich gelöst werden können. Dadurch wäre eine mechanische Beschreibung des Feststoffbetts möglich. Mithilfe einer durchgängigen, geschlossenen Lösung der Gleichungen ließen sich die Vorgänge im gesamten Extruder beschreiben. Hierfür könnten die in diesem Forschungsvorhaben gewonnenen Erkenntnisse sinnvoll einfließen. ■

DANK

Das IGF-Forschungsvorhaben 16513 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 Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Allen Institutionen gilt unser Dank. Für die Bereitstellung von Versuchsmaterial danken wir der Basell Polyolefine GmbH sowie der DSM GmbH.

LITERATUR

- Hopmann, Ch., Kremer, C., Grammel, S.: Predicting the Melting Behavior within a Single Screw Extruder using 3D FVM Simulations. Proceedings of the 28th International Conference of the Polymer Processing Society (PPS), Pattaya, Thailand, 2012
- Hopmann, Ch., Kremer, C., Grammel, S.: Simulation als Hilfsmittel zur Optimierung von Extruderschnecken. Umdruck zur IKV-Fachtagung der Folienextrusion – Trends bei Rohstoffen, Verarbeitung, Anwendungen. Aachen, 2012
- Maddock, B.: A Visual Analysis of Flow and Mixing in Extruder Screws, SPE Journal 5, 1959, S. 383-389
- Tadmor, Z.; Klein, I.: Engineering Principles of Plasticating Extrusion, Polymer Science and Engineering series, 1970

DIE AUTOREN

PROF. DR.-ING. CHRISTIAN HOPMANN, geb. 1968, ist Inhaber des Lehrstuhls für Kunststoffverarbeitung der RWTH Aachen und Leiter des Instituts für Kunststoffverarbeitung (IKV) in Industrie und Handwerk an der RWTH Aachen.

DIPL.-ING. SEBASTIAN GRAMMEL, geb. 1982, war wissenschaftlicher Mitarbeiter am IKV und leitete die Arbeitsgruppe Schneckenauslegung/CAE.

SUMMARY

VIRTUAL TRANSITION SECTION DESIGN

BARRIER SCREWS. One of the main functions of the extruder is the melting of the plastic. The length of the transition section, a crucial parameter for the performance of an extruder and hence for the quality of the melt, is difficult to predict, however, due to the large number of variables.

Read the complete article in our magazine

Kunststoffe international and on

www.kunststoffe-international.com