

# Schnellaufender Einschneckenextruder mit Direktantrieb

## Neuartige Schneckengeometrie für hohe Geschwindigkeiten

Die Leistungsfähigkeit eines Einschneckenextruders ist eng mit dem erreichbaren Durchsatz bei einer zufriedenstellenden Schmelzequalität verknüpft. In einem Kooperationsprojekt stand die Verarbeitung von Polypropylen (PP) auf einem High-Speed-Extruder mit 40 mm Schneckendurchmesser und Durchsätzen von bis zu 550 kg/h im Fokus.

Neu entwickeltes Schneckenkonzept:  
Der Schnellläufer ESE 1-40-42 HS mit 40 mm Schneckendurchmesser für Durchsätze von bis zu 550 kg/h Polypropylen (PP) © esde



In der Extrusion ist der Massedurchsatz in der Regel eng mit Leistungsfähigkeit und Wirtschaftlichkeit der Anlage verbunden. Durch Verbesserungen, wie genutete Einzugszonen, leistungsstärkere Antriebe und die gezielte Auslegung von Schneckengeometrien, z. B. Barrierschnecken, ließen sich die Durchsätze in der Extrusionstechnik in den letzten Jahrzehnten erheblich steigern. Diese Ansätze sind inzwischen jedoch weitgehend ausgereizt [1–3].

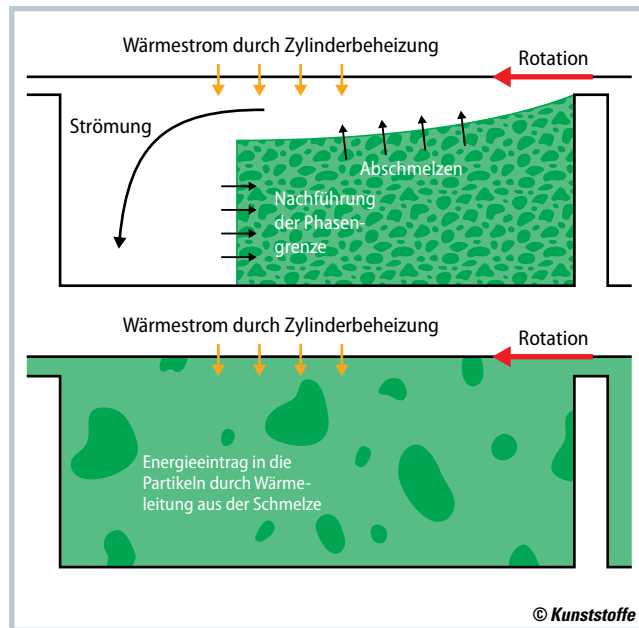
### Pionierarbeit zur Hochgeschwindigkeitsextrusion

In verschiedenen Forschungseinrichtungen und bei den Extruderherstellern ist deshalb die Erhöhung der Schneckendrehzahl des Einschneckenextruders bei konstantem Durchmesser zur Durchsatzsteigerung in den Blickpunkt gerückt. Erste Untersuchungen mit schnell drehenden Schnecken mit Drehzahlen von bis zu  $3500 \text{ min}^{-1}$  bei einem

Durchmesser von 35 mm wurden von Beck [4] bereits Ende der 50er-Jahre durchgeführt. Dieser Versuchsaufbau wird heute der Hochgeschwindigkeitsextrusion bzw. High-Speed-Extrusion zugeordnet, deren Extruder häufig auch als Schnellläufer bezeichnet werden. Predöhl [5] grenzte 1979 mit einer Umfangsgeschwindigkeit von  $1 \text{ m/s}$  die konventionelle von der schnellaufenden Einschneckenextrusion ab. Eine neuere Definition von Roth [6] setzt die Grenze zur Hoch-

geschwindigkeitsextrusion bei  $400 \text{ min}^{-1}$  an, weil nicht nur immer höhere Drehzahlen, sondern auch größere Schneckendurchmesser zu Umfangsgeschwindigkeiten von deutlich über  $1 \text{ m/s}$  führen. Aufgrund dieser hohen Drehzahlen bzw. Umfangsgeschwindigkeiten ergeben sich spezifische Herausforderungen, mit denen sich die Pioniere der Hochgeschwindigkeitsextrusion konfrontiert sahen, die aber teilweise noch heute aktuell sind: Bereits das Einrieseln von genügend Feststoff sowie ein gleichmäßiger Materialeinzug bei den hohen Drehzahlen stellen erste Herausforderungen dar. Aufgrund der kurzen Verweilzeit kann es zu einer unvollständigen Plastifizierung kommen, gleichzeitig jedoch auch zu unbrauchbar hohen Schmelzetemperaturen aufgrund der hohen Scherraten im Schneckenkanal.

Beginnend mit den ersten Untersuchungen von Beck [4] stellten zahlreiche experimentelle Untersuchungen und theoretische Überlegungen in den folgenden Jahren wichtige Fortschritte und Beiträge zum Prozessverständnis für die Herausforderungen der Hochgeschwindigkeitsextrusion dar, die Energie mehr über die hohe Drehzahl als über das Drehmoment der Extruderschnecke einträgt. [7] berichtet Ende der 90er-Jahre von der ersten erfolgreichen kommerziellen Umsetzung eines Schnellläufers in einem Kooperationsprojekt der esde Maschinenteknik GmbH, Bad Oeynhausen, und der ETA Kunststofftechnologie GmbH, Troisdorf. Dazu war intensive Forschungstätigkeit zu Themen wie Feststoffförderung und Plastifizierung im



**Bild 1.** Aufschmelzmodelle: Gegenüberstellung des Tadmor-Modells (oben) und des dispersen Aufschmelzmodells (unten) [21]

(Quelle: KTP)

Schnellläufer sowie zum Einfluss der hohen Scherraten auf das Material nötig.

Bei den Kunststoffverarbeitern gibt es bis heute Bedenken, dass eine mechanische Überbelastung des Kunststoffs aufgrund der enormen Scherraten im Schneckenkanal auftritt. In zahlreichen Untersuchungen zu dieser Thematik [8–11] erweisen sich diese Bedenken jedoch als unbegründet. Während Pohl [12] den Schnellläufer 2003 noch als absoluten „Exoten“ in kunststoffverarbeitenden Betrieben bezeichnet, gelingt diesem in den folgenden Jahren der Durchbruch, und im Jahr 2009 zählte der Schnellläufer bereits zur Standardproduktpalette von Extruderherstellern [13, 14].

Auch an Forschungseinrichtungen gerät die High-Speed-Extrusion in den Blickpunkt: Am Institut für Produkt Engineering der Universität Duisburg-Essen wurde für die High-Speed-Extrusion mit dem High-Speed-S-Truder sogar ein völlig neuartiges Extrusionskonzept entwickelt, das auf der Trennung von Schmelze und Feststoff mittels einer speziellen Schneckenhülle beruht [15, 16]. In Stuttgart wird am Institut für Kunststofftechnik das Helibar-Extruderkonzept mit Axial- oder Wendelnuten im Plastifizierzylinder auf Schnellläufer adaptiert [17].

Trotzdem besteht in der Hochgeschwindigkeitsextrusion weiter Forschungs- und Entwicklungsbedarf. Die eingesetzten Schneckendurchmesser »

## Vorteile auf einen Blick

Für den Kunststoffverarbeiter ergeben sich durch den Einsatz von schnelllaufenden Einschneckenextrudern zahlreiche Vorteile:

- Das reduzierte Bauvolumen der Extruder bei hohen Durchsätzen ist speziell bei komplexen Extrusionslinien mit mehreren Extrudern von großem Vorteil.
- Durch das verkleinerte Kanalvolumen der Schnecke reduziert sich die mittlere Verweilzeit des Materials und ermöglicht schnelle Material- und Farbwechsel.
- Verbesserter spezifischer Energieumsatz aufgrund der durchsatzbezogenen verkleinerten Wärmeverlustfläche.
- Keine Getriebeverluste aufgrund direkt angetriebener Schnecke.
- Kurze Verweilzeiten reduzieren den thermisch induzierten Materialabbau.

## Die Autoren

**Prof. Dr.-Ing. Volker Schöppner** leitet den Lehrstuhl für Kunststoffverarbeitung an der Universität Paderborn.

**Michael Schadomsky, M.Sc.**, ist Mitarbeiter an der Kunststofftechnik Paderborn (KTP, Universität Paderborn); michael.schadomsky@ktp.upb.de

**Dipl.-Ing. Carsten Diekmann** ist Geschäftsführer der esde Maschinentechnik GmbH, Bad Oeynhausen; Kontakt: info@esde-maschinentechnik.de

**Dipl.-Ing. Michael Schneider** ist Leiter von Konstruktion und Entwicklung der esde Maschinentechnik GmbH, Bad Oeynhausen.

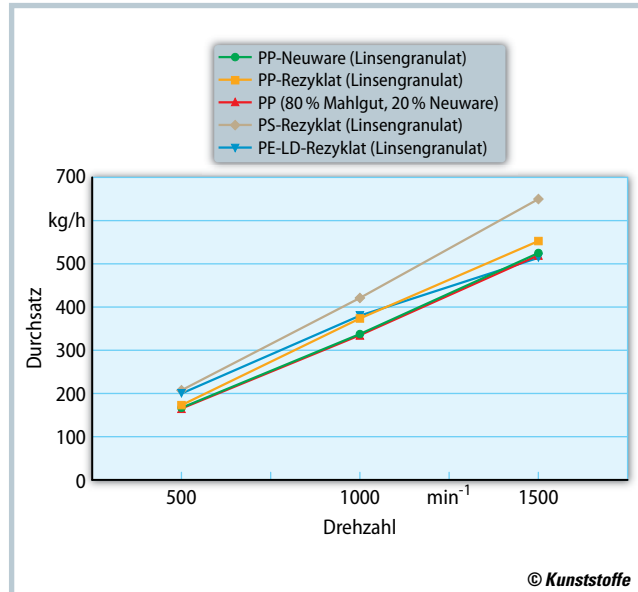
### Dank

Die esde Maschinentechnik GmbH und die Kunststofftechnik Paderborn bedanken sich für die Förderung im Rahmen „Zentrales Innovationsprogramm Mittelstand“ durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestags.

## Service

### Literatur & Digitalversion

- Das Literaturverzeichnis und ein PDF des Artikels finden Sie unter [www.kunststoffe.de/4137961](http://www.kunststoffe.de/4137961)



**Bild 2.** Durchsätze in Abhängigkeit der Drehzahl für unterschiedliche Materialien (PP, PS, PE-LD) und Rohstoffgeometrien (Linsengranulat, Mahlgut) (Quelle: KTP, esde)

liegen zumeist zwischen 60 und 90 mm und dienen zur Verarbeitung von Standardpolymeren. Das amorphe Polystyrol (PS) erweist sich dabei mit seiner relativ niedrigen Aufschmelzenthalpie in der Regel als verarbeitungskritisch. Insbesondere verschiedene Polyethylen (PE)-Typen wurden in der High-Speed-Extrusion intensiv und erfolgreich untersucht. Die Verarbeitung von Polypropylen (PP) stand dagegen weitaus weniger im Fokus der Hochgeschwindigkeitsextrusion und stellt die High-Speed-Konzepte teilweise noch vor deutlich größere Herausforderungen als andere Standardpolymere [15]. Die kurzen Verweilzeiten führen bei Materialien mit hohen Schmelzenthalpien zu Problemen bei der vollständigen Plastifizierung. Bei kleineren Schneckendurchmessern als 60 mm ergeben sich zudem Schwierigkeiten bezüglich der Schmelztemperatur und -homogenität [1, 12, 15, 18].

### Forschungsziel und Entwicklungsgrundlagen

Diese Herausforderungen sind wesentlicher Bestandteil des Kooperationsprojektes zwischen der esde Maschinentechnik GmbH, Bad Oeynhausen, und der Kunststofftechnik Paderborn (KTP, Universität Paderborn). Beide Projektpartner haben seit Jahren Know-how zur der Hochgeschwindigkeitsextrusion aufgebaut. Ziel ist es, einen Schnellläufer mit 40 mm Schneckendurchmesser zu entwickeln, der primär für die Verarbeitung von PP (100% granulatförmige Neuware und Mischungen mit bis zu 80% Rezyklat in

Form von Mahlgut) für die Folien- und Plattenextrusion ausgelegt ist. Im Vordergrund steht dabei, dass der Schnellläufer bei einem Durchsatz von etwa 550 kg/h als Hauptextruder von PP-Inline-Folienanlagen Rohstoffmischungen aus dem anfallenden Stanzgitter-Mahlgut und Neuware bei einer zufriedenstellenden Schmelzequalität erfolgreich plastifiziert. Als Randbedingung wurde ein 40-D-Glatrohr-Zylinder definiert. Zudem steht ein energieeffizienter und leistungsstarker Direktantrieb (Servomotor mit 190 kW bei 2100 min<sup>-1</sup>) zur Verfügung. Dieses Antriebskonzept ist äußerst wartungsarm und kompakt.

Lessmann [19] und Weddige [20] haben am KTP das Einrieselverhalten von Granulat und die Feststoffförderung in schnelllaufenden Einschneckenextrudern in Simulation und Experiment ausführlich untersucht. Die Länge der Einfüllöffnung, die Ausführung der Einzugschnecke längs der Trichteröffnung sowie die Geometrie der Schnecke unter dem Trichter ließen sich auf Basis dieser Ergebnisse für ein ausreichendes und gleichmäßiges Einzugsverhalten auslegen. Um die Schneckengeometrie auszulegen, kam die Soft-

Drehzahl [min <sup>-1</sup> ]	Mittlere Verweilzeit [s]	Minimale Verweilzeit [s]
500	16,47	8,94
1000	8,27	4,41
1500	5,53	2,94

**Tabelle 1.** Mit REX berechnete Verweilzeiten für granulatförmige PP-Neuware bei einem Gegendruck von 100 bar (Quelle: KTP)

ware REX (Rechnergestützte Extruderanlegung) des KTP zur umfassenden Beurteilung von Kunststoffverarbeitungsprozessen auf Einschneckenextrudern zum Einsatz. Die Schneckenengeometrie wurde dann im Technikum der esde Maschinentechnik experimentell untersucht und hinsichtlich der speziellen Herausforderungen der High-Speed-Extrusion feinabgestimmt.

Das grundlegende Prinzip, das der Schneckenauslegung in diesem Projekt zugrunde liegt, ist das materialschonende disperse Aufschmelzen (**Bild 1**). Dazu wird ein neuartiges, zweistufiges Schneckenendesign verwendet. In der ersten Kompressions- und Meteringzone wird dabei ein definierter Schmelzeanteil erzeugt. Nach der Staustufe, durch die der verbliebene Feststoff gleichmäßig in der bereits erzeugten Schmelze verteilt wird, erfolgt das disperse Aufschmelzen. Dieses Prinzip ist anschaulich bei Eiswürfeln (verbliebener Feststoff) in Wasser (Kunststoffschmelze) zu beobachten und generiert in der zweiten Schneckenstufe zwei positive Effekte: Die notwendige Aufschmelzenthalpie für den Feststoff wird durch das umgebende (wärmere) Fluid aufgebracht, wobei sich das Fluid abkühlt, da ihm die zur Phasenumwandlung des Feststoffs erforderliche Wärme entzogen wird. Dieses Prinzip gewährleistet nicht nur die vollständige Plastifizierung des Materials, sondern schützt auch die Schmelze vor Überhitzung. Förderlich für diesen Mechanismus sind gleichmäßig verteilte, kleine Feststoffpartikel mit einer großen spezifischen

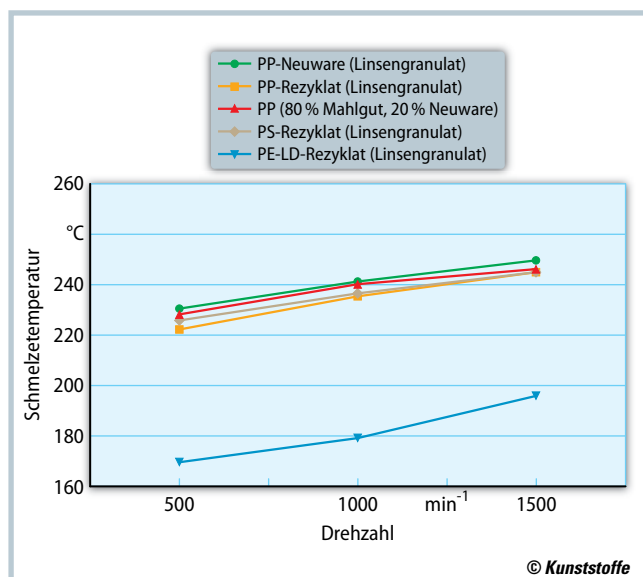
Oberfläche und damit einer großen Austauschfläche für den Wärmetransport. Derart positive Voraussetzungen für das disperse Aufschmelzen schafft die geometrische Gestaltung der Staustufe vor der zweiten Schneckenzone.

Die stoffliche Homogenisierung letzter Feststoffpartikel in der Schmelze übernimmt ein dynamisches Scherelement, dessen Geometrie an die besonderen Herausforderungen des schnellaufenden Extruders angepasst wurde, um die Homogenisierung zu verbessern und den Wärmeeintrag zu verringern.

Aufgrund der extrem kurzen Verweilzeit des Kunststoffs im Extruder (**Tabelle 1**) ist im Anschluss an die Schneckenspitze ein statischer Mischer installiert, der nicht nur die stoffliche, sondern auch die thermische Homogenität der Schmelze garantiert. In den experimentellen Untersuchungen haben wir sowohl die Schmelztemperaturen als auch die stoffliche Homogenität in Abhängigkeit vom jeweiligen Durchsatz und Betriebspunkt immer wieder kontrolliert.

### Experimentelle Untersuchungen

Zur Sicherstellung eines realitätsnahen Betriebsverhaltens und der Vergleichbarkeit der Ergebnisse ist eine Drosseldüse mit konstanter Einstellung verwendet worden, die in Abhängigkeit vom Durchsatz einen Gegendruck zwischen 80 und 100 bar an der Schneckenspitze aufgebaut hat. Um die Schmelzequalität am Ende des Extrudersystems beurteilen zu können, ist auf komplexere Versuchs- »



**Bild 3.** Schmelztemperaturen für die Materialien und Drehzahlen aus Bild 2: Auch bei 1500 min<sup>-1</sup> wird die kritische Schmelztemperatur von 240 °C für das verarbeitete PP nicht überschritten

(Quelle: KTP, esde)



**Bild 4.** Proben aus dem Schneckenziehversuch: Sichtbare weiße Feststoffe am Anfang der zweiten Schneckenstufe (oben), disperses Aufschmelzen (Mitte) und vollständige Plastifizierung am Extruderaustritt (© KTP, esde)

aufbauten mit Siebwechsler, Schmelzepumpe und Breitschlitzwerkzeug verzichtet worden.

Wie zuvor simuliert, ist der angestrebte Durchsatz von etwa 550 kg/h granulartförmiger Neuware PP in den experimentellen Untersuchungen bei Drehzahlen von  $1500 \text{ min}^{-1}$  erreicht worden (**Bild 2**). Der spezifische Durchsatz ist über den getesteten Drehzahlbereich nahezu konstant geblieben. Die untersuchten Rohstofffraktionen mit unterschiedlichen Schüttgutedichten lassen sich – solange die Rieselfähigkeit gegeben ist – problemlos verarbeiten. Aus den unterschiedlichen Materialeigenschaften resultieren jedoch geringfügig abweichende Massedurchsätze.

Während der experimentellen Untersuchungen wurden verschiedene Poly-

propylen-Typen getestet: Neben linsenförmiger Neuware (PP-Homopolymer) wurde ein zu Linsen gepresstes Rezyklat (Mischung aus PP-Homopolymer mit PP-Copolymer und Farbpigmenten) und eine rieselfähige Mischung aus 80 % Folienmahlgut und 20 % linsenförmiger Neuware (PP-Homopolymer) eingesetzt. Die erreichten Durchsätze sind in **Bild 2** dargestellt. Beispielhaft sind in den Durchsatz- und Temperaturdiagrammen (**Bilder 2 und 3**) noch ein Polyethylen geringer Dichte (PE-LD) und ein Polystyrol (PS) aufgeführt, die jeweils als linsenförmiges Rezyklat verarbeitet wurden. Bei identischer Schneckenengeometrie und unkritischen Schmelzetemperaturen wird bei Drehzahlen von  $1500 \text{ min}^{-1}$  ein Durchsatz von 514 kg/h PE-LD bzw. 650 kg/h PS möglich. Die Schmelzetemperatur (**Bild 3**) wird nach dem statischen Mischer, aber noch vor der Drosseldüse mit einem Masse-temperaturfühler gemessen, der circa 10 mm in den Schmelzekanal hineinragt. Alle für PP gemessenen Schmelzetemperaturen lagen unterhalb der für die Verarbeitung kritisch bewerteten Temperatur von  $240^\circ\text{C}$ .

Die stoffliche Homogenität wurde experimentell mithilfe von Schneckenziehversuchen bestimmt. Dazu wurde das PP-Granulat mit Ruß vermischt, weil Feststoff und Schmelze ansonsten gleichfarbig und nicht zu unterscheiden sind. Die Rußpartikel setzen sich auf der Oberfläche des Feststoffs ab. Das aufgeschmolzene Material vermischt sich mit den Rußpartikeln und verfärbt sich dunkel. Nicht aufgeschmolzenes Material kann sich nicht mit Rußpartikeln vermischen und bleibt dementsprechend farblos. Sobald ein stationärer Betriebspunkt erreicht ist, wird die Extruderschnecke angehalten und das System gekühlt. Ist

die Schmelze erstarrt, wird die Schnecke gezogen und es lassen sich Dünnschnitte über die Schneckenlänge zur Analyse des Aufschmelzverlaufs anfertigen. Am Ende des Extruders waren die Proben auch bei den maximalen Drehzahlen vollständig eingefärbt, was die vollständige Plastifizierung des weiß eingefärbten PP im eingesetzten Schnellläufersystem bestätigt. Der Dünnschnitt in **Bild 4** zeigt die grau eingefärbte Schmelze und den weißen Rest-Feststoff zu Beginn der zweiten Schneckenzone, in der dispers und materialschonend aufgeschmolzen wird, vor dem Scherelement und am Austritt des Extruders.

### Fazit

Die esde Maschinentechnik GmbH und die Kunststofftechnik Paderborn (KTP) haben gemeinsam einen Schnellläufer mit einem Schneckendurchmesser von 40 mm entwickelt, der bei der Verarbeitung von gängigen Polypropylen-Folientypen mit einer Drehzahl von  $1500 \text{ min}^{-1}$  einen Durchsatz von bis zu 550 kg/h erreicht. Die Schmelzetemperaturen liegen dabei unterhalb kritischer Verarbeitungstemperaturen und trotz der hohen Aufschmelzenthalpie des PP-Homopolymers wird das Material vollständig plastifiziert, was durch Messreihen und Schneckenziehversuche nachgewiesen wurde. Zudem ist mit der neuartigen Schneckenengeometrie die Verarbeitung von weiteren Standardpolymeren wie z. B. Polyethylen oder Polystyrol in ersten Testreihen problemlos möglich gewesen. In Kooperation ist es gelungen, die Herausforderungen stabiles Einzugsverhalten, hoher Massedurchsatz, niedrige Schmelzetemperatur und gute Schmelzequalität zu bewältigen. ■