

# Feststoff effizienter fördern

## Welche Modifikationen der Einzugszone den Durchsatz erhöhen können

Eine geschickte Gestaltung der Einzugszone erlaubt eine optimierte Befüllung schnelldrehender Schneckenmaschinen. Dadurch kann die Effizienz von Extrusionsprozessen mit schnelldrehender Schnecke deutlich gesteigert werden.

Die Leistungsfähigkeit von Glattrohretrudern zur Herstellung von Halbzeugen definiert sich in den schmelzeführenden Zonen, die in der Regel durchsatzbestimmend für das gesamte System sind. Allerdings können sie nicht mehr fördern als die Einzugszone zu liefern imstande ist, was wiederum von den Materialeigenschaften des Schüttguts abhängig ist – es kann gedrückt, jedoch nicht gezogen werden, da sich zwischen den Körnern keine Zugspannung übertragen lässt. Die Förderwirksamkeit der Einzugszone hängt maßgeblich vom Einrieselverhalten unter dem Trichter ab.

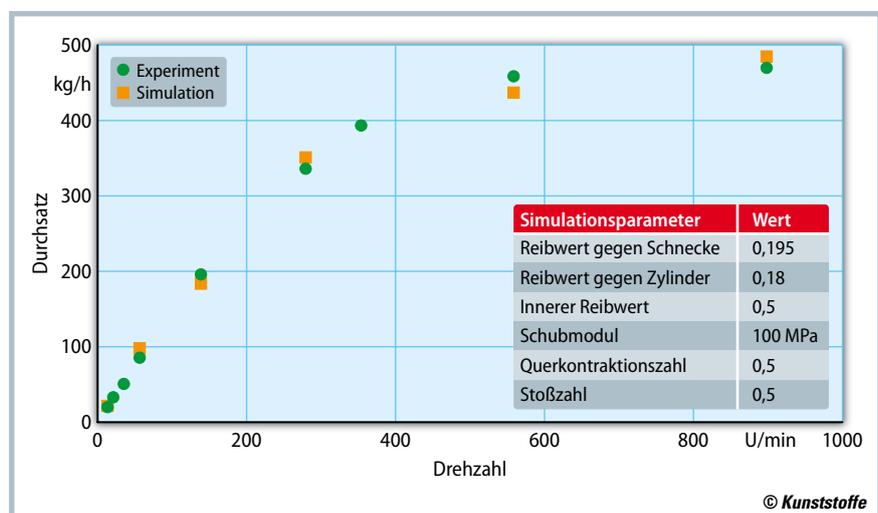
nicht vollständig, aber doch so sehr gefüllt, dass Granulatkörner, die direkt oberhalb des Schneckenkanals liegen, verdrängt werden. Ein Teil wird durch die Fase am Ende der Öffnung in den Schneckenkanal gedrückt. Der weitaus größere Teil allerdings wird zurück in die Trichteröffnung gedrängt. Dadurch reduziert sich die wirksame Einrieselfläche – in diesem Fall um ca. 50 %.

Hierauf fußt die Idee, den Feststoffdurchsatz durch eine Verringering der Zirkulationseffekte in der Einzugszone zu steigern, indem einerseits die Schneckengeometrie variiert wird und an-

### Einfluss der Einzugszone

Aus der Literatur [1, 2] und eigenen Untersuchungen [3] ist bekannt, dass beim Einrieseln zwei Grenzfälle auftreten: Zum einen existiert ein maximaler Einrieseldurchsatz, bei dem das Granulat aus dem Trichter auf die sich darunter befindende Schnecken rieselt. Dieser Durchsatz hängt maßgeblich von der Trichtergeometrie ab und wirkt bei einer ungünstig gestalteten Trichteröffnung durchsatzbegrenzend. Zum anderen wird der Durchsatz im Schneckenkanal über die Drehzahl definiert. Bei geringen Drehzahlen ist die Fördermenge proportional zur Drehzahl. Über das übliche Maß steigende Drehzahlen führen jedoch zu sehr kurzen „Einrieselzeiten“, wodurch dem Granulat ganz einfach die Zeit fehlt, den Schneckengang vollständig zu füllen. Bei hohen Drehzahlen bildet sich daher ein degressives Drehzahl-Durchsatz-Verhalten aus (Bild 1).

Weiterhin treten bei hohen Umfangsgeschwindigkeiten verstärkt Zirkulationsphänomene auf, die die wirksame Fläche der Einfüllöffnung deutlich verringern, wie die Simulation zeigt (Bild 2). Dabei steht jeder Vektor für die Bewegungsrichtung eines Granulatkorns. Die ausgeprägte Zirkulationsströmung resultiert aus den Impulsen, die die Granulatkörner im Auslaufbereich der Einfüllöffnung erfahren. Der Schneckenkanal ist hier zwar noch



**Bild 1.** Vergleich von simuliertem und experimentell ermitteltem Durchsatz (Quelle: Universität Paderborn)

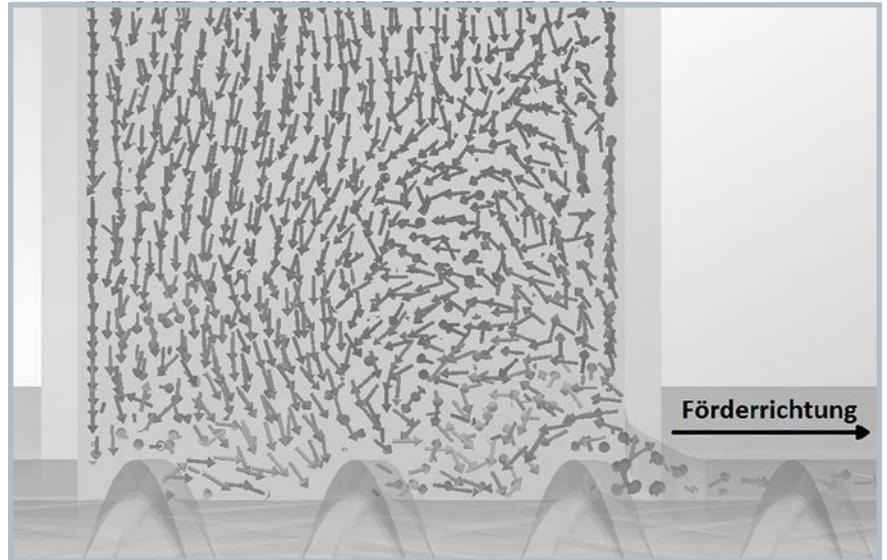
dererseits Leitbleche in die Trichteröffnung eingebracht werden. Eine Optimierung der Öffnungsgeometrie selbst ist bereits in [2] beschrieben worden. Untersucht werden die vorgeschlagenen Modifikationen mithilfe der Diskrete-Elemente-Methode (DEM, siehe Kasten). Für einen Extruder mit einem Durchmesser von 90 mm (Stegbreite 9 mm) werden daher im Folgenden DEM-Simulationen genutzt, um mithilfe von Schneckenmodifikationen die zuvor angesprochenen Zirkulationseffekte zu reduzieren und dadurch den maximal möglichen Feststoffdurchsatz bei hohen Schneckendrehzahlen zu steigern. »

## Diskrete-Elemente-Methode

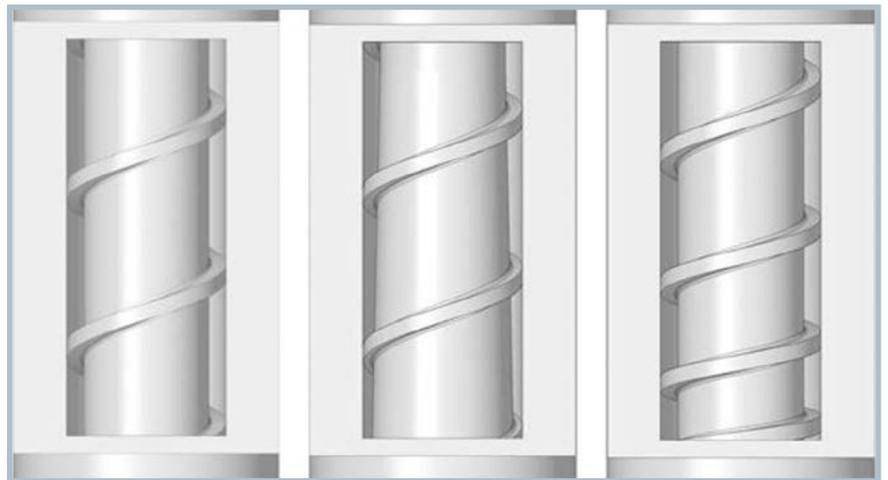
Die Diskrete-Elemente-Methode (DEM) wurde von Cundall und Strack entwickelt und durch Mooney und Thompson erfolgreich in der Simulation von Extrusionsprozessen umgesetzt. In [4–8] wird ihre Vorgehensweise zur Modellierung und die Weiterentwicklung der Simulationsmodelle ausführlich beschrieben.

Im Gegensatz zur Finite-Elemente-Methode (FEM) werden hier die zu berechnenden Geometrien nicht vernetzt, sondern durch einfache, meist sphärische, diskrete Partikel angenähert, für die in jedem Iterationsschritt Positionen und Geschwindigkeiten berechnet werden. Bei Kontakt werden die Partikel nicht verformt, sondern überlappen sich virtuell. Die Berechnung der Partikelpositionen und -geschwindigkeiten erfolgt auf Basis einer virtuellen Überlappung zweier oder mehrerer in Kontakt stehender Teilchen, aus der mit entsprechenden Modellgesetzen Reib-, Impuls- und Rückstoßkräfte ermittelt werden.

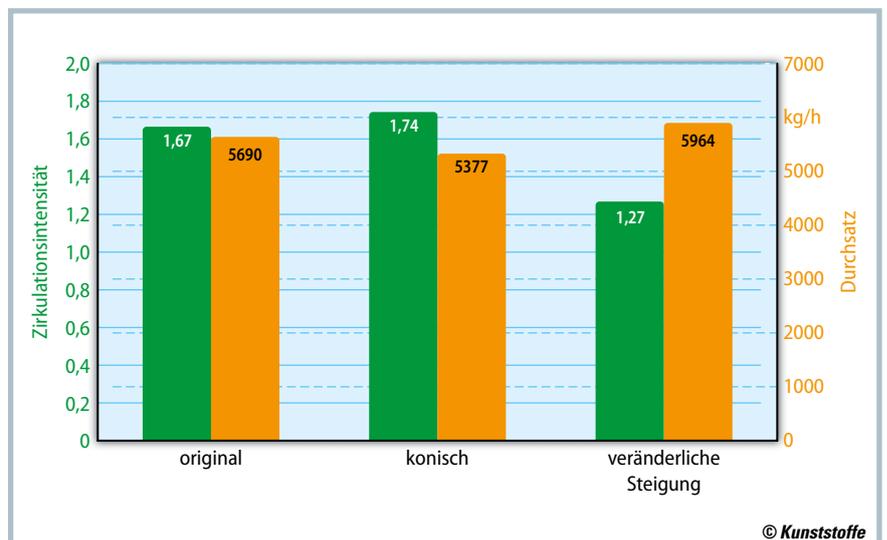
Die benötigten Elastizitätskennwerte ergeben sich aus dem E-Modul und dem Schubmodul des simulierten Werkstoffs in Kombination mit der virtuellen Überlappung. Die Dämpfungsparameter werden aus der Stoßzahl  $e$  (Restitutionskoeffizient) des Werkstoffs bestimmt. Für den Reibparameter  $\mu$  können direkt Messwerte verwendet werden. In den vorgestellten Simulationen wurden für die Moduln Angaben aus Datenblättern verwendet sowie Messwerte für die Stoßzahl, die in Fallversuchen ermittelt wurden. Ebenfalls sind Reibwerte ermittelt worden, die als Parameter  $\mu$  in die Simulationen eingehen. Für alle Partikel werden in jedem Iterationsschritt unter Berücksichtigung der aktuellen Position und Geschwindigkeit die Newtonschen Bewegungsgleichungen gelöst. Daraus ergeben sich die Position und Geschwindigkeit für den nächsten Iterationsschritt.



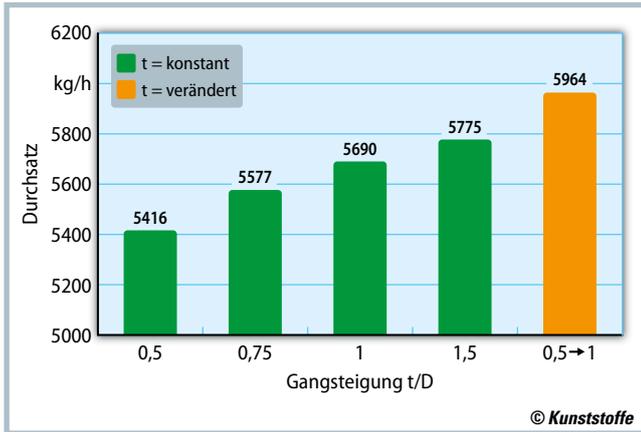
**Bild 2.** Feststoffförderzone eines Extruders mit 30 mm Durchmesser: Die Simulation der Partikelgeschwindigkeiten zeigt bei  $2000 \text{ min}^{-1}$  eine ausgeprägte Zirkulationsströmung (© Universität Paderborn)



**Bild 3.** Schnecken geometrievierungen: Links: Ausgangsgeometrie (Gangsteigung  $t = 90 \text{ mm}$ , Gangtiefe  $h = 9,7 \text{ mm}$ ); Mitte: konischer Kern ( $h = 4,1 \dots 9,7 \text{ mm}$ ) bei  $t = 90 \text{ mm}$ ; rechts: veränderliche Gangsteigung ( $t = 45 \dots 90 \text{ mm}$ ) bei  $h = 9,7 \text{ mm}$  (© Universität Paderborn)

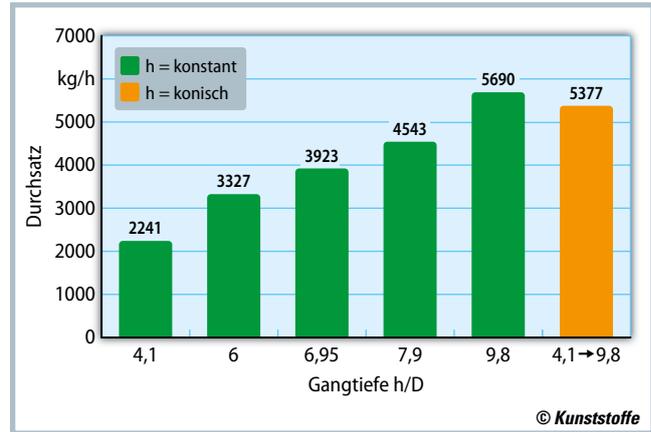


**Bild 4.** Simulierte Zirkulationsintensitäten und Durchsätze (Quelle: Universität Paderborn)



**Bild 5.** Variable Gangsteigung (ganz rechts) liefert in der Simulation (bei jeweils 90 mm Schneckendurchmesser und 2000 min<sup>-1</sup> Drehzahl) einen höheren Granulatdurchsatz als vergleichbare feste Gangsteigungen

(Quelle: Universität Paderborn)



**Bild 6.** Eine veränderliche Gangtiefe bewirkt (bei jeweils 90 mm Schneckendurchmesser und 2000 min<sup>-1</sup> Drehzahl) im Vergleich mit festen Gangtiefen keinen signifikanten Einfluss auf den Granulatdurchsatz

(Quelle: Universität Paderborn)

### Durchsatzsteigernde Schneckenmodifikationen

Als Ausgangsgeometrie wurde eine Gangtiefe von 9,7 mm, eine Gangsteigung von 90 mm und eine Gangzahl von 1 festgelegt. Betrachtet werden zwei Geometrien, in denen ein über der Öffnungslänge in Förderrichtung wachsender Kanalquerschnitt das Zirkulationsphänomen reduzieren soll: einerseits eine in Förderrichtung zunehmende Gangsteigung (veränderliche Gangsteigung) und andererseits eine in Förderrichtung zunehmende Kanaltiefe (konischer Schneckenkern). Die Geometrien sind derart angepasst worden, dass der Kanalquerschnitt am Ende der Trichteröffnung jeweils identisch ist. Im Fall des konischen Schneckenkerns beträgt daher die Gangtiefe am Trichterauslauf ebenfalls 9,7 mm. Zu Beginn der Trichteröffnung ist der Schneckenkanal 4,1 mm tief. Analog beträgt die Gangsteigung in der Geometrie mit veränderlicher Gangsteigung am Ende der Trichteröffnung 90 mm und zu Beginn 45 mm. Die Maße der Trichteröffnung betragen bei allen Simulationen  $b \times l = 90 \text{ mm} \times 225 \text{ mm}$ .

Der Vergleich der drei Varianten (**Bild 3**) erfolgt einerseits über den Durchsatz, andererseits wird eine sogenannte Zirkulationsintensität  $Z_i$  definiert, die die Zirkulationseffekte innerhalb der Einfüllöffnung quantifiziert:

$$Z_i = \frac{v_{\text{total}} - v_m}{v_m} \quad (1)$$

Darin ist  $v_m$  die Geschwindigkeit, die sich bei bekannter Trichteröffnungsquerschnittsfläche  $A_{Tr}$  und bekannter Schüttdichte  $\rho_s$  aus dem Durchsatz  $\dot{m}$  ergibt.

$$v_m = \frac{\dot{m}}{\rho_s \cdot A_{Tr}} \quad (2)$$

$v_{\text{total}}$  ist die durchschnittliche Absolutgeschwindigkeit der Simulationspartikel im ausgewerteten Kontrollraum oberhalb der Schnecke. Die Zirkulationsintensität wird also Null, wenn die Granulatkörner nur senkrechte Bewegungen zur Befüllung des Schneckenkanals ausführen. In Fördersimulationen mit einer Drehzahl von 2000 min<sup>-1</sup> ergeben sich die in **Bild 4** dargestellten Durchsätze und Zirkulationsintensitäten. Offensichtlich fördert die Geometrie mit einer über der Trichteröffnungslänge zuneh-

menden Gangsteigung mehr Durchsatz im Vergleich zur Ausgangsgeometrie.

Zusätzliche Untersuchungen mit konstanten Gangsteigungen von 0,5D, 0,75D, 1D und 1,5D sollten den Effekt der zunehmenden Gangsteigung isolieren. Die Gangsteigung von 0,75D entspricht dabei dem mittleren Wert der Schneckenengeometrie mit veränderlicher Gangsteigung. Liegt ein signifikanter Effekt vor, ist eine klare Differenzierung des Durchsatzes von den Werten mit konstanter Gangsteigung zu erwarten, was sich tatsächlich beobachten lässt (**Bild 5**): Der mit veränderlicher Gangsteigung simulierte Durchsatz liegt deutlich oberhalb der Werte sowohl für die konstante mittlere Gangsteigung von 0,75D als auch für die konstante Gangsteigung von 1D. Daher ist die Durchsatzsteigerung, die mit einer über die Trichteröffnungslänge größer werdenden Gangsteigung erreicht wird, auf einen signifikanten Effekt der veränderlichen Gangsteigung zurückzuführen.

Weniger zielführend erscheint dagegen die Geometriemodifikation mit konischem Schneckenkern. Hier ist der Durchsatz geringer und die Zirkulationsintensität größer als bei der Originalgeometrie (**Bild 4**). Auch zeigt der Vergleich mit jeweils konstanten Gangtiefen (**Bild 6**) keinen signifikanten Effekt einer veränderlichen Gangtiefe, sodass eine über der Trichteröff-

## Praxisnutzen

Die durchgeführten Untersuchungen haben gezeigt, dass eine über der Trichteröffnungslänge zunehmende Gangsteigung den Feststoffdurchsatz in Schneckenextrudern erhöhen kann. Alternativ lässt sich bei gleichem maximal möglichem Feststoffdurchsatz die Einfüllöffnung verkürzen. Dadurch steht bei gleichbleibender Gesamtlänge eines Extruders anteilig eine größere Prozesslänge für den Aufschmelzprozess zur Verfügung, wodurch sich wiederum die Schneckendrehzahl und damit der Gesamtdurchsatz bei gleichem Aufschmelzverhalten erhöhen lassen.

## Die Autoren

**Jan Trippe, M.Sc.**, ist seit 2014 als wissenschaftlicher Mitarbeiter der Kunststofftechnik Paderborn in der Arbeitsgruppe von Prof. Schöppner an der Universität Paderborn tätig; jan.trippe@ktp.upb.de

**Dipl.-Ing. Johann-Sebastian Leßmann** war zwischen 2011 und 2015 als wissenschaftlicher Mitarbeiter der Kunststofftechnik Paderborn in der Arbeitsgruppe von Prof. Schöppner an der Universität Paderborn tätig.

**Prof. Dr.-Ing. Volker Schöppner** ist seit 2007 als Leiter des Fachgebiets Kunststoffverarbeitung an der Universität Paderborn tätig.

## Danksagung

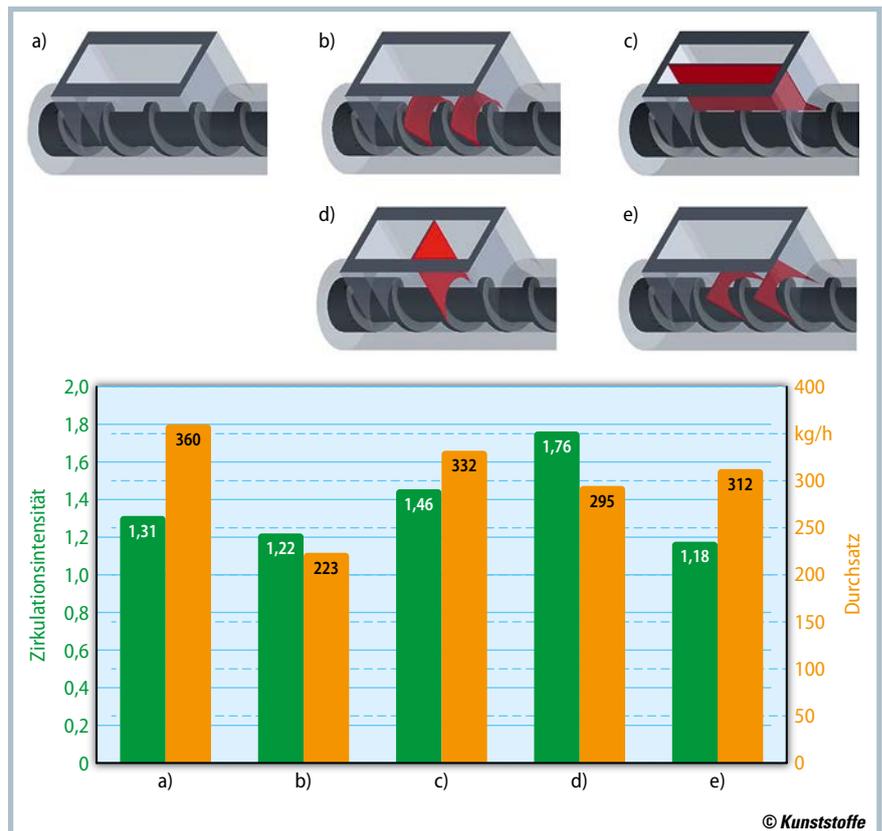
Wir danken an dieser Stelle herzlich der Deutschen Forschungsgemeinschaft, die die vorgestellten Untersuchungen durch die Finanzierung des Projekts SCHO 551/23-1 ermöglicht hat.

## Service

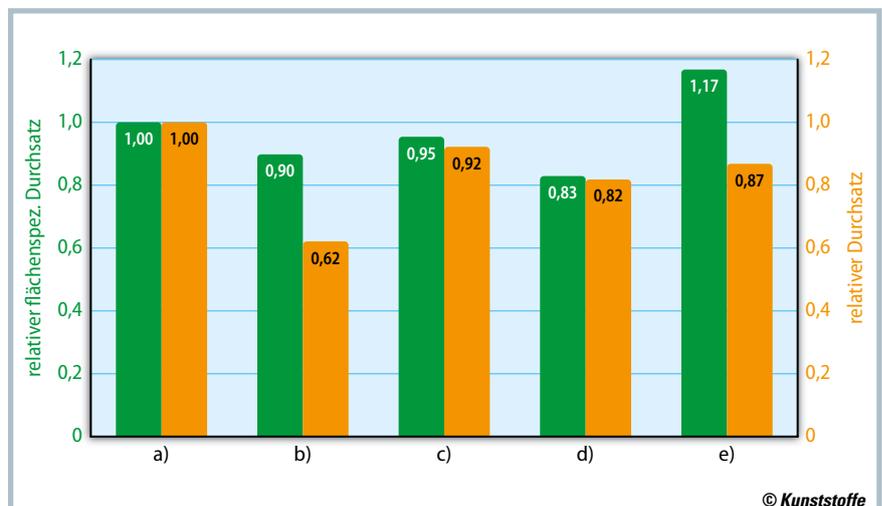
### Literatur & Digitalversion

Das Literaturverzeichnis und ein PDF des Artikels finden Sie unter [www.kunststoffe.de/2511903](http://www.kunststoffe.de/2511903)

nungslänge konstante Gangtiefe sinnvoller erscheint. Dies wird dadurch bekräftigt, dass auch die Zirkulationsintensität für die Geometrie mit veränderlicher Gangtiefe größer ist als bei der Ausgangsgeometrie. Hier sind also Stagnationszonen im Bereich der Trichteröffnung ausgeprägter zu erwarten [10], was zu höheren Verweilzeiten der Granulate in diesen Zonen führt. Dies gilt es aber besonders bei hygroskopischen Materialien zu vermeiden, um die Feuchtigkeitsaufnahme zu reduzieren.



**Bild 7.** Einfluss von Leitblechen: In die Ausgangsgeometrie (a) werden Leitbleche in Form der Fase am Auslauf der Trichteröffnung (b), sowie längs (c) und quer (d) zur Schneckenachse und unter einem 45°-Winkel (e) eingebracht und die zugehörigen Zirkulationsintensitäten und Durchsätze berechnet (Quelle: Universität Paderborn)



**Bild 8.** Relative Durchsätze und relative flächenspezifische Durchsätze für verschiedene Leitblechvariationen (Quelle: Universität Paderborn)

### Leitbleche in der Trichteröffnung

In weiteren Fördersimulationen sind zur Reduktion der Zirkulationsintensität für einen Extruder mit 30 mm Schneckendurchmesser (Gangsteigung 30 mm, Gangtiefe 5,6 mm) Leitbleche in die Trichteröffnung (b x l = 30 mm x 75 mm) eingebracht worden (**Bild 7**). Offensichtlich wird mit keiner der Varianten der Feststoffdurchsatz im Vergleich zur Ausgangsgeometrie gesteigert. Zwar wird die Zirkulationsintensität für die beiden diagonal eingebrachten Leitbleche reduziert, der Effekt der Verminderung der Querschnittsfläche, die für das Einrieseln zur Verfügung steht, überwiegt allerdings, sodass insgesamt der Durchsatz nicht steigt. Dieser Effekt lässt sich anhand des flächenspezifischen Durchsatzes  $\dot{m}_{fl.spez.}$

$$\dot{m}_{fl.spez.} = \frac{\dot{m}}{A_{Tr}} \quad (3)$$

aufzeigen, wobei  $\dot{m}$  der jeweils simulierte Durchsatz und  $A_{Tr}$  die effektive Querschnittsfläche der Trichteröffnung ist. Diese kann durch auftretende Zirkulationseffekte kleinere Werte gegenüber dem eigentlich vorhandenen Bauraum annehmen. Die so ermittelten Durchsätze werden jeweils auf den entsprechenden Durchsatz der Originalgeometrie ohne Leitblech bezogen (**Bild 8**)

$$\dot{m}_{rel.fl.spez.} = \frac{\dot{m}_{fl.spez.mit Leitblech}}{\dot{m}_{fl.spez.Ausgangsg.}}; \dot{m}_{rel.} = \frac{\dot{m}_{mit Leitblech}}{\dot{m}_{Ausgangsg.}} \quad (4)$$

Für die Leitbleche in Form der Fase (b) verringert sich der relative flächenspezifische Durchsatz im Vergleich zum relativen Durchsatz nur geringfügig gegenüber der Ausgangsgeometrie (a). Hier scheint daher die Verringerung der Querschnittsfläche der dominierende Effekt zu sein. Ähnlich verhält sich die Variante mit schrägen Leitblechen (e). Hier steigt sogar der relative flächenspezifische Durchsatz, während der relative Durchsatz fällt. Für die längs und quer eingebrachten Leitbleche verhalten sich der relative Durchsatz und der relative flächenspezifische Durchsatz in etwa proportional. Hier hat die Querschnittsfläche daher nahezu keinen durchsatzmindernden Effekt. Vielmehr dominiert hier die Zirkulationsintensität, wie in **Bild 8** deutlich wird: Durchsätze und Zirkulationsintensität verhalten sich für die die längs und quer eingebrachten Leitbleche reziprok zueinander.

Zur Durchsatzsteigerung erscheint die Einbringung von Leitblechen in die Trichteröffnung nicht geeignet. Lediglich unerwünschte Stagnationszonen in der Trichteröffnung können so reduziert werden (vgl. [10]), wenn es gelingt durch die Leitbleche die Zirkulationsintensität zu vermindern.

### Fazit

Die Untersuchungen bestätigen die Eignung der Diskrete-Elemente-Methode für die Simulation von Feststoffförderprozessen. Es ließ sich zeigen, dass Zirkulationseffekte in der Einfüllöffnung von Einschneckenextrudern den Feststoffdurchsatz beeinflussen. Ein durchsatzsteigernder Effekt konnte simulativ für eine in der Einzugszone zunehmende Gangsteigung nachgewiesen werden. Keinen positiven Einfluss auf den Durchsatz zeigt dagegen die Einbringung von Leitblechen in die Einfüllöffnung. Der nächste Schritt besteht somit in der experimentellen Verifikation der vorgestellten Simulationsergebnisse. ■