

Neue Schneckenkonzepte für die Extrusion

Auf der Welle zum Mischerfolg

Auf dem Prüfstand: Die Universität Paderborn untersuchte konventionelle und neue Schneckenkonzepte für die Extrusion, um einen höheren Durchsatz bei gleichbleibender Maschinengröße zu erreichen. Punkten konnten dabei vor allem die Energy-Transfer-Schnecken, die zu den Wave-Schnecken zählen.

Extrusionsanlagen müssen wirtschaftlich arbeiten. Die Erhöhung der Effektivität – besonders in der Einschneckenextrusion – soll dabei durch einen erhöhten Durchsatz bei gleichbleibender Maschinengröße erreicht werden. Um dabei eine hohe Schmelzequalität zu gewährleisten, wurden neben den konventionellen Schnecken neue Schneckenkonzepte entwickelt. Hierzu zählen die sogenannten Wave-Schnecken, welche das Feststoffbett zu einem frühen Zeitpunkt aufbrechen sollen, um das Aufschmelz- und Homogenitätsverhalten zu optimieren.

Zweigängige Double-Wave- und Energy-Transfer-Schnecken sind die am meisten verbreiteten Wave-Schnecken und zeichnen sich durch das periodische Zu- und Abnehmen der Kanaltiefe aus. Die daraus resultierenden Wellen sind versetzt angeordnet, sodass in einem Kanal ein Wellental vorliegt, während im anderen Kanal ein Wellenberg vorliegt und umgekehrt. Die beiden Kanäle der Double-Wave-Schnecke (DW-Schnecke) [1] sind dabei, ähnlich wie bei einer Barrierschnecke, durch einen kontinuierlich abgesetzten Nebensteg getrennt, welcher einen größeren Spalt zum Zylinder aufweist als der Hauptsteg. Hierdurch wird durch das Aufteilen der Schmelze an einem Wellenberg über den Nebensteg und über den Wellenberg selbst die Durchmischung stark gefördert und somit eine höhere thermische und stoffliche Homogenität erzielt. Die Energy-Transfer Schnecke (ET-Schnecke) [2] gleicht dem Aufbau der Double-Wave-Schnecke. Allerdings sind der Haupt- sowie Nebensteg vereinzelt abgesetzt, sodass die Schmelze am jeweiligen Wellenberg über den Steg in den jeweils stromaufwärts liegenden Schneckenkanal strömen kann (**Bild 1**). Die Funktion des Haupt- und Nebensteges alterniert dabei derartig, dass die Schmelze immer wieder gegen die Förderrichtung den Kanal wechselt, wodurch die Mischwirkung abermals verstärkt wird.

Mischvorgänge in Einschneckenextrudern

Das Mischen ist neben dem Plastifizieren und Fördern der Schmelze eine der Hauptaufgaben der Schnecke in Einschneckenextrudern. Direkt mit der Homogenität der Schmelze an der Schnecken spitze korreliert die Produktqualität des Extrudats. Weiterhin wird im Sinne der Wirtschaftlichkeit zunehmend

auf einen zusätzlichen Prozessschritt des Aufbereitens verzichtet, sodass Einschneckenextruder immer anspruchsvollere Mischaufgaben erfüllen müssen [3].

Die in Einschneckenextrudern ablaufenden Mischvorgänge gliedern sich grundsätzlich in die in **Bild 2** dargestellten zwei Arten von Mechanismen [4]. Zum einen existiert das dispersive Mischen, durch welches Feststoffe in Form von Agglomeraten und Aggregaten von der Kunststoffschmelze benetzt und auf Basis von Scher- und Dehnvorgängen zu möglichst kleinen Primärpartikeln zerteilt werden. Zum anderen existiert das distributive Mischen, durch das sich die Partikel in der Schmelze auf Basis von Deformationen und Umlagerungen möglichst homogen verteilen und auf das in den nachfolgenden Untersuchungen der Fokus gelegt wurde.

Die Mischgüte unter der Lupe

Zur Auswertung der distributiven Mischgüte wurden sowohl experimentelle als auch simulative Untersuchungen vier verschiedener Schneckenkonzepte durchgeführt und diese entsprechend miteinander verglichen. Zum Einsatz kamen hierbei eine klassische 3-Zonen-Schnecke, eine klassische Barrierschnecke sowie eine Double-Wave- und eine Energy-Transfer-Schnecke. Alle Schnecken wiesen keine weiteren Misch- und Scherteile auf.

Experimentell wurde die stoffliche Homogenität auf Basis von drei Dünnschnitten aus einer Strangprobe bei einer Materialmischung von PE-HD mit 0,2% schwarzem Masterbatch analysiert. Die Proben wurden anschließend eingescannt und die einzelnen Pixel in eine Grauwertverteilung überführt. Wie in **Bild 3** dargestellt, ergeben sich hierdurch Histogramme mit Häufigkeitsverteilungen der jeweiligen Pixelhäufig-

Info

Autoren

Maximilian Frank, M.Sc., arbeitet seit 2018 als wissenschaftlicher Mitarbeiter bei der Kunststofftechnik Paderborn (KTP) an der Universität Paderborn.

Marius Dörner, M.Sc., arbeitet als Projektleiter bei der Ianus Simulation GmbH.

Dr. Christian Marschik ist Area Manager für Prozessdigitalisierung bei der Competence Center Chase GmbH.

Christoph Schall, M.Sc., arbeitet seit 2019 als wissenschaftlicher Mitarbeiter bei der Kunststofftechnik Paderborn (KTP) an der Universität Paderborn.

Prof. Dr.-Ing. Volker Schöppner ist seit 2007 Inhaber des Lehrstuhls für Kunststoffverarbeitung an der Universität Paderborn.

Dank

Die Autoren bedanken sich für die Finanzierung dieses Projekts durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) unter dem Geschäftszeichen SCHO 551/41-1.

Literatur & Digitalversion

Das Literaturverzeichnis und ein PDF des Artikels finden Sie unter

www.kunststoffe.de/onlinearchiv

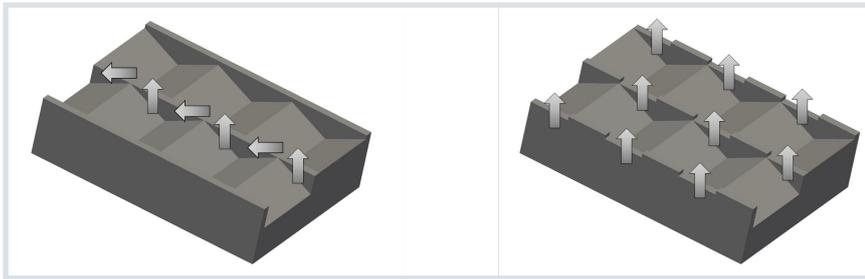


Bild 1. Abgewinkelte Kanalgeometrie einer Double-Wave- (links) und einer Energy-Transfer-Schnecke (rechts). © Uni Paderborn

keiten, die innerhalb einer Skala von 0 (reines Schwarz) bis 255 (reines Weiß) liegen. Die Auswertung der Histogramme erfolgte anschließend auf Basis statistischer Kenngrößen, um die Breite und die Verschiebung des Farbbereichs sowie die Schwarzintensität zu charakterisieren. Die Mischkennzahl liegt hierbei immer zwischen 100% (beste Durchmischung) und 0% (schlechteste Durchmischung).

Für die simulativen Untersuchungen wurde jeweils die gesamte Schnecke simuliert. Das Aufschmelzverhalten, das in **Bild 4** beispielhaft skizziert ist, wurde hierbei mittels einer einkomponentigen 2-Phasen-CFD-Simulation durchgeführt, welche den Feststoff gegenüber der Schmelze als ein sehr hochviskoses Fluid modelliert. Mittels einer Übergangsfunktion können somit sowohl dem Feststoff als auch der Schmelze ihre jeweiligen Materialeigenschaften zugewiesen werden.

Für die Charakterisierung der distributiven Mischgüte wurde im Feststoffbett eine Partikelwolke mit mehreren Partikeln definiert und entsprechend die Bahnlinien entlang der Schnecke (**Bild 5**) berechnet. Auf Basis der zweidimensionalen Partikelverteilung am Auslass kann

die Schnecke anschließend hinsichtlich ihrer Mischgüte charakterisiert werden.

Hierfür existieren bereits verschiedene Verfahren, welche jedoch mit diversen Nachteilen verbunden sind. Beispielhaft hierfür ist das sogenannte „Bin Counting“ anzuführen. Hierbei wird das Strömungsgebiet in gleichmäßige Zellen, die „Bins“, unterteilt und die Gleichmäßigkeit der in den Bins verteilten Partikel mittels der Varianz charakterisiert. Beispielhaft hierfür sind in **Bild 6** verschiedene Verteilungen schematisch dargestellt. Das

angesprochene Verfahren weist jedoch in vieler Hinsicht eklatante Nachteile auf. Beispielsweise können unterschiedliche Geometriegrößen, Querschnitte oder Kanaltiefen nicht miteinander verglichen sowie komplexere Geometrien, wie es beispielsweise bei einem Schneckenquerschnitt mit Steg der Fall ist, nur unzureichend in einheitliche Bins eingeteilt werden. Dies wird auch in **Bild 6** sehr deutlich. Die beiden Verteilungen im mittleren Bereich weisen hierbei den gleichen Wert für die Homogenität auf, obwohl die Partikelverteilungen keinerlei Ähnlichkeiten aufweisen. Des Weiteren wird das Ergebnis stark durch die Anzahl der Bins sowie die Anzahl der Partikel, welche aufgrund verschiedener Verweilzeiten sowie numerischer Instabilitäten häufig Schwankungen unterliegt, beeinflusst.

Aufgrund dieser Tatsache wurde eine neuartige Methodik auf Basis der Delaunay Triangulierung gewählt. Aus der 2D-Partikelverteilung wird, wie in **Bild 7** dargestellt, ein Dreiecksnetz aufge- ➤

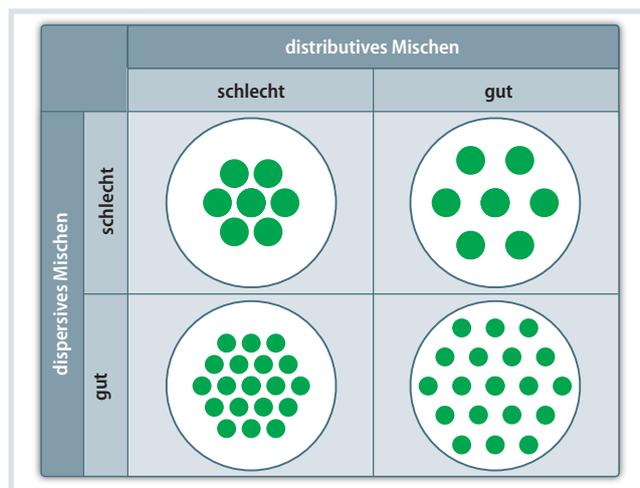


Bild 2. Schematische Darstellung des dispersiven und distributiven Mischmechanismus.

Quelle: Uni Paderborn, Grafik: © Hanser

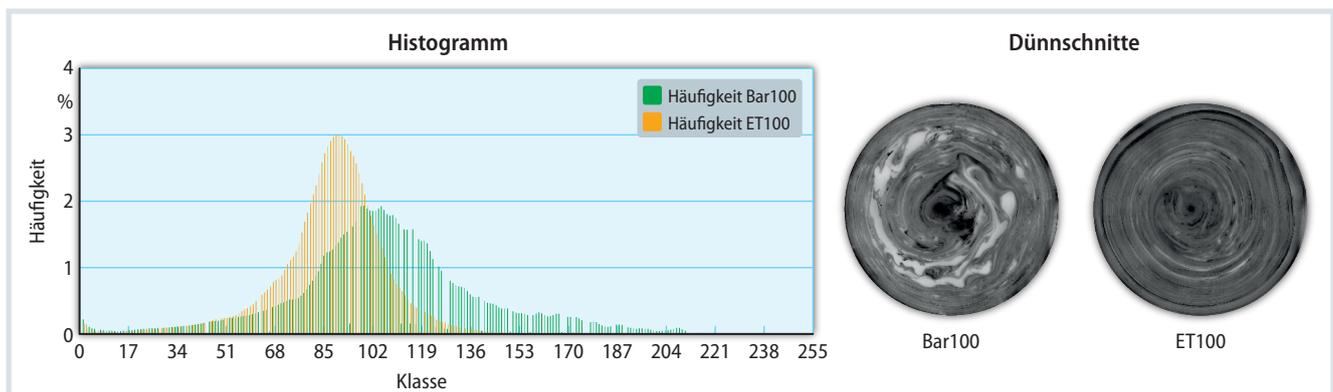


Bild 3. Beispielhafte Auswertung der Grauwertverteilung als Histogramm (links) mit zugehörigen Dünnschnitten für Barriere- und Energy-Transfer-Schnecke bei 100 U/min. Quelle: Uni Paderborn, Grafik: © Hanser



Bild 4. Kanalschnitt der Simulation im Aufschmelzbereich der Schnecke

Quelle: Uni Paderborn, Grafik: © Hanser

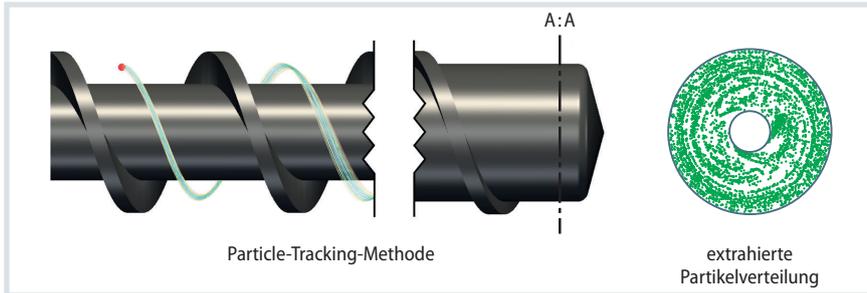


Bild 5. Schema der Particle-Tracking-Methode sowie extrahierte und triangulierte Partikelverteilung

Quelle: Uni Paderborn, Grafik: © Hanser

spannt. Die Delaunay Triangulierung ist ein Spezialfall, welcher maximierte Innenwinkel aufgrund der Einhaltung der sogenannten Umkreisbedingung erzielt. Wie in **Bild 7** deutlich wird, zielt die Umkreisbedingung darauf ab, dass innerhalb des Umkreises eines Dreiecks kein weiterer Punkt enthalten sein darf [4]. Die aufgespannten Dreiecke werden auf Basis der Standardabweichung und des Mittelwerts unter der Annahme, dass eine homogene Partikelverteilung auch mit flächenmäßig homogen aufgespannten Dreiecken einher geht, ausgewertet. Die Vorteilhaftigkeit dieser Methode äußert sich beispielsweise anhand

der Unabhängigkeit des Kennwertes von der Anzahl der Partikel für die Mischgüte. Dies ist besonders wichtig, da es aufgrund numerischer Instabilitäten und unterschiedlicher Verweilzeiten häufig zu unterschiedlichen Partikelanzahlen am Strömungsauslass kommt. Weiterhin besitzt die Methode eine hohe Flexibilität, da jeder beliebige Querschnitt analysiert werden kann. Im Kontrast zum Bin Counting ist es mithilfe der neuen Methode auch möglich in Bereichen, in denen Stege vorhanden sind, die Mischgüte auszuwerten. Zudem ergibt sich die Möglichkeit ein Scale-Up and -Down durchzuführen, da die Bewertung unab-

hängig von der Querschnittgröße erfolgen kann. Die experimentellen Untersuchungen wurden auf einem D=45 mm Glattröhre-Extruder der Firma Battenfeld des Typs BEX 1-45-30B durchgeführt, welcher mit einer Drehzahl von maximal 585 1/min betrieben werden kann. Der untersuchte Drehzahlbereich zur Bestimmung des erzielten Durchsatzes reicht von 50 bis zu 500 Umdrehungen pro Minute. Bei der Barriere- als auch 3-Zonen-Schnecke konnten die hohen Drehzahlen allerdings aufgrund der nicht ausreichenden Aufschmelzleistung teilweise nicht erreicht werden. Als Werkzeug wurde ein Drosselwerkzeug verwendet. Als exemplarisches Material wurde ein PE-HD (HE3493-LS-H) der Firma Borealis verwendet. Das verwendete Temperaturprofil entsprach dem Vorschlag des Materialherstellers.

Durchsätze der verschiedenen Schneckenkonzepte

Bei den maximal zu erzielenden Durchsätzen sind große Unterschiede der Schneckenkonzepte ersichtlich (**Tabelle**). Durch die höhere Mischgüte sowie der höheren Energieeinbringung durch die wiederholende Scherung über den abgesetzten Steg weisen die Wave-Schnecken einen deutlich höheren erzielbaren Durchsatz bei einer hohen Schmelzequalität auf. Die Energy-Transfer-Schnecke erzielt hierbei mit 98,4 kg/h einen um 57% höheren Durchsatz

Tabelle. Vergleich der erzielten Durchsätze der unterschiedlichen Schneckenkonzepte für PE-HD bei einem vollständig aufgeschmolzenem Kunststoffstrom.

Quelle: Uni Paderborn

	3-Zonen-Schnecke	Barriereschnecke	Double-Wave-Schnecke	Energy-Transfer-Schnecke
Durchsatz [kg/h]	42,2	62,8	85,1	98,4

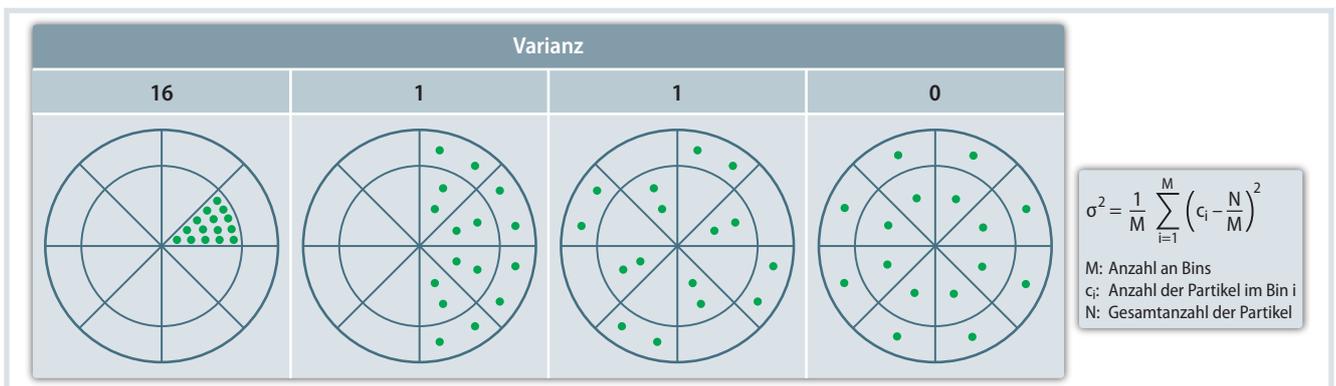


Bild 6. Beispielhafte Anwendung der Bin-Counting-Methode. Quelle: Uni Paderborn, Grafik: © Hanser

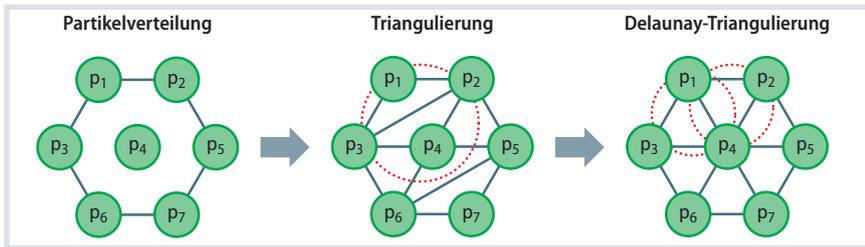


Bild 7. Beispielhafte Triangulierung einer Punktverteilung mittels Delaunay-Triangulierung.

Quelle: Uni Paderborn, Grafik: © Hanser

als die Barrierschnecke. Für die Homogenitätsuntersuchungen wurden für jedes Schneckenkonzept zwei Drehzahlen (100 U/min und 200 U/min) untersucht. In **Bild 8** ist ein Vergleich der stofflichen Homogenität von experimentell ermittelten Dünnschnitten sowie den ausgewerteten Partikelverteilungen der verschiedenen Schneckenkonzepte bei 100 U/min abgebildet. Bei der Betrachtung der Dünnschnitte ergeben sich deutliche Unterschiede. Bei der 3-Zonen- und der Barrierschnecke zeigen sich größere Bereiche mit kontinuierlichen Weißanteilen. Demgegenüber sind bei den Wave-Schnecken deutlich geringere Grenzflächen zwischen den Weiß- und Schwarzanteilen sichtbar, sodass ein wesentlich homogenerer Schmelzstrang extrudiert wird. Weiterhin ist zu erkennen, dass sich die größeren Ansammlungen an Bereichen mit weißen Flächen auch visuell in den simulativ ermittelnden Verteilungen in Form von großen Bereichen an Partikelanhäufungen widerspiegeln.

Bei einer Gegenüberstellung der quantitativ, statistisch ermittelten Kenngrößen der simulativen und der experimentell ermittelten Mischgüte in **Bild 9** ergeben sich deutliche Übereinstimmungen. Die 3-Zonen-Schnecke weist die schlechteste Durchmischung auf. Zudem konnten lediglich 100 U/min untersucht werden, da bei 200 U/min die Schmelze nicht mehr ausreichend durchmischt und aufgeschmolzen war. Die beiden neuartigen Schneckenkonzepte weisen gegenüber der 3-Zonen- und der Barrierschnecke deutliche Vorteile hinsichtlich der stofflichen Mischgüte auf. Weiterhin zeigt sich sowohl simulativ als auch experimentell bei allen Schneckenkonzepten ein deutlicher Trend zu einer verschlechterten Durchmischung bei Erhöhung der Dreh-

zahl. Bei Betrachtung der qualitativen und quantitativen Ergebnisse lässt sich die beste Mischwirkung beim Einsatz der Energy-Transfer-Schnecke resümieren. Dies ist bedingt durch die verbesserte Rückströmung über den abgesetzten Steg in den gegenüberliegenden Kanal plausibel nachvollziehbar.

Die Wave-Schnecke: Hohe Mischgüte und große Freiheitsgrade

Zusammenfassend lässt sich schlussfolgern, dass die neuartigen Wave-

Schnecken zu einer Verbesserung der Aufschmelzleistung sowie der Mischgüte und hiermit einhergehend auch zu Durchsatzsteigerungen führen können. Die korrekte Auslegung ebendieser ist dabei von enormer Bedeutung, da beispielsweise im Vergleich zu konventionellen 3-Zonen-Schnecken eine deutlich größere Anzahl an Freiheitsgraden in Form der Gestaltung der Wellen vorhanden ist. Weiterhin wurde im Verlauf der Untersuchungen deutlich, dass mittels der neuartigen Simulationen eine plausible Abschätzung der realen Mischgüte sehr gut abbildbar ist und diese somit für eine möglichst wirtschaftliche Auslegung verwendet werden kann. Somit können aufwendige experimentelle Untersuchungen durch schnellere, wirtschaftlichere und vor allem in der Schneckengeometrien deutlich variabelere simulative Untersuchungen ersetzt werden, wodurch eine optimierte Auslegung der Schneckenkonzepte für ein breites Anwendungsspektrum ermöglicht ist. ■

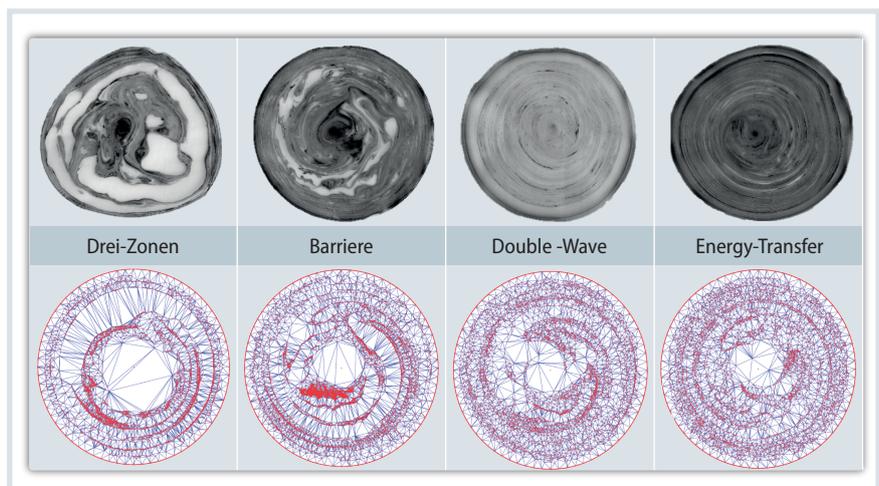


Bild 8. Qualitativer Vergleich zwischen experimentell ermittelten Dünnschnitten am Ende der Schnecke mit triangulierten, simulativ ermittelten Partikelverteilungen bei 100 U/min.

Quelle: Uni Paderborn, Grafik: © Hanser

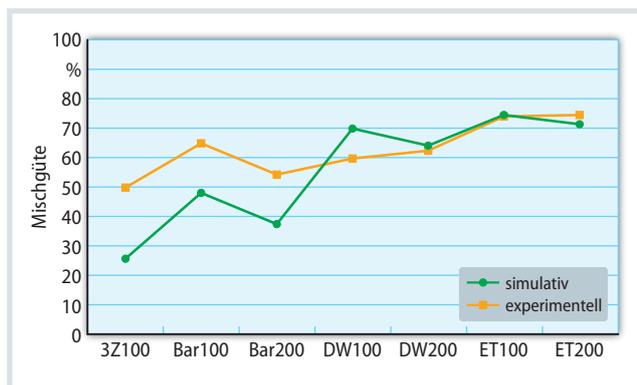


Bild 9. Gegenüberstellung der simulativen und experimentellen Ergebnisse der distributiven Mischgüte verschiedener Schneckenkonzepte bei verschiedenen Drehzahlen.

Quelle: Uni Paderborn, Grafik: © Hanser