

# 1

## Einleitung

### ■ 1.1 Technisch, wirtschaftliche Bedeutung der Extruder

*Klemens Kohlgrüber*

#### 1.1.1 Extrudertypen und Bezeichnungen

Schneckenmaschinen werden für viele verfahrenstechnische Aufgaben eingesetzt. In der Regel erfolgt der Einsatz in kontinuierlichen Prozessen, wobei eine Schneckenmaschine mehrere verfahrenstechnische Aufgaben gleichzeitig erfüllen kann. Sie ist eine „multifunktionale“ Maschine. Obwohl Schneckenmaschinen weit mehr als extrudieren können, wird meist der Begriff Extruder verwendet. Im älteren deutschen Sprachgebrauch wurden auch die Begriffe „Pressen“ und „Knetter“ verwendet. Entsprechend den alten Gummi-Schneckenpressen wurden Schneckenmaschinen/Extruder für Kunststoffe zunächst auch Kunststoff-Schneckenpressen genannt. Dies kommt zum Beispiel durch den Titel „Schneckenpressen für Kunststoffe“ der ersten Auflage des Buches von Gerhard Schenkel 1959 zum Ausdruck. Die zweite Auflage von 1963 wurde in „Kunststoff-Extrusionstechnik“ umbenannt [1]. Entsprechend dem Buchtitel „Der gleichläufige Doppel-Schnecken-Extruder“ wurden im vorliegenden Buch beide Begriffe, Schnecken und Extruder „eingebaut“.

Die Firma Werner & Pfleiderer erwarb von Bayer Lizenzen für zweiwellige, exakt abschabende, dicht kämmende Gleichdrall-Schneckenmaschinen (Abschnitt 1.2). Sie wurde „ZSK“ genannt und diese Bezeichnung war lange Zeit ein Synonym für diesen Schneckentyp. Die Bezeichnung „ZSK“ von Werner & Pfleiderer (heute Coperion) ist nach dem ehemaligen Mitarbeiter und Buchautor Heinz Herrmann eine Abkürzung für „Zweiwellige Knetscheibenschneckenpresse“ ([2], S.179). Kürzer sagt man heute meist ZSK = „Zwei(wellen)-Schnecken-Knetter“.

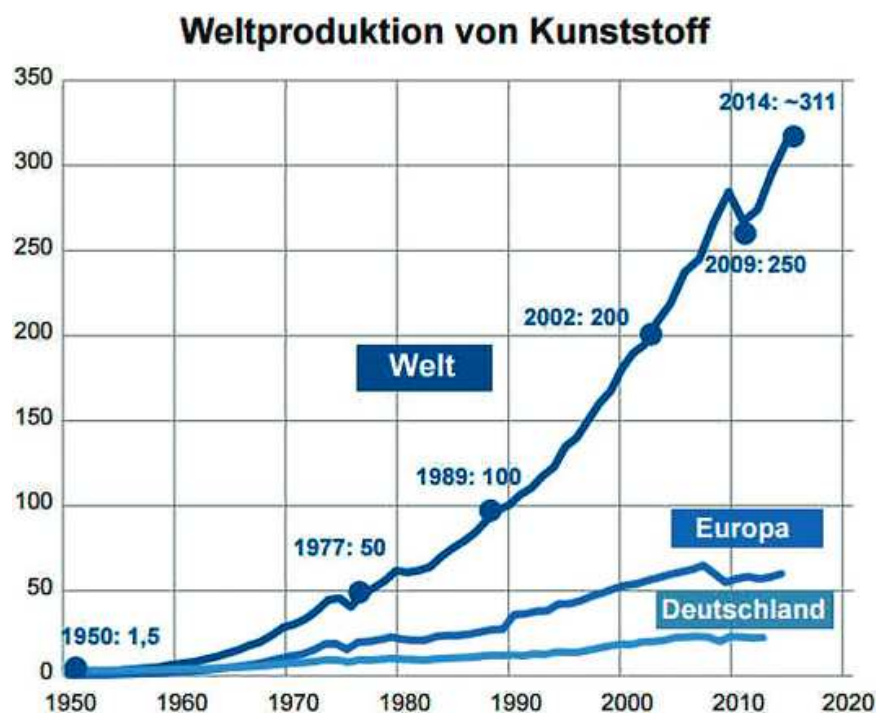
Es sind viele synonyme Bezeichnungen für diesen Maschinentyp in Gebrauch, zum Beispiel:

- Gleichdrall-Doppelschnecken (exakt oder lässig)
- Gleichdrallextruder
- Gleichsinnige, dicht kämmende Doppelwellenschnecke
- Gleichsinnig rotierende Zweischnckenextruder
- Gleichläufige Doppelschneckenextruder
- Gleichläufige Zweiwellenextruder

Die dicht kämmende Doppelwellenschnecke mit gleichsinnig drehenden Wellen hat eine dominante Bedeutung unter den „Extrudern“ und wird sehr vielfältig eingesetzt. Eine wichtige Anwendung findet sie bei der Herstellung, Aufbereitung und Verarbeitung von Kunststoffen. Aber auch in anderen Industriezweigen, z.B. der Kautschuk- und Lebensmittelindustrie, kommen die Gleichdrallschnecken vielfältig zum Einsatz.

### 1.1.2 Schneckenmaschinen und Kunststoffe

Die Geschichte der Kunststoffe ist verglichen mit der Geschichte anderer Werkstoffe (z.B. Holz, Metall, Keramik) sehr kurz. Das enorme Wachstum wird in Bild 1.1 besonders anschaulich.



**Bild 1.1** Grafik zur Kunststoffentwicklung weltweit in den letzten Jahrzehnten (Ordinate: Millionen Tonnen) [Plastics Europe Deutschland e.V.]

Ein Schneckenprofil mit Gangzahl  $Z$  kann in  $2Z$  symmetrische Teile aufgeteilt werden, wie in Bild 2.1 dargestellt ist. Ein Schneckenprofil ist innerhalb dieses Symmetriebereichs aus drei Teilen aufgebaut: Kamm, Flanke und Nut.

Der Kamm besteht aus einem Kreisbogen mit Durchmesser gleich dem Außendurchmesser und dem Drehpunkt des Profils als Kreismittelpunkt. Jeder Kamm geht mit je einer Kante in die benachbarten Flankenbereiche über.

Die Flanken gehen tangential in die Nutbereiche über, deren Durchmesser dem Kerndurchmesser der Schnecke entspricht und der wiederum als Kreismittelpunkt den Mittelpunkt des Profils hat.

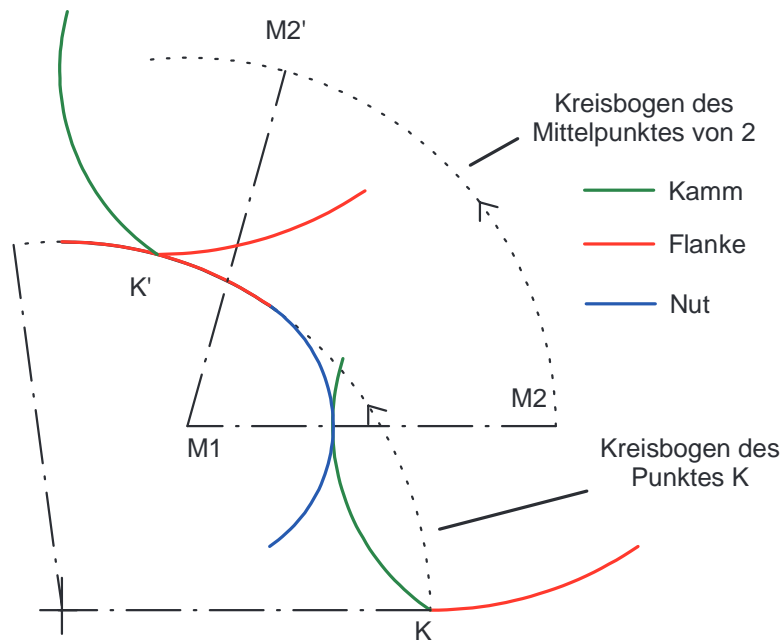
Der Kamm reinigt die Nut der gegenüberliegenden Schnecke ab und umgekehrt. Die Ecke des Profils zwischen Kamm und Flanke reinigt die Nut ab.

### 2.1.2 Das exakt abschabende Profil aus Kreisbögen

Grundlage eines jeden dicht kämmenden Schneckenprofils ist die exakt abschabende Schnecke. Die einzelnen Teile der Schneckenprofile für die exakt abschabende Schnecke sind Kreisbögen. Dies kann anhand der kinematischen Ersatzschaltung plausibel gemacht werden, in der die Drehung der Schnecken durch Festhalten einer Schnecke und Bewegen der anderen Schnecke auf einem Kreis mit Radius gleich dem Achsabstand ersetzt wird.

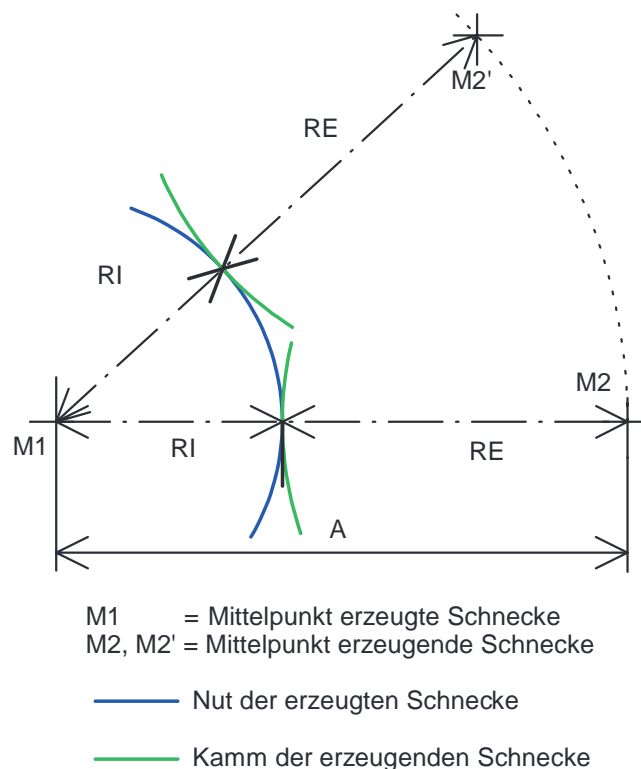
Die erste Schnecke (die „Erzeugte“) steht bei dieser Betrachtung still, und die zweite Schnecke (die „Erzeugende“) wird um die erste translatorisch auf einem Kreisbogen verschoben. Man gibt nun einen Teil des Profils auf der zweiten Schnecke vor und untersucht, welches Profil auf der ersten Schnecke dadurch erzeugt wird. Die erzeugte Schnecke wird durch die erzeugende gewissermaßen „herausgeschnitten“.

Als erstes betrachtet man den Punkt auf der erzeugenden Schnecke, an dem Kamm und Flanke ineinander übergehen. Dieser Punkt wird, mit jedem anderen Punkt der zweiten Schnecke, auf einem Kreisbogen mit Radius gleich dem Achsabstand bewegt. Auf der erzeugten Schnecke erhält man so die Flanke. Dies verdeutlicht Bild 2.2.



**Bild 2.2** Erzeugen des Flankenbereichs durch den Schnittpunkt zwischen Kamm und Flanke

Betrachtet man nun den Kambereich des erzeugenden Profils als Kreisbogen mit Radius  $R$ . Der Mittelpunkt dieses Kreisbogens rotiert mit Abstand  $A$  vom Mittelpunkt des ersten Profils. Der Berührungspunkt zwischen beiden Profilen, der auf der Nut des erzeugten Profils liegt, ist jeweils auf der Verbindungslinie beider Mittelpunkte, und zwar im Abstand  $RI = A - R$  vom Mittelpunkt des ersten Profils. Dies verdeutlicht Bild 2.3.



**Bild 2.3** Erzeugen des Nutbereichs als Kreisbogen durch den Kamm der anderen Schnecke



**Bild 2.54** Exzentrerscheiben



**Bild 2.55** Eingängige Knetscheiben mit Dehnkanal

Bei den eingängigen Knetscheiben wird die Exzentrerscheibe beidseitig von einer eingängigen Profilscheibe abgeschlossen. Das in den Dehnkanal eingezogene Polymer kann nun nicht mehr zu den Seiten entweichen und unterliegt damit vollständig der durch die Geometrie definierten Dehnströmung.

Beide Scheibenausführungen können, ähnlich wie bei den Knetscheiben, zu größeren Elementeinheiten kombiniert werden.

Bei den Schneckenscherenelementen (Bild 2.56) werden im Schneckenkamm abschnittsweise Scherspaltan eingearbeitet. In diesen Spalten wird ein Teil der Schmelze einem definierten Scherfeld ausgesetzt, um z. B. höher molekulare Polymeranteile aufzuschließen. Auch bei diesen Elementen ist zu beachten, dass die Beanspruchung des Materials nicht quantitativ über den gesamten Produktstrom erfolgt.



**Bild 2.56** Schneckenscherenelemente

Die Mehrzahl der bisher beschriebenen Elemente basieren in ihrer Grundform auf dem Erdmenger-Patent und sind mehr oder weniger selbstreinigend. Im Folgenden werden jene Elemente vorgestellt, die von diesem Prinzip deutlich abweichen.

HME-Elemente bestehen aus einer zylindrischen Scheibe mit Schneckenaußendurchmesser, an deren äußerem Rand in Axialrichtung Nocken vorstehen. (Bild 2.57). Kombiniert wird das Element mit einem geometriegleichen Gegenelement, das in Achsrichtung gespiegelt eingebaut wird. Die Nocken rotieren im Eingriffsbereich der beiden Elemente hinter der jeweiligen Gegenocke vorbei und passieren den Eingriff durch einen Spalt zwischen zwei aufeinanderfolgenden Nocken. Durch diese Bewegungsform wird eine intensive Vermischung realisiert, die z. B. bei der Einarbeitung von Glasfasern benötigt wird.

### 2.3.1 WO 2009152910, EP 2291277, US 20110110183

Anmeldetag: 2008-06-20

Firma: Bayer Technology Services, nun Covestro

Dieses Patent zeigt allgemeingültig, wie ein- bis viergängige, selbstreinigende Schneckenprofile aus Kreisbögen unter Ausnutzung von Symmetrien aufgebaut werden können. Weiterhin wird in dem Patent allgemeingültig am Beispiel eines Übergangselements behandelt, wie komplette, selbstreinigende Schneckenprofile aus Kreisbögen aufgebaut werden können.

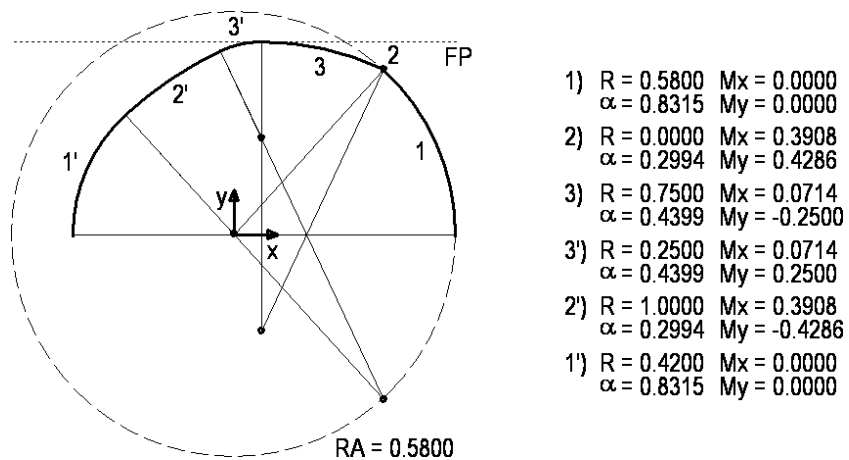


Bild 2.59

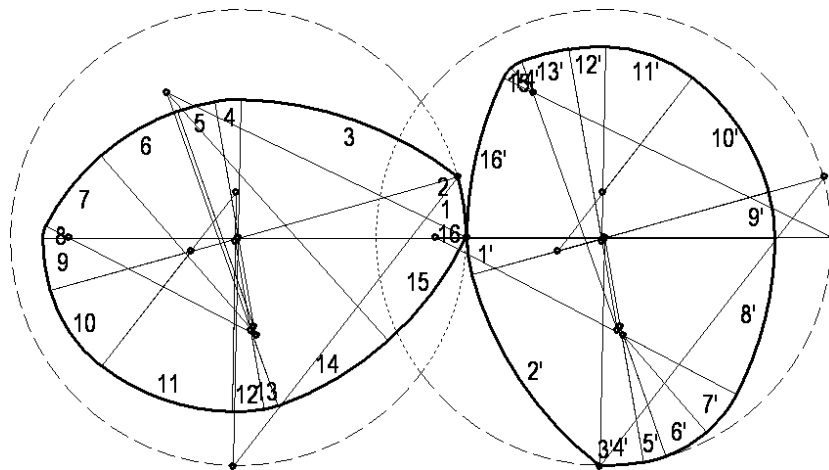


Bild 2.60

### 2.3.2 WO 2011039016, EP 2483051, US 20120320702

Anmeldetag: 2009-09-29

Firma: Coperion, ehemals Werner & Pfleiderer

In diesem Patent wird der Abschnitt eines Schneckenprofils über eine Evolute  $E$  erhalten, die aus einem Satz von Punkten  $P(1)$  bis  $P(n)$  besteht. Die Evolvente einer punktförmigen Evolute ist ein Kreis(bogen), so dass die gezeigte Konstruktionsvorschrift letztlich ebenfalls auf Kreisbögen basiert.

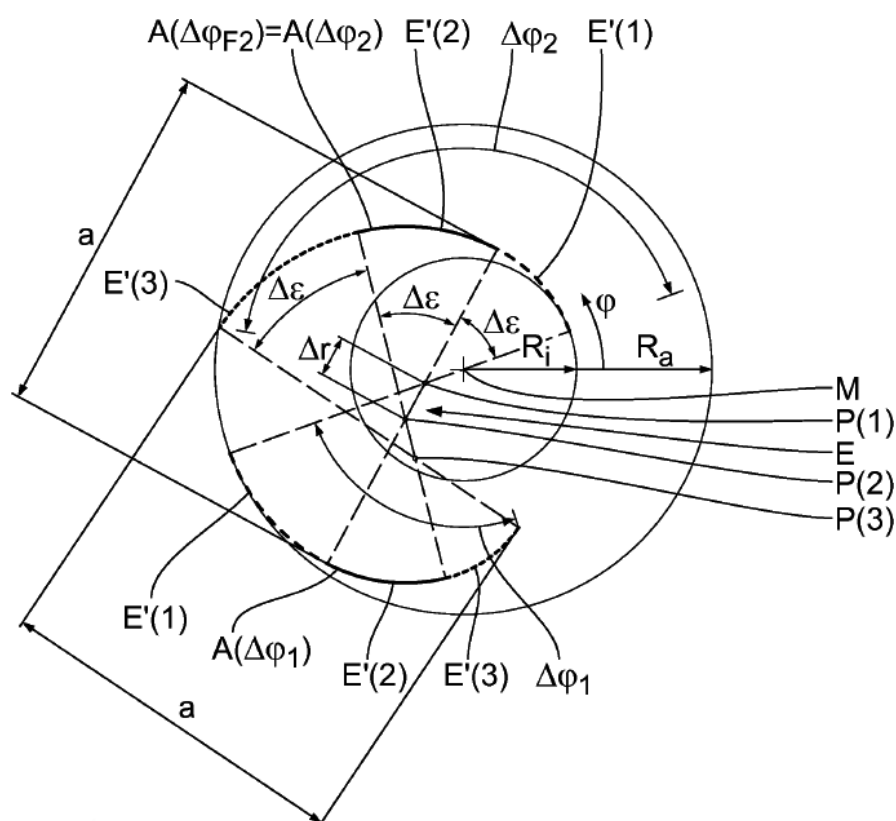
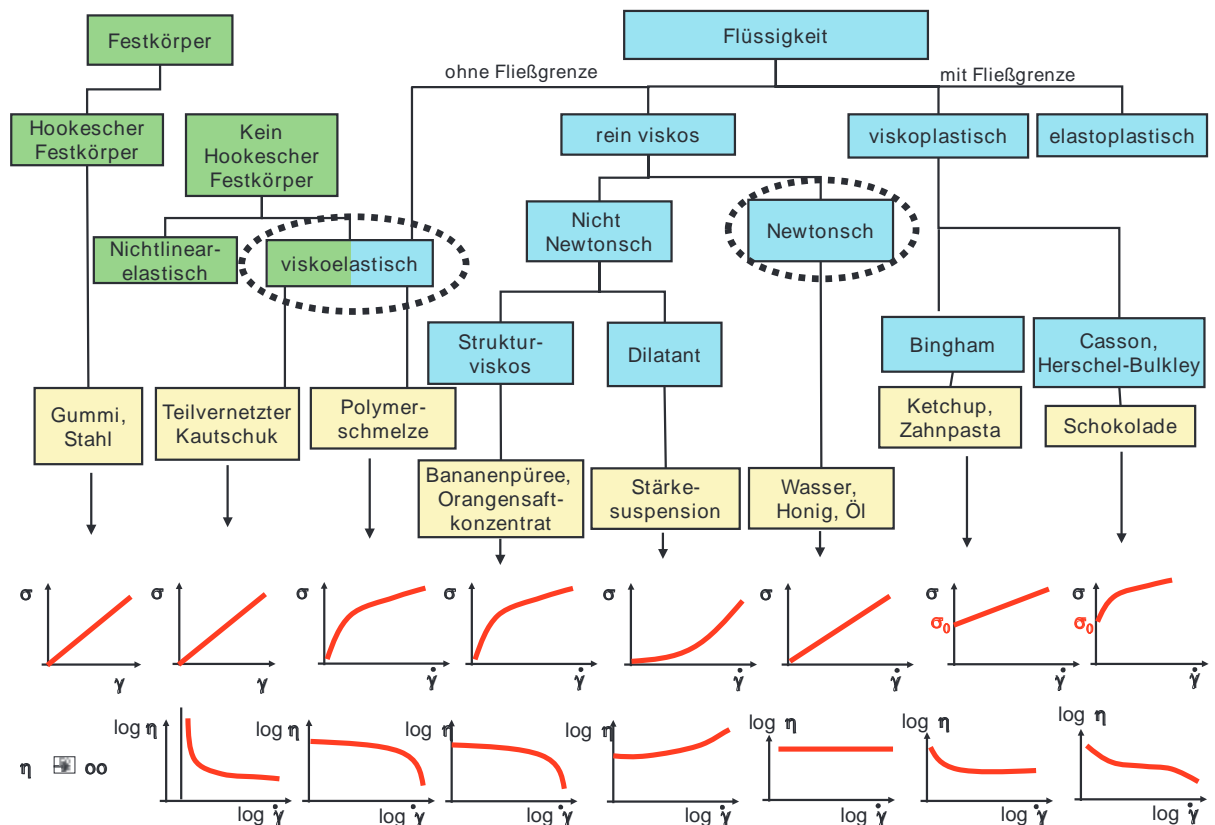


Bild 2.61





**Bild 3.2** Einteilung des rheologischen Verhaltens von Festkörpern und Fluiden mit Beispielen in der Praxis vorkommender Stoffe

Unten: Schubspannung als Funktion der Deformation  $g$  bzw. Scherrate  $\dot{\gamma}$  sowie Scherviskosität  $\eta$  als Funktion der Scherrate  $\dot{\gamma}$  (doppeltlogarithmische Achsen) [7]

Bei den Festkörpern ist ersichtlich, dass sich diese entweder linear elastisch wie ein Hooke'scher Festkörper deformieren (die meisten Feststoffe, wie Stahl und Gummi) oder nichtlinear-elastisch bzw. viskoelastisch. Bei den Flüssigkeiten lassen sich Fluide ohne Fließgrenze und solche mit Fließgrenze (sog. plastische Stoffe) unterscheiden. Bei den Fluiden ohne Fließgrenze tritt schon beim Aufbringen geringer Schubspannungen ein Fließen auf, bei den Fluiden mit Fließgrenze aber erst oberhalb einer stoffabhängigen Schubspannung, die hier mit  $\sigma_0$  bezeichnet ist.

Bei den Fluiden ohne Fließgrenze lassen sich viskoelastische Fluide von rein viskosen unterscheiden. Viskoelastische Fluide liegen in ihren Eigenschaften zwischen den rein elastischen Festkörpern und den rein viskosen newtonschen Fluiden. Bei den rein viskosen Fluiden gibt es solche, bei denen die Viskosität sich bei Belastung nicht ändert (newtonsche Fluide) und solche, bei denen eine Abhängigkeit der Scherviskosität  $\eta$  von der Scherrate  $\dot{\gamma}$  auftritt (nicht-newtonsche Fluide). Erhöht sich die Viskosität bei Aufbringen einer Deformation, so spricht man von dilatanten Fluiden, tritt eine Viskositätserniedrigung ein, handelt es sich um struktviskose Fluide.

Bei den Fluiden mit Fließgrenze lassen sich viskoplastische Fluide von elastoplastischen unterscheiden. Bei ersteren ändert sich die Deformationsgeschwindigkeit nach Aufbringen einer Schubspannung  $\sigma$  oberhalb der Fließgrenze  $\sigma_0$  entweder linear mit der Schubspannung oder nichtlinear, d. h.  $\sigma = f(\dot{\gamma})$ .

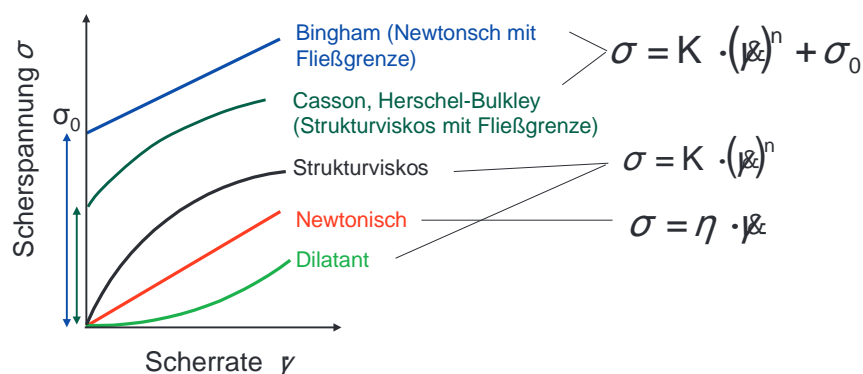
Das einfachste Stoffverhalten haben newtonsche Fluide; für sie gilt eine konstante Viskosität  $\eta$  und damit eine direkte Proportionalität zwischen Scherrate  $\dot{\gamma}$  und Schubspannung  $\sigma$ :

$$\sigma = \eta \cdot \dot{\gamma} \quad (3.4)$$

Im Gegensatz dazu können nicht-newtonsche Fluide, bei denen die Viskosität von der Scherrate abhängig ist, durch einen Potenzansatz beschrieben werden:

$$\sigma = K \cdot (\dot{\gamma})^n \quad (3.5)$$

Sie enthalten den konstanten Vorfaktor  $K$  und einen sog. Fließexponent  $n$ , der die Steigung der Viskositätsfunktion angibt. Bei newtonschen Medien entspricht  $K$  der Scherviskosität  $\eta$ . Für den Fließexponenten gilt dann  $n = 1$  (newtonsches Fluid). Für  $0 < n < 1$  ergibt sich ein scherverdünnendes (strukturviskoses) Fluid. Für dilatante Fluide, d. h. Flüssigkeiten, welche bei Scherung hochviskoser werden, gilt  $1 < n < \infty$ .



**Bild 3.3** Grafische Veranschaulichung von Gleichung (3.4) bis (3.6)

Bild 3.2 und Bild 3.3 zeigen Fluide mit und ohne Fließgrenze. Damit Fluide mit Fließgrenze fließen können, wird eine Schubspannung  $\sigma_0$  benötigt. Jeder kennt diesen Effekt von Ketchup, der erst bei einer gewissen „Minimalkraft“ anfängt, aus der Flasche zu fließen. Unterhalb von  $\sigma_0$  liegt – rheologisch gesehen – ein Festkörper vor. Im Modell wird diese Fließgrenze durch die Erweiterung von Gleichung (3.5) mit einer Schubspannung  $\sigma_0$  beschrieben.

### Momentante und mittlere Stoffströme

Für das Auslegen von Maschinen oder Apparaten für Sorptionsverfahren reicht die Kenntnis der Konzentrationsprofile an der Phasengrenze allein nicht aus. Sie bilden jedoch die Basis für das Herleiten von Beziehungen zum Bestimmen der zwischen den Phasen durch Diffusion hervorgerufenen Stoffströme. Geeignete Bezugsgrößen für die dimensionslose Darstellung der Stoffströme ergeben sich erst aus dem konkreten Anwendungsfall. Aus diesem Grund wird an dieser Stelle auf eine dimensionslose Darstellung der Ergebnisse verzichtet und erst wieder am Beispiel der Beziehungen zum Bestimmen der mittleren Flüssigkeitskonzentration von dimensionslosen Kenngrößen Gebrauch gemacht.

Aus Formel (3.28) erhält man für den örtlichen Konzentrationsgradienten an der Phasengrenzfläche bei  $x = 0$  die Beziehung:

$$\left. \frac{\partial \rho_j}{\partial x} \right|_{x=0} = (\rho_{j,0} - \rho_{j,gl}) \frac{1}{\sqrt{\pi D_f t}} \quad (3.42)$$

Mit diesem Ausdruck folgt aus dem 1. Fickschen Gesetz (Formel 3.26) für die aus einem Flüssigkeitselement an der Phasengrenzfläche in die Gasphase diffundierenden Massenstromdichte  $\dot{m}_j$ :

$$\dot{m}_j = -\frac{1}{\sqrt{\pi}} (\rho_{j,0} - \rho_{j,gl}) \left( \frac{D_f}{t} \right)^{1/2} \quad (3.43)$$

Der mit Formel (3.43) gegebene Zusammenhang charakterisiert den flüssigkeitsseitigen diffusiven Stofftransport an der Phasengrenzfläche. Sowohl die Proportionalität  $\dot{m}_j \sim (\rho_{j,0} - \rho_{j,gl})$  als auch  $\dot{m}_j \sim \sqrt{D_f / t}$  sind hierfür typische Merkmale. Für viele praktische Aufgaben werden an Stelle des momentanen Werts der Massenstromdichte  $\dot{m}_j$  Angaben über den zeitlichen Mittelwert  $\bar{m}_j$  in einem Zeitintervall  $t_0 \leq t \leq t_E$  benötigt. Mit der mathematischen Definition des zeitlichen Mittelwerts und Formel (3.43) für  $\dot{m}_j$  folgt:

$$\bar{m}_j \equiv \frac{1}{(t_E - t_0)} \int_{t_0}^{t_E} \dot{m}_j dt = -\frac{2}{\sqrt{\pi}} (\rho_{j,0} - \rho_{j,gl}) D_f^{1/2} \frac{(t_E^{1/2} - t_0^{1/2})}{(t_E - t_0)} \quad (3.44)$$

Mit dieser Beziehung kann der zeitliche Mittelwert der Massenstromdichte  $\bar{m}_j$  für beliebige Zeitintervalle  $t_0 \leq t \leq t_E$  berechnet werden. Für  $t_0 \rightarrow t_E$  gilt  $\bar{m}_j = \dot{m}_j$ , wie aus dem Vergleich von Formel (3.44) mit Formel (3.43) unter Beachtung des Grenzwerts:

$$\lim_{t_0 \rightarrow t_E} \left( \frac{t_E^{1/2} - t_0^{1/2}}{t_E - t_0} \right) = \frac{1}{2t^{1/2}} \quad (3.45)$$

hervorgeht. Für das Zeitintervall  $0 \leq t \leq t_E$  vereinfacht sich wegen  $t_0 = 0$  die Beziehung. Man erhält:

$$\dot{\bar{m}}_j = -\frac{2}{\sqrt{\pi}}(\rho_{j,0} - \rho_{j,gl}) \left( \frac{D_f}{t_E} \right)^{1/2} \quad (3.46)$$

Der zeitliche Mittelwert  $\dot{\bar{m}}_j$  für das Intervall  $0 \leq t \leq t_E$  unterscheidet sich in diesem Fall vom momentanen Wert  $\dot{m}_j$  zur Zeit  $t = t_E$  um den Faktor 2.

Durch Integration der Massenstromdichten  $\dot{m}_j$  bzw.  $\dot{\bar{m}}_j$  über die Phasengrenzfläche  $S$  erhält man die über die Phasengrenzfläche diffundierenden momentanen und mittleren Massenströme. Für den mittleren Massenstrom  $\bar{M}_j$  im Zeitintervall  $0 \leq t \leq t_E$  folgt:

$$\bar{M}_j = -\frac{2}{\sqrt{\pi}}(\rho_{j,0} - \rho_{j,gl}) D_f^{1/2} \iint t_E^{-1/2} dS \quad (3.47)$$

Dabei wird durch den integralen Ausdruck berücksichtigt, dass die Phasengrenzfläche  $S$  zeitlich veränderlich sein kann und für das Zeitintervall  $0 \leq t \leq t_E$ , in dem sich ein Flüssigkeitselement an der Phasengrenzfläche befindet, unterschiedliche Werte möglich sind.

Durch Multiplikation des mittleren Massenstrom  $\bar{M}_j$  mit der Zeit  $t_E$  erhält man die im Zeitintervall  $0 \leq t \leq t_E$  durch Diffusion zwischen den Phasen ausgetauschte Masse  $\Delta \bar{M}_j$ :

$$\Delta \bar{M}_j = \bar{M}_j t_E = -\frac{2}{\sqrt{\pi}}(\rho_{j,0} - \rho_{j,gl}) D_f^{1/2} \iint t_E^{1/2} dS \quad (3.48)$$

Die Formeln (3.47) und (3.48) stellen in indirekter Form den grundlegenden Zusammenhang zwischen dem diffusiven Stofftransport über eine Phasengrenzfläche und den Einflussgrößen des Stoffsystems, der Betriebsbedingungen und der Geometrie her. Die direkte Abhängigkeit kann nur am konkreten Anwendungsfall ermittelt werden, indem für jede der in den Formeln (3.47) und (3.48) rechts stehenden Größen die individuelle Abhängigkeit von Stoffsystem, Betriebsbedingungen und Geometrie bestimmt wird.

Mit den hier mitgeteilten Beziehungen zum Berechnen von momentanen und mittleren Stoffströmen ist es in der Verfahrenstechnik üblich, Stoffübergangskoeffizienten zu definieren. Diese historisch bedingte Vorgehensweise wird auch zum Beschreiben des Stofftransports in Schneckenmaschinen herangezogen [8] [9] [10]. Sie bietet jedoch bei theoretisch begründeten Beziehungen zum Stofftransport keine zusätzlichen Informationen, erfordert jedoch zusätzlichen Rechenaufwand bei der Anwendung [1]. Deshalb wird auf die Angabe von Stoffübergangs-

**Tabelle 3.12** Material: PE-LLD; Keilspaltöffnungswinkel:  $\alpha = 27^\circ$ 

| $v_h$<br>in $\text{mm s}^{-1}$ | $\gamma_{yx\text{ges}2}$ | $\gamma_{\text{ges}2}$ | $e_{x\text{ges}2}$ | $\varepsilon_{x\text{ges}2}$ | $\dot{\varepsilon}_{xm}$<br>in $\text{s}^{-1}$ | $\sigma \cdot 10^5$<br>in Pa |
|--------------------------------|--------------------------|------------------------|--------------------|------------------------------|--|------------------------------|
| 1200                           | 7,3                      | 892,7                  | 24,5               | 3,2                          | 35   | 2                            |
| 2400                           | 7,3                      | 432,8                  | 19,1               | 2,9                          | 646  | 5                            |
| 3600                           | 7,3                      | 421,7                  | 19,1               | 2,9                          | 968  | 7                            |

**Tabelle 3.13** Material: PP; Keilspaltöffnungswinkel:  $\alpha = 35^\circ$ 

| $v_h$<br>in $\text{mm s}^{-1}$ | $\gamma_{yx\text{ges}2}$ | $\gamma_{\text{ges}2}$ | $e_{x\text{ges}2}$ | $\varepsilon_{x\text{ges}2}$ | $\dot{\varepsilon}_{xm}$<br>in $\text{s}^{-1}$ | $\sigma \cdot 10^5$<br>in Pa |
|--------------------------------|--------------------------|------------------------|--------------------|------------------------------|--|------------------------------|
| 1200                           | 6,8                      | 572,2                  | 31,9               | 3,4                          | 34   | 5                            |
| 2400                           | 6,8                      | 651,1                  | 35,5               | 3,6                          | 7  | 9                            |
| 3600                           | 6,8                      | 719,9                  | 38,3               | 3,6                          | 172  | 2,1                          |

**Tabelle 3.14** Material: PS; Keilspaltöffnungswinkel:  $\alpha = 40^\circ$ 

| $v_h$<br>in $\text{mm s}^{-1}$ | $\gamma_{yx\text{ges}2}$ | $\gamma_{\text{ges}2}$ | $e_{x\text{ges}2}$ | $\varepsilon_{x\text{ges}2}$ | $\dot{\varepsilon}_{xm}$<br>in $\text{s}^{-1}$ | $\sigma \cdot 10^5$<br>in Pa |
|--------------------------------|--------------------------|------------------------|--------------------|------------------------------|--|------------------------------|
| 1200                           | 6,5                      | 932,8                  | 56,6               | 4,1                          | 366  | 2,4                          |
| 2400                           | 6,6                      | 1238,6                 | 67,7               | 4,2                          | 764  | 2,8                          |
| 3600                           | 6,6                      | 1411,2                 | 74,7               | 4,3                          | 173  | 3,1                          |

Man entnimmt den 6 Tabellen, dass die Gesamtscherdeformation  $\gamma_{yx\text{ges}2}$  bei vorgegebener Keilspaltgeometrie unabhängig von der Plattengeschwindigkeit  $v_h$  ist und die Steigerung der Gesamtdeformation  $\gamma_{\text{ges}2}$  bei allen Kunststoffschmelzen über die Gesamtverstreckung  $e_{x\text{ges}2}$  erfolgt. Die erzielbaren Gesamtdehnungen  $\varepsilon_{x\text{ges}2}$  sind bei den höher viskosen und stärker ausgeprägt strukturviskosen Kunststoffschmelzen vergleichsweise hoch, so dass die dehninduzierte Deformation jedes einzelnen Schmelzetropfens auf einem sehr hohen Niveau liegt. Die hohen mittleren Dehngeschwindigkeiten, die über die Plattengeschwindigkeit  $v_h$  gesteigert wird, führen bei den höherviskosen Kunststoffschmelzen zu hinreichend hohen mittleren Dehnspannungen  $\sigma$ . Die mittlere Dehnspannung (rot eingetragen in Tabelle 3.11) erreicht bei der hochviskosen PE-HD-Schmelze die von Hürlimann [11] mit einem Kapillarrheometer bestimmten Wert  $\sigma = 10^6$  Pa, bei dem Schmelzebruch am Kapillaraustritt beobachtet wurde, bzw. die von Bernnat [9] in Rheotensversuchen verifizierte kritische Dehnspannung. Selbst bei niedrigeren Dehnspannungen, die bei den hochviskosen PE-LLD-, PP- und PS-Schmelzen vorliegen, ist Tropfenbruch an einer Vielzahl von Schmelzetropfen, die im Keilspalt lokal noch viel höheren Dehnspannungen ausgesetzt sind, möglich.

Allgemein kann man festhalten, dass je stärker das strukturviskose Fließverhalten der Kunststoffschmelze ist, desto wirksamer sind Keilspaltgeometrien mit großem Öffnungswinkel. Ferner kann die Steigerung der Gesamtscherdeformation über die Keilspaltlänge eingestellt werden. Gesamtverstreckung, mittlere Dehngeschwindigkeit und Dehnspannung sind über die Plattengeschwindigkeit einstellbar.

#### 3.5.1.4.5 Deborah-Zahl in Abhängigkeit von der Plattengeschwindigkeit

Die Deborah-Zahl  $De$  die das Deformationsverhalten der Schmelzetropfen in einer Strömung mit in Fließrichtung sich ändernder Geschwindigkeitsverteilung charakterisiert und gemäß der (Gleichung 3.99) definiert ist, wurde für die sechs Kunststoffschmelzen im Keilspalt ( $l_c = 0$  mm) bei jeweils zwei Plattengeschwindigkeiten berechnet. Die Ergebnisse sind in den Tabellen 3.14 und 3.15 zusammengestellt.

**Tabelle 3.15** Deborah-Zahl  $De$  für sechs Kunststoffschmelzen im Keilspalt mit  $v_h = 1200$  mm s<sup>-1</sup>,  $\alpha = 15^\circ$ ,  $l_k = 4$  mm

| Material       | PC  | PA 6 | PE-HD | PE-LLD | PP  | PS   |
|----------------|-----|------|-------|--------|-----|------|
| $t_k$<br>in ms | 7,9 | 7,8  | 7,7   | 7,7    | 7,6 | 7,6  |
| De             | 1,6 | 1,3  | 285   | 4,1    | 5,4 | 77,5 |

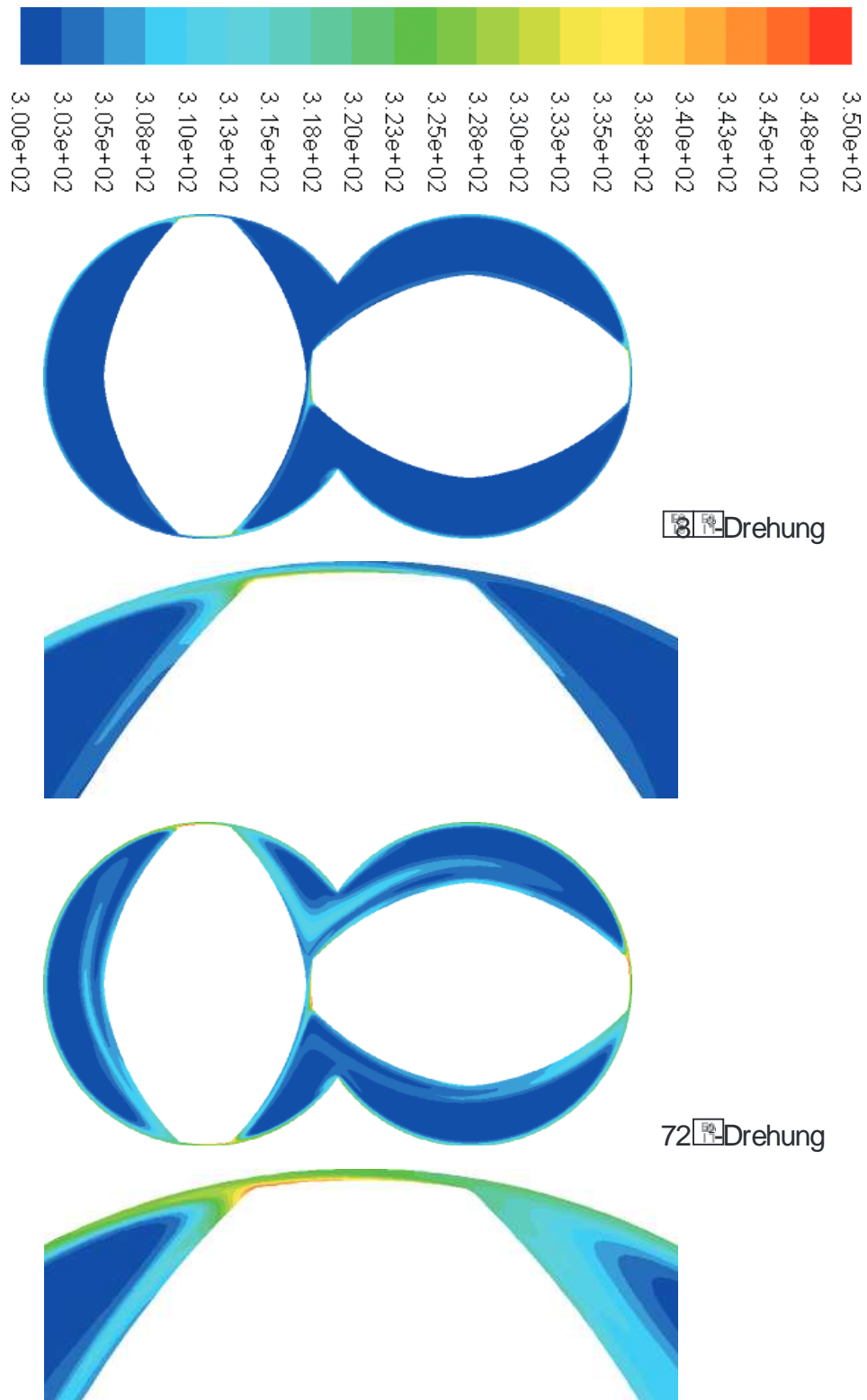
**Tabelle 3.16** Deborah-Zahl  $De$  für sechs Kunststoffschmelzen im Keilspalt mit  $v_h = 3600$  mm s<sup>-1</sup>,  $\alpha = 15^\circ$ ,  $l_k = 4$  mm

| Material       | PC  | PA 6 | PE-HD | PE-LLD | PP   | PS  |
|----------------|-----|------|-------|--------|------|-----|
| $t_k$<br>in ms | 2,6 | 2,6  | 2,6   | 2,6    | 2,5  | 2,5 |
| De             | 149 | 138  | 858   | 12,4   | 49,2 | 232 |

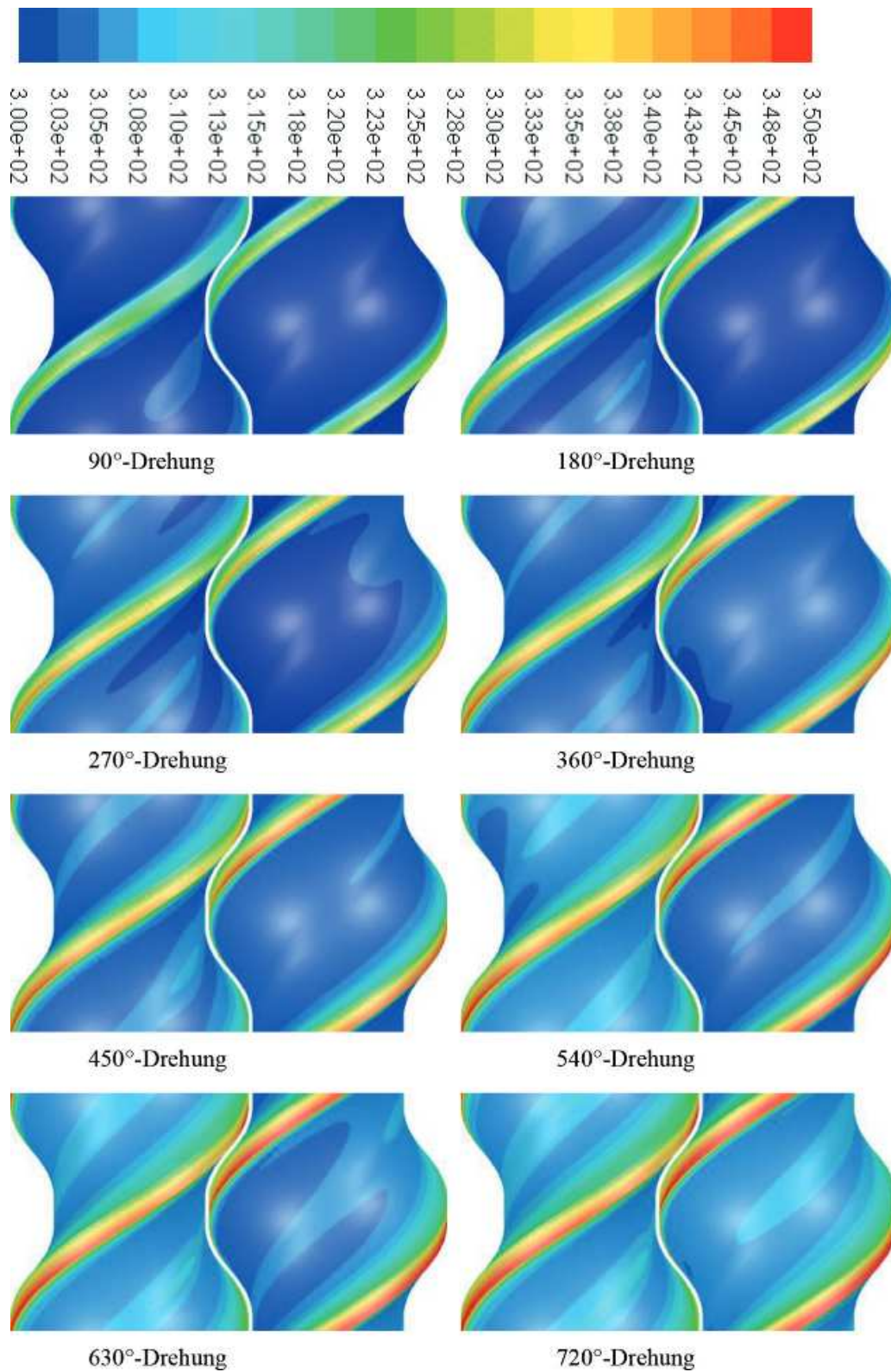
Bereits bei der Plattengeschwindigkeit  $v_h = 1200$  mm s<sup>-1</sup> sind bei den stärker ausgeprägt entropieelastischen Kunststoffschmelzen (mit höherem B-Wert des Carreau-Ansatzes (3.88)) die Deborah-Zahlen deutlich größer als 1, so dass die viskoelastischen Schmelzetropfen mehr das Deformationsverhalten eines Festkörpers zeigen. Das bedeutet, dass Tropfenbruch durch die viskoelastischen Eigenschaften der Schmelze begünstigt wird, wenn die charakteristische Relaxationszeit hinreichend groß und die Verweilzeit der Schmelze im Keilspalt hinreichend kurz ist (d. h. kurze Keilspalte mit wenige Millimeter Länge  $l_k$  und mit großem Keilspaltöffnungswinkel  $\alpha$ ). Bei niedrigeren Plattengeschwindigkeiten ist die Deborah-Zahl kleiner – korrespondierend zum viskosen Fließen der Schmelze – aber die hierbei erzielten Dehnspannungen sind dann für die Tropfenzerkleinerung auch zu gering.



skalierung in den beiden Abbildungen reicht von 300 °C (blaue Farbe) bis 350 °C (rote Farbe). Zusätzlich wird in Bild 4.83 ein Diagramm gezeigt, dass die maximale Temperatur auf dem Schneckenkamm über die Drehung des Fördererelements wiedergibt.

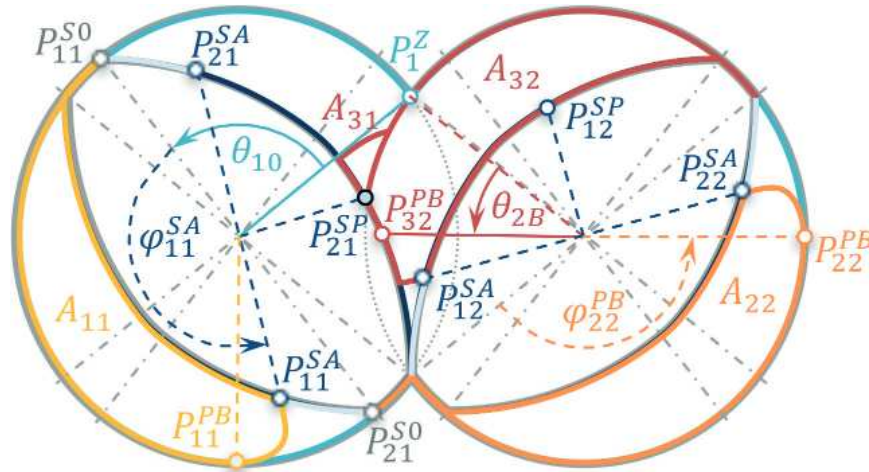


**Bild 4.81** Temperatur der Polymerschmelze im Querschnitt eines Gewindeelements mit adiabaten Wänden nach einer halben Umdrehung und nach zwei Umdrehungen jeweils mit einer Ausschnittsvergrößerung um einen der Schneckenkämme



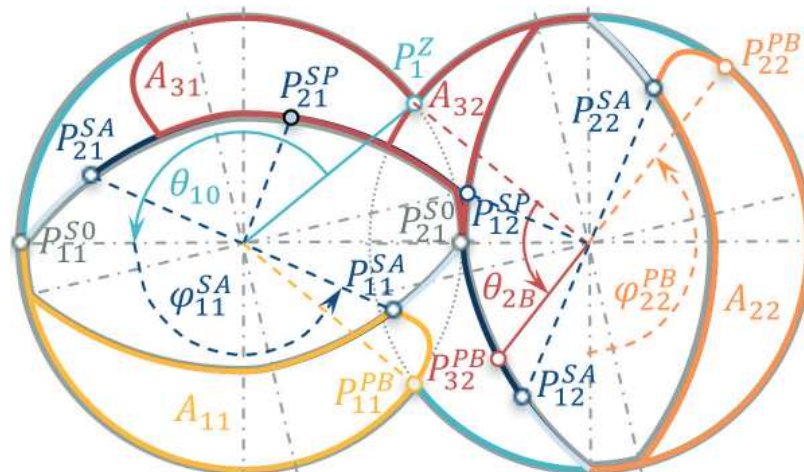
**Bild 4.82** Temperatur der Polymerschmelze auf der Schneckenoberfläche eines Gewindeelements innerhalb von zwei Umdrehungen





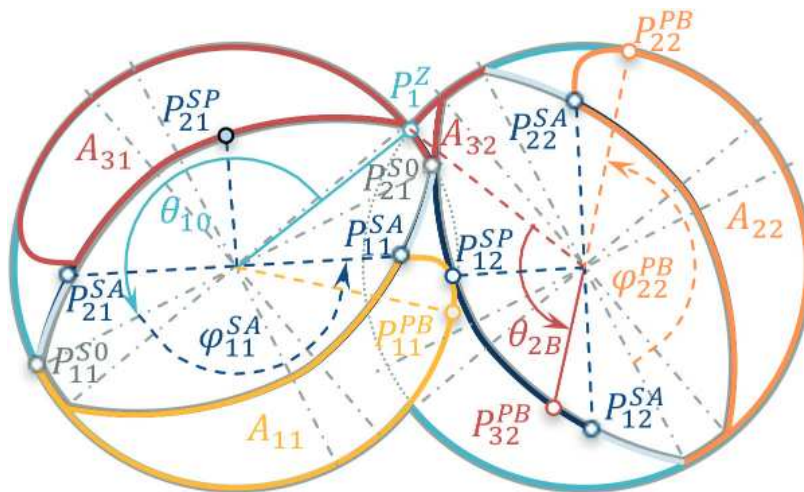
**Bild 5.42** Flüssigkeitsverteilung im Querschnitt einer 2-welligen SchnBildeckenmaschine mit 2-gängigen Schneckenelementen; Füllgrad  $\epsilon = 80\%$ , Drehwinkel  $\theta_{10} = \pi/i_g$

In Bild 5.42 ist die Flüssigkeitsverteilung nach einer Drehung der Wellen aus der Ausgangsstellung um  $\theta_{10} = \pi/i_g$  dargestellt. In dieser Stellung hat der Teilstrom 2 seine volle Ausdehnung im Schneckengang 2 auf Welle 2 erreicht. Die Form und Ausdehnung von Teilstrom 1 ist unverändert. Der Teilstrom 3 besitzt auf der Oberfläche des Schneckenprofils der Welle 2 noch seine volle Ausdehnung  $\varphi = \varphi_{12}^{SA}$ . Der Punkt  $P_{32}^{PB}$  ist nicht mehr Teil der freien Oberfläche des Teilstroms 3. Ein Teil dieses Stroms mit der Querschnittsfläche  $A_{31}$  ist auf Welle 1 mit der neu entstandenen Oberfläche  $S_{31}^{PB}$  übertragen worden. Die freie Oberfläche des Flüssigkeitspools 3 besteht bei dieser Stellung der Wellen somit aus den Anteilen  $S_{31}^{PB}$ ,  $S_{32}^{PB}$  und  $S_{32}^{PZ}$ . Im Vergleich zu Bild 5.41 haben die Anteile  $S_{32}^{PB}$  und  $S_{32}^{PZ}$  deutlich abgenommen. Der Anteil  $S_{21}^{GO}$  an der freien Oberfläche des Flüssigkeitsfilms auf der inneren Gehäuseoberfläche hat weiter zugenommen, während die freie Oberfläche  $S_{21}^{SA}$  auf der Flüssigkeitsschicht der Schneckenelemente im Schneckengang 2 der Welle 1 abgenommen hat.



**Bild 5.43** Flüssigkeitsverteilung im Querschnitt einer 2-welligen Schneckenmaschine mit 2-gängigen Schneckenelementen; Füllgrad  $\epsilon = 80\%$ , Drehwinkel  $\theta_{10} = 2\pi/i_g - \alpha_{TF}/2$

Bei der in Bild 5.43 wiedergegebenen Stellung der Wellen besitzt der durch die Querschnittsfläche  $A_{32}$  dargestellte Anteil des Teilstroms 3 keine freie Oberfläche mehr. Die freie Oberfläche  $S_{31}^{PB}$  der Querschnittsfläche  $A_{31}$  ist größer als bei dem voll ausgebildetem Flüssigkeitspool der Teilströme 1 und 2. Dies liegt an dem an dieser Stelle größeren radialen Abstand der Oberfläche des Schneckenprofils von der inneren Gehäuseoberfläche im Vergleich zum voll ausgebildeten Flüssigkeitspool bei diesem Füllgrad. Die freien Oberflächen  $S_{21}^{SA}$  und  $S_{21}^{GO}$  haben im Vergleich zu Bild 5.41 und Bild 5.42 weiter abgenommen. Im Vergleich zu Bild 5.42 sind auf Welle 2 im Schneckengang 1 sowohl auf der Innenseite der Gehäuseoberfläche als auch auf der Flüssigkeitsschicht des Schneckenelements die neuen freien Oberflächen  $S_{12}^{GO}$  und  $S_{12}^{SA}$  entstanden. Der Punkt  $P_{32}^{PB}$  ist nicht mehr Bestandteil des Teilstroms 3, sondern liegt auf der freien Oberfläche  $S_{12}^{SA}$ .



**Bild 5.44** Flüssigkeitsverteilung im Querschnitt einer 2-welligen Schneckenmaschine mit 2-gängigen Schneckenelementen; Füllgrad  $\epsilon = 80\%$ , Drehwinkel  $\theta_{10} = \theta_p + \pi/i_g$

In Bild 5.44 ist die Flüssigkeitsverteilung bei dem Drehwinkel  $\theta_{10} = \theta_p + \pi/i_g$  dargestellt. Dies entspricht im Vergleich zu Bild 5.41 einer Änderung des Drehwinkels um  $\Delta\theta = \pi/i_g$ . Der Teilstrom 1 auf Welle 1 trifft im Punkt  $P_{12}^{SP}$  auf die Flüssigkeitsschicht im Schneckengang 1 auf der Welle 2. Dies stimmt phasenverschoben mit der in Bild 5.41 dargestellten Flüssigkeitsverteilung überein. Dieser Vorgang wiederholt sich von Teilstrom zu Teilstrom in Abhängigkeit von der Gangzahl  $i_g$  der Schneckenelemente phasenverschoben um  $\pi/i_g$ . Der Wechsel von Welle zu Welle findet für jeden Teilstrom nach einer Drehung der Wellen um  $\Delta\theta = \pi(2 - 1/i_g)$  statt. Nach einer Drehung um  $\Delta\theta = 2\pi(2 - 1/i_g)$  ist der Teilstrom wieder auf der Ausgangswelle jedoch im anderen Schneckengang. Nach einer Drehung um  $\Delta\theta = 2\pi(2i_g - 1)$  findet sich der Flüssigkeitspool wieder auf derselben Welle im selben Gang. Bei einer Gangzahl von  $i_g = 2$  sind dies drei Umdrehungen.

Für die Schneckendrehzahl:

$$n_0 \sim D^{-\chi} \quad (6.54)$$

$$\frac{n_{0,1}}{n_{0,0}} = \left( \frac{D_1}{D_0} \right)^{-\chi} \quad (6.55)$$

mit  $\chi$  als Drehzahlexponent.

Da die Materialeigenschaften und der Gangsteigungswinkel als konstant vorausgesetzt werden, können auch die Durchsätze der Maschinen in Relation zueinander gesetzt werden:

$$\begin{aligned} \frac{\dot{M}_1}{\dot{M}_0} &= \frac{\dot{V}_1 \rho_1}{\dot{V}_0 \rho_0} \\ \Rightarrow \frac{\dot{M}_1}{\dot{M}_0} &= \left( \frac{D_1}{D_0} \right)^\psi \left( \frac{D_1}{D_0} \right) \left( \frac{D_1}{D_0} \right) \left( \frac{D_1}{D_0} \right)^{-\chi} \\ \Leftrightarrow \frac{\dot{M}_1}{\dot{M}_0} &= \left( \frac{D_1}{D_0} \right)^{2+\psi-\chi} \end{aligned} \quad (6.56)$$

worin  $\rho$  für die Schmelzedichte steht.

Der in der Gleichung enthaltene Gangtiefenexponent  $\psi$  liegt aufgrund der Geometrie von Start- und Zielmaschine fest. Der Drehzahlexponent  $\chi$  muss für die jeweils angenommenen Randbedingungen bestimmt werden. Dazu später mehr in Abschnitt 6.2.3.2.2 und Abschnitt 6.2.3.2.5.

Die Betrachtung der Leistungseinträge beider Maschinen erfordert eine Betrachtung der Schmelzetemperaturen auf beiden Maschinen. Je nach Annahme, ob die Temperatur am Düsenaustritt für beide Maschinen gleich sein soll oder variable sein darf und ob der Gangsteigungswinkel variabel oder konstant sein soll, ergeben sich für die einzelnen Verhältnisse von Haupt- und Zielmaschine verschiedene Lösungen. Beispielsweise resultiert unter den Annahmen einer konstanten Düsenaustrittstemperatur der Schmelze und eines konstanten Gangsteigungswinkels die Lösung:

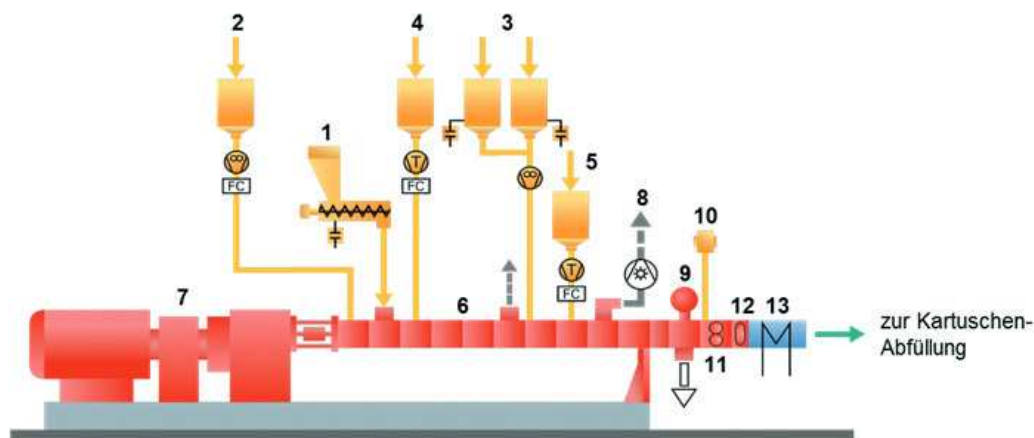
$$\frac{P_1}{P_0} = \left( \frac{D_1}{D_0} \right)^{2+\psi-\chi} \quad (6.57)$$

Für andere Annahmen bezüglich Temperatur und Gangsteigungswinkel ergeben sich andere Lösungen, die an dieser Stelle nicht betrachtet werden. Auf diese Art und Weise können weitere Modellgesetze hergeleitet werden. Details hierzu sind in [5] und [10] zu finden.

Unter den Annahmen einer konstanten Massetemperatur an der Schneckenspitze und eines konstanten Gangsteigungswinkel resultieren die in Tabelle 6.2 aufgeführten Modellgesetze.

**Tabelle 6.2** Modellgesetze für den Fall konstanter Massetemperaturen an der Schneckenspitze und konstanter Gangsteigungswinkel [5]

| Größe               |   | Modellgesetz                                 |
|---------------------|---|--|
| Durchsatz           | $\frac{\dot{M}_1}{\dot{M}_0}$                 | $\left(\frac{D_1}{D_0}\right)^{2+\psi-\chi}$ |
| Drehzahl            | $\frac{n_{0,1}}{n_{0,0}}$                     | $\left(\frac{D_1}{D_0}\right)^{-\chi}$       |
| Leistung            | $\frac{P_1}{P_0}$                             | $\left(\frac{D_1}{D_0}\right)^{2+\psi-\chi}$ |
| Drehmoment          | $\frac{M_{D,1}}{M_{D,0}}$                     | $\left(\frac{D_1}{D_0}\right)^{2+\psi}$      |
| Druck               | $\frac{p_1}{p_0}$                             | $\left(\frac{D_1}{D_0}\right)^0$             |
| Temperatur          | $\frac{T_{1,1} - T_{0,1}}{T_{1,0} - T_{0,0}}$ | $\left(\frac{D_1}{D_0}\right)^0$             |
| Wärmestrom          | $\frac{\dot{Q}_1}{\dot{Q}_0}$                 | $\left(\frac{D_1}{D_0}\right)^{2+\psi-\chi}$ |
| Länge               | $\frac{L_1}{L_0}$                             | $\left(\frac{D_1}{D_0}\right)^{1+\omega}$    |
| Gangsteigungswinkel | $\frac{\varphi_{s,1}}{\varphi_{s,0}}$         | $\left(\frac{D_1}{D_0}\right)^0$             |



- |                               |                               |                         |                  |
|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------|------------------|
| 1 Grav. Dosierung Aerosil     | 5 Grav. Dosierung Katalysator | 9 Anfahrventil          | 13 Wärmetauscher |
| 2 Grav. Dosierung Silikonpol. | 6 Extruder ZSK MEGAvolume     | 10 on-line Viskosimeter |                  |
| 3 Grav. Dosierung Silikonöl   | 7 Hauptantrieb und Getriebe   | 11 Zahnradpumpe         |                  |
| 4 Grav. Dosierung Vernetzer   | 8 Vakuumanlage                | 12 Siebwechsler         |                  |

**Bild 7.15** Anlagenbeispiel zur Herstellung von Silcondichtungsmassen

### 7.1.4.2 Chemische Reaktionen in Doppelschneckenextrudern

Die reaktive Extrusion auf Zweischneckenextrudern vom Typ ZSK findet Anwendung zur Polymerisation in der Masse ausgehend von Monomeren oder Vorpolymerisaten, sowie zur Modifizierung von Polymeren durch Pfropfen, Vernetzen und Abbauen. Die Anforderungen an ein kontinuierliches Reaktionssystem variieren je nach Verfahrensaufgabe.

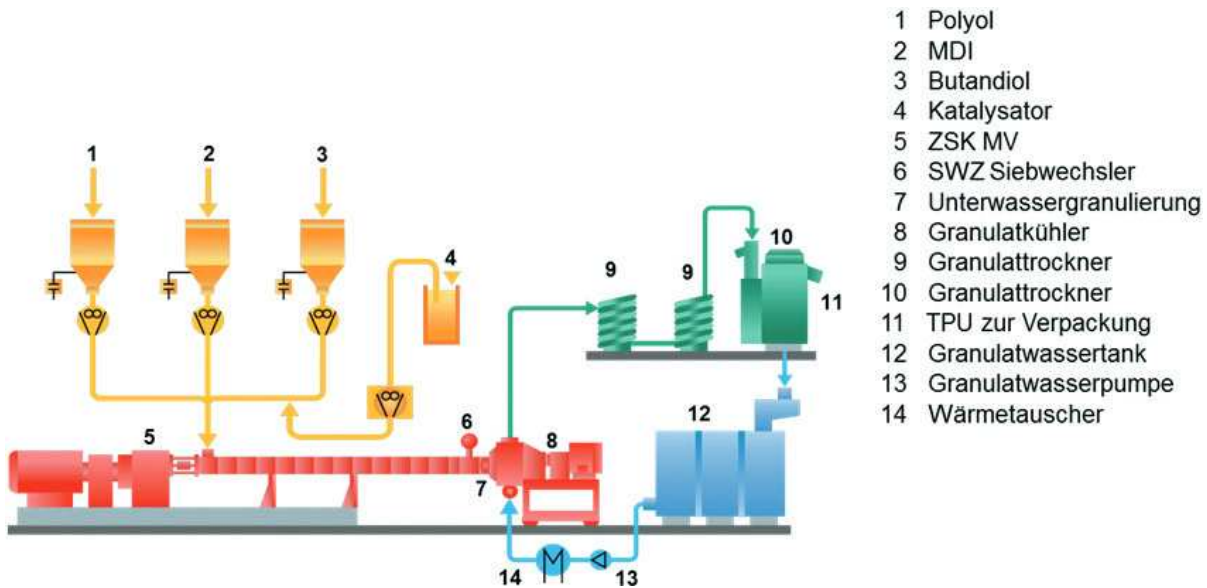
#### 7.1.4.2.1 Herstellen thermoplastischer Polyurethane (TPU)

Der ZSK erlaubt das kontinuierliche Herstellen eines extrem breiten Produktspektrums von weichen Polyurethan-Klebstoffen bis hin zu härtesten thermoplastischen Polyurethan-Elastomeren mit Shore-Härten von D 60. Zum Einsatz kommen diese linearen, thermoplastischen Polyurethane als Konstruktionswerkstoffe unterschiedlicher Härte, als hochelastische Beschichtungsmaterialien, sowie für Fasern und Folien. Der Herstellungsprozess (siehe auch Bild 7.16) verlangt eine stöchiometrische Zudosierung der Komponenten, den Polyolen (meist mit Katalysator vorgemischt) und den Diisocyanaten im flüssigen bzw. geschmolzenen Zustand, in den Einlauf des ZSK.

Der Herstellungsprozess des TPU kann erweitert werden zur Einarbeitung weiterer Zusatzstoffe, wie Stabilisatoren, Gleit-, Farb- und Flammschutzmittel, die bedarfsgerecht auch per Zweiwelliger Seitenbeschickung (ZS-B) stromab des Haupteinzugs dem Schmelzestrom zugegeben werden können.

Der Austrag erfolgt über eine Zahnradpumpe und eine Siebwechsellvorrichtung direkt zu einer Unterwassergranulierung.





**Bild 7.16** Anlage zur kontinuierlichen Herstellung linearer thermoplastischer Polyurethane

Da keine hohe Antriebsleistung erforderlich ist, kann seit ihrer Einführung die großvolumige Maschinenserie ZSK MEGAvolume PLUS bei der Herstellung von TPU zur Anwendung kommen. Aufgrund der größeren Gangtiefe und dem damit verbundenen größeren freien Volumen lassen sich mit dieser geringere Scherbelastungen, sowie größere Verweilzeiten einstellen. Die geringere Scherung der TPU Schmelze wirkt sich vorteilhaft auf den thermisch-mechanischen Abbau des Polymers und damit auch auf dessen Farbe aus. Ein typischer Durchsatz für einen ZSK 98 Mv PLUS beträgt 1,5 t/h.

#### 7.1.4.2.2 Peroxidischer Abbau von Polypropylen

Die üblichen direkt durch Polymerisation erhaltenen Polypropylen-Polymerisate haben eine relativ breite Molmassenverteilung. Durch kontrollierten peroxidischen Abbau in einer der Polymerisation nachgeschalteten Kunststoff-Aufbereitungs-Stufe werden bevorzugt Moleküle mit hoher Molmasse in kürzere Bruchstücke zerlegt, wodurch eine engere Molmassenverteilung und ein höherer Schmelzindex erzeugt wird. Diese Polypropylen Typen weisen aufgrund der besseren Fließfähigkeit der Schmelze günstigere Eigenschaften beim Spritzgießen und beim Spinnprozess auf.

Polypropylen und Additive werden meist in einem Mischer vorvermischt. Das Peroxid kann an dieser Stelle ebenfalls flüssig zugegeben werden, seltener wird es als Feststoff zu dosiert. Weitere Zugabemöglichkeiten für flüssiges Peroxid bestehen durch Einsprühung in die Einlauföffnung oder leicht stromab in die Einzugszone. Typische Abbauschritte gehen von einem Schmelzindex (MFR bei 2,16 kg und 230 °C) von 0,5 bis 40 g/10 Min. aus, auf Zielwerte des Schmelzindex von 35 bis 200 g/10 Min., in Einzelfällen auch darüber.

Additive mehr also nur farbgebend sein können. Titandioxid weist einen hohen Brechungsindex auf und zeigt deswegen ein hervorragendes Deck- und Aufhellvermögen. Es kann aber beispielsweise auch Barriere- und Schutzfunktionen übernehmen. Titandioxid als Nanopartikel bieten in erster Linie physikalische Effekte jenseits der Farbe. Bei Ruß werden auch dessen stabilisierende Eigenschaften gegen strahlungsinduzierten Abbau oder die elektrische Leitfähigkeit bestimmter Ruß-Typen zur Funktionalisierung eines Werkstoffes eingesetzt. Je nach Modifizierung können manche Typen von Titandioxid und Ruß schwieriger zu dispergieren sein als die meisten gängigen anorganischen Pigmente. Insbesondere Weißpigmente und anorganische Farbpigmente werden zu Masterbatches mit einem hohen Pigmentanteil von bis zu 80% verarbeitet. Die Durchsatzoptimierung steht dabei im Vordergrund, der Dispergierprozess ist in der Regel unproblematisch.

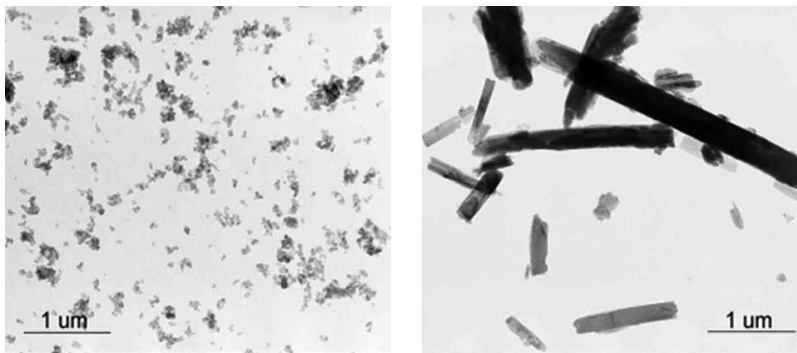
Bei organischen Pigmenten hingegen ist die Dispergieraufgabe eminent und stellt höchste Ansprüche an Prozessdesign und Equipment, um Batche hoher Qualität bei optimalen Produktionskosten herzustellen. Organische Pigmente benötigen erheblich mehr Scherenergie, um die Kristallverbände aufzubrechen und die Brillanz und Farbstärke der Produkte zu entwickeln. Weiterhin treten bei organischen Pigmenten deutliche Unterschiede in der Dispergierbarkeit auf. Schließlich beobachtet man bei dieser Pigmentgruppe Effekte wie eine mehr oder weniger ausgeprägte Kompaktierneigung, die bei den anderen Gruppen nicht oder nur in unbedeutendem Maß auftreten. Deswegen widmen wir den organischen Pigmenten eine eingehendere Betrachtung der Farb- und der Dispergiereigenschaften sowie der Auswirkung diverser Prozessvarianten und Maschinenparameter auf die Farbentwicklung bei dieser Pigmentgruppe.

Effektpigmente sind eigentlich eine Untergruppe der anorganischen Pigmente, die es aufgrund ihrer besonderen Eigenschaften und Anwendungsgebiete verdienen, gesondert betrachtet zu werden. Effektpigmente können grob in Metalleffektpigmente, wie Partikel aus Aluminium, Messing oder anderen Legierungen, und Perlglanzpigmente unterteilt werden. Letztere bestehen aus einem plättchen- oder schichtförmigen Trägermaterial wie Glimmer, Titandioxid oder Gläsern, die chemisch behandelt werden, um Schichtabstände zu variieren oder Deckschichten aufzubringen. Die Brillanz der Effekte hängt von der Unversehrtheit der erzeugten Schichtstrukturen ab. Deswegen ist es wichtig, die mechanische Belastung und Schereinwirkung bei den Einarbeitungsprozessen dahingehend zu minimieren, dass Partikelverbände zwar aufgebrochen und verteilt werden, die Mikrostruktur der Partikel jedoch intakt bleibt. Folglich stellen Mischungen von organischen Pigmenten und Effektpigmenten einen Spezialfall für die Dispergierung dar, weil die optimalen Verarbeitungsbedingungen beider Produktgruppen diametral entgegengesetzt sein können.

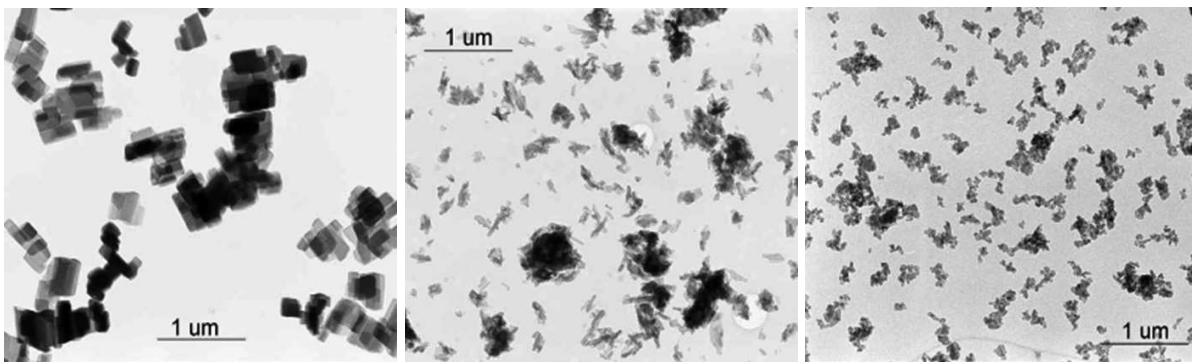
### 8.2.2.1.1 Colour Index und Partikelgrößen: Pigmente auf den ersten Blick

Organische Pigmente werden anhand ihrer chemischen Struktur einem Colour Index (C.I.) zugeordnet, der die Farbrichtung und eine fortlaufende Nummer trägt. Pigmente mit gleichem C.I. können jedoch unterschiedliche Kristallmorphologie und Partikelgrößenverteilungen aufweisen (=> elektronenmikroskopische Aufnahmen von C.I. Pigment Rot 202 und C.I. Pigment Violett 19: Bild 8.11, Bild 8.12). Deswegen ist der C.I. alleine keine schlüssige Angabe, um das Dispergierverhalten eines Pigments vorherzusagen. Auch andere Pigmenteigenschaften wie Deckvermögen, Transparenz oder Farbton können bei gleichem C.I. deutlich verschieden sein.

Handelsübliche Pulverpigmente bestehen aus einer Mischung von Primärkristallen, Aggregaten und Agglomeraten. Primärkristalle sind einzelne Kristalle, die durch Kristallstruktur und Kristallmorphologie eindeutig beschrieben sind. Primärkristalle, die über Ecken und gemeinsame Flächen zusammen gewachsen sind, heißen Aggregate. Sie sind fest physikalisch miteinander verwachsen und kaum mechanisch zu trennen. Agglomerate sind Verbände aus Primärkristallen und Aggregaten. Sie stellen den Hauptanteil bei Pulverpigmenten dar und müssen im Dispergierprozess möglichst vollständig zu Primärkristallen und Aggregaten aufgebrochen werden.

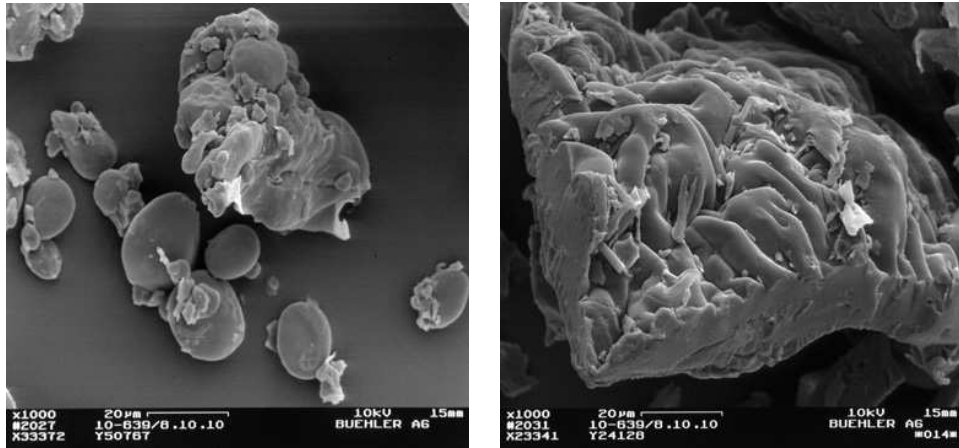


**Bild 8.11** Verschiedene Typen von C.I. Pigment Rot 202 [BASF AG]



**Bild 8.12** Verschiedene Typen von C.I. Pigment Violett 19 [BASF AG]



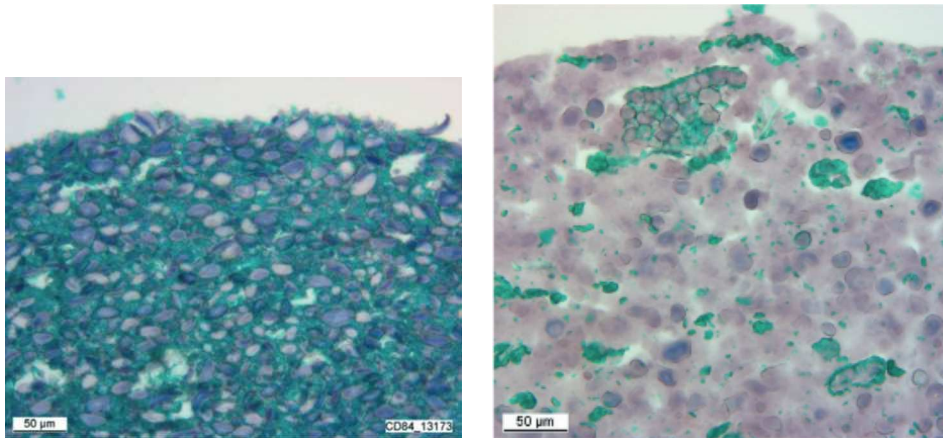


**Bild 8.56** Links: Natürliche Weizenstärke mit sichtbaren Stärkekörnern und Proteinpartikeln, rechts: Extrudierte, verkleisterte Weizenstärke [Bühler AG]

Die Gründe für den Erfolg der Kochextrusion sind vielfältig und in [4] näher beschrieben, hier sind die wichtigsten kurz zusammengefasst:

1. Kombination verschiedener verfahrenstechnischer Grundoperationen
2. Verfahrens- und Produktflexibilität
3. Niedrige Produktions- und Investitionskosten
4. Energieeffizienz und Nachhaltigkeit

Die Kaltextrusion zur Herstellung von z.B. Teigwaren beruht auf den gleichen physikalischen Prinzipien und verfahrenstechnischen Grundoperationen wie die Kochextrusion. Weizengrieße (200 bis 500 µm) werden mit Wasser (30 bis 33%) vermischt, geknetet und bei etwa 110 bar Düsendruck ausgeformt. Der Teig erfährt dadurch sowohl einen mechanischen als auch thermischen Energieeintrag, der im Gegensatz zur Kochextrusion nur zu einer geringen Protein- und Stärkeschädigung führt. Die Teigtemperaturen liegen deswegen unter 50 °C. Das Ziel der Kaltextrusion ist ein Teig, der als kontinuierliche Matrix eine Proteinstruktur aufweist, in dem die Stärke eingebettet ist. In der Kochextrusion ist es genau umgekehrt, die Stärke dient als Bindemittel und nicht die Proteine.

**Bild 8.57**

Links: Kaltextrusion – Kontinuierliche Proteinmatrix (grün) mit eingebetteter Stärke (lila)  
 Rechts: Heißextrusion – Kontinuierliche Stärkematrix (lila) mit eingebetteten Proteinen (grün)  
 [Bühler AG]

### 8.6.1 Extrusion von Frühstückszerealien

Je nach Kulturkreis können sich die Vorlieben beim Frühstück erheblich unterscheiden. Ein nicht unerheblicher Teil wird aber durch so genannte Frühstückszerealien abgedeckt. Untersuchungen zeigen auf, dass der jährliche Konsum in Deutschland 1 kg pro Kopf und Jahr beträgt. In 15 % der Haushalte werden täglich Zerealien gegessen, in 33 % der Haushalte einmal pro Woche und bei 10 % mindestens einmal im Monat. Interessanterweise verzehren Erwachsene 50 % der für die Kinder hergestellten Frühstückssprodukte. [5]

In den nachfolgenden Abschnitten werden am Beispiel einer modernen Kochextrusionsanlage für Frühstückszerealien die notwendigen Verfahrensschritte vorgestellt, um von den Rohwaren zu den fertigen Endprodukten zu gelangen.

Eine Anlage dieser Art besteht aus den folgenden Verfahrensschritten:

1. Rohwarenaufbereitung und Mischerei
2. Vorkonditionierung und Extrusion
3. Temperierung und Flockierung
4. Trocknung und Besprühung
5. Endtrocknung und Röstung

In Bild 8.58 ist das Verfahrensflißbild einer solchen Anlage dargestellt.

# Index

## A

Abbaureaktionen 756  
Abnahme der Molmasse 763  
abrasiver Verschleiß 621  
Abstaulemente 146  
Achsabstand 108  
Achsenabschnittsform 325, 348  
Additive 285, 692, 701, 715  
adhäsiver Verschleiß 624  
adiabate Betriebsweise 540  
Agglomerate 691, 713  
Aggregatzustände 203  
ähnlichkeitsgerechte dimensionslose Darstellung 14  
Ähnlichkeitstheorie 35  
Aktivierungsenergie 216, 277  
Alkyldradikale 277  
amorphe Thermoplaste 218  
Änderung  
– mechanische Eigenschaften 281  
– mittlere Konzentration 254  
– molekularer Polymeraufbau 281

Anlagenlayout Pharmaindustrie 800  
Anordnung von Schneckensatzelementen 129  
anorganische Pigmente 693  
Antioxidantien 286  
Antoine-Gleichung 269  
Anwendungen  
– Chemie 605  
– Food 605  
– Pharma 605  
Anwendungen der gleichläufigen Doppelwellenschnecke 675  
Anwendungsbeispiele für die Kunststoffindustrie 597  
Arrhenius-Ansatz 543  
Aufbau des Strukturmodells 645  
Aufbereitung von Kunststoffen 3  
Aufgabe im Produktionsmaßstab 537  
Aufschmelzenthalpie  
– PA/HDPE Polymerblend 230  
– PP-Kreide-Compound 230  
Aufschmelzen von Thermoplasten 449

Auslegen von Entgasungszonen 525  
Auslegung von Entgasungsextrudern 728  
Austrittstemperatur aus der Aufschmelzzone 459  
Autoxidation 277  
Axialgeschwindigkeit 408  
axial offen 679

## B

Baker Perkins 173  
Bandrockner 789  
Barriereschnecke 154, 692  
Bartbildung 688  
BASF 695  
Basisgeometrie 9, 20  
Basisgeometrie der Gleichläufer 9, 107  
Basis-Scale-up/-down-Regeln 548, 553  
Batch-Knetter 84  
batchorientierte Industrie 806  
Batchverfahren 3, 797  
Baukastenprinzip 30  
Bayer 1, 17, 197, 330, 554  
Bedeutung der Schergeschwindigkeit 546

- Begrenzungen beim  
 Compoundieren 676  
 Begriff: Produkt 10  
 Beheizung von Schnecken-  
 gehäusen 617  
 Beispiele für das Scale-up  
 587  
 Beispiele zum Leistungs-  
 eintrag und Rückstau-  
 länge 391  
 Beobachter Prozessmodell  
 85, 98  
 Berechnung  
 – Aufschmelzverhalten  
 456  
 – Rückstaulänge 332  
 beschichtete Schnecken-  
 gehäuse 617  
 Beschichtungswerkstoffe  
 641  
 Betriebsbereiche der  
 Förderkennzahl 336  
 Betriebskosten 346, 759  
 Betriebspunkte und  
 Schneckenelemente  
 398  
 Betriebszustände einer  
 Schneckenmaschine  
 379  
 Betrieb unter- oder über-  
 füttert 437  
 Bezogener Entgasungs-  
 winkel 513  
 Bio-TPV 721  
 Bioverfügbarkeit 806  
 blasenfreie Flüssigkeiten  
 beim Entgasen 519  
 Blasenfunktion 265  
 Bodenanregung 649  
 Böhme 15, 92  
 Brinkmann-Zahl 586  
 Bruchdehnung 282  
 Bruchfestigkeit 282  
 Bühler AG 195, 774  
 Buss-SMS-Canzler 344
- C**
- Caprolacton 762  
 CARPOW-Ansatz 313  
 Carreau-Ansatz 13, 208,  
 294, 311  
 Carreau-Parameter 297  
 CFD 401  
 – Rechnungen 101  
 Chargenmischer 776  
 chargenweises Mischen  
 702  
 chemischer Abbau durch  
 Restfeuchte 279  
 CIELAB System 711  
 Co-Extrusion 801  
 Coloristik 700  
 Colour Index 695  
 Colour-Matching 79  
 Compoundieren 47, 675,  
 678  
 Compoundierprozess  
 sukzessiv optimieren  
 84  
 Computational Fluid  
 Dynamics 401  
 Container Mischer 703  
 Coperion Werner &  
 Pfeleiderer 7, 199  
 Copolymer 714  
 Covestro 164  
 Cox-Merz-Relation 310
- D**
- Dämpfungsfaktoren 651  
 Danckwert 532  
 Darstellung Druck/Durch-  
 satz in der Literatur  
 330  
 Datenbank 661  
 Deborah-Zahl 296  
 Degradation 719  
 Dehngeschwindigkeit  
 295, 305  
 dehnrheologischen Eigen-  
 schaften 225  
 Dehnspannung 305  
 Dehnströmungen 224  
 Dehnviskosität 204, 295  
 Dekontamination 689  
 Depolymerisation 275,  
 283  
 Dichtprofil 31  
 Dichtstoffe 605  
 Differentialgleichungs-  
 system für Extruder  
 359  
 Differenzenverfahren für  
 Extruder 359  
 Differenzialgleichungs-  
 system 360  
 Diffusionskoeffizient 527  
 diffusiver Stofftransport in  
 Polymeren 245  
 diffusive Upwind-Verfahren  
 529  
 dilatante Fluide 207  
 1-dimensionale Modellie-  
 rung 765  
 Dimensionsanalyse 370  
 dimensionslose Kenn-  
 zahlen 369  
 – Größen, Diffusion 260  
 – Kenngrößen 35  
 – Konzentrationsgröße  
 249  
 Diole und Diisocyanate  
 764  
 direktbeschichtete  
 Gehäuse 634  
 direktexpandierte Früh-  
 stückszerealien 789  
 Dispergiereigenschaften  
 und Prozessparameter  
 699  
 Dispergieren in der  
 Schmelz 545  
 Dispergiertgüte in einem  
 Masterbatch 696

- Dispergierhilfsmittel 701  
Dispergierverhalten 490, 492  
– von Pigmenten 693, 699  
disperses Aufschmelzen 455  
dispersive Mischzone 61  
dispersives Mischen 469  
Dissipation 353, 416  
distributive Mischzone 59  
distributives Mischen 462  
Dow Chemical Compound 192  
Drehmoment- und volumenbegrenzte  
– Durchsätze 595  
– Prozesse 675  
Drehzahlen und Durchsatz für die Maßstabsübertragung 583  
Drehzahlexponent 562, 568  
Drehzahl und Drehmoment 579  
dreidimensionale Berechnungen des Misch- und Verweilzeitverhaltens 485  
dreidimensionale Modelle 87, 94  
Druckabbau in einer Düse 363  
Druckaufbau im Extruder 363  
Druckaufbauzone 64  
Druck auf der Schneckenoberfläche 425  
Druckaufnehmer 668  
Druckcharakteristik 350  
Druck-Durchsatz-Charakteristiken für drei unterschiedliche Steigungen 382  
Druckfeld 424  
druckgetriebene Rohrströmung 222  
Druckgrundgleichung für Extruder 327, 331  
Druckkennzahl 371  
Druckmesstechnik 666  
Druckströmung 323f.  
Druck- und Geschwindigkeitsfeld 409  
Druck- und Schleppströmungen 204  
Druck und Temperaturmesstechnik 664  
Druckverlust in einem Rohr 329  
Du Pont 169  
Durchsatzbegrenzung 675  
Durchsatzfüllgrad 338, 340  
Durchsatz für die Zielmaschine 567  
Durchsatzkennzahl 90, 337, 371  
Düsenkopf 782  
dynamischer Mischer 291  
dynamische Strukturanalysen 644  
dynamische Vulkanisation 713
- E**
- Effektpigmente 694  
Eigendurchsatz 326  
Eigenfrequenzen 649  
Einbauvorschrift für Schneckenelemente unterschiedlicher Gangzahl 134  
eindimensionale Modelle 87, 89, 325, 343  
Einfärben 79  
Einfluss der Strukturviskosität auf die Druckcharakteristik 334  
Einflussfaktoren der Schädigung von Polymeren 273  
Einfluss von nicht-newtonschem Verhalten 585  
eingängiges Profil 111  
Einwellenextruder 341, 712  
Einwellenschnecke 18  
einwellige Maschinen 6  
einwellige Maschinenbaureihe 652  
Einzugsbegrenzung 445, 536  
Einzugs Grenzen 88  
Einzugszone 51  
Elastizität 204  
elastoplastische Fluide 207  
Eliminierung und Vernetzung 276  
energetisch mittlere Temperatur 357  
Energiebilanz 358  
– Extruder 559  
– Gesamtschnecke 360  
Entgasen  
– ABS 752  
– Aufbereitungsschritt 727  
– Lösungsmittel aus synthetischem Kautschuk 747  
– PC 749  
– PES und PSU 750  
– PMMA 749  
– Polymerschmelzen 494, 725  
– POM 748  
– Reaktionsprodukte 727



- ungetrocknetes PET 752
  - Vinylacetat aus LDPE/EVA 747
  - Entgasung 430
  - Entgasungseinsätze
    - Gehäuse 743
  - Entgasungszeiten 510
  - Entgasungszone 63
  - Enthalpiediagramm 362, 542
  - Erdmenger 12
    - Geometrie 12
    - Profil 128, 160
  - ESA-Baureihe 653
  - Euler-Euler-Modell 432
  - experimenteller Aufbau zur Bestimmung der Mischgüte 481
  - experimentell gestützte Modellierung 538
  - Experimente und Modelle 82
  - experimentgestützte Experimente 84
  - Extricom 6, 101
  - Extrudate der Lebensmittelindustrie 770
  - Extruder 18
  - Extruderkennzahl 90, 337
  - Extruderkonfigurationsprogramm 97
  - Extrudersteuerung angezeigte Drehmoment 685
  - Extrudertypen und Bezeichnungen 1
  - Extrusion
    - von Fleischersatzstoffen 795
    - von Frühstückszerealien 773
    - von pharmazeutischen Massen 797
  - Extrusionsdüse 761, 782
  - Exzentrerscheibe 155
- F**
- Farbe im Koordinatensystem 711
  - Farbmasterbatche 689
  - Farbmessung 672, 710
  - Farrel 198
  - FEM 528
  - Festkörper und Fluide 204, 207
  - Feststoffbrücken 88
  - Feststoffe 87
  - Feststoffteilchen in Scherströmung 470
  - Feststofftransport 437
    1. Ficksche Gesetz 245
    2. Ficksches Gesetz 247
  - Filterdrucktest 712
  - Filterdruckwert 712
  - Filtereinsätze 708
  - Flakes 448
  - Flanken 108
  - Flashentgasung 729
  - Flashventil 732
  - Fließbehinderung 312
  - Fließbettrockner 785
  - Fließexponent 13, 207, 415
  - Fließgrenze 206
  - Fließmodifikatoren 284
  - Fließprofile der einfachen Schleppströmung 223
  - Fließverhalten hochgefüllter Kunststoffe 309
  - Flockierung 785
  - Flockierwalzwerk 785
  - Flory-Huggins 269, 735
  - Fluidisieren 447
  - Flüssigkeitsverteilung und Füllgrad 495
  - Folienextrusion 600
  - Folienherstellung 209
  - Fördercharakteristik 413
  - Förderkennzahl 331, 335
  - förderneutrale Schnecken-geometrien 329
  - Förderparameter 84, 92, 327
    - A1, A2, B1 und B2 14
    - für eine Gleichdrall- und Gegendrallschnecke 93
  - Förder- und Leistungscharakteristik 101, 406
  - Förderverhalten bei Strukturviskosität 384
  - Formel für mittlere Konzentration nicht geeignet 256
  - Formelzeichen 103
  - Fourier-Zahl 250, 586
  - freie Flüssigkeitsoberfläche 517
  - freie Oberfläche 340, 436
  - Freie-Oberflächen-Modell 432
  - Fremddosierung 87
  - Frequenzgänge der Schwingwege 659
  - Frequenzumrichter 685
  - Frühstückszerealien 770
  - Füllgrad 58, 338, 434 f., 501, 581, 733, 758
  - Füllstoffe 74
  - Funktionalisierung und Propfungsreaktionen 756
  - Funktionen des Extruders mit geringer Effektivität 5
  - Funktionsweise eines Knetblocks 467
  - Funktionszonen 10, 89, 437, 536
  - Fußbodenbeläge 605
  - FVM 528

**G**

Ganghöhe 501, 504  
Gangquerschnitt in Abhängigkeit der Elementsteigung 141  
Gangsteigungsexponent 570  
Gangsteigung  $t$  560  
Gangtiefe 22  
Gangtiefenexponent 561  
Gangzahl 22  
Gangzahl  $Z$  108  
Gaußsche Fehlerfunktion 248  
Geberg 12  
gefüllte Schneckenabschnitte 342, 377, 405  
Gegendrallschnecke 20, 93  
Gehäusedurchmesser 334  
Gehäuse mit Liner 616  
Gelpartikel 713  
geometrisch ähnliche Maschinen 579  
geometrische Größen eines Schneckenprofils 115  
geometrisch unähnlich 536  
Geruchsverbesserung 726  
Gesamtdeformation am Keilspaltaustritt 294  
gesamten Prozess im kleinen Extruder abbilden 83  
Geschichte der Kunststoffe 2  
Geschwindigkeitsverteilung im Keilspalt 298  
Gestufte Vakua 732  
Gewindeelement 405

Gewindeschnecken 24  
Glasfaser 71  
Glasfaserverstärkung von Polymeren 597  
Glastemperatur 218  
Gleichdrallschnecken 18  
Glycerin 209  
Good Engineering Practice 804  
Granulat 203, 689  
Granulierung im pharmazeutischen Sinn 797  
gravimetrische Dosierung 779  
größere Gangtiefen des Schneckenkanals 593  
großvolumiger Reaktor 345  
Grundgleichungen für Extruder 92  
grundlegende Patente 23  
Grundwerkstoffe Schneckenelemente 642

**H**

Haifischhaut (shark skin) 214  
Haptik 723  
Hazard Analysis and Critical Control Points (HACCP) 792  
Heizpatronen 617  
Heizplatten 618  
Heizschalen 618  
Hencky-Dehnung 295, 305  
Henry-Koeffizient 268  
Herstellprozess für TPV 716  
HIP 637  
historische Entwicklung 12  
HME 158

hochaktive Wirkstoffe 805  
hochviskose Flüssigkeiten 10, 89  
Hochviskosprozesse 37  
Hochviskosreaktor 344  
Hochviskostechnik 20, 34  
hohe Drehmomente 591  
hohe Drehzahlen 591  
hohes Volumen 591  
Homogenisierung und Vernetzung 717  
hydrodynamische Einlaufströmung 91  
Hydroperoxide (ROOH) 287

**I**

Igel-Elemente 150  
Infrarotthermometer 666  
Inhomogenitäten 678  
initiales Aufschmelzen 455  
Investitionskosten 346, 678

**J**

Japan Steel Works 192

**K**

Kalanderwalzen 698  
Kalandriereffekt 698  
Kaltagglomeration 691  
Kalt-, Warm- und Heißmischen 703  
Kamm 108  
kammauftragsgeschweißte Elemente 635  
Kammpanzerungen und Grundwerkstoffe 642  
Kammwinkel 116

- Kanalquerschnitte mit unterschiedlicher Gangsteigung 561
- Kanaltiefenexponent 569
- Kaschierverfahren 209
- Katalysator 272, 605
- Kavitation 406
- Kennzahl der Gesamtdeformation 299
- Kennzahlen
- der ganzen Maschine 577
  - Entgasen 518
  - für Schneckenelemente 99
  - zur Beurteilung der Dispergierung 289
- keramische Massen 605
- Kernwelle 26
- Kettenspaltung 275
- Kinematik 21
- kinematisch „selbstreinigend“ 6
- Kippeigenmoden 658
- Knetelemente 123, 142, 426
- Knetscheiben 24
- Knetzone 378
- Kochextrusion 770
- Kolbenströmung 325, 343
- Kolonnen 555
- Kompaktierneigung der Pigmente 698
- Komponentenmengenbilanz 486
- konische Schnecken 6
- Konzentrationsgradient an der Phasengrenzfläche 252
- Konzentrationsverlauf in der Nähe der Phasengrenzfläche 246, 248
- Korrektor 85
- Korrektor Prozessmodell 98
- Korrosion 627
- Korrosionsmessung 631
- Krauss Maffei Berstorff 5, 185
- Kugelpackung 240
- Kühlung und Temperierung 618
- Kunststofftechnik 45
- L**
- Laborextruder 83, 453, 540
- Laborrheometer 669
- laminare Strömung 90
- Länge der Entgasungszone 527
- Längenexponent 568
- Längsmischung und Verweilzeitverteilung 468
- Längsschnitt-Äquidistante 40, 115
- Längsschnittkontur 21
- Lanxess 178
- Lebensmittelextrusion 770
- Lebensmittelsicherheit in der Lebensmittelextrusion 791
- Leckströmung 337
- Leichtbauschnecken 42
- Leistritz 690, 799
- Leistungscharakteristik 350, 374, 413
- Leistungseintrag 393
- Leistungsgrundgleichung 352
- Leistungskennzahl 371
- für einen Ringspalt 348
- Leistungsparameter 350
- Leistungsverhalten 347
- Liner-Gehäuse 633
- LIST 344
- Lizenzvergabe 33
- LLDPE 746
- Löhr 16
- M**
- Makromoleküle 310
- Maschinendesign Pharmaindustrie 798
- Maschinengrundgeometrie 558
- Maschinenkonfiguration 558
- Masterbatche 76
- Masterbatch im Heißverfahren für Spinnfaser und Folienqualität 704
- Materialeigenschaften 558
- von Zweistoffsystemen 229
- Materialvergilbung 677
- Materialverhalten von Mischungen 227
- maximale adiabate Temperaturerhöhung 420
- mechanische Beanspruchung 415
- mechanischer Abbau 279
- mehrwellige Extruder 6
- Meskat 12
- Messen und Bewertung von Verschleiß 629
- Messergebnisse Entgasung 262
- Messtechnik 662
- minimal zulässige Schichtdicke 251
- Minimierung der Produktschädigung 272
- Minimierung von Reaktionspartnern 285
- mischbare Polymerblends 233



- Mischelement 148, 426  
Mischen 702  
– mit Füllstoffen 228  
Mischen und Dispergieren 461  
Mischgüte 478  
Mischungsansatz 432  
Mischvorgänge beim Farbwechsel 485  
Mischzeit und Mischgüte 778  
mittlere Konzentration im zweidimensionalen Extrudermodell 531  
mittlere Produktgeschwindigkeit 339  
mittlere Produktverweilzeit 341  
mittlere Schergeschwindigkeit 557  
mittlere Verweilzeit 343  
mittlere Verweilzeit im Keilspalt 304  
Modalhammer 648  
Modellanwendungen - online 98  
modellbasierter Skalierungsansatz 557  
Modellexponenten 568  
Modellgesetze für den Fall konstanter Massetemperaturen 563f.  
Modellgesetzexponenten 564  
modellgestützte Experimente 538  
modellgestützt geplante Experimente 84  
Modellierung 765  
Modellierungsansätze für Zweiphasenströmungen 431  
modellprädiktive Regelung 673  
Modellschnecke 351  
Modellschnecken mit Modellflüssigkeiten 84  
modulare Bauweise 29  
modularer Aufbau 754  
Modultechnik 9, 42  
möglichst ähnliche Prozessbedingungen 556  
Molekularmasse 209  
Molmassenverteilung 220, 757  
Monobatche 690  
Monolithische – Elemente 635  
– Gehäuse 633  
Motivation Modellierung 87  
Motorunterlagen 650  
Multibatches 692
- N**
- Nachteile Extruder 11  
Neidhardt 22  
neuronaies Netzmodell 88  
newtonsche Fluide 92, 207  
newtonsches Fließverhalten 413  
newtonsche Viskosität 319  
nicht selbstreinigende Profile 160  
NIR- und UV-VIS-Spektroskopie 803  
Nitrierschicht 638  
Normalspannungsdifferenz 211  
nulldimensionales Modell 360  
Nullviskosität 13, 89, 205  
numerische Diffusion 529  
numerische Simulation  
– der Filmentgasung 528  
– der Zweiphasenströmung 434  
Nut 108
- O**
- Oberflächen der Flüssigkeitspools 500  
Oberflächenerneuerung 495  
Oberflächenerneuerungsmodell 533  
Oberflächenvergrößerung durch Blasen 524  
Oberfläche-Volumen-Verhältnis 573  
Oberfläche von Gehäuse und Förderelementen 122  
offenes Schneckengehäuse 614  
Opazität 696  
optimaler Betriebspunkt 355  
optische Eigenschaften 283  
organische Pigmente 693  
oxidativer Abbau 276
- P**
- Partialdruck an der Phasengrenzfläche 267  
Partialdruckerniedrigung 737  
Particle-Tracking 487  
Partikelgrößenverteilung 777  
patentierete Schnecken-elemente 160  
PAT, Process Analytical Technology 803  
Pawlowski 12f., 92

- Pécelet-Zahl 260  
 Penetrationshypothese 246  
 peroxidischer Abbau 609  
 PET 600  
 Pfropfenströmung 325, 343  
 Pfropfpolymer 714  
 pharmazeutische Massen 605  
 Phasengrenzflächen-Kenngröße 265  
 Phasenverteilung 433  
 Phenolharze 716  
 physikalisch ungleiche Skalierung 553  
 PIGS-Schema, Presence, Introduction, Growth, Survival 793  
 PLA 600  
 planare Verstreckung 293  
 Plastifizieren von Zweistoffsystemen 236  
 Plastifizierzone 52  
 plastische Deformation 452  
 Platte-Platte 321  
 PM-HIP-Verbundwerkstoffe 643  
 PMMA 275, 726  
 polierte Edelstahloberflächen 798  
 Polyamid 216  
 Polycarbonat 220  
 Polycarbonat (PC)-Primärproduktion 16  
 Polyethylen 216  
 Polymereingangskonzentration 729  
 Polymerisation von Acrylaten 760  
 Polymerisation von Lactamen 759  
 Polymermischungen 228  
 Polymer-Trägermaterial 701  
 Polyolefine 697  
 Polypropylen 216  
 Polystyrol 220  
 Polytetrafluorethylen 216  
 POM 275  
 Potenzansatz für Viskosität 207  
 Prädiktor Prozessmodell 85, 98  
 Praxis beim Betreiben von Extrudern 242  
 Premix 77, 691, 706  
 Probennahme 684  
 Produkteigenschaft und Darreichungsform 798  
 produktionsunterstützte Modellierung 85  
 Produktkühlung über die Gehäusewand 539  
 Produktqualität 536, 677  
 Produktschädigung und Eigenschaften 280  
 Produkttemperatur beim Scaling 539  
 Produkttemperaturerhöhung durch Verweilzeit und Scherung 545  
 Produktvolumen 345  
 Profile von Schubspannung im Rohr 223  
 Profilparameter 35 f., 92, 327, 337  
 prozessintegrierte Qualitätssicherung 662  
 Prozesskontrolle 683  
 Prozessrheometer 671  
 Prozesssteuerungskonzept 795  
 Prozessverständnis 82  
 PS 275  
 PTFE 275  
 Pulver 445  
 Pulverpigmente 695  
 Pumpwirkungsgrad 36, 133, 354, 363, 382  
 Pumpwirkungsgrad als Funktion der Steigung 140  
 PVC 602, 697
- Q**
- Qualitätsbestimmung 710  
 Querschnittsfläche 121  
 – füllgrad 339  
 – profil 21
- R**
- Radikale 278  
 Radikalfänger 287  
 Raman-Spektroskopie 804  
 Raumäquidistante 40  
 Reaktionen erster Ordnung 768  
 reaktive Extrusion 272, 755  
 Rechengitter 403  
 – auf der Oberfläche 404  
 – im Querschnitt 404  
 Reibleistungen im Produkt 547  
 Reibungsverhältnissen des Feststoffs 438  
 Reißverschlussbildung beim Granulieren 677  
 repräsentative Schergeschwindigkeit proportional 387  
 repräsentative Viskosität 387  
 repräsentative Viskositäten für Leistung und Druck 390  
 Restentgasen 727

- Restentgasung und Schleppmitteleinsatz 734
- Restgehalte 746
- Reversion 719
- Reynoldszahl 90, 413
- rheologische Eigenschaften von Polymer-schmelzen 203
- Rheologische Messtechnik 669
- Riess 20
- rigorose Modellierung 86
- Ringextruder der Firma Extricom 6
- Ringspalt 321
- Rinnenmodelle 337
- Rissgefahr 639
- Rockstedt 195
- Röstung 787
- Rückstaulänge 332, 340, 380, 392
- Rückwärtsentgasung 730, 746
- rückwärtsfördernde Knet- oder Förderelemente 764
- Rührkessel 555
- Rüstzeiten 708
- S**
- SBR 726
- Scale-down 535f.
- Scale-up 535, 686, 767
- Durchsatz- und Schnecken-durchmesser 552
- Exponent 535, 745
- reaktiver Extrusionsprozess 768
- von Entgasungs-extrudern 744
- Scale-up-/Scale-down-Exponent 535, 556, 754, 768
- Scaling bei unterschiedlichen Geometrien 580
- scharfe Schneckenkonfiguration 722
- schematischer Druck- und Temperaturverlauf 621
- Schenkel 554
- Scherbelastung 490
- Schergeschwindigkeit 204, 318
- Schergeschwindigkeit in den Spielen Kamm-Wand und Schnecke-Schnecke 547
- Schergeschwindigkeitsbereiche für unterschiedliche Anwendungsfelder 209
- Schergradient 764
- Scherströmung 319
- Scher- und Dehnströmungen 221
- in Schneckenmaschinen 476
- schleichende Strömung 90, 369
- Schleppmittel 266, 734
- Schleppmittelzugabe 738
- Schleppströmung 321
- Schleppströmungsfaktor 321
- schmelzebeschickt 739
- Schmelzeentgasung 679
- Schmelzeförderzone 58
- Schmelzepumpe 712
- Schmelzetemperatur 562
- Schmelz- und Haftkleber 605
- Schneckenabmessungen verschiedener Hersteller 83
- Schneckenaußendurchmesser als Bezugsgröße 502
- Schneckendrehzahl 88
- Schneckenelemente 136, 327
- Schneckenkonfiguration 451
- für Ringöffnungspolymerisation 760
- Schneckenmodellierung 98
- Schneckenwellenabdichtung 740
- Schubkantenprofil 138
- Schubspannung 204, 319, 415
- als Funktion der Deformation 206
- Schulterknetzscheiben, 144
- Schwerkraftmischer 703
- Schwinggeschwindigkeiten 654
- Schwingungsanalyse 646
- Segregationsgrad 479
- Seitenbeschickung 718
- Seitenentgasung 743
- Seitengruppenabspaltung 276
- Selbstreinigung 20
- Sensoren 663
- SIGMA 554, 558
- Sigwart 20
- Siliconöle 210
- Silikonkautschuk 605
- Simulation 689
- Skalierungsansatz 556
- SME 149
- Smoothed-Particle-Hydrodynamics (SPH) 433, 493
- Sonderelemente 152
- Specks 696
- spezifische Energie für die Aufbereitung 603
- spezifische(r)
- Antriebsleistung 361, 541

- Energieeintrag 67, 361, 541, 578
  - Leistung 349
  - mechanischer Energieeintrag 784
  - Wärmekapazität 541 f.
  - SPH 528
  - Spieloptimierung 161
  - Spielstrategien 9, 40
  - Split-feed 78, 691, 707
  - Spritzgießverfahren 801
  - Spritzkeramik 605
  - Stabilisatoren 286
  - Standardabweichung 776
  - Staubbildung 775
  - Stauscheiben 159
  - Steer Engineering Ltd 186
  - Steigung kombiniert 398
  - Steigung T des Elements 112
  - Steigung und Länge bei Förderelementen 138
  - Stoffdaten 689
  - Stoffeigenschaften von Polymeren 203
  - Stoffstromdichte durch Diffusion 245
  - Stoffübergangskoeffizient 254
  - Stokes-Gleichungen 413
  - Stopfschnecke 680
  - Strangaufweitung 213
    - PEO-Lösung 214
  - Strangdüsenköpfe 708
  - Stranggranulierung 802
  - Strangspritzkopf 682
  - Strömung in keilförmigen Scherspalten 289
  - Strömungsformen in laminarer Strömung 463
  - strömungskinematische Parameter 373
  - Strömungssimulation 401
  - Strömung zwischen zwei Platten 347
  - strukturschwingstechnische Auslegung 656
  - strukturviskoses Fließverhalten 297
  - Strukturviskosität 204, 319
  - Summenhäufigkeitsverteilung der maximalen Scherbelastung 491
  - Superposition von Schlepp- und Druckströmung 560
  - Synthese von Homo- und Copolymeren 755
- T**
- Teigbildung stärkehaltiger Rohware 775
  - Teilfüllung 338
  - teilgefüllter Schneckenabschnitt 342 f., 430, 581
  - teilkristalline Polymere 218, 542
  - Teilmodelle 539
  - Temperatur 418
  - Temperaturabhängigkeit
    - der Scherviskosität 215
    - für amorphe Polymere 217
    - für teilkristalline Polymere 216
  - Temperaturanstieg 394
    - Druckverlust in einer Düse 364
    - durch Druckaufbau 364
  - Temperatur bei Reaktivextrusion 719
  - Temperatur der Polymer-schmelze auf der Schneckenoberfläche 419
  - Temperatur, Durchsatz bei Pharmaanwendungen 800
  - Temperaturrempfindlichkeitsfaktor 544
  - Temperaturerhöhung 357
    - im Keilspalt 308
    - in einer Gesamtschnecke 361
    - und innere Reibung 544
  - Temperaturgrenzschichtdicke 420
  - temperatur- und scherempfindliche Produkte 602
  - Temperaturverlauf beim Entgasen 732
  - Temperatur-Verschiebung 215
  - Temperaturverteilung im Fluid 586
  - thermische Beanspruchung 416
  - thermisch empfindliche Produkte 540
  - thermische Produktschädigung 543
  - thermischer Abbau 274
  - Thermoelemente 665
  - Thermoplast-Aufbereitung 675
  - thermoplastische Elastomere 603
  - thermoplastische Polyurethane 763
  - thermoplastische Stärken 605
  - Theysohn 191
  - TME-Elemente 150
  - TPA 714
  - TPC 714
  - TPE 604, 713

TPS 714  
TPU 608, 714  
TPV 713  
TPV auf Basis EPDM/PP  
714  
Tracerpartikel 492  
Trägermaterial 691  
Transparenz 696  
Turbinenpunkt 351  
turbulente Strömung 90

## U

Übergangselemente 117  
Überlagerung von Druck-  
und Scherströmung  
324, 385  
Übersicht chemischer  
Reaktionen 273  
Übersicht über die meist  
verwendeten Werkstoff-  
typen 639  
Ullrich 12  
Ultraschallmesstechnik  
673  
unähnliche Skalierung  
553  
Unähnlichkeit 558  
– beim Scaling 536  
unerwünschte chemische  
Reaktionen 272  
Universalmischer 678  
unmischbare (unverträg-  
liche) Polymerblends  
233  
unterschiedliche Ver-  
schleißzustände 687  
Unterwassergranulierung  
708

## V

Vakuum 680  
Vakuuendom 681  
Vakuumsystem 725

Variationen der Kamm-  
spiele 552  
Variationskoeffizient  
Mischen 465  
Verbundelemente 636  
Verdampfungsenergie  
731  
Verfahrensparameter 709  
Verfahrenszonen 10, 47,  
50  
Vergleich von Produktions-  
maschinen 536  
Verlauf des Pump-  
wirkungsgrades 355  
Vernetzer 715  
Versatzwinkel Knetschei-  
ben 131  
Verschiebungsfaktoren  $a_T$   
217  
Verschleiß 421, 620, 686  
Verschleiß- bzw. Korrosi-  
onsschutz 615  
Verstreckung in der Keil-  
spaltströmung 289  
Versuchsaufbau 375  
Verteilung der Partikel-  
größe 697  
Verweilzeit 283, 545,  
581, 678, 718  
Verweilzeitverhalten 69,  
490  
Verweilzeitverteilung 343  
viskoelastisches Fluid  
205, 211  
Viskosität 318  
Viskositätsverläufe eines  
mit Talkum gefüllten  
Polypropylens 231  
Viskositätsverläufe lang-  
glasfaser-verstärkte  
Polypropylene 313  
Viskosität und Molmasse,  
Potenzgesetz 219  
Viskosität und Scherge-  
schwindigkeit 317

Vitovsky 17  
vollständige Ähnlichkeit  
555  
Volumenanteil 268  
– des Füllstoffes 241  
volumenbegrenzte Anwen-  
dungen 600  
Volumenstrom 526  
Volumenstrom-Kennzahl  
501  
volumetrischer Füllgrad  
339, 342  
vorgeschalteter Misch-  
prozess 678  
Vorkonditionierung und  
Extrusion 779  
Vormischung 705, 800  
Vorteile von dicht käm-  
menden Gleichdrall-  
schnecken 5  
Vor- und Nachteile der  
Strömungssimulation  
402  
Vorwärtsentgasung 740  
Vulkameterkurven 720  
Vulkanisationsbeschleuni-  
ger 722

## W

Wärmeströme über den  
Zylinder 572  
Wärmeübergang 365  
Wärmeübergangskoeffizi-  
ent 358, 423  
Weber-Zahl für den Auf-  
bruch von Tropfen  
473  
Wechselwirkungspara-  
meter 270  
Weissenberg-Effekt 212  
Werkstoffausführungen für  
Extrudergehäuse und  
Schneckenelemente  
632

- Werkstoffe 619, 621, 623, 625, 627, 629, 631, 633, 635, 637, 639, 641, 643
- Werner & Pfleiderer 1, 190
- White 12
- Widerstandsthermometer 666
- Wirkung eines Knetelements Mischen 143
- wirtschaftliche Kernfunktion 3, 11, 97
- Wirtschaftlichkeit 344, 721
- WLF-Beziehung 218
- Würdigung von Bayer-Forschern 12
- Z**
- Zahl der Teilströme in einem Doppelschneckenextruder 466
- Zentrierung der Welle 213
- Ziel von Versuchen 538
- ZME 151
- ZSK 7
- Baureihen und Anwendungen 591
- Baureihen und Baugrößen von 18 bis 420 mm 593
- MEGAcoupler 594
- Zweiwellige Knetschneckenpresse 1
- ZSK-Generationen 591
- Zusammenwirken Polymer und Metalle 280
- Zweiphasenströmung 430
- Zweiwellige Gleichdrall-extruder 341
- zweiwellige Gleichdrallschnecken 18
- Zwickelbereich 341