



## Leseprobe

Der gleichläufige Doppelschneckenextruder

Grundlagen, Technologie, Anwendungen

Herausgegeben von Klemens Kohlgrüber

ISBN (Buch): 978-3-446-43361-8

ISBN (E-Book): 978-3-446-43597-1

Weitere Informationen oder Bestellungen unter

<http://www.hanser-fachbuch.de/978-3-446-43361-8>

sowie im Buchhandel.

Kohlgrüber  
**Der gleichläufige Doppelschneckenextruder**



**Bleiben Sie auf dem Laufenden!**

Hanser Newsletter informieren Sie regelmäßig über neue Bücher und Termine aus den verschiedenen Bereichen der Technik. Profitieren Sie auch von Gewinnspielen und exklusiven Leseproben. Gleich anmelden unter

**[www.hanser-fachbuch.de/newsletter](http://www.hanser-fachbuch.de/newsletter)**

## **Die Internet-Plattform für Entscheider!**

**Exklusiv:** Das Online-Archiv der Zeitschrift Kunststoffe!

**Richtungsweisend:** Fach- und Brancheninformationen  
stets top-aktuell!

**Informativ:** News, wichtige Termine, Bookshop, neue  
Produkte und der Stellenmarkt der Kunststoffindustrie

***Kunststoffe.de***

Klemens Kohlgrüber

# **Der gleichläufige Doppelschnecken- extruder**

Grundlagen, Technologie, Anwendungen

2., neu bearbeitete und erweiterte Auflage

HANSER

Der Herausgeber:

*Dr.-Ing. Klemens Kohlgrüber*, <http://www.hochviskostechnik.de>

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutzgesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Alle in diesem Buch enthaltenen Verfahren bzw. Daten wurden nach bestem Wissen dargestellt. Dennoch sind Fehler nicht ganz auszuschließen. Aus diesem Grund sind die in diesem Buch enthaltenen Darstellungen und Daten mit keiner Verpflichtung oder Garantie irgendeiner Art verbunden. Autoren und Verlag übernehmen infolgedessen keine Verantwortung und werden keine daraus folgende oder sonstige Haftung übernehmen, die auf irgendeine Art aus der Benutzung dieser Darstellungen oder Daten oder Teilen davon entsteht.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdruckes und der Vervielfältigung des Buches oder Teilen daraus, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Einwilligung des Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder einem anderen Verfahren), auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung – mit Ausnahme der in den §§ 53, 54 URG genannten Sonderfälle –, reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

© 2016 Carl Hanser Verlag München  
[www.hanser-fachbuch.de](http://www.hanser-fachbuch.de)

Lektorat: Ulrike Wittmann

Herstellung: Jörg Strohbach

Coverconcept: Marc Müller-Bremer, [www.rebranding.de](http://www.rebranding.de), München

Coverrealisierung: Stephan Rönigk

Satz, Druck und Bindung: Kösel GmbH, Krugzell

Printed in Germany

ISBN: 978-3-446-43361-8

E-Book-ISBN: 978-3-446-43597-1

# Vorwort zur 2. Auflage

Das 50. Jubiläum des „Zweiwellen-Schnecken-Kneters ( ZSK)“ war der Anlass, die erste Auflage dieses Buches zu erstellen. Deshalb waren auch ausschließlich Autoren der Firmen Bayer (Lizensgeber, Kapitel 1) und Werner&Pfleiderer (heute Coperion, Lizenznehmer) beteiligt. Die Ausarbeitung der ersten Auflage erfolgte unter starkem Zeitdruck, da nach der ersten Idee zum Buch dasselbe auf der Kunststoffmesse „K 2007“ erscheinen sollte.

Bei der vorliegenden Neuauflage habe ich mir als Herausgeber vorgenommen, insbesondere folgende Verbesserungen und Erweiterungen einfließen zu lassen:

- Die Beteiligung unterschiedlicher Firmen und Hochschulen.
- Eine stärkere Einbindung fachbezogener Themen.
- Selbstverständlich die Berücksichtigung der inzwischen erfolgten Weiterentwicklungen (bei Schneckenometrien, Berechnungsansätzen, Anwendungen,...).
- Die Grundlagen der Extrudertechnik und die Prozessbeschreibung durch Modelle sollten ausführlicher dargestellt werden.
- Insbesondere anwendungsbezogene Praxisbeispiele sollten in größerem Umfang einfließen.
- Die Beiträge sollten untereinander besser abgestimmt werden.

Es ist in der nun vorliegenden zweiten Auflage in vielen Punkten gelungen. Über die qualitativen Verbesserungen möge der Leser selbst entscheiden. Der Umfang ist durch die Anzahl der Beiträge und durch die ausführlichere Darstellung der Grundlagen gewachsen. Das Buch sollte jetzt für Auszubildende in Lehrberufen lesbar sein und gleichzeitig mit den beschriebenen Anwendungen für Experten eine Bereicherung darstellen. Einige Kapitel überschneiden sich teilweise; dies ist durchaus Absicht. Durch verschiedene Autoren mit unterschiedlichen Erläuterungen zum selben Sachverhalt wird manches Thema deutlicher. Bei der Abstimmung der Beiträge untereinander habe ich darauf geachtet, dass weitgehend gleiche Bezeichnungen und Formelzeichen verwendet wurden. Die Darstellung eines Themas und die Deutung von Erkenntnissen lagen im Fokus des jeweiligen Autors. In Einzelfällen kann ein Sachverhalt von verschiedenen Autoren auch unterschied-

lich gesehen werden. Als Beispiel sei hier die Einschätzung zur Nützlichkeit von „Modellen“ genannt (Einzelheiten dazu in Abschnitt 1.4). Aus diesem Grund habe ich auch von dem ursprünglichen Vorhaben abgesehen, für jeden Beitrag eine eigene Zusammenfassung zu schreiben. Das könnte dann zu einer Bewertung führen, die im Sinne einer Zusammenarbeit „kontraproduktiv“ ist.

Ich möchte allen Autorinnen und Autoren für ihre Beiträge an dieser Stelle recht herzlich danken! Herrn Lechner danke ich für die Koordinierung der Beiträge von Coperion.

Mein Dank richtet sich auch an Alle, die durch ihre Anmerkungen zu Verbesserungen und Präzisierungen beigetragen haben. Weiterhin möchte ich mich bei meiner Tochter Kristina für die Durchsicht meiner Beiträge bedanken.

Frau Wittmann vom Hanser Verlag gilt mein besonderer Dank! Sie hat das „Buchprojekt“ von der Vorbereitungsphase an bis zum Schluss immer begleitet und mit wertvollen Beiträgen zur Gestaltung des Buches beigetragen.

Klemens Kohlgrüber, im Mai 2016

## ■ Vorwort zur 1. Auflage

Die gleichläufige Zweiwellenschnecke findet heute in vielen Industriezweigen Anwendung, insbesondere bei der Verarbeitung von Kunststoffen. Dabei geht die Entwicklung dieses Maschinentyps weit zurück. Wichtige Beiträge zur Entwicklung der gleichläufigen Zweiwellenschnecke lieferten Mitarbeiter der chemischen Industrie: Ein Basispatent für „Gewindeschnecken“ aus dem Jahr 1944 von Meskat und Erdmenger wurde 1953 erteilt. Im selben Jahr erfolgte auch eine weltweite Exklusivlizenzvergabe der Patentnutzungsrechte von der Firma Bayer an die Firma Werner & Pfleiderer.

Nachdem 1957 der erste Zweiwellen-Schnecken-Kneter (ZSK) bei Werner & Pfleiderer in Produktion ging, begann die Erfolgsgeschichte dieses Maschinentyps. Die ersten großen Anwendungen erfolgten im Umfeld der Erfinder, in der chemischen Industrie. Heute wird diese Maschine besonders in der Kunststoffindustrie z. B. bei der Extrusion und beim Compoundieren eingesetzt. Deshalb wird diese Schneckenmaschine auch als Extruder bezeichnet und die Zweiwellenschnecke als Doppelwellenextruder.

Die Kunststoffmesse 2007 mit dem 50. Jubiläum der ZSK haben die Firmen Bayer (Bayer Technology Services) und Werner & Pfleiderer (Coperion Werner & Pfleiderer) zum Anlass genommen, ein Buch zu dieser Maschine herauszugeben. Als Basis des Buches diente ein VDI-Seminar des Herausgebers mit dem Titel „Der gleich-

läufige Doppelschneckenextruder“. Neben Historie, Grundlagen und Anwendungen wird dem Leser von beiden Firmen der neueste Technologiestand vermittelt.

Da mehrere Autoren in diesem Buch Beiträge liefern, kommen auch unterschiedliche Betrachtungsweisen zum Ausdruck. Ich möchte an dieser Stelle allen Autoren für ihre Beiträge herzlich danken.

Insbesondere geht mein Dank auch an Frau Stüve vom Carl Hanser Verlag und an meinen Kollegen Herrn Hepperle, die bei der konzeptionellen Gestaltung und Bearbeitung erheblich mitgewirkt haben. Weiterhin möchte ich Herrn Wiedmann von Coperion Werner & Pfleiderer danken, der u. a. die CWP-Beiträge organisiert und das Projekt mit forciert hat.

Klemens Kohlgrüber, im August 2007

# Inhalt

<b>Vorwort zur 2. Auflage</b> .....	<b>V</b>
Vorwort zur 1. Auflage .....	VI
<b>Zusatzmaterial</b> .....	<b>VIII</b>
<b>Die Autoren</b> .....	<b>IX</b>
Der Herausgeber .....	IX
Die Mitverfasser .....	X
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>1</b>
1.1 Technisch, wirtschaftliche Bedeutung der Extruder .....	1
1.1.1 Extrudertypen und Bezeichnungen .....	1
1.1.2 Schneckenmaschinen und Kunststoffe .....	2
1.1.3 Wirtschaftliche Kernfunktionen eines Extruders in der Kunststoffindustrie .....	3
1.1.4 Extrudertypen und Vorteile von dicht kämmenden Gleichdrallschnecken .....	5
1.1.5 Erste dicht kämmende Gleichdrallschnecken .....	6
1.1.6 Details zu Doppelschnecken .....	9
1.1.7 Zielsetzung des Buches .....	10
1.1.8 Zusammenfassung .....	11
1.1.9 Ausblick .....	11
1.2 Historische Entwicklung der Gleichdrall-Doppelschnecken .....	12
1.2.1 Vorwort und Würdigung von Bayer-Forschern .....	12
1.2.2 Einleitung von Martin Ullrich .....	18
1.2.3 Frühe Entwicklungen .....	18
1.2.3.1 Basisgeometrie .....	20
1.2.3.2 Grundlegende Patente .....	23
1.2.3.3 Pionierzeit .....	31
1.2.3.4 Maschinenentwicklung .....	31

1.2.3.5	Einsatz in Chemieprozessen .....	32
1.2.3.6	Lizenzvergabe .....	33
1.2.3.7	Würdigung für R. Erdmenger .....	33
1.2.3.8	Neue Hochviskostechnik mit Gleichdrallschnecken .....	34
1.2.3.9	Vielfältige Hochviskosprozesse .....	37
1.2.4	Spezielle Entwicklungen der Bayer-Hochviskostechnik .....	38
1.2.4.1	Vertiefte Kinematik, Profilgeometrien .....	38
1.2.4.2	Spielstrategien .....	40
1.2.4.3	Entwicklungen nach der Lizenzierung .....	42
1.2.4.4	Aktivitäten nach Ablauf der Hauptpatente .....	44
1.3	Compoundieren Gesamtübersicht: Aufgaben und Anwendungsbeispiele, Verfahrenszonen .....	47
1.3.1	Aufgaben und Anforderungen an die Compoundierung .....	47
1.3.2	Aufgaben und Auslegung der Verfahrenszonen eines Compoundierextruders .....	50
1.3.2.1	Einzugszone .....	51
1.3.2.2	Plastifizierzone .....	53
1.3.2.3	Schmelzeförderzone .....	58
1.3.2.4	Distributive Mischzone .....	59
1.3.2.5	Dispersive Mischzone .....	61
1.3.2.6	Entgasungszone .....	63
1.3.2.7	Druckaufbauzone .....	64
1.3.3	Verfahrenstechnische Kenngrößen .....	67
1.3.3.1	Spezifischer Energieeintrag .....	67
1.3.3.2	Verweilzeitverhalten .....	69
1.3.4	Verfahrensbeispiele .....	71
1.3.4.1	Einarbeitung von Glasfasern .....	71
1.3.4.2	Einarbeiten von Füllstoffen .....	74
1.3.4.3	Herstellung von Masterbatches .....	76
1.3.4.4	Einfärben .....	79
1.4	Prozessverständnis - Übersicht und Bewertung von Experimenten und Modellen .....	82
1.4.1	Einleitung .....	82
1.4.2	Einteilung von Modellen und Experimenten .....	86
1.4.3	Feststoffe .....	87
1.4.4	Hochviskose Flüssigkeiten .....	89
1.4.4.1	Eindimensionale Modelle .....	89
1.4.4.2	Dreidimensionale Modelle .....	94
1.4.5	Zusammenfassung .....	96
1.4.6	Ausblick und Anregungen .....	97
1.4.6.1	Extruderkonfigurationsprogramm .....	97

1.4.6.2	Modellweiterentwicklungen .....	97
1.4.6.3	Neue Modellanwendungen – online .....	98
1.4.6.4	Verfahrenstechnische Charakterisierung von Schneckenelementen durch Kennzahlen .....	99
1.5	Förder- und Leistungsparameter von üblichen Fördererelementen .....	101
1.6	Häufig verwendete Formelzeichen .....	103
<b>2</b>	<b>Basisgeometrien und Schneckenelemente .....</b>	<b>107</b>
2.1	Basisgeometrie der Gleichläufer: Förder- und Kneteelemente einschließlich Spielstrategien .....	107
2.1.1	Einleitung .....	107
2.1.2	Das exakt abschabende Profil aus Kreisbögen .....	108
2.1.3	Geometrische Konstruktion von dicht kämmenden Profilen .....	110
2.1.4	Geometriegrößen von Gewindeelementen mit Spielen .....	112
2.1.5	Übergang zwischen verschiedenen Gangzahlen .....	117
2.1.6	Berechnung eines Schneckenprofils zur Fertigung nach der Längsschnitt-Äquidistante .....	117
2.1.7	Freie Querschnittsfläche .....	121
2.1.8	Oberfläche von Gehäuse und Fördererelementen .....	122
2.1.9	Kneteelemente .....	123
2.1.10	Neue Entwicklungen bei Schneckengeometrien .....	126
2.2	Schneckenelemente und deren Einsatz .....	127
2.2.1	Aufbau von Schneckenelementen .....	128
2.2.2	Kombinieren von Schneckenelementen .....	133
2.2.3	Schneckenelemente und ihre Wirkungsweise .....	136
2.2.3.1	Fördererelemente .....	136
2.2.3.2	Kneteelemente .....	142
2.2.3.3	Abstauerelemente .....	146
2.2.3.4	Mischelemente .....	148
2.2.3.5	Sonderelemente .....	152
2.3	Übersicht patentierter Schneckenelemente .....	160
2.3.1	WO 2009152910, EP 2291277, US 20110110183 .....	162
2.3.2	WO 2011039016, EP 2483051, US 20120320702 .....	163
2.3.3	WO 2011069896, EP 2509765, US 20120281001 .....	164
2.3.4	DE 00813154, US 2670188 .....	165
2.3.5	DE 19947967, EP 1121238, WO 2000020188 .....	166
2.3.6	US 1868671 .....	167
2.3.7	DE 10207145, EP 1476290, US 20050152214 .....	167
2.3.8	DE 00940109, US 2814472 .....	168
2.3.9	US 5713209 .....	168

2.3.10	US 3717330, DE 2128468	169
2.3.11	DE 4118530, EP 516936, US 5338112	170
2.3.12	US 4131371	171
2.3.13	DE 03412258, US 4824256	171
2.3.14	DE 1180718, US 3254367	172
2.3.15	US 3900187	173
2.3.16	WO 2009153003, EP 2303544, US 20110112255	174
2.3.17	WO 2009152974, EP 2291279, US 20110180949	175
2.3.18	US 3216706	176
2.3.19	WO 2009152968, EP 2303531, US 20110158039	177
2.3.20	WO 2013045623, EP 2760658	178
2.3.21	WO 2009152973, EP 2291270, US 20110141843	179
2.3.22	WO 2009153002, EP 2307182, US 20110096617	180
2.3.23	EP 0002131, JP 54072265, US 4300839	181
2.3.24	DE 19718292, EP 0875356, US 6048088	182
2.3.25	DE 04239220	182
2.3.26	DE 01529919, US 3288077	183
2.3.27	EP 0330308, US 5048971	184
2.3.28	DE 10114727, US 6974243, WO 2002076707	185
2.3.29	US 6783270, WO 2002009919	186
2.3.30	WO 2013128463, EP 2747980, US 20140036614	187
2.3.31	JP 2008183721, DE 102007055764, US 2008181051	188
2.3.32	DE 4329612, EP 641640, US 5573332	189
2.3.33	DE 19860256, EP 1013402, US 6179460	190
2.3.34	DE 04134026, EP 0537450, US 5318358	190
2.3.35	DE 19706134	191
2.3.36	JP 2013028055	192
2.3.37	WO 1998013189 , US 6022133, EP 934151	192
2.3.38	WO 1999025537, EP 1032492	193
2.3.39	US 6116770, EP 1035960, WO 2000020189	193
2.3.40	DE 29901899 U1	194
2.3.41	US 6170975, WO 2000047393	194
2.3.42	DE 10150006 , EP 1434679, US 7080935	195
2.3.43	DE 4202821, US 5267788, WO 1993014921	195
2.3.44	DE 03014643, EP 0037984, US 4352568	196
2.3.45	DE 02611908, US 4162854	197
2.3.46	WO 1995033608, US 5487602, EP 764074	198
2.3.47	DE 102004010553	199
2.3.48	DE 04115591, EP 0513431	200
2.3.49	WO 2011073181, EP 2512776, US 20120245909	201

<b>3</b>	<b>Stoffeigenschaften von Polymeren</b>	<b>203</b>
3.1	Rheologische Eigenschaften von Polymerschmelzen	203
3.1.1	Einführung und Motivation	203
3.1.2	Einteilung des rheologischen Verhaltens von Festkörpern und Fluiden	204
3.1.3	Vergleich zwischen rein viskosem und viskoelastischem Fluid	210
3.1.3.1	Viskoses Fluid	210
3.1.3.2	Viskoelastisches Fluid	211
3.1.4	Temperaturabhängigkeit der Scherviskosität	215
3.1.4.1	Temperaturabhängigkeit für teilkristalline Polymere	216
3.1.4.2	Temperaturabhängigkeit für amorphe Polymere	217
3.1.5	Einfluss molekularer Parameter auf rheologische Eigenschaften von Polymerschmelzen	219
3.1.6	Scherströmungen: Schleppestömungen und druckgetriebene Strömungen	221
3.1.6.1	Fließprofile der druckgetriebenen Rohrströmung	222
3.1.6.2	Fließprofile der einfachen Schleppestömung	223
3.1.7	Dehnströmungen	224
3.2	Materialverhalten von Mischungen – Berücksichtigung von Polymer-Polymer und Feststoff-Polymer Systemen	227
3.2.1	Materialeigenschaften von Zweistoffsystemen	229
3.2.1.1	Einführung Mischsysteme	229
3.2.1.2	Thermodynamische Materialdaten von Zweistoffgemischen	229
3.2.1.3	Viskositäten von Zweistoffgemischen	231
3.2.1.4	Mischbare Polymerblends	233
3.2.1.5	Unmischbare (unverträgliche) Polymerblends	233
3.2.2	Prozessverhalten beim Plastifizieren von Zweistoffsystemen	236
3.2.3	Abschlussbemerkungen zum Einsatz in der Praxis	242
3.2.4	Zusammenfassung	243
3.3	Diffusiver Stofftransport in Polymeren	245
3.3.1	Stofftransportmechanismen	245
3.3.1.1	Konzentrationsverlauf in der Nähe der Phasengrenzfläche	246
3.3.2	Einflussgrößen des Stoffsystems	267
3.4	Minimierung der Produktschädigung bei der Verarbeitung von Polymeren	272
3.4.1	Einleitung	272
3.4.2	Übersicht chemischer Reaktionen	273
3.4.2.1	Schädigung durch thermischen Abbau	274
3.4.2.2	Schädigung durch oxidativen Abbau	276

3.4.2.3	Schädigung über chemischen Abbau durch Restfeuchte .	279
3.4.2.4	Schädigung durch mechanischen Abbau .....	279
3.4.2.5	Einfluss von Metallen .....	280
3.4.3	Zusammenhang zwischen Produktschädigung und Eigenschaften .....	280
3.4.4	Reduktion von Polymerschädigung bei der Verarbeitung .....	283
3.4.4.1	Maschinelle und prozesstechnische Maßnahmen .....	283
3.4.4.2	Änderung der Schmelzeviskosität durch Molekulargewicht und Fließmodifikatoren .....	284
3.4.4.3	Minimierung von Reaktionspartnern .....	285
3.4.4.4	Additive zur Reduktion von Polymerschädigung .....	285
3.4.5	Zusammenfassung .....	287
3.5	Berechnungsgrundlagen für die Strömung in keilförmigen Scherspalt und Fließeigenschaften von gefüllten Polymerschmelzen	289
3.5.1	Berücksichtigung des strukturviskosen Fließverhaltens der Kunststoffschmelzen in der Keilspaltströmung und Kennzahlen zur Beurteilung der Dispergierung .....	289
3.5.1.1	Einleitung - Deformation von Kunststoffschmelzen, Scherung und Verstreckung in der Keilspaltströmung ..	289
3.5.1.2	Grundlagen der Berechnung der Keilspaltströmung für hochviskose Medien .....	293
3.5.1.3	Kunststoffschmelzen mit unterschiedlichem strukturviskosem Fließverhalten .....	296
3.5.1.4	Simulationsergebnisse .....	298
3.5.2	Modellierung des Fließverhaltens hochgefüllter Kunststoffe ....	309
<b>4</b>	<b>Förderverhalten, Druck- und Leistungsverhalten .....</b>	<b>317</b>
4.1	Einführung des Förder- und Druckverhaltens hochviskoser Flüssigkeiten in Extrudern .....	317
4.1.1	Durchsatz- und Druckverhalten, dimensionslose Kennzahlen ...	317
4.1.1.1	Schergeschwindigkeit und Viskosität .....	317
4.1.1.2	Einfache qualitative Betrachtungen an einfacher ebener Strömung .....	319
4.1.1.3	Extruderkennzahlen und Druckgleichung für Extruder .....	327
4.2	Einführung des Leistungsverhaltens hochviskoser Flüssigkeiten in Extrudern .....	347
4.2.1	Durchsatz-Leistungs-Verhalten der ebenen Strömung zwischen zwei Platten .....	347
4.2.2	Leistungskennzahl für einen Ringspalt .....	348
4.2.3	Grundgleichung der Leistungscharakteristik von Extrudern ....	350

4.3	Dissipation, Pumpwirkungsgrad Temperaturerhöhung und Wärmeübergang .....	353
4.3.1	Dissipation .....	353
4.3.2	Pumpwirkungsgrad .....	354
4.3.3	Temperaturerhöhung .....	357
4.3.4	Wärmeübergang .....	365
4.4	Ausblick zu den Abschnitten 4.1, 4.2 und 4.3 .....	367
4.5	Förderverhalten, Druckverhalten und Leistungseintrag in der Schmelze .....	369
4.5.1	Dimensionslose Kennzahlen .....	369
4.5.2	Teilgefüllte und gefüllte Schneckenabschnitte .....	377
4.5.3	Förderparameter für Schneckenelemente und übliche Förderkennzahlen .....	381
4.5.4	Förderverhalten bei Strukturviskosität .....	384
4.6	Aufgaben zum Leistungseintrag und Rückstaulänge .....	391
4.6.1	Aufgabe: Einfluss der Gangsteigung .....	391
4.6.2	Aufgabe: Teilfüllung .....	393
4.6.3	Aufgabe: Auslegung einer Druckaufbauzone mit einheitlicher Steigung sowie voll- und teilgefüllt Bereichen .....	394
4.6.4	Aufgabe: Auslegung der Druckaufbauzone mit verschiedenen Elementen mit 40 mm und 60 mm Steigung kombiniert .....	398
4.6.5	Aufgabe: Einfluss von nicht-newtonschen Effekten .....	399
4.7	Strömungssimulation .....	401
4.7.1	Einleitung zur Strömungssimulation .....	401
4.7.2	Gefüllte Schneckenabschnitte .....	405
4.7.2.1	Beispiel 1 .....	405
4.7.2.2	Beispiel 2 .....	423
4.7.2.3	Zusammenfassung und Ausblick .....	426
4.7.3	Teilgefüllte Schneckenabschnitte .....	430
<b>5</b>	<b>Funktionszonen im Extruder .....</b>	<b>437</b>
5.1	Feststofftransport in den und im Extruder, Einzugs Grenzen .....	437
5.1.1	Kenngrößen und Berechnungsmöglichkeiten .....	438
5.1.2	Einzugsbegrenzungen .....	445
5.1.2.1	Granulate .....	445
5.1.2.2	Pulver .....	445
5.1.2.3	Flakes .....	448
5.1.2.4	Niedrig schmelzende Komponenten .....	448
5.2	Aufschmelzen von Thermoplasten .....	449
5.2.1	Aufgaben der Aufschmelzzone .....	449

5.2.2	Schneckenelemente und Schneckenkonfiguration .....	451
5.2.3	Messmethoden .....	452
5.2.4	Wesentliche Schritte des Aufschmelzens .....	454
5.2.5	Rechenmodelle .....	456
5.3	Mischen und Dispergieren .....	461
5.3.1	Übersicht, Grundlagen und Experimente .....	461
5.3.1.1	Distributives Mischen – Mischen in laminarer Strömung .....	462
5.3.1.2	Dispersives Mischen .....	469
5.3.1.3	Bestimmung der Mischgüte .....	478
5.3.1.4	Formelzeichen zu Abschnitt 5.3.1 .....	483
5.3.2	Dreidimensionale Berechnungen des Misch- und Verweilzeitverhaltens .....	485
5.3.2.1	Zusammenfassung .....	494
5.4	Entgasen von Polymerschmelzen .....	494
5.4.1	Phasengrenzflächen und Oberflächenerneuerung .....	495
5.4.1.1	Flüssigkeitsverteilung und Füllgrad .....	495
5.4.1.2	Entgasungszeiten .....	510
5.4.2	Konzentrationsänderung in der Entgasungszone .....	518
5.4.2.1	Kennzahlen .....	518
5.4.2.2	Blasenfreie Flüssigkeiten .....	519
5.4.2.3	Einfluss der Oberflächenvergrößerung durch Blasen ....	524
5.4.3	Auslegen von Entgasungszonen .....	525
5.4.4	Numerische Simulation der Filmentgasung .....	528
<b>6</b>	<b>Scale-up und Scale-down .....</b>	<b>535</b>
6.1	Einführung und Basis-Regeln für thermisch empfindliche Produkte ...	535
6.1.1	Unähnlichkeit .....	536
6.1.2	Vergleich von Produktionsmaschinen .....	536
6.1.3	Scale-down und Wege der Auslegung .....	537
6.1.3.1	Produkttemperatur .....	539
6.1.4	Zusammenfassung/Ausblick .....	553
6.2	Scale-up und Scale-down mit Exponentenansätzen .....	555
6.2.1	Grundlegende Problemstellung .....	555
6.2.2	Einfacher Skalierungsansatz .....	556
6.2.3	Modellbasierter Skalierungsansatz .....	557
6.2.3.1	Modelltheorie .....	558
6.2.3.2	Modellexponenten .....	568
6.2.3.3	Wärmeströme über den Zylinder .....	572
6.2.4	Experimentelle Ergebnisse .....	574

6.3	Scale-up und Scale-down mit Kennzahlen .....	576
6.3.1	Kennzahlen der ganzen Maschine .....	577
6.3.1.1	Dimensionsloser Durchsatz .....	577
6.3.1.2	Spezifischer Energieeintrag .....	578
6.3.2	Geometrische Maßstabsübertragung .....	579
6.3.2.1	Geometrisch ähnliche Maschinen .....	579
6.3.2.2	Drehzahl und Drehmoment .....	579
6.3.2.3	Übertragung bei unterschiedlichen Geometrien .....	580
6.3.2.4	Dimensionsanalyse für reales Produktverhalten .....	585
6.3.2.5	Einfaches Beispiel für ein volumetrisches Scale-up .....	587
<b>7</b>	<b>Maschinentechnik .....</b>	<b>591</b>
7.1	ZSK Baureihen und Anwendungen .....	591
7.1.1	Entwicklung zu hohen Drehmomenten, Volumina und Drehzahlen .....	591
7.1.2	Drehmoment- und volumenbegrenzte Durchsätze .....	595
7.1.3	Anwendungsbeispiele für die Kunststoffindustrie .....	597
7.1.3.1	Hohes Drehmoment zur Glasfaserverstärkung von Kunststoffen .....	597
7.1.3.2	Hohes Drehmoment zur Folienextrusion von ungetrocknetem PET oder PLA .....	600
7.1.3.3	Hohes Drehmoment bei bisher volumenbegrenzten Anwendungen .....	600
7.1.3.4	Verarbeitung von temperatur- und scherempfindlichen Produkten .....	602
7.1.4	Anwendungsbeispiele für die Chemieindustrie .....	605
7.1.4.1	Kleb- und Dichtstoffe .....	605
7.1.4.2	Chemische Reaktionen in Doppelschneckenextrudern ..	608
7.2	Gehäuseeinheiten .....	610
7.2.1	Einleitung .....	610
7.2.2	Bauarten .....	611
7.2.2.1	Zugankerversion für ZSK 18 - 54 .....	611
7.2.2.2	Flanschversion für ZSK 58 - 320 .....	612
7.2.2.3	Klammerversion für ZSK 350 - 420 .....	612
7.2.3	Varianten .....	613
7.2.3.1	Geschlossenes Schneckengehäuse .....	613
7.2.3.2	Geschlossenes Schneckengehäuse mit Bohrung .....	614
7.2.3.3	Offenes Schneckengehäuse .....	614
7.2.3.4	Kombi-Schneckengehäuse .....	615
7.2.3.5	Sonderformen .....	615

7.2.4	Verschleiß- bzw. Korrosionsschutz . . . . .	615
7.2.4.1	Massivgehäuse: Nitriert oder durchhart . . . . .	616
7.2.4.2	Gehäuse mit Liner (Ovalbuchse) . . . . .	616
7.2.4.3	Direkt beschichtete Schneckengehäuse . . . . .	617
7.2.5	Beheizung von Schneckengehäusen . . . . .	617
7.2.5.1	Heizpatronen . . . . .	617
7.2.5.2	Heizschalen, Heizplatten . . . . .	618
7.2.6	Kühlung und Temperierung . . . . .	618
7.2.6.1	Ein Kreislauf . . . . .	618
7.2.6.2	Zwei Kreisläufe . . . . .	619
7.3	Erhöhung der Verfügbarkeit des Doppelschneckenextruders durch gezielte Werkstoffwahl für produktberührende Bauteile . . . . .	619
7.3.1	Einleitung . . . . .	619
7.3.2	Verschleißphänomene an Doppelschneckenextrudern in der Praxis . . . . .	620
7.3.2.1	Abrasiver Verschleiß . . . . .	621
7.3.2.2	Adhäsiver Verschleiß . . . . .	624
7.3.2.3	Korrosion . . . . .	627
7.3.3	Messen und Bewertung von Verschleißkenngrößen . . . . .	629
7.3.3.1	Messung der abrasiven Verschleißbeständigkeit . . . . .	629
7.3.3.2	Messung des adhäsiven Verschleißes . . . . .	630
7.3.3.3	Korrosionsmessung . . . . .	631
7.3.4	Ausführungsformen und Werkstoffausführungen für Extrudergehäuse und Schneckenelemente . . . . .	632
7.3.4.1	Ausführungsformen der Gehäuse . . . . .	632
7.3.4.2	Ausführungsformen von Schneckenelementen . . . . .	634
7.3.4.3	Werkstoffausführung von Extrudergehäuse und Liner . . . . .	638
7.3.4.4	Werkstoffausführung von Schneckensatzelementen . . . . .	641
7.3.5	Ausblick . . . . .	644
7.4	Dynamische Strukturanalysen an Doppelschneckenextrudern und einwelligen Austragsextrudern . . . . .	644
7.4.1	Aufbau des Strukturmodells . . . . .	645
7.4.2	Schwingungsanalyse an einem ZSK . . . . .	646
7.4.3	Optimierung einwelliger Extruder . . . . .	652
7.4.4	Strukturschwingungstechnische Auslegung . . . . .	656
7.4.5	Zusammenfassung/Ausblick . . . . .	661
7.5	Messtechnik und prozessintegrierte Qualitätssicherung . . . . .	662
7.5.1	Messtechnische Grundlagen . . . . .	663
7.5.2	Druck- und Temperaturmesstechnik . . . . .	664
7.5.2.1	Temperatur . . . . .	664
7.5.2.2	Druckmesstechnik . . . . .	666

7.5.3	Rheologische Messtechnik .....	669
7.5.3.1	Laborrheometer .....	669
7.5.3.2	Prozessrheometer .....	671
7.5.4	Farbmessung .....	672
7.5.5	Sondersysteme .....	672
7.5.5.1	Ultraschallmesstechnik .....	673
7.5.5.2	Modellprädiktive Regelung und virtuelle Sensoren .....	673
<b>8</b>	<b>Anwendungen der gleichläufigen Doppelwellenschnecke .....</b>	<b>675</b>
8.1	Compoundieren in der Praxis .....	675
8.1.1	Durchsatzbegrenzung .....	675
8.1.1.1	Drehmomentbegrenzung .....	676
8.1.1.2	Volumenbegrenzung .....	676
8.1.1.3	Weitere Begrenzungen .....	676
8.1.1.4	Begrenzung durch Peripherie .....	677
8.1.2	Vormischung .....	678
8.1.3	Schmelzeentgasung .....	679
8.1.3.1	Einflussfaktoren .....	679
8.1.3.2	Technische Ausführung .....	680
8.1.4	Strangspritzkopf .....	682
8.1.5	Prozesskontrolle .....	683
8.1.5.1	Prozessüberwachung .....	684
8.1.5.2	Beispiel: Vorsicht, Falle! .....	684
8.1.6	Extruderschnecken .....	685
8.1.6.1	Schneckenauslegung .....	685
8.1.6.2	Verschleiß .....	686
8.1.7	Scale-up .....	686
8.1.7.1	Der Idealfall .....	686
8.1.7.2	Die Realität .....	687
8.1.7.3	Besonderheiten bei Neuentwicklungen .....	688
8.1.7.4	Fazit .....	688
8.1.8	Simulation .....	689
8.2	Farbmasterbatche .....	689
8.2.1	Grundsätzliche Verfahrensidee .....	690
8.2.2	Materialien .....	692
8.2.2.1	Pigmente .....	693
8.2.2.2	Auswahl des Polymers .....	701
8.2.2.3	Additive und Dispergierhilfsmittel .....	701
8.2.3	Mischen .....	702
8.2.3.1	Schwerkraftmischer .....	703

8.2.3.2	Langsam laufender stationärer oder mobiler (Container) Mischer .....	703
8.2.3.3	Schnell laufender stationärer oder mobiler (Container) Mischer .....	703
8.2.3.4	Anwendungsbeispiel: Herstellen von Mischungen für Masterbatch im Heißverfahren für Spinnfaser und Folienqualität .....	704
8.2.4	Dosieren .....	705
8.2.5	Extruder .....	705
8.2.5.1	Premix .....	706
8.2.5.2	Split-feed .....	707
8.2.5.3	Nachfolgeaggregate .....	708
8.2.5.4	Verfahrensparameter .....	709
8.2.6	Qualitätsbestimmung .....	710
8.2.6.1	Farbmessung .....	710
8.2.6.2	Filterdrucktest .....	712
8.2.6.3	Agglomerate und Gelpartikel .....	713
8.3	Herstellung von TPV durch dynamische Vulkanisation .....	713
8.3.1	Klassifizierung von TPE .....	714
8.3.2	Herstellung von TPV auf Basis EPDM/PP .....	714
8.3.2.1	Basisrohstoffe für TPV (EPDM/PP) .....	714
8.3.2.2	Vernetzer .....	716
8.3.2.3	Herstellprozess für TPV (EPDM/PP) .....	716
8.3.2.4	Herausforderung Verweilzeit .....	718
8.3.2.5	Eigenschaften von TPV (EPDM/PP) .....	720
8.3.3	TPV auf Basis nachwachsender Rohstoffe („Bio-TPV“) .....	721
8.3.3.1	Basisrohstoffe für Bio-TPV .....	721
8.3.3.2	Herstellprozess für Bio-TPV .....	721
8.3.3.3	Eigenschaften von Bio-TPV .....	723
8.4	Entgasen von Polymerschmelzen .....	725
8.4.1	Aufgaben der Entgasung .....	726
8.4.2	Auslegung von Entgasungsextrudern .....	728
8.4.2.1	Materialzuführung und Flashentgasung .....	729
8.4.2.2	Gestufte Vakua .....	732
8.4.2.3	Füllgrad .....	733
8.4.2.4	Restentgasung und Schleppmitteleinsatz .....	734
8.4.2.5	Auslegung von Extruder und Entgasungszonen .....	739
8.4.3	Scale-up von Entgasungsextrudern .....	744
8.4.4	Verfahrensbeispiele .....	746
8.4.4.1	Entgasen von Lösungsmitteln aus LLDPE-Schmelzelösungen .....	746

8.4.4.2	Entgasen von Lösungsmitteln aus synthetischem Kautschuk (Styrol-Butadien-Verbindungen) .....	747
8.4.4.3	Entgasen von Vinylacetat aus LDPE/EVA-Copolymer ....	747
8.4.4.4	Entgasen von POM .....	748
8.4.4.5	Entgasen von PC .....	749
8.4.4.6	Entgasen von PMMA .....	749
8.4.4.7	Entgasen von PES und PSU .....	750
8.4.4.8	Entgasen von ABS .....	752
8.4.4.9	Entgasen von ungetrocknetem PET .....	752
8.4.5	Zusammenfassung .....	754
8.5	Reaktive Extrusion .....	755
8.5.1	Einführung .....	755
8.5.2	Parametereinflüsse anhand ausgewählter Anwendungsbeispiele	757
8.5.2.1	Aktivierete anionische Polymerisation von Lactamen ....	759
8.5.2.2	Polymerisation von Acrylaten .....	760
8.5.2.3	Ringöffnungspolymerisation von $\epsilon$ -Caprolacton .....	762
8.5.3	Wirtschaftlich relevantes Beispiel: Thermoplastische Polyurethane .....	763
8.5.4	Modellierung .....	765
8.5.5	Scale-up .....	767
8.6	Lebensmittelextrusion .....	770
8.6.1	Extrusion von Frühstückszerealien .....	773
8.6.2.1	Rohwaren und Mischerei .....	775
8.6.2.2	Vorkonditionierung und Extrusion .....	779
8.6.2.3	Kurzzeittemperierung und Flockierung .....	785
8.6.2.4	Röstung, Besprühung und Trocknung .....	787
8.6.2	Produkte .....	789
8.6.3	Lebensmittelsicherheit in der Lebensmittelextrusion .....	791
8.6.4	Zusammenfassung .....	795
8.6.5	Abkürzungsverzeichnis .....	795
8.7	Extrusion von pharmazeutischen Massen .....	797
8.7.1	Einleitung .....	797
8.7.2	Grundlagen der Schmelzextrusion .....	798
8.7.3	Maschinendesign .....	798
8.7.4	Anlagenlayout .....	800
8.7.5	Containment-Anforderungen .....	805
8.7.6	Zusammenfassung und Ausblick .....	806
<b>Index</b> .....	<b>807</b>	

# 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“.

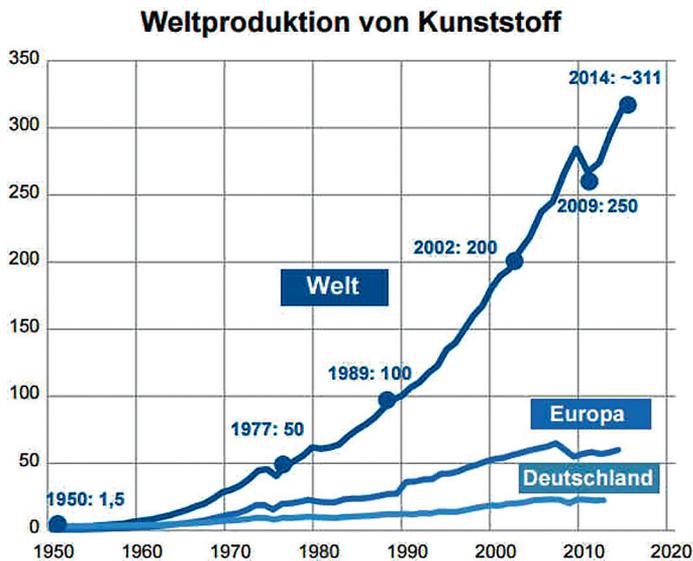
Es sind viele synonyme Bezeichnungen für diesen Maschinentyp in Gebrauch, zum Beispiel:

- 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.

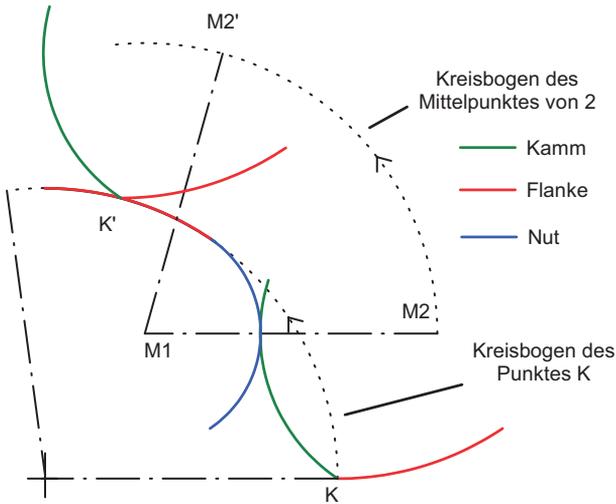
Der Kamm reinigt die Nut der gegenüberliegenden Schnecke ab und umgekehrt. Die Ecke des Profils zwischen Kamm und Flanke reinigt die Nut ab.

### 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.

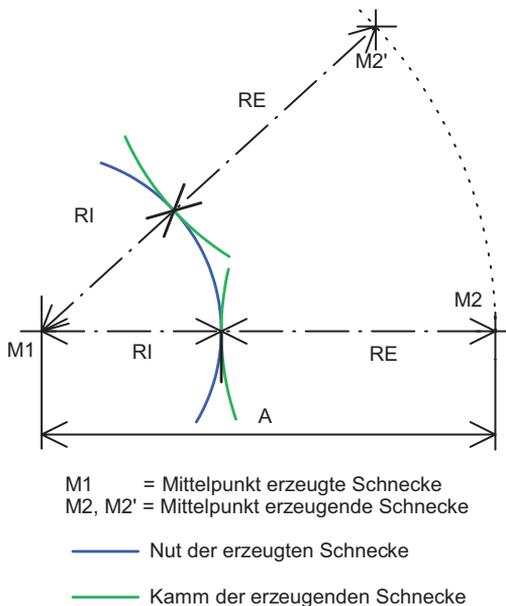
Die erste Schnecke (die „Erzeugte“) steht bei dieser Betrachtung still, und die zweite Schnecke (die „Erzeugende“) wird um die erste translatorisch auf einem Kreisbogen verschoben. Man gibt nun einen Teil des Profils auf der zweiten Schnecke vor und untersucht, welches Profil auf der ersten Schnecke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

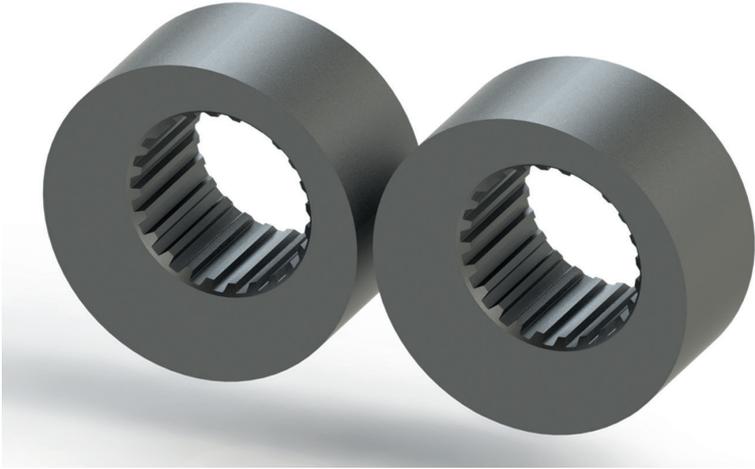


**Bild 2.2** Erzeugen des Flankenbereichs durch den Schnittpunkt zwischen Kamm und Flanke

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** Exzenterscheiben



**Bild 2.55** Eingängige Knetscheiben mit Dehnkanal

Bei den eingängigen Knetscheiben wird die Exzenterscheibe 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.

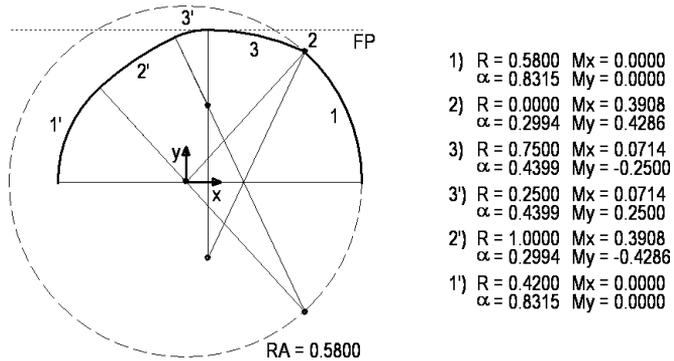


Bild 2.59

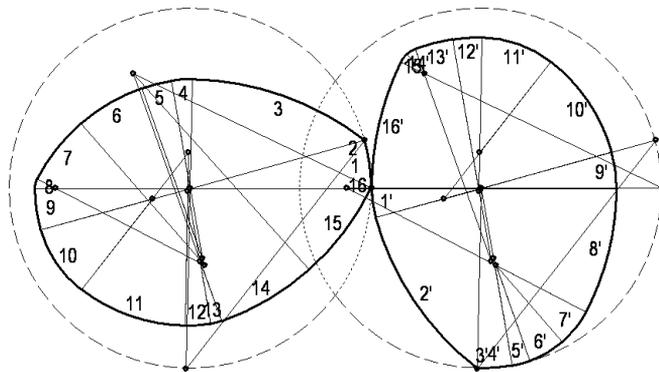


Bild 2.60

### 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.

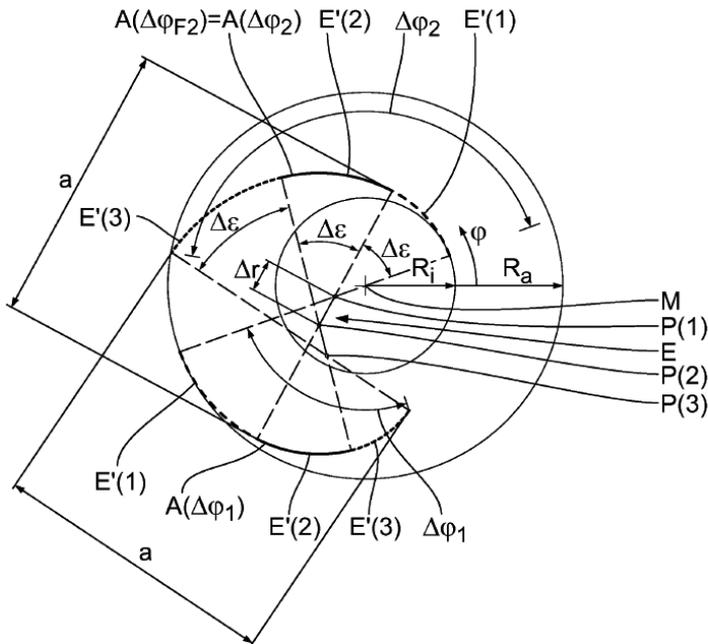
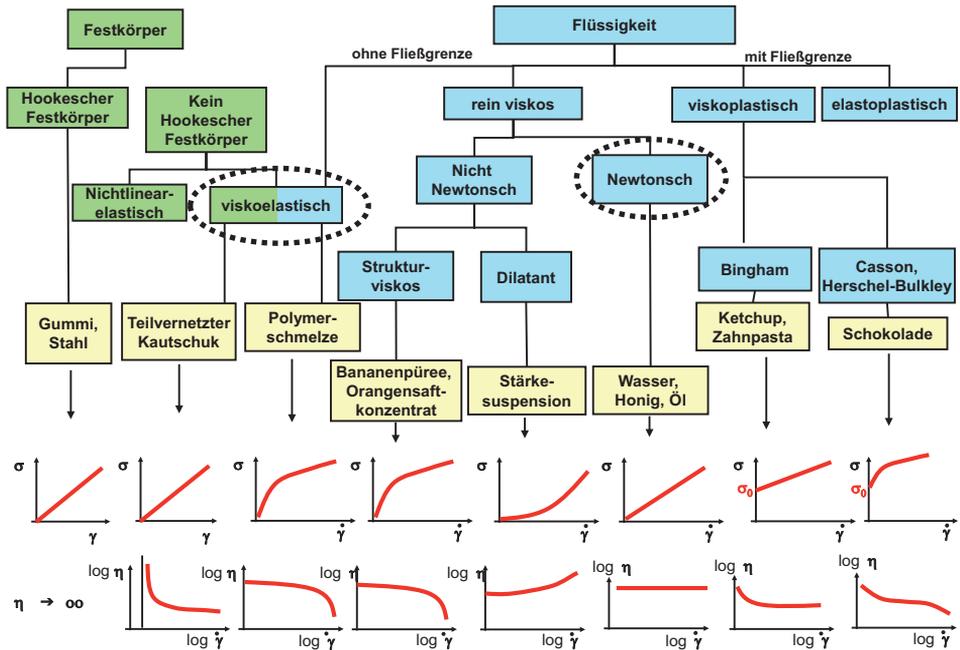


Bild 2.61



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

Unten: Schubspannung als Funktion der Deformation  $\gamma$  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 struktuviskose 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.  $\sigma = f(\dot{\gamma})$ .

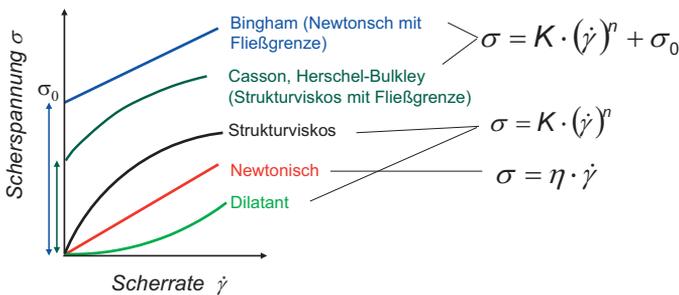
Das einfachste Stoffverhalten haben newtonsche Fluide; für sie gilt eine konstante Viskosität  $\eta$  und damit eine direkte Proportionalität zwischen Scherrate  $\dot{\gamma}$  und Schubspannung  $\sigma$ :

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

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:

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

Der zeitliche Mittelwert  $\bar{m}_j$  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.  $\bar{m}_j$  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:  $\alpha = 27^\circ$ 

$v_h$ in $\text{mm s}^{-1}$	$\gamma_{yx\text{ges}2}$	$\gamma_{\text{ges}2}$	$e_{x\text{ges}2}$	$\varepsilon_{x\text{ges}2}$	$\dot{\varepsilon}_{xm}$ in $\text{s}^{-1}$	$\sigma \cdot 10^5$ in Pa
1200	7,3	892,7	24,5	3,2	351	1,2
2400	7,3	432,8	19,0	2,9	646	1,5
3600	7,3	421,7	19,0	2,9	968	1,7

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

$v_h$ in $\text{mm s}^{-1}$	$\gamma_{yx\text{ges}2}$	$\gamma_{\text{ges}2}$	$e_{x\text{ges}2}$	$\varepsilon_{x\text{ges}2}$	$\dot{\varepsilon}_{xm}$ in $\text{s}^{-1}$	$\sigma \cdot 10^5$ in Pa
1200	6,8	572,2	31,9	3,4	340	1,5
2400	6,8	651,0	35,5	3,6	700	1,9
3600	6,8	719,9	38,3	3,6	1072	2,1

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

$v_h$ in $\text{mm s}^{-1}$	$\gamma_{yx\text{ges}2}$	$\gamma_{\text{ges}2}$	$e_{x\text{ges}2}$	$\varepsilon_{x\text{ges}2}$	$\dot{\varepsilon}_{xm}$ in $\text{s}^{-1}$	$\sigma \cdot 10^5$ in Pa
1200	6,5	982,8	56,6	4,0	366	2,4
2400	6,6	1238,6	67,7	4,2	764	2,8
3600	6,6	1411,2	74,7	4,3	1173	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 dehningduzierte 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 Keilspatlänge 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 ( $l_e = 0$  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

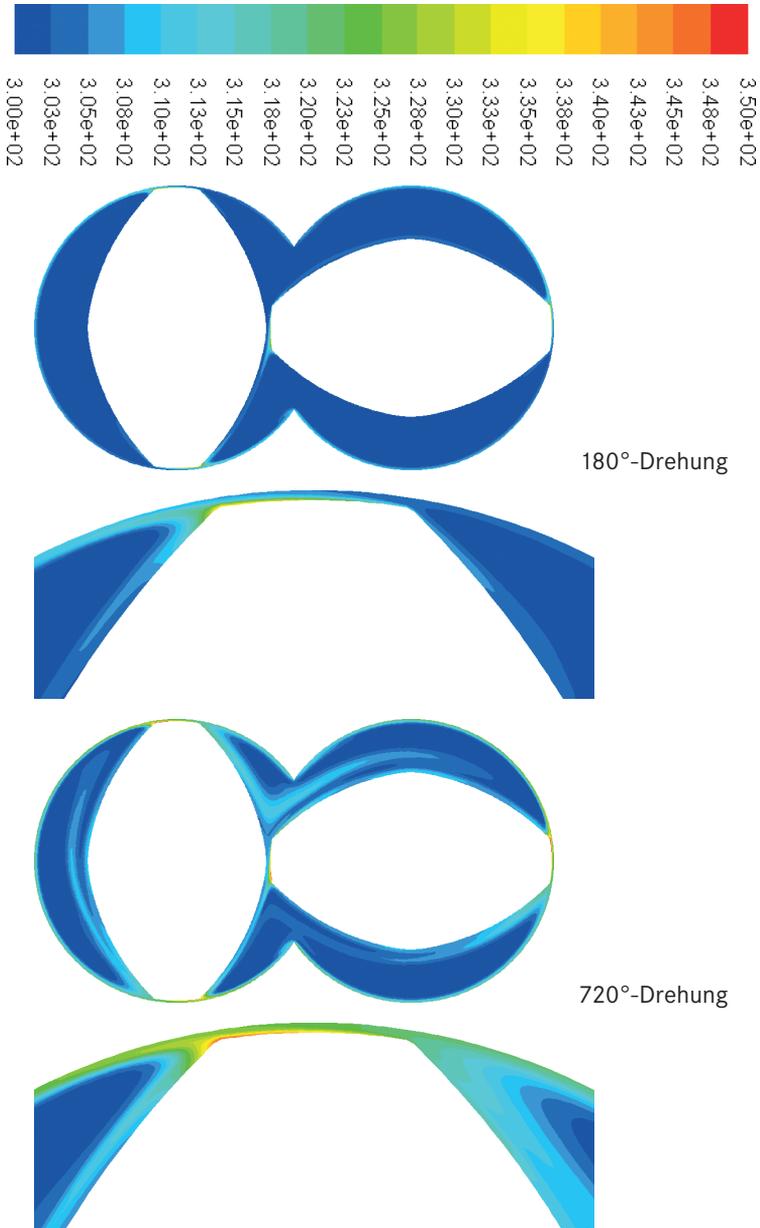
Material	PC	PA 6	PE-HD	PE-LLD	PP	PS
$t_k$ in ms	7,9	7,8	7,7	7,7	7,6	7,6
$De$	0,16	0,13	285	4,1	16,4	77,5

**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

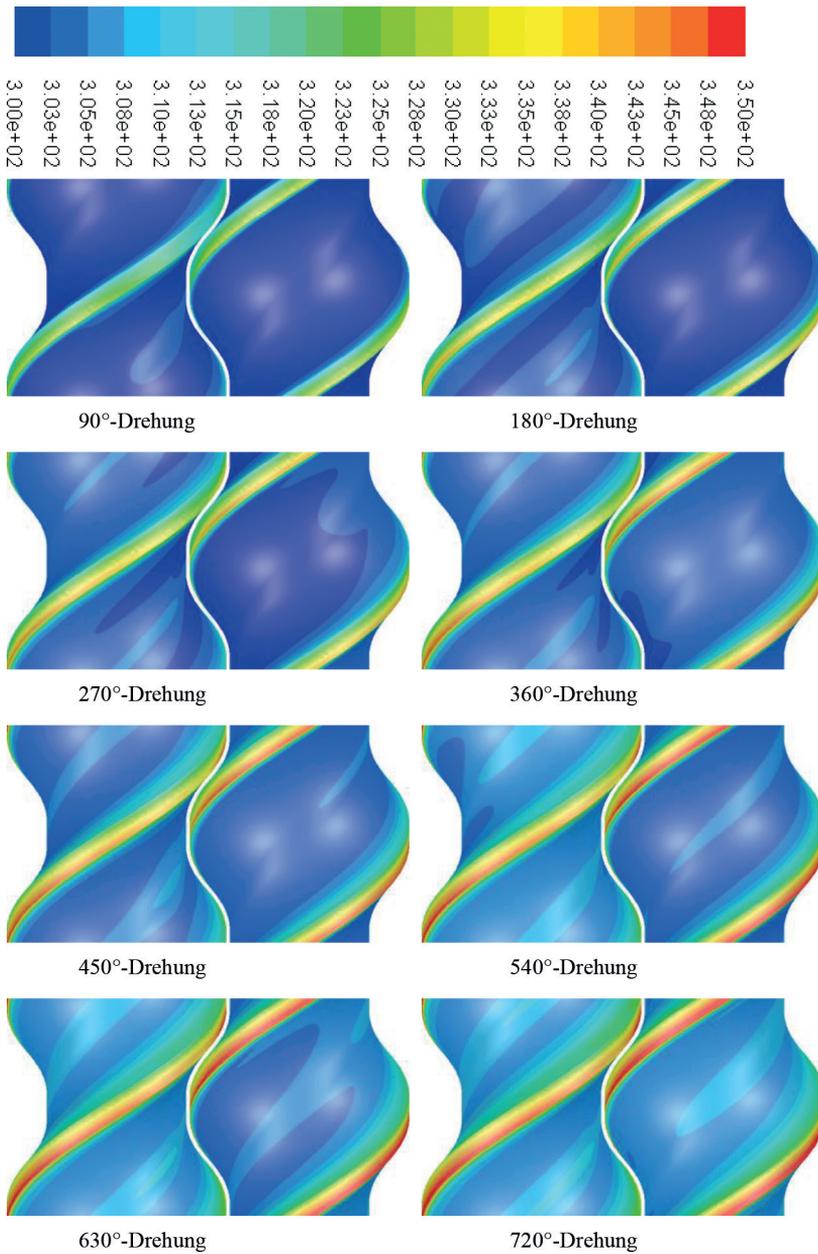
Material	PC	PA 6	PE-HD	PE-LLD	PP	PS
$t_k$ in ms	2,6	2,6	2,6	2,6	2,5	2,5
$De$	0,49	0,38	858	12,4	49,2	232

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.

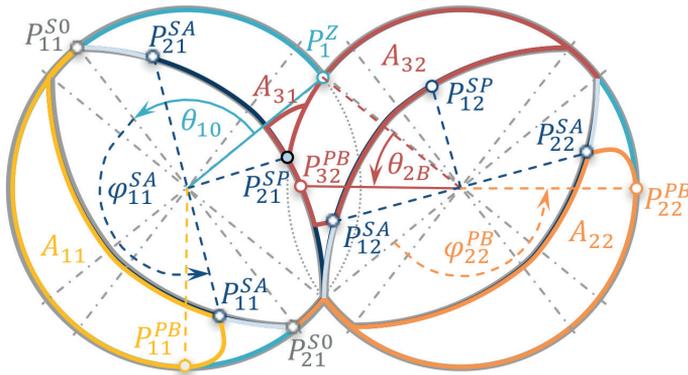
skalierung in den beiden Abbildungen reicht von 300 °C (blaue Farbe) bis 350 °C (rote Farbe). Zusätzlich wird in Bild 4.83 ein Diagramm gezeigt, dass die maximale Temperatur auf dem Schneckenkamm über die Drehung des Fördererelements wiedergibt.



**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

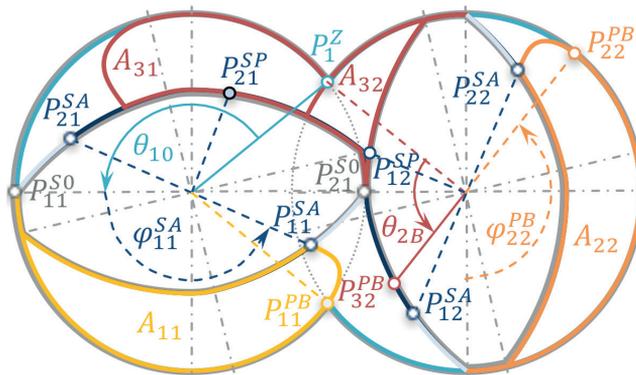


**Bild 4.82** Temperatur der Polymerschmelze auf der Schneckenoberfläche eines Gewindeelements innerhalb von zwei Umdrehungen



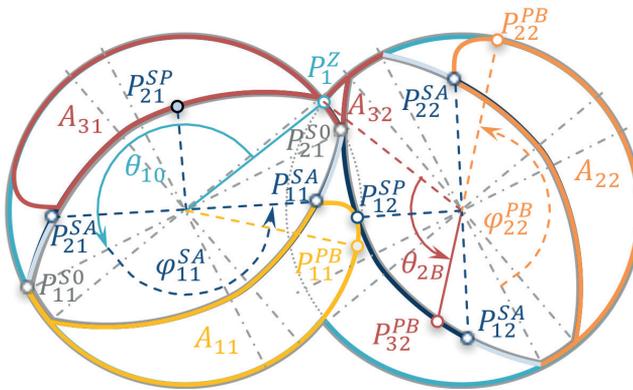
**Bild 5.42** Flüssigkeitsverteilung im Querschnitt einer 2-welligen SchnBildeckenmaschine mit 2-gängigen Schneckenelementen; Füllgrad  $\epsilon = 80\%$ , Drehwinkel  $\theta_{10} = \pi/i_g$

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  $S_{21}^{SO}$  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  $\theta_{10} = 2\pi/i_g - \alpha_{IT}/2$

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:

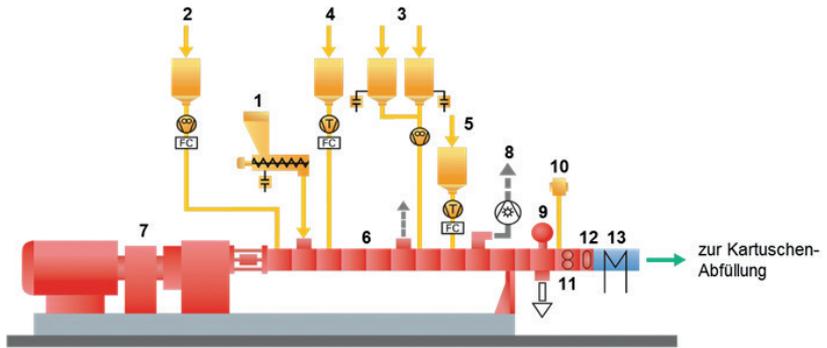
$$\frac{P_1}{P_0} = \left( \frac{D_1}{D_0} \right)^{2+\psi-\chi} \quad (6.57)$$

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	$\frac{\dot{M}_1}{\dot{M}_0}$	$\left(\frac{D_1}{D_0}\right)^{2+c-\lambda}$
Drehzahl	$\frac{n_{0,1}}{n_{0,0}}$	$\left(\frac{D_1}{D_0}\right)^{-\lambda}$
Leistung	$\frac{P_1}{P_0}$	$\left(\frac{D_1}{D_0}\right)^{2+c-\lambda}$
Drehmoment	$\frac{M_{D,1}}{M_{D,0}}$	$\left(\frac{D_1}{D_0}\right)^{2+c}$
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	$\frac{\dot{Q}_1}{\dot{Q}_0}$	$\left(\frac{D_1}{D_0}\right)^{2+c-\lambda}$
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 Siebwechslar         |                  |

**Bild 7.15** Anlagenbeispiel zur Herstellung von Silicondichtungsmassen

### 7.1.4.2 Chemische Reaktionen in Doppelschneckenextrudern

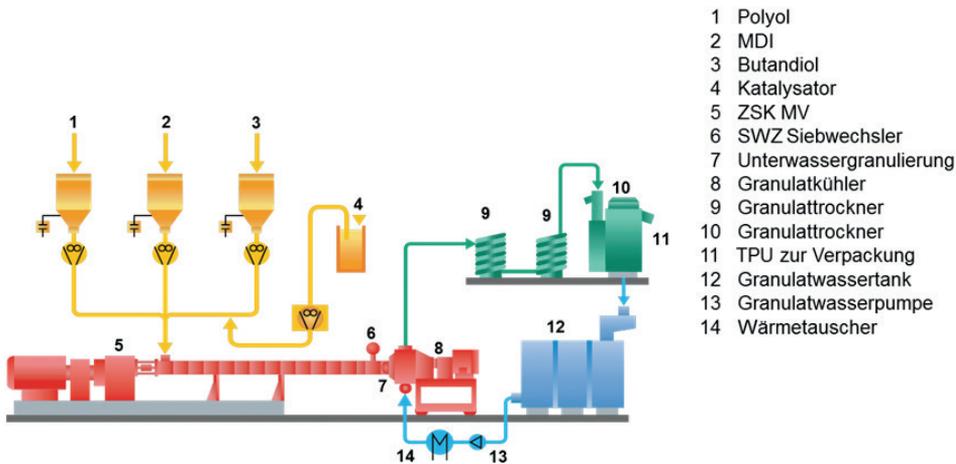
Die reaktive Extrusion auf Zweischneckenextrudern vom Typ ZSK findet Anwendung zur Polymerisation in der Masse ausgehend von Monomeren oder Vorpolymerisaten, sowie zur Modifizierung von Polymeren durch Pfropfen, Vernetzen und Abbauen. Die Anforderungen an ein kontinuierliches Reaktionssystem variieren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

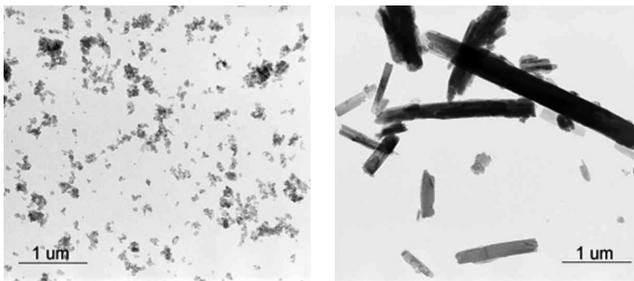
Bei organischen Pigmenten hingegen ist die Dispergieraufgabe eminent und stellt höchste Ansprüche an Prozessdesign und Equipment, um Batches hoher Qualität bei optimalen Produktionskosten herzustellen. Organische Pigmente benötigen erheblich mehr Scherenergie, um die Kristallverbände aufzubrechen und 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.

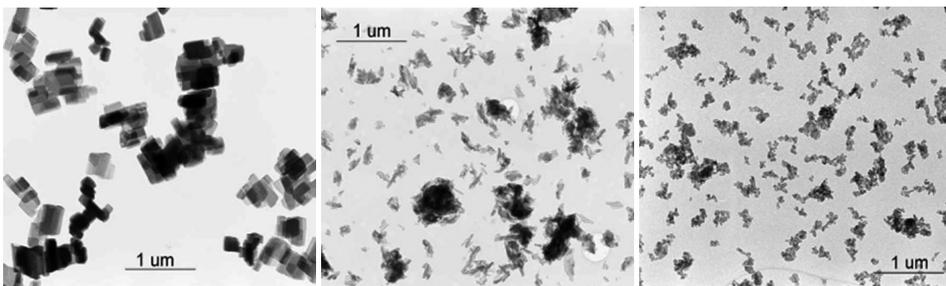
### 8.2.2.1.1 Colour Index und Partikelgrößen: Pigmente auf den ersten Blick

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.

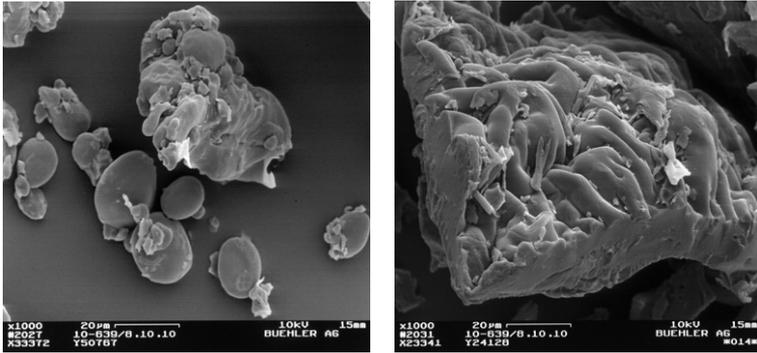
Handelsübliche Pulverpigmente bestehen aus einer Mischung von Primärkristallen, Aggregaten und Agglomeraten. Primärkristalle sind einzelne Kristalle, die durch Kristallstruktur und Kristallmorphologie eindeutig beschrieben sind. Primärkristalle, die über Ecken und gemeinsame Flächen zusammen gewachsen 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]

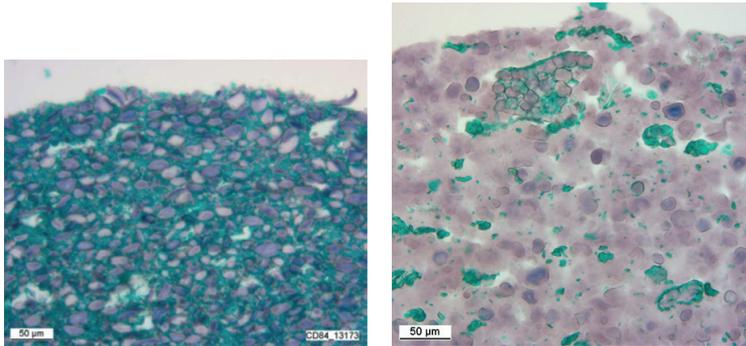


**Bild 8.56** Links: Natürliche Weizenstärke mit sichtbaren Stärkekörnern und Proteinpartikeln, rechts: Extrudierte, verkleisterte Weizenstärke [Bühler AG]

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 Frühstückserzeugnisse. [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 Verfahrensfliessbild 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
- Alkyldikale 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-Kneter 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 &  
Pfleiderer 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
  - Farbmasterbathe 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 Schleppestromung 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 Schneckengeometrien 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 Gangsteigerung 561
- Kanal tiefenexponent 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 Pharmanwendung 798
- Maschinengrundgeometrie 558
- Maschinenkonfiguration 558
- Masterbatte 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 Extrudermode ll 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  
Modell exponenten 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  
Multibatchen 692
- N**
- Nachteile Extruder 11  
Neidhardt 22  
neuronales 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 Fördererelementen 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  
patentier te Schnecken elemente 160  
PAT, Process Analytical Technology 803  
Pawlowski 12f., 92

- Péclet-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 Fördererlemente 764
- Rührkessel 555
- Rüstzeiten 708
- S**
- SBR 726
- Scale-down 535 f.
- 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 Kammwand und 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 Scherspalt 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 Polymereschmelze auf der Schneckenoberfläche 419
  - Temperatur, Durchsatz bei Pharmaanwendungen 800
  - Temperaturempfindlichkeitsfaktor 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 Werkstofftypen 639  
 Ullrich 12  
 Ultraschallmesstechnik 673  
 unähnliche Skalierung 553  
 Unähnlichkeit 558  
 – beim Scaling 536  
 unerwünschte chemische Reaktionen 272  
 Universalmischer 678  
 unmischbare (unverträgliche) Polymerblends 233  
 unterschiedliche Verschleißzustände 687  
 Unterwassergranulierung 708
- V**
- Vakuum 680  
 Vakuudom 681  
 Vakuumsystem 725
- Variationen der Kammspiele 552  
 Variationskoeffizient Mischen 465  
 Verbundelemente 636  
 Verdampfungsenergie 731  
 Verfahrensparameter 709  
 Verfahrenszonen 10, 47, 50  
 Vergleich von Produktionsmaschinen 536  
 Verlauf des Pumpwirkungsgades 355  
 Vernetzer 715  
 Versatzwinkel Knetscheiben 131  
 Verschiebungsfaktoren  $a_T$  217  
 Verschleiß 421, 620, 686  
 Verschleiß- bzw. Korrosionsschutz 615  
 Verstreckung in der Keilspaltströmung 289  
 Versuchsaufbau 375  
 Verteilung der Partikelgröße 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 langglasfaser-verstärkte Polypropylene 313  
 Viskosität und Molmasse, Potenzgesetz 219  
 Viskosität und Schergeschwindigkeit 317
- Vitovsky 17  
 vollständige Ähnlichkeit 555  
 Volumenanteil 268  
 – des Füllstoffes 241  
 volumenbegrenzte Anwendungen 600  
 Volumenstrom 526  
 Volumenstrom-Kennzahl 501  
 volumetrischer Füllgrad 339, 342  
 vorgeschalteter Mischprozess 678  
 Vorkonditionierung und Extrusion 779  
 Vormischung 705, 800  
 Vorteile von dicht kämmenden Gleichdrallschnecken 5  
 Vor- und Nachteile der Strömungssimulation 402  
 Vorwärtsgasung 740  
 Vulkameterkurven 720  
 Vulkanisationsbeschleuniger 722
- W**
- Wärmeströme über den Zylinder 572  
 Wärmeübergang 365  
 Wärmeübergangskoeffizient 358, 423  
 Weber-Zahl für den Aufbruch von Tropfen 473  
 Wechselwirkungsparameter 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 Knete-  
lements Mischen 143  
wirtschaftliche Kern-  
funktion 3, 11, 97  
Wirtschaftlichkeit 344,  
721  
WLF-Beziehung 218

Würdigung von Bayer-  
Forschern 12

## Z

Zahl der Teilströme in  
einem Doppelschne-  
ckenextruder 466

Zentrierung der Welle  
213

Ziel von Versuchen  
538

ZME 151

ZSK 7

- Baureihen und Anwen-  
dungen 591

- Baureihen und Baugrö-  
ßen von 18 bis 420 mm  
593

- MEGAcoumpounder 594  
- Zweiwellige Knetsch-  
benschneckenpresse 1

ZSK-Generationen 591

Zusammenwirken Polymer  
und Metalle 280

Zweiphasenströmung  
430

Zweiwellige Gegenrall-  
extruder 341

zweiwellige Gleichdrall-  
schnecken 18

Zwickelbereich 341