

Inhalt

Vorwort zur 2. Auflage	V
Vorwort zur 1. Auflage	VI
Zusatzmaterial	VIII
Die Autoren	IX
Der Herausgeber	IX
Die Mitverfasser	X
1 Einleitung	1
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 Förderelementen	101
1.6	Häufig verwendete Formelzeichen	103
2	Basisgeometrien und Schneckenelemente	107
2.1	Basisgeometrie der Gleichläufer:	
	Förder- und Knetelemente 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 Förderelementen	122
2.1.9	Knetelemente	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	Förderelemente	136
2.2.3.2	Knetelemente	142
2.2.3.3	Abstaulemente	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

3	Stoffeigenschaften von Polymeren	203
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: Schleppströmungen und druckgetriebene Strömungen	221
3.1.6.1	Fließprofile der druckgetriebenen Rohrströmung	222
3.1.6.2	Fließprofile der einfachen Schleppströmung	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
4	Förderverhalten, Druck- und Leistungsverhalten	317
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 Druckgrundgleichung 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
5	Funktionszonen im Extruder	437
5.1	Feststofftransport in den und im Extruder, Einzugsgrenzen	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
6	Scale-up und Scale-down	535
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
7	Maschinentechnik	591
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	Strukturschwingstechnische 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
8	Anwendungen der gleichläufigen Doppelwellenschnecke	675
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	Aktivierte anionische Polymerisation von Lactamen	759
8.5.2.2	Polymerisation von Acrylaten	760
8.5.2.3	Ringöffnungspolymerisation von ϵ -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
Index		807