

Inhalt

Die Herausgeber	XXIII
Vorwort	XXVII
TEIL A Einführung in die Aufbereitung von Polymeren/Kunststoffen	1
1 Einführung	3
<i>Klemens Kohlgrüber, Michael Bierdel</i>	
1.1 Kunststoffe und ihre Bedeutung	3
1.2 Aufbereitung und Compoundierung	4
1.3 Wiederverwertung von Kunststoffen	5
1.4 Erläuterungen zu den einzelnen Kapiteln des vorliegenden Buches ...	7
2 Aufbereitung – Verfahrenstechnik der Polymerherstellung ...	9
<i>Klemens Kohlgrüber</i>	
2.1 Einführung	9
2.2 Aufbereitung bei der Polymer-Herstellung in der Primärproduktion ...	15
2.3 Aufbereitung nach der Polymer-Herstellung – Compoundierung	18
2.3.1 Haupttemperaturfenster beim Compoundieren zur Finishmischung	19
2.3.2 Mischen im Extruder	19
2.3.3 Temperatur- und Zeitgrenzen beim Compoundieren	22
2.3.4 Herausforderungen beim Compoundieren	26
2.3.5 Leistungsbedarf beim Compoundieren	29
2.3.6 Leistungsangebot von Extrudern	33
2.3.7 Durchsatz- und Leistungsdichte	36
2.3.8 Leistungsdichte im Schmelzbereich	40
2.3.9 Energiebilanz und Produkt-Austrittstemperatur	41

2.3.10	Statische Mischer	48
2.3.11	Mischleistung, Mischgüte, Quermischung, Längsmischung ...	50
2.3.11.1	Mischleistung	51
2.3.11.2	Mischqualität	53
2.3.11.3	Quer- und Längsmischung	55
2.3.11.4	Verweilzeitverteilung	56
2.3.11.5	Mittlere Verweilzeit	60
TEIL B Aufbereitung bei der Polymerherstellung		63
3 Entgasungsapparate und -maschinen		65
3.1	Grundlagen des Entgasens	65
	<i>Heino Thiele</i>	
3.1.1	Phasengleichgewicht	67
3.1.2	Makroskopische Stoff- und Energiebilanz	70
3.1.3	Einflussgrößen auf die Konzentrationsänderung	71
3.2	Polymerherstellung und Entgasungsaufgaben	82
	<i>Klemens Kohlgrüber</i>	
3.2.1	Allgemeine Herausforderungen beim Entgasen von Flüchtigen aus Polymeren	83
3.2.2	Besonderheiten beim Entgasen von Polymeren mit hohem Flüchtigenanteil und Limitierung der Finishentgasung	85
3.3	Übersicht zu Apparaten und Maschinen zur Aufbereitung mit Polymerentgasung	86
	<i>Klemens Kohlgrüber</i>	
3.3.1	Einleitung	86
3.3.2	Geräte mit drehenden Bauteilen und Maschinen	88
3.4	Apparative Polymereindampfung	93
	<i>Klemens Kohlgrüber</i>	
3.4.1	Rohrverdampfer	94
3.4.2	Verfahren und Apparate zur Finishentgasung für sehr geringe Restgehalte im Polymer	101
3.4.3	Allgemeines Anlagenschema einer apparativen Eindampfstufe	105
3.4.4	Produktqualität	106
3.5	Entgasung von Kunststoffen in Entgasungssilos	110
	<i>Harald Wilms, Hans Schneider</i>	
3.5.1	Einleitung	110
3.5.2	Prozess-Anforderungen an die Feststoff-Entgasung	111
3.5.3	Grundlagen der Entgasung	112
3.5.4	Ermittlung der Prozessparameter	115

3.5.4.1	Ofenversuche	117
3.5.4.2	Batch-Versuche	117
3.5.4.3	Versuche in der Pilot-Anlage	117
3.5.4.4	Kriterien für den Entgasungsvolumenstrom	119
3.5.5	Anforderungen an das Entgasungssilo	119
3.5.6	Schüttgut-Aufheizung	122
3.5.7	Energieeffiziente Anlagenkonzepte	123
3.5.8	Vergleichbare Aufgabenstellungen	124
3.5.9	Zusammenfassung	124

TEIL C Aufbereitung nach der Polymerherstellung – Compoundieren 127

4 Anforderungen, Produktentwicklung, Additive, Fehlerquellen 129

4.1	Anforderungen an die Compoundierung aus Sicht des Compoundeurs <i>Thomas Schuldt</i>	129
4.1.1	Einleitung	129
4.1.2	Wirtschaftlichkeit	129
4.1.3	Technische Anforderungen entlang der Prozesskette	131
4.1.3.1	Materialförderung	131
4.1.3.2	Rohstoffvorbehandlung	133
4.1.3.3	Vormischung	134
4.1.3.4	Extruder und Verschleiß	136
4.1.3.5	Abkühlen und Granulieren	140
4.1.3.6	Verpackung	141
4.1.4	Qualitätskontrolle	142
4.1.5	Umweltaspekte	144
4.1.6	Fazit	145
4.2	Produktentwicklung	145
	<i>Thomas Schuldt</i>	
4.2.1	Einleitung	145
4.2.2	Arten der Produktentwicklung	146
4.2.3	Bausteine der Produktentwicklung	148
4.2.3.1	Anlagentechnik	148
4.2.3.2	Verfahrenstechnik	148
4.2.3.3	Rezeptur	149
4.2.4	Zuschlagsstoffe	150
4.2.4.1	Additive	150
4.2.4.2	Füllstoffe	151
4.2.4.3	Pigmente	151
4.2.5	Innovation	153

4.2.6	Qualitätskontrolle	154
4.2.7	Scale-Up	155
4.3	Zusatzstoffe für Polymere – vom Polymer zum Kunststoff	157
	<i>Hermann Diem</i>	
4.3.1	Blends	157
4.3.1.1	Definition Blend	157
4.3.1.2	Klassifizierung von Mehrphasensystemen	158
4.3.1.2.1	Polymermischungen	158
4.3.1.2.2	Dry-Blends	160
4.3.2	Additive	160
4.3.2.1	Definition Additive	160
4.3.2.2	Effekte und Wirkungsweise der Additive	161
4.3.2.2.1	Weichmacher	161
4.3.2.2.2	Stabilisatoren	162
4.3.2.3	Einarbeitung von Additiven in Polymere	164
4.3.3	Füllstoffe	164
4.3.3.1	Definition Füllstoffe	164
4.3.3.2	Einteilung und Eigenschaften der Füllstoffe	165
4.3.3.3	Aspektverhältnis	166
4.4	Praktische Beispiele für Fehlerquellen und deren Vermeidung beim Compoundieren	167
	<i>Klemens Kohlgrüber</i>	
4.4.1	Schwarze Punkte	169
4.4.2	Fehlerquellen beim Dosieren und Mischen	173
4.4.2.1	Entmischung	173
4.4.2.2	Dosiersystem	174
4.4.2.3	Mischung von Polymer mit Additiven	175
4.4.3	Antrieb-Messtechnik	177
4.4.4	Fehler bei Versuchen mit kleinen Extrudern für Scale-Up-Zwecke	178
5	Compoundieren mit gleichläufigen Doppelschnecken- extrudern	183
5.1	Einleitung	183
	<i>Klemens Kohlgrüber</i>	
5.1.1	Vorteile des gleichläufigen Doppelschneckenextruders	184
5.1.2	Nachteile des gleichläufigen Doppelschneckenextruders	186
5.1.3	Leistungsangebot und Leistungsdichte von gleichläufigen Doppelschneckenextrudern	188
5.1.4	Kenngrößen in Abhängigkeit vom Durchmesser- Verhältnis D_a/D_i	189

5.1.4.1	Festigkeit und Durchsatz als Funktion von D_a/D_i ...	190
5.1.4.2	Druck- und Leistungscharakteristik als Funktion von D_a/D_i	193
5.1.4.3	Maximales Produktvolumen	195
5.1.4.4	Gehäuseinnenoberfläche zu maximalem Produktraum	196
5.1.4.5	Ausblick	198
5.1.5	Spezielle Bauarten des Gleichläufers	199
5.2	Aufgaben und Auslegung der Verfahrenszonen eines Compoundierextruders	200
	<i>Reiner Rudolf, Michael Bierdel</i>	
5.2.1	Schmelzeförderzone	202
5.2.2	Einzugszone	207
5.2.3	Plastifizierzone	210
5.2.4	Distributive und dispersive Mischzone	215
5.2.5	Entgasungszone	220
5.2.6	Druckaufbauzone	223
5.2.7	Vollständiger Schneckenbesatz	225
5.2.8	Spezifischer Energieeintrag	230
5.2.9	Verweilzeitverhalten	232
5.3	Verfahrens- und Schneckenkonzepte für Maschinen mit hohen Durchsätzen	236
	<i>Frank Lechner</i>	
5.3.1	Entwicklung zu hohen Drehmomenten, Volumina und Drehzahlen	236
5.3.2	Kenngrößen und Verfahrensgrenzen von gleichläufigen Doppelschneckenknethern	237
5.3.3	Verfahrenslängen- und Schneckenentwicklung	240
5.3.4	Maximal mögliche Schneckendrehzahlen	241
5.3.5	Drehmomentbegrenzte Verfahren	242
5.3.6	Volumenbegrenzte Verfahren	244
5.3.7	Qualitätsbegrenzte Verfahren	249
5.3.8	Verfahrenskonzept für wirtschaftliches Compoundieren	252
5.3.9	Ausblick	254
5.4	Schneckenbesätze für hochgefüllte Polymere (und Dosierstrategien) ..	255
	<i>Sebastian Fraas</i>	
5.4.1	Warum Füllstoffcompounds?	255
5.4.2	Typische Anwendungen	255
5.4.3	Einflussfaktoren Material	256
5.4.3.1	Einfluss Füllstoff	256
5.4.3.1.1	Herkunft/Gewinnung	257

	5.4.3.1.2	Partikelgröße und Partikelgrößen- verteilung	258
	5.4.3.1.3	Coating	258
	5.4.3.1.4	Feuchtigkeit	259
	5.4.3.2	Einfluss Polymer und Additive	259
5.4.4		Verfahrenstechnik	260
	5.4.4.1	Fördertechnik	261
	5.4.4.2	Dosierung	262
	5.4.4.3	Nachfolge	263
	5.4.4.4	Zylindersetup Extruder	264
	5.4.4.5	Schneckenbesatz	267
	5.4.4.5.1	Aufschmelzzone	267
	5.4.4.5.2	Füllstoffzugabe und Benetzung	268
	5.4.4.5.3	Dispergierzone	269
	5.4.4.5.4	Vakuum und Austragszone	269
	5.4.4.6	Gesamtanlage	269
5.5		Compoundierung von naturfaserverstärkten Kunststoffen	270
		<i>Dijan Iltiew, Stephen Kroll, Andrea Siebert-Raths</i>	
	5.5.1	Vorabkenntnisse für die Verarbeitung von Naturfasern	272
	5.5.2	Aufbau und Parametrierung der Verfahrenseinheit eines gleichläufigen Doppelschneckenextruders	278
5.6		Grundlagen der thermoplastischen Schaumextrusion	286
		<i>Lukas Vogel</i>	
	5.6.1	Definition und Charakterisierung von Schäumen	288
	5.6.2	Verfahrenstechnische Prozessschritte zur Schaumextrusion ..	291
	5.6.2.1	Bereitstellen der Thermoplastschmelze	291
	5.6.2.2	Zugabe und Einmischen des Treibmittels	291
	5.6.2.3	Lösen des Treibmittels und Konditionieren der Schmelze	293
	5.6.2.4	Austrag der Schmelze durch die Düse	295
	5.6.2.5	Wachsen der Zellen und Stabilisieren der Schaumstruktur	297
	5.6.3	Anlagenkomponenten zur Schaumextrusion	301
5.7		Schneckenbesätze	305
		<i>Michael Bierdel</i>	
5.8		Werkstoffe, Beschichtungen, Verschleißtechnik	321
		<i>Oliver Kayser</i>	
	5.8.1	Anforderungen an Komponenten für die Compoundierung ...	321
	5.8.2	Materialien und Wärmebehandlung	322
	5.8.2.1	Vergütungsstähle und Nitrierstähle	323
	5.8.2.2	Warmarbeitsstähle	323

5.8.2.3	Legierte Kaltarbeitsstähle	324
5.8.2.4	Schnellarbeitsstähle	325
5.8.3	Ausführung von Komponenten von Doppelschneckenextrudern	325
5.8.4	Verfahren des Randschichthärtens	328
5.8.4.1	Verschleißschutz durch Nitrieren	328
5.8.4.2	Vermeidung von adhäsivem Verschleiß durch Nitrieren	332
5.8.4.3	Vermeidung von Lochfraßkorrosion durch Nitrieren	332
5.8.4.4	Sonderverfahren zum Erhalt des Korrosionsschutzes	333
5.8.5	Verschleißschutz durch Beschichtungen	335
5.8.5.1	Hartchrom	336
5.8.5.2	Chemisch Nickel	337
5.8.5.3	Dünne Hartstoffschichten	338
5.8.5.3.1	Physikalische Dampfabcheidung (engl.: physical vapor deposition)	338
5.8.5.3.2	Chemische Dampfabcheidung (engl.: chemical vapor deposition)	343
5.8.6	Anwendungsempfehlungen	346
5.8.7	Zusammenfassung und Ausblick	347
6	Compoundieren und Aufarbeiten mit verschiedenen Extruderbauarten	349
6.1	Extruderbauarten – Einleitung	349
	<i>Klemens Kohlgrüber</i>	
6.1.1	Compoundieren und Aufarbeiten mit verschiedenen Extruderbauarten	349
6.1.2	Einwellenextruder	352
6.1.3	Zahnradpumpen	353
6.1.4	Gleichläufige Doppelwellenextruder	354
6.1.5	Gegenläufige Doppelwellenextruder	355
6.1.6	Mehrwellenextruder: Ringextruder und Planetwalzenextruder	356
6.1.7	Schneckenlose Extruder	357
6.1.8	Hochviskosreaktoren	358
6.2	Einwellenextruder	359
	<i>Gregor Karrenberg</i>	
6.2.1	Einsatz in der Compoundierung	359
6.2.2	Aufbau und Funktionsweise	362
6.2.3	Plastifizierextruder	365
6.2.4	Schmelzeextruder	370

6.2.5	Entgasungsextruder	371
6.2.6	Mischelemente für Einwellenextruder	373
6.2.7	Scale-Up-Methoden	376
6.3	Ringextruder	379
	<i>Michael Erdmann</i>	
6.3.1	Mechanischer Aufbau	379
6.3.2	Bewegungsprinzip und distributives Mischen	382
6.3.3	Dispersives Mischen	384
6.3.4	Entgasungsleistung	385
6.3.5	Wärmeübertragung	386
6.3.6	Verschleiß- und Korrosionsschutz	387
6.3.7	Baureihe/Scale-Up	389
6.3.8	Anwendungsgebiete	390
	6.3.8.1 PET-Recycling	390
	6.3.8.2 Kontinuierliche Compoundierung von Gummimassen	391
6.4	Gegenläufige dichtkämmende Doppelschnecken	397
	<i>Ernst Krüger</i>	
6.4.1	Verständnis der Gelierung von PVC als Voraussetzung zum Verständnis der Doppelschnecken	398
6.4.2	Aufbau des PVC-Korns	399
6.4.3	Schema der PVC-Verarbeitung	400
6.4.4	Modell der PVC-Aufbereitung und -Verarbeitung	400
6.4.5	Geliergrad und mechanische Eigenschaften	401
6.4.6	Rezepturkomponenten	402
6.4.7	Homogenität des Geliergrades	403
6.4.8	Homogenität in der PVC-Verarbeitung	403
6.4.9	Einfluss von Temperatur auf Gelierhomogenität	404
6.4.10	Temperaturverteilung im Hosenrohradapter	404
6.4.11	Grundlagen der Schneckenauslegung	405
	6.4.11.1 Zonen einer Doppelschnecke	406
	6.4.11.2 Besonderheiten der Schneckenauslegung von Gegenläufern	408
6.4.12	Auslegung und Verschleiß	409
6.5	Planetwalzenextruder	415
	<i>Harald Rust, Thomas Bir, Holger Lange</i>	
6.5.1	Einleitung	415
6.5.2	Mechanisches Prinzip	416
6.5.3	Aufbau	417
6.5.4	Eigenschaften	419
6.5.5	Baugrößen und Bezeichnungen	420

6.5.6	Förder- und Wirkprinzip	422
6.5.6.1	Teil- und vollgefüllte Bereiche	423
6.5.7	Planetspindelkonfiguration	424
6.5.7.1	Planetspindeltypen	426
6.5.7.2	Planetspindellängen	429
6.5.7.3	Planetspindelaufteilung	431
6.5.8	Zwischenringe	432
6.5.9	Der modulare Systembaukasten	435
6.5.10	Zuführung von Feststoffen	436
6.5.11	Zuführung von Flüssigkeiten	440
6.5.12	Entgasung	442
6.5.13	Sensorik	450
6.5.14	Peripheriegeräte	453
6.6	Ko-Kneter	455
	<i>Hans-Ulrich Siegenthaler</i>	
6.6.1	Einleitung	455
6.6.2	Geschichtlicher Werdegang	456
6.6.3	Arbeitsprinzip	457
6.6.4	Schergeschwindigkeit	460
6.6.5	Verweilzeit und Verweilzeitverteilung	462
6.6.6	Konstruktiver Aufbau	464
6.6.6.1	Modularität	464
6.6.6.2	Halbschalen	467
6.6.6.3	Wellenelemente	468
6.6.6.4	Knetbolzen und -zähne	470
6.6.6.5	Temperierung	472
6.6.6.6	Druckaufbausysteme	475
6.6.7	Anwendungsfelder	476
6.6.7.1	Kabelcompounds	477
6.6.7.2	Technische und Hochleistungs-Kunststoffe	478
6.6.7.3	PVC Anwendungen (Granulieren und Kalandrieren)	479
6.6.7.4	Duroplast Anwendungen	480
6.6.7.5	Pulverlacke und Toner	480
6.6.7.6	Anodenmassen für die Aluminiumherstellung	481
6.6.7.7	Spezialitäten	481
6.6.7.8	Nahrungsmittel	482
6.7	Compact-Processor	484
6.7.1	Einleitung	484
	<i>Peter Gohl, Roman Kebalo, Joe Pereira, Stuart Sardinskas</i>	
6.7.2	Allgemeine mechanische Eigenschaften	487
6.7.2.1	Mechanische Merkmale: der Mischer	487
6.7.2.2	Mechanische Merkmale: der Extruder	487

6.7.3	FCM-Konfiguration	488
6.7.3.1	Einzugszone	488
6.7.3.2	Mischzone	488
6.7.3.3	Die Apex-Zone	489
6.7.3.4	Rotororientierung	490
6.7.4	Funktionsprinzip	492
6.7.4.1	Heizen und Kühlen	495
6.7.4.2	Mischersegmente und Mischdämme	496
6.7.5	Prozessflexibilität	497
6.7.6	Anwendungen	499
6.7.7	Energieeinsparung	501
6.7.8	Schlusswort	503
6.8	Extruderbauarten - Vergleich	504
	<i>Klemens Kohlgrüber, Michael Bierdel</i>	
6.8.1	Fragen, die vor einem Vergleich zu stellen sind	504
6.8.2	Kosten, Kennzahlen, spezifische Energie	506
6.8.3	Charakteristische verfahrenstechnische Merkmale verschiedener Extruderbauarten	513
6.8.4	Beschreibende Bewertung der Extruder mit aktuellen Durchsätzen und Baugrößen	517
7	Aufbereitung von Polymerschmelzen mit anderen Apparaten und Maschinen	529
7.1	Hochviskosreaktoren	529
	<i>Oliver Seck</i>	
7.1.1	Einleitung	529
7.1.2	Einwellige Hochviskosreaktoren	533
7.1.3	Zweiwellige Hochviskosreaktoren	534
7.1.3.1	Reacom	534
7.1.3.2	Reasil	535
7.1.4	Produktförderung	536
7.1.5	Energieeintrag	537
7.1.6	Axiales und radiales Mischverhalten	538
7.1.7	Entgasung	541
7.1.8	Apparateauslegung und Maßstabsübertragung	544
7.1.9	Zusammenfassung	546
7.1.10	Formelzeichen	547
7.2	Aufbereitung von Polymerschmelzen mittels Kalandern und Folienanlagen	548
	<i>Harald Rust</i>	
7.2.1	Historie	548
7.2.2	Kontinuierliche Beschickung	550

7.2.3	Der Planetwalzenextruder für die Kalandersbeschickung	550
7.2.4	Vergleich verschiedener Aufbereitungssysteme	551
7.2.5	Moderne Kalanderanlagen	552
7.2.6	Granulierungen	554
7.2.7	Walzwerk und Strainer	556
7.2.8	Walzwerk	556
7.2.9	Strainer	556
7.2.10	Randstreifen	558
7.2.11	Unterschiedliche Kalandersbauformen	559
7.2.12	Sonderbauformen	561
7.2.13	Unterschiede Kalanders und Calandrette	561
7.2.14	Die Aufgabe des Kalanders und unterschiedlicher Kalanderswalzen	562
7.2.15	Der Aufbau und die Arbeitsweise eines Kalanders	564
7.2.16	Korrekturmöglichkeiten	565
7.2.17	Temperaturverteilungen	566
7.2.18	Vergleich der Temperaturverteilung in den Randbereichen zwischen einer herkömmlichen, peripher gebohrten Walze und einer gewendelten Thermowalze:	566
7.2.19	Statischer und thermischer Vergleich der heute im Einsatz befindlichen Kalanderswalzen	567
7.2.20	Geschwindigkeiten und Größen	567
7.2.21	Der Minipresseur	569
7.2.22	Dickenmessung und Inspektionseinheit für Verunreinigung	570
7.2.23	Wickler	571
7.2.24	Platten- und Folienherstellung	572
7.2.24.1	Zahnradpumpen	572
7.2.24.2	Breitschlitzdüsen	573
7.2.24.2.1	Düsenkonstruktion ist stets ein Kompromiss	573
7.2.24.2.2	Anwendungsspezifische Düsen- ausstattung	574
7.2.24.2.3	Mehrschichtextrusion	575
7.2.25	Chillrollanlage	576
7.2.26	Flachfolienanlage	577
7.2.27	Glättwalzen	577
7.2.28	Schaumtafeln von 20 mm – 200 mm	579
7.2.29	Vakuumnoppenfolienanlage nach dem Foliengießprinzip für Baunoppenfolie	580
7.2.30	TPU-Folienanlage zur direkten Prägung zwischen silikonisiertem Gewebe	581
7.2.31	Folienstreckanlagen	582

7.2.32	Einführung in den Biax-Prozess am Beispiel von BOPP	582
7.2.32.1	Rohstoffversorgung und Extrusion	582
7.2.32.2	TDO (Transversal-Direction-Orienter)	583
7.3	Statische und dynamische Mischer – Mischen und Dispergieren	586
7.3.1	Grundlagen: homogenes & disperses Mischen	586
	<i>Jörg Kirchhoff, Michael Bierdel</i>	
7.3.1.1	Übersicht, Grundlagen und Experimente	586
7.3.1.1.1	Homogenes Mischen – Mischen in laminarer Strömung	586
7.3.1.1.2	Dispersives Mischen	591
7.3.1.1.3	Bestimmung der Mischgüte	599
7.3.1.1.4	Formelzeichen	601
7.3.1.2	Dreidimensionale Berechnungen des Misch- und Verweilzeitverhaltens	603
7.3.2	Statische Mischer	611
	<i>Klemens Kohlgrüber</i>	
7.3.2.1	Einleitung, Vor- und Nachteile	611
7.3.2.2	Bauarten	612
7.3.2.3	Verfahrenstechnik	617
7.3.2.3.1	Druckverlust und Mischerbewertung ...	617
7.3.2.3.2	Schichtdickenverringern in Abhängigkeit von der Mischerlänge – distributives Mischen	618
7.3.2.3.3	Verweilzeitverteilung	619
7.3.2.3.4	Leistungseintrag und Temperatur	619
7.3.2.3.5	Gasdispergierung	621
7.3.2.3.6	Additiveinmischung	622
7.3.2.3.7	Wärmeübergang	622
7.3.2.3.8	Scale-Up der Mischfunktion	623
7.3.2.4	Innen-temperierbare statische Mischer	626
7.3.2.4.1	SMR-Wärmetauscher	626
7.3.2.4.2	Kompaktwärmetauscher mit temperierbaren X-Einbauten	627
TEIL D Weitere wichtige Komponenten einer Aufbereitungsanlage		629
8	Schüttguttechnik in der Kunststoff-Aufbereitung	631
8.1	Silos – verfahrenstechnische Auslegung und statische Aspekte	631
	<i>Harald Wilms</i>	
8.1.1	Probleme beim Fließen von Schüttgütern aus Silos	631
8.1.1.1	Brückenbildung	631

8.1.1.2	Schachtbildung	632
8.1.1.3	Unregelmäßiges Fließen	633
8.1.1.4	Schießen von Schüttgut	633
8.1.1.5	Entmischungerscheinungen	633
8.1.1.6	Füllstandkontrolle	635
8.1.1.7	Verweilzeitverteilung	636
8.1.2	Fließprofile beim Entleeren von Schüttgütern aus Silos	637
8.1.3	Ermittlung der Fließeigenschaften durch Scherversuche	639
8.1.4	Verfahrenstechnische Auslegung eines Siloauslauftrichters	644
8.1.4.1	Trichterwandneigung für Massenfluss	644
8.1.4.2	Auslaufdurchmesser zur Vermeidung von Brückenbildung	648
8.1.4.3	Auslaufdurchmesser zur Vermeidung von Schachtbildung bei Kernfluss	653
8.1.4.4	Einfluss der Zeitverfestigung	656
8.1.4.5	Einsatzbereich von Austragorganen und Austraghilfen	658
8.1.5	Statische Aspekte der Siloauslegung	659
8.1.5.1	Drücke in Silos	659
8.1.5.2	Spannungsspitzen in Silos	661
8.1.5.3	Asymmetrische Fließzonen	662
8.2	Mischsilos für die Kunststoff-Aufbereitung	665
	<i>Harald Wilms</i>	
8.2.1	Einleitung	665
8.2.2	Anforderungen an Mischsilos	667
8.2.3	Bauformen von Mischsilos	670
8.2.3.1	Mischsilos mit mechanischem Energieeintrag	670
8.2.3.2	Mischsilos mit pneumatischem Energieeintrag	671
8.2.3.3	Schwerkraftfluss-Mischsilos mit Trichtereinbauten	673
8.2.3.4	Schwerkraftfluss-Mischsilos mit Rohreinbauten	675
8.2.3.5	Mehrkammer-Mischsilos	678
8.2.4	Auswahlkriterien	679
8.2.5	Zusammenfassung	681
8.3	Dosiertechnik	682
	<i>Bernhard Hüppmeier</i>	
8.3.1	Grundlagen der Dosiertechnik	683
8.3.2	Verschiedene Dosiertechniken für Feststoffe	685
8.3.3	Flüssigkeitsdosierdifferenzialwaage	691
8.3.4	Dosierdifferenzialwaage	692
8.3.5	Anforderungen an die Dosierwaagen	693
8.3.6	Einplanung in die Anlage	693

8.3.7	Befüllung	695
8.3.8	Entlüftung	698
8.3.9	ATEX	699
8.3.10	Genauigkeit, Dosierkonstanz, Namur	700
8.3.11	Reinigung und Produktwechsel	701
8.3.12	Steuerung und Schnittstellen	701
8.3.13	Zukunftsperspektiven	702
8.3.14	Resümee	702
8.4	Intensiv-Mischen	702
	<i>Harald Wilms, Henning Kreis</i>	
8.4.1	Einleitung	702
8.4.2	Einführung in das Mischen von Schüttgütern	703
8.4.2.1	Mischaufgabe	703
8.4.2.2	Einteilung von Mischer-Bauarten	704
8.4.2.3	Entmischungen	704
8.4.2.4	Beschreibung von Mischungen	705
8.4.3	Anwendungsgebiete von Intensiv-Mischern	707
8.4.3.1	PVC-Aufbereitung	708
8.4.3.2	Kunststoffcompound-Herstellung mit Holz (WPC) ...	709
8.4.3.3	Rohstoff-Compound-Herstellung für Spritzguss- produkte (PIM, MIM und CIM)	710
8.4.3.4	Bonding	710
8.4.4	Mischer für den Chargenbetrieb	711
8.4.4.1	Schubmischer, Fluidmischer	711
8.4.4.2	Intensivmischer, Heizmischer	712
8.4.4.3	Heiz-Kühl-Kombination	714
8.4.4.4	Containermischer	714
8.4.5	Mischer für den kontinuierlichen Betrieb	716
8.4.6	Zusammenfassung, Ausblick	718
8.4.7	Formelzeichen	719
8.5	Pneumatische Förderung von Kunststoffen	720
	<i>Harald Wilms, Guido Winkhardt</i>	
8.5.1	Einleitung	720
8.5.2	Förderverfahren und Förderzustände	721
8.5.3	Auslegung von pneumatischen Förderungen	723
8.5.4	Aufbau und Betrieb pneumatischer Förderanlagen	726
8.5.4.1	Aufbau und Betrieb von Flugförderanlagen	726
8.5.4.2	Aufbau und Betrieb von Dichtstromförderanlagen ..	727
8.5.5	Einspeisung in die Förderleitung	731
8.5.6	Zusammenfassung	733

9	Zahnradpumpen für die Compoundierung	735
	<i>Sven Wieczorek</i>	
9.1	Einleitung Zahnradpumpen	735
9.2	Wirkungsweise der Zahnradpumpe	736
9.3	Zahnradpumpe für die Compoundierung im Hauptstrom	737
9.3.1	Aufbau der Pumpe	739
9.3.1.1	Gehäuse und Deckel	740
9.3.1.2	Zahnräder	741
9.3.1.3	Gleitlager	742
9.3.1.4	Wellendichtung	745
9.3.1.5	Beheizung	745
9.3.2	Einfluss des Fördermediums	745
9.3.2.1	Viskosität	745
9.3.2.2	Feststoffe	747
9.3.3	Steuerung	747
9.4	Zahnradpumpe für die Additive	748
9.4.1	Aufbau der Pumpe	748
9.4.1.1	Gehäuse und Deckel	748
9.4.1.2	Zahnräder	749
9.4.1.3	Gleitlager	750
9.4.1.4	Wellendichtung	750
9.4.1.5	Beheizung	750
9.4.2	Einfluss des Fördermediums	750
9.4.2.1	Viskosität	750
10	Filter für (hoch-)viskose Polymerschmelzen	751
	<i>Thomas Grimm-Bosbach</i>	
10.1	Grundlagen der Polymerfiltration	751
10.1.1	Mögliche Kontaminationen von Polymerschmelzen	752
10.1.2	Verwendbare Filtermedien	753
10.1.3	Definition der Polymerschmelzefiltration	757
10.2	Filtrationssysteme	758
10.2.1	Großflächenfilter	758
10.2.1.1	Filterkerzen	760
10.2.1.2	Filterscheiben	761
10.2.2	Siebwechsler	764
10.2.2.1	Bolzensiebwechsler	765
10.2.2.2	Rotationssiebwechsler	768
10.2.3	Moderne Filtrationssysteme – Wirtschaftliche Betrachtung	769

10.3 Auslegung von Schmelzefiltern	771
10.4 Die „richtige“ Filtration	782
11 Granulieren und Trocknen	787
<i>Harald Zang, Horst Müller</i>	
11.1 Übersicht der Granulierverfahren	787
11.2 Verfahrenstechnische Aspekte beim Granulieren	788
11.3 Verfahrenstechnische Aspekte beim Trocknen	792
11.4 Granulieren und Trocknen in der Polymerherstellung	793
11.4.1 Anwendungstypische Anforderungen	793
11.4.2 Unterwasser-Granulierteknik für Polyolefine	794
11.4.3 Luftgekühlte Granulierung für PVC	798
11.4.4 Unterwasser-Stranggranulierung	799
11.4.5 Granulattrocknung und Prozesswasseraufbereitung in der Polymerherstellung	801
11.5 Granulieren und Trocknen beim Compoundieren (Füllen, Verstärken, Additivieren, Legieren)	803
11.5.1 Anwendungstypische Anforderungen	803
11.5.2 Unterwassergranulierung und Trocknung	804
11.5.3 Strang-Trockenschnitt (konventionelle Stranggranulierung) ...	807
11.5.4 Automatischer Strang-Trockenschnitt	809
11.5.5 Sonderverfahren für spezielle Anwendungen	810
11.6 Sonstige Granulier- und Trockenverfahren	811
11.6.1 Bandgranulierung	811
11.6.2 Wasserringgranulierung	812
11.6.3 Alternative Granulierverfahren	813
12 Messtechnik	815
<i>Christoph Kugler, Johannes Rudloff, Thomas Hochrein</i>	
12.1 Messtechnische Grundlagen	815
12.2 Druck- und Temperaturmesstechnik	816
12.2.1 Temperatur	817
12.2.2 Druckmesstechnik	819
12.3 Rheologische Messtechnik	821
12.3.1 Laborrheometer	822
12.3.2 Prozessrheometer	823
12.4 Optische und spektroskopische Verfahren	825
12.4.1 Farbmessung	825

12.4.2 Infrarotspektroskopie	826
12.4.3 Mikroskopie und Bildanalyse	827
12.5 Anwendungsnahe Prüfungen	827
12.6 Druckfiltertest	829
12.7 Sondersysteme	832
12.7.1 Ultraschallmesstechnik	833
12.7.2 Modellprädiktive Regelung und virtuelle Sensoren	833
Index	837