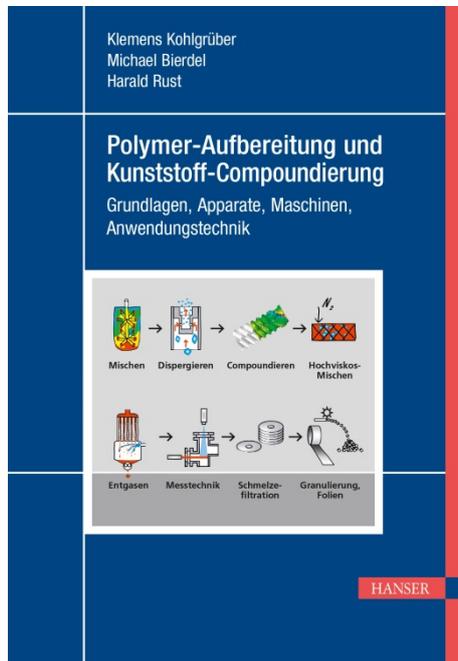


HANSER



Leseprobe

zu

„Polymer-Aufbereitung und Kunststoff-Compoundierung“

von Klemens Kohlgrüber, Michael Bierdel und
Harald Rust

Print-ISBN: 978-3-446-45832-1

E-Book-ISBN: 978-3-446-46079-9

Weitere Informationen und Bestellungen unter
<http://www.hanser-fachbuch.de/978-3-446-45832-1>

sowie im Buchhandel

© Carl Hanser Verlag, München

Inhalt

Die Herausgeber XXIII

Vorwort XXVII

TEIL A Einführung in die Aufbereitung von Polymeren/Kunststoffen 1

1 Einführung 3
Klemens Kohlgrüber, Michael Bierdel

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
Klemens Kohlgrüber

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 Doppelschneckenknetern	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 Iliw, 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 Dampfabscheidung (engl.: physical vapor deposition)	338
5.8.5.3.2	Chemische Dampfabscheidung (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	Gelierungsgrad und mechanische Eigenschaften	401
6.4.6	Rezepturkomponenten	402
6.4.7	Homogenität des Gelierungsgrades	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 Birr, 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-Knetter	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 Kalenderbeschickung	550
7.2.4	Vergleich verschiedener Aufbereitungssysteme	551
7.2.5	Moderne Kalenderanlagen	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 Kalenderbauformen	559
7.2.12	Sonderbauformen	561
7.2.13	Unterschiede Kalender und Calandrette	561
7.2.14	Die Aufgabe des Kalenders und unterschiedlicher Kalenderwalzen	562
7.2.15	Der Aufbau und die Arbeitsweise eines Kalenders	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 Kalenderwalzen	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 Kirchoff, 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	Schichtdickenverringering 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	Entmischungserscheinungen	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 Siloauslaufrichters	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

Die Herausgeber

■ Klemens Kohlgrüber



Dr. Klemens Kohlgrüber absolvierte eine Schlosserlehre mit anschließender zweijähriger Berufsausübung. Danach erfolgte die Weiterbildung zum Maschinenbau-Techniker in Köln. Das Studium zum Maschinenbauingenieur in Wuppertal, anschließend Diplom und Promotion an der RWTH Aachen. Von 1986 bis 2015 Tätigkeit bei der Bayer AG, u. a. Leitung der Hochviskos-, Misch- und Reaktortechnik. Parallel dazu mehrjährige Vorlesungen an der Uni Dortmund für Chemiker im Masterstudiengang über Polymeraufbereitung. Mehrjährige Leitung des Arbeitskreises Hochviskostechnik der Forschungsgesellschaft Verfahrenstechnik und ehemals Mitglied im VDI-Fachbeirat Kunststoff-Aufbereitungstechnik. Leiter von jährlich stattfindenden VDI-Seminaren über Extruder.

■ Michael Bierdel



Dr.-Ing. Michael Bierdel studierte Verfahrenstechnik an der Universität Stuttgart und promovierte 2001 auf dem Gebiet der Gegenstrom-Injektions-Mischer. Seit 2001 arbeitet er bei Bayer Technology Services GmbH (Bayer AG) im Bereich Forschung und Entwicklung in der Gruppe Hochviskostechnik und leitet diese seit 2012. Mit der Gründung der Covestro AG wechselte er mit der Gruppe Hochviskostechnik zur Covestro Deutschland AG (Covestro AG).

■ Harald Rust



Dipl.-Ing. Harald Rust (geb. 05.01.1949 in Bochum) studierte allgemeinen Maschinenbau in Bochum. Nach einer Tätigkeit in der Projektierung von Hydraulikanlagen von 1976 bis 1983 war er Entwicklungsleiter von Planetwalzenextrudern, Kalender-, Calandrette- und Flachfolienanlagen bei der Firma EKK und Battenfeld Extrusionstechnik, Werk Bochum. Von 1983 bis 1985 hatte er die technische Leitung in einem luftfahrt-technischen Entwicklungsbetrieb – Entwicklung von Aircargo Equipment und Transportstrukturen für die Ariane 5.

1986 dann die Gründung der ENTEX Rust & Mitschke GmbH. Technologieführung mit dem Planetwalzenextruder. Zahlreiche Patente. Bis heute Geschäftsführender Gesellschafter der ENTEX Rust & Mitschke GmbH mit ca. 150 Mitarbeitern.

■ Die Mitverfasser

Abschnitt	Titel	Autor
3.1	Grundlagen des Entgasens	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Dr.-Ing. Heino Thiele, ehemals BASF
3.5	Entgasungssilos	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Dr.-Ing. Harald Wilms, Wilms-ITC, Bremen ▪ Dipl.-Ing. Hans Schneider, Zeppelin Systems GmbH, Friedrichshafen
4.1	Anforderungen an die Compoundierung aus Sicht des Compoundeurs	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Thomas Schuldt, Albis Plastic GmbH, Hamburg
4.2	Produktentwicklung	
4.3	Zusatzstoffe für Polymere – vom Polymer zum Kunststoff	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Hermann Diem
5.2	Aufgaben und Auslegung der Verfahrenszonen eines Compoundierextruders	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Dr.-Ing. Reiner Rudolf, Covestro Deutschland AG ▪ Dr.-Ing. Michael Bierdel, Covestro Deutschland AG
5.3	Verfahrens- und Schneckenkonzepte für Maschinen mit hohen Durchsätzen	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Frank Lechner, Coperion
5.4	Schneckenbesätze für hochgefüllte Polymere (und Dosierstrategien)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Sebastian Fraas, Leistritz Extrusionstechnik GmbH, Nürnberg
5.5	Compoundierung von naturfaser-verstärkten Kunststoffen	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Dijan Iliew ▪ Dr. Stephen Kroll ▪ Prof. Dr.-Ing. Andrea Siebert-Raths HS Hannover

Abschnitt	Titel	Autor
5.5.2	Aufbau und Parametrierung der Verfahrenseinheit eines Planetwalzenextruders	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Dr.-Ing. Thomas Birr, Entex
5.6	Grundlagen der thermoplastischen Schaumextrusion	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Lukas Vogel, Leistritz Extrusionstechnik GmbH, Nürnberg
5.8	Werkstoffe, Beschichtungen, Verschleißtechnik	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Dr. Oliver Kayser, Dreistegen GmbH
6.2	Einwellenextruder	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Dr. Gregor Karrenberg, Covestro Deutschland AG, Leverkusen
6.3	Ringextruder	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Dr. Michael Erdmann, Extricom Extrusion GmbH, Lauffen a. N.
6.4	Gegenläufige dichtkämmende Doppelschnecken	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Dr. Ernst Krüger, Managing Director, GermanTwinScrews GmbH
6.5	Planetwalzenextruder	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Dipl.-Ing. Harald Rust, Geschäftsführender Gesellschafter, ENTEX Rust & Mitschke GmbH ▪ Dr.-Ing. Thomas Birr, Leitung Verfahrenstechnische Entwicklung, ENTEX Rust & Mitschke GmbH ▪ Holger Lange, Technischer Redakteur, ENTEX Rust & Mitschke GmbH
6.6	Ko-Knetter	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Dipl.-Ing. Hans-Ulrich Siegenthaler, Kneading Experts GmbH, Suhr, Schweiz
6.7	Compact Processor	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Peter Gohl ▪ Roman Kebalo ▪ Joe Pereira ▪ Stuart Sardinskas ▪ Farrel Pomini
7.1	Hochviskosreaktoren	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Dr.-Ing. Oliver Seck, Buss-SMS-Canzler GmbH, Zweitniederlassung Pratteln
7.2	Aufbereitung von Polymerschmelzen mittels Kalandern und Folienanlagen	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Dipl.-Ing. Harald Rust, Geschäftsführender Gesellschafter, ENTEX Rust & Mitschke GmbH ▪ Dr. Stefan Seibel, Brückner Maschinenbau GmbH & Co. KG
7.31	Grundlagen: homogenes & disperses Mischen	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Dr. Jörg Kirchhoff, Arlanxeo Deutschland GmbH, Leverkusen ▪ Dr. Michael Bierdel, Covestro Deutschland AG, Leverkusen
8.1	Silos – verfahrenstechnische Auslegung und statische Aspekte	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Dr.-Ing. Harald Wilms, Wilms-ITC, Bremen
8.2	Mischsilos für die Kunststoff-Aufbereitung	
8.3	Dosiertechnik	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Bernhard Hüppmeier, Brabender Technologie GmbH & Co.KG
8.4	Intensiv-Mischen von Kunststoffen in mechanischen Mischern	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Dr.-Ing. Harald Wilms, Wilms-ITC, Bremen ▪ Dipl.-Ing. Henning Kreis, Zeppelin Systems GmbH, Kassel

Abschnitt	Titel	Autor
8.5	Pneumatische Förderung von Kunststoffen	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Dr.-Ing. Harald Wilms, Wilms-ITC, Bremen ▪ Dipl.-Ing. Guido Winkhardt, Zeppelin Systems GmbH, Friedrichshafen
9	Zahnradpumpen für die Compounding	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Dr. Sven Wieczorek, Geschäftsführer, Witte Pumps & Technology GmbH
10	Filter für (hoch-)viskose Polymer-schmelzen	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Dr. Thomas Grimm-Bosbach, Geschäftsführer, Seebach GmbH, Vellmar
11	Granulieren und Trocknen	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Dipl.-Ing. Harald Zang, Dr. Horst Müller; Maag Automatik GmbH; Großostheim
12	Messtechnik	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Christoph Kugler ▪ Johannes Rudloff ▪ Thomas Hochrein SKZ - Das Kunststoff-Zentrum; Würzburg

Reihenfolge nach Kapitelstruktur

Vorwort

Bei Kunststoffprodukten gibt es vom Monomer zum Werkstoff drei aufeinander aufbauende Verfahrensstufen oder „Wertschöpfungsstufen“, Bild 1. Zu Polymerreaktionen wie der Polymerisation, der Polykondensation und der Polyaddition liegt in der Verfahrensstufe Reaktion umfangreiche Literatur vor. Dies gilt auch für die letzte Verfahrensstufe Verarbeitung. Spritzguss oder Extrusion werden in der Literatur ausführlich beschrieben. Auch an den Universitäten und bei Seminaranbietern gibt es vielfältige Vorlesungen bzw. Seminarangebote. Dagegen ist die Verfahrensstufe Aufbereitung, oder umfassender ausgedrückt Polymer-Aufbereitung und Kunststoff-Compoundierung weder in der Literatur noch in der Hochschullandschaft – bis auf die im Folgenden beschriebene eigene Vorlesung – vertreten. Selbst der Begriff ist wenig verbreitet. Diese „Lücke“ soll das vorliegende Buch schließen. Das Buch richtet sich jedoch nicht nur an Fachleute aus der Polymer- und Kunststoffbranche, sondern der Inhalt ist auch für andere Industriezweige, wie z. B. Lebensmittel- und Pharmaindustrie relevant.



Bild 1 Verfahrensstufen vom Monomer zum Werkstoff Kunststoff

Der Herausgeber Klemens Kohlgrüber hat jahrelang Vorlesungen über die Polymer-Aufbereitung, die Aufbereitungstechnik an der Technischen Universität Dortmund für Studenten im Masterstudiengang gehalten. Diese Vorlesung wird jetzt vom Herausgeber Michael Bierdel durchgeführt und die eingeführte „Tradition“, eine Besichtigung der Firma ENTEX in Bochum mit den Studenten, fortgesetzt. Die Firma ENTEX stellt Planetwalzenextruder her und ist für die Studenten ein sehr gutes Beispiel, wie ein innovatives Unternehmen vom „Stahl bis zum Verkaufsprodukt“ den Planetwalzenextruder entwickelt und herstellt. Dabei werden auch verfahrenstechnische Versuche in Technikumsanlagen besichtigt.

Bei den Herausgebern entstand dabei die Idee, ein Buch über die Polymer-Aufbereitung und die Kunststoff-Compoundierung mit den zugehörigen Apparaten und Maschinen zu schreiben. Durch die Vorlesung von Kohlgrüber und Bierdel und durch die langjährige Erfahrung des ENTEX-Firmengründers Harald Rust lagen viele Präsentationsunterlagen für die Basis des Buches vor. Andererseits bestand der Wunsch, das Buch durch Beiträge weiterer Autoren mit speziellem Fachwissen zu bereichern. Aus Sicht der Herausgeber ist das gelungen und sie möchten an dieser Stelle allen Autoren für ihre Beiträge danken!

Danken möchten wir auch dem Hanser-Verlag und insbesondere Frau Wittmann, die uns außergewöhnlich gut unterstützt hat und einen erhöhten Aufwand durch die Vielzahl an Autoren hatte!

Der Herausgeber Klemens Kohlgrüber dankt seiner Tochter Kristina für die Durchsicht der eigenen Manuskripte!

Herr Rust dankt seiner Sekretärin Frau Wiczorek für die intensive Unterstützung der Beiträge der Fa. ENTEX.

Klemens Kohlgrüber, Michael Bierdel, Harald Rust im Juli 2019



Erläuterung zu den einzelnen Kapiteln des vorliegenden Buches siehe auch Abschnitt 1.4.

1

Einführung

Klemens Kohlgrüber, Michael Bierdel

■ 1.1 Kunststoffe und ihre Bedeutung

Zu den fünf Grundbedürfnissen des Menschen [1] zählen:

- Nahrung
- Gesundheit
- Kleidung
- Wohnung
- Kommunikation

Dazu leisten die Kunststoffe in der heutigen Zeit erhebliche und wertvolle Beiträge. Dies ist offenkundig und wird im Rahmen dieses Handbuchs nicht weiter beschrieben.

Der Werkstoff Kunststoff ist im Vergleich zu den anderen Werkstoffgruppen (Metall, Glas, Keramik, Holz, Papier) sehr jung. Durch Staudinger wurde ab Mitte der 20er Jahre eine Basis für das Verständnis der Polymere (Makromoleküle) gelegt. Insbesondere in der IG-Farben-Industrie folgte eine Entwicklung von verschiedenen Polymeren, beispielsweise 1937 Polyurethan durch O. Bayer. Durch Ziegler Natta und gleichnamige Katalysatoren wurde die wirtschaftliche Herstellung von Polymeren beschleunigt. Bei Bayer wurde 1953 Polycarbonat erfunden.

Anfangs wurden die Kunststoffe diskontinuierlich hergestellt, der wirtschaftliche Erfolg der Kunststoffe ist aber mit dem Erfolg der kontinuierlichen Herstellungsweise und insbesondere bei Thermoplasten mit dem Erfolg der Extruder verbunden. Die Basisgeometrie von gleichläufigen Doppelschneckenextrudern wurde 1944 angemeldet und 1953 für die Bundesrepublik Deutschland erteilt.

■ 1.2 Aufbereitung und Compoundierung

In der Vergangenheit entstanden neue Kunststoffe durch neue Basispolymere. Heutzutage entsteht ein (neuer) gebrauchsfertiger Kunststoffwerkstoff erst durch die **Aufbereitung** eines Basispolymers während und nach der Polymerreaktion (Synthese) und durch die **Compoundierung**, also die anschließende Einarbeitung von Zusatzstoffen, wie Additiven, Füllstoffen, Fasern und Farben. Bild 1.1 zeigt beispielsweise, welche Einflüsse Füllstoffe bei PTFE-Kunststoffen haben [2]. Bild 1.2 zeigt eine qualitative Schätzung der Entwicklung zur Bedeutung der „Polymer-Aufarbeitung und Kunststoff-Compoundierung“, unserem Buchtitel. Die blaue Kurve beschreibt die Anzahl neu entwickelter Basispolymere und die grüne Kurve gibt die Menge produzierter Kunststoffe wieder.

Eigenschaft	Füllstoff						
	Glas (bis 40 %)	Kohle (bis 35 %)	Hartkohle (bis 35 %)	Graphit (bis 15 %)	MoS ₂ (bis 5 %)	Bronze (bis 60 %)	Stahl (bis 60 %)
Verschleiß	→	→	→	→	→	→	→
Abrieb (Gegenlaufpartner)	↔	→	→	→	→	→	↔
Chemische Beständigkeit	↔	↔	↔	↔	↔	↔	→
Wärmeleitfähigkeit	→	→	→	→	→	→	→
Gleiteigenschaften	→	→	→	→	↔	→	→
Reibungskoeffizient	↔	↔	↔	→	→	↔	↔
Härte	→	→	↔	↔	→	→	→
Steifigkeit	→	→	→	→	→	→	→
Trockenlaufeigenschaften	→	→	→	→	→	→	→

Trends: blau = neutral, grün = positiv, rot = negativ

Bild 1.1 Einfluss von Füllstoffen auf das Eigenschaftsprofil von PTFE-Kunststoffen [2]. Mit freundlicher Genehmigung von pro-K Industrieverband Halbzeuge und Konsumprodukte aus Kunststoff e. V.

Der Begriff Compoundieren ist bis dato im Duden nicht enthalten. Er bedeutet im weitesten Sinne Mischen, ein Verfahrensschritt, der bei der Polymeraufbereitung vielfach vorkommt und der eine der Hauptoperationen ist. Dabei wird unterschieden zwischen:

- Mischen von Feststoffen und
- Mischen in der Schmelzphase des Polymers (Schmelzecomoundieren).

Das sogenannte „Kaltmischen“ erfolgt bei Raumtemperatur, beim „Heißmischen“ werden die Komponenten erwärmt; wobei Polymergranulat oder Polymerpulver fest bleibt, während Additive sich verflüssigen können.

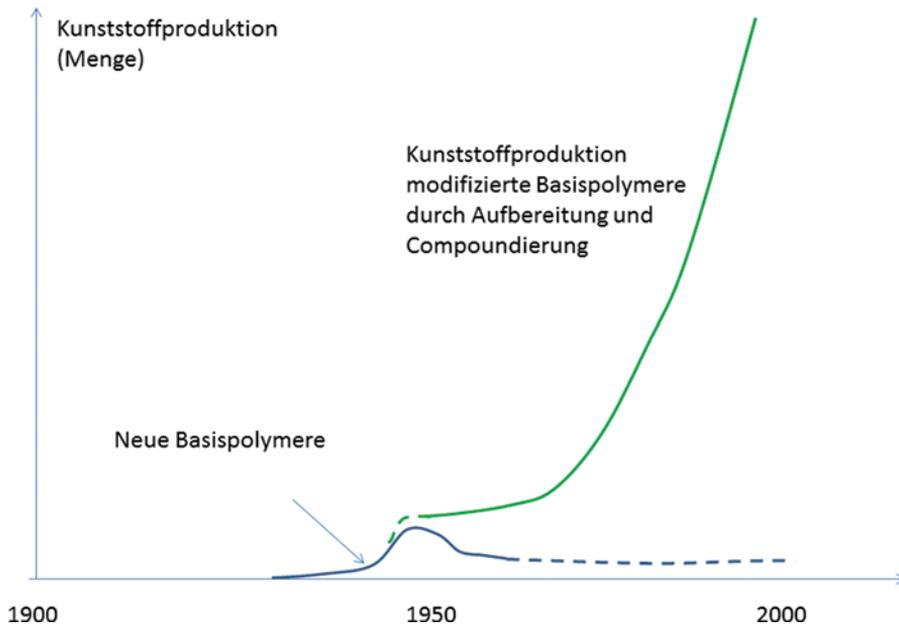


Bild 1.2 Bedeutung der Aufbereitung und Compoundierung für Kunststoffe (Schätzung)

Zu Beginn der Kunststoffentwicklung und der Kunststoffherstellung wurden „Batch-Verfahren“ verwendet. Eine Übersicht der entsprechenden Batch-Apparate und Maschinen beschreiben [3] und [4]. Heute werden insbesondere für die wirtschaftliche Herstellung der am meisten verwendeten Kunststoffe, die Thermoplaste, kontinuierliche Herstellverfahren angewendet, die in dem vorliegenden Buch mit den entsprechenden Apparaten und Maschinen beschrieben werden. Die Schmelzcompoundierung erfolgt normalerweise in Extrudern und wird in diesem Buch ausführlich beschrieben.

■ 1.3 Wiederverwertung von Kunststoffen

Kunststoffe sind unentbehrliche Werkstoffe. Wegen der insbesondere in manchen Ländern mangelhaften Entsorgung und der langen Haltbarkeit, sammeln sich immer mehr Kunststoffe in der Umwelt an und Kunststoffe geraten zunehmend in Kritik. In Deutschland haben wir eine gute Ordnungspolitik, was die Abfallentsorgung betrifft. Bild 1.3 zeigt die Verwertung von Kunststoff-„Abfällen“ in Deutschland nach ihrem Gebrauch:

- 53 % der Abfälle werden zur Energiegewinnung genutzt;
- 46 % werden werkstofflich wiederverwertet, wobei sich daraus häufig Kunststoffe schlechterer Qualität ergeben;

- lediglich 1 % der Abfälle wird wieder in Rohstoffe umgewandelt, die erneut zur Herstellung von Kunststoffen genutzt werden können;
- ebenfalls bei lediglich 1 % liegt der Anteil der Kunststoffe, die letztlich auf einer Deponie gelagert werden.

Rohstoffliches und werkstoffliches Recycling werden in Zukunft wichtiger werden. Im vorliegenden Buch werden das **lösungsmittelbasierte Recycling** und das **mechanische Recycling, die Recompoundierung**, kurz angeschnitten. Auch die EU-Politik beschäftigt sich mit dem Thema Kunststoff-Recycling und fordert: „Wir brauchen weniger und bessere Kunststoffe“ [7]. Es wird eine Produktionsumstellung verlangt, „da Kunststoffe zur größten Umweltgefahr werden“.

Auch in den Medien wird zurzeit über den Werkstoff „Kunststoffe“ meist kritisch berichtet. Die Vorteile dieses Werkstoffes gegenüber anderen Werkstoffen dürfen dabei nicht übersehen werden. Vorteile werden z. B. in den kürzlich ausgestrahlten TV-Sendungen [8] und [9] dargestellt. Im Idealfall ist natürlich ein unendlich oft recycelfähiger und somit wiederverwendbarer Kunststoff anzustreben. Eine energetische Verwertung der Kunststoffe, die schon als „Wertstoff“, z. B. einem Handygehäuse verwendet wurden, ist jedoch besser als eine direkte „Verbrennung“ des Erdöls, Bild 1.3.

Die Entwickler von Verfahren zur Polymer-Aufbereitung und von Maschinen und Apparaten zur Kunststoff-Compoundierung werden sich diesen Herausforderungen stellen müssen. Durchsetzen werden sich nur solche Verfahren und Maschinen, die ökologisch und wirtschaftlich am vielversprechendsten sind.

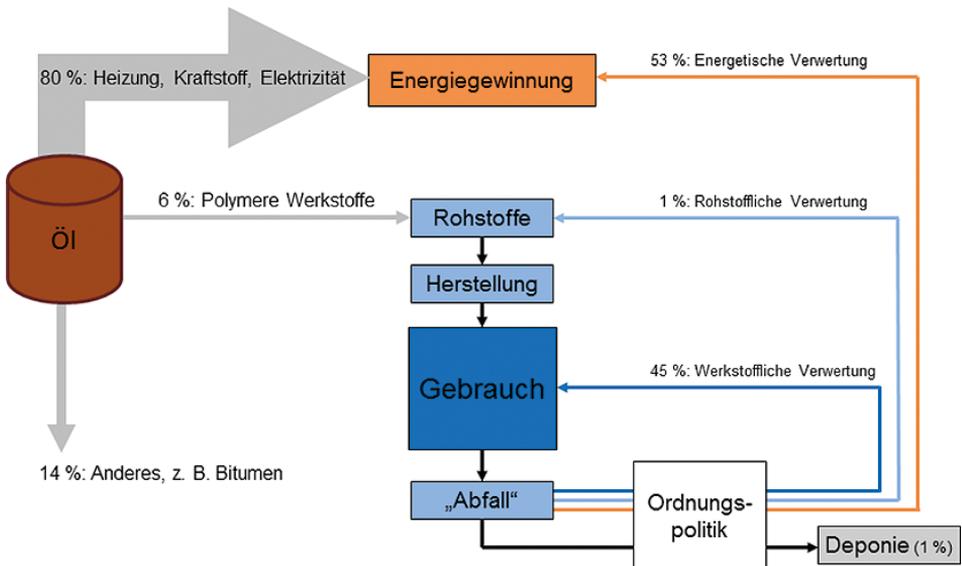


Bild 1.3 Öl als Basis von Kunststoffen einschließlich der Wiederverwertung von Kunststoffprodukten (nach [5], Zahlenwerte zur Verwertung nach [6])

■ 1.4 Erläuterungen zu den einzelnen Kapiteln des vorliegenden Buches

Das vorliegende Buch ist in vier Buchteile gegliedert:

Buchteil „A“ beschreibt, was unter der Aufbereitung von Polymeren zu verstehen ist. Sehr ausführlich wird die Compoundierung beschrieben, der Weg vom Polymer zum gebrauchsfertigen Kunststoff.

Buchteil „B“, die Aufbereitung bei der Primärproduktion von Polymeren, beschreibt als Schwerpunkt die „Entgasung“ von Polymeren mit den zugehörigen Apparaten und Maschinen.

Buchteil „C“ behandelt das umfangreiche Thema Compoundieren. Mit welchen Additiven und anderen Zusatzstoffen werden die Basispolymere modifiziert und gebrauchsfertig haltbar gemacht? Die Haupt-Einmischung erfolgt bei der „Schmelzecompoundierung“ in Extrudern. Welche Extruderbauarten gibt es? Welche Extruder sind für die Compoundierung besonders gut geeignet und welche sind die Vor- und Nachteile? Diese Fragen werden behandelt.

Buchteil „D“ beschäftigt sich mit weiteren wichtigen Anlagenkomponenten einer Aufbereitungsanlage. Dazu gehören die Themen wie Schmelzefiltration, die Granulation als Übergang von Schmelze zum Feststoff und die Feststoffverfahren. Auch die Dosier- und Messtechnik sind wichtige Bestandteile heutiger Verfahren.

Die Herausgeber haben Experten zu den Buchteilen A bis D als Autoren gewinnen können und die Beiträge mit den Autoren abgestimmt. Trotzdem spiegeln die Beiträge die Meinungen und die Erfahrungen der Autoren wider. In einigen Punkten kann dies auch abweichend von der Erfahrung der Herausgeber sein. Als Summe sind alle Beiträge eine wertvolle Bereicherung für das Buch und es sei nochmals an dieser Stelle allen Autoren gedankt!

Literatur zu Kapitel 1

- [1] Wolfgang Kaiser: Kunststoffchemie für Ingenieure: Von der Synthese bis zur Anwendung, Hanser-Verlag, 4. Auflage 2015
- [2] pro-K Industrieverband Halbzeuge und Konsumprodukte aus Kunststoff e.V.: <https://www.pro-kunststoff.de/assets/Merkbl%C3%A4tter%20und%20Co/FP%20TM-02-Einf%C3%BChrung-in-die-Verarbeitung-von-PTFE-Kunststoffen-M%C3%A4rz-2019.pdf>, abgerufen am 9.5.2019
- [3] White, Coran, Moet: Polymer Mixing, Hanser Verlag, 2001
- [4] White, Bumm: Encyclopedia of Polymer Blends: Volume 2: Processing, Abschnitt 1.2 „Methods of Compounding“, First Edition. Edited by Avraam I. Isayev. Wiley-VCH Verlag, 2011
- [5] PlasticsEurope, Der Verband der Kunststoffherzeuger
- [6] Consultic: Produktion, Verarbeitung und Verwertung von Kunststoffen in Deutschland 2015 – Kurzfassung, 2016

- [7] <https://eu-recycling.com/Archive/21436>: „Wir brauchen weniger und bessere Kunststoffe“, abgerufen am 23.03.2019
- [8] NTV: Revolution Kunststoff – Ein Material erobert die Welt, ausgestrahlt am 13.11.2018
- [9] SWR: Plastik ist toll – Zeitreise der Kunststoffproduktion. <https://www.swr.de/odysso/zeitreise-der-kunststoffproduktion/-/id=1046894/did=20400660/nid=1046894/fv9ekk/index.html>, ausgestrahlt am 16.11.2017

Wärmekapazität bei konstantem Druck. Der Unterschied wird bei sehr hohen Drücken und Temperaturen größer.

- ρ_A Dichte des Austrittsmassenstroms bei der Temperatur \bar{T}_A .
- p_A Austrittsdruck des Produktes an der Systemgrenze. Das kann der Druck vor der Düse sein, aber auch der Druck nach der Düse, je nachdem, wo die Systemgrenze gesetzt wird. Die Austrittstemperatur ändert sich in Abhängigkeit von der Systemgrenze. Ein Beispiel dazu in [8] Seite 364.
- $\dot{Q}_{\text{Gehäuse}}$ ist der über das innere Schneckengehäuse abgegebener oder aufgenommener Wärmestrom. Die Größe ist eine Prozessgröße und das Vorzeichen wurde so gewählt, dass ein abgegebener Wärmestrom (Kühlung) positiv ist. Formal kann der Wärmestrom wie folgt ausgedrückt werden, [8] Seite 358:

$$\dot{Q}_{\text{Gehäuse}} = U_G \cdot \int_{l_1}^{l_2} \alpha(l) \cdot (\bar{T}(l) - \bar{T}_{\text{Gehäusewand}}(l)) dl \quad 2.28$$

Dabei ist U_G der innere Gehäuseumfang. Da der Verlauf der Größen in der Gleichung in der Regel nicht bekannt ist, kann der Wärmestrom durch Mittelwertbildung überschlägig bestimmt werden:

$$\dot{Q}_{\text{Gehäuse}} = U_G \cdot (l_2 - l_1) \cdot \alpha_m \cdot (\bar{T}_m - \bar{T}_{\text{Gehäusewand},m}) \quad 2.29$$

Der Index m beschreibt eine Mittelung längs des Extruders bzw. der Länge l_2 bis l_1 . Bei einer Flüssigkeitskühlung oder -Heizung ist der Wärmestrom auch messtechnisch bestimmbar.

- P_{Heizung} : Im Fall einer elektrischen Beheizung innerhalb einer bestimmten Extruderlänge werden nicht Formel 2.28 oder Formel 2.29 angewendet, sondern zweckmäßig die elektrische Heizleistung eingesetzt.
- P_W : Die eingebrachte Leistung in die Schneckenwelle bzw. Schneckenwellen bei mehreren Wellen.
- $\dot{H}_{\text{Entgasung}}$ abgegebener Enthalpiestrom durch Entgasen der Schmelze.
- $\sum_{i=1}^n \left(c_{Ei} \cdot \bar{T}_{Ei} + \frac{p_{Ei}}{\rho_{Ei}} \right) \dot{M}_{Ei}$ zugeführte Enthalpieströme durch Polymere und Zusatzstoffe, insgesamt n (sinngemäße Bedeutung der Formelzeichen).

Chemische Reaktionen, also zum Beispiel eine Reaktivextrusion, werden hier nicht betrachtet. Diese können durch weitere Terme berücksichtigt werden.

Für Vergleiche ist es zweckmäßig, die Energieströme in Formel 2.27 auf den Durchsatz des Ausstoßes zu beziehen:

$$c_A(\bar{T}_A) \cdot \bar{T}_A + \frac{p_A}{\rho_A(\bar{T}_A)} = \sum_{i=1}^n \left(c_{Ei} \cdot \bar{T}_{Ei} + \frac{p_{Ei}}{\rho_{Ei}} \right) \cdot m_{Ei} + e_W - e_{\text{Gehäuse}} - e_{\text{Entgasung}} \quad 2.30$$

Ist der Druck am Austritt bekannt, dann kann die energetisch mittlere Produkt-austrittstemperatur mit Formel 2.30 berechnet werden. Wie numerische Beispiele zeigen, ist der durch Druck benötigte Leistungsanteil sehr gering. Der Austrittsdruck muss folglich nicht genau bekannt sein oder wird vernachlässigt.

Wegen der Temperaturabhängigkeit der Stoffwerte in der Gleichung ist T_A nicht direkt aufgelöst in der Form $T_A = \dots$ auszudrücken, sondern kann iterativ bestimmt werden.

In Formel 2.30 wurden folgende Abkürzungen bzw. Definitionen eingeführt:

Spezifischer Leistungseintrag über die Extruderwelle(n):

$$e_W = \frac{P_W}{\dot{M}_A} \quad 2.31$$

Spezifischer Energieanteil, der über das Gehäuse zu oder abgeführt wird (positiv bei Abführung):

$$e_{\text{Gehäuse}} = \frac{\dot{Q}_{\text{Gehäuse}} - P_{\text{Heizung}}}{\dot{M}_A} \quad 2.32$$

Enthalpieanteil, der durch eine Entgasung abgeführt wird:

$$e_{\text{Entgasung}} = \frac{\dot{H}_{\text{Entgasung}}}{\dot{M}_A} \quad 2.33$$

Definition der Massenanteile der einzelnen zugeführten Stoffe:

$$m_{Ei} = \frac{\dot{M}_{Ei}}{\dot{M}_A} \quad 2.34$$

Es gilt die Massenerhaltung:

$$\dot{M}_A = \sum_{i=1}^n \dot{M}_{Ei} \quad \text{also} \quad \sum_{i=1}^n m_{Ei} = 1 \quad 2.35$$

Damit sind alle Größen in Formel 2.30 beschrieben.

Diese enthält die Informationen, welche Farbmittel in welchen Kunststoffen eingesetzt werden können und ab welcher Konzentration negative Einflüsse auf insbesondere die mechanischen Eigenschaften zu erwarten sind. Am Anfang einer Farbentwicklung steht die Festlegung des Farbziels. Das kann sowohl ein vom Kunden bereitgestelltes Muster, eine Farbe aus einem Farbkatalog (RAL, Pantone etc.) oder auch eine schon in der Vergangenheit ausgearbeitete Rezeptur sein. Je länger ein Unternehmen Kunststoffe einfärbt, desto größer ist der Katalog an bestehenden Farben. Für den Compoundeur und dessen Kunden ergeben sich daraus sowohl finanzielle als auch zeitliche Vorteile. Entwicklungskosten entfallen und das gewünschte Produkt ist sofort lieferbar. Bild 4.10 zeigt exemplarisch eine Auswahl an transparenten Einfärbungen.



Bild 4.10 Auswahl transparenter Einfärbungen

Findet sich keine passende Farbe, so ist dann bei der Neuentwicklung die erste Aufgabe die Festlegung einer Startrezeptur. Ziel ist es, mit dieser Startrezeptur so nah wie möglich an das gewünschte Farbziel heranzukommen. In weiteren Korrekturschritten kann dann die Feinjustierung erfolgen. Bei der Entwicklung dieser Farbformel ist sehr viel Erfahrung notwendig. Die Farben werden grundsätzlich visuell vom menschlichen Auge am besten beurteilt. Modernste Technik ist heute aber auch in der Lage, Farben messtechnisch zu erfassen. Kombiniert man nun die Messtechnik mit bekannten Pigmentrezepturen und den zugehörigen Farborten mit aktueller Computertechnik, so erhält man ein System, das Farbformeln vorausberechnen kann. Ein Computersystem ist, wie bekannt, aber immer nur so gut wie die eingegebene Datenbasis. Aus diesem Grund produziert man sogenannte Eichreihen. Diese Eichreihen werden dann im System eingemessen und bilden die Grundlage für die Berechnung.

Die beiden Bilder 4.11 und 4.12 zeigen exemplarisch die Eichreihen zweier Pigmente. Bei den Eichreihen werden neben den unterschiedlichen Pigmentkonzentrationen (mittlere Reihe) auch unterschiedliche Mengen an Weißpigmenten (obere Reihe) zugesetzt. Zum Schluss gibt es dann noch die Kombination mit einem Schwarzpigment (untere Reihe). Je mehr Pigmentrezepturen und die jeweils zugehörige Farbe darüber hinaus entwickelt und ebenfalls im System hinterlegt werden, desto größer wird die Datenbasis. Damit können dann vom Kunden bereitgestellte Farbmuster eingemessen werden und im Idealfall liefert das System dann eine passende Startrezeptur, die allenfalls noch mit wenigen Korrekturschritten auf dem Entwicklungsextruder nachjustiert werden muss.

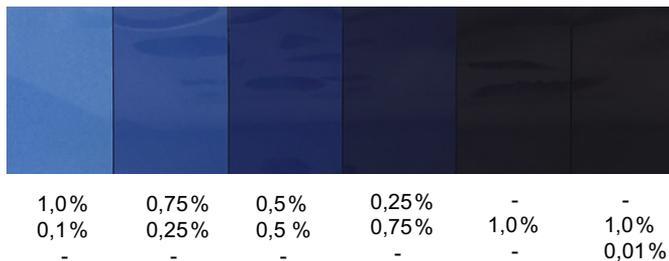


Bild 4.11 Eichreihe eines Blaupigmentes

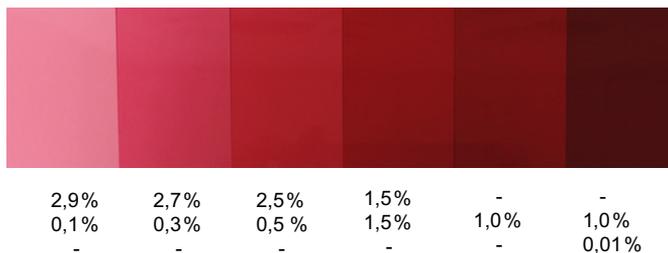


Bild 4.12 Eichreihe eines Rotpigmentes

4.2.5 Innovation

Bei Entwicklungen geht es immer auch um Innovationen. Je innovativer ein neues Produkt wird, desto größer ist das Alleinstellungsmerkmal im Markt und damit der mögliche Gewinn. Betrachtet man unter diesem Aspekt nun noch einmal die drei Bausteine der Produktentwicklung, so ergeben sich unterschiedliche Potentiale.

Rezeptur: Alle Bestandteile der Rezeptur werden in der Regel von den Compoundeuren zugekauft. Demzufolge sind diese Stoffe für jeden frei im Handel verfügbar und bieten kaum Möglichkeiten, sich vom Mitbewerber abzugrenzen. Wichtig sind

lierungen benötigt, so hilft häufig nur eine komplett ummantelte Schnecken­geometrie, um wirtschaftlich arbeiten zu können.

Zu 3.: PVC ist ein empfindliches Material, bei dessen Verarbeitung jede Art von Toträumen vermieden werden sollten. Toträume entstehen durch willkürliches Heraustrennen von Schneckenstegen, um z. B. Temperaturspitzen in der Kompression zu vermeiden, und durch Freistiche in den Schnecken­gängen. Diese Veränderungen führen zu einer deutlichen Verschlechterung der Kammerförderwirkung der gegenläufigen Doppelschnecke. Auch eine zu frühzeitige Kompression oder eine zu hohe Volumenkompression verursachen große Spreizkräfte und dementsprechend hohen Verschleiß.

Problematisch sind weiterhin falsch ausgelegte Zonen, die neben einer zu hohen Temperatur auch zu hohe Spreizkräfte hervorrufen. Der Verschleiß wird zusätzlich erhöht, wenn die Stegbreite in diesen Bereichen zu gering ist.

Auch hinsichtlich der Temperierung von Schnecke und Zylinder hat sich das Bild in der letzten Zeit gewandelt: bis zum Jahr 2000 waren die meisten renommierten Extruderhersteller der Meinung, dass eine externe Öltemperierung für eine möglichst hohe Flexibilität notwendig wäre und dass eine Öltemperierung des Zylinders für eine möglichst gleichmäßige Zylindertemperatur ratsam sei. Unsere Erfahrungen zeigen jedoch, dass die wartungsarme, geschlossene Wassertemperierung in den Schnecken wesentlich besser und gleichmäßiger in ihrer Wirkung ist, und dass die Zylindertemperierung mit drehzahl­geregelten Ventilatoren jeder Öltemperierung um ein Vielfaches überlegen ist.

Extrusion

Haupt­einflussgröße auf den maximalen Durchsatz eines Extruders ist das vom Motor bzw. Getriebe zur Verfügung gestellte Drehmoment. Durch verbesserte Getriebekonstruktionen konnte das Drehmoment in den letzten Jahren erheblich gesteigert werden. Um Drehmomente von Gleich- und Gegenläufern vergleichen zu können, wird der Drehmomentfaktor $fM_d = M_d/A^3$ verwendet. Der Drehmomentfaktor zeigt auf, welches Drehmoment bei gegebenem Achsabstand erreicht wird. Die von den Schnecken übertragene Leistung ist zu dem Drehmoment direkt und der spez. Antriebsenergie „e“ umgekehrt proportional. Die spez. Antriebsenergie gibt an, wie viel mechanische Energie dem PVC zugeführt werden muss, um eine bestimmte Massetemperatur und einen bestimmten Massedruck zu erreichen. Die spez. Antriebsenergie beträgt für:

- Rohre 70 – 90 Wh/kg
- Profile 85 – 105 Wh/kg
- Platten 95 – 120 Wh/kg

Je höher die benötigte spez. Antriebsenergie ist, desto niedriger kann der Ausstoß des Extruders werden. Die oben genannten Werte sind als Richtwerte zu betrachten.

Problem	Ursache(n)
Reißverschlüsse in Rohren und Profilen	zu hohe Temperaturen an der Schneckenspitze durch ungeeignete Temperierung oder Konstruktionsfehler der Spitze, mindestens ein zu enger Spalt am Umfang
Risse bei geschweißter Mo-Schicht	Spannungsrisse vom Schweißen
Risse in der Stellitschicht	Spannungsrisse vom Schweißen
Schlagzähigkeit zu niedrig	falsche Schneckenauslegung bzw. fehlerhafte Gelierung des PVC, s. dort
Schneckenberührung	falscher Einbau oder falsche Auslegung
Schneckenbruch, an der Spitze	Ermüdungsbruch durch Verschleiß, zu kalt angefahren
Schneckenbruch, in der Kompressionszone	zu kalt angefahren, Kompression zu hoch, Verschleiß durch Auswaschungen am Kern, Materialfehler, bei konischen Schnecken Absatz in der Kühlbohrung
Stege, gebrochen in der Kompressionszone	zu kalt angefahren, Stege zu dünn, Stegrand ausgewaschen, Metaldurchgang
Stege, gebrochen in der Vorwärmzone	Metaldurchgang, Verschleiß durch zu hohe Kompression
Streifen, grau unten am Profil	Abrieb zwischen Schnecken und Zylindern, Brenner
„Tannenbaumstrukturen“ unten am Extrudat	Abzeichnung der Schneckenkammern; zu enge Spalte in der Meteringzone
Temperaturkontrolle, schlechte der Einheit	Schwankungen im Einzug, falsche Auslegung der Temperierung
Verarbeitungsbandbreite nicht groß genug	Auslegungsfehler
Verschleiß an der Schneckenspitze	zu hoher Massedruck, Auslegungsfehler
Verschleiß, abnormal, an Schnecke und Zylinder	Ungünstige Schneckenauslegung, fehlender Verschleißschutz, Abrieb durch Metallkontakt und Füllstoffe, chemischer Verschleiß durch ätzende Stoffe.
Verschleiß im Einzug	ggf. Pulvergeometrie, falsche Spaltmaße
Zwickel, Ausbrüche	Materialfehler im Zylinder, Metaldurchgang

■ 6.5 Planetwalzenextruder

Harald Rust, Thomas Birr, Holger Lange

6.5.1 Einleitung

In den Anfängen wurden Kunststoffe ausschließlich diskontinuierlich aufbereitet. Dies geschah beispielsweise mittels Heiz- und Kühl-Mischerkombinationen und Walzwerken. Aufgrund der diskontinuierlichen Aufbereitung unterlag das Material jedoch häufig Qualitätsschwankungen, bedingt durch Rezepturabweichungen, unkontrollierte Verweilzeiten und unerwünschte Umwelteinflüsse während oder zwischen den Verfahrensabschnitten. Aus diesen Unzulänglichkeiten heraus ent-

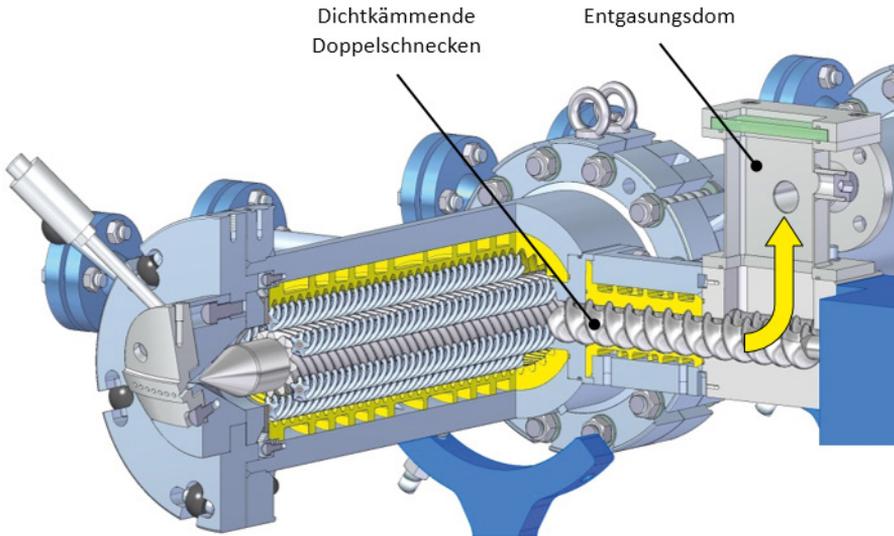


Bild 6.61 Vakuum-Entgasung über Seitenbeschickung [6.5.1]

Entgasungs- und Reaktions-Modul (ERMO)

Das Entgasungs- und Reaktionsmodul wurde entwickelt, um die bereits genannten Vorteile des Planetwalzenextruders für diese Anwendungen weiter auszubauen.

Es handelt sich hierbei um einen vergrößert ausgeführten Walzenzylinder, der durch den Einsatz ebenfalls vergrößerter Planetenspindeln zu einer unveränderten Zentralspindel kompatibel ist. Wie in jedem anderen Walzenzylinder können auch hier verschiedene Planetenspindelkonfigurationen eingesetzt werden.

Durch diese konstruktive Maßnahme ergibt sich ein Walzenzylinder mit deutlich vergrößertem Querschnitt, Volumen und inneren Oberflächen, ergänzt durch eine reduzierte Umlaufgeschwindigkeit der Planeten aufgrund der veränderten Proportionen.

Trotz aller Veränderungen ist ein ERMO zu allen anderen Walzenzylindern der zugehörigen Baugröße kompatibel und kann damit an jeder Position eingefügt werden; auch die Installation mehrerer dieser Einheiten aneinander ist möglich.

Aufgrund der konstruktiven Ausrichtung auf Entgasungsanwendungen kann diese Walzenzylindervariante mit einer Anschlussöffnung für eine besonders große Seitenbeschickung ausgestattet werden, um größtmögliche Öffnungs- und Strömungsquerschnitte bieten zu können. Diese Bauform ist ebenso für die Zuführung von Feststoffen mit besonders niedriger Schüttdichte, wie beispielsweise Holzmehl oder pyrogenem Siliziumdioxid, von Vorteil. Der Einsatz einer Seitenbeschickung ist jedoch nicht zwingend erforderlich, eine Verwendung als geschlossener Walzenzylinder, beispielsweise im Zusammenhang mit druckbeaufschlagten Reaktivprozessen, ist ebenso vorgesehen.

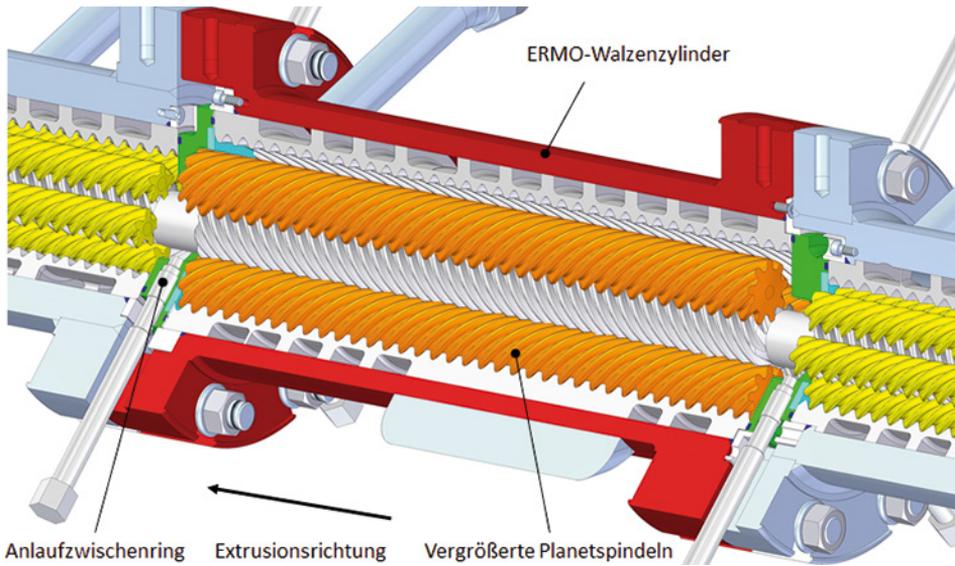


Bild 6.62 Schnittdarstellung eines ERMO zwischen zwei konventionellen Walzenzylindern [6.5.1]

Die verfahrenstechnische Besonderheit des ERMO besteht in der vergrößerten Prozesskammer und der damit einhergehenden verlangsamten Umlaufgeschwindigkeit der Planetenspindeln. Dadurch können bei Reaktivprozessen mittels Erzeugung eines hohen Füllgrades noch längere und breitere Verweilzeitspektren erzielt werden.

Für Entgasungsanwendungen stehen die vergrößerten inneren Oberflächen im Vordergrund. Diese ermöglichen ein längeres Verweilen des Extrudats in Form dünner Schichten, wodurch die Diffusion flüchtiger Bestandteile in die umgebende Atmosphäre begünstigt wird.

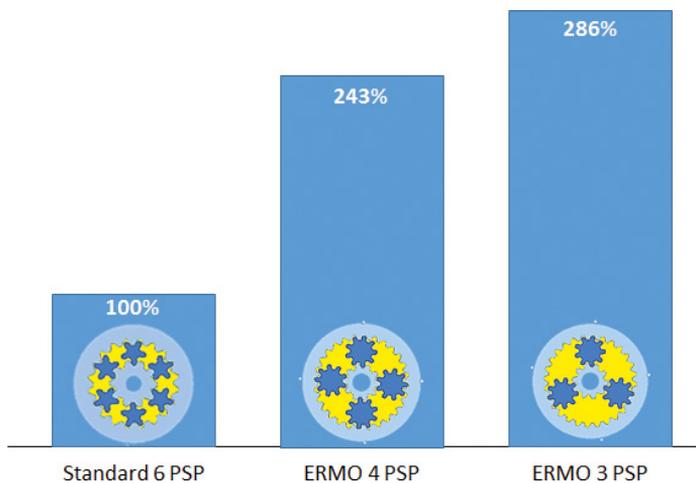


Bild 6.63 Vergleich des Prozesskammervolumens eines konventionellen Walzenzylinders mit dem ERMO in unterschiedlichen Konfigurationen [6.5.1]

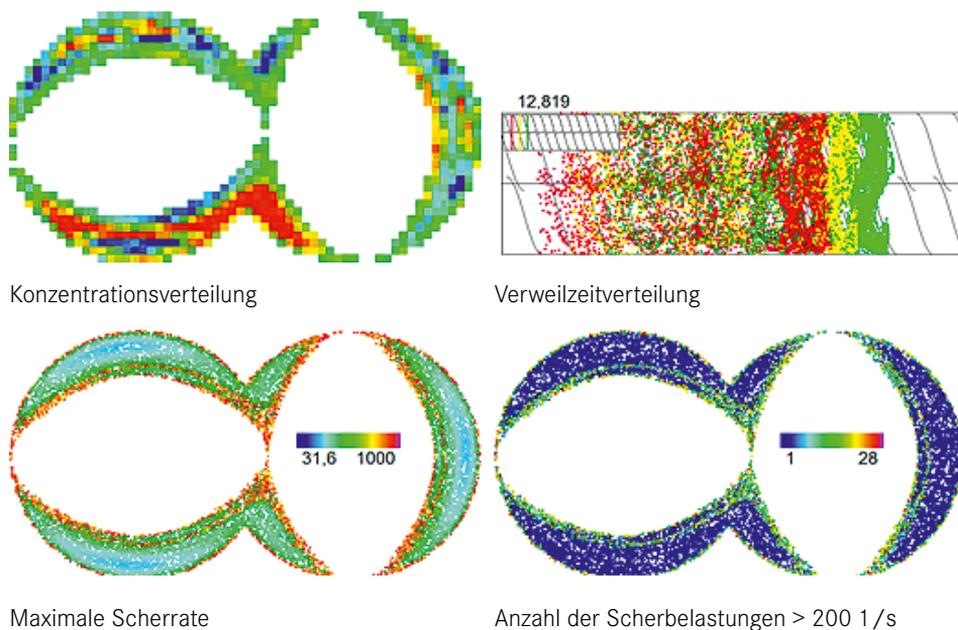


Bild 7.81 Misch-, Dispergier- und Verweilzeitverhalten eines zweigängigen Förderelements

In Bild 7.82 ist ferner eine Abbildung dargestellt, die einen Überblick über das Verweilzeitverhalten des zweigängigen Gewindeelements nach der dreifachen mittleren Verweilzeit (entsprechend 12,8 Umdrehungen) gibt. In dem kleinen Piktogramm ist die Anfangsverteilung von drei Ebenen mit Tracerpartikeln zu Beginn der 20 Umdrehungen gezeigt. Die Partikel einer Ebene sind durch die Farben rot, gelb und grün gekennzeichnet. Man erkennt, dass sich ein Großteil der drei Ebenen auch nach der dreifachen mittleren Verweilzeit gerade einmal über eine halbe Steigung aufweitet. Diese Bereiche entsprechen im Wesentlichen den unvermischten Bereichen. Die besser vermischten Bereiche liegen alle in der Nähe der Gehäusewandung und der Schneckenoberflächen. Diese Bereiche besitzen aufgrund ihrer Wandnähe eine größere Verweilzeit und sind deshalb noch nicht so weit nach vorne transportiert worden.

Darüber hinaus können durch das Particle Tracking auch Aussagen zum Dispergiervverhalten getroffen werden. Hierzu finden sich in Bild 7.81 zwei Abbildungen. In der einen Abbildung wird die maximale Scherbelastung gezeigt, die ein Partikel erfahren hat. Um den weiten Scherbereich gut abdecken zu können, wird die Farbskala logarithmisch skaliert. Eine blaue Farbe entspricht einer Scherrate von 31,6 1/s und eine rote Farbe einer Scherrate von 1000 1/s. Eine dunkelblaue Farbe bedeutet, dass die maximale Scherrate kleiner als 31,6 1/s ist, eine pinke Farbe, dass die maximale Scherrate größer 1000 1/s ist. Wenig überraschend erkennt man, dass an den Wandungen die höchsten Scherraten auftreten. Ferner fällt auf,

dass in den schlecht durchmischten Bereichen auch nur sehr niedrige Scherraten auftreten. Zusätzlich ist an den Schneckenoberflächen im Kanalbereich eine zweite Schicht mit hoher Scherrate zu beobachten.

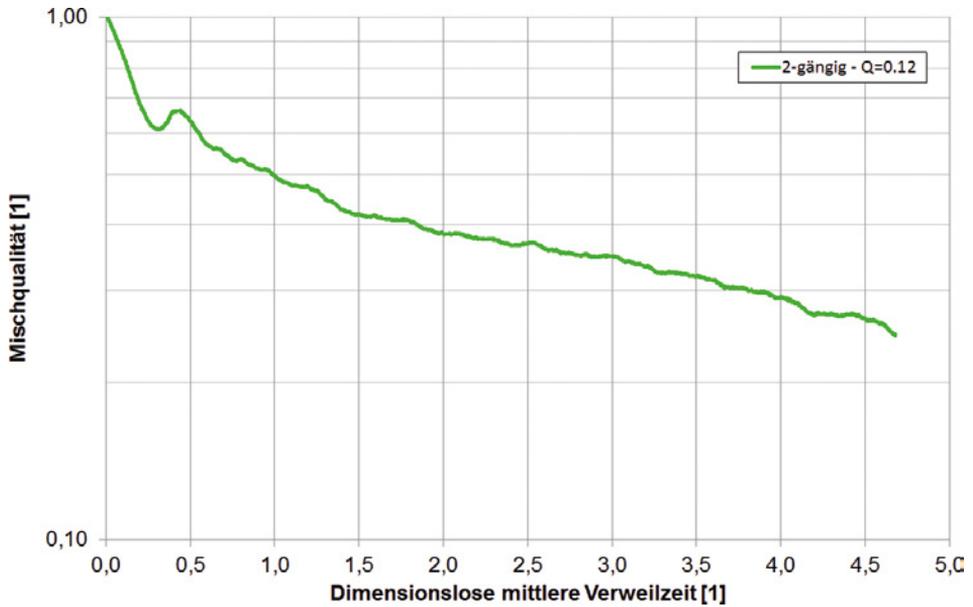


Bild 7.82 Entwicklung der Mischqualität

In der anderen Abbildung wird die Anzahl der Scherbelastungen dargestellt, und zwar für Scherraten größer 200 1/s. Eine blaue Farbe kennzeichnet 1 Belastung, eine rote Farbe 28 Belastungen. Eine dunkelblaue Farbe bedeutet, dass die Belastung kein einziges Mal erreicht wird, eine pinke Farbe, dass mehr als 28 Belastungen auftreten. Grundsätzlich sieht die Anzahlverteilung der Scherbelastungen sehr ähnlich wie die Abbildung mit der maximalen Scherrate aus: an den Wandungen wird die festgelegte Scherbelastung sehr häufig erreicht, in den Kanalbereichen dagegen kein einziges Mal.

In Bild 7.83 wird die Summenhäufigkeitsverteilung der maximalen Scherbelastung nach 10 Umdrehungen dargestellt. Die maximale Scherbelastung wird mit einer logarithmischen Skala wiedergegeben. In der Kurve spiegeln sich die Ergebnisse, die bereits in Bild 7.83 ersichtlich sind: Etwa 50 % der Partikel erfahren eine maximale Scherbelastung von größer 100 1/s und lediglich 22 % der Partikel eine von größer 316 1/s.

Index

Symbole

3D-Mischer 353

A

Abbauprodukte aus der Compoundierung 110

Abdichtungspunkt 741

Abgasbehandlung 112

Abrasion 136

abrasives Verarbeitungsverhalten 166

ABS 799

Abscherpunkt 640

Abschreibung 129

Achsabstand 379

Additiv 150

Additivdosierung 176

Additive 10, 160, 748

Additiveinmischung in Schmelze 622

Agglomeratabscheider 799

Ähnlichkeit, geometrisch 389

Alkylradikalfänger

– Radikalfänger 161

Alleinstellungsmerkmal 147, 154

Aluminiumbronze 744, 750

Anforderung an die Compoundierung 129

Anforderungen an die Dosierwaagen 693

Anforderungen an statische Mischer 611

Anforderungsprofil 504

Angebotsprofil 504

Anisotropie 405

Anlagenkonzept 123

Anlagentechnik 148, 154

Anlaufring PWE 418

Anlaufzwischenring 434

Anscherpunkt 640

Anschmelzen 135

anspruchsvolle Wärmeübertragungsaufgaben
626

Antioxidantien 163

Antistatika 150

Antriebsleistung 308

Antriebsleistung Extruder

– spezifische 29

Anwendungsempfehlungen

– Beschichtungen 346

Anwendungsfelder PWE 416

Anwendung statische Mischer 611

Apex-Zone 489

apparative Eindampftechnik 106

Arrhenius-Ansatz 23, 516

Aspektverhältnis 166

Asymmetrische Fließzonen 662

ATEX 699

Aufbau der Pumpe 739

Aufbau und die Arbeitsweise eines Kalanders
564

Aufbereitung 9, 11

Aufgabe des Kalanders 562

Aufgaben der Aufbereitung 14

Aufheizung von Schüttgütern 122

Aufpanzerung 335

Aufschmelzen 485

Aufschmelzenthalpie 279

Aufschmelzzone 267, 278, 311

Auftragsplanung 131

Ausgleichszone 408

Ausklippunkt 743

Auslauföffnung 632

Auslegung eines Siloauslaufrichters 644

Aussparungen im Extruder-Gehäuse 353

Austraggerät 659

Austraghilfen 695

Austragorgan 658

Austragssystem 475

Austragszone 223, 303

Austrittstemperatur 71, 317

Automationsgrad 788
 Automatisierung 130
 Axialspiel 744

B

Bagley-Korrektur 776
 Bandgranulierung 811
 Bandrockner 806
 Bandwaage 686
 Barriereschnecke 368
 Barriertesteg 369
 Batch-Anlagen 714
 Bauarten statischer Mischer 612
 Bauformen von Mischsilos 670
 Bauform, modular 380
 Baugrößen PWE 420
 Baukasten, modular 464
 Beads 288, 300
 Beanspruchungsarten Feststoffzerkleinerung
 21
 Beanspruchungshäufigkeit 593
 Beanspruchungszeit 593
 Befüllung 695
 – nicht gravimetrisch 684
 Begriff Aufbereitung 11
 Beheizung 745, 750
 Beladung von bis zu 85% Füllstoff 260
 Benetzbarkeit 151
 Beschichtung
 – Verschleißschutz 335
 – Werkstoff 323
 Betriebskosten 506
 Bezeichnungen eines Planetwalzenextruders
 420
 Bezugs-Durchsatzkennzahl
 – von Extrudern 36
 Bezugsgröße
 – Durchmesser, Achsabstand 188
 Bimetall 411
 Bimetallzylinder 327
 Blasenfunktion 81
 Blasensieden 542
 Blasenwachstum 297
 Bodenstein-Zahl 539
 Bolzensiebwechsler 765
 Bonding 710
 Boosterpumpen 737
 Breitschlitzdüsen 573
 Bremsschnecke 203, 206
 Bruchdehnung 401, 827

Brückenbildung 631
 Butadienkautschuk 394

C

Cavity-Transfer-Mixer 376
 Cellulose 275
 CFD 603
 Chargenmischer 711
 Chemische Vernickelungen 337
 Chillrollanlagen 576
 Chromoxidbeschichtungen 342
 CO₂-Bilanz 166
 Coatings Kalziumkarbonat 258
 Combiflow-Mischsilo 673
 Compact-Processor 485
 Compatibilizer 150
 Compound, duroplastisch 480
 Compoundieren 11, 18, 26
 Compoundierextruder 200
 Compoundierung 129, 270
 Compoundierung mit Zahnradpumpen 737
 Compounding 18
 Computational Fluid Dynamics (CFD) 781
 Container-Mischer 703
 Continuous Mixer 521
 Continuous Processor (FCM) 355
 Coperion 354
 Corioliswaage 690
 Coupling Agents 150
 CRD-Mischer 375

D

Da/Di-Entwicklung und Verfahrenslängen 240
 Da/Di-Verhältnis 204, 207, 264
 Da/Di von 1,55 Coperion
 – 1,66 Leistritz 238
 Dämmanwendung 286
 Dampf 745
 Dampfdruck 67, 542
 Dampfstrippung 101
 Darcy-Gesetz 772
 Dehnströmung 384, 459, 587
 Dehnviskosität 303
 Dekompressionszone 371
 Dichte 67, 288, 308, 313
 dichtkämmende Doppelschnecke 397
 dichtkämmende, gleichläufige Doppelschnecken
 PWE 439
 Dichtlinie 741

- Dickenmessung 570
 Differentialgleichung, gewöhnlich 308
 Differenzdruck 742
 Differenzialdosierwaage 18
 Diffusion 112, 115
 Diffusion, numerisch 604
 Diffusionskoeffizient 71
 diffusiver Stofftransport 71
 dimensionslose Kennzahlen
 – Gasdispersion 621
 dimensionslose Konzentration 73
 Direktverarbeitung von Recyclingmaterialien 689
 diskontinuierliche Aufbereitung
 – Batchverfahren 349
 diskontinuierliches Compoundieren 184
 Dispergiertgüte 827
 Dispergierhilfsmittel 219
 Dispergiering 284, 433
 Dispergierung 312, 827, 829
 Dispergierverhalten 607
 Dispergierzone 269
 Dissipationsleistung 53
 DMA 828
 Doppelschneckenextruder 200
 Doppelschneckenextruder, gegenläufig 521
 Doppelschneckenextruder, gleichläufig 519
 doppelte Schrägverzahnung 741
 Dosieren 735, 749
 Dosiergenauigkeit 700
 Dosierpumpe 748
 Dosiersystemen 748
 Dosierung 262
 – gravimetrisch 262
 Dosierung von Feststoffen 174
 Dosierwaage 682
 Dosierzone 303
 Drehmomentbegrenzter Prozess 187
 Drehmomentbegrenzte Verfahren 242
 Drehmomentdichte 33, 188, 237, 510
 – 18 Nm/cm^3 237
 Drehmomenten von Welle und Getriebe 178
 Drehmomentfaktor 412
 Drehmomentlimitierung 231
 Drehmomentmessung 380
 Drehrohr 685
 Drei-Zonen-Schnecke 363
 Druck 308, 313
 Druckaufbau 303, 368, 502, 509
 Druckaufbausystem 475
 Druckaufbauvermögen 203, 360
 Druckaufbauzone 202, 223, 316
 Druckaufnehmer, piezoresistiv 821
 Druck-Durchsatzregelung 354
 Druck-Durchsatzverhalten 204
 Drücke in Silos 659
 Druckfiltertest 829
 Druckleistung 308
 Druckmesstechnik 819
 Druck- und Leistungscharakteristiken von
 Extrudern 193
 Druckverlauf 648
 Druckverlustvielfaches
 – Druckverlust gegenüber Leerrohr 612
 Druckverlustvielfaches z vom Leerrohr
 – statische Mischer 617
 Dryblend 708
 Dry-Blend 160
 DSC 828
 Durchsatzdichte 37, 510
 – je Welle, gleich 39
 Durchsatzdichte je Welle 38
 Durchsatzkennzahl 36
 Durchsatzsteigerung mit FET
 – Seitenbeschickung 247
 Durchströmungsgeschwindigkeit 671
 Düsenplatte 796
 Dynamic Mixing Ring 376
- E**
- Eichreihe 152
 Eigendurchsatz 203
 Einarbeiten von Füllstoffen
 – Aufbau des Extruders 251
 Einflussgrößen bei der Schmelzefiltration 770
 eingängige Schneckenelemente 173
 Einlaufkennzahl 76
 Einmischen geringer Mengen 614
 Einsatzgrenze statische Mischer 615
 Einspritzbolzen 472
 Einspritzring 441
 Einspritzrohre und -ventile PWE 441
 einstellbare statische Mischer 622
 Eintrittstemperatur 71
 Einwellenextruder 352, 359, 518
 Einzugslimitierung 231
 Einzugsverhalten 397
 Einzugszone 207, 302, 311, 315, 365, 407,
 488
 Einzugszylinder mit Einzugschnecke PWE 436
 EJK Model 400

- elektrischen Beheizung
 - Extruder 43
 - energetisch mittlere Produktaustrittstemperatur 42
 - energetisch mittlere Temperatur 623
 - energetisch mittlere Temperaturerhöhung 620
 - Energieabsorptionsvermögen 291
 - Energiebedarf für die meisten Compoundierprozesse 0,15 und 0,25 kWh/kg 239
 - Energiebilanz 308, 313, 509
 - Energieeintrag 223, 712
 - Energieeintrag, spezifisch 156, 230, 319, 493
 - Energie, spezifisch 506
 - Energieströme 70f.
 - Energieverbrauch 501
 - Energiezertifizierung 144
 - Energiezufuhr ohne Wandung 101
 - Entfärbeversuch 599
 - Entgasen 65 ff., 70 ff., 74, 78 ff.
 - Entgasung 113, 270, 285, 385, 485, 496, 509, 541
 - Entgasung in der Feststoffphase 111
 - Entgasung PWE 442
 - Entgasungsaufgabe 71
 - Entgasungsdauer 114
 - Entgasungsextruder 371
 - Entgasungs-Kennzahl 74 ff., 78 ff.
 - Entgasungsöffnung 221
 - Entgasungsring 449
 - Entgasungssilo 110, 119, 123
 - Entgasungs- und Reaktions-Modul (ERMO) PWE 446
 - Entgasungszone 70, 220, 311, 407
 - Entgasungszylinder 450
 - Entgasung über eine nachgeschaltete Einschnecke PWE 448
 - Entlüftung 698
 - Entmetallisieren 133
 - Entmischung 135, 704
 - Entmischungerscheinung 667
 - Entmischungerscheinungen 633
 - Entmischung von Feststoffen 173
 - Entspannungsverdampfung 542
 - Entwicklungsarten 147
 - Erdmenger-Patente
 - Lizenz ab 1953 236
 - Erdmengerprofil 279
 - Erlös 358
 - Erweichungstemperatur 115
 - Evolventenverzahnung 421, 737
 - Expansion 297
 - Expansionsgrad 288
 - Explosionsgrenze, untere 112, 119
 - Extraktions-Zahl 543
 - Extruderbauart 504
 - Extruderbauarten 349
 - Extruder-Durchmesser 5mm
 - Gleichläufer 199
 - Extrudergehäuse 138, 382
 - Extruder L/D > 100 199
 - Extruder mit hohen Durchsätzen 236
 - Extrudervergleich 513
 - Extrusionsanlage 362
- F**
- Fallfilmverdampfer 66, 75
 - Falleitungen
 - Dosierung 693
 - Fallrohrverdampfer 98
 - Faltungintegral
 - Verweilzeitverteilung Kaskade 59
 - Farbe 143, 151
 - Farbentwicklung 152
 - Farbmessung 825
 - Farbmittel 151, 163
 - Farbmuster 153
 - Farbwechsel 603
 - Farrel-Continuous-Mixer 484
 - Fasergrößenverteilung 272
 - Fasermorphologie 272
 - Faseroptischer Sensor 453
 - Fehleranalyse 413
 - Fehlerquellen Scale-Up 624
 - Fehlverteilung 100
 - Festbettdurchströmung 122
 - Festigkeit eines Werkstoffs
 - Härte 322
 - Festigkeits-Betrachtung
 - Welle Da/Di 190
 - Festkörperreibung 743
 - Feststoffkanal 369
 - Feststoffmischung 373
 - Feuchtegehalt Kreide 259
 - Feuchtigkeit 801
 - FiberXpert 689
 - Filter 759
 - Filterelement 759
 - Filterflächenlast 780
 - Filtergehäuse 759
 - Filterkerzen 760

- Filtermedien 753
 - Filterscheiben 761
 - Filtersystem 759
 - Flachs 272
 - Flammschutzmittel 150, 162, 477, 803
 - Flankenspalt 409
 - flexible Partikel 752
 - Fließbett 112
 - Fließeigenschaften 116, 639
 - Fließfähigkeit 402
 - Fließprofile 637
 - Fließtemperaturbereich 28
 - Fließverhalten 116, 143
 - Flory-Huggins-Theorie 68
 - Flotronics-Mischsilo 675
 - Fluidisierung 113
 - Fluidmischer 711
 - Fluoreszenzanalyse 312
 - Flüssigkeit 745
 - Flüssigkeitsdosierdifferenzialwaage 691
 - Fogging 110, 116
 - Folienabzugsmaschine 583
 - Folienanlage 357
 - Foliendicken
 - Platten 572
 - Folienstreckanlagen 582
 - Förderelement 136, 202, 306, 468, 591
 - Förderelement, gefüllt 206
 - Förderelement, teilgefüllt 206
 - Förderkennzahl 589
 - Förderkennzahl Λ 192
 - Förderparameter, kinematischer 203
 - Förderschwankungen 739
 - Förder- und Wirkprinzip PWE 422
 - Förderverhalten 202, 364
 - Förderzone 407
 - Fourier-Zahl 622
 - Freiheitsgrad 497
 - Freistich 408
 - fremddosiert 18, 177
 - Fremddosierung 61, 184
 - Frequenzumrichter 178
 - Fressen des Lagers 746
 - Froude-Zahl 704
 - Füllgrad 135, 151, 206, 308, 313, 536
 - Füllgrad PWE 424
 - Füllstandkontrolle 635
 - Füllstoff 150, 477, 803
 - Füllstoffe 164, 255
 - Füllstoffgehalt 151
 - Füllstoffzugabe und Benetzung 268
 - Füllteil 284
 - Füllteil PWE 436
 - Funktionsprinzip der Feed Enhancement Technology (FET) 245
 - Funktionszonen eines Extruders 183
- ## G
- Gangtiefe 364
 - Gasdispargierung 621
 - gebohrte statische Mischer 616
 - Gegendruck 365
 - gegenläufige Doppelschnecke 398
 - Gegenläufige Doppelwellenextruder 355
 - Gehäusebesatz 305
 - Gehäusekühlung 509
 - Gehäusetemperaturierung 472
 - Gele 772
 - Gelierung 398
 - geometrische Größen
 - Doppelwellenextruder 193
 - Geradverzahnung 741
 - Geruchsbelästigung 110
 - Geruchsverhalten 116
 - Gesamtdruckverlust 778
 - Gesamtemission 116
 - Geschwindigkeitsverlauf Parabel- und Kolbenprofil 623
 - Gewindeelement 202
 - Gewindewellendichtung 740
 - Gewindewellendichtungen 745
 - Gewöll 273
 - Glasfaser 151, 307, 803
 - Glaskugel 151
 - Glattrohr-Extruder 365
 - Glättwalzen 577
 - Gleichgewichtsbeziehung 67ff.
 - Gleichläufiger Doppelschneckenextruder 270, 354
 - gleichmäßigen Zufallsmischung 707
 - Gleitlager 742, 750
 - Gleitlagerkühlung 739
 - Gleitmittel 150, 274
 - Grafitpackungen 740
 - Granulierkopfgehäuse 796
 - Granuliersystem 787
 - Granulierung 140, 787
 - Gravimetrische Dosierung 683
 - Grenze thermische Produktschädigung 22
 - Großflächenfilter 758
 - Gummicompound 391

Gummimischung 390
Gusswalzen 566

H

Hagen-Poiseuille 791
Halbzeug 362
Hart-PVC 479
Hartstoffbeschichtungen 338
Hauptaufgabe beim Compoundieren 183
Heißabschlag-Granulierung 787
Heizkanäle 740, 745
Heiz-Kühl-Mischer 270
Heizmischer 702
Heizpatronen 745
Henrysches Gesetz 68
Herstellkosten 506
Herstellung Polymerblends 157
Herstellungskosten 129
Hochdruckkapillarrheometer 822
Hochscher-Schneckenbesatz 312
Hochviskoseindampftechnik 94, 97
Hochviskosreaktor 358, 525, 529
Hochviskostechnik 16
Holzmehl 803
Homogenisiersilo 666
Homogenisierung 368
Hosenrohradapter 404
Hubbewegung, axial 457
Hybridspindel 428
hydrodynamischer Schmierfilm 742

I

Igelspindel 427
Impfstelle
– Seitenstromzugabe 621
Inertgas 81
Infrarotspektroskopie 826
Infrarotthermometer 819
Innenmischer 392
Intensiv-Mischer 708
Investitionskosten 506

J

Jenike 642
Jute 272

K

Kabelcompound 477
Kalander 357, 479, 548
Kalanderanzahl 1500 PVC 548
Kalanderbauformen 559
Kalandergeschwindigkeiten bis zum Wickler 567
Kalibrierung 816
Kaltabschlag-Granulierung 787
Kalziumkarbonat 166, 747
Kalziumkarbonat (CaCO_3)
– Kreide 257
Kammerförderwirkung 412
Kapillardruckaufnehmer 820
Kaskade 59
Kaskadenanordnung 408
Kautschuk 603
Kautschukextruder 34
Kenics-Mischer 612
Kenngrößen D_a/D_i 189
Keramik 750
Kerbschlagzähigkeit 401
Kerzenfilter 760
Kinematische Selbstreinigung 186
Knetblock 136, 591
Knetblöcke 279
Knetbolzen 457, 470
Knetelement 306, 468
Knetergehäuse 464
Knetewelle 464
Knetflügel 457
Knethaken 529
Knetreaktor 529
Knetscheibe 591
Knetströmungen
– Kalander 568
Knetzahn 457, 470
Knetzone 409
kohäsionsloses Schüttgut 631
Kohle 750
Kohlefaser 151
Ko-Knetter 353, 455, 519
Kolbenpumpen 691
Kolsterisieren 334
Kompaktwärmetauscher 627
Komponentenmengenbilanz 604
Kompressionsverhältnis 364
Kompressionszone 367
konische Doppelschnecke 408
konischer Doppelwellenextruder 354

konischer Gleichlaufextruder 354
 Konkurrenz zwischen Siebwechslern und
 Großflächenfilter 783
 Kontaminationsquellen 752
 Kontinuierlicher Mischer 716
 kontinuierlicher Siebwechslers 765
 Konzentration 600
 Konzentrationsdifferenz 73
 Konzentrationsverlauf 73f.
 Konzentrationsverteilung 606
 Korngrößen 747
 Korrosion 137, 321, 388
 Kostenverlauf 358
 Kühlleistung im Produktionsmaßstab 45
 Kühlluft 799
 Kühlluftgranulator 798
 Kühlmischer 702
 Kühlwalzen 569
 Kühlzone 303
 Kunststoff 12
 Kunststoff, technisch 799
 Kunststoffverarbeitung 352
 K-Wert 402

L

Labor-Dreiwälzwerke 357
 Laborextruder 312
 Laborrheometer 822
 Lagerung
 – der Schneckenwellen 350
 laminare Strömung 612
 Längsmischung 55
 LDPE 518
 Leckage 740
 Leichtbauanwendung 286
 Leistung 537
 Leistungsangebot von Extrudern 33
 Leistungsbedarf 205
 Leistungsbedarf beim Compoundieren 29
 Leistungsdichte 33, 189, 511
 Leistungsdichte im Schmelz 40
 Leistungs-Durchsatzverhalten 206
 Leistungsparameter B_2 195
 Leistung, spezifisch 506
 Leistungsverhalten 202
 Lichtmikroskopie 827
 Limitierung der Finishentgasung 85
 Lochfraßkorrosion 332
 Lochplatte 796
 Luftgranulierung 140

M

Maddock-Scherteil 374
 Magnetkupplung 750
 Maldistribution 100
 Maleinsäureanhydrid 276
 Mangelschmierung 744
 Mapping-Methode 609
 Marktverfügbarkeit und Wettbewerb 185
 martensitischer Edelstahl 749
 Maschinenstundensatz 129
 Massenanteil 67
 Massenbilanz 72
 Massenfluss 112, 120
 Massenflusssilo 631
 Massenkonzentration 68
 Massenstrom 70, 76
 Massenstromdichte 72
 Maßstabsübertragung 180, 545
 Masterbatch 164, 390, 503, 804
 Materialförderung 131
 maximale Leistungsdichte 36, 189
 Maximales Produktvolumen
 – im Extruder 195
 mechanische Brücken
 – Dosieren 683
 mechanische Eigenschaften 117
 Mehrkammer-Mischsilo 678
 Mehrschichtextrusion 575
 mehrstufig 371
 Mehrwellenextruder 603
 Mehrwellige Extruder 356
 Melt Flow Index 745
 Messerwelle 796
 Messmolch 138
 Messtechnik 815
 Metalldrahtgewebe 754
 Metallfaservliese 756
 Metallgewebelaminat 755
 Meteringzone 352, 368, 408
 MFR 822
 Mindest-Antriebsleistung von Extrudern 31
 Mindestbeanspruchung 593
 Mindestverweilzeit 57
 Mindest-Verweilzeit 59
 Mineral 151
 Minipresseur 569
 Mischdamm 496
 Mischelemente 184, 306, 373
 Mischelemente für die Einarbeitung von
 Glasfasern 243

Mischen 586
 Mischen, axial 464
 Mischen, dispersiv 215, 384, 459, 485, 591
 Mischen, distributiv 215, 459, 485, 586
 Mischen, homogen 586
 Mischen, längs 383
 Mischen, quer 383
 Mischen von Schüttgütern 703
 Mischer 375, 485, 487
 Mischer SMX Plus 615
 Mischer, statischer 303
 Mischgüte 180, 374, 599, 606, 717
 Mischgüte und Probengröße 624
 Mischintensität 493
 Mischleistung 50, 53f., 509
 Mischleistung eines Statikmischers 52
 Mischleistung und Mischqualität 53
 Mischqualität 53f., 509
 Mischqualität und Mischleistung 54
 Mischreibungsbereich 743
 Mischreihenfolge 135
 Mischsegment 496
 Mischsilo XXIII, 665
 Mischsilos mit pneumatischem Energieeintrag 671
 Mischungszustände 703
 Mischverhalten 217, 539, 604
 Mischvorgang, laminar 603
 Mischwerkzeug 134, 704
 Mischwirkung 383
 Mischzeit 135
 Mischzone 215, 292, 303, 311, 316, 488
 Mitreißgefahr
 – Staudruck 172
 mittlere Konzentration 72
 mittlere Produktverweilzeit im statischen
 Mischer 618
 Mittlere Verweilzeit
 – Messung, innere Geometrie 60
 modularer Systembaukasten PWE 435
 Modulbauweise 184
 Mohr 641
 Monomer 541
 Monomer zum Kunststoff 11
 Mooney 745
 Multifunktional 184
 Multi-Pipe-Mischsilo 677
 Multiprozesselement 280
 MVR 143

N

Nachhaltigkeit 144
 Nachkühlstrecke 799
 Nachteile des gleichläufigen Doppelschnecken-
 extruders 186
 Nachteile statische Mischer 612
 Nahrungsmittel 482
 Naturfaser 270, 803
 Neuronales Netz 834
 newtonsche Flüssigkeiten 746
 Newtonsches Reibungsgesetz 774
 Newton-Zahl 537
 nicht dichtkämmende Schneckengeometrie
 355
 nichtkämmender Extruder 398
 Nickel-Silber-Legierung 744, 750
 NIC-Zylinder
 – bei JSW-Extrudern 354
 NIR-Detektor 312
 Nitrieren 328
 Nitrierstahl 741
 nitriert 741
 Noppenspindel 427
 Noppenspindeln 284
 Nukleierung 295
 Nukleierungsmittel 291
 Nutbuchsensextruder 353
 Nutbuchs-Extruder 365

O

Oberflächenchemie 347
 Oberflächen-Volumen-Verhältnis 156, 385,
 387
 – Doppelschnecke 196
 Oligomer 541
 Online-Messung 303
 Online-Prozesskontrolle 144
 optimales D_a/D_f -Verhältnis 199

P

PA6 31
 Partialdruck 67
 Particle-Tracking 604
 Partikelgröße 632
 Partikelgrößenverteilung 634
 Partikelschaum 288
 PC
 – Polycarbonat 25

PC+GF 39
Péclet-Zahl 79
Permeabilität 773
Personalkosten 129
PET 390, 799
Pfeilverzahnung 741
Pflichtenheft 515
Phasengrenzfläche 542
Phasengrenzflächen-Koordinate 79
physikalische Mischungen 157
PID-Regler 747
Pigmente 150, 747
Planeteneinzugszylinder 283, 437
Planetspindelkonfiguration 424
Planetspindellängen 429
Planetspindeln 417
Planetwalzenextruder 271, 356, 416, 524
Plasmanitrierverfahren 331
Plastifizierextruder 362, 365
Plastifizierung 368
Plastifizierzone 210, 279, 303
PMMA 799
pneumatische Förderung 123
Polyamid 307, 799
Polykarbonat 312, 799
Polykondensation 87f., 541
Polymer 12
Polymerblend 15, 157, 390
Polymerentwicklung 145
Polymerisation 541
Polymerschmelzen 746
Polymerwerkstoff, geschäumt 286
Polyolefin 274, 312, 390, 477, 503, 794
Polypropylen 824
Polyreaktionen 15
Polystyrol 503, 799
Porosität 777
Powder Purge Bins 111
Pralltrockner 802
Prinzip des Planetwalzenextruders 416
Produktanforderung 145
Produktaustrittstemperatur 509
Produktempfindlichkeit 516
Produktentwicklung 145
Produktförderung 536
Produktionshistorie 154
Produktionskosten 130
Produktionsmaßstab 145
Produktqualität 139
Produktvielfalt 131
Produktwechsel 130

Produktwechselzeit 383
Profilparameter A1 192
Profilparameter 41
Prozessabschnitt 381
Prozessparameter 115, 148
Prozessraum 382
Prozessrheometer 823
Prozessvariablen 493
Prozessvolumen 529
Prozesswasser 797
Prüfmethode 115f., 155
Pulsationen 741
pulsationsfrei 741
Pulsationsverhalten 741
pulverförmige Kunststoffe 397
Pulverlack 480
Pulvermischer 134
Pumpenleistung 53
Pumpleistung 53, 186
Pumpwirkungsgrad 48, 173, 195, 224, 352
PVC 27, 477, 479, 503, 798
PVC-Aufbereitung 400, 708
PVC Dryblend 397
PVC-Korn 399
PVC Pulvermischung 397
PVD Beschichtung 342

Q

Qualitätsanforderung 129, 143
Qualitätsbegrenzte Verfahren 249
Qualitätskontrolle 142, 154
Qualitätsnorm 144
Quermischung 55
Quervermischung 587

R

Radiales Spannungsfeld 645
Radikalkettenabbrecher 163
RAM-Extrusion 397
Randschichthärten 328
Randschichtwärmebehandlung 323
Randstreifen als Abfallprodukt 558
Rasterelektronenmikroskopie 827
Reaktivextrusion 390
Recompounding 13
Recycling 83, 312, 390, 480
Recycling Additive 161
Recyclingquote 144

- Regelung, modellprädiktiv 833
 Reinigungszeit 131
 Reinstoff 67
 repräsentative Schergeschwindigkeit 777
 Restfeuchte 274, 801
 Restmonomer 110
 Restmonomergehalt 111
 Reynolds-Zahl 76, 537
 Rezeptur 148, 153, 714
 Rezepturkomponenten 402
 Rezepturproblem 413
 Rezirkulation 669
 Rezyklate 163
 Rheologie 821
 Rieselfähigkeit 788
 Ringextruder 38, 356, 379, 522
 Ringkanal 120
 Ring-Scheibenreaktor
 – Scheibenreaktor 90
 Rohr 397
 Rohrbündelwärmetauscher 95
 Rotationssiebwechsler 768
 Rotor 485, 529
 Rotorflügel 488
 Rotororientierung 490
 Rückförderelement 279
 Rückspülbarer Siebwechsler 767
 Rückstauzone 202
 Rückverfolgbarkeit 714
 Rückwärtsentgasung PWE 444
 Rührkesselreaktor 529
 Ruß 391, 477, 747
 Rüstzeit 131
- S**
- Scale-Down 178, 306
 Scale-Up 155, 306, 389, 624, 712
 Scale-Up durch Skalierung der Abmessungen
 623
 Scale-Up-Exponent 179
 Scale-Up Methode 625
 Scale-Up-Methode mit dem Exponenten x
 – statische Mischer 617
 Scale-Up statische Mischer 623
 Scale-Up- und Scale-Down-Betrachtungen 37
 Schachtbildung 632
 Schachttrockner 124
 Schaumcharakterisierung 288
 Schaumdichte 288
 Schäumen, chemisch 291
 Schäumen, physikalisch 291
 Schaumextrusion 291
 Schaumkunststoff 286
 Schaummorphologie 288
 Schaumverdampfers 104
 Scheibenfilter 762
 Scheibenmischermodul 616
 scheinbare Schergeschwindigkeit 775
 Scherbelastung 607
 Schereinwirkung 135
 Schergeschwindigkeit 460
 Scherrate 494, 597
 Scherströmung 384, 587
 Schertorpedo 374
 Scherung 746
 Scherviskosität 303
 Schichtdickenverringderung
 – statische Mischer 618
 Schießen von Schüttgut 633
 Schlagzähigkeit 827
 Schlagzähmodifizier 401
 Schlangrohrverdampfer 97
 Schlaufenverdampfer 104
 Schleppmittel 103, 222
 Schleppmitteldispersierung 104
 Schleppmitteldispersierzone 222
 Schleppströmung 184, 186, 352
 Schmelze-beschickte Extruder 32
 – Hot Feed Extruder 32
 Schmelzecompounding 13, 19
 Schmelzeextruder 362, 370, 485, 487
 Schmelzefilter 263
 Schmelzeförderzone 202
 Schmelzekanal 369
 Schmelzepool 368
 Schmelzepumpe 370
 Schmelzepumpen PWE 454
 Schmelzetemperatur 298, 817
 Schmelzeverteiler 796
 Schmelzeviskosität 279
 Schmidt-Zahl 76
 Schmiertaschen 744, 747
 Schnecke, förderaktiv 203, 206
 Schneckenauslegung 405
 Schneckenbesatz 225, 267, 305, 312
 Schneckendrehzahlen 241
 Schneckenelement 461
 Schneckenknetter 455
 Schneckenkonfiguration 225, 380
 Schneckenlose Extruder 357
 Schneckenmaschinen 66, 78 ff.

- Schneckenprofile
 - Dosierung 688
- Schneckenquerschnittsfläche 45
- Schnecke, überfahren 203, 206
- Schneidkammer 797
- Schneidkreisdurchmesser 796
- Schneidvorgang 787
- Schneidwerk 799
- Schnellarbeitsstählen 325
- Schrägverzahnung 741
- Schubkante
 - Schneckenelement 268
- Schubkantenelement 279
- Schubmischer 711
- Schubspannung 218
- Schüttdichte 151, 270, 367, 788
- Schüttgut-Bewegung 711
- Schüttgutdosierung 682
- Schüttgut-Wärmetauscher 123
- Schutzgas 120
- Schwarze Punkte
 - Black Specks 169
- schwere Baureihen PWE 422
- Schwerkraftfluss-Mischsilos 673
- Schwerpunkte
 - statische Mischer 611
- Segregationsgrad 600
- Seitenbeschickung 283
- Seitenbeschickungsschnecke 264
- Seitenentgasung 275
- selbstregelnde Rückstaulänge 108
- Selbstreinigung 383, 529
- Sensorik PWE 450
- Sensor, virtuell 833
- Sherwood-Zahl 73
- Sicherheitsabschaltungen 748
- Sidefeeder PWE 430
- Siebpaket 831
- Silikat 391
- Silikonöl 538
- Silo 631
- Siloauslegung 631
- Siloschneckenmischer 671
- sintern 325
- Skalierung unähnlich 180
- S-Kurve 99
- Smoothed Particle Hydrodynamics 609
- SMX-Mischer 612
- Solidifizierung 298
- Spannungsspitzen in Silos 661
- Spektralphotometer 452
- spez. Antriebsenergie 412
- Spezifikationsgrenze 25
- Spezifische Antriebsleistung 45
- spezifische Energie der Eingangsströme 29
- spezifische Enthalpie 30
- Spezifischen Energieanteil bei Extrudern 44
- spezifische Wärmekapazität 29
- spezifische Wirkung
 - Mischerbeurteilung 618
- SPH 609
- Sphäroverbundwalzen 566
- Spiel 364
- Spinnpumpen 735
- Spreizkraft 388, 411, 741
- Spritzgießmaschine 352
- Sprühring 440
- Spülgas 111, 120
- Stabilisatoren 162
- Standardabweichung 706
- Standardspindel 426
- Statikmischer 103
- Statische Mischer 48, 611
- Staubanteil 788
- Stauring 469
- steggepanzerter Schnecke 411
- Stegpanzerung 326
- Steifigkeit der Kunststoffprodukte 166
- Steigung 363
- Steuerung 747
- Stichprobe 599
- Stichprobenverfahren 142
- Stickstoff-Überlagerung 693
- Stiftextruder 34, 353
- Stippen 571
- Stoffaustausch 383, 603
- Stoffdaten 308
- Stoffsystem 71
- Stofftransport 72
- Stoffübergangskoeffizient 72f.
- Stoffübergangswiderstand 112
- Stopfbuchse 740, 745
- Stopfschnecke 172
- Stopfwerke PWE 430
- Stößeldruckaufnehmer 820
- Strainer 556
- Strangabsaugung 789
- Strangeinspeisung 562
- Strangextrusion 298
- Stranggießer 789
- Stranggranulator 140, 789
- Stranggranulierung 789, 808

- Strangtransportband 810
 Stromkosten 129
 Strömung, schleichend 587
 Strömungsleistung 308, 313
 Strömungssimulation 603
 Strömungszustand 79
 strukturviskos 746
 Strukturviskosität 623
 Subito 409
 Sulzer Mischreaktor SMR 626
 Suspensionsverfahren 399
- T**
- Talkum 166
 Tandemextrusion 301
 Technikumsversuche 718
 Teilströme 588, 590
 Temperatur 308, 313, 386, 817
 Temperaturdifferenz 791
 Temperaturerhöhung 135
 – Extruder 621
 – statischer Mischer 621
 Temperaturerhöhung durch Scherung 172
 Temperaturfühler 745
 Temperaturleitfähigkeit 791
 Temperaturmessung 471
 Temperatur, mittlere 516
 Temperaturspitzen 516
 Temperaturverlauf 788
 Temperieraggregate PWE 453
 temperierbare statische Mischer 626
 Temperieren 745
 Temperierung 472
 TGA 828
 thermische Oxidation 124
 thermische Temperatur-Zeit-Belastung 170
 Thermochromie 825
 Thermoelement 817
 Thermoplast 272
 Thermoplastanteil 13
 Thermoplaste 13
 Titandioxid 747
 Toner 481
 Totalversagen
 – Rohrbündelwärmetauscher 98
 Tote Ecken 171
 Toten Ecken dead zones
 – dead zones 354
 TPE 477
 TPU-Folienanlage 581
- Tracer 312, 463
 Transfermix 353
 Translationsscheherätes 642
 Transmissionselektronenmikroskopie 827
 Transportsystem 132
 Transportvorgang 202
 Treibmittel 291, 803
 Trend in der Kalenderbeschickung 550
 tribologische Eigenschaft 411
 Trichtergeometrie 647
 Trichterwandneigung 644
 Trocknen 133, 792
 Trocknungsvorgang 792
 Tropfenabscheider 802
 Tropfendispersierung 595
 TT-Spindel 284, 428
 Turbinenpunkt 205
- U**
- Übergangselement 468
 Überkorn 793
 überkritische Gase 103
 Übersättigung 81
 übliche Schüttgutdichten
 – Compoundieren 239
 Ultraschallmesstechnik 833
 Umfangsgeschwindigkeit 713
 Umweltschutz 144
 Universalmischer 134
 Unterwassergranulierung 140, 283, 790,
 804
 Unterwasser-Stranggranulierung 790, 799
 UV-Detektor 312
- V**
- Vakuumdom 275
 Vakuumentgasung 285
 Vakuumkammer 448
 Varianz 706
 Variationskoeffizient 600, 706
 verallgemeinertes Scale-Up 625
 Verarbeitungslinie 486
 Verarbeitung von Kunststoffen 357
 Verbundwerkstoff 272
 Verdichterzone 407
 Verdrängerpumpe 736
 Verdrängerpumpen 735
 Verdrängerströmung 352
 Verfahrenslänge 403

Verfahrenstechnik 148, 154
Verfahrenszone 200
Verfärbungsgrad 275
Verfestigungsspannung 649
Vergleich Einwellenextruder – Zweiwellenextruder 361
Vergüten
– Werkstoffe 321
Vermahlung 133
Vernetzungsmittel 477
Verpackung 132
Verpackungsarten 141
Verschleiß 136, 321, 387, 491, 796
Verschleißbüchsen 322, 326
Verschleißgrenze 139
Verschleiß PWE 421
Verschleißschutz 284
Verschweißen 300
Verstärkungsstoffe 166, 272
Verträglichkeitsvermittler 158
Verweilzeit 87, 112, 118f., 308, 314, 383, 462, 493, 516, 530, 779
Verweilzeitdichte 196
Verweilzeiten im Gasraum 87
Verweilzeitspektrum 274, 383, 405
Verweilzeitsummenkurve 56
Verweilzeitverhalten 232, 538, 607
Verweilzeitverteilung 58, 233, 462, 636
Verzahrter Zwischenring 434
Vibrationsrinnen 686
Viskosität 143, 308, 313, 745
volatile Komponenten 110
Volumenanteil 67
volumenbegrenzter Prozess 187
Volumenbegrenzte Verfahren 244
Volumenbegrenzung 260
Volumenstrom-Kennzahl 78
Volumetrische Dosierung 683
vom Polymer zum Kunststoff 157
Vormischung 134
Vormischung von Feststoffen 21
Vorteile des gleichläufigen Doppelschneckenextruders 184
Vorteile statische Mischer 611
Vortrocknen 133
Vorwärmzone 407
Vorwärts- Rückwärtsentlüftung 266

W

Wägesensoren 692
Wägezelle 684
Walzenextruder 357
Walzenspalt 409
Walzenzylinder 283, 416
Walzwerk 556
Wandfließort 643
Wandreibungswinkel 643
Wandschicht 603
Warmarbeitsstahl 741
Wärmekapazität 308, 313
Wärmeleitfähigkeit 308, 313
Wärmeleitfähigkeiten der Schmelze 166
Wärmestabilisatoren 162
Wärmestabilisierung 150
Wärmestrom 308, 314, 319
– Extrudergehäuse 43
Wärmeträger 454
Wärmeträgeröl 745
Wärmeübergangskoeffizient 792
Wärmeübergang statische Mischer 622
Wärmeübertragung 386
Warmfestigkeit 323
Wasseraufnahme 801
Wasserringgranulierung 812
Wasserrutsche 140
Weber-Zahl 594
Wechselwirkungsparameter 68
Weichmacher 161
Weichmacher bei PVC 160
Weich-PVC 479
Wellendichtung 745
Wellenleistung 308, 313, 319
Wellen/Naben-Verbindungen 237
Wellentemperierung 474
Wendelförderer 140, 793
Wendelrohrverdampfer 97
Wendelscherteil 374
Werkstoff 388
Werkstoffe
– Welle Da/Di 190
wichtigste Durchsatzbegrenzungen, Drehmoment und Volumen 238
wichtigste Extruderkennzahl 179
Wickler 571
Widerstandsthermometer 817
Wirksamkeit der Extruderkühlung 523
Wirksamkeit der Gehäusekühlung 45
Wirkungsgrad 303, 312, 316

Wirkungsweise der Zahnradpumpe 736
Wirkungsweise unterschiedlicher Knetblöcke
250
wirtschaftliches Compoundieren 252
Wirtschaftlichkeit 129
WLF-Gleichung 776
Wood-Plastic-Compounds (WPC) 709

Y

Yellonex-Index 25

Z

Zahnmischelement 137, 217
Zahnräder 741
Zahnradpumpe 303, 572
Zahnradpumpen 353, 691, 735
Zahnscheiben 375
Zeitfließfunktionen 657
Zeitverfestigung 656
Zelldichte 288
Zelldurchmesser 288
Zellkeim 295
Zellwachstum 297
Zentralspindel 417
Zentrifugaltrockner 802

Zerhacker 134
Zerkleinerung 592
Zero-Pellet-Loss 144
Zerteilgüte 594
Zerteilung 592
Zerteilungsgrad 218
Zertifizierung 144
Zirkulation 105
Zirkulationsstrom mit statischen Mischern 622
Zonen einer Doppelschnecke 406
Zonenspindel 428
Zugabepositionen beim Compoundieren 22
Zugversuch 142, 827
Zukunftsperspektiven Dosierung 702
Zusatzstoffe 10
Zuschlagsstoffe 150
Zustandsgrößen
– Prozessgrößen 42
Zweiwellenextruder 200
Zwickelbereich 184
– Schnecke-Schnecke 172
Zwischenring PWE 432
Zylinderwandtemperatur 817