

Inhalt

Vorwort des Herausgebers	XV
Herausgeber und Autoren	XVII
Verzeichnis der wichtigsten Symbole	XXI

Band 1

1	Einführung	1
	Literatur	4
2	Charakterisierung disperser Systeme	7
2.1	Eigenschaften disperser Systeme und ihre Bedeutung für die Verfahrenstechnik	8
2.1.1	Ziel einer Charakterisierung	9
2.1.1.1	Eigenschaftsfunktion – Produktmodell	9
2.1.1.2	Prozessfunktion – Prozessmodell	14
2.1.2	Definition der Messaufgaben und Nutzung der Messdaten	18
2.1.3	Eigenschaften von Einzelpartikeln	20
2.1.4	Verteilungen und Mittelwerte von Partikeleigenschaften	28
2.1.5	Mischungszustand und Anordnung	41
2.1.6	Sensibilität und Kinetik von dispersen Zuständen	43
2.2	Messmethoden für Partikeleigenschaften und ihre physikalischen Grundlagen	45
2.2.1	Messmethoden für Einzelpartikeln	48
2.2.1.1	Zählverfahren zur Ermittlung von Partikelgrößenverteilungen	48
2.2.1.2	Haftkraftmessungen	57
2.2.1.3	Festigkeit von Agglomeraten	60
2.2.1.4	Porositätsmessung	61
2.2.2	Messmethoden am Partikelkollektiv	61
2.2.2.1	Methoden zur Größenbestimmung	61
2.2.2.2	Porositätsmessung	69
2.2.2.3	Festigkeitsmessung	70
2.2.2.4	Integrale Messmethoden	72
2.2.2.5	Partikelanordnung	74
2.3	Messmethoden für veränderliche Zustände	75
2.3.1	Messverfahrenstechnik	76
2.3.2	Onlinecharakterisierung	86
2.4	Qualitätssicherung beim Einsatz von Messmethoden	91

2.5	Ausblick auf zukünftige Entwicklungen	94
	Danksagung	96
	Literatur	97
3	Mechanische Grundvorgänge und Mikroprozesse	101
3.1	Relativbewegung zwischen Partikeln bzw. Partikelkomplexen und einem Fluid	102
3.1.1	Wirkende Kräfte	103
3.1.2	Bewegung starrer Einzelpartikeln in einer stationären Strömung	117
3.1.3	Bewegung deformierbarer Partikeln in einer stationären Strömung	124
3.1.4	Bewegung von Partikelschwärmen	130
3.1.4.1	Stationäre Schwarmsinkgeschwindigkeit	130
3.1.4.2	Bewegung von Partikelschwärmen im Flüssigkeitsstrom auf geneigter Fläche	136
3.2	Durchströmung von Partikelschichten	139
3.2.1	Durchströmungswiderstand	140
3.2.2	Wirbelschichten	145
3.2.2.1	Homogene Wirbelschichten	147
3.2.2.2	Inhomogene Wirbelschichten	150
3.3	Grundvorgänge und Mikroprozesse in turbulenten Strömungen	153
3.3.1	Kennzeichnung turbulenter Strömungen	154
3.3.2	Kennzeichnung und Wirkungen der Makroturbulenz	159
3.3.2.1	Turbulente Diffusion	160
3.3.2.2	Turbulenter Transport disperser Partikeln	162
3.3.3	Kennzeichnung und Wirkungen der Mikroturbulenz	163
3.3.3.1	Grenz-REYNOLDS-Zahl der vollausgebildeten Turbulenz	169
3.3.3.2	Mischprozesse im Makro- und Mikrobereich	170
3.3.3.3	Turbulentes Zerteilen von Partikeln in Flüssigkeiten	172
3.3.3.4	Kollision und Koaleszenz	181
3.4	Bruchvorgänge und Mikroprozesse des Zerkleinerns	183
3.4.1	Partikelbeanspruchung	183
3.4.2	Bruchphysikalische Grundlagen	186
3.4.3	Spannungsfeld und Bruchformen	192
3.4.4	Untersuchungen zum Mikroprozess	197
3.4.5	Mechanische Aktivierung	209
3.5	Wechselwirkungen in grobdispersen Systemen	213
3.5.1	Bindemechanismen und Haftkräfte zwischen festen Partikeln	214
3.5.1.1	Bindung durch Adhäsionskräfte zwischen den Partikeln einschließlich ihrer Adsorptionsschichten	214
3.5.1.2	Bindung mit Hilfe benetzender Flüssigkeiten niedriger Viskosität	228
3.5.1.3	Bindung durch hochviskose Bindemittel	238
3.5.1.4	Bindung durch Festkörperbrücken	239
3.5.1.5	Formschlüssige Bindung	242

-
- 3.5.1.6 Brückenbindung durch organische Makromoleküle in wässrigen Suspensionen 242
 - 3.5.2 Modellierung der Agglomeratfestigkeit 244
 - 3.5.3 Flüssigkeitsbindung in körnigem Gut 248
 - 3.5.4 Agglomerieren (Flocken) und Dispergieren feiner Partikeln in wässrigen Suspensionen durch Beeinflussung der Wechselwirkungskräfte 250
 - Literatur 256

 - 4 Grundlagen mechanischer Makroprozesse 271
 - 4.1 Einteilung mechanischer Makroprozesse 271
 - 4.2 Allgemeines Prozessmodell und Wirkprinzipien 273
 - 4.3 Gewährleistung und Charakterisierung der Stoffströme 279
 - 4.3.1 Gewährleistung der Stoffströme 280
 - 4.3.2 Verweilzeitverhalten in Prozessräumen 282
 - 4.3.3 Vergleichmäßigung der Stoffströme 287
 - 4.3.4 Stoffwertermittlung und Probenahme 291
 - Literatur 296

 - 5 Zerteilprozesse 299
 - 5.1 Zerkleinern 299
 - 5.1.1 Einteilung von Zerkleinerungsmaschinen 300
 - 5.1.2 Brecher 302
 - 5.1.2.1 Backenbrecher 302
 - 5.1.2.2 Kegelbrecher 306
 - 5.1.2.3 Walzenbrecher 308
 - 5.1.2.4 Hammer- und Prallbrecher 312
 - 5.1.3 Mahlkörpermühlen 315
 - 5.1.3.1 Kugelmühlen 316
 - 5.1.3.2 Stabmühlen 327
 - 5.1.3.3 Autogenmühlen 328
 - 5.1.3.4 Planetenmühlen 329
 - 5.1.3.5 Schwingmühlen 331
 - 5.1.3.6 Zentrifugalmühlen 335
 - 5.1.3.7 Rührwerkmühlen 335
 - 5.1.4 Wälz- und Walzenmühlen 344
 - 5.1.4.1 Beanspruchung im Walzenspalt 345
 - 5.1.4.2 Wälzmühlen 349
 - 5.1.4.3 Gutbett-Walzenmühle 353
 - 5.1.5 Prallmühlen 355
 - 5.1.5.1 Grundlagen zur Prallzerkleinerung 355
 - 5.1.5.2 Rotorprallmühlen 359
 - 5.1.5.3 Strahlprallmühlen 367
 - 5.1.6 Modellierung der Zerkleinerungskinetik 371

- 5.1.6.1 Modellbildung 372
- 5.1.6.2 Satzweiser Prozess 374
- 5.1.6.3 Stationärer Prozess 378
- 5.1.6.4 Bestimmung der Zerkleinerungskoeffizienten 379
- 5.1.6.5 Mühle-Klassierer-Kreislauf 381
- 5.2 Zerstäuben von Flüssigkeiten, Suspensionen und Schmelzen 383
- 5.2.1 Zerfallsformen von Flüssigkeitskontinua 385
- 5.2.1.1 Spontaner Strahlerfall aus Einstoff-Druckzerstäubern (Druckdüsen) 385
- 5.2.1.2 Lamellenzerfall aus Einstoff-Druckzerstäubern (Hohlkegeldüsen) 391
- 5.2.1.3 Strahlerfall bei der koaxialen Zweistoff-Gaszerstäubung 393
- 5.2.2 Wirkprinzipien von Zerstäubern 396
- 5.2.3 Sprühtrocknen von Suspensionen 401
- 5.2.3.1 Anlagentechnische Aspekte 402
- 5.2.3.2 Relevante Eigenschaften von Suspension und Feststoff 405
- 5.2.3.3 Bedeutung der Mehrphasenströmung 410
- 5.2.4 Zerstäuben von Metall- und Mineralschmelzen 411
- 5.2.4.1 Gas- und Schmelzeströmungen im Zerstäubungsbereich 414
- 5.2.4.2 Beziehungen für die Tropfengrößen 421
- 5.2.5 Betriebstechnische und konstruktive Einflussnahmen auf die Tropfengrößenverteilung 423
- Literatur 425

6 Agglomerationsprozesse 433

- 6.1 Aufbauagglomeration 435
- 6.1.1 Pelletieren 437
- 6.1.1.1 Pelletbildung und Eigenschaften von Pellets 437
- 6.1.1.2 Pelletierausrüstungen 443
- 6.1.1.3 Pellethärtung 452
- 6.1.2 Mischeragglomeration 454
- 6.1.3 Agglomeration in fluidisierten Partikelschichten 461
- 6.2 Pressagglomeration 464
- 6.2.1 Bildung der Pressagglomerate 466
- 6.2.2 Ausrüstungen für die Pressagglomeration 472
- 6.2.2.1 Stempel- und Tablettenpressen 472
- 6.2.2.2 Formkanalpressen 473
- 6.2.2.3 Walzenpressen 475
- 6.3 Agglomeration in Suspensionen (Flockung) 481
- 6.3.1 Makromolekulare Flockungsmittel 481
- 6.3.2 Verfahrenstechnische Durchführung von Flockungsvorgängen und deren Modellierung 486
- 6.3.3 Selektive Flockung 490
- Literatur 493

Band 2

- 7 Trennprozesse 499
 - 7.1 Kennzeichnung des Trennerfolgs 499
 - 7.2 Klassieren 506
 - 7.2.1 Siebklassieren 508
 - 7.2.1.1 Grundlagen des Siebklassierens 508
 - 7.2.1.2 Modellierung der Makroprozesse 516
 - 7.2.1.3 Siebböden 519
 - 7.2.1.4 Ausrüstungen für die Siebklassierung 522
 - 7.2.1.5 Kennzeichnung des Trennerfolgs von Siebprozessen 544
 - 7.2.2 Hydroklassieren 545
 - 7.2.2.1 Zum Partikeltransport in Zweiphasenströmungen von Hydroklassierern 546
 - 7.2.2.2 Trennmodelle der Hydroklassierung 548
 - 7.2.2.3 Ausrüstungen für die Hydroklassierung 558
 - 7.2.2.4 Kennzeichnung des Trennerfolgs von Hydroklassierprozessen 583
 - 7.2.3 Windsichten 584
 - 7.2.3.1 Schwerkraft-Gegenstrom-Windsichter 586
 - 7.2.3.2 Fliehkraft-Gegenstrom-Windsichter 591
 - 7.2.3.3 Querstrom-Windsichter 605
 - 7.2.3.4 Kombinierte Sichtprinzipien, Umluftsichter 610
 - 7.3 Sortieren 612
 - 7.3.1 Verwachsungs-(Verbindungs-) bzw. Aufschlusszustand von Partikelkollektiven 613
 - 7.3.1.1 Wechselbeziehungen zwischen Dispersitätszustand und Aufschlusszustand 615
 - 7.3.1.2 Aufschluss- und Verwachsungsanalyse 618
 - 7.3.2 Dichtesortierung 627
 - 7.3.2.1 Schwimm-Sink-Sortierung 628
 - 7.3.2.2 Sortierung durch Setzen 634
 - 7.3.2.3 Sortierung in Rinnen und auf Herden 640
 - 7.3.2.4 Gegenstrom- und Querstromsortierung 646
 - 7.3.2.5 Kennzeichnung des Trennerfolgs eines Dichtesortierprozesses 649
 - 7.3.3 Sortierung in Magnetfeldern 651
 - 7.3.3.1 Magnetscheidung 652
 - 7.3.3.2 Wirbelstromsortierung 687
 - 7.3.3.3 Magnetohydrostatische Sortierung 700
 - 7.3.4 Sortierung in elektrischen Feldern (Elektrosortierung) 703
 - 7.3.5 Flotation 715
 - 7.3.5.1 Gestaltung des Reagensregimes 718
 - 7.3.5.2 Hydrodynamik von Flotationsprozessen 726
 - 7.3.5.3 Flotationsapparate 728

7.3.5.4	Industrielle Anwendung von Flotationsprozessen	738
7.3.6	Klauben	739
7.3.6.1	Handklauben	740
7.3.6.2	Automatisches Klauben	741
7.4	Flüssigkeitsabtrennen und -klären	747
7.4.1	Sedimentation	748
7.4.1.1	Sedimentation im Schwerkraftfeld	748
7.4.1.2	Sedimentation im Zentrifugalkraftfeld	781
7.4.2	Filtration von Flüssigkeiten	801
7.4.2.1	Druck- und Vakuumfiltration mit Kuchenbildung	804
7.4.2.2	Pressfiltration	846
7.4.2.3	Schwerkraftfiltration	851
7.4.2.4	Zentrifugalkraftfiltration	853
7.4.2.5	Querstromfiltration	860
7.4.2.6	Tiefenfiltration	873
7.5	Entstaubung	882
7.5.1	Entstaubung im Zentrifugalkraftfeld	883
7.5.1.1	Grundform des Zyklonabscheiders	884
7.5.1.2	Umfangsgeschwindigkeit	886
7.5.1.3	Grenzpartikelgröße	889
7.5.1.4	Fraktionsabscheidegrad	891
7.5.1.5	Gesamtabscheidegrad	892
7.5.1.6	Druckverlust	892
7.5.1.7	Vergleich experimenteller und berechneter Ergebnisse	894
7.5.1.8	Besondere Bauformen und Zyklonschaltungen	897
7.5.1.9	Optimalzyklone	900
7.5.2	Filtration	904
7.5.2.1	Filtrationsprozess	905
7.5.2.2	Filtermedien	916
7.5.2.3	Filterbauarten	920
7.5.2.4	Auswahl und Auslegung	927
7.5.3	Elektrische Staubabscheidung	932
7.5.3.1	Wirkprinzip	932
7.5.3.2	Mikroprozesse und Grundvorgänge	934
7.5.3.3	Sekundäreinflüsse auf die Partikelabscheidung	950
7.5.3.4	Wichtige Bestandteile und verschiedene Bauformen	956
7.5.3.5	Auslegung von Abscheidern	967
7.5.4	Nassabscheidung	970
7.5.4.1	Nassabscheiderbauarten	970
7.5.4.2	Abscheideleistung	974
7.5.4.3	Wirkungsweise	976
7.5.4.4	Druckverlust	981
	Literatur	985

8	Mischprozesse	1015
8.1	Mischen von Feststoffen	1016
8.1.1	Kennzeichnung des Mischungszustands	1017
8.1.2	Mechanismen, Wirkprinzipien und Kinetik des Feststoffmischens	1023
8.1.3	Mischer	1032
8.1.3.1	Rotierende Mischbehälter	1032
8.1.3.2	Mischbehälter mit rotierenden Agitationsorganen	1034
8.1.3.3	Pneumatische Mischer	1038
8.1.3.4	Bunker- bzw. Silomischer	1039
8.2	Mischen von Fluiden	1041
8.2.1	Mischgüte, Mischungsverlauf	1043
8.2.2	Kontinuierliches Mischen in statischen Mischern und Strahlmischern	1045
8.3	Rühren	1049
8.3.1	Einfluss der REYNOLDS-Zahl und der Viskosität	1053
8.3.2	Einfluss der Behälterform und der Einbauten	1055
8.3.3	Rühren im turbulenten Bereich	1057
8.3.3.1	Strömungsformen und Rührerauswahl	1058
8.3.3.2	NEWTON-Zahlen	1061
8.3.3.3	Trombenbildung und NEWTON-Zahlen bei unbewehrten Behältern	1067
8.3.3.4	Oberflächenbegasung	1069
8.3.3.5	Impulsstrom-, Zirkulationszahlen und Dissipationsbeiwerte	1070
8.3.4	Rühren im laminaren Bereich	1080
8.3.4.1	Gebiete mit stark behindertem Stofftransport	1081
8.3.4.2	NEWTON-Zahlen	1084
8.3.4.3	Nicht-NEWTONSche Fluide	1085
8.3.5	Mischen in Rührerausrüstungen	1090
8.3.5.1	Turbulenter Bereich	1092
8.3.5.2	Laminarer Bereich	1095
8.3.5.3	Nicht-NEWTONSche Fluide	1099
8.3.5.4	Einmischen leichterer Flüssigkeiten	1100
8.4	Suspendieren	1101
8.4.1	Suspendierkriterien	1102
8.4.2	Rührer- und Sedimentationsleistung	1105
8.4.3	Suspendiermodelle 1s-Kriterium	1107
8.4.3.1	Suspendieren bei niedrigen Feststoffgehalten	1108
8.4.3.2	Einfluss des Feststoffanteils auf die Suspendierdrehzahlen	1111
8.4.4	90 %-Höhenkriterium	1116
8.4.5	Rührervergleich und Maßstabsübertragung	1118
8.5	Dispergieren flüssig-flüssig	1119
8.6	Begasen in Rührerausrüstungen	1122
8.6.1	Hydrodynamik	1123
8.6.2	Überflutungspunkt	1125

- 8.6.3 Minderung der Leistungsaufnahme 1128
 - Literatur 1129

- 9 Lagern von Schüttgütern 1137
 - 9.1 Spannung-Dehnung-Verhalten von Schüttgütern 1139
 - 9.1.1 Beanspruchungszustand 1141
 - 9.1.2 Fließkriterien 1143
 - 9.1.2.1 MOHR-COULOMBSches Fließkriterium 1144
 - 9.1.2.2 Verhalten realer Schüttgüter 1146
 - 9.1.3 Zusammenhang zwischen Spannung und Dehnung 1147
 - 9.2 Messen der Fließeigenschaften von Schüttgütern 1150
 - 9.2.1 Messprinzipien 1150
 - 9.2.2 Translations- und Rotationsschergeräte 1151
 - 9.2.2.1 Modellvorstellung „einachsiger Druckversuch“ 1151
 - 9.2.2.2 Ermittlung von Fließorten 1153
 - 9.2.2.3 Ermittlung der Fließeigenschaften aus Fließorten 1156
 - 9.2.2.4 Praktische Messungen mit Translations- und Rotationsschergeräten 1158
 - 9.2.2.5 Messen von Zeitverfestigung und Wandreibung 1164
 - 9.2.2.6 Anmerkungen zu Translations- und Rotationsschergeräten 1168
 - 9.2.3 Schergeräte für wissenschaftliche Untersuchungen des Spannung-Dehnung-Verhaltens von Schüttgütern 1170
 - 9.2.4 Messverfahren zur Ermittlung der Fließfähigkeit 1173
 - 9.2.5 Sonstige Messverfahren 1177
 - 9.2.6 Vergleich der Schergeräte 1177
 - 9.2.7 Anisotropie und zeitabhängige Effekte 1179
 - 9.2.8 Stoffmodelle 1186
 - 9.3 Verfahrenstechnische Silodimensionierung 1188
 - 9.3.1 Probleme beim Lagern und Fließen 1188
 - 9.3.2 Fließprofile: Massenfluss und Kernfluss 1191
 - 9.3.3 Brückenbildung 1198
 - 9.3.4 Dimensionierung des Auslauftrichters bei Massenfluss 1201
 - 9.3.5 Dimensionierung des Auslauftrichters bei Kernfluss; Schachtbildung 1205
 - 9.4 Silobetrieb 1208
 - 9.4.1 Siloformen und Varianten 1208
 - 9.4.2 Austraggeräte 1214
 - 9.4.2.1 Aufgabenstellung und Funktion von Austraggeräten 1214
 - 9.4.2.2 Gestaltung von Austraggeräten 1215
 - 9.4.3 Austraghilfen 1222
 - 9.4.4 Einsatz von Austraggeräten und Austraghilfen 1225
 - 9.4.5 Auslaufmassenströme 1230
 - 9.4.6 Dosieren von Schüttgütern 1231

9.4.6.1	Diskontinuierliche Dosierung	1231
9.4.6.2	Kontinuierliche Dosierung	1232
9.5	Spannungen in Silos	1234
9.5.1	Einführung	1234
9.5.2	Spannungsberechnung	1234
9.5.2.1	Verhalten von Schüttgütern bei der Lagerung	1234
9.5.2.2	Berechnungsverfahren (Übersicht)	1238
9.5.2.3	Berechnung der Spannungen im Siloschaft	1240
9.5.2.4	Berechnung der Spannungen im Trichter	1243
9.5.3	Einflüsse auf die Spannungsverteilung	1243
9.5.3.1	Spannungsspitze am Übergang vom aktiven zum passiven Spannungszustand	1243
9.5.3.2	Imperfektionen	1245
9.5.3.3	Exzentrisches Entleeren	1245
	Literatur	1246
10	Sachwortverzeichnis	1255