

Inhaltsverzeichnis

Grundzüge der mechanischen Verfahrenstechnik

*Prof. Dr. Kurt Leschonski, Clausthal; Prof. Dr. Friedrich Löffler, Karlsruhe;
Prof. Dr. Otto Molerus, Erlangen; Dr. Walter Müller, Frankfurt(M)-Höchst;
Dr. Jürgen Raasch, Karlsruhe; Prof. Dr. Klaus Schönert, Clausthal;
Prof. Dr. Helmar Schubert, Karlsruhe; Prof. Dr. Jörg Schwedes, Braunschweig;
Prof. Dr. Werner Stahl, Karlsruhe*

1	Einführung	29
2	Allgemeine Grundlagen	31
2.1	Kennzeichnung und Darstellung von Partikelkollektiven (<i>K. Leschonski</i>)	31
2.1.1	Partikelmerkmale – Mengenarten	31
2.1.2	Graphische Darstellung einer Partikelgrößenverteilung	32
2.1.3	Mittlere Partikelgrößen	33
2.1.4	Verteilungsfunktionen	34
2.1.5	Rechnerische Ermittlung der spezifischen Oberfläche	35
2.2	Bewegungen von Feststoffpartikeln in strömenden Flüssigkeiten und Gasen (<i>J. Raasch</i>)	36
2.2.1	Bewegung einer einzelnen wandfernen Partikel in einer stationären laminaren Strömung	36
2.2.2	Wandeinfluß	39
2.2.3	Strömungswechselwirkung von Partikeln	40
2.3	Strömungen durch Packungen und Wirbelschichten (<i>O. Molerus</i>)	40
2.3.1	Druckverlust bei der Packungsdurchströmung	40
2.3.2	Verfahrensprinzip der Fluidisation, Vor- und Nachteile	40
2.3.3	Lockerungspunkt (<i>Minimalfluidisation</i>)	41
2.3.4	Wirbelschicht-Zustandsdiagramm	42
2.3.5	Schüttguttypen	43
2.3.6	Lokale Struktur der Gas-Feststoff-Wirbelschichten	44
2.3.7	Technische Anwendung des Wirbelschichtprinzips	45
3	Partikelmeßtechnik (<i>K. Leschonski</i>)	46
3.1	Probennahme und Probenteilung	47
3.1.1	Probenteilung von Schüttgütern, Pasten und Suspensionen	48
3.1.2	Probennahme aus strömenden Gasen und Flüssigkeiten	48
3.2	Sedimentationsverfahren	48
3.3	Zählverfahren	50
3.3.1	Mittelbare Zählverfahren	50
3.3.2	Unmittelbare Zählverfahren	51
3.4	Analyse von Beugungsspektren	52
3.5	Analysen-Trennverfahren	52
4	Trennverfahren	53
4.1	Kennzeichnung einer Trennung (<i>K. Leschonski</i>)	53
4.2	Abscheiden von Partikeln aus Gasen (<i>F. Löffler</i>)	55
4.2.1	Beurteilung von Abscheidern	55

4.2.2	Ermittlung des Trenngrades	56
4.2.3	Fliehkraftabscheider	57
4.2.4	Naßabscheider	59
4.2.5	Filter	61
4.2.6	Elektrische Abscheider	63
4.3	Abscheiden von Feststoffen aus Flüssigkeiten (<i>W. Stahl</i>)	64
4.3.1	Trennprinzipien	64
4.3.2	Rechnerische Beschreibung der Vorgänge bei der Fest-Flüssig-Trennung	66
4.3.2.1	Sinkgeschwindigkeit von Einzelpartikeln	66
4.3.2.2	Gesetz der kuchenbildenden Filtration	66
4.3.2.3	Entfeuchtung des Filterkuchens	67
4.3.3	Experimentelle Methoden der Vorhersage	68
4.3.4	Trennverfahren im Schwerfeld	68
4.3.5	Trennverfahren im Fliehkraftfeld	70
4.3.5.1	Diskontinuierliche Zentrifugen	70
4.3.5.2	Kontinuierliche Zentrifugen	71
4.3.6	Filtrierende Trennverfahren mit Differenzdruck	74
4.3.6.1	Diskontinuierliche Filter	74
4.3.6.2	Kontinuierliche Filter	75
4.4	Klassieren in Gasen (<i>K. Leschonski</i>)	76
4.4.1	Verfahrensschritte des Windsichtens	76
4.4.2	Gegenstrom-Windsichter	77
4.4.2.1	Spiralwindsichter	77
4.4.2.2	Abweiseradsichter	79
5	Zerkleinern (<i>K. Schönert</i>)	80
5.1	Grundlagen	80
5.1.1	Partikelzerstörung	80
5.1.2	Zerkleinerungstechnische Stoffeigenschaften	83
5.1.3	Beschreibung von Zerkleinerungsprozessen	86
5.2	Zerkleinerungsmaschinen	87
5.2.1	Brecher	87
5.2.2	Wälzmühlen	88
5.2.3	Mahlkörpermühlen	89
5.2.4	Prallmühlen	91
6	Agglomerieren (<i>H. Schubert</i>)	94
6.1	Bindemechanismen von Agglomeraten – Partikelhaftung	94
6.2	Eigenschaften von Agglomeraten	99
6.3	Grundverfahren des Agglomerierens	102
6.3.1	Aufbauagglomeration	102
6.3.2	Preßagglomeration	104
6.3.3	Sonstige Agglomerierverfahren	105
7	Mischen (<i>W. Müller</i>)	105
7.1	Ablauf von Mischvorgängen	105
7.2	Mischgüte bei dispersen Systemen	106
7.3	Rühren	108
7.3.1	Rührkessel, Rührorgane	108
7.3.2	Leistungsbedarf	108
7.3.3	Mischzeit	110
7.3.4	Wärmeübertragung, Suspendieren und Dispergieren	111
7.4	Mischen in Rohrleitungen	113

7.5	Mischen von Massen, Teigen und Schmelzen	113
7.6	Mischen von Feststoffen	114
8	Bunkern (<i>J. Schwedes</i>)	118
8.1	Fließverhalten von Schüttgütern	118
8.1.1	Fließkriterien	119
8.1.2	Verhalten realer Schüttgüter	120
8.2	Dimensionierung von Bunkern	122
8.2.1	Probleme, Fließprofile	122
8.2.2	Vermeidung von Brückenbildung	123
8.2.3	Austraghilfen, Austragorgane	124
8.2.4	Bunkerauslegung aus statischer Sicht	125
9	Hydraulischer und pneumatischer Transport (<i>O. Molerus</i>)	126
9.1	Hydraulischer Transport	126
9.2	Pneumatischer Transport	127
9.2.1	Vor- und Nachteile der pneumatischen Förderung	127
9.2.2	Förderzustände	128
9.2.3	Auslegung von pneumatischen Förderanlagen	129
9.2.4	Anlagen zur pneumatischen Förderung	133
	Literaturverzeichnis	134

Grundzüge der thermischen Verfahrenstechnik

Prof. Dr. Ulfert Onken, Dortmund
 unter Mitwirkung von
Dr. Peter Weiland, Braunschweig

1	Wärmeübertragung	139
1.1	Grundlagen des Wärmetransports	139
1.1.1	Wärmetransport durch Leitung	140
1.1.2	Konvektiver Wärmetransport	142
1.1.2.1	Wärmeübergang	142
1.1.2.2	Kennzahlbeziehungen	144
1.1.2.3	Wärmeübergang bei Änderung des Aggregatzustands	145
1.1.2.4	Wärmedurchgang	147
1.1.3	Wärmetransport durch Strahlung	148
1.2	Technischer Wärmetransport	150
1.2.1	Einteilung der Wärmeaustauscher	150
1.2.2	Wärmedurchgangskoeffizienten üblicher Wärmeaustauschertypen	152
1.2.2.1	Doppelrohr- und Rohrbündelwärmeaustauscher	152
1.2.2.2	Wärmeaustauscher mit berippten Oberflächen	154
1.2.2.3	Platten- und Spiralwärmeaustauscher	155
1.2.2.4	Wärmeaustausch in Rührkesseln	155
1.2.2.5	Wärmeaustausch in Dünnschichtverdampfern	156
1.2.2.6	Apparate mit direktem Wärmeaustausch	156
1.2.2.7	Wärmeaustauscher mit Wärmespeichern (Regeneratoren)	157
1.2.3	Wirtschaftlichkeitsüberlegungen	158
2	Grundlagen der thermischen Trennverfahren	158
2.1	Phasengleichgewichte	158
2.1.1	Gleichgewichte zwischen gasförmigen und kondensierten Phasen	158

2.1.1.1	Gleichgewichtsbeziehungen	158
2.1.1.2	Phasendiagramme	161
2.1.1.3	Aktivitätskoeffizienten flüssiger Mehrkomponentensysteme	163
2.1.1.4	Vorausberechnung von Aktivitätskoeffizienten	165
2.1.2	Gleichgewichte zwischen flüssigen Phasen	165
2.1.2.1	Gleichgewichtsbeziehungen	165
2.1.2.2	Phasendiagramme	166
2.1.3	Gleichgewichte zwischen flüssigen und festen Phasen	167
2.1.3.1	Gleichgewichtsbeziehungen	167
2.1.3.2	Phasendiagramme	168
2.2	Stofftransport	169
2.2.1	Stofftransport durch Diffusion	169
2.2.2	Stofftransport durch Konvektion	170
2.2.3	Stofftransport durch Grenzflächen (Stoffdurchgang)	172
2.2.3.1	Zweifilmtheorie	172
2.2.3.2	Oberflächenenergetische Theorien	174
2.3	Gegenstromtrennprozesse	174
2.3.1	Vervielfachung des Einzeltrenneffekts	174
2.3.2	Theorie der Trennstufen	176
2.3.3	Kinetische Theorie der Gegenstromtrennung	178
3	Trennverfahren für fluide Phasen	180
3.1	Destillation und Rektifikation	180
3.1.1	Einfache Destillation und Kondensation	181
3.1.2	Kontinuierliche Rektifikation von Zweistoffgemischen	182
3.1.2.1	Vereinfachte Berechnung	183
3.1.2.2	Berechnung unter Berücksichtigung der Wärmebilanzen	185
3.1.2.3	Wirtschaftliche Gesichtspunkte	186
3.1.3	Kontinuierliche Rektifikation von Mehrstoffgemischen	187
3.1.4	Absatzweise Rektifikation	188
3.1.5	Rektifikation mit Hilfsstoffen	190
3.1.5.1	Azeotroprektifikation	191
3.1.5.2	Extraktivrektifikation	192
3.1.6	Rektifizierapparate	194
3.1.6.1	Bodenkolonnen	194
3.1.6.2	Kolonnen mit Packungen	197
3.2	Absorption	199
3.2.1	Trennaufwand	200
3.2.2	Chemische Absorption	203
3.2.3	Absorptionsapparate	204
3.3	Flüssigkeitsextraktion	204
3.3.1	Auswahl des Lösemittels	206
3.3.2	Trennaufwand	206
3.3.3	Extraktionsapparate	208
3.3.3.1	Einstufige Apparate	208
3.3.3.2	Extraktionskolonnen	209
3.3.3.3	Zentrifugalextraktoren	211
4	Thermische Trennverfahren mit festen Phasen	212
4.1	Kristallisation	212
4.1.1	Kinetik der Kristallisation	212
4.1.1.1	Keimbildung	213
4.1.1.2	Kristallwachstum	214
4.1.1.3	Auslegung von Kristallisatoren	216

4.1.2	Kristallisationsverfahren	217
4.1.2.1	Anwendung der Kristallisation	217
4.1.2.2	Kristallisiermethoden	218
4.1.3	Kristallisatoren	219
4.2	Trocknung	222
4.2.1	Trocknungsverlauf	222
4.2.2	Auslegung von Trocknern	224
4.2.2.1	Trocknungszeit bei der Konvektionstrocknung	225
4.2.2.2	Wärmebedarf bei der Konvektionstrocknung	225
4.2.3	Bauarten von Trocknern	227
4.2.3.1	Konvektionstrockner	227
4.2.3.2	Kontaktrockner	229
4.2.3.3	Gefriertrocknung	229
4.3	Feststoffextraktion	230
5	Thermische Trennverfahren an Grenzflächen	231
5.1	Adsorption	231
5.1.1	Grundlagen	231
5.1.2	Anwendung und technische Durchführung	232
5.2	Ionenaustausch	234
5.3	Membranverfahren	235
	Literaturverzeichnis	238

Grundzüge der chemischen Reaktionstechnik

Prof. Dr. Kurt Dialer, München; Prof. Dr. Arno Löwe, Braunschweig

1	Einleitung – Bedeutung der chemischen Reaktionstechnik	242
2	Chemische Reaktion	244
2.1	Stöchiometrie, Thermodynamik	244
2.2	Kinetik	244
3	Reaktion und Transport (Makrokinetik)	247
3.1	Reaktionen in einer Phase	247
3.2	Heterogene Reaktionen	249
3.2.1	Fluidreaktionen mit Feststoffkatalysatoren	249
3.2.2	Heterogene Fluidreaktionen	256
3.2.3	Reaktionen von Feststoffen mit Fluiden	263
3.2.4	Mehrphasensysteme	266
3.2.4.1	Dreiphasensysteme mit Feststoff als Katalysator	266
3.2.4.2	Dreiphasensysteme mit Feststoff als Reaktionspartner	267
3.3	Desaktivierung fester Katalysatoren	268
4	Berechnung von Reaktoren	271
4.1	Grundformen technischer Reaktionsapparate	272
4.1.1	Kennzeichnende Merkmale	272
4.1.2	Technische Betriebsformen	273
4.1.2.1	Satzbetrieb	273
4.1.2.2	Fließbetrieb	273
4.1.2.3	Teilfließbetrieb	274

4.2	Modelle isothermer Reaktoren	274
4.2.1	Idealkessel	276
4.2.1.1	Absatzweise betriebener Idealkessel	276
4.2.1.2	Kontinuierlich betriebener Idealkessel	277
4.2.2	Idealrohr	278
4.2.3	Reaktorschaltungen	280
4.3	Verweilzeitverhalten	282
4.3.1	Verweilzeitverteilung	282
4.3.2	Verweilzeitmodelle	283
4.3.3	Verweilzeitverteilung und Reaktion	286
4.4	Berücksichtigung der Wärmebilanz von Reaktoren	287
4.4.1	Adiabatische Reaktionsführung	288
4.4.2	Nichtadiabatische Reaktionsführung	289
4.4.2.1	Absatzweise betriebener Idealkessel	289
4.4.2.2	Kontinuierlich betriebener Idealkessel	290
4.4.2.3	Idealrohr	292
4.5	Reaktoren für disperse Systeme	295
4.5.1	Festbettreaktoren	295
4.5.2	Wirbelschichtreaktoren	298
4.5.3	Gas-Flüssig-Reaktoren	300
4.5.4	Mehrphasenreaktoren	303
4.5.4.1	Rieselbettreaktoren	304
4.5.4.2	Suspensionsreaktoren	305
4.5.5	Andere Reaktoren	306
5	Wahl der Betriebsbedingungen	308
5.1	Zielgröße Umsatz	308
5.1.1	Konzentrationsführung	310
5.1.1.1	Druck und Inertstoffkonzentration	310
5.1.1.2	Einsatzverhältnis	310
5.1.1.3	Vermischung	311
5.1.1.4	Zu- bzw. Abfuhr von Reaktionskomponenten	312
5.1.2	Stoffstromführung	313
5.1.3	Temperaturführung	313
5.1.4	Maßnahmen bei Katalysator-Desaktivierung	316
5.1.4.1	Maßnahmen während der Desaktivierung	317
5.1.4.2	Maßnahmen zur Reaktivierung	317
5.2	Zielgröße Selektivität	318
5.2.1	Konzentrationsführung	318
5.2.1.1	Vermischung	318
5.2.1.2	Zu- bzw. Abfuhr von Reaktionskomponenten	323
5.2.2	Stoffstromführung	323
5.2.3	Temperaturführung	324
6	Fragen der Anwendung	326
6.1	Datenbeschaffung	327
6.2	Maßstabsvergrößerung	328
6.3	Optimierung	329
	Literaturverzeichnis	330
	Sachregister	335