

# 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*

<b>1</b>	<b>Einführung</b> . . . . .	29
<b>2</b>	<b>Allgemeine Grundlagen</b> . . . . .	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
<b>3</b>	<b>Partikelmeßtechnik</b> ( <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
<b>4</b>	<b>Trennverfahren</b> . . . . .	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	Filterierende 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
<b>5</b>	<b>Zerkleinern</b> ( <i>K. Schönert</i> ) . . . . .	<b>80</b>
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
<b>6</b>	<b>Agglomerieren</b> ( <i>H. Schubert</i> ) . . . . .	<b>94</b>
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
<b>7</b>	<b>Mischen</b> ( <i>W. Müller</i> ) . . . . .	<b>105</b>
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
<b>8</b>	<b>Bunkern (<i>J. Schwedes</i>) . . . . .</b>	<b>118</b>
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
<b>9</b>	<b>Hydraulischer und pneumatischer Transport (<i>O. Molerus</i>) . . . . .</b>	<b>126</b>
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
	<b>Literaturverzeichnis . . . . .</b>	<b>134</b>

## Grundzüge der thermischen Verfahrenstechnik

*Prof. Dr. Ulfert Onken, Dortmund*

unter Mitwirkung von

*Dr. Peter Weiland, Braunschweig*

<b>1</b>	<b>Wärmeübertragung . . . . .</b>	<b>139</b>
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
<b>2</b>	<b>Grundlagen der thermischen Trennverfahren . . . . .</b>	<b>158</b>
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	Oberflächenenergieertheorien . . . . .	174
2.3	Gegenstromtrennprouesse . . . . .	174
2.3.1	Vervielfachung des Einzeltrenneffekts . . . . .	174
2.3.2	Theorie der Trennstufen . . . . .	176
2.3.3	Kinetische Theorie der Gegenstromtrennung . . . . .	178
<b>3</b>	<b>Trennverfahren für fluide Phasen . . . . .</b>	<b>180</b>
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
<b>4</b>	<b>Thermische Trennverfahren mit festen Phasen . . . . .</b>	<b>212</b>
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
<b>5</b>	<b>Thermische Trennverfahren an Grenzflächen . . . . .</b>	<b>231</b>
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
	<b>Literaturverzeichnis . . . . .</b>	<b>238</b>

## Grundzüge der chemischen Reaktionstechnik

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

<b>1</b>	<b>Einleitung – Bedeutung der chemischen Reaktionstechnik . . . . .</b>	<b>242</b>
<b>2</b>	<b>Chemische Reaktion . . . . .</b>	<b>244</b>
2.1	Stöchiometrie, Thermodynamik . . . . .	244
2.2	Kinetik . . . . .	244
<b>3</b>	<b>Reaktion und Transport (Makrokinetik) . . . . .</b>	<b>247</b>
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
<b>4</b>	<b>Berechnung von Reaktoren . . . . .</b>	<b>271</b>
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
<b>5</b>	<b>Wahl der Betriebsbedingungen . . . . .</b>	<b>308</b>
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
<b>6</b>	<b>Fragen der Anwendung . . . . .</b>	<b>326</b>
6.1	Datenbeschaffung . . . . .	327
6.2	Maßstabsvergrößerung . . . . .	328
6.3	Optimierung . . . . .	329
	<b>Literaturverzeichnis . . . . .</b>	<b>330</b>
	<b>Sachregister . . . . .</b>	<b>335</b>