

Grundlagen der Verfahrenstechnik für Ingenieure

Von

Ober-Ing. *Hans-Dieter Bockhardt*
Dr.-Ing. *Peter Oüntzschel*
Dipl.-Ing. *Armin Poetschukat*

4., durchgesehene und erweiterte Auflage

Mit 247 Bildern und 13 Tabellen



Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie
Stuttgart 1997

Inhaltsverzeichnis

Allgemeine Formelzeichen	. . . . .	17
Einführung	. . . . .	19
1. Allgemeine Grundlagen		
Verwendete Formelzeichen	. . . . .	22
1.1. Das chemische Produktionsverfahren	. . . . .	22
1.2. Grundoperationen	. . . . .	23
1.3. Mechanische Prozesse, Kraftfeldprozesse, molekulare Triebkraftprozesse	. . . . .	23
1.4. Stoff-, Wärme- und Impulsübertragung	. . . . .	24
1.4.1. Konvektionsströme	. . . . .	24
1.4.2. Leitströme	. . . . .	25
1.4.3. Übergangsströme	. . . . .	26
1.5. Ähnlichkeitslehre	. . . . .	26
1.5.1. Berechnungsmethoden des Verfahreningenieurs	. . . . .	26
1.5.2. Dimensionsanalyse	. . . . .	27
1.5.3. Modellübertragung	. . . . .	31
1.6. Diskontinuierliche und kontinuierliche Betriebsweise	. . . . .	32
1.7. Stoff- und Energiebilanzen	. . . . .	33
2. Lagern und Speichern		
Verwendete Formelzeichen	. . . . .	38
2.1. Allgemeine Prinzipien für das Lagern und Speichern	. . . . .	38
2.2. Lagern von festen Stoffen	. . . . .	39
2.3. Lagern von Flüssigkeiten	. . . . .	41
2.4. Lagern von Gasen	. . . . .	43
3. Kennzeichnung, Zerkleinerung und Transport von Feststoffen		
Verwendete Formelzeichen	. . . . .	45
3.1. Kennzeichnung körniger Stoffe	. . . . .	45
3.1.1. Korngröße	. . . . .	46
3.1.2. Korngrößenverteilung	. . . . .	48
3.1.2.1. Siebanalyse	. . . . .	48
3.1.2.2. Darstellung von Korngrößenverteilungen	. . . . .	49
3.1.3. Mittlere Korngröße	. . . . .	51
3.1.4. Spezifische Oberfläche	. . . . .	52
3.1.5. Porosität	. . . . .	53

3.2.	Zerkleinern von Feststoffen	54
3.2.1.	Allgemeine Grundlagen	54
3.2.2.	Beanspruchungsarten und Zerkleinerungsmaschinen	55
3.2.3.	Energiebedarf bei der Zerkleinerung	56
3.2.4.	Auswertung von Zerkleinerungsversuchen	57
3.2.5.	Praktische Schlußfolgerungen	58
3.3.	Transport von Feststoffen	59
3.3.1.	Durchsatz und Antriebsleistung mechanischer Stetigförderer	60
3.3.2.	Gurtförderer	61
3.3.3.	Becherwerke	62
3.3.4.	Schneckenförderer	63
3.3.5.	Pneumatische Stetigförderer	63

4. Technische Strömungsvorgänge

	Verwendete Formelzeichen	65
4.1.	Grundbegriffe der Mechanik fluider Stoffe	65
4.2.	Stationäre, ideale Rohrströmung	67
4.2.1.	Kontinuitätsgleichung	67
4.2.2.	Bernoulli-Gleichung	69
4.3.	Stationäre, reale Rohrströmung	71
4.3.1.	Innere Reibung; JVeitonsches Reibungsgesetz	71
4.3.2.	Ähnlichkeitstheorie der Rohrströmung	74
4.3.3.	Strömungsformen und Druckverluste	76
4.3.3.1.	Laminare und turbulente Strömung	76
4.3.3.2.	Gesetze der laminaren Strömung	78
4.3.3.3.	Druckverluste bei laminarer Strömung	80
4.3.3.4.	Quadratisches Widerstandsgesetz der turbulenten Strömung	81
4.3.3.5.	Druckverlust bei turbulenten Strömung	82
4.3.3.6.	Bestimmung des Reibungskoeffizienten X. bei glatten und rauen Rohren	83
4.3.3.7.	Druckverluste durch Rohrleitungseinbauten	87
4.3.3.8.	Gesamtdruckverlust	88
4.3.3.9.	Erweiterte Bernoulli-Gleichung	88
4.4.	Ausströmen aus Behältern	90
4.4.1.	Ausfluß aus Bodenöffnungen in offenen Behältern bei konstanter Spiegelhöhe	90
4.4.2.	Ausfluß aus Bodenöffnungen in offenen Behältern bei veränderlicher Spiegelhöhe	92
4.5.	Strömung in Schüttsschichten	93
4.5.1.	Druckverlust in trockenen Schüttsschichten	93
4.5.2.	Druckverlust in berieselten Schüttsschichten	95
4.6.	Hydrodynamik der Wirbelschicht	97
4.6.1.	Strömungstechnisches Verhalten und Erscheinungsformen der Wirbelschicht	97
4.6.2.	Geschwindigkeit am Wirbelpunkt und Austragspunkt	98
4.6.3.	Wirbelbettverfahren (Fließbettsysteme)	100

5. Fördern von Flüssigkeiten und Gasen

Verwendete Formelzeichen	101
5.1. Fördern von Flüssigkeiten	101
5.1.1. Theoretische Grundlagen	101
5.1.1.1. Aufgaben der Flüssigkeitspumpen	102
5.1.1.2. Klassifizierung der Pumpen	102
5.1.1.3. Förderdrücke und hydraulischer Wirkungsgrad	102
5.1.1.4. Förderstrom und volumetrischer Wirkungsgrad	106
5.1.1.5. Leistungen und mechanischer Wirkungsgrad	108
5.1.1.6. Kupplungs- und Motorleistung und Gesamtwirkungsgrad	108
5.1.1.7. Wirkungsgrade von Kolben- und Kreiselpumpen	108
5.1.2. Kolbenpumpen	109
5.1.2.1. Hubkolbenpumpen	109
5.1.2.2. Umlaufkolbenpumpen	114
5.1.2.3. Betriebsverhalten der Kolbenpumpen	116
5.1.3. Kreiselpumpen	118
5.1.3.1. Einteilung der Kreiselpumpen	118
5.1.3.2. Einstufige Radialkreiselpumpen	118
5.1.3.3. Mehrstufige Kreiselpumpen	122
5.1.3.4. Pumpen- und Rohrleitungskennlinien, Arbeitspunkt, Regelung	123
5.1.3.5. Parallel- und Hintereinanderschaltung	128
5.2. Fördern von Gasen (Verdichten)	129
5.2.1. Klassifizierung der Verdichter	129
5.2.2. Isotherme, isentrope und polytrope Verdichtung	130
5.2.3. Wirkungsweise und Kenngrößen von Hubkolbenverdichtern	131
5.2.4. Mehrstufenverdichtung	133
5.2.5. Kreiselradverdichter	134

6. Trennen disperter Systeme

Verwendete Formelzeichen	135
6.1. Einführung	136
6.2. Sedimentieren	136
6.2.1. Absetzgeschwindigkeit	137
6.2.2. Berechnung der Absetzgeschwindigkeit über dimensionslose Kennzahlen	139
6.2.3. Absetzgeschwindigkeit unregelmäßig geformter Teilchen	140
6.2.4. Absetzen feststoffreicher Suspensionen	140
6.2.4.1. Feststoffgehalt, Dichte und Viskosität von Suspensionen	141
6.2.4.2. Einfache Absetzversuche	142
6.2.5. Erforderliche Absetzfläche	142
6.2.5.1. Berücksichtigung der Konzentrationsverhältnisse	144
6.2.6. Absetzapparate	144
6.3. Zentrifugieren in Absetzzentrifugen	146
6.3.1. Beschleunigungsverhältnis	146
6.3.2. Absetzgeschwindigkeit	146
6.3.3. Durchsatz	147
6.3.4. Absetzzentrifugen	148

6.4.	Zyklonieren	149
6.4.1.	Abscheidung im Aerozyklon	150
6.4.2.	Abscheidung im Hydrozyklon	151
6.5.	Filtrieren	153
6.5.1.	Einflußgrößen	154
6.5.2.	Theoretische Grundlagen	155
6.5.2.1.	Strömung in Kapillaren	155
6.5.2.2.	Gleichung der Kuchenfiltration	156
6.5.2.3.	Filtration bei konstantem Druck	157
6.5.2.4.	Filtration bei konstantem Durchsatz	158
6.5.2.5.	Filtration bei veränderlichem Druck und veränderlichem Durchsatz	158
6.5.2.6.	Experimentelle Bestimmung der Widerstandswerte	159
6.5.2.7.	Anwendung der Gleichung der Kuchenfiltration auf kontinuierliche Filter	160
6.5.2.8.	Verstopfungsfiltration	161
6.5.3.	Filtermittel und Filterhilfsmittel	162
6.5.4.	Filter	163
6.6	Zentrifugieren in Filterzentrifugen	165
6.6.1.	Gleichung der Zentrifugalfiltration	165
6.6.2.	Filterzentrifugen	166

6.7.	Membrantrennprozesse	169
6.7.1.	Grundlagen der Membrantrenntechnik	169
6.7.2.	Mikrofiltration, Ultrafiltration und Umkehrosmose	170
6.7.3.	Dialyse und Elektrodialyse	172
6.7.4.	Pervaporation, Dampf-bzw. Gaspermeation	172
6.7.5.	Flüssigmembranpermeation	173

7. Mechanische Stoffvereinigung

	Verwendete Formelzeichen	174
7.1.	Allgemeine Mischprinzipien	174
7.2.	Zusammensetzung von Mischungen	175
7.3.	Stoffvereinigung in flüssiger Phase	176
7.4.	Rührmaschinen	177
7.4.1.	Rührerformen	178
7.4.2.	Rührerleistung	181
7.4.3.	Strömungsbereiche und Leistungsbeiwert	183
7.4.4.	Spezifische Rührerleistung	183
7.4.5.	Modellübertragung	185
7.5.	Mischen von Feststoffen	187

8. Wärmeübertragung

	Verwendete Formelzeichen	190
8.1.	Einführung	191
8.2.	Thermodynamik der Dämpfe	192
8.2.1.	Thermische Zustandsgleichungen der Dämpfe	192
8.2.1.1.	Isobarer Verdampfungsvorgang	193

8.2.1.2.	Thermische Zustandsgrößen	194
8.2.2.	Kalorische Zustandsgleichungen der Dämpfe	194
8.2.2.1.	Kalorische Zustandsgrößen	194
8.2.3.	Zustandsdiagramme für Wasserdampf	195
8.3.	Wärmeleitung	199
8.3.1.	Stationäre Wärmeleitung	199
8.3.1.1.	Stationäre Wärmeleitung in einer ebenen einschichtigen Wand	200
8.3.1.2.	Stationäre Wärmeleitung in einer ebenen mehrschichtigen Wand	201
8.3.1.3.	Stationäre Wärmeleitung im Rohr	202
8.3.2.	Instationäre Wärmeleitung	205
8.4.	Konvektiver Wärmetransport	207
8.4.1.	Wärmeübertragung ohne Zustandsänderung	207
8.4.1.1.	Konvektion freier Strömung	210
8.4.1.2.	Konvektion erzwungener Strömung	210
8.4.2.	Wärmeübertragung mit Zustandsänderung	215
8.4.2.1.	Verdampfung	215
8.4.2.2.	Kondensation	216
8.5.	Wärmedurchgang	217
8.5.1.	Wärmedurchgang durch eine ebene Wand	217
8.5.2.	Wärmedurchgang durch Rohrwände	219
8.6.	Wärmestrahlung	222
8.6.1.	Gesetzmäßigkeiten der Strahlung	222
8.6.2	Strahlungsaustausch zwischen technischen Oberflächen	225
8.6.2.1.	Strahlungsaustausch zwischen zwei parallelen ebenen Flächen	225
8.6.2.2.	Strahlungsaustausch zwischen einem Körper und seiner Umhüllung	226
8.7.	Wärmeübertrager	228
8.7.1.	Darstellung einiger wichtiger Bauformen	228
8.7.2.	Berechnung der Wärmeübertrager	232
8.7.2.1.	Berechnung der Gleich- und Gegenstromwärmeübertrager	232
8.7.2.2.	Betriebscharakteristik der Wärmeübertrager	239
8.7.2.3.	Instationärer Wärmedurchgang in Rührwerken	244
9.	Beheizen und Kühlen	
	Verwendete Formelzeichen	246
9.1.	Beheizen	246
9.1.1.	Brennstoffe	247
9.1.2.	Luftbedarf und Rauchgasvolumen	248
9.1.3.	Heizverfahren	251
9.2.	Kühlen	252
9.2.1.	Kälteerzeugung	253
9.2.1.1	Kältemischungen und Kühlsohlen	253
9.2.1.2.	Verdunstungskühlung	254
9.2.2.	Kälteanlagen	255
9.2.2.1.	Kaltluftanlagen	255
9.2.2.2.	Kaltdampfanlagen	255
9.2.2.3.	Absorptionskälteanlagen	259
9.2.2.4.	Dampfstrahlkälteanlagen	261

10. Stoffübertragung

Verwendete Formelzeichen	263
10.1. Arten der Stoffübertragung	263
10.1.1. Molekularer Stofftransport	264
10.1.2. Turbulenter Stofftransport	264
10.2. Grundgesetze des molekularen und turbulenten Stofftransports	265
10.2.1. Grundgesetze des molekularen Stofftransports	265
10.2.1.1. Äquimolare Diffusion	265
10.2.1.2. Einseitige Diffusion	267
10.2.1.3. Nichtäquimolare Diffusion	269
10.2.2. Turbulenter Stofftransport	270
10.2.3. Ermittlung des Diffusionskoeffizienten	270
10.3. Konvektiver Stofftransport	271
10.3.1. Triebkraft und Austauschgeschwindigkeit	272
10.3.2. Stoffübergangskoeffizienten	274
10.3.3. Gleichung der Stoffübertragung	277
10.3.4. Technische Modellvorstellungen zur Berechnung thermischer Trennprozesse	280

11. Trocknung

Verwendete Formelzeichen	282
11.1. Anwendungsbereiche der Trocknung	282
11.2. Feuchtebindung in Trockengütern	283
11.3. Stoffbilanz der Trocknung	284
11.4. Eigenschaften feuchter Luft	285
11.4.1. Thermodynamisches Verhalten feuchter Luft	286
11.4.2. $>i,x$ -Diagramm für feuchte Luft	287
11.5. Trocknungsvorgang im $/i,a:$ -Diagramm	291
11.5.1. Ideale Trocknung	291
11.5.2. Reale Trocknung	292
11.5.3. Varianten des Trocknungsprozesses	295
11.5.3.1. Trocknungsprozeß mit in dem Trockner erwärmer Luft	295
11.5.3.2. Trocknungsprozeß mit Zwischenerwärmung der Luft	296
11.5.3.3. Trocknungsprozeß mit Wiederverwendung der Abluft	297
11.6. Geschwindigkeit des Trocknungsprozesses	298
11.7. Gefriertrocknung	302
11.8. Technische Trockner	303
11.8.1. Auswahl der Trockner	303
11.8.2. Gleich-, Gegen-und Kreuzstromtrocknung	304
11.8.3. Einteilung der Trockner	304

12. Destillation

Verwendete Formelzeichen	306
12.1. Prinzip der Destillation	306
12.2. Destillationsmethoden	307

12.3. Phasengleichgewicht von Flüssigkeitsgemischen	309
12.4. Zweistoffsysteme	311
12.4.1. Gemische ohne konstante Siedetemperatur	311
12.4.2. Gemische mit einem Maximum der Siedetemperatur	315
12.4.3. Gemische mit einem Minimum der Siedetemperatur	316
12.4.4. Teilweise lösliche Gemische	316
12.4.5. Fast unlösliche Gemische	318
12.5. Gleichstromdestillation	318
12.5.1. Berechnungsgrundlagen	319
12.5.2. Praktische Anwendung der Gleichstromdestillation	321
12.6. Gegenstromdestillation	322
12.6.1. Kontinuierliche Gegenstromdestillation	322
12.6.2. Diskontinuierliche Gegenstromdestillation	330
12.6.3. Wärmebilanzen	335
12.7. Destillationskolonnen	338
12.7.1. Bodenkolonnen	338
12.7.1. Filmkolonnen	340
12.8. Kolonnendestillation unter erschweren Bedingungen	342
12.8.1. Vakuumdestillation	343
12.8.2. Trägerdampfdestillation	344
12.8.3. Extraktive Destillation	344
12.9. Mehrstoffdestillation	345

13. Sorption

Verwendete Formelzeichen	347
13.1. Absorption	348
13.1.1. Einführung und Definition	348
13.1.2. Arbeitslinie bei der Absorption	348
13.1.3. Minimales Trägerstoffverhältnis und Absorbensüberschüßkoeffizient	350
13.1.4. Löslichkeit von Gasen in Flüssigkeiten	351
13.1.4.1. Phasengleichgewichte	351
13.1.4.2. Gleichgewichtslien bei Absorptionsprozessen	352
13.1.5. Bestimmung der theoretischen Trennstufenzahl für eine Absorptionskolonne	354
13.2 Adsorption	358
13.2.1. Adsorptionsisotherme	360
13.2.2. Durchbruchskurven	361
13.2.3. Periodische Adsorption	362
13.2.4. Kontinuierliche Adsorption	363

14. Extraktion

Verwendete Formelzeichen	367
14.1. Einführung	367
14.2. Solventextraktion	367

14.2.1.	Extraktionsdiagramme	370
14.2.1.1.	Hebelgesetz	371
14.2.1.2.	JVernstsches Verteilungsgesetz	371
14.2.2.	Berechnung von Extraktionsvorgängen mit Beladungen	374
14.2.2.1.	Kreuzstromextraktion	374
14.2.2.2.	Gegenstromextraktion	376
14.2.2.3.	Trägerstoffverhältnis	377
14.2.3.	Berechnung von Extraktionsvorgängen im Dreiecksdiagramm	381
14.2.3.1.	Kreuzstromextraktion	381
14.2.3.2.	Gegenstromextraktion	382
14.3.	Extraktionsapparate	386

15. Stoffumwandlung in Reaktoren

Verwendete Formelzeichen	389
15.1. Einführung	389
15.2. Grundbegriffe und Definitionen	390
15.3. Reaktionskinetische Betrachtungen	390
15.3.1. Stöchiometrischer Koeffizient und Art der Reaktion	390
15.3.2. Fortschreitungsgrad	392
15.3.3. Umsatz und Stoffmengenbilanzen	393
15.3.4. Zusammenhang zwischen Umsatz, Fortschreitungsgrad und Zusammensetzung	394
15.3.5. Reaktionsgeschwindigkeit	395
15.3.6. Einteilung der Reaktionen	397
15.4. Technische Reaktoren	399
15.4.1. Diskontinuierliche Reaktoren (Füllreaktoren)	400
15.4.2. Kontinuierliche Reaktoren (Durchflußreaktoren)	401
15.5. Mathematische Modellierung von Stoffveränderungen in technischen Reaktoren	402
15.5.1. Idealer diskontinuierlicher Rührreaktor (Füllreaktor)	402
15.5.1.1. Stoffbilanz	403
15.5.1.2. Dimensionierung	404
15.5.2. Idealer kontinuierlicher stationärer Rührreaktor (Durchflußreaktor)	408
15.5.2.1. Stoffbilanz	409
15.5.2.2. Dimensionierung	410
15.5.3. Idealer stationärer Rohrreaktor	411
15.5.3.1. Stoffbilanz	411
15.5.3.2. Dimensionierung	413
15.6. Thermisches Verhalten von Reaktoren	413
15.6.1. Rührreaktoren	413
15.6.2. Rohrreaktoren	415
15.7. Reaktorstabilität	416
15.8. Maßstabsvergrößerung bei chemischen Reaktoren	417

16. Schlußbetrachtung	421
Literaturverzeichnis	423
Sachwörterverzeichnis	426