

# 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

<b>Allgemeine Formelzeichen.</b>	<b>.17</b>
<b>Einführung.</b>	<b>.19</b>
<b>1. Allgemeine Grundlagen</b>	
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
<b>2. Lagern und Speichern</b>	
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
<b>3. Kennzeichnung, Zerkleinerung und Transport von Feststoffen</b>	
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 fluiden 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; Poiseuillesches 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 turbulenter Strömung	82
4.3.3.6.	Bestimmung des Reibungskoeffizienten $\lambda$ bei glatten und rauhen 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 veränder- licher Spiegelhöhe	92
4.5.	Strömung in Schütttschichten	93
4.5.1.	Druckverlust in trockenen Schütttschichten	93
4.5.2.	Druckverlust in berieselten Schütttschichten	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. Kreisradverdichter	134

## 6. Trennen disperser 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 Kühltölen	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. $\psi$ - $x$ -Diagramm für feuchte Luft	287
11.5. Trocknungsvorgang im $\psi$ - $x$ -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 erwärmter 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 erschwerten 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 Absorbensüberschußkoeffizient . . . . .	350
13.1.4. Löslichkeit von Gasen in Flüssigkeiten. . . . .	351
13.1.4.1. Phasengleichgewichte . . . . .	351
13.1.4.2. Gleichgewichtslinie 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. Durchbruchkurven. . . . .	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. JVerntsches 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

<b>16. Schlußbetrachtung . . . . .</b>	<b>421</b>
<b>Literaturverzeichnis. . . . .</b>	<b>423</b>
<b>Sachwörterverzeichnis. . . . .</b>	<b>426</b>