
Taschenbuch der Verfahrenstechnik

herausgegeben von
Prof. Dr. Karl Schwister

5., aktualisierte Auflage

Mit 305 Bildern und 55 Tabellen



Fachbuchverlag Leipzig
im Carl Hanser Verlag

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	5
TEIL I Berufliche Anforderungen und Perspektiven	21
1 Berufsbild des Verfahrensingenieurs	22
1.1 Traditionelles Verständnis	22
1.2 Berufliche Einsatzmöglichkeiten	23
1.2.1 Forschung, Entwicklung und Lehre	24
1.2.2 Planung und Konstruktion	25
1.2.3 Betrieb und Produktion	25
1.2.4 Anwendungstechnik, Vertrieb und Einkauf	26
1.2.5 Branchenübergreifende Einsatzmöglichkeiten	27
2 Aktuelle Trends	28
2.1 Neue Beschäftigungsfelder	28
2.2 Veränderte Arbeitsplatzprofile	30
2.3 Freiberufliche Ingenieurdienstleistungen	31
3 Weiterentwicklung der Ingenieurausbildung	33
3.1 Arbeitsmarktsituation	33
3.2 Wahl von Studienform und Studienabschluss	34
3.3 Praxisbezug der Ausbildung	37
3.4 Reform der Ingenieurausbildung	38
3.5 Erhalt der Beschäftigungsfähigkeit	40

TEIL II Mechanische Verfahrenstechnik	43
4 Einführung	44
5 Kennzeichnung disperser Stoffsysteme	46
5.1 Begriffsbestimmung	46
5.2 Charakterisierung von Partikelmerkmalen	47
5.2.1 Feinheitseigenschaften	47
5.2.2 Verteilungskurven	49
5.2.3 Standardverteilungen	51
5.2.4 Kenngrößen aus Verteilungen	53
5.3 Messverfahren der Partikelgrößenanalyse	54
5.3.1 Probenahme und Probeteilung	54
5.3.2 Mikroskopische Zählverfahren	55
5.3.3 Bildanalyseverfahren	56
5.3.4 Optische Einzelpartikelzähler	57
5.3.5 Laserbeugungsspektrometer	58
5.3.6 Feldstörungsverfahren	59
5.3.7 Siebanalyse	60
5.3.8 Sichtanalyse	61
5.3.9 Sedimentationsanalyse	62
5.3.10 Messverfahren zur Oberflächenbestimmung	63
5.4 Haftkräfte	64
5.5 Bewegung von Teilchen in einem Fluid	66
5.5.1 Bewegung eines kugelförmigen Kornes	66
5.5.2 Bewegung nicht kugelförmiger Körner	68
5.5.3 Kornbewegung in nichtNEWTONschen Flüssigkeiten	68
5.5.4 Bewegung von Körnerschwärmen	68
5.5.5 Sedimentation von Körnerkollektiven	69
5.6 Durchströmung von Kornschichten	70
5.6.1 Strömung durch eine ruhende Materialschicht	70
5.6.2 Strömung durch eine Wirbelschicht	72
6 Fließen von Schüttgütern	73
6.1 Ruhende Schüttgüter	73
6.2 Fließende Schüttgüter	77
6.2.1 Wandreibungswinkel	77
6.2.2 Ausflussverhalten aus Schüttgutspeichern	77

6.2.3	Brückenbildung	79
6.2.4	Ermittlung der Schüttgutparameter	81
7	Mischen von Feststoffen und Rühren	83
7.1	Übersicht der Mischverfahren	83
7.2	Kennzeichnung des Mischungszustands	85
7.2.1	Probeanalyse von Mischungen	86
7.2.2	Mittelwert und Varianz	87
7.2.3	Mischungszustände	89
7.2.4	Untersuchung des Mischungszustandes	91
7.3	Feststoffmischverfahren	92
7.4	Rühren	94
7.4.1	Rühren mit rotierenden Rührorganen	95
7.4.2	Leistungsbedarf des Rührers	97
7.4.3	Homogenisieren mit rotierenden Rührorganen	99
7.4.4	Suspendieren	99
7.4.5	Emulgieren	100
7.4.6	Begasen	101
7.5	Statisches Mischen von Flüssigkeiten	102
8	Mechanische Trennprozesse	103
8.1	Kennzeichnung der Trennprozesse	103
8.2	Klassieren	107
8.2.1	Siebklassierung	107
8.2.2	Windsichten	110
8.2.3	Nassstromklassierer	112
8.3	Sortieren	113
8.4	Fest-Flüssig-Trennung	115
8.4.1	Grundbegriffe	115
8.4.2	Trennverfahren	115
8.5	Partikelabscheidung aus Gasen	119
9	Agglomerieren	122
9.1	Übersicht zu Begriffen und Verfahren	122
9.2	Bindemechanismen und Festigkeit	123

9.3	Aufbauagglomeration	126
9.4	Pressagglomerieren	127

10 Zerkleinern 130

10.1	Grundlagen des Zerkleinerns	130
10.2	Modelle vom Zerkleinerungsvorgang	132
10.2.1	Bruchbildung	132
10.2.2	Zerkleinerungsgesetze	134
10.2.3	Zerkleinerungsgrad	138
10.3	Zerkleinerungsmaschinen und Klassierer	139
10.4	Brecher	141
10.4.1	Backenbrecher und Rundbrecher	141
10.4.2	Walzenbrecher	142
10.4.3	Prallbrecher	143
10.5	Mühlen	144
10.5.1	Wälzmühlen	144
10.5.2	Mahlkörpermühlen	145
10.5.3	Walzenmühlen	150
10.5.4	Prallmühlen	151
10.5.5	Strahlmühlen	152
10.6	Scheren und Schneidmühlen	153

TEIL III Thermische Verfahrenstechnik 157

11 Thermische Trennoperationen im Überblick 158

12 Verdampfung 163

12.1	Grundlagen	163
12.2	Technische Anforderungen an die Bauweise von Verdampfern	165
12.3	Verdampferschaltungen	166
12.4	Verdampferbauarten	169

13 Kristallisation 172

13.1	Grundlagen	172
13.2	Technische Anforderungen an den Kristallisationsvorgang ...	175
13.3	Bauarten von Kristallisatoren	179

14 Destillation	184
14.1 Grundlagen	184
14.2 Blasendestillation	192
14.3 Trennung von Gemischen ohne Mischungslücke	195
14.4 Wasserdampf- oder Trägerdampfdestillation	197
14.5 Kontinuierliche Rektifikation	199
14.6 Diskontinuierliche Rektifikation	212
14.7 Einbauten und Dimensionierung der Rektifiziersäule	214
15 Absorption	224
15.1 Grundlagen	224
15.2 Dimensionierung der Absorptionskolonne	231
15.3 Bauarten von Absorbern	236
16 Adsorption	238
16.1 Grundlagen	238
16.2 Dimensionierung von Adsorptionsanlagen	244
16.3 Bauarten von Adsorbern	250
17 Trocknung	251
17.1 Grundlagen	251
17.2 Trocknungsarten	253
17.3 Bauarten von Trocknern	255
18 Flüssig-Flüssig-Extraktion (Solventextraktion)	258
18.1 Grundlagen	258
18.2 Solventextraktion in Kreuz- und Gegenstromfahrweise	265
18.3 Auslegungshinweise für Gegenstromkolonnen im kontinuierlichen Betrieb	271
18.4 Apparatetypen für die Solventextraktion	274
18.5 Auswahl und Regeneration des Lösungsmittels	278

19	Fest-Flüssig-Extraktion	279
19.1	Grundlagen	279
19.2	Durchführung der Feststoffextraktion	281
19.3	Beispiele für Feststoffextraktionsanlagen	282
20	Hochdruckextraktion	285
20.1	Grundlagen	285
20.2	Anwendung der Hochdruckextraktion	289
	TEIL IV Chemische Reaktionstechnik	291
21	Einführung in die chemische Reaktionstechnik	292
21.1	Allgemeines	292
21.2	Beurteilungsgrößen für Reaktoren	294
21.2.1	Durchsatz	295
21.2.2	Umsatz	295
21.2.3	Selektivität	299
21.2.4	Ausbeute	299
21.2.5	Verweilzeit	299
21.2.6	Produktionsleistung	300
21.3	Stoffbilanz	301
22	Kinetik chemischer Reaktionen	303
22.1	Grundlagen der Reaktionskinetik	303
22.2	Analyse kinetischer Untersuchungen	305
22.2.1	Integrationsmethode	306
22.2.2	Differenzielle Methode	311
22.3	Temperaturabhängigkeit der Reaktionsgeschwindigkeit	312
22.4	Katalyse	316
22.4.1	Homogene Katalyse	317
22.5	Makrokinetik chemischer Reaktionen	318
22.5.1	Heterogene Katalyse	321
22.5.2	Gas-Flüssigkeits-Reaktionen	324
22.6	Reaktionsarten	328

22.6.1	Reversible Reaktionen	328
22.6.2	Parallelreaktionen	329
22.6.3	Folgereaktionen	331
23	Isotherm betriebene ideale Reaktoren	334
23.1	Betriebsweisen chemischer Reaktoren	334
23.1.1	Diskontinuierlicher Betrieb	334
23.1.2	Kontinuierlicher Betrieb	336
23.2	Der diskontinuierlich betriebene Rührkessel	339
23.3	Der kontinuierlich betriebene Rührkessel	344
23.4	Die Rührkesselkaskade	347
23.5	Das ideale Strömungsrohr	354
23.6	Vergleich der idealen Reaktoren	357
23.7	Reaktor mit Kreislaufführung	358
23.8	Der halbkontinuierliche Rührkessel (Semibatch-Reaktor)	362
24	Reale Reaktoren (Verweilzeitverhalten)	364
24.1	Verweilzeitverteilung $E(t)$	364
24.2	Verweilzeitsummenfunktion $F(t)$	369
24.3	Mittlere Verweilzeit	370
24.4	Experimentelle Bestimmung der Verweilzeitfunktionen	371
24.5	Verweilzeitverhalten realer Reaktoren	373
24.5.1	Kontinuierlicher Rührkessel	373
24.5.2	Rohrreaktor	375
24.6	Berechnung des mittleren Umsatzes	377
25	Thermisches Verhalten von Reaktoren	379
25.1	Thermische Stabilität von Reaktoren	379
25.2	Wärmetechnische Auslegung von Reaktoren	383
25.3	Der diskontinuierlich betriebene Rührkessel	384
25.4	Der kontinuierlich betriebene Rührkessel	387
25.4.1	Adiabatischer Betrieb	387
25.4.2	Isothermer Betrieb	389
25.5	Das ideale Strömungsrohr	390

26	Chemiereaktoren	394
26.1	Reaktoren für homogene Reaktionen	394
26.2	Reaktoren für heterogene Reaktionen	395
TEIL V Biologische Verfahrenstechnik		399
27	Grundlagen der Mikrobiologie	400
27.1	Entwicklung und Bedeutung der Mikrobiologie	400
27.2	Struktur und Funktion der prokaryotischen Zelle	405
27.2.1	Kern und Plasmide	409
27.2.2	Cytoplasmamembran	411
27.2.3	Zellwand	414
27.2.4	Geißeln	417
27.2.5	Fimbrien und Pili	418
27.3	Struktur und Funktion der eukaryotischen Zelle	418
27.3.1	Cytoplasma	419
27.3.2	Mitochondrien und Chloroplasten	420
27.4	Hauptgruppen der Bakterien	421
27.4.1	Stoffwechseltypen	424
27.4.2	Übersicht über die Vielfalt der Prokaryonten	424
27.5	Hauptgruppe der Hefen und Pilze	431
27.6	Technisch wichtige Mikroorganismen	434
28	Biochemische Grundlagen	436
28.1	Grundlagen des Stoffwechsels und der Energieumwandlung	436
28.2	Ernährungstypen	441
28.2.1	Heterotrophie und Autotrophie	441
28.2.2	Chemotrophie und Phototrophie	442
28.2.3	Lithotrophie und Organotrophie	442
28.2.4	Aerobier und Anaerobier	442
28.3	Atmungsprozesse	443
28.3.1	Embden-Meyerhof-Parnas-Weg	443
28.3.2	ENTNER-DOUDOROFF-Weg und Pentosephosphat-Weg	445
28.3.3	Oxidativer Abbau von Pyruvat	446
28.3.4	Tricarbonsäure-Cyclus	447
28.3.5	Atmungskette	448

28.4	Anaerobe Atmung	450
28.4.1	Nitrat-Atmung	450
28.4.2	Sulfat-Atmung	453
28.5	Gärungen	453
28.5.1	Alkohol-Gärung	455
28.5.2	Milchsäure-Gärung	456
28.5.3	Propionsäure-Gärung	457
29	Bioprozesskinetik	459
29.1	Nährmedien und Wachstumsbedingungen	459
29.1.1	Feste Nährböden	461
29.1.2	Temperaturabhängigkeit des Wachstums	461
29.1.3	pH-Abhängigkeit des Wachstums	463
29.2	Wachstumsbestimmungen	464
29.2.1	Bestimmung der Mikroorganismenzahl	465
29.2.2	Bestimmung der Mikroorganismen	467
29.3	Statische Kultur	469
29.3.1	Exponentielles Wachstum	469
29.3.2	Wachstumskurve	472
29.4	Kontinuierliche Kultur	476
29.4.1	Wachstum im Turbidostaten	478
29.4.2	Wachstum im Chemostaten	479
30	Bioreaktoren	483
30.1	Allgemeine Anforderungen an Bioreaktoren	483
30.2	Oberflächenreaktoren	484
30.2.1	Feste Nährböden	485
30.2.2	Statische Oberflächenkultur	485
30.2.3	Bettreaktoren	487
30.2.4	Membran-Reaktoren	488
30.3	Submers-Reaktoren	489
30.3.1	Energieeintrag durch Begasung	490
30.3.2	Energieeintrag durch eine Flüssigkeitspumpe	492
30.3.3	Energieeintrag mit Rührorganen	494
30.3.4	Vergleich der Reaktorsysteme	496
30.4	Belüftung und Sauerstofftransport	497

31 Sterilisation und Steriltechnik	501
31.1 Einführung	501
31.2 Kinetik der Abtötung durch Hitzeeinwirkung	503
31.3 Sterilisation von flüssigen Medien	504
31.3.1 Batch-Sterilisation mit Dampf	505
31.3.2 Kontinuierliche Sterilisation mit Dampf	508
31.3.3 Sterilisation durch Filter	511
31.3.4 Sterilisation durch chemische Methoden	511
31.4 Sterilisation von Gasen	512
 32 Messtechnik an Bioreaktoren	 514
32.1 Einführung	514
32.2 Physikalische Messgrößen	517
32.2.1 Temperatur	517
32.2.2 Druck	518
32.2.3 Drehzahl	518
32.2.4 Schaum	519
32.2.5 Trübung	519
32.3 Chemische Messgrößen	520
32.3.1 pH-Wert	520
32.3.2 Redoxpotenzial	521
32.3.3 Sauerstoff	522
32.3.4 Kohlenstoffdioxid	524
32.3.5 Ionenselektive Elektroden	525
32.4 Biologische Sensoren	526
 TEIL VI Anwendungen in Industrie und Umwelt	 529
 33 Schwefelsäureherstellung	 530
33.1 Einführung	530
33.2 Reaktion	531
33.3 Rohstoffeinsatz	532
33.4 Katalysator	532
33.5 Kontaktverfahren	533

34 Herstellung von Titandioxid	536
34.1 Einführung	536
34.2 Rohstoffeinsatz	536
34.3 Verfahren	537
34.3.1 Sulfatverfahren	537
34.3.2 Chloridverfahren	539
34.3.3 Nachbehandlung	540
35 Erdölaufbereitung und Petrochemie	541
35.1 Einführung	541
35.2 Physikalische Bearbeitung	542
35.2.1 Vorbereitung	542
35.2.3 Fraktionierte Destillation	543
35.2.3 Entparaﬃnierung	545
35.3 Raffinerieverfahren zur stofflichen Umwandlung	545
35.3.1 Cracking-Verfahren	547
Thermisches Cracking	548
Katalytisches Cracking	550
Hydrocracking	551
35.3.2 Reforming	552
35.3.3 Hydrierung	554
35.3.4 Isomerisierung	555
35.3.5 Polymerisation	555
35.3.6 Alkylierung	556
36 Herstellung von Polyurethanen	557
36.1 Einführung	557
36.2 Reaktion	558
36.3 Rohstoffeinsatz	558
36.3.1 Isocyanate	558
36.3.2 Polyolkomponenten	561
36.3.3 Hilfs- und Zusatzstoffe	562
36.4 Verarbeitungsverfahren	563
36.4.1 Allgemeines	563
36.4.2 Dosiermaschinen	564
36.4.3 Formwerkzeuge	567

37 Herstellung von Citronensäure	568
37.1 Einführende Bemerkungen	568
37.2 Mikroorganismen und Biosynthese	569
37.3 Nährmedien	570
37.4 Produktionsverfahren	571
37.4.1 Oberflächenverfahren	571
37.4.2 Submersverfahren	573
38 Herstellung von Penicillin	576
38.1 Einführende Bemerkungen	576
38.2 Antibiotika-Produzenten und Klassifizierung	576
38.3 Wirkungsspektrum von Antibiotika	579
38.4 Produktionsverfahren	580
39 Metallgewinnung durch Mikroorganismen	584
39.1 Einführende Bemerkungen	584
39.2 Mechanismen der mikrobiellen Laugung	585
39.2.1 Direkte Laugung	585
39.2.2 Indirekte Laugung	586
39.3 Laborverfahren	587
39.3.1 Perkulatorlaugung	588
39.3.2 Suspensionslaugung	589
39.3.3 Säulenlaugung	590
39.4 Industrielle Laugungsverfahren	591
40 Reinigung kommunaler Abwässer	595
40.1 Abwasserarten und Fortleitung	595
40.2 Abwasserinhaltsstoffe	596
40.2.1 Typische Messgrößen zur Abwasserbeurteilung	598
40.2.2 Typische Abwasserparameter für ein kommunales Abwasser	599
40.3 Aufbau und Funktion einer kommunalen Kläranlage	601
40.3.1 Mechanisch-physikalische Reinigung	601
40.3.2 Chemische Elimination	604

40.3.3	Biologische Abwasserbehandlung	605
40.3.3.1	Elimination von Phosphorverbindungen	605
40.3.3.2	Elimination von Stickstoffverbindungen	607
40.3.4	Nachklärung	613
40.3.5	Schlammbehandlung	613
40.4	Alternative Verfahren	615
41	Mechanische und thermische Abluft- reinigungsverfahren	617
41.1	Einführende Bemerkungen	617
41.2	Mechanische Abluftreinigungsverfahren	619
41.3	Thermische Abluftreinigungsverfahren	622
41.3.1	Rauchgasentschwefelung und Stickoxidreduktion im Abgasstrom von Kohlekraftwerken	623
41.3.2	Abscheidung von Quecksilber und Beseitigung von Dioxinen aus dem Rauchgasstrom von Abfallverbrennungsanlagen mit Adsorbern	627
41.3.3	Adsorber in Lackierstraßen der Automobilindustrie ...	628
41.3.4	Thermische oder katalytische Nachverbrennung	629
42	Biologische Abluftreinigung	633
42.1	Kriterien zur Anwendung der biologischen Abluftreinigung ..	635
42.1.1	Abzubauenende Substanzen	635
42.1.2	Mikrobiologische Voraussetzungen	636
42.2	Biowäscher	637
42.2.1	Tropfkörperverfahren	638
42.2.2	Belebtschlammverfahren	639
42.3	Biofilter	641
42.4	Biomembranverfahren	644
42.5	Analysemethoden	646
42.5.1	Geruchsmessung (Olfaktometrie)	646
42.5.2	Instrumentelle Abluftanalytik	649

43 Beseitigung von Altlasten – Bodensanierungsverfahren	653
43.1 Einführende Bemerkungen	653
43.2 Überblick über die Verfahren zur Bodensanierung	654
43.3 In-situ-Verfahren	655
43.4 On-site- und Off-site-Verfahren	658
44 Verfahren zur Abfallbehandlung	661
44.1 Einführende Bemerkungen	661
44.2 Geordnete Deponien	662
44.3 Hausmüll- und Sonderabfallverbrennung	663
44.4 Thermische Abfallbehandlungsanlagen neuer Konzeption	665
45 Biologische Abfallbehandlung	669
45.1 Einführende Bemerkungen	669
45.2 Kompostierung von organischen Abfällen	670
45.3 Kompostqualität	672
45.4 Produktion von Biogas	672
Sachwortverzeichnis	675