

Inhaltsverzeichnis

BERUFLICHE ANFORDERUNGEN UND PERSPEKTIVEN

1	Berufsbild des Verfahreningenieurs	20
1.1	Traditionelles Verständnis	20
1.2	Berufliche Einsatzmöglichkeiten	21
1.2.1	Forschung, Entwicklung und Lehre	21
1.2.2	Planung und Konstruktion	22
1.2.3	Betrieb und Produktion	23
1.2.4	Anwendungstechnik, Vertrieb und Einkauf	23
1.2.5	Branchenübergreifende Einsatzmöglichkeiten ..	24
2	Aktuelle Trends	25
2.1	Neue Beschäftigungsfelder	25
2.2	Veränderte Arbeitsplatzprofile	27
2.3	Freiberufliche Ingenieurdienstleistungen	27
3	Weiterentwicklung der Ingenieurausbildung	29
3.1	Arbeitsmarktsituation	29
3.2	Wahl von Studienform und Studienabschluss	30
3.3	Praxisbezug der Ausbildung	33
3.4	Reform der Ingenieurausbildung	33
3.5	Erhalt der Beschäftigungsfähigkeit	36

MECHANISCHE VERFAHRENSTECHNIK

4	Einführung	40
5	Kennzeichnung disperser Stoffsysteme	41
5.1	Begriffsbestimmung	41
5.2	Charakterisierung von Partikelmerkmalen	41
5.2.1	Feinheitsmerkmale	41
5.2.2	Verteilungskurven	43
5.2.3	Standardverteilungen	46
5.2.4	Kenngößen aus Verteilungen	47

5.3	Messverfahren der Partikelgrößenanalyse.....	48
5.3.1	Probenahme und Probeteilung.....	48
5.3.2	Mikroskopische Zählverfahren	49
5.3.3	Bildanalyseverfahren.....	50
5.3.4	Optische Einzelpartikelzähler	50
5.3.5	Laserbeugungsspektrometer.....	51
5.3.6	Feldstörungsverfahren	52
5.3.7	Siebanalyse.....	53
5.3.8	Sichtanalyse.....	54
5.3.9	Sedimentationsanalyse	55
5.3.10	Messverfahren zur Oberflächenbestimmung....	55
5.4	Haftkräfte.....	57
5.5	Bewegung von Teilchen in einem Fluid.....	59
5.5.1	Bewegung eines kugelförmigen Kornes	59
5.5.2	Bewegung nicht kugelförmiger Körner	60
5.5.3	Kornbewegung in nichtNEWTONschen Flüssigkeiten	60
5.5.4	Bewegung von Körnerschwärmen	60
5.5.5	Sedimentation von Körnerkollektiven	61
5.6	Durchströmung von Kornschichten	62
5.6.1	Strömung durch eine ruhende Material- schicht.....	63
5.6.2	Strömung durch eine Wirbelschicht.....	64
6	Fließen von Schüttgütern	65
6.1	Ruhende Schüttgüter	65
6.2	Fließende Schüttgüter	68
6.2.1	Wandreibungswinkel	68
6.2.2	Ausflussverhalten aus Schüttgutspeichern.....	69
6.2.3	Brückenbildung	70
6.2.4	Ermittlung der Schüttgutparameter	72
7	Mischen von Feststoffen und Rühren	74
7.1	Übersicht der Mischverfahren	74
7.2	Kennzeichnung des Mischungszustands	76
7.2.1	Probeanalyse von Mischungen	77
7.2.2	Mittelwert und Varianz.....	78
7.2.3	Mischungszustände	80
7.2.4	Untersuchung des Mischungszustandes.....	82
7.3	Feststoffmischverfahren	83
7.4	Rühren	85

7.4.1	Rühren mit rotierenden Rührorganen.....	86
7.4.2	Leistungsbedarf des Rührers	88
7.4.3	Homogenisieren mit rotierenden Rührorganen	89
7.4.4	Suspendieren	90
7.4.5	Emulgieren	91
7.4.6	Begasen	91
7.5	Statisches Mischen von Flüssigkeiten.....	92
8	Mechanische Trennprozesse	94
8.1	Kennzeichnung der Trennprozesse	94
8.2	Klassieren	97
8.2.1	Siebklassierung	97
8.2.2	Windsichten.....	100
8.2.3	Nassstromklassierer.....	102
8.3	Sortieren.....	103
8.4	Fest-Flüssig-Trennung	105
8.4.1	Grundbegriffe	105
8.4.2	Trennverfahren.....	105
8.5	Partikelabscheidung aus Gasen.....	109
9	Agglomerieren	112
9.1	Übersicht zu Begriffen und Verfahren	112
9.2	Bindemechanismen und Festigkeit	113
9.3	Aufbauagglomeration	115
9.4	Pressagglomerieren	117
10	Zerkleinern	119
10.1	Grundlagen des Zerkleinerns	119
10.2	Modelle vom Zerkleinerungsvorgang	120
10.2.1	Bruchbildung	120
10.2.2	Zerkleinerungsgesetze	123
10.2.3	Zerkleinerungsgrad	127
10.3	Zerkleinerungsmaschinen und Klassierer	127
10.4	Brecher.....	129
10.4.1	Backenbrecher und Rundbrecher	129
10.4.2	Walzenbrecher.....	130
10.4.3	Prallbrecher.....	131
10.5	Mühlen	132
10.5.1	Wälzmühlen	132
10.5.2	Mahlkörpermühlen	133
10.5.3	Walzenmühlen	137

10.5.4	Prallmühlen	138
10.5.5	Strahlmühlen.....	139
10.6	Scheren und Schneidmühlen	141

THERMISCHE VERFAHRENSTECHNIK

11	Thermische Trennoperationen im Überblick	146
12	Verdampfung	151
12.1	Grundlagen	151
12.2	Technische Anforderungen an die Bauweise von Verdampfern.....	153
12.3	Verdampferschaltungen	154
12.4	Verdampferbauarten	157
13	Kristallisation	160
13.1	Grundlagen	160
13.2	Technische Anforderungen an den Kristallisationsvorgang	163
13.3	Bauarten von Kristallisatoren	167
14	Destillation	172
14.1	Grundlagen	172
14.2	Blasendestillation	179
14.3	Trennung von Gemischen ohne Mischungslücke mit einem azeotropen Punkt.....	181
14.4	Wasserdampf- oder Trägerdampfdestillation	183
14.5	Kontinuierliche Rektifikation	185
14.6	Diskontinuierliche Rektifikation.....	197
14.7	Einbauten und Dimensionierung der Rektifiziersäule	199
15	Absorption	209
15.1	Grundlagen	209
15.2	Dimensionierung der Absorptionskolonne.....	215
15.3	Bauarten von Absorbern	221
16	Adsorption	223
16.1	Grundlage	223
16.2	Dimensionierung von Adsorptionsanlagen	229
16.3	Bauarten von Adsorbern	235
17	Trocknung.....	237

17.1	Grundlagen	237
17.2	Trocknungsarten	239
17.3	Bauarten von Trocknern.....	241
18	Flüssig-Flüssig-Extraktion (Solventextraktion)	244
18.1	Grundlagen	244
18.2	Solventextraktion (Kreuz- und Gegenstromfahrweise)....	250
18.3	Auslegungshinweise für Gegenstromkolonnen im kontinuierlichen Betrieb	256
18.4	Apparatetypen für die Solventextraktion.....	259
18.5	Auswahl und Regeneration des Lösungsmittels.....	263
19	Fest-Flüssig-Extraktion	264
19.1	Grundlagen	264
19.2	Durchführung der Feststoffextraktion	266
19.3	Beispiele für Feststoffextraktionsanlagen.....	266
20	Hochdruckextraktion	270
20.1	Grundlagen	270
20.2	Anwendung der Hochdruckextraktion	274

CHEMISCHE REAKTIONSTECHNIK

21	Einführung in die chemische Reaktionstechnik	278
21.1	Allgemeines.....	278
21.2	Beurteilungsgrößen für Reaktoren	280
	21.2.1 Durchsatz	280
	21.2.2 Umsatz	281
	21.2.3 Selektivität.....	284
	21.2.4 Ausbeute	285
	21.2.5 Verweilzeit.....	285
	21.2.6 Produktionsleistung	285
21.3	Stoffbilanz	286
22	Kinetik chemischer Reaktionen	288
22.1	Grundlagen der Reaktionskinetik	288
22.2	Analyse kinetischer Untersuchungen	290
	22.2.1 Integrationsmethode.....	290
	22.2.2 Differenzielle Methode	295
22.3	Temperaturabhängigkeit der Reaktionsgeschwindigkeit..	296
22.4	Katalyse	300

22.5	Makrokinetik chemischer Reaktionen.....	302
22.5.1	Heterogene Katalyse.....	305
22.5.2	Gas-Flüssigkeits-Reaktionen	307
22.6	Reaktionsarten	311
22.6.1	Reversible Reaktionen	312
22.6.2	Parallelreaktionen	312
22.6.3	Folgereaktionen	315
23	Isotherm betriebene ideale Reaktoren	318
23.1	Betriebsweisen chemischer Reaktoren	318
23.1.1	Diskontinuierlicher Betrieb.....	318
23.1.2	Kontinuierlicher Betrieb	320
23.2	Der diskontinuierlich betriebene Rührkessel	322
23.3	Der kontinuierlich betriebene Rührkessel.....	328
23.4	Die Rührkesselkaskade.....	330
23.5	Das ideale Strömungsrohr.....	337
23.6	Vergleich der idealen Reaktoren	340
23.7	Reaktor mit Kreislauführung.....	341
23.8	Der halbkontinuierliche Rührkessel	345
24	Reale Reaktoren (Verweilzeitverhalten)	347
24.1	Verweilzeitverteilung $E(t)$	347
24.2	Verweilzeitsummenfunktion $F(t)$	351
24.3	Mittlere Verweilzeit	353
24.4	Experimentelle Bestimmung der Verweilzeit	353
24.5	Verweilzeitverhalten realer Reaktoren.....	355
24.5.1	Kontinuierlicher Rührkessel.....	355
24.5.2	Rohrreaktor	357
24.6	Berechnung des mittleren Umsatzes	359
25	Thermisches Verhalten von Reaktoren	361
25.1	Thermische Stabilität von Reaktoren.....	361
25.2	Wärmetechnische Auslegung von Reaktoren	365
25.3	Der diskontinuierlich betriebene Rührkessel	366
25.4	Der kontinuierlich betriebene Rührkessel.....	369
25.4.1	Adiabatischer Betrieb	369
25.4.2	Isothermer Betrieb.....	370
25.5	Das ideale Strömungsrohr.....	371
26	Chemiereaktoren	375
26.1	Reaktoren für homogene Reaktionen.....	375
26.2	Reaktoren für heterogene Reaktionen	375

BIOLOGISCHE VERFAHRENSTECHNIK

27	Grundlagen der Mikrobiologie	382
27.1	Entwicklung und Bedeutung der Mikrobiologie.....	382
27.2	Struktur und Funktion der prokaryotischen Zelle	387
	27.2.1 Kern und Plasmide	390
	27.2.2 Cytoplasmamembran	392
	27.2.3 Zellwand.....	395
	27.2.4 Geißeln.....	397
	27.2.5 Fimbrien und Pili	399
27.3	Struktur und Funktion der eukaryotischen Zelle	399
	27.3.1 Cytoplasma	400
	27.3.2 Mitochondrien und Chloroplasten.....	401
27.4	Hauptgruppen der Bakterien	402
	27.4.1 Stoffwechselftypen	404
	27.4.2 Übersicht über die Vielfalt der Prokaryonten...	405
27.5	Hauptgruppen der Hefen und Pilze	411
27.6	Technisch wichtige Mikroorganismen.....	414
28	Biochemische Grundlagen	417
28.1	Grundlagen des Stoffwechsels und der Energieumwandlung	417
28.2	Ernährungstypen	421
	28.2.1 Heterotrophie und Autotrophie	422
	28.2.2 Chemotrophie und Phototrophie	422
	28.2.3 Lithotrophie und Organotrophie.....	422
	28.2.4 Aerobier und Anaerobier	423
28.3	Atmungsprozesse	423
	28.3.1 EMBDEN-MEYERHOF-PARNAS-Weg	424
	28.3.2 ENTNER-DONDOROFF-Weg und Pentosephosphat-Weg.....	424
	28.3.3 Oxidativer Abbau von Pyruvat.....	426
	28.3.4 Tricarbonsäure-Cyclus	427
	28.3.5 Atmungskette	428
28.4	Anaerobe Atmung	430
	28.4.1 Nitrat-Atmung	430
	28.4.2 Sulfat-Atmung	432
28.5	Gärungen	433
	28.5.1 Alkohol-Gärung	434
	28.5.2 Milchsäure-Gärung.....	435

28.5.3	Propionsäure-Gärung.....	436
29	Bioprozesskinetik	438
29.1	Nährmedien und Wachstumsbedingungen	438
29.1.1	Feste Nährböden	440
29.1.2	Temperaturabhängigkeit des Wachstums	440
29.1.3	pH-Abhängigkeit des Wachstums	442
29.2	Wachstumsbestimmungen	443
29.2.1	Bestimmung der Mikroorganismenzahl	444
29.2.2	Bestimmung der Mikroorganismen.....	446
29.3	Statische Kultur	447
29.3.1	Exponentielles Wachstum	447
29.3.2	Wachstumskurve.....	449
29.4	Kontinuierliche Kultur	453
29.4.1	Wachstum im Turbidostaten.....	455
29.4.2	Wachstum im Chemostaten	456
30	Bioreaktoren	460
30.1	Allgemeine Anforderungen an Bioreaktoren.....	460
30.2	Oberflächenreaktoren.....	461
30.2.1	Feste Nährböden	461
30.2.2	Statische Oberflächenkultur	462
30.2.3	Bettreaktoren.....	463
30.2.4	Membran-Reaktoren	465
30.3	Submers-Reaktoren	466
30.3.1	Energieeintrag durch Begasung.....	466
30.3.2	Energieeintrag durch eine Flüssigkeitspumpe	468
30.3.3	Energieeintrag mit Rührorganen	470
30.3.4	Vergleich der Reaktorsysteme	472
30.4	Belüftung und Sauerstofftransport.....	473
31	Sterilisation und Steriltechnik	477
31.1	Einführung.....	477
31.2	Kinetik der Abtötung durch Hitze einwirkung.....	478
31.3	Sterilisation von flüssigen Medien	480
31.3.1	Batch-Sterilisation mit Dampf	480
31.3.2	Kontinuierliche Sterilisation mit Dampf.....	483
31.3.3	Sterilisation durch Filter	486
31.3.4	Sterilisation durch chemische Methoden.....	486
31.4	Sterilisation von Gasen	487

32	Messtechnik an Bioreaktoren	489
32.1	Einführung	489
32.2	Physikalische Messgrößen	492
32.2.1	Temperatur	492
32.2.2	Druck	492
32.2.3	Drehzahl	493
32.2.4	Schaum	493
32.2.5	Trübung	494
32.3	Chemische Messgrößen	495
32.3.1	pH-Wert	495
32.3.2	Redoxpotenzial	496
32.3.3	Sauerstoff	496
32.3.4	Kohlenstoffdioxid	498
32.3.5	Ionenselektive Elektroden	499
32.4	Biologische Sensoren	500

ANWENDUNGEN IN INDUSTRIE UND UMWELT

HERSTELLUNGSVERFAHREN EINIGER PRODUKTE

33	Schwefelsäureherstellung	504
33.1	Einführung	504
33.2	Reaktionen	504
33.3	Rohstoffeinsatz	505
33.4	Katalysator	506
33.5	Kontaktverfahren	507
34	Herstellung von Titandioxid	510
34.1	Einführung	510
34.2	Rohstoffeinsatz	510
34.3	Verfahren	511
34.3.1	Sulfatverfahren	511
34.3.2	Chloridverfahren	513
34.3.3	Nachbehandlung	514
35	Erdölaufbereitung und Petrochemie	515
35.1	Einführung	515
35.2	Physikalische Bearbeitung	516
35.2.1	Vorbereitung	516
35.2.2	Fraktionierte Destillation	517
35.2.3	Entparaffinierung	518

35.3	Raffinerieverfahren zur stofflichen Umwandlung	519
35.3.1	Cracking-Verfahren	520
35.3.2	Reforming.....	525
35.3.3	Hydrierung.....	527
35.3.4	Isomerisierung.....	528
35.3.5	Polymerisierung	528
35.3.6	Alkylierung.....	529
36	Herstellung von Polyurethanen	530
36.1	Einführung.....	530
36.2	Reaktion.....	530
36.3	Rohstoffeinsatz	531
36.3.1	Isocyanate.....	531
36.3.2	Polyolkomponenten.....	533
36.3.3	Hilfs- und Zusatzstoffe	534
36.4	Verarbeitungsverfahren.....	535
36.4.1	Allgemeines.....	535
36.4.2	Dosiermaschinen	536
36.4.3	Formwerkzeuge	539

BIOTECHNOLOGISCHE VERFAHREN

37	Herstellung von Citronensäure	540
37.1	Einführende Bemerkungen.....	540
37.2	Mikroorganismen und Biosynthese	541
37.3	Nährmedien.....	542
37.4	Produktionsverfahren	543
37.4.1	Oberflächenverfahren	543
37.4.2	Submersverfahren.....	545
38	Herstellung von Penicillin	547
38.1	Einführende Bemerkungen.....	547
38.2	Antibiotika-Produzenten und Klassifizierung	547
38.3	Wirkungsspektrum von Antibiotika	550
38.4	Produktionsverfahren	551
39	Metallgewinnung durch Mikroorganismen	555
39.1	Einführende Bemerkungen.....	555
39.2	Mechanismen der mikrobiellen Laugung.....	556
39.2.1	Direkte Laugung	556
39.2.2	Indirekte Laugung	557
39.3	Laborverfahren.....	558

39.3.1	Perkolatorlaugung	558
39.3.2	Suspensionslaugung	560
39.3.3	Säulenlaugung	561
39.4	Industrielle Laugungsverfahren	561

VERFAHREN ZUR WASSER- UND LUFTREINHALTUNG

40	Reinigung kommunaler Abwässer	565
40.1	Abwasserarten und Fortleitung	565
40.2	Abwasserinhaltsstoffe	566
40.2.1	Typische Messgrößen zur Abwasserbeurteilung	568
40.2.2	Typische Abwasserparameter für ein kommunales Abwasser	569
40.3	Aufbau und Funktion einer kommunalen Kläranlage	570
40.3.1	Mechanisch-physikalische Reinigung	570
40.3.2	Chemische Elimination	573
40.3.3	Biologische Abwasserbehandlung	574
40.3.4	Nachklärung	581
40.3.5	Schlammbehandlung	582
40.4	Alternative Verfahren	583
41	Mechanische und thermische Abluftreinigungsverfahren	585
41.1	Einführende Bemerkungen	585
41.2	Mechanische Abluftreinigungsverfahren	587
41.3	Thermische Abluftreinigungsverfahren	589
41.3.1	Rauchgasentschwefelung und Stickoxidreduk- tion im Abgasstrom von Kohlekraftwerken	590
41.3.2	Abscheidung von Quecksilber und Beseitigung von Dioxinen aus dem Rauchgasstrom von Abfallverbrennungsanlagen mit Adsorbentien	594
41.3.3	Adsorbentien in Lackierstraßen der Automobilindustrie	595
41.3.4	Thermische oder katalytische Nachverbrennung	596
42	Biologische Abluftreinigung	600
42.1	Kriterien zur Anwendung der biologischen Abluftreinigung	602
42.1.1	Abzubauenende Substanzen	602
42.1.2	Mikrobiologische Voraussetzungen	603

42.2	Biowäscher.....	604
	42.2.1 Tropfkörperverfahren	604
	42.2.2 Belebtschlammverfahren.....	605
42.3	Biofilter	607
42.4	Biomembranverfahren.....	611
42.5	Analysemethoden	612
	42.5.1 Geruchsmessung (Olfaktometrie)	612
	42.5.2 Instrumentelle Abluftanalytik	614

BODEN- UND ABFALLBEHANDLUNG

43	Beseitigung von Altlasten – Bodensanierungsverfahren.....	618
43.1	Einführende Bemerkungen.....	618
43.2	Überblick über die Verfahren zur Bodensanierung.....	619
43.3	In-situ-Verfahren	620
43.4	On-site- und Off-site-Verfahren	624
44	Verfahren zur Abfallbehandlung.....	626
44.1	Einführende Bemerkungen.....	626
44.2	Geordnete Deponien	627
44.3	Hausmüll- und Sonderabfallverbrennung	628
44.4	Thermische Abfallbehandlungsanlagen	629
45	Biologische Abfallbehandlung.....	634
45.1	Einführende Bemerkungen.....	634
45.2	Kompostierung von organischen Abfällen	634
45.3	Kompostqualität	637
45.4	Produktion von Biogas	637
	SACHWORTVERZEICHNIS	640