
Inhaltsverzeichnis

BERUFLICHE ANFORDERUNGEN UND PERSPEKTIVEN

1	Berufsbild des Verfahreningenieurs	22
1.1	Traditionelles Verständnis	22
1.2	Berufliche Einsatzmöglichkeiten	23
1.2.1	Forschung, Entwicklung und Lehre	23
1.2.2	Planung und Konstruktion	24
1.2.3	Betrieb und Produktion	25
1.2.4	Anwendungstechnik, Vertrieb und Einkauf	25
1.2.5	Branchenübergreifende Einsatz- möglichkeiten	26
2	Aktuelle Trends	27
2.1	Neue Beschäftigungsfelder	27
2.2	Veränderte Arbeitsplatzprofile	29
2.3	Freiberufliche Ingenieurdienstleistungen	30
3	Weiterentwicklung der Ingenieurausbildung	32
3.1	Arbeitsmarktsituation	32
3.2	Wahl von Studienform und Studienabschluss	33
3.3	Praxisbezug der Ausbildung	35
3.4	Reform der Ingenieurausbildung	36
3.5	Erhalt der Beschäftigungsfähigkeit	38

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	54
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 eines nicht kugelförmigen Kornes	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 Materialschicht	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	Inhaltsverzeichnis	
	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 in 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	304
	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 Kreislaufführung	341
23.8	Der halbkontinuierliche Rührkessel (Semibatch-Reaktor)	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 Verweilzeitfunktionen	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	Stoffwechselltypen.....	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 Hitzeeinwirkung.....	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 VON ZWISCHEN- UND ENDPRODUKTEN

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 Stickoxidreduktion im Abgasstrom von Kohlekraftwerken.....	590
41.3.2	Abscheidung von Quecksilber und Beseitigung von Dioxinen aus dem Rauchgasstrom von Abfallverbrennungsanlagen mit Adsorbern.....	594
41.3.3	Adsorber 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 neuer Konzeption.....	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