

# 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	<b>Aktuelle Trends</b> .....	25
2.1	Neue Beschäftigungsfelder .....	25
2.2	Veränderte Arbeitsplatzprofile .....	27
2.3	Freiberufliche Ingenieurdienstleistungen.....	27
3	<b>Weiterentwicklung der Ingenieurausbildung</b> .....	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	<b>Einführung</b> .....	40
5	<b>Kennzeichnung disperser Stoffsysteme</b> .....	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	Kenngrößen 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
<b>6</b>	<b>Fließen von Schüttgütern .....</b>	<b>65</b>
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
<b>7</b>	<b>Mischen von Feststoffen und Rühren .....</b>	<b>74</b>
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
<b>8</b>	<b>Mechanische Trennprozesse .....</b>	<b>94</b>
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
<b>9</b>	<b>Agglomerieren .....</b>	<b>112</b>
9.1	Übersicht zu Begriffen und Verfahren .....	112
9.2	Bindemechanismen und Festigkeit .....	113
9.3	Aufbauagglomeration .....	115
9.4	Pressagglomerieren .....	117
<b>10</b>	<b>Zerkleinern .....</b>	<b>119</b>
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

<b>11</b>	<b>Thermische Trennoperationen im Überblick .....</b>	<b>146</b>
<b>12</b>	<b>Verdampfung .....</b>	<b>151</b>
12.1	Grundlagen .....	151
12.2	Technische Anforderungen an die Bauweise von Verdampfern .....	153
12.3	Verdampferschaltungen .....	154
12.4	Verdampferbauarten .....	157
<b>13</b>	<b>Kristallisation .....</b>	<b>160</b>
13.1	Grundlagen .....	160
13.2	Technische Anforderungen an den Kristallisationsvorgang .....	163
13.3	Bauarten von Kristallisatoren .....	167
<b>14</b>	<b>Destillation .....</b>	<b>172</b>
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
<b>15</b>	<b>Absorption .....</b>	<b>209</b>
15.1	Grundlagen .....	209
15.2	Dimensionierung der Absorptionskolonne .....	215
15.3	Bauarten von Absorbern .....	221
<b>16</b>	<b>Adsorption .....</b>	<b>223</b>
16.1	Grundlage .....	223
16.2	Dimensionierung von Adsorptionsanlagen .....	229
16.3	Bauarten von Adsorbern .....	235
<b>17</b>	<b>Trocknung .....</b>	<b>237</b>

17.1	Grundlagen .....	237
17.2	Trocknungsarten .....	239
17.3	Bauarten von Trocknern.....	241
<b>18</b>	<b>Flüssig-Flüssig-Extraktion (Solventextraktion).....</b>	<b>244</b>
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
<b>19</b>	<b>Fest-Flüssig-Extraktion .....</b>	<b>264</b>
19.1	Grundlagen .....	264
19.2	Durchführung der Feststoffextraktion .....	266
19.3	Beispiele für Feststoffextraktionsanlagen.....	266
<b>20</b>	<b>Hochdruckextraktion .....</b>	<b>270</b>
20.1	Grundlagen .....	270
20.2	Anwendung der Hochdruckextraktion .....	274

## CHEMISCHE REAKTIONSTECHNIK

<b>21</b>	<b>Einführung in die chemische Reaktionstechnik.....</b>	<b>278</b>
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
<b>22</b>	<b>Kinetik chemischer Reaktionen .....</b>	<b>288</b>
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
<b>23</b>	<b>Isotherm betriebene ideale Reaktoren .....</b>	<b>318</b>
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
<b>24</b>	<b>Reale Reaktoren (Verweilzeitverhalten) .....</b>	<b>347</b>
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
<b>25</b>	<b>Thermisches Verhalten von Reaktoren .....</b>	<b>361</b>
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
<b>26</b>	<b>Chemiereaktoren .....</b>	<b>375</b>
26.1	Reaktoren für homogene Reaktionen.....	375
26.2	Reaktoren für heterogene Reaktionen .....	375

## BIOLOGISCHE VERFAHRENSTECHNIK

<b>27</b>	<b>Grundlagen der Mikrobiologie</b> .....	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 Stoffwechselformen .....	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
<b>28</b>	<b>Biochemische Grundlagen</b> .....	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
<b>29</b>	<b>Bioprozesskinetik .....</b>	<b>438</b>
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
<b>30</b>	<b>Bioreaktoren .....</b>	<b>460</b>
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
<b>31</b>	<b>Sterilisation und Steriltechnik.....</b>	<b>477</b>
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



<b>32</b>	<b>Messtechnik an Bioreaktoren</b> .....	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**

<b>33</b>	<b>Schwefelsäureherstellung</b> .....	504
33.1	Einführung .....	504
33.2	Reaktionen .....	504
33.3	Rohstoffeinsatz .....	505
33.4	Katalysator .....	506
33.5	Kontaktverfahren .....	507
<b>34</b>	<b>Herstellung von Titandioxid</b> .....	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
<b>35</b>	<b>Erdölaufbereitung und Petrochemie</b> .....	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
<b>36</b>	<b>Herstellung von Polyurethanen .....</b>	<b>530</b>
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

<b>37</b>	<b>Herstellung von Citronensäure .....</b>	<b>540</b>
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
<b>38</b>	<b>Herstellung von Penicillin .....</b>	<b>547</b>
38.1	Einführende Bemerkungen.....	547
38.2	Antibiotika-Produzenten und Klassifizierung .....	547
38.3	Wirkungsspektrum von Antibiotika .....	550
38.4	Produktionsverfahren .....	551
<b>39</b>	<b>Metallgewinnung durch Mikroorganismen .....</b>	<b>555</b>
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

<b>40</b>	<b>Reinigung kommunaler Abwässer</b> .....	<b>565</b>
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
<b>41</b>	<b>Mechanische und thermische Abluftreinigungsverfahren</b> .....	<b>585</b>
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 Adsorbern .....	594
41.3.3	Adsorber in Lackierstraßen der Automobilindustrie .....	595
41.3.4	Thermische oder katalytische Nachverbrennung .....	596
<b>42</b>	<b>Biologische Abluftreinigung</b> .....	<b>600</b>
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**

<b>43</b>	<b>Beseitigung von Altlasten – Bodensanierungsverfahren.....</b>	<b>618</b>
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
<b>44</b>	<b>Verfahren zur Abfallbehandlung.....</b>	<b>626</b>
44.1	Einführende Bemerkungen.....	626
44.2	Geordnete Deponien .....	627
44.3	Hausmüll- und Sonderabfallverbrennung.....	628
44.4	Thermische Abfallbehandlungsanlagen .....	629
<b>45</b>	<b>Biologische Abfallbehandlung.....</b>	<b>634</b>
45.1	Einführende Bemerkungen.....	634
45.2	Kompostierung von organischen Abfällen.....	634
45.3	Kompostqualität .....	637
45.4	Produktion von Biogas .....	637
	<b>SACHWORTVERZEICHNIS .....</b>	<b>640</b>