

# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b> .....	<b>5</b>
<b>TEIL I Berufliche Anforderungen und Perspektiven</b> .....	<b>21</b>
<b>1 Berufsbild des Verfahreningenieurs</b> .....	<b>22</b>
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
<b>2 Aktuelle Trends</b> .....	<b>28</b>
2.1 Neue Beschäftigungsfelder .....	28
2.2 Veränderte Arbeitsplatzprofile .....	30
2.3 Freiberufliche Ingenieurdienstleistungen .....	31
<b>3 Weiterentwicklung der Ingenieurausbildung</b> .....	<b>33</b>
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

<b>TEIL II Mechanische Verfahrenstechnik</b> .....	<b>43</b>
<b>4 Einführung</b> .....	<b>44</b>
<b>5 Kennzeichnung disperser Stoffsysteme</b> .....	<b>46</b>
5.1 Begriffsbestimmung .....	46
5.2 Charakterisierung von Partikelmerkmalen .....	47
5.2.1 Feinheitsemerkmale .....	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
<b>6 Fließen von Schüttgütern</b> .....	<b>73</b>
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
<b>7</b>	<b>Mischen von Feststoffen und Rühren .....</b>	<b>83</b>
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
<b>8</b>	<b>Mechanische Trennprozesse .....</b>	<b>103</b>
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
<b>9</b>	<b>Agglomerieren .....</b>	<b>122</b>
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

---

<b>14 Destillation</b> .....	<b>184</b>
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
<b>15 Absorption</b> .....	<b>224</b>
15.1 Grundlagen .....	224
15.2 Dimensionierung der Absorptionskolonne .....	231
15.3 Bauarten von Absorbern .....	236
<b>16 Adsorption</b> .....	<b>238</b>
16.1 Grundlagen .....	238
16.2 Dimensionierung von Adsorptionsanlagen .....	244
16.3 Bauarten von Adsorbern .....	250
<b>17 Trocknung</b> .....	<b>251</b>
17.1 Grundlagen .....	251
17.2 Trocknungsarten .....	253
17.3 Bauarten von Trocknern .....	255
<b>18 Flüssig-Flüssig-Extraktion (Solventextraktion)</b> .....	<b>258</b>
18.1 Grundlagen .....	258
18.2 Solventextraktion in Kreuz- und Gegenstromfahrweise .....	265
18.3 Auslegungshinweise für Gegenstromkolonnen im kontinuierlichen Betrieb .....	271
18.4 Apparattypen für die Solventextraktion .....	274
18.5 Auswahl und Regeneration des Lösungsmittels .....	278

<b>19 Fest-Flüssig-Extraktion</b> .....	<b>279</b>
19.1 Grundlagen .....	279
19.2 Durchführung der Feststoffextraktion .....	281
19.3 Beispiele für Feststoffextraktionsanlagen .....	282
<b>20 Hochdruckextraktion</b> .....	<b>285</b>
20.1 Grundlagen .....	285
20.2 Anwendung der Hochdruckextraktion .....	289
<b>TEIL IV Chemische Reaktionstechnik</b> .....	<b>291</b>
<b>21 Einführung in die chemische Reaktionstechnik</b> ....	<b>292</b>
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
<b>22 Kinetik chemischer Reaktionen</b> .....	<b>303</b>
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
<b>23</b>	<b>Isotherm betriebene ideale Reaktoren .....</b>	<b>334</b>
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
<b>24</b>	<b>Reale Reaktoren (Verweilzeitverhalten) .....</b>	<b>364</b>
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
<b>25</b>	<b>Thermisches Verhalten von Reaktoren .....</b>	<b>379</b>
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

<b>26</b>	<b>Chemiereaktoren</b> .....	<b>394</b>
26.1	Reaktoren für homogene Reaktionen .....	394
26.2	Reaktoren für heterogene Reaktionen .....	395
<b>TEIL V Biologische Verfahrenstechnik</b> .....		<b>399</b>
<b>27</b>	<b>Grundlagen der Mikrobiologie</b> .....	<b>400</b>
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	Stoffwechselformen .....	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
<b>28</b>	<b>Biochemische Grundlagen</b> .....	<b>436</b>
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
<b>29</b>	<b>Bioprozesskinetik .....</b>	<b>459</b>
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
<b>30</b>	<b>Bioreaktoren .....</b>	<b>483</b>
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

<b>31</b>	<b>Sterilisation und Steriltechnik</b>	<b>501</b>
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
<b>32</b>	<b>Messtechnik an Bioreaktoren</b>	<b>514</b>
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
	<b>TEIL VI Anwendungen in Industrie und Umwelt</b>	<b>529</b>
<b>33</b>	<b>Schwefelsäureherstellung</b>	<b>530</b>
33.1	Einführung	530
33.2	Reaktion	531
33.3	Rohstoffeinsatz	532
33.4	Katalysator	532
33.5	Kontaktverfahren	533

---

<b>34 Herstellung von Titandioxid</b> .....	<b>536</b>
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
<b>35 Erdölaufbereitung und Petrochemie</b> .....	<b>541</b>
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
<b>36 Herstellung von Polyurethanen</b> .....	<b>557</b>
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

<b>37 Herstellung von Citronensäure</b> .....	<b>568</b>
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
<b>38 Herstellung von Penicillin</b> .....	<b>576</b>
38.1 Einführende Bemerkungen .....	576
38.2 Antibiotika-Produzenten und Klassifizierung .....	576
38.3 Wirkungsspektrum von Antibiotika .....	579
38.4 Produktionsverfahren .....	580
<b>39 Metallgewinnung durch Mikroorganismen</b> .....	<b>584</b>
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
<b>40 Reinigung kommunaler Abwässer</b> .....	<b>595</b>
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
<b>41</b>	<b>Mechanische und thermische Abluft-</b>	
	<b>reinigungsverfahren .....</b>	<b>617</b>
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
<b>42</b>	<b>Biologische Abluftreinigung .....</b>	<b>633</b>
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

<b>43 Beseitigung von Altlasten – Bodensanierungsverfahren</b> .....	<b>653</b>
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
<b>44 Verfahren zur Abfallbehandlung</b> .....	<b>661</b>
44.1 Einführende Bemerkungen .....	661
44.2 Geordnete Deponien .....	662
44.3 Hausmüll- und Sonderabfallverbrennung .....	663
44.4 Thermische Abfallbehandlungsanlagen neuer Konzeption ....	665
<b>45 Biologische Abfallbehandlung</b> .....	<b>669</b>
45.1 Einführende Bemerkungen .....	669
45.2 Kompostierung von organischen Abfällen .....	670
45.3 Kompostqualität .....	672
45.4 Produktion von Biogas .....	672
<b>Sachwortverzeichnis</b> .....	<b>675</b>