

## Inhaltsverzeichnis

|                                                           |       |
|-----------------------------------------------------------|-------|
| Vorwort zur 3. Auflage                                    | XV    |
| Vorwort zur 2. Auflage                                    | XVII  |
| Vorwort zur 1. Auflage                                    | XIX   |
| Die Autoren                                               | XXIII |
| Enzyklopädien und Nachschlagewerke zur technischen Chemie | XXVII |
| Symbolverzeichnis für häufig benutzte Formelzeichen       | XXIX  |

### Teil I Einführung in die technische Chemie 1

|          |                                                                       |           |
|----------|-----------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>Chemische Prozesse und chemische Industrie</b>                     | <b>3</b>  |
| 1.1      | Besonderheiten chemischer Prozesse                                    | 3         |
| 1.2      | Chemie und Umwelt                                                     | 4         |
| 1.3      | Chemiewirtschaft                                                      | 5         |
| 1.3.1    | Einteilung der Chemieprodukte                                         | 5         |
| 1.3.2    | Chemiefirmen werden Großunternehmen – ein historischer Rückblick      | 6         |
| 1.3.3    | Strukturwandel in der Chemieindustrie                                 | 8         |
| 1.4      | Struktur von Chemieunternehmen                                        | 9         |
| 1.5      | Bedeutung von Forschung und Entwicklung für die chemische Industrie   | 10        |
| 1.5.1    | Wissenschaft und chemische Technik                                    | 10        |
| 1.5.2    | Betriebsinterne Forschung                                             | 11        |
| 1.6      | Entwicklungstendenzen und Zukunftsaussichten der chemischen Industrie | 13        |
|          | Literatur                                                             | 15        |
| <b>2</b> | <b>Charakterisierung chemischer Produktionsverfahren</b>              | <b>17</b> |
| 2.1      | Laborverfahren und technische Verfahren                               | 17        |
| 2.1.1    | Chlorierung von Benzol                                                | 17        |
| 2.1.2    | Oxychlorierung von Benzol                                             | 19        |
| 2.1.3    | Herstellung von Azofarbstoffen                                        | 19        |
| 2.1.4    | Zusammenfassung                                                       | 20        |
| 2.2      | Gliederung chemischer Produktionsverfahren                            | 20        |
| 2.3      | Darstellung chemischer Verfahren und Anlagen durch Fließschemata      | 23        |
| 2.3.1    | Grundfließschema                                                      | 24        |
| 2.3.2    | Verfahrensfließschema                                                 | 24        |
| 2.3.3    | Rohrleitungs- und Instrumenten (RI)-Fließschema                       | 25        |
| 2.3.4    | Mess- und Regelschema                                                 | 26        |
| 2.3.5    | Spezielle Schemata                                                    | 26        |
|          | Literatur                                                             | 28        |

**3 Katalyse als Schlüsseltechnologie der chemischen Industrie 29**

- 3.1 Was ist Katalyse? 29
- 3.2 Arten von Katalysatoren 32
  - 3.2.1 Heterogene Katalyse 32
  - 3.2.2 Homogene Katalyse 36
  - 3.2.3 Spezielle Aspekte in der Katalyse 44
  - 3.2.4 Biokatalyse 47
  - 3.2.5 Elektrokatalyse 51
  - 3.2.6 Photokatalyse 54
- Literatur 55

**Teil II Chemische Reaktionstechnik 59****4 Grundlagen der Chemischen Reaktionstechnik 61**

- 4.1 Grundbegriffe und Grundphänomene 61
  - 4.1.1 Klassifizierung chemischer Reaktionen 61
  - 4.1.2 Grundbegriffe und Definitionen 62
  - 4.1.3 Stöchiometrie chemischer Reaktionen 64
- 4.2 Chemische Thermodynamik 72
  - 4.2.1 Reaktionsenthalpie 72
  - 4.2.2 Gleichgewichtsumsatz 74
  - 4.2.3 Simultangleichgewichte 77
- 4.3 Stoff- und Wärmetransportvorgänge 81
  - 4.3.1 Molekulare Transportvorgänge 81
  - 4.3.2 Diffusion in porösen Medien 87
  - 4.3.3 Wärmeleitfähigkeit in porösen Feststoffen 92
  - 4.3.4 Stoff- und Wärmetransport an Phasengrenzflächen 93
  - 4.3.5 Wärmeübertragung in Mehrphasenreaktoren 96
- Literatur 101

**5 Kinetik chemischer Reaktionen 103**

- 5.1 Mikrokinetik chemischer Reaktionen 104
  - 5.1.1 Einführung 104
  - 5.1.2 Kinetik homogener Gas- und Flüssigkeitsreaktionen 106
  - 5.1.3 Kinetik heterogen katalysierter Reaktionen 112
  - 5.1.4 Kinetik der Desaktivierung heterogener Katalysatoren 117
  - 5.1.5 Kinetik von Gas-Feststoff-Reaktionen 118
  - 5.1.6 Kinetik homogen und durch gelöste Enzyme katalysierter Reaktionen 119
- 5.2 Ermittlung der Kinetik chemischer Reaktionen 125
  - 5.2.1 Zielsetzungen kinetischer Untersuchungen 125
  - 5.2.2 Betriebsweise und Bauart von Laborreaktoren für kinetische Untersuchungen 126
  - 5.2.3 Planung und Auswertung kinetischer Messungen zur Ermittlung von Geschwindigkeitsgleichungen 144
- 5.3 Makrokinetik chemischer Reaktionen – Zusammenwirken von chemischer Reaktion und Transportvorgängen 170
  - 5.3.1 Heterogen katalysierte Gasreaktionen 170
  - 5.3.2 Fluid-Fluid-Reaktionen 189
  - 5.3.3 Gas-Feststoff-Reaktionen 196
- Literatur 202

**6 Chemische Reaktoren und deren reaktionstechnische Modellierung 209**

- 6.1 Allgemeine Stoff- und Energiebilanzen 209
- 6.2 Absatzweise betriebene Rührkesselreaktoren 210
  - 6.2.1 Stoffbilanz 211
  - 6.2.2 Wärmebilanz 214
- 6.3 Halbkontinuierlich betriebene Rührkesselreaktoren 218
- 6.4 Kontinuierlich betriebener idealer Rührkesselreaktor 221
  - 6.4.1 Stoffbilanz des kontinuierlich betriebenen Rührkesselreaktors 221
  - 6.4.2 Wärmebilanz des kontinuierlich betriebenen Rührkesselreaktors 225
- 6.5 Ideale Strömungsrohrreaktoren 229
  - 6.5.1 Stoffbilanz 230
  - 6.5.2 Wärmebilanz 231
- 6.6 Kombination idealer Reaktoren 233
  - 6.6.1 Kaskade kontinuierlich betriebener Rührkesselreaktoren 233
  - 6.6.2 Strömungsrohrreaktor mit Rückführung 236
- 6.7 Reale homogene und quasihomogene Reaktoren 238
  - 6.7.1 Verweilzeitverteilung in chemischen Reaktoren 239
  - 6.7.2 Experimentelle Bestimmung der Verweilzeitverteilung 240
  - 6.7.3 Verweilzeitverteilung in idealen Reaktoren 243
  - 6.7.4 Verweilzeitmodelle realer Reaktoren 246
  - 6.7.5 Verweilzeitverhalten realer Reaktoren 252
  - 6.7.6 Einfluss der Verweilzeitverteilung und der Vermischung auf die Leistung realer Reaktoren 256
  - 6.7.7 Vermischung in realen Reaktoren 259
- 6.8 Reale Mehrphasenreaktoren 263
  - 6.8.1 Fluid-Feststoff-Systeme 263
  - 6.8.2 Fluid-Fluid-Systeme 270
  - 6.8.3 Gasförmig-flüssig-fest-Systeme 275
- Literatur 278

**7 Auswahl und Auslegung chemischer Reaktoren 283**

- 7.1 Reaktorauswahl und reaktionstechnische Optimierung 283
  - 7.1.1 Einfache Reaktionen (Umsatzproblem) 284
  - 7.1.2 Komplexe Reaktionen (Ausbeuteproblem) 301
- 7.2 Thermische Prozesssicherheit 317
  - 7.2.1 Theorie der Wärmeexplosion 318
  - 7.2.2 Parametrische Sensitivität 322
- 7.2.3 Halbkontinuierlich betriebene Rührkesselreaktoren 324
- 7.2.4 Kontinuierlich betriebene Rührkesselreaktoren 329
- 7.2.5 Strömungsrohrreaktoren 329
- 7.3 Mikrostrukturierte Reaktoren 329
  - 7.3.1 Homogene Reaktionen 330
  - 7.3.2 Feststoffkatalysierte Fluidreaktionen 338
  - 7.3.3 Fluid-Fluid-Reaktionen 339
- Literatur 340

**Teil III Grundoperationen 345****8 Thermodynamische Grundlagen für die Berechnung von Phasengleichgewichten 347**

- 8.1 Phasengleichgewichtsbeziehung 349
- 8.2 Dampf-Flüssig-Gleichgewicht 350
  - 8.2.1 Anwendung von Zustandsgleichungen 351

- 8.2.2 Virialgleichung 353
- 8.2.3 Assoziation in der Gasphase 355
- 8.2.4 Weitere Zustandsgleichungen 356
- 8.2.5 Anwendung von Aktivitätskoeffizientenmodellen 357
- 8.2.6 Aktivitätskoeffizientenmodelle 359
- 8.3 Vorausberechnung von Phasengleichgewichten 363
- 8.4 Konzentrationsabhängigkeit des Trennfaktors binärer Systeme 366
  - 8.4.1 Bedingung für das Auftreten azeotroper Punkte 366
  - 8.4.2 Rückstandslinien, Grenzdestillationslinien und Destillationsfelder 369
- 8.5 Flüssig-Flüssig-Gleichgewicht 371
- 8.6 Gaslöslichkeit 374
- 8.7 Fest-Flüssig-Gleichgewicht 377
- 8.8 Phasengleichgewicht für die überkritische Extraktion 381
- 8.9 Adsorptionsgleichgewichte 382
- 8.10 Osmotischer Druck 385
  - Literatur 386
- 9 Auslegung thermischer Trennverfahren 389**
  - 9.1 Grundlagen der Wärmeübertragung 389
    - 9.1.1 Wärmetransport durch Leitung 390
    - 9.1.2 Konvektiver Wärmetransport 391
    - 9.1.3 Wärmeübergang bei Kondensation 392
    - 9.1.4 Wärmeübergang bei Verdampfung 393
    - 9.1.5 Wärmedurchgang 394
    - 9.1.6 Wärmetransport durch Strahlung 394
  - 9.2 Technischer Wärmetransport 395
    - 9.2.1 Einteilung der Wärmeübertrager 395
    - 9.2.2 Technisch wichtige Wärmeübertrager 396
  - 9.3 Konzept der idealen Trennstufe für die Destillation 403
  - 9.4 Realisierung mehrerer Trennstufen 403
  - 9.5 Kontinuierliche Rektifikation 405
    - 9.5.1 Rektifikationskolonne 405
    - 9.5.2 Ermittlung der Zahl theoretischer Trennstufen 406
    - 9.5.3 Konzept der Übertragungseinheit 429
  - 9.6 Trennung azeotroper und engsiedender Systeme 431
    - 9.6.1 Rektifikative Trennung azeotroper und engsiedender Systeme ohne Zusatzstoff 432
    - 9.6.2 Rektifikation mit Hilfsstoffen 436
    - 9.6.3 Wasserdampfdestillation 440
  - 9.7 Reaktive Rektifikation 441
  - 9.8 Zahl der Kolonnen und mögliche Trennsequenzen 442
    - 9.8.1 Energieeinsparung 444
    - 9.8.2 Trennwandkolonnen 445
  - 9.9 Diskontinuierliche Rektifikation 447
    - 9.9.1 Einfache diskontinuierliche Destillation 448
    - 9.9.2 Mehrstufige diskontinuierliche Rektifikation 449
  - 9.10 Auslegung von Rektifikationskolonnen 450
    - 9.10.1 Bodenkolonnen 451
    - 9.10.2 Packungskolonnen 454
  - 9.11 Absorption 459
    - 9.11.1 Lösemittelauswahl 460
    - 9.11.2 McCabe-Thiele-Verfahren 460
    - 9.11.3 Kremser-Gleichung 464

- 9.11.4 Chemische Absorption 466
- 9.11.5 Absorberbauarten 466
- 9.12 Flüssig-Flüssig-Extraktion 467
  - 9.12.1 Auswahl des Extraktionsmittels 469
  - 9.12.2 McCabe-Thiele-Verfahren 469
  - 9.12.3 Kremser-Gleichung 471
  - 9.12.4 Anwendung von Dreiecksdiagrammen 471
  - 9.12.5 Extraktoren 473
- 9.13 Fest-Flüssig-Extraktion 477
- 9.14 Extraktion mit überkritischen Fluiden 478
- 9.15 Kristallisation 478
  - 9.15.1 Kristallisationsprozess 479
  - 9.15.2 Kristallisatoren 481
- 9.16 Adsorption 485
  - 9.16.1 Adsorptionsmittel 486
  - 9.16.2 Adsorptions- und Desorptionsschritt 487
  - 9.16.3 Adsorberbauarten 488
- 9.17 Entfernung der Restfeuchten, Entwässern und Trocknen 491
  - 9.17.1 Trocknungsgüter und Trocknungsarten 491
  - 9.17.2 Kriterien zur Auslegung von Trocknern 491
  - 9.17.3 Apparate zum technischen Trocknen 491
- 9.18 Membrantrennverfahren 494
  - 9.18.1 Trennprinzip und Arbeitsweise 494
  - 9.18.2 Arten von Membrantrennverfahren 497
  - 9.18.3 Membranmodule 499
  - 9.18.4 Ionenleitende Membranen 501
- Literatur 501
  
- 10 Mechanische Grundoperationen 505**
  - 10.1 Strömungslehre – Fluiddynamik in Reaktoren, Kolonnen und Rohrleitungen 505
    - 10.1.1 Strömungsarten, Reynolds'sche Ähnlichkeit 505
    - 10.1.2 Strömungsgesetze 506
    - 10.1.3 Strömungsbedingter Druckverlust 511
  - 10.2 Erzeugen von Förderströmen – Pumpen, Komprimieren, Evakuieren 514
    - 10.2.1 Pumpencharakteristika und Pumpenwirkungsgrade 514
    - 10.2.2 Pumpen – Apparate zum Fördern von Flüssigkeiten 516
    - 10.2.3 Verdichten von Gasen 518
    - 10.2.4 Vakuumerzeugung 523
  - 10.3 Mischen fluider Phasen 525
    - 10.3.1 Mischen in flüssiger Phase 525
    - 10.3.2 Flüssigkeitsverteilung in der Gasphase 533
  - 10.4 Mechanische Trennverfahren 537
    - 10.4.1 Partikelabtrennung aus Flüssigkeiten 537
    - 10.4.2 Partikelabscheidung aus Gasströmen 546
    - 10.4.3 Trennen weiterer disperser Systeme 551
  - 10.5 Verarbeiten von Feststoffen 553
    - 10.5.1 Zerkleinern von Feststoffen 553
    - 10.5.2 Klassieren und Sortieren 559
    - 10.5.3 Formgebung 565
  - Literatur 568

**Teil IV Verfahrensentwicklung 571**

- 11 Gesichtspunkte der Verfahrensauswahl 573**
  - 11.1 Das Konzept der Nachhaltigkeit 573
  - 11.2 Stoffliche Gesichtspunkte (Rohstoffauswahl und Syntheseroute) 575
    - 11.2.1 Nachhaltigkeit am Beispiel des Phenols – sieben technische Synthesewege 575
    - 11.2.2 Phenol aus nachwachsenden Rohstoffen 580
    - 11.2.3 Vergleich der Phenolverfahren 580
    - 11.2.4 Zusammenfassung 581
  - 11.3 Energieaufwand 581
    - 11.3.1 Energiearten und Energienutzung 581
    - 11.3.2 Wasserstoff 582
  - 11.4 Sicherheit 588
    - 11.4.1 Exotherme Reaktionen 589
    - 11.4.2 Druckerhöhung 591
    - 11.4.3 Brennbare und explosive Stoffe und Stoffgemische 592
    - 11.4.4 Toxische Stoffe 594
    - 11.4.5 Zusammenfassung und Folgerungen 595
  - 11.5 Umweltschutz im Sinne der Nachhaltigkeit 595
    - 11.5.1 Luftverunreinigungen 596
    - 11.5.2 Abwasserbelastungen 598
    - 11.5.3 Abfälle 603
    - 11.5.4 Zusammenfassung und Folgerungen 605
  - 11.6 Betriebsweise 606
    - 11.6.1 Beispiel: Hydrierung von Doppelbindungen 606
    - 11.6.2 Unterschiede zwischen diskontinuierlichen und kontinuierlichen Verfahren 608
    - 11.6.3 Entscheidungskriterien 610
      - Literatur 611
- 12 Verfahrensgrundlagen 615**
  - 12.1 Ausgangssituation und Ablauf 615
  - 12.2 Verfahrensinformationen 617
    - 12.2.1 Übersicht 617
    - 12.2.2 Sicherheitstechnische Kenndaten 617
    - 12.2.3 Toxikologische Daten 620
  - 12.3 Stoff- und Energiebilanzen 622
    - 12.3.1 Stoff- und Energiebilanzen – Werkzeuge in Verfahrensentwicklung und Anlagenprojektierung 622
    - 12.3.2 Stoffbilanzen 622
    - 12.3.3 Energiebilanzen 628
  - 12.4 Versuchsanlagen 629
    - 12.4.1 Notwendigkeit und Aufgaben 629
    - 12.4.2 Typen von Versuchsanlagen 629
    - 12.4.3 Planung einer Versuchsanlage 631
    - 12.4.4 Modularer Planungsansatz 631
  - 12.5 Auswertung und Optimierung 631
    - 12.5.1 Versuchsplanung und Auswertung 631
    - 12.5.2 Prozesssimulation und Prozessoptimierung 632
      - Literatur 633

**13 Wirtschaftlichkeit von Verfahren und Produktionsanlagen 637**

- 13.1 Erlöse, Kosten und Gewinn 637
- 13.2 Herstellkosten 638
  - 13.2.1 Vorkalkulation und Nachkalkulation 638
  - 13.2.2 Ermittlung des Kapitalbedarfs 639
  - 13.2.3 Ermittlung der Herstellkosten 642
- 13.3 Kapazitätsauslastung und Wirtschaftlichkeit 644
  - 13.3.1 Erlöse und Gewinn 644
  - 13.3.2 Fixe Kosten und veränderliche Kosten 646
  - 13.3.3 Gewinn bzw. Verlust in Abhängigkeit von der Kapazitätsauslastung 646
- 13.4 Wirtschaftlichkeit von Projekten 648
  - 13.4.1 Rentabilität als Maß für die Wirtschaftlichkeit 648
  - 13.4.2 Investitionsertrag und Kapitalrückflusszeit 648
  - 13.4.3 Andere Methoden der Rentabilitätsbewertung 649
  - 13.4.4 Entscheidung zwischen Alternativen 650
- Literatur 653

**14 Planung und Bau von Anlagen 655**

- 14.1 Projektablauf 655
- 14.2 Projektorganisation 656
- 14.3 Genehmigungsverfahren für Chemieanlagen 658
- 14.4 Anlagenplanung 660
- 14.5 Projektentwicklung 662
  - 14.5.1 Ablaufplanung und -überwachung 662
  - 14.5.2 Bau und Montage 664
- Literatur 666

**Teil V Chemische Prozesse 669****15 Organische Rohstoffe 671**

- 15.1 Erdöl 671
  - 15.1.1 Zusammensetzung und Klassifizierung 671
  - 15.1.2 Bildung und Vorkommen 672
  - 15.1.3 Förderung und Transport 674
  - 15.1.4 Erdölraffinerien 677
  - 15.1.5 Thermische Konversionsverfahren 682
  - 15.1.6 Katalytische Konversionsverfahren 684
- 15.2 Erdgas 689
  - 15.2.1 Zusammensetzung und Klassifizierung 689
  - 15.2.2 Förderung und Transport 689
  - 15.2.3 Weiterverarbeitung 691
- 15.3 Kohle 691
  - 15.3.1 Zusammensetzung und Klassifizierung 691
  - 15.3.2 Vorkommen 693
  - 15.3.3 Förderung 693
  - 15.3.4 Verarbeitung 694
- 15.4 Nachwachsende Rohstoffe 703
  - 15.4.1 Bedeutung der nachwachsenden Rohstoffe 703
  - 15.4.2 Fette und Öle 704
  - 15.4.3 Kohlenhydrate 713
- Literatur 721

**16 Organische Grundchemikalien 725**

- 16.1 Alkane 726
  - 16.1.1 Herstellung 726
  - 16.1.2 Verwendung 726
- 16.2 Alkene 729
  - 16.2.1 Herstellung 729
  - 16.2.2 Verwendung 738
- 16.3 Aromaten 742
  - 16.3.1 Herstellung 742
  - 16.3.2 Verwendung 745
- 16.4 Ethin 749
  - 16.4.1 Herstellung 749
  - 16.4.2 Verwendung 751
- 16.5 Synthesegas 752
  - 16.5.1 Herstellung 752
  - 16.5.2 Verwendung von Synthesegas 755
  - 16.5.3 Kohlenmonoxid 756
- Literatur 757

**17 Organische Zwischenprodukte 761**

- 17.1 Sauerstoffhaltige Verbindungen 761
  - 17.1.1 Alkohole 761
  - 17.1.2 Phenole 774
  - 17.1.3 Ether 775
  - 17.1.4 Epoxide 777
  - 17.1.5 Aldehyde 780
  - 17.1.6 Ketone 787
  - 17.1.7 Carbonsäuren 789
- 17.2 Stickstoffhaltige Verbindungen 801
  - 17.2.1 Amine 801
  - 17.2.2 Lactame 804
  - 17.2.3 Nitrile 805
  - 17.2.4 Isocyanate 807
- 17.3 Halogenhaltige Verbindungen 808
  - 17.3.1 Chlormethane 808
  - 17.3.2 Chlorderivate höherer Aliphaten 809
  - 17.3.3 Chloraromaten 812
  - 17.3.4 Fluorverbindungen 813
- Literatur 816

**18 Anorganische Grund- und Massenprodukte 821**

- 18.1 Anorganische Schwefelverbindungen 821
  - 18.1.1 Schwefel und Sulfide 821
  - 18.1.2 Schwefeldioxid 821
  - 18.1.3 Schwefeltrioxid und Schwefelsäure 822
- 18.2 Anorganische Stickstoffverbindungen 823
  - 18.2.1 Ammoniak 823
  - 18.2.2 Salpetersäure 827
  - 18.2.3 Harnstoff und Melamin 828
- 18.3 Chlor und Alkalien 829
  - 18.3.1 Chlor und Alkalilauge durch Alkalichloridelektrolyse 829
  - 18.3.2 Natronlauge und Soda 831
- 18.4 Phosphorverbindungen 832
  - 18.4.1 Elementarer Phosphor 832

- 18.4.2 Phosphorsäure und Phosphate 833
- 18.5 Technische Gase 834
  - 18.5.1 Sauerstoff und Stickstoff 834
  - 18.5.2 Edelgase 837
  - 18.5.3 Kohlendioxid 838
- 18.6 Düngemittel 839
  - 18.6.1 Bedeutung der Düngemittel 839
  - 18.6.2 Stickstoffdüngemittel 840
  - 18.6.3 Phosphordüngemittel 840
  - 18.6.4 Kalidüngemittel 841
  - 18.6.5 Mehrnährstoffdünger 841
  - 18.6.6 Wirtschaftliche Betrachtung 841
- 18.7 Metalle 842
  - 18.7.1 Gusseisen 842
  - 18.7.2 Stähle 843
  - 18.7.3 Nichteisenmetalle und ihre Legierungen 844
  - 18.7.4 Korrosion und Korrosionsschutz 845
  - Literatur 846
- 19 Chemische Endprodukte 851**
  - 19.1 Polymere 851
    - 19.1.1 Aufbau und Synthese von Polymeren 851
    - 19.1.2 Polymerisationstechnik 857
    - 19.1.3 Massenkunststoffe 861
    - 19.1.4 Fasern 867
    - 19.1.5 Klebstoffe 868
    - 19.1.6 Hochtemperaturfeste Kunststoffe 868
    - 19.1.7 Elektrisch leitfähige Polymere 869
    - 19.1.8 Flüssigkristalline Polymere 869
    - 19.1.9 Biologisch abbaubare Polymere 870
  - 19.2 Tenside und Waschmittel 871
    - 19.2.1 Aufbau und Eigenschaften 871
    - 19.2.2 Anionische Tenside 871
    - 19.2.3 Kationische Tenside 874
    - 19.2.4 Nichtionische Tenside 874
    - 19.2.5 Amphotere Tenside 876
    - 19.2.6 Vergleich der Tensidklassen 877
    - 19.2.7 Anwendungsgebiete 878
  - 19.3 Farbstoffe 883
    - 19.3.1 Übersicht 883
    - 19.3.2 Azofarbstoffe 884
    - 19.3.3 Carbonylfarbstoffe 885
    - 19.3.4 Methinfarbstoffe 886
    - 19.3.5 Phthalocyanine 887
    - 19.3.6 Färbevorgänge 888
  - 19.4 Pharmaka 889
    - 19.4.1 Allgemeines 889
    - 19.4.2 Arten pharmazeutischer Produkte 890
    - 19.4.3 Wirkstoffherstellung durch chemische Synthese 895
    - 19.4.4 Wirkstoffherstellung mit Biokatalysatoren 896
    - 19.4.5 Wirkstoffherstellung durch Fermentationsverfahren 898
    - 19.4.6 Sonstige Verfahren zur Wirkstoffherstellung 901
    - 19.4.7 Entwicklung neuer Pharmawirkstoffe 901

|        |                                      |     |
|--------|--------------------------------------|-----|
| 19.5   | Pflanzenschutzmittel                 | 902 |
| 19.5.1 | Bedeutung des Pflanzenschutzes       | 902 |
| 19.5.2 | Insektizide                          | 902 |
| 19.5.3 | Herbizide                            | 904 |
| 19.5.4 | Fungizide                            | 905 |
| 19.5.5 | Marktdaten und Entwicklungstrends    | 906 |
| 19.6   | Metallorganische Verbindungen        | 907 |
| 19.7   | Silicone                             | 909 |
| 19.7.1 | Struktur und Eigenschaften           | 909 |
| 19.7.2 | Herstellung der Ausgangsverbindungen | 910 |
| 19.7.3 | Herstellung der Silicone             | 911 |
| 19.7.4 | Technische Siliconerzeugnisse        | 913 |
| 19.8   | Zeolithe                             | 914 |
|        | Literatur                            | 915 |

**Anhang A Größen zur Charakterisierung von Reaktionen,  
Verfahren und Anlagen** 921

**Anhang B Tabellen zu Reinstoffdaten** 923

**Anhang C Graphische Symbole für Fließschemata  
nach EN ISO 10628-2012** 927

**Stichwortverzeichnis** 933