

## Inhaltsverzeichnis

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

### Teil I Einführung in die technische Chemie 1

#### 1 Chemische Prozesse und chemische Industrie 3

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 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 |

#### 2 Charakterisierung chemischer Produktionsverfahren 17

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 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 |



VI | Inhaltsverzeichnis

**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
- 3.2.6 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
- 4.3.5 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
- 5.3.3 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



VIII | Inhaltsverzeichnis

|          |  |            |
|----------|--|------------|
| 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<br>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        |
| <b>9</b> | <b>Auslegung thermischer Trennverfahren</b>                                    | <b>389</b> |
| 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<br>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 – Fluidodynamik 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 |



**Inhaltsverzeichnis**

**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 Versuchsplanaung 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
- 13.5 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 Projektabwicklung 662
  - 14.5.1 Ablaufplanung und -überwachung 662
  - 14.5.2 Bau und Montage 664
- 14.6 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
- 15.5 Literatur 721



XII | Inhaltsverzeichnis

**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    | Mehrährstoffsdünger                               | 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        |
| <b>19</b> | <b>Chemische Endprodukte</b>                      | <b>851</b> |
| 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        |



**XIV | Inhaltsverzeichnis**

|        |                                      |     |
|--------|--------------------------------------|-----|
| 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

