

Inhaltsverzeichnis

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

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
- 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

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 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 – 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 fluidier 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

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	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

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