

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

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	Absorberbauarten	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

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	Projektabwicklung	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 Nichtisenmetalle 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 Färbvorgänge 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