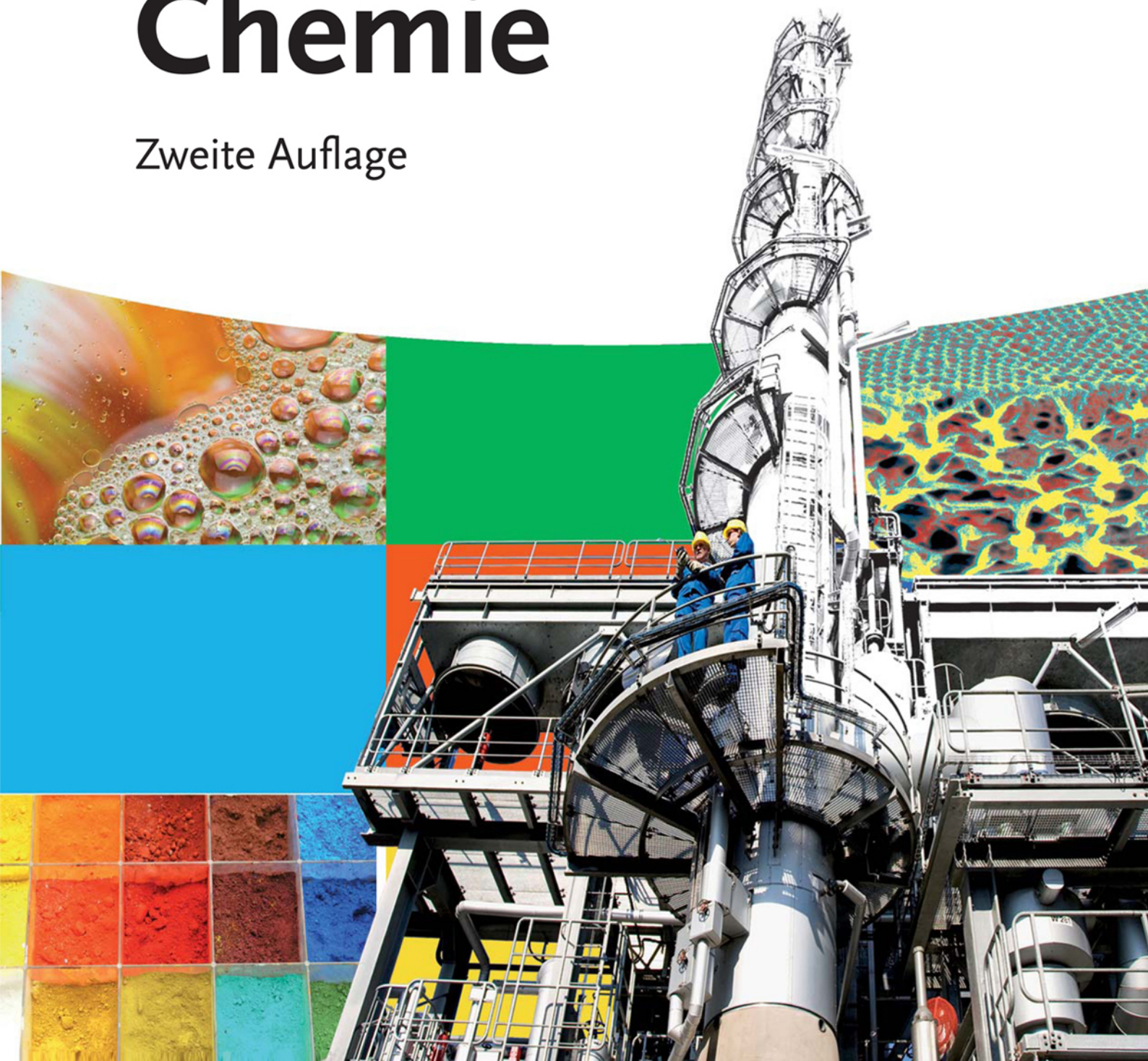


M. Baerns, A. Behr, A. Brehm, J. Gmehling, K.-O. Hinrichsen,
H. Hofmann, U. Onken, R. Palkovits, A. Renken

Technische Chemie

Zweite Auflage



*Manfred Baerns, Arno Behr, Axel Brehm,
Jürgen Gmehling, Kai-Olaf Hinrichsen,
Hanns Hofmann, Regina Palkovits,
Ulfert Onken, Albert Renken*

Technische Chemie

Beachten Sie bitte auch weitere interessante Titel zu diesem Thema

Bobzin, K.

Oberflächentechnik für den Maschinenbau

2013

ISBN: 978-3-527-33018-8

Bertau, M., Müller, A., Fröhlich,
P., Katzberg, M.

Industrielle Anorganische Chemie

4. Auflage

2013

ISBN: 978-3-527-33019-5

Arpe, H., Röper, M.

Industrielle Organische Chemie

Bedeutende Vor- und Zwischenprodukte

7. Auflage

2013

ISBN: 978-3-527-32001-1

Worthoff, Rüdiger / Siemes, W.

Grundbegriffe der Verfahrenstechnik

Mit Aufgaben und Lösungen

3., vollständig überarbeitete Auflage

2012

ISBN 978-3-527-33174-1

Bunge, Rainer

Mechanische Aufbereitung

Primär- und Sekundärrohstoffe

2012

ISBN 978-3-527-33209-0

Goedecke, Ralf (Hrsg.)

Fluidverfahrenstechnik

Grundlagen, Methodik, Technik, Praxis

2011

ISBN 978-3-527-33270-0

Behr, Arno

Angewandte homogene Katalyse

2008

ISBN 978-3-527-31666-3

Arpe, Hans-Jürgen

Industrielle Organische Chemie

Bedeutende Vor- und Zwischenprodukte

6., vollständig überarbeitete Auflage

2007

ISBN 978-3-527-31540-6

Vogel, G. Herbert

Lehrbuch Chemische Technologie

Grundlagen Verfahrenstechnischer Anlagen

2004

ISBN 978-3-527-31094-4

Bohnet, M. (Hrsg.)

Mechanische Verfahrenstechnik

2004

ISBN: 978-3-527-31099-9

Hagen, J.

Chemiereaktoren

Auslegung und Simulation

2004

ISBN: 978-3-527-30827-9

Schubert, H. (Hrsg.)

Handbuch der Mechanischen

Verfahrenstechnik

2003

ISBN: 978-3-527-30577-3

Sattler, K.

Thermische Trennverfahren

Grundlagen, Auslegung, Apparate

3. Auflage

2001

ISBN: 978-3-527-30243-7

*Manfred Baerns, Arno Behr, Axel Brehm,
Jürgen Gmehling, Kai-Olaf Hinrichsen,
Hanns Hofmann, Regina Palkovits,
Ulfert Onken, Albert Renken*

Technische Chemie

Zweite, erweiterte Auflage

Autor

Manfred Baerns

Berlin-Adlershof e.V.
Institut für Angewandte Chemie
Richard-Willstätter-Str. 12
12489 Berlin
MBAERNS@aol.com

Arno Behr

Universität Dortmund
Institut für Technische Chemie A
Emil-Figge-Str. 66
44227 Dortmund
behr@bci.tu-dortmund.de

Dr. Axel Brehm

Universität Oldenburg
Technische Chemie
Ammerländer Heerstr. 114–118
26129 Oldenburg
axel.brehm@uni-oldenburg.de

Jürgen Gmehling

Universität Oldenburg
Technische Chemie
Ammerländer Heerstr. 114–118
26111 Oldenburg
gmehling@tech.chem.uni-oldenburg.de

Kai-Olaf Hinrichsen

Technische Universität München
Lehrstuhl I Technische Chemie
Lichtenbergstr. 4
85747 Garching
olaf.hinrichsen@ch.tum.de

Hanns Hofmann

ehemals Universität Erlangen-Nürnberg, Institut
Frankenstr. 24
91096 Möhrendorf

Regina Palkovits

RWTH Aachen (38B 417)
Technische Chemie & Petrochemie
Worringerweg 1
52074 Aachen
palkovits@itm.rwth-aachen.de

Ulfert Onken

Universität Dortmund
Lehrstuhl für Technische Chemie B
Emil-Figge-Str. 66
44227 Dortmund
onken@bci.uni-dortmund.de

Albert Renken

École Polytechnique Fédérale
EPFL-SB ISIC-LGRC
CH J2 500
1015 Lausanne
albert.renken@epfl.ch

2. Auflage 2013

Alle Bücher von Wiley-VCH werden sorgfältig erarbeitet. Dennoch übernehmen Autoren, Herausgeber und Verlag in keinem Fall, einschließlich des vorliegenden Werkes, für die Richtigkeit von Angaben, Hinweisen und Ratschlägen sowie für eventuelle Druckfehler irgendeine Haftung

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

© 2013 Wiley-VCH Verlag & Co. KGaA,
Boschstr. 12, 69469 Weinheim, Germany

Alle Rechte, insbesondere die der Übersetzung in andere Sprachen, vorbehalten. Kein Teil dieses Buches darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form – durch Photokopie, Mikroverfilmung oder irgendein anderes Verfahren – reproduziert oder in eine von Maschinen, insbesondere von Datenverarbeitungsmaschinen, verwendbare Sprache übertragen oder übersetzt werden. Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen, Handelsnamen oder sonstigen Kennzeichen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass diese von jedermann frei benutzt werden dürfen. Vielmehr kann es sich auch dann um eingetragene Warenzeichen oder sonstige gesetzlich geschützte Kennzeichen handeln, wenn sie nicht eigens als solche markiert sind.

Print ISBN: 978-3-527-33072-0

ePDF ISBN: 978-3-527-67407-7

ePub ISBN: 978-3-527-67409-1

Mobi ISBN: 978-3-527-67408-4

Umschlaggestaltung Adam Design, Weinheim

Satz Reemers Publishing Services GmbH,
Krefeld

Druck und Bindung betz-druck GmbH,
Darmstadt

Gedruckt auf säurefreiem Papier.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort zur 2. Auflage	<i>XIII</i>	3.2	Arten von Katalysatoren	25
Vorwort zur 1. Auflage	<i>XV</i>	3.2.1	Heterogene Katalyse	25
Die Autoren	<i>XVII</i>	3.2.1.1	Grundprinzipien der heterogenen Katalyse	25
Enzyklopädien und Nachschlagewerke zur Technischen Chemie	<i>XIX</i>	3.2.1.2	Eigenschaften von Feststoffkatalysatoren	26
Symbolverzeichnis	<i>XXI</i>	3.2.2	Homogene Katalyse	27
Teil I Einführung in die Technische Chemie	1	3.2.2.1	Grundprinzipien der homogenen Katalyse	27
	<i>Arno Behr, Ulfert Onken, Regina Palkovits</i>	3.2.2.2	Technische Anwendungen homogener Katalysatoren	28
1 Chemische Prozesse und chemische Industrie	1	3.2.3	Biokatalyse	30
1.1 Besonderheiten chemischer Prozesse	1	3.2.3.1	Grundprinzipien der Biokatalyse	30
1.2 Chemie und Umwelt	2	3.2.3.2	Biotransformationen	31
1.3 Chemiewirtschaft	3	3.2.3.3	Biotransformationen zur Herstellung von Wirkstoffen und Feinchemikalien	32
1.3.1 Einteilung der Chemieprodukte	3	3.3	Besondere Anwendungsformen in homogener und heterogener Katalyse	35
1.3.2 Chemiefirmen werden Großunternehmen – ein historischer Rückblick	4	3.3.1	Vergleich von homogener und heterogener Katalyse	35
1.3.3 Strukturwandel in der Chemieindustrie	5	3.3.2	Heterogenisierung homogener Katalysatoren	35
1.4 Struktur von Chemieunternehmen	6	3.3.3	Enantioselektive Katalyse	35
1.5 Bedeutung von Forschung und Entwicklung für die chemische Industrie	7	3.3.4	Elektrokatalyse	35
1.5.1 Wissenschaft und chemische Technik	7	3.3.5	Photokatalyse	36
1.5.2 Betriebsinterne Forschung	8		<i>Literatur</i>	36
1.6 Entwicklungstendenzen und Zukunftsaussichten der chemischen Industrie	10	Teil II Chemische Reaktionstechnik	37	
	<i>Literatur</i>		<i>Manfred Baerns, Kai-Olaf Hinrichsen, Hanns Hofmann, Albert Renken</i>	
2 Charakterisierung chemischer Produktionsverfahren	13	4 Grundlagen der Chemischen Reaktionstechnik	37	
2.1 Laborverfahren und technische Verfahren	13	4.1	Grundbegriffe und Grundphänomene	38
2.1.1 Chlorierung von Benzol	13	4.1.1	Klassifizierung chemischer Reaktionen	38
2.1.2 Oxychlorierung von Benzol	14	4.1.2	Grundbegriffe und Definitionen	38
2.1.3 Herstellung von Azofarbstoffen	14	4.1.3	Stöchiometrie chemischer Reaktionen	41
2.1.4 Zusammenfassung	15	4.1.3.1	Zusammensetzung des Reaktionsgemisches	41
2.2 Gliederung chemischer Produktionsverfahren	15	4.1.3.2	Schlüsselkomponenten und Schlüsselreaktionen	42
2.3 Darstellung chemischer Verfahren und Anlagen durch Fließschemata	18	4.1.3.3	Reaktionsfortschritt	45
2.3.1 Grundfließschema	19	4.1.3.4	Zusammenhang zwischen Stöchiometrie und Reaktionskinetik	46
2.3.2 Verfahrensfließschema	21	4.2	Chemische Thermodynamik	48
2.3.3 Rohrleitungs- und Instrumenten (RI)-Fließschema	21		<i>Jürgen Gmehling</i>	
2.3.4 Mess- und Regelschema	22	4.2.1	Reaktionsenthalpie	48
2.3.5 Spezielle Schemata	22	4.2.2	Gleichgewichtsumsatz	49
	<i>Literatur</i>	4.2.3	Simultangleichgewichte	53
3 Katalyse als Schlüsseltechnologie der chemischen Industrie	23	4.2.3.1	Relaxationsmethode	53
3.1 Was ist Katalyse?	23	4.2.3.2	Ermittlung der Gleichgewichtszusammensetzung durch Minimierung der Gibbs'schen Enthalpie	55
		4.3	Stoff- und Wärmetransportvorgänge	56
		4.3.1	Molekulare Transportvorgänge	56
		4.3.1.1	Diffusion	56
		4.3.1.2	Wärmeleitung	59
		4.3.2	Diffusion in porösen Medien	59

- 4.3.2.1 Molekulare Porendiffusion 60
- 4.3.2.2 Knudsen-Diffusion in Poren 60
- 4.3.2.3 Diffusiver Stofftransport im Übergangsgebiet von molekularer zu Knudsen-Diffusion 61
- 4.3.2.4 Poiseuille-Strömung in Poren 62
- 4.3.2.5 Sonderfälle der Diffusion in porösen Feststoffen 62
- 4.3.3 Wärmeleitfähigkeit in porösen Feststoffen 64
- 4.3.4 Stoff- und Wärmetransport an Phasengrenzflächen 65
- 4.3.5 Wärmeübergang 66
- 4.3.6 Stoffübergang 69
- Literatur* 71
- 5 Kinetik chemischer Reaktionen 75**
 - 5.1 Mikrokinetik chemischer Reaktionen 75
 - 5.1.1 Einführung 75
 - 5.1.2 Kinetik homogener Gas- und Flüssigkeitsreaktionen 77
 - 5.1.3 Kinetik heterogen katalysierter Reaktionen 82
 - 5.1.3.1 Katalytische Oberflächenreaktionen 82
 - 5.1.3.2 Abhängigkeit der Reaktionsgeschwindigkeit von den Gasphasenkonzentrationen 82
 - 5.1.3.3 Katalytische Oberflächenreaktion als geschwindigkeitsbestimmender Schritt 83
 - 5.1.3.4 Komplexe Vorgänge bei einer einfachen Reaktion 84
 - 5.1.4 Kinetik der Desaktivierung heterogener Katalysatoren 87
 - 5.1.5 Kinetik von Gas-Feststoff-Reaktionen 88
 - 5.1.6 Kinetik homogen und durch gelöste Enzyme katalysierter Reaktionen 88
 - 5.1.7 Polymerisationskinetik 89
 - 5.1.7.1 Kinetik radikalischer Polymerisationen 89
 - 5.1.7.2 Kinetik der ionischen Polymerisation 90
 - 5.1.7.3 Polykondensation, Polyaddition 90
 - 5.2 Ermittlung der Kinetik chemischer Reaktionen 91
 - 5.2.1 Zielsetzungen kinetischer Untersuchungen 91
 - 5.2.2 Betriebsweise und Bauart von Laborreaktoren für kinetische Untersuchungen 92
 - 5.2.2.1 Allgemeine apparative Gesichtspunkte 96
 - 5.2.2.2 Spezielle Laborreaktoren 98
 - 5.2.3 Planung und Auswertung kinetischer Messungen zur Ermittlung von Geschwindigkeitsgleichungen 108
 - 5.2.3.1 Klassische Methoden 108
 - 5.2.3.2 Statistisch begründete Methoden der Versuchsplanung und -auswertung 121
 - 5.2.3.3 Versuchsplanung 125
 - 5.2.3.4 Auswertesoftware für kinetische Daten 126
 - 5.3 Makrokinetik chemischer Reaktionen – Zusammenwirken von chemischer Reaktion und Transportvorgängen 128
 - 5.3.1 Heterogen katalysierte Gasreaktionen 128
 - 5.3.1.1 Äußere Transportvorgänge 128
 - 5.3.1.2 Innere Transportvorgänge und chemische Reaktion 132
 - 5.3.1.3 Einfluss der Transportvorgänge auf die Selektivität 141
 - 5.3.1.4 Kriterien zur Abschätzung des Einflusses von Stoff- und Wärmetransportvorgängen auf den Reaktionsablauf 145
 - 5.3.2 Fluid-Fluid-Reaktionen 145
 - 5.3.2.1 Einfluss des Stoffübergangs auf die effektive Reaktionsgeschwindigkeit 146
 - 5.3.2.2 Einfluss des Stoffübergangs bei Fluid-Fluid-Reaktionen auf die Selektivität 151
 - 5.3.3 Gas-Feststoff-Reaktionen 152
 - 5.3.3.1 Nichtporöse Feststoffe 152
 - 5.3.3.2 Poröse Feststoffe 157
 - Literatur* 157
- 6 Chemische Reaktoren und deren reaktionstechnische Modellierung 161**
 - 6.1 Allgemeine Stoff- und Energiebilanzen 161
 - 6.2 Absatzweise betriebene Rührkesselreaktoren 162
 - 6.2.1 Stoffbilanz 162
 - 6.2.2 Wärmebilanz 165
 - 6.2.2.1 Adiabate Reaktionsführung 166
 - 6.2.2.2 Polytrope Reaktionsführung 167
 - 6.3 Halbkontinuierlich betriebene Rührkesselreaktoren 169
 - 6.4 Kontinuierlich betriebener idealer Rührkesselreaktor 170
 - 6.4.1 Stoffbilanz des kontinuierlich betriebenen Rührkesselreaktors 170
 - 6.4.1.1 Volumenbeständige Reaktionen 171
 - 6.4.1.2 Nichtvolumenbeständige Reaktionen 172
 - 6.4.2 Wärmebilanz des kontinuierlich betriebenen Rührkesselreaktors 173
 - 6.5 Ideale Strömungsrohrreaktoren 177
 - 6.5.1 Stoffbilanz 177
 - 6.5.2 Wärmebilanz 178
 - 6.5.2.1 Adiabate Reaktionsführung 178
 - 6.5.2.2 Polytrope Reaktionsführung 178
 - 6.6 Kombination idealer Reaktoren 180
 - 6.6.1 Kaskade kontinuierlich betriebener Rührkesselreaktoren 180
 - 6.6.2 Strömungsrohrreaktor mit Rückführung 181
 - 6.7 Reale homogene und quasihomogene Reaktoren 183
 - 6.7.1 Verweilzeitverteilung in chemischen Reaktoren 184
 - 6.7.2 Experimentelle Bestimmung der Verweilzeitverteilung 185
 - 6.7.2.1 Sprungfunktion 185
 - 6.7.2.2 Pulsfunktion 186
 - 6.7.2.3 Beliebige Eingangsfunktion 186

6.7.3	Verweilzeitverteilung in idealen Reaktoren	187
6.7.3.1	Idealer Strömungsrohrreaktor	187
6.7.3.2	Idealer kontinuierlich betriebener Rührkesselreaktor	187
6.7.3.3	Reaktorkaskade	188
6.7.3.4	Laminar durchströmtes Rohr	188
6.7.4	Verweilzeitmodelle realer Reaktoren	189
6.7.4.1	Dispersionsmodell	189
6.7.4.2	Zellenmodell	192
6.7.4.3	Mehrparametrische Modelle	192
6.7.5	Verweilzeitverhalten realer Reaktoren	192
6.7.5.1	Rührkesselreaktoren	192
6.7.5.2	Strömungsrohrreaktoren	193
6.7.6	Einfluss der Verweilzeitverteilung und der Vermischung auf die Leistung realer Reaktoren	195
6.7.6.1	Reaktionen 1. Ordnung	195
6.7.6.2	Reaktionen mit nichtlinearer Kinetik	197
6.7.7	Vermischung in realen Reaktoren	198
6.7.7.1	Segregation	198
6.7.7.2	Zeitpunkt der Vermischung	200
6.7.7.3	Einfluss der Segregation auf die Reaktorleistung und Produktverteilung	201
6.8	Reale Mehrphasenreaktoren	204
6.8.1	Fluid-Feststoff-Systeme	204
6.8.1.1	Festbettreaktoren	204
6.8.1.2	Wirbelschichtreaktoren	208
6.8.2	Fluid-Fluid-Systeme (vgl. Abschnitt 5.3.2)	210
6.8.2.1	Blasensäulen-Reaktor	211
6.8.2.2	Rührkessel für Fluid-Fluid-Reaktionen	213
6.8.2.3	Bodenkolonnen	213
6.8.2.4	Füllkörperkolonnen	213
6.8.2.5	Strahlwäscher	214
6.8.3	Gasförmig-flüssig-fest-Systeme	214
6.8.3.1	Mehrphasen-Festbettreaktoren	215
6.8.3.2	Dreiphasenblasensäule	216
6.8.3.3	Dreiphasen-Wirbelschichtreaktoren	216
6.8.3.4	Mehrphasen-Rührkesselreaktoren	216
6.8.3.5	Strukturierte Mehrphasenreaktoren	216
	<i>Literatur</i>	217
7	Auswahl und Auslegung chemischer Reaktoren	219
7.1	Reaktorauswahl und reaktionstechnische Optimierung	219
7.1.1	Einfache Reaktionen (Umsatzproblem)	219
7.1.1.1	Absatzweise betriebener Reaktor (RK)	219
7.1.1.2	Kontinuierlich betriebene Reaktoren	220
7.1.1.3	Temperaturführung	223
7.1.1.4	Isotherme Reaktionsführung	225
7.1.1.5	Adiabate Reaktionsführung	225
7.1.1.6	Adiabater Abschnittsreaktor	227
7.1.2	Komplexe Reaktionen (Ausbeuteproblem)	228
7.1.2.1	Parallelreaktionen	229
7.1.2.2	Folgereaktionen	231

7.1.2.3	Konkurrierende Folgereaktionen	232
7.1.2.4	Polymerisationsreaktionen	234
7.1.2.5	Temperaturführung	236
7.2	Thermische Prozesssicherheit	237
7.2.1	Theorie der Wärmeexplosion	237
7.2.2	Parametrische Sensitivität	240
7.2.3	Halbkontinuierlich betriebene Rührkesselreaktoren	242
7.2.4	Kontinuierlich betriebene Rührkesselreaktoren	243
7.2.5	Strömungsrohrreaktoren	243
7.3	Mikrostrukturierte Reaktoren	243
7.3.1	Homogene Reaktionen	244
7.3.1.1	Mikrofluidik	244
7.3.1.2	Verweilzeitverteilung	244
7.3.1.3	Mikrovermischung	246
7.3.1.4	Wärmeübergang	247
7.3.2	Feststoffkatalysierte Fluidreaktionen	250
7.3.2.1	Innerer Stofftransport	251
7.3.2.2	Äußerer Stofftransport	251
7.3.2.3	Temperaturkontrolle	252
7.3.3	Fluid-Fluid-Reaktionen	252
	<i>Literatur</i>	253

Teil III Grundoperationen 255

Jürgen Gmehling, Axel Brehm

8	Thermodynamische Grundlagen für die Berechnung von Phasengleichgewichten	255
8.1	Phasengleichgewichtsbeziehung	257
8.2	Dampf-Flüssig-Gleichgewicht	257
8.2.1	Anwendung von Zustandsgleichungen	258
8.2.2	Virialgleichung	260
8.2.3	Chemische Theorie	262
8.2.4	Anwendung von Aktivitätskoeffizienten-Modellen	262
8.2.5	Aktivitätskoeffizienten-Modelle	264
8.3	Vorausberechnung von Phasengleichgewichten	267
8.4	Konzentrationsabhängigkeit des Trennfaktors binärer Systeme	269
8.4.1	Bedingung für das Auftreten azeotroper Punkte	271
8.4.2	Rückstandslinien, Grenzdestillationslinien und Destillationsfelder	272
8.5	Flüssig-Flüssig-Gleichgewicht	275
8.6	Gaslöslichkeit	278
8.7	Fest-Flüssig-Gleichgewicht	280
8.8	Phasengleichgewicht für die überkritische Extraktion	284
8.9	Adsorptionsgleichgewichte	285
8.10	Osmotischer Druck	287
	<i>Literatur</i>	289

9 Auslegung thermischer Trennverfahren 291

- 9.1 Konzept der idealen Trennstufe 291
- 9.2 Realisierung mehrerer Trennstufen 291
- 9.3 Kontinuierliche Rektifikation 291
- 9.3.1 Rektifikationskolonne 292
- 9.3.2 Ermittlung der Zahl theoretischer Trennstufen 294
 - 9.3.2.1 Binäre Systeme 295
 - 9.3.2.2 Mehrkomponentensysteme 302
- 9.3.3 Konzept der Übertragungseinheit 315
- 9.4 Trennung azeotroper und eng siedender Systeme 316
- 9.4.1 Rektifikative Trennung azeotroper und engsiedender Systeme ohne Zusatzstoff 317
- 9.4.1.1 Trennung durch Rektifikation im Vakuum oder bei erhöhtem Druck 317
- 9.4.1.2 Trennung binärer heteroazeotroper Systeme 319
- 9.4.1.3 Zweidruckverfahren 320
- 9.4.2 Rektifikation mit Hilfsstoffen 320
- 9.4.2.1 Extraktive Rektifikation 320
- 9.4.2.2 Azeotrope Rektifikation 323
- 9.4.3 Wasserdampfdestillation 325
- 9.5 Reaktive Rektifikation 325
- 9.6 Zahl der Kolonnen und mögliche Trennsequenzen 327
- 9.6.1 Energieeinsparung 328
- 9.7 Diskontinuierliche Rektifikation 330
- 9.7.1 Einfache diskontinuierliche Destillation 330
- 9.7.2 Mehrstufige diskontinuierliche Rektifikation 331
- 9.8 Auslegung von Rektifikationskolonnen 333
- 9.8.1 Bodenkolonnen 333
- 9.8.2 Packungskolonnen 335
- 9.8.3 Wärmetauscher 341
- 9.8.3.1 Verdampfer 341
- 9.8.3.2 Kondensatoren 341
- 9.9 Absorption 341
- 9.9.1 Lösemittelauswahl 343
- 9.9.2 McCabe-Thiele-Verfahren 344
- 9.9.3 Kremser-Gleichung 346
- 9.9.4 Chemische Absorption 348
- 9.9.5 Absorberbauarten 349
- 9.10 Flüssig-Flüssig-Extraktion 349
- 9.10.1 Auswahl des Extraktionsmittels 351
- 9.10.2 McCabe-Thiele-Verfahren 351
- 9.10.2.1 Kremser-Gleichung 353
- 9.10.3 Anwendung von Dreiecksdiagrammen 353
- 9.10.4 Extraktoren 356
- 9.10.4.1 Mixer-Settler 356
- 9.10.4.2 Extraktionskolonnen 357
- 9.10.4.3 Zentrifugalextraktoren 358
- 9.11 Fest-Flüssig-Extraktion 358
- 9.12 Extraktion mit überkritischen Fluiden 359
- 9.13 Kristallisation 360

- 9.13.1 Kristallisationsprozess 360
- 9.13.2 Kristallisatoren 362
- 9.14 Adsorption 363
- 9.14.1 Adsorptionsmittel 364
- 9.14.2 Adsorptions- und Desorptionsschritt 365
- 9.14.3 Adsorberbauarten 366
- 9.15 Entfernung der Restfeuchten, Entwässern und Trocknen 368
- 9.15.1 Trocknungsgüter und Trocknungsarten 368
- 9.15.2 Kriterien zur Auslegung von Trocknern 369
- 9.15.3 Apparate zum technischen Trocknen 370
- 9.15.3.1 Konvektionstrockner 370
- 9.15.3.2 Kontaktstrockner 371
- 9.16 Membrantrennverfahren 371
- 9.16.1 Trennprinzip und Arbeitsweise 371
- 9.16.2 Arten von Membrantrennverfahren 373
- 9.16.3 Membranmodule 375
- Literatur 377*

10 Mechanische Grundoperationen 379

- 10.1 Strömungslehre – Fluidodynamik in Reaktoren, Kolonnen und Rohrleitungen 379
- 10.1.1 Strömungsarten, Reynoldssche Ähnlichkeit 379
- 10.1.2 Strömungsgesetze 380
- 10.1.2.1 Strömung „idealer Fluide“ 380
- 10.1.2.2 Auftreten von Reibungskräften (Strömen von Flüssigkeiten) 380
- 10.1.3 Strömungsbedingter Druckverlust 382
- 10.1.3.1 Ungestörte Strömung – Durchströmen eines geraden Rohrs 382
- 10.1.3.2 Gestörte Strömung – Auftreten örtlicher Druckverluste 383
- 10.2 Erzeugen von Förderströmen – Pumpen, Komprimieren, Evakuieren 384
- 10.2.1 Pumpencharakteristika und Pumpenwirkungsgrade 385
- 10.2.2 Pumpen – Apparate zum Fördern von Flüssigkeiten 386
- 10.2.2.1 Arbeitsweise von Hubkolbenpumpen 386
- 10.2.2.2 Arbeitsweise von Kreiselpumpen 387
- 10.2.2.3 Arbeitsweise von Umlaufkolbenpumpen 388
- 10.2.3 Verdichten von Gasen 388
- 10.2.3.1 Druck-Volumen-Diagramm, ein- und mehrstufiges Verdichten 389
- 10.2.3.2 Bauarten von Kompressoren (Verdichtern) 391
- 10.2.3.3 Einsatzbereiche von Kompressoren 392
- 10.2.4 Vakuumerzeugung 393
- 10.3 Mischen fluiden Phasen 394
- 10.3.1 Mischen in flüssiger Phase 394
- 10.3.1.1 Aufbau von Rührbehältern; Rührorgane und ihre Förderwirkung 395
- 10.3.1.2 Ermittlung des Leistungsbedarfs für das Homogenisieren durch Rühren 397
- 10.3.1.3 Begasen von Flüssigkeiten, Emulgieren und Suspensieren 399

- 10.3.2 Flüssigkeitsverteilung in der Gasphase 401
 - 10.3.2.1 Kriterien der Flüssigkeitsverteilung 401
 - 10.3.2.2 Einflussgrößen und Auswahlkriterien beim Zerstäuben 402
- 10.4 Mechanische Trennverfahren 404
 - 10.4.1 Partikelabtrennung aus Flüssigkeiten 404
 - 10.4.1.1 Sedimentieren und Zentrifugieren 405
 - 10.4.1.2 Filtern 408
 - 10.4.2 Partikelabscheidung aus Gasströmen 413
 - 10.4.2.1 Ausnutzung der Schwer- und der Zentrifugalkraft 413
 - 10.4.2.2 Filterelemente, Elektrofilter, Nassentstaubung 413
 - 10.4.3 Trennen weiterer disperser Systeme 415
 - 10.4.3.1 Emulsionstrennen 415
 - 10.4.3.2 Schaumbrechen und Schaumverhindern 416
- 10.5 Verarbeiten von Feststoffen 417
 - 10.5.1 Zerkleinern von Feststoffen 417
 - 10.5.1.1 Grundlagen des Zerkleinerns 417
 - 10.5.1.2 Energiebedarf beim Zerkleinern 418
 - 10.5.1.3 Zerkleinerungsapparate 420
 - 10.5.2 Klassieren und Sortieren 422
 - 10.5.2.1 Auftrennen des Mahlguts nach Kornklassen (Klassieren) 422
 - 10.5.2.2 Auftrennen des Mahlguts unter Ausnutzung von Teilcheneigenschaften (Sortieren) 424
- 10.5.3 Formgebung 426
 - Literatur 428
- Teil IV Verfahrensentwicklung 429**
 - Arno Behr, Ulfert Onken, Regina Palkovits
- 11 Gesichtspunkte der Verfahrensauswahl 429**
 - 11.1 Das Konzept der Nachhaltigkeit 429
 - 11.2 Stoffliche Gesichtspunkte (Rohstoffauswahl und Synthesroute) 431
 - 11.2.1 Nachhaltigkeit am Beispiel des Phenols – sieben technische Synthesewege 431
 - 11.2.1.1 Alkalischemelze von Natriumbenzolsulfonat 431
 - 11.2.1.2 Wasserdampfhydrolyse von Chlorbenzol (Raschig-Hooker-Verfahren) 432
 - 11.2.1.3 Alkalische Hydrolyse von Chlorbenzol 432
 - 11.2.1.4 Cumolverfahren (Hock-Verfahren) 433
 - 11.2.1.5 Toluoloxidation 434
 - 11.2.1.6 Dehydrierung von Cyclohexanol/Cyclohexanon 434
 - 11.2.1.7 Benzolhydroxylierung mit Distickstoffmonoxid 434
 - 11.2.1.8 Phenol aus nachwachsenden Rohstoffen 434
 - 11.2.1.9 Vergleich der Phenolverfahren 434
 - 11.2.2 Zusammenfassung 435
 - 11.3 Energieaufwand 436
 - 11.3.1 Energiearten und Energienutzung 436
 - 11.3.2 Wasserstoff 436
 - 11.3.2.1 Wasserstofferzeugung aus fossilen Rohstoffen 437
 - 11.3.2.2 Wasserstofferzeugung durch Wasserelektrolyse 439
 - 11.3.2.3 Vergleich: Wasserstoff aus fossilen Rohstoffen oder durch Wasserelektrolyse 439
 - 11.3.2.4 Wasserstoff als Energieträger und Energiespeicher 440
 - 11.3.2.5 Direktverstromung von Wasserstoff 440
 - 11.4 Sicherheit 441
 - 11.4.1 Exotherme Reaktionen 441
 - 11.4.1.1 Ausfall der Kühlung am Beispiel der Blockpolymerisation von Styrol 441
 - 11.4.1.2 Explosion eines Ethylenoxidbehälters als Beispiel einer Wärmeexplosion 442
 - 11.4.1.3 Exotherme Sekundärreaktionen 443
 - 11.4.2 Brennbare und explosive Stoffe und Stoffgemische 443
 - 11.4.2.1 Explosionen 443
 - 11.4.2.2 Explosionsbereich 444
 - 11.4.2.3 Organische Peroxide 445
 - 11.4.2.4 Maßnahmen zur Verhinderung von Explosionen 445
 - 11.4.3 Toxische Stoffe 445
 - 11.4.4 Zusammenfassung und Folgerungen 446
 - 11.5 Umweltschutz im Sinne der Nachhaltigkeit 446
 - 11.5.1 Luftverunreinigungen 447
 - 11.5.2 Abwasserbelastungen 449
 - 11.5.2.1 Alternativen zum Chlorhydrinverfahrens zur Herstellung von Ethylenoxid und Propylenoxid 450
 - 11.5.2.2 Abwasserreinigung 451
 - 11.5.3 Abfälle 454
 - 11.5.4 Zusammenfassung und Folgerungen 456
 - 11.6 Betriebsweise 456
 - 11.6.1 Beispiel: Hydrierung von Doppelbindungen 456
 - 11.6.1.1 Hydrierung im Suspensionsreaktor 457
 - 11.6.1.2 Hydrierung im Rieseltrektor 457
 - 11.6.2 Unterschiede zwischen diskontinuierlichen und kontinuierlichen Verfahren 458
 - 11.6.3 Entscheidungskriterien 460
 - Literatur 461
- 12 Verfahrensgrundlagen 463**
 - 12.1 Ausgangssituation und Ablauf 463
 - 12.2 Verfahrensinformationen 464
 - 12.2.1 Übersicht 464
 - 12.2.2 Sicherheitstechnische Kenndaten 465
 - 12.2.3 Toxikologische Daten 467
 - 12.3 Stoff- und Energiebilanzen 469
 - 12.3.1 Stoff- und Energiebilanzen – Werkzeug in Verfahrensentwicklung und Anlagenprojektierung 469
 - 12.3.2 Stoffbilanzen 469
 - 12.3.3 Energiebilanzen 474

- 12.4 Versuchsanlagen 474
 - 12.4.1 Notwendigkeit und Aufgaben 474
 - 12.4.2 Typen von Versuchsanlagen 475
 - 12.4.3 Planung einer Versuchsanlage 476
- 12.5 Auswertung und Optimierung 476
 - 12.5.1 Versuchsplanung und Auswertung 477
 - 12.5.2 Prozess-Simulation und Prozessoptimierung 477
- Literatur* 478
- 13 Wirtschaftlichkeit von Verfahren und Produktionsanlagen 481**
 - 13.1 Erlöse, Kosten und Gewinn 481
 - 13.2 Herstellkosten 482
 - 13.2.1 Vorkalkulation und Nachkalkulation 482
 - 13.2.2 Ermittlung des Kapitalbedarfs 482
 - 13.2.3 Ermittlung der Herstellkosten 485
 - 13.3 Kapazitätsauslastung und Wirtschaftlichkeit 487
 - 13.3.1 Erlöse und Gewinn 487
 - 13.3.2 Fixe Kosten und veränderliche Kosten 488
 - 13.3.3 Gewinn bzw. Verlust in Abhängigkeit von der Kapazitätsauslastung 489
 - 13.4 Wirtschaftlichkeit von Projekten 490
 - 13.4.1 Rentabilität als Maß für die Wirtschaftlichkeit 490
 - 13.4.2 Kapitalrückflusszeit 491
 - 13.4.3 Andere Methoden der Rentabilitätsbewertung 491
 - 13.4.4 Entscheidung zwischen Alternativen 492
- Literatur* 494
- 14 Planung und Bau von Anlagen 497**
 - 14.1 Projektablauf 497
 - 14.2 Projektorganisation 498
 - 14.3 Genehmigungsverfahren für Chemieanlagen 500
 - 14.4 Anlagenplanung 500
 - 14.5 Projektentwicklung 503
 - 14.5.1 Ablaufplanung und -überwachung 503
 - 14.5.2 Bau und Montage 505
- Literatur* 507
- Teil V Chemische Prozesse 509**
Arno Behr, Ulfert Onken
- 15 Organische Rohstoffe 509**
 - 15.1 Erdöl 509
 - 15.1.1 Zusammensetzung und Klassifizierung 509
 - 15.1.2 Bildung und Vorkommen 510
 - 15.1.3 Förderung und Transport 511
 - 15.1.4 Erdölraffinerien 515
 - 15.1.5 Thermische Konversionsverfahren 519
 - 15.1.6 Katalytische Konversionsverfahren 520
 - 15.2 Erdgas 525
 - 15.2.1 Zusammensetzung und Klassifizierung 525
 - 15.2.2 Förderung und Transport 525
 - 15.2.3 Weiterverarbeitung 526
 - 15.3 Kohle 527
 - 15.3.1 Zusammensetzung und Klassifizierung 527
 - 15.3.2 Vorkommen 528
 - 15.3.3 Förderung 528
 - 15.3.4 Verarbeitung 529
 - 15.3.4.1 Verkokung 529
 - 15.3.4.2 Kohlevergasung 532
 - 15.3.4.3 Kohlehydrierung 535
 - 15.4 Nachwachsende Rohstoffe 536
 - 15.4.1 Bedeutung der nachwachsenden Rohstoffe 536
 - 15.4.2 Fette und Öle 537
 - 15.4.3 Kohlenhydrate 542
 - 15.4.3.1 Cellulose 542
 - 15.4.3.2 Stärke 547
 - 15.4.3.3 Zucker 547
 - 15.4.4 Pflanzliche Sekrete und Extrakte 548
 - Literatur* 549
 - 16 Organische Grundchemikalien 551**
 - 16.1 Alkane 551
 - 16.1.1 Herstellung 551
 - 16.1.1.1 Methan 551
 - 16.1.1.2 Höhere *n*- und iso-Alkane 552
 - 16.1.1.3 Cycloalkane 552
 - 16.1.2 Verwendung 552
 - 16.1.2.1 Methan 552
 - 16.1.2.2 Höhere *n*-Alkane 553
 - 16.1.2.3 Cycloalkane 554
 - 16.2 Alkene 555
 - 16.2.1 Herstellung 555
 - 16.2.2 Verwendung 562
 - 16.3 Aromaten 564
 - 16.3.1 Herstellung 564
 - 16.3.2 Verwendung 567
 - 16.4 Acetylen 570
 - 16.4.1 Herstellung 570
 - 16.4.1.1 Acetylen aus Kohle 571
 - 16.4.1.2 Acetylen aus Kohlenwasserstoffen 571
 - 16.4.2 Verwendung 572
 - 16.5 Synthesegas 573
 - 16.5.1 Herstellung 573
 - 16.5.1.1 Steamreforming 573
 - 16.5.1.2 Partielle Oxidation 575
 - 16.5.2 Verwendung 576
 - 16.5.3 Kohlenmonoxid 577
 - Literatur* 578
 - 17 Organische Zwischenprodukte 581**
 - 17.1 Sauerstoffhaltige Verbindungen 581
 - 17.1.1 Alkohole 581
 - 17.1.1.1 Methanol 581
 - 17.1.1.2 Ethanol 585
 - 17.1.1.3 Propanole 588

- 17.1.1.4 Butanole 588
- 17.1.1.5 Längerkettige Alkohole 588
- 17.1.1.6 Cyclische Alkohole 588
- 17.1.1.7 Ungesättigte Alkohole 589
- 17.1.1.8 Mehrwertige Alkohole 589
- 17.1.2 Phenole 591
- 17.1.3 Ether 591
- 17.1.3.1 Aliphatische Ether 591
- 17.1.3.2 Cyclische Ether 591
- 17.1.4 Epoxide 592
- 17.1.4.1 Ethylenoxid 592
- 17.1.4.2 Propylenoxid 593
- 17.1.5 Aldehyde 594
- 17.1.5.1 Formaldehyd (Methanal) 594
- 17.1.5.2 Acetaldehyd (Ethanal) 595
- 17.1.5.3 Butyraldehyd (Butanale) 596
- 17.1.5.4 Ungesättigte Aldehyde 598
- 17.1.6 Ketone 599
- 17.1.6.1 Aceton und Methylisobutylketon 599
- 17.1.6.2 Methylethylketon 599
- 17.1.7 Carbonsäuren 599
- 17.1.7.1 Ameisensäure 599
- 17.1.7.2 Essigsäure 600
- 17.1.7.3 Ungesättigte Carbonsäuren 602
- 17.1.7.4 Aliphatische Dicarbonsäuren 603
- 17.1.7.5 Aromatische Carbonsäuren 603
- 17.2 Stickstoffhaltige Verbindungen 606
- 17.2.1 Amine 606
- 17.2.1.1 Niedere Amine 606
- 17.2.1.2 Fettamine 606
- 17.2.1.3 Diamine 607
- 17.2.1.4 Cyclische Amine 607
- 17.2.1.5 Aromatische Nitroverbindungen und Amine 607
- 17.2.2 Lactame 608
- 17.2.3 Nitrile 608
- 17.2.3.1 Acrylnitril 608
- 17.2.3.2 Adipodinitril 610
- 17.2.4 Isocyanate 611
- 17.2.4.1 Aliphatische Isocyanate 611
- 17.2.4.2 Aromatische Isocyanate 611
- 17.3 Halogenhaltige Verbindungen 612
- 17.3.1 Chlormethane 612
- 17.3.2 Chlorderivate höherer Aliphaten 613
- 17.3.3 Chloraromaten 615
- 17.3.4 Fluorverbindungen 616
- Literatur* 618
- 18 Anorganische Grund- und Massenprodukte 621**
- 18.1 Anorganische Schwefelverbindungen 621
- 18.1.1 Schwefel und Sulfide 621
- 18.1.2 Schwefeldioxid 621
- 18.1.3 Schwefeltrioxid und Schwefelsäure 622
- 18.2 Anorganische Stickstoffverbindungen 622
- 18.2.1 Ammoniak 622
- 18.2.2 Salpetersäure 626
- 18.2.3 Harnstoff und Melamin 627
- 18.3 Chlor und Alkalien 627
- 18.3.1 Chlor und Alkalilauge durch Alkalichlorid-elektrolyse 627
- 18.3.2 Natronlauge und Soda 629
- 18.4 Phosphorverbindungen 630
- 18.4.1 Elementarer Phosphor 630
- 18.4.2 Phosphorsäure und Phosphate 631
- 18.5 Technische Gase 632
- 18.5.1 Sauerstoff und Stickstoff 632
- 18.5.2 Edelgase 633
- 18.5.3 Kohlendioxid 634
- 18.6 Düngemittel 634
- 18.6.1 Bedeutung der Düngemittel 634
- 18.6.2 Stickstoffdüngemittel 635
- 18.6.3 Phosphordüngemittel 635
- 18.6.4 Kalidüngemittel 636
- 18.6.5 Mehrnährstoffdünger 636
- 18.6.6 Wirtschaftliche Betrachtung 636
- 18.7 Metalle 636
- 18.7.1 Stähle 636
- 18.7.2 Nichteisenmetalle und ihre Legierungen 637
- 18.7.3 Korrosion und Korrosionsschutz 637
- Literatur* 638
- 19 Chemische Endprodukte 641**
- 19.1 Polymere 641
- 19.1.1 Aufbau und Synthese von Polymeren 641
- 19.1.1.1 Stufenreaktionen 642
- 19.1.1.2 Kettenreaktionen 642
- 19.1.2 Polymerisationstechnik 645
- 19.1.3 Massenkunststoffe 648
- 19.1.4 Fasern 653
- 19.1.5 Klebstoffe 653
- 19.1.6 Hochtemperaturfeste Kunststoffe 654
- 19.1.7 Elektrisch leitfähige Polymere 654
- 19.1.8 Flüssigkristalline Polymere 655
- 19.1.9 Biologisch abbaubare Polymere 655
- 19.2 Tenside und Waschmittel 655
- 19.2.1 Aufbau und Eigenschaften 655
- 19.2.2 Anionische Tenside 656
- 19.2.3 Kationische Tenside 658
- 19.2.4 Nichtionische Tenside 658
- 19.2.5 Amphotere Tenside 661
- 19.2.6 Vergleich der Tensidklassen 661
- 19.2.7 Anwendungsgebiete 661
- 19.3 Farbstoffe 666
- 19.3.1 Übersicht 666
- 19.3.2 Azofarbstoffe 667
- 19.3.3 Carbonylfarbstoffe 668
- 19.3.4 Methinfarbstoffe 669
- 19.3.5 Phthalocyanine 669
- 19.3.6 Färbvorgänge 670
- 19.4 Pharmaka 672

19.4.1	Allgemeines	672	19.7.1	Struktur und Eigenschaften	687
19.4.2	Arten pharmazeutischer Produkte	672	19.7.2	Herstellung der Ausgangsverbindungen	688
19.4.3	Wirkstoffherstellung durch chemische Synthese	676	19.7.3	Herstellung der Silicone	689
19.4.4	Wirkstoffherstellung mit Biokatalysatoren	676	19.7.4	Technische Siliconerzeugnisse	691
19.4.5	Wirkstoffherstellung durch Fermentationsverfahren	678	19.8	Zeolithe	692
19.4.6	Sonstige Verfahren zur Wirkstoffherstellung	681		<i>Literatur</i>	693
19.5	Pflanzenschutzmittel	681	Anhang 1	Größen zur Charakterisierung von Reaktionen, Verfahren und Anlagen	697
19.5.1	Bedeutung des Pflanzenschutzes	681	Anhang 2	Tabellen zu Reinstoffdaten	699
19.5.2	Insektizide	681	Anhang 3	Graphische Symbole für Fließschemata nach EN ISO 10 628	703
19.5.3	Herbizide	683		Stichwortverzeichnis	709
19.5.4	Fungizide	684			
19.5.5	Marktdaten und Entwicklungstrends	685			
19.6	Metallorganische Verbindungen	685			
19.7	Silicone	687			

Vorwort zur 2. Auflage

Die 1. Auflage des Lehrbuchs für Technische Chemie (2006) hat bei Lehrenden und Lernenden großes Interesse gefunden. In der neuen Auflage haben wir zahlreiche Anregungen unserer Fachkollegen berücksichtigt. Um die Aktualität der neuen Auflage zu gewährleisten, haben wir die Autorenschaft durch Professorin Dr. Regina Palkovits (RWTH Aachen) und Professor Dr. Kai-Olaf Hinrichsen (TU München) ergänzt.

Regina Palkovits hat die vielfältigen Aspekte der Katalyse als Schlüsseltechnologie der chemischen Industrie in Kapitel 3¹⁾ zusammen geführt; in Kapitel 11 hat sie die Grundprinzipien der Nachhaltigkeit und deren Anwendung auf chemische Prozess und Produkte behandelt.

Kai-Olaf Hinrichsen hat die Ausführungen zur Mikro- und Makrokinetik chemischer Reaktionen für das Kapitel 5 sorgfältig überarbeitet und aktualisiert.

Wir beabsichtigen, die Ergänzung der Autoren auch künftig fortzuführen. Diese Ergänzungen durch jüngere Kolleginnen und Kollegen des Fachs sollen insbesondere neue und relevante Gesichtspunkte aus der wissenschaftlichen Forschung und aus der industriellen Praxis in die Lehre eingehen.

Um inhaltliche Überschneidungen zu vermeiden bzw. zu minimieren, wurde der diffusive und konvektive Stofftransport, der ursprünglich in zwei verschiedenen Kapiteln behandelt wurde, jetzt in Kapitel 4 (Grundlagen der chemischen Reaktionstechnik) zusammengeführt; in gleicher Weise wurden die Ausführungen über Wirbelschichtreaktoren in Kapitel 6 vereinigt.

Mikrostrukturierten Reaktoren, die inzwischen verstärkten Eingang in die Forschung und in die industrielle Anwendung gefunden haben, wurde mehr Bedeutung beigemessen (Kapitel 7).

Vertiefung des Inhalts wurde der Text – wie bereits in der ersten Auflage – durch zahlreiche Übungsaufgaben ergänzt, die im Internet (www.Wiley-vch.de/publish/dt/books/ISBN978-3-527-33072-0) abgerufen werden können. Bei Bedarf werden weitere Übungsaufgaben angefügt.

Wir laden sowohl Fachkollegen als auch Studierende weiterhin zu kritischen Anregungen ein, um das Lehrbuch auf hohem Niveau zu halten und seine Anwendung zu optimieren.

Die Autoren

Manfred Baerns, Arno Behr, Axel Brehm, Jürgen Gmehling, Kai-Olaf Hinrichsen, Ulfert Onken, Regina Palkovits, Albert Renken

Danksagungen der Autoren

Dem Verlag, insbesondere Frau Dr. Waltraud Wüst und Herrn Hans-Jochen Schmitt, wird für die andauernde und geduldige Unterstützung bei der Vorbereitung der Manuskripte für den Druck gedankt.

Arno Behr und Ulfert Onken danken Herrn M.Sc. Nils Rentmeister (TU Dortmund) für die redaktionelle Unterstützung und für die Koordination bei der Überarbeitung der von ihnen verfassten Teilgebiete I, IV und V. Axel Brehm dankt Herrn Dr.-Ing Ulrich Kersten (Sympatec GmbH) für die Unterstützung bei der grundlegenden Neufassung des Abschnitts zur Partikelmessechnik.

1) Alle Kapitelangaben beziehen sich auf die zweite Auflage des Lehrbuchs

Vorwort zur 1. Auflage

Das vorliegende Lehrbuch behandelt das Grundwissen der Technischen Chemie in seiner Gesamtheit – aktuell und gestrafft.

Es resultiert aus unseren langjährigen Erfahrungen in der Lehre und in der Industrie. In Ausrichtung und Inhalt entspricht das Lehrbuch dem „Lehrprofil Technische Chemie“ des „DECHEMA – Unterrichtsausschusses für Technische Chemie“. Daher eignet sich als Lehrbuch für Studenten der Chemie, des Chemieingenieurwesens und der Verfahrenstechnik an Universitäten, Technischen Hochschulen und Fachhochschulen. Es baut auf den Kenntnissen der Grundlagenfächer auf, wie sie in den ersten Semestern vermittelt werden; Spezialkenntnisse werden nicht vorausgesetzt. Das Buch dürfte aber auch zum Selbststudium von Interesse sein, insbesondere für Chemiestudenten an Universitäten, an denen die Technische Chemie nicht als Pflicht- oder Wahlfach vertreten ist. Besonders für die Absolventen, die eine Industrietätigkeit anstreben, ist eine Mindestkenntnis der Produktion von Chemieproduktion wichtig. Darüber hinaus kann das Buch den in der Industrie tätigen Chemikern und Ingenieuren als kompaktes Nachschlagewerk dienen und ihnen anhand der Literaturübersichten einen schnellen Einstieg in neue Teilgebiete ermöglichen. Auch Ingenieure anderer Fachrichtungen sowie Kaufleute und Betriebswirtschaftler sowie Chemielehrer werden in dem Buch nützlichen Informationen und Anregungen für ihre Tätigkeit finden.

Von den drei Teilbereichen der Technischen Chemie befassen sich die Reaktionstechnik und die Grundoperationen mit den reaktions- und verfahrenstechnischen Grundlagen chemischer Produktionsverfahren. Die Chemische Prozesskunde behandelt die Verfahren als Ganzes in ihren stofflichen und technischen Aspekten. Dabei soll nicht ein enzyklopädisches Wissen über die vielen Verfahren der chemischen Technik vermittelt werden; vielmehr wird an Hand ausgewählter Verfahren dargestellt, welche Probleme bei der Prozessentwicklung und beim Betrieb von Chemieanlagen auftreten, und wie sie gelöst werden. Dabei werden übergreifende Zusammenhänge, wie Rohstoff- und Energieversorgung, Anfall von Koppel- und Nebenproduktion, Anlagensicherheit sowie Fragen nach möglichen Umweltbelastungen diskutiert.

Ein wesentliches Ziel des Buchs besteht darin, die Verknüpfungen zwischen den verschiedenen Sachgebieten aufzuzeigen. Besonders eingegangen wird auf neue Entwicklungen in der Technischen Chemie, z.B. bei den nachwachsenden Rohstoffen und in der Biotechnologie. Neu aufgenommen wurden die mikrostrukturierten Reaktoren mit ihren viel versprechenden Aussichten beim Einsatz in der Produktion insbesondere von Wirkstoffen und Feinchemikalien. Ein eigener Abschnitt befasst sich mit der Biokatalyse, die außer in biotechnischen Verfahren zuneh-

mend auch zur Herstellung von Feinchemikalien eingesetzt wird. Ein Beispiel für neue Methoden zur Stofftrennung, die im Buch behandelt werden, ist die Pervaporation zur Trennung von Azeotropen.

Die Einleitung des Buchs (Kapitel 1 und 2) behandelt neben den Aufgaben der Technischen Chemie im Spannungsfeld zwischen wissenschaftlichen Grundlagen und deren Umsetzung in industriellen chemischen Prozessen auch die Struktur der Chemiewirtschaft. Es folgen die einzelnen Teilgebiete der Technischen Chemie. Der Teil „Chemische Reaktionstechnik“ bringt nach den Grundlagen (Kapitel 3: Stöchiometrie, Thermodynamik, Wärme- und Stofftransport) in Kapitel 4 zunächst die Kinetik chemischer Reaktionen. Ausführlich wird auf deren kinetische Modellierung, die Messung und Auswertung kinetischer Daten eingegangen. Anschließend wird die Beeinflussung des Ablaufs chemischer Reaktionen durch Stoff- und Wärmetransportvorgänge dargestellt. Die Grundtypen chemischer Reaktoren und Methoden zu deren Auslegung werden in Kapitel 5 vorgestellt. In Kapitel 6 werden die Auswahl und reaktionstechnische Optimierung chemischer Reaktoren behandelt, wobei sicherheitstechnische Aspekte eingehend diskutiert werden.

Der Teil „Grundoperationen“ beginnt mit einer Einführung in Strömungslehre, Wärmeübertragung und Trocknung (Kapitel 7). Daran schließt sich in Kapitel 8 die Thermodynamik der Mischphasen als Grundlage der thermischen Trennverfahren an. Von diesen (Destillation und Rektifikation, Absorption, Extraktion, Kristallisation, Absorption, Membrantrennverfahren) werden in Kapitel 9 die destillativen Verfahren wegen ihrer Bedeutung besonders eingehend behandelt. Neben graphischen Methoden zur Auslegung von Kolonnen für thermische Stofftrennungen werden auch computergestützte Verfahren zur Berechnung von Rektifikationskolonnen für Vielstoffgemische vorgestellt. Bei der Darstellung der mechanischen Grundoperation (z. B. Rühren, Filtrieren, Zerkleinern) wird nach der Behandlung der Grundlagen vor allem auf wichtige Apparate und deren Anwendung in der Produktion eingegangen (Kapitel 10).

Die Chemische Prozesskunde wird in den zwei Teilen „Verfahrensentwicklung“ (Kapitel 11 bis 14) und „Chemische Prozesse“ (Kapitel 15 bis 19) dargestellt. Die Verfahrensentwicklung behandelt zunächst die Verfahrensauswahl, wobei an Hand von Beispielen stoffliche Gesichtspunkte, technische Katalyse, Energieaufwand, Anlagensicherheit, Umwelt- und Arbeitsschutz sowie die Alternativen von kontinuierlicher und satzweiser Betriebsweise der Verfahren diskutiert werden. Es folgen Projektierung und Optimierung von Verfahren mit einem Kapitel über die Wirtschaftlichkeit von Projekten und Rentabilität von Anlagen. Besondere Aufmerksamkeit wurde dem Teil „Che-

mische Prozesse“ gewidmet, in dem Verfahren der verschiedenen Produktionsbereiche dargestellt werden. Als Auswahlkriterium für besprochenen Verfahren dienten neben der weltweiten Produktionsmenge die technologische Bedeutung der Prozesse und ihre Relevanz für Ökonomie und Ökologie. Um die Fülle an Informationen überschaubar zu machen, sind an zahlreichen Stellen Produktstammbäume eingefügt, aus denen auch die Querverbindungen zu anderen Produktgruppen deutlich werden.

Der Vertiefung des Lehrstoffs dienen zahlreiche in den Text eingestreute Rechenbeispiele. Zusätzliche Beispiele und weitere wertvolle Informationen sind im Internet untern www.wiley-vch.de/textbooks zugänglich. Im Anhang zu diesem Buch befindet sich außerdem eine Übersicht über wichtige graphische Symbole für Fließschemata, Stoffdaten für ausgewählte Verbindungen und Zweistoffgemische sowie ein Computerprogramm zur Berechnung der Rektifikation von Vielstoffgemischen.

An dieser Stelle möchten wir allen Kollegen in der Industrie und an Hochschulen, die uns durch Rat und Tat, vor allem in Form wertvoller Informationen unterstützt

haben, unseren Dank aussprechen. Wir würden es begrüßen, wenn es zu einem lebhaften Dialog zwischen den Lesern und Nutzern dieses Buchs und den Autoren käme. Dank gilt auch den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern unserer Arbeitskreise für ihre engagierte Mitwirkung bei der Erstellung von Manuskripten und Zeichnungen. Genannt sei hier Herr Dipl.-Ing. Ulf Schüller (Universität Dortmund, Lehrstuhl Technische Chemie A), der für die besonders umfangreichen redaktionellen Arbeiten für die Teile I, IV und V verantwortlich war. Gedankt sei auch dem Wiley-VHC Verlag und seinen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern, vor allem Frau Karin Sora und Frau Dr. Waltraud Wüst, für die konstruktive und entgegenkommende Zusammenarbeit. Schließlich möchten wir in Dankbarkeit an unseren verstorbenen Kollegen Prof. Dr. Dr. h. c. Hanns Hofmann erinnern, der bis zu seinem Tode Anfang dieses Jahres an diesem Buch mitgewirkt hat.

Berlin, Dortmund Lausanne, Oldenburg im August 2006
*Manfred Baerns, Arno Behr, Axel Brehm, Jürgen Gmehlig,
Ulfert Onken, Albert Renken*

Die Autoren

Prof. em. Dr. Manfred Baerns: 5 Jahre Abteilungsleiter „Chemische Verfahrensentwicklung“ bei Krupp-Chemieanlagenbau/Essen; Professor für Technische Chemie Ruhr-Universität Bochum; Wissenschaftlicher Direktor Institut für Angewandte Chemie Berlin-Adlershof und Abteilung für Anorganische Chemie, Fritz-Haber-Institut der MPG. Arbeitsgebiete: Heterogene Katalyse und Chemische Reaktionstechnik. 350 wissenschaftliche Zeitschriftenartikel und Buchkapitel sowie ca. 20 Patente, Herausgeber von „Basic Principles of Applied Catalysis“, Mitautor bei „Combinatorial Development of Solid Catalytic Materials“. Honorarprofessuren an der Humboldt-Universität und Technischen Universität, beide Berlin. DECHEMA-Medaille in Titan.



Prof. Dr. Arno Behr, 10 Jahre Abteilungsleiter und Hauptbevollmächtigter bei der Henkel KGaA/Düsseldorf. Seit 1996 Leiter des Lehrstuhls Technische Chemie (Chemische Prozessentwicklung) an der Technischen Universität Dortmund. Forschungsgebiete: Technische Katalyse, Petrochemie, Nachwachsende Rohstoffe, Kohlendioxid-Aktivierung, Miniplant-Technologie. Autor von mehreren Büchern, über 200 wissenschaftlichen Veröffentlichungen und zahlreichen Patenten.

Prof. Dr. Axel Brehm, apl. Professor an der Universität Oldenburg. Forschungsschwerpunkte: Untersuchungen zum Stoff- und Wärmetransport im Dreiphasensystem Gas/Flüssigkeit/Katalysator, Fixierung von Zeolithen an formgebenden Substraten sowie Austesten derartiger Komposit-Katalysatoren in dafür entwickelten Laborreaktoren.



Prof. Dr. Jürgen Gmehling, Professor für Technische Chemie, Universität Oldenburg, CEO der DDBST GmbH, sowie Mitglied des Advisory Boards der „Laboratory for Thermophysical Properties (LTP) GmbH“. Forschungsgebiete: Aufbau der Dortmunder Datenbank, Computergestützte Auslegung und Optimierung chemischer Prozesse. Autor von etwa 50 Büchern (Lehrbücher, Datensammlungen) und über 420 wissenschaftlichen Artikeln. Ausgezeichnet mit dem Arnold-Eucken-Preis, dem Rossini-Lecture Award, der Gmelin-Beilstein-Denk-münze und der Emil-Kirschbaum-Medaille.

Prof. Dr.-Ing. Kai-Olaf Hinrichsen, M.Ch.E., Professor für Technische Chemie an der Technischen Universität München. Forschungsgebiete: Heterogene Katalyse, Reaktionskinetik, Computational Fluid Dynamics. Über 60 wissenschaftliche Veröffentlichungen, mehrere Buchkapitel und einige Patente. Ausgezeichnet mit dem Jochen-Block-Preis der Deutschen Gesellschaft für Katalyse.



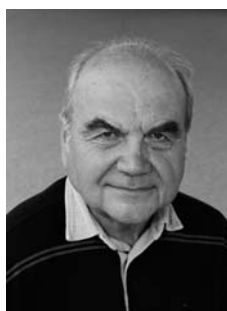
Prof. em. Dr. h. c. mult. Dr. rer. nat. Hanns P. K. Hofmann (†), ehem. Inhaber des Lehrstuhls für Chemische Reaktionstechnik an der Universität Erlangen-Nürnberg. Verstorben im Januar 2006. Forschungsgebiete: Reaktionsanalyse, Mehrphasenreaktoren, Reaktorauslegung und Optimierung, Katalyse, rechnergestütztes Experimentieren. Über 200 Veröffentlichungen in internationalen wissenschaftlichen Fachzeitschriften. Solvay-preisträger (1982), Bundesverdienstkreuz (1982), DECHEMA-Medaille (1994).

Prof. em. Dr. Ulfert Onken, Leiter des Bereiches Chemische Verfahrenstechnik bei der Hoechst AG. Professor für Technische Chemie an der Technischen Universität Dortmund. Forschungsgebiete: Biotechnologie, Gas-Flüssigkeits-Reaktoren, Mischphasenthermodynamik. Aufbau der Dortmunder Datenbank für Phasengleichgewichte (mit J. Gmehling). Autor von Monographien und Tabellenwerken. Gastprofessuren u. a. in Kyoto (Japan), Ehrenmitglied der Czech Society of Chemical Engineering. Ausgezeichnet mit der Emil-Kirschbaum-Medaille der Deutschen Vereinigung für Chemie- und Verfahrenstechnik (DVCV).



Prof. Dr. rer. nat. Regina Palkovits ist Universitätsprofessorin für Heterogene Katalyse und Technische Chemie der Fakultät für Mathematik, Information und Naturwissenschaften der RWTH Aachen. 2010 erhielt sie die Robert Bosch Juniorprofessur zur nachhaltigen Nutzung erneuerbarer natürlicher Rohstoffe und den Jochen-Block-Preis der Deutschen Gesellschaft für Katalyse. Arbeitsgebiete: Entwicklung neuartiger fester Katalysatoren für die effiziente Nutzung fossiler Ressourcen und die Entwicklung von Verfahren zur Umsetzung von Biomasse in Chemikalien und Treibstoffe.

Prof. Dr. Albert Renken, Professor für Chemische Reaktionstechnik an der Eidgenössischen Technischen Hochschule, Lausanne (EPFL), Schweiz. Arbeitsgebiete: Polymerisationstechnik, Heterogene Katalyse, Instationäre Prozessführung chemischer Reaktoren, Mikroreaktionstechnik. über 400 wissenschaftliche Veröffentlichungen, ca. 40 Buchkapitel, 4 Bücher über Reaktionstechnik und Katalyse und zahlreiche Patente. DECHEMA-Medaille in Titan. Mitglied der Schweizer Akademie der Technischen Wissenschaften



Enzyklopädien und Nachschlagewerke zur Technischen Chemie

(2011) Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, 7. ed., 40 vols.; Wiley-VCH, Weinheim. Online-Version 8. ed., *Ullmann* 8. ed., 2013.

(2004–2007) Kirk-Othmer: Encyclopedia of Chemical Technology, 5. ed., 27 vols., Wiley-Interscience, New York. *Kirk-Othmer* 5. ed.

(2003–2006) Dittmeyer, R., Keim, W., Kreysa, G., Oberholz, A. (Hrsg.) Winnacker-Küchler Chemische Technik, 5. Aufl., 9 Bde. Wiley-VCH, Weinheim. *Winnacker-Küchler*, 5. Aufl.

(1996) Falbe, J., Regitz, M. (Hrsg.) Römpp Lexikon Chemie, 6 Bde., 10. Aufl., Thieme, Stuttgart, Online-Version: (2013) Dill, B., Heiker, F. R., Kirschning, A., Faupel, F. (Hrsg.).

(2007) Arpe, H.-J. Industrielle organische Chemie. Bedeutende Vor- und Zwischenprodukte, 6. Aufl., Wiley-VCH, Weinheim.

(2013) Bertau, M., Müller, A., Fröhlich, P., Katzberg, M. Industrielle Anorganische Chemie, 4. Aufl., Wiley-VCH, Weinheim.

(2001) Rehm, H.-J., Reed, G., Pühler, A., Stadler, P. (Hrsg.) Biotechnology, 2. ed., 12 vols., Wiley-VCH, Weinheim.

(1999) Deckwer, W.-D., Pühler, A., Schmid, R. D. (Hrsg.) Römpp Lexikon Biotechnologie und Gentechnik, 2. Aufl., Thieme, Stuttgart, Online-Version: (2013) Bornscheuer, U., Pühler, A. (Hrsg.).

In Kursivschrift ist jeweils die Kurzform angegeben, mit der die Werke in der Literatur zu den einzelnen Kapiteln zitiert werden.

Symbolverzeichnis

Symbol	Einheit	Name
A	m^2	Fläche
A_i		chemische Spezies i im Reaktionsgemisch
Ar		Archimedes-Zahl
a	$\text{m}^2 \text{m}^{-3} = \text{m}^{-1}$	spezifische Phasengrenzfläche
a	$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$	Temperaturleitzahl
a_i		Aktivität der Komponente i
a_z	m s^{-2}	Zentrifugalbeschleunigung
B	$\text{m}^3 \text{mol}^{-1}$	2. Virialkoeffizient
$\dot{B}$	kmol h^{-1}	Sumpfsproduktstrom
Bi		Biot-Zahl
Bo		Bodenstein-Zahl
$\dot{b}_i$	kmol h^{-1}	Sumpfstrom der Komponente i
C_p	$\text{J mol}^{-1} \text{K}^{-1}$	molare Wärmekapazität
c	kmol m^{-3}	Konzentration
c_0	kmol m^{-3}	Eingangskonzentration
c^*	kmol m^{-3}	Gleichgewichtskonzentration an der Phasengrenzfläche
c_p	$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$	Wärmekapazität (bei konstantem Druck)
$c_{s,i}$	mol cm^{-2}	Oberflächenkonzentration der Komponente i
D	$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$	Diffusionskoeffizient
$\dot{D}$	kmol h^{-1}	Destillatstrom
$DaI, DaII$		Damköhler-Zahl erster Art, zweiter Art
D_{ax}	$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$	axialer Dispersionskoeffizient
D_{eff}	$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$	effektiver Diffusionskoeffizient
D_K	$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$	Knudsen-Diffusionskoeffizient
d	m	Durchmesser, Dicke
$\dot{d}_i$	kmol h^{-1}	Destillatstrom der Komponente i
E	J	Energie
$\dot{E}$	kmol h^{-1}	Extraktstrom
E, E_a	J mol^{-1}	(scheinbare) Aktivierungsenergie
E		Verstärkungsfaktor
E_{MV}		Murphree-Bodenwirkungsgrad für die Dampfphase V
$E(t)$	s^{-1}	Verweilzeit-Verteilungsfunktion
Eu		Euler-Zahl
F	N	Kraft
Fr		Froude-Zahl
$\dot{F}$	kmol h^{-1}	Zulauf-Strom
f_i	Pa	Fugazität der Komponente i
$\dot{f}_i$	kmol h^{-1}	Zulauf-Strom der Komponente i
G	kJ mol^{-1}	molare Gibbs'sche Freie Enthalpie
Ga		Gallilei-Zahl
ΔG_B^0	kJ mol^{-1}	molare Gibbs'sche Standardbildungsenthalpie

Symbol	Einheit	Name
G^E	kJ mol^{-1}	molare Gibbs'sche Exzessenthalpie
ΔG_R^0	kJ mol^{-1}	molare Gibbs'sche Standardreaktionsenthalpie
Gz		Graetz-Zahl
g	$9,807 \text{ m s}^{-2}$	Erdbeschleunigung
H	Pa	Henry-Konstante
H	kJ mol^{-1}	molare Enthalpie
ΔH_m	kJ mol^{-1}	molare Schmelzenthalpie
ΔH_R	kJ mol^{-1}	Reaktionsenthalpie
ΔH_v	kJ mol^{-1}	molare Verdampfungsenthalpie
Ha		Hatta-Zahl
h_{ov}	$\text{W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$	Wärmedurchgangskoeffizient (overall)
h	m	Höhe
h	$\text{W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$	Wärmeübergangskoeffizient
J_i	$\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$	Stoffmengenstromdichte
K, K_x, K_c, K_p		Gleichgewichtskonstante
k	$1,380658 \cdot 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$	Boltzmann-Konstante
k	m s^{-1}	Stoffübergangskoeffizient
$k = k_0 e^{\left(\frac{-E}{RT}\right)}$	$\text{mol}^{1-n} \text{ m}^{3(n-1)} \text{ s}^{-1}$	Reaktionsgeschwindigkeitskonstante
L	m	Länge
L	$\text{kg h}^{-1}, \text{mol h}^{-1}$	Leistung eines Reaktors
$\dot{L}$	kmol h^{-1}	Flüssigkeitsstrom
Le		Lewis-Zahl
$\dot{L}_R$	kmol h^{-1}	flüssiger Rücklaufstrom
$\dot{l}$	kmol h^{-1}	Flüssigkeitsstrom der Komponente i
M_i	g mol^{-1}	Molmasse der Komponente i
m	kg	Masse
m		Reaktionsordnung
$\dot{m}$	kg s^{-1}	Massenstrom
m_i	mol kg^{-1}	Molalität der Komponente i
m_{kat}	kg	Katalysatormasse
$m_{\pm}$	mol kg^{-1}	mittlere Molalität
N		Kesselzahl, Rührerdrehzahl
N_A	$6,023 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$	Avogadro-Konstante
N_{th}		Anzahl der theoretischen Stufen
Nu		Nusselt-Zahl
$\dot{n}$	kmol h^{-1}	Stoffmengenstrom
n_i	mol	Molzahl, Molmenge
P	Pa	Druck
Pe_{ax}		axiale Péclet-Zahl
Pr		Prandtl-Zahl
p_i	Pa	Partialdruck der Komponente i
p_i^S	Pa	Dampfdruck der Komponente i
Q	J	Wärmemenge

Symbol	Einheit	Name
$\dot{Q}$	W	Wärmestrom
q		thermischer Zustand des Zulaufstroms
R	$8,31433 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$	universelle Gaskonstante
R	$\text{kmol m}^{-3} \text{ s}^{-1}$	Stoffmengenänderungsgeschwindigkeit
$\dot{R}$	kmol h^{-1}	Raffinatstrom
Re		Reynolds-Zahl
r	m	Radius
r	$\text{mol m}^{-3} \text{ s}^{-1}$	Reaktionsgeschwindigkeit
S	$\text{J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$	molare Entropie
S	$\text{m}^2 \text{ m}^{-3}$	spezifische Oberfläche
S		Selektivität
$\dot{S}$	kmol h^{-1}	Seitenstrom
Sc		Schmidt-Zahl
Se		Semenov-Zahl
Sh		Sherwood-Zahl
St		Stanton-Zahl
T	K	absolute Temperatur
ΔT_{ad}	K	adiabate Temperaturerhöhung
t	s	Zeit
$\bar{t}$	s	mittlere Verweilzeit der Reaktanten im Reaktor
u	m s^{-1}	Geschwindigkeit
V	m^3	Volumen
V	$\text{m}^3 \text{ mol}^{-1}$	molares Volumen
$\dot{V}$	kmol h^{-1}	Dampfstrom
$\dot{v}$	$\text{m}^3 \text{ h}^{-1}$	Volumenstrom
v		Rücklaufverhältnis
$\dot{v}_i$	kmol h^{-1}	Dampfstrom der Komponente i
$\dot{W}$	W	Leistung
We		Weber-Zahl
w_i		Massenanteil der Komponente i
X		Umsatz
X_i	kmol kmol^{-1}	Beladung der Phase ' mit Komponente i
x	m	Länge
x_i		Molanteil in der flüssigen Phase
Y_i	kmol kmol^{-1}	Beladung der Phase '' mit Komponente i
y_i		Molanteil in der Dampfphase
z	m	Längskoordinate
z		Kompressibilitätsfaktor
α	K^{-1}	thermischer Ausdehnungskoeffizient
$\alpha_{i,j}$		Trennfaktor
β		Prater-Zahl
γ		Arrhenius-Zahl
γ_i		Aktivitätskoeffizient der Komponente i

<i>Symbol</i>	<i>Einheit</i>	<i>Name</i>
$\gamma_{\pm}$		mittlerer Aktivitätskoeffizient
δ	m	Filmdicke
ε	J	Kraftkonstante
ε		Porosität, Partikelporosität
ζ		Reaktionsfortschritt
ζ		Widerstandsbeiwert
η	Pa s	dynamische Viskosität
η		Nutzungsgrad, Wirkungsgrad
Θ_K		Thiele-Modul
θ		Underwood-Faktor, Bedeckungsgrad
ϑ	°C	Temperatur
λ		Reibungszahl
λ	W m ⁻¹ K ⁻¹	Wärmeleitfähigkeitskoeffizient
λ	nm	Wellenlänge
$\bar{\lambda}$	nm	mittlere freie Weglänge
$\Delta\lambda_{ij}$	K	Wechselwirkungsparameter Wilson-Gleichung
Λ_{ij}		Wilson-Parameter
μ	kJ mol ⁻¹	chemisches Potenzial
ν	m ² s ⁻²	kinematische Viskosität
ν_i		stöchiometrischer Koeffizient der Komponente <i>i</i>
ξ	Pa m ⁻¹	Spreizdruck, Adsorbatphasenspreizdruck
π	Pa	osmotischer Druck
ρ	kg m ⁻³	Dichte
σ	pm	Stoßdurchmesser
σ	Nm ⁻¹	Oberflächenspannung
τ	s	hydrodynamische Verweilzeit, Raumzeit
$\tau = V/\dot{V}_0$	s	Raumzeit
φ		Fugazitätskoeffizient
φ		Rückführungsverhältnis
χ		Adiabatenexponent
ψ'		Weisz-Modul
ψ_p		Sphärizität
ω		azentrischer Faktor

Umrechnungsfaktoren

Allgemeine Gaskonstante R

$$R = 8.31433 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1} = 1.98721 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1} = 0.08205 \text{ dm}^3 \text{ atm mol}^{-1} \text{ K}^{-1} = 8.31433 \text{ dm}^3 \text{ kPa mol}^{-1} \text{ K}^{-1} \\ = 0.0831433 \text{ dm}^3 \text{ bar mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$$

Druck

$$1 \text{ kPa} = 0.009869 \text{ atm} = 0.01 \text{ bar} = 7.50062 \text{ Torr} = 10^3 \text{ N m}^{-2} = 1000 \text{ Pa} = 10 \text{ hPa}$$

Energie

$$1 \text{ J} = 1 \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-2} = 1 \text{ Nm} = 0.239006 \text{ cal}$$

Teil I

Einführung in die Technische Chemie

Die chemische Industrie erzeugt eine Vielzahl verschiedenster Produkte, wie z. B. Schwefelsäure, Düngemittel, Farbstoffe, Pharmaka oder Polymere. Um all diese Produkte herzustellen, werden unterschiedliche chemische Verfahren angewendet.

Die wissenschaftliche Disziplin, die diesen Produktionsverfahren zugrunde liegt, ist die „Technische Chemie“. Als

Teilbereich der Chemie umfasst sie die verschiedenen Aspekte chemischer Produktionen, angefangen bei der Entwicklung von Verfahren und ihrer Übertragung in die Technik bis hin zum Betrieb von Produktionsanlagen. Die Lösung dieser Aufgaben erfordert die Kenntnis spezieller Methoden, aber auch das Wissen um stoffliche Zusammenhänge.

1 Chemische Prozesse und chemische Industrie

1.1

Besonderheiten chemischer Prozesse

Produktionsverfahren, die mit einer Stoffumwandlung verbunden sind, werden nicht nur von der chemischen Industrie benutzt, sondern auch in einer ganzen Reihe anderer Industriezweige, wie der Hüttenindustrie zur Gewinnung von Metallen, der Zementindustrie und der Lebensmittelindustrie. Bei diesen Industrien ist die Anzahl der durch Stoffumwandlungsprozesse hergestellten Produkte jeweils überschaubar, während in den Prozessen der chemischen Industrie sehr viele verschiedenartige Produkte hergestellt werden.

Bei einem Vergleich chemischer Prozesse mit den Produktionsverfahren anderer Industrien fallen weitere Besonderheiten auf. Während die Produktionsmethoden, z. B. der Textilindustrie und der Automobilindustrie, jeweils relativ gleichartig sind, müssen Chemieanlagen speziell auf die darin ablaufenden chemischen Reaktionen und die jeweiligen Produkte hin konzipiert sein. Keine Anlage sieht wie die andere aus. Diese Vielfalt wird dadurch noch vergrößert, dass es für viele Produkte mehrere Herstellungswege und dementsprechend mehrere Prozesse gibt.

Weiterhin ist für chemische Produktionen charakteristisch, dass die Produktionsanlagen für die einzelnen Prozesse aus vielen Einzelelementen bestehen und dementsprechend ausgesprochen komplex aufgebaut sind. Das gilt in ganz besonderem Maße für Anlagen mit kontinuierlicher Prozessführung, da dort für jeden Arbeitsschritt des Prozesses eine speziell dafür geeignete apparative Anordnung vorhanden sein muss (vgl. Abschnitt 11.6). Insgesamt sind chemische Produktionsanlagen durch *hohe Komplexität* gekennzeichnet.

Eine weitere Besonderheit chemischer Prozesse besteht darin, dass man nicht nur das gewünschte Produkt erhält, sondern je nach Reaktionssystem auch *Koppel- und Neben-*

produkte. Koppelprodukte werden aufgrund der Stöchiometrie der Hauptreaktion zwangsläufig gebildet. Zusätzlich können Nebenprodukte durch Parallel- und Folgereaktionen entstehen; ihre Bildung kann über die Reaktionsbedingungen (z. B. Temperatur, Katalysator) beeinflusst werden.

Beispiele für die Bildung von *Koppelprodukten* sind die Veresterung von Carbonsäuren (Gl. 1.1) mit dem Koppelprodukt Wasser sowie die Chlorierung von Kohlenwasserstoffen (Gl. 1.2) unter der Bildung von Chlorwasserstoff. Das primäre Ziel dieser Umsetzung ist die Erzeugung eines Chlorkohlenwasserstoffs (RCl); aus wirtschaftlichen Gründen muss man aber auch den als Koppelprodukt anfallenden Chlorwasserstoff (HCl) verwerten.



Eine ähnliche Problematik stellt die *Bildung von Nebenprodukten* dar. Bei den allermeisten chemischen Reaktionssystemen läuft nicht nur eine einzige chemische Reaktion ab; vielmehr wird die Ausbeute der gewünschten Umsetzung durch Parallel- und Folgereaktionen gemindert. Deutlich wird der Effekt unerwünschter Parallelreaktionen bei der Substitution am aromatischen Kern. So können bei der einfachen Kernchlorierung von Toluol prinzipiell drei Isomere entstehen, wobei meist nur eines der Isomere als Produkt erwünscht ist. Als ein Beispiel für unerwünschte Folgereaktionen sei die Bildung von Di- und Triethylen-glykol bei der Herstellung von Glykol aus Ethylenoxid und Wasser (vgl. Abschnitt 17.1.1.8) genannt. Mit geeigneten Katalysatoren und optimierter Reaktionstechnik gelingt es zwar häufig, die Umsetzung in Richtung auf das gewünschte Produkt zu lenken, jedoch nicht soweit, dass die Bildung der Nebenprodukte vollständig unterdrückt wird. Man muss also versuchen, die entstandenen Nebenprodukte

zu verwerten. Das ist in einem größeren Anlagenkomplex mit vielen Produkten eher möglich als in einem Werk mit wenigen Produktionsanlagen.

Schließlich gibt es noch eine weitere Besonderheit chemischer Prozesse, nämlich den Umgang mit *gefährlichen Stoffen*. Die wesentlichen Ursachen für Gefährdungen sind die Toxizität, die Brennbarkeit, die Explosionsfähigkeit und die geringe Stabilität vieler chemischer Substanzen. Diese gefährlichen Eigenschaften können auch zu schädlichen Einwirkungen auf die Umgebung von Chemieanlagen, also auf die *Umwelt* führen.

1.2

Chemie und Umwelt

Das Wissenschaftsgebiet, das sich mit Problemen der Umwelt befasst, ist die *Ökologie*. Schon seit langer Zeit hat der Mensch Ökosysteme in gravierender Weise verändert, z. B. durch Abholzen von Wäldern. Mit der Industrialisierung kam es durch emittierte Schadstoffe zu ganz neuartigen Störungen von Ökosystemen. Beispiele dafür sind die Herstellung von Soda nach dem Leblanc-Verfahren (Schadstoff HCl) und die Röstung sulfidischer Erze (Schadstoff SO₂).

Mit der Zunahme der Produktionskapazitäten wuchsen auch die Mengen der von Chemieanlagen emittierten Schadstoffe. Etwa ab 1960 kam es zu verstärkten Aktivitäten zur Vermeidung von Emissionen aus chemischen Produktionen. Dabei wurden neue Verfahrensvarianten und zum Teil völlig neuartige Prozesse entwickelt. Die Resultate dieser Maßnahmen zeigten sich schon bald. So sank beispielsweise für das Stammwerk Ludwigshafen der BASF die Abwasserbelastung durch organische Verunreinigungen von 1972 bis 1991 um mehr als den Faktor 10 bei gleichzeitiger Steigerung der Produktionsmenge um 50 %. Danach wurde die Umweltbelastung noch weiter reduziert, wie Abb. 1.1 am Beispiel der produktionsspezifischen Umweltbelastung durch die BASF für 1991 und 2001 zeigt.

Bis heute besteht ein großes Interesse an der Senkung von produktionsbedingten Emissionen. In dem Zeitraum zwischen 2002 und 2009 konnten nach einem Jahresbericht

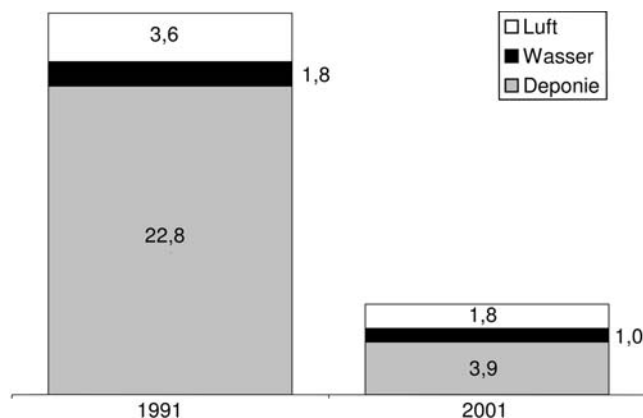


Abb. 1.1 Produktionsspezifische Umweltbelastung in kg je Tonne Verkaufsprodukt der BASF AG für 1991 und 2001.

der BASF die Emissionen von organischen Stoffen (–80 %), Stickstoffverbindungen (–84 %) und Schwermetallen (–61 %) in Wasser weiter reduziert werden.

Interessant ist die Herkunft von Kohlendioxid aus menschlichen Tätigkeiten. Abb. 1.2 zeigt, dass die chemische Industrie zur Gesamtemission von etwa 29 Gt/a nur einen geringen Anteil von 2 % beiträgt.

Neben unerwünschten Emissionen können auch chemische Endprodukte umweltkritische oder toxische Eigenschaften aufweisen. Ein Beispiel dafür ist das Insektizid DDT (Dichlordiphenyltrichlorethan). Die breite Wirkung von DDT gegen Insekten führte dazu, dass das Produkt nicht nur im chemischen Pflanzenschutz, sondern in großem Maß auch zur Bekämpfung von krankheitsübertragenden Insekten, z. B. Fiebertücken, sehr erfolgreich eingesetzt wurde. Es zeigte sich jedoch, dass das DDT aufgrund seiner hohen Stabilität in der Umwelt nur langsam abgebaut wird. Mögliche schädliche Wirkungen führten deshalb zu Einschränkungen und Verboten für den Einsatz von DDT.

Wie problematisch ein striktes Verbot einer Chemikalie sein kann, zeigt das Beispiel von Sri Lanka, wo es gelungen war, die Malaria durch den Einsatz von DDT fast auszurotten. Während es dort vor 1950 über 2 Mio. Malariafälle mit mehr als 10 000 jährlichen Todesfällen gab, waren es 1963 nur noch 17. 1964 wurden die DDT-Aktionen eingestellt,

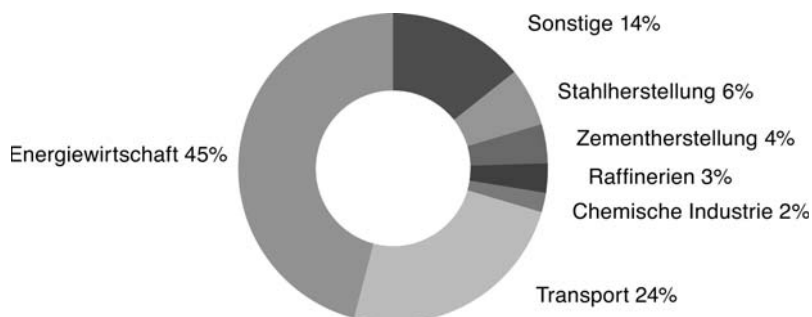


Abb. 1.2 Verteilung der globalen Kohlendioxidemissionen.