

Baerns, Behr, Brehm, Gmehling, Hinrichsen, Hofmann,  
Kleiber, Kockmann, Onken, Palkovits, Renken, Vogt

# Technische Chemie

Dritte Auflage





## Technische Chemie



## Technische Chemie

*Manfred Baerns, Arno Behr, Axel Brehm, Jürgen Gmehling,  
Kai-Olaf Hinrichsen, Hanns Hofmann, Michael Kleiber, Norbert Kockmann,  
Ulfert Onken, Regina Palkovits, Albert Renken und Dieter Vogt*

Dritte Auflage

WILEY-VCH

## Autoren

### **Prof. Dr. Manfred Baerns †**

Institut für Angewandte Chemie  
Berlin-Adlershof e. V.  
Richard-Willstätter-Str. 12  
12489 Berlin

### **Prof. Dr. Arno Behr**

Technische Universität Dortmund  
Lehrstuhl für Technische Chemie  
Emil-Figge-Str. 66  
44227 Dortmund

### **apl. Prof. Dr. Axel Brehm**

Carl von Ossietzky Universität Oldenburg  
Technische Chemie  
Ammerländer Heerstr. 114–118  
26111 Oldenburg

### **Prof. Dr. Jürgen Gmehling**

Carl von Ossietzky Universität Oldenburg  
Technische Chemie  
Ammerländer Heerstr. 114–118  
26111 Oldenburg

### **Prof. Dr. Kai-Olaf Hinrichsen**

Technische Universität München  
Lehrstuhl I Technische Chemie  
Lichtenbergstr. 4  
85747 Garching

### **Prof. Dr. Hanns Hofmann †**

ehemals Universität Erlangen-Nürnberg  
Lehrstuhl für Chemische Reaktionstechnik

### **Dr.-Ing. Michael Kleiber**

thyssenkrupp Industrial Solutions AG  
Petrochemicals & Polymers/PLM/TIS  
Friedrich-Uhde-Str. 2  
65812 Bad Soden

### **Prof. Dr.-Ing. Norbert Kockmann**

Technische Universität Dortmund  
Bio- und Chemieingenieurwesen, Apparatedesign  
Emil-Figge-Str. 68  
44227 Dortmund

### **Prof. Dr. Ulfert Onken †**

Universität Dortmund  
Lehrstuhl für Technische Chemie B  
Emil-Figge-Str. 66  
44227 Dortmund

### **Prof. Dr. Regina Palkovits**

RWTH Aachen  
Technische Chemie und Petrochemie  
Worringerweg 1  
52074 Aachen

### **Prof. Dr. Albert Renken**

École Polytechnique Fédérale de Lausanne  
Institute of Chemical Sciences and Engineering EPFL-SB ISIC  
1015 Lausanne  
Schweiz

### **Prof. Dr. Dieter Vogt**

Technische Universität Dortmund  
Bio- und Chemieingenieurwesen, Technische Chemie  
Emil-Figge-Str. 66  
44227 Dortmund

## Titelbild

Unter Verwendung eines Bilds von Shutterstock  
(#224936086, (c) Christian Lagerek).

Zusatzmaterial für Dozentinnen und Dozenten  
erhältlich unter <http://www.wiley-vch.de/ISBN9783527345748>

Dritte Auflage 2023

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.

© 2023 WILEY-VCH Verlag GmbH & 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 Datenverarbeitungsanlagen, 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.

**Umschlaggestaltung** Formgeber, Mannheim  
**Satz** le-tex publishing services GmbH, Leipzig  
**Druck und Bindung**

**Print ISBN** 978-3-527-34574-8

**ePDF ISBN** 978-3-527-81954-6

**ePub ISBN** 978-3-527-81956-0

**Mobi ISBN** 978-3-527-81955-3

Gedruckt auf säurefreiem Papier.

## Inhaltsverzeichnis

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

### Teil I Einführung in die technische Chemie 1

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

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

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

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

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

**5 Kinetik chemischer Reaktionen 103**

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

<b>6</b>	<b>Chemische Reaktoren und deren reaktionstechnische Modellierung</b>	<b>209</b>
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
<b>7</b>	<b>Auswahl und Auslegung chemischer Reaktoren</b>	<b>283</b>
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
	<b>Teil III Grundoperationen</b>	<b>345</b>
<b>8</b>	<b>Thermodynamische Grundlagen für die Berechnung von Phasengleichgewichten</b>	<b>347</b>
8.1	Phasengleichgewichtsbeziehung	349
8.2	Dampf-Flüssig-Gleichgewicht	350
8.2.1	Anwendung von Zustandsgleichungen	351

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

- 9.11.4 Chemische Absorption 466
- 9.11.5 Absorberbauarten 466
- 9.12 Flüssig-Flüssig-Extraktion 467
  - 9.12.1 Auswahl des Extraktionsmittels 469
  - 9.12.2 McCabe-Thiele-Verfahren 469
  - 9.12.3 Kremser-Gleichung 471
  - 9.12.4 Anwendung von Dreiecksdiagrammen 471
  - 9.12.5 Extraktoren 473
- 9.13 Fest-Flüssig-Extraktion 477
- 9.14 Extraktion mit überkritischen Fluiden 478
- 9.15 Kristallisation 478
  - 9.15.1 Kristallisationsprozess 479
  - 9.15.2 Kristallisatoren 481
- 9.16 Adsorption 485
  - 9.16.1 Adsorptionsmittel 486
  - 9.16.2 Adsorptions- und Desorptionsschritt 487
  - 9.16.3 Adsorberbauarten 488
- 9.17 Entfernung der Restfeuchten, Entwässern und Trocknen 491
  - 9.17.1 Trocknungsgüter und Trocknungsarten 491
  - 9.17.2 Kriterien zur Auslegung von Trocknern 491
  - 9.17.3 Apparate zum technischen Trocknen 491
- 9.18 Membrantrennverfahren 494
  - 9.18.1 Trennprinzip und Arbeitsweise 494
  - 9.18.2 Arten von Membrantrennverfahren 497
  - 9.18.3 Membranmodule 499
  - 9.18.4 Ionenleitende Membranen 501
- Literatur 501
  
- 10 Mechanische Grundoperationen 505**
  - 10.1 Strömungslehre – 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

<b>16</b>	<b>Organische Grundchemikalien</b>	<b>725</b>
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
<b>17</b>	<b>Organische Zwischenprodukte</b>	<b>761</b>
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
<b>18</b>	<b>Anorganische Grund- und Massenprodukte</b>	<b>821</b>
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 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

## Vorwort zur 3. Auflage

Für die nunmehr dritte Auflage wurde das deutschsprachige Standard-Lehrbuch „Technische Chemie“ erneut gründlich überarbeitet. Dabei war es sehr hilfreich, dass wieder neue kompetente Koautoren zur Mitarbeit gewonnen werden konnten, nämlich Dr. Michael Kleiber von der thyssenkrupp Industrial Solutions AG sowie die Professoren Norbert Kockmann und Dieter Vogt von der Technischen Universität Dortmund. Bei dieser Neubearbeitung wurden nicht nur durchgehend aktuelle Produktions- bzw. Kapazitätswerte eingefügt, sondern auch zahlreiche Themengebiete neu aufgenommen bzw. deutlich ergänzt. Dazu gehören z. B. wichtige Informationen zur Rohstoffverfügbarkeit, insbesondere von Biomasse und Metallen, zur Katalyse, zu neuen Produktionsprozessen sowie zur Prozessintensivierung, z. B. mit Mikroreaktoren, modularen Anlagen und der Membrantechnologie.

Viele Literaturangaben und Verweise wurden aktualisiert und der neue Kostenindex der ProcessNet zur Kalkulation neuer Anlagenprojekte wurde aufgenommen. Auch wurden Grundoperationen, wie z. B. Kristallisation und Chromatografie, thematisch erweitert dargestellt. Generelle Themen der chemischen Industrie, wie z. B. Lifecycle-Analyse, Anlagensicherheit und Kreislaufwirtschaft, wurden wesentlich überarbeitet.

Die im Lehrbuch angegebenen Werte für Produktions- bzw. Kapazitätswerte stammen aus unterschiedlichsten Quellen. Die Autoren haben diese Zahlen mit größtmöglicher Sorgfalt recherchiert, können aber für ihre Genauigkeit keine Gewähr übernehmen.

Durch ein neues, modernes Layout ist das Arbeiten mit dem Lehrbuch wesentlich erleichtert worden; zahlreiche neue Querverweise ermöglichen das rasche Nachschlagen offener Fragen. Im Internet stehen den Studierenden zusätzliche Übungen (mit Lösungen) zur Verfügung. Die Autoren danken Herrn M. Sc. Marc Peters von der TU Dortmund und den Herren Felix Bloeck und Andreas Sendtko vom Verlag Wiley-VCH für ihre engagierte organisatorische Unterstützung. Wir danken auch den Kolleginnen und Kollegen sowie Lesern für ihre zahlreichen Rückmeldungen, die an vielen Stellen in das Buch eingeflossen sind.

Die Autorin und Autoren hoffen, dass auch die 3. Auflage des Lehrbuchs wieder gut aufgenommen wird – sowohl in Hochschulen und Universitäten als auch in der chemischen Industrie. Allerdings können sich auch bei sorgfältigster Bearbeitung eines so umfangreichen Buches Fehler einschleichen. Sollten Sie welche entdecken oder neue Anregungen haben, schicken Sie uns doch bitte eine E-Mail mit Ihren Vorschlägen.

Aachen, Dortmund,  
Hattersheim, Lausanne,  
Garching, Oldenburg im  
September 2022

*M. Baerns, A. Behr, A. Brehm, J. Gmehling,  
K.-O. Hinrichsen, M. Kleiber, N. Kockmann,  
U. Onken, R. Palkovits, A. Renken, D. Vogt*



## 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 Kap. 3<sup>1)</sup> zusammengeführt; in Kap. 11 hat sie die Grundprinzipien der Nachhaltigkeit und deren Anwendung auf chemische Prozesse und Produkte behandelt.

Kai-Olaf Hinrichsen hat die Ausführungen zur Mikro- und Makrokinetik chemischer Reaktionen für das Kap. 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 Kap. 4 (Grundlagen der chemischen Reaktionstechnik) zusammengeführt; in gleicher Weise wurden die Ausführungen über Wirbelschichtreaktoren in Kap. 6 vereinigt.

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

Zur 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](http://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.

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

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 Partikelmesstechnik.

## 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 es 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 Chemieprodukten 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 nützliche 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 anhand 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 vielversprechenden Aussichten beim Einsatz in der Produktion insbesondere von Wirkstoffen und Feinchemikalien. Ein eigener Abschnitt befasst sich mit der Biokatalyse, die außer in biotechnischen Verfahren zunehmend 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 (Kap. 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 (Kap. 3: Stöchiometrie, Thermodynamik, Wärme- und Stofftransport) in Kap. 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 Kap. 5 vorgestellt. In Kap. 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 (Kap. 7). Daran schließt sich in Kap. 8 die Thermodynamik der Mischphasen als Grundlage der thermischen Trennverfahren an. Von diesen (Destillation und Rektifikation, Absorption, Extraktion, Kristallisation, Absorption, Membrantrennverfahren) werden in Kap. 9 die destillativen Verfahren wegen ihrer Bedeutung besonders eingehend behandelt. Neben grafischen 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 (Kap. 10).

Die chemische Prozesskunde wird in den zwei Teilen „Verfahrensentwicklung“ (Kap. 11–14) und „Chemische Prozesse“ (Kap. 15–19) dargestellt. Die Verfahrensentwicklung behandelt zunächst die Verfahrensauswahl, wobei anhand 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 „Chemische Prozesse“ gewidmet, in dem Verfahren der verschiedenen Produktionsbereiche dargestellt werden. Als Auswahlkriterium für die besprochenen Verfahren dienen 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 unter [www.wiley-vch.de/textbooks](http://www.wiley-vch.de/textbooks) zugänglich. Im Anhang zu diesem Buch befindet sich außerdem eine Übersicht über wichtige grafische 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 Dort-

mund, 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-VCH 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 Gmehling, 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.

Herr Prof. Baerns verstarb während der Manuskripterstellung zur dritten Auflage des Lehrbuches im Februar 2021.



**Prof. Dr. Arno Behr**, 10 Jahre Abteilungsleiter und Hauptbevollmächtigter bei der Henkel KGaA/Düsseldorf. Von 1996 bis 2017 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, ca. 300 wissenschaftlichen Publikationen und zahlreichen Patenten. Ausgezeichnet mit zwei Literaturpreisen des Fonds der Chemischen Industrie und der Normann-Medaille der Deutschen Gesellschaft für Fettwissenschaft.



**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, mit Mitarbeitern Gründer der DDBST GmbH sowie der „Laboratory for Thermophysical Properties (LTP) GmbH“. Forschungsgebiete: Aufbau der Dortmunder Datenbank, Entwicklung thermodynamischer Modelle zur Vorausberechnung von Phasengleichgewichten (UNIFAC, mod. UNIFAC, VTPR, ...), Computergestützte Entwicklung, Auslegung und Optimierung chemischer Prozesse. Autor von etwa 50 Büchern (Lehrbücher, Datensammlungen) und über 430 wissenschaftlichen Artikeln. Ausgezeichnet mit dem Arnold-Eucken-Preis, dem Rossini-Lecture Award, der Gmelin-Beilstein-Denk Münze, der Emil-Kirschbaum-Medaille und des Donald L. Katz Awards der GPA Midstream Association.



**Prof. Dr.-Ing. Kai-Olaf Hinrichsen, M.Ch.E.**, Professor für Technische Chemie an der Technischen Universität München (TUM) seit 2004. Studierte Energie- und Verfahrenstechnik an der TU Berlin und Chemical Engineering an der University of Delaware, wurde an der TU Berlin promoviert. Forschungsgebiete: Heterogene Katalyse, Reaktionskinetik, Computational Fluid Dynamics. Autor von mehr als 150 wissenschaftlichen Veröffentlichungen, mehreren Buchkapiteln und einigen Patenten.

**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. Solvaypreisträger (1982), Bundesverdienstkreuz (1982), DECHEMA-Medaille (1994).



**Dr.-Ing. Michael Kleiber**, Principal Process Engineer bei thyssenkrupp Industrial Solutions AG, Bad Soden am Taunus. Arbeitsgebiete: Prozesssimulation, Equipment Design, Prozesssynthese und -optimierung. Circa 30 wissenschaftliche Veröffentlichungen, darunter zwei Bücher und div. Beiträge in Standardwerken (VDI-Wärmeatlas, Winnacker-Küchler, Ullmann). Mitglied der ProcessNet-Fachgruppe Thermodynamik.



**Prof. Dr.-Ing. Norbert Kockmann**, Professor für Apparatdesign an der Technischen Universität Dortmund. Studierte Maschinenwesen an der TU München, promovierte an der Universität Bremen und habilitierte an der Universität Freiburg. Von 1997 bis 2001 war er im Anlagenbau und von 2007 bis 2011 in der pharmazeutischen Prozessentwicklung tätig. Er ist Autor von mehr als 200 wissenschaftlichen Publikationen und 15 Buchkapiteln, Autor und Co-Autor von 4 Büchern und 7 Patenten. Arbeitsgebiete: Prozessintensivierung, Mikroreaktoren, miniaturisierte Apparate für Trennverfahren, Mehrphasenreaktionen mit Stofftransport, Sicherheitstechnik, pharmazeutische Wirkstoffproduktion, Technik- und Innovationsgeschichte.

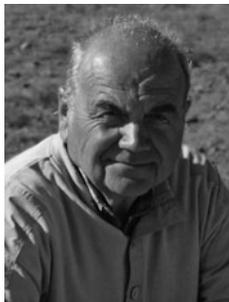


**Prof. em. Dr. Ulfert Onken** (†), ehemaliger Leiter des Bereiches Chemische Verfahrenstechnik bei der Hoechst AG. Professor für Technische Chemie an der Technischen Universität Dortmund. Forschungsgebiete: Biotechnologie, Gas-Flüssigkeits-Reaktoren, Mischphasenthermodynamik. Aufbau der Dortmunder Datenbank 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).

Herr Prof. Onken verstarb während der Manuskripterstellung zur dritten Auflage des Lehrbuches im April 2021.



**Prof. Dr. rer. nat. Regina Palkovits** ist Universitätsprofessorin für Heterogene Katalyse und Technische Chemie der Fakultät für Mathematik, Information und Naturwissenschaften der RWTH Aachen. Ihr Forschungsschwerpunkt sind maßgeschneiderte Materialien für die heterogene Katalyse mit dem Ziel, globalen Herausforderungen durch die Entwicklung nachhaltiger chemischer Prozesse zu begegnen. Sie ist Autorin von über 150 Publikationen, 8 Buchkapiteln und zahlreichen Patenten. Ausgewählte Auszeichnungen umfassen den Dechema-Preis 2016, den EFCATS 2019 Young Researcher Award sowie die Aufnahme in die Nordrhein-Westfälische Akademie der Wissenschaften und Künste 2020.



**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. Autor/Koautor von über 450 wissenschaftlichen Veröffentlichungen, 16 Patenten, ca. 40 Buchkapiteln und 5 Büchern zu Reaktionstechnik und Katalyse. DECHEMA-Medaille in Titan. Gewähltes Mitglied der Schweizer Akademie der Technischen Wissenschaften.



**Prof. Dr. rer. nat. Dieter Vogt**, Professor für Technische Chemie an der Technischen Universität Dortmund. Von 1999 bis 2012 Professor für Koordinationschemie und Katalyse an der Technischen Universität Eindhoven und von 2012 bis 2017 Professor für Industrielle Chemie an der Universität von Edinburgh. Autor von mehr als 130 wissenschaftlichen Publikationen, 15 Buchkapiteln und 15 Patenten. Arbeitsgebiete: Angewandte homogene Katalyse, kinetische und mechanistische Studien, Katalysatorrecycling und Prozessentwicklung mittels Miniplant Technologie, stoffliche Nutzung nachwachsender Rohstoffe.

## Enzyklopädien und Nachschlagewerke zur technischen Chemie

### Enzyklopädien

- Elvers, B. und Ley, C. (Hrsg.) (2011). *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*, 7. Aufl., 40 Bde. Weinheim: Wiley-VCH, Online-Version
- Stephan, P., Kabelac, S., Kind, M., Mewes, D., Schaber, K. und Wetzel, T. (2019). *VDI-Wärmeatlas*, 12. Aufl. Berlin: Springer-Verlag.
- Kroschwitz, J.I. und Seidel, A. (Hrsg.) (2004–2017). *Kirk-Othmer: Encyclopedia of Chemical Technology*, 5. Aufl., 27 Bde. New York: Wiley-Interscience.
- Dittmeyer, R., Keim, W., Kreysa, G. und Oberholz, A. (Hrsg.) (2003–2006). *Winnacker-Küchler: Chemische Technik*, 5. Aufl., 9 Bde. Weinheim: Wiley-VCH.

### Nachschlagewerke

- Bornscheuer, U., Streit, W., Böckler, F., Dill, B., Kirschning, A., Eisenbrand, G., Matissek, R., Faupel, F., Fugmann, B., Pohnert, G., Dingerdissen, U. und Gamse, T. (Hrsg.) (2020). *Römpp Lexikon Chemie*, 10. Aufl. Stuttgart: Thieme, Online-Version.
- Moo-Young, M. und Butler, M. (Hrsg.) (2019). *Comprehensive Biotechnology*. 3. Aufl. St. Louis: Pergamon.
- Kamer, P.C.J., Vogt, D. und Thybaut, J.W. (Hrsg.) (2017). *Contemporary Catalysis: Science, Technology, and Applications*. London: Royal Society of Chemistry.
- Kent, J.A., Bommaraju, T. und Barnicki, S.D. (Hrsg.) (2017). *Handbook of Industrial Chemistry and Biotechnology*. Cham: Springer International Publishing.
- Benvenuto, M.A. (2017). *Industrial Organic Chemistry*. Berlin: De Gruyter.
- Benvenuto, M.A. (2015). *Industrial Chemistry*. Berlin: De Gruyter.
- Benvenuto, M.A. (2015). *Industrial Inorganic Chemistry*. Berlin: De Gruyter.
- Bertau, M., Müller, A., Fröhlich, P. und Katzberg, M. (2013). *Industrielle Anorganische Chemie*, 4. Aufl. Weinheim: Wiley-VCH.
- Lennarz, W.J. und Lane, M.D. (Hrsg.) (2013). *Encyclopedia of Biological Chemistry*, 2. Aufl., 4 Bde. Amsterdam: Elsevier Academic Press.
- Wittcoff, H.A., Reuben, B.G. und Plotkin, J.S. (2013). *Industrial Organic Chemicals*, 3. Aufl. Hoboken: Wiley.
- Moulijn, J.A., Makkee, J.A. und van Diepen, A. (2013). *Chemical Process Technology*, 2. Aufl. Chichester: Wiley.
- Ertl, G., Knözinger, H., Schüth, F. und Weitkamp, J. (Hrsg.) (2008). *Handbook of Heterogeneous Catalysis*, 2. Aufl., 8 Bde. Weinheim: Wiley-VCH.

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

Rehm, H.-J., Reed, G., Pühler, A., Stadler, P. und Kelly, D.R. (Hrsg.) (2001). *Biotechnology*, 2. Aufl., 12 Bde. Weinheim: Wiley-VCH.