

## Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort zur 2. Auflage</b>	<b>XIII</b>		
<b>Vorwort zur 1. Auflage</b>	<b>XV</b>		
<b>Die Autoren</b>	<b>XVII</b>		
<b>Enzyklopädien und Nachschlagewerke zur Technischen Chemie</b>	<b>XIX</b>		
<b>Symbolverzeichnis</b>	<b>XXI</b>		
<b>Teil I Einführung in die Technische Chemie</b>	<b>1</b>		
	<i>Arno Behr, Ulfert Onken, Regina Palkovits</i>		
<b>1 Chemische Prozesse und chemische Industrie</b>	<b>1</b>		
1.1 Besonderheiten chemischer Prozesse	1	3.2 Arten von Katalysatoren	25
1.2 Chemie und Umwelt	2	3.2.1 Heterogene Katalyse	25
1.3 Chemiewirtschaft	3	3.2.1.1 Grundprinzipien der heterogenen Katalyse	25
1.3.1 Einteilung der Chemieprodukte	3	3.2.1.2 Eigenschaften von Feststoffkatalysatoren	26
1.3.2 Chemiefirmen werden Großunternehmen – ein historischer Rückblick	4	3.2.2 Homogene Katalyse	27
1.3.3 Strukturwandel in der Chemieindustrie	5	3.2.2.1 Grundprinzipien der homogenen Katalyse	27
1.4 Struktur von Chemieunternehmen	6	3.2.2.2 Technische Anwendungen homogener Katalysatoren	28
1.5 Bedeutung von Forschung und Entwicklung für die chemische Industrie	7	3.2.3 Biokatalyse	30
1.5.1 Wissenschaft und chemische Technik	7	3.2.3.1 Grundprinzipien der Biokatalyse	30
1.5.2 Betriebsinterne Forschung	8	3.2.3.2 Biotransformationen	31
1.6 Entwicklungstendenzen und Zukunftsaussichten der chemischen Industrie	10	3.2.3.3 Biotransformationen zur Herstellung von Wirkstoffen und Feinchemikalien	32
<i>Literatur</i>	<i>11</i>	3.3 Besondere Anwendungsformen in homogener und heterogener Katalyse	35
<b>2 Charakterisierung chemischer Produktionsverfahren</b>	<b>13</b>	3.3.1 Vergleich von homogener und heterogener Katalyse	35
2.1 Laborverfahren und technische Verfahren	13	3.3.2 Heterogenisierung homogener Katalysatoren	35
2.1.1 Chlorierung von Benzol	13	3.3.3 Enantioselektive Katalyse	35
2.1.2 Oxychlorierung von Benzol	14	3.3.4 Elektrokatalyse	35
2.1.3 Herstellung von Azofarbstoffen	14	3.3.5 Photokatalyse	36
2.1.4 Zusammenfassung	15	<i>Literatur</i>	<i>36</i>
2.2 Gliederung chemischer Produktionsverfahren	15	<b>Teil II Chemische Reaktionstechnik</b>	<b>37</b>
2.3 Darstellung chemischer Verfahren und Anlagen durch Fließschemata	18		<i>Manfred Baerns, Kai-Olaf Hinrichsen, Hanns Hofmann, Albert Renken</i>
2.3.1 Grundfließschema	19	<b>4 Grundlagen der Chemischen Reaktionstechnik</b>	<b>37</b>
2.3.2 Verfahrensfließschema	21	4.1 Grundbegriffe und Grundphänomene	38
2.3.3 Rohrleitungs- und Instrumenten (RI)-Fließschema	21	4.1.1 Klassifizierung chemischer Reaktionen	38
2.3.4 Mess- und Regelschema	22	4.1.2 Grundbegriffe und Definitionen	38
2.3.5 Spezielle Schemata	22	4.1.3 Stöchiometrie chemischer Reaktionen	41
<i>Literatur</i>	<i>22</i>	4.1.3.1 Zusammensetzung des Reaktionsgemisches	41
<b>3 Katalyse als Schlüsseltechnologie der chemischen Industrie</b>	<b>23</b>	4.1.3.2 Schlüsselkomponenten und Schlüsselreaktionen	42
3.1 Was ist Katalyse?	23	4.1.3.3 Reaktionsfortschritt	45
		4.1.3.4 Zusammenhang zwischen Stöchiometrie und Reaktionskinetik	46
		4.2 Chemische Thermodynamik	48
		<i>Jürgen Gmehling</i>	
		4.2.1 Reaktionsenthalpie	48
		4.2.2 Gleichgewichtsumsatz	49
		4.2.3 Simultangleichgewichte	53
		4.2.3.1 Relaxationsmethode	53
		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	7.1.2.3	Konkurrierende Folgereaktionen	232
6.7.3.1	Idealer Strömungsrohrreaktor	187	7.1.2.4	Polymerisationsreaktionen	234
6.7.3.2	Idealer kontinuierlich betriebener Rührkesselreaktor	187	7.1.2.5	Temperaturführung	236
6.7.3.3	Reaktorkaskade	188	7.2	Thermische Prozesssicherheit	237
6.7.3.4	Laminar durchströmtes Rohr	188	7.2.1	Theorie der Wärmeexplosion	237
6.7.4	Verweilzeitmodelle realer Reaktoren	189	7.2.2	Parametrische Sensitivität	240
6.7.4.1	Dispersionsmodell	189	7.2.3	Halbkontinuierlich betriebene Rührkesselreaktoren	242
6.7.4.2	Zellenmodell	192	7.2.4	Kontinuierlich betriebene Rührkesselreaktoren	243
6.7.4.3	Mehrparametrische Modelle	192	7.2.5	Strömungsrohrreaktoren	243
6.7.5	Verweilzeitverhalten realer Reaktoren	192	7.3	Mikrostrukturierte Reaktoren	243
6.7.5.1	Rührkesselreaktoren	192	7.3.1	Homogene Reaktionen	244
6.7.5.2	Strömungsrohrreaktoren	193	7.3.1.1	Mikrofluidik	244
6.7.6	Einfluss der Verweilzeitverteilung und der Vermischung auf die Leistung realer Reaktoren	195	7.3.1.2	Verweilzeitverteilung	244
6.7.6.1	Reaktionen 1. Ordnung	195	7.3.1.3	Mikrovermischung	246
6.7.6.2	Reaktionen mit nichtlinearer Kinetik	197	7.3.1.4	Wärmeübergang	247
6.7.7	Vermischung in realen Reaktoren	198	7.3.2	Feststoffkatalysierte Fluidreaktionen	250
6.7.7.1	Segregation	198	7.3.2.1	Innerer Stofftransport	251
6.7.7.2	Zeitpunkt der Vermischung	200	7.3.2.2	Äußerer Stofftransport	251
6.7.7.3	Einfluss der Segregation auf die Reaktorleistung und Produktverteilung	201	7.3.2.3	Temperaturkontrolle	252
6.8	Reale Mehrphasenreaktoren	204	7.3.3	Fluid-Fluid-Reaktionen	252
6.8.1	Fluid-Feststoff-Systeme	204		Literatur	253
6.8.1.1	Festbettreaktoren	204	<b>Teil III</b>	<b>Grundoperationen</b>	255
6.8.1.2	Wirbelschichtreaktoren	208		Jürgen Gruehling, Axel Brehm	
6.8.2	Fluid-Fluid-Systeme (vgl. Abschnitt 5.3.2)	210	<b>8</b>	<b>Thermodynamische Grundlagen für die Berechnung von Phasengleichgewichten</b>	255
6.8.2.1	Blasensäulen-Reaktor	211	8.1	Phasengleichgewichtsbeziehung	257
6.8.2.2	Rührkessel für Fluid-Fluid-Reaktionen	213	8.2	Dampf-Flüssig-Gleichgewicht	257
6.8.2.3	Bodenkolonnen	213	8.2.1	Anwendung von Zustandsgleichungen	258
6.8.2.4	Füllkörperkolonnen	213	8.2.2	Virialgleichung	260
6.8.2.5	Strahlwäscher	214	8.2.3	Chemische Theorie	262
6.8.3	Gasförmig-flüssig-fest-Systeme	214	8.2.4	Anwendung von Aktivitätskoeffizienten-Modellen	262
6.8.3.1	Mehrphasen-Festbettreaktoren	215	8.2.5	Aktivitätskoeffizienten-Modelle	264
6.8.3.2	Dreiphasenblasensäule	216	8.3	Vorausberechnung von Phasengleichgewichten	267
6.8.3.3	Dreiphasen-Wirbelschichtreaktoren	216	8.4	Konzentrationsabhängigkeit des Trennfaktors binärer Systeme	269
6.8.3.4	Mehrphasen-Rührkesselreaktoren	216	8.4.1	Bedingung für das Auftreten azeotroper Punkte	271
6.8.3.5	Strukturierte Mehrphasenreaktoren	216	8.4.2	Rückstandslinien, Grenzdestillationslinien und Destillationsfelder	272
	Literatur	217	8.5	Flüssig-Flüssig-Gleichgewicht	275
<b>7</b>	<b>Auswahl und Auslegung chemischer Reaktoren</b>	219	8.6	Gaslöslichkeit	278
7.1	Reaktorauswahl und reaktionstechnische Optimierung	219	8.7	Fest-Flüssig-Gleichgewicht	280
7.1.1	Einfache Reaktionen (Umsatzproblem)	219	8.8	Phasengleichgewicht für die überkritische Extraktion	284
7.1.1.1	Absatzweise betriebener Reaktor (RK)	219	8.9	Adsorptionsgleichgewichte	285
7.1.1.2	Kontinuierlich betriebene Reaktoren	220	8.10	Osmotischer Druck	287
7.1.1.3	Temperaturführung	223		Literatur	289
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			

- 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 Kontakttrockner 371
        - 9.16 Membrantrennverfahren 371
          - 9.16.1 Trennprinzip und Arbeitsweise 371
          - 9.16.2 Arten von Membrantrennverfahren 373
          - 9.16.3 Membranmodule 375
- 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 fluidler 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	11.3.2.1	Wasserstofferzeugung aus fossilen Rohstoffen	437
10.3.2.1	Kriterien der Flüssigkeitsverteilung	401	11.3.2.2	Wasserstofferzeugung durch Wasserelektrolyse	439
10.3.2.2	Einflussgrößen und Auswahlkriterien beim Zerstäuben	402	11.3.2.3	Vergleich: Wasserstoff aus fossilen Rohstoffen oder durch Wasserelektrolyse	439
10.4	Mechanische Trennverfahren	404	11.3.2.4	Wasserstoff als Energieträger und Energiespeicher	440
10.4.1	Partikelabtrennung aus Flüssigkeiten	404	11.3.2.5	Direktverstromung von Wasserstoff	440
10.4.1.1	Sedimentieren und Zentrifugieren	405	11.4	Sicherheit	441
10.4.1.2	Filtern	408	11.4.1	Exotherme Reaktionen	441
10.4.2	Partikelabscheidung aus Gasströmen	413	11.4.1.1	Ausfall der Kühlung am Beispiel der Blockpolymerisation von Styrol	441
10.4.2.1	Ausnutzung der Schwer- und der Zentrifugalkraft	413	11.4.1.2	Explosion eines Ethylenoxidbehälters als Beispiel einer Wärmeexplosion	442
10.4.2.2	Filterelemente, Elektrofilter, Nassentstaubung	413	11.4.1.3	Exotherme Sekundärreaktionen	443
10.4.3	Trennen weiterer disperser Systeme	415	11.4.2	Brennbare und explosive Stoffe und Stoffgemische	443
10.4.3.1	Emulsionstrennen	415	11.4.2.1	Explosionen	443
10.4.3.2	Schaumbrechen und Schaumverhindern	416	11.4.2.2	Explosionsbereich	444
10.5	Verarbeiten von Feststoffen	417	11.4.2.3	Organische Peroxide	445
10.5.1	Zerkleinern von Feststoffen	417	11.4.2.4	Maßnahmen zur Verhinderung von Explosionen	445
10.5.1.1	Grundlagen des Zerkleinerns	417	11.4.3	Toxische Stoffe	445
10.5.1.2	Energiebedarf beim Zerkleinern	418	11.4.4	Zusammenfassung und Folgerungen	446
10.5.1.3	Zerkleinerungsapparate	420	11.5	Umweltschutz im Sinne der Nachhaltigkeit	446
10.5.2	Klassieren und Sortieren	422	11.5.1	Luftverunreinigungen	447
10.5.2.1	Auftrennen des Mahlguts nach Kornklassen (Klassieren)	422	11.5.2	Abwasserbelastungen	449
10.5.2.2	Auftrennen des Mahlguts unter Ausnutzung von Teilcheneigenschaften (Sortieren)	424	11.5.2.1	Alternativen zum Chlorhydrinverfahrens zur Herstellung von Ethylenoxid und Propylenoxid	450
10.5.3	Formgebung	426	11.5.2.2	Abwasserreinigung	451
	Literatur	428	11.5.3	Abfälle	454
<b>Teil IV</b>	<b>Verfahrensentwicklung</b>	<b>429</b>	11.5.4	Zusammenfassung und Folgerungen	456
	<i>Arno Behr, Ulfert Onken, Regina Palkovits</i>		11.6	Betriebsweise	456
<b>11</b>	<b>Gesichtspunkte der Verfahrensauswahl</b>	<b>429</b>	11.6.1	Beispiel: Hydrierung von Doppelbindungen	456
11.1	Das Konzept der Nachhaltigkeit	429	11.6.1.1	Hydrierung im Suspensionsreaktor	457
11.2	Stoffliche Gesichtspunkte (Rohstoffauswahl und Syntheseroute)	431	11.6.1.2	Hydrierung im Rieselbettreaktor	457
11.2.1	Nachhaltigkeit am Beispiel des Phenols – sieben technische Synthesewege	431	11.6.2	Unterschiede zwischen diskontinuierlichen und kontinuierlichen Verfahren	458
11.2.1.1	Alkalischmelze von Natriumbenzolsulfonat	431	11.6.3	Entscheidungskriterien	460
11.2.1.2	Wasserdampfhydrolyse von Chlorbenzol (Raschig-Hooker-Verfahren)	432		Literatur	461
11.2.1.3	Alkalische Hydrolyse von Chlorbenzol	432	<b>12</b>	<b>Verfahrensgrundlagen</b>	<b>463</b>
11.2.1.4	Cumolverfahren (Hock-Verfahren)	433	12.1	Ausgangssituation und Ablauf	463
11.2.1.5	Toluoloxidation	434	12.2	Verfahrensinformationen	464
11.2.1.6	Dehydrierung von Cyclohexanol/Cyclohexanon	434	12.2.1	Übersicht	464
11.2.1.7	Benzolhydroxylierung mit Distickstoffmonoxid	434	12.2.2	Sicherheitstechnische Kenndaten	465
11.2.1.8	Phenol aus nachwachsenden Rohstoffen	434	12.2.3	Toxikologische Daten	467
11.2.1.9	Vergleich der Phenolverfahren	434	12.3	Stoff- und Energiebilanzen	469
11.2.2	Zusammenfassung	435	12.3.1	Stoff- und Energiebilanzen – Werkzeug in Verfahrensentwicklung und Anlagenprojektierung	469
11.3	Energieaufwand	436	12.3.2	Stoffbilanzen	469
11.3.1	Energiearten und Energienutzung	436	12.3.3	Energiebilanzen	474
11.3.2	Wasserstoff	436			

- 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 Projektabwicklung 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	18.2.2	Salpetersäure	626
17.1.1.5	Längerkettige Alkohole	588	18.2.3	Harnstoff und Melamin	627
17.1.1.6	Cyclische Alkohole	588	18.3	Chlor und Alkalien	627
17.1.1.7	Ungesättigte Alkohole	589	18.3.1	Chlor und Alkalilauge durch Alkalichlorid-	elektrolyse 627
17.1.1.8	Mehrwertige Alkohole	589	18.3.2	Natronlauge und Soda	629
17.1.2	Phenole	591	18.4	Phosphorverbindungen	630
17.1.3	Ether	591	18.4.1	Elementarer Phosphor	630
17.1.3.1	Aliphatische Ether	591	18.4.2	Phosphorsäure und Phosphate	631
17.1.3.2	Cyclische Ether	591	18.5	Technische Gase	632
17.1.4	Epoxide	592	18.5.1	Sauerstoff und Stickstoff	632
17.1.4.1	Ethylenoxid	592	18.5.2	Edelgase	633
17.1.4.2	Propylenoxid	593	18.5.3	Kohlendioxid	634
17.1.5	Aldehyde	594	18.6	Düngemittel	634
17.1.5.1	Formaldehyd (Methanal)	594	18.6.1	Bedeutung der Düngemittel	634
17.1.5.2	Acetaldehyd (Ethanal)	595	18.6.2	Stickstoffdüngemittel	635
17.1.5.3	Butyraldehyde (Butanale)	596	18.6.3	Phosphordüngemittel	635
17.1.5.4	Ungesättigte Aldehyde	598	18.6.4	Kalidüngemittel	636
17.1.6	Ketone	599	18.6.5	Mehrnährstoffdünger	636
17.1.6.1	Aceton und Methylisobutylketon	599	18.6.6	Wirtschaftliche Betrachtung	636
17.1.6.2	Methylethylketon	599	18.7	Metalle	636
17.1.7	Carbonsäuren	599	18.7.1	Stähle	636
17.1.7.1	Ameisensäure	599	18.7.2	Nichteisenmetalle und ihre Legierungen	637
17.1.7.2	Essigsäure	600	18.7.3	Korrosion und Korrosionsschutz	637
17.1.7.3	Ungesättigte Carbonsäuren	602		Literatur	638
17.1.7.4	Aliphatische Dicarbonsäuren	603			
17.1.7.5	Aromatische Carbonsäuren	603	<b>19</b>	<b>Chemische Endprodukte</b>	641
17.2	Stickstoffhaltige Verbindungen	606	19.1	Polymere	641
17.2.1	Amine	606	19.1.1	Aufbau und Synthese von Polymeren	641
17.2.1.1	Niedere Amine	606	19.1.1.1	Stufenreaktionen	642
17.2.1.2	Fettamine	606	19.1.1.2	Kettenreaktionen	642
17.2.1.3	Diamine	607	19.1.2	Polymerisationstechnik	645
17.2.1.4	Cyclische Amine	607	19.1.3	Massenkunststoffe	648
17.2.1.5	Aromatische Nitroverbindungen und Amine	607	19.1.4	Fasern	653
17.2.2	Lactame	608	19.1.5	Klebstoffe	653
17.2.3	Nitrile	608	19.1.6	Hochtemperaturfeste Kunststoffe	654
17.2.3.1	Acrylnitril	608	19.1.7	Elektrisch leitfähige Polymere	654
17.2.3.2	Adipodinitril	610	19.1.8	Flüssigkristalline Polymere	655
17.2.4	Isocyanate	611	19.1.9	Biologisch abbaubare Polymere	655
17.2.4.1	Aliphatische Isocyanate	611	19.2	Tenside und Waschmittel	655
17.2.4.2	Aromatische Isocyanate	611	19.2.1	Aufbau und Eigenschaften	655
17.3	Halogenhaltige Verbindungen	612	19.2.2	Anionische Tenside	656
17.3.1	Chlormethane	612	19.2.3	Kationische Tenside	658
17.3.2	Chlorderivate höherer Aliphaten	613	19.2.4	Nichtionische Tenside	658
17.3.3	Chloraromaten	615	19.2.5	Amphotere Tenside	661
17.3.4	Fluorverbindungen	616	19.2.6	Vergleich der Tensidklassen	661
	Literatur	618	19.2.7	Anwendungsgebiete	661
<b>18</b>	<b>Anorganische Grund- und Massenprodukte</b>	621	19.3	Farbstoffe	666
18.1	Anorganische Schwefelverbindungen	621	19.3.1	Übersicht	666
18.1.1	Schwefel und Sulfide	621	19.3.2	Azofarbstoffe	667
18.1.2	Schwefeldioxid	621	19.3.3	Carbonylfarbstoffe	668
18.1.3	Schwefeltrioxid und Schwefelsäure	622	19.3.4	Methinfarbstoffe	669
18.2	Anorganische Stickstoffverbindungen	622	19.3.5	Phthalocyanine	669
18.2.1	Ammoniak	622	19.3.6	Färbevorgänge	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	<b>Anhang 1</b>	<b>Größen zur Charakterisierung von Reaktionen, Verfahren und Anlagen</b>	697
19.5.1	Bedeutung des Pflanzenschutzes	681	<b>Anhang 2</b>	<b>Tabellen zu Reinstoffdaten</b>	699
19.5.2	Insektizide	681	<b>Anhang 3</b>	<b>Graphische Symbole für Fließschemata nach EN ISO 10 628</b>	703
19.5.3	Herbizide	683		<b>Stichwortverzeichnis</b>	709
19.5.4	Fungizide	684			
19.5.5	Marktdaten und Entwicklungstrends	685			
19.6	Metallorganische Verbindungen	685			
19.7	Silicone	687			