

## Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort zur 2. Auflage</b>	XIII	3.2	Arten von Katalysatoren	25
<b>Vorwort zur 1. Auflage</b>	XV	3.2.1	Heterogene Katalyse	25
<b>Die Autoren</b>	XVII	3.2.1.1	Grundprinzipien der heterogenen Katalyse	25
<b>Enzyklopädien und Nachschlagewerke zur Technischen Chemie</b>	XIX	3.2.1.2	Eigenschaften von Feststoffkatalysatoren	26
<b>Symbolverzeichnis</b>	XXI	3.2.2	Homogene Katalyse	27
<b>Teil I Einführung in die Technische Chemie</b>	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
<b>1 Chemische Prozesse und chemische Industrie</b>	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	<b>Teil II Chemische Reaktionstechnik</b>	37	
<i>Literatur</i>	11	<i>Manfred Baerns, Kai-Olaf Hinrichsen, Hanns Hofmann, Albert Renken</i>		
<b>2 Charakterisierung chemischer Produktionsverfahren</b>	13	<b>4 Grundlagen der Chemischen Reaktionstechnik</b>	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>	22	4.2.3	Simultangleichgewichte	53
<b>3 Katalyse als Schlüsseltechnologie der chemischen Industrie</b>	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

VI *Inhaltsverzeichnis*

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

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		<i>Literatur</i>	253
6.8.1.1	Festbettreaktoren	204	<b>Teil III</b>	<b>Grundoperationen</b>	255
6.8.1.2	Wirbelschichtreaktoren	208		<i>Jürgen Gmehling, Axel Brehm</i>	
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
	<i>Literatur</i>	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		<i>Literatur</i>	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			

## VIII Inhaltsverzeichnis

- 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 fluider 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 Suspendieren 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 Syntheseroute) 431
- 11.2.1 Nachhaltigkeit am Beispiel des Phenols – sieben technische Synthesewege 431
- 11.2.1.1 Alkalischmelze 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 Rieselbettreaktor 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	15.2.2	Förderung und Transport	525
12.4.1	Notwendigkeit und Aufgaben	474	15.2.3	Weiterverarbeitung	526
12.4.2	Typen von Versuchsanlagen	475	15.3	Kohle	527
12.4.3	Planung einer Versuchsanlage	476	15.3.1	Zusammensetzung und Klassifizierung	527
12.5	Auswertung und Optimierung	476	15.3.2	Vorkommen	528
12.5.1	Versuchsplanung und Auswertung	477	15.3.3	Förderung	528
12.5.2	Prozess-Simulation und Prozessoptimierung	477	15.3.4	Verarbeitung	529
	<i>Literatur</i>	478	15.3.4.1	Verkokung	529
<b>13</b>	<b>Wirtschaftlichkeit von Verfahren und Produktionsanlagen</b>	<b>481</b>	15.3.4.2	Kohlevergasung	532
13.1	Erlöse, Kosten und Gewinn	481	15.3.4.3	Kohlehydrierung	535
13.2	Herstellkosten	482	15.4	Nachwachsende Rohstoffe	536
13.2.1	Vorkalkulation und Nachkalkulation	482	15.4.1	Bedeutung der nachwachsenden Rohstoffe	536
13.2.2	Ermittlung des Kapitalbedarfs	482	15.4.2	Fette und Öle	537
13.2.3	Ermittlung der Herstellkosten	485	15.4.3	Kohlenhydrate	542
13.3	Kapazitätsauslastung und Wirtschaftlichkeit	487	15.4.3.1	Cellulose	542
13.3.1	Erlöse und Gewinn	487	15.4.3.2	Stärke	547
13.3.2	Fixe Kosten und veränderliche Kosten	488	15.4.3.3	Zucker	547
13.3.3	Gewinn bzw. Verlust in Abhängigkeit von der Kapazitätsauslastung	489	15.4.4	Pflanzliche Sekrete und Extrakte	548
13.4	Wirtschaftlichkeit von Projekten	490		<i>Literatur</i>	549
13.4.1	Rentabilität als Maß für die Wirtschaftlichkeit	490	<b>16</b>	<b>Organische Grundchemikalien</b>	<b>551</b>
13.4.2	Kapitalrückflusszeit	491	16.1	Alkane	551
13.4.3	Andere Methoden der Rentabilitätsbewertung	491	16.1.1	Herstellung	551
13.4.4	Entscheidung zwischen Alternativen	492	16.1.1.1	Methan	551
	<i>Literatur</i>	494	16.1.1.2	Höhere <i>n</i> - und <i>iso</i> -Alkane	552
<b>14</b>	<b>Planung und Bau von Anlagen</b>	<b>497</b>	16.1.1.3	Cycloalkane	552
14.1	Projekttablauf	497	16.1.2	Verwendung	552
14.2	Projektorganisation	498	16.1.2.1	Methan	552
14.3	Genehmigungsverfahren für Chemieanlagen	500	16.1.2.2	Höhere <i>n</i> -Alkane	553
14.4	Anlagenplanung	500	16.1.2.3	Cycloalkane	554
14.5	Projektabwicklung	503	16.2	Alkene	555
14.5.1	Ablaufplanung und -überwachung	503	16.2.1	Herstellung	555
14.5.2	Bau und Montage	505	16.2.2	Verwendung	562
	<i>Literatur</i>	507	16.3	Aromaten	564
<b>Teil V</b>	<b>Chemische Prozesse</b>	<b>509</b>	16.3.1	Herstellung	564
	<i>Arno Behr, Ulfert Onken</i>		16.3.2	Verwendung	567
<b>15</b>	<b>Organische Rohstoffe</b>	<b>509</b>	16.4	Acetylen	570
15.1	Erdöl	509	16.4.1	Herstellung	570
15.1.1	Zusammensetzung und Klassifizierung	509	16.4.1.1	Acetylen aus Kohle	571
15.1.2	Bildung und Vorkommen	510	16.4.1.2	Acetylen aus Kohlenwasserstoffen	571
15.1.3	Förderung und Transport	511	16.4.2	Verwendung	572
15.1.4	Erdölraffinerien	515	16.5	Synthesegas	573
15.1.5	Thermische Konversionsverfahren	519	16.5.1	Herstellung	573
15.1.6	Katalytische Konversionsverfahren	520	16.5.1.1	Steamreforming	573
15.2	Erdgas	525	16.5.1.2	Partielle Oxidation	575
15.2.1	Zusammensetzung und Klassifizierung	525	16.5.2	Verwendung	576
			16.5.3	Kohlenmonoxid	577
				<i>Literatur</i>	578
			<b>17</b>	<b>Organische Zwischenprodukte</b>	<b>581</b>
			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 Butyraldehyde (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 Färbevorgänge 670
- 19.4 Pharmaka 672

**XII** *Inhaltsverzeichnis*

---

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			