

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einführung</b>	<b>1</b>
	<i>Ralf Goedecke</i>	
<b>2</b>	<b>Verfahrensentwicklung</b>	<b>5</b>
2.1	Vorgehensweise und Methodik	6
	<i>Ralf Goedecke und Willi Hofen</i>	
2.1.1	Ziele, Zeit- und Kostenaspekte	6
2.1.2	Miniplant-Technologie, Scale-up-Faktoren	7
2.1.3	Methoden und Werkzeuge zur Unterstützung der Verfahrensentwicklung	8
2.1.4	Verfahrensablauf zur Entwicklung eines chemischen Prozesses	12
2.1.5	Praxisbeispiel einer Prozessentwicklung	23
2.1.6	Ausblick	26
2.2	Recherche thermophysikalischer Stoffdaten	28
	<i>Richard Sass und Helmut Wendeler</i>	
2.2.1	Bedeutung von thermophysikalischen Stoffdaten zur Prozessauslegung und -optimierung aus Sicht der chemischen Industrie	28
2.2.2	Welche thermodynamischen Eigenschaften braucht die chemische Industrie?	29
2.2.3	Quellen von thermophysikalischen Daten	30
2.2.4	Beispiele für Datenbanken mit thermophysikalischen Eigenschaften	31
2.2.5	Datenbank-Recherche am Beispiel von DETHERM	32
2.2.6	Messung von thermophysikalischen Daten	35
2.2.7	Neuere Eigenschaften der Stoffklassen Ionische Flüssigkeiten und Hochverzweigte Polymere	36
2.3	Prozesssynthese in der Trenntechnik	38
	<i>Gerhard Schembecker</i>	
2.3.1	Einleitung	38
2.3.2	Aufgabe der Prozesssynthese	38

2.3.3	Methoden der Prozesssynthese in der Industrie	40
2.3.3.1	Evolutionäre Methode	41
2.3.3.2	Hierarchisch-heuristische Methoden	42
2.3.3.3	Mathematische Methoden	44
2.3.4	Synthese von Trennverfahren	46
2.3.4.1	Grundlagen	47
2.3.4.2	Vorgehen bei der heuristisch-numerischen Synthese von Trennprozessen	51
2.3.4.3	Entwurfsmethodik für Trennprozesse	59
2.3.5	Prozesssynthese in der industriellen Praxis	65
2.3.5.1	Management von Prozesssyntheseprojekten	65
2.3.5.2	Informationsbeschaffung und Berücksichtigung von Unsicherheiten	68
2.3.5.3	Vergleichskosten	68
2.3.5.4	Anlagensicherheit, Umweltschutz und Werkstoffe	69
2.3.5.5	Prozesssynthese und Debottlenecking	69
2.3.6	Beispiel für die Anwendung der Methodik zur Synthese von Trennprozessen	70
2.3.6.1	Wesentliche Prozessdaten	70
2.3.6.2	Input-Output-Ebene	71
2.3.6.3	Fließbildentwicklung auf der Aktionen- und Fließbildebene	72
2.3.6.4	Anmerkungen zum Beispiel	82
2.3.7	Ausblick	84
2.4	Methoden und Werkzeuge der Simulationstechnik	86
	<i>Günter Wozny und Helmut Wendeler</i>	
2.4.1	Einteilung der Simulationsverfahrenstechnik	87
2.4.2	Verfahrenstechnische Prozesse	89
2.4.3	Simulation in der Prozessanalyse und Prozesssynthese	92
2.4.4	Modellierungssystematik	93
2.4.5	Physikalisch-chemische Modelle (First-Principle-Modelle)	95
2.4.5.1	Flussgetriebene Simulation	100
2.4.5.2	Druckgetriebene Simulation	101
2.4.6	Rolle der Dokumentation in der Modellentwicklung	102
2.4.7	Prozesssimulation	104
2.4.7.1	Fließschema-Simulation – Grundlagen	104
2.4.7.2	Fließschemasimulation – Strukturen	106
2.4.7.3	Prozesse der Fluidverfahrenstechnik in der Fließschemasimulation	110
2.4.8	Prozessoptimierung in der Fluidverfahrenstechnik	111
2.4.8.1	Stationäre Optimierung	112
2.4.8.2	Dynamische Optimierung unter Einschluss von Unsicherheiten	113
2.4.9	Bedeutung der Stoffdaten in der Prozesssimulation	113
2.4.10	CFD-Simulation in der Fluidverfahrenstechnik	115

- 2.4.11 Anwendungen – Beispiele (1) 116
  - 2.4.11.1 CFD für Mehrphasenströmung 116
  - 2.4.11.2 CFD-Simulation für Packungskolonnen 117
  - 2.4.11.3 Neuere Simulationsergebnisse 118
- 2.4.12 Anwendungen – Beispiele (2) 120
  - 2.4.12.1 Anfahren von Kolonnen 120
  - 2.4.12.2 Batchkolonnen 121
  - 2.4.12.3 Nichtreaktive Destillation 122
  - 2.4.12.4 Reaktivdestillation 123
  - 2.4.12.5 Druckentlastung von Kolonnen 124
  - 2.4.12.6 Automatisierung von Kolonnen 127
  - 2.4.12.7 Operatorschulung 128
  - 2.4.12.8 Reaktivrektifikation, Reaktivabsorption 129
  - 2.4.12.9 Dreiphasenrektifikation 138
  - 2.4.12.10 Energetisch und stofflich gekoppelte Kolonnen 140
  - 2.4.12.11 Herstellung von hochreinem MTBE aus technisch reinem MTBE 142
  - 2.4.12.12 Industrielle Anwendungsbeispiele der Prozesssimulation  
in der Fluidverfahrenstechnik 150
- 2.5 Miniplant-Technik 166
  - Henrik Hahn und Wolfgang Albert*
  - 2.5.1 Hintergrund und Einordnung 166
  - 2.5.2 Merkmale und Anwendungsgrenzen 168
  - 2.5.3 Ausführungsdetails 172
  - 2.5.4 Automatisierungstechnik 174
  - 2.5.5 Praxisbeispiele 180
  - 2.5.6 Neue technologische Ansätze und Methoden 182
- 3 Verfahrenstechnische Grundlagen zu Stoffaustausch  
und Wärmeübertragung 187**
  - 3.1 Stoffaustausch 187
    - Andreas Pfennig*
    - 3.1.1 Einleitung 187
    - 3.1.2 Gleichgewicht 189
      - 3.1.2.1 Phasengrenzen 196
    - 3.1.3 Stofftransport 196
      - 3.1.3.1 Diffusion 197
      - 3.1.3.2 Stoffübergang 199
      - 3.1.3.3 Stoffdurchgang 202
      - 3.1.3.4 Instabilitäten an Phasengrenzen 204
    - 3.1.4 Stufenmodell 206
      - 3.1.4.1 Berücksichtigung von zwei unabhängigen Bilanzgrößen 208
      - 3.1.4.2 Stufenkonstruktion mit einer Bilanzgröße 211
      - 3.1.4.3 Short-Cut-Ansätze mit analytischen Beziehungen  
für das Gleichgewicht 222
      - 3.1.4.4 Stufenmodell bei einer stationären Phase 224

3.1.5	HTU-NTU-Modell	229
3.1.6	Detaillierte Modelle	233
3.2	Wärmeübertragung	238
	<i>Holger Martin</i>	
3.2.1	Begriffe, Grundgesetze	238
3.2.1.1	Wärme, Arbeit, Energiebilanz	238
3.2.1.2	Kinetik der Wärmeübertragung	240
3.2.1.3	Größenordnung von Wärmeströmen	242
3.2.1.4	Größenordnung der wichtigsten Stoffeigenschaften	244
3.2.2	Berechnung von Wärmeübergangskoeffizienten	247
3.2.2.1	Definition des Wärmeübergangskoeffizienten	248
3.2.2.2	Stationäre Wärmeleitung in ruhenden Medien	250
3.2.2.3	Instationäre Wärmeleitung in ruhenden Medien	253
3.2.2.4	Stationär durchströmte Kanäle	256
3.2.2.5	Überströmte Einzelkörper	267
3.2.2.6	Durchströmte Haufwerke	270
3.2.2.7	Freie Auftriebsströmung	275
3.2.2.8	Kondensation und Verdampfung reiner Stoffe und Gemische	277
3.2.3	Zur Auslegung von Wärmeübertragern	283
3.2.3.1	Begriffe	283
3.2.3.2	Wärmedurchgangskoeffizienten	284
3.2.3.3	Temperaturverlauf, mittlerer Temperaturunterschied, Stromführung	285
3.2.3.4	Kennzahlen für Wärmeübertrager	286
3.2.3.5	Wirtschaftlich optimale Auslegung	289
3.2.4	Möglichkeiten zur Verbesserung der Wärmeübertragung	293
3.2.4.1	Vergroßerung der Übertragungsfläche	293
3.2.4.2	Vergroßerung der Wärmeübergangskoeffizienten	296
3.2.4.3	Hinweise	298
<b>4</b>	<b>Adsorption</b>	<b>303</b>
	<i>Dieter Bathen und Jürgen Ciprian</i>	
4.1	Grundlagen	303
4.1.1	Definitionen	303
4.1.2	Physikalische Wechselwirkungsmechanismen	304
4.1.2.1	Bindungskräfte	304
4.1.2.2	Mechanismen	304
4.1.3	Selektivität der Adsorption	305
4.2	Technische Adsorbentien	306
4.2.1	Klassifizierung der Adsorbentien	306
4.2.2	Kohlenstoffhaltige Adsorbentien	307
4.2.2.1	Aktivkohlen und -kokse	307
4.2.2.2	Kohlenstoffmolekularsiebe	309
4.2.2.3	Versottung und Adsorberbrand	309

- 4.2.3 Oxidische Adsorbentien 310
  - 4.2.3.1 Silicagele 310
  - 4.2.3.2 Zeolithe 310
  - 4.2.3.3 Aluminate und Tonerden 312
- 4.2.4 Polymere Adsorbentien 314
- 4.2.5 Einsatzgebiete der Adsorbentien 315
- 4.3 Thermodynamik der Adsorption 317
  - 4.3.1 Grundlagen 317
    - 4.3.1.1 Darstellung des Adsorptionsgleichgewichts 317
    - 4.3.1.2 Temperatur- und Druckeinfluss 317
    - 4.3.1.3 Kapillarkondensation 318
  - 4.3.2 Einkomponentenadsorption 319
    - 4.3.2.1 Klassifizierung von Isothermen 319
    - 4.3.2.2 Mathematische Beschreibung von Adsorptionsisothermen 320
    - 4.3.2.3 Messverfahren für Einkomponenten-Adsorptionsgleichgewichte 323
  - 4.3.3 Mehrkomponentenadsorption 326
    - 4.3.3.1 Phänomene der Mehrkomponentenadsorption 326
    - 4.3.3.2 Messverfahren für Mehrkomponenten-Adsorptionsgleichgewichte 328
  - 4.3.4 Adsorptionswärme 329
- 4.4 Adsorptionskinetik und Adsorptionsdynamik 330
  - 4.4.1 Adsorptionskinetik 330
    - 4.4.1.1 Beschreibung der Phänomene 330
    - 4.4.1.2 Heterogene Modelle 332
    - 4.4.1.3 LDF-Ansatz (Homogenes Modell) 337
    - 4.4.1.4 Kinetik von Mehrkomponentenprozessen 337
  - 4.4.2 Adsorptionsdynamik 338
    - 4.4.2.1 Durchbruchskurve 338
    - 4.4.2.2 Einfluss der Thermodynamik 339
    - 4.4.2.3 Einfluss der Kinetik 340
    - 4.4.2.4 Mehrkomponentenadsorption 341
- 4.5 Desorption und Regenerierung 341
  - 4.5.1 Desorption 341
    - 4.5.1.1 Druckwechseldesorption (PSA) 342
    - 4.5.1.2 Temperaturwechseldesorption (TSA) 344
    - 4.5.1.3 Konzentrationswechseldesorption (CSA) 349
  - 4.5.2 Reaktivierung und Deponierung 350
    - 4.5.2.1 Reaktivierung 350
    - 4.5.2.2 Deponierung 354
- 4.6 Apparate und Verfahren 354
  - 4.6.1 Gasphasenadsorption 354
    - 4.6.1.1 Apparate 354
    - 4.6.1.2 Verfahren 356
    - 4.6.1.3 Auslegung 364
    - 4.6.1.4 Kosten 367

- 4.6.2 Flüssigphasenadsorption 369
  - 4.6.2.1 Apparate 369
  - 4.6.2.2 Verfahren 369
  - 4.6.2.3 Auslegung 373
  - 4.6.2.4 Kosten 375
- 4.6.3 Computergestützte Simulation von Adsorptionsprozessen 375

## 5 Chromatographie 381

*Jochen Strube, Michael Schulte und Wolfgang Arlt*

- 5.1 Nomenklatur chromatographischer Verfahren 381
  - 5.1.1 Verfahrensvarianten 382
  - 5.1.2 Stand der Technik 384
    - 5.1.2.1 Großtechnische Chromatographieprozesse 384
    - 5.1.2.2 Chromatographie in Pharma- und Feinchemieanwendungen 385
    - 5.1.2.3 Chromatographie in biotechnologischen Produktionen 388
    - 5.1.2.4 Weitere Entwicklungen und Forschungsansätze 390
- 5.2 Grundlagen 391
  - 5.2.1 Thermodynamik der Adsorption 391
    - 5.2.1.1 Begriffe 391
    - 5.2.1.2 Adsorptionsisothermen 391
    - 5.2.1.3 Adsorptionsexzess 393
    - 5.2.1.4 Adsorptionswärmen 394
  - 5.2.2 Phasenauswahl und Methodenentwicklung 394
    - 5.2.2.1 Adsorbentien 394
    - 5.2.2.2 Mobile Phase 399
  - 5.2.3 Charakteristische Parameter der Chromatographie 401
    - 5.2.3.1 Retentionszeit 401
    - 5.2.3.2 Porosität 402
    - 5.2.3.3 Trennfaktor 403
    - 5.2.3.4 Säulentotvolumina 403
    - 5.2.3.5 Volumenstromraten 405
    - 5.2.3.6 Effektiver Dispersionskoeffizient 405
    - 5.2.3.7 Stoffaustausch 406
    - 5.2.3.8 Van Deemter Gleichung 407
  - 5.2.4 Modellierungsansätze des Stofftransportes 408
    - 5.2.4.1 Modellierung von Extrasäuleneffekten 408
    - 5.2.4.2 Modellierung der Chromatographiesäule 409
  - 5.2.5 Trennsequenzentwicklung 411
- 5.3 Verfahrensentwicklung 414
  - 5.3.1 Methodenentwicklung 414
  - 5.3.2 Modellparameterbestimmung 425
    - 5.3.2.1 Einleitende Versuche zur Auslegung präparativer Chromatographieprozesse 431
    - 5.3.2.2 Zu messende Parameter 431

- 5.3.3 Prozesskonzepte 436
  - 5.3.3.1 Generelle Prozesseigenschaften 436
  - 5.3.3.2 Prozesskonzepte 438
  - 5.3.3.3 Integrierte Prozessentwicklung 443
- 5.3.4 Auslegung und Optimierung chromatographischer Verfahren 448
  - 5.3.4.1 Grundsätzliche Überlegungen und Methoden 448
  - 5.3.4.2 Optimierungsansätze 449
  - 5.3.4.3 Auslegung von SMB-Prozessen 453
- 5.4 Beispiel zur Auslegung und Optimierung von Batch- und SMB-Chromatographie 463
  - 5.4.1 Beispiel zur Optimierung von Batch-Elutionschromatographie-Prozessen 463
  - 5.4.2 Auslegungssoftware 465
  - 5.4.3 Auslegung von SMB-Prozessen am Beispiel EMD 53986 467
- 5.5 Apparate- und Anlagentechnik 472
  - 5.5.1 Anlagenbeschreibung 473
    - 5.5.1.1 Säulen und Peripherie 474
  - 5.5.2 Reinigung, Lösemittelrecycling und Produktkonfektionierung 479
  - 5.5.3 Fehlersuche 479
    - 5.5.3.1 Auswirkung von Fehlern in chromatographischen Säulen 480
- 5.6 Spezifische Trennkosten der Prozesschromatographie 483
- 5.7 Ausblick 489
  
- 6 Membrantechnik 495**  
*Hartmut Brüscke und Thomas Melin*
  - 6.1 Einführung 495
    - 6.1.1 Gleichgewichtstrennung – Membrantrennung 496
      - 6.1.1.1 Trennung durch Einstellung eines Gleichgewichts 496
      - 6.1.1.2 Trennung aufgrund unterschiedlicher Transportkinetiken 497
    - 6.1.2 Definition einer Membran 498
    - 6.1.3 Technische Membranen 500
  - 6.2 Membranen 501
    - 6.2.1 Aufbau 502
    - 6.2.2 Polymermembranen 503
      - 6.2.2.1 Herstellung von porösen Filmen 503
      - 6.2.2.2 Phaseninversionsmembranen 505
      - 6.2.2.3 Integral-asymmetrisch dichte Membranen 508
      - 6.2.2.4 Kompositmembranen 509
    - 6.2.3 Anorganische Membranen 510
      - 6.2.3.1 Herstellung anorganischer Membranen 511
      - 6.2.3.2 Asymmetrische anorganische Membranen 512
    - 6.2.4 Module 515
      - 6.2.4.1 Plattenmodul 515
      - 6.2.4.2 Spiralwickelmodul 516
      - 6.2.4.3 Kissenmodul 519

6.2.4.4	Module mit tubularen Membranen	519
6.2.4.5	Getauchte Module	521
6.3	Stofftransport	522
6.3.1	Triebkräfte und Transportwiderstände	522
6.3.2	Modellierung des Stofftransports durch Membranen	525
6.3.2.1	Porenmodell	527
6.3.2.2	Lösungs-Diffusions-Modell	529
6.3.2.3	Stofftransport durch mikroporöse Membranen	532
6.3.3	Polarisation	534
6.4	Verfahren und Anlagen	539
6.4.1	Mikrofiltration, Ultrafiltration	539
6.4.1.1	Membranen und Module	540
6.4.1.2	Prozessführung	541
6.4.1.3	Verfahren und Anwendungen	544
6.4.2	Umkehrosmose	545
6.4.2.1	Membranen	546
6.4.2.2	Osmotischer Druck	547
6.4.2.3	Scaling und Fouling	549
6.4.2.4	Module und Anlagen	550
6.4.2.5	Verfahren und Anwendungen	552
6.4.3	Nanofiltration	552
6.4.3.1	Membranen, Donnan-Effekt	553
6.4.3.2	Verfahren und Anwendungen	554
6.4.4	Elektrodialyse	555
6.4.4.1	Grundlagen	555
6.4.4.2	Membranen	556
6.4.4.3	Module	557
6.4.4.4	Verfahren und Anwendung	558
6.4.5	Gastrengung	559
6.4.5.1	Membranen	560
6.4.5.2	Module	561
6.4.5.3	Verfahren und Anwendung	561
6.4.6	Pervaporation, Dampfpermeation	563
6.4.6.1	Membranen	564
6.4.6.2	Module	566
6.4.6.3	Auslegung	566
6.4.6.4	Verfahren und Anwendungen	571
6.5	Kosten	573
6.5.1	Investitionskosten	574
6.5.2	Betriebskosten	576
6.5.3	Spezifische Kosten	577



<b>7</b>	<b>Verdampfung und Kondensation</b>	<b>581</b>
	<i>Stephan Scholl und Michael Rinner</i>	
7.1	Einführung und Einordnung	581
7.2	Grundlagen	584
7.2.1	Wärmeübertragung in Verdampfern und Kondensatoren	584
7.2.1.1	Wärmeübergang und Fluidodynamik in Rieselfilmen	584
7.2.1.2	Wärmeübergang an Platten oder Rohrwänden ohne Phasenänderung	588
7.2.2	Grundlagen zur Verdampfung	592
7.2.2.1	Verdampfung ruhender Flüssigkeiten	593
7.2.2.2	Verdampfung in erzwungener Strömung	596
7.2.2.3	Zustandsänderung eines verdampfenden Gemisches	598
7.2.3	Grundlagen zur Kondensation	599
7.2.3.1	Film- und Tropfenkondensation	599
7.2.3.2	Filmkondensation von Reinstoffen	600
7.2.3.3	Filmkondensation von binären Gemischen	603
7.2.3.4	Lokale Grenzfälle: Gleichgewichts- und Brutalkondensation	605
7.2.3.5	Offene und geschlossene Kondensation, Teil- und Totalkondensation	607
7.2.3.6	Einfluss von Inertgasen	607
7.3	Verdampfung und Verdampfer	609
7.3.1	Voruntersuchungen zum Gleichgewichts- und Verdampfungsverhalten	609
7.3.2	Verdampferbauformen	612
7.3.2.1	Aufkocher	613
7.3.2.2	Naturumlaufverdampfer	614
7.3.2.3	Zwangsumlaufverdampfer	623
7.3.2.4	Zwangsumlaufentspannungsverdampfer	624
7.3.2.5	Fallfilmverdampfer	627
7.3.2.6	Dünnschichtverdampfer	637
7.3.2.7	Kurzwegverdampfer	643
7.3.2.8	Kletterfilmverdampfer	644
7.3.2.9	Rotationskegelverdampfer	645
7.3.2.10	Mehrphasenwendelrohr	647
7.3.3	Bereitstellung des Wärmeangebotes	648
7.3.4	Verdampfung thermisch und/oder mechanisch sensibler Produkte	651
7.3.5	Regelung von Verdampfern	653
7.3.6	Maßstabübertragung bei Verdampfern	657
7.3.7	Hinweise zur Apparatewahl bei Verdampfern	658
7.3.8	Typische Verfahrensaufgaben für Verdampfer	660
7.4	Kondensation und Kondensatoren	666
7.4.1	Übersicht Bauformen und Einsatzzweck	666

7.4.2	Rohrbündelkondensatoren	667
7.4.2.1	Rohrbündelapparate mit Kondensation im Mantelraum	667
7.4.2.2	Rohrbündelapparate mit Kondensation in den Rohren	669
7.4.3	Plattenkondensatoren	671
7.4.3.1	Apparate mit geprägten Platten	671
7.4.3.2	Thermoblechkondensatoren	673
7.4.4	Überschlägige Dimensionierung eines Kondensators	675
7.4.5	Kosten	676
7.4.6	Gegenüberstellung von Kondensatorbauformen	678
7.4.7	Scale-down und Scale-up bei der Kondensation	678
7.4.7.1	Kondensationstechnik im Labor	678
7.4.7.2	Machbarkeitsversuche und Scale-up	680
7.4.8	Mehrstufige Kondensation	680
7.5	Software zur thermischen Auslegung von Verdampfern und Kondensatoren	681
<b>8</b>	<b>Rektifikation</b>	<b>689</b>
	<i>Ralf Düssel und Johann Stichlmair</i>	
8.1	Einführung	689
8.2	Phasengleichgewicht	690
8.2.1	Siedepunkt, Taupunkt	691
8.2.2	Gleichgewicht binärer Gemische	693
8.2.3	Gleichgewicht ternärer Gemische	696
8.3	Destillation, Rektifikation	700
8.3.1	Einstufige Destillation	700
8.3.1.1	Kontinuierliche Destillation	700
8.3.1.2	Batch-Destillation	701
8.3.1.3	Batch-Destillation ternärer Gemische	702
8.3.2	Mehrstufige Destillation, Rektifikation	703
8.3.3	Kontinuierliche Rektifikation	705
8.3.3.1	Rektifikation binärer Gemische	705
8.3.3.2	Rektifikation ternärer Gemische	712
8.3.3.3	Rektifikation von Vielstoffgemischen	719
8.3.4	Batch-Rektifikation	721
8.3.4.1	Batch-Rektifikation binärer Gemische	722
8.3.4.2	Batch-Rektifikation ternärer Gemische	725
8.3.5	Reaktivrektifikation	727
8.4	Rektifikationsprozesse	729
8.4.1	Prozesse zur Zerlegung idealer Dreistoffgemische	729
8.4.1.1	Basisprozesse	729
8.4.1.2	Seitenkolonnen	731
8.4.1.3	Thermische Kopplung	735
8.4.2	Prozesse zur Zerlegung azeotroper Gemische	737
8.4.2.1	Prozesse zur Zerlegung von Heteroazeotropen	738
8.4.2.2	Druckwechselrektifikation	739

- 8.4.2.3 Zerlegung azeotroper Gemische unter Verwendung eines Entrainers 740
- 8.4.2.4 Azeotroprektifikation 743
- 8.4.2.5 Extraktivrektifikation 744
- 8.4.3 Prozesse der Reaktivrektifikation 746
- 8.5 Gestaltung und Dimensionierung von Rektifikationskolonnen 748
  - 8.5.1 Kolonneneinbauten 748
    - 8.5.1.1 Bodenkolonnen 748
    - 8.5.1.2 Packungskolonnen 752
  - 8.5.2 Auslegungskriterien 757
    - 8.5.2.1 Gasbelastung 758
    - 8.5.2.2 Flüssigkeitsbelastung 762
    - 8.5.2.3 Stoffübergang und Trennleistung 764
    - 8.5.2.4 Druckverlust und Flüssigkeitsinhalt (Hold-up) 768
    - 8.5.2.5 Fouling 770
    - 8.5.2.6 Fehlverteilung 771
    - 8.5.2.7 Schaumbildung 773
    - 8.5.2.8 Mehrphasige Systeme 773
  - 8.5.3 Auslegungssoftware 773
  - 8.5.4 Scale-Up 774
- 8.6 Kostenrechnung 778
  - 8.6.1 Investitionskosten 778
  - 8.6.2 Energiekosten 780
- 8.7 Regelung 781
 

*Verfasst von Herrn Dr. M. Groebel, Degussa AG.*

  - 8.7.1 Stellgrößen von Destillationskolonnen 781
  - 8.7.2 Basisregelungen 782
  - 8.7.3 Produktregelung 783
    - 8.7.3.1 Temperatur als Ersatzregelgröße 783
    - 8.7.3.2 Wahl der Stellgröße 784
    - 8.7.3.3 Prozessführung ohne ausgeprägtes Temperaturprofil 785
- 8.8 Troubleshooting 786
  
- 9 Absorption 799**

*Karl Hölemann und Andrzej Górak*

  - 9.1 Einführung 799
  - 9.2 Stoffdatenbasis 804
    - 9.2.1 Gaslöslichkeit, Henry'sches Gesetz 804
    - 9.2.2 Elektrolytthermodynamik 807
    - 9.2.3 Physikalische Stoffdaten 808
    - 9.2.4 Chemische Gleichgewichte 808
  - 9.3 Berechnungsmethoden für Absorber 809
    - 9.3.1 Gleichgewichtsmodell 809
    - 9.3.2 Kinetische Stofftransportansätze 815
    - 9.3.3 HTU-NTU-Konzept 816

9.3.4	Reaktionskinetik und Enhancement-Faktor	820
9.3.5	Hydrodynamik und Stofftransport	822
9.3.6	Rigore Simulationenmodelle	828
9.4	Auswahl und Auslegung von Absorbern	829
9.4.1	Kontinuierliche Gas- und Flüssigphase	831
9.4.1.1	Füllkörper- und Packungskolonnen	831
9.4.1.2	Fallfilmabsorber	835
9.4.2	Dispergierung des Flüssigstroms	839
9.4.2.1	Austauschfläche im Sprühwäscher	840
9.4.2.2	Stoffübergangskoeffizient	846
9.4.2.3	Sprühabsorber	849
9.4.2.4	Strahlwäscher	852
9.4.2.5	Venturiwäscher	853
9.4.2.6	Rotationswäscher	854
9.4.3	Dispergierung der Gasphase	855
9.4.3.1	Bodenkolonnen	855
9.4.3.2	Blasensäulen	856
9.5	Direkte Gaskühlung	857
9.5.1	Simulation eines Direktgaskühlers	858
9.5.1.1	Rieselfilmapparate	862
9.5.1.2	Sprühapparate	863
9.6	Anwendungsbeispiele	868
9.6.1	Physikalische Absorption	868
9.6.2	Absorption von Halogenwasserstoffen	871
9.6.3	NO <sub>x</sub> -Absorption	875
9.6.4	Kokereigasreinigung	877
9.6.5	CO <sub>2</sub> -Absorption mit wässrigen Aminlösungen	882
9.7	Vergleich und Kosten verschiedener Absorber	884
9.7.1	Absorption von SO <sub>2</sub> in alkalischer Waschlösung	886
9.7.2	Produktion konzentrierter HCl aus einem Abgasstrom	891
<b>10</b>	<b>Flüssig-Flüssig-Extraktion</b>	<b>907</b>
	<i>Andreas Pfennig, Theo Pilhofer<sup>†</sup> und Jürgen Schröter</i>	
10.1	Einleitung	907
10.2	Erarbeitung der Aufgabenstellung	912
10.3	Apparate für die Flüssig-Flüssig-Extraktion	918
10.3.1	Kolonnen	919
10.3.1.1	Kolonnen ohne Energiezufuhr	919
10.3.1.2	Kolonnen mit Energiezufuhr	922
10.3.2	Mixer-Settler	928
10.3.3	Extraktionsmaschinen	930
10.3.4	Empfehlungen für die Anwendung der verschiedenen Extraktorbauarten	930
10.4	Einschränkung der Bauarten für typische Extraktionsaufgaben	937

- 10.5    Versuche und Modellierung von Extraktoren im  
          Technikumsmaßstab   942
- 10.5.1   Technikumsversuche als Basis für den Scale-up   942
- 10.5.2    Einzeltropfenbasierte Methode   945
- 10.5.2.1   Labormesszellen   945
- 10.5.2.2   Lösung der Tropfenpopulationsbilanzen   953
- 10.5.2.3   Auswahl des Apparats   958
- 10.6    Wahl des optimalen Betriebspunkts   958
- 10.7    Auslegung technischer Extraktionsapparate   962
- 10.7.1    Auslegung von Mixer-Settlern   964
- 10.7.2    Auslegung von gerührten Extraktionskolonnen   968
- 10.7.3    Auslegung von pulsierten Siebbodenkolonnen   973
- 10.7.4    Auslegung von pulsierten Kolonnen mit geordneten Packungen   973
- 10.7.5    Auslegung der Dispersphasenverteiler   974
- 10.7.6    Probleme bei Auslegung und Betrieb von Extraktionsapparaten   976
- 10.7.7    Ökonomische Aspekte der Kolonnenauslegung   978
  
- 11    Trennverfahren mit überkritischen Fluiden   993**
- 11.1    Grundlagen, Thermodynamik, Trenntechnik   993  
          *Gerd Brunner*
- 11.1.1    Einführung   993
- 11.1.1.1   Was ist ein überkritisches Fluid?   993
- 11.1.1.2   Die Dichte eines reinen Stoffs in der Nähe des kritischen Punkts   996
- 11.1.2    Trennverfahren mit überkritischen Fluiden   997
- 11.1.2.1   Übersicht zu den Trennverfahren   997
- 11.1.2.2   Stand der Entwicklung   1000
- 11.1.3    Extraktion aus Feststoffen   1001
- 11.1.3.1   Verfahrensauslegung   1003
- 11.1.3.2   Der Einfluss der Betriebsbedingungen   1004
- 11.1.3.3   Modellieren der Extraktion   1008
- 11.1.3.4   Laboranlagen zur Feststoffextraktion   1012
- 11.1.3.5   Andere Verfahrensweisen zur Extraktion  
          (insbesondere mehrstufige Extraktion, Gegenstromextraktion  
          und kontinuierliche Extraktion mit Feststoffen)   1013
- 11.1.3.6   Weitere Beispiele zur Feststoffextraktion   1014
- 11.1.4    Mehrstufen-Gegenstromextraktion   1016
- 11.1.4.1   Auslegungsmethode   1017
- 11.1.4.2   Phasengleichgewichte als Grundlage der  
          Mehrstufen-Gegenstromextraktion   1019
- 11.1.4.3   Trenntechnische Analyse bezüglich der Anzahl  
          der theoretischen Trennstufen   1020
- 11.1.4.4   Mehrkomponenten-Prozesssimulation   1022
- 11.1.4.5   Höhe einer Trennstufe (HETP, HTU)   1023
- 11.1.4.6   Bestimmung des Kolonnendurchmessers   1024
- 11.1.4.7   Filmdicke, Strömungsformen und Flutpunkte   1026

- 11.1.4.8 Laboranlage für die Gegenstromtrennung 1029
- 11.1.4.9 Beispiele zur Mehrstufengegenstromtrennung 1031
- 11.1.5 Chromatographische Trennungen mit überkritischen Fluiden (SFC) einschließlich der Adsorption und Desorption 1033
  - 11.1.5.1 Allgemeine Überlegungen (Brunner 1994) 1033
  - 11.1.5.2 Chromatographie mit überkritischen Fluiden (SFC) im präparativen und Produktionsmaßstab 1035
  - 11.1.5.3 Allgemeine Beschreibung einer SFC-Apparatur 1037
- 11.1.6 Phasengleichgewichte flüssiger und fester Stoffe mit überkritischen Fluiden 1038
  - 11.1.6.1 Wozu werden Phasengleichgewichte benötigt? 1038
  - 11.1.6.2 Löslichkeit in überkritischen Fluiden 1040
  - 11.1.6.3 Phasengleichgewicht in binären Systemen 1043
  - 11.1.6.4 Phasengleichgewichte in Systemen mit drei Komponenten 1051
  - 11.1.6.5 Gleichgewichte mit festen Substraten 1054
- 11.1.7 Lösungsmittelkreislauf 1058
  - 11.1.7.1 Charakteristische Daten für Lösungsmittelkreisläufe 1058
  - 11.1.7.2 Gaskreislauf im Kompressorverfahren (Brunner 1994) 1060
  - 11.1.7.3 Lösungsmittelkreislauf mit Pumpe (Brunner 1994) 1062
  - 11.1.7.4 Regeneration mit einem Membrantrennprozess 1065
- 11.1.8 Produktabscheidung (Regenerierung eines beladenen überkritischen Fluids) 1066
  - 11.1.8.1 Methoden zur Produktabscheidung 1066
  - 11.1.8.2 Abscheidung von flüchtigen Substanzen 1069
  - 11.1.8.3 Regenerierung des Lösungsmittels durch Adsorption 1070
  - 11.1.8.4 Regenerierung des überkritischen Fluids durch Membrantrennung 1071
- 11.2 Überkritische Extraktion – aus Sicht der Industrie 1074
 

*Stephan Pilz, Eduard Lack, Helmut Seidlitz, Volkmar Steinhagen und Kurt Stork*

  - 11.2.1 Einführung – Stand der Technik 1074
  - 11.2.2 Verfahrensführung einer SFE-Anlage 1077
  - 11.2.3 Verfahrensauslegung 1082
    - 11.2.3.1 Produkt- und anlagenspezifische Daten 1082
  - 11.2.4 Versuchsanlagen und Versuchsdurchführungen 1096
  - 11.2.5 Projektierung einer kommerziellen SFE-Anlage 1102
  - 11.2.6 Betrieb von SFE-Anlagen – Betreibersicht 1116
  - 11.2.7 Kosten 1123
  - 11.2.8 Ausblick – Entwicklungstendenzen 1125
- 12 Schmelzkristallisation 1131**

*Joachim Ulrich und Stefan Nordhoff*

  - 12.1 Einleitung 1131
  - 12.2 Grundlagen 1132
    - 12.2.1 Definitionen 1132
      - 12.2.1.1 Lösung/Schmelze 1132

- 12.2.1.2 Suspensions-/Schichtkristallisation 1133
- 12.2.1.3 Prozessführung statisch/dynamisch 1137
- 12.2.2 Phasengleichgewichte 1138
  - 12.2.2.1 Experimentelle Bestimmung 1143
  - 12.2.2.2 Berechnung 1144
- 12.2.3 Kinetik 1145
  - 12.2.3.1 Bedeutung der Kinetik bei der Schmelzkristallisation 1145
  - 12.2.3.2 Reinheitskriterien 1147
- 12.2.4 Nachreinigungsschritte 1151
  - 12.2.4.1 Schwitzen 1152
  - 12.2.4.2 Waschen 1155
- 12.2.5 Einfache Laboruntersuchungen 1158
  - 12.2.5.1 Flaschentest (bottle test) 1158
  - 12.2.5.2 Kühlfingerexperiment 1158
- 12.3 Verfahrensauswahl 1161
  - 12.3.1 Anlagentyp 1161
    - 12.3.1.1 Schichtkristallisationsprozesse 1162
    - 12.3.1.2 Suspensionskristallisationsprozesse 1165
    - 12.3.1.3 Vergleich von Schicht- und Suspensionskristallisation 1175
  - 12.3.2 Auslegung/Scale-up-Regeln 1176
    - 12.3.2.1 Auslegung von Schichtkristallisationsanlagen 1176
    - 12.3.2.2 Energiebedarf für Schichtkristallisationsprozesse 1177
    - 12.3.2.3 Vorgehensweise bei der Auslegung 1179
    - 12.3.2.4 Scale-up 1179
  - 12.3.3 Investitions- und Betriebskosten 1179
  - 12.3.4 Hybridverfahren 1181
- 12.4 Ausgewählte Anwendungsbeispiele 1182
  - 12.4.1 Wasserstoffperoxid 1182
  - 12.4.2 Acrylsäure 1183
  - 12.4.3 Fette 1184
  - 12.4.4 Abwasser 1184
- 12.5 Konzepte für die Zukunft 1186
  - 12.5.1 Breiband 1187
  - 12.5.2 Granupure 1187
  - 12.5.3 Waschkolonnen 1188
  - 12.5.4 Eutectic Freezing 1188
  - 12.5.5 Verschiebung des Eutektikums 1189

**Sachverzeichnis** 1197

