

Inhaltsverzeichnis

Vorwort *XVII*

Autorenliste *XIX*

1	Polymermembranen	1
	<i>Klaus-Viktor Peinemann und Suzana Pereira Nunes</i>	
1.1	Einführung	1
1.2	Phaseninversions-Prozess zur Herstellung von Membranen	3
1.3	Membranen für die Umkehrosmose	8
1.4	Membranen für die Ultrafiltration	11
1.4.1	Polysulfone und Polyethersulfone	11
1.4.2	Polyvinylidenfluorid (PVDF)	12
1.4.3	Polyetherimid	13
1.4.4	Polyacrylnitril	14
1.4.5	Cellulose	15
1.5	Membranen für die Mikrofiltration	16
1.5.1	Polypropylen und Polytetrafluorethylen	16
1.5.2	Polycarbonat und Polyethylenterephthalat	18
1.6	Literatur	18
2	Molekulare Modellierung des Transports kleiner Moleküle in polymerbasierten Materialien	23
	<i>Dieter Hofmann und Matthias Heuchel</i>	
2.1	Einleitung	23
2.2	Grundlagen von MD Methoden für amorphe Polymere	25
2.3	Ausgewählte Anwendungen von atomistischen Simulationen	29
2.3.1	Verwendete Hard- und Software	29
2.3.2	Beispiele für die Anwendung von Bulkmodellen für amorphe Polymere	29
2.3.2.1	Validierung von Packungsmodellen	29
2.3.2.2	Freies Volumen und Transportprozesse in amorphen Polymeren	34

2.3.2.3	Einfluss von Unterschieden in der Polymerdynamik auf das Permeationsverhalten gummi- und glasartiger Polymere	38
2.3.3	Beispiele für die Anwendung von Grenzflächenmodellen für amorphe Polymere	39
2.3.3.1	Polymere in Kontakt mit wässrigen Feedlösungen	39
2.4	Zusammenfassung	43
2.5	Danksagung	43
2.6	Literatur	44
3	Oberflächenmodifikationen	47
	<i>Mathias Ulbricht</i>	
3.1	Einführung – Oberflächen von Membranen	47
3.2	Motivation und Ziele für Oberflächenmodifikationen von Membranen	49
3.3	Strategien und Wege zur Oberflächenmodifikation von Membranen	51
3.3.1	Anforderungen	51
3.3.2	Grenzschichtchemie, -architektur und -morphologie, Oberflächenbedeckung	52
3.3.3	Wege zu oberflächenmodifizierten Membranen	55
3.3.3.1	Modifikation des Membranmaterials	55
3.3.3.2	Grenzflächenchemisch kontrollierte Modifikationen	55
3.3.3.2.1	Molekulare Schichten	56
3.3.3.2.2	Chemische Reaktionen am Basismaterial	58
3.3.3.2.3	Auf dem Basismaterial aufbauende Funktionalisierungen – Pfpfreaktionen zur Einführung makromolekularer funktionaler Einheiten	60
3.3.3.3	Beschichtungen	63
3.3.3.4	Mehrstufige Oberflächenmodifikationen	64
3.4	Struktur und Funktion oberflächenmodifizierter Membranen	66
3.4.1	Minimierung von Membranfouling	66
3.4.2	Biokompatibilität	67
3.4.3	Verbesserte oder neue Selektivität durch kombinierte Trennmechanismen	68
3.4.3.1	Erhöhung des Rückhaltes der Membran	69
3.4.3.2	Erhöhung der Triebkraft für den Membrantransport	70
3.4.4	Membranadsorber	70
3.4.5	Katalytisch aktive Membranen	71
3.4.6	Kommerzielle oberflächenmodifizierte Membranen	72
3.5	Schlussfolgerungen und Ausblick	73
3.6	Abkürzungen für Polymere	73
3.7	Literatur	74

4	Vliesstoffe für Membranen	77
	<i>Thomas Beeskow</i>	
4.1	Einführung	77
4.2	Vliesstoffe	79
4.2.1	Herstellungsprozesse	79
4.2.1.1	Bildung des Flächengebildes	79
4.2.1.2	Verfestigung des Flächengebildes	83
4.2.1.3	Optionale abschließende Behandlung des Flächengebildes	85
4.2.2	Aufrollung	85
4.2.3	Rohstoffe für die Vliesstoffherstellung	86
4.3	Stützvliesstoffe für Membranen	87
4.3.1	Beschichtungsträger mit direkter Membranverankerung	87
4.3.1.1	Gleichmäßigkeit	91
4.3.1.2	Defektfreiheit und Fasereinbindung	92
4.3.1.3	Haftung auf Vliesstoffen	93
4.3.1.4	Chemikalien- und Temperaturstabilität sowie mechanische Stabilität	95
4.3.1.5	Einfluss von Umrollung und Konfektionierung	96
4.3.1.6	Filtrationsproduktrelevante Bestimmungen für Stützvliesstoffe	97
4.3.1.7	Beschichtungsträger und Membranleistung	97
4.3.2	Stütz- und Drainageschichten	98
4.3.2.1	Gleichmäßigkeit, Defektfreiheit und Fasereinbindung	99
4.4	Ausblick	100
4.5	Literatur	101
5	Keramische Membranen und Hohlfasern	103
	<i>Ingolf Voigt und Stefan Tudyka</i>	
5.1	Keramische Membranen	103
	<i>Ingolf Voigt</i>	
5.1.1	Einleitung	103
5.1.1.1	Historie der keramischen Membranen	104
5.1.1.2	Aufbau keramischer Membranen	104
5.1.2	Poröse keramische Träger (Supporte)	106
5.1.2.1	Rohrförmige poröse keramische Träger	107
5.1.2.2	Platten- und scheibenförmige poröse keramische Träger	109
5.1.3	Membranen	110
5.1.3.1	Makro- und mesoporöse Membranen	110
5.1.3.2	Mikroporöse Membranen	114
5.1.3.3	Dichte Membranen	120
5.1.4	Module	122
5.1.4.1	Rohrmodule	122
5.1.4.2	Plattenmodule	123
5.1.4.3	Rotationsfilter	124

5.1.5	Trends 125
5.1.5.1	Kapillaren und Hohlfasern 125
5.1.5.2	Kompositmembranen 126
5.1.5.3	Mikrofabrikation 127
5.1.6	Literatur 128
5.2	Keramische Hohlfasern 129 <i>Stefan Tudyka</i>
5.2.1	Einführung 129
5.2.1.1	Markt 129
5.2.1.2	Membrangeometrien 130
5.2.2	Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten 131
5.2.2.1	Angrenzende Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten 133
5.2.3	Hohlfaserherstellung 134
5.2.3.1	Lyocell-/Alceruverfahren 135
5.2.3.2	Polysulfonverfahren 135
5.2.3.3	Spinnprozess und Hohlfasergeometrie 137
5.2.3.4	Formgebung 139
5.2.3.5	Trocknen 139
5.2.3.6	Sintern 139
5.2.4	Charakterisierung 140
5.2.4.1	Morphologie und Geometrie 140
5.2.4.2	Biegebruchspannung 140
5.2.4.3	Vibrationsbeständigkeit 141
5.2.4.4	Berstdruck 141
5.2.4.5	Wasserpermeation 141
5.2.5	Beschichtung 142
5.2.6	Modultechnik 143
5.2.6.1	Schleuderpotten und Standpotten 144
5.2.7	Literatur 145
6	Medizintechnik 147 <i>Bernd Krause, Hermann Göhl und Frank Wiese</i>
6.1	Einleitung 147
6.2	Nierenersatztherapie 148
6.2.1	Membranen in der Nierenersatztherapie 149
6.2.2	Struktureigenschaften von Dialysemembranen 151
6.2.3	Transporteigenschaften von Dialysemembranen 154
6.2.4	Hämokompatibilität von Dialysemembranen 156
6.2.5	Betriebsarten in der Nierenersatztherapie 157
6.2.6	Ultrafiltrationsmembranen zur Dialysat- und Infusat-Aufbereitung 159
6.3	Blutfraktionierung 160
6.3.1	Therapeutische Plasmapherese 161

6.3.2	Plasmafraktionierung	167
6.3.3	Adsorptive Plasmareinigung	169
6.4	Blutoxygenation	170
6.4.1	Prinzip des Gastransportes	171
6.4.2	Membranen/Membraneigenschaften	172
6.4.3	Herstellung von Oxygenationsmembranen	174
6.4.4	Betriebsweisen und Membrananordnung im Oxygenator	177
6.4.5	Die extrakorporale Zirkulation	179
6.5	Großtechnische Herstellung von Membranen und Filtern in der Medizintechnik	180
6.5.1	Membranherstellung	181
6.5.2	Dialysatormontage	183
6.5.3	Integritätstest und Qualitätskontrolle	186
6.5.4	Sterilisation	186
6.6	Literatur	187

7 Membranen für biotechnologische Prozesse 189

Ina Pahl, Dieter Melzner und Oscar-W. Reif

7.1	Einführung: Biotechnologische Herstellung von Wirkstoffen – Fermentation	189
7.2	Filtrationsverfahren	189
7.2.1	Statische Filtration	189
7.2.2	Dynamische Filtration	191
7.3	Membrantypen	192
7.3.1	Porengrößen	194
7.3.2	Filterformen	196
7.3.3	Qualitativer Überblick der Modultypen	197
7.4	Ultrafiltration	197
7.5	Adsorptionseffekte	198
7.6	Membranreinigung	199
7.7	Betriebsarten in der Ultrafiltration	200
7.8	Durchfluss	201
7.9	Membrancharakterisierung	201
7.9.1	Rasterelektronenmikroskopie	203
7.9.2	Bubble-Point-Test	203
7.9.3	Permeabilitätsmessungen	205
7.10	Anwendungen der Mikrofiltration	205
7.10.1	Anwendungsbeispiel Filtervalidierung	205
7.10.2	Virenentfernung	206
7.10.3	Beispiel für Cross-Flow	206
7.11	Membranchromatografie	208
7.11.1	Einführung	208
7.11.2	Anwendungen	213
7.11.3	Anwendungsbeispiel der Affinitätschromatografie	213

7.11.4	Ausblick für Membranadsorber	215
7.12	Literatur	215
8	Wasseraufbereitung	217
	<i>Jens Lipnizki, Ulrich Meyer-Blumenroth, Torsten Hackner, Eugen Reinhartd und Pasi Nurminen</i>	
8.1	Wasserkreisläufe – Spiralwickelmodule	217
	<i>Jens Lipnizki und Ulrich Meyer-Blumenroth</i>	
8.1.1	Einleitung	217
8.1.2	Aufbau eines Spiralwickelmoduls	219
8.1.3	Fouling in Spiralwickelmodulen	226
8.1.4	Spiralwickelmodule in Anlagen	228
8.1.5	Beispiele für die Verwendung von Spiralwickelmodulen in Wasserkreisläufen	229
8.1.6	Zusammenfassung und Konklusion	231
8.1.7	Literatur	231
8.2	Vacuum Rotation Membrane (VRM) – das rotierende Membranbelebungsverfahren: Aufbau und Betrieb	232
	<i>Torsten Hackner</i>	
8.2.1	Einleitung	232
8.2.2	Theorie	233
8.2.2.1	Membranbelebungsverfahren nach dem Niederdruckprinzip	233
8.2.2.2	VRM-Verfahren	234
8.2.3	Betriebserfahrungen mit VRM-Anlagen	237
8.2.3.1	Abwasserreinigungsanlage Schwägalp (kommunales Abwasser)	237
8.2.3.2	Klarfiltration von Brauereiabwasser (Pilotierung)	238
8.3	Prozesswasseraufbereitung mit CR-Filtertechnologiee	240
	<i>Eugen Reinhartd und Pasi Nurminen</i>	
8.3.1	Einleitung	240
8.3.2	Technische Beschreibung des CR-Filters	241
8.3.2.1	Filteraufbau	241
8.3.2.2	Funktionsprinzip des CR-Filters	242
8.3.2.3	CR-Filtertypen	243
8.3.2.4	Trennbereich des CR-Filters	244
8.3.2.5	Anlagenkonzepte	245
8.3.3	Anwendungsbeispiele	246
8.3.3.1	Aufbereitung von Prozesswasser aus der Textilproduktion	246
8.3.3.2	Aufbereitung von Prozesswasser aus der PVC-Produktion	247
8.3.3.3	Aufbereitung von Streichfarbenspülwasser	249
8.3.4	Zusammenfassung	251
8.3.5	Literatur	251

9	Verfahrenskonzepte zur Herstellung von Reinstwasser in der pharmazeutischen und Halbleiter-Industrie	253
	<i>Thomas Menzel</i>	
9.1	Einführung	253
9.2	Anforderungen an Systeme zur Herstellung von Reinwasser der pharmazeutischen Industrie	254
9.3	Systeme zur Herstellung von Reinwasser in der pharmazeutischen Industrie	254
9.3.1	Einsatz der Umkehrosmose bei Systemen zur Herstellung von Reinwasser der pharmazeutischen Industrie	257
9.3.2	Einsatz der Elektrodeionisation bei Systemen zur Herstellung von Reinwasser der pharmazeutischen Industrie	260
9.3.2.1	Heißwassersanitation der Elektrodeionisation	264
9.4	Anforderungen an Systeme zur Herstellung von Reinstwasser in der mikroelektronischen Industrie	268
9.4.1	Konzeptioneller Aufbau eines Reinstwassersystems	269
9.5	Zusammenfassung	271
9.6	Literatur	272
10	Modellierung und Simulation der Membranverfahren Gaspermeation, Dampfpermeation und Pervaporation	273
	<i>Torsten Brinkmann</i>	
10.1	Einführung	273
10.2	Modellierung von Membranverfahren	284
10.2.1	Modellierung des transmembranen Stofftransports	286
10.2.2	Modellierung der sekundären Transportphänomene	291
10.2.2.1	Konzentrationsgrenzschichten	292
10.2.2.2	Druckverluste und Transportwiderstände in porösen Stützschichten	296
10.2.2.3	Temperatureffekte	298
10.2.3	Modellierung von Membranmodulen	300
10.3	Implementierung	308
10.4	Modulverschaltung	314
10.5	Verfahrenssimulation	318
10.6	Zusammenfassung und Ausblick	325
10.7	Danksagungen	326
10.8	Symbolverzeichnis	326
10.9	Literatur	329

11 Pervaporation und Dampfpermeation 335

Hartmut E. A. Brüscké

- 11.1 Einleitung 335
- 11.2 Grundlagen 338
- 11.2.1 Definitionen 338
- 11.2.1.1 Pervaporation 338
- 11.2.1.2 Dampfpermeation 339
- 11.2.1.3 Gaspermeation 339
- 11.2.2 Lösungs-Diffusionsmechanismus 340
- 11.2.3 Polarisationseffekte 344
- 11.2.3.1 Konzentrationspolarisation 344
- 11.2.3.2 Temperaturpolarisation 345
- 11.3 Permeattraum 345
- 11.3.1 Absenken des Drucks im Permeattraum 347
- 11.4 Auslegung von Anlagen 350
- 11.5 Charakterisierung von Membranen 352
- 11.6 Membranen 354
- 11.6.1 Polymermembranen 355
- 11.6.1.1 Hydrophile Membranen 356
- 11.6.1.2 Organophile Membranen 357
- 11.6.1.3 Membranen zur Trennung von Organika 357
- 11.6.2 Anorganische Membranen 358
- 11.7 Module 359
- 11.7.1 Plattenmodule 360
- 11.7.2 Spiralwickelmodule 361
- 11.7.3 Taschenmodule (Kissenmodule) 362
- 11.7.4 Tubulare Module 362
- 11.8 Verfahren 363
- 11.8.1 Absatzweiser („Batch“) Betrieb 364
- 11.8.2 Kontinuierlicher Betrieb 365
- 11.8.3 Dampfpermeation 366
- 11.9 Beeinflussung von Reaktionen 369
- 11.10 Zusammenfassung 372
- 11.11 Literatur 372

12 Verfahren zur Trennung von Gasen und Dämpfen

- 12.1 Membranverfahren zur Gaspermeation 375

Klaus Ohlrogge, Jan Wind, Klaus Viktor Peinemann und Jürgen Stegger

- 12.1.1 Einführung 375
- 12.1.2 Prinzip der selektiven zur Gaspermeation 376
- 12.1.2.1 Definitionen 379
- 12.1.3 Wasserstofftrennung 381
- 12.1.4 Heliumrückgewinnung 383

- 12.1.5 Luftzerlegung 384
 - 12.1.5.1 Inertgasherstellung 384
 - 12.1.5.2 Sauerstoffherstellung 385
 - 12.1.6 Drucklufttrocknung 386
 - 12.1.7 Erdgasbehandlung 389
 - 12.1.7.1 CO₂-Abtrennung 389
 - 12.1.7.2 Wasserdampf-Taupunkteinstellung 392
 - 12.1.7.3 Kohlenwasserstoff-Taupunkteinstellung 395
 - 12.1.7.4 Stickstoffabtrennung 400
 - 12.1.8 Lösemittelrückgewinnung 400
 - 12.1.8.1 Abluftreinigung 400
 - 12.1.8.2 Olefinabtrennung 402
 - 12.1.9 Ausblick 407
 - 12.1.10 Literatur 408
 - 12.2 Abtrennung organischer Dämpfe 410
 - 12.2.1 Einleitung 410
 - 12.2.2 Prozesse zur Abtrennung organischer Dämpfe mittels Membranverfahren 410
 - 12.2.2.1 Membranen 410
 - 12.2.2.2 Der Druck als Triebkraft 412
 - 12.2.2.3 Permeatmanagement 412
 - 12.2.2.4 Die Membrantrennstufe 414
 - 12.2.3 Industrielle Anwendungen 415
 - 12.2.3.1 Gesetzlicher Rahmen als treibende Kraft 415
 - 12.2.3.2 Dämpfe leichtflüchtiger Kohlenwasserstoffe aus Lagerung und Umschlag 416
 - 12.2.3.3 Resultierende Anforderungen an die Abluftreinigungsanlage 419
 - 12.2.3.4 Anwendung: Rückgewinnung organischer Dämpfe durch Gaspermeation/Absorption 422
 - 12.2.3.5 Anwendung: Emissionsreduzierung an Tankstellen durch Membr 技术 424
 - 12.2.4 Zusammenfassung 426
 - 12.2.5 Literatur 427
-
- 13 Elektrodialyse 429**
Hans-Jürgen Rapp
 - 13.1 Einleitung 429
 - 13.2 Grundlagen 429
 - 13.2.1 Das grundlegende Prinzip 429
 - 13.2.2 Die Selektivität von Ionenaustauschermembranen 430
 - 13.2.3 Monoselektive und bipolare Ionenaustauschermembranen 433
 - 13.2.3.1 Die bipolare Membran 433
 - 13.2.3.2 Monoselektive Ionenaustauschermembranen 434
 - 13.2.4 Aufbau eines Elektrodialysemoduls 436

13.2.5	Auslegung der Elektrodialyse	439
13.2.6	Energiebedarf	441
13.2.7	Grenzstromdichte	443
13.2.8	Elektroden und Elektrodenspülung	446
13.2.9	Wassertransport und Konvektion	447
13.2.10	Betriebsweisen der Elektrodialyse	448
13.3	Säurerückgewinnung mittels Elektrodialyse	448
13.4	Formelzeichen	451
13.5	Literatur	452

14 Membranen für die Brennstoffzelle 453
Suzana Pereira Nunes

14.1	Einleitung	453
14.2	Fluorierte Membranen	454
14.3	Sulfonierte nichtfluorierte Membranen	457
14.4	Phosphonierte Membranen	459
14.5	Polymermembranen für Betrieb mit hohen Temperaturen	460
14.6	Organisch-anorganische Membranen	461
14.7	Letzte Kommentare	464
14.8	Literatur	465

**15 Anwendungen der Querstrommembranfiltration
in der Lebensmittelindustrie** 469
Frank Lipnizki

15.1	Einleitung	469
15.2	Milchindustrie	471
15.2.1	Übersicht der Milchindustrie	471
15.2.2	Hauptanwendungen von Membranen in der Milchindustrie	472
15.2.2.1	Herstellung von Milchprodukten	472
15.2.2.2	Herstellung von Molkeproteinprodukten	474
15.2.2.3	Käseherstellung	477
15.3	Fermentierte Lebensmittel	479
15.3.1	Bier	479
15.3.1.1	Bierrückgewinnung aus Überschusshefe	479
15.3.1.2	Klärung von Bier	481
15.3.1.3	Entalkoholisierung von Bier	481
15.3.2	Wein	482
15.3.2.1	Mostkonzentration/-optimierung	482
15.3.2.2	Weinklärung/-schönung	484
15.3.2.3	Verjüngung von alten Weinen (Lifting)	484
15.3.2.4	Entalkoholisierung von Wein	485
15.3.3	Essigherstellung	485
15.3.3.1	Klärung von Essig	486

15.4	Fruchtsäfte 486
15.4.1	Klärung von Fruchtsaft 487
15.4.2	Konzentration von Fruchtsaft 487
15.5	Andere Anwendungen von Membranprozessen in der Lebensmittelindustrie 488
15.5.1	Membranprozesse in der Lebensmittelproduktion 489
15.5.2	Membranprozesse in Prozesswasseraufbereitung und Abwasserbehandlung 489
15.6	Ausblick – Zukünftige Trends 489
15.6.1	Neue Anwendungen für Membranprozesse 491
15.6.2	Neue Membranprozesse 492
15.6.2.1	Pervaporation 492
15.6.2.2	Elektrodialyse 493
15.6.2.3	Membrankontaktoren – Osmotische Destillation 493
15.6.3	Integrierte Prozesslösungen: Synergien und Hybridprozesse 494
15.7	Danksagungen 494
15.8	Literatur 495
16	Nicht-wässrige Nanofiltration 497
	<i>Katrin Ebert, F. Marga J. Dijkstra und Frauke Jordt</i>
16.1	Einleitung 497
16.2	Membranen für die nicht-wässrige Nanofiltration 498
16.3	Mathematische Beschreibung der Transportvorgänge 501
16.4	Anwendungen 506
16.4.1	Petrochemie 506
16.4.2	Homogene Katalyse 508
16.4.3	Pharmazeutische Industrie 509
16.5	Literatur 509
17	Membranreaktoren 515
	<i>Detlev Fritsch</i>
17.1	Einleitung 515
17.2	Klassifizierung von Membranreaktoren 517
17.3	Ausgewählte Reaktionen mit Membranreaktoren 520
17.3.1	Extraktortyp 520
17.3.2	Distributortyp 526
17.3.3	Kontaktortyp 533
17.3.3.1	Kontaktor-MR Typ 1 (Diffusion) 537
17.3.3.2	Kontaktor-MR Typ 2 (Durchfluss) 540
17.3.4	Modellierung 544
17.3.5	Schlussbetrachtung 545
17.4	Literatur 545
	Stichwortverzeichnis 549