

Inhaltsverzeichnis

Vorwort XVII

Autorenliste XIX

1 Polymermembranen 1

Klaus-Viktor Peinemann und Suzana Pereira Nunes

- 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

Dieter Hofmann und Matthias Heuchel

- 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 – Pfropfreaktionen 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	Blutfractionierung	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
	<i>Ina Pahl, Dieter Melzner und Oscar-W. Reif</i>	
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 Reinhardt 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-Filtertechnologie	240
	<i>Eugen Reinhardt 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 Reinstwasser der pharmazeutischen Industrie	254
9.3	Systeme zur Herstellung von Reinstwasser in der pharmazeutischen Industrie	254
9.3.1	Einsatz der Umkehrosmose bei Systemen zur Herstellung von Reinstwasser der pharmazeutischen Industrie	257
9.3.2	Einsatz der Elektrodeionisation bei Systemen zur Herstellung von Reinstwasser 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 Stützsichten	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. Brüscke

- 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 Polarisierungseffekte 344
 - 11.2.3.1 Konzentrationspolarisation 344
 - 11.2.3.2 Temperaturpolarisation 345
 - 11.3 Permeatraum 345
 - 11.3.1 Absenken des Drucks im Permeatraum 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 Wasserstoffabtrennung 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 Membrantechnologie 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