

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

Mathias Ulbricht

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
Stefan Tudyka
- 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 Hohlherstellung 134
- 5.2.3.1 Lyocell-/Alceruverfahren 135
- 5.2.3.2 Polysulfonverfahren 135
- 5.2.3.3 Spinnprozess und Hohlhergeometrie 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

Bernd Krause, Hermann Göhl und Frank Wiese

- 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

*Jens Lipnizki, Ulrich Meyer-Blumenroth, Torsten Hackner,
Eugen Reinhardt und Pasi Nurminen*

8.1 Wasserkreisläufe – Spiralwickelmodule 217

Jens Lipnizki und Ulrich Meyer-Blumenroth

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
Torsten Hackner

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 Schwägälp (kommunales Abwasser) 237

8.2.3.2 Klarfiltration von Brauereiabwasser (Pilotierung) 238

8.3 Prozesswasseraufbereitung mit CR-Filtertechnologie 240
Eugen Reinhardt und Pasi Nurminen

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**
Thomas Menzel

- 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**
Torsten Brinkmann

- 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
 - 12.1.2.2 Wasserstoffabtrennung 381
 - 12.1.2.3 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 Membrankontakoren – 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

Katrin Ebert, F. Marga J. Dijkstra und Frauke Jordt

- 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

Detlev Fritsch

- 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