

Inhaltsverzeichnis

1 Membranprozesse - Triebkräfte und Transportwiderstände.....	1
1.1 Einleitung: Membranen, Module, Membranverfahren	1
1.2 Grundbegriffe – Selektivität, Fluss, Rückhalt.....	4
1.3 Triebkräfte und Widerstände	7
1.4 Universelle Triebkraft: Differenz des chemischen Potentials	8
1.5 Transportwiderstände an der Membran	14
1.6 Zusammenfassung	16
Formelzeichen und Indizierung	17
2 Membranen – Strukturen, Werkstoffe und Herstellung.....	19
2.1 Einleitung.....	19
2.2 Klassifizierung von Membranen.....	20
2.3 Organische Membranen.....	22
2.3.1 Membranmaterialien und deren Wahl	22
2.3.2 Struktureigenschaften von Polymeren.....	24
2.3.3 Betrachtung der Vorgänge in Membranen auf molekularer Ebene – Vorhersage der Permeabilität dichter Membranen	33
2.3.4 Organische asymmetrische Membranen.....	36
2.3.5 Organische symmetrische Membranen	47
2.4 Anorganische Membranen	47
2.4.1 Historische Entwicklung der anorganischen Membranen	48
2.4.2 Symmetrische poröse anorganische Träger.....	49
2.4.3 Asymmetrische poröse anorganische Membranen	50
2.4.4 Zeolithmembranen - Aktive Schicht aus Zeolith-Kristallen.....	56
2.4.5 Heterogene Membranen aus Kombination anorganischer und organischer Werkstoffe	59
2.4.6 Porenfreie anorganische Membranen	60
2.5 Flüssige Membranen, Membranen mit Carrier	63
2.6 Erleichterter Stofftransport durch Membranen	65
Literatur	66

3 Modellierung des Stofftransportes in Membranen	71
3.1 Einleitung.....	71
3.2 Porenmodell für Filtrationsanwendungen.....	75
3.3 Lösungs-Diffusions-Modell für porenfreie Membranen.....	78
3.3.1 Sorption.....	83
3.3.2 Diffusion	84
3.3.3 Berechnungsbeispiele.....	87
3.4 Modelle für den Gas- und Dampftransport in porösen Materialien	96
3.4.1 Stofftransport in Makro- und Mesoporen.....	97
3.4.2 Stofftransport in Mikroporen.....	103
3.5 Transport in Membranen mit Oberflächenladungen.....	106
3.6 Zusammenfassung	107
3.7 Berechnungsbeispiele	108
Formelzeichen und Indizierung	112
Literatur	114
4 Stoffaustausch an Membranen.....	117
4.1 Triebkraftmindernde Effekte	117
4.1.1 Lokale Transportwiderstände	117
4.1.2 Feedseitige Konzentrationspolarisation.....	118
4.1.3 Transportwiderstand der porösen Stützsicht.....	126
4.1.4 Axiale Rückvermischung	131
4.1.5 Vorgehensweise zur Berechnung der örtlichen Membranleistung ...	134
4.2 Einfluss der Einbaurichtung asymmetrischer Membranen	138
4.3 Maßnahmen zur Verbesserung des Stoffübergangs an der Membran.....	142
4.3.1 Erzeugung von Mehrphasenströmungen	142
4.3.2 Feed-Spacer in Membranmodulen	145
Formelzeichen und Indizierung	147
Literatur	150
5 Modulkonstruktionen	151
5.1 Einleitung.....	151
5.2 Strömungsführung im Modul.....	152
5.3 Anforderungen an Modulkonstruktionen.....	155
5.4 Module mit Schlauchmembranen	157
5.4.1 Rohrmodul	157
5.4.2 Hohlfaser-/ Kapillarmodul	162
5.5 Module mit Flachmembranen.....	167
5.5.1 Plattenmodul	167
5.5.2 Kissenmodul.....	170
5.5.3 Wickelmodul.....	173
5.6 Getauchte Module für die Wasseraufbereitung	175
5.7 Moduloptimierung	184
5.7.1 Konstruktive Maßnahmen zur Optimierung des Stoffaustausches... 184	
5.7.2 Kostenoptimierung.....	188
5.8 Zusammenfassung	200

Formelzeichen und Indizierung	201
Literatur	202
6 Anlagenentwurf und Modulanordnung.....	205
6.1 Einleitung.....	205
6.2 Parallel- und Reihenschaltung	206
6.3 Modulanordnung innerhalb einer Stufe	207
6.4 Mehrstufige Anlagenverschaltung	211
6.4.1 Gaspermeation.....	214
6.4.2 Umkehrosmose.....	218
6.5 Anlagenauslegung – Näherungsrechnungen	219
6.5.1 Integration der differentiellen Bilanzen mit Vereinfachungen	219
6.5.2 Abschätzung mittels integraler Bilanzen	223
Formelzeichen und Indizierung	225
Literatur	226
7 Kosten	227
7.1 Investitionskosten - Methoden zur Kostenschätzung.....	227
7.1.1 Faktormethode nach H.J. Lang.....	227
7.1.2 Ermittlung der Kosten für die Hauptaggregate.....	229
7.1.3 Verbesserte Faktormethode nach Miller.....	230
7.1.4 Kapazitätsmethode	231
7.2 Laufende Kosten – Wirtschaftlichkeit	234
7.2.1 Fixe Betriebskosten	235
7.2.2 Variable Betriebskosten	238
7.3 Spezifische Kosten.....	239
7.3.1 Meerwasserentsalzung mittels Umkehrosmose zur Kesselspeisewassererzeugung	239
Formelzeichen und Indizierung	243
Literatur	243
8 Umkehrosmose.....	245
8.1 Einleitung.....	245
8.2 Membranbeständigkeit.....	247
8.2.1 Hydrolyse	247
8.2.2 Beständigkeit gegen freies Chlor.....	249
8.2.3 Empfindlichkeit von Membranen gegenüber Sauerstoff und Ozon	249
8.2.4 Beständigkeit gegen Lösungsmittel	251
8.3 Osmotischer Druck	252
8.4 Viskositätseinfluss	253
8.5 Membranverblockung infolge von Kristallisation (Scaling).....	255
8.6 Membranverblockung infolge Verschmutzungen (Fouling).....	259
8.7 Membranflächen-, Leistungs- und spezifischer Energiebedarf.....	263
8.8 Beispiele für den Einsatz der Umkehrosmose	266
8.8.1 Beispiel: Rückgewinnung von ϵ -Caprolactam (ϵ -Cap.)	267
8.8.2 Beispiel: Reinigung von Deponiesickerwasser	270

8.9 Aufgabe: Auslegung einer Meerwasserentsalzungsanlage	275
8.9.1 Kostentwicklung der Trinkwassergewinnung aus Meerwasser	279
8.10 Zusammenfassung	280
Formelzeichen und Indizierung	282
Literatur	283
9 Nanofiltration	285
9.1 Abgrenzung zur Umkehrosmose und Ultrafiltration	285
9.2 Kommerzielle NF-Membranen, Einsatzgebiete	287
9.3 Berechnung des Trennverhaltens von NF-Membranen	290
9.4 Donnan-Effekt	290
9.5 Druck- und konzentrationsabhängiger Rückhalt	294
9.5.1 Druckabhängigkeit	296
9.5.2 Konzentrationsabhängigkeit	299
9.6 Vergleich von NF und RO	300
9.7 Zusammenfassung	305
Formelzeichen und Indizierung	306
Literatur	307
10 Ultrafiltration und Mikrofiltration	309
10.1 Verfahrensbeschreibung	309
10.2 Membranen in der Ultra- und Mikrofiltration	311
10.2.1 Mikrofiltrationsmembranen	312
10.2.2 Ultrafiltrationsmembranen	313
10.3 Prozessführung und Modulsysteme	315
10.3.1 Dead-End-Betrieb	315
10.3.2 Cross-Flow-Betrieb	319
10.3.3 Getauchte Membranen	322
10.4 Modellierung des Stofftransportes bei der Ultra- und Mikrofiltration	323
10.4.1 Diffusionsmodelle	327
10.4.2 Hydrodynamische Modelle	333
10.5 Membranfouling	336
10.5.1 Foulants	338
10.5.2 Foulingmechanismen und -phänomene für poröse Membranen	339
10.5.3 Einfluss der Membraneigenschaften auf das Foulingverhalten	342
10.6 Chemische Reinigung	344
10.7 Anwendungen in der Abwasserbehandlung und Wasseraufbereitung	348
10.7.1 Einsatzkonzepte	349
10.7.2 Anwendungsbeispiele aus der Trinkwasseraufbereitung und Abwasserbehandlung	354
10.8 Berechnungsbeispiel	358
Formelzeichen und Indizierung	363
Literatur	366

11 Elektrodialyse	369
11.1 Verfahrensbeschreibung	369
11.2 Ionenaustauschermembranen: Prinzip, Eigenschaften und Herstellung	371
11.2.1 Prinzip	371
11.2.2 Eigenschaften	372
11.2.3 Herstellung von Ionenaustauschermembranen	375
11.3 Aufbau und Betriebsweisen von Elektrodialyseanlagen	377
11.3.1 Aufbau	377
11.3.2 Betriebsweisen der Elektrodialyse	379
11.4 Auslegung von ED-Anlagen	383
11.4.1 Ermittlung der erforderlichen Membranfläche	383
11.4.2 Grenzstromdichte	387
11.5 Kosten und Anwendung des Verfahrens	393
11.6 Verfahrensvarianten	396
11.6.1 Donnan-Dialyse	396
11.6.2 Kombination der Elektrodialyse mit Ionenaustausch	397
11.6.3 Elektrodialyse mit bipolaren Membranen	399
11.6.4 Weitere Anwendungsvarianten	401
11.7 Berechnungsbeispiel: Auslegung einer Brackwasserelektrodialyse	402
11.7.1 Aufgabenstellung	402
11.7.2 Lösung	404
Formelzeichen und Indizierung	409
Literatur	411
 12 Pervaporation / Dampfpermeation	 415
12.1 Verfahrensbeschreibung	415
12.2 Membranen und Module	417
12.2.1 Hydrophile Membranen	417
12.2.2 Hydrophobe Membranen	418
12.2.3 Module	419
12.3 Diskussion der leistungsbestimmenden Parameter	420
12.3.1 Leistungsminderung durch Polarisierungseffekte	424
12.4 Verfahrensauslegung	425
12.5 Anwendungsbeispiele	429
12.5.1 Leistungsvergleich anorganischer Membranmaterialien	430
12.5.2 Hybridprozess Pervaporation/Destillation	433
12.6 Zusammenfassung und Ausblick	442
Formelzeichen und Indizierung	443
Literatur	445
 13 Gaspermeation	 447
13.1 Einleitung	447
13.2 Trennmechanismen von GP-Membranen	448
13.2.1 Stofftransport in porösen Membranen	449
13.2.2 Stofftransport in mikroporösen Membranen	450
13.2.3 Stofftransport in dichten Membranen	450

13.3 Membranwerkstoffe.....	451
13.3.1 Polymerwerkstoffe	452
13.3.2 Anorganische Werkstoffe.....	461
13.4 Modulkonstruktionen.....	469
13.4.1 Hohlfasermodul / Kapillarmodul.....	469
13.4.2 Wickelmodul	471
13.4.3 Kissenmodul	472
13.5 Lokale Trenncharakteristik	472
13.5.1 Trennung von Binärgemischen	472
13.5.2 Mehrkomponentengemische	476
13.5.3 Joule-Thomson-Effekt.....	477
13.6 Modul- und Anlagenauslegung.....	482
13.6.1 Kennfelder.....	482
13.6.2 Mittelwertrechnung	483
13.7 Anwendungsbeispiele	484
13.7.1 Stickstoffanreicherung	489
13.7.2 Lösemittelrückgewinnung aus Abluft	495
13.8 Berechnungsbeispiele	500
Formelzeichen und Indizierung	502
Literatur	504

14 Membrankontaktoren.....	507
14.1 Einleitung.....	507
14.2 Verfahrensprinzip	507
14.2.1 Abgrenzung von anderen Membranprozessen	508
14.2.2 Vergleich mit klassischen Kontaktapparaten	509
14.3 Membranen.....	511
14.4 Modulkonstruktionen.....	511
14.5 Auslegung von Membrankontaktoren.....	513
14.5.1 Auslegungsheuristiken	513
14.5.2 Auslegungsgleichungen	514
14.5.3 Stofftransportvorgänge in Membrankontaktoren	515
14.5.4 Korrelationen für Transportkoeffizienten.....	518
14.5.5 Druckverlust und transmembraner Druck	520
14.5.6 Auslegungsbeispiel.....	522
14.6 Anwendungen.....	526
14.6.1 Pertraktion.....	527
14.6.2 Diffusionsdialyse.....	528
14.6.3 Membrandestillation.....	530
14.6.4 Kommerzielle Anwendungen.....	534
14.7 Zusammenfassung und Ausblick	537
Anhang A: Herleitung der allgemeinen Transportgleichung	538
Anhang B: Beschreibung des Stoffdurchgangs	541
Formelzeichen und Indizierung	544
Literatur	546

15 Membranreaktoren	549
15.1 Einleitung.....	549
15.2 Extraktorprinzip.....	550
15.2.1 Selektive Produktentfernung	550
15.2.2 Pervaporationsmembranreaktoren	553
15.2.3 Katalysatorrückhalt	555
15.3 Distributorprinzip.....	556
15.3.1 Partielle Oxidationsreaktionen	557
15.3.2 Kopplung von Reaktionen	558
15.4 Kontaktorprinzip	559
15.4.1 Mehrphasenkontaktor	560
15.4.2 Unselektiver Grenzflächenkontaktor	561
15.4.3 Erzwungene Durchströmung	562
15.4.4 Flüssige Membranen	562
15.5 Membranbioreaktoren.....	563
15.5.1 Selektive Produktentfernung	563
15.5.2 Rückhalt von Biokatalysator	564
15.5.3 Selektive Substratzugabe.....	565
15.5.4 Mehrphasenkontaktor	566
15.5.5 Membranbioreaktoren in der Wasseraufbereitung	566
15.6 Zusammenfassung	569
Formelzeichen und Indizierung	569
Literatur	570
 Sachverzeichnis.....	 573