

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Membranprozesse - Triebkräfte und Transportwiderstände.....</b>	<b>1</b>
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
<b>2 Membranen – Strukturen, Werkstoffe und Herstellung.....</b>	<b>19</b>
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

---

<b>3 Modellierung des Stofftransportes in Membranen .....</b>	<b>71</b>
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
<b>4 Stoffaustausch an Membranen.....</b>	<b>117</b>
4.1 Triebkraftmindernde Effekte .....	117
4.1.1 Lokale Transportwiderstände .....	117
4.1.2 Feedseitige Konzentrationspolarisation.....	118
4.1.3 Transportwiderstand der porösen Stützschiicht.....	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
<b>5 Modulkonstruktionen .....</b>	<b>151</b>
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
<b>6 Anlagenentwurf und Modulanordnung.....</b>	<b>205</b>
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 – Nahrungsrechnungen.....	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
<b>7 Kosten.....</b>	<b>227</b>
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
<b>8 Umkehrosmose.....</b>	<b>245</b>
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 $\epsilon$ -Caprolactam ( $\epsilon$ -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
<b>9 Nanofiltration .....</b>	<b>285</b>
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
<b>10 Ultrafiltration und Mikrofiltration.....</b>	<b>309</b>
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

<b>11 Elektrodialyse .....</b>	<b>369</b>
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
<b>12 Pervaporation / Dampfpermeation .....</b>	<b>415</b>
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
<b>13 Gaspermeation.....</b>	<b>447</b>
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 Hohlfaserm modul / 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
<b>14 Membrankontaktoren.....</b>	<b>507</b>
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

---

<b>15 Membranreaktoren .....</b>	<b>549</b>
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
 <b>Sachverzeichnis .....</b>	 <b>573</b>