

Inhaltsverzeichnis

Vorwort *XI*

Liste der Symbole *XIII*

1	Mikro- und Ultrafiltration mit Membranen	1
1.1	Übersicht über die Membranverfahren	1
1.2	Einordnung der Mikro- und Ultrafiltration	4
1.2.1	Die Mikrofiltration	5
1.2.2	Die Ultrafiltration	6
1.3	Bekanntere Verfahrensweisen und Ausführungsformen	9
1.3.1	Dead-End-Filtration (statische Filtration)	9
1.3.2	Crossflow-Filtration mit Membranmodulen	10
1.3.3	Dynamische Filtration mit Filtrationsmaschinen	11
1.3.4	Single-Pass-Crossflow-Filtration	11
1.3.5	Getauchte Membranen in Becken und Behältern	12
1.4	Entscheidende Faktoren für eine industrielle Membrananwendung	12
1.5	Technische und wirtschaftliche Bedeutung	15
	Literatur	17
2	Historische Entwicklung der Mikro- und Ultrafiltration	19
2.1	Entdeckung grundlegender Naturgesetze	19
2.2	Herstellung von Polymermembranen	21
2.3	Entwicklungen der Entkeimungs- und Sterilfiltration	27
2.4	Entwicklung anorganischer Membranen	29
	Literatur	32
3	Membranen zur Ultra- und Mikrofiltration	35
3.1	Allgemeine Beschreibung und Einteilung	35
3.2	Polymermembranen und ihre Herstellung	37
3.2.1	Membranherstellung durch Phasenseparation	40
3.2.2	Herstellung von Rohrmembranen durch Spiralwickeln	48
3.2.3	Membranherstellung durch Verstrecken von Polymerfolien	50
3.2.4	Das Kernspurverfahren („track etching“)	51
3.2.5	Herstellung mikroporöser Strukturen durch Sintern	53

VI | *Inhaltsverzeichnis*

3.3	Anorganische Membranen	53
3.4	Charakterisierung von Membranen zur Mikro- und Ultrafiltration	56
3.4.1	Überblick über die zu charakterisierenden Eigenschaften	56
3.4.2	Äußere Abmaße	59
3.4.3	Die Porenstruktur	59
3.4.4	Die Topographie der äußeren Oberfläche	63
3.4.5	Die Permeabilität	64
3.4.6	Die Trenngrenze bzw. das Rückhaltevermögen	71
3.4.7	Benetzungseigenschaften von Membranen	79
3.4.8	Blaspunktdruck und maximale Porengröße	87
3.4.9	Die Porengrößenverteilung	89
3.4.10	Adsorptionseigenschaften und elektrochemische Eigenschaften	94
3.4.11	Mechanische Membraneigenschaften	97
3.4.12	Die Temperatur- und Chemikalienbeständigkeit	99
	Literatur	102
4	Relevante Eigenschaften der behandelten Stoffsysteme	105
4.1	Besonderheiten der behandelten Stoffsysteme	105
4.2	Agglomeration und Flockung	108
4.3	Absetzgeschwindigkeit	109
4.4	Verhalten von Partikeln und Makromolekülen im elektrischen Feld	110
4.5	Diffusion	110
4.6	Osmotischer Druck	111
4.7	Das Fließverhalten von Dispersionen	115
4.8	Strömungswiderstand der Deckschicht	122
5	Die Dead-End-Filtration mit Membranen	135
5.1	Einführung	135
5.2	Ausführungsformen	137
5.2.1	Scheibenfilter zur Dead-End-Filtration	137
5.2.2	Capsule-Filter	138
5.2.3	Filterkerzen mit den zugehörigen Gehäusen	138
5.3	Physikalische Überlegungen zur Dead-End-Filtration	142
5.3.1	Flüssigkeits- bzw. Gasdurchsatz reiner Medien	142
5.3.2	Flüssigkeitsdurchsatz bei einer Oberflächenfiltration	144
5.3.3	Die Schmutzaufnahmefähigkeit	148
5.4	Validierung von Membranfiltern	150
5.4.1	Entwicklung der Validierungspraxis	150
5.4.2	Integritätstestverfahren	152
5.4.3	Nachweise für einen unbedenklichen Einsatz von Filtern	160
5.4.4	Qualitätssicherung bei der Produktion	166
	Literatur	169

6	Crossflow-Filtration mit durchströmten Membranmodulen	171
6.1	Apparative Ausführung und wichtige Betriebsparameter	171
6.2	Membranmodule zur Crossflow-Filtration	179
6.2.1	Übersicht über einzelne Bauarten	179
6.2.2	Der konzentratseitige Druckabfall im Membranmodul	184
6.3	Betriebsweisen zur Crossflow-Filtration	190
6.3.1	Diskontinuierliche Betriebsweisen	190
6.3.2	Kontinuierliche Betriebsweisen	193
6.3.3	Beispiel zum Vergleich verschiedener Betriebsweisen	195
6.3.4	Die Diafiltration	198
6.4	Berechnungsansätze zur Crossflow-Filtration	203
6.4.1	Bekannte Berechnungsansätze	203
6.4.2	Gekoppeltes Diffusions- und hydrodynamisches Modell	213
6.4.3	Modellierung des zeitlichen Filtrationsverlaufs	218
6.4.4	Schlussfolgerungen	220
6.5	Klassierverfahren	220
6.6	Die UTP-Betriebsweise	221
6.7	Der Einsatz von Gradientenmembranen	223
6.8	Dynamische Precoat-Filtration	225
6.9	Fouling	225
	Literatur	228
7	Sonstige Verfahrensweisen mit feststehenden, überströmten Membranen	233
7.1	Single-Pass-Crossflow-Filtration	233
7.2	Filtration mit getauchten Membranen	236
7.3	Pumpe-Düse-Filtersysteme	237
7.4	Crossflow-Filtration mit Dean-Wirbeln	237
7.5	Zyklonmodule	239
	Literatur	241
8	Filtrationsmaschinen	243
8.1	Einführung	243
8.2	Rührzellen	245
8.3	Scherspaltfilter mit radialem Spalt und Rührorganen	246
8.4	Filter mit rotierenden Filterscheiben	249
8.5	Filter mit zylindrischen Filterelementen	254
8.6	Filter mit oszillierenden Membranen	260
8.7	Filter mit Schaber zum Entfernen der Deckschicht	260
8.8	Hinweise zur Auslegung und zum Betrieb	261
	Literatur	262

VIII | *Inhaltsverzeichnis*

- 9** **Zusätzliche Maßnahmen zur Erhöhung des Filtratstroms** 265
 - 9.1 Crossflow-Filtration mit periodischer Rückspülung 265
 - 9.2 Crossflow-Filtration mit überlagertem elektrischen Feld 273
 - 9.3 Crossflow-Filtration mit überlagertem Ultraschall 276
 - 9.4 Einsatz abrasiv wirkender Partikeln 277
 - Literatur 278

- 10** **Anwendungsgebiete der Ultra- und Mikrofiltration** 281
 - 10.1 Anwendungen in der Labor- und Analysetechnik 281
 - 10.2 Entkeimungsfiltration von Flüssigkeiten 284
 - 10.3 Entkeimungsfiltration von Gasen 286
 - 10.4 Pyrogenabtrennung 288
 - 10.5 Anwendungen in der Biotechnologie 290
 - 10.6 Anwendungen in der Medizin 298
 - 10.7 Anwendungen in der Lebensmitteltechnik 301
 - 10.7.1 Klären und Entkeimen 302
 - 10.7.2 Anwendungen in der Zucker- und Stärkeindustrie 311
 - 10.7.3 Anwendungen bei der Verarbeitung von Milch und Molke 313
 - 10.7.4 Anwendungen bei der Gewinnung von Sojaprodukten 315
 - 10.7.5 Filtration von Reinigungslösungen 315
 - 10.8 Anwendungen zur Wasseraufbereitung 316
 - 10.8.1 Trinkwassergewinnung 317
 - 10.8.2 Vorbehandlung von Wasser für die Umkehrosmose 319
 - 10.8.3 Rein- und Reinstwasserbereitung 320
 - 10.8.4 Beurteilung der Filtrierbarkeit von Wasser 323
 - 10.8.5 Membranbioreaktoren zur Abwasseraufbereitung 326
 - 10.8.6 Zero Liquid Discharge 330
 - 10.9 Anwendungen in der Produktions- und Umweltschutztechnik 332
 - 10.9.1 Aufarbeitung öl- und fetthaltiger Wässer 333
 - 10.9.2 Recycling von Schleifereiwasser 335
 - 10.9.3 Anwendung bei der elektrophoretischen Tauchlackierung 337
 - 10.9.4 Abtrennung von gefällten Metallverbindungen 337
 - 10.9.5 Anwendungen bei der Herstellung von Zellstoff und Papier 338
 - 10.9.6 Anwendungen in der chemischen Produktion 339
 - 10.10 Mikroporöse Membranen in konventionellen Filterapparaten 342
 - Literatur 343

- 11** **Reinigung, Desinfektion und Sterilisation von Membrananlagen** 347
 - 11.1 Einführung 347
 - 11.2 Die CIP-Reinigung 349
 - 11.3 Desinfektion und Sterilisation von Membrananlagen 361
 - 11.3.1 Einführung 361
 - 11.3.2 Chemische Desinfektion und Desinfektionsmittel 362
 - 11.3.3 Desinfektion und Sterilisation durch Hitze 365
 - 11.3.4 Validierung des Desinfektions- oder Sterilisationserfolgs 367
 - Literatur 368

12	Hinweise zur Projektbearbeitung	369
12.1	Verfahrensauswahl	369
12.2	Hybridprozesse	371
12.3	Bedeutung experimenteller Untersuchungen	371
12.4	Projektbearbeitung zur Ultra- und Mikrofiltration	373
12.5	Betriebswirtschaftliche Betrachtungen	379
	Literatur	385
	Stichwortverzeichnis	387

