

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	Bekannte 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

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	Klassiervverfahren	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

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