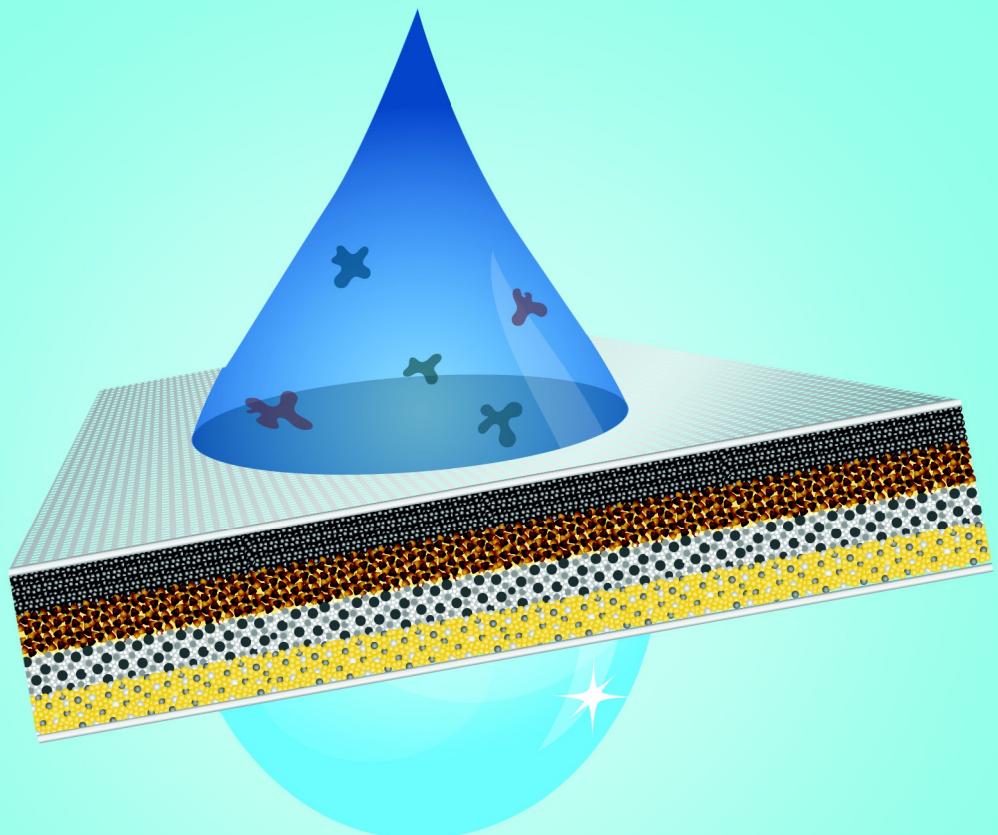


Siegfried Ripperger

▪ **Mikro- und Ultrafiltration mit Membranen**



Mikro- und Ultrafiltration mit Membranen

Mikro- und Ultrafiltration mit Membranen

Siegfried Ripperger

WILEY ■ vch

Autor**Prof. Dr.-Ing. Siegfried Ripperger**

Ehemaliger Leiter des Lehrstuhls
für Mechanische Verfahrenstechnik
an der TU Dresden (1993 bis 2004)
und an der TU Kaiserslautern (2004 bis 2016)

Titelbild

Unter Verwendung einer Abbildung von
shutterstock (ID 697753690 / John1179)

1. Auflage

Alle Bücher von WILEY-VCH werden sorgfältig
erarbeitet. Dennoch übernehmen Autoren,
Herausgeber und Verlag in keinem Fall,
einschließlich des vorliegenden Werkes, für die
Richtigkeit von Angaben, Hinweisen und
Ratschlägen sowie für eventuelle Druckfehler
irgendeine Haftung.

**Bibliografische Information der
Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese
Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie;
detaillierte bibliografische Daten sind im Internet
über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

© 2023 WILEY-VCH GmbH, Boschstr. 12, 69469
Weinheim, Germany

Alle Rechte, insbesondere die der Übersetzung in
andere Sprachen, vorbehalten. Kein Teil dieses
Buches darf ohne schriftliche Genehmigung des
Verlages in irgendeiner Form – durch Photokopie,
Mikroverfilmung oder irgendein anderes
Verfahren – reproduziert oder in eine von
Maschinen, insbesondere von
Datenverarbeitungsmaschinen, verwendbare
Sprache übertragen oder übersetzt werden. Die
Wiedergabe von Warenbezeichnungen,
Handelsnamen oder sonstigen Kennzeichen in
diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass
diese von jedermann frei benutzt werden dürfen.
Vielmehr kann es sich auch dann um eingetragene
Warenzeichen oder sonstige gesetzlich geschützte
Kennzeichen handeln, wenn sie nicht eigens als
solche markiert sind.

Satz le-tex publishing services GmbH, Leipzig

Print ISBN 978-3-527-34539-7

ePDF ISBN 978-3-527-81843-3

ePub ISBN 978-3-527-81845-7

eBook ISBN 978-3-527-81844-0

Moby ISBN 978-3-527-81846-4

Gedruckt auf säurefreiem Papier.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort *XI*

Liste der Symbole *XIII*

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

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	Benetzungsseigenschaften 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

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 ölf- 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
-----------------------------	------------

Vorwort

Die Ultra- und Mikrofiltration mit Membranen haben sich in vielen Industriezweigen zu einem Standartverfahren entwickelt. Bei vielen Produktionsprozessen in unterschiedlichen Industriezweigen nehmen sie eine Schlüsselfunktion wahr. So z. B. in der pharmazeutischen Produktion, in der Biotechnologie, der Getränke- und Lebensmitteltechnik sowie in der Elektronikindustrie. Mit dieser Entwicklung haben sich unterschiedliche Membrantypen und Membraneinheiten, Testverfahren zu ihrer Untersuchung und verschiedene Verfahrensweisen zu ihrer Anwendung etabliert. Die Membranen werden u. a. als Dead-End-Kerzen, als durchströmte Membranmodule zur Crossflow-Filtration sowie als getauchte Einheiten in Becken oder Membran-Bioreaktoren eingesetzt. Zunehmend werden sie auch in dynamischen Filtern, die mit einem eigenen Antrieb zur Bewegung der Membranen und/oder der zu behandelnden Flüssigkeit versehen sind, eingesetzt. Vieles wurde erst in den letzten Jahrzehnten entwickelt. Die Entwicklungen sind jedoch noch nicht abgeschlossen. Es kann erwartet werden, dass noch zahlreiche neue Aufgaben auf den Gebieten der Produktions- und Umwelttechnik, der Biotechnologie, der Wasseraufbereitung und der Kreislaufwirtschaft mit Membranverfahren gelöst werden.

In dem vorliegenden Buch werden Grundlagen zur Ultra- und Mikrofiltration mit Membranen dargestellt. Bekannte Membranen und ihre Herstellung sowie ihre Anwendungen in verschiedenen Industriezweigen werden beschrieben. Zum besseren Verständnis der Filtrationsverfahren werden die zugehörigen physikalischen Grundlagen behandelt und grundlegende Untersuchungsergebnisse erläutert. Die Systematik gestattet einen schnellen Überblick. Dadurch kann das Buch auch als Nachschlagewerk genutzt werden. Die umfangreichen Literaturzitate ermöglichen die Vertiefung in einzelne spezielle Gebiete.

Mit den Anwendungsbeispielen der Ultra- und Mikrofiltration in Kap. 10 wird die große Vielfalt ihrer Nutzungsmöglichkeiten aufgezeigt. Auch wenn es schwierig ist, Betriebs- und Versuchsergebnisse von einem Anwendungsfall auf einen anderen zu übertragen, geben die Beispiele Anregungen zur Lösung ähnlich gelagerter Separationsprobleme. Sie sollen auch dazu anregen, Einsatzmöglichkeiten der Ultra- und Mikrofiltration auf neue Gebiete zu übertragen.

Liste der Symbole

Die Symbole werden im Text im Zusammenhang mit den Gleichungen erklärt. Häufig benutzte Symbole werden in der folgenden Liste auch aufgeführt.

Symbol	Bedeutung
A	Fläche
A_M	Membranfläche, Filterfläche
c	Konzentration
c_v	Volumenkonzentration
c_n	Anzahlkonzentration
C	Faktor
d	Durchmesser
d_a	Außendurchmesser
d_h	hydraulischer Durchmesser
d_i	Innendurchmesser
$d_{K,a}$	Außendurchmesser einer Kapillare
$d_{K,i}$	Innendurchmesser einer Kapillare
d_{p_0}	Poredurchmesser
$d_{p_0,m}$	mittlerer Poredurchmesser
$d_{p_0,h}$	hydraulischer Poredurchmesser
d_{32}	Sauterdurchmesser
D	Diffusionskoeffizient
De	Dean-Zahl
e	spezifischer Energieeintrag
F_n	Anpresskraft
F_R	Reibkraft
F_x	Kraft infolge einer Querströmung
F_L	Liftkraft
g	Erdbeschleunigung
h	Höhe
h_D	Deckschichthöhe
H	Henry-Absorptionskoeffizient
k	Wandrauigkeit

Symbol	Bedeutung
k_B	Boltzmann-Konstante
K	Konstante
K_D	Konstante der Darcy-Gleichung
KI	Kolloidindex
K_M	Permeabilitätskoeffizient
K_S	Konstante der allgemeinen Filtergleichung zur statischen Filtration
l, L	Länge
L_V	Länge einer Kapillare im Vergussmaterial
m	Masse
\dot{m}_p	spezifischer Massestrom der Partikel
M	Drehmoment
M	molare Masse
n	Anzahl
\dot{n}	molarer Stoffstrom
p	Druck
p_a	Druck außerhalb einer Kapillare
p_B	Benetzungsdruck
p_{BP}	Blaspunktdruck
p_G	Partialdruck einer Gaskomponente
p_i	Druck innerhalb einer Kapillare
Δp_F	Druckdifferenz bei der Filtration
Δp_R	Druckdifferenz bei der Rückspülung
Δp_{tD}	Druckabfall über die Deckschichtdicke
Δp_{tM}	Druckabfall über die Membrandicke (transmembrane Druckdifferenz)
Δp_z	Druckabfall in der Kreislaufströmung
P	Leistung (Antriebsleistung, Pumpenleistung)
PI	Plugging-Index
r	Radius
r	spezifischer Strömungswiderstand
R	Rückhalterate
R	Strömungswiderstand
Re	Reynolds-Zahl
s	Dicke
S_V	auf das Partikelvolumen bezogene spezifische Oberfläche
Sc	Schmidt-Zahl
Sh	Sherwood-Zahl
t	Zeit
Δt_F	Zeitspanne des Filtrationsintervalls
Δt_R	Zeitspanne des Rückspülintervalls
T	absolute Temperatur
Ta	Taylor-Zahl
v_F	spezifischer Filtratstrom
$v_{F,eff}$	effektiver spezifischer Filtratstrom
v_p	Geschwindigkeit einer Partikel

Symbol **Bedeutung**

\dot{V}	Volumenstrom
V	Volumen, Gesamtvolumen
V_H	Hohlräumvolumen
V_S	Feststoffvolumen
V_{RS}	rückgespültes, spezifisches Volumen
\dot{V}_z	umgewälzter (zirkulierender) Volumenstrom
w	Geschwindigkeit der Membranüberströmung
w_s	stationäre Sinkgeschwindigkeit
Z	Zirkulationszahl
δ	Grenzschichtdicke
ε	Porosität
ζ	Zetapotenzial
η	dynamische Viskosität
η_{Pu}	Pumpenwirkungsgrad
λ	Reibungsbeiwert
μ	Reibungskoeffizient
μ_L	Labyrinthfaktor
ν	kinematische Viskosität
π	osmotischer Druck
ρ	Dichte
σ	Oberflächenspannung
τ	Schubspannung, Wandschubspannung
φ	Benetzungswinkel

Indizes

D	Deckschicht
F	Filtrat
G	Gas
K	Konzentrat
M	Membran
P	Partikel
Po	Pore
S	Suspension
0	Beginn, Anfang (zeitlich)

Nicht im Verzeichnis aufgeführte Symbole werden im Text erklärt.

1

Mikro- und Ultrafiltration mit Membranen

1.1 Übersicht über die Membranverfahren

Eine Membran zur Stofftrennung ist ein flächenhaftes Gebilde, das zwei Phasen voneinander trennt und für bestimmte Stoffe oder Stoffgruppen durchlässig ist und für andere nicht (Abb. 1.1). Der Stofftransport durch Membranen ist demnach selektiv. Dadurch ist die Grundvoraussetzung für eine Stofftrennung erfüllt.

Die in der Technik hauptsächlich verwendeten synthetischen Membranen sind passiv, im Gegensatz zu den aktiven Membranen der belebten Natur. Beim passiven Transport durch eine Membran sind der Stofftransport und dessen Richtung an die Wirkung einer aufgeprägten treibenden Kraft gebunden. Die Art der treibenden Kraft sowie die Eigenschaften und Wirkungsmechanismen der Membran bestimmen das Membranverfahren. In Tab. 1.1 sind nach diesem Gesichtspunkt die bekannten technischen Membranverfahren charakterisiert.

Als treibende Kraft können eine Druckdifferenz, eine Konzentrationsdifferenz oder eine elektrische Potenzialdifferenz wirken. Die beiden Ersten lassen sich auf eine Differenz des chemischen Potenzials und in Verbindung mit der elektrischen Potenzialdifferenz auf eine Änderung des elektrochemischen Potenzials zurückführen. Bei der Membrananwendung können sich, beabsichtigt oder unbeabsichtigt, auch verschiedene treibende Kräfte überlagern. Dadurch kann der gewünschte Stofftransport durch die Membran verstärkt oder gehemmt werden, je nach Wirkrichtung der treibenden Kräfte.

Membranen, die feinste Partikeln oder Moleküle aufgrund ihrer unterschiedlichen Größe und Gestalt voneinander trennen (Siebeffekt), können als Membranen der ersten Generation angesehen werden. Der Membranwerkstoff spielt in diesem

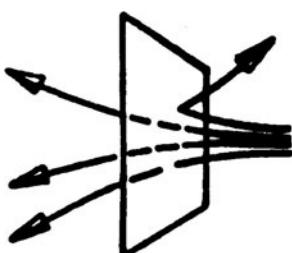


Abb. 1.1 Wirkprinzip einer Membran zur Stofftrennung.

Tab. 1.1 Membranverfahren zur Stofftrennung.

Trennprozess	Treibende Kraft	Phasen	Separations-mechanismus	Membrantyp
Mikrofiltration	Hydrostatische Druckdifferenz 0,2–5 bar	fl/fl	Siebmechanismus	Symmetrische und asymmetrische mikroporöse Membranen
Ultrafiltration	Hydrostatische Druckdifferenz 1–10 bar	fl/fl	Siebmechanismus	Asymmetrische mikroporöse Membranen mit dünner Trennschicht
Nanofiltration	Hydrostatische Druckdifferenz	fl/fl	Siebmechanismus und Donnan Exclusion	Asymmetrische mikroporöse Membranen mit dünner Trennschicht
Umkehrosmose	Hydrostatische Druckdifferenz 10–150 bar	fl/fl	Lösungs-/Diffusions-mechanismus	Asymmetrische Membranen mit dünner Trennschicht
Osmose	Konzentrations-differenz	fl/fl	Lösungs-/Diffusions-mechanismus	Symmetrische und asymmetrische Membranen
Dialyse	Konzentrations-differenz	fl/fl	Lösungs-/Diffusions-mechanismus	Sehr dünne symmetrische Membranen
Elektrodialyse	Elektrisches Feld	fl/fl	Donnan Exclusion	Kationen- und Anionen-Austau-schermembranen
Gasseparation	Partialdruck-differenz bis zu 80 bar	g/g	Lösungs-/Diffusions-mechanismus	Komposit- und asymmetrische Membranen mit dünner Trennschicht
Dampf-permeation	Partialdruck-differenz	g/g	Lösungs-/Diffusions-mechanismus	Asymmetrische Membranen mit dünner Trennschicht und Komposit-Membranen
Pervaporation	Partialdruck-differenz 0,001–1 bar	fl/g	Lösungs-/Diffusions-mechanismus	Asymmetrische Membranen mit dünner Trennschicht und Komposit-Membranen
Transmembran-destillation	Partialdruck-differenz 0,001–1 bar	fl/fl fl/g	Dampfdiffusion durch hydrophobe Membranen	Mikroporöse Membranen
Flüssigkeits-membran-Technik	Konzentrations-differenz	fl/fl	Lösungs-/Diffusions-mechanismus und Reak-tion mit einem Träger	Mikroporöse Membranen als Träger für ein organisches Lösungsmittel oder multiple Emulsion
Membran-absorption	Partialdruck-differenz	g/fl	Dampfdiffusion in Verbindung mit hydro-phoben Membranen	Mikroporöse Membranen

Fall im Hinblick auf die Trenneigenschaft eine untergeordnete Rolle. Die Trenneigenschaft der Membran wird hauptsächlich von ihrer porösen Struktur bestimmt. Für die Beständigkeit der Membran und ihren Einsatzbereich ist der Membranwerkstoff jedoch von Bedeutung. Membranen der ersten Generation werden zur Mikro- und Ultrafiltration eingesetzt. Die Membran ist in diesem Fall ein Filtermedium, das unter der Wirkung einer treibenden Druckdifferenz durchströmt wird. Zur Beschreibung der Vorgänge werden die Gesetze der Porenströmung angewendet, wobei auch die Ausbildung einer Ablagerungsschicht aus den abgetrennten Stoffen auf der Membran berücksichtigt wird.

Bei der Nanofiltration kommt hinzu, dass aufgrund der elektrischen Ladung an der Membran mehrwertige Ionen zurückgehalten werden und einwertige Ionen die Membran passieren. Dieser zusätzliche Trenneffekt rechtfertigt es, die Nanofiltration als eigenständiges Membranverfahren zu betrachten.

Membranen der zweiten Generation können gelöste Bestandteile eines Gemisches (Moleküle, Ionen, Atome) auch bei nahezu gleichen Abmessungen trennen. Ausschlaggebend dafür sind unterschiedliche Löslichkeits- und Diffusionseigenschaften innerhalb des Membranwerkstoffs. Die Wechselwirkungen zwischen den Bestandteilen eines Gemisches und dem Membranwerkstoff sind in diesem Fall für das Trennverhalten der Membran entscheidend. Typische Vertreter dieser Gruppe sind die Polymermembranen zur Umkehrosmose, zur Pervaporation und zur Gastrennung. Der Stofftransport durch die Membran wird im Fall einer Membranüberströmung mit den Gesetzen der Grenzschichtströmung und dem Lösungs-Diffusionsmodell beschrieben.

Bei Membranen der dritten Generation ist der selektive Stofftransport an eine Reaktion einer Komponente des Gemisches mit einer Trägersubstanz (Carrier) verbunden. Die chemische Potenzialdifferenz für die Reaktionsprodukte ist dabei als treibende Kraft für den Stofftransport durch die Membran verantwortlich. Die flüssigen Membranen zur Abtrennung von Metallionen oder zur Gasseparation sind hierfür Beispiele. Die als Membran wirkende Flüssigkeit kann z. B. im Porenraum einer mikroporösen Membran, wie sie zur Mikrofiltration verwendet wird, immobilisiert sein.

Bei der Transmembrandestillation wird mittels einer porösen Membran ein dünner Luft- bzw. Gasspalt zwischen zwei flüssigen Phasen realisiert, der den Stoffaustausch reguliert. Eine Voraussetzung dabei ist, dass die Membran nicht von den flüssigen Phasen benetzt wird. Eine Porenstruktur mit durchgehenden Poren und einer möglichst hohen Porosität ist von Vorteil. Der Stofftransport und seine Selektivität werden in diesem Fall durch das natürliche Verhalten der Stoffe an den Phasengrenzen und die Porenstruktur bestimmt.

Das Gleiche trifft auch auf die Membranabsorption zu. In diesem Fall wird eine mikroporöse Membran zur Realisierung großer und stabiler Phasengrenzen zwischen einem Gas und einer Flüssigkeit eingesetzt. Die dazu eingesetzten Membraneinheiten mit einer großen Membranfläche pro Volumeneinheit sorgen für einen stabilen und innigen Kontakt der beiden Phasen, so dass sie auch als „Membrankontaktoren“ bezeichnet werden.

Die beiden letztgenannten Membranverfahren sind im Übergangsbereich der Membrantechnik zur thermischen Trenntechnik angesiedelt. Die Mikro- und Ultrafiltration mit ihren mikroporösen Membranen, welche wie ein Filtermedium wirken, stellen den Übergangsbereich von der Membrantechnik zur konventionellen Filtertechnik dar.

In der Technik werden überwiegend feste Membranen aus verschiedenen Materialien eingesetzt. Es dominieren Membranen aus Polymeren, die kostengünstig in Form von Folien und Kapillaren (Hohlfasern) produziert werden. Insbesondere für die Ultra- und Mikrofiltration werden auch anorganische Membranen, z. B. aus Keramik oder einem Metall, angeboten. Sie kosten aufgrund der verwendeten Materialien.

Tab. 1.2 Einteilungskriterien für technische Membranen.

Einteilungskriterium	
Membran- struktur	<ul style="list-style-type: none"> a) • dicht (frei von Poren) <ul style="list-style-type: none"> • porös b) • symmetrisch (= gleichförmig über die Membrandicke) <ul style="list-style-type: none"> • asymmetrisch (= ungleichförmig über die Membrandicke) • geschichtet (Composite-Membran)
Membran- material	<ul style="list-style-type: none"> • organisch (Polymermembran) • anorganisch (Membran aus Metall, Glas, Keramik, Kohlenstoff)
Form	<ul style="list-style-type: none"> • flach • rohrförmig (Rohrmembran) • kapillarförmig (Kapillar- oder Hohlfasermembran)
Anwendungs- gebiet	<ul style="list-style-type: none"> a) • Membranverfahren (z. B. Ultrafiltrationsmembran, Dialysemembran, RO-Membran) b) • Anwendungsbereich (z. B. Membran zur Sterilfiltration, Öl/Wasser-Trennung, Weinfiltration, Gastrennung)

lien und der Herstellungsprozesse in der Regel ein Vielfaches von Polymermembranen. Sie werden daher dann eingesetzt, wenn ihre spezifischen Vorteile, insbesondere ihre höhere thermische und/oder chemische Beständigkeit, genutzt werden. In Tab. 1.2 sind mögliche Einteilungskriterien für technische Membranen aufgeführt.

Viele Bücher sind zur Membrantechnik erschienen. Die im Literaturverzeichnis aufgeführten beschreiben die Grundlagen und geben einen guten Überblick [1–10].

In der Natur treten Membranen als Trennschicht zwischen verschiedenen Bereichen innerhalb eines lebenden Organismus sowie zwischen dem Inneren des Organismus und dem Außenraum auf. Membranen umschließen biologisch aktive, in sich geschlossene Einheiten mit einem für die Funktion notwendigen einheitlichen Milieu. Beim sogenannten aktiven Transport kann ein Molekül auch gegen ein Konzentrationsgefälle transportiert werden. In diesem Fall wird jedoch chemische Energie, z. B. in Form von ATP (Adenosintriphosphat), abgerufen, um den Stofftransport zu bewerkstelligen. Zusätzlich zur Energieumwandlung ist der Stofftransport durch die Membranen oft auch mit einer Signalverarbeitung verbunden. Der Transport durch eine Membran der belebten Natur ist daher wesentlich komplexer als der, welcher bisher in der Technik genutzt wird. Die belebte Welt wäre ohne Membranen nicht existent. Ein lebender Organismus ist auch ein Membransystem, bei dem Stoff-, Energie- und Signalaustauschvorgänge energetisch sparsam und effektiv über Membranen betrieben werden.

1.2 Einordnung der Mikro- und Ultrafiltration

Mit der Mikro- und Ultrafiltration werden feinste Partikeln, kolloidale Inhaltsstoffe und/oder Makromoleküle aus flüssigen Gemischen abgetrennt. Dabei steht

- die Konzentrierung der abgetrennten Komponenten des Gemisches und/oder
- die Gewinnung der reinen Flüssigkeit oder
- beide Maßnahmen gleichzeitig

im Vordergrund.

Bei vielen Anwendungen wird auch eine Entkeimungs- oder Sterilfiltration gefordert, wobei mit der Mikrofiltration auch Gase filtriert werden.

Je nach der geforderten Trenngrenze kommt eine Mikro- oder Ultrafiltrationsmembran zur Anwendung. Die dazu verwendeten Membranen weisen eine poröse Struktur auf, welche Partikeln und/oder Moleküle aufgrund ihrer Größe und Gestalt abtrennen (Siebeffekt). Bei einer Filtration muss zusätzlich noch die Ablagerung der abgetrennten Stoffe auf oder in der Membran berücksichtigt werden. Die Zuordnung einer Membran zu einem Membranverfahren erfolgt aufgrund ihrer Trenneigenschaften, die im Fall der Mikro- und Ultrafiltration in der Regel auf Basis von Testfiltrationen ermittelt werden (s. Abschn. 3.4.6).

1.2.1 Die Mikrofiltration

Als Mikrofiltration (MF) werden Membranverfahren bezeichnet, deren Membranen partikelförmige Inhaltsstoffe im Größenbereich von 0,1 bis ca. 10 µm sicher abtrennen. Die Mikrofiltration stellt damit in Bezug auf die Trennwirkung den Übergang von der Membrantechnik zu den konventionellen Filtrationsverfahren dar (s. Abb. 1.2). Letztere werden in den Lehrbüchern der Verfahrenstechnik, ins-

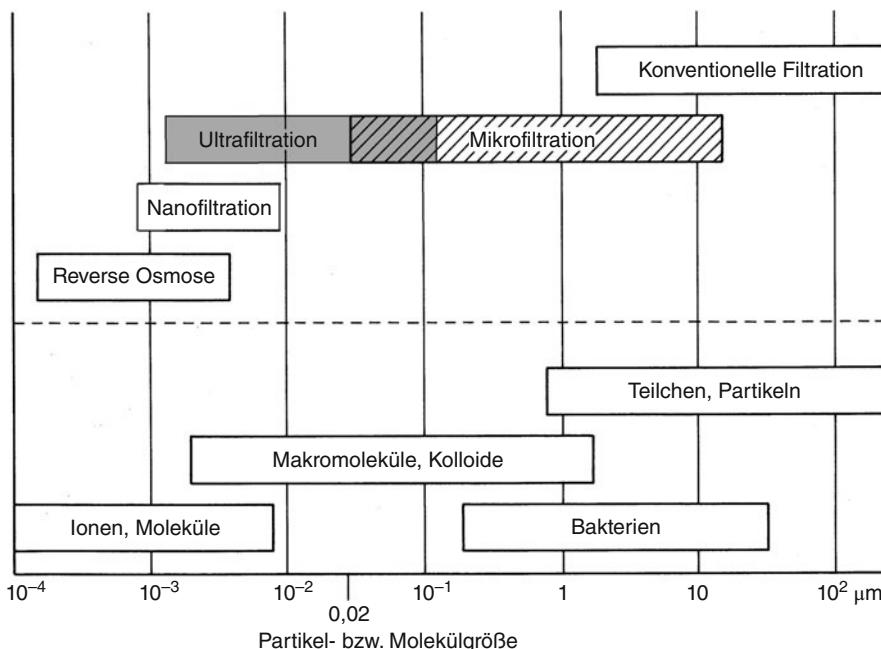


Abb. 1.2 Bereich der Trenngrenzen von Filtrations- und Membranverfahren.

besondere der mechanischen Verfahrenstechnik, und in den Handbüchern der Filtration behandelt (z. B. [11–15]).

Die meisten Membranen zur Mikrofiltration werden mit einer nominalen Porengröße (Nenn-Porengröße) von 0,1, 0,2 oder 0,4 μm angeboten (s. Abschn. 3.4.6). Es werden damit feinste Partikeln, Kolloide und emulgierte Tröpfchen sowie Mikroorganismen sicher abgetrennt. Eine bedeutende Anwendung von Membranen zur Mikrofiltration ist die Entkeimungs- bzw. Sterilfiltration. Die Druckdifferenz zur Filtration liegt meist im Bereich zwischen 0,5 und 2,5 bar.

Um einen Eindruck von der Größenordnung der Trenngrenze bei der Mikrofiltration zu vermitteln, sind in Tab. 1.3 Abmessungen verschiedener Partikeln und Gegenstände aufgeführt. Die Anwendungen der Mikrofiltration können je nach Gehalt an abtrennbaren Stoffen in der zu filtrierenden Flüssigkeit in folgende Klassen eingeteilt werden:

- Abscheidung und Konzentrierung von feinsten Partikeln, Kolloiden und Mikroorganismen (oft zusammengefasst unter der Bezeichnung „Trubstoffe“) aus Flüssigkeiten mit einem relativ hohen Anfangs-Trubstoffgehalt (einstufige Filtration),
- Abscheidung von Trubstoffen aus weitgehend vorgeklärten Flüssigkeiten (Nachfiltration, Endfiltration),
- Abtrennung von Partikeln oder Mikroorganismen aus geklärten Lösungen, die bereits überwiegend den Anforderungen genügen (Polizei- oder Sicherheitsfiltration).

Für die einzelnen Aufgabenstellungen wurden unterschiedliche Ausführungsformen und Verfahrensweisen entwickelt, welche in Abschn. 1.3 beschrieben werden.

Membranen zur Mikrofiltration weisen eine poröse Struktur mit einer möglichst engen Porengrößenverteilung auf, die den Anforderungen im Hinblick auf Festigkeit und Durchströmbarkeit gerecht wird. Als optimal erweisen sich offene Schaumstrukturen aus Polymeren, mit einer hohen Porosität (meist > 70 %). Sie werden überwiegend mit einem Phasen separationsverfahren in Form von Folien oder Kapillaren hergestellt (s. Abschn. 3.2.1). Die Porenstruktur ist in vielen Fällen über die Dicke der Membran nahezu gleichförmig, so dass man von einer symmetrischen Membran sprechen kann. Auch Membranen aus Keramik sind häufig anzutreffen. Bei ihnen wird auf einem porösen Grundkörper eine dünne „trennaktive“ Schicht aufgebracht. In einem solchen Fall liegt eine asymmetrische Membran vor. Weitere Verfahren zur Herstellung von Mikrofiltrationsmembranen werden in den Abschn. 3.2 und 3.3 beschrieben.

1.2.2 Die Ultrafiltration

Mit Membranen zur Ultrafiltration (UF) werden molekular gelöste Stoffe und Makromoleküle abgetrennt. Die jeweilige Trenngrenze einer Ultrafiltrationsmembran liegt im Bereich der molaren Masse von ca. 2000–500 000 kg/kmol. Die Masse und Morphologie der Moleküle im Verhältnis zur Porengröße der Membran sind für den Trenneffekt entscheidend. Die jeweilige Trenngrenze einer Membran wird experimentell mit Testlösungen ermittelt (s. Abschn. 3.4.6). Die Trenngrenze einer Mem-

Tab. 1.3 Abmessungen verschiedener Partikeln und Gegenstände.

Partikel/Gegenstand	Größe
Partikelgröße von Strandsand	100–1200 μm
Spray-Aerosole	50–500 μm
Durchmesser eines menschlichen Haares	40–150 μm
Kleinste mit dem Auge sichtbare Partikeln	ca. 30 μm
Unkrautpollen	10–100 μm
Tonpartikel	10–500 μm
Myzelien der Biotechnologie	5–500 μm
Rote Blutkörperchen	7,5 μm
Lungengängige Staubpartikeln	< 5 μm
Hefezellen	4–30 μm
Mehlstaub	1–80 μm
Bakterien	0,4–10 μm
<i>E. coli</i>	0,8–2 μm
Bruchstücke der Zellhomogenate der Biotechnologie	0,2–1 μm
Fällprodukte	0,1–50 μm
Farbpigmente	0,1–8 μm
Pyrogene	< 0,03 μm
Viren	0,02–0,3 μm
Kolloide, Kolloidsysteme	0,001–1 μm

bran zur Ultrafiltration wird üblicherweise als „Nominal Molecular Weight Cut-off (NMWC)“ in der Einheit „Dalton“ angegeben. Es handelt sich dabei um eine molekulare Masseneinheit. Ihr Wert ist auf $\frac{1}{12}$ der Masse eines Atoms des Kohlenstoff-Isotops ^{12}C festgelegt. Die Einheit „Dalton“ (Einheitenzeichen: Da) entspricht der „unified atomic mass unit“ (Einheitszeichen u) und ist nach dem englischen Naturforscher John Dalton benannt.

Die Trenngrenze im molekularen Bereich erfordert Porenabmessungen im Bereich von ca. 2–20 nm. Diese kleinen Abmessungen sind mit einem hohen spezifischen Durchströmungswiderstand verbunden. Eine technisch ausreichend hohe Durchströmung der Membran wird dadurch erreicht, dass asymmetrische Membranen verwendet werden. Bei ihnen wird die Trenngrenze von einer sehr dünnen „trennaktiven“ Schicht bestimmt, die mit der zu trennenden Lösung in Kontakt steht. Diese eigentliche Membran weist oft nur eine Dicke von ca. 1 μm auf. Unter dieser dünnen „trennaktiven“ Schicht befindet sich in der Regel eine großporige Stützstruktur. Entsprechende Strukturen aus Polymeren können mit dem Phasen-separationsverfahren hergestellt werden (s. Abschn. 3.2.1). Die Druckdifferenz liegt bei einer Ultrafiltration oft im Bereich zwischen 2 und 12 bar (Abb. 1.3).

Keramische Membranen zur Mikrofiltration können durch das Aufbringen weiterer immer feiner werdender dünner Schichten zu Ultrafiltrationsmembranen weiterverarbeitet werden. Auch Polymermembranen zur Mikrofiltration können als Stützstruktur für eine Ultrafiltrationsmembran dienen, indem man sie entspre-

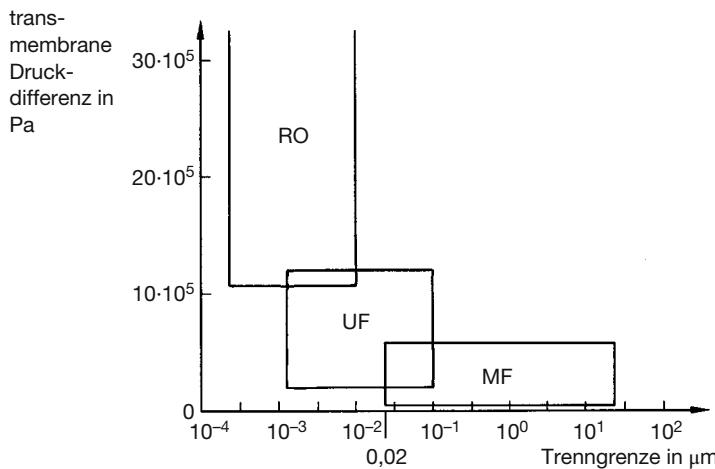


Abb. 1.3 Einordnung der Ultra- und Mikrofiltration bzgl. Betriebsdruck und Trenngrenze.

chend beschichtet. Es entsteht dann eine sogenannte Composite-Membran, die in der Regel aus zwei oder mehreren Schichten besteht, die sich in ihrer Struktur unterscheiden. Oft bestehen die Schichten aus verschiedenen Materialien. Eine gröbere Struktur dient dabei als Träger für eine sehr dünne Schicht, welche die Funktion der eigentlichen Stofftrennmembran übernimmt. Der Übergang von der Ultra- zur Mikrofiltration ist fließend.

Da Ultrafiltrationsmembranen in ihrer Trenngrenze im molekularen Bereich weitgehend an einzelne Stofftrennprobleme angepasst werden können, sind ihre Anwendungsmöglichkeiten besonders vielfältig. Sie werden zur Fraktionierung, Konzentrierung und Reinigung von molekularen flüssigen Gemischen in der Chemie, Biotechnologie, Pharmazie sowie der Lebensmittel- und Umwelttechnik, aber auch zur Wasseraufbereitung eingesetzt.

Unterhalb der Ultrafiltration ist die Nanofiltration angesiedelt. Die Trenngrenze der dafür verwendeten Membranen liegt überwiegend im Bereich einer Molekülmasse von 200 bis 500 Da. Hinzu kommt eine Ionenselektivität derart, dass aufgrund von elektrischen Ladungsträgern auf bzw. in der Membran mehrwertige Ionen überwiegend zurückgehalten werden und einwertige Ionen die Membran weitgehend passieren. Diese spezielle Eigenschaft der Membran führte dazu, dass sich die Nanofiltration als eigenständiges Membranverfahren etablierte, so z. B. zur Rückhaltung mehrwertiger Anionen bei der Enthärtung von Trinkwasser, zur Entlastung von nachgeschalteten Ionenaustauschern oder Umkehrosmoseanlagen sowie zur Rückgewinnung von Säuren aus Beizbädern. Die Nanofiltration wird üblicherweise mit einer transmembranen Druckdifferenz im Bereich von 20–50 bar betrieben.

- Permeabilität 187
 Kapillarmembranen 68
 Permeabilitätskoeffizient 56
 Permeation 64, 221
 Permeationsrate 25
 Permittivitätszahl 96
 Pfeffer'sche Zelle 20
 Pflichtenheft 374
 Phaseninversionsverfahren 55
 Phasenkolloid 106
 Phasenseparation 40, 41
 Phasenseparationsverfahren 6
 Phosphatierbad 334
 Phosphorsäure 354
 Pilotversuch 372, 376
 Pin holes 40
 Pinch-Effekt 207
 Plasma-Kryofiltration 300
 Plasmapherese 27, 299
 therapeutische 300
 Plattenmodul 179, 187, 327
 Plattenwärmeaustauscher 179
 Plugging-Index (PI) 323
 Point-of-Use-Filtration 322, 339
 Polizeifilter 338
 Polyamid 39
 Polyethersulfon 260
 Polymer 24, 81
 fluoriertes 352
 hydrophiles 39
 temperaturbeständiges 39
 Polymerauswahl 37
 Polymerfilm, teilkristalliner 50
 Polymerfolie 50
 Polymerkonzentration 47
 Polymermembran 4, 15, 59, 247, 261, 347
 halbsynthetische 21
 Herstellung 37
 synthetische 24
 Polypropylen 81, 83, 183, 352
 Polysaccharide 304
 Polystyrol-Testuspension 76
 Polytetrafluorethylen 39, 50
 Polyvinylpyrrolidon 48
 Porenbildner 40
 Poredurchmesser 65
 Porengröße 6
 Porengrößenverteilung 89
 Porenströmung 2
 Porenstruktur 59, 83
 Porosimetrie 93
 Porosität 145
 Positive charge filter 97
 Positivliste 161
 Potenzialdifferenz 3
 Precoat-Filtration, dynamische 225
 Preisindex 381
 Produktionstechnik 332
 Produktvermischung/-übertragung 351
 Proteinadsorption 164, 300
 Proteindurchtritt 315
 Prozessfähigkeit 150
 Prozessintegration 340
 Prozessintensivierung 340
 Prozesswässer 317
 Prüflebensmittel 162
 Prüfzertifikat 167
Pseudomonas-diminuta-Suspension 285
 Pulveraktivkohle 371
 Pumpe-Düse-Filtersystem 237
 Pumpenkennlinie 147
 Punkt, isoelektrischer (IEP) 108
 Pyrogenabtrennung 288
 Pyrogenfreiheit 164
- Q**
 Qualitätsaudit 169
 Qualitätsmanagement 151
 Qualitätsmanagementsystem 166
 Qualitätsprüfung 168
 Qualitätssicherung 166
 Quecksilberporosimetrie 93
 Quecksilber-Strahler 322
 Querstromfiltration 10, 261, 273, *siehe auch* Crossflow-Filtration
- R**
 Raster-Kraft-Mikroskop 63
 Rauigkeitskennwert 352
 Reaktionsführung, kontinuierliche 294
 Recycling von Schleifereiwasser 335
 Redispergierung 247
 Reduktionsfaktor, logarithmischer 289
 Reibungsbeiwert 188

- Reibungskoeffizient 210
 Reibungszahl 185
 Reifetrübung 302
 Reinigungsschemikalien 354
 Reinigungslösung 315
 - gestapelte 359
 - verlorene 359
 Reinigungsmittel
 - alkalische 354
 - Säure 354
 Reininstwasser 163, 320, 322
 Reinwasser 320
 Reynolds-Zahl 109, 185, 205, 238
 Rheopexie 122
 Ringspaltfilter 255, 257
 Rohmilch 313
 Rohrbündelwärmeaustauscher 278
 Rohrmembran 35, 48, 53, 59, 183, 234
 Rohrreibungszahl 186, 238
 Rohrströmung 185, 209
 Rohsaftreinigung 311
 Rohstoffe, nachwachsende 297
 Rohwasser 319
 Rohwasservorbehandlung 321
 Röntgen-Mikrotomographie 63
 Rotor 258
 Rotostream 253
 Rückgewinnungsrate 174
 Rückhalterate 71
 Rückspüldruck 265
 Rückspültechnik 129
 Rückspülung 184, 237, 304, 334
 - autodynamische 253, 273
 - mit Membranüberströmung 266
 - ohne Membranüberströmung 266
 - periodische 265
 Rückströmung 188
 Rücktransport
 - diffusiver 215
 - hydrodynamischer 215
 Rührorgan 247
 Rührzellen 79, 245
- S**
 Salpetersäure 354
 Salzfracht 331
 Sanitation 361
- Sauerstoff, aktiver 363
 Säugerzellkulturen 297
 Säure 364
 Sauter-Durchmesser 125
 Scaling 14, 278, 319
 Schaber 260
 Schallsignal 154
 Scheibenfilter 137
 Schergefälle/Scherrate 115
 Scherkraftaktivierung 296
 Scherspaltfilter 243
 - mit axialem Spalt 254
 - mit radialem Spalt 246
 Schicht, trennaktive 61
 Schichtenfiltration 309
 Schleifereiwasser 335
 Schleppkraft 213
 Schlicker 55
 Schmidt-Zahl 205
 Schmutzaufnahmekapazität 35, 142, 148
 Schubspannung 115
 Schüttschichtfilter 319
 Schwarmsedimentation 110
 Schwefelsäure 355
 Sedimentationsbecken 327
 Sekundärströmung 237
 Semi-Batch-Prozess 293
 Sensor 294
 - optischer 325
 Separationsverfahren 13
 Serumfiltration 149
 Shere-induced diffusion 206
 Shriver-Eindicker 182
 Sichelfaltung 140
 Sicherheitsfiltration 9, 135, 142
 Sicherheitsstufen, biologische 287
 Siebeffekt 1, 72, 78
 Silt Density Index (SDI) 323
 Single-Pass-Crossflow-Filtration 11, 219, 233
 Single-Use-Technik 290
 Sinkgeschwindigkeit 109
 Sintern 53
 Situationsanalyse 374
 Skin Layer 288
 Sojaprodukte 315

- Sol 55
 Spacer 179
 Spin-Filter 254
 Spinnlösung 26, 40
 Spinodale 47
 Spiralwickel 48
 Sprödbruch 98
 Standzeit 148
 Stärkeindustrie 312
 Starling-recirculation flow 188, 357
 Starrkörperwirbel 252
 Stator 254
 Sterilfiltration 28, 72, 88, 136, 150
 Sterilisation 165, 347, 362
 durch Hitze 365
 Validierung 367
 Sterilisationsverfahren 284
 Stern-Schicht 95
 Stoff
 abtrennbarer 177
 dispergierter 198
 Stoffaustauschapparate 179
 Stoffbilanz, differentielle 190
 Stoffsystem 105
 kolloiddisperses 105
 viskoelastisches 122
 Stofftransport 1
 Stofftransportkoeffizient 204
 Stofftrennung 1, 12, 26, 56, 332
 Kosten 14
 Stokes-Bereich 109
 Stokes-Durchmesser 111
 Stokes-Einstein-Gleichung 111, 206, 216, 217
 Stokes-Kraft 213
 Störstoffe 339
 Streulicht 325
 Strömung
 laminare 116, 185
 turbulente 185
 Strömungsgeschwindigkeit 177, 235, 244
 Strömungsgrenzschicht 209
 Strömungspotenzial 95
 Strömungssimulation 240, 261
 Strömungswiderstand
 der Deckschicht 122
 spezifischer des Haufwerks 123
 Struktur, gesinterte 53
 Submersverfahren 291
 Substanz, polymere 21
 Sulfate 318
 Suspension 75
 monodisperse 76
 polydisperse 77
 stabile 107
- T**
- Tangential Flow Filtration (TFF) *siehe* Crossflow-Filtration
 Tankentleerung 287
 Tannenbaumstruktur 235
 Tauchlackierung, elektrophoretische 337
 Taylor-Görtler-Wirbel 250
 Taylor-Wirbel 255
 Taylor-Zahl 254
 Tellerseparatator 309
 Temperaturbeständigkeit 99, 166
 Temvern 50
 Tenside 84, 355
 kationaktive 363
 Tensidmolekül 85
 Testfiltration mit Suspensionen 75
 Testflüssigkeit 88
 Testorganismen 72
 Thermoplaste 53
 Tiefenfilter 288
 Tiefenfiltration 9, 308
 Titandioxid-Suspension 122
 Toms-Effekt 116
 Track etching *siehe* Kernspurverfahren
 Transmembrandestillation (TMD) 3, 331
 Transmembrandruck 272
 Transport, aktiver 4
 Trenngrenze 6, 71, 78, 221, 289
 Trennkurve 78
 Trennproblem 374
 Trennzelle 182
 TRF-System (Tubular-Rotor-Filter) 258
 Trinkwassergewinnung 25, 317
 aus Abwasser 329
 Trinkwasserverordnung 317

Trockenblasen 342
 Trubstoffe 6, 307
 Trübungsmessung 325
 Tuberkulose 28
 Turbulenzpromotor 182, 187

U

Überströmgeschwindigkeit 221, 304
 Überströmung 10
 Ultrafeinfilter 23
 Ultrafiltration 4, 6, 16, 26, 43, 114, 129, 171, 177, 322
 Anwendungsbereiche 281
 Projektbearbeitung 373
 Ultrafiltrationsmembran 7, 77
 Ultraschall, überlagerter 276
 Ultraschallschweißen 49
 Umkehrosmose 25, 43, 112, 319, 323, 331, 339
 Umwegfaktor 125
 Umweltschutz 16
 produktionsintegrierter 332
 Umwelttechnik 332
 Urananreicherung 31
 Uranisotop 31
 UTP-Betriebsweise 221, 315

V

Vakuumfiltration 342
 Vakuumlaborfilter 137
 Validation Guide 151, 161, 285
 Validierung 168
 von Membranfiltern 150
 Van der Waals'sche Bindungskraft 220
 Van-der-Waals-Kraft 107, 164
 Van't-Hoff-Gesetz 20, 114
 Verfahrensauswahl 369
 Verfahrensvarianten 378
 Verstrecken 50
 Verstreckungsbruch 98
 Versuche, experimentelle 371
 Verunreinigung 16
 Verzuckerung 312
 Vibrating Membrane Filtration (VMF) 260
 Viskosität 20, 179
 kinematische 116
 Volumenporosität 59

Volumenstrom 194
 Vorfiltermedium 148
 Vorfiltration 135

W

Wandschubspannung 207, 239, 249
 Wärmebehandlung 48
 Waschen des Feststoffes 198
 Waschmittelzufuhr, kontinuierliche 200
 Wasseraufbereitung 316
 Wasseraufnahme 101
 Wasserdampf 366
 Wassereindringdruck 80
 Wassereindringtest 160
 Wasserfiltration 233
 Wasserkreislauf 338
 Wasserrecycling 236, 336, 338
 Wasserstoffperoxid 363
 Wechselwirkungsenergie 107
 Weinfiltration 127
 Weinklärung 302
 Weinschönung 303
 Weissenberg-Effekt 122
 Werkstoffe, produktberührende 351
 Wickeldorn 48
 Wickelmodul 182, 187
 Wickelriemen 50
 Widerstandsbeiwert 185
 Windkessel 271
 Wirtschaftlichkeit 379

Z

Zähigkeitskraft 254
 Zellrückführung 296
 Zellstoffherstellung 338
 Zellwaschung 292
 Zentralrohr 182
 Zentrifugalkraft 254
 Zentrifugalpumpe 147
 Zentrifugation 294
 Zero Liquid Discharge (ZLD) 330
 Zetapotenzial 95, 108, 220
 Zirkulationszahl 172
 Zuckergewinnung 311
 Zugversuch 97
 Zyklonmodul 239, 262
 Zylinder 254