

L. Michalowsky

Membrantechnik, Stand und Perspektive*

1. Trennverfahren als Bestandteil innovativer Technologien

Die rasche Entwicklung der Umweltverfahrenstechnik, der Biotechnologien, neuer chemischer Synthesen, neuer Verfahren der Lebensmittelbranche, die neuen gesetzlichen Bestimmungen zur Wassereinleitverordnung und der neuen TA-Luft vom 1.1.1995 über die weitere Limitierung der Emission von Schadstoffen in die Atmosphäre erfordern in zunehmendem Maße leistungsfähige Trenntechnologien für die Stofftrennung in allen Aggregatzuständen. Dies erklärt den volkswirtschaftlich hohen Stellenwert der weitweiten Förderprogramme zur Weiterentwicklung der Membrantechnologien. Die Stofftrennung besitzt in den Naturwissenschaften und in der Technik, insbesondere über die bergmännischen Gewinnungsverfahren für Rohstoffe sowie die mechanische, thermische und chemische Verfahrenstechnik, eine über Jahrhunderte bestehende Tradition. Das betrifft unter anderem die bekannten Verfahren der Sedimentation, der Flotation, der Filterung, der fraktionierten Destillation und der Verdampfung von Stoffgemischen. Die Reinststoffchemie von Gasen, Flüssigkeiten und Feststoffen war in der Neuzeit Ausgangspunkt für die Entwicklung effektiver Trenntechnologien im molekularen und atomaren Bereich und eine wichtige Voraussetzung für die Realisierung der Technologien der Mikroelektronik. Die Stofftrennung konzentriert sich gegenwärtig auf folgende Grundprozesse:

- Trennung von Gasgemischen
- Trennung von Flüssigkeitsgemischen
- Trennung von Gas-Flüssigkeitsgemischen
- Trennung von Feststoff-Gasgemischen
- Trennung von Feststoff-Flüssigkeitsgemischen
- Trennung von Stäuben

* Vortrag, gehalten vor der Klasse Naturwissenschaften der Leibniz-Sozietät am 15. Juni 1995

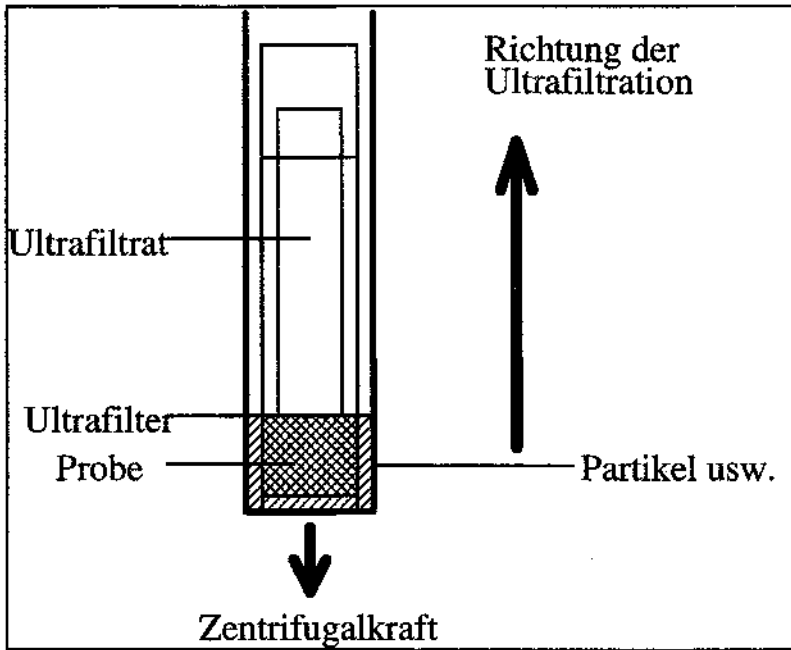


Bild 1: Prinzip der Zentrifugaltrennung

Der Stofftrennung nach den Methoden der Membrantechnologien liegen beispielsweise Dimensionsunterschiede der zu trennenden Partikel, Moleküle oder Atome, Gewichtsunterschiede zwischen den Bestandteilen von Gemischen, Ladungsunterschiede zu trennender Stoffe, Löslichkeitsunterschiede oder Unterschiede in der magnetischen Suszeptibilität zugrunde.

Bild 1 beinhaltet das Schema einer Zentrifugalkrafttrennung, wobei der Trenneffektivität die Gewichtsunterschiede der zu trennenden Partikel zugrundeliegen. Bild 2 beinhaltet das Schema der Abtrennung von Kochsalz aus wässrigen Lösungen über eine poröse Trennwand unter hydrostatischem Druck (Umkehrosmose). Der Porendurchmesser $2t$ bestimmt dabei die Größe der passierfähigen Partikel (im Beispiel das Wassermolekül) und damit die Trenngröße.

Die Klassifikation der Vielfalt der Filtrationslösungen auf der Grundlage von Membranen hat zu folgenden Einteilungen geführt:

- Mikrofilter
- Ultrafilter oder Nanofilter

mit klarem Bezug auf die Teilchentrenngröße.

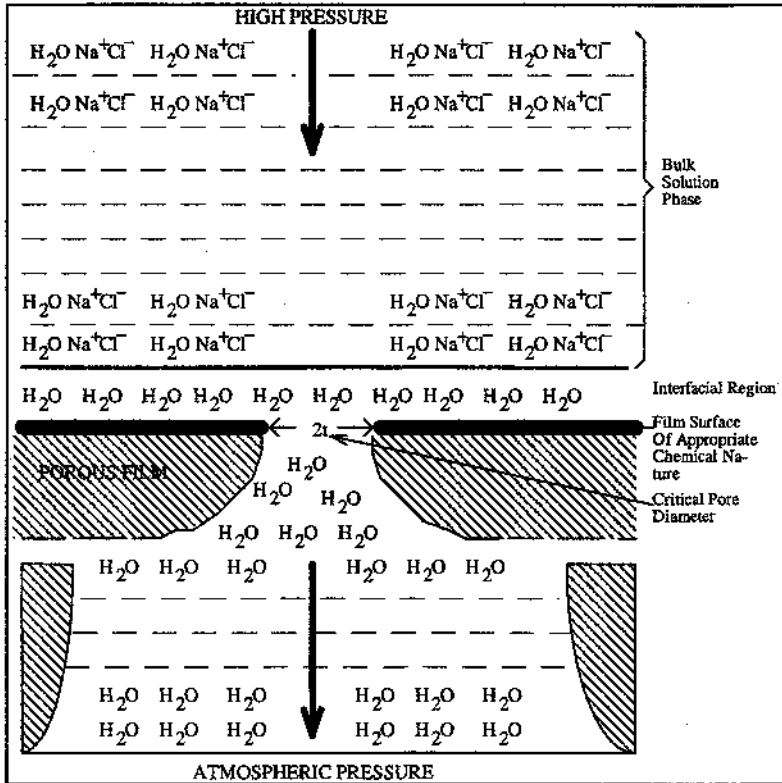


Bild 2: Stofftrennung an einer porösen Wand, Beispiel Kochsalz / Wasser

Die Trenneffektivität von Membranen beruht entweder auf ihrer Porosität, Porengröße bzw. den Porenkanaldurchmessern oder auf der Semi-permeabilität dünner Schichten. Von porösen Membranfiltern wird gesprochen, wenn der Poren- bzw. Porenkanaldurchmesser größer oder gleich 1 Mikrometer beträgt. Nichtporöse oder dichte Membranen werden auf der Basis von Polymerschichten aufgebaut, deren Schichtdicke ca. 1 Mikrometer beträgt. Träger von Polymermembranen sind in der Regel poröse Folien gleicher oder ähnlicher Zusammensetzung wie die Membranschicht. Die Membranschichten müssen für eine oder mehrere

Lösungskomponenten semipermeabel sein. Zur Erhöhung der Trenneffektivität von Polymermembranen für Lösungsgemische mit unterschiedlichen Partikeldurchmessern werden grundsätzlich Filter für die Abscheidung grober Partikel vorgeschaltet. Gewickelte Membranfilter und Hohlfaserpakete (wichtiges Anwendungsgebiet: Dialyse) besitzen eine hohe Trennwirkung. Tabelle 1 beinhaltet eine Übersicht zu realisierbaren Trennverfahren in Abhängigkeit von der Partikelgröße (MWCO: Molecular Weight Cut Off) nach einer Zusammenstellung des Unternehmens Sartorius/Göttingen, einem der bedeutenden Marktführer für die Membranfiltrationstechnik.

Die Trenneffektivität handelsüblicher Ultrafilter auf der Basis poröser Cellulosetriacetat- und Polysulfonschichten beinhaltet die Tabelle 2.

Wichtige Anwendungen der Membrantechnologien im Bereich der innovativen Technologien betreffen:

- Reinigungsfiltration von Lösungsmitteln
- Wertstoffgewinnung aus Flüssigkeiten
- Kühlmittelreinigung von Kompressionsanlagen
- Schmiermittelreinigung bei Maschinen mit Schmiermittelumlauf
- Dehydrierung von Kohlenwasserstoffen
- Gastrenntechnik einschließlich Luftzerlegung
- Kristallisation von speziellen Spezies in Flüssigkeiten auch unter Nutzung der Umkehrosmose
- Klarfiltration in der Getränkeindustrie
- Membran-Trinkwasseraufbereitung
- Meerwasserentsalzung
- Blutdetoxikation, Blutgasanalysetechnik
- Membranen für die Hochdruckflüssigkeits-Chromatographie
- Trennanlagen für die Erdgasaufbereitung und Sauergasreinigung
- Chlor-Alkali-Elektrolyse
- Aufkonzentrierung von PVC-Dispersionen, Caprolaktamen, Enzymen, Hefen, Molkeprodukten
- Eiweiß- und Milchkonzentrierung für die Käse- und Milchprodukterzeugung
- Saft-, Bier- und Weinfiltration
- Reinigung und Aufkonzentrierung von Rohpflanzenölen

Tabelle : 1 Übersicht zu Membran-und Ultrafiltern

Übersicht: Membran- und Ultrafilter, Trennbereiche									
Grobe Partikel		feine Partikel		Kolloide			Liposome		
Hefen/Schimmelpilze			Bakterien			Viren		Pyrogene	
Zellen						Proteine		Peptide	Salze
8 µm	3 µm	0,8 µm	0,65 µm	0,45 µm	0,2 µm	0,1 µm	300.000 D MWCO	20.000 D MWCO	5.000 D MWCO
Membranfilter					Ultrafilter				

MWCO: Molekulare Weight Cut Off (Angaben nach Sartorius)

Tabelle 2: Rückhaltequoten von Ultrafiltern

Rückhaltequoten in % für Celluloseacetat- und Polysulfonfilter-Ultrafilter

Ultrafilter		Celluloseacetat-Ultrafilter			Polysulfon-Ultrafilter	
Substanz	Molekulargewicht	5.000	10.000	20.000	10.000	30.000
MWCO		MWCO	MWCO	MWCO	MWCO	MWCO
Dextran Blau	2.000.000					99,5%
γ-Globulin	169.000					99,0%
Aldolase	142.000			98,0%		
Hexokinase	100.000			98,0%		
Albumin	67.000		98,0%	98,0%	99,5%	98,0%
Trypsin	24.000			98,0%		
Myoglobin	17.000		98,0%	95,0%	99,0%	
Cytochrom C	12.000	98,0%	93,0%	60,0%		
Insulin	5.733	90,0%	74,0%	52,0%		
Bacitracin	1.400	70,0%				
Saccharose	342	20,0%				

Versuchsbedingungen:

- 25 mm Ultrafilter in einer Rührzelle bei 1 bar (außer 5000 D Cellulosetriacetat: 4 bar)
- Aufkonzentrierung von 10 ml einer 0,1%igen Lösung auf 0,1 ml und Bestimmung der Gesamtsubstanz in dem Ultrafiltrat nach Angaben von Sartorius
- Molekulargewichte stellen ca.-Werte dar

2. Problemstellungen für die Filtrations- und Membrantrenntechnik

Die Weiterentwicklung der Membrantechnologien wird sich vordergründig an den Verfahrensbedürfnissen der Reinststoffchemie, der Umweltschutztechnik, der Biotechnologie, der Pharma- und Lebensmittelindustrie orientieren, wobei die kernphysikalischen Trennverfahren einer gesonderten Bewertung bedürfen, auf die hier nicht eingegangen werden soll.

Zu trennende Stoffgemische werden in der Filtrationstechnik als Retentate und die selektiv durch das Filter hindurchgetretenen Gemischbestandteile als Permeat bezeichnet. Für die Auslegung von Membranfiltern sind folgende Betriebsparameter von besonderer Bedeutung:

- Retentat-Fördermenge m^3/h
- Retentat-Betriebsflußgeschwindigkeit m/s
- Retentat-Betriebsdruck bar
- Retentat-Betriebstemperatur $^{\circ}C$
- Retentat-Betriebsabreicherungsmenge (Permeatmenge als Flux)
- Retentat- Betriebsrückstand (kleinstes Rückstandsvolumen)
- Rückspül- und Sterilisierbarkeit
- Preis Permeat / Stunde

Die Trenneffektivität und Trenngröße handelsüblicher Ultrafilter auf der Basis dünner Cellulosetriacetat- und Polysulfonschichten wurden bereits in Tabelle 2 dargestellt. Poröse Membranen werden auf der Basis von Metallen oder Keramiken hergestellt, deren Porensystem mit Hilfe spezieller Zusätze (Porentreiber) bzw. Technologien der unvollständigen Dichtsinterung von Pulvern eingestellt wird.

Tabelle 3 beinhaltet eine Übersicht zum Zusammenhang zwischen Porengröße, Trennverfahren und wichtigen Anwendungen für Keramikmembranen.

Tabelle 3 : Anwendungen für Membranfilter auf keramischer Basis

Porengröße	Verfahren	Applikation
0,1-5 μ m	Mikrofiltration	Abwasseraufbereitung Klarfiltration von Getränken
0,005-0,1 μ m	Ultrafiltration	Protein-Rückgewinnung, native Fettaufbereitung
0,002-0,2 μ m	Gastrennung mit niedrigem Trennfaktor	UF ₆ -Isotopentrennung zur Anreicherung von Kembrennstoffen
0,002 μ m	hochselektive Gastrennung	O ₂ /N ₂ -Trennung
0,001-0,005 μ m	Pervaporation	Alkohol/Wasser-Trennung Kohlenwasserstoffabtrennung in Flüssigkeiten
0,002-0,02 μ m	Membranreaktor	Dehydrierung durch Oxidationsprozesse

Für die Stofftrennung mit Hilfe von Membranen können folgende, die Trenneffektivität verbessernde physikalische Prinzipien genutzt werden:

- uniaxialer Druck auf das zu trennende Produkt
- Cross flow-Trennung an porösen Rohrwandungen (siehe Bilder 3 und 4)
- Kapillardruck
- Sedimentation (siehe auch Bilder 2 und 4)
- Zentrifugalkraft (siehe auch Bild 1)
- Vakuumfiltration
- Osmose und Umkehrosmose
- Elektrophorese
- Ionenaustausch (Anionen- und Kationenaustauschmembranen)
- An- und Kationenleitung in Festelektrolyten
- Trennkaskaden, aus Filtern unterschiedlicher Trenngröße aufgebaut
- Magnetische Separation

Hohe Trenneffektivitäten werden heute mit Zeolithen erreicht, die bei den chemischen Synthesen, insbesondere in Verbindung mit den Erdöltechnologien über die Dotierung von Oxiden der Seltenerdmetalle die Prozeffektivität bestimmen. Anzumerken ist:

- Trennprozesse an Membranen erfordern keine Phasenübergänge
- und ermöglichen Energieeinsparungen bis zu 80% im Vergleich zu konventionellen Verfahren

3. Aufbau von Membranfiltern

Der Aufbau von Membranfiltern ist von der Auswahl der Trennschichten nach den Klassifikationsmerkmalen "porös" oder "nichtporös" abhängig. Bei porösen Trennschichten oder Membranen kann die notwendige Stütz- oder Trägerfunktion durch das Membranmaterial (Keramik oder Metall) direkt übernommen werden. Zur Vergrößerung der effektiven Membranoberfläche werden Mehrlochanordnungen nach Bild 5 oder Wabenanordnungen nach Bild 6 bevorzugt.

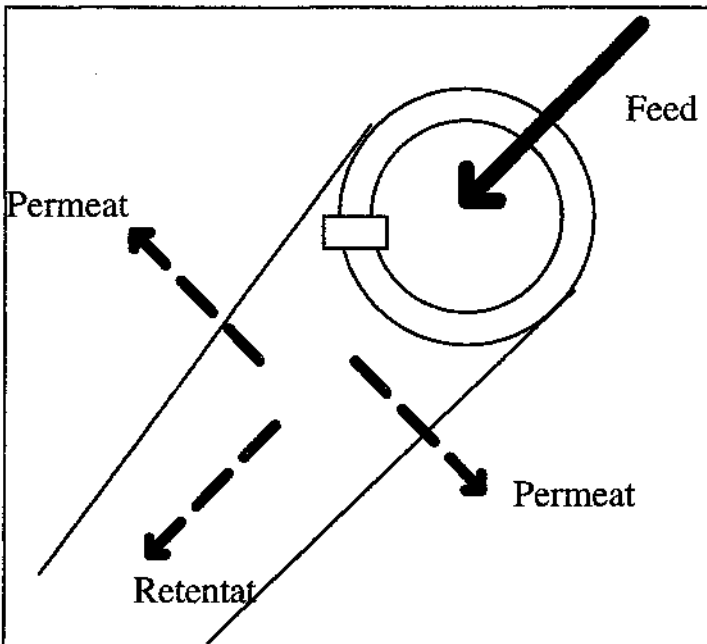


Bild 3: Prinzip der Cross Flow Filtration

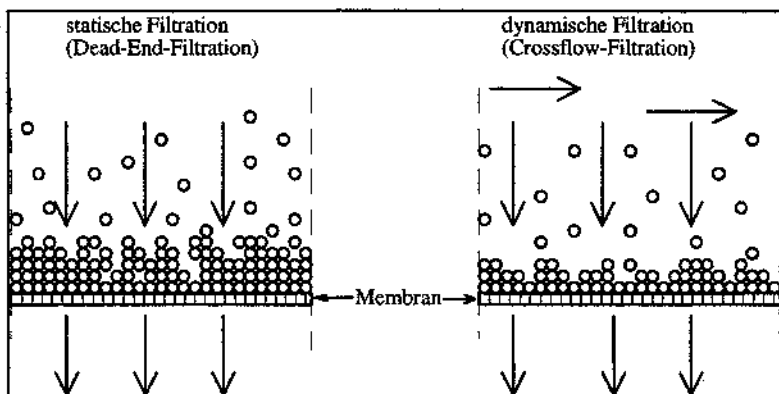


Bild 4: Prinzip der statischen und dynamischen Filtration

Bei nichtporösen Membranfiltern übernimmt eine dichte dünne Polymer-schicht von ca. 1 μm Schichtdicke die Trennfunktion. Da derartig dünne Schichten nicht selbsttragend sind, werden sie auf porösen polymeren Stützsichten abgeschieden. Die Stützsichten ihrerseits sind in der Regel nochmals durch eine Polymervliesträgerschicht unterstützt (siehe Bild 7). Die Membranschichten werden über Lösungsmittel (Filmschichten), Sol-Gel-Verfahren oder Pervaporation auf den vorkonfektionierten Trägern mit Stützsicht abgeschieden.

Konstruktiv läßt sich der Aufbau von Membranfiltern nach folgenden Merkmalen unterscheiden:

Membranmorphologien:

- Flachmembranen mit Abstandshalter und Spacer
- Koaxialmembranen (Kapillaren, Röhren, Waben, Bilder 5 und 6)
- Multikanalstäbe mit Außenoberflächen-Permeatablauf
- Multikanalstäbe mit Koaxial- und Außenoberflächen-Permeatablauf
- Spiralwickel zur Multikanalbildung
- Trennkaskaden mit permeatabhängigen Durchlässigkeiten
- Hydrophile oder hydrophobe Membranwerkstoffe
- Katalytisch bzw. selektiv katalytische Membranwerkstoffe
- Elektrisch leitende Membranwerkstoffe zur Trennung geladener Teilchen
- Keramische Membranen mit definiert abgestufter Porosität
- Selektivität der Membranwerkstoffe/Polymere

In Tabelle 3 wurde bereits beispielhaft die Trennfunktion von Keramikmembranen mit unterschiedlicher Porengröße vorgestellt.

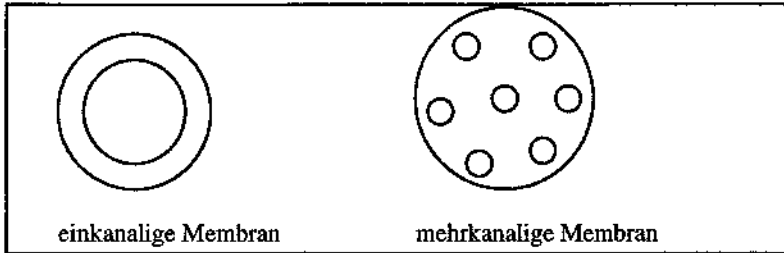


Bild 5: Ein- und mehrkanalige Keramikmembranen, Arbeitslängen bis 1,5 m

Eine andere wichtige Konstruktionsvariante für Keramikmembranen stellt die Wabenform dar, die zunächst für Hochtemperaturwärmetauscher entwickelt worden war. Bild 6 beinhaltet die schematische Querschnittsdarstellung einer Wabenmembran.

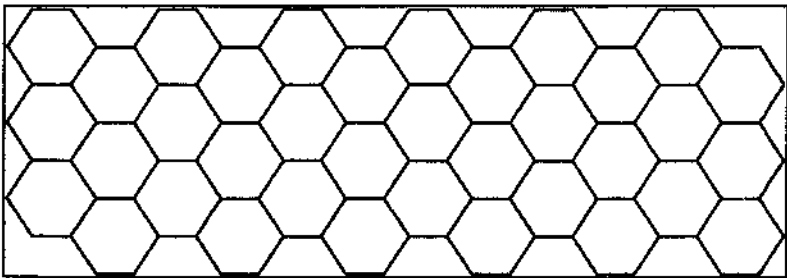
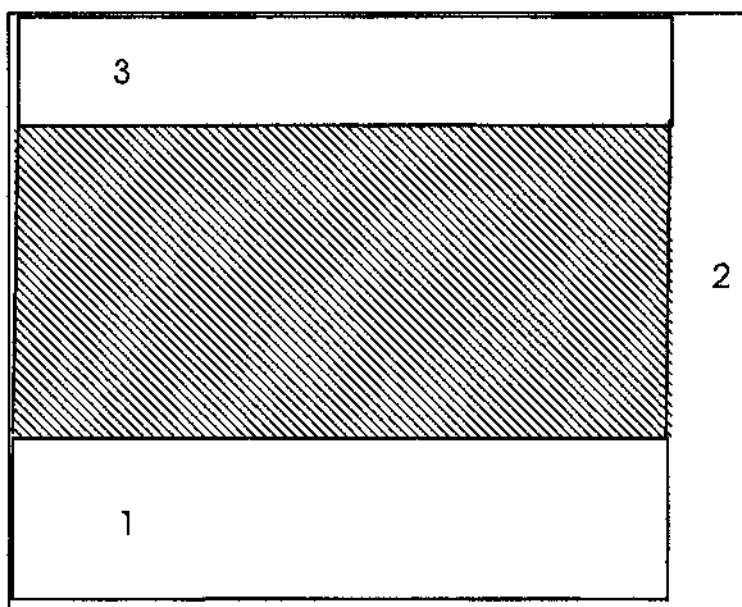


Bild 6: Schematische Darstellung einer Wabenmembranstruktur



- 1 Trägerschicht
- 2 poröse Stützschiicht
- 3 Membrantrennschicht

Bild 7 Prinzipaufbau einer Polymermembran

4. Werkstoffe für Membranfilter

In der Filtrationstechnik wurde bereits sehr frühzeitig das Potential keramischer Werkstoffe für die Stofftrennung erkannt. Terrakotten und Steinzeugwerkstoffe fanden für Aufgabenstellungen in der Metallurgie und in der mechanischen Verfahrenstechnik vielfältig Anwendung. Definierte Porensysteme, die chemische Inertheit und die hohe Temperaturbeständigkeit der Keramiken waren entscheidende Werkstoffeigenschaften, die keramische Filtrationstechnik breit in industrielle Fertigungsprozesse zu integrieren. Die systematische Erforschung der Gefüge-Eigenschaftsbeziehungen der Oxid-, Nitrid-, Karbid- und Boridkeramiken hat leistungsfähigen Membrantechnologien ein beträchtliches Potential eröffnet. Von besonderer Bedeutung sind dabei die Verfügbarkeit

nanokristalliner Pulver definierter chemischer Zusammensetzung, die beginnende industrielle Beherrschung der Sol-Gel-Technologien und die Erzeugung definierter Porensysteme im Mikro- und Nanometerbereich. Für innovative Anwendungen der Membrantrenntechnik für chemische Synthesen und die Heißgasfiltration sind insbesondere Eigenschaften, wie die Hochtemperaturfestigkeit, die Thermoschockbeständigkeit, die hohe chemische Beständigkeit kovalent gebundener Keramiken von großem Vorteil. Für die Membranherstellung sind folgende anorganisch-nichtmetallische Werkstoffe für die industrielle Nutzung vorgesehen:

- Aluminiumoxid
- Aluminiumtitanat
- Aluminiumnitrid
- Graphit und Aktivkohlen
- Siliciumkarbid
- Siliciumnitrid
- Titaniumdioxid
- Vanadiumpentoxid
- Molybdänoxid
- Strontiumtitanat
- Zirkoniumdioxid
- Nickeloxid, Eisenoxid
- Alumosilikate (Cordierit u.a.)
- Zeolithe

Aluminiumoxide haben als Membranwerkstoffe bereits breite Anwendungsfelder belegt. Siliciumkarbid ist ein potentieller Werkstoff für die Heißgasfiltration. Aluminiumnitride besitzen eine ausgezeichnete Thermoschockbeständigkeit und empfehlen sich besonders für die Filtration von Leichtmetallschmelzen. Graphite und Aktivkohlen finden in der Pharmaindustrie und in der chemischen Industrie vielfältig Anwendung. Titanium-, Vanadium-, Nickel-, Eisen- und Molybdäniumoxide besitzen in Abhängigkeit vom Oxidationszustand halbleitende Eigenschaften, während Zirkoniumdioxid in der kubisch stabilisierten Phase Sauerstoffionenleitfähigkeit besitzt. In der tetragonal stabilisierten Modifikation ist Zirkoniumdioxid ein hochfester und bruchzäher Werkstoff mit Oxidationsbeständigkeit bis zu sehr hohen Temperaturen. Die Spezifikation von Membranen für die Mikro- und Nanofiltration beinhaltet die Tabelle 4.

Tabelle 4. Eigenschaften von Mikro- und Nanofiltern nach Angaben der Tridelta

Mikrofilter:

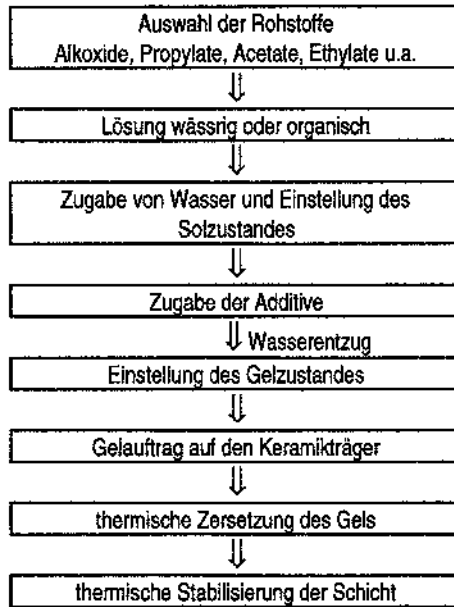
Membranträger	Al ₂ O ₃
Membranwerkstoff	Al ₂ O ₃
Trenngrenze	3/1/0,4/0,2/0,1µm
Porosität	ca. 35%
Temperaturbeständigkeit	270°C
chemische Beständigkeit	pH = 0-14
Ausnahme: Fluß- und Phosphorsäure	
Betriebsdruck	1 - 6 bar
Mechanische Festigkeit	> 40 bar

Ultrafiltrationsmembran:

Membranträgerwerkstoff	Al ₂ O ₃
Membranwerkstoff	Al ₂ O ₃
Trenngrenze	60/30 nm
Porosität	35%
Temperaturbeständigkeit	270°C
chemische Beständigkeit	pH = 0-14
Ausnahme: Fluß- und Phosphorsäure	
Betriebsdruck	1 - 10 bar
Mechanische Festigkeit	> 40 bar
Sterilisierbarkeit	ja, maximale Temperatur: 1000°C

Für keramische Membranen ist die Rückspülbarkeit und die Möglichkeit der Sterilisation grundsätzlich gegeben. Eine bevorzugte Membranausführung stellt die Mehrkanalstruktur dar.

Die Herstellung von keramischen Werkstoffen mit definiertem Nanometerporensystemen ist mit den Sol-Gel-Technologien möglich:



Neben der Sterilisier- und Rückspülbarkeit der Keramikmembranen stellt die nahezu druckunabhängige Arbeitsweise einen wesentlichen Anwendungsvorteil dar.

Kumuliertes Volumen mm^2/g , Trennschärfe einer Aluminiumoxydkeramik

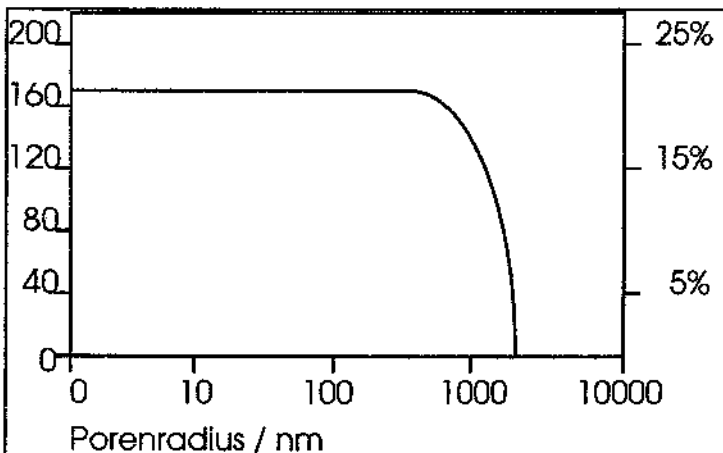


Bild 8 beinhaltet die Zeitabhängigkeit des Permeates (Flux) für Aluminiumoxidkeramikmembranen mit Trenngrenzen von 0,2 bzw. 0,6 μm bei Arbeitsdrucken von 1 bar.

Flux (l/hm^2)

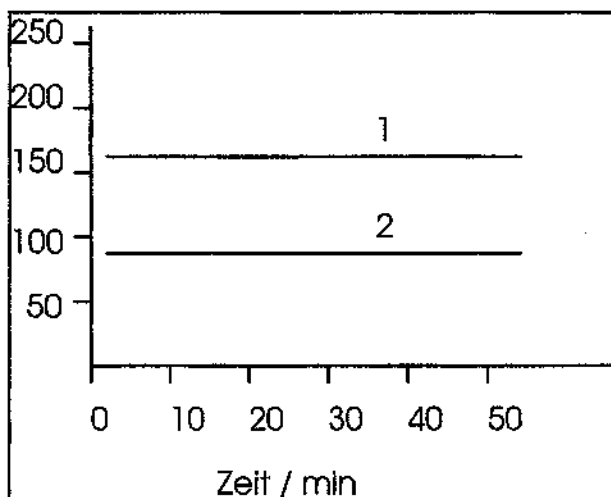


Bild 8: Fluß als Funktion der Zeit bei einem Druck von 1 bar

1: 0,6 μm -Membran

2: 0,2 μm -Membran

Nach dem Sol-Gel-Verfahren hergestellte Keramikmembranschichten versprechen die Erschließung völlig neuer Anwendungsfelder in der Medizin (Blutfiltration) und in den Biotechnologien. Keramiken und Polymerwerkstoffe ergänzen sich gegenwärtig sehr sinnvoll in den industriellen Membrantrennverfahren.

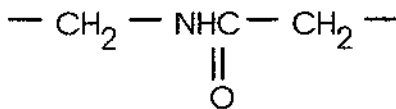
Das System der gegenwärtig bekannten Polymerwerkstoffe eröffnet den Membrantechnologien ein breites Anwendungsfeld. Die Membranwirkung begründet sich auf der Semipermeabilität gegenüber chemischen Spezies über dünne Polymerschichten. Eine Übersicht zu Polymerwerkstoffen für Diaphragmen und Membranen beinhaltet die nachstehende Übersicht:

- Zellosetriacetat
- Polyethylen
- Polykarbonat
- Polysulfon, Polyethersulfone

- Siloxane
- Polytetrafluorethylen/ Teflone, Polyimide, Kapton
- Polyester
- Polyacrylnitril
- Polypropylene (Hohlfasern)

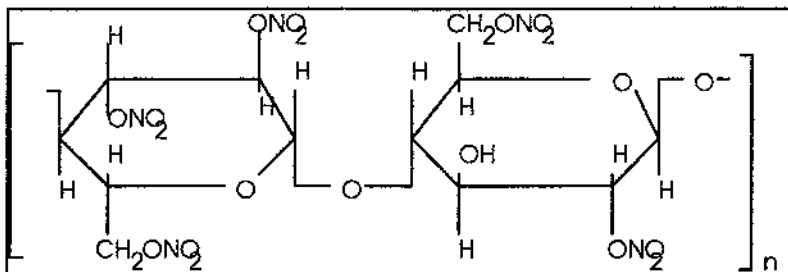
Entscheidend für die Semipermeabilität und die Trenneffektivität sind der spezifische räumliche Makromolekülaufbau und die Spezifik der chemischen Bindung. Die Modifikation der chemischen Bindung der Makromoleküle ermöglicht die Beeinflussung der Hydrophobie bzw. der Hydrophilie der Makromoleküle. Die Oberflächeneigenschaften sind für die Luft- und Gasfiltration, die chemische Beständigkeit und die Trennung von wässrigen Suspensionen von entscheidender Bedeutung. Nachstehend sollen einige Makromoleküle vorgestellt werden, die in der Membrantrenntechnik vielfältig Anwendung finden:

Polyamide:



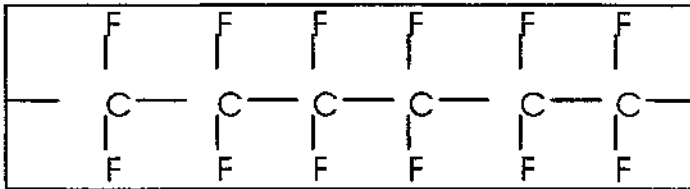
Besondere Eigenschaften: Hydrophil, chemische Beständigkeit gegen alkalische Lösungen und organische Lösungsmittel

Cellulosenitrat:



Besondere Eigenschaften: Hydrophil, chemische Beständigkeit, definierte Porensysteme

Polytetrafluorethylen:



Besondere Eigenschaften: Hydrophob, chemisch inert, belastbar zu höheren Temperaturen

Entwicklungsseitig wird die Erkundungsforschung zu polymeren Membranwerkstoffen mit hoher Trenneffektivität und kleineren Trenngrenzen intensiv weitergeführt.

5. Innovative Anwendungen

Die Anwendung der Membrantrenntechnik hat in vielen Branchen zu wesentlichen Innovationen geführt. Das trifft besonders für die pharmazeutische, chemische und biotechnische Industrie zu. Auch die Lebensmittelherstellung beruht heute in vielen Fällen auf der Nutzung der Filtrationstechniken. In den Umwelttechnologien erwartet man zukünftig das größte Potential für die Anwendung der Membrantechnik, insbesondere hinsichtlich der Gas-Gas- und der Gas-Feststofftrennung. Wichtige Arbeitsrichtungen für innovative Anwendungen der Membrantrenntechnologien sind:

- Reinigungsfiltration von Lösungsmitteln
- Wertstoffgewinnung aus Flüssigkeiten
- Kühlmittelreinigung von Kompressionsanlagen
- Schmiermittelreinigung bei Maschinen mit Schmiermittelumlauf
- Dehydrierung von Kohlenwasserstoffen
- Gastrenntechnik einschließlich Luftzerlegung
- Kristallisation von speziellen Spezies in Flüssigkeiten auch unter Nutzung der Umkehrosmose

Weitere potentielle Anwendungsbereiche der chemischen Verfahrenstechnik auf der Grundlage der Nutzung von Molsieben und der Membrantrenntechnik sind die Sterilfiltration und die Verfahren zur Herstellung von Pflanzenschutzmitteln wie

- die Herstellung hochaktiver kulturpflanzenverträglicher Herbizide

- die Präparation resistenter Fungizide, Insektizide, Bakterizide und Wachstumsregulatoren zur Verbesserung der Standfestigkeit von Getreide

Weitere wichtige Gebiete der zukünftig verstärkten Anwendung der Membrantrenntechnik werden sein:

- die Schadstoffbeseitigung durch Fällung, Verbrennung, Adsorption, Ionenaustausch, Mikro- und Ultrafiltration
- die allgemeine Entsorgung von Schadstoffen über den Einsatz von Molsieben, Katalysatoren, Waben- oder Katalysatorenlträgern mit Aktionsschichten auf der Basis von Aerosolen, Zeolithen, Aktivkohle und oberflächenmodifizierten Kohlenstoffgerüsten
- die Entsorgung von Industrieschlämmen
- die Entsorgung von Prozeßwässern der Wäschereibetriebe (Phosphate, Stearate), der Lebensmittelbranche, z.B. die Reinigung von Proteinabtrennungsanlagen in Molkerei- und Käsebetrieben, die Schlachtblutentsorgung, die Abwasseraufbereitung von Abwässern der Textilbranche
- Sterilisierungsverfahren in der Biotechnologie und Pharmaindustrie über die Fixierung von Enzymen in porösen Trägern, die Filtrations-trennung von Bakterien und Viren, die Abtrennung von Makromolekülen aus Flüssigkeiten und die Flüssig-Feststofftrennung
- Wertstoffgewinnung aus Rückständen der Erzaufbereitung
- Abwasserentsorgung
- Chloralkalielektrolyse
- Trennung von Elektronikschrott und Wertmetallrecycling
- die Herstellung hochaktiver kulturpflanzenverträglicher Herbizide
- die Präparation resistenter Fungizide, Insektizide, Bakterizide und Wachstumsregulatoren zur Verbesserung der Standfestigkeit von Getreide
- NO_x -Minderung bei Verbrennungsmotoren

Die Beherrschung leistungsfähiger Membrantrenntechnologien wird neue Möglichkeiten der molekularen Erkennbarkeit, zu trägerfixierten

Reagenzien für Enzyme für Stoffwandlungsreaktionen bis zu definierten C-C-Verknüpfungen ermöglichen.

Der Anwendungsbereich der Membrantechnologien erstreckt sich aber auch auf Gebiete des Kunststoffrecyclings, beispielsweise können Verfahren zur Entsorgung von organischen Stoffgemischen den Prozeß der Aufoxidation nutzen und eine definiert gespeiste Wasserstoffverbrennung ermöglichen. Die zu entsorgenden Stoffe werden rechnergesteuert als Kühlgut im flammenfreien Bereich zugeführt und im Schwelverfahren umgesetzt. Als alternative Quelle könnte für den Oxidationsprozeß auch das Plasmaverfahren Verwendung finden. Offensichtlich ist der gezielte Abbau von Kohlenwasserstoffen durch katalytische Reaktionen während des Oxidationsprozesses möglich, so daß nach erfolgter Kondensation die Reaktionsprodukte durch Ultrafiltration bzw. Nanofiltration getrennt werden können, wobei Aerosole, Al_2O_3 , TiO_2 , Zeolithe und Mischoxide mit Seftenerdmetall-dotierungen (Cer, Lanthan) als Molsiebe, Molekularsieb-gewebe und Ionenaustauscher Verwendung finden werden. Diese Verfahren sind auch für die Aufarbeitung von Metallsalzen zu Oxiden von Interesse.

Bei der Gerätekonzeption wird die Standzeit der Werkstoffe im Reaktorbereich entscheidend die Verfahrenseffektivität beeinflussen. Die Werkstoffe müssen dabei den Beanspruchungen hinsichtlich :

- Thermoschockbeständigkeit
- Oxidationsbeständigkeit
- hoher Arbeitstemperaturen und
- Chemikalienbeständigkeit genügen.

6. Alternative Trennverfahren

Die Erzeugung definierter Porensysteme stellt sowohl für die aktuelle Werkstoffentwicklung als auch für die neuen physikalischen Technologien eine große Herausforderung dar. Die physikalischen Technologien besitzen ein beträchtliches Potential, insbesondere die Dünnschichttechnologien und Bearbeitungsverfahren mit dem Excimerlaser bieten Ansätze zur weiteren systematischen Senkung der Trenngrößen und der Erhöhung der Trenneffektivität. Das Plasmatron-Hochratesputterverfahren ermöglicht sowohl die Herstellung keramischer als auch polymerer Strukturen mit definiertem Porensystem im Nanometerbereich. Schichtdicken von ca. 50 nm bis ca. 2 μm sind mit diesem Verfahren effektiv herstellbar. Die

Plasmaspritztechnik ist sowohl zur Herstellung nanokristalliner Keramikpulver als auch zur Herstellung nano- und mikroporöser Porensysteme geeignet.

In der Trenntechnik breit eingeführt sind die magnetischen Hochgradientenmagnetscheider, beispielsweise in der bergmännischen Gewinnungstechnik von mineralischen Rohstoffen höchster Reinheit. Diese Feststellung gilt auch für die chemischen Trennverfahren in der Verbindung von Fällungs-, Kristallisations und Destillationsprozessen, wie sie teilweise in der Hochreinigung von Seltenerdmetallen zur Anwendung kommen. Die Entwicklung neuer Supraleitermaterialien mit hoher Stromtragfähigkeit und hoher Sprungtemperatur ermöglicht der magnetischen Separation ein weiteres Vordringen in die Aufbereitungstechniken der modernen Rohstoffgewinnung. Mit der Verfügbarkeit dieser Verfahren wird die Frage der Abbauwürdigkeit erkundeter Rohstoffressourcen neu zu stellen sein.

Für die Trenneffektivität der Magnetscheider sind folgende Parameter von Bedeutung:

- maximale Magnetfeldstärke
- Suszeptibilitäten der Gemischbestandteile
- Reichweite der magnetischen Trennkräfte
- Trennung feinteiliger Gemische im Hochgradientenfeld
- Trocken- oder Naßscheidung
- Geschwindigkeit der zu trennenden Teilchen.

Die Magnetscheidung hat einen hohen Stellenwert in der Kaolinreinigung für die Porzellanindustrie, in der Zinnanreicherung von wenig abbauwürdigen Zinnerzen und in der Wertmetallgewinnung erreicht. Maßgebend für die technischen Konzepte und das Trennverfahren werden in allen Fällen die Trenneffektivität und die Verfahrenskosten sein.

Literatur

- "Membranes in Gas Separation and Enrichment", Proceedings 4. BOC Priestley Conference (1986), Royal Society of Chemistry, ISBN 0-85186 676-X
- "Ultrafiltration Membranes and Applications" ed. by A.R. Cooper, Plenum Press New York and London (1979), ISBN 0-306-40548-2
- "Reverse Osmosis/ Ultrafiltration Processes Principles" S. Sourirajan, T. Matsoura, National Council Canada Publications Ottawa, Canada (1985) NRCC No 24188
- "Porö Cer" Cross-flow Filtration, Tridelta AG Filtrationskeramik, Hermsdorf, Firmenprospekte, (1995)
- "Membranfilter", Sartorius AG Prozeßfiltration/ Laborfiltration, Firmenprospekte, (1995)
- U. Ströder, R. Henne: "Entwicklung und Herstellung neuartiger Verbundschichten für elektrochemische Verfahren durch Unterdruckplasmaspritzen" 2. Symposium Materialforschung 1991 des BMFT (26. - 29.8.1991 in Dresden) s.1966 - 1991, ISBN 3-8249-0020-3
- F. Harbach: "Hochleistungsfunktionskeramik für die rationelle schadstoffarme und sichere Energieversorgung" 2.Symposium Materialforschung 1991 des BMFT (26. - 29.8.1991 in Dresden), s. 961 - 984, ISBN 3 - 8249 - 0020 - 3
- H. Nürnberg, F. Harbach: "Pressure Filtration of Fine Ceramic Suspensions"; 4th. Intern. Conf. Ceramic Powder Processing Science, Nagoya, Japan 12. - 15.3.1991
- Mayr W., Henne R.: "Investigation of a VPS Burner with Laval Nozzle by Means of an Automated Laser Doppler Measuring Equipment", in Proc. 1 st. Plasmatechnik Symposium Vol. 1 (1988) 87-97
- O. Kustek, B. Bosserhoff, C. Stöbel: "PVD-Beschichtung bei niedrigen Temperaturen und neue Schichtsysteme" 2. Symposium Materialforschung 1991 des BMFT (26.- 29.8.1991 in Dresden), S. 2072-2088, ISBN 3 - 8249 - 0020 - 3
- H. Nickel, F.J. Dias, K. Bach, W. Best, W. Simonis: "Entwicklung von Heißgasfiltern aus Siliciumkarbid auf der Basis des Coat-Mix-Verfahrens" 2. Symposium Materialforschung 1991 des BMFT (26.-29.8.1991 in Dresden), S. 2173-2175, ISBN 3 - 8249 - 0020 - 3
- Kyo, O.: (NGK Insulations Ltd.) "Recent Ceramic Filter" International Forum on Fine Ceramics 1990, Nagoya "Fine Ceramics - Challenging the Unknown"
- H. Gasthuber: "Keramische Spritzschichten" 2. Symposium Materialforschung 1991 des BMFT (26. - 29.8.1991 in Dresden), s. 1947-1965, ISBN 3 - 8249 - 0020 - 3
- Österreichische Keramische Rundschau 22(1985) 1/2, 6 - 12
- T.Terpetschnig: "Standzeit erhöht-verbesserte Membranen", cav 12/95, S. 18
- Keizer, K. ; Burggrau, A.J. "Ceramic Membranes: Preparation, Structure, Application" (1988)

- Anonym Sol-Gel-Technology for Thin Films, Fibers, Preforms, Electronics and speciality Shopes, Noyes Publication, Park Ridge 1987
- Kinna, J. Pfeiade und Cabosep Cross flow Filtration, Review on industrial applications, Vortrag auf dem Seminar der Technischen Akademie Wuppertal 2.2. - 3.2.1989
- Roth, L. Gefahrstoff-Entsorgung 2 Erg. Lfg. 12/90 II - 7.6.II - 8.1 II - 8.0
Gefahrstoffverordnung Deutschland
- Heym,B.; Hippler,B.; Kreisel,G.; Scheer,H.; Walter,D., Anorganische Synthesechemie, 2.Auflage Springer Berlin 1990
- Lehmann,R. ZIID Entwicklungstendenzen in Wissenschaft, Technik und Wirtschaft "Herstellung und Anwendung von Keramikmembranen" A 27/90 Reihe 02 06/1990
- Verordnung über Höchstmengen für Phosphate in Wasch- und Reinigungsmitteln vom 4.6.1980
- Roth, L. Wassergefährdende Stoffe, ecomed Verlagsgesellschaft, Landsberg 1990
- Sittig,M. Handbook of Toxic and Hazardous Chemicals and Carcinogens, Park Ridge New Jersey, USA 1985
- Allg. VwV über die nähere Bestimmung wassergefährdender Stoffe und ihre Einstufung entsprechend ihrer Gefährlichkeit, vom 9.3.1990 (GMBL Nr. 8, S. 114)
- Das neue Wasserrecht für die betriebliche Praxis Band 1 Teil 03 und Teil 05 sowie Band 3 Teil 07, WEKA Fachverlag für technische Führungskräfte GmbH 06/1991
- G.Bauer, H.Nowak "Recycling elektrokeramischer Werkstoffe "Keramische Zeitschrift 34 (1982), 374-376
- Workshop des BMFT "Laser 2000" am 3./4.2.1994 im VDE/VDI-Zentrum Düsseldorf - Ergebnisse:
- Lindner Audi AG Abt. I/PK-P "Bearbeitung der Zylinderlauffläche mit dem Excimerfaser"