

Erfahrungen und Anwendungspotential der Nanofiltration

Prof. Wolfgang M. Samhaber
Institut für Verfahrenstechnik
Johannes Kepler Universität Linz
A-4060 Leonding, Welser Straße 42

Einleitung

Auf dem Gebiete der Wasseraufbereitung und Trinkwassergewinnung aus Meerwasser gehören Membrantrennverfahren seit über 40 Jahren zum Stand der Technik. Die Nanofiltration, die in ihren Anfängen als Vorreinigungsprozess vor Umkehrosmoseanlagen eingesetzt worden ist, entwickelte sich in den letzten 25 Jahren in der Prozessindustrie als selektives und schonendes Verfahren zur Aufarbeitung von wasserlöslichen Produkten. Trennverfahren mit NF-Membranen werden in der Verfahrenstechnik den thermischen Trennverfahren zugezählt und weisen hier oftmals Vorteile als Alternative zu den klassischen Trennverfahren wie Extraktion, Verdampfung, Ionenaustausch und Sorptionsverfahren auf. Diese hoch selektive Trenntechnik hat in den vergangenen Jahren jene Akzeptanz und jenen Stellenwert erhalten, die ihr als ein eigenständiges Gebiet der Membrantechnik heute durch den Erfolg in unzähligen Anwendungsgebieten zukommt. Grundlagen dazu finden sich in der einschlägigen Fachliteratur, wie beispielsweise in [1], [2], [3], [4], [5].

NF-Membranen sind in das Übergangsgebiet zwischen den nicht-porösen RO-Membranen und den porösen UF-Membranen einzuordnen. Verfahren mit Porenmembranen werden demnach den mechanischen Stofftrennverfahren zugeordnet, sofern sie zur Trennung von feindispersen festen Phasen aus Flüssigphasen eingesetzt werden, und den thermischen Trennverfahren, sofern gelöste Makromoleküle aus Lösungen abzutrennen sind. Betrachten wir NF-Membranen, so sind diese nicht-poröse Membranen, so wie auch die RO-Membranen, nur weisen NF-Membranen eine nicht so dichte Struktur auf, wie diese den RO-Membranen eigen ist. Dies lässt auch bereits auf ein daraus resultierendes und nicht so einfach zu charakterisierendes Trennverhalten von NF-Membranen schließen.

Das Trennpotential nicht-poröser Membranen ist sehr groß und nur durch die Einschränkungen aufgrund von mechanischen, thermischen und chemischen Eigenschaften der Membranwerkstoffe begrenzt. Neben diesen inhärenten Werkstoffeigenschaften ist aber noch neben Stabilität und Beständigkeit die Regenerierbarkeit von verschmutzten Membranoberflächen ein wesentlicher Faktor, der die Anwendbarkeit zudem durch die Eigenschaften und Zusammensetzungen des zu trennenden Systems noch mitbestimmt.

Charakterisierung von NF-Membranen

NF-Membranen sind wie RO-Membranen nichtporöse Membranen, weisen jedoch für einwertige Ionen einen Rückhalt von unter 90% auf, für zweiwertige hingegen einen Rückhaltewert, der oftmals noch über 90% liegt. Diese so bei NF-Membranen ausgeprägte (Ionen-)Selektivität zwischen ein- und mehrwertigen Ionen basiert auf dem unterschiedlichen Lösungs- und Transportverhalten von hydratisierten Ionen in der aktiven Membranstruktur, wobei einwertige, hydratisierte Ionen eine höhere Mobilität als mehrwertige Ionen in der für den Trennprozess aktiven Membranschicht zeigen. Bei niedrigen Ionenkonzentrationen haben Festionenladungen in der aktiven Membranschicht einen messbaren Einfluss auf das Trennverhalten. Der Stofftransport in NF-Membranen findet zum einen Teil durch Diffusion statt, zum anderen können auch kleinere Ionen, weniger stark hydratisierte Ionen, oder auch ungeladene gelöste kleine Moleküle konvektiv durch einen so genannten viskosen Fluss durch die Membrane transportiert werden, im Gegensatz zu größeren und vollständig hydratisierten Ionen, oder neutralen gelösten Molekülen mit höheren Molmassen, die sich teils nicht mehr in der Membranstruktur lösen und somit auch aufgrund ihrer Größe nicht durch die Membrane transportiert werden.

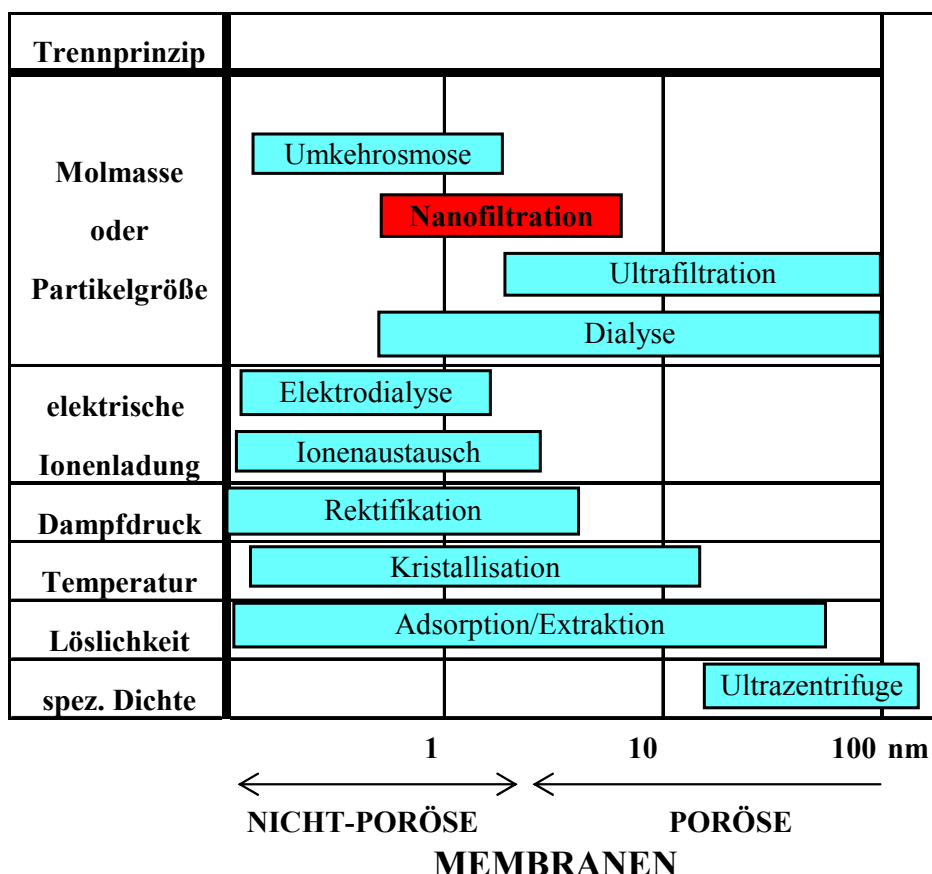


Abb. 1: Bezug der Nanofiltration zu klassischen Trennoperationen mit Trennprinzipien

In Abbildung 1 sind die Nanofiltration und angrenzende Membrantrennverfahren verglichen mit den konventionellen Verfahren einerseits hinsichtlich des Trennpotenzials, was die Partikelgröße auf der Abszisse betrifft, und der verschiedenen Trennmechanismen, die dabei wirksam sind, auf der Ordinate.

Die Trennschnitte bei NF-Membranen hinsichtlich gelöster Stoffe liegen zwischen 200 und 1000 kg/kmol, wogegen sich diese bei sehr dichten RO-Membranen bei 100 kg/kmol zeigen (siehe dazu auch Tabelle 3). Die Charakterisierung und Unterscheidung verschiedener NF-Membranen stellt sich in der Praxis nicht so einfach dar, wie dies bei RO-Membranen über den Salzurückhalt bei bekannten Prozessbedingungen geschehen kann. Nicht-poröse Membranen, wie sie in RO- und NF-Trennprozessen verwendet werden, unterscheiden sich in ihrem Lösungs-/Diffusionsverhalten hinsichtlich des reinen Lösemittels und auch hinsichtlich des Stofftransports gelöster Komponenten. In Tabelle 1 sind die einen NF- oder RO-Prozess bestimmenden Kriterien nochmals gezeigt:

Prozessmerkmale hinsichtlich	Umkehrosmose (RO)	Nanofiltration (NF)
Transport	nur das Lösemittel	spez. gelöste Komponenten
Membranstruktur	nicht-porös	nicht-porös
gelöster Komponenten	hält alle zurück	selektiv für gelöste Komponenten

Tab. 1: Prozesskriterien zu RO und NF-Trennungen

Systematik und Abgrenzung der Nanofiltration

Die Nanofiltration ist neben der Mikrofiltration, Umkehrosmose und Ultrafiltration der vierte druckgetriebene Membrantrennprozess, deren erste Anwendungen aus den 70er Jahren bekannt sind. Zum Beispiel hatten DDS, Desal, und Osmonics bereits Mitte der 70er Jahre derartige Membranen im Programm, ohne wahrscheinlich das breite Anwendungspotenzial dieser Membranen damals noch abschätzen zu können. Rudimentär lässt sich die Nanofiltration zwischen Umkehrosmose und Ultrafiltration einordnen, wobei sich der Name Nanofiltration für dieses spezielle Trennverfahren innerhalb der Membrantechnologie erst in den 80er Jahren eingebürgert hat, wogegen die Nanofiltration in den aus dem Jahr 1986 von der European Society of Membrane Science and Technology herausgegebenen Richtlinien zur Terminologie der druckgetriebenen Membrantrennoperationen noch unerwähnt blieb.

In den IUPAC-Empfehlungen von 1996 wird in der "Terminology for membranes and membrane processes" die Nanofiltration dann auch beschrieben und zwar mit: „pressure-driven membrane-based separation process in which particles and dissolved molecules smaller than about 2 nm are rejected“.

Die Ultrafiltration, die sich auf der einen Seite mit der Nanofiltration überschneidet, wird im weiteren darin als Trennprozess beschrieben, in dem Partikeln zwischen 2 nm und 0,1 µm getrennt werden können und auf der anderen Seite, wo sich die NF mit der Umkehrosmose (RO) überdeckt, wird die RO wiederum als Trennprozess beschrieben, in dem der angelegte Druck zu einem selektiven Transport des Lösemittels entgegen der osmotischen Druckdifferenz führt (liquid-phase pressure-driven separation process in which applied transmembrane pressure causes selective movement of solvent against its osmotic pressure difference).

An dieser Stelle müssen wir noch die Unterscheidung zwischen porösen und dichten Membranen treffen, wobei dichte Membranen keine bestimmaren Poren aufweisen und somit auch als quasi nicht-poröse Membranen bezeichnet werden (nach der IUPAC-Terminologie 1996: „dense (non-porous) membrane: membrane with no detectable pores“.

Die Trennmechanismen in diesen Membranen funktionieren ganz allgemein auf Basis unterschiedlicher diffusiver oder konvektiver Stofftransportvorgänge. Gewinnt man also selektiv ein Lösemittel aus einer Lösung entgegen dem in der Lösung vorhandenen osmotischen Druck, so ist dies gem. der IUPAC-Empfehlung als RO-Prozess zu bezeichnen. Dieser Prozess ist natürlich mittels einer dichten bzw. nicht-porösen Membrane auszuführen. So werden jene Membranprozesse als RO Trennprozesse verstanden, in denen zur Konzentrierung von Lösungen osmotische Drücke überwunden werden müssen, die in der Größenordnung des aufzubringenden Betriebsdruckes liegen wie es das klassische Beispiel der Meerwasserentsalzung auch zeigt, wo osmotische Drücke je nach Salzgehalt zwischen 20 und 30 bar liegen können und die Betriebsdrücke üblicherweise zwischen 40 und 60 bar. Die Charakterisierung von RO-Membranen geschieht mittels ihres NaCl-Rückhaltes unter Angabe der entsprechenden Prozessbedingungen. Die Rückhalteraten der in der Wasseraufbereitung verwendeten RO-Membranen liegen für einwertige Ionen normalerweise bei 95 bis über 99,5%.

Betrachten wir nun eine Anwendung, in der beispielsweise aus einer Peptidlösung selektiv das Lösemittel mittels einer dichten Membrane abgetrennt werden soll, so wird dieser Prozess naturgemäß auch entgegen dem osmotischen Druck erfolgen müssen und damit wäre hier auch definitionsgemäß von einem Umkehrosioseprozess zu sprechen, der hier aber mit einer heute üblicherweise bezeichneten Nanofiltrationsmembrane ausgeführt werden kann, die ja selektiv so nur das Lösemittel, nicht aber das gelöste Peptid permeieren lässt. In einem anderen Fall, in dem die Trennung zweier gelöster Komponenten in stark saurer Lösung stattfinden soll, wird eine sehr dichte Membrane benötigt, um die erforderliche Selektivität zur Trennung dieser Komponenten zu erreichen. In speziellen Fällen sind dafür daher auch sehr dichte RO-Membranen einzusetzen, obgleich der Prozess gemäß obiger Definition immer noch als Nanofiltrationsprozess zu bezeichnen ist. Es zeigt sich also bei speziellen Anwendungsfällen, dass nicht immer durch die verwendete Membrane festgelegt ist, ob es sich nun um einen Nanofiltrations- oder einen Umkehrosioseprozess handelt.

Auswahl von NF-Membranen

Um geeignete Vergleiche für eine Membranauswahl anstellen zu können, sind die Rückhaltevermögen in Funktion der Permeatstromdichten von mindestens einem einwertigen und einem zweiwertigen Salz notwendig, wogegen bei den dichten RO-Membranen üblicherweise mit NaCl-Rückhaltedaten das Auslangen gefunden wird.

Dass nun aber der Vergleich von unterschiedlichen Typen von NF-Membranen nicht so einfach ist wie bei RO-Membranen wird dem Anwender in Folge dann noch klarer, wenn in einem Produktionsprozess ein bestimmter NF-Membrantyp durch einen möglicherweise alternativen Membrantyp eines anderen Herstellers auszutauschen wäre.

NF-Herstellerdaten sind vergleichbar mit jenen, wie sie für RO-Membranen zur Verfügung gestellt werden, wobei mitunter auch Rückhalteraten von dem einen oder anderen zweiwertigen Salz als weitere Richtwerte angegeben sind. In Tabelle 2 sind Daten einer Membrane aus einem älteren Nitto-Bericht [6] aufgezeigt, der diese Membrane noch unter dem Titel Umkehrosiose einordnete. Die hierin dargestellten Rückhaltedaten sind auf Basis 0,2%iger Lösungen der einzelnen Salze und jeweils bei 10 bar und 25°C bestimmt worden.

Derartige Daten, so wie sie aus diesem Bericht doch eine differenzierte Beschreibung des Trennverhaltens erlauben, sind von Seiten der Hersteller von NF-Membranen heute normalerweise nicht verfügbar. Es lässt sich aus dieser Zusammenstellung der Werte bei dieser NF-Membrane z.B. ein hinsichtlich Nitrat auffallendes Trennverhalten erkennen: Normalerweise permeiert Nitrat sehr gut auch durch dichtere Membranen und hier wird dazu noch im sauren Bereich ein höherer Rückhalt gemessen. Gemäß [3] wird üblicherweise bei NF-Membranen ein steigender Anionen-Rückhalt NO_3^- , Cl^- , OH^- , SO_4^{2-} , CO_3^{2-} und bei Kationen eine Reihenfolge von H^+ , Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cu^{2+} beobachtet.

	Anion	OH	F	Cl	NO3	Br	HCO3	I	PO4	SO4
Cation	MW	17	19	35	62	80	61	127	95	96
H	1			32	43					15
NH4	18			13						
Li	7			17						
Na	23	2	14	15	19	23	25	32	33	55
K	39		20	13						56
Cs	133			13						
Mg	24			4	5					9
Ca	40			3						
Ni	59			3						
Cu	64			2						7

Tab. 2: Rückhalt anorganischer Ionen NTR-7410 Nitto Report 601 [6]

Bei NF-Trennungen unterscheiden sich die Rückhaltedaten eines einzelnen gelösten Salzes von jenen Rückhaltewerten, die für das betrachtete Salz in gemeinsamer Lösung mit einem anderen Salz zu beobachten sind. Interpretationen bzw. Vergleiche von Membranen auf Basis von Einzelsalz-Rückhaltedaten zeigen sich schon an diesem Beispiel als sehr schwierig, wobei auch diese Salz-Rückhalte von den jeweiligen Konzentrationen und dem spezifischen Permeatfluss beeinflusst werden.

Was für die Umkehrosmose ein NaCl-Rückhalt unter Angaben der Testbedingungen ist, kann bei NF-Membranen nur eine sehr rudimentäre Richtlinie bei der Unterscheidung oder beim Vergleich darstellen. Bei der Auswahl von Membranen für spezielle NF-Trennprozesse ist man daher in hohem Maße sowohl auf theoretische als auch auf praktische Erfahrung angewiesen und zudem noch insbesondere auf entsprechende Untersuchungen der realen Trennsysteme und bei entsprechenden Konzentrationen.

In Abbildung 2 sind als Beispiel aus Laboruntersuchungen einer DK-Membrane die Rückhaltewerte von Na-Sulfat und Na-Chlorid in Abhängigkeit der NaCl-Konzentrationen bei einer konstanten Na_2SO_4 -Konzentration von 5% in Funktion des Permeatflusses gezeigt. Hieraus lässt sich einfach die Problematik und die nicht mehr ausreichende Charakterisierung einer NF-Membrane mittels einer einzigen Salzkomponente erkennen. Will man einen Vergleich unterschiedlicher NF-Membranen anstellen, kann dies differenzierter in Lösungen beispielsweise zweier ein- und zweiwertiger Salze geschehen.

In Abbildung 3 wurde versucht [8], einen einfachen Vergleich von unterschiedlichen NF-Membranen und einer UF-Membrane mittels einer 90 g/L NaCl-Lösung in Abhängigkeit der Na_2SO_4 -Konzentration mittels Leitfähigkeitsdifferenzen zwischen Feed- und Permeat-Lösung darzustellen.

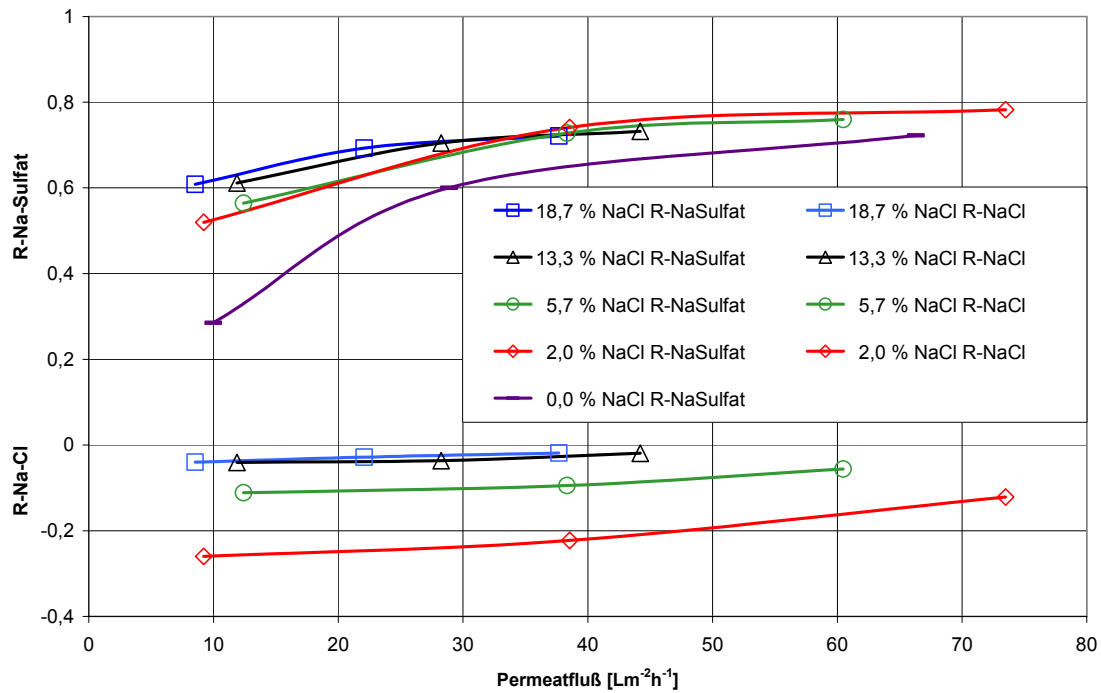


Abb. 2: DK-Membranrückhaltewerte bei unterschiedlichen Na-Chloridkonzentrationen und mit konstant 5% Na-Sulfat [8]

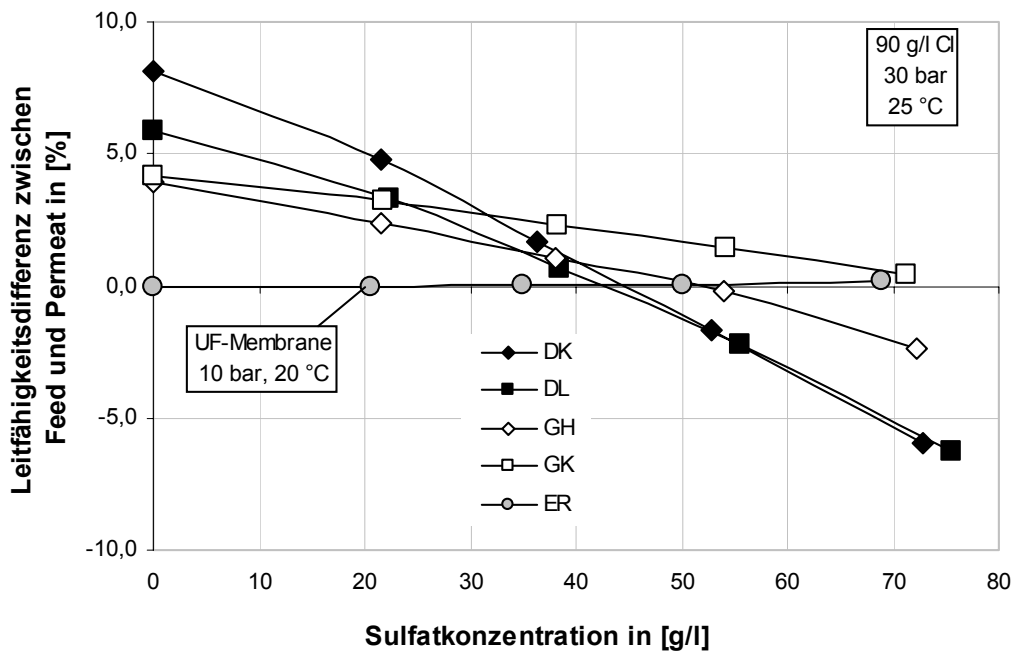


Abb. 3: Vergleich einiger GE Osmonics DESAL Membrantypen untereinander [9].

Wie aus Abbildung 3 zu sehen ist, lassen sich die NF-Membranen damit von der UF-Membrane klar durch ihr hierbei gezeigtes Trennverhalten unterscheiden. Für weitergehende Vergleiche werden aber auf Basis eines geeigneten Modells die erforderlichen Parameter für einen zweckmäßigen Vergleich zu ermitteln sein.

Trenneigenschaften dichter Membranen

Üblicherweise werden die Trenneigenschaften der NF wie schon erwähnt zwischen den bekannten Verfahren der Umkehrosmose und der Ultrafiltration eingeordnet, obgleich der Übergang von einer dichten nicht-porösen Struktur zu einer porösen Trennschicht nicht stetig sein kann. Typische RO-Membranen besitzen NaCl-Rückhalte über 90% und halten Inhaltsstoffe mit einer Molmasse über 100 kmol/kg vollständig zurück. In Tabelle 3 sind Daten über Membranrückhalte der PEC 1000 von Toray zusammengestellt [7].

Functional Group	Solute	Conc. %	MW kg/kmol	RO-Performance	
				Rejection %	Flux l/m ² h
Alcohol	Methanol	5	32	41,0	15,8
	Ethanol	5	46	92,0	12,5
	i-Propanol	5	60	99,5	13,3
	n-Butanol	5	74	99,0	12,5
	Benzylalcohol	4	108	82,0	4,2
	Ethylene Glycol	5	62	94,0	15,0
	Propylene Glycol	5	76	99,7	16,7
	Glycerine	5	92	99,9	17,9
	Phenol	1	94	99,0	10,0
Carboxylic Acid	Formic Acid	5	46	34,0	21,7
	Acetic Acid	5	60	91,0	15,4
	Propionic Acid	5	74	97,0	16,3
	Butyric Acid	5	88	99,0	15,8
	Oxalic Acid	0,5	90	99,1	28,8
	Lactic Acid	5	90	99,6	19,6
Ketone	Acetone	4	58	97	12,1
Ester	Ethyl Acetate	4	88	99,2	7,5
Ether	Tetrahydrofuran	5	72	99,8	11,7
Amine	Ethylene Diamine	5	60	99,5	3,3
Sulfoxide	Dimethylsulfoxide	5	78	99,6	14,2
Sugar	Lactose	5	360	99,9	20,8

Tab. 3: Basic RO Performance of PEC-1000 Membrane for various solutes in aqueous solutions (organic solutes evaluated at 800 psi and 25 °C)

In diesem Report sind parallel dazu auch die anorganischen Salzzückhalte mit dieser Membrane angegeben, wobei alle Werte zwischen 99,50 und 99,95% liegen mit Ausnahme der Nitratsalze, deren Rückhalt mit dieser sehr dichten Membrane mit 99% angegeben wird. Würde man für die Aufarbeitung einer methanolischen Extraktlösung das gelöste Methanol vom im Extrakt auch gelösten Wirkstoff trennen, hätten wir wiederum bei einer sehr dichten Membrane einen NF-Prozess vorliegen, da ja aus dem Extrakt nicht selektiv Wasser abgetrennt wird, was eben nicht der Definition eines RO-Prozesses entspricht.

Beispiele kommerzieller NF-Membranen [10]

Hersteller	Membrane	aktive Schicht	pH	P _{max} MPa	T _{max} °C	R _{NaCl} %	Fluss l/m ² /h	Testbed. °C g/l/MPa
Applied Membranes Inc.	NF3	-	4-11	30	45	30	52	25/2/1
DOW-Filmtec	NF 270	PA	2-11	4,1	40	50 (CaCl ₂)		25/2/0,5
DSS-Alfa Laval	NFT 50	- /PP/PE	2-10	10	50	99 (MgSO ₄)		
FLUID SYSTEMS	SR 2	TFC	4-9	0,24	45	10-30	50,8	25/2/0,38
FLUID SYSTEMS	SR 3	TFC	4-10	3,45	50	30-50	34,5	25/5/0,66
GE Osmonics-	Desal 5 (DK)	PA/PS/PE	4-11	6,8	90	50	38	25/1/0,7
GE Osmonics-	Desal G10 (GH)	PA/PS/PE	4-11	6,8	90	30	38	25/1/0,7
Hydranautics	ESNA		2-11	4,14	40	85		25/0,5/0,52
KOCH SelRo	MPS 32	-	0-14	4,1	80	70	64	30/5/3,1
KOCH SelRo	MPS 50	-	3-10	3,5	40			lösemittelstabil
Microdyn-Nadir	N30F	PES	0-14	40	95	25-35	70	
Nitto	NTR 7450	PES/P S/-	2-11	3	80	50	96	25/2/0,2
Nitto	NTR 7410	PES/P S/-	2-11	3	80	10	96	25/2/0,2
TORAY	UTC 60	PPA/-/-	3-8	4,2	45	55	29	25/0,5/0,35
TORAY	SU 610 SU 620					55	30	
TRISEP	XN45-TSA	-				20	52	-/0,5/-

Tab. 4: Zusammenstellung einiger handelsüblicher Nanofiltrationsmembranen

In Tabelle 4 sind von einigen kommerziell erhältlichen NF-Membranen die Spezifikationen und Daten, soweit von den Herstellern verfügbar gemacht, zusammengestellt. Einige Informationen sind auch über das Internet (z.B. [13], [14]), ebenso zum Austausch bzw. Ersatz von einigen Membrantypen, zu finden, wobei die anspruchsvollen Anwendungen in der Prozesstechnik hier keine ausreichenden Basisdaten erhalten. Im Bereich der Wasseraufbereitung und Enthärtung besteht aber die Möglichkeit, mit derartigen Daten Preis/Leistungsvergleiche anzustellen. Die Trennung organisch gelöster Stoffe von anorganischen Inhaltsstoffen sind die üblichen Anwendungen der NF-Technik, die nicht nur im Bereich der Produktaufarbeitung und -isolierung, sondern auch bei der Abwasserreinigung zur Abtrennung von refraktären CSB zu finden sind, für die jedoch oftmals spezielle Grundlagen in vorausgehenden Untersuchungen erarbeitet werden müssen.

Beständigkeiten von Trennmembranen

Selektivitäts-Langzeituntersuchungen

Um Aussagen hinsichtlich einer wirtschaftlichen Anwendung treffen zu können, müssen die voraussichtlichen Membranstandzeiten bekannt sein. Für neue unkonventionelle Anwendungen stellt sich dabei immer wieder die Frage, wie diese Zeit bestimmt bzw. geschätzt werden kann, um die Einflussgröße der Membransatzkosten für eine ins Auge gefasste technische Anlagenausführung bestimmen zu können.

Betrachten wir beispielsweise eine nitrathaltige Mutterlauge bei einem pH von 8, die noch einen Restgehalt an Produkt enthält, der sich mittels Nanofiltration zurückgewinnen und die Prozessausbeute dadurch erhöhen lässt, so erscheint diese Aufgabenstellung für eine NF-Anwendung in einer ersten Betrachtung durchführbar zu sein. Labor- und halbtechnische Untersuchungen hatten dabei einen unproblematischen Trennbetrieb mit einer speziell ausgewählten NF-Membrane gezeigt, wobei als MUSS-Kriterium für eine Produktionsanlage ein restlicher TOC (total organic carbon) von 300 ppm als Mittelwert im Permeat festgelegt war.

In der Folge wurde im Labormaßstab eine Trennanlage über einen Zeitraum von über 1000 Stunden mit Mutterlauge bei Prozessbedingungen betrieben und im Abstand von 1 bis 2 Wochen die Wasserpermeabilität und der Sulfatrückhalt bestimmt, der aus der Abbildung 4 zu ersehen ist. Der Rückhalt einer neuen Membrane des eingesetzten Typs liegt erfahrungsgemäß etwas höher. Würde man daher die Werte der ersten 100 Stunden für eine Trendliniendarstellung nicht berücksichtigen, so könnte man dafür eine lineare Abnahmefunktion annähern.

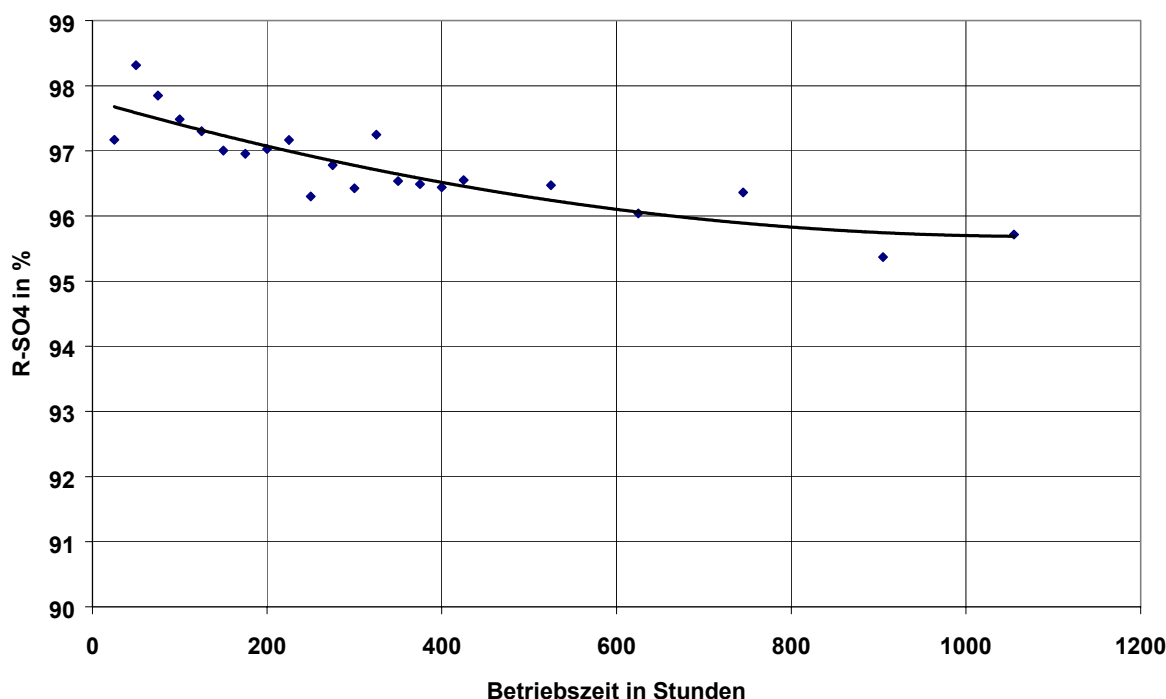


Abb. 4: Sulfatrückhalt der gespülten NF-Membrane im Verlaufe der Langzeittests

Der Sulfatrückhalt ist wie andere Rückhalteraten (z.B. für Chlorid, Carbonat, Ca, Mg, etc.) für NF-Membranen eine charakterisierende Größe, der für das Trennvermögen der NF-Membrane in der vorliegenden Trennaufgabe von wesentlicher Bedeutung ist. Da die NF-Membrane für TOC einen dem Sulfat sehr ähnlichen Rückhalt zeigt, lässt also dieser Wert auch Rückschlüsse auf das Produkt-Rückhaltevermögen zu. So konnte in dieser Langzeituntersuchung ein vergleichbares Absinken des TOC-Rückhaltes und des Sulfat-Rückhaltes festgestellt werden, wobei sich diese zeitliche Abnahme des TOC-Rückhaltes durchschnittlich mit 0,00035% pro Betriebsstunde errechnen ließ.

In einem getrennt eingerichteten Versuch wurde ein Membranelement über einen Zeitraum von 6 Monaten in einer Prozessmutterlauge gelagert, wobei sich ebenso ein Absinken des Sulfatrückhaltes über diesen Zeitraum und zwar um 0,0005% je Stunde gezeigt hat.

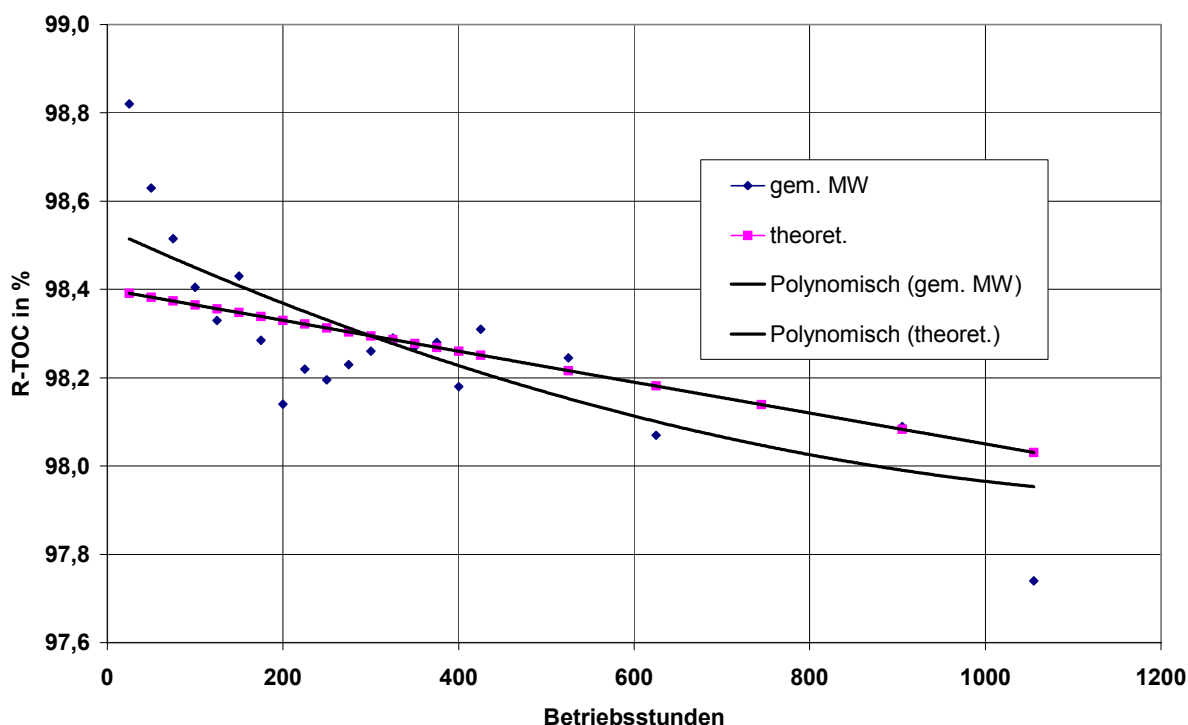


Abb. 5: Gemessene und linearisierte TOC-Rückhaltewerte

In Abbildung 5 sind wiederum die über den Untersuchungszeitraum von über 1000 Stunden gemessenen TOC-Rückhaltewerte als Messwerte (MW) dargestellt, die mit einer Trendlinie 2ten Grades angenähert worden sind. Das langsame Absinken des TOC-Membranrückhalts ist hier ebenso wie für den Sulfat-Rückhalt zu erkennen. Diese Veränderungen der Membranrückhalteraten waren mit einer gleichzeitigen Erhöhung der gemessenen Wasserpermeabilitätswerte der Membrane verbunden.

Um den Prozessvorgaben gerecht zu werden, kann die Membrane nur solange eingesetzt werden, als sie im Mittel Permeat mit weniger als 300 ppm TOC produziert. Diese geringfügige und fast stetige Verkleinerung der Membranrückhalteraten bei paralleler Erhöhung der Wasserpermeabilität konnte nur durch eine langsame chemische Veränderung (Hydrolyse) der Struktur der aktiven Trennschicht der Membrane erklärt werden. Diese Membranveränderung war für die Beurteilung der Membranstandzeit vor der Anlagenausführung von großer Bedeutung, um diesen Faktor auch entsprechend in der Betriebskostenschätzung berücksichtigen zu können.

Legt man dem Trennprozess ein einfaches Modell zugrunde und nimmt für die Veränderungen der Rückhaltewerte einen linearen Verlauf an, so kann damit mit den Prozessvorgaben eine Standzeit für einen industriellen Prozess bestimmt werden.

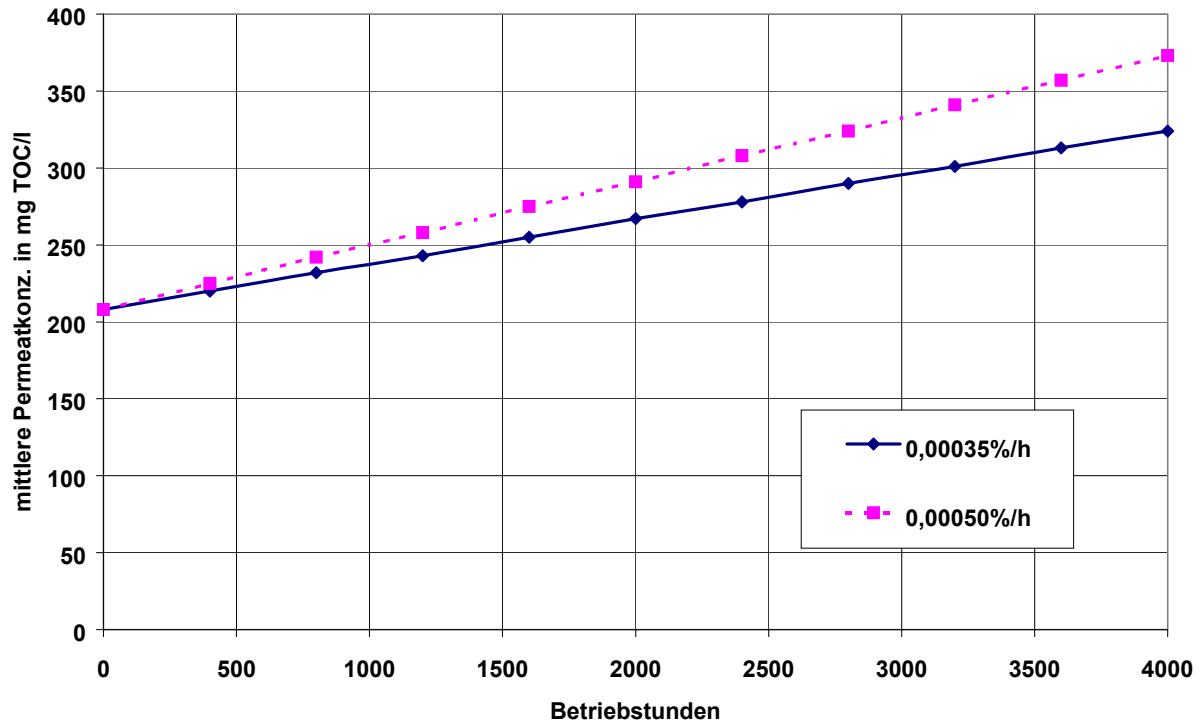


Abb. 6: Mittlere TOC-Permeatkonzentration in Funktion der Betriebsstunden

In Abbildung 6 ist der simulierte Betrieb hinsichtlich der mittleren Permeatkonzentration an TOC über die Betriebszeit aufgetragen, woraus sich eine innerhalb der Vorgaben liegende Betriebszeit für den ausgewählten Membrantyp von extrapolierten 3'200 Betriebsstunden für eine Betriebskostenschätzung ablesen läßt.

Fouling-Untersuchungen

Die Lebenszeit einer Membrane in einer Produktionsanlage ist jedoch nicht nur von ihrer Selektivität abhängig. Neben dieser für die geforderte Trenngüte sehr wichtigen Kenngröße kann auch die Verkleinerung der Kapazität über die Betriebszeit einer Trennanlage die Standzeit der eingesetzten Membranelemente reduzieren. In Prozessanlagen, in denen synthetische Produkte gefahren werden, sind Fouling- und Scaling-Effekte nicht so verbreitet wie in Wasseraufbereitungs- und -behandlungsanlagen.

Selbstverständlich sind vor Anwendungsrealisierungen Untersuchungen hinsichtlich potentieller Fouling- bzw. Scaling-Effekte unumgänglich. Es ist sicherlich kostengünstiger, halbtechnische Untersuchungen bei einer neuen industriellen NF-Anwendung zur Abklärung von potentiellen Problemen wie diese z.B. Scaling oder Fouling sein können, vor dem Entscheid zum Bau einer Anlage durchzuführen. Im technischen Maßstab, also in einer ausgeführten Produktionsanlage, sind sicherlich derartige Untersuchungen langwieriger und kostenaufwendiger und daher nur im Ausnahmefall (z.B. bei bestehenden Anlagen oder Verfügbarkeit von Erfahrungen) Pilotuntersuchungen vorzuziehen.

Methoden der Charakterisierung und Überwachung von industriellen NF-Anlagen

Erscheinungsbild	Mögliche Ursache	Diagnoseschritte	Maßnahmen
Signifikanter Rückhalterückgang, Differenzdruckanstieg, Permeatflussreduktion	Übersättigung, Fällung von anorganischen Inhaltsstoffen (z. B. Ca-, Mg-Sulfat/Carbonat, Me-Fällungen, etc.)	Löslichkeiten der Produkt- und Nebenproduktkomponenten bestimmen (z.B. durch Eindampfversuch bei komplexer Lösung)	pH-, Konzentrationsfaktor, Temperatur Membrantyp ändern, Zusatzstoffe überlegen, Prozesswasser verbessern
Steigender Differenzdruck, fallender Rückhalt	Gelöste org. Stoffe, suspendierte Kolloide, Feinste Partikel	Vorbehandlung überprüfen, Feed auf Fouling verursachende Stoffe überprüfen	Fahren bei höheren Temperaturen, Konzentrierung verringern, Vorbehandlung kontrollieren.
Schneller und starker Permeatflussrückgang, jedoch ohne relevante Erhöhung des Differenzdrucks	Adsorptionen organischer Stoffe auf Membranen, z.B. Fette, Öle, Polymere, etc.	System auf mögliche Kontamination od. ev. Quellen prüfen ungeeignete Entschäumer oder Additive	Andere Feedvorbehandlung (hydrophobe Filter, Aktivkohle, etc.), alternative Zusatzstoffe

Tab. 5: Potentielle Veränderungen im Trennverhalten der Anlage und Vorschläge zur Begegnung und Lösung dieser Abweichungen vom normalen Verhalten

Andere Fragestellungen betreffen zum Beispiel auch die Verfügbarkeit von alternativ einzusetzenden Membranen. Was, wenn NF-Membranen durch analoge Trennmembranen ersetzt werden müssen und warum kann dies erforderlich werden? Hier ist vor allem das relativ kleine Angebot seitens der Hersteller die größte Herausforderung. Der Betreiber ist in vielen Fällen zufrieden, wenn die neuartige Trennanlage produziert und wird normalerweise keine weiteren Untersuchungen hinsichtlich Ersatztypen vornehmen. Der Ausgangspunkt kann durch unterschiedliche Faktoren begründet sein: Standzeit, Fouling-Eigenschaften, CIP-Eigenschaften, Änderungen im Prozess oder bei den Ausgangsprodukten, von Preisen und noch anderes mehr können diese Forderung auslösen.

In der Folge seien hier nur einige Anregungen gegeben, wie vorzeitig darauf Vorbereitungen getroffen werden können:

- Charakterisierung der Membranen für den Prozesseinsatz,
- Beschreibung des Trennverhaltens der Membrane bei realen Prozessbedingungen,
- Einführung eines geeigneten Testsystems und Bestimmung der Trenndaten in der Produktionsanlage,
- Beauftragung zur Untersuchung von potenziellen NF-Membrantypen mit dem evaluierten Testsystem,
- Fahren von einzelnen alternativen Membranelementen in der Produktionsanlage und Vergleich der Permeatqualität des Testelementes mit jener des Gesamtpermeats.

Dies sind jedoch nur Maßnahmen, die bei neuartigen und nicht vergleichbaren Anwendungen zu treffen sind. Bei Molke beispielsweise wären diese Maßnahmen nur dann zu treffen, wenn ein spezieller neuer Inhaltsstoff mit bestimmter Qualität zu produzieren ist.

Generelle Anwendungen

Typische Anwendungen der Nanofiltration sind Entsalzung von organischen Produktlösungen und damit auch ganz allgemein der bedeutende Einsatz der NF zur Trennung von organischen und anorganischen gelösten Stoffen, ferner in der Abwasserbehandlung, in der Enthärtung von Trinkwasser, Trennungen von gelösten Stoffen, die sich zumindest um den Faktor 2 bis 5 in ihren Molmassen unterscheiden.

Anwendung	Permeat	Retentat	Prozessziel/Motive
Alkalische CIP-Abläufe/Lösungen	Alkalische Reinigungslösungen	CSB, TOC, gelöste und ungelöste Stoffe, Reinigungszusätze	Rezyklierung von CIP-Flüssigkeiten, Reduzierung von Chemikalien / Kosten
Antibiotika, Wirkstoffe, Fine chemicals	Salzhaltiges Wasser	Entsalzte, gereinigte und konzentrierte Produktlösungen	Einfachere kostengünstigere Trenntechnik, Erhöhung von Qualität / Reinheit
Entfärbung von Zuckerlösungen	Entfärbte Produktlösung	Fraktion mit abgetrennten Farbstoffen	Qualität-/ Betriebskostenreduktion
Getränke-, Genussmittelindustrie	Klarsäfte, Klarsaftkonzentrate, Konzentrierungswasser	Rückstände, Farbstoffe, konzentrierte Produkte, Extraktkonzentrate	Schönung von Wein und Bier, Farbstoffisolierung/-Konzentrierung aus Presssäften
Recycling von Säuren aus Bädern	Verdünnte Säure, saure Lösungen	CSB, TOC, Ca, Al, Fe, suspendierte Stoffe, restliche Säuren	Reduzierung von Verbrauchskemikalien und Kosten
Sulfatabtrennung aus Meerwasser, Elektrolysesolen, Salzsolen zur Herstellung von Chemiesalz	Organik- und erdalkalifreie Salzlösung	Erdalkali- und organikreiche Fraktion, Rückführung zur Vorbehandlung	Gewinnung von: hochreinem Vakuumsalz [11], sulfatfreie Salzlösungen für Elektrolyseanlagen [12], Injektionswasser zur Eröl- und Erdgasgewinnung
Textilindustrie, Farbstoffindustrie	Farbstoffe	Rückgewinnung von Prozesswasser, Behandlung von farbstoffhaltigem Abwasser, Reduzierung von CSB, TOC	Herstellung von salzarmen Farbstoffen, höhere Reinheit/Qualität, hochreine Formulierungen
Wasser	Teilenthärtung	Aufgehärtetes Wasser	Reduzierung von Kalkabscheidungen, Heizflächen/Apparaten
Weitergehende Abwasserreinigung	Gereinigtes Wasser	Restfarbstoffe, refraktäre Stoffe, CSB	Deponiesickerwasser, geklärtes Industrieabwasser [18]

Tab. 6: NF-Anwendungsbeispiele [10]

Aufgabenstellungen im Bereich Nahrungs- und Getränekemittel

Nanofiltrationsverfahren bieten sich in steigendem Maße in der Herstellung neuer Lebensmittelqualitäten, von Lebensmittelzusatzstoffen oder auch für die Produktion neuartiger funktioneller Produkte, den so genannten Nutraceuticals, an. Die Ausgangsprodukte sind hierbei in überwiegendem Maße natürliche und hoch komplexe Systeme, deren Aufarbeitung und Formulierungen sich an Anforderungen zu orientieren haben, die wesentlich schwieriger messtechnisch zugänglich sind, oder deren Kriterien sich aufgrund einer nur teilweisen Kenntnis oder noch besser einer weitgehenden Unkenntnis der relevanten Wirkungsmechanismen und nur auf Basis langfristiger empirischer Daten beschreiben lassen.

Edukte	Komponenten, Aufgabenstellung	Ziele
Most, Traubensaft	Säuren, Zucker, Hefen; Konzentrieren, Entkeimen	Keine therm. Belastung, keine Hydrolyse
Früchte, Gemüse, Obst, Presssäfte	Aromastoffe, Farbstoffe; Isolieren, Reinigen, Konzentrieren	Geschmack, Klarheit, keine Verunreinigungen
Frucht, Blüten, Blätter, Holzextrakte	Wirkstoffe, Geruch-, Geschmacksstoffe, Isolieren, Konzentrieren	Qualität, Erhaltung aller relevanten Komponenten
Molke	Aufarbeitung, Trennung, Fraktionierung von Inhaltsstoffen	Gewinnung von Nebenprodukten, Ausbeute
Molkehydrolysate	Peptide, Aminosäuren, Fraktionierung	Qualität, Ausbeute
Dünnsäfte, Klarsäfte	Entmineralisierung, Vorkonzentrierung	Qualität, Energiekosteneinsparung
Knollenfrüchten	Kohlehydrate, Stärke, Fraktionierung	Qualität, Reinigung Kostenreduzierung
Zuckerlösungen, Roh-Zuckerlösungen	Saccharose, Klärung, Entfärbung, Konzentrieren, Rückgewinnung	Qualität, Chemikalieneinsparung, Ausbeute
Wein, Bier	Klärung, Konzentrierung	Kaltsterilisierung
Extrakte (Kaffee, Tee, Aromen, Polyphenole)	Isolieren, Konzentrieren	Aromen, Qualität, Kosten
Süßungsmittel	Enzyme, Salze; Synthesen, Reinigung,	Ausbeute, Stabilisierung
Organische Säuren, Aminosäuren	L-Glutamat, L-Asparagin, L-Cystein, Glycin, L-Glutamin	Isolierung, Reinigung
Citrussäfte	Entsäuerung	Standardisieren, Qualität
Spül- und Reinigungswasser, CIP-Abläufe	Aufarbeitung, Aufbereitung	Wiederverwendung, Laugenrückgewinnung

Tab. 7: Überblick zu Produkten, zu gewinnenden Stoffen und Anwendungen.[15]

Als Beispiel sei hier auf Anwendungen im Bereich der Nutzung von Molke hingewiesen, in denen die NF für ein eher noch weniger genutztes Verfahren gilt. Milchsäurehaltige Molken lassen sich mit NF entsäuern und eine in wirtschaftlicher Hinsicht nicht zu übersehende Anwendung ist ebenso in der Vorkonzentrierung von bereits entsalzter Molke vor

der Eindampfung zu sehen. Damit können im Wesentlichen die Betriebskosten reduziert, aber auch die Kapazität einer bestehenden Eindampfanlage erhöht werden.

In Abbildung 7 sind schematisch verschiedene Wege der Molkeverarbeitung gezeigt, worin die NF 1 als Trennschritt mit einer etwas offeneren NF-Membrane zur weitgehenden Gewinnung von Lactose und hydrolysierten Proteinen konzeptionell eingesetzt ist, die NF 2 dann zur Trennung von Salzen und Lactose von den permeierten Molkehydrolysaten.

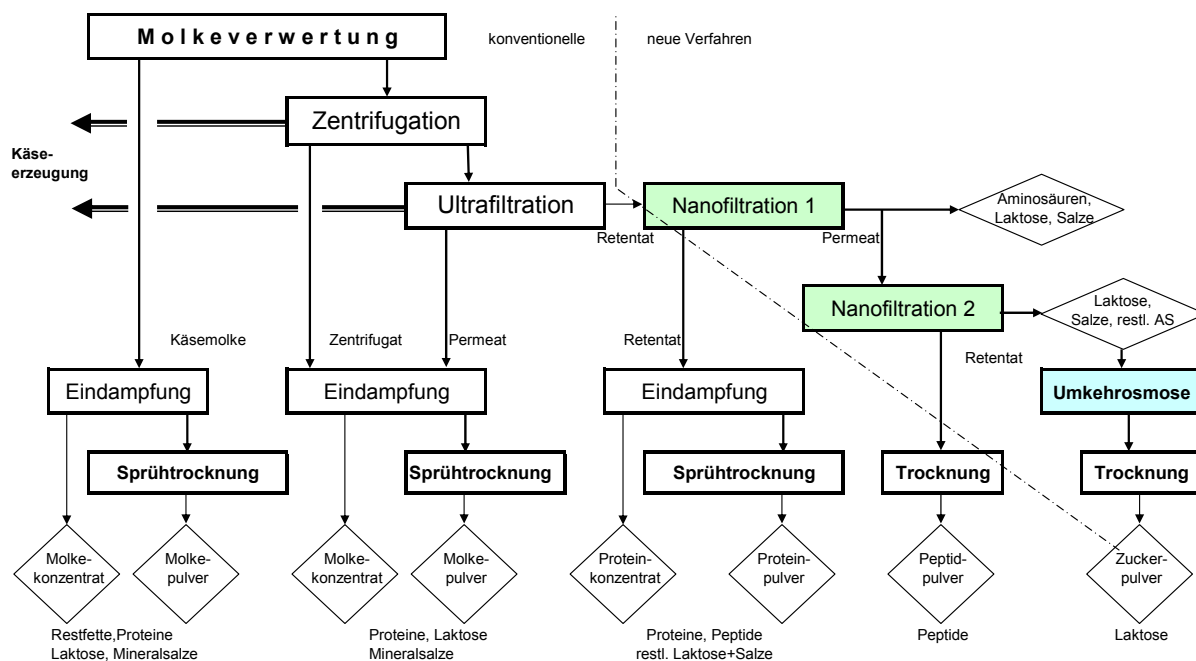


Abb. 7: Prozessschritte der Molkeaufarbeitung und NF-Anwendungen [15]

Die Aufarbeitung von enzymatisch hydrolysierte Molke wird zukünftig zur Gewinnung von speziellen Produktfraktionen vermehrt eingesetzt werden: Dies einmal, um verfügbare Molke zu verwerten und zum anderen, um neuartige Produktkomponenten herzustellen. Bei der Hydrolyse werden physikalisch-chemische Eigenschaften wie Löslichkeit, biologische Verfügbarkeit, Viskosität, Oberflächenspannung und Emulgierverhalten verändert, indem die Molekülgrößen der natürlichen Proteinmischungen drastisch verkleinert werden. Damit geht auch eine wesentliche Hydrophilisierung durch den Abbau von hydrophoben und Schaffung von polaren Gruppen einher. Bei der daran anschließenden Aufarbeitung dieser hydrolysierten Molkeinhaltsstoffe ist einmal die Entfernung der Enzyme geeignet auszuführen, ferner sind niedermolekulare gelöste Stoffe und Aminosäuren neben der Isolierung der gesuchten funktionellen Peptide zu entfernen.

Die Gewinnung von Wachstumsfaktoren aus Kollostralmilch, ferner spezielle Molkebestandteile, wie Wachstumsfaktoren, β -Lactoglobulin, Peptide, Aminosäuren und noch weitere sind mit diesen Membranen zu gewinnende Inhaltsstoffe, die in steigendem Maße auch in Ernährungsprodukte Einzug finden werden [15]. Ausgangssysteme dafür sind wiederum Permeate aus Vorfraktionierungen, wie diese als Möglichkeiten in der Abbildung 7 zu ersehen sind. Hier sind NF-Membranen mit unterschiedlichen Permeationseigenschaften erforderlich, durch die sich potentiell interessierende Produkte selektiv fraktionieren und gewinnen lassen.

Anwendungen in der Wasseraufbereitung

Waren die Wasseraufbereitungsverfahren noch vor einigen Jahrzehnten mit Fällung/ Floccung, Bettfiltration und Chlorierung ausreichend, so haben sich in den letzten 20 Jahren Problemstellungen und wesentliche Anforderungen geändert, womit neue Trenntechniken zur Erreichung der geforderten Qualitäten notwendig geworden sind. Im Bereich der Entwicklung und des Einsatzes neuer Verfahren zur Verbesserung der Qualität unseres Wassers zählt die Nanofiltration ebenso zu den bedeutenden Trennverfahren in der Technik der zukünftigen Wasseraufbereitung.

In Abbildung 8 sind in einem schematischen Überblick partikuläre und gelöste Wasserinhaltsstoffe nach ihrer Größe und den anzuwendenden Trenn- bzw. Filtermedien dargestellt. Diese Stoffe sind mit Ausnahme der mineralischen gelösten Anteile, speziell was das Trinkwasser betrifft, als Verunreinigungen und teils als pathogene Stoffe zu klassifizieren, die durch konventionelle Techniken teils nicht mehr in erforderlichlichem Maße erfassbar und behandelbar sind.

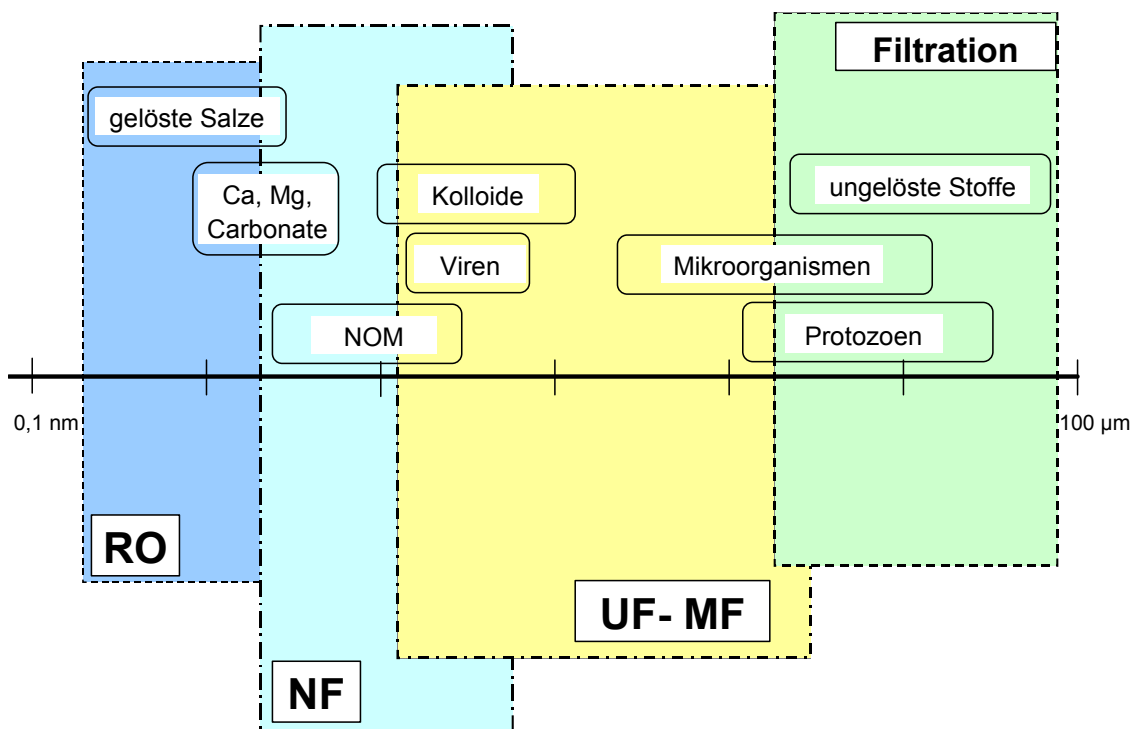


Abb. 8: Wasserinhaltsstoffe und anwendbare Trennmedien

RO-Membranen weisen einen hohen Rückhalt für Na-Ionen – also einwertige Ionen – auf, wohingegen NF-Membranen einwertige Ionen nur in geringerem Maße zurückhalten, zweiwertige – wie Ca, oder Mg-Ionen – hingegen in hohem Maße abzutrennen vermögen.

NF und RO: Membrananwendungen bei höherem Druck

Aufgrund dieser speziellen Ionenselektivität zwischen einwertigen und zweiwertigen Ionen konnten NF-Membranen bereits erfolgreich zur Teilenthärtung von Grund- und Quellwas-

ser eingesetzt werden. Eine erste große Anwendung dieser NF wurde bereits 1977 in Florida realisiert [16], [19].

Bis heute wird die Anzahl von Anlagen mit Membrantechnik weltweit mit über 300 beziffert und die Gesamtkapazität dieser Anlagen mit über 50'000 m³/h geschätzt.

NF-Membranen können aber mit ihren speziellen Trenneigenschaften nicht nur zur Reduzierung von Härtebildnern eingesetzt werden, sondern sind auch vorteilhaft zur Abtrennung von im Wasser befindlichen natürlichen und anthropogenen organischen gelösten Inhaltsstoffen zu verwenden. Damit gelingt es auch, mit der NF Farbstoffe und organische Metabolite bzw. Precursors der Desinfektionsreaktionen abzutrennen, womit diese Membranen generell als das zweckmäßige Trennmedium für im Wasser befindliche natürliche Kohlenstoffverbindungen (DOC) betrachtet werden können. Die Verwendung von NF-Membranen zur Aufbereitung von Oberflächenwasser wird dabei wesentlich durch eine geeignete Kontrolle des Membranfoulings bestimmt. Eine Vielzahl von Untersuchungen und Erfahrungen mit bzw. bei der Aufbereitung von Oberflächengewässern und organisch belasteten Grundwässern existiert bereits.

Zweistufige Membranverfahren (kombinierte oder integrierte)

Bei niedrigen Drücken können mittels MF und UF partikuläre Verunreinigungen in der Wasseraufbereitung erfasst werden; bei den Membranverfahren mit höheren Drücken, wie NF und RO, werden gelöste Inhaltsstoffe in zweckmäßiger Weise abgetrennt. Konzeptuell würde also die Kombination von MF und UF mit der NF und RO eine vollständige Behandlung von gelösten und ungelösten Inhaltsstoffen des Wassers möglich machen. Im November 1999 ist die weltweit größte integrale Membrananlage in Heemskerk, Niederlande, mit einer Produktion von ca. 2'500 m³/h behandeltes Wasser in Betrieb gegangen [21].

Verschiedene Studien (z. B. [20]) wurden und werden immer noch durchgeführt; das wesentliche Augenmerk ist hier der Fouling-Problematik gewidmet, ferner werden neue Kombinationen von Membran- und konventionellen Aufbereitungstechniken untersucht. Spezielle neue Aufgabenstellungen werden beispielsweise im Bereich Wasser/Abwasser hinsichtlich Abtrennung endokriner Stoffe auf die NF zukommen [17].

Weitere Anwendungsgebiete der NF, die hier nicht im Detail besprochen werden, wären noch:

Metallverarbeitung/Galvanoindustrie: Aufarbeitung von Beizen, Spülbäder,
Säure-/Metallionen-Rückgewinnung.

Pharma/Biotechnologie: Wirkstoffisolierung/-Reinigung und/oder -Konzentrierung,
Aufarbeitung pflanzlicher, synthetischer, mikrobieller, tierischer Stoffe,
Feinchemikalien, organische Säuren, alkoholische Lösungen.

Bei der Anwendung neuer Technologien, zu denen auch heute noch die Nanofiltration zu zählen ist, haben im Vergleich mit den klassischen oder konventionellen Techniken die Vorteile der neuen Techniken klar ersichtlich zu sein. Dies können beispielsweise niedrigere Investitions- oder Betriebskosten betreffen, höhere zu erwartende Ausbeuten, verbesserte und neu erreichbare Qualitäten, ein geringerer Chemikalieneinsatz, geringere Anteile zu entsorgender Fraktionen und dergleichen mehr.

Die Investitionskostenschätzung

Bei der Schätzung der Kosten für die Ausführung von Nanofiltrationsanlagen ist genau zu definieren, was der Anlage zugeordnet wird und was außerhalb der Anlagengrenze liegt. Die dargestellten Kostenzahlen basieren einmal auf empirischen Daten, ferner auf Firmenangeboten und auch auf Kosten von ausgeführten Anlagen. Es wurden hierbei nicht übliche vorgefertigte Anlagen betrachtet, die in größeren Stückzahlen gebaut und auf Wasseraufbereitung oder Reinwassergewinnung ausgelegt sind, sondern ausschließlich Anlagen, die entsprechende Entwicklungs- und Planungskosten erfordern, da sie auf eine spezielle Anwendung ausgelegt werden, bei der nicht auf Erfahrungen zu bereits ausgeführten Anlagen zurückgegriffen werden kann. Näheres zu einfachen Kompaktanlagen wird im Beitrag von DI M. Zimmermann im Rahmen dieses Seminars vorgestellt.

In dieser Grobkostendarstellung werden für derartige Spezialanlagen, wie diese für industrielle Einsätze in der Chemie, im Pharma- und teilweise auch im Lebensmittelbereich ausgeführt werden, die Kosten in Abhängigkeit der zu installierenden Membranfläche dargestellt. Zudem wird darin unterschieden, mit welcher gewählten Modulkonfiguration (Rohr-, Platten-, Spiralmodulanlage) diese Anlage auszustatten ist.

In den Kostenzahlen der Abbildung 9 sind in den spezifischen Investitionskosten (SIK) die Kosten für Montage, Installation, Steuerung und ein üblicher Kostensatz an Engineering inbegriffen, wobei Bauliches, Behälter, Ver- und Entsorgungsanschlüsse nicht enthalten sind.

Aus Abbildung 9 sind weiters die spezifischen Investitionskosten - also die Kosten je m² Anlagenmembranfläche - in Euro mit einer Kostengenauigkeit von $\pm 30\%$ zu entnehmen. Diese Abhängigkeiten der spezifischen Investitionskosten sind vorzugsweise nur im Bereich von über 100 bis zu 1000 m² zu verwenden. Die Membranfläche muss vor der Kostenschätzung entweder aufgrund von verschiedenen zu treffenden Annahmen (siehe Tabelle 8) festgelegt werden, oder sie ist in vorausgehenden Labor- und Pilotuntersuchungen unter Anwendung der erforderlichen Richtlinien zur Maßstabsvergrößerung zu bestimmen.

Voraussetzungen und Grenzen einer Kostenschätzung

Mit dem hier vorgestellten Investitionskostendiagramm besteht für den interessierten Membrananwender die Möglichkeit, schon in einer relativ frühen Phase eines Projektes grob die zu erwartenden Kosten zu schätzen, um einen Kostenvergleich anzustellen, inwieweit ein derartiges ins Auge gefasstes Membranverfahren eine Wirtschaftlichkeit aufweisen könnte. Bei all diesen Schätzungen sind aber die getroffenen Annahmen genauestens festzuhalten und dazu anzuführen, worauf sich diese gemachten Annahmen begründen (Erfahrungen, ähnliches Verfahren, Vorversuche im Labor, etc.) und welche Daten nachfolgend und mit welchen Untersuchungen diese zu überprüfen sind.

Das Treffen von Annahmen ist sicherlich der wesentliche aber auch kritischste Teil einer derartigen Kostenschätzung. Diese angenommenen Daten dienen als Eingangsgrößen für die Dimensionierung der Anlagengröße und sollten daher immer als solche auch bewusst erkennbar bleiben. Auf diese Weise sind in der Tabelle 8 Daten oder Bereiche dargestellt, aus welchen bestimmte Werte als Annahmen festzulegen sind.

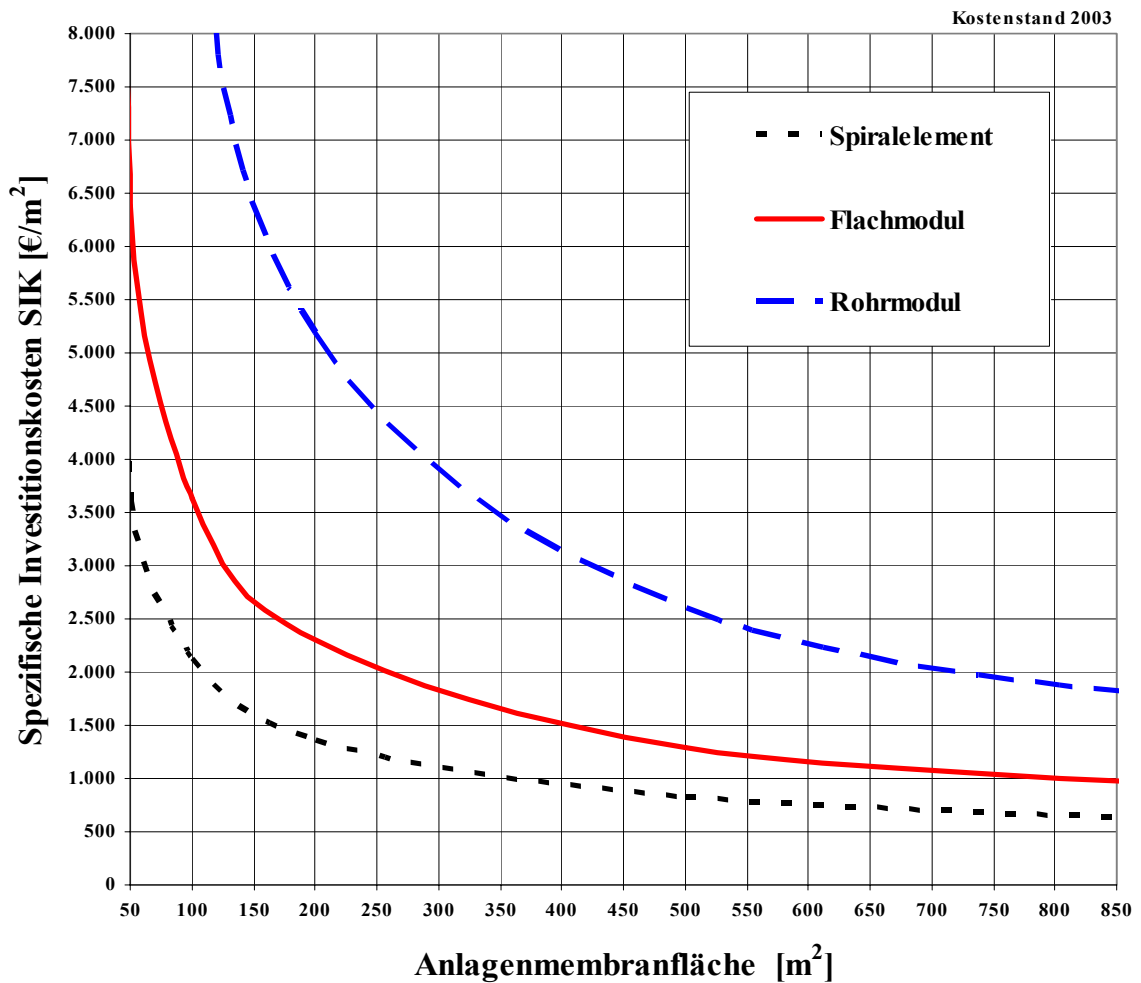


Abb. 9: Spezifische Investitionskosten in Abhängigkeit der Anlagenmembranfläche

Modulkonzept	welche Modulart für das gestellte Problem geeignet erscheint.
Membrantyp	z. B. keramische oder Polymermembranen
Prozess-Permeatfluss	die z. B. in einem bestimmten Bereich erwartet werden.
Betriebsdruck	der zu erwartende erforderliche mittlere Druck im Prozess

Tabelle 8: Bereiche der zu treffenden Annahmen für grobe Kostenschätzungen

Als allgemeiner Hinweis sollte hier noch angeführt werden, dass Annahmen womöglich nur mit der Unterstützung von erfahrenen Fachleuten oder Experten getroffen werden, um nicht Gefahr zu laufen, potentielle Alternativen voreilig auszuschließen oder in ein Verfahren Entwicklungskosten zu investieren, die sich dann als unwirtschaftlich und so als nicht durchführbar herausstellen.

Literatur

- [1] R. W. Baker: Membrane Technology and Applications, 2004, J. Wiley & Sons Ltd, Chichester, England
- [2] S.P. Nunes and K.V. Peinemann: Membrane Technology in the Chemical Industry, WILEY-VCH Weinheim, Germany (2001).
- [3] R. Rautenbach: Membranverfahren, Grundlagen- der Modul und Anlagenauslegung, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York (1997).
- [4] M. Mulder: Basic Principles of Membrane Technology, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands (1996).
- [5] K. Scott: Handbook of Industrial Membranes, Elsevier Science Publisher Ltd., Oxford (1995).
- [6] Nitto Report R-601: Nitto Reverse Osmosis Spiral Element NTR-7410 Series, August 28, (1986).
- [7] Toray Report Section 900: Concentration and Recovery of valuable Materials from their dilute aqueous solutions, TSP-911, May 31, (1982).
- [8] M. Doloszeski, Diplomarbeit: Trenneigenschaften von Nanofiltrationsmembranen in Lösungssystemen hoher Salzkonzentration, TU Wien, (Jan. 1996).
- [9] A. Schönauer and W.M. Samhaber: The specific behaviour of NF membranes in the separation of high ionic strength electrolyte solutions, CHISA, Prag (2000).
- [10] W. Samhaber: Die industrielle Anwendung der Nanofiltration – Potenziale, Erfahrungen und Grenzen, Chem. Ing. Techn. 2005, 77, Nr. 5, pp. 566 - 572.
- [11] W. Samhaber and K. Krenn: Potential of Membrane Technology for Improving the Brine Purification Process, 8th World Salt Symposium Vol. II 1209-1210 (2000).
- [12] Z. Twardowski and J. G. Ulan: Nanofiltration of concentrated aqueous salt solution, US Pat. 5,858,240.
- [13] Website of Membrane Manufacturers:
<http://www.tcn.zaq.ne.jp/membrane/english/MembManufE.htm>
- [14] Website of Process Applications:
<http://www.tcn.zaq.ne.jp/membrane/english/ProcessE.htm>
- [15] W. Samhaber: Anwendungen und Aufgabenstellungen der Nanofiltration in der Lebensmittelindustrie, Chem. Ing. Techn. 2005, 77, Nr. 5, pp. 583 – 588.
- [16] W. Samhaber: Membrananwendungen zur Verbesserung der Wasserqualität, ÖWAV-VDI-Membrantagung 2005, Linz.
- [17] L. D. Nghiem, et al.: Estrogenic hormone removal from wastewaters using NF/RO membranes, J. Membr. Sci. Vol. 242 (2004).
- [18] S. K. Marttinen: Screening of physical-chemical methods for removal of organic material, nitrogen and toxicity from low strength landfill leachates, Chemosphere 46 (2002) 851-858.
- [19] W.J. Conlon and S.A. McClellan: Membrane Softening: A water treatment process comes of age. J. of the American Water Works Assoc. 81 (11) 47 (1989).
- [20] A.Gorenflo, D. Velázquez-Padrón, F.H. Frimmel: Nanofiltration of a German groundwater of high hardness and NOM content: performance and costs. Desalination 151 (2002) 253-265.
- [21] J.C. Kruithof et al.: Development of a membrane integrity monitoring strategy for the UF/RO Heemskerk drinking water treatment plant. Water Supply 1 (2001) 261-271.