

Neue Membranen und Membranverfahren für eine Vielzahl von Prozessen

Bericht vom 14. Aachener Membrankolloquium 2013

H. Lyko*

Sowohl die Materialwissenschaft der Membranen als auch die Entwicklung von Membranverfahren sind Disziplinen, die steten Entwicklungsprozessen unterliegen, so dass mit immer neuen Materialien neue Verfahren und neue Anwendungsgebiete erschlossen werden. Das 14. Aachener Membrankolloquium, das im November 2012 unter Federführung der Aachener Verfahrenstechnik (RWTH Aachen) stattfand, gab den über 200 Teilnehmern aus 25 Ländern wieder einen eindrucksvollen Überblick. Die Themen der 34 Vorträge und 50 Poster (s. /1/) deckten das volle Spektrum an Anwendungen ab. Auch die drei Keynote-Vorträge vertieften den Eindruck von der großen Zahl und Unterschiedlichkeit möglicher Anwendungen. Prof. Hans Wijmans, Membrane Technology and Research, Inc., gab einen Überblick darüber, wie aus Materialwissenschaft und Prozesstechnik neue Membranen und Anwendungen hervorgehen. Prof. Detlef Stolten vom Forschungszentrum Jülich erläuterte die Entwicklungen der Wasserelektrolyse und der Brennstoffzellentechnologie als Schlüsseltechnologien für erneuerbare Energien. Dr. Joachim Koschikowski vom Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE) in Freiburg zeigte aktuelle Ergebnisse der Entwicklung von solarthermisch betriebenen Membrandestillationsanlagen zur dezentralen Meer- und Brackwasserentsalzung. In den nachfolgenden Zusammenfassungen ausgewählter Vorträge und Posterpräsentationen liegt der Schwerpunkt auf Anwendungen in der Biotechnologie und Prozesstechnik, der Gastrennung und neuen Materialien und Methoden.

Membranen in biotechnologischen Produktionsprozessen

Mit der zunehmenden Erzeugung und Verwendung von Mikroalgen als Rohstoffe für die biobasierte Produktion von Grundstoffen und Energieträgern steigt auch die Nachfrage nach wirtschaftlichen Entwässerungstechniken. Mikroalgen sind Einzeller mit Größen zwischen 1 bis 10 μm , die in der Zuchtbrühe relativ verdünnt vorliegen. Für die weitere Verarbeitung müssen die Algen „geerntet“, d.h. die Brühe muss entwässert werden. Dazu werden Zentrifugen verwendet, üblicherweise Separatoren mit hoher Drehzahl oder neuerdings auch Zentrifugen nach der so genannten Spiralplattentechnologie /2/. Um den Energiebedarf, die Investitionskosten und ggfs. den Chemikalienbedarf für die Entwässerung zu minimieren, wurde von Chris Dotremont et al. vom flämischen Forschungsinstitut VITO ein Hybridverfahren mit vorgeschalteter Membranfiltration vorgeschlagen (s. auch /3/). Dieser Prozessschritt soll mit getauchten Flachmembranmodulen erfolgen. In Labortests wurden zunächst verschiedene Membranmaterialien (PVC, PVDF und PES-PVP) getestet, wobei dabei die von VITO entwickelten IPC-Membranen (IPC = integrated permeate channel, s. www.vito.be) mit Porenweiten, die der Mikro- beziehungsweise Ultrafiltration entsprechen, mit einer handelsüblichen und einer nicht kommerziellen Mikro-

filtrationsmembran verglichen wurden. Die IPS-Membran ist rückspülbar, während die anderen Membranen in nicht rückspülbaren Plattenmodulen konfiguriert waren. Als Messgröße wurde der kritische Fluss in Abhängigkeit vom Membranmaterial, der Porenweite, der Algenart und -konzentration bestimmt. Der kritische Fluss hängt dabei weniger von der Zellgröße als von der Eigenschaft der Zellwand ab. Algen mit rigiden Zellwänden lassen sich am besten filtrieren. Anhand der Laborergebnisse wurden die IPC-UF-Membran aus PES-PVP mit einer Trenngrenze von 300 kDa und die kommerzielle MF-Membran mit nomineller Porenweite von 0,4 μm für Pilotversuche ausgewählt. Es zeigte sich, dass UF-Membranen generell besser geeignet sind zur Aufrechterhaltung stabiler Flüsse als die MF-Membranen. Das IPC-Konzept bietet durch die Rückspülbarkeit höhere und stabilere Flüsse als das kommerzielle Plattenmodul. Das hinsichtlich seines Foulingverhaltens am besten bewertete Membranmaterial PVDF lag noch nicht als IPC-Membran vor, soll in Zukunft aber realisiert werden.

In der pharmazeutischen Biotechnologie haben sich membranbasierte Filtrationstechniken als effektive Maßnahmen sowohl zur Produktgewinnung als auch zur Produktreinigung erwiesen. Prof. Peter Czermak von der Fachhochschule Mittelhessen gab einen Überblick über die verschiedenen Membranverfahren zur Virusgewinnung beziehungsweise -entfernung (je nachdem, ob Viren Produkt oder Störstoffe sind), und welche Vor- oder Nachteile sie gegenüber den anderen, für

diese Trennaufgaben geeigneten Verfahren wie Affinitäts- oder Ionenaustauschchromatographie aufweisen. Als wesentlicher Vorteil der Membranfiltration wurde die Möglichkeit der kontinuierlichen Verarbeitung auch großer Volumenströme mit hohen Ausbeuten bei Erhalt der Virusaktivität genannt, als wesentlicher Nachteil die angeblich geringere Selektivität. Die Möglichkeit, Membranen sowohl zur Aufkonzentrierung als auch zur Reinigung in einer Anlage einzusetzen, nämlich durch Anwendung der Diafiltration, gibt den Membranverfahren ein Alleinstellungsmerkmal und ermöglicht eine optimale Einpassung in eine Bioprozesskette. Generell werden zur Virusfiltration Ultrafiltration und Membranadsorption eingesetzt, es werden sowohl Querstrom- als auch Deadend-Filtrationsanlagen betrieben. Die Sterilfiltration ist ebenfalls eine Variante der Ultrafiltration, die eingesetzten Membranen haben aber eine engere Porengrößenverteilung (20 ± 2) nm und wirken deshalb quasi als Absolutfilter.

Membranelemente in der pharmazeutischen Biotechnologie sind, wie viele andere Anlagenkomponenten auch, häufig als Einwegelemente ausgeführt, wodurch sich die Ausrüstung und der Aufwand für Reinigung und Validierung der Reinigung erübrigen. Von einem Sterilfilter erwartet man neben der engen Porengrößenverteilung eine geringe Neigung zur Proteinbindung, eine exzellente chemische und thermische Stabilität, ein Minimum an extrahierbaren Stoffen, eine hohe Aufnahmekapazität für die zurück zu haltenden Viren und Virenbruchstücke sowie eine sehr gute Benetzbarkeit. Über diese

*Dr.-Ing. Hildegard Lyko
Dortmund, Tel. 0231-730696



Eigenschaften verfügen die Sterilfilter der Marke Sartopore® Platinum, so die Ausführungen von Dr. Dieter Melzner und Mitarbeitern der Sartorius Stedim Biotech GmbH. Wesentliche Merkmale dieser Filter sind die nach einer neuen, patentierten Technologie modifizierte Oberfläche der PES-Membranen und die ebenfalls patentierten Faltung (Twin-Pleat-Technologie). Die Oberfläche sorgt für die gute Benetzbarkeit und die geringe Proteinbindung, und damit einen geringen Produktverlust wie beispielsweise monoklonale Antikörper. Die Faltung erhöht die zur Verfügung stehende Membranfläche pro Elementvolumen und damit die Aufnahmekapazität beziehungsweise den Durchsatz.

Als weitere Innovation stellte Melzner die jüngsten Entwicklungen auf dem Gebiet der Membranchromatographie (Membranadsorption) vor, die sich besonders für das Polishing etabliert haben (nähere Beschreibung s. auch /4/). Als weitere relevante Applikation wurde die gezielte Bindung und Reinigung großer Viren genannt. Hier erweist sich der Membranadsorber als vorteilhaft gegenüber eine Chromatographiegels, da im Membranadsorber durch die hochporöse Struktur mehr (nahezu alle) potenziellen Bindungsstellen von den Viren auch erreicht werden können.

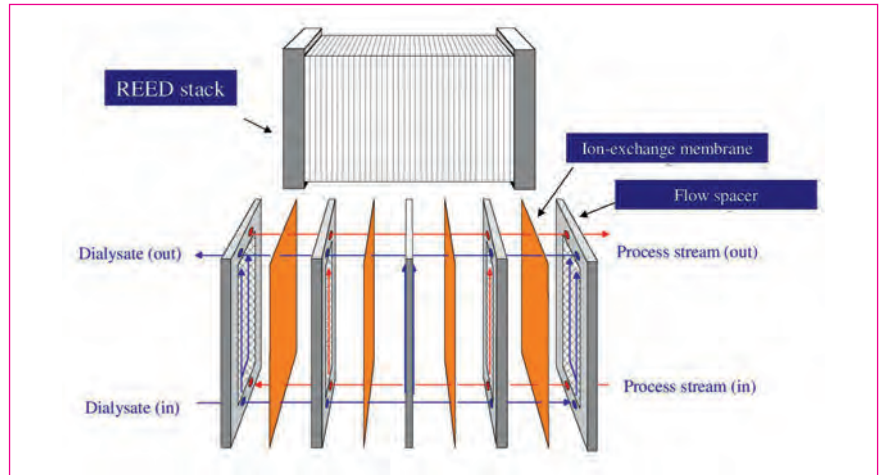


Abb. 1: Prinzipschema des REED-Verfahrens (Bild: Department of Chemical and Biochemical Engineering, Technical University of Denmark)

REED (Reverse Electro-Enhanced Dialysis = umgekehrte Elektrodialyse) ist ein Verfahren, das in ähnlicher Form unter dem Acronym EDR (Electrodialysis Reversal) auf dem 13.amk zur Brackwasserbehandlung gezeigt wurde /5/. Hier dient die gezielte Abtrennung von Ionen der Verbesserung der Ausbeute von Fermentationsreaktionen. Die bei der Fermentation entstehenden Ionen behindern den Fortgang der Reaktion, sobald eine bestimmte Konzentration überschritten wird. Prof. Gunnar E. Jonsson von der technischen Universität von

Dänemark in Lynby zeigte die Ausführungsform der REED-Stacks, die vom Unternehmen Jurag Separation realisiert werden (s. Abb. 1), und Anwendungsbeispiele (s. auch /6/). So entsteht zum Beispiel bei der Herstellung von rekombinanten Proteinen unter Verwendung der Bakterien *Lactococcus lactis* Lactat als Nebenprodukt mit der vorab genannten inhibierenden Wirkung. Der kontinuierliche Abzug des Lactats bei gleichzeitiger Rückhaltung der Mikroorganismen durch das REED-Verfahren erhöht die Gesamtausbeute etwa um den Faktor 6.

NÜRNBERG MESSE



EXPLORE THE DYNAMICS OF POWTECH 2013

Internationale Fachmesse für Mechanische Verfahrenstechnik und Analytik



DYNAMICS.POWTECH.DE

Zukunftsweisende Expertenlösungen für Analysieren, Zerkleinern, Sieben, Mischen, Fördern, Dosieren und Kompaktieren.

23.-25. APRIL IN NÜRNBERG, GERMANY

Ideeller Träger

Mitglied im powderbulknetwork



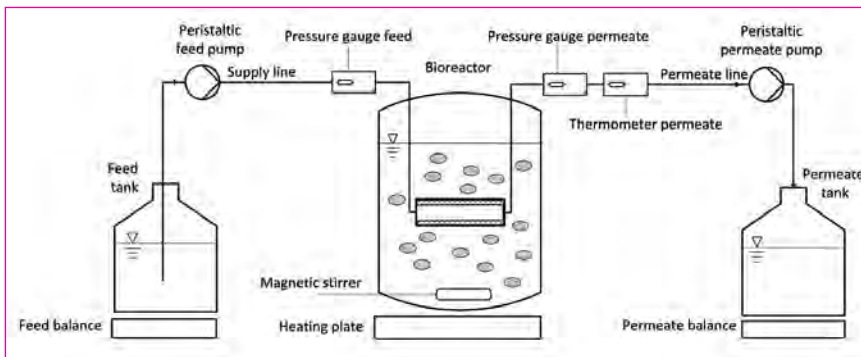


Abb. 2: Versuchsaufbau für die Reverse-Flow Diafiltration (Bild: Aachener Verfahrenstechnik (AVT), RWTH Aachen)



Abb. 3: Mikrosieb (links) und Modul (rechts) für die Produktgewinnung in einem Bioreaktor (Bild: Aachener Verfahrenstechnik (AVT), RWTH Aachen)

Die Fermentationsbrühe wird durch das System geleitet, und die Zielionen werden durch die Membranen zurückgehalten und in das Dialysat überführt. Bei einer solchen Membrananwendung stellt das Fouling eine sehr große Herausforderung dar. Dieser begegnet man hier durch periodische Umkehr der Polarität des angelegten elektrischen Feldes. Dadurch werden Ablagerungen auf den Membranen wieder abgelöst. Das System aus Fermenter und REED-Stacks ist gesamt als Membranbioreaktor zu betrachten, wobei die Einflüsse der periodischen Spannungsumkehr und des Lactatabzug sowohl experimentell als modellbasiert untersucht wurden /7/.

Das Eintauchen von Membranmodulen in einen Bioreaktor ist Stand der Technik in der Abwasserreinigung. Neben der Erprobung zur Algengeräte (s.o.) wurden hier auch Untersuchungen zu ihrer Verwendung in der biopharmazeutischen Produktion präsentiert. Frederike Carstensen von der Aachener Verfahrenstechnik erläuterte in einem Vortrag und einer Posterpräsentation das Verfahren der Reverse-flow Diafiltration (eine allgemein anerkannte deutsche Übersetzung gibt es noch nicht, man kann es als Diafiltration mit Strömungsumkehr beschreiben) zur Insitu-Produktgewinnung. Dieses Verfahren, das schematisch in Abb. 2 dargestellt und detaillierter in /8/ beschrieben ist, läuft in einem Zyklus aus vier Schritten ab. Im ersten Schritt wird eine Nährlösung über die Membran in den

Reaktor geleitet, im zweiten wird die Feedlösung aus dem Zulufräum durch Permeat verdrängt, indem die Feedpumpe durch Umkehr der Strömungsrichtung einen Unterdruck erzeugt. Im dritten Schritt wird das Produkt, beispielsweise Antikörper, mit dem Permeat abgezogen, und im abschließenden vierten Schritt wird die im Permeatraum vorhandene Lösung durch Nährlösung erneut ausgetrieben. Für dieses Verfahren wurden unter anderem eine Hohlfasermembran eingesetzt, wobei die Strömungsrichtung für den ersten Schritt von innen nach außen und für die Produktgewinnung (Permeatabzug, dritter Schritt) von außen nach innen gewählt wurde. Die Schritte 3 und 4 bewirken, dass die das Produkt enthaltene Permeatlösung nicht unnötig verdünnt wird, aber auch kein Permeat verloren geht. Die periodische Strömungsumkehr an der Membran verhindert die Bildung einer Deckschicht auf der Membran.

Neben den Hohlfasermembranen, die unter anderem auch als UF-Membranen mit 0,05 μm Porenweite verwendet worden waren /8/, wurden für die Reverse-flow Diafiltration auch Mikrosiebe eingesetzt, und zwar auch in getauchten Modulen (s. Abb. 3). Hierfür wurde die klassische Filtration mit Rückspülung, aber ohne zwischenzeitliche Zugabe von Nährlösung, mit der Reverse-flow Diafiltration verglichen. Beim Einsatz von Mikrosieben in solchen Fermentern erweist sich der damit erreichbare hohe

Fluss als besonderer Vorteil, weil der für die Module zur Verfügung stehende Raum begrenzt ist. Die Trenngrenzen der eingesetzten Mikrosiebe lagen mit 0,5 und 0,8 μm in der Größenordnung der zurück zu haltenden Hefezellen. Da auch noch Zellfragmente in der Lösung vorlagen, war der mit Hilfe von Partikelzählern gemessene Gesamtrückhalt mit etwa 90% nicht so hoch. Die Diafiltration reduzierte den Anstieg der transmembranen Druckdifferenz und ermöglichte die Aufrechterhaltung eines stabilen Flusses mit geringeren Schwankungen als die Filtration mit Rückspülung. Dafür erhielt man mit letzterer etwas höhere Rückhalte, weil die Bildung einer Deckschicht die Filtrationswirkung erhöhte.

Gastrennung mit Membranen

Bei den Forschungsthemen zur Gastrennung spielt die CO_2 -Abtrennung aus (Ab)Gasströmen eine wichtige Rolle. Die direkte Gastrennung mit Membranen steht dabei in Konkurrenz zur Absorption, aber auch Hybridverfahren aus beiden werden untersucht. Als weitere Variante wird außerdem die Absorption in Membrankontakoren in verschiedenen Projekten betrieben.

Für die Trennung sehr großer Gasströme, wie beispielsweise die CO_2 -Abtrennung aus Kraftwerksabgasen, werden Komposit-Flachmembranen entwickelt, die hohe Flüsse ermöglichen sollen. Eine ebenso große Bedeutung hat aber auch die Entwicklung von geeigneten Modulen für diese Kapazitäten. Dr. Torsten Brinkmann vom Helmholtz-Zentrum Geesthacht (HZG) zeigte die Ergebnisse vergleichender Simulationsrechnungen zur Leistungsfähigkeit von Flachmembranmodulen. Dafür wurden das allseits bekannte Spiralwickelmodul, das in Geesthacht entwickelte Taschenmodul und ein Modulkonzept aus Stapeln rechteckiger Membrantaschen herangezogen. Zu letzterem schien es zum Zeitpunkt des Vortrages noch keinen Prototyp zu geben. Während im Spiralwickelmodul eine reine Querströmung vorliegt, liegt im Taschenmodul, bedingt durch Umlenkelemente, eine partielle Gegenströmung vor, während im Modulkonzept aus rechteckigen Membrantaschen eine reine Gegenströmung von Retentat und Permeat realisiert werden soll. Membranleistungsdaten wurden in Vorversuchen mit einem Taschenmodul, ausgerüstet mit der im HZG entwickelten PolyActive-Kompositmembran ermittelt. Maßgebend für die Eignung eines Moduls ist neben dem Membranfluss der Druckverlust, den das abgezogene Permeat erfährt. Dieser ist beim Spiralwickelmodul am höchsten. Beim Modulkonzept aus rechteckigen Membrantaschen existiert eine optimale

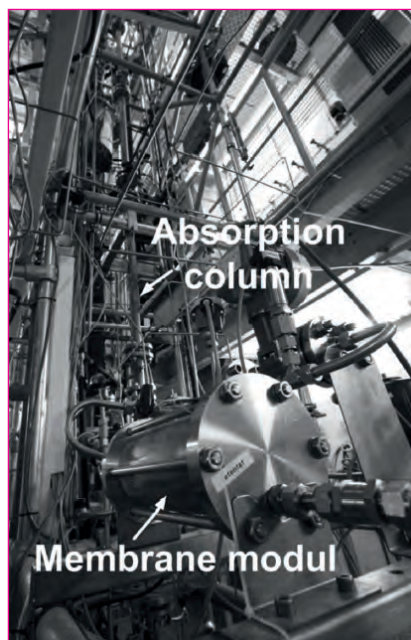


Abb. 4: Versuchsanlage zum Hybridprozess aus Membranseparation und Gasabsorption (Foto: Fachgebiet Dynamik und Betrieb technischer Anlagen, TU Berlin)

Anzahl von Segmenten mit entsprechend arrangierten Permeatabzügen, bei denen die treibende Kraft zur Gastrennung optimal genutzt werden kann. Das bekannte HZG-Taschenmodul, bei dem für große Gasmengen mehrere Stacks in einem Druckrohr untergebracht werden sollen, wurde für Rauchgasbehandlungen und ähnliche Großanlagen als zu kompliziert erachtet.

Die Anwendung eines Membrankontaktors zur Biogaskonditionierung wurde vom Ingenieurbüro Buse, vertreten durch Steffen Vogler, untersucht. Beim verwendeten Membranmodul handelt es sich um ein Liqui-Cel®-Kontaktor von Membrana, der mit Hohlfasern bestückt ist. Als Absorptionsmittel für das abzutrennende CO₂ dient Wasser, das die Hohlfasern außen umströmt, während das zu trennende Gasgemisch, das vorab entschwefelt wurde, durch die Fasern geleitet wird. Das Absorptionsmittel wird im Kreislauf geführt. Das aufgenommene CO₂ wird zunächst aus dem Wasser gestrippt, und

die weitergehende Entgasung des Wassers geschieht in einem weiteren Membrankontaktor mit Luft als Schlepplgas. Mit dem Verfahren, das seit Anfang 2012 zum Patent angemeldet ist, konnte eine Methankonzentration von über 98% erreicht werden. Im Gegensatz zur Aminwäsche kommt es ohne teure Absorbentien aus. Man geht aber davon aus, dass im großtechnischen Betrieb Mittel zur Wasserdesinfektion notwendig werden. Weitere Untersuchungen, die mehr Aufschluss über Wirtschaftlichkeit und Umweltverträglichkeit des Verfahrens im Vergleich zu anderen Methoden geben, wurden in Aussicht gestellt.

Die Möglichkeiten, durch die Installation einer Membrantrennstufe vor einer Absorptionsanlage den gesamten Gastrennungprozess energieeffizienter und kostengünstiger zu betreiben, wurden an der TU Berlin von Steffen Stünkel et al. untersucht. Der aufzutrennende Gasstrom entsteht bei der oxidativen Kopplung von Methan, einem Alternativprozess zur Fischer-Tropsch-Synthese, mit dem länger-kettige Alkane und Alkene hergestellt werden können. Neben 26 Vol% CO₂ enthält das Produktgasgemisch Methan, Ethan und Ethen. Ohne Betrieb einer Membrangastrennung liegt der Energiebedarf einer Absorption mit einem Hochleistungsabsorbent (37 Gew.-% N-Methyl-diethanolamin (MDEA) mit 3 % Piperazin) in der Versuchsanlage bei knapp 3,5 MJ/kg CO₂. Die Installation eines vom HZG entwickelten Membranmoduls mit Matrimid-Membranen führte zu einer ersten Reduktion des CO₂-Gehalts im Zulauf der Absorptionskolonne (Anordnung s. Abb. 4) auf 17 Vol.-%. Damit reduzierten sich die Zahl der theoretischen Böden in der Kolonne, die Kapazität von Wärmetauscher und Pumpe und der Volumenstrom des Absorbents, so dass sich der spezifische Energiebedarf pro kg abgetrennten Kohlendioxids insgesamt um 40 % verringerte. Im Hybridverfahren wurde außerdem mehr CO₂ abgetrennt als mit der Absorption alleine, allerdings führte die Installation der Membranstufe auch zu einer insgesamt geringeren

Ausbeute an Produkt (Ethylen). Um diesen Verlust zu minimieren, schlägt man eine zweistufige Membrananlage mit Rezirkulation vor. Neben den Experimenten in der Versuchsanlage wurde der Prozess mit verschiedenen Parametern auch mit Aspen Custom Modeler® simuliert,

Neue anorganische Hohlfasern

Hohlfasern bieten die höchste Packungsdichte in Membranmodulen. Aber gerade bei chemisch und thermisch resistenten Materialien wie Metallen oder Keramiken waren bislang die technisch realisierbaren kleinsten Durchmesser von Hohlfasern deutlich über denen, die mit Polymeren hergestellt werden können. An der Universität Twente wurde ein Verfahren entwickelt, mit dem poröse Hohlfasern mit minimalen Außendurchmessern von etwa 250 µm hergestellt werden können. Mieke Luiten-Olieman zeigte in einer Posterpräsentation vielversprechende Resultate, die mit verschiedenen Materialien erhalten worden waren (s. Abb. 5,6). Das Herstellungsverfahren (näher beschrieben in /9/) beruht auf einem Trocken-Nassspinnverfahren einer mit anorganischen Partikeln beladenen Polymerlösung. Die beim Spinnen entstehende „Grünfaser“, die zunächst noch einen größeren Durchmesser hat, wird einer Wärmebehandlung unterzogen. Während dieser schrumpft die Faser, weil das Polymer schmilzt (die Temperatur liegt oberhalb der Glasübergangstemperatur), in einer viskosen Strömung aus den Räumen zwischen den Partikeln zu fließen beginnt, zersetzt und bei weiterer Temperaturerhöhung vollständig oxidiert (verbrannt) wird. Am Ende der thermischen Behandlung wird die übrig gebliebene Struktur, die nur noch anorganische Partikel enthält, gesintert. Der Durchmesser und die Porosität der Hohlfaser lassen sich in bestimmten Grenzen über die Wahl des Polymers (die Viskosität oberhalb der Glasübergangstemperatur), die Art, Konzentration und Größe der suspendierten Partikel und die Temperaturführung beeinflussen. Die Hohlfasern sind noch keine fertigen Membranen, aber geeignet, als Substrate für entsprechende trennaktive Schichten zu fungieren.

Neue Produkte für die Wasseraufbereitung

In der Wasseraufbereitung haben sich Kapillarmembranen zur Ultrafiltration etabliert, aber bei Prozessen mit dichteren Membranen zur Nanofiltration oder Umkehrosmose überwiegen Spiralwickelmodule, obwohl sie nicht rückspülbar sind. Die Nanofiltration oder Umkehrosmose mit Spiralwickelmodulen erfordert



Abb. 5: Ansicht der neu entwickelten Hohlfasern im Vergleich zu einer kommerziellen Hohlfasermembran aus Al₂O₃ (rechts außen) (Bild: Inorganic Membranes Group, Fakultät für Science and Technology, University of Twente)



eine entsprechende Vorbehandlung, was den gesamten Prozess komplizierter und teurer macht. Um diese Nachteile zu umgehen, hat man bei Pentair X-Flow Polymerkapillaren zur Nanofiltration entwickelt. Die Grundkörper sind aus modifiziertem Polysulphon und die trennaktive Schicht aus Polyamid. Ihre Filtrationsrichtung ist von innen nach außen. Mit diesen Kapillaren sind Module mit 40 m² Membranfläche pro Element und Abmessungen von 20,3 cm (8 inch) Durchmesser und etwa 1,5 m Länge (60 inch) erhältlich. In 6-monatigen Pilotversuchen mit Oberflächenwasser konnten ein stabiler Filtrationsbetrieb erreicht und alle Anforderungen für die Trinkwasserproduktion erfüllt werden.

Die Lewabrane®-Umkehrosmosemodule sind nach Angaben ihres Herstellers Lanxess die ersten wirklich neuen Umkehrosmoselemente auf dem globalen Markt seit mehr als 15 Jahren. Die Membranen werden seit 2011 in einem neu errichteten Werk in Bitterfeld aus den im eigenen Unternehmen produzierten Rohstoffen hergestellt. Alan Sharpe berichtete über die ersten Erfahrungen im Einsatz zur Aufbereitung von Kühlturmwasser, wo die Lewabrane-Elemente zusammen mit Modulen von Wettbewerbern eingesetzt waren. Sowohl hinsichtlich der Flussleistung als auch des Salzzückhalts waren die Elemente der verschiedenen Hersteller ähnlich. Um die Auswirkungen der chemischen Beschaffenheit der Membran (geringere Oberflächenladung der Membran und stärkere Vernetzung des Polymers im Vergleich zum Wettbewerb) auf Lebensdauer und Foulingneigung zu beurteilen, reichten die protokollierten Versuchszeiten von etwa 200 Tagen noch nicht aus.

Literatur:

- /1/ Proceedings 14th Aachener Membran Kolloquium, 7th/8th November 2012 Aachen, ISBN 978-3-00-039967-1
- /2/ Lyko, H.: Zentrifugentechnologie: Nachhaltigkeit und Energieeffizienz bestimmen Maschinenkonstruktion und Prozessgestaltung; F&S Filtrieren und Separieren, Global Guide 2012-2014, S. 52- 57, ISBN 978-3-00-037568-2
- /3/ De Baerdemaeker, T.; Lemmens, B. Dotremont, C., Fret, J.; Roef, L.; Goiris, K.; Diels, L.: Benchmark study on algae harvesting with backwashable submerged flat panel membranes; Accepted manuscript: Bioresource Technology (2012) <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2012.10.153>
- /4/ Melzner, D.; Lyko, H.: Membranwendungen in der biopharmazeutischen Produktion; F&S Filtrieren und Separieren, Global Guide 2010-2012, S. 30 – 36, ISBN 978-3-00-029751-9
- /5/ de Armas, J.C.; Ohle, P.: Desalination of Llobregat river water in Barcelona using electrodialysis (EDR); Proceedings 13th Aachener Membran Kolloquium, 27th-28th October 2010, S. 103 – 110, ISBN 978-3-00-032823-7

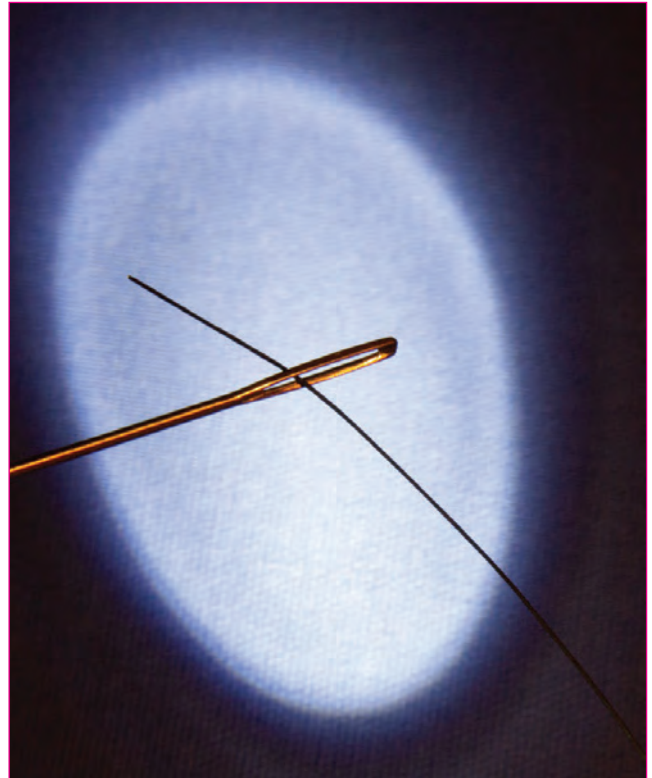


Abb. 6: Anorganische Hohlfaser im Nadelöhr (Bild: Inorganic Membranes Group, Fakultät für Wissenschaft und Technologie, Universität Twente)

- /6/ Fuhlendorff, R.; Garde, A.; Rype, J.-U.: Electro Membrane Technology Boosting Bioreactor Processes; Pharmaceutical Engineering (online article) July/august 2009, Vol 29 No. 4
- /7/ Prado-Rubio, O.A.; Jørgensen, S.B.; Jonsson, G.: Reverse Electro-Enhanced Dialysis for lactate recovery from a fermentation broth; Journal of Membrane Science 473 (2011), S. 20 – 32. DOI: 10.1016/j.memsci.2011.03.007
- /8/ Carstensen, F.; Marx, C.; André, J.; Melin, T.; Wessling, M.: Reverse-flow diafiltration for continuous in situ product recovery; Journal of Membrane Science 421-422 (2012), S. 39-50. <http://dx.doi.org/10.1016/j.memsci.2012.06.034>
- /9/ Luiten-Olieman, M.W.J.; Raaijmakers, M.J.T.; Winnubst, L.; Bor, T. C.; Wessling, M.; Nijmeijer A.; Benes, N. E.: Towards a generic method for inorganic porous hollow fibers preparation with shrinkage-controlled small radial dimensions, applied to Al₂O₃, Ni, SiC, stainless steel, and YSZ; Journal of Membrane Science 407-408 (2012), S. 155-163. DOI:10.1016/j.memsci.2012.03.030

die RICHTIGE Wahl

☑ TORAY Integrierte Membranverfahren

Membranen bester Qualität mit fachlicher Beratung durch unsere Experten

Höchste Qualität
TORAY produziert Membranen unter Verwendung neuester Technologien und Materialien nach ISO9001 und 14001.

Komplette Produktpalette
TORAY entwickelt und produziert Membranprodukte für sämtliche Anwendungen der Wasser und Abwasserbehandlung insbesondere für RO , NF, UF und MBR.

Weltweite Lieferung mit lokaler fachlicher Beratung
TORAY verkauft Membranprodukte weltweit und offeriert dabei regionale fachliche Beratung durch Experten.

RO

NF

UF

MBR

TORAY
MEMBRANE EUROPE

Headquarters Switzerland
Toray Membrane Europe AG
Tel. +41 61 415 8710
info@toraywater.com

Weitere Informationen finden Sie unter www.toraywater.com