

Membranen als Schlüsseltechnologie von morgen

Membranen trennen Räume und lassen bevorzugt bestimmte Komponenten passieren. Mit dieser Eigenschaft stellen Zellmembranen einen der wichtigsten Bestandteile jeder Zelle: sie ermöglichen Konzentrationsunterschiede zwischen innen und außen, lassen benötigte Stoffe selektiv hindurch und befördern Schadstoffe nach außen. Für die technischen Membranen sind die biologischen Membranen ein in vielen Punkten unerreichtes Vorbild. Aber auch technische Membranen lassen selektiv bestimmte Stoffe hindurch und halten andere zurück. Sie werden zunehmend zum Reinigen und zur Konzentrierung von Stoffströmen verwendet.

Die Forschungsgruppe „Molekulare Membrantrennverfahren und Reaktionstechnik“ beschäftigt sich mit der Trennung von Stoffgemischen mittels Membranen, basierend auf den unterschiedlichen Diffusions- und Löslichkeitskoeffizienten der zu trennenden Stoffe. Das Hauptaugenmerk liegt auf der Entwicklung neuer Geräte und Methoden, die Ressourcenverbrauch senken, damit Kosten sparen und die Umwelt entlasten. Wichtige Aufgaben sind neben der experimentellen Charakterisierung der Membranmaterialien auch die Simulation und Konstruktion innovativer Membranmodule für etablierte und neue Trennanwendungen. Darüber hinaus werden Anlagen für membran-gestützte Verfahren ausgelegt und im Pilotmaßstab erprobt oder eigens entwickelte Membranmodule eingesetzt.

Die Wissenschaftler der AVT arbeiten an Einsatzgebieten in der Energietechnik, dem prozessintegrierten Umweltschutz und Anwendungen außerhalb der klassischen Verfahrenstechnik.

Energietechnik

Brennstoffzellen:

Was Membranen mit Energietechnik zu tun haben, lässt sich an der Brennstoffzelle verdeutlichen. Im Gegensatz zur Wärmekraftmaschine, deren Wirkungsgrad grundsätzlich thermisch limitiert ist, können Brennstoffzellen theoretisch die gesamte chemisch gebundene Energie nutzen. Nur Wenige wissen aber, dass das Herzstück der Brennstoffzelle – zumindest bei dem gängigsten Typ PEM – eine Membran ist. Zur Bereitstellung von elektrischem Strom trennt die Membran selektiv zwei Räume: Kathode und Anode. Nur Ionen wandern durch die Membran, die Elektronen werden über einen externen Stromkreis geführt und speisen den Elektromotor. Membranen können auch in der Peripherie von Brennstoffzellen zum Einsatz kommen, beispielsweise in Membrankontaktoren zur Befuchtung der Zuströme. Membranen können aber auch in Kombination mit konventioneller Energieerzeugung nützliche Dienste leisten: Bestimmte keramische Membranen werden bei Temperaturen über 800°C für Sauerstoff permeabel und ermöglichen so die Abtrennung des für Verbrennungsprozesse benötigten Sauerstoffs aus Luft. Bei der Verbrennung von Kohlenstoff oder Kohlenwasserstoffen fällt dann nur Wasserdampf und Kohlendioxid an und das Treibhausgas CO₂ kann ohne die Anwesenheit von störendem Luftstickstoff effektiver abgetrennt und gelagert werden.

In Brennstoffzellen und keramischen Membranen zur Luftzerlegung findet jeweils eine ideale Trennung statt, die Membran lässt also nur eine Komponente hindurch, die anderen überhaupt nicht. In den meisten Fällen ist dies jedoch nicht so, Membranen lassen vielmehr alle Stoffe eines Gemisches passieren, einige jedoch besser als andere. Wenn es den Materialwissenschaftlern nicht gelingt, für eine Trennaufgabe ausreichend selektive Membranen zu entwickeln, besteht grundsätzlich die Möglichkeit

einer mehrstufigen Anlage. Im Falle der direkten CO₂-Abscheidung aus Rauchgas wären die Kosten dafür aber zu hoch.

Biogas, Erdgas, Synthesegas:

Methanhaltige Gase sind wichtige Energieträger. Methan verbrennt schadstoffarm und rückstandsfrei, jedoch sind seine fossilen Bestände begrenzt. Eine Alternative für die Zukunft stellen Biogase wie Klär- oder Deponiegas dar, die jedoch vor der energetischen Verwendung von unerwünschten Begleitstoffen befreit werden müssen. Oft ist eine Methananreicherung sinnvoll, um das Biogas in Gasversorgungsnetze einspeisen zu können. Das Rohgas enthält neben dem Zielprodukt Methan vor allem Kohlendioxid, Luftbestandteile, Schwefelwasserstoff, Wasserdampf und häufig Spurenschadgase wie Siloxane. Diese Stoffe müssen abgetrennt werden, einerseits um einen ausreichenden Heizwert zu gewährleisten, andererseits, um Korrosion in den Rohrleitungen zu verhindern und Sicherheitsaspekten zu genügen. Da man nicht für jeden abzutrennenden Stoff eine eigene Anlage bauen kann, ist es wichtig, Membranen zu entwickeln, die möglichst viele der störenden Komponenten möglichst komplett durchlassen und nur das wertvolle Methan ebenso komplett zurückhalten. Durch neue Materialien und Fertigungsverfahren konnten die Flüsse in den letzten zehn Jahren um den Faktor 10 gesteigert werden, was entsprechend geringere Membranflächen und niedrigere Investkosten bedeutet. Da gleichzeitig der Methanverlust durch verbesserte CO₂/CH₄-Selektivität sank, konkurriert die Membrantechnik heute er-

folgreich mit etablierten Techniken.

Auch die Nutzung von Abfällen wie Altreifen als Energiequelle kann mittels der Membrantechnik effektiver gestaltet werden. Zum einen können die in Altreifen gebundenen hochwertigen Ressourcen genutzt, zum anderen aber auch das Deponievolumen reduziert werden. Die Altreifen werden durch Vergasung unter anderem in Synthesegas umgewandelt, welches hauptsächlich aus Wasserstoff, Kohlenmonoxid, Methan und Kohlendioxid besteht. Durch den Einsatz von Membranen kann das Gasgemisch gemäß den Anforderungen nachgeschalteter Energiewandlungsprozesse dann aufbereitet werden.

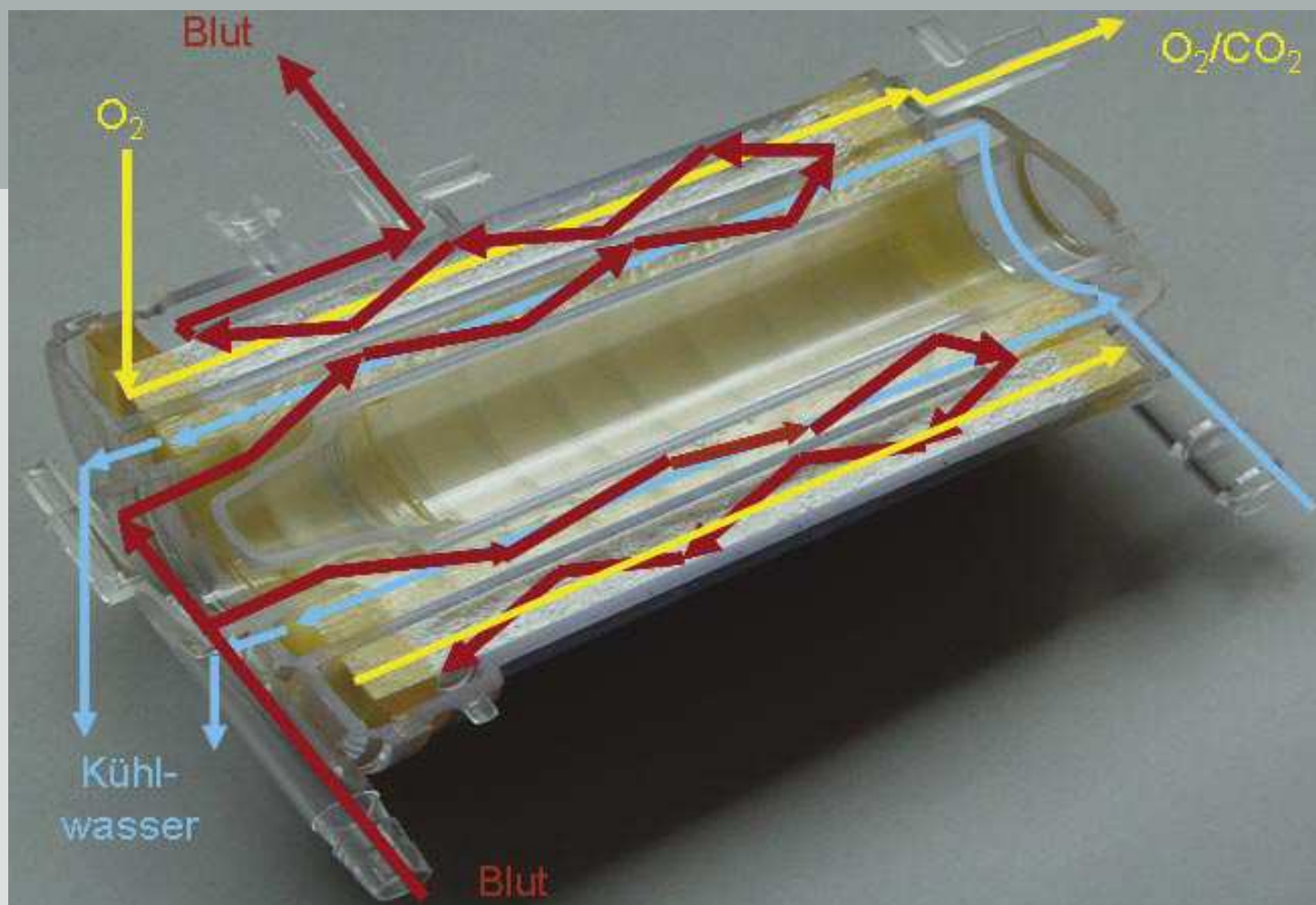
Prozessintegrierter Umweltschutz

Unter prozessintegriertem Umweltschutz versteht man den Einsatz von Verfahren, die Emissionen in Abwasser, Abgasen oder Abfall vermeiden oder vermindern, etwa indem Prozessströme zurückgeführt oder zu Wertstoffen aufgearbeitet oder Reaktion und Trennung so geführt werden, dass Nebenreaktionen ausbleiben oder die Verwendung problematischer Hilfsstoffe entfällt. Als rein physikalisch wirkende, bei moderaten Bedingungen betriebene Verfahren sind Membranprozesse hierzu besonders geeignet. Elektrodialyse und Reaktivextraktion mit einem Membrankontaktor werden als Beispiele vorgestellt.

Elektrodialyse

Die Elektrodialyse ist eines der ältesten technisch eingesetzten Membranverfahren. Hierbei wird ausgenutzt, dass bestimmte Membranmaterialien nur Anionen, andere nur Kationen transportieren. Durch Anlegen eines elektrischen Feldes und geeignete Anordnung der Membranen lassen sich vollentsalztes Wasser und konzentrierte Salzströme, aber auch konzentrierte Säuren und Laugen herstellen. Die Eigenschaften der Elektrodialyse sichern ihr einen Platz in Zukunftsmärkten wie der Gewinnung von Trink-

Neue Entwicklungen kommen im Umweltschutz und in der Medizintechnik zum Einsatz



wasser aus Brackwasser, der Produktion von organischen Säuren aus nachwachsenden Rohstoffen und im prozessintegrierten Umweltschutz. Hierzu gehören die Rückführung von Säuren und Laugen oder von Schwermetallsalzen aus verdünnten Prozesswässern und die Entsalzung von Produkten. Bei herkömmlichen Umsalzungen oder Fällungsprozessen fallen große Mengen an Schlämmen und Abwässern an, bei der Elektrodialyse nicht.

Die AVT forscht auf drei Ebenen an Elektrodialyseprozessen: der Ebene der physikalischen Grundlagen, an Anwendungen für reale Stoffsysteme und an der optimalen Einbindung der Elektrodialyse in Gesamtprozesse.

Auf der Grundlagenebene werden mit internationalen Partnern neuartige, bipolare Elektrodialysmembrane mit verbesserten Eigenschaften entwickelt und untersucht. In der Anwendungsforschung werden die realen Trenneigen-

schaften am Beispiel der Abtrennung von Itakonsäure im Rahmen des Exzellenzclusters „Maßgeschneiderte Kraftstoffe aus Biomasse“ ermittelt. Neben den Trenneigenschaften werden auch Störeffekte wie das Ausfallen von Salzen (Scaling), die Deckschichtbildung (Fouling) oder die Membranvergiftung (Poisoning), die durch Verunreinigungen ausgelöst werden, untersucht. Entsprechend der Ergebnisse wird dann die gegebenenfalls nötige Vorbehandlung und die beste Stelle und Fahrweise der Elektrodialyseanlage im Gesamtprozess festgelegt. Die dritte Ebene, die technische und wirtschaftliche Optimierung des Gesamtprozesses, erfolgt lehrstuhlübergreifend und erfordert Modelle des Trennprozesses unter Einbezug von Vorbehandlung und Folgeschritten.

Reaktivextraktion mit Membrankontaktoren

In einem Membrankontaktor findet ein Stoffaustausch zwischen Fluidströmen statt, die durch eine Membran getrennt sind. Aus Sicht des über die Membran transportierten Stoffes spricht man von Abgeber- und Aufnehmerphase. Man unterscheidet Fälle, in denen die Membran nur der Einstellung des Phasengleichgewichts zwischen den Strömen dient, und solche, in denen sie selektiv wirkt. Durch Verwendung einer dichten, selektiven Membran ist auch eine Extraktion zwischen zwei ineinander löslichen Flüssigkeiten, etwa zwei wässrigen Lösungen möglich. Zur Erzeugung der Triebkraft für den Transport wird dann eine chemische Reaktion in der Aufnehmerphase eingesetzt, zum Beispiel eine Neutralisation mit deren Hilfe Stoffe in der Aufnehmerphase stark angereichert werden können. Entscheidend für die Einsetzbarkeit des Verfahrens sind einerseits die

*Bild 1: Blutoxygenator: Ein sehr kompaktes künstliches Organ.
Quelle: Kashefi-Khorasani, A. (2005): Untersuchungen zu Stofftransport und Fluid-dynamik bei extrakorporalen Membranoxygenatoren. RWTH Aachen, Dissertation, ISBN: 3-86130-764-2*

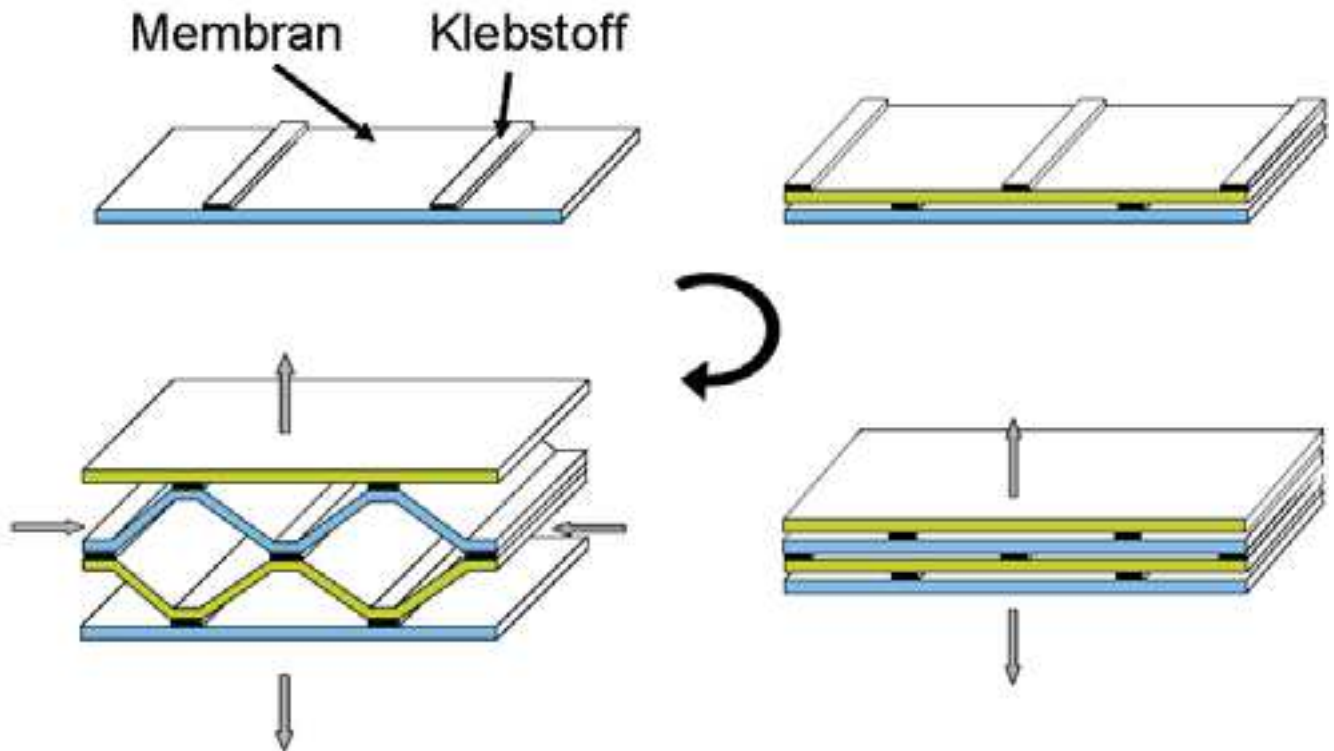


Bild 2: Das Prinzip der Modulfertigung.

Permeabilität der Membran für die zu transportierende Komponente und die Sperrwirkung für die anderen Reaktionsteilnehmer und die Reaktionsprodukte. In dem neuen Verfahren wird eine Silikonmembran als Transportmedium für toxische Phenole verwendet, welche aus verdünnten wässrigen Lösungen in Natronlauge extrahiert werden. Dort reagieren die Phenole mit Hydroxylionen zu Phenolaten, für welche die Membran ebenso wie für die Hydroxylionen undurchlässig ist. Es findet keine Kontamination des zu reinigenden Stoffstroms mit Lösemitteln statt. Aus den Prozessabwässern entstehen Produktströme: das von Phenolen befreite Wasser lässt sich zurückführen, die in hoher Konzentration abgetrennten Phenolate können aufgearbeitet und wieder verwendet werden.

Anwendungen außerhalb der klassischen Verfahrenstechnik

Medizintechnik:

Als künstliche Niere (Dialysator) und künstliche Lunge (Blutoxygenator) haben sich die Membrankontakoren in der Medizintechnik als Stand der Technik etabliert. Mehr als 10.000 Hohlfasern pro Dialysator mit Innendurchmessern von 0,2 mm realisieren eine Membranfläche von 1 bis 2 m². Lediglich 60 bis 100 ml Blut sind nötig, um den Dialysator zu füllen. Die offenporigen Fasern werden vom Blut durchströmt, während eine isotonische Salzlösung im Modulumantelraum geführt wird. Die Porengröße ist so eingestellt, dass höhermolekulare Bestandteile wie Eiweiße im Blut verbleiben und nur die kleinen Moleküle, darunter auch toxische Stoffwechselprodukte wie Harnstoff, ausgeschleust werden.

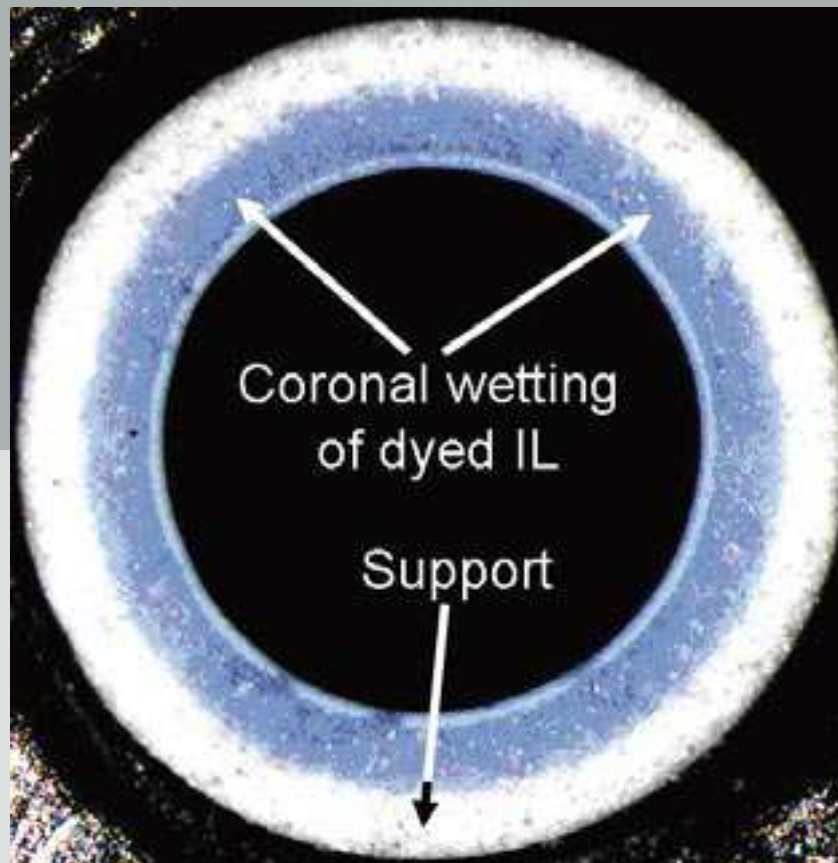
Blutoxygenatoren werden zur Sauerstoffversorgung des Blutes bei Herzoperationen benötigt, bei denen die normale Lungenfunktion des Patienten aussetzt. Der erstmals 1980 eingesetzte Membranoxygenator eroberte schnell den Markt und stellt heute den einzigen als künstliche Lunge verwendeten Apparatetyp dar. Bild 1 zeigt die Strömungswege innerhalb eines aufgeschnittenen Blutoxygenators. Das Modul fungiert gleichzeitig als Wärmetauscher, um während der Operation die Körpertemperatur des Patienten zu senken.

Klimatechnik:

Entwicklung eines simultanen Wärme- und Feuchtetauschers

Die Klimatisierung von Gebäuden ist in zahlreichen Bereichen unerlässlich und in anderen zur Verbesserung der Arbeits- und Wohnbedingungen erwünscht. Mit wachsendem Bedarf steigen die Anforderungen an die eingesetzte Technik. In Reinstäumen, Museen und Krankenhäusern sind strenge Auflagen bei Belüftungsraten und Raumfeuchte einzuhalten. Dies erfordert große Mengen Primärenergie zur Konditionierung der Luft hinsichtlich Temperatur und Feuchte. Gelingt es im Winter, die Wärme und Feuchte möglichst verlustfrei aus der Abluft an den kalten, trockenen Frischluftstrom zu übertragen, so lässt sich die Klimatisierung wesentlich energieeffizienter gestalten. Hierzu entwickelt die AVT in Kooperation mit dem DWI sowie zahlreichen Industriepartnern einen so genannten Enthalpietauscher.

Die Idee des Enthalpietauschers ist nicht neu. Bisherige Technologien sind jedoch entweder hygienisch bedenklich oder zu teuer um eine breite Akzeptanz zu erfahren. Das neue Konzept sieht den Einsatz eines Membranmoduls vor, in



dem Zu- und Fortluftströme durch eine weniger als 50 µm dicke, symmetrische, porenfreie Membran getrennt sind. Die Membran als selektive Barriere überträgt Wasserdampf und Wärme, während Staub, Bakterien und flüchtige organische Verbindungen nicht in das Gebäude zurückgeführt werden. Zur wirtschaftlichen Realisierung ist ein innovatives Modul-Design notwendig. Eine patentierte und im Labormaßstab erprobte selbsttragende Membranstruktur basiert auf einem Leichtbauprinzip, welches in der Luft- und Raumfahrt für tragende Bauteile bereits angewandt wird. Flachmembranen werden hierbei mit Hilfe eines alternierenden Klebemusters derart verbunden, dass sich nach dem Entfalten des Membranstapels die charakteristische hexagonale Modulstruktur einstellt, siehe Bild 2.

Der Fokus aktueller Forschungsarbeiten liegt auf der Optimierung der Modulgeometrie hinsichtlich des Wärme- und Stofftransportes sowie des Druckverlustes. Hierzu werden experimentelle Untersuchungen durchgeführt, welche im Anschluss mit Hilfe von Simulationen überprüft werden sollen. Parallel dazu wird nach neuartigen Membranmaterialien gesucht, welche über ausreichende mechanische Stabilität verfügen, leicht zu verkleben sind und zugleich eine hohe Permeabilität für Wasserdampf aufweisen.

Flüssigmembranen

Membranen müssen nicht immer aus festen Materialien wie Polymer-Verbindungen oder keramischen Bestandteilen bestehen. Auch Flüssigkeiten können als Membran eingesetzt werden, wobei es verschiedene Möglichkeiten gibt, diese so zu stabilisieren, dass sie dauerhaft eine definierte, dichte Trennschicht ausbilden. Eine Methode zur Stabilisierung ist das Aufbringen der Flüssigkeit auf eine poröse Trägerschicht, wobei sie entweder auf der Oberfläche haften bleibt (Supported Liquid Membrane - SLM) oder in deren Poren immobilisiert wird (Immobilized Liquid Membrane - ILM). Ein Nachteil bei der Anwendung von Flüssigmembranen bestand bisher im Verdunsten der Flüssigkeit in die Atmosphäre: die Membran löste sich im Laufe der Zeit im wahrsten Sinne des Wortes in Luft auf.

In Zusammenarbeit mit der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg haben die Wissenschaftler der AVT ein Konzept entwickelt, dieses Problem zu beheben: Der Einsatz einer neuen Klasse von Lösungsmitteln, den so genannten ionalischen Flüssigkeiten, verspricht die Langzeitstabilität von Flüssigmembranen entscheidend zu verbessern. Ionalische Flüssigkeiten weisen einen so niedrigen Dampfdruck auf, dass die Verdampfungsraten kaum noch messbar sind. In Bild 3 ist eine an der AVT hergestellte Flüssigmembran ge-

zeigt, in welcher eine blau eingefärbte ionalische Flüssigkeit verwendet wird. Der Träger, hier eine keramische Membran, wird so lange mit der ionalischen Flüssigkeit benetzt, bis sie durch Kapillarkräfte bedingt eine definierte Schicht der Poren des Materials ausfüllt. Dieses Benetzungsverfahren erlaubt eine reproduzierbare Membranherstellung über die Steuerung der Benetzungszeit. Einsatz findet die Membran in der Auftrennung eines Alken-Alkan-Gemisches, wie es beispielsweise in der Petrochemie vorkommt. Dabei ist die unterschiedliche Absorption der beiden Gase in der ionalischen Flüssigkeit ein maßgebender Faktor für die Selektivität dieser Membran.

Fazit

Die Membrantechnik bietet unzählige aussichtsreiche Lösungen für die Zukunft. Membranen überzeugen als Schlüsseltechnologie von morgen durch ihr hohes Potenzial, gleichzeitig Ökobilanzen zu verbessern und ökonomische Ziele zu erreichen. Die rapide Entwicklung der Membrantechnik und vielversprechende Forschungsergebnisse lassen spannende Forschung und lohnenswerte Ergebnisse erwarten.

Bild 3: In einem porösen keramischen Träger immobilisierte ionalische Flüssigkeit (blau).

Autor:
Univ.-Prof. Dr.-Ing.
Thomas Melin
ist Inhaber des Lehrstuhls
AVT-Chemische
Verfahrenstechnik.