

Prozessintensivierung mit Membranen

S. Ripperger*

Im letzten Jahrzehnt wurde unter dem Schlagwort „Prozessintensivierung“ auf dem Gebiet der Verfahrenstechnik und chemischen Technologie systematisch nach Maßnahmen gesucht, um die Effizienz der Stoffwandlung in vielen Bereichen drastisch zu verbessern. Die Verbesserungen können z. B. eine Erhöhung der Raum-Zeit-Ausbeuten einer Anlage, eine deutlich erhöhte Energie- und/oder Rohstoffausnutzung oder ein neues Produkt bzw. neue Produktqualitäten betreffen. Eine Prozessintensivierung kann unterschiedliche Konzepte und Maßnahmen beinhalten, die im einleitenden Teil des folgenden Beitrags erläutert werden. Ausgehend von den spezifischen Eigenschaften der Membranverfahren wird danach gezeigt, dass mit dem Einsatz von Stofftrennmembranen meist eine Prozessintensivierung verbunden war. Häufig konnten damit auch neue Produkte bzw. Produktqualitäten erzeugt werden. Möglichkeiten zur Prozessintensivierung mit Membranen werden im folgenden Beitrag aufgezeigt.

1. Einführung

Ein Trend innerhalb der Verfahrenstechnik und chemischen Technik wird seit mehreren Jahren mit dem Begriff „Prozessintensivierung (PI)“ beschrieben. Der Begriff wurde in den siebziger Jahren im Zusammenhang mit chemischen Prozessen eingeführt /1/. In den achtziger Jahren entwickelte sich unter dem Begriff durch die Arbeiten von C. Ramshaw /2/ eine Arbeitsrichtung innerhalb der Verfahrenstechnik. C. Ramshaw hat den Wärme- und Stoffaustausch bei Gas/Flüssig-Stoffaustauschprozessen durch die gegenüber der Erdbeschleunigung um ein Vielfaches höhere Zentrifugalbeschleunigung in rotierenden Kontaktapparaten intensiviert und hat die darauf aufbauende „High-g-Technology“ eingeführt. Mit der Entwicklung der Mikroverfahrenstechnik, in den neunziger Jahren wurde das Gebiet der „Prozessintensivierung“ weiter belebt und unter einem breiteren Blickwinkel betrachtet.

Nach dem heutigen Verständnis kann eine Prozessintensivierung mit

- einer Erhöhung der die Raum-Zeit-Ausbeuten in einer Anlage,
- einer verbesserten Energie- und Rohstoffnutzung,
- einer drastischen Senkung der Produktionskosten (Investitions- und/oder Betriebskosten),
- einer Verbesserung des Umweltschutzes (Reduzierung von Abluft-, Abwasser- und Abfallströmen,
- einer Erhöhung der inhärenten Prozesssicherheit und
- der Erzeugung neuer oder verbesserter Produktqualität

verbunden sein. Der Unterschied zur regulären Weiterentwicklung von Pro-

zessen besteht darin, dass aufgrund neuer Ansätze signifikante Verbesserungen in einer oder mehreren oben aufgeführten Richtungen erzielt werden. Solche Verbesserungen können auf Basis eines vertieften Verständnisses der ablaufenden Vorgänge in einem Prozess und der Einführung neuer Methoden und Technologien erreicht werden. Die Maßnahmen, die zu signifikanten Verbesserungen gegenüber den konventionellen Prozessen führen, lassen sich in verschiedene Kategorien einteilen, die im Folgenden näher betrachtet werden.

2. Maßnahmen zur Prozessintensivierung

Eine Prozessintensivierung kann mit unterschiedlichen Maßnahmen erreicht werden, die man in folgende Kategorien einteilen kann.

2.1. Prozessverstärkung

Die Prozessverstärkung beinhaltet eine wesentliche Intensivierung von Misch-, Wärme- und Stofftransportvorgängen. In Verbindung mit daran gekoppelten chemischen oder biochemischen Reaktionen kann dadurch die Raum-Zeit-Ausbeute und/oder die Selektivität wesentlich erhöht werden. Durch eine Vergleichmäßigung der Vorgänge im Prozessraum können auch verbesserte bzw. neue Produktqualitäten erzielt werden. Beispielhaft wird in diesem Zusammenhang oft die Entwicklung der Mikroreaktionstechnik aufgeführt, die zeigt, dass mit der Minimierung von Reaktorabmessungen die Vermischung der Edukte sowie die Wärmeübertragung sehr stark intensiviert werden können. Das Verhältnis von Oberfläche zu Volumen steigt bei mikrostrukturierten Apparaten auf mehrere Tausend m^2/m^3 . Dadurch kann der Wärme- und Stoffaustausch über die Wand eines Prozessraums wesentlich verstärkt werden, so dass auch das volle Potential einer chemischen Reaktion ausgeschöpft wird. Infolge der kurzen Distanzen sind damit auch große Gradienten für den Impuls-,

Wärme- und Stoffaustausch verbunden. Die notwendigen Produktionsraten können erzielt werden, wenn man die benötigte Anzahl an Strömungskanälen bzw. Reaktoren parallel betreibt (numbering-up). Das Risiko, dass die im Labor erzielten Ergebnisse mit der Großanlage nicht erreicht werden, das mit einer üblichen Maßstabsvergrößerung (scaling-up) verbunden ist, existiert beim Konzept des „numbering-ups“ nicht. Dagegen müssen Vorkehrungen getroffen werden, um einem Fouling der Wandungen und einer Verstopfung der kleinen Kanäle entgegen zu wirken. Diese Art der Prozessintensivierung wird u. a. vorteilhaft bei mischsensitiven und/oder stark exo- oder endothermen homogenen Reaktionen angewendet.

Eine Prozessintensivierung ist oft auch möglich, wenn anstatt eines Apparates, der sich durch das Fehlen von angetriebenen beweglichen Teilen auszeichnet und in Verbindung mit Arbeitsmaschinen (Pumpen, Gebläse) betrieben wird, eine Maschine eingesetzt wird. Dies gilt insbesondere dann, wenn es mit einer Maschine gelingt schwierige Prozessbedingungen (z. B. hoher Druck, hohe Konzentrationen, Erzeugung von Scherströmungen durch drehende Einbauten) zu beherrschen. Die High-g-Technology nach Ramshaw beinhaltet einen solchen Übergang von einem Stoffaustausch-Apparat auf eine Stoffaustausch-Maschine. Die Vor- und Nachteile von Stoffaustausch-Maschinen gegenüber Apparaten wurden von Brauer /3/ und Mersmann /4/ anhand von Beispielen 1986 bereits behandelt.

2.2. Prozessintegration

Eine Prozessintegration beinhaltet die simultane Durchführung mehrerer Grundoperationen in einem Apparat bzw. in einer Maschine. Ursprünglich wurden diese in sequentiell verschalteten separaten Apparaten oder Maschinen durchgeführt. Bei einer simultanen Durchführung von Grundverfahren in einem Apparat bzw. einer Maschinen überlagern und beeinflussen sich die Vorgänge gegenseitig. Bei einer genauen Kenntnis der Vorgänge kön-

Prof. Dr.-Ing. Siegfried Ripperger
Lehrstuhl für Mechanische Verfahrenstechnik
Technische Universität Kaiserslautern
Postfach 3049
67653 Kaiserslautern
Tel./Fax: 0631-205-2121/3055
E-Mail: ripperger@mv.uni-kl.de



nen diese gezielt beeinflusst und Limitierungen der Stoffwandlung überwunden werden. Die Vorgänge können „intensiviert“ werden. Beispiele für integrierte Verfahren sind die Reaktivdestillation, die Reaktivchromatographie sowie Extruder und ähnliche Schneckenmaschinen, in denen mehrere Vorgänge gleichzeitig ablaufen (z. B. Mischen, Heizen, Schmelzen, Reagieren und eine Formgeben). Die Integration mehrerer Prozessschritte in einem Apparat bzw. in einer Maschine ist oft mit Vorteilen verbunden, trotz notwendiger Kompromisse, infolge einer nicht optimalen Fahrweise einzelner Grundoperationen. Als Vorteile solcher Integrationen können genannt werden: Erhöhung der Ausbeuten bei chemischen bzw. biochemischen Reaktionen, Minimierung von Betriebs- und Investitionskosten, geschlossene Bauweise und geringer Handhabungsaufwand. In der Pharma- und Lebensmittelindustrie lässt sich auf diese Weise auch eine Produktkontamination am sichersten vermeiden.

2.3. Hybridprozesse

Mit einem Hybridprozess können oft ähnliche Effekte erzielt werden wie mit einer Prozessintegration. Bei ihm werden einzelne Verfahren in gesonderten Apparaten betrieben, die jedoch so miteinander verbunden sind, dass sie sich bei der Stoffwandlung gegenseitig unterstützen. Es geht um einen Wirkverbund, wodurch Synergien geschaffen werden, die es erlauben, die Grenzen eines einzelnen Verfahrens zu überschreiten. Hybridprozesse zur Prozessintensivierung beinhalten damit Konfigurationen von Prozessschritten mit neuen Effekten.

2.4. Reduzierung von Prozessschritten durch neue bzw. optimierte Verfahren

Eine wesentliche Effizienzsteigerung kann oft auch durch Einführung eines neuen oder optimierten Verfahrens erreicht werden. Insbesondere dann, wenn es damit gelingt, die insgesamt zur Herstellung eines Produktes notwendigen Prozessschritte zu verringern. So kann z. B. eine Fällung bzw. Kristallisation so betrieben werden, dass die geforderte Partikelgröße bzw. Partikelgrößenverteilung direkt erzeugt wird, und somit auf eine aufwendige Produktaufarbeitung durch Mahlen und Klassieren verzichtet werden kann.

Eine gezielte Beeinflussung von Elementarschritten einer Grundoperation kann oft auch mit einer in- bzw. on-line-Prozessüberwachung in Form eines Regelkreises erreicht werden. Voraussetzung dazu sind Sensoren, mit welchen die gewünschte Stellgröße (z. B. die Partikelgröße) in- bzw. online gemessen werden kann.

2.5. Verwendung neuartiger Hilfsstoffe

Eine Prozessintensivierung kann bei bestehenden Verfahren auch durch den Einsatz neuartiger Hilfsstoffe erzielt werden. Hierzu gehören z. B. verbesserte Filterhilfs- und Flockungsmittel, neuartige Extraktions- und Absorptionsmittel (z. B. ionische Flüssigkeiten). Bei Reaktionen können höhere Raum-Zeit-Ausbeuten insbesondere durch den Einsatz von neuen bzw. verbesserten Katalysatoren erzielt werden.

Viele Beispiele zeigen, dass die Einführung eines Membranverfahrens oft auch mit einer Prozessintensivierung im Sinne einer der oben beschriebenen Möglichkeiten verbunden war.

3. Kennzeichnende Eigenschaften der Membranverfahren

Membranverfahren haben in den letzten fünf Jahrzehnten in der Technik neue Möglichkeiten zur Stofftrennung eröffnet, die heute zunehmend genutzt werden. Ausschlaggebend für diese Entwicklung waren die folgenden vorteilhafte Eigenschaften der Membranverfahren:

- hohe Selektivität der Stofftrennung,
- Stofftrennung ohne Zusatzstoffe,
- physikalisches Trennprinzip, ohne eine chemische Veränderung der Komponenten,
- Möglichkeit der Stofftrennung im molekularen Bereich ohne Phasenänderung,
- Produkt schonende Stofftrennung,
- einfacher, modularer Aufwandaufbau,
- geschlossene Anlagenausführung,
- mögliche kontinuierliche Betriebsführung.

GRUPPO PIERALISI
DEDICATED INNOVATORS

kooperiert mit:

Kyffhäuser Maschinenfabrik Artern GmbH TOMOE Engineering Co., Ltd. Tokyo

NEUE ZENTRIFUGENMACHT!

Kyffhäuser Maschinenfabrik Artern GmbH

Hoch-qualifizierter Hersteller vertikaler Teller-Separatoren in "state-of-the-art"

- Direkt-Antrieb und Module
- Zulauf von < 1 – 100 m³/h

GRUPPO **PIERALISI**

Sieb-Schnecken-Zentrifugen, horizontal, Filtrationsprinzip, vervollständigen das Zentrifugen-Programm.

Diese ergänzend zu den bekannten Pieralisi Dekantern und Separatoren.

Tomoe Engineering Co., Ltd. Tokyo

Weltmarktführer Gross-Dekanter für Prozess-Industrie + Abwasser

Spezial Dekanter

- Druckdicht bis > 30 bar
- Hochtemperatur bis > 400 °C

Pieralisi-Dekanter und -Separatoren + KMA + TOMOE jetzt für alle Aufgaben der mechanischen Trenntechnik !

Ihr Problemlöser für Neu-Maschinen und Service einschließlich "Upgrading".

PIERALISI Deutschland GmbH
Ochsenfurter Str. 2, 97246 Eibelstadt - Tel.: + 49 9303 9082-0, Fax: -20,
www.pieralisi.com, e-mail: pieralisi@pieralisi.de / gert.bergjohann@pieralisi.com

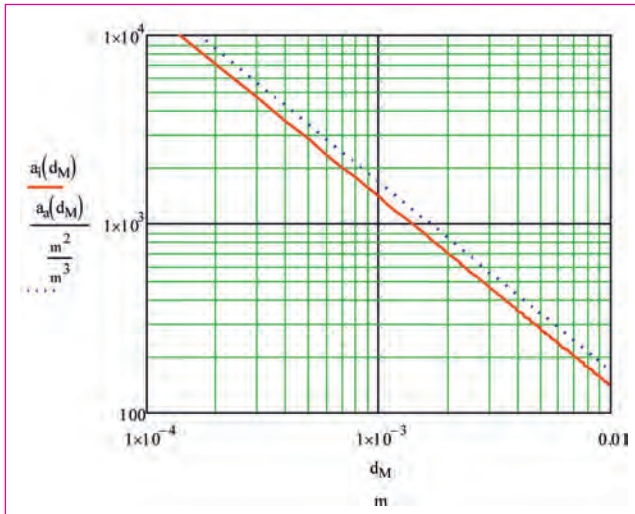


Abb. 1: Spezifische Membranfläche a eines Kapillarmoduls in Abhängigkeit vom Innendurchmesser der Kapillaren d_M ; a_i auf den inneren Kapillardurchmesser bezogen, a_a auf den äußeren Kapillardurchmesser bezogen; $\varepsilon_{M0} = 0,5$; $z = 1,2$

Oft ist nur eine dieser Eigenschaften für die Anwendung eines Membranverfahrens ausschlaggebend. Die Produkt schonende Separation wird z. B. in der Medizin und Biotechnologie genutzt. Die Möglichkeit der selektiven Stofftrennung ohne Zusatzstoffe steht bei Anwendungen zur gezielten Ausschleusung von Stoffen aus einem Gemisch oder beim Stoffrecycling im Vordergrund. Bei solchen Anwendungen ist es vorteilhaft, wenn das Stoffgemisch am Ort der Entstehung behandelt wird. Man ist daher bestrebt, geschlossene und kontinuierlich arbeitende Aufbereitungsverfahren in den Prozess zu integrieren. Der geschlossene und modulare Anlagenbau sowie die kontinuierliche Betriebsweise von Membrananlagen werden den Forderungen an eine prozessintegrierte Separationsstufe sehr gut gerecht. Membrananlagen, welche eine selektive Stofftrennung im molekularen Bereich ohne Phasentrennung ermöglichen, stellen eine Alternative zu den thermischen Trennverfahren mit Zusatzstoffen dar (z. B. Absorption, Adsorption, Extraktion, Chromatographie). Alle Argumente, die für eine Nutzung der Membrantechnik sprechen, stellen auch Maßnahmen zur Prozessintensivierung im erweiterten Sinne dar.

Mit dem Einsatz der Membrantechnik wurde oft auch die Herstellung einer neuen Produktqualität möglich. So konnten z. B. mit einer der ersten industriellen Anwendung von Membranen, der Sterilfiltration in der pharmazeutischen Industrie in den sechziger Jahren des letzten Jahrhunderts, keimfreie Produkte ohne die negativen Veränderungen einer thermischen Sterilisation erzeugt werden. Außerdem werden dabei Produkte erzeugt, in denen keine abgetöteten Zellen enthalten sind. Die Methode wird heute in großem Maßstab zur Entkeimung von Getränken und sonstigen Flüssigkeiten eingesetzt. Die erst vor wenigen Jahren eingeführt ESL-Milch (ESL = extended shelf life) ist hierfür ein Beispiel. Bei ihr wird oft mittels einer Mikrofiltration mit Membranen ein Großteil der enthaltenen Mikroorganismen mechanisch abgetrennt und damit die Haltbarkeit der Milch verlängert, ohne wertvolle Enzyme abzutrennen bzw. zu inaktivieren. Für viele Anwendungen wurden Membranen entwickelt, welche die Keime aufgrund des Sieb effektes sicher zurückhalten und abtrennen. Der Vorgang der Keimabtrennung ist im Bereich der Nanotechnik angesiedelt, so dass die Sterilfiltration mit Membranen auch eine erste großtechnische Anwendung von nanostrukturierten Materialien war.

Bei einer hohen Keimbelastung und dem Vorhandensein von weiteren Stoffen in Form von Kolloiden bilden sich schnell sehr dichte Deckschichten auf der Membran aus, welche eine Filtration stark behindern und zum Erliegen bringen. Zu Behandlung solcher Stoffsysteme wurde die Crossflow-Filtration entwickelt, bei wel-

cher die Membran von der zu filtrierenden Suspension überströmt wird. Aufgrund der Überströmung wird eine Rückführung von abgetrennten Stoffen von der Membran weg aufgrund der Diffusion und wirkender hydrodynamischer Kräfte erreicht. Es sind viele verschiedene Formen der Membranüberströmung bekannt, wobei die Durchströmung von Membranmodulen die am häufigsten angewandte Form darstellt. Mit den Parametern der Strömung und der konstruktiven Gestaltung der Strömungskanäle bzw. Scherspaltel können auch Stoff- und Wärmetransportvorgänge intensiviert und die notwendige Membranfläche reduziert werden.

Das Prinzip der Entkeimungsfiltration, welche im Bereich der Mikrofiltration und damit noch im Bereich der Partikel und Kolloide angesiedelt ist, wurde mit der Entwicklung von asymmetrischen Membranen auf Membranverfahren mit einer Trenngrenze im molekularen Bereich (z. B. Ultrafiltration, Nanofiltration, Umkehrosiose, Pervaporation) übertragen. In diesem Bereich spielen beim Stofftransport durch die Membran und der Separation auch elektrostatische Effekte und Lösungs-/Diffusionsvorgänge in der Membran eine entscheidende Rolle. Die einzelnen, sich überlagerten Vorgänge an der Membran wurden intensiv untersucht und sind weitgehend aufgeklärt und können auch modellhaft beschrieben werden. Damit ist eine Optimierung der Vorgänge auf Basis von mathematischen Modellen möglich.

Einige Membranprozesse beruhen auf relativ langsam ablaufenden Diffusionsprozessen, was nachteilig im Sinne einer Prozessintensivierung ist. Dieser Nachteil kann durch eine Optimierung der Membran (z. B. sehr dünne Membran mit kurzem Diffusionsweg, oder Membran in Form dünner Kapillaren bzw. Hohlfasern zur Realisierung großer spezifischer Membranflächen), eine Optimierung der Verfahrensweise (z. B. Gegenstromprinzip, verbesserter Stofftransport durch erhöhte Überströmung, Nutzung von Turbulenzpromotoren), einer optimierten Anlagenkonfiguration (z. B. mehrstufige Betriebsweise) erreicht werden. Bei einer solchen Optimierung müssen viele, teilweise sich gegenläufig beeinflussende Abhängigkeiten berücksichtigt werden.

4. Beispiele zur Prozessintensivierung mit Membranen

4.1. Prozessverstärkung

4.1.1. Nutzung miniaturisierte Strukturen

Die Nutzung von miniaturisierten Strukturen zur Prozessverstärkung wird in der Membrantechnik seit langem angewendet. Membranen in Form von feinsten Hohlfasern mit einem Innendurchmesser von unter 1 mm sind hierfür ein Beispiel. Das Verhältnis von Oberfläche zu Volumen steigt bei den daraus hergestellten Membraneinheiten (Membranmodulen), ähnlich wie bei anderen mikrostrukturierten Apparaten auf mehrere Tausend m^2/m^3 an. In Abb. 1 sind die auf den inneren und äußeren Kapillardurchmesser bezogenen spezifischen Membranflächen a eines Kapillarmoduls in Abhängigkeit vom Innendurchmesser der Kapillaren aufgetragen. Diese können mit den folgenden Gleichungen ermittelt werden:

$$a_a = \frac{4 \cdot \varepsilon_{M0}}{d_{M,a}} = \frac{4 \cdot \varepsilon_{M0}}{d_M \cdot z} \quad \text{mit} \quad z = \frac{d_a}{d_i}$$

$$a_i = \frac{4 \cdot d_M \cdot \varepsilon_{M0}}{d_{M,i}^2} = \frac{4 \cdot d_M \cdot \varepsilon_{M0}}{(d_M^2 + 2s)^2} = \frac{4 \cdot \varepsilon_{M0}}{d_M^2 \cdot z^2}$$

s ist die Dicke der Wand der Kapillarmembran. ε_{M0} ist die Packungsdichte des Moduls, d. h. der Flächenanteil des Hüllrohrquerschnittes des Moduls, der mit Kapillarmembranen ausgefüllt ist. Theoretische Grenzwerte, über die dieser Anteil nicht gesteigert werden kann, ergeben sich aus regulären Membrananordnungen. Folgende Grenzwerte können ermittelt werden:



$$\varepsilon_{Mo} = \frac{\pi}{4} \approx 0,785$$

bei einer quadratischen Anordnung der Kapillaren in der Packung und

$$\varepsilon_{Mo} = \frac{\pi}{\sqrt{12}} \approx 0,907$$

bei der hexagonal dichtesten Packung der Kapillaren.

In der Praxis werden bei der Modulfertigung mit Kapillarmembranen Werte im Bereich von 0,45 bis 0,65 erreicht.

4.1.2. Dialyse

Eine produktschonende Separation wird oft dadurch erreicht, dass die Vorgänge der Stoffwandlung bei Umgebungstemperatur oder einer noch niedrigeren Temperatur ablaufen. Als Beispiel hierzu sei die Hämodialyse aufgeführt, bei der Detoxigenation des Blutes und damit des menschlichen Körpers auf Basis von Membranen durchgeführt wird. Der Stofftransport der aus dem Körper zu entfernenden Stoffe durch die Membran in das Dialysat (überwiegend aufbereitetes Wasser) wird dabei hauptsächlich durch eine Konzentrationsdifferenz und die daran gekoppelte Diffusion bewirkt. Zur Prozessverstärkung dieser an und für sich langsam auflaufenden Diffusion wurden extrem dünne Membranen (Dicke bis hinab zu 5 μm), meist in Form von sehr dünnen Kapillaren (Hohlfäden), entwickelt. Die Membranen können mit einem Spinnprozess fehlerfrei in großen Mengen kostengünstig produziert werden. Der Stofftransport konnte noch dadurch optimiert werden, dass es gelungen ist, die für die Behandlung notwendige Membranfläche (ca. 1 m^2) in einem relativ kleinen Volumen darzubieten. Diese ist möglich, da die Membranen mit einem Innendurchmesser im Bereich von ca. 200 μm hergestellt werden. Der notwendige Durchsatz wird dadurch erzielt, dass man die Kapillaren im Membranmodul in der benötigten Anzahl parallel schaltet und betreibt (numbering-up). Legt man für einen Dialysemodul die oben aufgeführten Kapillarabmessungen und eine Packungsdichte von $\varepsilon_{Mo} = 0,5$ zugrunde, so erkennt man anhand von Abb. 1, dass man bezogen auf den Kapillarinnendurchmesser eine spezifische Membranfläche von ca. 7000 m^2/m^3 erreicht. Ähnliche Größenordnungen werden mit Hohlfasermembranen auch bei der Gasseparation angestrebt. Bei anderen technischen Anwendungen von Kapillarmembranen, wie z. B. der Wasserfiltration oder der Be- und Entgasung von Flüssigkeiten, sind spezifischen Membranflächen von 1000 bis 2000 m^2/m^3 in einem Membranmodul durchaus üblich.

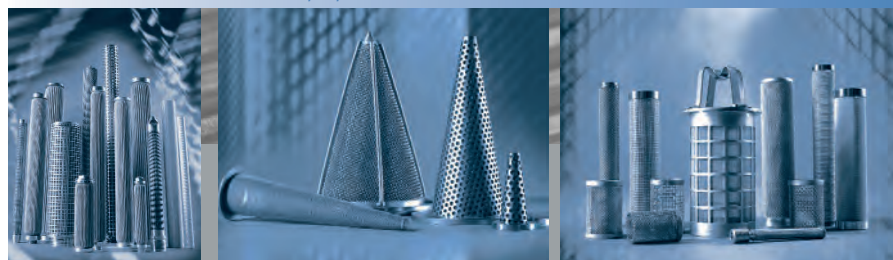
4.1.3. Membrankontaktoren

Bei der Be- und Entgasung von Flüssigkeit werden Membranmodule als Membrankontaktoren genutzt. Kontaktoren werden eingesetzt, wenn ein Stoffaustausch über die Phasengrenzen zwischen zwei Phasen erreicht werden soll. Bei hydrophoben mikroporösen Membranen verhindern die Grenzflächenkräfte in Verbindung mit den geringen Porendurchmessern das Eindringen einer Flüssigkeit in die Porenstruktur bis zu einem bestimmten Druck, so dass die beiden Phasen über die Membranfläche an den Poren direkt in Kontakt sind. Hierzu werden Membranen mit einer Flächen-

porosität von 75 bis 93 % eingesetzt, bei gleichzeitig einem maximalen Porendurchmesser im Bereich von 0,1 bis 1 μm . Auch hier wird der Stoffaustausch hauptsächlich durch die Gesetze der Diffusion bestimmt, so dass auch hier Stoffaustauschapparate mit einer hohen spezifischen Austauschfläche gefragt sind. Sie werden zur absorptiven Gastrennung, zur blasenfreien Begasung von Flüssigkeiten sowie zur extraktiven und destillativen Stofftrennung eingesetzt. Sie ermöglichen eine Strömungsführung im Gleich-, Gegen- und Kreuzstrom und erlauben es den Durchsatz der abgebenden und aufnehmenden Phase in einem weiten Bereich zu variieren.



PACO Spinpack-Siebe



In der Filtertechnik ist es wie überall im Business: Nur die Besten kommen durch. PACO zählt bereits seit 5 Jahrzehnten zum Feinsten, was die Filter-Technik mit Elementen und Komponenten aus Metalldrahtgeweben,

Metallfaservliesen, Spaltrohren, Lochblechen, u. v. a. zu bieten hat. Ganz gleich, wie Ihr Bedarf aussieht: PACO garantiert Ihnen immer Highest Filtration Value – ganz individuell.



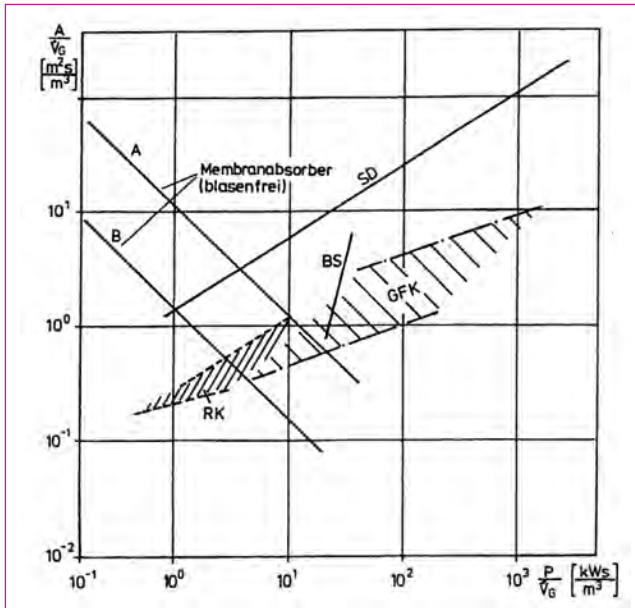


Abb. 2: Auf den Gasdurchsatz bezogene Stoffaustauschfläche verschiedener Kontaktapparate in Abhängigkeit vom spezifischen Energieeintrag infolge des Druckabfalls; SD = Strahlröhrenreaktor; BS = Blasensäule; RK = begaster Rührkessel; GFK = Gleichstrom-Füllkörperkolonne; Membranreaktor mit folgenden Daten: Hüllrohrdurchmesser: 0,25 m, Länge: 2,00 m; Kapillar-Innendurchmesser A: $d_M = 0,6$ mm, B: $d_M = 1,2$ mm /5/

In Abb. 2 ist die auf den Gasdurchsatz bezogene Stoffaustauschfläche verschiedener Kontaktapparate in Abhängigkeit vom spezifischen Energieeintrag infolge des Druckabfalls aufgetragen /5/. Man erkennt, dass bei den konventionellen Kontaktapparaten im Gegensatz zu einem Membrankontaktor eine hohe spezifische Stoffaustauschfläche immer auch mit einem erhöhten Energieeintrag verbunden ist. Bei einem Membrankontaktor wird dagegen auch bei einem niedrigen Volumenstrom, und damit auch bei einem niedrigen Energieeintrag, eine große spezifische Austauschfläche gewährleistet. Dies macht man sich u. a. bei der extrakorporalen Blutoxygenation mit Membran-Oxygenatoren zu Nutze. Sie haben die früher üblichen Blasenoxxygenatoren weitgehend ersetzt. Membran-Oxygenatoren werden bei Operationen in Verbindung mit Herz-Lungen-Maschinen heute routinemäßig angewendet, und übernehmen die Aufgabe, Blut mit Sauerstoff zu versorgen und gleichzeitig das Kohlendioxid zu entfernen.

Ein weiteres Beispiel für die Anwendung von Membrankontaktoren ist die Luftbefeuchtung in Klimaanlage. Bei einer entsprechenden Membranauswahl werden Mikroorganismen durch die Membran zurückgehalten und nur Wasserdampf an die Luft überführt.

Auch zur Entgasung von Wasser in Verbindung mit der Reinstwasserbereitung werden Membrankontaktoren heute routinemäßig eingesetzt. Mit ihnen kann eine Vakuumentgasung oder eine Entgasung mit einem Strippgas realisiert werden. Grundlagen hierzu werden in /6/ beschrieben. Im Vergleich zu den anderen Trennverfahren weisen sich die Membrankontaktoren durch einen geringen Energiebedarf und ein geringes Bauvolumen aus.

Wie Abb. 2 zu entnehmen ist nimmt bei hohen Gasdurchsätzen die auf den Gasdurchsatz bezogene Austauschfläche ab und der spezifische Energieeintrag nimmt infolge des ansteigenden Druckabfalls zu. Daher haben sich Membrankontaktoren bei großen Gasdurchsätzen noch nicht durchgesetzt.

4.1.4. Prinzip „numbering-up“

Bei allen Membrananwendungen wird das Prinzip des numbering-up konsequent angewendet. Es genügt für den Fall von Kapillar- und Rohrmembranen die Vorgänge in einer Kapillare bzw.

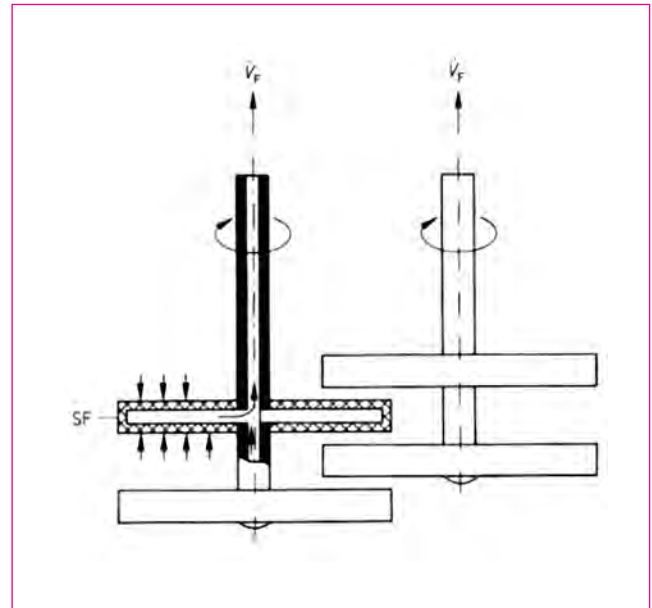


Abb. 3: Rotierende Membran-Filterscheiben mit einem radialen Scherspalt in einem Behälter /7/

einem Rohr der später zu installierenden Länge zu untersuchen. Danach können durch ein numbering-up (Parallelschaltung vieler Membrankapillaren bzw. -rohre zu einem Membranmodul und mehrerer Membranmodule in einem Modulblock) die Ergebnisse auf Großanlagen übertragen werden. Bei sehr großen Anlagen wird das Prinzip konsequent weitergeführt, indem mehrere Modulblöcke parallel zur jeweils notwendigen Anlagengröße zusammengeschaltet werden.

Im Zusammenhang mit der Membrantechnik werden jedoch auch die Nachteile mikrostrukturierter Apparate und des „numbering-ups“ deutlich. Eine gleichmäßige Anströmung sehr vieler Membraneinheiten bzw. großer Membranflächen über lange Zeitspannen ohne periodische Reinigungen ist meist nicht zu realisieren. Bei einer periodischen Membran-Rückspülung kann bei einer gleichzeitigen Überströmung der Membran eine gleichmäßige Beaufschlagung der Membranfläche nicht gewährleistet werden. Außerdem sind die langsam ablaufende Vorgänge des Membran-Fouling zu berücksichtigen. Da diese Vorgänge nicht gleichmäßig auftreten, sondern durch geringe Unterschiede in der Strömungsführung an einigen Stellen verstärkt wirken, werden dadurch die Ungleichförmigkeiten der ablaufenden Vorgänge noch verstärkt. Ungleichförmigkeiten durch Ablagerungen und Anhaftungen werden in der Regel durch geplante periodische Reinigungen von Zeit zu Zeit beseitigt.

4.1.5. Prozessintensivierung durch bewegte Einbauten oder bewegte Membranen

Ein Membranmodul weist keine beweglichen Teile auf und kann daher den Apparaten zugeordnet werden. Daneben wurden auch Membraneinheiten entwickelt, bei denen durch bewegte Einbauten oder bewegte Membranen der Stoffaustausch intensiviert wird. Hierbei werden bevorzugt Membranen aus Keramik, oft in Form von Membranscheiben, eingesetzt. Besonders günstige Verhältnisse stellen sich ein, wenn dabei ein Scherspalt über der Membran realisiert wird. Diese Membraneinheiten besitzen bewegte Teile mit eigenem Antrieb und können daher als Stoffaustauschmaschinen bezeichnet werden. Entsprechend ihrer Bauart können folgende Kategorien unterschieden werden:

- die Membran ist starr und wird aufgrund bewegter Einbauten überströmt,
- die Membran wird bewegt und dadurch überströmt und
- die Überströmung wird durch starre und bewegte Membranen realisiert.



Als Vorteile dieser Systeme gegenüber Anlagen mit Membranmodulen können genannte werden:

- Ein reduzierter spezifischer Energiebedarf, da die in das System eingetragene Energie hauptsächlich dazu dient, die Stoffaustauschvorgänge an der Membran zu verstärken und ein Fouling zu vermindern. Eine Energiedissipation in Pumpen, Rohrleitungen und Armaturen, die bei Membranmodulen auftritt, wird vermieden.
- Maschinen mit bewegten Einbauten können gegenüber Membranmodulen mit höher viskosen Medien, wie z. B. hochkonzentrierten Suspensionen, betrieben werden. Oft ist dadurch auch eine höhere Permeatausbeute möglich. Das trifft besonders auf Suspensionen mit strukturviskosem oder thixotropem Fließverhalten zu.
- Vorteilhaft bei Filtrationsverfahren mit bewegten Einbauten ist auch, dass die Strömungsverhältnisse an der Membran die transmembrane Druckdifferenz in geringerem Maße beeinflussen als bei Membranmodulen. Bei durchströmten Membranmodulen steigen mit steigender Durchströmungsgeschwindigkeit die Scherkräfte an der Membran an, gleichzeitig nimmt der Druckabfall im Modul

zu, so dass sich die Druckdifferenz der Filtration über die Modullänge stark verändert.

- Auch die Verweilzeit der Suspension im Bereich der Membran ist nicht an die Überströmung der Membran gekoppelt.

Trotz dieser Vorteile werden die Membraneinheiten mit bewegten Einbauten bis heute nur vereinzelt im industriellen Bereich eingesetzt.

4.2. Prozessintegration von Membranverfahren

4.2.1. Membranreaktoren

Beispiele für eine Prozessintensivierung durch eine Prozessintegration, sind die Membranreaktoren- bzw. -bioreaktoren. In der Regel ist bei ihnen die Membran im Reaktionsraum angeordnet. Das eröffnet bei chemischen und biochemischen Prozessen die Möglichkeit, Zwischen- und/oder Nebenprodukte der Reaktion selektiv aus dem Reaktionsgemisch abzutrennen. Diese direkte Nutzung der Membraneigenschaften in Reaktoren wird in der chemischen Industrie bisher noch relativ wenig genutzt, ist jedoch Gegenstand zahlreicher Forschungsprojekte. Da viele Reaktionen in einem räumlich beschränkten Reaktionsraum bei hohen Temperaturen betrieben

werden, werden meist sehr temperaturbeständige und selektiv wirkende Membranen gefordert. Dagegen können viele bio-chemische Reaktionen mit den vorhandenen Polymermembranen gekoppelt werden, weshalb Bio-Membranreaktoren bereits vielfältig im industriellen Maßstab genutzt werden. Durch eine kontinuierliche Abtrennung von Wertprodukten und/oder Hemmstoffen aus dem reagierenden Stoffgemisch können chemische bzw. biochemische Reaktionen bei optimalen Bedingungen betrieben werden. Das Reaktionsgleichgewicht kann dadurch zur Produktseite hin verschoben und mögliche Folgereaktionen können unterdrückt werden. Damit ist es oft möglich den Umsatz und die Raum/Zeit-Ausbeuten wesentlich zu erhöhen. Ein Beispiel hierfür die die Abtrennung des Wassers bei Polykondensationsreaktionen mittel der Pervaporation.

In anderen Fällen werden Membranen in Reaktoren z.B. als Träger eines Katalysators verwendet, so dass zusätzlich zur selektiven Stofftrennung eine beschleunigte Stoffumwandlung erreicht wird. Die vielfältigen Möglichkeiten der Nutzung von Membranen in Membranreaktoren wurden von Westermann et. al [8] aufgezeigt.

SARATECH®
Blücher Technologies

INNOVATIVE FILTERTECHNOLOGIE

Sphärische Hochleistungsadsorbentien für maßgeschneiderte Filtrationslösungen.

<p>FILTRATION VON FLÜSSIGKEITEN</p> <ul style="list-style-type: none"> · Reinstwasser · TOC · Entfernung von Chlor · MTBE- und Schwermetallentfernung · Entfernung von Röntgenkontrastmitteln 	<p>FILTRATION VON GASEN</p> <ul style="list-style-type: none"> · Kabinenluftfiltration · Toxische Luftbestandteile · AMC-Reduktion (Reinraum) · Lösungsmittelrückgewinnung · Quecksilberentfernung · Vinylchloridentfernung
---	--

www.bluecher.com

BLÜCHER®
Innovation since 1214

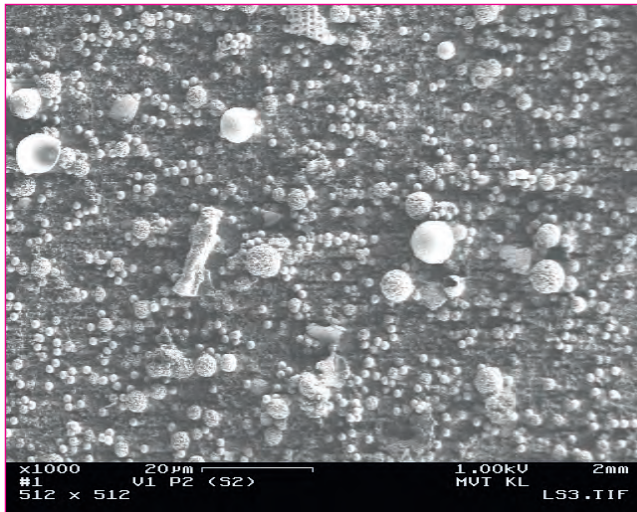


Abb. 4: Partikel aus Calciumcarbonat erzeugt mit einem Membranverfahren das an der TU Kaiserslautern entwickelt wurde

4.2.2. Membranbioreaktoren zur Abwasserbehandlung

Großtechnisch durchgesetzt haben sich Membranbioreaktoren mit getauchten Membraneinheiten im Belebtschlammbecken einer biologischen Reinigungsstufe zur aeroben Abwasserbehandlung. Durch die Umwälzung im Becken infolge der Begasung werden die Membranen überströmt. Die Membraneinheiten bilden mit dem Becken einen Membran-Bio-Reaktor (MBR). Es werden Membraneinheiten mit Kapillar- und mit Flachmembranen angeboten. Ein Vergleich beider Systeme wird in /9/ vorgenommen. Das Filtrat wird aus den offenen Becken durch Anlegen eines Unterdruckes $< 0,5$ bar auf der Filtratseite abgesaugt. Die erste kommunale Abwasserreinigungsanlage dieser Art wurde 1989 in Japan in Betrieb genommen. In /10/ wird über Betriebsergebnisse solcher Anlagen berichtet. Die dauernde oder zyklische Luftzufuhr, die auch mit einer Umwälzung im Becken verbunden ist, ermöglicht in Verbindung mit einer zyklischen Rückspülung einen stabilen Betrieb der Anlagen. Sie werden in der Regel mit spezifischen Filtratströmen < 40 l/(m²h) betrieben. Der spezifische Energieeintrag wird mit 0,05 bis 0,15 kWh/m³ Filtrat angegeben.

Durch diese Prozessintegration ergeben sich Vorteile aufgrund der Einsparung von Nachklärbecken und einem höheren Biomassegehalt in der biologischen Stufe, wodurch auch die Raum-Zeit-Ausbeute erhöht wird. Das Filtrat solcher Anlagen erfüllt meist die Anforderungen, die an den Zulauf zu einer RO-Anlage gestellt werden. Daher kann eine RO-Anlage zur weiteren Wasseraufbereitung direkt angeschlossen werden. Über eine solche Anwendung zur Schließung eines Wasserkreislaufs wird in /11/ berichtet.

4.2.3. Elektrodeionisation

Ein weiteres Beispiel für eine gelungene Prozessintegration mit Membranen ist die Elektrodeionisation (EDI), die zur Reinstwasserbereitung vielfach in industriellen Prozessen angewendet wird. Sie kombiniert die Elektrodialyse mit Ionenaustauschern derart, dass die Austauscherharze kontinuierlich regeneriert werden, wodurch eine kontinuierliche Deionisation ermöglicht wird. Die bei Ionenaustauscherkolonnen notwendige Regeneration der beladenen Harze mit Salz bzw. Säure und Lauge entfällt. Unterschiedliche Verfahrensweisen wurden entwickelt, die von Duscher ausführlich beschrieben werden /12/.

4.2.4. Membranfällung

Bei Kristallisations- und Fällungsprozessen besteht das Ziel, den Prozess so zu führen, dass das Produkt in der gewünschten Partikelgrößenverteilung und Morphologie erzeugt wird. Das Ziel kann in Rührkesseln im Labormaßstab häufig erreicht werden,

jedoch besteht das Problem, den Prozess, der wesentlich durch das Mikromischen beeinflusst wird, auf Rührkessel im Produktionsmaßstab zu übertragen. Es sind aufwendige Nachbereitungsschritte wie Zerkleinern und Sieben erforderlich, wenn die beschriebene Zielsetzung nicht erfüllt wird. Der Aufwand steigt beträchtlich, wenn Partikelsysteme im Bereich weniger Mikrometer oder sogar Nanometer erzeugt werden sollen.

An der TU Kaiserslautern wurde ein neues Fällungsverfahren entwickelt, bei dem die Fällung in Kapillarmembranen abläuft /13/. Das Verfahren wurde angewendet, um Calciumcarbonat aus einer Calciumhydroxidlösung mit Kohlenstoffdioxid auszufällen. Dabei diffundiert das gasförmige Edukt durch eine Membran in die Grenzschichtströmung, so dass die Übersättigung und die Partikelbildung in ihr stattfinden. Aufgrund des hydrodynamischen Auftriebs und der zunehmenden Größe des Partikels bewegt diese sich von der Membran weg und damit aus der Reaktionszone, so dass es nicht weiter wachsen kann. Da es sich um eine hydrophobe hochporöse Membran handelt, ist der Diffusionswiderstand der Membran vernachlässigbar gering. Für den Fall der Calciumcarbonatfällung wurde nachgewiesen, dass die Reaktion in der laminaren Unterschicht der Strömung abläuft, d.h., dass die Konzentrationsgrenzschicht für CO₂ kleiner ist als die Strömungsgrenzschicht. Weiterhin wurde der in diesem Fall bedeutende Einfluss des hydrodynamischen Auftriebs (Liftkraft) dargestellt.

Die experimentellen Untersuchungen zeigen, dass es möglich ist, mit dem Verfahren Partikel im Größenbereich < 1 µm in hoher Anzahl zu erzeugen. Bei einer Aufkonzentrierung der Partikel im System und einer hohen Verweilzeit muss mit einem Anwachsen der Partikel gerechnet werden, wobei sich auch die Struktur des Produktes verändern kann. Es konnten auch neuartige kugelförmige poröse Partikel aus Calciumcarbonat erzeugt werden (Abb. 4).

4.3. Hybridprozesse

Seit langem ist bekannt, dass Membranverfahren in vielen Fällen besonders vorteilhaft in Kombination mit anderen (konventionellen) Trennverfahren eingesetzt werden (Hybridprozesse). Solche Prozesse können dazu beitragen die Stoffwandlung in ihrer Effektivität wesentlich zu steigern.

4.3.1. Neuartiger Klärprozess

Als Beispiel für einen Hybridprozess sei die Klärung von Suspensionen mit kolloidalen Inhaltsstoffen (z.B. Essig, Öl, Bier, Wein) mit Membranen erwähnt, bei denen eine Crossflow-Mikrofiltration mit einer Zentrifuge kombiniert wird (Abb. 5). Die Konzentrierung der Trübstoffe erfolgt durch den Separator und die Fein- und Entkeimungsfiltration wird mit der Crossflow-Mikrofiltration in einem kontinuierlich betriebenen Prozess durchgeführt. Er ersetzt häufig einen mehrstufigen diskontinuierlichen Klärprozess, wie er beispielhaft in den Abb. 5 und 6 abgebildet ist. Beim Prozess in Abb. 5 ist dem Klärprozess eine Pasteurisierung (thermische Prozessstufe) zur Erhöhung der Haltbarkeit des Produktes nachgeschaltet. Eine neue Produktqualität konnte bereits durch den Ersatz der Pasteurisierung in Abb. 5 durch die Dead-End-Filtration mit Membranen in Form von Filterkerzen entsprechend Abb. 6 erreicht werden. Um eine hohe Standzeit der Filterkerzen zu gewährleisten, wird dabei zusätzlich der Einsatz von vorgeschalteten Tiefenfilterkerzen empfohlen. Der Ersatz von Filterhilfsmitteln und/oder Filterschichten und Filterkerzen mit einer relativ kurzen Standzeit durch vergleichsweise langlebige Membranmodule ist ein Grund dafür, dass der Prozess entsprechend Abb. 4 trotz eines erhöhten Energiebedarfs wirtschaftlich betrieben werden kann. Die Kombination ist sowohl für große und kleinen Betriebe interessant, wenn gleichzeitig auf eine hohe Auslastung der Anlage geachtet wird. Aufgrund der Betriebsweise ist ein automatischer Betrieb leicht möglich, so dass eine vergleichsweise kleine Anlage mit einer hohen Auslastung realisiert werden kann.



4.3.2. Kombination von Reaktoren mit Membranstufen

Die unter 4.2.1 beschriebene direkte Kopplung von einer Reaktion mit einer Trennstufe auf Basis von Membranen kann auch in Form eines Hybridprozesses realisiert werden. Hierbei sind der chemische Reaktor bzw. der Fermenter räumlich von der Membranstufe getrennt, jedoch werden sie gekoppelt betrieben. Diese Kombination wird in der Biotechnologie vielfach angewendet.

4.3.3. Hybridprozesse mit Membranen auf dem Gebiet der Fluidverfahrenstechnik

Neue Ansätze zur Hybridprozesse mit Membranen auf dem Gebiet der Fluidverfahrenstechnik werden von T. Keller et al. /14/ beschrieben. Sie beschreiben u. a. die Kopplung der Rektifikation mit einer Pervaporation oder einer Dampfpermeation zur Überwindung des azeotropen Punktes. Ein Hauptanwendungsgebiet solcher Kombinationen ist die Entwässerung (Absolutierung) von Bio-Ethanol und anderen Lösungsmitteln. Weiterhin werden die Reaktivdestillation, und deren Kombination mit Membranverfahren behandelt. Eine solche Kombination bietet die Möglichkeit die Ausbeute und den Umsatz der Reaktion gezielt zu verbessern

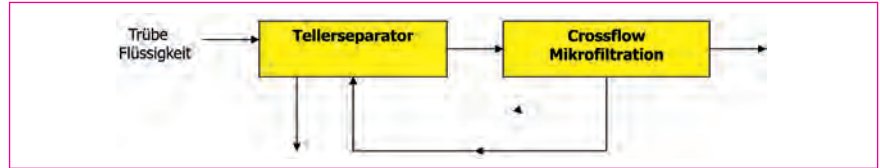


Abb. 5: Klärung von Flüssigkeiten mit einem Hybridprozess bestehend aus einer Zentrifugation und einer Crossflow-Mikrofiltration

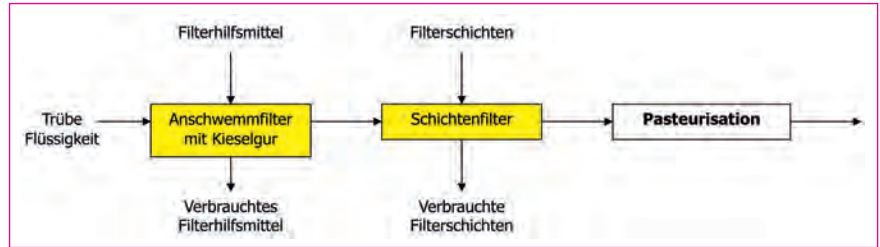


Abb. 6: Konventioneller mehrstufiger Prozess zur Klärung von Flüssigkeiten mit anschließender Pasteurisierung

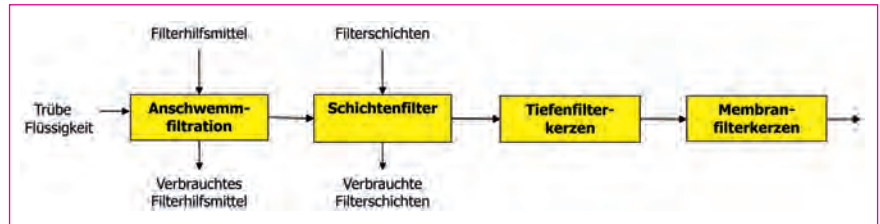


Abb. 7: Konventioneller mehrstufiger Prozess zur Klärung von Getränken mit einer Entkeimungsfiltration mit Membranen

Your trusted partner for innovative solid/liquid separation solutions





ANDRITZ SEPARATION is one of the leading global suppliers of mechanical and thermal solid/liquid separation technologies. With our established experience in many chemical applications we are a worldwide trusted partner when it comes to innovative products and systems:

- Decanters, filter centrifuges, separators
- Drum filters, belt filters
- Filter presses, cross-flow filters
- Fluid bed dryers, vertical helix dryers, plate dryers
- Mechanical and thermal separation systems

ANDRITZ KMPT GmbH
 Industriestrasse 1-3
 85256 Vierkirchen, Germany
 Phone: +49 (8139) 80299 0
 separation.de@andritz.com

www.andritz.com

und gleichzeitig die destillative Trennung durch den Einsatz der Membrantrennung günstig zu beeinflussen. Weitere Varianten der Verbindung von Membranverfahren und der Rektifikation zu einem Hybridprozess werden in /15, 16/ behandelt. Bei der Dampfpermeation wird im Gegensatz zur Pervaporation die Membranfläche direkt mit dem dampfförmigen Gemisch beaufschlagt. Dabei bietet sich auch eine Prozessintegration an, d. h. die Integration der Membranflächen in den Kopf der Rektifikationskolonne, so dass beide Verfahren in einem Apparat betrieben werden.

In /17/ wird die Kopplung eines Reaktors mit einer Pervaporationsstufe zur Herstellung von Acetalen in Form eines Hybridprozesses beschrieben. Durch die Kopplung konnten eine wesentlich Steigerung des Umsatzes und eine gleichzeitige deutliche Energieeinsparung erzielt werden.

4.4. Reduzierung von Prozessschritten mit dynamischen betriebenen Membranverfahren

Einige der oben aufgeführten Beispiele zeigen, dass mit den beschriebenen Maßnahmen oft eine deutliche Reduzierung von Prozessschritten verbunden ist. Dynamisch betriebene Membranverfahren werden kontinuierlich betrieben und können daher einfach in entsprechende Prozesse integriert werden. So werden z. B. die Vorteile der Crossflow-Mikrofiltration seit Anfang der 80-iger Jahre des vergangenen Jahrhunderts zur industriellen Essigproduktion genutzt /18/. Davor wurde Essig mit Bentonit geschönt und mit Anschwemm- und anderen Tiefenfiltern geklärt. Heute wird Essig meist semikontinuierlich hauptsächlich aus Ethanol durch submerse Fermentation über einen Zeitraum von ca. 30 Stunden produziert und direkt aus dem Fermenter über eine Crossflow-Filtration in der gewünschten Qualität in Form eines Hybridprozess abgeführt.

4.5. Verwendung neuartiger Hilfsstoffe

Eine Prozessintensivierung kann auch durch neuartige bzw. verbesserte Hilfsstoffe erreicht werden. Hierzu gehören z. B. optimierte Katalysatoren bzw. Bio-Katalysatoren (Enzyme).

Enzyme entfalten ihre Wirkung bereits im Bereich geringer Konzentrationen. Die geringen Einsatzkonzentrationen machen ihre Rückgewinnung nach der Stoffumwandlung problematisch. Daher werden sie z. B. in der Lebensmittelindustrie in einigen Fällen nicht mehr zurück gewonnen und als so genannte "verlorene Enzyme" eingesetzt. Durch den ständigen "Enzymverbrauch" werden jedoch die Kosten erhöht. Das Enzym und seine Begleitstoffe werden im Produkt evtl. auch als störende Komponente und Verunreiniger betrachtet. Mit einer Enzym-Immobilisie-

rung wird der Einsatz wertvoller Enzyme und höherer Enzymkonzentrationen wirtschaftlich vertretbar und der Vorteile kontinuierlich betriebener Durchflusssysteme anwendbar. Solche Systeme wurden z. B. mit Kapillarmembranen zur Ultrafiltration dadurch realisiert, dass das Enzym im Inneren der Kapillarmembranen, die für das Enzym eine Barriere darstellen, immobilisiert wurde. Die Membranen sind für die Edukte und Produkte durchlässig und werden im Reaktor oder in einem damit verbundenen durchströmten Membranmodul platziert. In /19/ wird eine der ersten großtechnischen Anwendung eines solchen Systems zur Herstellung von Aminosäuren beschrieben.

Neben dieser „physikalischen Immobilisierung“, wurden auch Enzyme direkt an die innere oder äußere Oberfläche einer Trägermembran gebunden und damit immobilisiert.

In vielen Fällen wurde der wirtschaftliche Einsatz von Enzymen bei biochemischen Umwandlungen erst durch einen entsprechenden Membraneinsatz ermöglicht, da nur damit eine wirtschaftlich ausreichend lange Nutzungsdauer der Enzyme erreicht wurde.

Entsprechend bieten sich auch bei chemischen Reaktionen Membranen, bevorzugt aus Keramik, als Träger für Katalysatoren an.

In anderen Fällen können optimierte Katalysatoren in Form von Nanopartikeln oder Makromolekülen mit einer entsprechend hohen spezifischen Oberfläche eingesetzt werden, die dann nach der Reaktion kontinuierlich oder diskontinuierlich mit einem Membranverfahren für einen wiederholten Einsatz zurückgewonnen werden. Solche Membrananwendungen sind zahlreich und werden mit Erfolg in der chemischen Industrie betrieben.

5. Zusammenfassung

Wie erläutert, kennzeichnet der Begriff „Prozessintensivierung“ das Bemühen, die Stoffumwandlung in verfahrenstechnischen Prozessen deutlich zu verbessern. Es wurde gezeigt, dass solche deutliche Verbesserungen oft mit dem Einsatz von Membranen erreicht wurden. Aufgrund steigender Anforderungen sowie steigender Energie- und Rohstoffpreise bleiben die mit der „Prozessintensivierung“ verbundenen Ziele weiterhin aktuell. Entsprechend werden die Membrananwendungen weiterhin zunehmen. Jedoch werden die im Zusammenhang mit einer Prozessintensivierung auftretenden Aufgabenstellungen komplexer. Einige erfordern eine auf die Aufgabenstellung abgestimmte Membran- oder Membranmodulentwicklung. In solchen Fällen muss abgewogen werden, ob die sich damit bietenden Chancen, die oft langwierigen Entwicklungsarbeiten rechtfertigen.

Dass solche Chancen bestehen, zeigt z. B. ein Beitrag in der aktuellen Ausgabe der Chemie Ingenieur Technik /20/, in dem über deutliche Verbesserungen bei der Abreicherung von Flüssiggas aus Erdgas mittels Zeolithmembranen berichtet wird. Es werden Möglichkeiten zur Taupunkteinstellung dargestellt, welche sich als energieeffiziente Alternativen zur konventionellen Verfahren der Erdgaskonditionierung erwiesen.

Aufgrund der z. T. zahlreichen gekoppelten Elementarvorgänge können solche Verbesserungen in vielen Fällen nur auf Basis einer „umfassenden“ Betrachtung aller miteinander gekoppelten Vorgänge erkannt werden. Oft ist dies nur mit Hilfe einer mathematischen Modellierung und Simulation der Vorgänge möglich. Entsprechende Arbeiten werden auch am Lehrstuhl an der TU Kaiserslautern durchgeführt.

Literatur:

- /1/ Z. Leszcynski: Przem. Chem. 1973, 52, S. 161
- /2/ C. Ramshaw: Chem. Eng. (London) 1983, 389
- /3/ H. Brauer: Chem.-Ing.-Tech. 58 (1986), Nr. 2, S. 97-107
- /4/ A. Mersmann, H. Voit, H. Zeppenfeld: Chem.-Ing.-Tech. 58 (1986), Nr. 2, S. 87-96
- /5/ S. Ripperger: Die blasenfreie Be- und Entgasung von Flüssigkeiten mit mikroporösen Membranen. Chem.-Ing.-Tech. 58 (1986) 4, S. 322 - 323
- /6/ St. Düscher: Zeitgemäße Wasserentgasung. Filtrieren und Separieren 24 (2010) Nr. 1, S. 10-15
- /7/ S. Ripperger: Mikrofiltration mit Membranen - Grundlagen, Verfahren, Anwendungen. VCH Verlagsgesellschaft mbH, Weinheim (1992), ISBN 3-527-28457-5
- /8/ Th. Westermann, Th. Melin: Membranreaktoren. Chem.-Ing.-Tech. 77 (2005) 11, S. 1655-1667
- /9/ St. Krause, R. Gutknecht: Filtrieren und Separieren 22 (2008) Nr. 4, S. 189-190
- /10/ A. Kraft, U. Mende: Filtrieren und Separieren 9 (1995) Nr. 6, S. 249-254
- /11/ K. Vossenkaul, Ch. Kullmann: Filtrieren und Separieren 19 (2005) Nr. 3, S. 123-124
- /12/ St. Düscher: Ausführungsformen und Anwendungen der Elektrodeionisation (EDI. Teil 1: Anforderungen an Reinstwasser und Verfahrensweisen der EDI. Filtrieren und Separieren 24 (2010) Nr. 4, S. 230-238
- /13/ S. Ripperger, Ch. Schnitzer, L. Steinke: Verfahren und Vorrichtung zur Erzeugung von Mikro- und/oder Nanopartikeln. Patentschrift zum Deutschen Patent Nr. 10 2006 020 288 vom 25.06.2009
- /14/ T. Keller, T. Roth, J. F. Mackowiak, P. Kreis, A. Górak, A. Stankiewicz: Prozessintensivierung in der Fluidverfahrenstechnik. Chem.-Ing.-Tech. 83 (2011), Nr. 7, 935-951
- /15/ U. Hömmerich: Pervaporation und Dampfpermeation mit Zeolithmembranen – Einsatzpotenzial und Verfahrensintegration. Dissertation RWTH-Aachen (1998)
- /16/ P. Kreis, A. Górak: Prozessanalyse hybrider Trennverfahren am Beispiel der Kopplung von Rektifikation und Membrantrennung. Chem.-Ing.-Tech. 77 (2005), Nr. 11, S. 1737-1748
- /17/ Th. Clavey: Prozessintensivierung mit Pervaporation zur Herstellung von Acetalen – Pilotierung. Chem.-Ing.-Tech. 77 (2009), Nr. 10, S. 1583-11590
- /18/ H. Ebner: Die kontinuierliche Filtration von Essig. Chem.-Ing.-Tech. 53 (1981), Nr. 1, S. 25-31
- /19/ W. Leuchtenberger, U. Plöcker: Herstellung von Aminosäuren mit Hilfe biotechnologischer Methoden. Chem.-Ing.-Tech. 60 (1988), Nr. 1, S. 16-23
- /20/ K. Neubauer, U. Lubenau, C. Hecker, B. Lücke, D. Paschek, S. Wöhrle: Abreicherung von Flüssiggas aus Erdgas mittels Zeolithmembranen. Chem.-Ing.-Tech.