

Messinger Engineering
 David-Hess-Weg 34
 CH-8038 Zürich

✉ info@membranfiltration.ch

📞 +41 79 390 60 48



Membrantechnik - Konzepte und Anwendungen

Keramische Membranen

1	Einleitung	4
2	Keramische Membranen	4
2.1	Porendurchmesser	5
2.2	Poren	5
2.3	Kanäle	6
2.4	Porosität	6
2.5	Tortuosität	6
2.6	Permeabilität	7
2.7	Tiefenfilter	8
2.8	Oberflächenfilter	9
3	Werkstoffe	9
4	Bauformen	10
5	Herstellung	12
5.1	Extrusion	13
5.2	Trocknung	13
5.3	Sintern	13
5.4	Endbearbeitung	13
5.5	Regulatorische Aspekte	13
5.6	Regulatorische Aspekte	13
6	Filtration	13
6.1	Einleitung	13
6.2	Membranfiltration	14
6.2.1	Flux	14
6.2.2	Rückhalt	15
6.2.3	Transmembrandruck	15
6.3	Crossflow, Tangentialstrom	16
6.4	Filtration, Denkschule Schule für’s Engineering	17
7	MWCO	19
7.1	Trennung bei unterschiedlichem MWCO	20

8 Mikrofiltration vs. Ultrafiltration	20
9 Temperatur- und Chemikalienbeständigkeit	21
10 Mechanische Stabilität	22
11 Lebensdauer und Ersatzkosten	22
12 Vergleich mit polymeren Membranen	22
12.1 Regulatorische Aspekte	22
13 Fouling und Reinigung	22
14 Arten des Foulings	22
15 Betriebliche Einflussfaktoren	22
15.1 Fluss	22
15.2 Scherung	22
15.3 TMP	23
15.3.1 UTP, GP, Isoflux	23
15.4 Temperatur	23
15.5 Strategien zur Fouling-Reduktion	23
15.5.1 Rückspülung	23
15.5.2 Pulsation	24
15.5.3 Crossflow-Optimierung	24
16 Prozessauslegung und Skalierung	24
17 Auswahl der Kanalgeometrie und Membranfläche	24
18 Membranmodule	24
19 Crossflow- Geschwindigkeiten und Druck	24
20 Modul- und Anlagenlayout	24
20.1 Einzelmodule	24
20.2 Racks	24
20.3 Linien	24
20.3.1 Automation	24
21 Kostenbetrachtung	25
21.1 CAPEX/OPEX	25
22 Anwendungen	25
23 Membrankristallisation	25
24 Membran-Emulsifier	25
25 Membran-Reaktor	26

26 Membran-Bioreaktor	27
27 Molkereitechnik	28
28 Getränke	28
29 Pflanzliche Extrakte	28
30 Bioproduktion	28
31 Ausblick	28
32 Innovation	28
33 Märkte	28
33.0.1 Bedarf an Trennverfahren	28
33.0.2 Ergänzung, Synergien zu klassischen Separationstechniken	28
33.0.3 Verdampfung	28
33.0.4 Zentrifugation	28
33.0.5 Polymerbasierte Membranfiltration	28
33.0.6 Chromatographie	28
33.1 Einsatzfelder in der Lebensmittel- und Bioindustrie	29
33.1.1 Lebensmittelindustrie	29
33.1.2 Bioindustrie	29
33.2 Zusammenfassung	29

1 Einleitung

In der Lebensmittel- und Ingredients-Industrie wächst der Bedarf an Trenn- und Aufbereitungstechnologien, die zugleich wirtschaftlich, produktschonend und hygienisch sicher arbeiten. Produzenten von Milchinhaltstoffen, pflanzlichen Extrakten, Fermentationsprodukten, Enzymen oder Farbstoffen stehen vor der Herausforderung, funktionelle Produkte mit definierten Eigenschaften bereitzustellen – und das unter hohen Qualitäts- und Reinigungsanforderungen.

Viele klassische Verfahren wie thermische Eindampfung, Zentrifugation oder polymerbasierte Membranfiltration stossen dabei zunehmend an ihre Grenzen: kurze Reinigungszyklen, empfindliche Materialien, eingeschränkte Standzeiten und damit steigende Betriebskosten.

Hier eröffnen *keramische Membranen* neue Perspektiven. Dank ihrer hohen Temperatur- und Chemikalienbeständigkeit lassen sie sich intensiv CIP- und SIP-reinigen, halten über lange Laufzeiten stabile Permeatqualitäten und weisen eine Lebensdauer von mehreren Jahren auf. Sie ermöglichen Prozesse, die robuster, reproduzierbarer und zuverlässiger sind – und gleichzeitig das Produkt schonen.

Dieser Artikel möchte dazu anregen, das Potenzial keramischer Membranen bewusster zu nutzen. Es führt in Aufbau, Eigenschaften und Leistungsmerkmale ein und zeigt, wie sich mit keramischen Membranen technisch überzeugende Lösungen realisieren lassen. Ziel ist es, Anwenderinnen und Anwender zu ermutigen und neue Wege in der Filtration zu eröffnen.

2 Keramische Membranen

Keramische Membranen sind poröse, anorganische Werkstoffe, die zur Trennung von Flüssigkeiten und Gasen eingesetzt werden. Sie sind technologisch seit Jahrzehnten etabliert, werden jedoch in der Lebensmittelindustrie deutlich seltener eingesetzt als Polymermembranen. Ein häufiger Grund dafür ist die Wahrnehmung höherer Investitionskosten. Bei einer wirtschaftlichen Bewertung über den gesamten Anlagenlebenszyklus – typischerweise über Zeiträume von fünf oder mehr Jahren – zeigt sich ein anderes Bild: Keramische Membranen punkten aufgrund ihrer langen Lebensdauer, hohen Temperatur- und Chemikalienbeständigkeit sowie ihrer beständigen Reinigbarkeit (CIP/SIP).

Die Gesamtkosten (CAPEX + OPEX), bestehend aus Anschaffung, Betrieb, Reinigung, Membranwechseln und Stillstandszeiten, liegen in vielen Anwendungen unter denen polymerer Membransysteme. Wo hohe Betriebssicherheit, lange Produktionskampagnen, häufige Reinigungszyklen und stabile Produktqualität entscheidend sind, sind keramische Membranen im Bereich Mikrofiltration und Ultrafiltration wirtschaftlich und prozesstechnisch hochinteressant. In der Lebensmittelindustrie ist Sauberkeit besonders wichtig. Produktionsanlagen müssen regelmässig gereinigt werden. Keramische Membranen können häufig und intensiv gereinigt werden. Sie vertragen Laugen, Säuren und Desinfektionsmittel. Auch eine Reinigung mit heissem Wasser oder Dampf ist möglich.

Der Begriff Membran leitet sich vom lateinischen *membrana* ab und bedeutet «dünne Haut».

Keramische Membranen besitzen in der Regel einen mehrschichtigen Aufbau. Dieser lässt sich in drei Bereiche gliedern: die Trägerstruktur, eine oder mehrere Übergangsschichten sowie die aktive Deckschicht, die eigentliche Membran.

Der unterste Schicht bildet die mechanisch stabile Basis der Membran. Die darauf aufgetragene Übergangsschicht dient dazu, die Porengrößen zwischen Träger und aktiver Schicht kontinuierlich anzupassen. Die eigentliche Trennwirkung findet in der obersten, feinporigen Deckschicht statt. Hier wird die Selektivität der Membran bestimmt.

Die Dicke der obersten Membranschicht ist mitentscheidend für die Filtrationseigenschaften. Da der Stofftransport in dieser Schicht erfolgt, wird sie in der Herstellung möglichst dünn ausgeführt. Dadurch verringert sich der Strömungswiderstand durch die Membran. Sie wirkt dabei wie ein Sieb, das bestimmte Stoffe aus der Lösung zurückhält.

Typische Schichtdicken keramischer Mikrofiltrationsmembranen liegen bei etwa 20–40 µm.

2.1 Porendurchmesser

Die wichtigste Eigenschaft, die eine mikroporöse Membran charakterisiert, ist der Porendurchmesser (d). Dieser Durchmesser ist allerdings stark idealisiert. Obwohl mikroporöse Membranen vom Hersteller durch einen einzigen Porendurchmesserwert charakterisiert werden (zB 0.1 µm), weisen die meisten Membranen tatsächlich eine Verteilung von Porengrößen auf.

Ebenso spielt die Verteilung der Porengrößen eine wichtige Rolle. Diese Parameter beeinflussen gemeinsam das Strömungsverhalten der Membran. Mit zunehmender Porosität nimmt die Durchlässigkeit der Membran generell zu. Der Stofftransport wird dadurch erleichtert. Insbesondere die Porosität der aktiven Porenschicht ist von grosser Bedeutung. Diese sollte möglichst hoch sein, um einen hohen Flux zu ermöglichen.

2.2 Poren

Was sind Poren?

Auf den ersten Blick scheint die Antwort trivial: kleine Öffnungen, feine Kanäle, winzige Hohlräume. Aber schon bei der ersten präzisen Betrachtung verliert sich diese Einfachheit. Eine Pore kann ein einzelner, klar definierter Kanal sein oder ein weit verzweigtes Netzwerk miteinander verbundener Hohlräume, dessen Geometrie sich kaum vollständig erfassen lässt. Manche Poren verlaufen nahezu geradlinig, andere winden sich in räumlich komplexen Bahnen mit Engstellen, Verzweigungen und Sackgassen.

Selbst die Frage nach der Grösse von Poren ist erstaunlich vielschichtig. Je nach Messmethode kann sie als mittlerer Durchmesser, als engste Engstelle oder als effektiver Transportquerschnitt definiert werden.

In technischen Membranen werden Porenstrukturen gezielt erzeugt, abgestuft, reproduziert und kontrolliert, während sie in natürlichen Materialien häufig zufällig wachsen und statistischen Gesetzmässigkeiten folgen.

2.3 Kanäle

Poren bezeichnen lokale Hohlräume innerhalb des Membranmaterials, die durch ihre Grösse, Form und Verteilung die Mikrostruktur der Membran charakterisieren. Kanäle hingegen stellen durchgängige Strömungswege dar, welche sich aus der Verbindung mehrerer Poren über die gesamte Membrandicke ergeben und den effektiven Stofftransport ermöglichen.

Der Begriff Pore geht auf lateinisch *porus* und weiter auf altgriechisch *póros* zurück, was Weg, Durchgang oder Öffnung bedeutet und sich somit ursprünglich auf einen Kanal bezieht, durch den etwas hindurchtreten kann.

In der Mikrofiltration sind aufgrund der vergleichsweise grossen Porendurchmesser häufig offene und klar ausgeprägte Porenkanäle vorhanden, sodass der Trennmechanismus überwiegend auf einer Siebwirkung basiert. Ultrafiltrationsmembranen weisen dagegen eine deutlich feinere, stark vernetzte Porenstruktur auf, bei der keine eindeutig definierten Einzelkanäle erkennbar sind. Insbesondere bei anisotrop aufgebauten Membranen übernimmt die dichte Deckschicht mit kleinen Poren die eigentliche Trennfunktion, während die darunterliegenden, gröber strukturierten Schichten den Transport des Permeats über kanalartige Strukturen unterstützen.

2.4 Porosität

Die Porosität ist eine zentrale Kenngrösse von Mikrofiltrations- und Ultrafiltrationsmembranen. Sie ist definiert als das Verhältnis des Porenvolumens zum gesamten Volumen des Materials. Sie beschreibt somit den Anteil der Hohlräume im Festkörper. Eine hohe Porosität bedeutet, dass ein grosser Teil des Materials aus Poren besteht. Diese Poren stehen für den Stofftransport zur Verfügung.

Die Porosität kann experimentell auf verschiedene Weise bestimmt werden. Eine wichtige Methode ist die Auswertung mikroskopischer Aufnahmen. Dazu werden hochauflösende Bilder der Membranstruktur analysiert. Solche Bilder stammen häufig aus der Rasterelektronenmikroskopie. Auch die Transmissionselektronenmikroskopie wird eingesetzt. Aus diesen Bildern lassen sich Porenform, Porengrösse und Porengrössenverteilung bestimmen. Durch Bildverarbeitung kann der Porenanteil quantitativ ausgewertet werden.

Die Erhöhung der Porosität ist jedoch technisch begrenzt. Eine zu hohe Porosität schwächt die mechanische Stabilität der Membran. Dies gilt besonders für keramische Membranen. Sinkt die Festigkeit zu stark, kann es zu Brüchen oder Deformationen kommen. Die Membran wird dann für den technischen Einsatz ungeeignet.

Aus diesem Grund muss ein Kompromiss gefunden werden. Bei der Herstellung durch die Partikelsintermethode wird die Porosität gezielt eingestellt. In der Praxis liegt sie häufig im Bereich von 30 bis 40 Prozent. Dieser Wert lässt sich durch Wiegen der Membran vor und nach dem Befüllen der Poren mit einer inerten Flüssigkeit ermitteln. In diesem Bereich sind Durchlässigkeit und mechanische Festigkeit in einem ausgewogenen Verhältnis.

2.5 Tortuosität

Die *Membrantortuosität* (τ) spiegelt die Länge der durchschnittlichen Poren im Verhältnis zur Membrandicke wider. Einfache zylindrische Poren im rechten Winkel zur Membranoberfläche haben eine Tortuosität von eins, d. h. die durchschnittliche Länge der Poren

entspricht der Membrandicke. In der Regel verlaufen die Poren eher mäanderförmig durch die Membran, sodass typische Tortuositäten im Bereich von 1,5 bis 2,5 liegen.

2.6 Permeabilität

Eine weitere Grösse wird in (Li, 2008) über die Messung der Permeabilität von reinem Wasser (engl. *pure water permeability*, PWP) beschrieben.

Bereits im Jahr 1856 beobachtete (Darcy, 1856), dass die Durchflussrate von Wasser durch ein poröses Medium mit der Schichtdicke Δx in Beziehung zur antreibenden Druckdifferenz ΔP gesetzt werden kann. Diese Beziehung wird durch den folgenden Zusammenhang beschrieben:

$$J = \frac{1}{A} \cdot \frac{dV}{dt} = \frac{\Delta P}{\eta \cdot R_m} \quad (1)$$

Dabei bezeichnet:

- J die volumetrische Flussdichte (Permeatfluss), angegeben in $\text{L m}^{-2} \text{h}^{-1}$ bzw. $\text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$,
- ΔP die treibende Druckdifferenz in Pa,
- η die dynamische Viskosität der Flüssigkeit in Pa s,
- R_m den Membranwiderstand in m^{-1} ,
- A die Membranfläche in m^2 ,
- V das permeierte Volumen und t die Messzeit.

Je höher der Membranwiderstand R_m oder die Viskosität η ist, desto geringer ist der resultierende Fluss J bei gleicher Druckdifferenz ΔP .

☉ *Henry Darcy* war ein französischer Ingenieur des 19. Jahrhunderts, der ursprünglich die Wasserversorgung seiner Heimatstadt Dijon verbessern wollte. Dabei untersuchte er, wie Wasser durch Sandfilter strömt, und formulierte eine einfache, aber tiefgreifende Beziehung zwischen Druck, Fluss und Durchlässigkeit poröser Materialien. Diese scheinbar unspektakuläre Erkenntnis wurde zur Grundlage der Strömungslehre in Porenmedien und damit auch der Membrantechnik. Noch heute begegnet uns das sogenannte Darcy-Gesetz in jedem Lehrbuch, weil es den zentralen Zusammenhang beschreibt, den wir verstehen müssen, wenn Flüssigkeiten durch ein Filtermaterial oder eine Membran hindurchtreten: Es erklärt nicht nur, wie schnell etwas fließt, sondern warum es fließt.

Die Durchlässigkeit von Wasser hängt somit nicht allein von der Porengrösse ab, sondern in erheblichem Maße von den oberflächenchemischen Eigenschaften der Membran. Hydrophile oder hydrophobe Charakteristiken entstehen dabei nicht nur aus der chemischen Natur des Grundmaterials, sondern können auch gezielt durch in Reinigungs- oder Prozesslösungen enthaltene Netzmittel beeinflusst werden.

Bei der Messung der Wasserpermeabilität muss zusätzlich die *Hydrophilie* bzw. *Hydrophobie* der Membranoberfläche berücksichtigt werden. Eine Membranoberfläche kann hydrophil oder hydrophob sein. Hydrophil bedeutet „wasserfreundlich“: Wasser verteilt sich leicht

auf der Oberfläche und die Poren lassen sich gut benetzen. Dadurch kann das Wasser einfacher durch die Membran fließen. Hydrophob bedeutet „wasserabweisend“: Wasser bildet Tropfen und haftet schlecht an der Oberfläche. Die Poren werden schlechter benetzt und der Wasserfluss durch die Membran ist geringer. In der Praxis bedeutet das: Hydrophile Membranen zeigen meist einen höheren Wasserfluss. Hydrophobe Membranen benötigen oft eine Vorbehandlung (zum Beispiel mit Ethanol oder Netzmitteln), damit Wasser in die Poren eindringen kann. Grundsätzlich gilt: Je hydrophiler eine Membran ist, desto leichter kann Wasser in die Poren eindringen und hindurchströmen. Hydrophobe Membranen hingegen weisen Wasser ab, sodass die Wasserpermeation deutlich geringer ausfällt.

Diese verändern die Benetzbarkeit der Oberfläche und damit das Wechselspiel zwischen Wasser und Membran, sodass die Filtrationsleistung letztlich das Ergebnis eines Zusammenspiels aus Porenstruktur, Materialchemie und fluidseitiger Umgebung ist.

☉ Ein verbreiteter Fehler in der industriellen Praxis besteht darin, den gemessenen Wasserfluss (*Water Flux*) als alleiniges Mass für die „Sauberkeit“ oder Leistungsfähigkeit einer Membran zu interpretieren. Da der Wasserfluss neben der Porenstruktur immer auch von der Benetzbarkeit, der Oberflächenladung und möglichen Adsorptionseffekten beeinflusst wird, ist diese Annahme nicht ausreichend.

Mikroporöse Ultra- und Mikrofiltrationsmembranen, die zur Abtrennung von Partikeln aus Flüssigkeiten eingesetzt werden, lassen sich grundsätzlich in zwei Kategorien einteilen: Oberflächen- bzw. Siebfilter und Tiefenfilter.

2.7 Tiefenfilter

Ein Tiefenfilter hat eine Struktur, bei der die Poren über die gesamte Materialdicke verteilt sind. Die Filtration findet deshalb nicht nur an der Oberfläche statt, sondern im Inneren des gesamten Filterkörpers. Teilchen aus der Flüssigkeit gelangen in das Material hinein. Dort werden sie zurückgehalten, während das gereinigte Filtrat weiter durch den Filter strömt.

Ein Tiefenfilter besteht aus einer dicken, porösen Matrix. Die Poren sind unregelmässig verteilt und unterschiedlich gross. Dadurch entsteht ein verwinkeltes, labyrinthisches Porennetzwerk. Die gesamte Tiefe des Materials trägt aktiv zur Filterwirkung bei.

Der Tiefenfilter trägt seinen Namen, weil die Teilchen nicht an einer einzigen Trennschicht gestoppt werden. Stattdessen dringen sie in die innere Struktur des Filters ein. Im Inneren werden sie über die gesamte Materialtiefe verteilt abgeschieden. Die Filterwirkung entsteht durch das Zusammenwirken vieler Effekte. Dazu gehören mechanische Siebung, Umströmung von Partikeln, Trägheitseffekte und Anlagerungskräfte. Diese Prozesse

Die Wirkung auf Partikel und Moleküle hängt von deren Grösse ab. Grosse Partikel werden meist früh im Filter zurückgehalten. Mittlere Partikel dringen tiefer ein und lagern sich in der Porenstruktur an. Tiefenfilter haben eine hohe Partikelauflagekapazität, da das gesamte Volumen der Struktur genutzt wird. Eine Reinigung ist in der Regel nicht möglich, weshalb Tiefenfilter meist als Einwegfilter eingesetzt werden. Mit zunehmender Beladung steigt der Strömungswiderstand und damit der Druckverlust.

2.8 Oberflächenfilter

Der Oberflächenfilter ist anisotrop aufgebaut. Der Begriff anisotrop stammt aus dem Griechischen (an = nicht, tropos = Richtung, Art) und bedeutet, dass ein Material in unterschiedlichen Richtungen unterschiedliche Eigenschaften besitzt.

Für einen anisotrop aufgebauten Membranfilter bedeutet dies, dass seine Porenstruktur über die Membrandicke nicht einheitlich ist. Die Membran besteht aus zwei funktionalen Schichten. An der dem Medium zugewandten Seite befindet sich eine sehr dünne Schicht mit sehr kleinen Poren, die als *Skin-Layer* bezeichnet wird und die eigentliche Trennleistung bestimmt. Darunter liegt eine deutlich dickere Stützschiicht mit grösseren Poren, die vor allem für die mechanische Stabilität der Membran verantwortlich ist.

Vereinfacht kann man den Aufbau folgendermassen darstellen:

Fluid → dünne Schicht mit kleinen Poren (Filtration) → dicke Schicht mit grösseren Poren (Stütze) → Filtrat

Praktische Konsequenzen: 1. Die Abtrennung der Partikel erfolgt hauptsächlich an der Membranoberfläche. 2. Trotz der feinen Poren des Skin-Layers kann ein vergleichsweise hoher Permeatfluss erreicht werden, da die poröse Stützschiicht den Durchfluss nur gering behindert. 3. Die Membran besitzt eine ausreichende mechanische Stabilität, obwohl die trennende Schicht sehr dünn ist. 4. Reinigungsprozesse betreffen überwiegend die Membranoberfläche, zum Beispiel durch Rückspülen oder tangentialer Strömungsführung (Cross-flow)

Membranfilter sind Oberflächenfilter mit definierter Trenngrenze, Tiefenfilter wirken volumetrisch und weniger scharf selektiv.

3 Werkstoffe

Keramische Multikanalelemente sind Filterkörper aus anorganischen Materialien. Zum Einsatz kommen typischerweise folgende keramische Materialien:

- Aluminiumoxid (Al_2O_3)
- Siliciumcarbid (SiC)
- Zirkonoxid (ZrO_2)
- Titandioxid (TiO_2)

Neben diesen häufig eingesetzten keramischen Werkstoffen gibt es weitere keramische Materialien, die in der Lebensmittelindustrie und in der Biotechnologie zum Einsatz kommen oder erforscht werden.

Darüber hinaus existieren funktionalisierte keramische Materialien, bei denen die Oberfläche chemisch modifiziert ist. Solche Modifikationen dienen dazu, die Hydrophilie, die Oberflächenladung oder die Foulingneigung gezielt zu beeinflussen. In der Biotechnologie werden solche Materialien eingesetzt, um Proteinadsorption zu reduzieren oder biologische Prozesse besser zu kontrollieren.

Viele dieser Werkstoffe befinden sich noch in der Entwicklung oder werden nur in Spezialanwendungen eingesetzt. Ihre Bedeutung nimmt jedoch zu, da die Anforderungen an Hygiene, Reinigbarkeit und Prozessstabilität stetig steigen. Die Materialwahl bleibt daher

ein zentrales Thema bei der Entwicklung keramischer Membranen.

Alle genannten Werkstoffe sind anorganische keramische Materialien. Sie besitzen eine hohe Härte, eine ausgeprägte Verschleiss- und Temperaturbeständigkeit sowie eine gute chemische Resistenz gegenüber vielen Medien. Gleichzeitig sind sie spröde und zeigen keine plastische Verformbarkeit. In poröser Form lassen sie sich so herstellen, dass sie sowohl mechanisch als auch thermisch stabil bleiben – selbst bei hohen Einsatztemperaturen und in chemisch aggressiven Umgebungen. Dadurch eignen sie sich hervorragend als Filterwerkstoffe in der Membran- und Trenntechnik.

4 Bauformen

Keramische Membranelemente werden in unterschiedlichen Bauformen entwickelt, um verschiedenen technischen Anforderungen gerecht zu werden. Eine der am häufigsten eingesetzten Formen sind monolithische Multikanalelemente. Diese besitzen meist eine zylindrische Geometrie. Im Inneren verlaufen mehrere parallele Kanäle durch eine poröse keramische Matrix. Die Kanäle dienen als Strömungswege für das zu filtrierende Medium. Die aktive Membranschicht befindet sich an den Kanalwänden. Multikanalelemente kombinieren hohe mechanische Stabilität mit einer grossen effektiven Membranfläche. Sie werden bevorzugt in der Mikrofiltration und Ultrafiltration eingesetzt. Besonders in der Lebensmittelindustrie und Abwasserbehandlung sind sie weit verbreitet.

Eine weitere Bauform sind keramische Platten- oder Scheibenmembranen. Diese weisen eine flächige Geometrie auf. Sie werden häufig in Modulkonzepten mit stapelbaren Elementen verwendet. Solche Systeme ermöglichen eine kompakte Bauweise. Zudem erleichtern sie den Austausch einzelner Membranelemente. Plattenmembranen finden Anwendung in Pilotanlagen und spezialisierten industriellen Prozessen.

Daneben existieren keramische Rohr- und Kapillarmembranen. Diese zeichnen sich durch ihren kleinen Durchmesser aus. Durch ihre schlanke Geometrie besitzen sie eine hohe spezifische Oberfläche. Dies ist vorteilhaft für Prozesse mit begrenztem Platzangebot. Rohr- und Kapillarmembranen werden insbesondere in Cross-Flow-Anwendungen eingesetzt. Die Wahl der Bauform beeinflusst Strömungsverhältnisse, Reinigbarkeit und Prozessstabilität. Die Wahl der Bauform richtet sich in erster Linie nach den Eigenschaften der zu filtrierenden Flüssigkeit, insbesondere ihrer Viskosität und ihrem Feststoffgehalt.

Bei viskosen oder feststoffhaltigen Medien werden offene Geometrien mit Kanalquerschnitten über 3 mm bevorzugt, da sie geringere Strömungswiderstände aufweisen und eine zuverlässige Reinigung sowie eine stabile Filtrationsleistung gewährleisten. Bei der Auswahl der Geometrie gibt es zwei wesentliche Zielrichtungen.

Weite und offen gestaltete Kanäle bieten eine hohe Betriebssicherheit gegenüber Verstopfungen und ermöglichen grössere Überströmungen, wodurch höhere Scherkräfte zur Abreinigung der Membranoberfläche erzeugt werden. Gleichzeitig führt eine Vergrösserung des Kanalquerschnittes jedoch zu einer Verringerung der spezifischen Membranfläche pro Element. Um die gleiche Filtrationsleistung zu erzielen, müssen daher mehr Elemente installiert werden, was sich unmittelbar in erhöhten Investitions- und Betriebskosten niederschlägt. Zudem steigen durch die höheren Überströmungsgeschwindigkeiten die erforderlichen Pumpenleistungen, wodurch der Energiebedarf und damit die Betriebskosten weiter

zunehmen.

Die Querstrom-Mikrofiltration wird mit rohrförmigen oder Multikanalelementen durchgeführt. Es sind aber auch Mikrofiltrationsmembranen im Hohlfaserformat, als Platten und Scheiben erhältlich. Die heute weltweit am häufigsten eingesetzte Geometrie basiert auf runden Monolithen mit einem Aussendurchmesser von 1 Zoll (25 mm). Dieser Durchmesser hat sich über Jahre hinweg als *de-facto-Standard* etabliert. Die praktische Bedeutung dieses Standards ist erheblich: In Anlagen, die mit keramischen Multikanalelementen dieser Baugröße arbeiten, können Module unterschiedlicher Hersteller ohne grundlegende Anpassungen ausgetauscht werden. Das ermöglicht eine flexible Ersatzteilversorgung, reduziert das Risiko von Lieferantenabhängigkeiten und schafft strategische Versorgungssicherheit über den gesamten Lebenszyklus einer Anlage. Gerade in einem Markt mit dynamischer technologischer Entwicklung ist diese Hersteller- und Lieferantenflexibilität ein wesentlicher Vorteil.

Multikanalelemente stellen in der Lebensmittel-Industrie die am weitesten verbreitete Bauform keramischer Membranen dar. Daher konzentrieren wir uns im Folgenden gezielt auf diese Ausführung.

Der Begriff *Multikanal* bezeichnet den inneren Aufbau: das Filterelement besteht aus einem massiven Keramikkörper (Monolith) mit mehreren parallel verlaufenden, durchgehenden Kanälen, die symmetrisch angeordnet sind.

Die Kanäle sind durchgehend und frei von inneren Widerständen, was eine hohe Durchströmung ermöglicht. Durch die entstehenden Turbulenzen werden Ablagerungen minimiert und die Reinigbarkeit deutlich erleichtert. Dank dieser offenen Struktur können selbst Medien mit höherem Feststoffgehalt direkt filtriert werden, ohne Vorfiltration.

Jeder Kanal ist an seiner Innenwand mit einer Membranschicht versehen, während das darunterliegende Trägermaterial eine gröbere Porenstruktur aufweist.

Die äussere Form ist in der Regel zylindrisch, während die Kanalquerschnitte verschiedene Formen annehmen: Rundkanäle (häufigste Form), Quadratische Kanäle, Sechseckige Kanäle (Wabenstruktur).

Die Anzahl der Kanäle reicht von 1 (monokanalig, meist für Laboranwendungen) bis zu 19, 37, 61, 91 oder mehr (je nach Durchmesser und Hersteller).

Die genauen Masse variieren je nach Hersteller und Anwendung. Typische Werte sind:

Parameter / Material	Wert / Eigenschaften
Abmessungen	
Gesamtlänge	250 mm – 1500 mm
Außendurchmesser	3 mm – 40 mm
Kanalinnendurchmesser	0.5 mm – 12 mm
Ultrafiltration	1 kDa; 5 kDa; 15 kDa; 25 kDa; 100 kDa; 150 kDa; 0.05 μm
Mikrofiltration	0.1 μm ; 0.2 μm ; 0.4 μm ; 0.8 μm ; 1.2 μm
Materialvarianten	
Al_2O_3 (Aluminiumoxid)	Standardmaterial; chemisch stabil; thermisch beständig bis ca. 1000 °C.
ZrO_2 (Zirkonoxid)	Feinporige Membranen für Ultrafiltration; hohe Dichte.
SiC (Siliciumcarbid)	Sehr hohe Abrasionsfestigkeit; starke chemische Widerstandsfähigkeit.
TiO_2 (Titandioxid)	Gute chemische Resistenz; jedoch vergleichsweise kostenintensiv.

Tabelle 1. Abmessungen und Materialvarianten keramischer Multikanalelemente

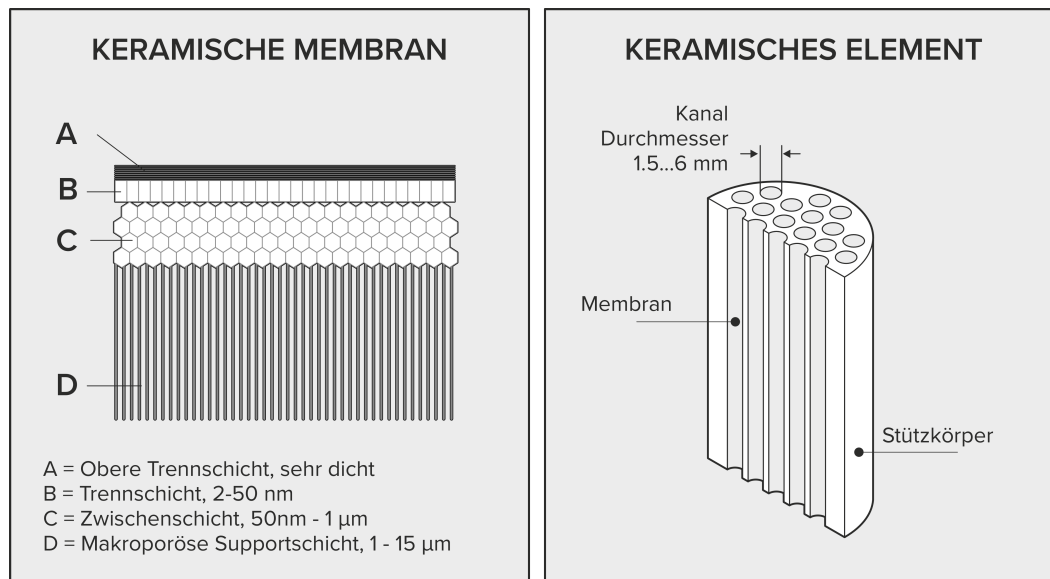


Abbildung 1. Keramische Membranen, Keramische Elemente

5 Herstellung

Die Herstellung erfolgt durch Sintern feinkörniger keramischer Pulver unter kontrollierten Bedingungen. Durch gezielte Steuerung der Sinterparameter können Porengröße, Poren-

volumen und Oberflächenstruktur präzise eingestellt werden.

Die Herstellung keramischer Multikanalelemente erfolgt in mehreren Schritten:

5.1 Extrusion

Eine plastische Keramikmasse (bestehend aus keramischem Pulver, Bindern, Lösungsmitteln und Additiven) wird durch eine speziell geformte Düse gepresst. Diese Düse bestimmt Geometrie, Kanalanzahl und Anordnung. Das resultierende ungesinterte Bauteil wird als *Grünling* bezeichnet.

5.2 Trocknung

Der Grünling wird kontrolliert getrocknet, um Rissbildung zu vermeiden.

5.3 Sintern

Der getrocknete Grünling wird bei Temperaturen von etwa 1200 °C bis 1600 °C gesintert. Dabei verdichtet sich das Material und erhält seine endgültige Festigkeit und Porosität.

5.4 Endbearbeitung

Die Enden der Elemente werden plan geschliffen, glasiert oder abgedichtet.

5.5 Regulatorische Aspekte

Mit zunehmenden Anforderungen an Nachhaltigkeit, Lebensmittelsicherheit und Abfallvermeidung gewinnen Verfahren mit keramischen Membranen an Relevanz. Die längere Lebensdauer, bessere Reinigung, die Möglichkeit Zusatzstoffe zu reduzieren und das Vermeiden von Kunststoff in der Produktion entsprechen den Trends der EU-Lebensmittel- und Umweltgesetzgebung.

5.6 Regulatorische Aspekte

Mit zunehmenden Anforderungen an Nachhaltigkeit, Lebensmittelsicherheit und Abfallvermeidung gewinnen Verfahren mit keramischen Membranen an Relevanz. Die längere Lebensdauer, bessere Reinigung, die Möglichkeit Zusatzstoffe zu reduzieren und das Vermeiden von Kunststoff in der Produktion entsprechen den Trends der EU-Lebensmittel- und Umweltgesetzgebung.

6 Filtration

6.1 Einleitung

Der Begriff Filtration leitet sich vom lateinischen Wort *filtrum* ab, das ursprünglich einen Woll- oder Faservlies bezeichnete, durch den Flüssigkeiten gegossen wurden. Schon früh wurde erkannt, dass solche Fasermatten Partikel zurückhalten, während das Wasser hin-

durchtritt. Heute versteht man unter Filtration im technischen Sinn das Trennen von festen oder kolloidal gelösten Stoffen aus einer Flüssigkeit oder einem Gas mithilfe einer durchlässigen Barriere. Diese Barriere kann eine Membran, ein Gewebe, ein poröser Körper oder ein ganzes Schüttbett sein. Doch Filtration ist keineswegs nur eine Erfindung der Technik. In der Natur ist sie ein fundamentaler Prozess. Die Wurzeln von Pflanzen filtern Nährstoffe aus Bodenlösungen, während unerwünschte Partikel zurückbleiben. Schwämme, Muscheln und Manteltiere ernähren sich durch das Durchströmen von Meerwasser und die Abscheidung mikroskopischer Nahrungspartikel. Die menschliche Niere ist ein hochkomplexes Filtersystem, das das Blut reinigt und lebenswichtige Moleküle zurückhält. Diese natürlichen Filtrationsprozesse arbeiten oft mit erstaunlicher Selektivität und Selbstregulation. Technische Filter dagegen benötigen Wartung, Energie und oftmals Druckdifferenzen, um zu funktionieren. Dennoch haben Ingenieurinnen und Ingenieure viel von der Natur gelernt. Viele moderne Membranen ahmen die hierarchischen Strukturen biologischer Gewebe nach. Auch in der Natur wirken nicht nur Poren, sondern Oberflächenkräfte, Ladungen und hydrodynamische Effekte. Dadurch wird deutlich, dass Filtration mehr ist als ein mechanisches Sieben. Sie ist ein Zusammenspiel von Struktur, Chemie und Stromlinien. Wer die Filtration verstehen will, blickt deshalb in Labor, Natur und manchmal sogar in sich selbst.

6.2 Membranfiltration

Bei der Membranfiltration wird ein Zufuhrmischung in zwei verschiedene Ströme aufgeteilt. Der Zufuhrstrom \dot{m}_F gelangt in ein Membranmodul und teilt sich dort in zwei Teile.

Der erste Teil ist der Retentatstrom \dot{m}_R . Das ist der Stoffstrom, der von der Membran zurückgehalten wird. Er enthält einerseits Stoffe, die zu gross sind, um durch die Membran zu gelangen. Andererseits enthält er auch Stoffe, die eigentlich durch die Membran passieren würden, aber noch keine Gelegenheit dazu hatten.

Der zweite Teil ist der Permeatstrom \dot{m}_p . Das ist der Stoffstrom, der durch die Membran hindurchgetreten ist. Er enthält nur kleine Moleküle oder Teilchen, die durch die Poren der Membran passen. Grössere Moleküle oder Partikel sind im Permeat kaum oder gar nicht vorhanden.

Die Membranfiltration wird mit zwei wichtigen Grössen bewertet: dem *Flux* und dem *Rückhalt*.

6.2.1 Flux

Der Flux, auch Permeatfluss genannt, beschreibt, wie viel Permeat (Filtrat) pro Zeiteinheit durch eine bestimmte Membranfläche hindurchtritt. Er ist ein wichtiges Mass dafür, wie leistungsfähig eine Membran ist.

Je nachdem, welche Grösse betrachtet wird, unterscheidet man verschiedene Arten von Flux:

- volumetrischer Flux J_V
- Massenflux J_m

- Komponentenflux J_i

Der *volumetrische Flux* J_V gibt an, welches Volumen an Permeat pro Zeiteinheit durch eine bestimmte Membranfläche strömt. Dabei wird nur das Volumen betrachtet, nicht die Masse.

Der *Massenflux* J_m beschreibt die Masse des Permeats, die pro Zeiteinheit durch eine bestimmte Membranfläche hindurchtritt.

Der Massenflux kann aus dem volumetrischen Flux berechnet werden:

$$J_m = J_V \cdot \rho$$

Dabei ist ρ die Dichte des Permeats.

Der *Komponentenflux* J_i beschreibt den Durchfluss einer einzelnen Komponente i durch die Membran. Er wird verwendet, wenn man wissen möchte, wie schnell ein bestimmter Stoff durch die Membran transportiert wird.

Flux	Bezeichnung	Bedeutung	Typische Einheit
J_V	Volumetrischer Flux	Volumenstrom pro Membranfläche	$\text{m}^3/(\text{m}^2 \text{ s})$ oder $\text{L}/(\text{m}^2 \text{ h})$ oder m/s
J_m	Massenflux	Massenstrom pro Membranfläche	$\text{kg}/(\text{m}^2 \text{ s})$
J_i	Komponentenflux	Fluss einer einzelnen Komponente i	$\text{kg}/(\text{m}^2 \text{ s})$ oder $\text{kmol}/(\text{m}^2 \text{ s})$

Tabelle 2. Verschiedene Arten von Flux

6.2.2 Rückhalt

Der Stofftransport einer Komponente i durch ein Membranelement hängt von ihrer Konzentration auf der Zufuhrseite $C_{R,i}$ und auf der Permeatseite $C_{P,i}$ ab. Wenn insgesamt n Komponenten durch die Membran hindurchtreten, kann ein Gesamtfluss J_{tot} definiert werden:

$$J_{\text{tot}} = \sum_{i=1}^n J_i$$

Zur Beurteilung der Trennleistung wird der Retentionsfaktor R_i einer Komponente i verwendet. Er ist definiert als

$$R_i = 1 - \frac{C_{P,i}}{C_{R,i}}$$

Dabei ist $C_{P,i}$ die Konzentration der Komponente i im Permeat und $C_{R,i}$ die Konzentration derselben Komponente im Retentat.

6.2.3 Transmembrandruck

Die treibende Kraft bei der druckgetriebenen Membrantrennung ist natürlich der Druck oder der Druckunterschied zwischen dem Upstream- und dem Downstream-Bereich der Membran bzw. zwischen dem Feed und dem Permeat. Dieser wird als Transmembrandruck

bezeichnet. Da der Druck im Membranmodul aufgrund der Querströmung variieren kann, wird ein gemittelter Druckunterschied über das Modul verwendet:

$$\Delta p_{TM} = \frac{p_{F,ein} + p_{F,aus}}{2} - p_P \quad (2)$$

6.3 Crossflow, Tangentialstrom

Tatsächlich können druckgetriebene Membranprozesse in zwei verschiedenen Modi betrieben werden: Dead-End- und Cross-Flow-Betrieb. Im Dead-End-Modus tritt ein Strom der Zufuhr in das Membranmodul ein und fließt vertikal in Richtung der Membranoberfläche, und nur ein Strom verlässt das Membranmodul. Im Cross-Flow-Modus fließt ein Strom der Zufuhr tangential zur Membranoberfläche, und es gibt zwei Ströme, die das Membranmodul verlassen, wobei einer für den Retentatfluss und der andere für den Permeatfluss bestimmt ist (wie in Abb. 1.3 dargestellt). Der Dead-End-Modus wird meist in der MF zur Klärung und Sterilisation eingesetzt, wo das Feed relativ sauber ist. In den meisten Anwendungen ist die Anreicherung der zurückgewiesenen Partikel oder Moleküle so stark, dass der Dead-End-Betrieb unpraktisch wird und der Cross-Flow-Betrieb angewendet werden muss. Der Tangentialfluss im Cross-Flow-Modus kann dazu beitragen, die angesammelten abgelehnten Stoffe an den Membranen abzutragen, die Höhe der Kuchen-schichten zu begrenzen und somit den Permeatfluss aufrechtzuerhalten.

Die Crossflow oder Tangentialstromfiltration wird vor allem in der Mikrofiltration und Ultrafiltration eingesetzt.

Der Begriff *Cross-Flow-Filtration* stammt vor allem aus dem englischsprachigen Raum. *Tangentialstromfiltration* ist die deutsche Übersetzung desselben Konzepts. Inhaltlich gibt es keinen Unterschied zwischen den beiden Bezeichnungen.

In diesen Verfahren strömt die Flüssigkeit nicht senkrecht auf die Membran zu. Stattdessen fließt sie parallel zur Membranoberfläche. Nur ein Teil der Flüssigkeit tritt als Permeat durch die Membran.

Der restliche Teil der Flüssigkeit wird als Retentat weitergeführt. Durch die parallele Strömung entstehen Scherkräfte an der Membranoberfläche. Diese Scherkräfte wirken der Ablagerung von Partikeln entgegen. Dadurch unterscheidet sich die Cross-Flow-Filtration deutlich von der *Dead-End-Filtration*. Bei der Dead-End-Filtration lagern sich Partikel schnell auf der Membranoberfläche ab. Dies führt dort rasch zu einem starken Fluxabfall.

Die Cross-Flow-Filtration reduziert diese Ablagerungen. Partikel werden teilweise wieder von der Membranoberfläche abtransportiert. Dies verlängert die Betriebszeit der Membran. Der Prozess kann dadurch stabiler betrieben werden. Trotzdem tritt auch hier Fouling auf. Es wird jedoch langsamer aufgebaut.

Die schematischen Darstellungen des Dead-End- Modus und des Cross-Flow-Modus sowie deren Auswirkungen auf den Permeatfluss und die Höhe und den Widerstand der Kuchen-schicht sind in Abbildung 1.4 dargestellt. In den meisten Anwendungen, die mit wässrigen Lösungen in der Lebensmittel- und Bioproduktverarbeitung zu tun haben, besteht das Lösungsmittelpermeat größtenteils aus Wasser, und der Permeatfluss wird oft bequem als $[m^3/(m^2 s)$, d. h. m/s] oder $[L/(m^2 h)$, LMH] angegeben. Das ist das Volumen des pro Zeiteinheit und Membranflächeneinheit erzeugten Permeats. Normalerweise gibt es nur eine

Spezies, Mikropartikel oder Makromolekül, die von Interesse ist, und die Zurückhaltung bezieht sich nur auf die betreffende Spezies. Oft ist die Permeatflussrate viel geringer als die Retentatflussrate in einem einzigen Durchgang, sodass die Konzentrationsänderung im Retentat nicht signifikant ist. Die Zurückhaltung kann dann bequem berechnet werden: Die Zurückhaltung kann dann bequem berechnet werden mit: $CP R5 12 \delta 1:2bP CF$ wobei CF die Zufuhrkonzentration ist. Die treibende Kraft bei der druckgetriebenen Membrantrennung ist natürlich der Druck oder der Druckunterschied zwischen dem Upstream- und dem Downstream-Bereich der Membran oder zwischen der Zufuhr und dem Permeat. Dies wird als Transmembrandruck bezeichnet. Da der Druck im Membranmodul aufgrund der Querströmung variieren kann, wird eine gemittelte Druckdifferenz über das Modul verwendet:

6.4 Filtration, Denkschule Schule für's Engineering

Filtration, das Trennen von Stoffen, lässt sich nicht nur als technischer Vorgang verstehen, sondern auch als eine Metapher für die Art und Weise, wie wir Menschen die Welt wahrnehmen.

In technischen Prozessen zeigt sich dieser Zusammenhang besonders deutlich. Erst durch die gezielte Trennung von Stoffen werden ihre Eigenschaften sichtbar. Ein anschauliches Beispiel ist die Filtration von Magermilch. Wird die Milch getrennt, entsteht im Permeat das Milchserum. Damit wird ein Stoff sichtbar, der im ursprünglichen Gemisch für das bloße Auge verborgen war. Die Trennung macht deutlich, dass scheinbar homogene Materialien in Wirklichkeit aus unterschiedlichen Bestandteilen bestehen.

In ähnlicher Weise funktioniert menschliches Denken. Wir ordnen Informationen, indem wir sie filtern. Wir wählen aus, was wir beachten, und lassen anderes bewusst oder unbewusst weg.

Dadurch entstehen Kategorien, Begriffe und Modelle. Struktur ist somit kein gegebenes Merkmal der Welt. Sie entsteht durch den Akt des Trennens und Ordnen.

Bereits in der antiken Philosophie spielt Trennung eine zentrale Rolle. Bei Platon entsteht Erkenntnis durch Unterscheidung von Erscheinung und Idee. Erkenntnis ist dort immer ein Akt des Ausscheidens des Unwesentlichen. Auch bei Aristoteles ist das Trennen grundlegend. Seine Kategorienlehre beruht darauf, Dinge nach bestimmten Merkmalen zu sortieren. Dieses Ordnen entspricht einem geistigen Filterprozess.

Erkennen bedeutet trennen, und Trennen führt zu Erkennen.

Diese Formulierung eignet sich besonders gut, um Denkprozesse zu erklären. Sie verdeutlicht, dass Erkennen nicht plötzlich entsteht, sondern das Ergebnis eines aktiven und bewussten Vorgehens ist. Komplexe Sachverhalte werden dabei gezielt in unterscheidbare Teile zerlegt. Durch diese Trennung werden Zusammenhänge überschaubar. Erst in einem zweiten Schritt können sie verstanden, verglichen und eingeordnet werden.

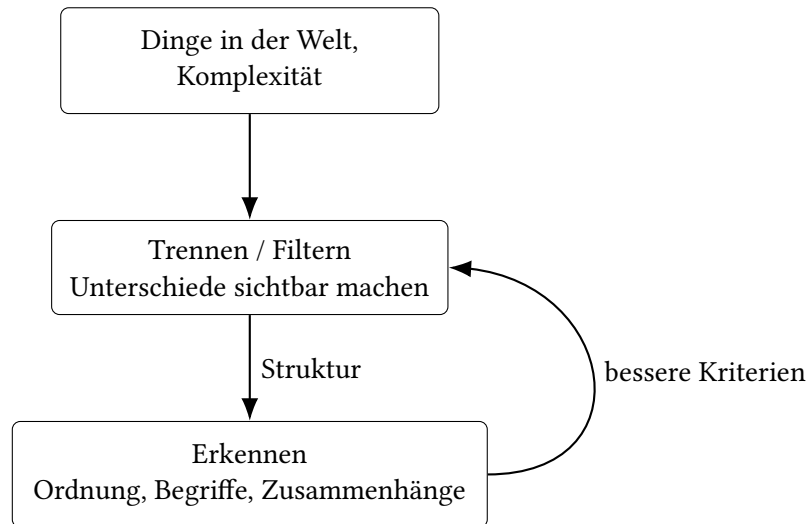


Abbildung 2. Erkennen bedeutet trennen, und Trennen führt zu Erkennen.

Das Trennen fungiert damit als ein zentrales Werkzeug des Denkens. Es beschreibt einen methodischen Weg, auf dem Erkenntnis Schritt für Schritt entsteht. Genau dieses Vorgehen ist ein Hauptvorgang im Engineering. Ingenieurinnen und Ingenieure analysieren komplexe Systeme, indem sie sie in Teilprobleme zerlegen. Diese werden einzeln untersucht, modelliert und verstanden. Erst anschliessend werden sie wieder zu einem funktionierenden Gesamtsystem zusammengesetzt. Trennen ist keine Vereinfachung aus Bequemlichkeit, sondern eine grundlegende Voraussetzung für technisches Erkennen und Gestalten.

Ich mache diesen philosophischen Einschub bewusst aus der Perspektive eines Ingenieurs. Er soll verdeutlichen, warum Filtration mehr ist als eine rein technische Methode.

Filtration ist keine exakte Wissenschaft. Sie ist kein rein mechanischer Vorgang mit vollständig vorhersagbarem Ausgang. Vielmehr handelt es sich um einen komplexen Prozess, der nur näherungsweise beschrieben werden kann. In realen Systemen wirken viele Effekte gleichzeitig. Diese lassen sich nicht vollständig isolieren oder exakt berechnen.

Ein vertieftes Verständnis von Filtration ist daher immer an geistige Modelle gebunden. Solche Modelle helfen, komplexe Vorgänge erklärbar zu machen. Sie reduzieren die Wirklichkeit auf wenige, gut beschreibbare Grössen. Dadurch werden technische und naturwissenschaftliche Untersuchungen überhaupt erst möglich. Gleichzeitig ist klar, dass diese Modelle nie die ganze Realität abbilden. Bestimmte Details müssen zwangsläufig ausgeblendet werden.

Die reale Filtration wird von einer Vielzahl wechselwirkender Prozesse bestimmt. Dazu gehören Strömungsvorgänge, Stofftransport, Oberflächenwechselwirkungen und zeitabhängige Veränderungen der Membran. Diese Effekte überlagern sich und beeinflussen sich gegenseitig. Eine vollständige Erfassung all dieser Zusammenhänge ist praktisch nicht möglich. Filtration bleibt daher in einem gewissen Sinn unbegreiflich. Nicht weil sie irrational wäre, sondern weil ihre Komplexität die Grenzen unserer Beschreibungsmöglichkeiten überschreitet. Die verwendeten Modelle sind Annäherungen. Sie sind nützlich, aber niemals vollständig. Genau dieses Spannungsfeld macht Filtration technisch anspruchsvoll und zugleich intellektuell reizvoll.

Filtration entspricht damit auch einem Akt des Ordners. Eine Membran lässt bestimmte Be-

standteile passieren und hält andere zurück. Aus einem ursprünglich gemischten Zustand entsteht Struktur. Diese technische Handlung spiegelt eine grundlegende geistige Tätigkeit. Auch wir ordnen die Welt, indem wir filtern. Wir wählen aus Eindrücken, Erfahrungen und Informationen aus. Unbewusst entscheiden wir, was relevant ist und was nicht. In dieser Auswahl liegt der Kern von Erkenntnis.

Bereits Aristoteles beschrieb Erkennen als das Herausarbeiten des Wesentlichen. Erst wenn das Unwesentliche abgelegt wird, tritt das Wesentliche hervor. In diesem Sinn verbindet Filtration Technik und Denken. Sie ist nicht nur ein Verfahren, sondern ein grundlegendes Prinzip des Erkennens und Gestaltens.

Filtration entspricht daher einem Akt des Ordnen. Eine Membran lässt einiges passieren und hält anderes zurück. So entsteht Struktur aus einem ursprünglich gemischten Zustand. Diese technische Handlung spiegelt unsere geistige Tätigkeit. Auch wir filtern Eindrücke, Erfahrungen und Bedeutungen. Wir entscheiden unbewusst, was relevant ist und was nicht. In dieser Auswahl liegt der Kern von Erkenntnis. Aristoteles beschrieb dies als die Suche nach dem Wesensmerkmal. Erst wenn das Unwesentliche abgelegt ist, tritt das Wesentliche hervor.

Filtration wird so zu einem Modell des Lernens. Sie ist nicht nur ein Trennvorgang, sondern ein Klärungsprozess. Jede Klarheit verlangt eine Grenze. Jede Grenze ermöglicht Verstehen. Darin liegt der stille Zauber der Filtration: Sie macht die Welt deutlicher.

In der Mikrofiltration werden vor allem grössere Partikel und Mikroorganismen zurückgehalten. Die Poren der Membran liegen typischerweise im Mikrometerbereich. In der Ultrafiltration sind die Poren deutlich kleiner. Dort werden auch Makromoleküle wie Proteine zurückgehalten. Beide Verfahren profitieren stark vom Cross-Flow-Betrieb.

Keramische Membranen werden häufig in der Cross-Flow-Filtration eingesetzt. Sie bestehen aus anorganischen Materialien wie Aluminiumoxid oder Siliziumkarbid. Diese Membranen sind mechanisch sehr stabil. Sie halten hohen Drücken und Temperaturen stand. Auch aggressive Reinigungsmittel stellen kein grosses Problem dar.

Ein weiterer Vorteil keramischer Membranen ist ihre lange Lebensdauer. Sie können häufig gereinigt werden, ohne beschädigt zu werden. Das ist besonders in hygienisch sensiblen Anwendungen wichtig. In der Lebensmittelindustrie werden sie deshalb oft verwendet. Auch in der Abwasserbehandlung spielen sie eine grosse Rolle.

Die Strömungsgeschwindigkeit im Cross-Flow ist ein wichtiger Betriebsparameter. Eine hohe Geschwindigkeit erhöht die Scherkräfte. Dadurch wird Fouling stärker reduziert. Gleichzeitig steigt jedoch der Energiebedarf. Es muss daher ein sinnvoller Kompromiss gefunden werden.

Auch der Transmembrandruck beeinflusst den Prozess. Unterhalb des kritischen Fluxes steigt der Flux mit dem Druck an. Oberhalb dieses Punktes nimmt Fouling stark zu. Der Cross-Flow-Betrieb hilft, diesen kritischen Bereich hinauszuzögern. Er kann Fouling jedoch nicht vollständig verhindern.

7 MWCO

Bei der Membranfiltration, speziell der Ultrafiltration (UF), orientiert sich die Trennleistung einer Membran häufig an der sogenannten *Molecular Weight Cut-Off* (MWCO) – also je-

ner molaren Masse, bei der mindestens 90 Prozent eines gelösten Stoffes zurückgehalten werden.

Mikrofiltrationsmembranen haben Porengrößen (Mikrometer) von 0,05 bis 5 µm und UF-Membranen von 1000 bis 100.000 Da. Die gemessene Porengröße ist jedoch nicht absolut, da die Membranporen miteinander verbunden (vernetzt) und keine zylindrischen Kapillaren sind.

Der MWCO ist keine scharfe Grenze, sondern beschreibt einen statistischen Wert (typischerweise Retention von 90%).

Die tatsächliche Trennschärfe hängt nicht nur vom Molekulargewicht, sondern auch von Molekülgestalt (globulär vs. fadenförmig), Hydratationshülle und Wechselwirkungen mit der Membranoberfläche ab.

7.1 Trennung bei unterschiedlichem MWCO

Eine Faustregel besagt, dass sich Moleküle dann zuverlässig trennen lassen, wenn ihre Molekülmassen mindestens um einen Faktor 10 differieren. Dies lässt sich dadurch erklären, dass die Porengrößenverteilung realer Membranen nie vollkommen homogen ist und eine gewisse Übergangszone besteht, in der Retention und Permeation gleichzeitig auftreten. Ein Verhältnis von mindestens einer Größenordnung zwischen den Molekülmassen zweier Spezies sorgt daher dafür, dass die kleinere Spezies praktisch vollständig permeiert, während die grössere nahezu vollständig zurückgehalten wird.

Der Faktor-10-Unterschied ist deshalb eine konservative und bewährte Regel, die in biotechnologischen und pharmazeutischen Anwendungen (Proteinkonzentration, Abtrennung von Peptiden) häufig herangezogen wird.

8 Mikrofiltration vs. Ultrafiltration

Mikrofiltrationsmembranen trennen typischerweise Bakterien, Zellfragmente und Schwebstoffe ab. Ultrafiltrationsmembranen halten Makromoleküle, Proteine und Kolloide zurück. In der Membrantechnik werden Mikrofiltration und Ultrafiltration häufig als klar getrennte Verfahren dargestellt. Diese Einteilung basiert meist auf der Porengröße (Mikrofiltration) oder auf dem Rückhaltevermögen (Ultrafiltration).

In der Praxis ist diese Trennung jedoch unscharf, da bei der Bezeichnung die realen Flüssigkeiten mitberücksichtigt werden müssten.

Eine genaue Anzahl aller Flüssigkeiten im Lebensmittelbereich lässt sich nicht angeben. Man kann jedoch eine grobe Abschätzung vornehmen.

Bereits auf reiner Stoffebene existieren mehrere Hundert lebensmittelrelevante Flüssigkeiten. Dazu gehören Wasser, Öle, Fette, Alkohole, organische Säuren, Sirupe und wässrige Salzlösungen. Hinzu kommen flüssige Extrakte, Aromen und Konzentrate.

Berücksichtigt man reale Lebensmittel, steigt die Zahl stark an. Getränke wie Milch, Molke, Fruchtsäfte, Gemüsesäfte, Bier, Wein, Kaffee und Tee liegen jeweils in unzähligen Varianten vor. Allein Fruchtsäfte existieren in Tausenden unterschiedlicher Zusammensetzungen. Unterschiede entstehen durch Sorte, Reifegrad, Verarbeitung und Verdünnung.

Auch flüssige oder halbflüssige Lebensmittel wie Suppen, Saucen, Sirupmischungen oder Fermentationsmedien zählen dazu. Jede Rezeptur stellt eine eigene Flüssigkeit dar. Zusätzlich verändern sich viele dieser Flüssigkeiten während der Verarbeitung zeitlich.

Insgesamt kann man davon ausgehen, dass es im Lebensmittelbereich mindestens mehrere zehntausend, eher aber hunderttausende unterschiedliche Flüssigkeiten gibt. Zählt man alle Rezepturen, Prozesszustände und Konzentrationsstufen mit, ist die Zahl praktisch unbegrenzt.

Für die Verfahrenstechnik bedeutet dies, dass jeder Prozess an sehr unterschiedliche Flüssigkeitseigenschaften angepasst werden muss. Für die Membrantechnik folgt daraus, dass ein und dieselbe Membran kein festes, unveränderliches Trennverhalten besitzt. Abhängig von der zu filtrierenden Flüssigkeit und von den Betriebsbedingungen kann sie sich unterschiedlich verhalten. Unter bestimmten Bedingungen zeigt sie das typische Verhalten einer Mikrofiltration. Unter anderen Bedingungen und bei einer anderen Flüssigkeit kann sie hingegen Eigenschaften einer Ultrafiltration aufweisen. Dies verdeutlicht, dass die Einteilung von Membranen in feste Klassen nur eine vereinfachte Beschreibung darstellt. Das tatsächliche Trennverhalten ergibt sich stets aus dem Zusammenspiel von Membran, Flüssigkeit und Prozessführung.

Die effektive Trennleistung hängt also nicht nur von der nominalen Porengrösse ab. Betriebsbedingungen wie Druck, Strömungsgeschwindigkeit und Temperatur spielen ebenfalls eine wichtige Rolle. Dadurch kann dieselbe Membran je nach Einsatz sowohl mikro- als auch ultrafiltrierende Eigenschaften zeigen.

Zudem sind Poren in realen Membranen nicht einheitlich gross. Sie weisen stets eine Verteilung von Porengrössen auf. Ein Teil der Poren kann kleiner oder grösser sein als der angegebene Nennwert. Dies führt dazu, dass die Trennung nicht scharf erfolgt. Stoffe werden oft nur teilweise zurückgehalten.

Auch der Transportmechanismus unterscheidet sich nicht abrupt. Mechanische Siebung, Diffusion und Wechselwirkungen überlagern sich. Im Übergangsbereich tragen mehrere Mechanismen gleichzeitig zur Trennung bei. Eine klare physikalische Grenze zwischen Mikrofiltration und Ultrafiltration existiert daher nicht.

Die Einteilung in zwei Kategorien ist dennoch hilfreich. Sie erleichtert die Orientierung und den Vergleich von Verfahren. Für die Auslegung realer Prozesse ist sie jedoch oft zu grob. Insbesondere bei komplexen Feed-Lösungen versagt diese einfache Klassifikation.

Statt einer strikten Trennung ist es sinnvoller, Mikrofiltration und Ultrafiltration als Kontinuum zu betrachten. Membranprozesse lassen sich besser über ihre tatsächliche Trennleistung beschreiben. Dazu gehören Rückhaltegrad, Fluxverhalten und Foulingneigung. Eine solche Betrachtung wird der Vielfalt realer Membranen gerechter. Sie trägt zu einem besseren Verständnis der Prozesse bei.

9 Temperatur- und Chemikalienbeständigkeit

Trotz ihrer hohen thermischen Stabilität sollten Temperatursprünge möglichst vermieden werden. Schnelle Temperaturwechsel führen zu Spannungen zwischen Träger und Membranschicht und können zu Mikrorissen oder Delamination führen. Temperaturänderungen sollten daher stets langsam und kontrolliert erfolgen.

10 Mechanische Stabilität

Vor dem Start und nach dem Betrieb ist auf eine vollständige **Entlüftung** der Module zu achten, da eingeschlossene Luft die Filtrationsleistung beeinträchtigen kann. Ebenso wichtig ist eine kontrollierte **Entleerung**, um Druckstöße oder mechanische Belastungen beim Ablassen der Flüssigkeit zu vermeiden.

11 Lebensdauer und Ersatzkosten

12 Vergleich mit polymeren Membranen

Keramische Membranen werden dort eingesetzt, wo sie im Hinblick auf Leistung, Prozesssicherheit und Wirtschaftlichkeit mit polymeren Membranen konkurrieren können oder wo ihre materialbedingten Vorteile erforderlich sind.

In Standardanwendungen stehen sie häufig in direktem Vergleich zu Polymermembranen. In speziellen Fällen hingegen – etwa bei hohen Temperaturen, aggressiven Reinigungsbedingungen, stark variierenden Medien oder hohen hygienischen Anforderungen – konkurrieren keramische Membranen nicht mehr mit anderen Membranen, sondern mit gänzlich anderen Trenntechnologien, wie Zentrifugen, Dekantern oder thermischen Konzentrationsstufen.

Damit nehmen keramische Membransysteme eine besondere Position innerhalb der verfahrenstechnischen Landschaft ein.

12.1 Regulatorische Aspekte

Mit zunehmenden Anforderungen an Nachhaltigkeit, Lebensmittelsicherheit und Abfallvermeidung gewinnen Verfahren mit keramischen Membranen an Relevanz. Die längere Lebensdauer, bessere Reinigung, die Möglichkeit Zusatzstoffe zu reduzieren und das Vermeiden von Kunststoff in der Produktion entsprechen den Trends der EU-Lebensmittel- und Umweltgesetzgebung.

13 Fouling und Reinigung

14 Arten des Foulings

15 Betriebliche Einflussfaktoren

15.1 Fluss

15.2 Scherung

Keramische Membranen werden mit **hohen Querstromgeschwindigkeiten** betrieben, um Ablagerungen auf der Membranoberfläche zu minimieren und eine stabile Filtrationsleistung zu erreichen. Die Crossflow-Geschwindigkeit erzeugt Scherkräfte, die die Grenz-

schichtdicke reduzieren und den Massenübergang verbessern. Typische Strömungsgeschwindigkeiten liegen im Bereich von 3 m/s bis 7 m/s, abhängig von Membrantyp und Produkt.

15.3 TMP

15.3.1 UTP, GP, Isoflux

Ein Problem bei herkömmlichen Crossflow-MF-Membranen ist die ungleichmässige Leistung. Sie entsteht, weil der Transmembrandruck entlang der Membran unterschiedlich ist. Das passiert durch den Druckabfall auf der Zufuhrseite. Bei niedrigem Druck und grösseren Poren führt das zu ungleichem Permeatfluss, schnellerem Verstopfen der grösseren Poren und eventuell zu einem Rückfluss am Ende der Membran. Es gab viele Versuche, dieses Problem zu lösen. Das erste erfolgreiche und kommerzielle Konzept kam von Tetra Pak Filtration System und hiess UTP (Uniform Transmembrane Pressure). Das 1986 von TPFS entwickelte Design sorgte für einen gleichmässigen Transmembrandruck entlang der Membran. Es brauchte aber eine besondere Bauweise des Permeatbereichs und ein zusätzliches System zum Rückführen des Permeats. Ein neueres Konzept von Pall hiess GP (Gradient Porosity). Es konnte mit normalen Anlagen genutzt werden. Die Membranen vom Typ Membralox GP haben einen in die Stützstruktur eingebauten Längs-Permeabilitäts-Gradienten, ohne dass die Filterschicht geändert werden muss. Dadurch bleibt der Mikrofiltrationsprozess über die ganze Membran stabil. Im Jahr 2000 brachte Tami Industries das ISOFLUX-Konzept heraus. Es basiert auf einer speziell entwickelten Membran mit einer Schicht, deren Dicke angepasst ist. Wie bei den anderen Konzepten bleibt der Permeatfluss über die ganze Membran gleich – im Gegensatz zu klassischen Membranen, bei denen er vom Einlass zum Auslass abnimmt. Um das zu erreichen, wird die Schicht vom Einlass zum Auslass dünner, sodass das Verhältnis von Druck zu Schichtdicke gleich bleibt.

Dieses Membrandesign sorgt für einen fast gleichmässigen Durchfluss über die ganze Länge des Membranelements. Dadurch verbessert sich die Leistung der Membran bei industriellen Anwendungen und die Durchflussrate bleibt über längere Zeit stabil. Ausserdem wird die Trennung gleichmässiger, und die Verschmutzung der Membran ist über die gesamte Länge ähnlich. Das macht die chemische Reinigung einfacher.

15.4 Temperatur

15.5 Strategien zur Fouling-Reduktion

15.5.1 Rückspülung

Zur Aufrechterhaltung der Leistungsfähigkeit wird regelmäßig eine **Rückspülung** (Backflush) durchgeführt. Dabei wird das Filtrat in umgekehrter Richtung durch die Membran gedrückt, um angelagerte Partikel und Fouling-Schichten zu entfernen. Rückspülungen sind ein zentraler Bestandteil des Membranbetriebs und verlängern die Standzeiten zwischen den chemischen Reinigungen.

15.5.2 Pulsation

15.5.3 Crossflow-Optimierung

16 Prozessauslegung und Skalierung

17 Auswahl der Kanalgeometrie und Membranfläche

18 Membranmodule

Die keramischen Elemente werden in Gehäusen aus Edelstahl untergebracht. Die Verbindung zwischen den Elementen und dem Modulgehäuse erfolgt über polymerbasierte Dichtungen oder Dichtungsringe.

Der Begriff *Membranelement* bezeichnet die Grundform der Membran, also Flachmembran, Hohlfaser, Rohrmembran oder monolithische Membran.

Der Begriff *Membranmodul* bezeichnet das Gehäuse, in dem die keramischen Elemente untergebracht sind.

19 Crossflow- Geschwindigkeiten und Druck

20 Modul- und Anlagenlayout

20.1 Einzelmodule

20.2 Racks

20.3 Linien

20.3.1 Automation

Die Wahl des Membranmaterials hat auch einen Einfluss auf den Automatisierungsaufwand von Membranprozessen. Keramische Membranen zeichnen sich durch eine deutlich höhere Stabilität und Zuverlässigkeit im Vergleich zu Polymermembranen aus. Grundsätzlich gilt: Je robuster ein technisches System ist, desto geringer sind die Anforderungen an Überwachung, Regelung und Fehlerkorrektur. Keramische Membranen profitieren genau von diesem Prinzip. Ihre hohe Beständigkeit gegenüber Temperatur, pH-Schwankungen und Reinigungschemikalien erleichtert den Aufbau zuverlässiger Automatisierungskonzepte. Polymermembranen hingegen sind empfindlicher. Hier erfordert die geringere Stabilität engmaschigere Kontrolle und komplexere Regelstrategien, was den Automationsaufwand und die Betriebskosten erhöht. Wegen ihrer Stabilität treten im Betrieb weniger unerwartete Leistungsabfälle oder Schädigungen auf. Die Reinigung (CIP) ist in der Regel einfacher als bei Polymermembranen. Für die Automatisierung bedeutet dies, dass keramische Systeme mit einem tendenziell geringeren Steuerungs- und Überwachungsaufwand betrieben werden können. Der Einsatz von Sensorik, Regelkreisen und Sicherheitsmechanismen ist zwar weiterhin erforderlich, kann aber in vielen Fällen einfacher gestaltet werden als bei

Systemen mit Polymermembranen.

Polymermembranen reagieren empfindlicher auf Abweichungen von den Betriebsbedingungen, oder Produktschwankungen (Qualität, Alter, Zusammensetzung, Mikrobiologie u.a.). Dies erfordert eine engmaschigere Überwachung und ein aufwändigeres Automatisierungskonzept, um Leistungsverluste zu vermeiden oder Qualitätsforderungen einzuhalten. Etwas pauschal formuliert lässt sich sagen: Der Automationsaufwand ist bei keramischen Membransystemen in vielen Fällen geringer als bei polymerbasierten Systemen.

21 Kostenbetrachtung

21.1 CAPEX/OPEX

22 Anwendungen

Der Einsatz keramischer Membranen ist ein technologisch hochdynamisches Entwicklungsfeld. Viele industrielle Anwendungen werden nicht öffentlich dokumentiert, da sie betriebsinternen Vertraulichkeiten unterliegen. Das bedeutet: Der Stand der Technik, wie er in Publikationen, Patenten oder Konferenzbeiträgen sichtbar wird, bildet nur einen Teil dessen ab, was industriell erprobt und teilweise etabliert ist. Ein erheblicher Wissens- und Erfahrungsschatz liegt in Betriebspraxen, Pilotierungen und kontinuierlichen Prozessoptimierungen, die bewusst nicht kommuniziert werden.

Keramische Membranen bieten dabei klare wirtschaftliche und strategische Vorteile. Sie weisen lange Standzeiten, hohe Reinigungsbeständigkeit (CIP/SIP) und stabile, reproduzierbare Leistungswerte über lange Betriebsintervalle auf. Dadurch reduzieren sie Wechselzyklen, Stillstandszeiten, Reinigungsaufwand und Qualitätsvariabilität.

Gleichzeitig ermöglichen sie auf Grund ihrer offenen Kanäle (keine *spacer* wie bei Polymermembranen) einen einfachen, robusten Anlagenbau auch für viskose Produkte, da die Vorfiltration nicht mehr nötig ist.

23 Membrankristallisation

Ein Membrankristallisator ist ein gekoppelt betriebenes System aus Membranfiltration und Kristallisation. Dabei wird durch die Membran kontinuierlich Wasser entfernt, sodass die Lösung schrittweise übersättigt und der gelöste Stoff im Kristallisator ausfällt. Keramische Membranen eignen sich hierfür aufgrund ihrer hohen thermischen und chemischen Stabilität besonders gut.

24 Membran-Emulsifier

Ein Membran-Emulsifier ist ein Verfahren zur Emulsionsherstellung, bei dem die disperse Phase durch eine Membran mit definierten Poren in die kontinuierliche Phase überführt wird. Die Tropfengröße wird dabei wesentlich durch den Porendurchmesser der Membran bestimmt, sodass Emulsionen mit sehr enger Tropfengrößenverteilung bei geringem En-

ergieeintrag erzeugt werden können.

25 Membran-Reaktor

Ein Membranreaktor ist ein Reaktor, in dem chemische oder biochemische Reaktionen und eine selektive Stofftrennung durch eine Membran gleichzeitig stattfinden. Die Membran hält bestimmte Moleküle, Katalysatoren oder Enzyme zurück oder entfernt Reaktionsprodukte kontinuierlich. Dadurch können Reaktionsgleichgewichte verschoben, Ausbeuten erhöht und Prozesse stabil und energieeffizient betrieben werden. Keramische Membranen eignen sich hierfür besonders aufgrund ihrer hohen thermischen und chemischen Stabilität.

In einem katalytischen Membranreaktor (CMR) übernimmt die Membran zugleich die Funktion der katalytischen Reaktion und der Stofftrennung. Die katalytische Aktivität kann dem Membranmaterial selbst innewohnen oder durch Aufbringen einer katalytisch aktiven Schicht erzielt werden. Dadurch fallen Reaktionsort und Trennstelle räumlich zusammen, was die Verschiebung von Reaktionsgleichgewichten und die Erhöhung der Ausbeute begünstigt.

In einem katalytischen nicht-permselectiven Membranreaktor (CNMR) weist die Membran zwar katalytische Eigenschaften auf, besitzt jedoch keine selektive Trennfunktion. Sie dient hier vorwiegend dazu, eine definierte reaktive Oberfläche bereitzustellen und die Verteilung der Reaktanten zu steuern, was die Selektivität und Produktbildung verbessern kann.

Die in der Forschung lange Zeit am häufigsten eingesetzte Konfiguration ist der Festbett-Membranreaktor (PBMR), bei dem die Membran ausschliesslich zur Trennung oder zur dosierten Zuführung eines Reaktanten genutzt wird. Soll die Membran zusätzlich katalytisch wirken, wird ein gepackter katalytischer Membranreaktor (PBCMR) verwendet, in dem der Katalysator im Festbett vorliegt und die Membran gleichzeitig zur Trennung beiträgt.

Für Prozesse, bei denen eine gleichmässige Temperaturführung entscheidend ist, kann das Festbett durch ein Wirbelbett ersetzt werden. Dies führt zu fluidisierten Bett-Membranreaktoren (FBMR) bzw. fluidisierten katalytischen Membranreaktoren (FBCMR). Das Wirbelbett gewährleistet eine sehr gute Wärme- und Stoffdurchmischung und ermöglicht damit eine stabile und kontrollierte Reaktionsführung, insbesondere bei exothermen Reaktionen.

Formen von Membranreaktoren

CMR – Catalytic Membrane Reactor Ein katalytischer Membranreaktor, in dem eine Membran sowohl als Trennelement als auch als Träger für den Katalysator dient. Die Reaktion und die selektive Abtrennung von Stoffen finden gleichzeitig statt. Dadurch können Gleichgewichte verschoben und Ausbeuten erhöht werden.

CNMR – Catalytic Nonpermselective Membrane Reactor Ein katalytischer Membranreaktor, bei dem die Membran *nicht* selektiv durchlässig ist. Die Membran dient hier vor allem als Katalysatorträger oder zur Phasentrennung, jedoch nicht zur selektiven Stoffabtrennung. Die Reaktionskontrolle erfolgt primär über die Katalyse.

PBMR – Packed Bed Membrane Reactor Ein Membranreaktor mit einem *Festbett* aus Katalysatorkörnern. Die Membran ist meist seitlich oder im Produktfluss angeord-

net und ermöglicht die Entfernung oder Dosierung von Reaktanten oder Produkten. Häufig eingesetzt in Gasreaktionen und Hydrierungsprozessen.

PBCMR – Packed Bed Catalytic Membrane Reactor Ein Festbett-Membranreaktor, bei dem die Membran selbst *katalytisch aktiv* ist oder den Katalysator trägt. Die Reaktionen finden an der Membranoberfläche und im Festbett statt, während selektive Stoffabtrennung gleichzeitig erfolgt. Hohe Reaktions- und Stofftrenneffizienz.

FBMR – Fluidized Bed Membrane Reactor Ein Reaktor, in dem der Katalysator *fluidisiert* wird (durchströmtes, bewegtes Partikelbett). Die Membran dient zur selektiven Abtrennung oder Dosierung von Komponenten. Dieses System erlaubt sehr gute Wärme- und Stoffübergänge sowie gleichmässige Temperaturverteilung.

FBCMR – Fluidized Bed Catalytic Membrane Reactor Ein fluidisierter Membranreaktor, bei dem die Membran katalytisch aktiv ist oder einen Katalysator trägt. Reaktion und Stofftrennung finden gleichzeitig in einer dynamischen, hoch gemischten Phase statt. Besonders geeignet für schnell ablaufende oder stark wärmefreisetzende Reaktionen.

Aus Sanchez et al., 2002, Catalytic Membranes and Membrane Reactors Dieses Werk gilt als grundlegende Referenz für Theorie und Praxis katalytisch aktiver Membranen. Es verbindet Reaktionskinetik, Stofftransport und Membrantrennung zu einem integrierten Prozessmodell und zeigt industrielle Anwendungen, insbesondere zur Prozessintensivierung und zur Verschiebung chemischer Gleichgewichte.

26 Membran-Bioreaktor

Ein Membran-Bioreaktor (MBR) ist ein Reaktor, in dem biologische oder biochemische Reaktionen mit einer Membrantrennung kombiniert werden. Die Membran dient dabei zur selektiven Abtrennung von Zellen, Biomolekülen oder Reaktionsprodukten, während die biologische Reaktion im Reaktor selbst stattfindet. Dadurch können Kulturen in Suspension gehalten, Produkte kontinuierlich abgetrennt oder Prozesslösungen konzentriert werden, ohne die biologisch aktiven Komponenten zu entfernen.

MBRs sind insbesondere in der Lebensmittel- und Pharmaindustrie weit verbreitet. Die Molkereiindustrie war hier ein Pionier: Mikrofiltrations-, Ultrafiltrations-, Nanofiltrations- und Umkehrosomemembranen werden zur Verarbeitung natürlicher Flüssigkeiten wie Milch, Blut oder Fruchtsäfte eingesetzt. Typische Anwendungen sind die Proteinkonzentration aus Milch, die Gewinnung und Auftrennung von Molkebestandteilen (Laktose, Proteine, Mineralstoffe und Fettfraktionen) sowie die Fraktionierung spezifischer Bioaktivstoffe. Diese Prozesse werden üblicherweise bei niedrigen Temperaturen und moderaten Drücken mit kommerziell verfügbaren Membranen durchgeführt, um empfindliche Bestandteile zu schonen und den Energieverbrauch gering zu halten.

«Ein Membran-Bioreaktor trennt Produkte ab, während die Biologie weiterarbeitet.»

In vielen Fällen ist die flächenspezifische Leistung (Flux) enorm höher als bei Polymermembranen.

27 Molkereitechnik

28 Getränke

29 Pflanzliche Extrakte

30 Bioproduktion

31 Ausblick

32 Innovation

Es ist nahezu immer eine gezielte, produkt- und prozessspezifische Verfahrensentwicklung erforderlich. Prozesse lassen sich aufgrund der hohen Vielfalt der Medien nicht einfach übertragen. Jedes System muss hinsichtlich Membrancharakteristik, Strömungsbedingungen, Temperaturführung, Vorkonditionierung, Reinigungsstrategie und Anlagenintegration optimiert werden. Und genau hier setzt die Innovation an.

Innovationskraft entsteht nicht primär durch das Membranmaterial selbst, sondern durch die intelligente Prozessgestaltung darum herum: durch adaptierte Prozesslinien, hybride Trennkonzepte, dynamische Filtrationsstrategien, automatisierte Reinigungsschemata und datenbasiertes Betriebsmonitoring. Die entscheidenden Fortschritte finden daher in der konkreten Anwendung statt.

Keramische Membranen sind ein *Innovationstreiber* für neue Herstellungsverfahren, kürzere Prozessketten, höhere Ausbeuten, stabilere Qualitäten und nachhaltige Produktionsstrategien.

33 Märkte

33.0.1 Bedarf an Trennverfahren

33.0.2 Ergänzung, Synergien zu klassischen Separationstechniken

33.0.3 Verdampfung

33.0.4 Zentrifugation

33.0.5 Polymerbasierte Membranfiltration

33.0.6 Chromatographie

33.1 Einsatzfelder in der Lebensmittel- und Bioindustrie

33.1.1 Lebensmittelindustrie

33.1.2 Bioindustrie

33.2 Zusammenfassung

Der Betrieb keramischer Mikro- und Ultrafiltrationsmembranen erfordert eine Kombination aus **hoher Strömungsgeschwindigkeit, regelmäßiger Rückspülung** und **sorgsamem Umgang mit thermischen und mechanischen Belastungen**. Wird dies beachtet, bieten keramische Membranen eine außerordentlich stabile und langlebige Technologie für anspruchsvolle Trennaufgaben in der Lebensmittel- und Molkereitechnik.

Literatur

Reaktoren

- [1] Sanchez Marcano, J. G. & Tsotsis, T. T. (2002): *Catalytic Membranes and Membrane Reactors*. Wiley-VCH Verlag GmbH, Weinheim.
- [2] Das, C. & Bose, S. (2023): *Advanced Ceramic Membranes and Applications*. CRC Press, Boca Raton.

Allgemein

- [3] Gitis, V. & Rothenberg, G. (2016): *Ceramic Membranes: New Opportunities and Practical Applications*. Wiley-VCH, Weinheim.

Food

- [4] Peinemann, K.-V. (Hrsg.) (2010): *Membrane Technology. Volume 3: Membranes for Food Applications*. Wiley-VCH, Weinheim.
- [5] Darcy, H. (1856). *Les fontaines publiques de la ville de Dijon*. Victor Dalmont.
- [6] Baker, R. W. (2004). *Membrane technology and applications* (2nd ed.). John Wiley & Sons.
- [7] Cheryan, M. (1998). *Ultrafiltration and microfiltration handbook*. CRC Press.
- [8] Li, N. N., Fane, A. G., Ho, W. S. W., & Matsuura, T. (Eds.). (2008). *Advanced membrane technology and applications*. John Wiley & Sons.
- [9] Mulder, M. (1996). *Basic principles of membrane technology* (2nd ed.). Springer.
- [10] Porter, M. C. (Ed.). (1989). *Handbook of industrial membrane technology*. Noyes Publications.
- [11] Ripperger, W., & Alt, K. *Filtration*. Springer.
- [12] Sourirajan, S., & Matsuura, T. (1985). *Reverse osmosis and ultrafiltration technology*. Wiley.
- [13] Strathmann, H. (2011). *Introduction to membrane science and technology*. Wiley-VCH.
- [14] Zeman, L. J., & Zydney, A. L. (1996). *Microfiltration and ultrafiltration: Principles and applications*. CRC Press.
- [15] van Reis, R., & Zydney, A. (2001–2007). Bioprocess membrane technology. Various journal and handbook chapters.