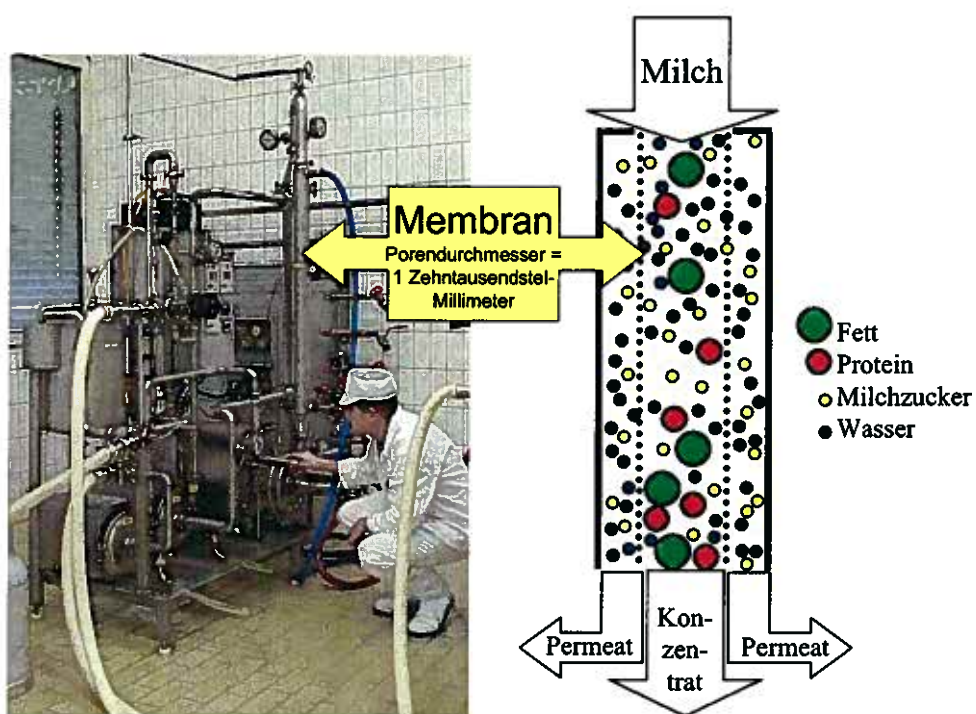




Neue Milchprodukte dank Membrantrenntechnik

Zusammenfassung	3
1. Allgemeine Grundlagen der Membranfiltration	4
2. Wichtige physikalische Kenngrössen	5
3. Membransysteme	7
4. Beeinflussung der Trenneigenschaften	14
5. Prozessdesign	16
6. Anwendungen	22
Spezifische Anwendungen in der Käsereiwirtschaft	27
7. Ausgewählte Produkte auf Basis Membrantrennverfahren	30
8. Wirtschaftliche Aspekte der Membranfiltration	35
9. Ausblick	39
Literaturverzeichnis	40

Titelbild: Mikrofiltrationsanlage im Pilot Plant (FAM)

Erstveröffentlichung

Herausgeber:

FAM
 Eidg. Forschungsanstalt für Milchwirtschaft
 Liebefeld
 CH-3003 Bern
 Telefon +41 (0)31 323 84 18
 Fax +41 (0)31 323 82 27
<http://www.fam-liebefeld.ch>
 e-mail info@fam.admin.ch

Autoren:

Andreas Thomet, Peter Gallmann

Kontaktadresse für Rückfragen:

Andreas Thomet
 e-mail andreas.thomet@fam.admin.ch
 Telefon +41 (0)31 323 26 52
 Fax +41 (0)31 322 86 16

Gestaltung: Müge Yildirim

Erscheinungsweise:

In unregelmässiger Folge mehrmals jährlich.

Ausgabe:

April 2003, Nr. 453

ISBN 3-905667-07-X

ISSN 1660-2587

Neue Milchprodukte dank Membrantrenntechnik

*Andreas Thomet und Peter Gallmann
Eidgenössische Forschungsanstalt
für Milchwirtschaft (FAM),
Liebefeld, CH-3003 Bern*

Bereits seit mehreren Jahren ist die Membrantrenntechnik in der Milchverarbeitung etabliert. Neue Filtrationsverfahren und verbesserte Filtersysteme eröffnen der milchverarbeitende Industrie neue Perspektiven. Produktinnovationen mit besserer Wertschöpfung sowie eine nachhaltige Molkenverwertung sind Motivation zur breiteren Anwendung der Technologie. Was ist die Filtrationstechnik und welche Möglichkeiten bietet sie? Ein Überblick.

Membrantrenntechniken sind Filtrationsverfahren in den Teilchenbereichen Ionen, gelöste Moleküle, Makromoleküle und teilweise noch Mikropartikel. Sie ermöglichen das Zerlegen der Milch in ihre einzelnen Bestandteile. Die Trennung der Moleküle erfolgt nach ihrer spezifischen Teilchengrösse oder Molmasse mit einem rein mechanischen Separationsverfahren.

Die Einsatzmöglichkeiten der diversen Membrantrennverfahren sind vielfältig. Diese Arbeit bietet einen Überblick über die für die Milchverarbeitung relevanten Techniken und Applikationen.

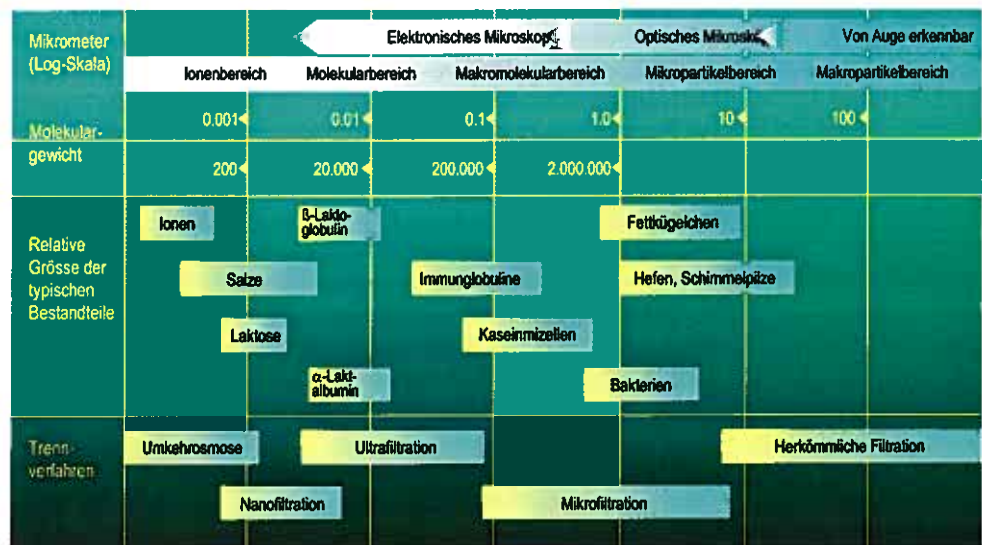


1. Allgemeine Grundlagen der Membranfiltration

Obwohl Membrantrennprozesse beim Stoffaustausch in der Natur eine zentrale Rolle spielen, findet diese Technik erst seit etwa 25 Jahren in der Lebensmittel-industrie Anwendung. In der einheimischen Milchwirtschaft werden Membran-verfahren hauptsächlich zur Proteinge-winnung, zur Weich- und Frischkäseher-

stellung sowie zur Molkenkonzentrierung eingesetzt (Puhan und Lawrence, 1988). Je nach Porengrösse der Membrane spricht man gemäss Abbildung 1 von Mikrofiltration (MF), Ultrafiltration (UF) oder Umkehrosmose (UO). Im Schnittbe-reich der UO und der UF ist die Nanofilt-ration (NF) anzusiedeln.

Abbildung 1:
Einsatzbereich
der Membrantrenn-
verfahren



Mikrofiltration ist das Verfahren mit den grössten Poren und wird zum Abtrennen von Makromolekülen wie Kaseinmicellen und Mikropartikeln mit über 0,1 μm Durchmesser eingesetzt. Bei Milch erfolgt mittels MF beispielsweise die Abtrennung somatischer Zellen, Bakterien und Fettkügelchen. Ebenfalls sehr interessante Möglichkeiten bietet die Fraktionierung von Milchproteinen. Der Stofftransport durch die Membran wird durch den Druckgradienten über der Membran gewährleistet. Der Filtrationsschub erfolgt also über den Transmembrandruck (TMP). Bei der Mikrofiltration liegt dieser unter 5 bar, bei der Ultrafiltration - wegen der kleineren Porendurchmesser - zwischen

1 und 10 bar. Die Abgrenzungen zwischen Mikrofiltration, Ultrafiltration und Umkehrosmose sind fließend und nur durch Definition festgelegt. Die Ultrafiltration dient generell zur Abtrennung hochmolekularer Stoffe und kann somit zur Anreicherung und Fraktionierung von Milchproteinen eingesetzt werden. Interessante Perspektiven bietet die Nanofiltration. Dieses Verfahren isoliert selektiv gelöste Moleküle der Milch - wie Laktose, Mineralstoffe, Vitamine oder bioaktive Peptide. Die Umkehrosmose dagegen eignet sich primär zur Wasserentfernung, da nur sehr kleine Teilchen wie Wassermoleküle die Membran passieren können.

2. Wichtige physikalische Kenngrößen

Die richtige Auslegung und Berechnung der Filterelemente und –systeme ist für die richtige Ausführung der Trennaufgabe und den optimierten Anlagenbetrieb elementar. In der Pilotphase von Filtrationsprojekten gilt es alle notwendigen Daten mittels mathematischer Modellberechnungen und umfangreicher Versuche zu ermitteln. Fachspezialisten übernehmen anschliessend die zukunftsweisende Aufgabe die Datenfülle richtig auszuwerten und zu interpretieren. Dazu stützen sich die Fachteams auf die bekannten physikalischen Kenngrößen und die Filtrationsparameter. Nachfolgend sind wichtige physikalische Kenngrößen (aus Gallmann, 2001) aufgeführt, welche für die Planung und den erfolgreichen Betrieb von Filtrationsanlagen der Milchverarbeitung von Bedeutung sind:

Transmembrandruck (TMP)

Der Transmembrandruck (TMP) stellt die treibende Kraft während der Filtration dar. Dieser entspricht dem Druckunterschied zwischen Produkt- und Permeatseite. Da entlang des Moduls ein Druckabfall entsteht, ist der Transmembrandruck am Eingang höher als beim Austritt des Moduls. Bei Filtrationsprozessen wird der durchschnittliche Transmembrandruck (TMP) nach folgender Formel berechnet:

$$TMP = \frac{p_1 + p_2}{2} - p_3 \quad [\text{bar}]$$

p ₁	Druck Moduleingang	[bar]
p ₂	Druck Modulausgang	[bar]
p ₃	Druck Permeatseite	[bar]

Die einzelnen Drucksensoren sollen direkt am Moduleingang resp. Modulausgang liegen. Der Transmembrandruck wird in der Praxis häufig direkt aus den eingelesenen Druckwerten automatisch berechnet, angezeigt und auch geregelt.

Überströmgeschwindigkeit

Die durchschnittliche Überströmgeschwindigkeit v in einem Röhren- oder Hohlfasermodul beträgt:

$$v = \frac{4 \cdot \dot{V}}{N \cdot \pi \cdot d^2} \quad [\text{m s}^{-1}]$$

$\dot{V}$	Volumenstrom durch das Modul	$[\text{m}^3 \text{s}^{-1}]$
N	Anzahl parallele Röhren im Modul	[-]
d	Durchmesser einer Röhre	[m]

Konzentrationsfaktor

Der Konzentrationsfaktor des Prozesses $c_{v\text{tot}}$ ergibt sich aus dem Verhältnis des Ausgangsvolumens und dem Retentatvolumen. Er lässt keine Aussagen über die effektiven Konzentrationszunahmen einzelner Inhaltsstoffe zu.

$$c_{v\text{tot}} = \frac{V_A}{V_R} = \frac{V_A}{V_A - V_P} = \frac{V_A}{V_A - \int_0^t J \cdot dt} \quad [-]$$

V_A	Anfangsvolumen	$[\text{m}^3]$
V_R	Retentatvolumen	$[\text{m}^3]$
V_P	Permeatvolumen	$[\text{m}^3]$

Das Anfangsvolumen V_A wird zu Beginn eines Filtrationsprozesses festgelegt, während die Berechnung des Permeatvolumens V_P durch die Integration des Permeatvolumenstromes erfolgt.

Retention

Die Retention ist ein Mass um festzustellen, wie gut eine Membran einen bestimmten Stoff zurückhält. Die Berechnung der Retention für eine bestimmte Komponente i erfolgt nach folgender Formel:

$$\sigma_i = 100 - \frac{100 \cdot c_{Pi}}{c_{Ri}} \quad [\%]$$

σ_i Retention, Rückhaltevermögen des Stoffes i
 c_{Pi} Konzentration des Stoffes i im Permeat
 c_{Ri} Konzentration des Stoffes i im Retentat

Die Retention wird sowohl durch die Betriebsbedingungen wie auch durch die Membraneigenschaften beeinflusst (Cheryan, 1990). Die Konzentration der einzelnen Inhaltsstoffe (c_{Pi} bzw. c_{Ri}) werden analytisch bestimmt.

Normflux

Der Normflux J_N entspricht dem Flux bei Standardbedingungen. Er bezieht sich auf einen Transmembrandruck von 10 kPa (1 bar), eine Membranfläche von 1 m² und die Viskosität von Wasser bei 20°C.

$$J_N = \frac{J \cdot \eta_g}{A \cdot \eta_{W20^\circ C}} \quad [\ell \cdot h^{-1} \cdot m^{-2}]$$

J Flux [$\ell \cdot h^{-1}$]
 η_g Viskosität bei der aktuellen Temperatur g [Pa s]
 A Membranfläche [m²]
 $\eta_{W20^\circ C}$ Viskosität von Wasser bei 20°C [Pa s]

Mit Hilfe der Berechnung des Normflux werden vergleichbare Fluxwerte erhalten. In der Literatur findet häufig nur die vereinfachte Einheitsbezeichnung l/mh Verwendung. Der Normflux ist von den Betriebsparametern Temperatur, Viskosität und Transmembrandruck unabhängig. Die Betriebsparameter haben jedoch einen Einfluss auf die Deckschichtbildung, was durch den Normflux aufgezeigt wird.

Wandschubspannung

Für querüberströmte Membranen stellt die Wandschubspannung τ_w eine massgebende Einflussgrösse auf den Widerstand der Deckschicht (R_D) dar. Mit zunehmender Wandschubspannung wird eine geringere Deckschichtbildung beobachtet (Kessler, 1988).

$$\tau_w = \frac{d_h \cdot \Delta P}{4 \cdot L} \quad [\text{Pa}]$$

d_h Hydraulischer Durchmesser [m]
 ΔP Druckabfall entlang der Länge l [Pa]
 L Länge des Rohrs [m]

3. Membransysteme

Eine Membran ist definiert als eine bestimmte Materialstruktur mit Barrierenfunktion zur aktiven oder passiven Stoffauftrennung. Eine Membran kann dick oder dünn sein. Es gibt homogene oder heterogene Membranstrukturen. Der Stofftransport kann aktiv oder passiv sein. Der passive Transport kann druckbetrieben sein oder aufgrund unterschiedlicher Konzentrationen oder Temperaturen erfolgen. Die Membranen können aus natürlichen oder synthetischen Stoffen hergestellt sein und können neutral oder chemisch-elektrisch geladen sein. In der Milchverarbeitung sind vorwiegend passive, druckbetriebene Membrantrennsysteme im Einsatz. Auch finden vorwiegend synthetische Membranen Anwendung, da diese besser die hohen hygienischen und chemisch-physikalischen (Reinigung und Sterilisation) Prozessanforderungen erfüllen.

dicke der Membranstruktur. Je dünner die Membranschicht konstruiert ist, um so höher entwickeln sich die Fluxleistungen. Den Durchbruch für industrielle Anwendungen von Filtersystemen brachte die Entwicklung der asymmetrischen Membranstruktur: Sie sind mit einer ganz dünnen, 0.1 – 0.5 µm dicken Deckschicht oder Haut auf einer porösen Trägerstruktur bestückt. Die Gesamtdicke dieser Membran beträgt zwischen 50 - 200 µm. Die Konstruktion vereinigt die Vorteile einer möglichst dünnen Membranschicht mit der besseren Selektivität einer dickeren Membran und liefert deshalb gute Permeationsresultate. Symmetrische Membransysteme mit einer ganz dünnen Haut auf einer porösen Trägerschicht sind die sogenannten „thin film composite“ (TFC) –Membranen.

Tiefen- versus Flachfiltersysteme

Die Crossflow-Filtrationstechnik in Foodprozessen fördert mehrheitlich Flachfiltersysteme (Screen filters), welche mit einer hohen Überströmgeschwindigkeit beschickt werden. Im Gegensatz zu den Tiefenfiltern (depth filters) sind die Trenneigenschaften dieser Flachfiltersysteme einheitlicher und schärfer. Die Arbeitsweise erfolgt kontinuierlich.

Mikroporöse versus asymmetrische Membranen

Die Architektur der Membranen ist nach Morphologie und Struktur klassifiziert. Es wird unterschieden zwischen symmetrischer (microporöser) und asymmetrischer Struktur. Abbildung 2 erklärt die beiden etablierten Membranstrukturen.

Symmetrische Membranen sind 10 bis 200 µm dick gebaut. Der Stoffübergang ist abhängig von der gesamten Schicht-

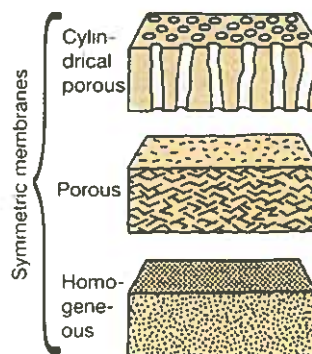
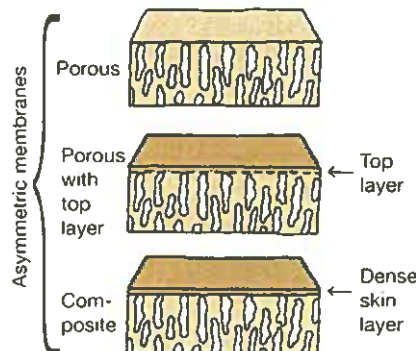


Abb. 2:
Die Struktur von
symmetrischen und
asymmetrischen
Membransystemen



Materialien und chemische Zusammensetzung

Die meisten Membranen sind aus organischen Polymeren gefertigt, vergleichbar mit einem feinen Plastikfilm. Wichtig ist die Produktion und Lagerung der TFC-Produkte in nasser Form. Tabelle 1 zeigt die gebräuchlichsten Filtermaterialien aus Polymeren und für welche Filteraufgabe diese einsetzbar sind:

Spezielle Dialysemembranen bestehen meistens aus Cellophan und Cuprophan. Beide sind aus regenerierter Zellulose gefertigt. Nachteilig bei allen Polymeren ist die bescheidene pH- und Temperaturbeständigkeit. Die ersten kommerziell erhältlichen Polymermembranen waren

nur im pH-Bereich 2-11 und bei Temperaturen unter 50°C beständig. Heute reicht der pH-Einsatzbereich der meisten Membranen von 1-13. Weiterentwickelte Membranen aus speziellen Polymeren sind für Temperaturen bis 90°C geeignet. Die chemische und thermische Beständigkeit von Membranen ist ein wichtiger Faktor bei der Beschaffung von Filtrationssystemen.

In der Fruchtsaftindustrie sind auch Membranen aus gesinterten Metallen im Einsatz. Die Variationsmöglichkeiten bezüglich der Porengrößen sind jedoch noch sehr begrenzt.

Tabelle 1:
Liste gebräuchlicher Polymere für die Produktion kommerzieller Membranen

Polymer	Abkürzung	Anwendung		
		MF	UF	RO/NF
Zelluloseacetat	CA	X	X	X
Zellulosetriacetat	CTA	X	X	X
Zelluloseacetat / -triacetat, gemischt	CA/CTA			X
Zellulosenitrat	CN	X		
Zellulose, regeneriert	RC	X	X	
Gelatine	GE		X	
Polyacrylonitril	PAN		X	
Polyvinylchlorid	PVC	X		
Polyamid, aromatisch	PAN	X	X	X
Polysulphon	PS	X	X	
Polybenzimidazol	PBI			X
Polybenzimidazolon	PBIL			X
Polycarbonat, geätzt	PC	X		
Polyimid	PI		X	X
Polypropylen	PP	X		
Polytetrafluorethylen	PTFE	X		
Polyvinylidene-fluorid	PVDF	X	X	
Polyacrylsäure + Schicht Zirkoniumoxid			X	X
Polyethylenimin + Toluendiisozonat				X

Molekularer „Cut-off-Wert“ (Porengrösse)

Zur Charakterisierung der Porengrösse von Membransystemen gibt es unterschiedliche Terminologien. Im MF-Bereich wird die Trenngrösse meist mit dem Porendurchmesser (in μm oder nm) der Membran angegeben. Die meisten Hersteller von UF-Membranen dagegen brauchen den „Cut-off-Wert“ zur Bestimmung der Trenngrösse. Der „Cut-off-Wert“ ist definiert mit demjenigen Molekulargewicht, welches zu 90% von der Membran zurückgehalten wird. Ein Cut-off von 40'000 Dalton bedeutet, dass alle Moleküle mit einem Molekulargewicht > 40'000 Dalton zu 90% im Retentat

verbleiben. Generell ist bei der Charakterisierung von Membranen zu beachten, dass die Trenngrösse mit einer gewissen z.T. beträchtlichen Unschärfe behaftet ist. Abbildung 3 zeigt, wie unterschiedlich die Trennqualität zwischen einem „scharfen“ und einem „diffusen“ Cut-off von UF-Membranen sein kann. Gute Membranen müssen einen möglichst „scharfen“ Cut-off erzielen.

Im RO/NF-Bereich wird die Trennschärfe vielfach mit der Salzretention (Vergleiche Kapitel 6 unter Nanofiltration) angegeben.

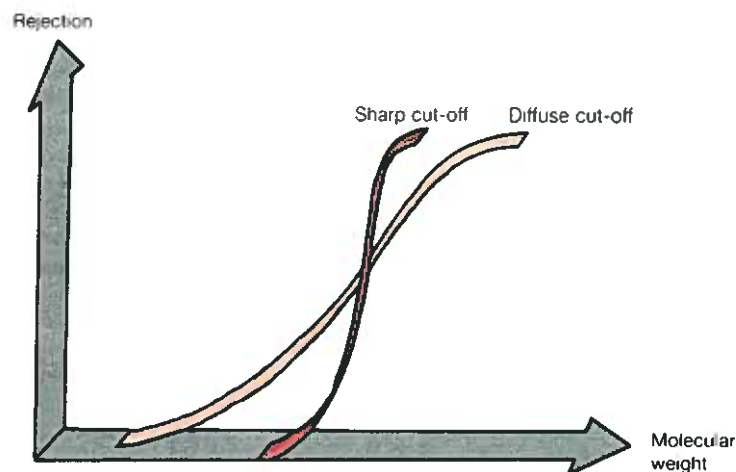


Abb. 3:
Darstellung der
Trennqualität von
UF-Membranen

Membrandesign

Es gibt die verschiedensten Wege, Membranfilter zu konstruieren. Die erprobten Designarten von Membransystemen lassen sich in drei Hauptgruppen klassifizieren:

a) Rohr

- Feine Hohlfaser
- Hohlfaser
- Rohrmodule

b) Flache Form

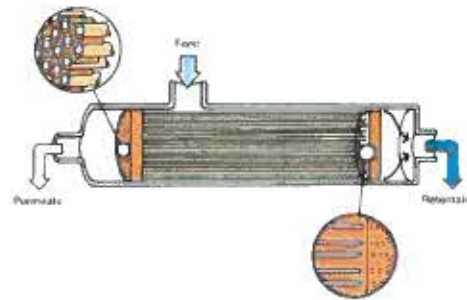
- Spiralwickel-System
- Plattenmodule

c) andere Systeme

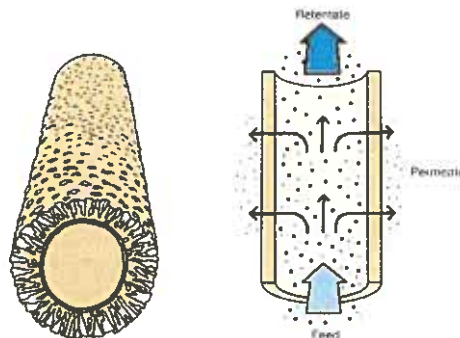
- Kasettensysteme (parallel leaf)
- Dynamische Systeme
- Oszillierende Systeme
- Keramiksysteme

In der Milchverarbeitung haben sich bisher fünf Formen etabliert. Jede Konstruktion hat spezifische Anwendungsmöglichkeiten und Eigenschaften.

Abb. 4:
Hohlfasersysteme
gebündelt im
Gehäuse sowie
mit der typischen
Kerzenform
(Cartridges)



Hohlfasersysteme eignen sich primär für MF- und UF-Prozesse. Typisch ist ihre kerzenähnliche Form mit den vielen Rohrbündelkanälen, welche an den Enden dicht mit dem Adapterstück verschweisst sind. Der Durchmesser der Fiberrohre („Spaghettiform“) variiert von 0.2 bis 1.25 mm. Bündel enthalten je nach Filterkonstruktion 50 - 3'000 individuelle Fiberrohre.



Rohrmodule sind im Vergleich zu den Hohlfasersystemen robuster und neigen viel weniger zu Foulingbildung. RO-Module sind häufig aus perforierten Edelstahlrohren gefertigt, während die UF-Module je nach Anwendung aus den verschiedensten Polymerkunststoffen

konzipiert sind. Form und Aufbau der Rohrmodule sind in Abbildung 5 erklärt. Rohrmodule eignen sich auch zum Filtern von viskosen Rohstoffen oder Produkten mit feinen Faser- oder Partikelanteilen.

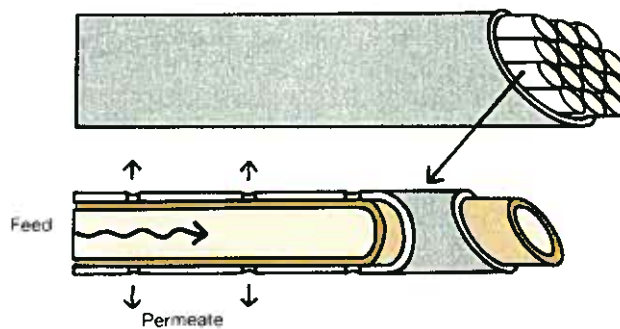


Abb. 5:
Aufbau und
Funktionsprinzip
vom Rohrmodul

Spiralwickelsysteme sind stark verbreitet im Food- und Milchbereich. Original wurden die Systeme für die Wasseraufbereitung entwickelt. In den letzten Jahren hat man die Spiralwickelmodule für die vielfältigsten Anwendungen weiterentwickelt. Auf geringem Raum sind

grosse Filterflächen verstaут. Sowohl auf der Feedseite als auch auf der Permeatseite halten sogenannte Spacers oder Abstandhalter (siehe Abbildung 6) den Raum für den Produktfluss frei. Bei dickflüssigen Produkten sind die Spacerkanäle grösser dimensioniert.

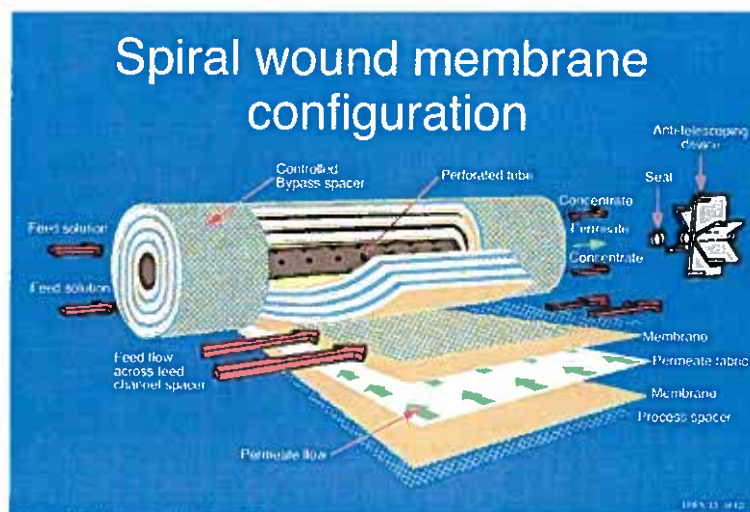
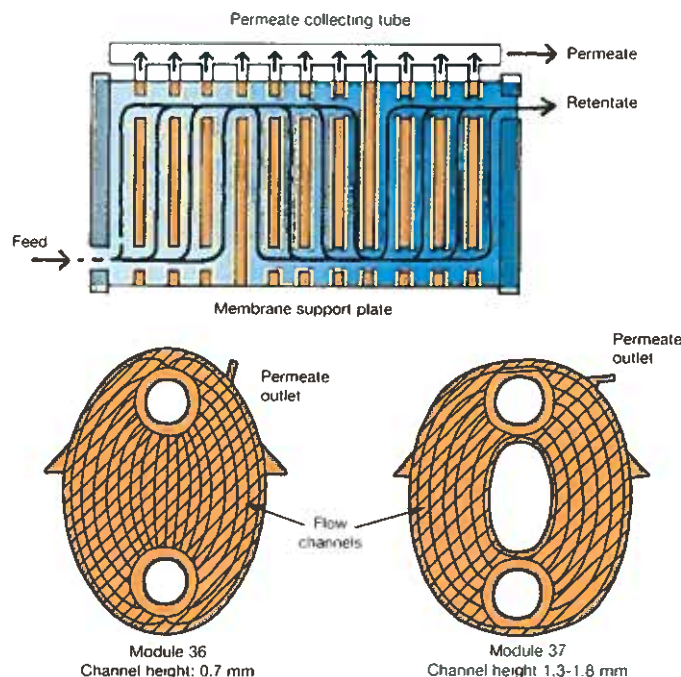


Abb. 6:
Aufbau und
Funktionsprinzip
eines Spiralwickel-
systems

Plattenmodule sind verschiedene Systeme auf dem Markt. Sehr bekannt ist das Plattenrahmensystem (plate-and-frame), welches von mehreren bekannten Firmen (DDS, Millipore, Filtron, Sartorius) weiterentwickelt wurde. War die erste Generation der Plattenrahmenmodule für RO- und UF-Prozesse konzipiert, so haben sich die heutigen Entwicklungen insbesondere zur UF-Bearbeitung von viskosen Produkten (z.B. UF-Quark, Rahmkäse) herauskristallisiert. Abbildung

7 zeigt das speziell für UF-Prozesse der Milchverarbeitung entwickelte und weit verbreitete „Plate-and-frame“-System Module 36 und 37 von DDS, Dänemark. Mit der Erhöhung des Plattenabstandes (Modul 37) können viskosere Produkte bei 10 - 20 bar ultrafiltriert werden. Filterwechsel und Funktionsänderungen sind einfach und komfortabel durchführbar. Andere Firmen haben rechteckige Platten konstruiert. Diese Systeme sind einer Plattenerhitzungsanlage sehr ähnlich.

Abb. 7:
Das "Plate-and-frame"-System von DDS, Dänemark



Keramiksysteme sind vorwiegend für Aufgaben im Bereich der Mikrofiltration (MF) im Einsatz. Es sind anorganische oder mineralische Membranen. Vereinzelt Produkte eignen sich auch für UF- oder NF-Prozesse. Die meisten Keramikmembranen sind aus einer metallischen (Aluminium, Zirkonium, Titanium) und nichtmetallischen Komponente (Oxide, Nitride, Carbide) gefertigt. Die Materialien haben eine hervorragende chemische

und thermische Beständigkeit (voll CIP/SIP-fähig) und werden von organischen Lösungen nicht angegriffen. Gewöhnlich sind Keramikfilter aus einem Multi-channel System mit einem Trägerblock (Beispiel in Abbildung 8, s. Seite 13) konstruiert. Die Keramiksysteme sind äußerst teuer. Der hohe Preis rechnet sich aber teilweise über die lange Lebensdauer von Keramikelementen.

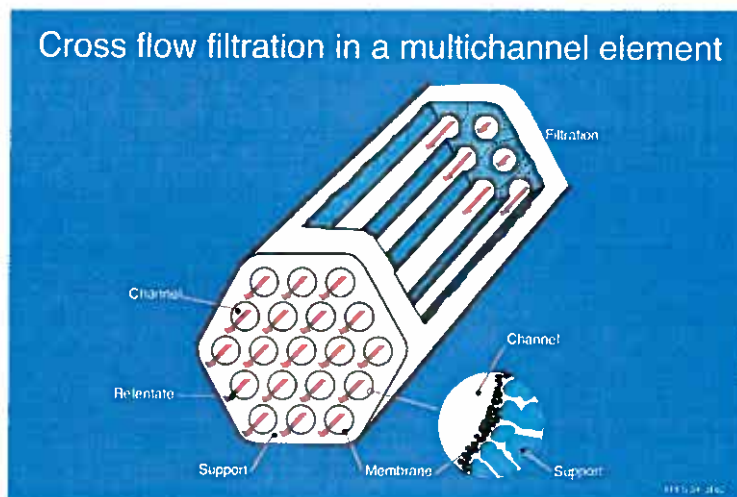


Abb. 8:
Multi-channel
Element von
Membralox von SCT,
France

Systemvergleich

Die in diesem Kapitel vorgestellten gebräuchlichen Filtersysteme der Milchwirtschaft exakt zu vergleichen ist schwierig. Jedes System hat seine Vorzüge und Nachteile. Die Systeme sind immer auf die jeweilige Eignung für die gewünschte Applikation zu überprüfen. Eine generelle Systembeurteilung ist nicht möglich.

Eine nähere Betrachtung von wichtigen Filtrationskriterien wie Leervolumen, Energieverbrauch, Kosten für Membranwechsel, Tendenz für Deckschichtbildung etc. ist trotzdem zulässig. Tabelle 2 verschafft einen kleinen Überblick zur Beurteilung der bekannten Membranfiltersysteme der Milchindustrie.

Tabelle 2: Kriterien verschiedener Membransysteme im Vergleich

	Kriterien / Anforderungen							
	Rückspül- system	Vorbehand- lung	Kompakte Bauart	Membran- wechsel	Energie- kosten	Leer- volumen	Deckschicht- bildung	Viskose Produkte
Feine Hohlfasern	ja	hoch	hoch	hoch	tief	sehr wenig	hoch	nein
Hohlfasern	ja	hoch	mittel	hoch	tief	wenig	hoch	nein
Rohrmodule	nein	tief	tief	mittel	hoch	viel	mittel	ja / nein
Spiralwickel	nein	hoch	mittel	tief	tief	mittel	mittel	nein
„Plate-and-frame“	nein	mittel	tief	mittel / tief	mittel	mittel	tief	ja
Platten (parallel)	nein	tief	tief	hoch	hoch	viel	tief	nein
Keramiksyste m e	ja	mittel / hoch	mittel	sehr hoch	hoch	mittel	mittel	ja

4. Beeinflussung der Trenneigenschaften

Die nachstehend beschriebenen Parameter beeinflussen die Trenneigenschaften von Filtersystemen nachhaltig und sind zu beachten.

Temperatur

Die Einstellung der richtigen Temperatur bei Filteroperationen ist entscheidend für den Erfolg des Prozesses. Folgende thermisch bedingte Faktoren beeinflussen das Filtrationsgleichgewicht:

- Pro 10°C Temperaturanstieg nimmt die Viskosität der Produkte um rund 25% ab. Dadurch verbessert sich die Permeationsleistung (Flux) von Membranen deutlich.
- Erhöhte Temperatur erleichtert die Operationen in Produktion und Reinigung.
- Mit zunehmender Temperatur steigt die chemische Reaktionsgeschwindigkeit der Filtrationslösungen. Die chemische Belastung und Abnutzung der Materialien (insbesondere bei Polymermembranen) nimmt zu.
- Eine zu hohe thermische Belastung der Filtermembran verändert deren Eigenschaften.
- Filtrationsoperationen im Temperaturbereich von 20-60°C fördern das mikrobiologische Wachstum im Produkt. Bei gewissen Anwendungen der Membrantechnologie im Milchbereich ist deshalb eine spezifische Temperaturführung notwendig. Die Membranfiltration erfordert eine gute mikrobiologische Kontrolle der Prozesse. Einige Molkereien haben sich sogar für eine kalte Mikrofiltration (um 15°C) entschieden. Es ist rund die 2.0 bis 2.5-fache Filterfläche nötig, um die gleiche Filtrationsleistung zu erzielen, wie bei den herkömmlichen Filtrationsverfahren um 50-55°C.
- Ab einem Temperaturbereich von 60-65°C sind die thermischen Effekte auf die Proteinmatrix zu beachten.

Druck

Bei druckbetriebenen Filtrationsprozessen sind die Druckverhältnisse genau zu verfolgen. Der Einfluss vom Druck auf die Filteroperationen manifestiert sich folgendermassen:

- Eine Druckerhöhung erhöht die Fluxleistung bis zu einem gewissen Punkt, abhängig von den Systembedingungen und den Produkteigenschaften.
- Erhöhter Druck ist zur Überwindung des osmotischen Druckes erforderlich.
- Erhöhter Druck vermindert die Permeabilität gelöster Stoffe.
- Erhöhter Druck verursacht bei Polymeren eine irreversible Ausdehnung, was die Trenneigenschaften der Membranen verändert.

Deckschichtbildung versus Überströmgeschwindigkeit

Deckschichtbildung (oder Fouling) ist ein weitverbreitetes Problem bei MF- und UF-Prozessen der Milchverarbeitung. Je nach Filterart und -konstruktion bildet sich nach Beginn des Filtrationsprozesses dynamisch eine zunehmende Schicht, welche hauptsächlich aus Komplexen von Proteinfractionen mit Kalziumphosphaten und -zitraten besteht. Auch wenn die Operationsparameter wie Druck, Temperatur, Durchfluss und Feedkonzentration konstant bleiben, entsteht vielfach Fouling. Die Schicht bewirkt eine drastische Fluxverminderung und eine Veränderung der Trenneigenschaften in Richtung vermehrter Rückhaltung kleinerer Moleküle. Zur Verzögerung der unerwünschten Fluxeinbussen infolge Deckschichtbildung sind konstruktive Verbesserungen sowie die Erhöhung der Überströmgeschwindigkeit am wirksamsten. Mit zunehmender Geschwindigkeit der Flüssigkeit über der Membran werden Moleküle von der Membran mit dem Retentatstrom wieder mitgerissen, was der Foulingbildung entgegenwirkt. Zu Beginn der Operationen

ist es von Vorteil nur mit rund 50% der maximal möglichen Fluxleistung zu starten, weil die Deckschicht somit wesentlich weniger schnell wächst und die Fluxleistung dank dieser Massnahme über längere Zeit konstant bleibt.

Deckschichtbildung und Fluxminimierung sind durch diverse Faktoren bedingt, die wichtigsten sind:

- Konzentrationspolarisation
- Adsorption
- Gelschichtbildung
- Porenverstopfung
- Chemische Veränderung der Membran
- Physikalische Veränderung der Membran
- Bakterienwachstum

Konzentrationspolarisation (CP)

Mit zunehmender Konzentration verlangsamt sich die Trennleistung von Filtrationsprozessen mehr und mehr. Diese physikalische Gesetzmässigkeit nennt man Konzentrationspolarisation (CP) und sie ist abhängig von der Überströmgeschwindigkeit entlang der Membran, der Konzentration an gelösten Stoffen und der Viskosität vom Retentat.

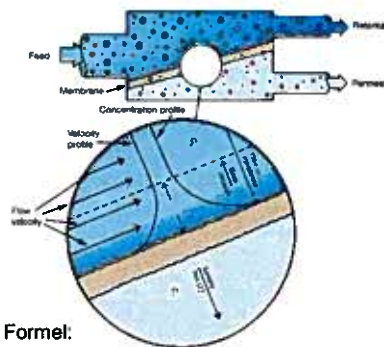
Auf Abbildung 9 sind die Entstehung und die Zusammenhänge der Konzentrationspolarisation dargestellt.

Die Konzentrationspolarisation ist essenziell für die Leistung eines Membransystems. Die Konsequenzen der CP sind sehr wichtig und gelten für alle Operationen jeglicher Membransysteme, für alle Produkte und alle Konzentrationsstufen. Zusammengefasst sind folgende Möglichkeiten in der Praxis denkbar:

Verminderte Reduktion aufgrund einer erhöhten Konzentration auf der Membranoberfläche im Vergleich zur Retentatkonzentration kommt beim Filtrieren von Lösungen mit Salzen von niedrigem Molekulargewicht vor.

Erhöhte Reduktion entsteht beim Filtrieren von Gemischtlösungen mit Makromolekülen. Die grossen Moleküle bilden eine feine Deckschicht (eine Art Sekundärmembran) über der Membran, die kleineren Moleküle werden dadurch vermehrt zurückgehalten.

Reduzierter Flux ist die Folge der zunehmenden Konzentration an der Schnittstelle über der Membran (C_w), der osmotische Druck steigt lokal an, was sukzessive den Flux (lmh) vermindert.



Formel:

$$CP = C_w / C_b$$

wobei

C_w = Konzentration an der Schnittstelle (Wand)

C_b = Konzentration vom Retentat

Abb. 9: Darstellung der physikalischen Zusammenhänge der Konzentrationspolarisation (CP)

pH-Verhältnisse

Wichtig ist die Beachtung der vom Hersteller angegebenen pH-Limiten der eingesetzten Membranen. In der Filterlösung beeinflusst der pH-Wert die Struktur von Makromolekülen, die Zusammensetzung von organischen und anorganischen Salzen, die Bildung von Kalziumkomplexen und viele andere Eigenschaften von gelösten Stoffen. Die pH-bedingten Einflüsse, welche die Fluxrate, die Konzentrationspolarisation und die Deckschichtbildung beeinflussen, sind bei allen Filtrationsprozessen zu beachten. Vor neuen Applikationen muss man in Testversuchen die Trenneigenschaften gründlich analysieren.

5. Prozessdesign

In diesem Kapitel werden einige wichtige Begriffe und Kenntnisse über Filtrationsanlagen oder Teile davon in vereinfachter Art und Weise vermittelt.

Abb. 10: Kontinuierliche Filtrationssysteme mit Recycling-Loop

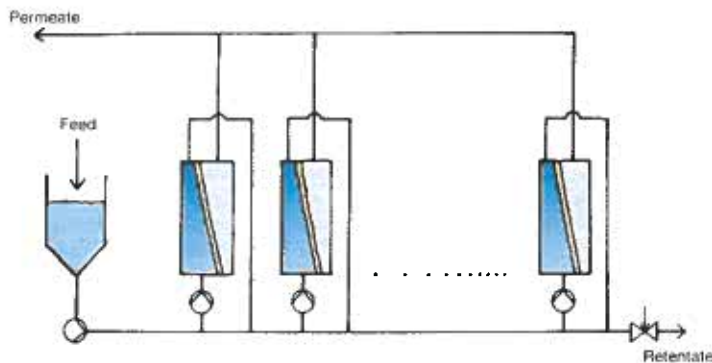
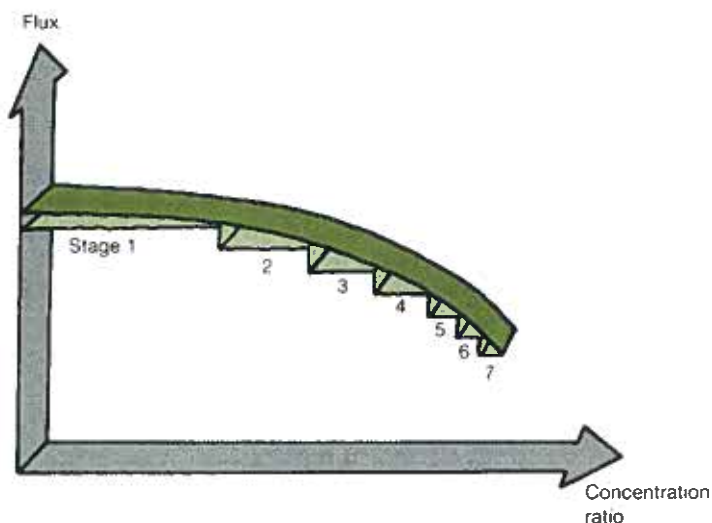


Abb. 11: Fluxkurve bei zunehmender Konzentration zur Berechnung der Anlagestufen



a) Operationsweise

Bei Industrieanwendungen sind mehrheitlich kontinuierliche Filtersysteme im Einsatz und in seltenen Fällen Batchoperationen. Die meisten in der Milchverarbeitung eingesetzten kontinuierlichen Systeme arbeiten mit mehreren Stufen. Jede Stufe hat wiederum einen eigenen Kreislauf (Loop), wo das Produkt mehrmals recycelt wird. Das sogenannte kontinuierliche Recyclingsystem ist auf Abbildung 10 illustriert.

Dieses Prozessdesign ermöglicht die Steuerung und Regelung von Produktfluss, Druck und Konzentration auf jeder Stufe. Das System benötigt etwas mehr Filterfläche als vergleichbare Batch-Systeme dafür ist die gesamte Filtrationsleistung um ein Mehrfaches grösser. Die Systeme arbeiten normalerweise vollautomatisch während 24 Stunden. Davon werden täglich zwei bis vier Stunden für Reinigungsprozesse benötigt.

Zur Bestimmung der Anzahl Stufen, welche für den einwandfreien und optimalen Betrieb einer Filtrationsanlage notwendig sind, muss man den Verlauf der Fluxkurven genau kennen. Abbildung 11 zeigt, wie anhand der Fluxkurve einer konzentrierten Lösung die Anzahl an Anlagestufen festgelegt wird.

Die Dimensionierung der Prozessanlagen erfolgt mehrheitlich mit ausgeklügelten PC-Modellen. Bei neuen Applikationen sind die Grunddaten zur Berechnung und Auslegung der diversen Filtrationsparameter wie Trenneigenschaften, Membranauswahl, Druck, Temperatur, Konzentrationsverhalten, Fouling etc. in aufwändigen Tests im Labor und auf Stufe Pilotplant zu ermitteln.

b) Crossflow-System

Im Gegensatz zu konventionellen Filtrationsverfahren wird bei Membranverfahren der Lebensmittelverarbeitung die sogenannte Crossflow- oder Tangentialtechnik eingesetzt. Das zu filtrierende Medium wird mit hoher Geschwindigkeit tangential zur Membranoberfläche bewegt.

Wie aus Abbildung 12 ersichtlich, verläuft der Volumenstrom des Filtrats (Permeat) senkrecht zur Flussrichtung des Mediums. Die treibende Kraft des Prozesses ist der Transmembrandruck. Mit zunehmendem Transmembrandruck steigt auch der Permeatvolumenstrom, in der Fachsprache **Flux** (Gallmann, 2001) genannt.

c) Gleichmässiger Transmembrandruck (TMP)

Bei MF-Systemen ist die Kontrolle des Transmembrandruckes (TMP) von entscheidender Bedeutung zur optimalen Erfüllung der gestellten Trennaufgaben. Es wird ein möglichst gleichmässiger TMP angestrebt. Die Firmen unternah-

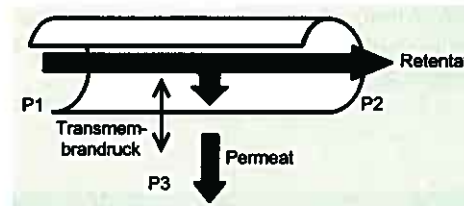
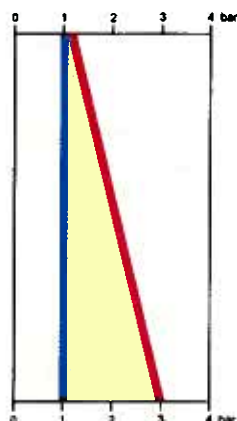


Abb. 12:
Prinzip der
Tangentialfluss-
Filtration (Cross-
flow Filtration)

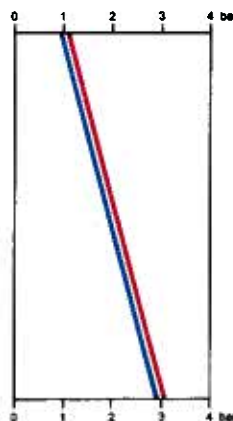
men grosse Anstrengungen zur Lösung dieses Problems. Mehrere Neuentwicklungen haben sich mittlerweile auf dem Markt bewährt. Tetra Laval patentierte das sogenannte „Uniform transmembran pressure“-System (Abkürzung = UTP). Das UTP-System hat sich einerseits zur Erzielung einer zufriedenstellenden Keimreduktion gut bewährt und ermöglicht andererseits die gezielte Fraktionierung verschiedener Milchproteine. Diese Anwendungen sind im nachfolgenden Kapitel 6 detaillierter beschrieben. Den Unterschied zwischen den konventionellen Systemen mit unkontrolliertem TMP und den revolutionären Systemen mit kontrolliertem TMP erklärt Abbildung 13.

Pressure profiles



TMP
unkontrolliert

Pressure profiles



TMP
kontrolliert

Abb. 13:
Vergleich
Druckprofile TMP
konventionell mit
dem UTP von Tetra
Laval

Das besondere am UTP-System von Tetra Laval ist die zusätzliche Rezirkulierung des Permeatstromes (Permeatloop), wie Abbildung 14 zeigt. Dadurch erreicht man eine exakte Einstellung der Druckverhältnisse auf der Permeatseite.

Abb. 14:
Retentat- und
Permeatfluss beim
UTP-System (Tetra
Laval)

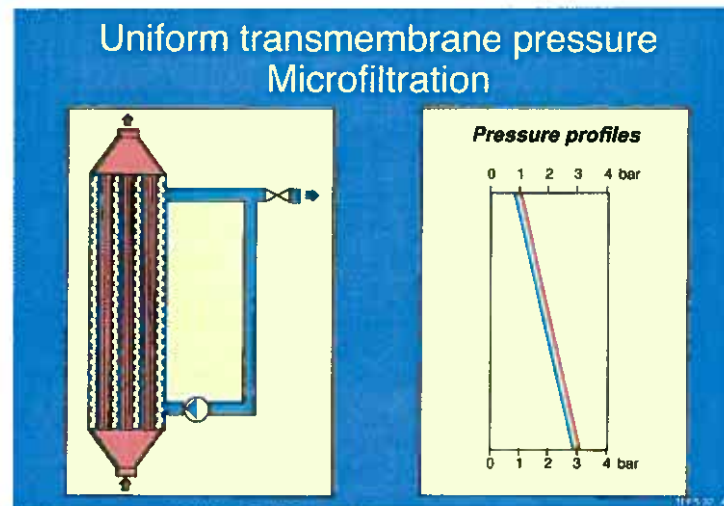
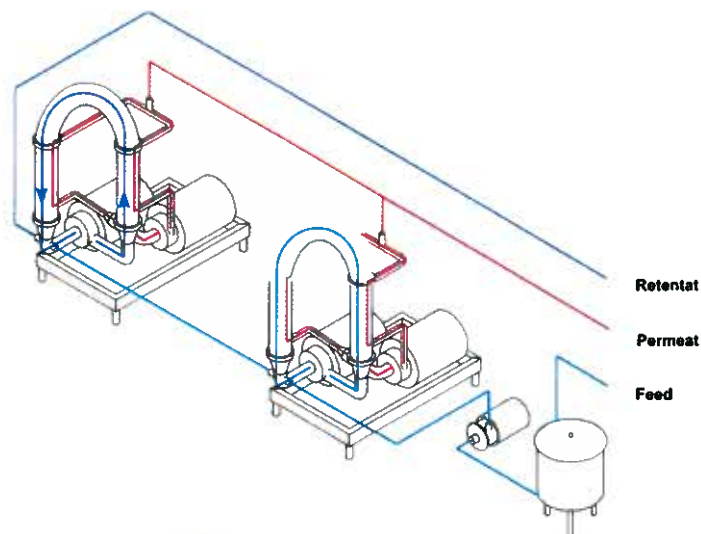


Abb. 15: Kontinuierliches Filtrationssystem mit Permeatloop (System APV)



Andere Firmen wie APV haben vergleichbare Systeme zur Kontrolle eines gleichmässigen TMP entwickelt. Beim patentierten System von APV wird ebenfalls das Permeat in einem separaten Loop im Gleichstrom mit dem Retentat zirkuliert, wie Abbildung 15 illustriert.

Das Membranmodul ist permeatseitig so konstruiert, dass über den gesamten Flusspfad der Permeatdruck kontinuierlich mit der gleichen Druckdifferenz zum Retentatdruck abnimmt. Die Druckhöhe auf der Permeatseite wird mit einem Gegendruckventil exakt eingestellt. Somit hat auch das APV-System ein kontrolliertes, gleichmässiges TMP-Profil (vergleichbar mit dem System in Abbildung 13).

Gute Resultate zur Reduktion der Foulingbildung und zur Verbesserung der Trenneigenschaften im MF-Bereich werden mit Systemen erreicht, welche mit einem Rückspülsystem ausgerüstet sind. Unter kontrollierten Bedingungen kann während der Filteroperation periodisch eine kleine Menge Permeat rückwärts durch die Filterelemente gedrückt werden. Kurzfristig steigt der Permeatdruck höher als der Druck

auf der Retentatseite. Die Moleküle der Deckschicht werden mit diesem Vorgang von der Membranoberfläche weg befördert, die Fluxleistung steigt markant an, wie Abbildung 16 aufzeigt. Über den gesamten Filtrationsprozess gesehen, erzielen Rückspülsysteme konstant hohe Fluxwerte. Bei Trennaufgaben mit heiklen Stoffen, welche schnell zur Foulingbildung neigen, sind vielfach solche Systeme zur Lösung der Aufgabe erfolgreich im Einsatz.

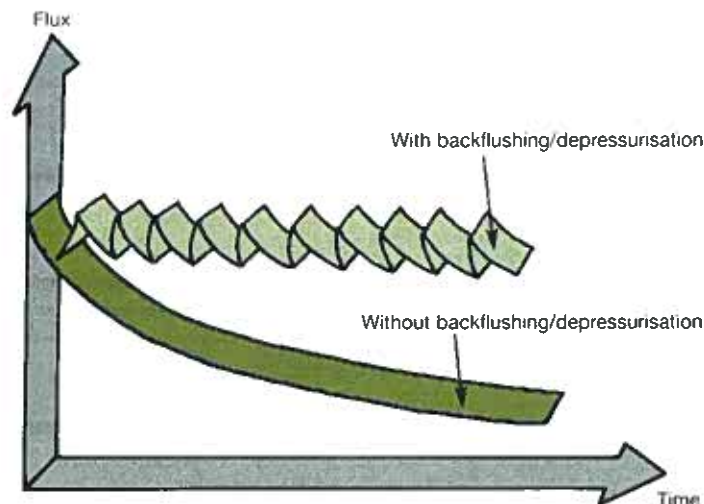


Abb. 16:
Typischer Fluxver-
lauf bei Trenn-
operationen mit
Rückspülsystemen

d) Reinigung von Membransystemen

Die Reinigung von Membransystemen ist höchst anspruchsvoll und muss ebenso minutiös geplant und durchgeführt werden wie die Produktionsschritte. Firmen der Milchverarbeitung reinigen die Filtersysteme im Betrieb beinahe ausnahmslos mittels chemischen Reini-

gungssystemen, gewöhnlich sind das CIP-Prozesse. Im Gegensatz zu den übrigen Prozessanlagen der Milchverarbeitung brauchen die Membranfiltrationsanlagen bei der Reinigung spezielle Anforderungen bezüglich Temperatur, Druck und Chemikalien.

Die CIP-Reinigung von Filtersystemen umfasst in der Regel folgende Prozessschritte:

- Produktentfernung
- Spülen mit Wasser
- Reinigung in einem oder mehreren Schritten
- Zwischenspülen nach jedem Schritt
- Desinfektion vom gesamten System

Die gebräuchlichsten chemischen Reinigungskomponenten sind Laugen, Säuren, Detergenzien, Enzyme und

Komplexbildner wie Ethylendiamintetraessigsäure (EDTA). Häufig verwendete Desinfektionsmittel sind Wasserstoffperoxyd, Natriumhypochlorid und Natriumbisulfate. Tabelle 3 zeigt ein Beispiel von möglichen Prozessschritten zur erfolgreichen Reinigung von Membransystemen der Milchwirtschaft.

Will man den maximalen Reinigungseffekt bei Filtersystemen erzielen, sind folgende Parameter zu beachten:

Tabelle 3:
Beispiel CIP-Reinigung einer UF-Anlage mit Spiralwickelmodulen (Invensys, 2002)

Operation	Konz.	Mittel	pH-Wert	Temp.	Zeit
1. Produktpülung	—	Wasser			
2. Lauge	1.0%	RO-DAN plus ®	12.8	70°C	20 min.
3. Wasserspülung	—	Wasser / RO-Permeat			
4. Säure	0.3%	RO-DAN sauer ®	2.0	50°C	20 min.
5. Wasserspülung	—	Wasser / RO-Permeat			
6. Lauge	1.0%	RO-DAN plus ®	12.8	70°C	40 min.
7. Wasserspülung	—	Wasser			
8. Desinfektion	0.3%	OXIDAN ®		20°C	10 min.
9. Schlusspülung	—	Wasser			

Wasserqualität

Das für Filtrationsprozesse bestimmte Wasser muss von der bestmöglichen Qualität sein, um nicht negative Einflüsse auf die Membranen und deren Trenneigenschaften auszuüben. In Tabelle 4 (s. Seite 21) sind die minimalen Anforderungen der Wasserqualität für verschiedene Filterprozesse aufgeführt.

Häufig muss zur Erzielung der Qualitätsrichtlinien das Trinkwasser im Betrieb zusätzlich technisch aufbereitet werden.

Qualität der Chemikalien

Die eingesetzten Chemikalien müssen frei sein von Verunreinigungen, welche Foulingbildung auf den Membranoberflächen verursachen. Es ist ratsam, Art und Qualität der eingesetzten Chemikalien mit dem Membranspezialisten abzustimmen. Die Chemikalien sind ein wichtiger Erfolgsfaktor für die Reinigung und den Betrieb von Filtrationssystemen.

	Einheiten	RO / NF	UF / MF	MF
Eisen (Fe)	mg/l	<0.05	<0.05	<0.1
Mangan (Mn)	mg/l	<0.02	<0.02	<0.05
Aluminium (Al)	mg/l	<0.05	<0.1	<0.1
Silikon SiO ₂)	mg/l	<20	<20	<20
Chlor (Cl ₂ / HOCl)	mg/l	<0.1	<5	<5
Wasserhärte	°dH	<20	<20	<20
Fouling Index	SDI	<3	<3	<3
Trübung	NTU	<1	<1	<1
Fremdkeime (22°C)	KbE per ml	<1000	<1000	<1000
Fremdkeime (38°C)	KbE per ml	<10	<10	<10
Coliforme	KbE per 100 ml	<1	<1	<1

Tabelle 4:
Qualitätsrichtlinien
für Wasser bei Fil-
trationsprozessen
(Königsfeldt, 2002)

Reinigungstemperatur

Gemäss Gesetzmässigkeit der chemischen Reaktionsgeschwindigkeit ist die höchst mögliche Temperatur zur Reinigung von Filtrationsanlagen zu wählen. Limitierend ist die maximale Belastungstemperatur der eingesetzten Membran, welche der Hersteller angibt. Finden enzymatische Reinigungsmittel Verwendung, so ist die CIP-Temperatur auf das Optimum der Enzyme einzustellen.

Druck

Im CIP-Zyklus sind die Betriebsdrücke so tief wie möglich zu halten. Dadurch erzielt man die besten Spüleffekte durch die Membran und an deren Oberfläche. Zu grosse Drücke bei CIP-Operationen verursachen Ablagerungen (Schmutz, organische Stoffe) an der Membranoberfläche. Zur effizienten und vollständigen Wegförderung der Schmutzteilechen von den Filterflächen ist eine hohe Überströmgeschwindigkeit anzustreben.

Reinigung der Permeatseite der Module

Permeatseitig sind die Strömungsbedingungen bei CIP-Prozessen meist ungünstiger als retentatseitig. Nur mit einem hohen CIP-Volumenstrom gelingt es diesen kritischen Raum sauber zu reinigen. Dabei ist in jedem Fall der Druck auf der Permeatseite kontrolliert tiefer zu halten als auf der Konzentratseite.

Wassertest

Nach jeder Reinigung von Membransystemen wird gewöhnlich der Wassertest durchgeführt. Dies ist ein einfacher praktischer Test: Mit Wasser wird die Fluxleistung gemessen und mit dem Ausgangswert (Sollwert) verglichen. Er gibt Auskunft über die korrekte Reinigung sowie den Zustand der Membranen.

Membrane werden normalerweise mit der Garantie ausgeliefert, dass sie einwandfrei zu reinigen sind. Zur Fehlersuche und deren Behebung, ist es ratsam und wertvoll, die wichtigsten Produktions- und CIP-Zyklen möglichst gut aufzuzeigen und zu dokumentieren.

6. Anwendungen

Die Anwendungsmöglichkeiten von Filtrationstechniken in der Milchverarbeitung sind vielfältig. Dem Innovationsgeist der Betriebe sind praktisch keine Grenzen gesetzt. Eine vollständige Präsentation aller gängigen und möglichen Applikationen in der Milchwirtschaft würde den Rahmen dieser FAM-Information sprengen. Wir beschränken uns auf einige

ausgewählte Produktgruppen auf Basis Membrantrennverfahren. In erster Linie richten sich die Anwendungsmöglichkeiten nach den verschiedenen etablierten Filtrationstechniken. Sie sind durch die Porengrösse der verwendeten Membranen definiert. Die Übergänge zwischen den Verfahren sind fließend (Tabelle 5).

Tabelle 5:
Definition der wichtigsten Membrantrennverfahren (Gallmann 2001)

Verfahren	Kenngrossen	Grundprozesse
Mikrofiltration (MF)	Bei MF-Prozessen sind Membranen mit 0.1 – 5.0 µm Porengrösse zur selektiven Abtrennung der Makromoleküle (über 20 kDa Molmasse) im Einsatz. Der Betriebsdruck variiert zwischen 1 - 4 bar	– Keimreduktion (Hygienisierung) der Milch – Auftrennen von Milchproteinen – Separieren der Fettkügelchen nach Grösse
Ultrafiltration (UF)	UF umfasst den Gebrauch von Membranen mit einem Bereich von 1 - 20 kDa und bis zu einem Porendurchmesser um 0.01 µm. Dabei werden Drücke unter 10 bar angewendet	– Aufkonzentrierung der Proteine – Abtrennen von Wasser, gelösten Mineralstoffen, Laktose, Nichtprotein-Bestandteilen (NPN) und wasserlöslichen Vitaminen
Nanofiltration (NF)	NF separiert Partikel mit Molekulargewichten zwischen 100 - 1000 Dalton. NF lässt eine selektive Ionenseparierung zu, basierend auf deren Molekulargewicht, Diffusions- und Ladungseigenschaften.	– Laktose zurückhalten oder durchlassen – Entsalzen von Molke und Permeat – Herstellung von Zuckersirup – Gewinnung bioaktiver Peptide
Umkehrosmose (RO)	RO-Membranen werden durch eine Trenngrösse um 100 Dalton charakterisiert. Die Prozesse benötigen Drücke zwischen 30 – 100 bar	– Aufkonzentrieren durch Abtrennung von Wasser
Diafiltration (DF)	Der DF-Prozess hat das Ziel, die Membran permeierenden Substanzen während einer Filtrationsbehandlung besser abzutrennen (Auswaschen).	– Auswaschen von Proteinen, Laktose und gewissen Mineralien

Mikrofiltration (MF)

Bei der Mikrofiltration spielt die Wahl des Porendurchmessers (Cut-off-Wert) für die Partikelzusammensetzung im Konzentrat (Retentat) und Permeat eine entscheidende Rolle.

In der Milch sind im entsprechenden Arbeitsbereich die Bakterien, die Fettmo-

leküle und die grösseren Proteine tangiert (siehe im Kapitel 1, Abbildung 1). Mit der Porengrösse wird folglich der Entkeimungsgrad und die Proteinzusammensetzung des Permeates (proteinstandardisierte Milch) bestimmt. Eine wichtige Anwendung ist ESL-Milch. ESL steht

für extended shelf life (deutsch: Verlängerte Haltbarkeit). Mit MF-Technologien kann vor der Pasteurisation die Zahl der thermoresistenten Keime, insbesondere von *B. cereus* reduziert werden, was die Haltbarkeit von Pastmilch auf mehrere Wochen erhöht (Gallmann et. al., 2001). Mehr und mehr Bedeutung in der Milchwirtschaft gewinnt die Proteinfractionierung mittels einer 0.1 µm MF-Membran. Die gewonnenen Milchfraktionen lassen sich beinahe beliebig einsetzen (Maubois, 2001 und Kulozik et. al., 2001) und zu innovativen Produkten mit guten funktionellen Eigenschaften verarbeiten. Das Retentat von Magermilch nach der Filtrationsanlage ist ein Kaseinkonzentrat mit geringem Anteil an Molkenproteinen. Es kann zu den verschiedensten Produkten weiterverarbeitet werden (Bachmann et. al., 2002a). Die meisten Molkenproteine bleiben im Permeat zurück. Es handelt sich beim Permeat also um eine sogenannte „ideale Molke“.

Die ist mikrobiologisch praktisch steril und pH-stabil und enthält keine Milchsäure, keine Glycomakropeptide (GMP), keine Restmengen von Labenzymen und Starterkulturen. Die Proteinfractionen liegen mehrheitlich noch in nativem Zustand vor (Thomet, 2001). Es ist durchaus denkbar, dass in der „Molke-
rei der Zukunft“ die Mikrofiltration zum gängigen Behandlungsschritt der Milch avanciert, wie es bereits die Separation darstellt. Folglich würde die Milchvorbehandlung in Zukunft eine Fett- und Proteinstandardisation sowie ein Hygienisierungsverfahren (Mikrofiltration und thermisches Verfahren) beinhalten.

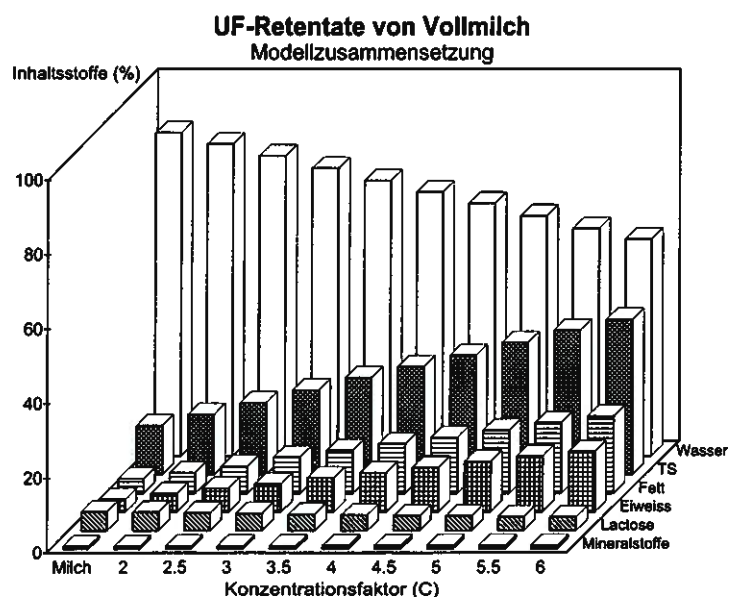
Ultrafiltration (UF)

Die Zusammensetzung von UF-Retentaten bei bestimmten Konzentrationsgraden lässt sich modellmässig rechnen. Der Konzentrationsfaktor C errechnet sich als Quotient von Ausgangsvolumen und Retentat als Massen oder Volumen: siehe Formel (5)

Moderne Anlagen erlauben aufgrund ihrer hydraulischen Konfiguration Konzentrationen bis zu einem Faktor 7 für Vollmilch und 10 für Magermilch. Damit werden Retentatstrockenmassen von 50 bis 60 % (Lawrence, 1989) erzielt. Abbildung 17 zeigt die bei der UF-Konzentration von Vollmilch durchlaufene Zusammensetzung von Retentaten bzw. Retentatstrockenmassen (Gallmann, P.U., 1990).

Innerhalb dieses Verfahrens können Abweichungen vom Modell durch Variieren der Prozessbedingungen (pH-Veränderungen, thermische Behandlung) gezielt eingesetzt werden. Solche technologisch bedeutsamen Modifikationen wirken sich weniger in den dargestellten Grobzusammensetzung der Retentate sondern innerhalb der Inhaltsstoffgruppe (insbesondere der Zusammensetzung der Mineralstoffe) aus.

Abb. 17: Modellzusammensetzung von UF-Retentaten unterschiedlicher Konzentration



Nanofiltration (NF)

Die Nanofiltration (NF) ist ein Filtrationsprozess im Bereich der gelösten Stoffe mit einer relativ offenen Membranstruktur. Insbesondere erlaubt der Vorgang die Permeation von monovalenten Ionen der Milch wie Natrium, Kalium und Chlor. In der Regel wird die Trenneigenschaft der NF-Membranen mit der Salz- oder Zuckerretention (z.B. 99% Laktoserückhaltung) definiert. Tabelle 6 zeigt zwei unterschiedliche Leistungsprofile von NF-Membranen.

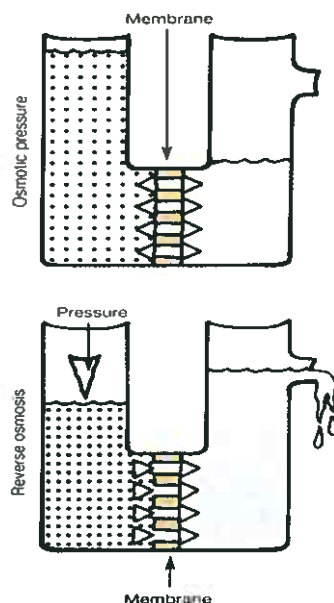
Tabelle 6: Leistungsdaten von NF-Membranen (APV Systems, 2000)

Eigenschaft		Typ 1	Typ 2
Laktoserückhaltung	%	99	96
MgSO ₄ -Rückhaltung	%	98	96
NaCl-Rückhaltung	%	50	27
Wasserflux	lmh	54	73

Daten gemessen bei 10 bar und 25°C

Abhängig von den gewählten Prozessbedingungen (Porengrösse, Druckverhältnisse und allenfalls Hilfsstoffbeigabe) kann ein gewisser Durchgang von Mineralstoffen und Laktose erzielt oder verhindert werden (Kulozik, 1988). Nanofiltration hat ein weites Potenzial für neue Anwendungen in der Lebensmittel-, Milch- und Pharmaindustrie. Der wesentliche Vorteil der NF-Technologie ist die Entmineralisierung von Lösungen ohne bedeutende Verluste an wertvollen organischen Inhaltsstoffen bei gleichzeitiger Aufkonzentrierung. Die heutigen NF-Systeme erzielen Entmineralisierungsraten bei Molke oder UF-Permeat von 40-50%. Einzelne Ionen wie Chlorid gehen zu > 90% ins Permeat über. Neben den technologischen Vorteilen der selektiven Aufkonzentrierung von gelösten Milchinhaltsstoffen ist die Aufkonzentrierung auf ca. 20 – 24% Trockenmasse (TS) wirtschaftlicher im Vergleich zur Eindampftechnik (siehe unter Kapitel 8: Vergleich von Prozesskosten).

Abb. 18:
Physikalisches
Prinzip zur Über-
windung des osmo-
tischen Druckes



Umkehrosmose (englisch: reverse osmosis, RO)

Sind zwei chemische Lösungen mit unterschiedlicher Konzentration durch eine Membran getrennt, welche den Stoffausgleich der gelösten Moleküle verhindert, gilt es mit Druckenergie den osmotischen Druck zu überwinden, um die kleinen Moleküle (in der Regel Wassermoleküle) aus der Lösung zu bringen. Mit dem Prinzip der Umkehrosmose (siehe Abbildung 18) gelingt es Salz- und Zuckerlösungen zu konzentrieren.

Je nach Inhaltsstoff und Konzentration ändert sich der osmotische Druck, wie Tabelle 7 zeigt. Ab einer bestimmten Konzentration wirkt der ansteigende osmotische Druck limitierend auf den erfolgreichen und wirtschaftlichen Betrieb von RO-Prozessen.

Die Hauptanwendung von RO-Prozessen in der Milchwirtschaft ist die Aufkonzentrierung von Koppelprodukten aus der Milchverarbeitung wie Molke und

Permeat. Mit RO-Technologien ist die Entfernung von Wasser aus diesen Derivaten bis zu einer Trockenmasse auf ca. 20 - 24% TS wirtschaftlicher als mit Eindampftechnik.

Aber auch Milch und Magermilch werden aufkonzentriert, sei es als Vorkonzentration vor dem Verdampfer, zur Ausbeuteerhöhung bei der Käsefabrikation (Phillips, 1989) oder als wirtschaftliche Alternative zum Zusatz von Magermilchpulver bei der Joghurtherstellung.

Produkt	Trockensubstanz (TS) (%)	Osmotischer Druck (bar)
Kasein	3.5	0.03
Laktose	5.0	4.1
Milch	11.0	7.0
Molke	6.0	7.0
Orangensaft	11.0	16.2
Apfelsaft	14.0	21.1
Seewasser	3.5	24.6
Kaffeeextrakt	28.0	35.2

Tabelle 7:
Osmotischer Druck
in verschiedenen
Produkten (APV
Systems, 2000)

Diafiltration (DF)

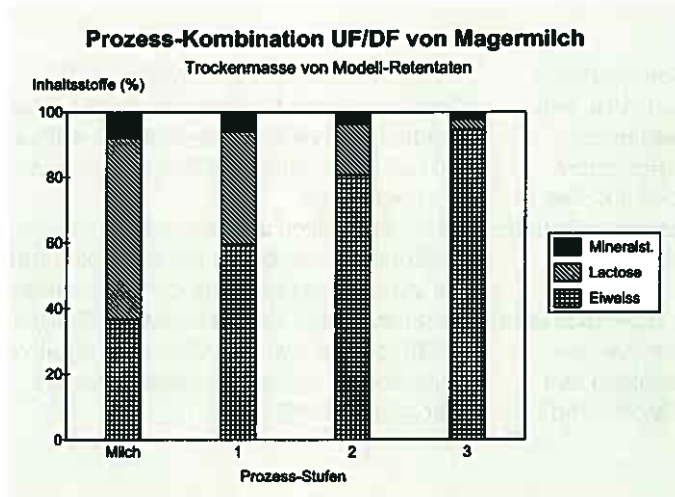
Die Anwendung der DF in der Milchwirtschaft beruht in der Regel auf Kombinationen mit UF- oder NF-Verfahren, indem das Retentat parallel zum Filtrationsprozess mit Wasser oder reinem Permeat verdünnt wird. Als Ziel dieser Prozessführung will man die Membran passierenden Inhaltsstoffe möglichst vollständig aus dem Konzentrat auswaschen. Durch DF-Verfahren lässt sich die Reinheit der Konzentrate verbessern.

Am Beispiel der Magermilch ist die Zusammensetzung des UF-Retentates nach mehreren Diafiltrationsstufen dargestellt (Abbildung 19, s. Seite 26).

Als offensichtlicher Unterschied zur einfachen Ultrafiltration von Magermilch enthält die Trockenmasse im Retentat nach ausreichenden Verdünnungsschritten wenig Laktose und Mineralstoffe.

Praktische Anwendung findet diese Technik bei verschiedenen Käsetechnologien. Bei der Mozzarellaherstellung wird beispielsweise ausgehend von Magermilch, durch UF in Kombination mit DF eine Endtrockenmasse von 38 % bei einem Proteinanteil von 34 % angestrebt. Die nach der Vorsäuerung verbleibende Laktose wird mit der Diafiltration weitgehend entfernt (Phillips, 1989).

Abb. 19:
TS-Anteile von
Modellkonzentra-
ten verschiedener
DF-Stufen
(Gallmann, 1990)

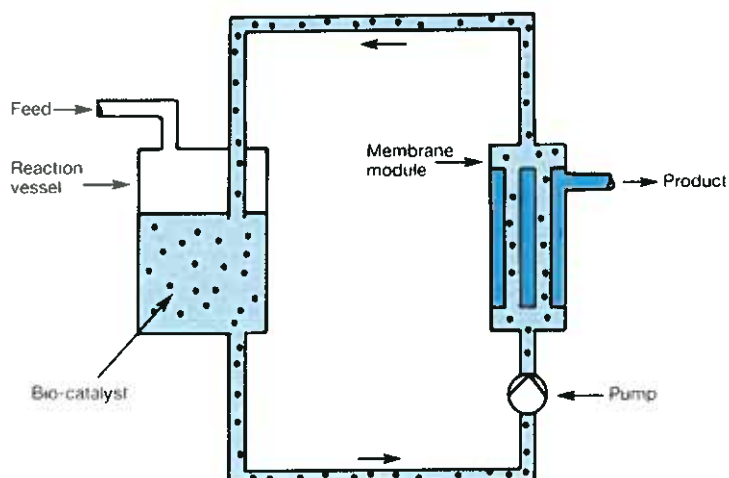


Membran Bioreaktor-Systeme

Ein sehr interessantes Ausbaufeld mit viel Innovationspotenzial bieten Membransysteme kombiniert mit Bioreaktoren. Es gibt auch vollständig geschlossene Filtersysteme, welche immobilisierte

Enzyme enthalten und vom zu hydrolierenden Produkt (Feed) durchströmt werden. Die abgespaltenen Edukte aus der Enzymreaktion passieren die Membrane. In den nachgeschalteten Filterstufen werden die so gewonnenen Stoffe gereinigt und konzentriert. Aufbau und Funktionsweise der Membran Bioreaktor-Systeme erklärt Abbildung 20.

Abb. 20: Bioreaktor mit immobilisierten Enzymen und Membransystem, (APV Systems, 2000)



Die in der Biotechnologie seit Jahren etablierte Technologie eröffnet auch den Milchverarbeitern Anwendungsmöglichkeiten bei der Gewinnung von Einfachzuckern aus Laktose, bei der Isolierung bioaktiver Peptide oder spezifischer Minorproteine aus Milch und Molke sowie zur Gewinnung spezifischer Stoffwechselprodukte (Vitamine, Aromastoffe, Bakteriozine, Enzyme etc.) aus fermentierten Milchprodukten. Die Verschmelzung der Membran- mit der Fermentertechnologie ist eine ideale Basis zur Entdeckung neuer Verfahren und Technologien auch für die Milchwirtschaft.

Spezifische Anwendungen in der Käsereiwirtschaft

Ultrafiltration (UF) der Käsereimilch

Das **Vollkonzentrierungsverfahren** ermöglicht den Übergang der gesamten Retentatstrockenmasse in den Käse. Damit geht kaum Protein mit der Molke verloren, was sich in der Käseausbeute niederschlägt (13 - 25% Erhöhung) und gleichzeitig eine Aufwertung aus ernährungsphysiologischer Sicht beinhaltet. Allerdings sind im Hinblick auf die Produktqualität die gegenüber Milch deutlich veränderten technologischen Eigenschaften des Konzentrates zu berücksichtigen (Gallmann, 1990a). Die UF-Vollkonzentrate enthalten die gesamte Molkenproteinfraktion sowie das gebundene Kalzium der Milch. Die beiden Faktoren beeinflussen meistens die Teig- und Geschmackseigenschaften von UF-Käsen nachteilig. Anwendungen im Produktionsmassstab findet die UF-Vollkonzentration heute besonders bei der Herstellung von Frischkäse (Abbildung 21), Weichkäse, Feta und Cottage cheese.

Beim **Teilkonzentrieren** mit UF-Membranen ist wegen der hohen Stoffkonzentration in der abfliessenden Molke die Ausbeuteerhöhung eher bescheiden. Das Verfahren wird aber zur Anpassung von Anlagenkapazitäten häufig eingesetzt.

Umkehrosmose zur Molkenkonzentrierung

Die käsereiwirtschaftliche Hauptanwendung dieser Technik liegt in der Konzentrierung von Molke zum Zwecke einer zentralen Verarbeitung oder zur Direktverfütterung.

Konzentrieren der Käsereimilch bewirkt veränderte Produkteigenschaften, was jedoch praktisch kaum genutzt wird.

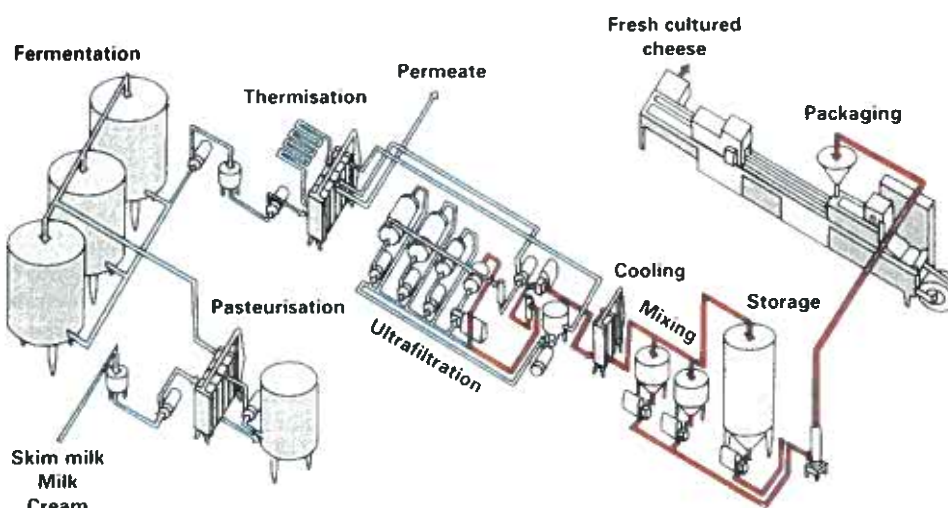


Abb. 21:
Herstelllinie von
Frischkäse mit UF-
Vollkonzentration
(Dairy Industries
International, 2001)

Mikrofiltration von Käseemilch

Mittels MF können Bakterien und Sporen mit hoher Effizienz (Keimreduktion $> \log 4$) aus der Käseemilch abgetrennt werden. Der Effekt und die geschmackliche Beeinflussung beim Einsatz in der Käsefabrikation wurde von Klantschitsch, T. 1998, 1999 und 2000 eingehend untersucht.

Eine vielversprechende Technologie bietet die **MF-Vollkonzentration** bei der Herstellung von Weich- und Halbhartkäse ohne Bruchbereitung. Standardisierte Milch wird durch eine $0.1 \mu\text{m}$ Membran filtriert. Dabei werden das Kasein und das Fett aufkonzentriert. Ein Konzentrationsfaktor von 5 – 8 (je nach angestrebter

Trockenmasse im Käse) führt zu einem Konzentrat, welches direkt für die Herstellung von Weichkäse oder Halbhartkäse verwendet werden kann. Nach der Zugabe von Kulturen (Säurewecker und Oberflächenkulturen), Lab (0.2 ‰) und Salz (1 ‰) wird das Konzentrat in eine beliebige Form abgefüllt und während 5 - 20 Minuten bei $35 - 38^\circ\text{C}$ zur Gerinnung gebracht. Nach der Gerinnung wird die Form gestürzt und der Käse während 10 - 20 Tagen bei 14°C gereift. Die Weichkäse (Abbildung 22) sind qualitativ den konventionell hergestellten Produkten ebenbürtig. Mittels gezielter thermischer Behandlung wird der Molkenproteingehalt in der Käsematrix auf den gewünschten Wert eingestellt.

Abb. 22:
Weichkäse ohne
Bruchbearbeitung,
hergestellt an der
FAM (Bachmann et.
al., 2002b)



Auch „Liquid filled cheese“ von zufriedenstellender Qualität lässt sich im Bereich Halbhartkäse herstellen (Bachmann et. al., 2001), wie Versuche an der FAM zeigten. Die Fett- und Proteinübergangsdaten in % von Milch über das Retentat in den Käse sind in Tabelle 8 (s. Seite 29) aufgeführt.

Die Vollkonzentrierung mit MF-Technologien könnte künftig zur Schlüsseltechnologie der kontinuierlichen Käseherstellung werden. Die Vorteile liegen auf der Hand:

- Kontinuierliche Herstellung ohne Bruchbereitung
- Kontinuierliche Abfüllung und Portionierung

- Weniger Verluste
- Weniger Kosten für Energie, Investitionen und Personal
- Gezielte Einstellung der Proteinzusammensetzung
- Innovative Produkte mit Käselaiben von beliebiger Form sind möglich
- Bedeutend bessere Fluxleistungen als bei UF-Konzentration

Verstärkte Forschungsanstrengungen auf diesem Gebiet könnten der einheimischen Käsewirtschaft neue Perspektiven eröffnen.

Die Standardisierung kombiniert mit einer **Teilkonzentration** der Kessmilch mit MF-Technologie hat im Vergleich zu konventioneller Käseherstellung folgende Hauptvorteile (Thomet, 2002a und 2002b):

- Bei einem Protein- und Fettgehalt von 6% kann mit den gleichen Anlagen die doppelte Milchmenge zu Käse verarbeitet werden. Die Investitionskosten sinken.
- Die Kosten für Lab und Starterkulturen sinken.
- Die Ausbeute ist 3 – 5% besser, dank geringeren Kaseinverlusten über die Molke und grösseren Proteinübergangsraten.
- Mit einer gezielten Vorbehandlung der

Milch und einer partiellen Denaturierung lässt sich ein Teil der Molkenproteine in die Käsematrix einarbeiten.

- Das Mengenverhältnis der Hauptbestandteile Protein, Fett und Laktose lässt sich mit Hilfe der MF-Technologie (Filter 0.1 μm) ziemlich genau einstellen.
- Ein Ausgleich der saisonalen Unterschiede ist mit der Standardisierung der Kessmilch möglich.
- Bei höherer Proteinkonzentration im Kessi nehmen die Kaseinverluste in der Molke ab.
- Geschmacksrichtungen wie bitter, sauer, salzig sind weniger ausgeprägt.
- Die Schmelzeigenschaften sind gezielt steuerbar, abhängig vom Wassergehalt und vom Grad der Teilkonzentrierung.

Die Qualität der Käse aus teilkonzentrierter Milch ist vielversprechend. Zudem entsteht als Koppelprodukt ein grosser Teil „ideale Molke“ mit besserem Wertschöpfungspotenzial.

Tabelle 8: Fett- und Proteinübergang bei der Herstellung von Halbhartkäse aus MF-Milch

Prüfmerkmal	n	Milch		Permeat		Retentat		Molke		Käse	
		g / kg	g / kg	% von Milch	g / kg	% von Milch	g / kg	% von Milch	g / kg	% von Milch	% von Retenta
Fett	8	30.0	< 0.1	< 0.1	168	>99.9	10.0	2.0	270	98.1	98.1
Protein	8	31.9	5.39	13.9	153	86.1	13.9	2.9	243	82.8	96.7

7. Ausgewählte Produkte auf Basis Membrantrennverfahren

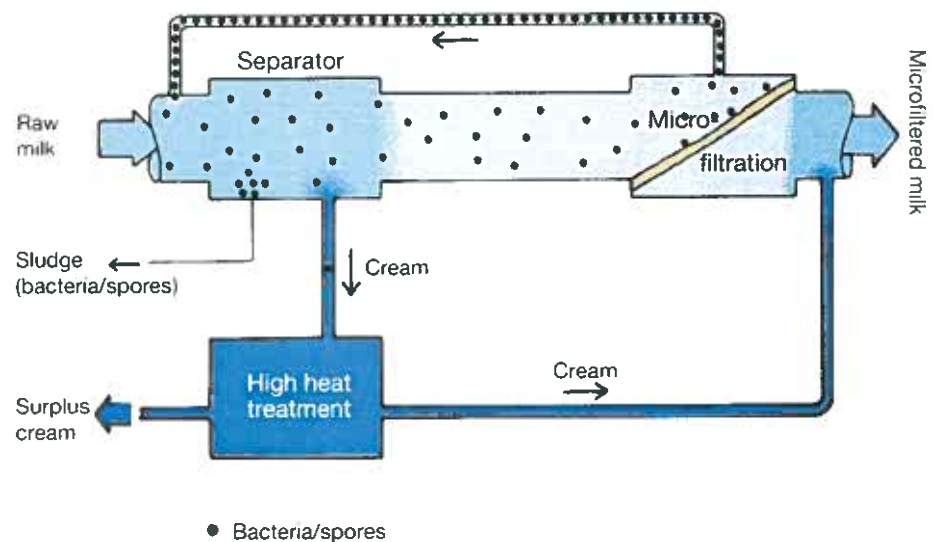
Hygienisierte Rohmilch

Anstelle der traditionellen thermischen Reduktion von Mikroorganismen in Milch und flüssigen Produkten im Milchbereich können seit der Entwicklung der Mikrofiltration (MF) auch Membranen eingesetzt werden. Dabei ist es von Vorteil das Fett bzw. den Rahm separat zu behandeln (Abbildung 23).

Für die Membrantrenntechnik im MF-Bereich ist ein möglichst gleichbleibender Transmembrandruck über das ganze Modul von ausschlaggebender Bedeutung (siehe UTP-Konzept von Tetra Laval). Der TMP beträgt in der Regel 20 - 40 kPa. Die Bakterienreduktion wird im Bereich von 99.9 – 99.99 % (log 3 bis log 4) angegeben. Die übliche Prozesskonfiguration ist eine MF-Behandlung mit einer nachgeschalteten Pasteurisation (Absenz pathogener Keime).

Die Rahmphase erfährt eine Hochtemperaturbehandlung im Bereich 130°C/4 s. Diese neue Technologie eröffnet interessante Möglichkeiten zur besseren Hygienisierung der Ausgangsmilch für Käse- und Trockenmilchprodukte (Säuglingsnahrung). Breite Anwendungsmöglichkeiten bietet die MF-Technologie zudem im Konsummilchsektor (Eberhard, 2001) im Bereich der ESL(Extended Shelf Life)-Milchen. Es handelt sich dabei um pasteurisierte Trinkmilch mit einer verlängerten Haltbarkeit. Dank der Reduktion von Bakterien und Sporen mit Hilfe der MF beträgt die Haltbarkeit einer solchen ESL-Milch 20 Tage. Die Trinkmilchprodukte sind peroxydase-positiv und lassen sich – auch im europäischen Raum – noch als „natürliche“ Frischmilchprodukte vermarkten.

Abb. 23:
Entfernung von
Bakterien und
Sporen mit
Membrantrenn-
verfahren,
(System APV)



Milchproteine

Die MF- und UF-Techniken eröffnen eine ganze Palette von Möglichkeiten, die Anteile bestimmter Milchinhaltsstoffe zu verändern, ohne die chemisch-physikalischen Eigenschaften zu tangieren. Der Einsatz zur Proteinstandardisierung in diversen Produkten (z.B. Sauermilch-

produkte, Käse) zeigt, dass hiermit klare Qualitätsverbesserungen gegenüber der herkömmlichen Technologien erzielt werden können. Abbildung 24 beschreibt den Funktionsmechanismus der Proteinstandardisierung im saisonalen Verlauf.

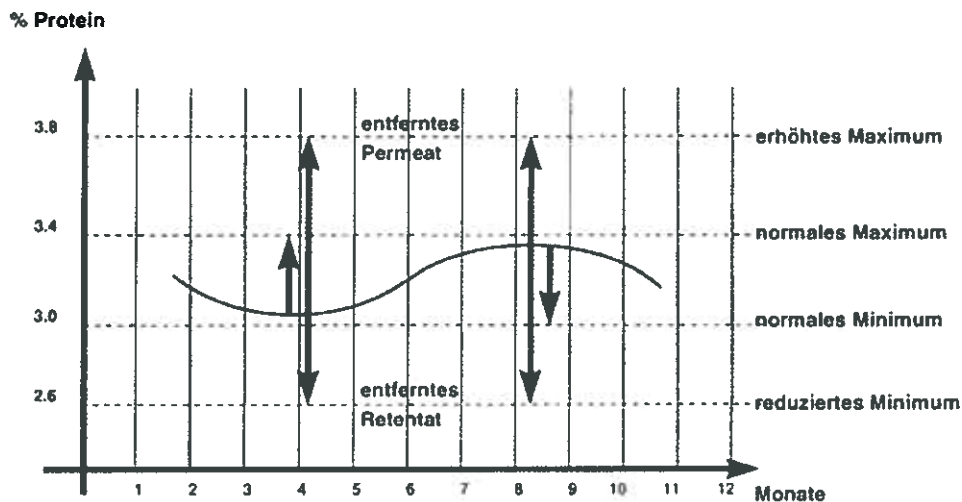
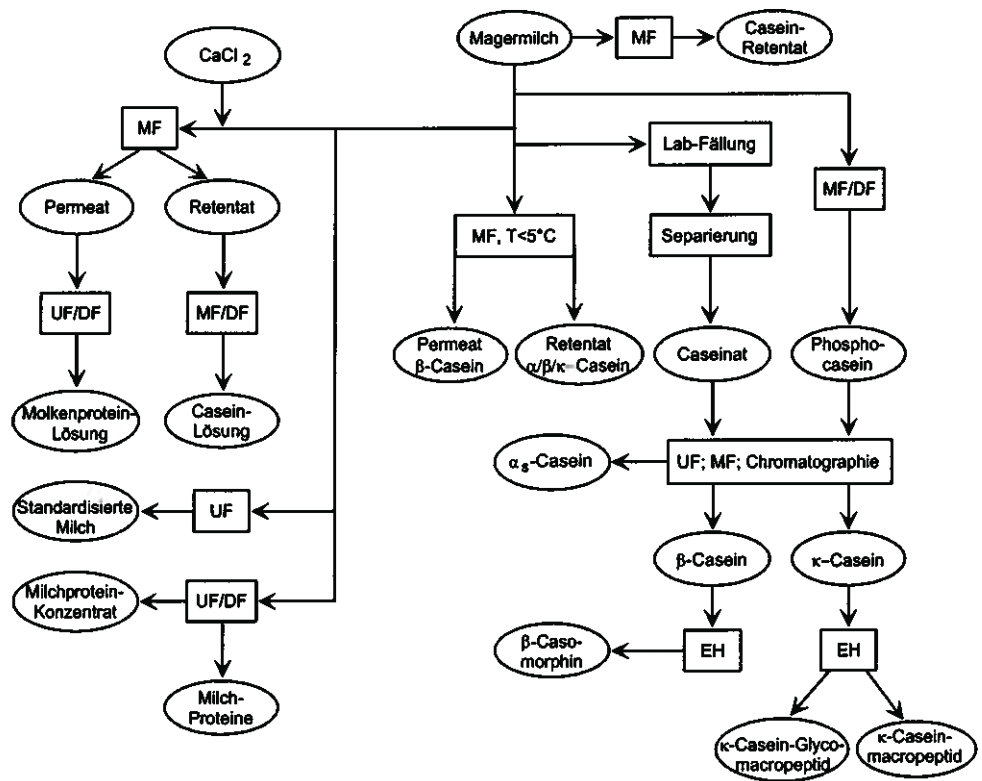


Abb. 24:
Funktionsweise
der Proteinstan-
dardisation mittels
Filtration

Weiter können durch entsprechende Membranwahl und Prozesskombination unter Einbezug von Erhitzungstechniken neue Produkteigenschaften und funktionelle Rohstoffe als Lebensmittelzutaten (Abbildung 25) hergestellt werden. Diese Produkte haben in den letzten

Jahren als Spezialpulver europa- und weltweit einen grossen Zuwachs gefunden. Je nach Zusammensetzung und funktionellen Eigenschaften sind die Pulver prädestiniert für den Einsatz in Milch-, Fleisch, Food-, Säuglings- und Diätprodukten.

Abb. 25:
Anwendung von MF und UF in der Milchprotein-Standardisierung und -Fraktionierung (EH = enzymatische Hydrolyse)



Molkenderivate

Aus Molke lassen sich unter Anwendung der Crossflow Filtrationsprozesse UF, MF, NF und RO die in Abbildung 26 dargestellten Produkte herstellen. Molke ist ein sehr günstiger Rohstoff (Koppel-

produkt der Milchverarbeitung) aus dem sich die verschiedensten Produkte und Halbfabrikate isolieren lassen (Thomet, 2001), welche ernährungsphysiologisch und funktionell interessant sind.

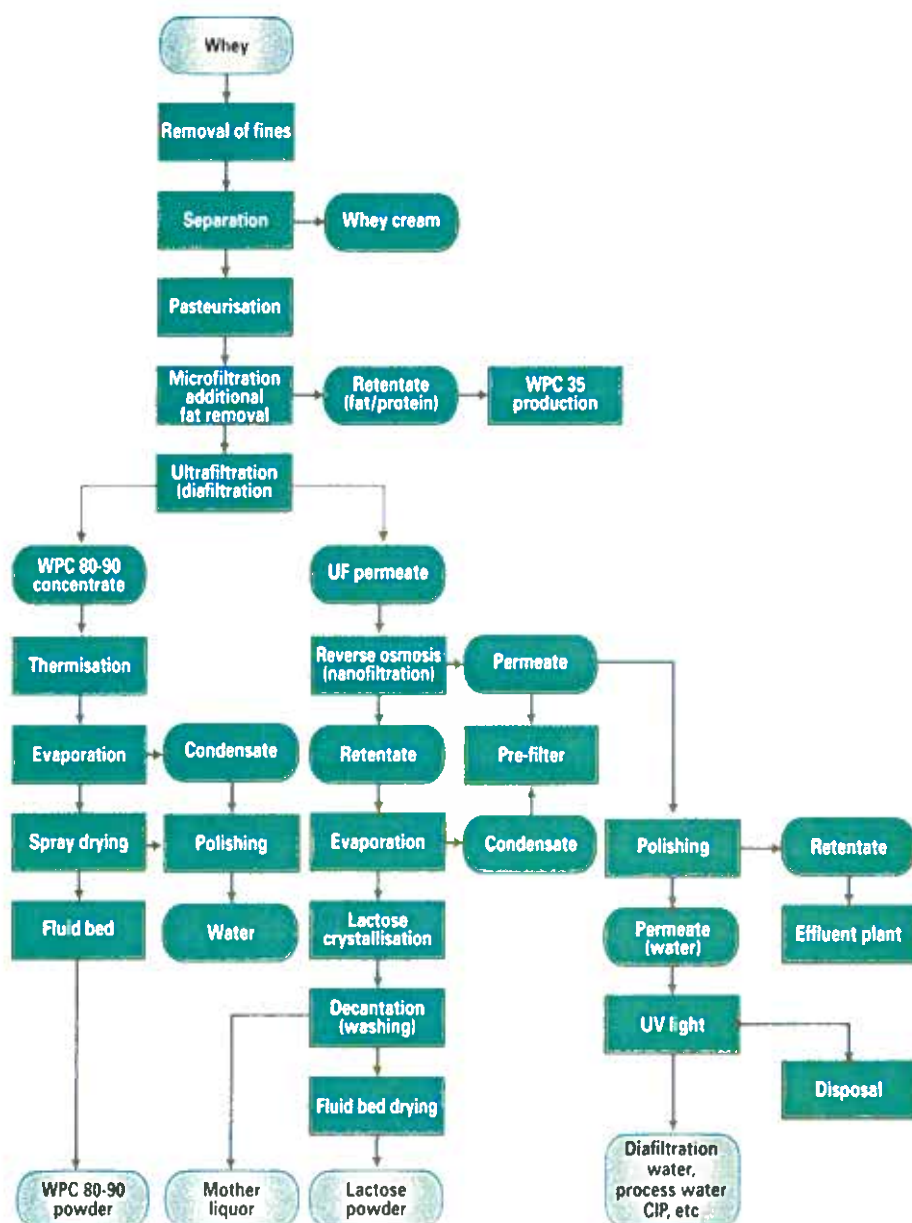


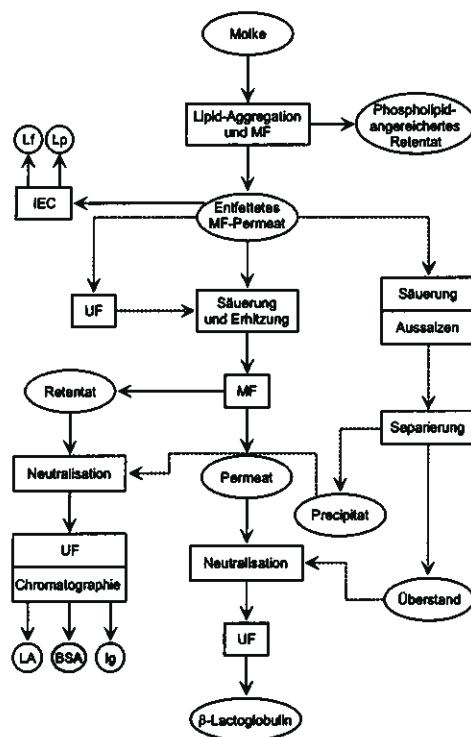
Abb. 26:
Herstellverfahren
der häufigsten
Molkenderivate
(Dairy Industries
International, 2001)

Molkenproteine

Von speziellem Interesse wegen Ihrer funktionellen Eigenschaften (Einfluss auf Produkteigenschaften, Technologie, Ernährung) sind die Molkenproteine. Sie finden deshalb in vielen Produktgruppen, wie Säuglings- und Sportnahrung, diätetischen Lebensmitteln, Nutrazeutika, Milchprodukten, Fleischprodukten, Eiscremeprodukten, Softdrinks etc. Anwendung. Fraktionierungsmöglichkei-

ten mittels Membranprozessen zeigt die Abbildung 27. Die Abtrennung der Molkenproteine mittels Filtrationsoperationen hat im Vergleich zu anderen Trennverfahren den Vorteil, dass die Molkenproteine mehrheitlich im nativen Zustand verbleiben. Mit neuen Filtersystemen ist es möglich, die meisten Proteine der Molke rein abzutrennen und aufzukonzentrieren.

Abb. 27:
Schema der
Technologien
zur Isolierung
spezifischer
Molkenproteine



Fraktionierung von Molkenproteinen.
BSA, bovine serum albumin
IEC, ion-exchange chromatography
Ig, immunoglobulins
LA, α-lactalbumin
Lf, lactoperoxidase

Spezielle Molkenproteine sind die Wachstumsfaktoren, welche zur Gruppe der Immunoglobuline zählen. Sie sind in geringsten Konzentrationen in der Molke (Minorbestandteile) enthalten und verfügen über spezifische Wirkungen im menschlichen und tierischen Körper. Wachstumsfaktoren sind für medizini-

sche und therapeutische Zwecke aber auch in der Human- und Tierernährung willkommen. Die FAM hat ein Filtrationsverfahren zur Isolierung von IGF-1 und IGF-2 (Insulin like Growth Factors) aus Kolostralmilch entwickelt (Eyer, 2001 und Rehberger, 2002).

8. Wirtschaftliche Aspekte der Membranfiltration

Der Erfolg einer neuen Technologie oder Anwendung ist immer von der Wirtschaftlichkeit abhängig. Die Erfassung und Berechnung der wirtschaftlichen Faktoren und Kennziffern, welche die Rentabilität von Filtrationsprozessen beeinflussen, ist anspruchsvoll und aufwändig. Im wesentlichen sind die folgenden Faktoren bei Filtrationsprojekten exakt zu ermitteln und in die Kaufüberlegungen einzubeziehen: Ausbeute und Verluste, Reinheit und Qualität der Fraktionen, Haltbarkeit der Produkte, Investitionskosten, Filterfläche, Energie, Chemikalien (Reinigung), Membrankosten und -beständigkeit, Wartungsaufwand und Filterwechsel. Nachstehend wird ein grober Überblick - mit Schätzung der wichtigsten Kostenparameter - beim Betrieb von Filtrationssystemen in der Milchverarbeitung vermittelt. Diese Zusammenstellung erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit und präzise Wiedergabe der Marktsituation:

Kapitalkosten

Die Investitionskosten sind abhängig von verschiedenen Faktoren wie Grösse der Filteranlage, Produkthanforderungen und Anlagendesign. Weitaus am meisten Gewicht haben bei den Investitionskosten die Membransysteme. Für eine Anlage mit einer Filtrationsleistung von rund

6'000 l/h sind je nach Applikation (inkl. Diafiltration) erfahrungsgemäss 150 – 400 m² UF-Fläche nötig. Es gibt grosse Unterschiede im Preis pro m² Filterfläche je nach Filterart, wie in Tabelle 9 zu erkennen ist:

Bei der Auswahl der Filtermodule soll nicht nur der Preis als einziges Entscheidungskriterium gelten. Jedes System hat bezüglich Fluxleistung, Trenneigenschaften, Foulingbildung, Lebensdauer und Wartungsaufwand seine Vor- und Nachteile. Auf den ersten Blick scheinen beispielsweise die Keramikmodule um ein Mehrfaches teurer zu sein als andere Filterelemente. Die Lebensdauer von Keramikmodulen ist jedoch sehr hoch. Auch ihre chemische und thermische Beständigkeit ist bisher bedeutend besser als bei andern Membrantypen. Zudem erbringen Keramikprodukte zur Magermilchbehandlung im MF-Bereich Fluxwerte zwischen 500 – 700 l/mh im Vergleich zu Spiralwickelmodulen mit 10 – 50 l/mh oder Hohlfasermodulen mit 30 – 50 l/mh, welche in der Regel mit Membranen von etwas geringeren Porendurchmessern (im UF-Bereich) ausgestattet sind. Entscheidend bei der Wahl der Filterelemente ist eine zufriedenstellende Funktion der gewünschten Applikation sowie eine korrekte Trennqualität der ausgewählten Filterprodukte.

Membransystem	Investitionspreis sFr. pro m ²
Spiralwickel-Module	225 - 900
Rohrmodule	1'500 – 2'250
Plattenrahmen-Module	2'250 - 7'500
Hohlfaser-Module	2'250 – 3'000
Keramik-Module	7'500 – 15'000

Tabelle 9:
Geschätzte Investitionspreise für typische Membransysteme, (APV Systems, 2000)

Kosten für Membranersatz

Die Kosten für den Ersatz defekter oder abgenützter Filterelemente sind primär vom Kaufpreis und sekundär von den Konstruktionsbedingungen (Filterfläche pro Volumen) und den Montagekosten pro Filterwechsel abhängig. Tabelle 10 zeigt, in welchem Rahmen sich diese Kosten pro m² Filterersatz bewegen können.

Auch hier gelten die gleichen Überlegungen wie unter dem Kapitel „Kapitalkosten“ beschrieben. Technisch sind bei

der Dimensionierung der Filtergrößen die weltweit anerkannten Normgrößen zu wählen. So ist der Verarbeitungsbetrieb nicht an einzelne Filterlieferanten gebunden und kann vermehrt zu Wettbewerbspreisen einkaufen.

Die gängigen Normgrößen (in Zollmassen) von Filterelementen mit Gehäusen sind 2.5", 4.0" und 8.0". Andere Abmessungen sind bereits Lieferanten-spezifisch und gehören zu den „Exoten“ unter den Filterprodukten.

Tabelle 10:
Kostenschätzung
für den Austausch
der Filterelemente
APV Systems 2000

Membransystem	Investitionspreis sFr. pro m ²
Spiralwickel-Module	50 - 120
Rohrmodule	150 - 200
Plattenrahmen-Module	170 - 250
Hohlfaser-Module	450 - 1'000
Keramik-Module	3'000 - 4'000

Reinigungskosten

Gewöhnlich werden Filtrationsanlagen nach 20 Stunden CIP-gereinigt. Bei speziellen Anwendungen ist die Reinigungsfrequenz auch kürzer. Die Kosten für die Reinigung der Filtersysteme sind ein beträchtlicher Teil der gesamten Operationskosten. Sie sind auch abhängig vom Totalvolumen der Filteranlage.

Ein Rohrmodul mit 0.5-inch Membranen ist wesentlich teurer zu reinigen als ein Spiralwickelmodul mit 5.0 mm Spacers (Abstandhalter), welche pro m² Filterfläche ein geringeres Volumen haben. Eine Abschätzung der Reinigungskosten und ein Vergleich der beiden Systeme ist in Tabelle 11 (s. Seite 37) ersichtlich.

	Anlage 1 (Spiralwickel)		Anlage 2 (Rohrmodul)	
	Menge	sFr. / Tag	Menge	sFr. / Tag
Totalvolumen	1'100 L		2'120	
Wasserverbrauch	16.5 m ²	35	15.0 m ²	34
CIP Säure	3.3 kg	7.5	6.4 kg	12
CIP Lauge	17.6	48	34 kg	95
Desinfektion	6.6 kg	22.5	11 kg	37
Total		113		178

Tabelle 11:
Zusammenstellung
der Reinigungs-
kosten von 2
Filtersystemen
(APV Systems,
2000)

Anlage 1 RO-Anlage mit Spiralwickelmodulen, Molkenkonzentration von 5.5 auf 15% TS, Permeatleistung 15'000 kg/h, TVC-Membrane

Anlage 2 RO-Anlage mit Rohrmodulen, Rohrdurchmesser 0.5 inch, Molkenkonzentration von 5.5 auf 15% TS, Permeatleistung 15'000 kg/h, TVC-Membrane

Energieverbrauch

Membransysteme brauchen vor allem elektrische Energie zur Erreichung der gewünschten Filtrationsdrücke sowie der Überströmgeschwindigkeit im Filtersystem. Ein geringer Energiekonsum ergibt sich für Kühl- und Heizzwecke der Produkte - insbesondere zur Kühlung des Konzentratstromes. Der theoretische Energieverbrauch für den Betrieb jeder einzelnen Filtrationspumpe lässt sich mit nachstehender Formel relativ einfach errechnen:

Elektrizitätsverbrauch (kW) =

$$\frac{\text{Volumenstrom (m}^3/\text{h)} \cdot \text{Druck (bar)}}{\eta \cdot 36}$$

wobei

η = Wirkungsgrad von Pumpe und Motor

η = 0.85 für positive Förderpumpen

η = 0.65 für effiziente Zentrifugalpumpen

Der grösste Elektrizitätsverbrauch bei kontinuierlichen Filtrationsanlagen basiert von den Zirkulationspumpen im Mehrstufensystem. Massnahmen, wie einwandfreie Membranreinigung und Minimierung der Polarisierungseffekte, helfen den Energieverbrauch tief zu halten. Ebenso gelingt es mit einer Erhöhung der Filtrationstemperatur den Energieverbrauch zu reduzieren. Tabelle 12 (s. Seite 38) zeigt eine Übersicht über den approximativen Energieverbrauch der vier gebräuchlichen Filtrationsarten:

Erstaunlicherweise ist bei der Mikrofiltration der Energieverbrauch höher als bei der RO mit den hohen Operationsdrücken. Bei der MF-Technologie sind jedoch zur Vermeidung von Deckschichtbildung sehr hohe Überströmgeschwindigkeiten nötig. Dank dem UTP-System mit gleichzeitiger Permeatzirkulation und geringem Differenzdruck konnte die Deckschichtbildung und somit auch der Energiekonsum reduziert werden.

Tabelle 12:
Approximativer
Energieverbrauch
von Membranfilter-
anlagen (APV
Systems 2000)

Prozesstyp (Crossflow)	Energieverbrauch (kWh) pro m ³ Permeat
Mikrofiltration	9-12
Ultrafiltration	2-5
Nanofiltration	4-6
Umkehrosmose	5-10

Vergleich von Prozesskosten

Die Ermittlung der exakten Prozesskosten im Vorfeld der Beschaffung von Filtrationsanlagen ist nicht einfach, da viele Faktoren die Prozesskosten beeinflussen und die Kostenkalkulationen lediglich auf Annahmen und Modellberechnungen beruhen. Auch ein Kostenvergleich verschiedener Prozesse oder Technologien ist nur bedingt aussagekräftig. In Tabelle 13 ist ein Praxisbeispiel dargestellt, welches dem Milchverarbeiter erste Anhaltspunkte liefert. Die Informationen geben ein Beispiel, wie die Wirtschaftlichkeit

der verschiedenen Technologien ermittelt werden kann.

Der in Tabelle 13 aufgeführte Vergleich zeigt, wie mit einer Kombination von RO- und Eindampftechnik die Wirtschaftlichkeit der Molkenkonzentration steigt. Zu einem ähnlichen Ergebnis kommt eine Studie der Schweizerischen Hochschule für Landwirtschaft (SHL) in Zusammenarbeit mit der Industrie und der FAM (Wyss, 2003).

Tabelle 13:
Kostenvergleich
RO-Konzentration
von Molke mit Mol-
keneindampfung
(APV Systems,
2000)

	sFr. pro Produktionstag			
	5.5 – 15%	15 – 33%		33%
	RO	TVR	RO und TVR	MVR
Membrane	135		135	
Elektrizität	245	108	353	827
Kühlen	147	15	164	32
Heizen	33	212	245	122
Reinigung	101	89	189	114
Total	662	423	1'083	1094
Permeat bez. Kondensat m ³	543	188	732	732
spez. Kosten pro m ³	1.83	3.38	2.22	2.235
Feed:	30'000 kg/h, 6% TS			
Konzentrat:	5'625 kg/h, 32% TS			
Permeat:	18'101 + 6'274 kg/h			
TVR	= Eindampfer mit thermischer Dampfregression			
MVR	= Eindampfer mit mechanischer Dampfregression			

9. Ausblick

Die Entwicklungen in der Membrantrenntechnik sind noch lange nicht abgeschlossen. Es werden laufend neue Anwendungsmöglichkeiten aufgezeigt sowie innovative Produkte basierend auf Membrantechnologien entwickelt. Diese Technologie wird durch den erkennbaren Trend in der Milchverarbeitung gefördert, der hin zur Fabrik geht, in der zunächst die Milch in ihre einzelnen Bestandteile zerlegt wird, welche anschliessend eine spezifische Behandlung erfahren. Die Einzelkomponenten werden nachher wieder bedarfsgerecht zu Produkten zusammengesetzt.

Aber auch allgemeine Trends der Ernährungswissenschaft und Lebensmittelindustrie, wie neue Produkte in den Segmenten Convenience, Functional Food, All Natural etc. aufzeigen, liegen eigentlich gut auf der Linie dieser Technik.

Für die CH-Milchwirtschaft liegt das Potenzial nach unserer Beurteilung in:

- Milch mit verlängerter Haltbarkeit (ESL)
- Keimreduktion im allgemeinen
- Fraktionierung von Proteinen
- Gewinnung bioaktiver Proteine und Peptide
- Frischkäseherstellung, Herstellung von Sauermilchprodukten
- Herstellung von Weich- und Halbhartkäse
- Kontinuierliche Käseherstellung
- Molkenverwertung
- Zuckergewinnung aus Molke
- Entwicklung von Functional Food

Neben den Marktchancen der hergestellten Produkte hängt der Erfolg einer neuen Technologie oder Anwendung auch von der Wirtschaftlichkeit ab.

Die Erfassung und Berechnung der vielen Faktoren und Kennziffern, welche Funktionalität und Rentabilität von Filtrationsprozessen beeinflussen, ist anspruchsvoll und aufwändig. Die Betriebe müssen über Personal mit einer hohen Fachkompetenz im Bereich Filtration verfügen.

Ein Erfahrungsaustausch mit Spezialisten aus dem Fachgebiet kombiniert mit eigenen Versuchserfahrungen empfiehlt sich dabei. Trotz hohen Anforderungen sind Filtrationsverfahren in Zukunft eine Chance für die Milchwirtschaft.

Literaturverzeichnis

APV Systems

Membrane filtration and related molecular separation technologies
ISBN 87-88016 757 (2000)

Bachmann, H.-P., Schafröth, K.:

4 kg Käse aus 6 kg Konzentrat
Schweizerische Milchzeitung Nr. 38 (2001)

Bachmann, H.-P., Schafröth, K.:

3-mal weniger Fett als Maskarpone
Schweizerische Milchzeitung Nr. 21 (2002a)

Bachmann, H.-P., Schafröth, K.:

Käse herstellen ohne Bruchbereitung
Schweizerische Milchzeitung Nr. 25 (2002b)

Cheryan, M.:

Handbuch der Ultrafiltration
Behr's Verlag Hamburg (1990)

Eyer, H.:

„Scale up“ in der Isolierung von Wachstumsfaktoren aus Kolostrum
Schweizerische Milchzeitung Nr. 3 (2001)

Eberhard, P.:

Vor- und Nachteile der ESL (Extended Shelf Life)-Milch
FAM-Info Nr. 423 (August 2001)

Gallmann, P.U.:

Membrantrenntechnik, eine Herausforderung für die Milchtechnologie
Lebensmittel-Technologie 23 (4) 71-75 (1990)

Gallmann, P.U.:

Möglichkeiten der Membrantrenntechnik im Bereiche der Käsereiwirtschaft
Milchwirtschaftliche Berichte Wolfpassing 105. 209-214 (1990a)

Gallmann, P.U.:

Grundlagen der Membranfiltration
Lehrmodul SHL, Zollikofen, unveröffentlicht (2001)

Gallmann, P.U., Eberhard, P., Sieber, R.:

Vor- und Nachteile der ESL-Milch
Agrarforschung 8, 3, 112 – 117 (2001)

Kessler, H.:

Lebensmittel- und Bioverfahrenstechnik
Molkereitechnologie, TU München-Weihenstephan, Verlag A. Kessler, Freising. (1988)

Klantschitsch, T., Puhan, Z., Bachmann, H.P.:

Wirtschaftlichkeit der Mikrofiltration für die Herstellung von Käse aus Silomilch
Lebensm. Techn. 31, 354-358 (1998)

Klantschitsch, T., Puhan, Z., Bachmann, H.P.:

Eine Erfolg versprechende Technologie für die Herstellung von Käse aus Silomilch
Schweizerische Milchzeitung 125, 7 (1999)

Klantschitsch, T.:

Influence of microfiltration on the quality of semi-hard cheese from raw milk with particular emphasis on Clostridium tyrobutyricum spores
Diss. ETH Zürich 13233, 1-114 (1999)

Klantschitsch, T., Bachmann, H.P., Puhan, Z.:

Influence of milk treatment and ripening conditions on quality of Raclette cheese
Le Lait 80, 51-67 (2000)

Königsfeldt, P.:

Invensys Process Systems, Cleaning Procedures (2002)

Kulozik, U., Kessler, H.G.:

Einsatz der Umkehrosmose in der Milchwirtschaft, Teil II: Durchgang gelöster Stoffe und Permeatqualität
Deutsche Milchwirtschaft, (30) 996-997 (1988)

Kulozik, U., Spiegel, T., Huss, M.,

Strohmaier, W.:

Funktional properties of micro-particulated whey proteins in product applications
Proceeding of the 3rd International Whey Conference, Behr's Verlag (2001)

Maubois, J.-L.:

Milk microfiltrate, a convenient starting material for fractionation of whey proteins and derivatives.

Proceeding of the 3rd International Whey Conference, Behr's Verlag (2001)

Lawrence, R.C.:

The use of ultrafiltration technology in cheese making

Bulletin 240 of the IDF, Brussels, 1-15 (1989)

Phillips, D.J.:

Application of Membrane Processing to Cheese Manufacture: Process engineering in the Food Industry, developments and opportunities / edited by Field, R.W., ELSEVIER APPLIED SCIENCE, London, New York (1989)

Rehberger, B.:

Gewinnung physiologisch aktiver Peptide

– Isolierung von Wachstumsfaktoren aus Kolostralmilch

Impuls Ausgabe September (2002)

Thomet, A.:

Molke und Milchserum, Rohstoffe mit Potenzial

Schweizerische Milchzeitung Nr. 47 (2001)

Thomet, A.:

Standardisation der Kessimilch mit MF-Technologie (Teilkonzentration, saisonale Einflüsse, Serie 1)

Interner Bericht FAM Nr. 18 (2002a)

Thomet, A.:

Standardisation der Kessimilch mit MF-Technologie (Teilkonzentration, pH-Veränderung, Serie 2)

Interner Bericht FAM Nr. 19 (2002b)

Winzeler, H.:

Membranfiltration mit hoher Trennleistung und minimalem Energiebedarf

Chimia 44 (9), 288-291 (1990)

Wyss, B.:

Ermittlung von wirtschaftlichen Kennziffern zur FAM NF-Methode

Semesterarbeit Schweizerische Hochschule für Landwirtschaft (2003)

