

# Membranen zur Aufarbeitung von Milchsäure aus Getreide

Winfried Reimann

Institut für Agrartechnik Bornim e.V. (ATB), Potsdam

*Das aus der Fermentation bei der Herstellung von Milchsäure aus Getreidehydrolysaten kommende Reaktionsgemisch enthält neben der Milchsäure, die als Natriumlactat vorliegt, Verunreinigungen, die je nach Art und Reinheitsanforderungen an das Produkt beseitigt werden müssen. Membranverfahren werden zunehmend als Alternative zu den konventionellen Verfahren eingesetzt. Dazu zählen die Nanofiltration in der Fahrweise als Diafiltration sowie die Elektrodialyse. Mit diesen Verfahren können nicht nur ungeladene Komponenten wie Zucker und Proteine, sondern auch Fremdionen wie Chloridionen, aus dem Zielprodukt entfernt werden.*

## Schlüsselwörter

Milchsäure, Aufarbeitung, Nanofiltration, Elektrodialyse

## Einleitung

Unter Aufarbeitung werden die Verfahrensschritte verstanden, die zur Gewinnung des Endproduktes nach einer Fermentation erforderlich sind. Je nach Art und Reinheitsanforderungen an das Produkt werden mehrere Verfahrensschritte miteinander kombiniert, die wiederum einen wesentlichen Einfluss auf die Kosten ausüben. So betragen beispielsweise die Aufarbeitungskosten eines Bioproduktes in Abhängigkeit vom Wert des Produktes bis über 90 % der gesamten Produktionskosten [1]. Deshalb kommt der Aufarbeitung von Fermentationsmedien eine besondere Bedeutung zu. Membranverfahren in Form der Mikro-, Ultra- und Nanofiltration sowie der Umkehrosmose und der Elektrodialyse werden zunehmend als Alternative zu den konventionellen Verfahren wie Filtrieren, Separieren, Kristallisieren, Verdampfen, Trocknen und Ionenaustausch eingesetzt [2]. Sie stellen produktschonende, kosteneffektive, energetisch und sicherheitstechnisch attraktive sowie umweltfreundliche Technologien dar [3, 4]. Durch ihren modularen Aufbau können sie an jede Kapazität angepasst werden. Im Vergleich zu thermischen Verfahren fallen die Energiekosten geringer aus [5].

Die Milchsäure, die nach der kontinuierlich betriebenen Fermentation durch Ultrafiltration gewonnen wird [6], enthält z. T. auch die zur Fermentation eingesetzten gelösten Stoffe, die Verunreinigungen

darstellen und in Abhängigkeit vom Einsatz der Milchsäure zu beseitigen sind. Konventionell erfolgt dies mittels Ionenaustauscherharzen und Aktivkohle. Damit ist jedoch ein hoher Verbrauch an Regenerierungsmitteln (Säure, Lauge und Aktivkohle) sowie ein hoher Abwasseranfall verbunden. Eine Vorreinigung des Produktes durch Membranverfahren kann zur Entlastung der konventionellen Verfahren beitragen.

BÖRGARDTS et al. [7] setzen zur kombinierten Wertstoffgewinnung und Abwasserreinigung am Beispiel der Milchsäureproduktion aus Molkepermeat Membranverfahren zur Aufarbeitung der Milchsäure ein, wobei jedoch nicht die Reinigung der Milchsäure, sondern ihre Gewinnung im Vordergrund steht.

MADZINGAIDZO [8] und DANNER et al. [9] untersuchen die Elektrodialyse mit mono- und bipolaren Membranen zur Reinigung von Natriumlactat nach der Fermentation von Lösungen aus Glucose und von Milchsäure aus Pressflüssigkeit

aus Silage nach einer Ultrafiltration, wobei insbesondere auf die Entfärbung der Milchsäure und die Rückhaltung von nicht umgesetzter Glucose und bestimmter Mineralstoffe eingegangen wird. Auch von LEE et al. [10] wird die Entsalzung von Milchsäure mittels Elektrodialyse untersucht und an Hand experimenteller Daten modelliert.

Erste Ergebnisse eigener Untersuchungen über Aufarbeitungsschritte mittels Membranverfahren zur Biomasseabtrennung, zur Entfärbung der Kulturfiltratlösung sowie zur Konzentrierung, Reinigung und Umwandlung von Natriumlactat in die freie Milchsäure sind bereits in [11] und [12] dargestellt worden, wobei auch über Eigenschaften, Anwendungsgebiete und Fermentation von Milchsäure aus Getreidehydrolysaten ausführlich berichtet wurde.

Im vorliegenden Beitrag werden weiterführende Ergebnisse beim Einsatz von Membranverfahren zur Reinigung des Produktes aus Modell- und praktischen Versuchslösungen aus Technikumsversuchen vorgestellt, die sich insbesondere auf die Permeabilität und Transportgeschwindigkeiten von Chlorid-, Sulfat- und Lactationen beziehen.

## Material und Methoden

Die Untersuchungen zur Nanofiltration wurden mit einer Technikumsanlage mit auswechselbaren Membranen durchgeführt. In der Fahrweise als Diafiltration wurde die abgeführte Permeatmenge durch Zugabe von destilliertem Wasser ersetzt und das Ausgangsmedium im Doppelmantel-Vorlagebehälter gekühlt (Bild 1). Die Registrierung der Tempera-

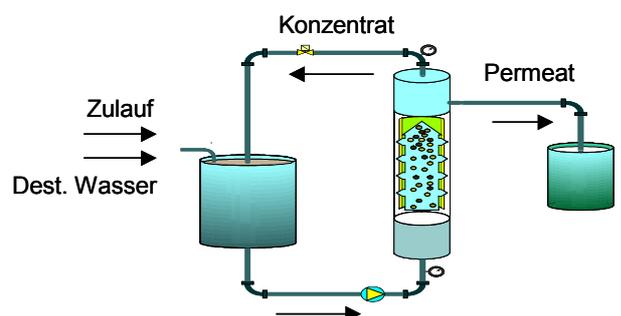


Bild 1: Versuchsaufbau zum Einsatz von Membranen

tur, der Drücke vor und hinter der Membran sowie des Permeatflusses erfolgte regelmäßig während der Versuche.

Die Versuche zur Elektrodialyse wurden mit einer Laboranlage mit 4 Kreisläufen und auswechselbaren Membranstapeln (Typ: OS-ED-100 und OS-ED-100 Quadro) mit monopolaren (AMX/CMX) und bipolaren Membranen durchgeführt (**Bild 2**). Jeder Kreislauf war mit einer Pumpe sowie mit Messeinrichtungen für Durchfluss, Druck, Temperatur, pH-Wert und Leitfähigkeit ausgestattet. Die Vorlagebehälter wurden thermostatiert. Die Stromversorgung des Membranstapels erfolgte über eine Gleichstromversorgungseinheit mit einer regelbaren Stromstärke von 0 bis 5 A, ausgelegt für eine strom- und spannungskonstante Fahrweise. Der Membranstapel ist für eine effektive Membranfläche von 100 cm<sup>2</sup> vorgesehen. Die Zellrahmengröße betrug 15 x 15 cm bei einer Zellrahmendicke von 0,5 mm. Die eingesetzte Membranzahl betrug jeweils 10 AMX-Membranen, 11 CMX-Membranen und 10 bipolare Membranen. Anionen und Kationen wurden mit dem Ionenchromatograph DX-120 von Dionex, Idstein unter nachfolgenden Bedingungen bestimmt: Säule: IonPac AS14 (4 mm) mit Vorsäule (Anionen); IonPac CS12A (4 mm) mit Vorsäule (Kationen); Eluent: 3,5 mM Dinatriumcarbonat, 1 mM Natriumhydrogencarbonat (Anionen), 22 mM Schwefelsäure (Kationen); Flussrate: 1,12 ml/min (Anionen), 1,1 ml/min (Kationen); Detektion: Leitfähigkeit mit Autosuppression; Suppressor: ASRS im Recyclemodus (Anionen), CSRS im Recyclemodus (Kationen); Injektionsvolumen: 25 µl; Elutionsdauer: 12 min (Anionen), 14 min (Kationen)).

## Resultate und Diskussion

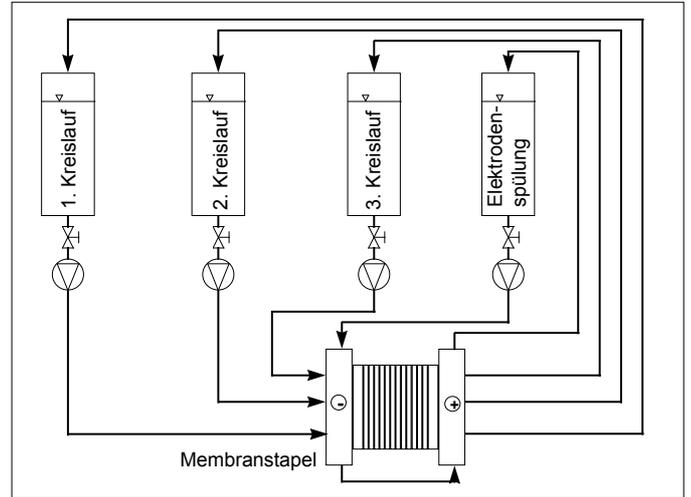
### Nanofiltration

Nanofiltrationsmembranen weisen eine ausgeprägte Ionenselektivität gegenüber ein- und mehrwertigen Ionen auf, wobei mehrwertige Ionen teilweise zurückgehalten werden, während einwertige Ionen die Membran passieren können [13-18]. Auf dieser Grundlage erfolgten Untersuchungen zur Auswaschung von Chloridionen in der Fahrweise als Diafiltration.

Zum Einsatz kamen die in der **Tabelle 1** aufgeführten Membranen.

Voruntersuchungen mit Modell-Lösungen aus Natriumlactat und Milchsäure haben ergeben, dass die Selektivität der Membranen für Lactationen bzw. für Milchsäure auf Grund der unterschiedlichen Dissoziation in diesen beiden Lösungen deutliche Unterschiede aufweist. Die Milchsäu-

Bild 2: Versuchsaufbau zur Elektrodialyse



re passiert unabhängig von der Membran diese wesentlich stärker gegenüber dem Lactation des Salzes, wogegen beim Einsatz von Natriumlactat die Permeation von Lactationen deutlich von der Membranartart bestimmt wird (**Bild 3** und **4**). Mit der Membran NF 90 wurden die schlechtesten Ergebnisse erzielt. Deshalb wurde diese Membran für weitere Untersuchungen ausgeschlossen.

Bei der Entfernung von Chloridionen aus zellfreier Natriumlactat-Lösung konnten mit der Membran OS-50 die besten Ergebnisse gewonnen werden (**Bild 5**), wobei mit einer Waschflüssigkeitsmenge von 140 % der eingesetzten Menge an Natriumlactat-Lösung 99,7 % der Chloridionen ausgewaschen wurden. Der Verlust an Lactationen betrug dabei bis zu 26 %. Die Permeabilität der Membran für Kaliumionen, Lactationen, Phosphationen und Sulfationen verhält sich entsprechend ihren Molekulargewichten (**Bild 6**).

### Elektrodialyse

#### Allgemeines

Die Elektrodialyse ist ein Membranverfahren zur Entfernung, Trennung und Aufkonzentrierung von Ionen aus wässrigen Lösungen. Mit Hilfe von semipermeablen Membranen und elektrischem Strom werden Ionen aus einer weniger konzentrierten Lösung in eine höher konzentrierte Lösung überführt. Die Trennung erfolgt durch das unterschiedliche Rückhaltevermögen der Ionenaustau-

schermembran für Ionen unterschiedlicher Ladung. Das prinzipielle Funktionsschema der Elektrodialyse ist im **Bild 7** dargestellt. Die Anionen (negativ geladene Ionen) wandern aus der Diluat-Zelle in Richtung Anode durch eine Anionenaustauschermembran in die benachbarte Konzentrat-Zelle. Diese Zelle ist in Richtung Anode durch eine Kationenaustauschermembran begrenzt, die ein weiteres Wandern der Anionen verhindert. Für die Kationen (positiv geladene Ionen) gilt analog dasselbe. Der Stromfluss erfolgt innerhalb der Zellen immer in Form eines Ionentransportes. Dieser Stofftransport nimmt seinen Ausgang an den Elektroden, an denen durch Wasserspaltung Protonen und Hydroxylionen erzeugt werden. Dies ist immer mit der Erzeugung von Gas verbunden, welches durch eine permanente Spülung der Zellen von den Elektroden abgespült wird. Diese Spüllösung besteht aus einem Elektrolyten (z. B. Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), der eine ausreichende Leitfähigkeit aufweist und nicht zu unerwünschten Elektrodenreaktionen führt.

Elektrodialysestapel oder -stacks sind sogenannte Flachmembranmodule. Vergleichbar mit einer Filterpresse werden abwechselnd Membranen und Abstandhalter, auch Spacer oder Zellrahmen genannt, hintereinander angeordnet und durch eine Spannvorrichtung zusammengepresst. Die Zu- und Ableitungen in den Stacks sowie die Elektroden sind in den Endplatten untergebracht.

Tabelle 1: Kennwerte verschiedener Nanofiltrationsmembranen zur Reinigung von zellfreier Natriumlactat-Lösung

Kennwerte	Membranbezeichnung				
	NF 45	NF 70	NF 90	OS-15	OS-50
Material	Polyamid	Polyamid	Polyamid	Polymer	Polymer
NaCl-Rückhalt %	-	60	-	15	50
Filterfläche m <sup>2</sup>	2,1	1,4	2,1	2,4	1,4
Druck bar	30	14	15	30	30
Permeatfluss l/m <sup>2</sup> *h	32	18	1,1	8,3	5,4

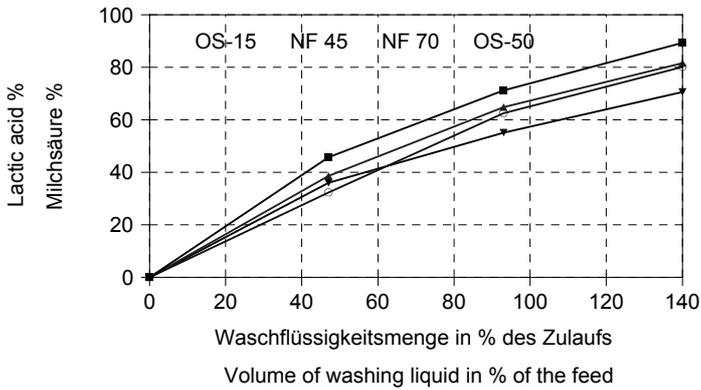


Bild 3: Permeation von Modell-Milchsäure bei der Diafiltration mit verschiedenen Nanofiltrationsmembranen (pH-Wert: 3,6)

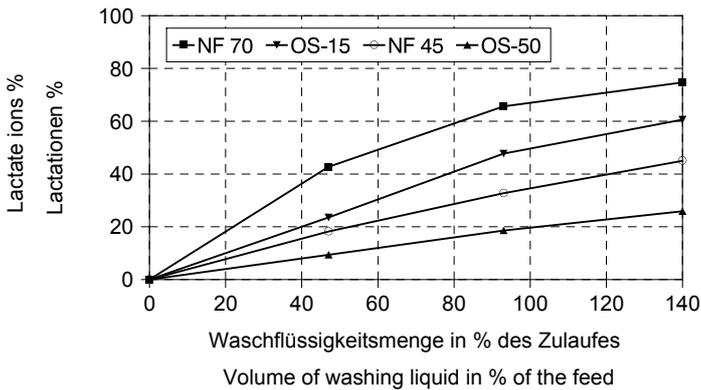


Bild 4: Permeation von Lactationen bei der Diafiltration von Modell-Natriumlactat mit verschiedenen Nanofiltrationsmembranen (pH-Wert: 6,6)

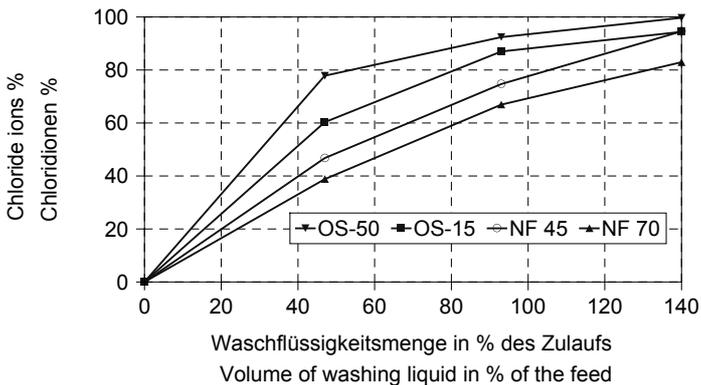


Bild 5: Permeation von Chloridionen bei der Diafiltration von zellfreiem Natriumlactat mit verschiedenen Nanofiltrationsmembranen

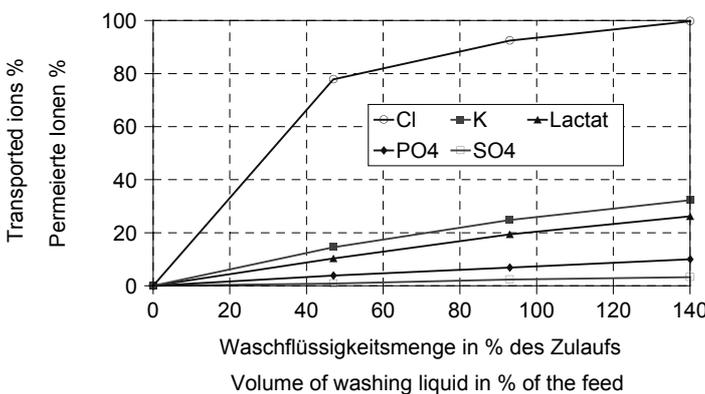


Bild 6: Permeation von Ionen bei der Diafiltration von zellfreiem Natriumlactat mit der Nanofiltrationsmembran OS-50

Bei Konzentrierungsaufgaben von gut löslichen Stoffen wie Kochsalz, Mineralsäuren, Laugen usw. wird die Maximalkonzentration durch den an den Ionentransport in Form einer Hydrathülle gekoppelten Wassertransport limitiert. Außerdem sind die Membranmodule nicht zu 100 % hydraulisch leakagefrei.

Um anorganische und organische Salze in ihre korrespondierenden Säuren und Basen zu überführen, werden bipolare

Membranen eingesetzt. Eine bipolare Membran besteht aus einer anionen- und kationenselektiven Schicht, die durch einen dünnen Wasserfilm voneinander getrennt und zwischen zwei Elektroden so angeordnet sind, dass die Kationenaustauschermembran sich auf der Seite der Kathode und die Anionenaustauschermembran sich auf der der Anode zugewandten Seite befindet. Wird zwischen den beiden Elektroden eine elektrische Potentialdiffe-

renz vorgegeben, so werden alle ionogenen Bestandteile, die sich auf dem Wasserfilm zwischen den Ionenaustauschermembranen befinden, entfernt. Befindet sich in der Schicht zwischen den Membranen ausschließlich Wasser, so kommt es zu einem Transport von Protonen und Hydroxylionen, die auch in reinem Wasser in einer Konzentration von  $10^{-7}$  mol/l vorhanden sind. Die durch das elektrische Feld abtransportierten  $H^+$ - und  $OH^-$ -Ionen werden durch eine dem Gleichgewicht entsprechende Wasserdissoziation nachgeliefert. Somit kommt es zu einer kontinuierlichen Wasserspaltung, die auf Grund der katalytischen Wirkung von unkompenzierten Ladungsträgern in der Zwischenschicht der bipolaren Membran erheblich schneller ist als in freier Lösung. Der Vorteil zur elektrolytischen Wasserzersetzung liegt darin, dass wie im Falle der Elektrodialyse mehrere bipolare Membranen zwischen einem Elektrodenpaar angeordnet werden können. Somit findet die Produktion von Sauerstoff und Wasserstoff an den Elektroden nur einmal statt. Aus diesem Grund ist der theoretische Energiebedarf zur Wasserdissoziation mit bipolaren Membranen nur knapp halb so hoch wie der einer vergleichbaren Elektrolyse [19]. Die entstandenen Protonen und Hydroxylionen bilden mit den Ionen des Salzes ohne Zusatz von Chemikalien die korrespondierende Säure und Base, so dass keine weiteren Abprodukte entstehen.

#### Elektrodialyse mit monopolaren Membranen

Bei Entmineralisierungsprozessen von Molke mittels Elektrodialyse tritt nach [20] eine Disproportionierung in der Zusammensetzung der in der Molke verbliebenen Salze auf. Dies wird u. a. durch unterschiedliche Transportgeschwindigkeiten einwertiger und mehrwertiger Ionen hervorgerufen. Auch in [21] werden diese Effekte beschrieben, die zur Reinigung von Natriumlactat ausgenutzt werden sollen.

Erste Untersuchungen mit Modell-Lösung aus Natriumlactat mit einer Konzentration von 51 g/l ergaben bei einer Stromdichte von 50 mA/cm<sup>2</sup> nach einer Versuchszeit von 60 min bereits einen Transport der Chloridionen von 86 %. Der Transport für Sulfat- und Lactationen betrug nach dieser Versuchszeit 63 % bzw. 34 % (Bild 8).

Dabei zeigt sich in Abhängigkeit von der Zeit für die Chlorid- und Sulfationen ein degressiver gegenüber einem linearen bis progressiven Ionentransport für Lactationen. Obwohl Sulfationen auf Grund ihrer Zweiwertigkeit eine höhere Transportrate gegenüber einwertigen Chloridionen ha-

ben, weisen die Chloridionen mit dem geringeren Molekulargewicht eine höhere Permeabilität auf.

Beim Vergleich früherer Ergebnisse mit einer zellfreien Natriumlactatlösung nach der Fermentation konnte der im Bild 8 dargestellte Verlauf für Modell-Lösung bestätigt werden.

Entsprechend dem Faradayschen Gesetz steigt in Abhängigkeit von der Stromdichte der Ionentransport mit zunehmender Stromdichte an (**Bild 9**). Gegenüber den Lactationen ist der Anstieg und damit die Transportgeschwindigkeit für Chloridionen bei gleicher Stromdichte größer. Für Lactationen fällt der Einfluss der Stromdichte auf den Ionentransport erst bei einer Stromdichte von 50 und 25 mA/cm<sup>2</sup> nach einer Versuchszeit von 60 min deutlich aus.

Zur Erzielung einer hohen Stromausbeute ist im vorzulegenden Konzentrat eine entsprechende Anfangsleitfähigkeit erforderlich. Dies wird erreicht, indem üblicherweise destilliertes Wasser mit Natriumlactat auf eine bestimmte Leitfähigkeit (5-10 mS/cm) eingestellt wird. Da dieses Salz bei Reinigungsaufgaben als Verlust auftritt, wurde der direkte Einsatz von reinem Leitungswasser und destilliertem Wasser als Konzentratvorlage untersucht. In **Bild 10** ist dargestellt, dass bei Verwendung von destilliertem Wasser, dass mit Natriumlactat auf die vorgegebene Leitfähigkeit eingestellt wurde, wie erwartet der höchste Chloridionentransport erfolgt. Verringert sich die Anfangsleitfähigkeit in der Konzentratvorlage, wie bei reinem Leitungswasser (0,8 mS/cm) oder destilliertem Wasser (0,015 mS/cm), so nimmt der Chloridionentransport zwar ab, der Lactationentransport wird jedoch erst nach einer Versuchszeit von 60 min beeinflusst.

#### Elektrodialyse mit bipolaren Membranen

Wie bei der Elektrodialyse mit monopolarer Membranen erfolgt auch beim Einsatz von bipolaren Membranen eine Disproportionierung in der Zusammensetzung der Ionen durch unterschiedliche Transportgeschwindigkeiten und Permeabilitäten.

Untersuchungen mit Modell-Lösung aus konzentriertem Natriumlactat mit einer Konzentration von 209 g/l, das mit definierten Mengen an Natriumchlorid und Natriumsulfat versetzt wurde, zeigen bei einer Stromdichte von 50 mA/cm<sup>2</sup> in Abhängigkeit von der Zeit für die Chloridionen in den ersten 30 min einen wesentlich stärkeren Anstieg und damit eine höhere Transportgeschwindigkeit gegenüber den Sulfat- und Lactationen (**Bild 11**). Nach dieser Versuchszeit sind bereits 63,5 % und nach 120 min 98,4 % der gesamten

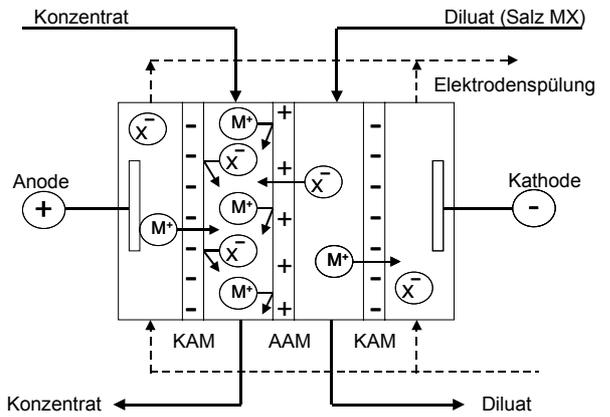


Bild 7: Funktionsschema der Elektrodialyse

KAM = Kationenaustauschermembran AAM = Anionenaustauschermembran

Bild 8: Zeitliche Änderung des Ionentransports bei der Konzentrierung von Natriumlactat-Modell-Lösung (NaL) durch Elektrodialyse mit monopolarer Membranen (NaL = 51 g/l; Stromdichte = 50 mA/cm<sup>2</sup>; Konzentratvorlage: 1 l Salzlösung)

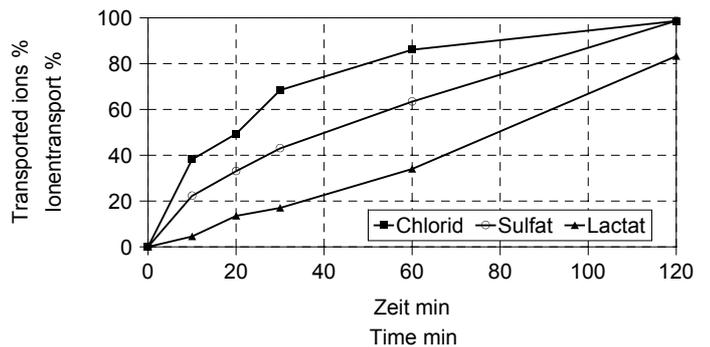


Bild 9: Zeitliche Änderung des Ionentransports (Chlorid Cl und Lactat Lac) bei der Konzentrierung von Natriumlactat-Modell-Lösung (NaL) durch Elektrodialyse mit monopolarer Membranen bei verschiedenen Stromdichten (Konzentratvorlage: 1 l Salzlösung; NaL = 51 g/l)

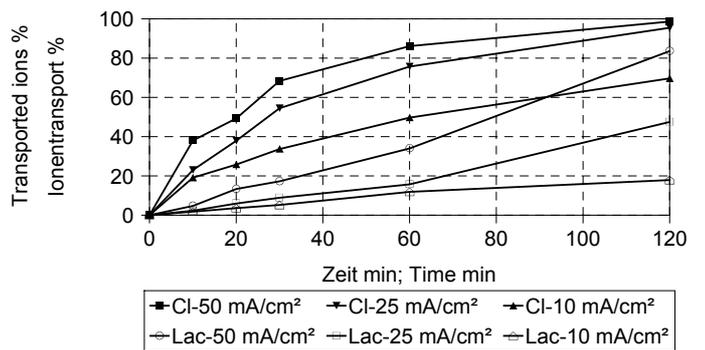
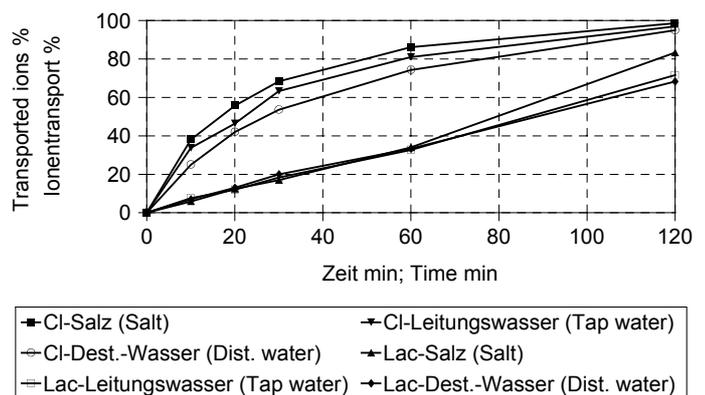


Bild 10: Ionentransport (Chlorid Cl und Lactat Lac) bei der Konzentrierung von Natriumlactat-Modell-Lösung (NaL) durch Elektrodialyse mit monopolarer Membranen in Abhängigkeit von der Zeit für verschiedene Arten von Konzentratvorlagen (je 1 l Salzlösung, Leitungswasser und Dest.-Wasser) (NaL = 51 g/l; Stromdichte = 50 mA/cm<sup>2</sup>)



Chloridionen in den Säurekreislauf transportiert worden. Die einwertigen Chloridionen weisen gegenüber den zweiwertigen Sulfationen eine höhere Permeabilität auf.

Frühere Untersuchungen zur Umwandlung von konzentriertem, durch Fermentation erzeugtem Natriumlactat bestätigen die im Bild 11 dargestellten Ergebnisse mit Modell-Lösung.

In Abhängigkeit von der Stromdichte steigt der Chloridionentransport entsprechend dem Faradayschen Gesetz mit zunehmender Stromdichte an (**Bild 12**). Für Lactationen ist der Unterschied bei einer Stromdichte von 25 und 10 mA/cm<sup>2</sup> weniger deutlich ausgeprägt.

Den Einfluss der Leitfähigkeit in der Säurevorlage auf den Ionentransport zeigt **Bild 13**. Dafür wurden verschiedene Vorlagen getestet. Neben destilliertem Was-

Bild 11: Zeitliche Änderung des Ionentransports bei der Umwandlung von konzentrierter Natriumlactat-Modell-Lösung (NaL) in Milchsäure durch Elektrodialyse mit bipolaren Membranen (NaL = 209 g/l; Stromdichte = 50 mA/cm<sup>2</sup>)

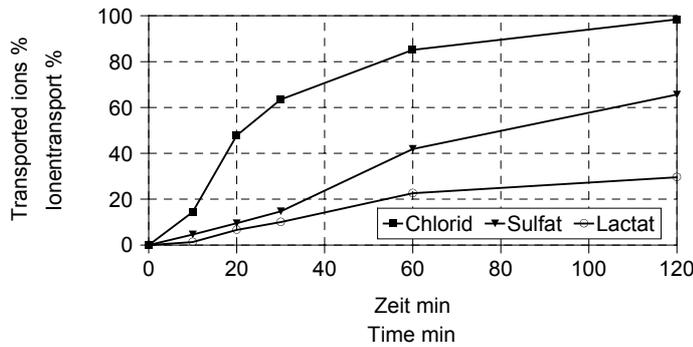


Bild 12: Zeitliche Änderung des Ionentransports (Chlorid Cl und Lactat Lac) bei der Umwandlung von konzentrierter Natriumlactat-Modell-Lösung (NaL) in Milchsäure durch Elektrodialyse mit bipolaren Membranen bei verschiedenen Stromdichten (NaL = 209 g/l)

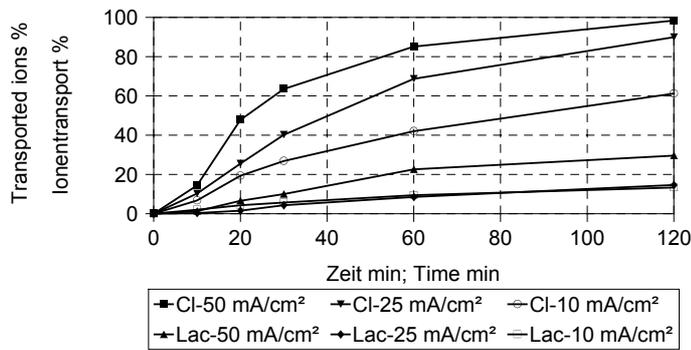
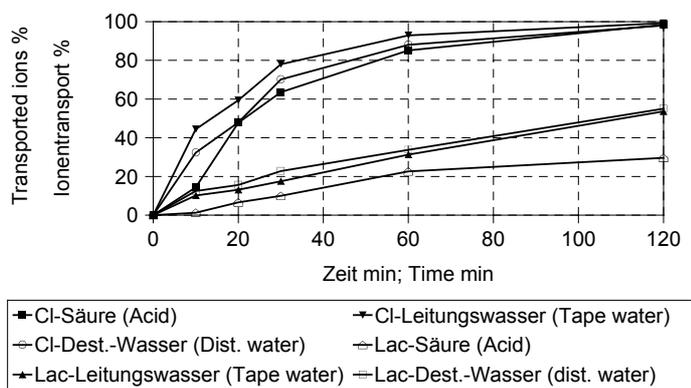


Bild 13: Zeitliche Änderung des Ionentransports (Chlorid Cl; Lactat Lac) bei der Umwandlung von konzentrierter Natriumlactat-Modell-Lösung (NaL) in Milchsäure durch Elektrodialyse mit bipolaren Membranen mit verschiedenen Medien als Säurevorlage (Säure, Leitungswasser und destilliertes Wasser; NaL = 209 g/l; Stromdichte = 50 mA/cm<sup>2</sup>)



ser, das mit Milchsäure auf eine Leitfähigkeit von 2,75 mS/cm bei einer Konzentration der Milchsäure von 13 g/l eingestellt wurde, wurden sowohl reines Leitungswasser mit einer Leitfähigkeit von 0,8 mS/cm als auch destilliertes Wasser mit einer Leitfähigkeit von 0,015 mS/cm untersucht. Dabei traten für den Ionentransport beim Einsatz von Leitungswasser die höchsten Werte auf. Damit besteht bei einer Reinigung der Säure die Möglichkeit, die Verluste an Milchsäure beim Austausch der Säurevorlage nach kurzer Laufzeit der Elektrodialyse zu minimieren.

## Schlussfolgerungen

Zur Reinigung von Milchsäure, die durch Fermentation gewonnen wird, werden überwiegend kosten- und abwasserintensive Ionenaustauscherharze verwendet. Mit den vorgelegten Versuchsergebnissen konnte gezeigt werden, dass eine Reinigung von Fermentationsmedien auch mit Membranverfahren möglich ist. Dazu

wurde die Nanofiltration in der Fahrweise als Diafiltration eingesetzt. Da Chloridionen eine höhere Permeabilität gegenüber Lactationen aufweisen, können diese ausgewaschen werden, wobei die Waschwassermenge minimiert werden kann. Mit dem Einsatz der Elektrodialyse mit mono- und bipolaren Membranen besteht die Möglichkeit, unter Ausnutzung unterschiedlicher Permeabilitäten und Transportgeschwindigkeiten der Ionen Chlorid von Lactationen zu trennen. Durch Einstellung einer optimalen Stromdichte sowie durch Beachtung der Anfangsleitfähigkeit für die Konzentrat- bzw. Säurevorlage kann ein maximaler Chloridionentransport bei gleichzeitiger Reduzierung der Verluste an Lactationen erreicht werden, wodurch Reinigungseffekte bei der Aufarbeitung von Natriumlactat bzw. Milchsäure erzielt werden können.

## Literatur

- [1] Kasche, V.: Achema-Berichte: Aufarbeitung von Bioprodukten. Chem. Ing. Tech. 72 (2000) H. 12, S. 1448
- [2] Sirkar, K.K., P.V. Shanbhag und A.S. Kovvali: Membrane in a reactor: A functional perspective. Ind.Eng.Chem.Res. 38 (1999) S. 3715-3737
- [3] Paul, D. und K. Ohlrogge: Membrane separation processes for clean production. Environ.Prog. 17 (1998) S. 137-141
- [4] Schmidt, M., S. Mirza, R. Schubert, H. Rodicker, S. Kattaneck und J. Malisz: Nanofiltration membranes for separation problems in organic solutions. Chem-Ing-Tech. 71 (1999) S. 199-206
- [5] Cheryan, M. und N. Rajagopalan: Membrane processing of oily streams. Wastewater treatment and waste reduction. J.Membrane.Sci. 151 (1998) S. 13-28
- [6] Reimann, W. und I.B. Yeo: Membranen zur Aufarbeitung von Milchsäure. F & S Filtrieren und Separieren 13 (1999) H. 4, S. 167-170
- [7] Börgardt, P., W. Kruschke und W. Trösch: Kombinierte Wertstoffgewinnung und Abwasserreinigung durch den Einsatz von Membranverfahren am Beispiel der Milchsäureproduktion aus Molkepermeat. Chem.-Ing.-Tech. 66 (1994) Nr. 9, S. 1270-1271
- [8] Madzingaidzo, L.: 1999. Ph.D thesis, IFA Tulln, University of Agriculture, Vienna
- [9] Danner, H., L. Madzingaidzo, M. Holzer, L. Mayrhuber und R. Braun: Extraction and purification of lactic acid from silages. Bioresource Technology 75 (2000) 181-187
- [10] Lee, E.G., S.H. Moon, Y.K. Chang, I.K. Yoo und H.N. Chang: Lactic acid recovery using two-stage electrodialysis and its modelling. J.Membrane Sci. 145 (1998) 53-66
- [11] Richter, K., W. Reimann, Ch. Berthold und I.B. Yeo: Produktion von Milchsäure aus Getreidehydrolysaten. Agrartechnische Forschung. 4 (1998) H. 2, S. 130-141
- [12] Richter, K., W. Reimann und I.B. Yeo: Milchsäuregewinnung aus Getreide. Landtechnik 53 (1998) H. 3, S. 128-129
- [13] Rautenbach, R.: Membranprozesse – von den Grundlagen zu aktuellen Anwendungen. Hochschulkurs RWTH Aachen, 29.-31.Mai 1996, Aachen
- [14] Linde, K. and A.S. Jonsson: Nanofiltration of salt solutions and landfill leachate. Desalination. 103 (1995) 223-232
- [15] Ujang, Z. and G.K. Anderson: Performance of low pressure reverse osmosis membrane (LPROM) for separating mono- and divalent ions. Water.Sci.Technol. 38 (1998) 521-528
- [16] Peeters, J.M.M., J.P. Boom, M.H.V. Mulder und H. Strathmann: Retention measurements of nanofiltration membranes with electrolyte solutions. J.Membrane. Sci. 145 (1998) 199-209
- [17] Rautenbach, R. und M. Lohscheidt: Einfluß der Kationen auf die Selektivität von Nanofiltrationsmembranen. F&S Filtrieren und Separieren 12 (1998) 4, S. 155-160

- [18] *Van den Bruggen, B.; J. Schaep; D. Wilms and C. Vandecasteele*: Influence of molecular size, polarity and charge on the retention of organic molecules by nanofiltration. *J.Membrane.Sci.* 156 (1999) 29-41
- [19] *Strathmann, H., H.-J. Rapp, B. Bauer and C.M. Bell*: Theoretical and practical aspects of preparing bipolar membranes. *Desalination* 90 (1993) 303-323
- [20] *Huschka, H.-G.*: Einsatz der Elektrodialyse in der Lebensmittel- und pharmazeutischen Industrie. Tokuyama Europa GmbH, Eurodia Industries SA, Stuttgart Office, Pfullingen, 11 S.
- [21] *Sata, T.*: Studies on anion exchange membranes having permselectivity for specific anions in electrodialysis-effect of hydrophilicity of anion exchange membranes on permselectivity of anions. *J.Membrane. Sci.* 167 (2000) 1-31

**Autor**

Dr. Winfried Reimann  
Institut für Agrartechnik Bornim e. V.  
Abteilung Bioverfahrenstechnik  
Max-Eyth-Allee 100  
14469 Potsdam  
Tel.: +49/(0)331/5699-113  
Fax: +49/(0)331/5699-849  
E-mail: [wreimann@atb-potsdam.de](mailto:wreimann@atb-potsdam.de)

---