

Optimierung der Elektrodialyse bei der Aufarbeitung von Milchsäure

Winfried Reimann*

Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e. V., Max-Eyth-Allee 100, D-14469 Potsdam, Germany

Kurzfassung - Abstract

Zur Produktion biologisch abbaubarer Kunststoffe gewinnt Milchsäure zunehmend an Bedeutung. Bei der kontinuierlichen Fermentation von Glucose aus Hydrolysat von Roggenschrot entsteht Natriumlactat in löslicher Form. Mit Hilfe der Elektrodialyse über mono- und bipolare Membranen erfolgt eine Aufkonzentrierung und Konversion in Milchsäure. Die Elektrodialyse wird in Abhängigkeit von der direkt messbaren Leitfähigkeit im Diluatkreislauf (monopolar) bzw. Salzkreislauf (bipolar) betrieben. Die durchgeführten Untersuchungen haben ergeben, dass allein die Leitfähigkeit aufgrund verschiedener Mineralstoffe im Ablauf der Fermentation zu Aussagen führen kann, die einer optimalen Fahrweise der Elektrodialyse entgegenstehen. Dagegen führen die ebenfalls direkt messbaren Werte für die Stromstärke und die Spannung während des Ablaufes der Elektrodialyse zu eindeutigen Aussagen zum Stofftransport im elektrischen Feld. Mit dieser einfachen Methode lässt sich für das dargestellte Beispiel die Konzentration für Natriumlactat von 219 g/l auf 235 g/l steigern. Der Wirkungsgrad (Stromausbeute) erhöht sich dabei auf 84 %. Bei der Konversion des Natriumlactats in Milchsäure erhöht sich die Konzentration der Milchsäure von 171 g/l auf 182 g/l bei einer Zunahme des Wirkungsgrades auf 77 %.

Schlüsselwörter: Aufarbeitung, Milchsäure, Elektrodialyse, Wirkungsgrad

Optimization of electro dialysis in downstreaming of lactic acid

Lactic acid is becoming increasingly important for the production of biodegradable polymers. Sodium lactate in soluble form develops in the continuous fermentation of glucose from hydrolysate of shredded rye. Concentration of the sodium lactate and conversion into lactic acid take place with the help of electro dialysis using mono-polar and bipolar membranes. The electro dialysis is usually operated on the basis of the conductivity in the diluate circuit (mono-polar) and salt circuit (bipolar) respectively. The investigations performed revealed that due to different mineral nutrients in the fermentation process, the conductivity alone can lead to statements, that oppose optimal operation of the electro dialysis. In contrast, the values for current and voltage that are likewise directly measurable lead to clear indices for the mass transport in the electrical field in the course of the electro dialysis. In the example considered, this simple method makes it possible to increase the concentration for sodium lactate from 219 g/l to 235 g/l with a rise in current efficiency to 84 %. During the conversion of the sodium lactate into lactic acid the lactic acid concentration increases from 171 g/l to 182 g/l with a rise in current efficiency to 77 %.

Keywords: Downstreaming, lactic acid, electro dialysis, efficiency

1 Einleitung

Milchsäure (HLac) ist eine organische Säure, die ein weites Anwendungsgebiet aufweist wie z. B. in der Nahrungsmittelindustrie, der Getränkeproduktion, der pharmazeutischen und chemischen Industrie und der Medizin (Vick Roy 1985, Van Velthuisen 1994). Der Einsatz von Milchsäure aus nachwachsenden Rohstoffen spielt besonders für die Produktion von biologisch abbaubaren Kunststoffen eine immer größere Rolle (Datta et al. 1995, Vaidya et al. 2005). Zur Herstellung von Poly-Milchsäure werden jedoch hohe Reinheitsanforderungen an die Milchsäure gestellt. Konventionelle Prozesse zur Aufarbeitung basieren auf Fällungsstufen, die eine große Menge an chemischen Abwässern erzeugen (Bailey & Ollis 1986). Dank alternativer Technologien wie der zweistufigen Elektrodialyse (ED) mit mono- und bipolaren Membranen (Glassner & Datta 1990, Lee et al. 1998) können die Umweltbelastungen und die Betriebskosten der tradi-

tionellen Fällungsprozesse reduziert werden. Membranverfahren werden zunehmend als Alternative zu den konventionellen Verfahren eingesetzt (Sirka et al. 1999). Sie stellen produktschonende, kosteneffektive, energetisch und sicherheitstechnisch attraktive sowie umweltfreundliche Technologien dar (Paul & Ohlrogge 1998, Reimann 2005a). Durch konventionelle Elektrodialyse (EDM) ist eine Entsalzung, Reinigung und Konzentrierung von Natriumlactat (NaLac) nach der Fermentation möglich (Nolasco-Hipolito et al. 2001, Bazinet 2004, Fidaleo & Moresi 2004, Wee et al. 2005) und das konzentrierte Natriumlactat kann in Milchsäure durch die wasserspaltende Elektrodialyse mit bipolaren Membranen (EDB) in Milchsäure und Natronlauge konvertiert und weiter gereinigt werden (Persson et al. 2001, Habova et al. 2004a, 2004b, Reimann 2005b). Die Effektivität der Elektrodialyse wird jedoch durch verschiedene Stoff- und Volumenströme durch die Membranen wie Diffusion und Mig-

* Corresponding author. Tel: ++49 (0) 331 5699 113; Fax: ++49 (0) 331 5699 849; E-mail: wreimann@atb-potsdam.de

ration sowie Osmose und Elektroosmose beeinflusst (Bailly et al. 2001, Kedem 2002, Roux-de Balman et al. 2002), wodurch die Konzentrierung von Natriumlactat begrenzt und der Wirkungsgrad verringert wird. Da mit zunehmender Konzentration des Salzes die erforderliche Fläche an bipolaren Membranen bei der EDB zur Konversion des Salzes reduziert werden kann (Bailly et al. 2001), stellt eine optimierte Fahrweise der Elektrodialyse einen bedeutenden Faktor zur Reduzierung von Investitions- und Betriebskosten dar.

Das Ziel der Untersuchungen ist es, durch Auswertung messbarer Einflussgrößen die Versuchsdauer bei der Elektrodialyse von Natriumlactat nach der kontinuierlichen Fermentation von Glucose aus Hydrolysat von Roggenschrot zu optimieren und damit den Wirkungsgrad zu erhöhen.

2 Material und Methoden

2.1 Untersuchungsmedium

Für die Untersuchungen wird Natriumlactat nach der kontinuierlichen Fermentation von Glucose aus Hydrolysat von Roggenschrot mit einer Natriumlactat-Konzentration von 43,2 g/l und einer Leitfähigkeit von 25,3 mS/cm eingesetzt. Von der Fermentationslösung werden durch Ultrafiltration mit der Kapillarmembran MD 020 UP 03N aus Polyethersulfon mit einer Trenngrenze von 0,03 μm (MICRODYN, Wuppertal, Deutschland) die Biomasse und durch Ionenaustausch mit dem Chelatharz RCH46 (Eurodia Industrie SA, Pfullingen, Deutschland) mehrwertige Kationen wie Ca und Mg abgetrennt. Die so vorgereinigte Natriumlactat-Lösung wird anschließend durch Elektrodialyse mit monopolaren Membranen bis zu einer Leitfähigkeit im Diluat von 1,5 mS/cm konzentriert. Danach erfolgt eine Konversion des konzentrierten Natriumlactats durch Elektrodialyse mit bipolaren Membranen in Milchsäure und Natronlauge. Die Leitfähigkeit der gebildeten Natronlauge wird auf 250 mS/cm durch Verdünnung mit destilliertem Wasser eingestellt. Aufgrund der begrenzten Menge an vorhandener Natriumlactat-Lösung musste auf eine Wiederholung der Versuche verzichtet werden.

2.2 Monopolare (EDM) und bipolare Elektrodialyse (EDB)

Die Versuche zur mono- und bipolaren Elektrodialyse werden in einer Laboranlage mit 4 Kreisläufen (Abb. 1) und dem Membranstapel OS-ED-100 Quadro durchgeführt (OSMOTA Membrantechnik GmbH, Rutesheim, Deutschland). Für die monopolare Elektrodialyse werden die Membranen AMX/CMX und für die bipolare Elektrodialyse die gleichen monopolaren Membranen AMX/CMX sowie bipolare Membranen von Neosepta, Tokuyama Corp., Japan verwendet.

Die Zellrahmengröße beträgt 15 x 15 cm bei einer Zellrahmendicke von 0,5 mm. Die effektive Membranfläche beträgt 100 cm². Es werden jeweils 10 Anionentauscher-, 11 Kationentauscher- und 10 bipolare Membranen eingesetzt. Jeder Kreislauf ist mit einer Pumpe sowie mit Messeinrichtungen für Durchfluss, Druck, Temperatur, pH-Wert und Leitfähigkeit ausgestattet. Die Messung der Leitfähigkeit, des pH-Wertes und der Temperatur wird mit dem Messgerät MultiLine P3pH/LF (WTW Weilheim, Deutschland) durchgeführt. Die Stromversorgung des Membranstapels erfolgt über eine Gleichstromversorgungseinheit (EA-PS 7065 – 10 A, EA Elektro-Automatik GmbH, Viersen, Deutschland) mit einer regelbaren Spannung von 0 bis 50 V und einer Stromstärke von 0 bis 10 A, ausgelegt für eine strom- und spannungskonstante Fahrweise.

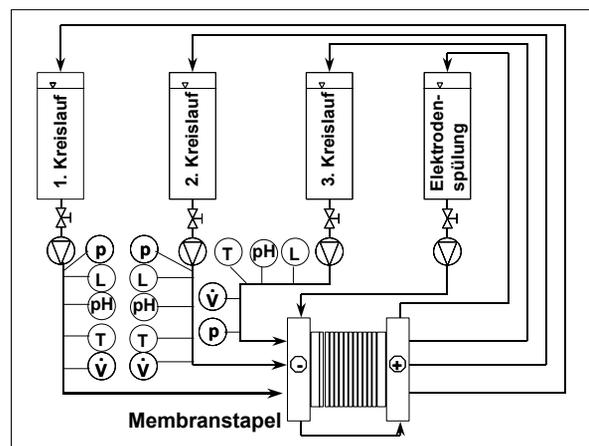


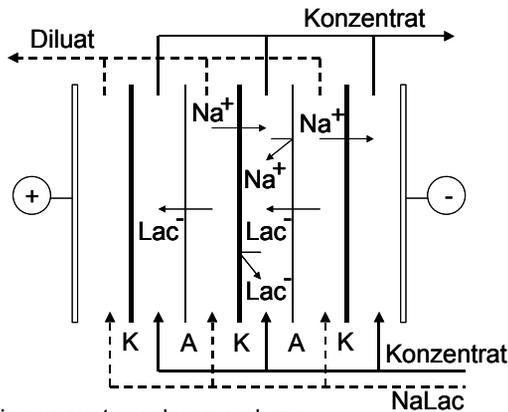
Abb. 1: Versuchsaufbau zur Elektrodialyse (Messgeräte für Druck p, Leitfähigkeit L, pH-Wert pH, Temperatur T und Durchfluss \dot{V})

Die Versuche werden in der batch-Fahrweise durchgeführt. Zur Aufnahme des Diluates (entsalzte Lösung) und des Konzentrates bei der EDM, des Salzes, der Säure und der Lauge bei der EDB sowie der Elektroden-spüllösung dienen vier Vorlagebehälter mit jeweils 10 l Inhalt. Die Vorlagebehälter werden auf eine Temperatur zwischen 33 und 36 °C thermostatiert. Die Elektroden-spüllösung zirkuliert kontinuierlich durch alle Stapel-Konfigurationen, um den Stromfluss zu gewährleisten und das Gas, das durch Reaktion an den Elektroden während des Betriebes der ED gebildet wird, abzuleiten. Aus jeder Kammer werden nach definierten Zeiten 10 ml Probe für die Bestimmung von Milchsäure und anorganischen sowie organischen Stoffen gezogen.

Durch konventionelle Elektrodialyse EDM wird das Produkt Natriumlactat konzentriert und gereinigt. Die Höhe der Konzentrierung stellt einen bedeutenden Faktor für die nachfolgende Rückgewinnungsstufe

von Milchsäure, die Elektrokonversion dar. Der Konzentrierungsgrad - das Verhältnis der Endkonzentration im Konzentrat zur Ausgangskonzentration im Diluat - wird durch das Verhältnis des Ausgangsvolumens im Diluat zum Ausgangsvolumen im Konzentrat bestimmt. Für die Untersuchungen ist der Konzentrierungsgrad durch ein Ausgangsvolumen im Konzentrat von mindestens 1 l zur Füllung der Pumpe und der Rohrleitung begrenzt. Deshalb wird die Elektrodialyse mit zwei Befüllungen in zwei Stufen betrieben.

Bei der EDM zirkulieren die Elektrodenspüllösung (Na_2SO_4 ; Konzentration: 5 g/l für eine Leitfähigkeit von 10 mS/cm), das Konzentrat (Natriumlactat) und das Diluat (Natriumlactat) in den drei Kanälen der zugehörigen Kammern des Stapels mit einem mittleren Volumenstrom von 2,5 bis 3,0 l/min in jeder Kammer. Die Stromstärke wird auf maximal 3 A und die Spannung auf maximal 20 V eingestellt. Die Funktionsweise der monopolareren ED ist in Abb. 2 dargestellt.

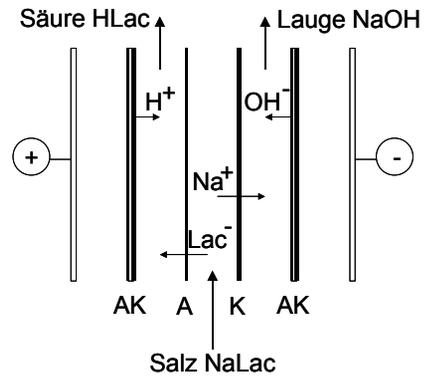


A: Anionenaustauschermembran
K: Kationenaustauschermembran

Abb. 2: Verfahrensschema der Elektrodialyse mit monopolareren Membranen (EDM) zur Konzentrierung von Natriumlactat (Ausschnitt des Membranstapels aus Abb. 1)

Für die EDB werden folgende Lösungen verwendet: Als Elektrodenspüllösung und als Vorlage für den Laugekreislauf dient NaOH mit einer Konzentration von 9,5 g/l bzw. 9,6 g/l für eine Leitfähigkeit von etwa 50 mS/cm, und als Vorlage für den Säurekreislauf kommt Milchsäure mit einer Konzentration von 1,7 g/l für eine Leitfähigkeit von maximal 1 mS/cm zum Einsatz. Der Volumenstrom beträgt in den Kanälen 2,5 bis 3,0 l/min. Die bipolare Elektrodialyseanlage wird im 3-Kammer-Verfahren bei einer maximalen Stromstärke von 5 A und einer maximalen Spannung von 40 V betrieben. Die bipolaren Membranen sowie die Anionen- und Kationenaustauschermembranen werden wechselseitig angeordnet. Die Funktionsweise der EDB ist in Abb. 3 dargestellt.

Die in der Salzkammer vorhandenen Lactat- und Natrium-Ionen wandern während der ED entsprechend durch die Anionen- und Kationenaustauschermembranen in die Säure- bzw. Laugenkammer. Durch die Kombination von Lactat-Ionen und die an der Kationenaustauscherschicht der bipolaren Membran entstehenden Wasserstoff-Ionen wird freie Milchsäure gebildet, während Natronlauge durch die Kombination von Natrium-Ionen und Hydroxyl-Ionen, die an der Anionenaustauscherschicht der bipolaren Membran gleichzeitig entstehen, erzeugt wird.



AK: Bipolare Membran, A: Anionenaustauschermembran, K: Kationenaustauschermembran

Abb. 3: Verfahrensschema der Elektrodialyse EDB mit bipolaren Membranen und mit 3 Kreisläufen (Ausschnitt des Membranstapels aus Abb. 1); (Salzkreislauf: Natriumlactat NaLac; Säurekreislauf: Milchsäure HLac; Laugekreislauf: Natronlauge NaOH)

Zur Auswertung der Ergebnisse für die Versuche zur Elektrodialyse werden der Wirkungsgrad η (%) und der spezifische Energieverbrauch E_{spez} (Wh/g) verwendet. Der Wirkungsgrad η wird nach der Gleichung

$$\eta = t_{\text{th}} / t_{\text{exp}} = [(F_{\text{NaLac/in}} - F_{\text{NaLac/fin}}) / \text{ÄG}] * F / (I * ZP * t_{\text{exp}}) * 100 \quad (\%) \quad (1)$$

berechnet, wobei t_{th} die theoretische und t_{exp} die experimentelle Versuchszeit, $F_{\text{NaLac/in}}$ und $F_{\text{NaLac/fin}}$ die Fracht F an Natriumlactat am Anfang und am Ende (g) im Zulaufbehälter (Diluat), ÄG das Äquivalentgewicht (Molgewicht dividiert durch die Wertigkeit) von Natriumlactat (g/mol), F die Faraday-Konstante (Ah/mol), I die Stromstärke (A) und ZP die Anzahl der Zellpaare im Stapel darstellen.

Die Fracht F für Natriumlactat wird aus der jeweiligen Konzentration c (g/l) und dem Volumen V (l) ermittelt:

$$F = c * V \quad (\text{g}) \quad (2)$$

Der spezifische Energieverbrauch E_{spez} ergibt sich aus der Gleichung:

$$E_{\text{spez}} = \int_0^{t_{\text{fin}}} (U * I) * dt / (F_{\text{NaLac/in}} - F_{\text{NaLac/fin}}) \quad (\text{Wh/g}) \quad (3)$$

wobei U die Spannung (V), I die Stromstärke (A) und t die Versuchszeit (h) darstellen. Da U und I sich in Abhängigkeit von den eingestellten Bedingungen während des Versuches ändern können, wird das Integral in Gleichung 3 auf der Grundlage der gemessenen Werte numerisch ausgewertet.

Die konventionelle Elektrodialyse wird bis zu einem Entsalzungsgrad S im Salzkreislauf von etwa 95 % gefahren. Der Entsalzungsgrad wird über die direkt messbare elektrische Leitfähigkeit σ (S/m) berechnet und ergibt sich aus:

$$S = (\sigma_{\text{in}} - \sigma_{\text{fin}}) / \sigma_{\text{in}} * 100 \quad (\%) \quad (4)$$

wobei σ_{in} und σ_{fin} die elektrische Leitfähigkeit am Anfang und am Ende der Entsalzung der Lösung im Diluat darstellen.

Die Elektrodialyse mit bipolaren Membranen wird bis zu einer Konversionsrate K von Natriumlactat in Milchsäure von 95 % betrieben. Die Konversionsrate ergibt sich aus dem Verhältnis der im Säurekreislauf gebildeten Milchsäurefracht $F_{\text{HLac/Säure}}$ (g) zu der im Salzkreislauf vorhandenen Fracht an Milchsäure $F_{\text{HLac/Salz}}$ (g):

$$K_{\text{HLac}} = F_{\text{HLac/Säure}} / F_{\text{HLac/Salz}} * 100 \quad (\%) \quad (5)$$

Da während des Versuches keine Analysenwerte über die Konzentrationen an Milchsäure vorliegen, wird zur Bestimmung der Konversionsrate die Veränderung der elektrischen Leitfähigkeit im Salzkreislauf σ_{in} am Anfang und σ_{fin} am Ende als K_{Leit} benutzt, was dem Entsalzungsgrad S bei der konventionellen Elektrodialyse entspricht.

$$K_{\text{Leit}} = (\sigma_{\text{in}} - \sigma_{\text{fin}}) / \sigma_{\text{in}} * 100 \quad (\%) \quad (6)$$

2.3 Analysenmethoden

Die Konzentration von Milchsäure wird durch HPLC (GYNKOTEK Chromatograph, Deutschland) bestimmt (Säule: Eurokat H (KNAUER); 300 x 7,8 mm i.D.; Eluent: 0,003 n H_2SO_4 ; Flussrate: 0,8 ml/min; Probenvolumen: 50 μl ; Temperatur: 25 °C; Druck: 3 MPa; Detektor: RI). Die Konzentration von Natriumlactat wird stöchiometrisch aus der Konzentration von Milchsäure berechnet.

3 Ergebnisse und Diskussion

3.1 Monopolare Elektrodialyse

In Abb. 4 ist der zeitliche Verlauf der Leitfähigkeit im Diluatkreislauf, der Entsalzungsgrad und die im Konzentratkreislauf entstandene Fracht an Natriumlactat bei der zweistufigen Elektrodialyse von Natriumlactat-Lösung dargestellt. Nach Erreichen einer Leitfähigkeit im Diluat von jeweils 1,5 mS/cm in der 1. und 2. Stufe (entspricht 94 % Entsalzungsgrad) wurde der Versuch beendet. Nach der 1. Stufe wurde das entsalzte Diluat durch die gleiche Ausgangsmenge an frischem Natriumlactat ersetzt und der Versuch weitergeführt. Die Parameter für die Elektrodialyse mit zweimaliger Befüllung enthält die Tabelle 1.

Tabelle 1: Untersuchungsparameter bei der zweistufigen konventionellen Elektrodialyse EDM von Natriumlactat NaLac

Parameter	Dimension	Konzentrierungsstufe	
		1. Stufe	2. Stufe
Versuchszeit	h	5	7
Mittlere Spannung	V	18	19
Mittlere Stromdichte	A/m ²	241	190
Anfangskonzentration NaLac Diluat	g/l	43,2	43,2
Anfangsleitfähigkeit Diluat	mS/cm	25,3	25,3
Endkonzentration NaLac Diluat	g/l	5,4	1,2
Endleitfähigkeit Diluat	mS/cm	1,5	1,5
Anfangskonzentration NaLac Konzentrat	g/l	1,8	180,7
Endkonzentration NaLac Konzentrat	g/l	180,7	219,3
Spezifischer Energieverbrauch E_{spez}	Wh/g	0,70	0,85
Wirkungsgrad η	%	70	62

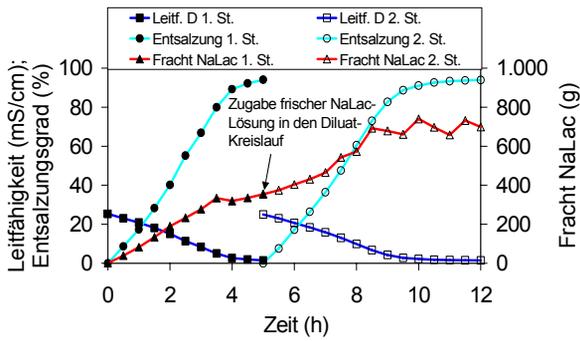


Abb. 4: Leitfähigkeit, Entsalzungsgrad und transportierte Natriumlactat-Fracht NaLac in Abhängigkeit von der Zeit bei der zweistufigen (1. und 2. St.) monopolaren Elektrodesalation von Natriumlactat

In Auswertung der Abb. 4 wird deutlich, dass ein Entsalzungsgrad von 94 % keiner optimal transportierten Fracht von Natriumlactat aus dem Diluat- in den Konzentratkreislauf entspricht. Nach einer Versuchszeit von 3,5 h in der 1. Stufe verringert sich bereits die entstandene Natriumlactat-Fracht. Die im Diluatkreislauf nach 5 h Entsalzungszeit auf einen Wert von 1,5 mS/cm abgenommene Leitfähigkeit entspricht einer Natriumlactat-Konzentration von 5,4 g/l (Tabelle 1). Auch in der 2. Stufe nimmt bereits nach einer Versuchszeit von 3,5 h (Gesamtzeit von 8,5 h) die bis dahin angestiegene Natriumlactat-Fracht wieder ab und bewegt sich auf einem Niveau von etwa 700 g. Am Ende der 2. Stufe entspricht die Leitfähigkeit im Diluatkreislauf von 1,5 mS/cm nur noch einer Natriumlactat-Konzentration von 1,2 g/l. Somit korreliert die Leitfähigkeit nicht mehr mit der Konzentration an Natriumlactat, da die Leitfähigkeit nicht nur von dem Salz Natriumlactat, sondern auch von der Konzentration anderer Fremdionen, die im elektrischen Feld transportiert werden, beeinflusst und somit vom je-

weils eingesetzten Medium mit bestimmt wird. Deshalb können die Messwerte der Leitfähigkeit nicht für eine Optimierung des Stofftransportes vom Diluat- in den Konzentratkreislauf herangezogen werden.

Eine Aussage über den Verlauf des Stofftransportes lässt sich jedoch aus den direkten messbaren Werten für Spannung und Stromstärke ableiten (Abb. 5). Eine Abnahme der Stromstärke weist während des Entsalzungsprozesses bei konstant bleibender Spannung eindeutig auf eine Abnahme des Stofftransportes hin, ohne dass Analysenwerte herangezogen werden müssen. Ein rechtzeitiger Abbruch der Elektrodesalation nach Veränderung von Stromstärke und Spannung führt somit zu einem optimalen Wirkungsgrad mit geringstem spezifischen Energieverbrauch.

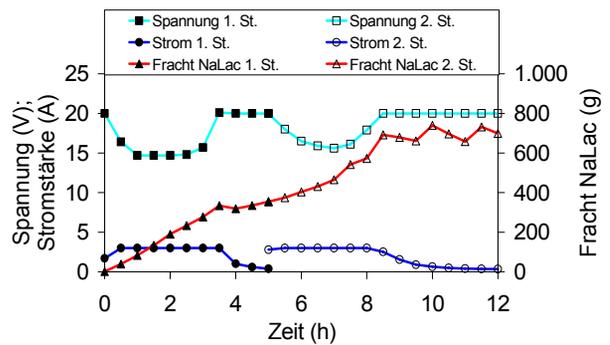


Abb. 5: Spannung, Stromstärke und gebildete Natriumlactat-Fracht NaLac in Abhängigkeit von der Zeit bei der zweistufigen monopolaren Elektrodesalation von Natriumlactat

Für eine entsprechend dem Strom- und Spannungsverlauf in Abb. 5 verkürzte Versuchszeit auf jeweils 3,5 h in der 1. und 2. Stufe der Elektrodesalation sind die gemessenen Werte in der Tabelle 2 dargestellt worden.

Tabelle 2: Untersuchungsparameter bei der zweistufigen konventionellen Elektrodesalation von Natriumlactat-Lösung NaLac nach verkürzten Versuchszeiten der einzelnen Konzentrationsstufen

Parameter	Dimension	Konzentrationsstufe	
		1. Stufe	2. Stufe
Versuchszeit	h	3,5	3,5
Mittlere Spannung	V	16	18
Mittlere Stromdichte	A/m ²	291	291
Anfangskonzentration NaLac Diluat	g/l	43,2	43,2
Anfangsleitfähigkeit Diluat	mS/cm	25,3	25,3
Endleitfähigkeit Diluat	mS/cm	5,1	6,8
Anfangskonzentration NaLac Konzentrat	g/l	1,8	186
Endkonzentration NaLac Konzentrat	g/l	186	235
Spezifischer Energieverbrauch E _{spez}	Wh/g	0,6	0,6
Wirkungsgrad η	%	78	84

Der Wirkungsgrad kann somit von 70 % auf 78 % (1. Stufe) und von 62 % auf 84 % (2. Stufe) gesteigert und eine maximale Konzentration an Natriumlactat erzielt werden.

Der Verlauf der Spannung und der Stromstärke sowie der gebildeten Natriumlactat-Fracht in Abhängigkeit von den verkürzten Versuchszeiten ist für die zweistufige Elektrodialyse in Abb. 6 dargestellt. Die Werte für die Leitfähigkeit im Diluat betragen in diesem Fall noch 5,1 mS/cm in der 1. Stufe und 6,8 mS/cm in der 2. Stufe, was nur einem Entsalzungsgrad von 80 % bzw. 73 % entspricht. Der spezifische Energieverbrauch nimmt von 0,7 Wh/g (1. Stufe) und 0,85 Wh/g (2. Stufe) auf jeweils 0,6 Wh/g ab.

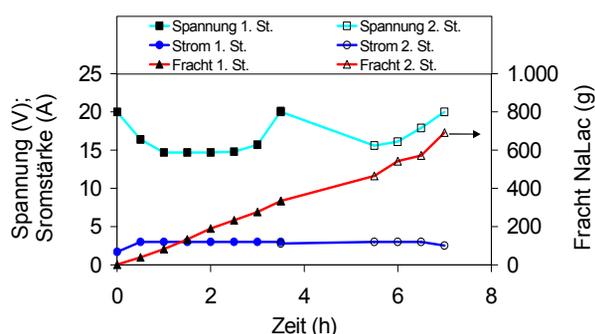


Abb. 6: Spannung, Stromstärke und gebildete Natriumlactat-Fracht NaLac in Abhängigkeit von der Zeit bei der zweistufigen monopolaren Elektrodialyse von Natriumlactat-Lösung bei verkürzten Versuchszeiten

3.2 Bipolare Elektrodialyse

Betrachtet man in Abb. 7 den zeitlichen Verlauf der Leitfähigkeit im Salz- und Säurekreislauf und die nach der Leitfähigkeit im Salz ermittelte Konversionsrate K_{Leit} sowie die im Säurekreislauf gebildete Milchsäu-

refracht bei der bipolaren Elektrodialyse von konzentriertem Natriumlactat, so ist festzustellen, dass nach einer Versuchszeit von 9,5 h die bis dahin gebildete Milchsäurefracht zunächst konstant bleibt und danach sogar bei einer Konversionsrate von 98 % wieder abnimmt. Aus dem Verlauf der Leitfähigkeiten der einzelnen Stoffströme bzw. aus der Konversionsrate ergibt sich kein Hinweis, aus dem auf eine Reduzierung der Milchsäurefracht geschlussfolgert werden kann.

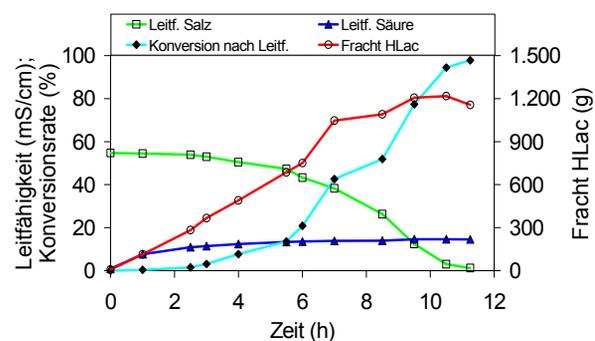


Abb. 7: Leitfähigkeit im Salz- und Säurekreislauf und Konversionsrate K_{Leit} (ermittelt aus der Leitfähigkeit im Salz) sowie gebildete Milchsäure-Fracht HLac in Abhängigkeit von der Zeit bei der bipolaren Elektrodialyse von Natriumlactat

Wie bereits unter Punkt 3.1 dargestellt, wird die Leitfähigkeit des Salzes nicht nur von der Natriumlactat-Konzentration sondern auch von der Konzentration anderer im jeweils eingesetzten Medium vorhandener Fremdionen (Verunreinigungen) beeinflusst, die im elektrischen Feld transportiert werden. So entspricht die nach der Leitfähigkeit im Salzkreislauf bestimmte Konversionsrate K_{Leit} von 98 % in diesem Fall nur einer tatsächlichen Konversionsrate K_{HLac} von 89 %, wenn die Milchsäurefracht berücksichtigt wird. Des-

Tabelle 3: Gegenüberstellung von Untersuchungsparametern bei der Konversion von Natriumlactat NaLac in Milchsäure HLac durch 3-Kammer bipolare Elektrodialyse (EDB) nach der bisher üblichen und der neuen Methode

Parameter	Dimension	Bisher übliche Methode	Neue Methode
Versuchszeit	h	11,25	9,50
Mittlere Spannung	V	29	27
Mittlere Stromdichte	A/m ²	448	487
Anfangskonzentration NaLac	g/l	187,4	187,4
Endkonzentration NaLac	g/l	12,3	9,4
Anfangskonzentration HLac	g/l	1,74	1,74
Endkonzentration HLac	g/l	171	182
Konversionsrate K_{HLac}	%	89	93
Spezifischer Energieverbrauch E_{spez}	Wh/g	1,18	1,0
Wirkungsgrad η	%	68	77

halb können die Messwerte der Leitfähigkeit im Salzkreislauf nicht für eine Optimierung des Stofftransportes im Salz- und Säurekreislauf herangezogen werden.

Aus dem Verlauf der Stromstärke und der Spannung in Abb. 8 lässt sich dagegen die Abnahme der Milchsäurefracht erkennen. So führt ein Abbruch des Versuches nach der Abnahme der Stromstärke bereits nach einer Versuchszeit von 9,5 zu einer Verringerung des spezifischen Energieverbrauches und zu einer Verbesserung des Wirkungsgrades von 68 % auf 77 % (Tabelle 3). Gleichzeitig kann die tatsächliche Konversionsrate für Natriumlactat - berechnet nach den Werten für die Milchsäurefracht - von 89 % auf 93 % erhöht und die Endkonzentration für die Milchsäure auf 182 g/l gesteigert werden.

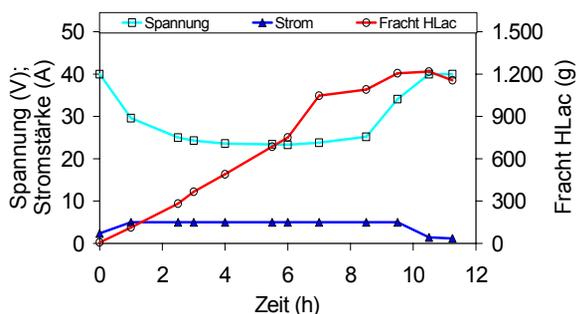


Abb. 8: Spannung, Stromstärke und Milchsäure-Fracht HLac in Abhängigkeit von der Zeit bei der bipolaren Elektrodialyse von Natriumlactat

4 Schlussfolgerungen

Die Konzentrierung und Konversion von Natriumlactat-Lösungen durch konventionelle und nachfolgende bipolare Elektrodialyse wird nach der direkt messbaren Leitfähigkeit im Diluat- (monopolare ED) bzw. Salzkreislauf (bipolare ED) vorgenommen. Dabei zeigt sich, dass allein die Leitfähigkeit aufgrund verschiedener Verunreinigungen in der Natriumlactat-Lösung nach einer kontinuierlichen Fermentation von Glucose aus Hydrolysaten von nachwachsenden Rohstoffen wie Roggen zu Aussagen führen kann, die einer optimalen Fahrweise der Elektrodialyse entgegenstehen. Direkt aufgenommene Messwerte zum Verlauf der Spannung und der Stromstärke während der Elektrodialyse führen dagegen sowohl beim Einsatz von monopolen als auch beim Einsatz von bipolaren Membranen zu eindeutigen Aussagen bezüglich des Stofftransportes im elektrischen Feld. Damit ist eine einfache Methode zur Optimierung der Elektrodialyse gegeben, mit der der spezifische Energieverbrauch gesenkt und der Wirkungsgrad erhöht werden kann.

Literaturverzeichnis

- Bailey J.E., Ollis D.F. (1986): *Biochemical Engineering Fundamentals*, MacGraw-Hill, Singapore.
- Bailly M., Roux-de Balmann H., Aimar P., Lutin F., Cheryan M. (2001): Production processes of fermented organic acids targeted around membrane operations: design of the concentration step by conventional electrodesis. *Journal of Membrane Science* 191, 129-142.
- Bazinnet L. (2004): *Electrodialytic Phenomena and Their Applications in the Dairy Industry: A Review*. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 44, 1-20.
- Datta R., Tsai S.P., Bonsignore P., Moon S.H., Frank J.R. (1995): Technological and economic potential of poly(lactic) and lactic derivatives. *FEMS Microbiology Reviews* 16, 221-231.
- Fidaleo M., Moresi M. (2004): Modelling the electrodesis recovery of sodium lactate. *Biotechnol. Appl. Biochem.* 40, 121-131.
- Glassner D.A., Datta R. (1990): Process for production and purification of lactic acid. EP 0393818 A1.
- Habova V., Melzoch K., Rychtera M. (2004a): Modern Method of Lactic acid Recovery from Fermentation Broth. *Czech J. Food Sci.* 22, 87-94.
- Habova V., Melzoch K., Rychtera M., Sekavova B. (2004b): Electrodesis as a useful technique for lactic acid separation from a model solution and a fermentation broth. *Desalination* 163, 361-372.
- Kedem O. (2002): The role of volume flow in electrodesis. *Journal of Membrane Science* 206, 333-340.
- Lee E.G., Moon S-H., Chang, Y.K., Yoo, Ik-K., Chang H.N. (1998): Lactic acid recovery using two-stage electrodesis and its modelling. *Journal of Membrane Science* 145, 53-66.
- Nolasco-Hipolito C., Thang V.H., Kobayashi G., Sonomoto K., Ishizaki A. (2001): Lactic Acid Recovery from Model Solutions and Fermentation Broth by Electrodesis. *J. Fac. Agr., Kyushu Univ.* 45, 531-540.
- Paul D., Ohlrogge K. (1998): Membrane separation processes for clean production. *Environ. Prog.* 17, 137-141.
- Persson A., Garde A., Jönsson A-S., Jonsson G., Zacchi G. (2001): Conversion of Sodium Lactate to Lactic Acid with Water-Splitting Electrodesis. *Applied Biochemistry and Biotechnology* 94, 197-211.
- Reimann W. (2005a): Membrane Separation Technology for the Purification of Lactic Acid after Fermentation. *FILTRATION* 5, 201-203.
- Reimann W. (2005b): Down Streaming of Lactic Acid from Hydrolysate of Barley after Fermentation. *Agricultural Engineering International: the CIGR Ejournal*. Manuscript. FP 05 004. Vol. VII. September, 2005.
- Roux-de Balmann H., Bailly M., Lutin F., Aimar P. (2002): Modelling of the conversion of weak organic acids by bipolar membrane electrodesis. *Desalination* 149, 399-404.
- Sirka K.K., Shanbhag P.V., Kovvali A.S. (1999): Membrane in a reactor: A functional perspective. *Ind. Eng. Chem. Res.* 38, 3715-3737.
- Vaidya A.N., Pandey R.A., Mudliar S., Kumar M.S. (2005): Production and recovery of lactic acid for polylactide – An overview. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* 35, 429-467.

- Van Velthuisen J.A. (1994): Lactic acid production and utilization. In: Bekkum H. van, Roeper H. (eds.), Carbohydrate Organic Raw Materials III, Workshop. Wiley-VCH, Weinheim, p. 129-140.
- Vick Roy T.B. (1985): Lactic acid. In: Young M.M. (ed.), Comprehensive Biotechnology. Pergamon Press Ltd., New York, p. 761-775.
- Wee Y-J., Yun J-S., Lee Y.Y., Zeng A-P., Ryu H-W. (2005): Recovery of Lactic Acid by Repeated Batch Electrodialysis and Lactic Acid Production Using Electrodialysis Wastewater. *Journal of Bioscience and Bioengineering* 99, 104-108.