

Aufnahme von Kennlinien an einem PEM-Brennstoffzellen-Stack

Versuchsziele

- Mit PEM-Brennstoffzellen aus Wasserstoff elektrische Energie herstellen.
- Einen Brennstoffzellen-Stack aufbauen.
- Parallelschaltung und Reihenschaltung von Brennstoffzellen vergleichen.
- Spannungskennlinien eines Brennstoffzellen-Stacks aufnehmen.
- Leistungskennlinien eines Brennstoffzellen-Stacks aufnehmen.

Grundlagen

Eine PEM-Brennstoffzelle wandelt die chemische Energie im Wasserstoff direkt in elektrische Energie um. Im Unterschied zur Batterie wird der Brennstoff kontinuierlich zugeführt und Reaktionsprodukte genauso kontinuierlich abgeführt. Brennstoffzellen eignen sich daher für Anwendungen, bei denen mehr Leistung über eine längere Zeitdauer abgerufen wird.

In der PEM-Brennstoffzelle reagieren Wasserstoff und Sauerstoff unter Energiefreisetzung zu Wasser. Die Reaktion findet an einem Katalysator statt. Der Aufbau einer solchen Brennstoffzelle ist in Abb. 1 dargestellt. PEM-Brennstoffzellen haben Elektroden aus katalytisch aktiven Edelmetallen. Hier werden zunächst die molekular ankommenden Gase in Atome aufgespalten. Die Wasserstoffatome geben je ein Elektron (e^-) ab, das durch einen äußeren Stromkreis fließen und elektrische Arbeit verrichten kann.

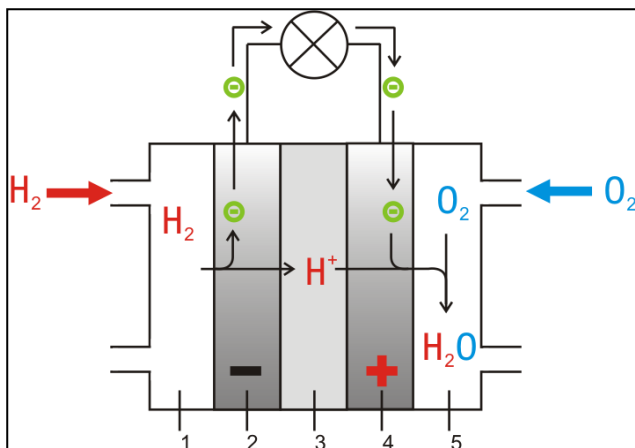
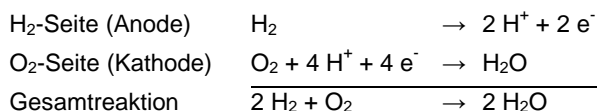


Abb. 1: Modell einer Brennstoffzelle. 1 – H₂-Kammer, 2 – Anode mit Katalysator, 3 – PEM (Protonenaustauschmembran), 4 – Kathode mit Katalysator, 5 – O₂-Kammer.

Die entstehenden Protonen (H^+) wandern durch eine Membran. Hier wird die namensgebende Protonenaustauschmembran (PEM = *proton exchange membrane*) eingesetzt. Sie besteht aus Nafion, einem sulfonierten Polymer ähnlich Teflon, das im nassen Zustand nur für Protonen durchlässig ist. Diese Membran dient gleichzeitig als Elektrolyt.

Auf der Sauerstoffseite trennt sich am gleichen Katalysator molekularer Sauerstoff in atomaren Sauerstoff auf. Zusammen mit den durch den Stromkreis wandernden Elektronen

und den durch die Membran gewanderten Protonen entsteht hier Wasser. Die Reaktionsgleichungen lauten:



Die hier verwendeten Brennstoffzellen werden mit Sauerstoff aus der Luft versorgt. An dieser Fläche verdampfen auch die geringen Mengen entstehendes Wasser. 1 l Wasserstoff führt zu 0,75 ml Wasser.

Mit Hilfe der Standardpotenziale kann die mögliche Spannung einer Brennstoffzelle berechnet werden. Diese liegt für die Reaktion von Wasserstoff und Sauerstoff bei 1,23 V. Reale Brennstoffzellen erreichen allerdings selten eine größere Leerlaufspannung als 1 V. Grund dafür sind innere Widerstände oder eine nicht maximale Wasserstoffversorgung der Elektroden. Die Spannung ist unabhängig von der Größe der Brennstoffzelle, da sie vom verwendeten Brennstoff Wasserstoff abhängt. Die Größe einer Brennstoffzelle entscheidet jedoch über die Strommenge, d.h. die Menge an Elektronen, die pro Zeiteinheit generiert werden kann.

Werden höhere Spannungen benötigt, so empfiehlt es sich, mehrere Brennstoffzellen zusammen zu schalten. Mit dem hier verwendeten Brennstoffzellen-Stack können dabei Parallel- und Reihenschaltung ausprobiert werden. Die Untersuchung erfolgt mit der Aufnahme von Kennlinien.

Die Spannungskennlinie gibt an, welche Spannung die Brennstoffzelle bei Abnahme einer definierten Strommenge aufrecht erhält. Die definierte Strommenge wird mit regelbaren Widerständen eingestellt. Diese wandeln den Strom in Wärme um. Auch die Leistungskennlinie ist stromabhängig. Hier wird die Leistung einer Brennstoffzelle, also das Produkt aus Stromstärke und Spannung, gegen die Stromstärke aufgetragen. Eine Brennstoffzelle sollte möglichst am Maximum der Leistung betrieben werden. Um dies zu erreichen, wird die Stromentnahme geregelt.

Um Kennlinien von Brennstoffzellen aufzunehmen, ist eine ausreichende Wasserstoffversorgung nötig. Bei niedrigen Strömen wird sehr wenig Wasserstoff verbraucht. Je mehr Strom abgenommen wird, desto mehr Wasserstoff wird benötigt. Bei sehr hohen Strömen kann ein Abfall der Spannung durchaus daher resultieren, dass nicht genug Wasserstoff an die Elektroden gelangt: die Reaktion „verhungert“. Dies verfälscht die Ergebnisse der Kennlinien.

In diesem Versuch wird der Wasserstoff aus einem Metallhydrid-Speicher zur Verfügung gestellt. Der Wasserstoff entweicht hier mit einem ausreichenden Druck und ermöglicht so die Messung auch bei sehr hohen Strömen. Eine Messung des Kurzschlussstroms ist jedoch auch mit dieser Wasserstoffquelle nur für eine sehr kurze Zeit möglich.

Im Versuch werden Spannungs- und Leistungskennlinien von einem Brennstoffzellen-Stack aufgenommen. Dieser wird in Reihe und parallel geschaltet.

Gefährdungsbeurteilung

Die Arbeit mit Wasserstoff birgt immer das Risiko von Knallgasreaktionen. Daher Wasserstoff nur freisetzen, wenn keine Flammen in der Nähe sind. In dem Metallhydridspeicher HydroStik PRO können sich höchstens 10 l Wasserstoff befinden.

Wasserstoff



Signalwort:
Gefahr

Gefahrenhinweise

H220 Extrem entzündbares Gas.

H280 Enthält Gas unter Druck; kann bei Erwärmung explodieren.

Sicherheitshinweise

P210 Von Hitze/Funken/offener Flamme/heißen Oberflächen fernhalten. Nicht rauchen.

P377 Brand bei Gasleckage: Nicht löschen, bis Leckage ohne Gefahr gestoppt werden kann.

P381 Alle Zündquellen entfernen, wenn gefahrlos möglich.

P403 An einem gut belüfteten Ort aufbewahren

Geräte und Chemikalien

- | | |
|--|------------|
| 1 PEM-Brennstoffzellen-Stack, CPS | 666 4812 |
| 1 HydroStik PRO, CPS..... | 666 4795 |
| 1 Blasenähler, CPS | 666 4794 |
| 1 Elektrische Verbraucher, CPS..... | 666 4831 |
| 1 HydroFill PRO | 666 4798 |
| 1 Sensor-CASSY 2..... | 524 013 |
| 1 CASSY Lab 2 | 524 220 |
| und 1 PC mit Windows XP/Vista/7/8 oder | |
| 1 CASSY-Display USB..... | 524 020USB |
| 1 Experimentierkabel 19 A, 25 cm, Paar.... | 501 44 |
| 1 Experimentierkabel 19 A, 50 cm, Paar.... | 501 45 |
| 1 Profilrahmen C50, zweizeilig, für CPS..... | 666 425 |
| 1 Silikon Schlauch 2 mm Ø, 1 m..... | 667 198 |
| 2 Blindplatte 100 mm, CPS | 666 464 |
| 1 Wasser, rein, 1 l | 675 3400 |

Versuchsaufbau und -vorbereitung

Die Wasserstoffquelle

Der Wasserstoff wird aus dem Metallhydridspeicher HydroStik PRO entnommen. Dieser wird mit dem Elektrolyseur HydroFill PRO gefüllt.

1. Deckel des Wassertanks öffnen und vorsichtig destilliertes oder entionisiertes Wasser bis zur inneren Kante einfüllen. Deckel schließen.
2. AC-DC-Adapter anschließen und in die Steckdose stecken. Die Statusanzeige blinkt nun grün.
3. Den HydroStik PRO in den HydroFill PRO einschrauben. Die Statusanzeige wechselt von grün nach rot und zeigt eine Verbindung an. Den HydroStik PRO festschrauben.
4. Die Beladung vom HydroStik PRO erfolgt automatisch und zeigt sich durch die rot leuchtende Statusanzeige. Die Beladung dauert 4 bis 6 Stunden. Ein Spülen des Systems äußert sich in einem gelegentlichen Zischen. Der produzierte Sauerstoff ist in Form von Blasen sichtbar.
5. Wenn die Statusanzeige zu grün wechselt, ist der HydroStik PRO vollständig geladen und kann abgeschraubt werden. Dabei kommt es zu einem kurzen Zischen.

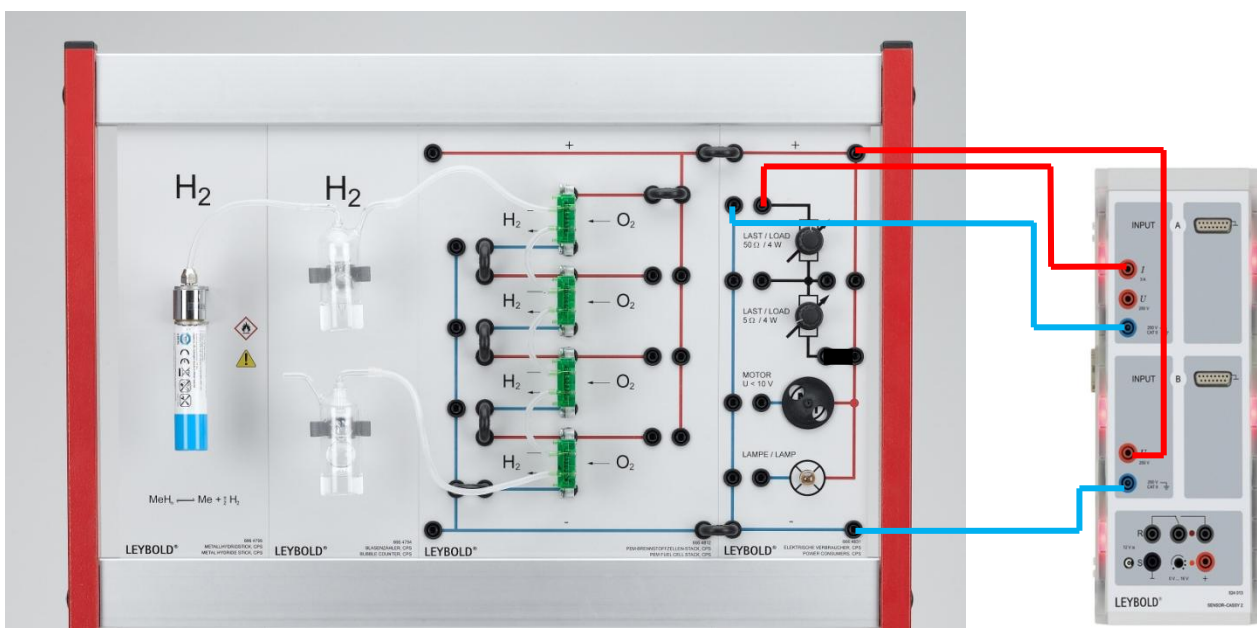


Abb. 2: Versuchsaufbau für die Untersuchung des Brennstoffzellen-Stacks. Die Brennstoffzellen sind seriell verbunden. Blaue und rote Linien: Verbindungen vom CPS-Modul „Elektrische Verbraucher“ zum Sensor-CASSY 2 mit Experimentierkabeln. In diesem Beispiel ist die regelbare Last angeschlossen.

- Nun kann ein weiterer HydroStik PRO geladen werden. Dafür die Anleitung ab Schritt 3 wiederholen.
- Nach dem Beladen den HydroFill PRO vom Strom trennen und den Wassertank leeren.

Der Versuchsaufbau

- Die CPS-Module wie in Abbildung 2 in den Profilrahmen C50 einhängen.
- Die Blasenähler am CPS-Modul „Blasenzähler“ so mit destilliertem oder entionisiertem Wasser füllen, dass ca. 5 mm der inneren Röhren unter Wasser sind.
- Das Regulierventil im CPS-Modul „HydroStik PRO“ mit einem Schlauch mit dem oberen Blasenähler verbinden. Dabei darauf achten, dass der HydroStik PRO mit dem inneren Röhren verbunden wird.
- Das CPS-Modul „PEM-Brennstoffzellen Stack“ wie in der Gebrauchsanweisung beschrieben aufbauen. Dafür:
 - Die Brennstoffzellen in die CPS-Platte stecken. Die einzelnen Brennstoffzellen mit kurzen Schlauchstücken miteinander verbinden. Alle Schläuche und damit die Wasserstoff-Seite befinden sich links.
 - Die Brennstoffzellen mit destilliertem Wasser wässern. Dafür an die untere Brennstoffzelle einen weiteren Schlauch anschließen. Über diesen mit einer Spritze so viel Wasser in die Brennstoffzellen geben, dass es aus der obersten Zelle heraus tropft. Die Spritze entfernen und das Wasser wieder herauslaufen lassen.
- Nun die unterste Brennstoffzelle mit dem unteren Blasenähler verbinden. Auch hier darauf achten, dass der Schlauch an das innere Röhren angeschlossen ist.
- Den Brennstoffzellen-Stack mit Brückensteckern mit dem CPS-Modul „Elektrische Verbraucher“ verbinden.
- Am CPS-Modul „Elektrische Verbraucher“ die regelbare Last (Widerstände, Potentiometer) in den Stromkreis einschalten. Dafür wie in Abb. 2 gezeigt die positive Leitung (rot) mit einem Brückenstecker mit dem unteren Ausgang der Widerstände verbinden.
- Den ganzen Aufbau mit einem Sensor-CASSY 2 oder einem anderen Messinstrument verbinden.
 - Für Spannungsmessungen die elektrischen Verbraucher wie in Abb. 2 gezeigt mit Experimentierkabeln mit dem Eingang B vom Sensor-CASSY 2 verbinden.
 - Für Strommessungen die regelbaren Widerstände mit dem Eingang A vom Sensor-CASSY 2 wie in Abb. 2 verbinden.

Hinweis: Das Sensor-CASSY 2 kann nun entweder über USB an einen Computer mit der Software CASSY Lab 2 angeschlossen werden. Alternativ kann ein CASSY-Display verwendet werden, das Arbeiten ohne Computer und CASSY Lab 2 ermöglicht.

Versuchsdurchführung

Im Versuch C4.4.7.2 werden Kennlinien von einem Brennstoffzellen-Stack aufgenommen. Die einzelnen Brennstoffzellen werden dabei zunächst in Reihe, dann parallel verbunden.

- Die einzelnen Brennstoffzellen des Brennstoffzellen-Stacks in Reihe miteinander verbinden (siehe Abb. 3, links).
- Den geladenen HydroStik PRO in das Regulierventil im CPS-Modul „HydroStik PRO“ eindrehen, bis eine deutliche Blasenentwicklung im Blasenähler sichtbar ist.
- Zunächst die Leerlaufspannung messen und notieren. Dafür darf die Last nicht verbunden sein.

- Die regelbare Last auf den größten Widerstand (kleinsten Strom) einstellen, indem die Drehregler im Uhrzeigersinn bis zum Anschlag gedreht werden.
- Die Last verbinden und Stromstärke und Spannung notieren.
- Nun den Widerstand mit dem oberen Drehregler reduzieren, bis eine Stromstärke von 100 mA fließt. Werte notieren.
Hinweis: Immer darauf achten, dass genug Wasserstoff nachgeliefert wird. Dies ist daran sichtbar, dass auch im zweiten Blasenähler Blasen sichtbar sind.
- Die Stromstärke weiter steigern und alle 100 mA einen Wert aufnehmen.
- Die Messung der Kurzschlussspannung erfolgt ohne Widerstände. Dafür die mittleren Anschlussbuchsen mit Brückensteckern verbinden. Alternativ das rote und das blaue Kabel ineinanderstecken.

Auf Dauer schädigt der Kurzschluss die Brennstoffzellen, daher nur kurz im Kurzschluss laufen lassen.

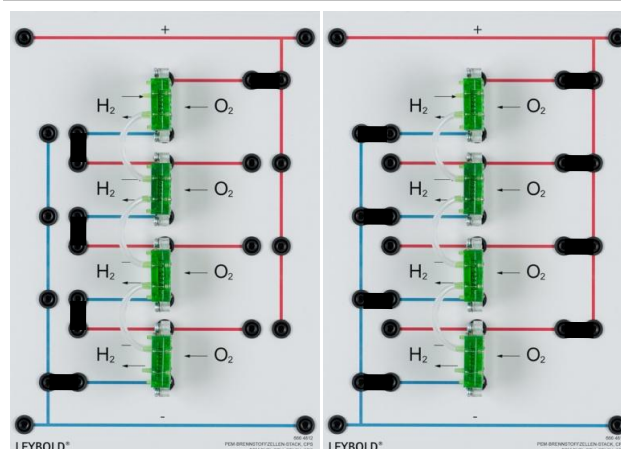


Abb. 3: Links: Reihenschaltung, rechts: Parallelschaltung.

- Den Versuch wiederholen. Diesmal die Brennstoffzellen in Parallelschaltung (siehe Abb. 3, rechts) verbinden.
- Für die Spannungskennlinien die Spannung gegen die Stromstärke auftragen.
- Für die Leistungskennlinien die Leistung P aus der Spannung U und der Stromstärke I mit

$$P = U \cdot I$$

berechnen und auch gegen die Stromstärke auftragen.

Versuchsergebnis

Messwerte der Versuche in Reihenschaltung

Stromstärke [A]	Spannung [V]	Leistung [W]
0	3,62	0
0,04	2,85	0,11
0,10	2,72	0,27
0,21	2,18	0,45
0,30	1,66	0,50
0,41	1,29	0,52
0,50	0,94	0,47
0,61	0,59	0,36
0,70	0,36	0,25
0,75	0,16	0,12

Messwerte der Versuche in Parallelschaltung

Stromstärke [A]	Spannung [V]	Leistung [W]
0	0,86	0
0,02	0,81	0,01
0,10	0,74	0,07
0,20	0,70	0,14
0,30	0,68	0,20
0,40	0,66	0,27
0,50	0,64	0,32
0,61	0,62	0,37
0,70	0,60	0,42
0,80	0,58	0,46
0,90	0,56	0,50
1,01	0,54	0,54
1,10	0,51	0,56
1,21	0,51	0,61
1,30	0,5	0,64
1,43	0,47	0,66
1,51	0,45	0,68
1,79	0,38	0,67

Versuchsauswertung

Ist keine Last verbunden (Leerlaufspannung), so erreicht der Brennstoffzellen-Stack in Reihenschaltung deutlich höhere Spannungen als in Parallelschaltung. Bei einer Reihenschaltung addieren sich die Spannungen, bei einer Parallelschaltung nicht.

Spannungskennlinien

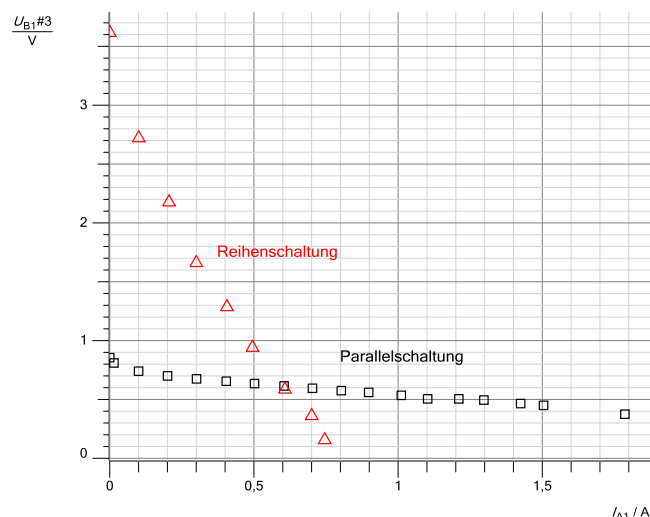


Abb. 4: Spannungskennlinien des Brennstoffzellen-Stacks in Reihenschaltung (rot) und Parallelschaltung (schwarz).

Je höher die Stromstärke ist, desto mehr sinkt die Spannung. Dies ist bei beiden Schaltungen zu beobachten. Die Spannung in Reihenschaltung sinkt jedoch bedeutend schneller und es kann ein maximaler Strom von ca. 0,75 A erreicht werden. In der Parallelschaltung bleibt die Span-

nung über einen weiten Bereich relativ konstant. Es werden Stromstärken bis zu 1,8 A erreicht.

Leistungskennlinien

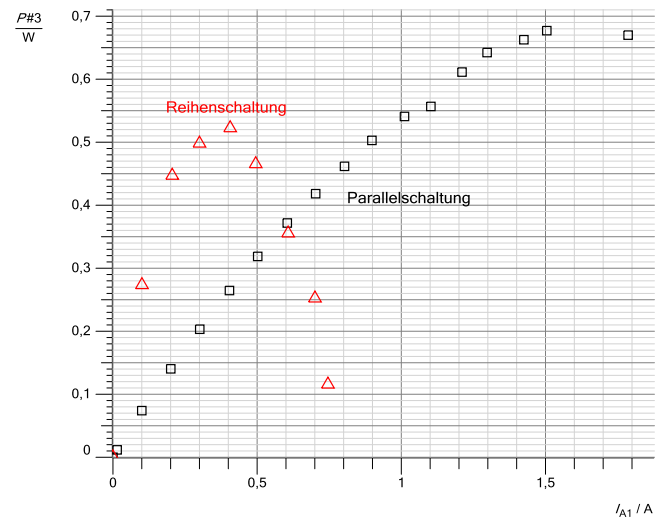


Abb. 5: Leistungskennlinien des Brennstoffzellen-Stacks in Reihenschaltung (rot) und Parallelschaltung (schwarz).

Die Leistungskennlinien steigen mit steigender Stromstärke an und durchlaufen ein Maximum. Danach kommt es zu einem deutlichen Abfall der Leistung. Das Leistungsmaximum liegt bei der Reihenschaltung bei 0,54 W (bei 0,41 A). In Parallelschaltung liegt das Leistungsmaximum bei 0,68 W (1,51 A).

Vergleich von Reihenschaltung und Parallelschaltung

Die Reihenschaltung zeigt eine hohe Leerlaufspannung an. Dahinter steckt jedoch keine Leistung. Bei der Parallelschaltung kann dagegen bei einer zwar kleinen Spannung deutlich mehr Leistung entnommen werden.

In der Anwendung von Brennstoffzellen wird meist eine Kombination beider Schaltungen gewählt. So können hohe Spannungen und große Leistungen erreicht werden. Problematisch bleibt jedoch weiterhin die Versorgung mit Wasserstoff. Dies wird in professionellen Brennstoffzellen-Stacks nicht mit Schläuchen, sondern mit Kanälen gelöst.

Reinigung und Entsorgung

Einmal verwendet, sollten die Brennstoffzellen nach Möglichkeit feucht gelagert werden. Dafür beide Wasserstoff-Eingänge mit einem kurzen Schlauchstück verbinden und alle Brennstoffzellen in einer wasserdichten Tüte lagern.

Zum Lagern den HydroStik PRO aus dem Ventil drehen. Er ist dann dicht und der Wasserstoff kann nicht entweichen.

Bemerkung

Sollten die Brennstoffzellen ihre Leistung einbüßen, kann dies zwei Ursachen haben:

Bei zu feuchten Zellen kann der Wasserstoff nicht mehr in ausreichender Menge zu den katalytisch aktiven Elektroden gelangen. Die Leistung sinkt daher drastisch. Zellen dann mit Luft (aus der Spritze) oder mit Wasserstoff aus dem HydroStik PRO durchpusten.

Bei zu trockenen Zellen funktioniert die PEM nicht einwandfrei. Die protonenleitende Eigenschaft ist nur dann gegeben, wenn die Membran feucht ist. Hier kann es helfen, die Zellen erneut zu wässern.