

Der PEM-Brennstoffzellen-Stack

Versuchsziele

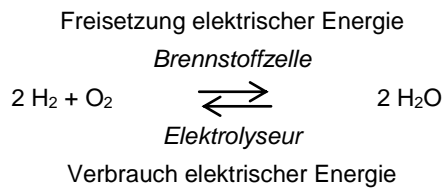
- Wasserstoff selbst produzieren und in einem Metallhydridspeicher aufbewahren.
- Wasserstoff aus einem Metallhydridspeicher sicher entnehmen und für Experimente einsetzen.
- Untersuchung einer einzelnen PEM-Brennstoffzelle
- Aufbau eines PEM-Brennstoffzellen-Stacks
- Untersuchung eines PEM-Brennstoffzellen-Stacks

Grundlagen

Eine Brennstoffzelle wandelt chemische Energie direkt in elektrische Energie um. Im Unterschied zur Batterie kann bei einer Brennstoffzelle der Brennstoff jedoch kontinuierlich zugeführt und Reaktionsprodukte genauso kontinuierlich abgeführt werden. Brennstoffzellen eignen sich daher für Anwendungen, bei denen mehr Leistung über eine längere Zeitdauer abgerufen werden muss.

Brennstoffzellen sind wie andere galvanische Elemente auch aus zwei Halbzellen aufgebaut, die durch eine Membran getrennt sind. Wichtig ist hier jedoch, dass bei beiden Halbzellen Brennstoff zu- und Produkte abgeführt werden können.

Eine bekannte Brennstoffzelle ist die Wasserstoff/Sauerstoff-Brennstoffzelle. Hier reagieren Wasserstoff und Sauerstoff unter Energiefreisetzung zu Wasser (siehe Reaktionsgleichung). Die Umkehrreaktion, die Elektrolyse von Wasser, produziert mit Energieverbrauch die beiden Gase Wasserstoff und Sauerstoff.



Bei der Reaktion von Wasserstoff und Sauerstoff wird Energie frei. Zündet man beide Stoffe direkt, wird diese in einem großen Knall freigesetzt. Diese Energie kann jedoch mit dem entsprechenden Aufbau einer Brennstoffzelle (siehe Abb. 1) direkt in elektrische umgewandelt werden. Entscheidend dafür ist ein geeigneter Katalysator.

Eine Brennstoffzelle enthält Elektroden aus Platin oder anderen katalytisch aktiven Edelmetallen. An dieser Oberfläche 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. Die entstehenden Protonen (H^+) fließen durch eine Membran. Hier wird eine Protonenaustauschmembran (PEM = *proton exchange membrane*) eingesetzt. Sie besteht aus Nafion, einem sulfonierten, Teflon-ähnlichen Polymer, das im nassen Zustand nur für Protonen durchlässig ist. Diese Membran dient gleichzeitig als Elektrolyt.

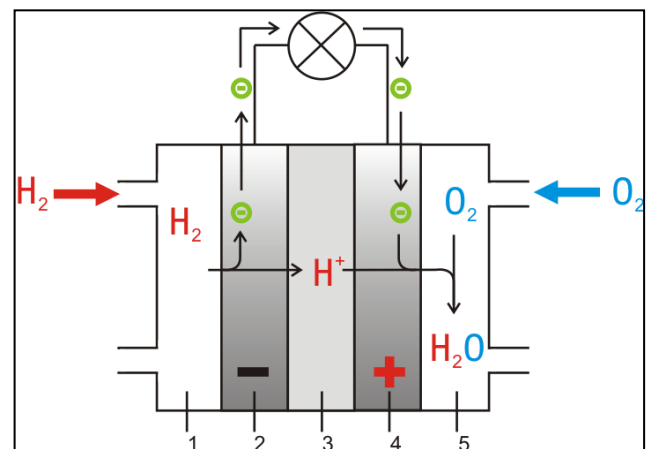
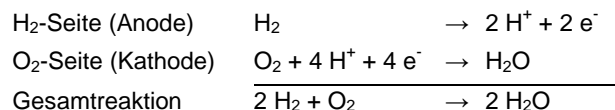


Abb. 1: Modell einer Brennstoffzelle. 1 – H₂-Kammer, 2 – Anode mit Katalysator, 3 – PEM (Protonenaustauschmembran), 4 – Kathode mit Katalysator, 5 – O₂-Kammer.

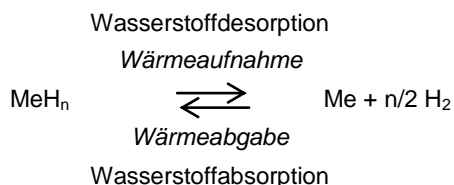
Auf der Sauerstoffseite wird am gleichen Katalysator molekularer Sauerstoff adsorbiert und trennt sich in atomaren Sauerstoff (2 O) auf. Zusammen mit den durch den Stromkreis wandernden Elektronen und den durch die Membran gewanderten Protonen entsteht hier Wasser. Die Reaktionsgleichungen lauten:



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.

Ein Nachteil von Wasserstoff-Brennstoffzellen ist die schwierige Handhabbarkeit von Wasserstoff. Dieser kommt meist aus Druckgasflaschen. Alternativ können Metallhydridspeicher verwendet werden, in denen Wasserstoff als Hydrid in Metallen absorbiert vorliegt.

Beim Laden dieser Metallhydridspeicher wird der Wasserstoff mit bis zu 3 bar in die Titanlegierung gepresst. Wasserstoff wird absorbiert. Es bildet sich in einer chemischen Reaktion das Metallhydrid (MeH). Dabei wird Wärme frei. Bei der Rückreaktion, der Freisetzung von Wasserstoff, muss Wärme aufgebracht werden. Das Gefäß kühlt daher ab.



In diesem Versuch wird Wasserstoff elektrolytisch produziert und als Metallhydrid gespeichert. Die dann untersuchten Brennstoffzellen werden mit Wasserstoff aus dem Metallhydridspeicher gespeist.

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 Silikonschlauch 2 mm Ø, 1 m.....	667 198
2 Blindplatte 100 mm, CPS	666 464
1 Wasser, rein, 1l.....	675 3400

Versuchsaufbau und -vorbereitung

- Die CPS-Module wie in Abbildung 2 in den Profilrahmen C50 einhängen.
- Die Blasenähler am CPS-Modul „Blasenähler“ 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.

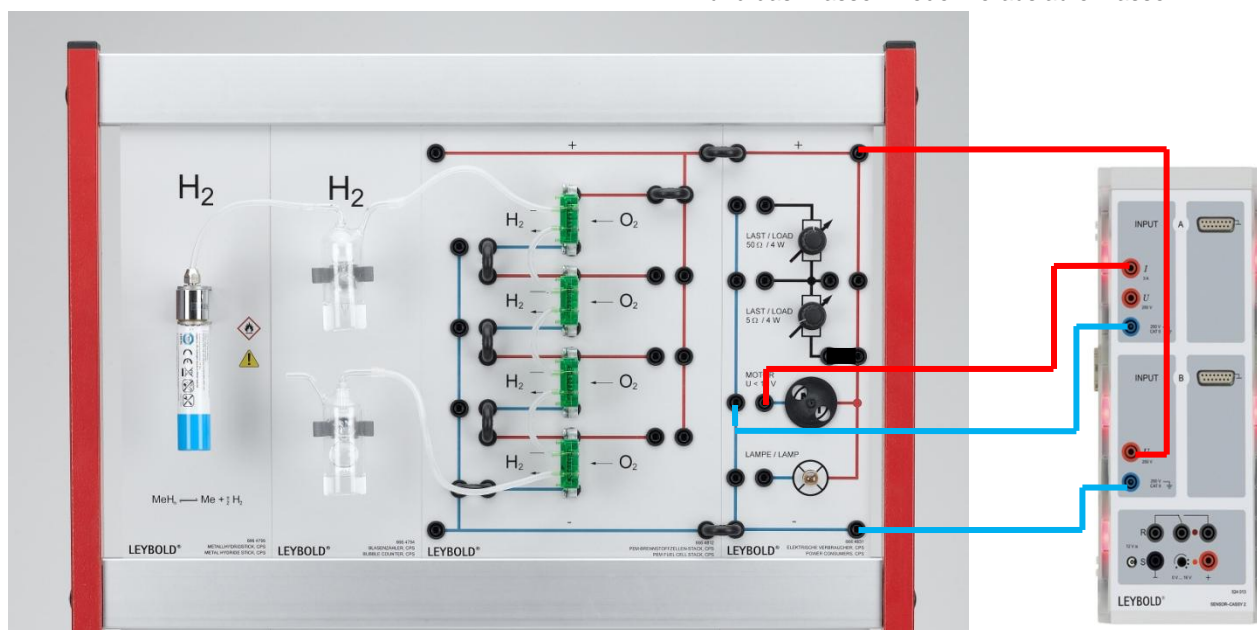


Abb. 2 Versuchsaufbau für die Untersuchung des Brennstoffzellen-Stacks. Die Brennstoffzellen sind seriell verbunden. Blaue und rote Linien: Verbindungen vom CPS-Modul „Elektrische Verbraucher“ zum Sensor-CASSY 2 mit Experimentierkabeln. In diesem Beispiel ist der Motor verbunden.

5. Nun die unterste Brennstoffzelle mit dem unteren Blasenähler verbinden. Auch hier darauf achten, dass der Schlauch an das innere Röhrchen angeschlossen ist.

6. Den Brennstoffzellen-Stack mit Sicherheitssteckern mit dem CPS-Modul „Elektrische Verbraucher“ verbinden.

7. Den ganzen Aufbau mit einem Sensor-CASSY 2 oder einem anderen Messinstrument verbinden.

a. Für Spannungsmessungen die elektrischen Verbraucher wie in Abb. 2 gezeigt mit Experimentierkabeln mit dem Eingang B vom Sensor-CASSY 2 verbinden.

b. Für Strommessungen Motor oder Lampe mit dem Eingang A vom Sensor-CASSY 2 wie in Abb. 2 verbinden. In Abb. 2 ist auf diese Weise der Motor verbunden.

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

Der Versuch C4.4.7.1 kann in zwei Aspekte aufgeteilt werden. Zum einen geht es um die gefahrlose Versorgung mit Wasserstoff und zum anderen um die Untersuchung von Brennstoffzellen.

Arbeit mit dem Metallhydridspeicher HydroStik PRO

In diesem Versuch wird Wasserstoff aus dem Metallhydridspeicher HydroStik PRO zur Verfügung gestellt. Dieser wird mit dem HydroFill PRO mit Wasserstoff beladen. Der HydroFill PRO ist ein Elektrolyseur, der Wasserstoff aus Wasser und Strom herstellt.

1. Deckel des Wassertanks vom HydroFill PRO öffnen und vorsichtig destilliertes 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 dabei von grün nach rot und zeigt damit eine Verbindung an. Den HydroStik PRO festschrauben.

4. Beim Laden wird der HydroStik PRO warm. Er ist vollgeladen, wenn keine Wärmeentwicklung mehr zu fühlen ist.

5. Dies misst auch HydroFill PRO. Wenn die Statusanzeige zu grün wechselt, ist der HydroStik PRO vollständig geladen und kann abgeschraubt werden. Dabei kommt es zu einem kurzen Zischen.

6. Nun kann ein weiterer HydroStik PRO geladen werden. Dafür die Anleitung ab Schritt 3 wiederholen.

7. Nach dem Beladen den HydroFill PRO vom Strom trennen und den Wassertank leeren.

8. Den HydroStik PRO vorsichtig in das Regulierventil einschrauben, bis Wasserstoffblasen im oberen Blasenähler erscheinen. Vorsichtig fester in das Ventil drehen, bis größere Mengen Wasserstoff entweichen.

9. Die Temperatur vom HydroStik PRO fühlen. Er wird kalt. Es bildet sich Kondenswasser.

Inbetriebnahme der Brennstoffzellen

Dieser Versuch kann in zwei Teilversuche geteilt werden. Zunächst kann eine einzelne Zelle untersucht werden. Im zweiten Versuchsteil wird der gesamte Stack, d.h. alle vier Zellen untersucht.

a) Untersuchung einer einzelnen Brennstoffzelle

1. Die oberste Brennstoffzelle elektrisch mit den Verbrauchern verbinden. Dafür rechts und links von der Brennstoffzelle jeweils einen Brückenstecker waagrecht einstecken.

2. Die Leerlaufspannung der Brennstoffzelle messen und notieren.

3. Den Motor verbinden, indem ein Experimentierkabel-Paar links vom Motor eingesteckt und mit dem Sensor-CASSY 2 so verbunden wird, wie in Abb. 2 gezeigt.

Hinweis: Immer darauf achten, dass genug Wasserstoff nachgeliefert wird. Dies ist daran sichtbar, dass auch im zweiten Blasenähler Blasen sichtbar sind.

4. Den Motor beobachten und Stromstärke und Spannung notieren.

5. Nun die Lampe auf gleiche Weise verbinden und erneut Stromstärke und Spannung notieren. Leuchtet die Lampe?

b) Untersuchung mehrerer Brennstoffzellen

1. Jeweils zwei, drei oder vier Zellen in Serie miteinander verbinden (siehe dazu Abb. 3, links).

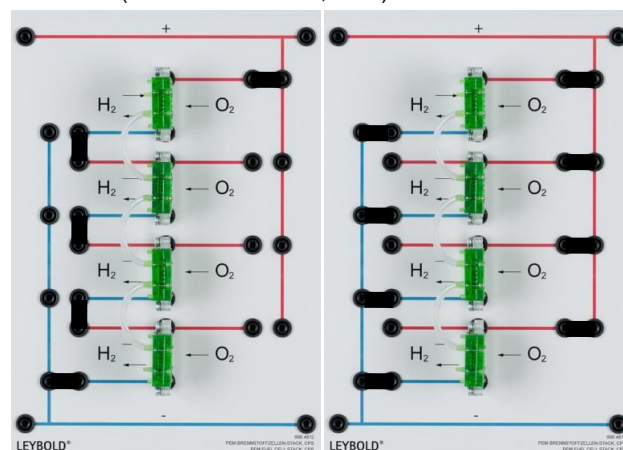


Abb. 3: Links: Serienschaltung, rechts: Parallelschaltung.

2. Jeweils die Leerlaufspannungen messen

3. Für jede Anzahl der Zellen Motor zuschalten und Stromstärken und Spannungen notieren. Welcher Zusammenhang besteht zwischen der Anzahl der Brennstoffzellen und der Geschwindigkeit des Motors?

4. Nun zwei, drei oder vier Brennstoffzellen in Parallelschaltung verbinden (siehe Abb. 3, rechts).

5. Wieder die Leerlaufspannungen messen.

6. Erneut den Motor zuschalten und Stromstärken und Spannungen notieren. Wie beeinflusst hier die Anzahl der Brennstoffzellen die Geschwindigkeit des Motors?

7. Die Wasserstoffzufuhr abdrehen, indem der HydroStik PRO aus dem Ventil gedreht wird. Wie lange läuft der Motor weiter?

Hinweis: Man kann den verbrauchten Wasserstoff gut am zweiten Blasenähler erkennen. Sind hier keine Blasen zu sehen, so wird mehr Wasserstoff verbraucht als geliefert wird. Bei geschlossener Wasserstoffzufuhr steigt der Wasserstand im Blasenähler langsam an, weil Wasserstoff von der Brennstoffzelle aus den Schläuchen „herausgesaugt“ wird.

8. Die Experimente mit der Lampe als Verbraucher wiederholen.

Versuchsergebnis

Inbetriebnahme der Brennstoffzellen

Messwerte der Versuche:

Serienschaltung

Anzahl der Zellen	Leerlaufspannung [V]	Spannung Motor [V]	Stromstärke Motor [A]
1	0,82	0,72	0,014
2	1,66	1,42	0,014
3	2,50	2,14	0,014
4	3,39	2,92	0,018

Anzahl der Zellen	Spannung Lampe [V]	Stromstärke Lampe [A]
1	0,64	0,030
2	1,30	0,043
3	1,89	0,052
4	2,58	0,061

Parallelschaltung

Anzahl der Zellen	Leerlaufspannung [V]	Spannung Motor [V]	Stromstärke Motor [A]
1	0,82	0,72	0,014
2	0,85	0,78	0,015
3	0,85	0,79	0,018
4	0,86	0,82	0,018

Anzahl der Zellen	Spannung Lampe [V]	Stromstärke Lampe [A]
1	0,66	0,031
2	0,73	0,032
3	0,76	0,033
4	0,79	0,033

Versuchsauswertung

Arbeit mit dem Metallhydridspeicher HydroStik PRO

Der Metallhydridspeicher erwärmt sich beim Laden und kühlt beim Entladen ab. Er enthält genug Wasserstoff für die nachfolgenden Experimente.

Inbetriebnahme der Brennstoffzellen

a) Untersuchung einer einzelnen Brennstoffzelle

Sobald eine Brennstoffzelle mit Wasserstoff versorgt wird und sie an einen Stromkreis angeschlossen ist, ist eine

Spannung messbar. Dies ist die Leerlaufspannung. Wird dann ein Verbraucher, z.B. ein Motor, verbunden, so beginnt dieser, sich zu drehen. Die Menge an Wasserstoff, die dafür verbraucht wird, ist gering.

Die Spannung und der Strom reichen nicht aus, um die Lampe zum Leuchten zu bringen. Bei genauem Hinsehen glimmt sie jedoch. Eine einzelne Brennstoffzelle ist nicht in der Lage, genug Leistung zu produzieren. Eine Verschaltung mehrerer Brennstoffzellen zu einem Stack („Stapel“) ist damit unumgänglich.

b) Untersuchung mehrerer Brennstoffzellen

In Serienschaltung steigt die Leerlaufspannung mit der Anzahl der Zellen additiv. Wird der Motor angeschlossen, ist dieser Effekt erneut zu beobachten. Die Stromstärke dagegen verändert sich kaum. Der Motor dreht sich mit jeder Zelle schneller. Die Brennstoffzelle verhält sich also wie andere Stromproduzenten auch. In Serienschaltung addieren sich die Spannungen.

Bei der Verwendung der Lampe ist ein weiterer Effekt sichtbar. Mit jeder Zelle wird die Lampe heller, bis sie bei vier Zellen deutlich leuchtet. Die Stromstärke steigt dabei auch an. Hier kann durch die erhöhte Spannung auch ein höherer Strom fließen.

In Parallelschaltung ist die Spannung unabhängig von der Anzahl der Zellen. Damit ändert sich bei den hier untersuchten Verbrauchern auch die Stromstärke kaum. Die Vorteile der parallelen Verschaltung werden erst bei der Aufnahme von Kennlinien (siehe Versuch C4.4.7.2) deutlich.

Reinigung und Entsorgung

Einmal verwendet, sollten die Brennstoffzellen nach Möglichkeit feucht gelagert werden. Dafür am besten 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.

Aus dem HydroFill PRO das Wasser entfernen und diesen auch dunkel lagern.

Bemerkung

Sollten die Brennstoffzellen ihre Leistung einbüßen, kann dies zwei Ursachen haben: Die Zellen sind entweder zu feucht oder nicht feucht genug. 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 wässern.