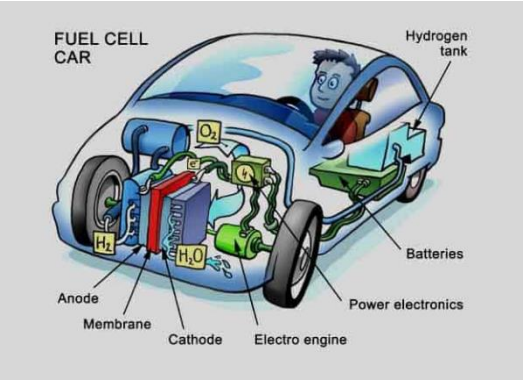
Hochschule Emden / Leer	Elektrochemie Praktikum	Vers.Nr.30 Nov. 2025

Brennstoffzelle - Elektrolyseur

Einleitung

Motivation und Anwendungen



Der durch Polymerelektrolytmembran (PEM)-Elektrolyse erzeugte Wasserstoff kann für viele Anwendungen verwendet werden, wie zum Beispiel:

- Fahrzeugbetankung
- Kühlung von Generatoren in Kraftwerken
- Energieerzeugung

Im Prinzip besteht ein Elektrolyseprozess aus einem Elektrolyten, Elektroden und einer externen Stromquelle. Unter Elektrolyse versteht man das Fließen eines elektrischen Gleichstroms durch einen Elektrolyten, der chemische Reaktionen an den Elektroden und die Zersetzung der Materialien hervorruft.

In einem PEM-Elektrolyseur besteht der Elektrolyt aus einer protonenleitenden Membran und Wasser (PEM = Proton-Exchange-Membrane). Beim Anlegen einer elektrischen Spannung entstehen Wasserstoff und Sauerstoff.

Die PEM-Brennstoffzelle erzeugt elektrische Energie aus Wasserstoff und Sauerstoff. Die elektrischen Eigenschaften des Elektrolyseurs und der Brennstoffzelle werden anhand einer Strom-Spannungs-Kennlinie untersucht. Der Wirkungsgrad wird durch Messung der Menge der erzeugten oder verbrauchten Gase bestimmt.

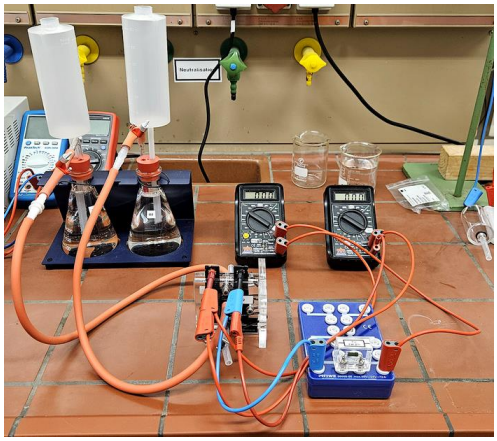
Eine PEM Brennstoffzelle besitzt keine lineare Leistungskurve, sondern erreicht bei einer bestimmen Stromstärke ein Leistungsmaximum. In der Praxis möchte man besonders die Bedingungen verwenden, bei der die Brennstoffzelle am meisten Leistung zur Verfügung stellt. Brennstoffzellen werden, um höhere Leistungen zu erzielen, zu größeren Stapeln (Brennstoffzellen-Stacks) zusammengeschaltet. Um ein Maximum an Leistung zu erreichen ist es wichtig, dass jede einzelne Brennstoffzelle optimal betrieben wird.

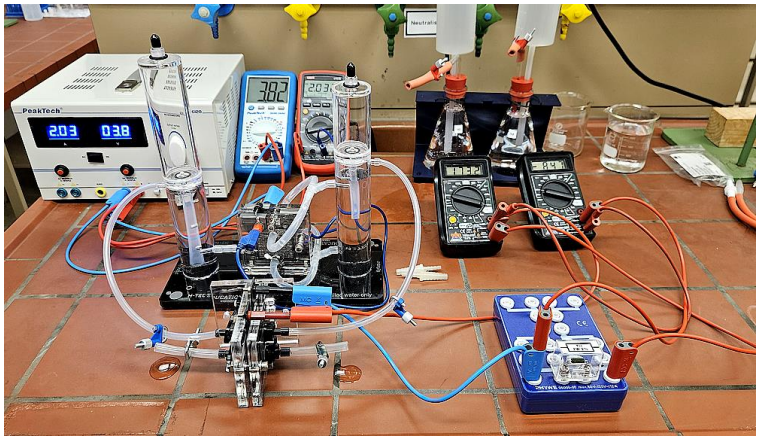
Aufgabenstellung

Kennlinie und Wirkungsgrad von PEM-Brennstoffzelle und PEM-Elektrolyseur

1. Nehmen Sie die Kennlinie des PEM-Elektrolyseurs auf.
2. Nehmen Sie die Kennlinie der PEM-Brennstoffzelle auf.
3. Bestimmen Sie die Effizienz der PEM-Elektrolyseeinheit.
4. Bestimmen Sie den Wirkungsgrad der PEM-Brennstoffzelle.

Blick auf den Versuch

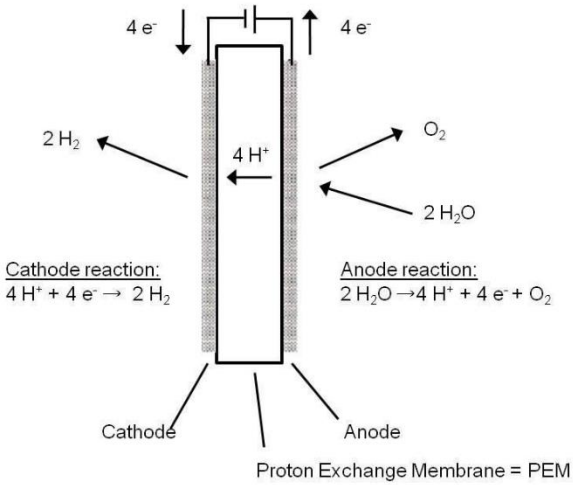




Grundlagen

Funktionsprinzip eines PEM Elektrolyseurs

Der Hauptteil der PEM-Elektrolyseeinheit sowie der PEM Brennstoffzelle ist eine Membran-Elektroden-Einheit. Eine Katalysatorschicht Material wurde auf beiden Seiten einer dünnen protonenleitende Membran (PEM = Protonenaustausch). Membran) aufgetragen. Diese beiden Schichten bilden die Anode und die Kathode der elektrochemischen Zelle.



Im Elektrolyseur finden folgende Reaktionen statt:

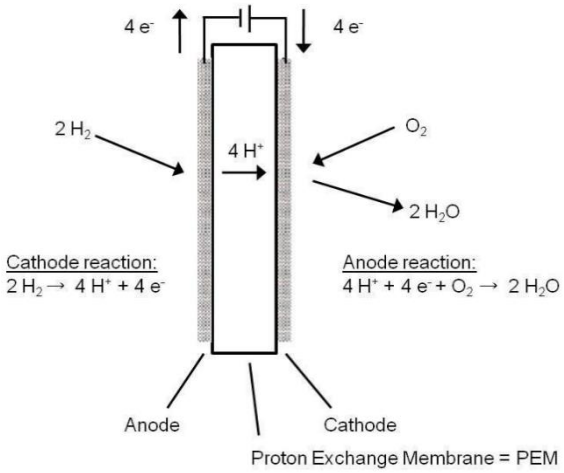
- Anode: $2\ H_2O \rightarrow 4\ e^- + 4\ H^+ + O_2$
- Kathode: $4\ H^+ + 4\ e^- \rightarrow 2\ H_2$
- Gesamtreaktion: $2\ H_2O \rightarrow 2\ H_2 + O_2$

Auf der Anodenseite entstehen bei Anlegen einer äußeren Spannung gasförmiger Sauerstoff, Elektronen und H+-Ionen. Die Ionen gelangen durch die Protonenleitungsmembran zur Kathode und bilden dort gasförmigen Wasserstoff. Die Elektronen fließen über den äußeren Stromkreis.

Die Brennstoffzelle funktioniert nach dem Umkehrprinzip.

Bei der Elektrolyse wird elektrische Energie in chemische Energie umgewandelt und in Form von Wasserstoff und Sauerstoff gespeichert. In der Brennstoffzelle wird chemische Energie in Form von Wasserstoff und Sauerstoff direkt umgewandelt, d. h. ohne Verbrennungsprozess in elektrische Energie umgewandelt. Wasserstoff und Sauerstoff reagieren zu Wasser und geben auf Strom und Wärme.

Funktionsprinzip einer PEM Brennstoffzelle



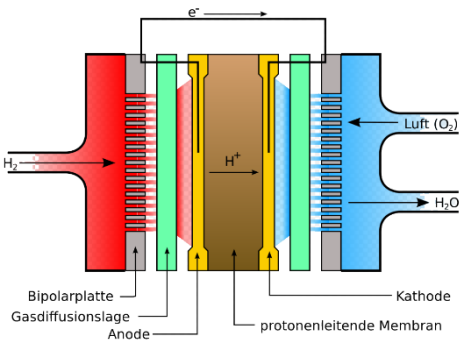
In der Brennstoffzelle finden folgende Reaktionen statt:

- Anode: $2\ H_2 \rightarrow 4\ e^- + 4\ H^+$
- Kathode: $4\ H^+ + 4\ e^- + O_2 \rightarrow 2\ H_2O$
- Gesamtreaktion: $2\ H_2 + O_2 \rightarrow 2\ H_2O$

Der gasförmige Wasserstoff, der der Anode zugeführt wird, wird oxidiert, er zerfällt durch die katalytische Wirkung der Elektrode (z. B. Platin) in Protonen und Elektronen.

Die H+Ionen gelangen durch die protonenleitende Membran zur Kathodenseite. Die Elektronen gelangen durch den geschlossenen äußeren Stromkreis zur Kathode und verrichten auf diese Weise elektrische Arbeit. Der der Kathode zugeführte gasförmige Sauerstoff wird reduziert. Dabei entsteht neben den Protonen und Elektronen auch Wasser.

Befinden sich in einem Elektrolyseur oder einer Brennstoffzelle eine Wasserstoff- und eine Sauerstoffelektrode, besteht zwischen den beiden Elektroden eine Potentialdifferenz ΔE. Diese ist temperaturabhängig. Ihr theoretischer Wert kann aus der freien Reaktionsenthalpie ΔG berechnet werden und beträgt ΔE=1.23V bei 25 °C.



Bei der Elektrolyse muss die angelegte äußere Spannung mindestens so groß sein wie diese theoretische Zellspannung, damit ein Strom fließen kann. In der Brennstoffzelle kann die maximale Klemmenspannung diesen theoretischen Wert erreichen. Sowohl im Elektrolyseur als auch in der Brennstoffzelle treten an den Elektroden zusätzliche Potenziale auf.

Im elektrochemischen Gleichgewicht treten an den Elektroden Phasengrenzpotentiale zwischen Elektrode und Membran auf. Dabei findet ein kontinuierlicher Ladungsaustausch zwischen beiden statt, die Bruttoreaktion ist jedoch gleich Null.

Fließt zusätzlich ein Strom durch den Elektrolyseur oder die Brennstoffzelle, wird das elektrochemische Gleichgewicht an den Elektroden gestört. Durch verschiedene Reaktionen an der Elektrode nimmt das Elektrodenpotential einen anderen, von der Stromdichte abhängigen Wert an. Diese Abweichung vom Gleichgewichtswert wird als „elektrische Polarisation“ bezeichnet, d. h. die Elektrode wird polarisiert.

Die Kennlinien des Elektrolyseurs und der Brennstoffzelle weisen daher erst bei größeren Stromwerten einen nahezu linearen Verlauf auf; In diesem Bereich ist die Bewegung der Ionen durch die Membran entscheidend. Die an einer Elektrode freigesetzte Stoffmenge n kann mit dem Faraday'schen Gesetz berechnet werden.

$$n = \frac{I\,t}{z\,F} \qquad (1)$$

mit I = Strom, t = Zeit, z = Anzahl der übertragenen Elektronen, F = Faraday'sche Konstante, $F = 96\,485\ As/mol$.

Bei diesem Experiment entstehen Gase. Das Volumen einer Stoffmenge n lässt sich mit dem bestimmen allgemeine Gasgleichung.

$$V = \frac{n\,R\,T}{p} \qquad (2)$$

mit T = absolute Temperatur, p = Druck, R = allgemeine Gaskonstante $R = 8{,}314462\ J/(mol\ K)$

Fließt in einem Elektrolyseur ein Strom I, so entsteht nach den Gleichungen (1) und (2) folgender Gasdurchfluss (Gasvolumen pro Zeiteinheit):

$$\frac{V}{t} = \frac{I\,R\,t}{z\,F\,p} \qquad (3)$$

In der Brennstoffzelle ist dieser Gasdurchfluss erforderlich, damit der Strom I fließen kann. Um den Wirkungsgrad des Elektrolyseurs und der Brennstoffzelle zu ermitteln, werden die elektrische und die chemische Energie des erzeugten bzw. benötigten Wasserstoffs berechnet.

$$W_{el} = U \cdot I \cdot t \qquad (4)$$

$$W_{H_2} = n \cdot H \qquad (5)$$

wobei U = Spannung, I = Strom, t = Zeit, n = Wasserstoffmenge, H = molarer kalorischer Energieinhalt (molare Reaktionsenthalpie) von Wasserstoff.

Man unterscheidet zwischen dem unteren Kaloriengehalt und dem oberen Kaloriengehalt von Wasserstoff:

$$H_{low} = 241.8\ \ kJ/mol$$

$$H_{up} = 285.8\ kJ/mol$$

Der Unterschied zwischen beiden ist die molare Verdampfungsenthalpie (Kondensationsenthalpie) $q = 43{,}99\ kJ/mol\ (25\ °C)$ von Wasser.

$$H_{up} = H_{low} + q \qquad (6)$$

Die Effizienz des Elektrolyseurs hängt stark vom jeweiligen Betriebszustand ab. Bei längerem Nichtgebrauch kann die Stromstärke kleiner sein als angegeben; nach längerer Betriebszeit teilweise deutlich größer.

Effizienz des PEM-Elektrolyseurs

Das fehlende Gas ist auf Diffusionsverluste innerhalb der Zelle zurückzuführen. Der Wirkungsgrad des Elektrolyseurs kann anhand der Gleichungen (4) und (5) berechnet werden.

$$\eta = \frac{W_{H_2}}{W_{el}} = \frac{H_0\, n}{U\, I\, t} \qquad (7)$$

Mithilfe der allgemeinen Gasgleichung (2) werden die gemessenen Volumina V des Wasserstoffs in Stoffmengen n umgerechnet. Somit erhält man für den Wirkungsgrad:

$$\eta = \frac{H_0\, p\, V}{R\, T\, U\, I\, t} \qquad (8)$$

Zusätzlich sollte zu ggf. ein Korrekturfaktor berücksichtigt werden, sofern die Volumenmarkierungen auf den Gasometertrichtern mit einem Volumenmessgerät überprüft wurden. **Im Rahmen dieses Versuches verzichten wir darauf.** In einem Fall ergab eine Messung Folgendes: 250 ml im Gasometer = 255 ml im Volumenmessgerät

$$V_{corr} = 1{,}02 \cdot korr.V_{H_2}$$

Effizienz der PEM-Brennstoffzelle

Das fehlende Gas ist auf Diffusionsverluste innerhalb der Zelle zurückzuführen. Der Wirkungsgrad der Brennstoffzelle kann mit den Gleichungen (4) und (5) berechnet werden.

$$\eta = \frac{W_{el}}{W_{H_2}} = \frac{U\, I\, t}{H\, n} \qquad (9)$$

Aufgrund der in der Brennstoffzelle ablaufenden Reaktion muss zur Berechnung des Wirkungsgrades der obere Kaloriengehalt herangezogen werden. In der Industrie ist es jedoch üblich, mit dem geringeren Kaloriengehalt zu rechnen, da durch die Kondensationswärme nur Wärme und keine elektrische Energie erzeugt wird. Mithilfe der allgemeinen Gasgleichung (2) werden die gemessenen Volumina V des Wasserstoffs in Stoffmengen n umgerechnet. Somit erhält man für den Wirkungsgrad:

$$\eta = \frac{R\, T\, U\, I\, t}{H_{up}\, p\, V} \qquad (10)$$

Versuchsausstattung:

Gerätename		Menge
PEM-Brennstoffzelle-Kit, zerlegbar	06746-01	1
PEM-Elektrolyseur H2/O2 65	06730-00	1
Schaltkasten	06000-00	1
Widerstand 10 Ohm 2%, 2 W, G1	06056-10	2
Widerstand 5 Ohm 5%, 2 W, G1	06055-50	1
Widerstand 2 Ohm 5%, 2 W, G1	06055-20	1
Widerstand 1 Ohm 2%, 2 W, G1	06055-10	2
Kurzschlussstecker, grau	06027-07	2
Gasbar	40466-00	1
Messzylinder Volumen: 100 ml		1
Gummischlauch, Durchmesser: 4 mm		1
Gummischlauch, Durchmesser: 6 mm		1
Schlauchklemme, b = 10 mm		4
Schlauch-Verbinder, di = 3-5/6-10 mm, gerade		2
Spritzflasche, 500 ml		1
Laborbecher, 250 ml		1
Digitale Stoppuhr		1
Digitalmultimeter, 600V AC/DC, 10A AC/DC, 20 MΩ, 200µF, 20 kHz, −20°C…760°C		4
Netzgerät, universal mit Analoganzeige, RiSU 2019 konform, DC: 18 V, 5 A / AC: 15 V, 5 A		1
Verbindungsleitung, 32 A, rot, Länge: 500 mm		3
Verbindungsleitung, 32 A, blau, Länge: 500 mm		2
Verbindungsleitung, 32 A, blau, Länge: 250 mm		2
Elektronische Wetterstation		1
Bananenstecker-Adapter, 4mm-Buchse auf 2mm Stecker (1 Paar)		1
Schraubkappen für PEM-Elektrolyseur H2/O2 65	06730-01	1
Bidestilliertes Wasser (κκ < 2 µS)		

Sicherheitsinformation H: 220 / 270 P: 210 / 220

- **Sauerstoff** ist ein farb-, geruch- und geschmackloses brandförderndes Gas. Feuergefahr bei der Berührung mit brennbaren Stoffen.
- **Wasserstoff** ist ein farb-, geruch- und geschmackloses brennbares Gas, das mit Luft leicht explosionsgefährliche Gemische bildet. Bei Versuchen, in denen mit Wasserstoff gearbeitet wird, müssen alle Zündquellen vorher entfernt werden. Schutzbrille tragen.

Achtung: Verwenden sie für alle Aufgaben in diesem Versuch ausschließlich bidestilliertes Wasser ($\kappa < 2\ \mu S$). Verwenden sie bitte kein normales destilliertes Wasser. Das führt zu Schäden am Versuch!!!

Achtung/Vorsicht

Beschädigungsgefahr durch unsachgemäße Handhabung

Der Betrieb des Elektrolyseurs mit Wasser mit einer elektrischen Leitfähigkeit von ≥ 2 µS/cm führt zu irreparablen Schäden am Elektrolyseur.

Befüllen Sie den Elektrolyseur nur mit **bi**destilliertem Wasser mit einer elektrischen Leitfähigkeit von < 2 µS/cm.

Achtung/Vorsicht

Beschädigungsgefahr durch elektrische Überlastung

Jeder Betrieb außerhalb der elektrischen Spezifikationen führt zu irreparablen Schäden am Elektrolyseur.

Betreiben Sie den Elektrolyseur niemals außerhalb der in den technischen Daten angegebenen elektrischen Spezifikationen.

Zulässige Betriebsspannung:	0 - 4,0 V DC
Zulässiger Betriebsstrom:	0 - 4,4 A
Nennstromverbrauch	ca. 16 W
Zulässiger Betriebsdruck:	0 - 20 mbar

Allgemeine Sicherheitsvorkehrungen

Achtung/Vorsicht

Verletzungsgefahr durch Wasserstoffzündung

Beschädigte Schläuche oder undichte Verbindungen können dazu führen, dass Wasserstoff austritt. Wasserstoff und Wasserstoff-Luft-Gemische sich in der Nähe einer Zündquelle entzünden. Überprüfen Sie vor jedem Aufbau Schläuche und Anschlüsse auf Beschädigungen.

Achtung/Vorsicht

Verletzungsgefahr durch heiße Oberflächen

Bei falscher Polarität wird die Schutzdiode am Elektrolyseur sehr heiß. Das Berühren der Diode am Elektrolyseur kann zu Verletzungen führen.

Achten Sie vor der Inbetriebnahme auf die richtige Polarität der Anschlusskabel und der elektrischen Anschlüsse (rot = „+“, schwarz = „-“).

Berühren Sie nicht die Diode.

Achtung/Vorsicht

Verletzungsgefahr durch Wasserstoffzündung

Austretender Wasserstoff kann sich in der Nähe einer Zündquelle entzünden.

Verhindern Sie, dass Wasserstoff austritt. Am Ende der Versuche und vor dem Abbau den gesamten Wasserstoff vollständig verbrauchen.

Achtung/Vorsicht

Brandgefahr durch elektrische Überlastung

Jeder Betrieb außerhalb der elektrischen Spezifikationen führt zu einer übermäßigen Überhitzung des Elektrolyseurs. Dies kann einen Brand verursachen.

Betreiben Sie den Elektrolyseur niemals außerhalb der in den technischen Daten angegebenen elektrischen Spezifikationen.

- Das System ist ausschließlich für Lehr- und Demonstrationszwecke in Schulen, Universitäten, Institutionen und Unternehmen bestimmt und darf nur von fachkundigen Personen aufgestellt und betrieben werden bzw. unter deren Aufsicht.
- Lesen Sie die Bedienungsanleitung, bevor Sie das PEMFC-Kit einrichten. Befolgen Sie diese während des Gebrauchs und bewahren Sie sie zum Nachschlagen griffbereit auf.
- Tragen Sie eine Schutzbrille.
- Das System ist kein Spielzeug. Betreiben Sie das PEMFC-Kit und bewahren Sie es und die erzeugten Gase außerhalb der Reichweite von kleinen Kindern.
- Sofern nicht anders angegeben, dürfen die Anschlüsse nicht kurzgeschlossen oder die Polarität vertauscht werden.
- Betreiben Sie die Anlage nicht trocken. Achten Sie immer darauf, dass ausreichend Wasser enthalten ist.
- Entfernen Sie brennbare Gase, Dämpfe und Flüssigkeiten aus der Umgebung von Brennstoffzellen und Elektrolyseuren. Die im System enthaltenen Katalysatoren können eine Selbstentzündung auslösen.
- Wasserstoff und Sauerstoff können aus dem System entweichen. Um zu verhindern, dass sich die Gase ansammeln und explosionsfähige Gemische bilden, verwenden Sie das System nur in gut belüfteten Räumen. Die Anlage darf nur in einer stets ausreichend belüfteten Orten betrieben werden. Der Betreiber ist verpflichtet, dies durch entsprechende Messungen nachzuweisen.

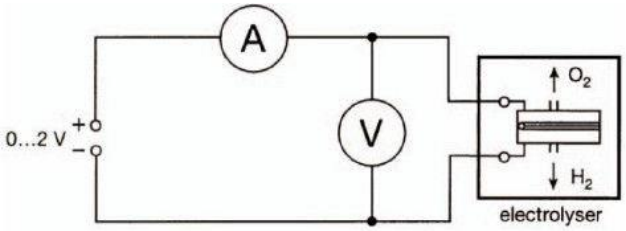
- Entfernen Sie aus der Nähe der Anlage alles, was den Wasserstoff entzünden könnte (offene Flamme, Materialien, die sich statisch aufladen können, Stoffe mit katalytischer Wirkung).

- Entfernen Sie alle Stoffe aus der Umgebung der Anlage, die sich bei erhöhter Sauerstoffkonzentration selbst entzünden könnten.
- Nicht rauchen.

- Zum Druckausgleich dienen Schläuche, Stopfen und Tanks. Sie dürfen nicht mit Klammern, Kleber etc. befestigt oder gesichert werden.
- Benutzen Sie zur Speicherung von Gas ausschließlich die zum System gehörenden oder mitgelieferten Gasspeicher. Schließen Sie niemals andere Alternativen an.
- Betreiben Sie die Anlage nur bei Raumtemperatur und Umgebungsdruck.

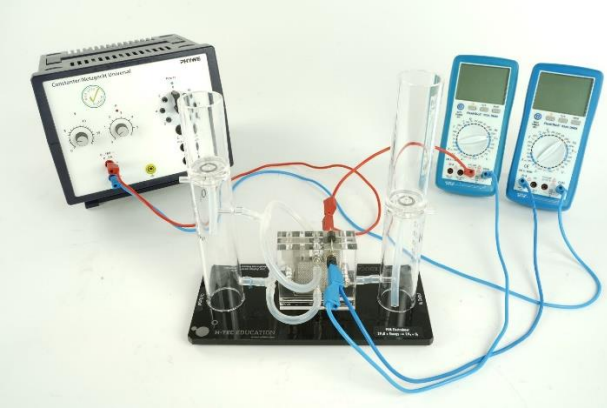
Durchführung: Aufbau und Ablauf

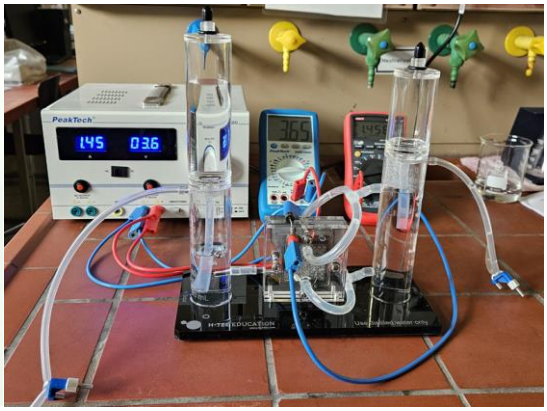
1. Kennlinie des PEM-Elektrolyseurs



Schaltplan: Charakteristik und Wirkungsgrad des PEM Elektrolyseur.

- Setzen Sie die Überlaufbehälter auf die Wasserreservoirs
- Füllen Sie beide Wasserbehälter bis zur Markierung -A- mit Wasser.





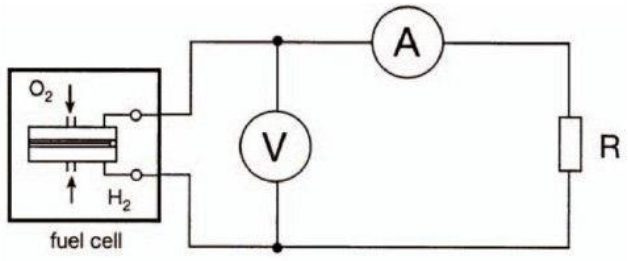
Experimenteller Aufbau

- Schließen Sie den Elektrolyseur entsprechend dem Versuchsaufbau und dem Schaltplan an den Gleichstromanschluss (DC) des Netzteils an.
- Starten Sie die Messung mit der Spannung von U = 3.5 V. (Dabei kann der Strom kurzzeitig u.U. den Wert des maximalen Dauerstroms von I = 2 A überschreiten.) Nach ca. 1 Minute stabilisieren sich die Werte für Spannung und Strom.
- Erhöhen Sie die Spannung langsam bis max. 4 V. Der Strom sollte dabei 2.5 A und darf 4 A nicht überschreiten. Reduzieren Sie die Spannung bis ca. 2.5 V (fast kein Strom mehr). Notieren Sie jeweils Strom in Abhängigkeit von der Spannung. Ab welcher Spannung ist eine Gasproduktion zu beobachten bzw. noch zu beobachten?
- Warten Sie vor der Messwerterfassung ca. 30-60 s, bis sich die Strom- und Spannungswerte stabilisiert haben.
- Nehmen Sie für ca. 12 Spannungen die zugehörigen Ströme auf.

Die gemessenen Ströme I werden gegen die Spannung U grafisch aufgetragen (Kennlinie). Durch den linearen Teil der Messpunkte (im Diagramm rechts) wird eine Ausgleichsgerade gelegt. Aus dem linearen Abschnitt der Kennlinie wird die Zersetzungsspannung als Schnittpunkt der verlängerten Geraden mit der U-Achse bestimmt.

- Drehen sie die Spannung für 20 s auf ca. 3,5 V. Drehen Sie die Spannung am Netzteil auf 0 V zurück. Welchen Wert für die Spannung am Multimeter können sie im ersten Moment danach ablesen?

2. Kennlinie der PEM-Brennstoffzelle

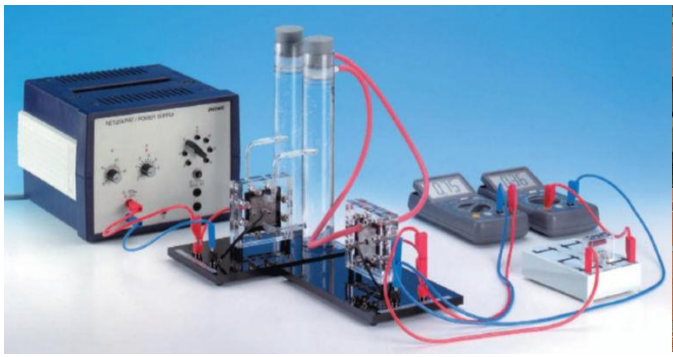


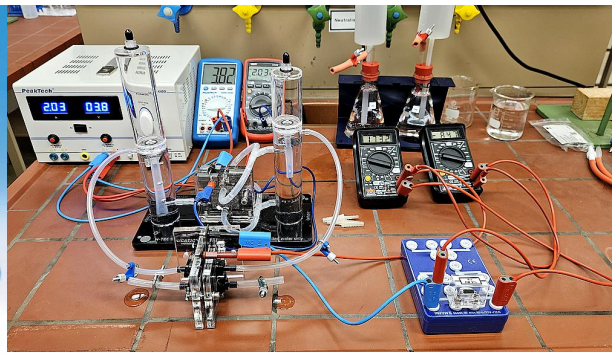
Schaltplan Brennstoffzelle

Zur Erfassung der Kennlinie besteht die einfachste Möglichkeit, die Brennstoffzelle mit Gas zu versorgen, darin, diese direkt mit dem Elektrolyseur zu verbinden. (Es ist jedoch auch möglich, das Gas aus der Gasbar zu entnehmen, wie im Abschnitt „Wirkungsgradmessung“ beschrieben.)

Vorbereitung des Elektrolyseurs:

- Die Gummischlauchstücke mit einer Länge von ca. 40 cm (d_i = 4 mm) werden ggf. mit den oberen Auslassanschlüssen des Vorratsbehälters am Elektrolyseur verbunden.



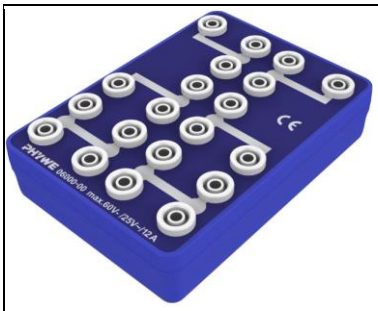


Experimenteller Aufbau

- Füllen Sie beide Wasserbehälter bis zur Linie -A- mit bidestilliertem Wasser (κ < 2 µS). Halten Sie dabei den Schlauch hoch, damit er sich ebenfalls mit Wasser füllt. Benutzen Sie die Überlauftanks auf den Lagertanks. Halten Sie die mit Wasser gefüllten Gummischlauchstücke in ein mit bidestilliertem Wasser gefülltes Becherglas. Schließen Sie den Elektrolyseur an das Stromnetz an und stellen Sie einen Strom von max. 4,4 A oder eine Betriebsspannung von max. 4 V.
- Bauen sie die Schaltung an der Brennstoffzelle entsprechend der Skizze auf. Die Schaltung des Elektrolyseurs bleibt wie bei 1. Als Amperemeter im Stromkreis der Brennstoffzelle wird eines mit 3 Nachkommastellen verwendet.
- Wenn Wasserstoff und Sauerstoff aus den Gummischlauchstücken in das Becherglas entweichen, drücken Sie die Schlauchenden kurz zusammen; Nehmen Sie sie aus dem Wasser und schließen Sie sie an die oberen Einlassanschlüsse der Brennstoffzelle an.
- Eventuell noch in den Rohren befindliche Wassertropfen können die Gaszufuhr zur Brennstoffzelle unterbrechen. In diesem Fall sinkt die Ausgangsspannung. Heben Sie die Schlauchstücke kurz an, damit das Wasser ablaufen kann.

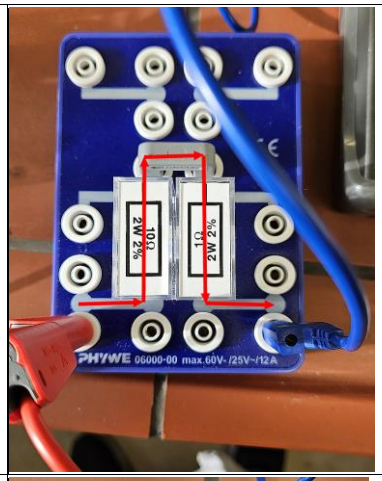
Die elektrischen Daten der Brennstoffzelle sind abhängig vom Gasdurchsatz und der Feuchtigkeit der Membran. Um einen stabilen Zustand in der Brennstoffzelle herzustellen, sollte diese ca. 5 min im Leerlauf laufen und anschließend ca. 5 min mit einem festen Lastwiderstand von z. B. 2 Ω betrieben werden.

- Schließen sie Lastwiderstände unterschiedlicher Größe gemäß Schaltplan an die Brennstoffzelle an. Messen Sie jeweils die Spannung U und den Strom I. Messen Sie zunächst die Leerlaufspannung (Stromkreis nicht geschlossen = ∞ Ω) und beginnen Sie dann die Messreihe mit den größten Widerstandswerten. (Unterschiedliche Widerstände können auch kombiniert werden - in Reihe geschaltet.) Verwenden sie mind. ca. 10-12 unterschiedliche Widerstandswerte. Achten Sie darauf, dass der Stromkreis durch die Brennstoffzelle nicht kurzgeschlossen werden darf.

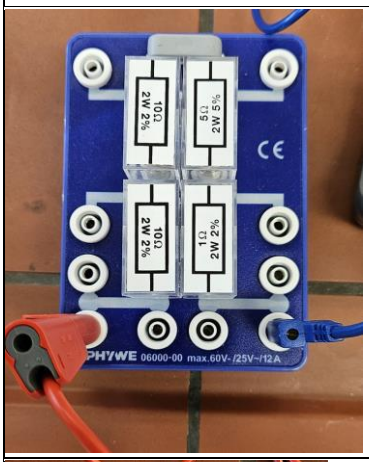


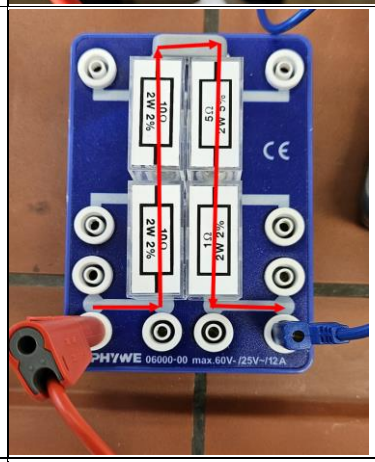
In den Schaltkasten sind unten links und unten recht je 4 Buchsen miteinander verbunden.
In der Mitte und oben sind es 4x je 3 Buchsen.
Durch Setzen der einzelnen Widerstände (2x 10Ω ; 1x 5Ω; 1x2Ω; 2x 1Ω und Kurzschlussstecker) lassen sich verschieden Kombinationen erreichen. Wir haben also 6 Felder, die durch eine Einzelverbindung miteinander kombiniert werden können = Reihenschaltung. Bei einer Doppelverbindung zwischen 2 Feldern erreichen wir eine Parallelschaltung:

Beispiele:



Hier sind es 10 Ω + 1 Ω = 11 Ω
Reihenschaltung





Hier sind es 10 Ω +10 Ω + 5 Ω + 1 Ω = 26 Ω
Reihenschaltung
Das Max. von 28 Ω kann durch Ersetzen des Kursschlussstecker oben durch den 2 Ω Widerstand erreicht werden.

Links: 1 Ω
Die beiden Widerstände oben sind nicht im Stromkreis.

Rechts: keine Verbindung
∞Ω

	$\frac{1}{\frac{1}{1\,\Omega}+\frac{1}{2\,\Omega}} = 0{,}75\,\Omega$ Parallelschaltung	
Durch Reihenschaltung lassen sich alle ganzzahligen Widerstände von 1 Ω bis 28 Ω schalten. Durch die beiden 1 Ω Widerstände parallelgeschaltet (=0,5 Ω) und in Reihe mit den restlichen Widerständen lassen sich auch 0,5 Ω; 2,5 Ω; 5,5 Ω; 7,5 Ω; 10,5 Ω ... 25,5 Ω bis 27,5 Ω realisieren.		

- Da der Innenwiderstand des Amperemeters gegenüber dem Lastwiderstand nicht zu vernachlässigen ist, verwenden Sie immer den 10 A-Messbereich (oder 20 A Bereich). Bei Widerstandswerten kleiner als 1 Ω kann es sein, dass die Werte für Strom und Spannung bei unzureichender Gaszufuhr nicht immer stabil sind.
- Vor einer Messung sollte der Stromkreis für ca. 30 s geöffnet werden, um eine gute Gasversorgung zu gewährleisten. Vermeiden Sie einen Kurzschluss der Brennstoffzelle (max. 10 s)!
- Tragen sie die Spannung U gegen den Strom I in einem Diagramm auf.

3. Effizienz des PEM-Elektrolyseurs

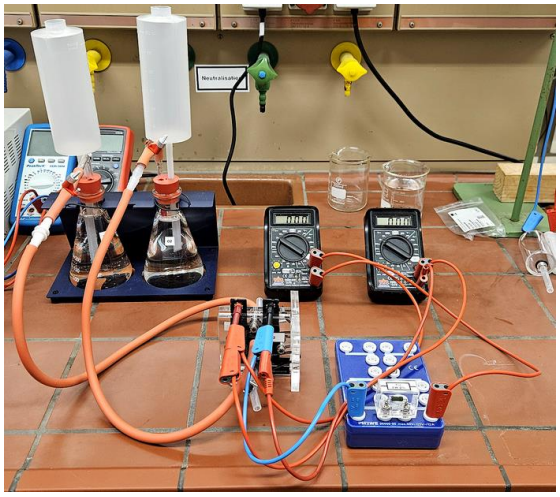
Experimenteller Aufbau

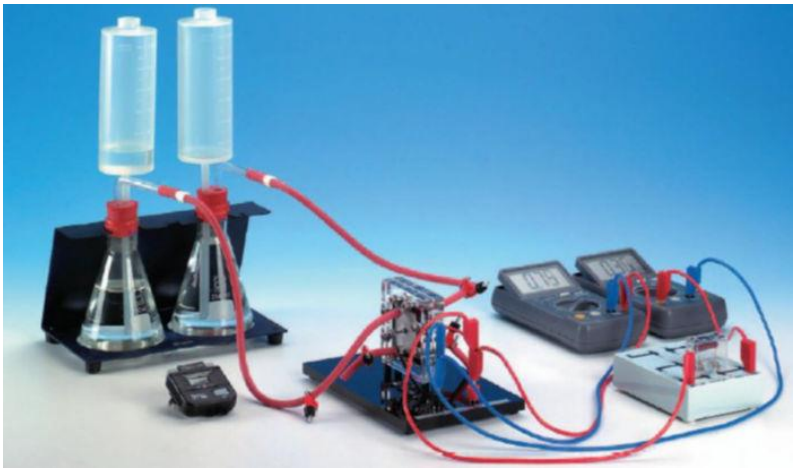
Vorbereitung der Gasbar mit 2 Gasometern:

Ein Gasometer besteht aus einem Erlenmeyerkolben mit zylindrischem Trichter und gebogenem Glasrohr darauf montiert.

- Verbinden Sie über die Reduzieradapter mit jeweils einem kurzen Stück Gummischlauch (d_i = 6 mm) mit den Glasrohren des Gasometers.
- Füllen Sie jedes Gasometer über seinen zylindrischen Trichter mit bidestilliertem Wasser, bis der Erlenmeyerkolben und das rechtwinklige Glasrohr gefüllt sind und nahezu keine Blasen mehr enthalten. Überschüssiges Wasser fließt dann über das Glasrohr ab und wird in einem Becherglas gesammelt. Die Füllhöhen der zylindrischen Trichter sind kalibriert. (Entfällt derzeit: Um die Genauigkeit dieser Markierungen zu überprüfen, empfiehlt es sich, den gesamten Trichter mit bidestilliertem Wasser zu füllen und dieses anschließend in ein Volumenmessgerät fließen zu lassen.)
- Schließen Sie ein ca. 40 cm langes Stück Gummischlauchs (d_i = 4 mm) an den oberen Auslass an den Anschluss des Vorratsbehälters des Elektrolyseurs an.
- Füllen Sie beide Wasserbehälter bis zur Linie -A- mit bidestilliertem Wasser. Halten Sie dabei den Schlauch hoch, damit er sich ebenfalls mit Wasser füllt.
- Verschließen Sie die mit Wasser gefüllten Gummischlauchstücke etwa 2 cm von ihren Enden entfernt mit einer Schlauchklemme und befestigen Sie sie an den Gasometern.
- Setzen Sie die mitgelieferten **Schraubverschlüsse** auf die Vorratsbehälter am Elektrolyseur, damit bei der Produktion oben kein Gas austreten kann.
- Öffnen Sie die Schlauchklemmen.
- Messen Sie Luftdruck und Umgebungstemperatur
- Schließen Sie den Elektrolyseur gemäß 1. an das Stromnetz an und stellen Sie mit dem Einstellknopf eine Stromstärke von ca. 1 A ein. (genauen Wert notieren)
- Messen Sie die Dauer (Zeit) für 25 ml entstandenes Gasvolumen H_2 sowie Strom und Spannung zu Beginn und am Ende
- Messen Sie erneut Luftdruck und Umgebungstemperatur
- Stellen Sie mit dem Einstellknopf jetzt eine Stromstärke von ca. 2 A ein. (genauen Wert notieren)
- Messen Sie die Dauer (Zeit) für 25 ml entstandenes Gasvolumen H_2 sowie Strom und Spannung zu Beginn und am Ende
- Für die spätere Auswertung werden die Werte der beiden Messreihen (1 A und 2 A) in einem Diagramm (2 Kurven) aufgetragen.
- Berechnen Sie den Wirkungsgrad (Protokoll)
- Die Gasmengen im Gasometer werden für 4. weiterverwendet.

4. Effizienz der PEM-Brennstoffzelle

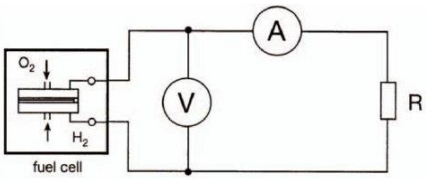




Um den Wirkungsgrad der Brennstoffzelle zu ermitteln, sollten beide Gasometer der Gasbar so voll sein wie möglich. Hierzu wird der Elektrolyseur genutzt (siehe oben).

Übersteigt die Gasproduktion das maximale Fassungsvermögen des Gasometers (ca. 250 ml), entweicht das überschüssige Gas durch den Trichter in die Atmosphäre. Dadurch lässt sich nicht nur der H_2-Gasometer, sondern auch der O_2-Gasometer problemlos vollständig mit dem Elektrolyseur befüllen.

- Schalten Sie nach dem Befüllen des Gasometers den Elektrolyseur aus und klemmen Sie den Schlauch hinter dem Elektrolyseur fest ab.
    - Beide Gasometer sollten ca. 250 ml Gas enthalten.
    - Nutzen Sie den Versuchsaufbau und die Schaltung wie in 2)



- Die unteren Auslassanschlüsse mit kurzen Gummischlauchstücken (= 4 mm) und Schlauch dicht verschließen Klemmen.
- Verbinden Sie die beiden oberen Einlassanschlüsse der Brennstoffzelle jeweils mit einem Gasometer.
- Lösen Sie die Schlauchklemmen an den Verbindungsschläuchen zwischen Gasometer und Brennstoffzelle.
- Schließen Sie einen Lastwiderstand von 1 Ω gemäß der Schaltung in 2. an die Brennstoffzelle an.
- Messen sie Luftdruck und Umgebungstemperatur.
- Messen sie für je 25 ml H_2 die benötigte Zeit die Spannung U und den Strom I zu Beginn und zum Ende des Zeitraums.
- Berechnen Sie den Wirkungsgrad (Protokoll).

Aufgabenstellung

1. Kennlinie des PEM-Elektrolyseurs

- Die gemessenen Ströme I werden gegen die Spannung U grafisch aufgetragen (Kennlinie). Durch den linearen Teil der Messpunkte (rechts im Diagramm) wird eine Ausgleichsgerade gelegt. Aus dem linearen Abschnitt der Kennlinie wird die Zersetzungsspannung als Schnittpunkt der verlängerten Geraden mit der U-Achse bestimmt.

2. Kennlinie der PEM-Brennstoffzelle

- Tragen sie die Spannung U gegen den Strom I in einem Diagramm auf.

3. Effizienz des PEM-Elektrolyseurs

- Tragen Sie für beide Messreihen (1 A und 2 A) die Werte in einem Diagramm auf.
- Berechnen Sie den Wirkungsgrad

4. Effizienz der PEM-Brennstoffzelle

- Berechnen Sie den Wirkungsgrad.

Quelle: Diese Lektion ist erstellt nach den Originalanleitungen der Firma Phywe.
frei nach: https://www.phywe.de/physik/elektrizitaet-und-magnetismus/elektrischer-strom-und-seine-wirkung/kennlinie-und-wirkungsgrad-von-pem-brennstoffzelle-und-pem-elektrolyseur_11558_12591/
übersetzt und angepasst für das Labor an der HS Emden Leer

Gasbar: Funktion und Verwendung

Bestehend aus zwei Kleingasometern mit Stativ und Klebeetiketten zum Beschriften. Zum Bereitstellen kleiner Gasportionen (z. B. Wasserstoff und Sauerstoff). Nicht geeignet zur Speicherung von Gasen, die mit Wasser reagieren oder sich in Wasser lösen.

Funktionsprinzip: Die Erlenmeyerkolben werden bis an den Gummistopfen mit Wasser gefüllt. Durch Einleiten des Gases über die Glasrohre wird das Wasser in den zylindrischen Trichter hochgedrückt. Das Gas selbst sammelt sich im Erlenmeyerkolben. Eine Überfüllung ist nicht möglich, da zu viel eingeleitetes Gas über die Trichter die Speicher verlässt.

Vorteile

Die Gase können mit einer Spritze über die Blindtüllen in der benötigten Menge entnommen werden

Ausstattung und technische Daten

- 2 Kleingasometer, je ca. 200 ml
- max. Fülldruck: 30 mbar
- Speicherbare Gasmenge: je ca. 250 ml
- mit Stativ und Klebeetiketten zum Beschriften