

TUM Science Labs



Brennstoffzelle

Versuch im Physikalischen Praktikum des Mathematik/Informatik-Gebäudes



Schüler-Skript und Versuchsanleitung

Bearbeitet von Markus Beckert, Sheila Sabock

Stand 12.09.2013

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	3
1.1	Vorbereitung, Vorwissen, Vorüberlegungen	3
2	Theorie	3
2.1	Aufbau der Brennstoffzelle	3
2.2	Elektrolyse	4
2.3	Brennstoffzelle	4
2.4	Wirkungsgrad	5
2.5	Kennlinie Brennstoffzelle	7
3	Versuche	9
3.1	Versuchsaufbau	9
3.1.1	Schaltpläne	9
3.2	Bestimmung der Leckrate	10
3.2.1	Versuchsdurchführung	10
3.2.2	Versuchsauswertung	10
3.3	Wirkungsgrad des Elektrolyseurs	10
3.3.1	Versuchsdurchführung	10
3.3.2	Versuchsauswertung	10
3.4	Wirkungsgrad der Brennstoffzelle	10
3.4.1	Versuchsdurchführung	10
3.4.2	Versuchsauswertung	11
3.5	Kennlinie des Elektrolyseurs (optional)	11
3.5.1	Versuchsdurchführung	11
3.5.2	Versuchsauswertung	11
3.6	Kennlinie der Brennstoffzelle (optional)	11
3.6.1	Versuchsdurchführung	11
3.6.2	Auswertung	12

Vorüberlegungen

1 Einführung

1.1 Vorbereitung, Vorwissen, Vorüberlegungen

Um eine Vorstellung zu erlangen, wie eine Brennstoffzelle funktioniert, dienen die nachfolgenden Fragen. Sie sollen einen mit der Thematik vertraut machen.

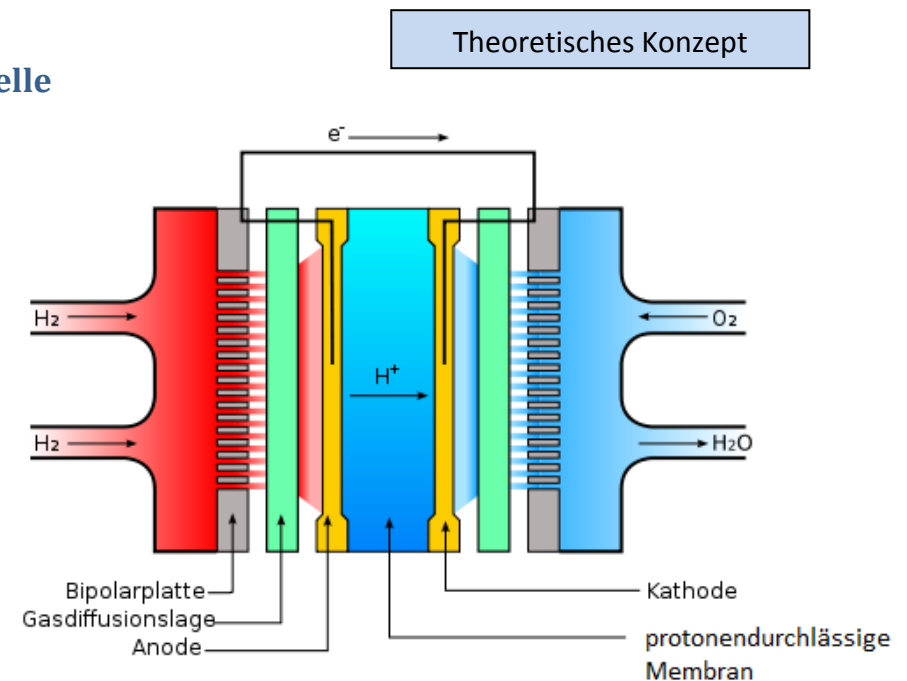
- Aus welchen Molekülen besteht Wasser? Was sind deren Eigenschaften?
- Was ist eine galvanische Zelle? Welchen galvanischen Zellen begegnet man im Alltag?
- Was unterscheidet die Brennstoffzelle von anderen galvanischen Zellen?
- Was könnte man unter einer reversiblen Brennstoffzelle verstehen?
- Die Brennstoffzelle dient der Stromerzeugung. Im Vergleich zu anderen Formen der Stromerzeugung, welche Vor- und Nachteile bringt die Brennstoffzelle mit sich?
- Was versteht man unter den Begriffen Brennstoff und Oxidationsmittel?
- Was ist eine Anode, was ist eine Kathode?

2 Theorie

2.1 Aufbau der Brennstoffzelle

Eine Brennstoffzelle besteht im groben aus drei Teilen: Den zwei Elektroden und einer protonendurchlässigen Membran (Englisch: *proton exchange membran*, kurz: *PEM*), welche zur Abgrenzung zwischen den Elektroden dient. Dieser Aufbau ist in Abbildung 1 dargestellt. Protonen (p^+) sind positiv geladene Elementarteilchen und werden auch als H^+ bezeichnet, da ein Wasserstoffatom (H) aus einem Proton und einem negativ geladenen Elektron (e^-) besteht. Entzieht man dem Wasserstoffatom ein Elektron, so

bleibt nur das Proton übrig und das Wasserstoffatom ist positiv geladen, dies wird durch das Pluszeichen am H gekennzeichnet. Die zwei Elektroden unterscheidet man in ihrer Eigenschaft: Elektronen aufzunehmen oder abzugeben. Die Elektrode, die Elektronen aufnimmt, also ein Elektronenakzeptor, nennt man Anode. Die Elektrode, die Elektronen abgibt, also der Elektronendonator, nennt man Kathode. Wenn man den Elektroden Ladungssymbole vergibt, so wäre die Anode der Pluspol und die Kathode der Minuspol. Die Gasdiffusionslage und die Bipolarplatte dienen dazu, dass Gas gleichmäßig auf die Elektroden zu verteilen, um die Angriffsfläche der Gasteilchen zu maximieren, sodass möglichst viel Wasserstoff zu Wasser reagieren kann.



Theoretisches Konzept

2.2 Elektrolyse

Der Wasserstoff und Sauerstoff, den man für die Reaktion der Brennstoffzelle benötigt, muss zunächst hergestellt werden. Da man in diesem Versuch mit reversiblen Brennstoffzellen arbeitet, kann man die Brennstoffzelle auch nutzen um destilliertes Wasser in seine Bestandteile, Wasserstoff und Sauerstoff, zu zerlegen (Abbildung 2). Bei dieser Reaktion muss man permanent Energie zuführen, damit sie abläuft. So eine Reaktion nennt man

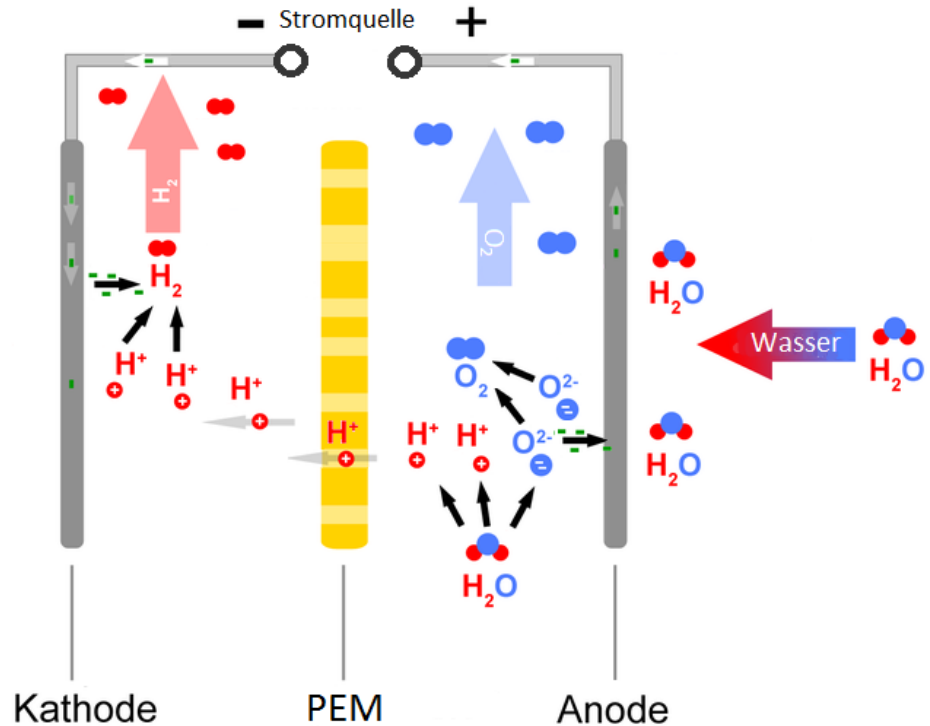
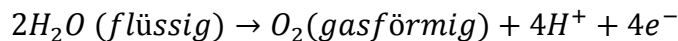


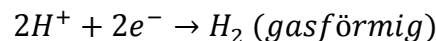
Abbildung 2: Funktionsweise eines Elektrolyseurs

endotherm. Es wird Energie in Form von Strom zugeführt und man erhält aus dem Ausgangsstoff Wasser, die Produkte Wasserstoff und Sauerstoff.

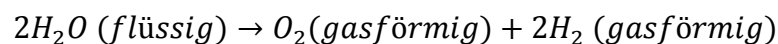
An der Anode (Pluspol) entsteht zunächst aus Wasser, Sauerstoff, Protonen und Elektronen:



Die Protonen (H^+) wandern durch die PEM zur Kathode (Minuspole) und die Elektronen wandern zum Pluspol der Stromquelle. An der Kathode entsteht Wasserstoff:



Also ist die Gesamtgleichung:



Wobei an der Anode Sauerstoff (O_2) und an der Kathode Wasserstoff (H_2) entsteht, welches sich in den jeweiligen Auffangbehältern sammelt.

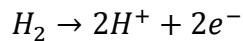
2.3 Brennstoffzelle

Theoretisches Konzept

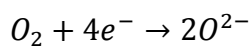
Die Brennstoffzelle gehört zu den galvanischen Zellen. Unter einer galvanischen Zelle versteht man im Allgemeinen eine Vorrichtung zur Umwandlung chemischer Energie in elektrische Energie. In Abbildung 3 sieht man die Funktionsweise einer PEM-Brennstoffzelle. An der Anode wird der Brennstoff (Wasserstoff (H_2)) und an der Kathode das Oxidationsmittel (Sauerstoff (O_2)), zugeführt. Es wird Schematisch die Reaktion der Brennstoffzelle dargestellt und im Folgenden genauer erläutert.

Reaktionsverlauf der Brennstoffzelle

Das Wasserstoffgas wird an der Anode oxidiert, wobei dort Elektronen freigesetzt werden:



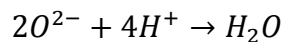
An der Kathode wird Sauerstoff reduziert, wobei hier Elektronen benötigt werden:



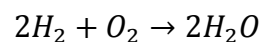
Die Elektronen, die hierfür gebraucht werden, werden durch den Leiter, der zwischen der Anode und der Kathode

sitzt transportiert. Ist der Stromkreis geschlossen, so fließt Strom, ist der Stromkreis durchbrochen, so baut sich eine Potentialdifferenz, also Spannung auf.

Die Protonen (H^+), die an der Anode entstehen, wandern durch die protonendurchlässige Membran zum reduzierten Sauerstoff (O^{2-}). Dort entsteht dann das Wasser:



Somit lautet die Gesamtreaktion:



Diese Reaktion bezeichnet man als exotherm, da sie Energie freigibt. Exotherme Reaktionen laufen, sobald eine gewisse Aktivierungsenergie (z.B.: Temperatur) überschritten ist, freiwillig ab.

2.4 Wirkungsgrad

Theoretisches Konzept

Allgemein gibt ein Wirkungsgrad das Verhältnis zwischen Nutzen und Aufwand wieder. Die Formel ist $\eta = \frac{P_{\text{Nutz}}}{P_{\text{Auf}}}$, also das Verhältnis von nutzbarer Leistung zu aufgewendeter Leistung. Der Wirkungsgrad wird in Prozent angegeben.

Energiewirkungsgrad

Bei dem Energiewirkungsgrad betrachtet man das Verhältnis der Energie, die verbraucht wird und die Energie, die in Wasserstoff gespeichert ist.

Zunächst wird erklärt, wie der Wirkungsgrad bei der Elektrolyse berechnet wird.

Bei der **Elektrolyse** wird Strom in chemische Energie gespeichert, man berechnet die aufgewendete Energie durch die Formel:

$$W_{\text{auf}} = U_{\text{el}} \cdot I_{\text{el}} \cdot t_{\text{el}}$$

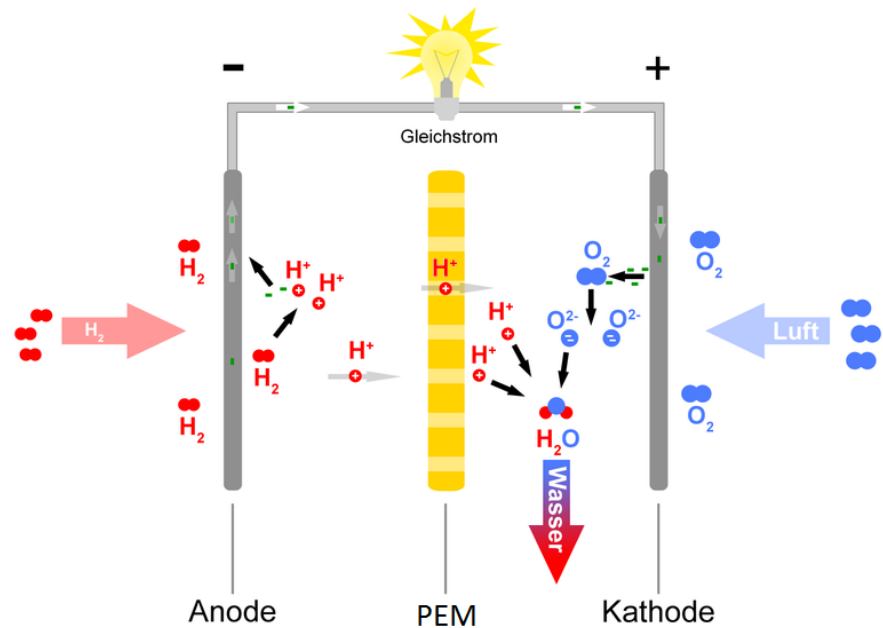


Abbildung 3: Funktionsweise einer Brennstoffzelle

Wobei U_{el} die angelegte Spannung, I_{el} die gemessene Stromstärke am Elektrolyseur ist und t_{el} die Zeit darstellt, wie lang man den Elektrolyseur betreibt.

Nun hat man ein gewisses Volumen Wasserstoff erzeugt. Um herauszufinden, wie viel chemische Energie in dieser Menge Wasserstoff steckt, benötigt man folgende Formel:

$$W_{H_2} = n \cdot \Delta H^0$$

Wobei $\Delta H^0 = 286 \frac{kJ}{mol}$ der chemische Energieinhalt von Wasserstoff pro *mol* ist und n die erzeugte Stoffmenge Wasserstoff in *mol*. Die Stoffmenge ist in der Chemie allgemein eine Größe, mit der man die Teilchenanzahlen von Stoffen vergleichen kann. 1 *mol* entspricht in etwa $6,022 \cdot 10^{23}$ Teilchen. Die Stoffmenge von Wasserstoff berechnet sich durch:

$$n = \frac{V_{H_2,exp}}{V_{m,labor}}$$

$V_{H_2,exp}$ ist das Volumen des Experimentell erzeugten Wasserstoffs. $V_{m,labor}$ ist das molare Gasvolumen unter Laborbedingungen, und hat die Einheit $\frac{m^3}{mol}$. Es berechnet sich durch:

$$V_{m,labor} = \frac{R \cdot T_{labor}}{p_{labor}}$$

Wobei T die aktuelle Labortemperatur in Kelvin, p der aktuelle Laborluftdruck in Pascal ist und R für die universelle Gaskonstante mit $R = 8,31 \frac{J}{mol \cdot K}$ steht.

Der Energiewirkungsgrad lässt sich schlussendlich durch folgende Formel berechnen:

$$\epsilon_E = \frac{W_{H_2}}{W_{auf}}$$

Dieser Wirkungsgrad zeigt an, wie viel Energie bei der Umwandlung von Wasser zu Wasserstoff verloren gegangen ist.

Will man nun den Energiewirkungsgrad der **Brennstoffzelle** berechnen, muss man die Formel bei der Elektrolyse ein wenig anpassen, da in diesem Fall die Reaktion in die andere Richtung verläuft.

Die aufgewendete Energie ist in diesem Fall die eingesetzte chemische Energie:

$$W_{H_2} = n \cdot \Delta H^0$$

Mit der Stoffmenge n des Verbrauchten Wasserstoffs.

Die nutzbare Energie ist dann die Energie die man durch die Brennstoffzelle bekommt, also die elektrische Energie:

$$W_{nutz} = U_{brz} \cdot I_{brz} \cdot t_{brz}$$

In diesem Fall steht U_{brz} für die gemessene Spannung, I_{brz} für die gemessene Stromstärke an der Brennstoffzelle. t_{brz} steht für die Zeit, die benötigt wird, bis das erzeugte Wasserstoffgas vollständig verbraucht wurde.

Um später die ermittelten Ergebnisse besser vergleichen zu können, sind hier ein paar typische Wirkungsgrade angegeben:

Maschine/Prozess	~ Energiewirkungsgrad in Prozent
Solarzelle	5-27
Elektrolyse von Wasser	70-80
Brennstoffzelle	20-60
Ottomotor (Benzinmotor)	35-40
Dieselmotor	<50
Elektromotor	>90
Glühlampe (keine Halogenlampe)	3-5
Mensch (Skelettmuskulatur)	<30
Photosynthese	35

Tabelle 1: Typische Wirkungsgrade einiger Maschinen oder Prozesse

2.5 Kennlinie Brennstoffzelle

Theoretisches Konzept

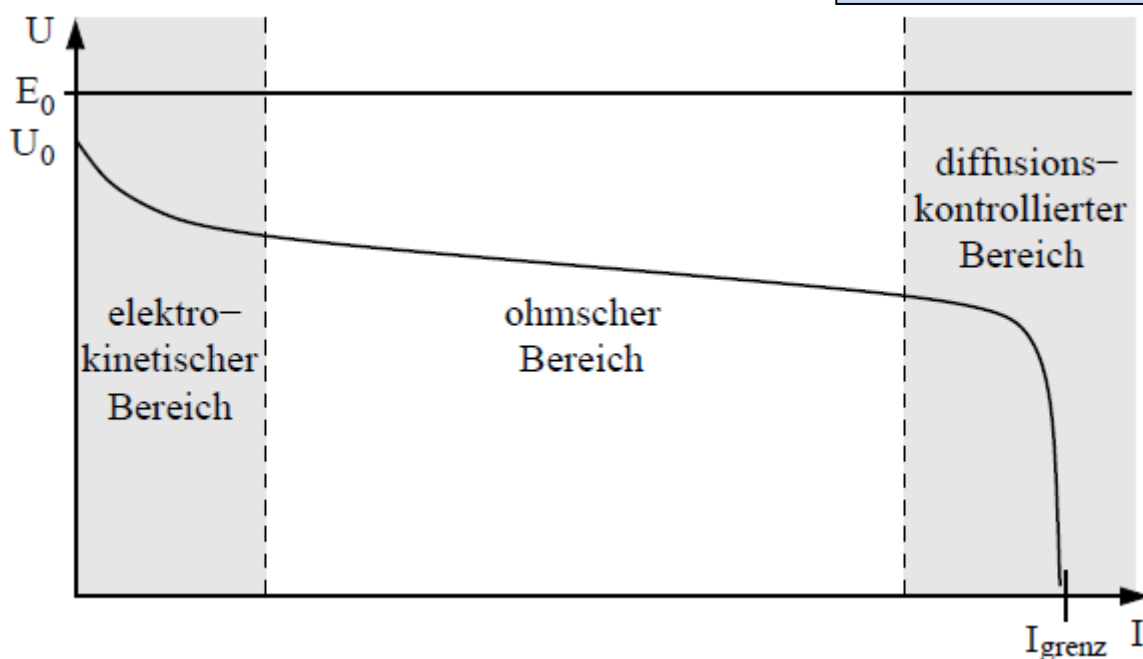


Abbildung 4: Typische Kennlinie einer Brennstoffzelle mit Unterscheidungen in drei Bereiche

Eine ideale Brennstoffzelle ist eine Konstantspannungsquelle mit $1,23V$, was auch die Mindestspannung für die Elektrolyse von Wasser ist. Da eine Brennstoffzelle von dem Verhalten einer konstanten Spannungsquelle abweicht, wird dies für jede Brennstoffzelle mit einer Kennlinie charakterisiert, indem man in ein Diagramm den Zellstrom I gegen die Zellspannung U aufträgt (Abbildung 4). Diese Abweichung von der Normalspannung nennt man Überspannung.

Im Folgenden wird erklärt, wie diese Überspannungen entstehen und durch was sie beeinflusst werden.

Durchtritts-Überspannung

Der erste Bereich in Abbildung 4, also der elektrokinetische Bereich, wird Durchtritts-Überspannung genannt. In diesem Bereich ist die Kennlinie durch katalytische Prozesse an den Elektroden bestimmt. Aus diesem Grund ist der Hauptfaktor, die Geschwindigkeit mit der die Elektronen die Kontaktfläche zwischen den Gasmolekülen und dem Katalysator auf der Elektrode überqueren.

Charakteristisch für diese Durchtrittsüberspannung, also den elektrokinetischen Bereich, ist der schnelle Abfall der Spannung bei kleinem Strom.

Ohmsche Überspannung

Die ohmsche Überspannung wird auch ohmscher Bereich genannt. Eine Brennstoffzelle hat wie jede andere Spannungsquelle einen Innenwiderstand. In diesem Bereich dominiert der Innenwiderstand die Charakteristik der Kennlinie.

Charakteristisch für diesen Bereich ist der lineare Abfall der Kennlinie.

Diffusionsüberspannung

Die Diffusionsüberspannung ist der diffusionskontrollierte Bereich in Abbildung 4. In diesem Bereich ist die Diffusion der Gase, also die Geschwindigkeit, wie schnell neues Gas zu den Elektroden kommt, der bestimmende Faktor. Umso höher der Stromfluss wird, umso niedriger wird die Spannung, da nicht genug Moleküle nachströmen können um eine Spannung aufrecht zu erhalten.

Charakteristisch für diesen Bereich ist das plötzliche Abknicken der Kurve, wenn man in die Nähe des Grenzstroms gelangt.

3 Versuche

3.1 Versuchsaufbau

In Abbildung 5 wird der Versuchsaufbau beschrieben. Auf dem Bild sind wichtige Bauelemente oder Anzeigen markiert.

- 1: Netzschalter
- 2: Stromquelle für den Elektrolyseur
- 3: Elektrolyseur
- 4: Wasserstoffbehälter
- 5: Sauerstoffbehälter
- 6: Spannungs- und Strommessgerät
- 7: Strommessgerät der Brennstoffzelle
- 8: Spannungsmessgerät der Brennstoffzelle
- 9: Zwei Brennstoffzellen
- 10: Widerstand als Verbraucher
- 11: Lampe als Verbraucher
- 12: Ventilator als Verbraucher

Geräte und Anordnungen

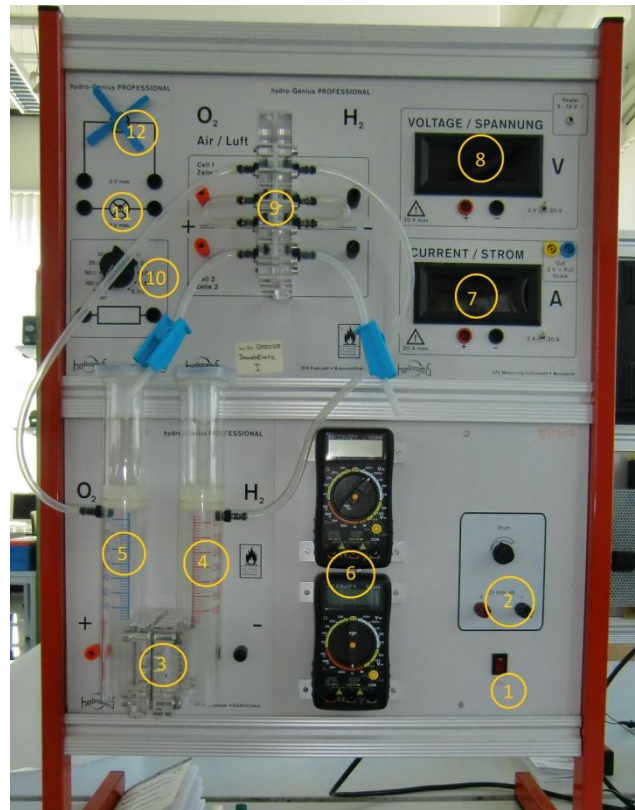


Abbildung 5 Versuchsaufbau Brennstoffzelle

3.1.1 Schaltpläne

Für die folgenden Versuche werden die Schaltpläne Abbildung 6 entnommen.

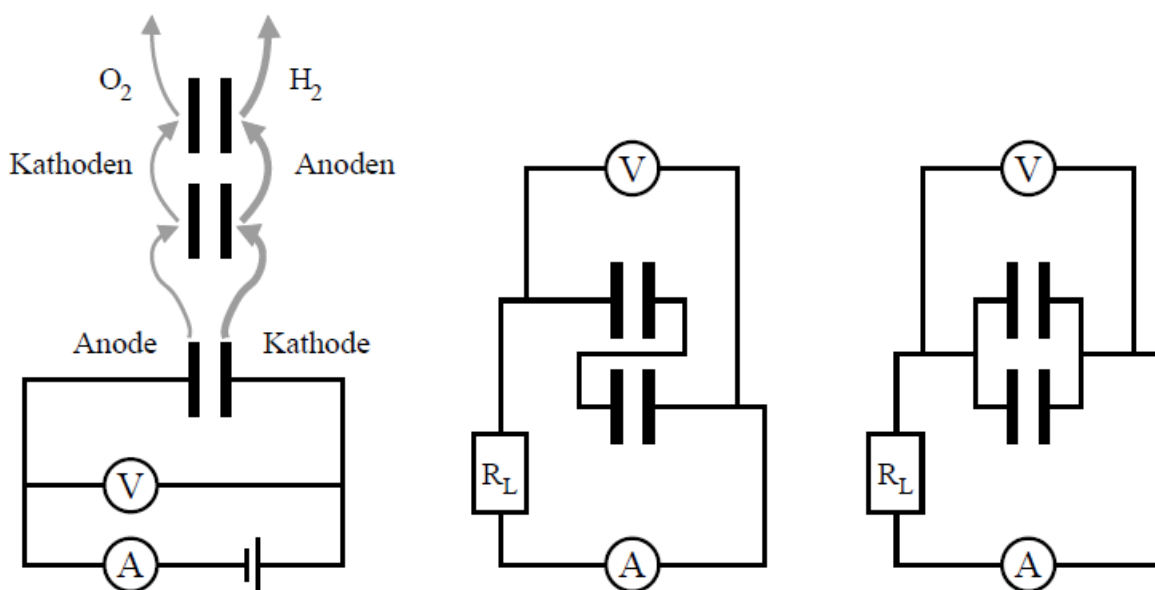


Abbildung 6: Schaltpläne: Links Elektrolyse, Mitte Brennstoffzellen in Reihenschaltung, Rechts Brennstoffzelle in Parallelschaltung

3.2 Bestimmung der Leckrate

Da das Wasserstoffmolekül (H_2) sehr klein ist, geht permanent etwas von dem Gas durch die Schläuche und Wände der Behälter verloren. Der Grund hierfür ist, dass die Schläuche und Behälter nicht dicht genug sind und dadurch die Wasserstoffmoleküle entweichen können. Dies ist unter anderem der Grund, warum man Wasserstoff so schwer speichern kann. Bei den folgenden Versuchen wird der Verbrauch von Wasserstoff bestimmt. Um hier keinen groben Fehler bei der Auswertung zu machen, muss man zuerst bestimmen wie hoch die Leckrate, also der Verlust an Wasserstoff ohne Reaktion tatsächlich ist, um dies bei den folgenden Auswertungen zu berücksichtigen.

Die Leckrate $V_{Leck} = \left(\frac{dV}{dt}\right)_{Leck}$ des Systems, also die Änderung des Volumens pro Zeit, wird wie folgt bestimmt.

Versuchsdurchführung

3.2.1 Versuchsdurchführung

Zuerst wird mit dem Elektrolyseur, bei geschlossenen Schlauchklemmen, ein ausreichender Wasserstoffvorrat (ca. 30ml) erzeugt. Danach trennt man alle elektrischen Anschlüsse vom Elektrolyseur und der Brennstoffzelle. Nun misst man alle zwei Minuten den Füllstand des Wasserstofftanks für insgesamt zehn Minuten und trägt dies in eine Tabelle ein.

3.2.2 Versuchsauswertung

Man trägt für die Auswertung den Gasvorrat (Volumen) gegen die Zeit in ein Koordinatensystem ein. Über eine Ausgleichsgerade bestimmt man anschließend die Leckrate. Üblicherweise wird hierbei die x – Achse als Zeitachse gewählt und die y – Achse für das Volumen verwendet.

3.3 Wirkungsgrad des Elektrolyseurs

Nun wird der Energiewirkungsgrad ϵ_E des Elektrolyseurs bestimmt.

3.3.1 Versuchsdurchführung

Versuchsdurchführung

Um diese Aufgabe zu erfüllen, stellt man einen festen Strom ($I_{el} \approx 1A$) am Elektrolyseur ein und bestimmt die Spannung U_{el} . Dann erzeugt man in sechs Minuten Wasserstoff und notiert sich das Volumen. Ebenso soll man Raumtemperatur und den aktuellen Luftdruck messen.

3.3.2 Versuchsauswertung

Der Energiewirkungsgrad wird nun wie im Theorieteil beschrieben berechnet. Zu beachten ist, dass Wasserstoff verloren geht, also muss man das erzeugte Volumen um die Leckrate aus Versuch 3.2 korrigieren. Den errechneten Wirkungsgrad soll man mit den angegebenen Wirkungsgraden vergleichen, ist das Ergebnis plausibel?

3.4 Wirkungsgrad der Brennstoffzelle

Mit Hilfe der Brennstoffzelle erzeugt man nun Strom. Hier wird, ähnlich wie bei der Elektrolyse der Energiewirkungsgrad ϵ_E bestimmt.

3.4.1 Versuchsdurchführung

Versuchsdurchführung

Hinweis: Bei diesem Versuch entsteht Wasser, welches die Brennstoffzelle verstopfen kann. Wichtig ist daher, dass man vor jedem folgenden Versuch die Brennstoffzelle zweimal freispült. Hierfür wird ein ausreichender Gasvorrat Wasserstoff (ca. 40ml) im Tank

bei geschlossenen Schlauchklemmen erzeugt. Danach werden die Schlauchklemmen geöffnet, sodass das gesamte Gas möglichst schnell durch die Brennstoffzelle fließen kann um das überschüssige Wasser auszuspülen.

Um generell einen Stromfluss zu messen, muss man an die Brennstoffzelle einen Verbraucher anschließen. In diesem Versuch ist geplant, hierfür den Lastwiderstand herzunehmen, jedoch kann man, auch den Ventilator oder die Lampe als Verbraucher betreiben.

Die Brennstoffzellen werden nun angeschlossen. Der Lastwiderstand wird geöffnet und die Schlauchklemmen geschlossen. Mit dem Elektrolyseur wird sechs Minuten **lang** Wasserstoffgas erzeugt und das erzeugte Volumen notiert.

Nun stellt man den Lastwiderstand auf einen geringen Wert ein ($0,3\Omega$ oder $0,5\Omega$). Anschließend misst man die Zeit t_{brz} , die gebraucht wird bis das gesamte Wasserstoffgas verbraucht wird. Man notiert sich die Stromstärke und Spannung in der Zeit.

3.4.2 Versuchsauswertung

Der Energiewirkungsgrad wird nun wie im Theorieteil beschrieben berechnet. Zu beachten ist, dass Wasserstoff verloren geht, also muss man das erzeugte Volumen um die Leckrate aus Versuch 3.2 korrigieren. Den errechneten Wirkungsgrad soll man mit den angegebenen Wirkungsgraden vergleichen, ist das Ergebnis plausibel?

3.5 Kennlinie des Elektrolyseurs (optional)

Bei diesem Versuch bestimmt man die Strom-Spannungs-Kennlinie des Elektrolyseurs. Man soll zusätzlich die Spannung, an der der Stromfluss einsetzt möglichst genau messen.

3.5.1 Versuchsdurchführung

Versuchsdurchführung

An den Elektrolyseur legt man eine Spannung U_{el} an und variiert diese, sodass der Stromfluss I_{el} in $0,1A$ Schritten bis max $1,5A$ steigt. Man misst für jeden Schritt die aktuelle Spannung, sowie den Strom.

3.5.2 Versuchsauswertung

Zur Auswertung trägt man I_{el} gegen U_{el} in ein Koordinatensystem ein und betrachtet die gefundene Kennlinie. Was fällt auf?

3.6 Kennlinie der Brennstoffzelle (optional)

Nun bestimmt man die Kennlinie in Parallel- und Reihenschaltung der Brennstoffzellen.

3.6.1 Versuchsdurchführung

Versuchsdurchführung

Man kann mit der Parallelschaltung beginnen. Dazu schließt man die Schlauchklemmen und erzeugt einen ausreichenden Gasvorrat bei geöffnetem Lastwiderstand.

Aufgabe ist es für alle Lastwiderstände R_{Last} den Strom und die Spannung an den Brennstoffzellen zu messen. Dabei beginnt man mit dem größten Widerstand $R_{Last} = \infty$ und geht dann nach und nach runter bis $R_{Last} = 0,3\Omega$. Die Werte für Spannung und Strom sollte man nicht sofort ablesen, sondern etwas warten, bis sie aufhören zu schwanken (ca. 30s). Damit das Endergebnis genauer wird wiederholt man diese Messreihe dreimal.

Zum Schluss wird alles in Reihenschaltung wiederholt.

3.6.2 Auswertung

Man bildet den jeweiligen Mittelwert der drei Messungen für Spannung und Strom. Die gemessene Werte trägt man in ein Koordinatensystem ein und erstellt somit ein Diagramm. Da man bei diesem Versuch zwei Zellen misst, muss man die Messwerte noch korrigieren. Die beiden Brennstoffzellen dürfen als Identisch angenommen werden. Was fällt auf?