

Die Brennstoffzelle

29. Mai 2024



Inhaltsverzeichnis

1	Was versteht man unter Wasserstofftechnologie?	2
2	Funktionsprinzipien der Komponenten	3
2.1	Der Elektrolyseur	3
2.2	Die Brennstoffzelle	3
3	Experimente und Aufgaben	5
3.1	Der Wirkungsgrad des Elektrolyseurs	5
3.2	Kennlinien der Brennstoffzelle unter Last	6
3.3	Der Wirkungsgrad der Brennstoffzelle (optional)	8
3.3.1	Berechnung der Spannung einer idealen Brennstoffzelle	8
3.3.2	Bestimmung der realen Leerlaufspannung	9
3.3.3	Vertiefung: Bestimmung des Wirkungsgrads bei verschiedenen Lastwiderständen	10
3.4	Betrieb des Wasserstoffautos	12
4	Quellen	12

1 Was versteht man unter Wasserstofftechnologie?

Sicherlich ist Ihnen aufgefallen, dass in den letzten Jahren die Diskussion um den Ersatz der **fossilen Energieträger** (Öl, Kohle, Erdgas) durch **regenerative Energien** und um eine CO₂-freie Energiewandlung zugenommen hat. Bei der Nutzung regenerativer Energien, ob Wind- oder Wasserkraft oder die direkte Sonnenenergienutzung durch **Solarzellen**, geht es in der Regel um die Erzeugung von Elektrizität. Elektrizität ist sehr praktisch, hat aber den entscheidenden Nachteil, dass sie sich nur schlecht *speichern* lässt. Die „Wasserstofftechnologie“ ist eine Möglichkeit, diesen Nachteil auszugleichen, indem die Energie in chemischer Form als molekularer **Wasserstoff** (H₂) gespeichert wird. Man versteht darunter (unter anderem) den in sich geschlossenen Prozess der Herstellung molekularen Wasserstoffs aus Wasser (H₂O) zur Energiespeicherung einerseits und seiner späteren **Oxidation** (zurück zu Wasser) zur Elektrizitätserzeugung andererseits.

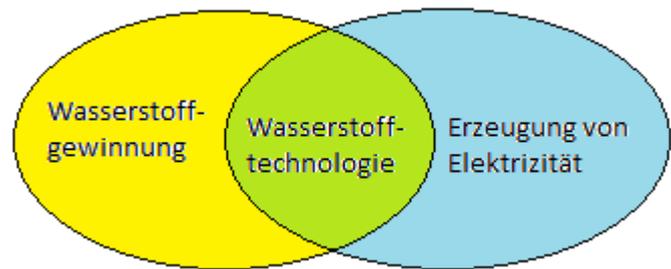


Abbildung 1: Wasserstofftechnologie

Die H₂-Technologie besteht im Wesentlichen aus drei Elementen:

- dem Solarmodul,
- dem **Elektrolyseur** und
- der **Brennstoffzelle**.

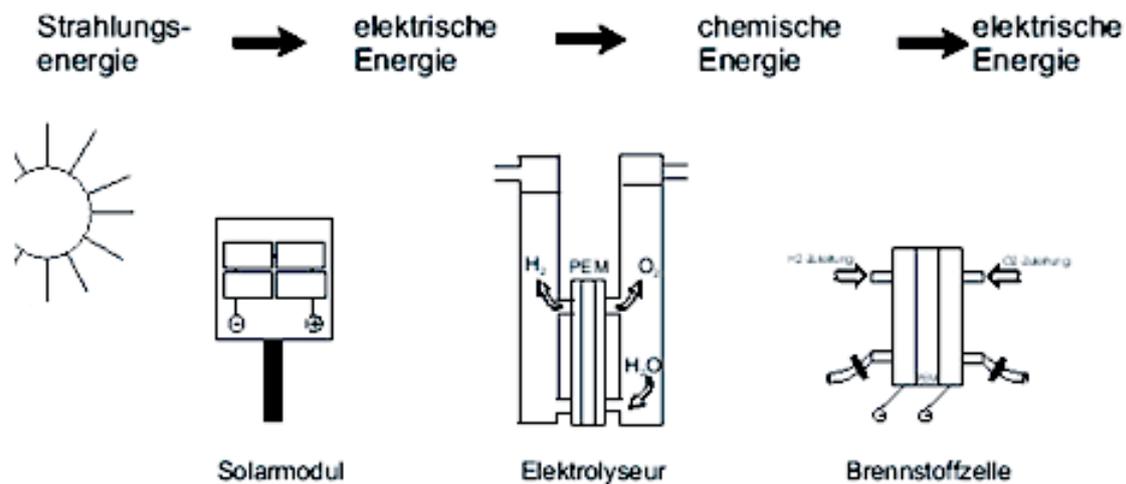


Abbildung 2: Die Energieumwandlungen der Wasserstofftechnologie im Überblick: Aus der Strahlungsenergie der Sonne erzeugt das Solarmodul (Solarzellen) Elektrizität, mit der im Elektrolyseur aus Wasser (H₂O) Wasserstoff (H₂) und Sauerstoff (O₂) hergestellt werden. Der Wasserstoff wird in einem Tank gespeichert und kann an einem anderen Ort zu einer späteren Zeit mittels der Brennstoffzelle wieder zu Wasser oxidiert werden, wodurch Elektrizität entsteht. Elektrolyseur und Brennstoffzelle arbeiten also komplementär zueinander².

In den Experimenten zur Brennstoffzelle vollziehen wir die in Abb. 2 gezeigten Energieumwandlungen nach und untersuchen sie auf ihren Wirkungsgrad. Schwerpunktmäßig konzentrieren wir

²Quelle: <http://www.physik.uni-augsburg.de/ferdi/umweltpraktikum/solar> (nicht mehr aktiv)

uns dabei auf den Elektrolyseur (in dem der Wasserstoff erzeugt wird) und die Brennstoffzelle (in der aus dem erzeugten Wasserstoff Nutzenergie erzeugt wird). Wir weichen dabei etwas von der Abbildung ab: Die Elektrizität für den Elektrolyseur im Experiment kommt nicht von einer Solarzelle, sondern wird dem Elektrizitätsnetz entnommen.

2 Funktionsprinzipien der Komponenten

2.1 Der Elektrolyseur

Unser Elektrolyseur besteht aus einem Behälter mit destilliertem Wasser, in dem sich zwischen zwei mit **Platin** beschichteten **Elektroden** eine nur für **Protonen** durchlässigen Polymembran (**Protonen-Austausch-Membran**) befindet. Zwischen der **Anode** und der **Kathode** wird eine **Spannung** angelegt. Die Wassermoleküle ($2\text{H}_2\text{O}$) werden an der Anode in ihre Bestandteile ($\text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^-$) zerlegt. An der Anodenseite entsteht molekularer Sauerstoff (O_2). Die Protonen (4H^+) gelangen durch die nur für sie durchlässige Membran auf die Kathodenseite, wo sie sich anreichern. Durch die angelegte äußere Spannung gelangen die **Elektronen** (4e^-) über einen äußeren Stromkreis zur Kathode, wo sie mit den durch die Membran diffundierten Protonen molekularen Wasserstoff (2H_2) bilden.

Die Energie, die der Elektrolyseur zur Zersetzung von Wasser in seine Bestandteile benötigt, kann beispielsweise von einer **Solarzelle** geliefert werden⁴.

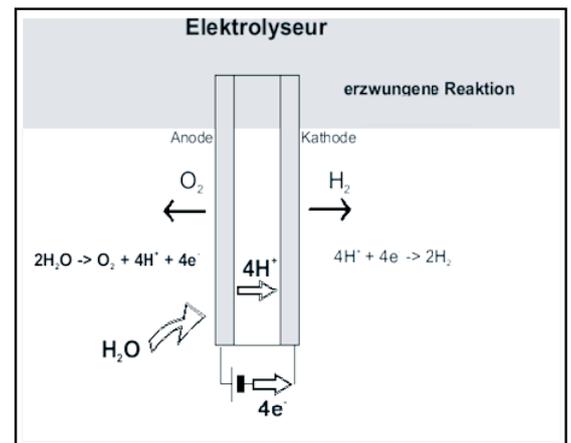


Abbildung 3: Chemische Umwandlungen im Elektrolyseur³. Zur Erklärung der chemischen Reaktionen, siehe nebenstehenden Text.

2.2 Die Brennstoffzelle

Die Brennstoffzelle besteht, wie der Elektrolyseur, ebenfalls aus zwei mit Platin als Katalysator beschichteten Elektroden, zwischen denen sich die nur für Protonen durchlässige **Protonen-Austausch-Membran** befindet. Nur befinden sich diese Elektroden nicht in Wasser, sondern an die Anode wird (gasförmiger) Sauerstoff (O_2), an die Kathode (gasförmiger) Wasserstoff (H_2) herangeführt. Die Prozesse der Elektrolyse laufen hier in umgekehrter Richtung ab. Die chemische Energie, die frei wird, wenn Sauerstoff (O_2) und Wasserstoff (H_2) zu Wasser (H_2O) reagieren, wandelt die Brennstoffzelle direkt mit Hilfe des Katalysatormaterials Platin (ohne „heißen“ Verbrennungsprozess) in elektrische Energie um. Vereinfacht gesagt ist eine Brennstoffzelle also ein „rückwärts betriebener Elektrolyseur“.



Abbildung 4: Energieumwandlung in der Brennstoffzelle.

³Quelle: <http://www.physik.uni-augsburg.de/ferdi/umweltpraktikum/solar/> (nicht mehr aktiv)

⁴Da bei der Erzeugung und dem Transport des Wasserstoffs hohe Energieverluste auftreten, ist die Wasserstofftechnologie nur dann wirklich sinnvoll, wenn irgendwann in der Zukunft emissionsfreie Solarenergie in großem Maßstab genutzt werden kann.

In Abbildung 5 sind die chemischen Vorgänge in einer Brennstoffzelle dargestellt: Der Wasserstoff H_2 gelangt (in der Abb. links) an die Anode, der Sauerstoff O_2 (in der Abb. rechts) an die Kathode. Die Platinbeschichtung wirkt als **Katalysator** und sorgt dafür, dass die **Aktivierungsenergie** (und damit die Temperatur) der chemischen Reaktion deutlich gesenkt wird. Dem an die Anode geführten Wasserstoff werden durch die katalytische Wirkung der Elektrode die Elektronen entrissen⁵. Dabei wird das neutrale Wasserstoffatom (H) in ein Proton (H^+) und ein Elektron (e^-) zerlegt. Da Wasserstoff in molekularer Form (H_2) vorliegt, werden an der Anode also immer zwei Atome in ihre Bestandteile zerlegt. An der Anode befinden sich somit freie, bewegliche Elektronen (e^-) und Protonen (H^+).

Durch die dazwischen liegende **Protonen-Austausch-Membran**, gelangen die Protonen (H^+) auf die Sauerstoffseite, d.h. zur Kathode⁶, die Elektronen jedoch nicht. Sie bleiben im Metall der Anode, was dazu führt, dass sich die Kathode positiv auflädt. Zwischen den beiden Elektroden entsteht eine Potenzialdifferenz.

Die vom Wasserstoff abgegebenen Elektronen (e^-) werden von der Anode „abgesaugt“ und zur Kathode, die über einen Verbraucher (Elektromotor, Lampe, ...) mit der Anode verbunden ist, weitergeleitet, so dass ein elektrischer Strom fließt.

Aus dem Metall der Kathode nimmt ein O_2 -Molekül vier Elektronen von zwei H_2 -Molekülen auf (in der Abb. rechts), so dass zunächst zwei zweifach negativ geladene Sauerstoffionen O^{2-} entstehen. Jedes Sauerstoffion verbindet sich mit jeweils zwei Protonen (H^+), die durch das Elektrolyt zur Kathode diffundiert sind, zu einem Wassermolekül H_2O .

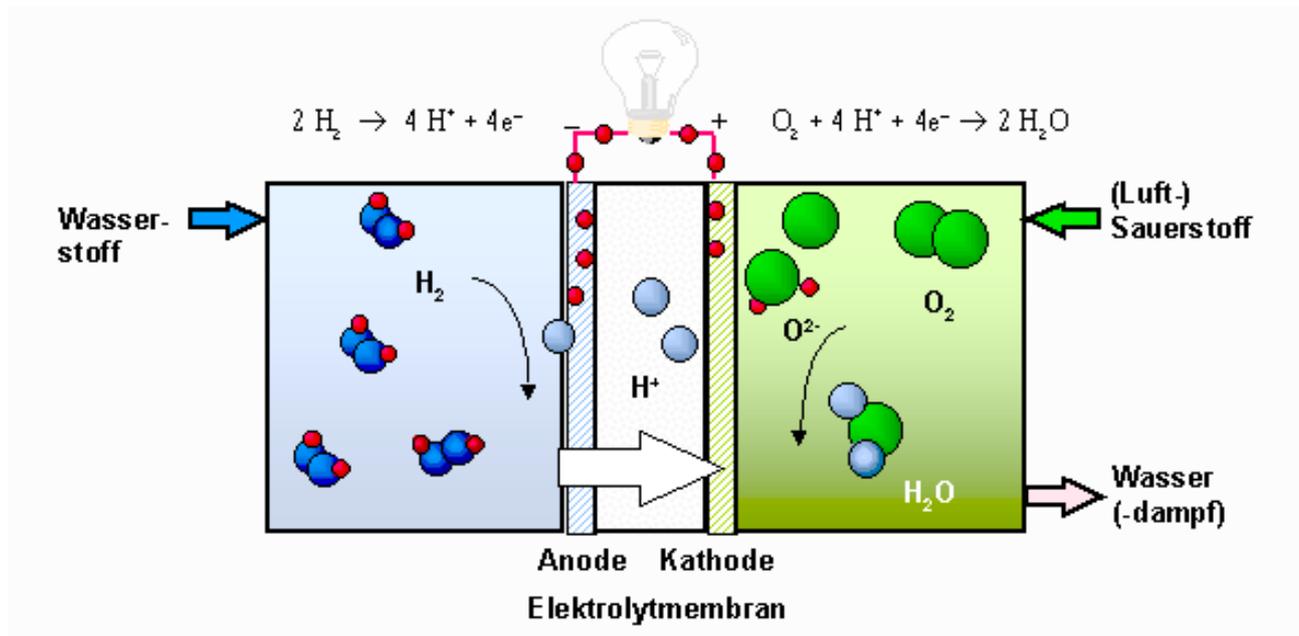


Abbildung 5: Chemische Umwandlungen in der Brennstoffzelle. Bei der in der Abbildung eingezeichneten „Elektrolytmembran“ handelt es sich um die oben erwähnte **Protonen-Austausch-Membran**.

Solange Wasserstoff und Sauerstoff zugeführt werden, bildet sich zwischen den Elektroden eine Spannung, mit der ein Stromfluss in Gang gehalten werden kann. Die Brennstoffzelle ist somit eine Elektrizitätsquelle, die geräuschlos und nur mit Wasser als „Abgas“ arbeitet.

⁵In der Chemie wird eine solche Reaktion als „**Oxidation**“ bezeichnet. Allgemein bedeutet *Oxidation* eine Abgabe von Elektronen und *Reduktion* eine Aufnahme von Elektronen. Im ursprünglichen, speziellen Sinne bedeutet Oxidation das Entstehen einer Sauerstoffverbindung.

⁶ Als Kathode bezeichnet man die Elektrode, an der Reduktionsreaktionen – d.h. Reaktionen, bei denen Elektronen aufgenommen werden – stattfinden. Entscheidend ist also nicht das Vorzeichen der Spannung, die an der Elektrode anliegt, sondern die Art der chemischen Reaktion, die an ihr stattfindet! (Bei Elektrolysen ist die Kathode die *negativ* geladene Elektrode, bei Batterien und Brennstoffzellen die *positiv* geladene.)

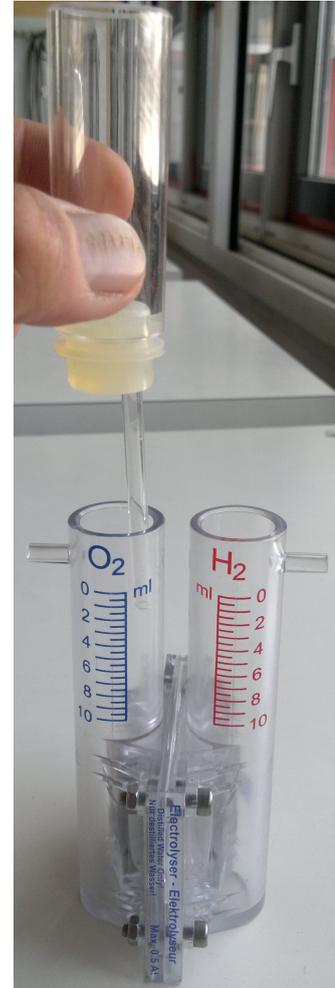
3 Experimente und Aufgaben

3.1 Der Wirkungsgrad des Elektrolyseurs

Aufgabe: Erzeugen Sie mit dem Elektrolyseur Wasser- und Sauerstoff und berechnen Sie seinen **Wirkungsgrad**. Die Anleitung zum Zusammenbau und Hinweise zur Auswertung finden Sie im folgenden Text.

Zusammenbau:

1. Füllen Sie beide Zylinder bis zur Null-Markierung mit destilliertem Wasser.
2. Verschließen Sie die beiden Elektrolyseurzylinder jeweils mit einer Dreierkombination aus Doppelstopfen, dünnem Glasröhrchen und Glaszylinder wie in der Abbildung rechts gezeigt. In das Loch im Doppelstopfen müssen Sie das Glasröhrchen stecken und auf die andere Seite des Doppelstopfens den Glaszylinder. Beim Aufsetzen des Doppelstopfens auf den Elektrolyseurzylinder muss das Glasröhrchen in diesen hineinragen.
3. Verschließen sie die Auslassöffnungen des Elektrolyseurs mit den beiliegenden Stopfen.
4. Schließen Sie die Kontakte des Elektrolyseurs an das Netzgerät an und, falls nicht schon am Netzgerät ein Ampèremeter vorhanden ist, bauen Sie ein Multimeter so ein, dass es die Stromstärke misst.



Messung: Stellen Sie die **Stromstärke** auf $I = 0,5 \text{ A}$ (**nicht höher !**) und stoppen Sie mit einer Stoppuhr die Zeit t , bis sich in beiden Zylindern eine deutlich sichtbare Menge Gas angesammelt hat. Notieren Sie Zeit t , **Stromstärke** I , **Spannung** U und das Volumen V des entstandenen Wasserstoffs in der Tabelle unten.

Auswertung: Wenn man einen Kubikzentimeter⁷ gasförmigen Wasserstoffs verbrennt, so werden etwa 10 Joule Energie frei⁸ (\rightarrow **Heizwert** von Wasserstoff: $H = 10 \text{ J/cm}^3$).

Etwas ungenau⁹ kann man sagen: In einem Kubikzentimeter Wasserstoff sind 10 Joule Energie gespeichert.

Allgemein ist der Wirkungsgrad technischer Geräte das Verhältnis von „sinnvoll genutzter Energie“ zu „zugeführter Energie“, beim Elektrolyseur also die im Wasserstoff gespeicherte

⁷Ein Kubikzentimeter ist ein Milliliter, d.h. ein tausendstel Liter.

⁸Diese Angabe hat eine Genauigkeit von zwei gültigen Ziffern (d.h. in wissenschaftlicher Schreibweise: $H = 1,0 \cdot 10^1 \text{ J/cm}^3$). Sie gilt für eine Temperatur von 20°C und einem Druck von 1013 hPa. Bei anderen Werten für Temperatur oder Druck ändert sich der Zahlenwert – also Vorsicht beim Vergleich mit Literaturwerten! Die Abhängigkeit des Volumens von Druck und Temperatur ist der Grund, warum Physiker/innen sich lieber auf die gelieferte Energie pro Masse (bzw. pro Stoffmenge) bezieht. Da in unserem Experiment jedoch die Volumina gemessen werden, haben wir uns für die obige Vorgehensweise entschieden.

⁹Bei exakter Argumentation müsste man hier zwischen **Heizwert** und **Brennwert** unterscheiden. Fachphysiker/innen würde zudem an dieser Stelle den Begriff der **Enthalpie** ins Spiel bringen. Da es uns nur um eine Verdeutlichung der prinzipiellen Vorgänge in einer Brennstoffzelle bzw. einem Elektrolyseur geht, haben wir uns zu dieser vereinfachten Darstellungsweise entschlossen.

(chemische) Energie dividiert durch die zugeführte (elektrische) Energie¹⁰.

Der Wirkungsgrad η_{EL} ergibt sich daher aus der Gleichung (Messdaten hier einsetzen):

$$\eta_{EL} = \frac{E_{\text{chemisch}}}{E_{\text{elektrisch}}} = \frac{H \cdot V}{U \cdot I \cdot t} =$$

Hierbei ist:

H : Heizwert von Wasserstoff (10 J/cm³)

V : Volumen des erzeugten Wasserstoffs

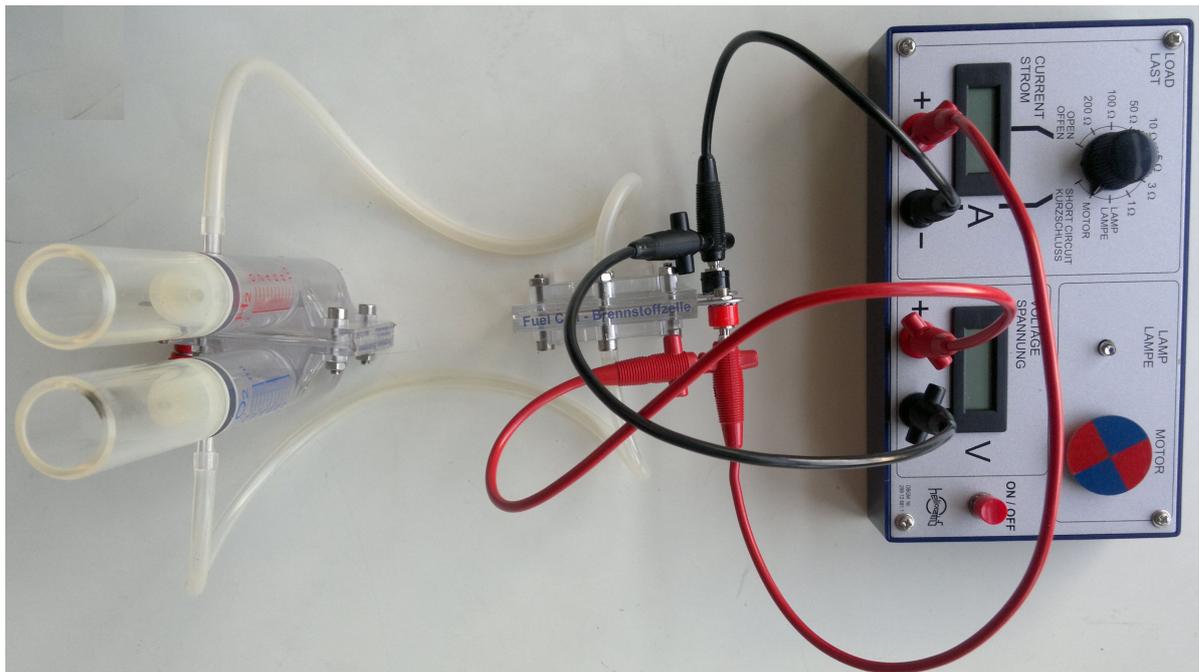
U : elektrische Spannung

I : elektrische Stromstärke

t : Zeit

Messdaten	
Messzeit t in s	
Stromstärke I in A	
Spannung U in V	
Wasserstoffvolumen V in cm ³	
Wirkungsgrad η_{EL}	

3.2 Kennlinien der Brennstoffzelle unter Last



Aufbau: Orientieren Sie sich an dieser Abbildung und den beiden folgenden Hinweisen !

1. Lassen Sie den Elektrolyseur mit dem Netzgerät verkabelt und ändern Sie Spannung und Stromstärke nicht. Schließen Sie ihn an den Auslassöffnungen mit zwei Schläuchen oben an die Brennstoffzelle an. Achten sie dabei darauf, jeweils die beiden Wasserstoff- und die beiden Sauerstoffseiten miteinander zu verbinden!
2. Schließen Sie, wie in der Abbildung oben, die Kontakte der Brennstoffzelle mit Kabeln an das Experimentiergerät an, so dass Sie die elektrische Stromstärke und Spannung messen können.

¹⁰ Elektrische Energie und chemische Energie sind hierbei nicht etwa zwei völlig verschiedene Dinge – beides ist Energie! Der Unterschied ist so ähnlich wie bei Grundwasser und Trinkwasser – beides ist Wasser!

Messung:

1. Prüfen Sie zunächst, ob die Brennstoffzelle Strom erzeugt, indem Sie den Drehknopf am Experimentiergerät auf die Position „Motor“ einstellen. Das mit „Motor“ beschriftete Rad muss sich drehen, wenn dies der Fall ist.
2. Stellen Sie mit dem Drehknopf am Experimentiergerät, **beginnend mit den großen Widerständen**, verschiedene Lastwiderstände ein und notieren Sie Strom und Spannung in der folgenden Tabelle. **Am Ende stellen Sie den Drehknopf wieder auf „Motor“!**

ACHTUNG – bei sehr kleinen Widerständen ($\leq 10 \Omega$) darf die Messzeit nur wenige Sekunden betragen! Drehschalter niemals auf „Kurzschluss“ stellen! Die hohen Stromstärken können sonst das Gerät beschädigen!

Brennstoffzelle unter Last							
R in Ω	200	100	50	10	5	3	1
I in mA							
U in V							
P in mW							

Auswertung:

- Berechnen Sie die **elektrische Leistung** P für jeden **Widerstand** und tragen Sie sie in die letzte Zeile der Tabelle ein. Zeichnen Sie die beiden **Kennlinien** der Brennstoffzelle, indem Sie die Spannung U und die Leistung P (vertikale Achsen) jeweils über dem Widerstand R (horizontale Achse) *in dem nachfolgenden leeren Diagramm* auftragen! **Anleitung:** Die linke vertikale Achse bezeichnet die Spannung U , die rechte vertikale Achse die Leistung P .

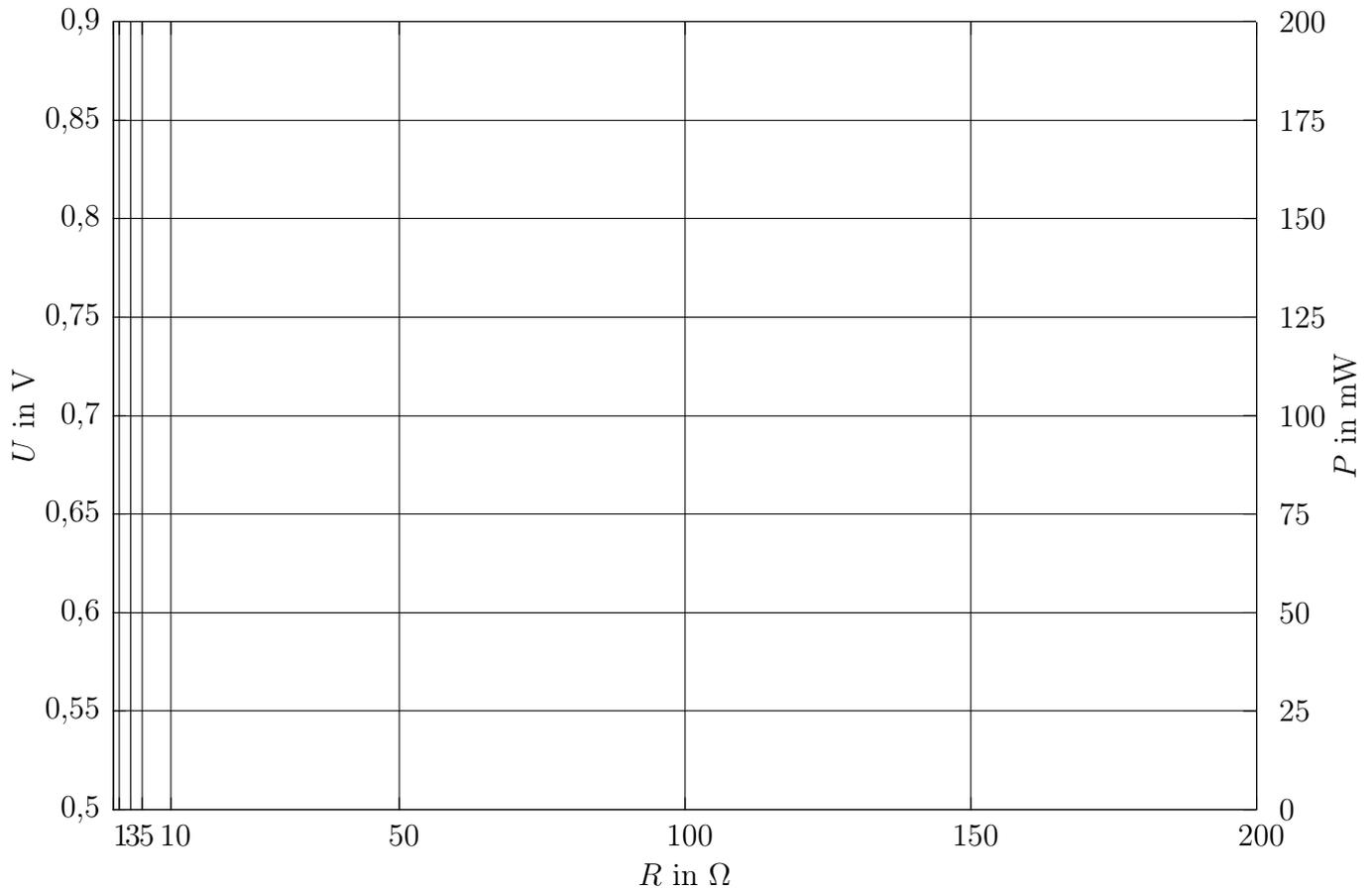
Für den Betrieb von Brennstoffzellen (auch der vorliegenden) müssen 2 Bedingungen eingehalten werden:

1. Die Spannung darf sich bei begrenzten Änderungen des Lastwiderstands nicht stark verändern.
2. Die Leistung soll so groß wie möglich sein.

Bestimmen Sie aufgrund dieser Bedingungen den optimalen Bereich, in dem der Lastwiderstand liegen muss. Warum ist es nicht praktikabel die Brennstoffzelle mit einem Lastwiderstand an ihrem Leistungsmaximum zu betreiben?

- Das Phänomen, dass die Spannung einer Elektrizitätsquelle „**zusammenbricht**“, wenn man sie zu stark belastet, tritt auch im Alltag gelegentlich auf. Notieren Sie stichworthaft Beispiele auf den Zeilen am Ende dieses Abschnitts !

Stichworte zur Auswertung: _____



3.3 Der Wirkungsgrad der Brennstoffzelle (optional)

3.3.1 Berechnung der Spannung einer idealen Brennstoffzelle

Vorbetrachtung: Die theoretisch mögliche Spannung einer „idealen“ Brennstoffzelle kann berechnet werden. Allerdings sind die Verhältnisse in realen Brennstoffzellen nicht so ideal, wie es in den Annahmen für die folgende Modellrechnung vorausgesetzt wird. Deshalb liegt die real zur Verfügung stehende Spannung immer etwas niedriger, als die hier berechnete ideale.

Man hat herausgefunden, dass in allen Gasen bei einer Temperatur von 20°C und einem Druck von 1013 hPa $6 \cdot 10^{23}$ Teilchen (Moleküle bzw. Atome) ein **Volumen von 22,4 Litern** einnehmen¹¹. Dies entspricht $\frac{6 \cdot 10^{23}}{22,4} = 2,7 \cdot 10^{22}$ Teilchen pro Liter bzw. $2,7 \cdot 10^{19}$ Teilchen pro Kubikzentimeter.

Wasserstoff liegt molekular vor. Ein Wasserstoffmolekül (H_2) besteht aus zwei Wasserstoffatomen, von denen jedes ein Elektron liefern kann. Wasserstoff enthält bei 20°C und 1013 hPa also $2 \cdot 2,7 \cdot 10^{19} = 5,4 \cdot 10^{19}$ Elektronen pro Kubikzentimeter, wobei jedes Elektron einen Ladungsbetrag von $1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ trägt (\rightarrow **Elementarladung**).

¹¹Die Stoffmenge von $6 \cdot 10^{23}$ Teilchen (**Avogadro-Konstante**) wird fachsprachlich als „ein Mol“ (in Zeichen: 1 mol) bezeichnet. Bei Normalbedingungen (20°C , 1013 hPa) beträgt das **molare Volumen** eines idealen Gases $22,4 \text{ l/mol}$ (**Avogadrosches Gesetz**).

Ergebnis:

Unter den typischen Arbeitsbedingungen einer Brennstoffzelle kann Wasserstoff mit dem Volumen V die folgende Ladung abgeben:

$$Q = k \cdot e \cdot V \text{ mit } k = 5,4 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3} \text{ und } e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C.}$$

Rechnung: Eine „ideale“ Brennstoffzelle würde die gesamte zur Verfügung stehende chemische Energie $E_{\text{chem}} = H \cdot V$ in elektrische Energie $E_{\text{el}} = U \cdot I \cdot t$ umwandeln¹². Gleichsetzen und Auflösen nach U liefert für die ideale Spannung:

$$U_{\text{ideal}} = \frac{H \cdot V}{I \cdot t} = \frac{H \cdot V}{Q} = \frac{H \cdot V}{k \cdot e \cdot V} = \frac{H}{k \cdot e} \quad (1)$$

Hierbei ist: H : Heizwert von Wasserstoff (10 J/cm³)
 k : Anzahl der Ladungsträger/cm³ ($5,0 \cdot 10^{19}$ Elektronen/cm³ für Wasserstoff)
 e : Elementarladung ($e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ C)

Aufgaben:

1. Berechnen Sie die Spannung einer idealen Brennstoffzelle!
2. Die gelieferte Spannung ist selbst bei einer idealen Brennstoffzelle relativ gering. Wie kann man trotzdem anspruchsvolle Verbraucher (z.B. den Elektromotor eines großen Brennstoffzellenautos) versorgen, die eine hohe Betriebsspannung benötigen ?

Rechnung zu Aufgabe 1:

$$U_{\text{ideal}} =$$

Antwort zu Aufgabe 2:

3.3.2 Bestimmung der realen Leerlaufspannung

Die reale **Leerlaufspannung** U_0 , die von der Brennstoffzelle abgegeben wird, kann durch eine Messung bestimmt werden.

Aufgabe: Bestimmen Sie den Quotienten aus realer und idealer Spannung der Brennstoffzelle, wie im Anschluss beschrieben.

Messung: Um die reale Leerlaufspannung U_0 zu bestimmen, lässt man die Brennstoffzelle ca. 2 Minuten ohne Lastwiderstand (d.h. ohne Verbraucher, Schalterstellung am Experimentiergerät auf „offen“!) laufen. Anschließend misst und notiert man die Spannung. Durch Bildung des

¹² Dies ist freilich nur näherungsweise der Fall! Die chemische Energie wird zwar zum allergrößten Teil in elektrische Energie umgewandelt, ein kleiner Teil aber auch in Wärme.

Verhältnisses von realer und idealer Spannung kann der Faktor α bestimmt werden, um den die reale Spannung niedriger ist.

$$\alpha = \frac{U_0}{U_{\text{ideal}}} \quad (2)$$

Messwert: $U_0 =$

Rechnung: $\alpha =$

3.3.3 Vertiefung: Bestimmung des Wirkungsgrads bei verschiedenen Lastwiderständen

Oben haben wir die Brennstoffzelle nur im Leerlauf, d.h. ohne Verbraucher, betrachtet. In der Realität wird die Brennstoffzelle jedoch einen Verbraucher versorgen, was zur Folge hat, dass sich die Spannung gegenüber der realen Leerlaufspannung U_0 nochmals verringert. Der Wirkungsgrad ist in diesem Fall gleich dem Quotienten aus der erhaltenen elektrischen Energie und der von der Brennstoffzelle bereitgestellten chemischen Energie:

Der Berechnung des Wirkungsgrads ist in diesem Fall ebenfalls recht einfach. Eine Brennstoffzelle ist, wie schon beschrieben, im Prinzip nichts anderes als ein „rückwärts betriebener Elektrolyseur“. Alle chemischen Vorgänge laufen in umgekehrter Richtung ab, d.h. Wasser wird nicht in Wasserstoff und Sauerstoff zerlegt, sondern Wasserstoff und Sauerstoff verbinden sich zu Wasser. Dementsprechend ist der Wirkungsgrad der Brennstoffzelle im Prinzip nur der Kehrwert des Wirkungsgrads des Elektrolyseurs, da die „sinnvoll genutzte Energie“ jetzt die elektrische Energie und die „zugeführte Energie“ die chemische Energie ist. (Man beachte: Auch dieser Wirkungsgrad ist kleiner als Eins, da die Werte für Stromstärke I und Spannung U nicht identisch mit denen des Elektrolyseurs sind.)

$$\eta_{BZ} = \frac{E_{\text{elektrisch}}}{E_{\text{chemisch}}} = \frac{U \cdot I \cdot t}{H \cdot V} \quad (3)$$

Veränderungen am Aufbau und Durchführung:

1. Verschließen Sie die beiden unteren Öffnungen der Brennstoffzelle mit den beiden kleinen Stopfen.
2. Schalten Sie den Schalter am Betriebsgerät auf „offen“ und produzieren Sie mit dem Elektrolyseur eine gewisse Menge Wasserstoff (H_2) und Sauerstoff (O_2). Es darf dabei im Brennstoffzellenstromkreis kein Strom fließen.
3. Schalten Sie das Netzgerät, das den Elektrolyseur mit Strom versorgt, aus.
4. Führen Sie die Messung von U , I , t (mit Stoppuhr) und V , wie in den nachfolgenden Aufgaben beschrieben, für max. drei verschiedene Lastwiderstände durch.

Aufgaben:

- Überlegen Sie sich, wie man das Volumen des oxidierten Wasserstoffs messen kann. Wenn Sie eine Lösung gefunden haben, bestimmen Sie den Wirkungsgrad der Brennstoffzelle für verschiedene Lastwiderstände R („Verbraucher“) soweit die Zeit reicht! Orientieren Sie sich bei der Wahl der Lastwiderstände an der Kennlinie, die Sie bereits aufgenommen haben (Abschnitt 3.2, S. 7). **Achtung: Von außen darf keine Spannung an die Brennstoffzelle angelegt werden!**
- Diskutieren Sie, warum der Wirkungsgrad der Brennstoffzelle vom Widerstand des Verbrauchers abhängt!

Tipp: Überlegen sie sich dazu die beiden Fälle, dass der Widerstand gleich Null ist ($R = 0$, Kurzschluss) bzw. dass er unendlich groß ist ($R \rightarrow \infty$, keine Verbindung zwischen den Kontakten).

Messwerte und berechnete Werte zu Aufgabe 1:

R in Ω	U in V	I in A	t in s	$H_2:V$ in cm^3	η_{BZ}

Rechnungen:

$R =$; $\eta_{BZ} =$
$R =$; $\eta_{BZ} =$
$R =$; $\eta_{BZ} =$

Antwort zu Aufgabe 2:

3.4 Betrieb des Wasserstoffautos

Aufgabe: Nehmen Sie, wie unten beschrieben, das Elektroauto in Betrieb. **Hinweis:** Es ist sinnvoll, das Auto auf Kurvenfahrt einzustellen, da es sonst mit irgendwelchen Wänden oder Gegenständen kollidieren würde.

Vorgehen:

Die dem Wasserstoffauto beiliegende Brennstoffzelle kann auch als Elektrolyseur betrieben werden. Hierzu stellen Sie ihn auf den Kopf, füllen beide Zylinder randvoll mit destilliertem Wasser und verschließen sie ihn mit den beiliegenden Gummistopfen. Nachdem Sie ihn wieder richtig herum gedreht haben, schließen Sie ihn ans Netzgerät an und stellen die Spannung so ein, dass die **Stromstärke maximal 0,5 A** beträgt. Nun füllen sich die Zylinder langsam mit Gas (H_2 und O_2). Hat sich in beiden Zylindern genügend Gas gebildet, so trennen Sie ihn vom Netzgerät, setzen ihn in das Auto ein und schließen die Kontakte an. Er arbeitet nun als Brennstoffzelle und das Auto fährt los.

4 Quellen

- Webseite mit detaillierten chemischen und physikalischen Erklärungen verschiedener Brennstoffzellentypen. Geeignet für einen fundierten Einstieg ins Thema:
<http://www.chemieunterricht.de/dc2/fc/index.html>
- Informationen über den Aufbau von Brennstoffzellen und weiterführende Verweise gibt es bei Wikipedia:
<https://de.wikipedia.org/wiki/Brennstoffzelle>
<https://de.wikipedia.org/wiki/Protonen-Austausch-Membran>.
- Webseiten zu einer ökologischen Energiewende, auch mit Informationen zum Einsatz von Brennstoffzellen:
<http://www.solarserver.de>
<https://www.energiezukunft.eu>
<https://energyload.eu>
- Industrieinitiative zur Förderung von Brennstoffzellen in vielfältigen Einsatzbereichen:
<http://www.cleanpowernet.de>
- Mehrere Abbildungen und Hintergrundinformationen wurden der folgenden Handreichung der Universität Augsburg entnommen (inzwischen nicht mehr zugänglich):
<http://www.physik.uni-augsburg.de/ferdi/umweltpraktikum/solar>
- Diese Seite bietet allgemeine Informationen zum Themenkreis Energie:
<http://www.energieinfo.de>

Internetadressen überprüft am 17.10.2018.