

Inhaltsverzeichnis

Wasserstoff und Brennstoffzellen

1. Was für ein Stoff ist Wasserstoff?	3
Welche Eigenschaften hat Wasserstoff?	4
Wo kommt Wasserstoff vor?	4
Wie wird Wasserstoff nachgewiesen?	5
Woher kommt das Leuchten?	6
2. Wie stellt man Wasserstoff und Sauerstoff her?	8
3. Wie arbeitet der Elektrolyseur?	10
Wie funktioniert die Polymer-Elektrolyt-Membran (PEM)?	12
4. Wie und wozu können wir Wasserstoff nutzen?	16
Könnte Wasserstoff ein Energieträger der Zukunft sein?	17
Strom aus Wasserstoff?	19
5. Was ist eine Brennstoffzelle?	20
Wie erzeugt die Brennstoffzelle Strom?	
Was ist überhaupt „Strom“?	22
Woher kommen die Elektronen in der Brennstoffzelle?	23
6. Wie kann man Wasserstoff speichern?	27
7. Ist die Wasserstofftechnologie nicht gefährlich?	29
8. Wie könnte die Zukunft aussehen?	31
Hat Jules Verne sich für die „Nautilus“ einen Brennstoffzellenantrieb erdacht?	32
Literaturverzeichnis	33
Internetseiten	35
Bildquellen	36

1. Was für ein Stoff ist Wasserstoff?

Wasserstoff ist

- das häufigste Element im Weltall
- das am einfachsten aufgebaute Element
- der Stoff, aus dem das Weltall entstand
- Hauptbestandteil der Sonne und damit der Wärme- und Lichtlieferant für unsere Erde



Abb. 1 Sonnenuntergang am Meer



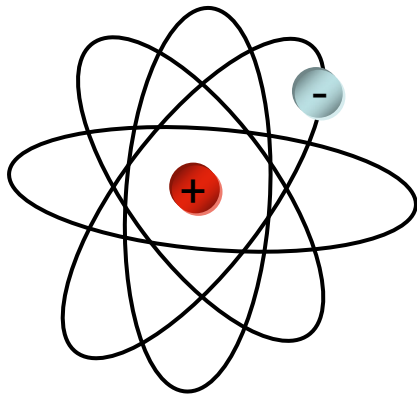
Abb. 2 Sicht von Apollo 17 auf die Erde



Abb. 3 Space Shuttle „Atlantis auf dem Weg zur Raumstation ISS

Mit seinem einfachsten Atomaufbau steht Wasserstoff gleich am Anfang des Periodensystems der Elemente. Der Atomkern besteht nur aus einem Proton und in der Hülle kreist nur ein Elektron um diesen Kern. Damit ist es auch das kleinste Atom und misst nur $0,6 \cdot 10^{-10}$ m, oder 0,06 Nanometer, das sind 0,06 Milliardstel Meter, oder 0,06 Millionstel Millimeter – sehr klein eben. Zum Atomkern gehört eigentlich noch das Neutron, aber über 99,98% der natürlich vorkommenden Wasserstoffatome haben keins und deshalb beträgt die Atommasse laut Periodensystem 1,008. Die Massenzahl sagt etwas aus über die Anzahl der Kernbausteine. Der Wasserstoffkern besteht also aus einem Proton. Nur ganz wenige natürlich vorkommende Wasserstoffatome haben dazu noch ein oder sogar zwei Neutronen im Kern und sind dadurch schwerer. Wegen der damit entstehenden Massenzahl heißt dieser Wasserstoff dann Deuterium (2) oder Tritium (3). Aber zurück zum „normalen“ Wasserstoff: hier bewegt sich also nur ein Elektron um nur ein Proton im Kern.

Größenverhältnis
im Wasserstoffatom



0,06 nm = 0,06 Milliardstel Meter

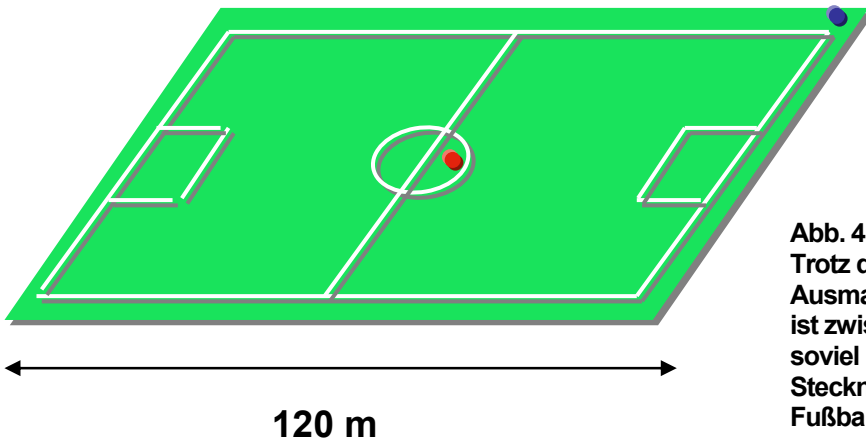
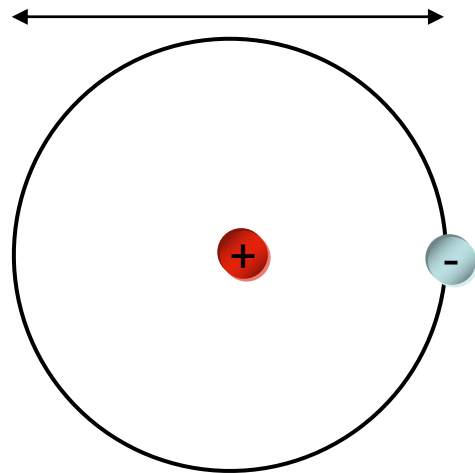


Abb. 4
Trotz des verschwindend kleinen
Ausmaßes des Wasserstoffatoms
ist zwischen Proton und Elektron
soviel Platz, als wären zwei
Stecknadelköpfe auf einem
Fußballfeld verteilt.

Welche Eigenschaften hat Wasserstoff?

Jeweils zwei Wasserstoffatome gehen eine Atombindung ein, nutzen das gemeinsame Elektronenpaar ($\text{H} + \text{H} \rightarrow \text{H} - \text{H}$) und bilden ein Molekül (H_2). Wasserstoff ist ein Gas, es ist farblos, geruchlos und ungiftig. Wasserstoff wird erst bei -253°C flüssig und bei -259°C liegt er in fester Form vor. Wasserstoff hat auch die geringste Dichte von allen Stoffen. Bei 0°C und unter normalem Luftdruck würde 1m^3 , also 1000 Liter, nur 89 g wiegen. Damit steigt Wasserstoff als leichtestes Gas immer sofort nach oben.

Wo kommt Wasserstoff vor?

Um die Erde bildet Wasserstoff eine Schicht in einer Höhe von 2.000 km bis 20.000 km. Die Sonne besteht zu etwa 73% aus Wasserstoff. Auf der Erde gibt es so gut wie keinen reinen Wasserstoff. Er tritt nur in

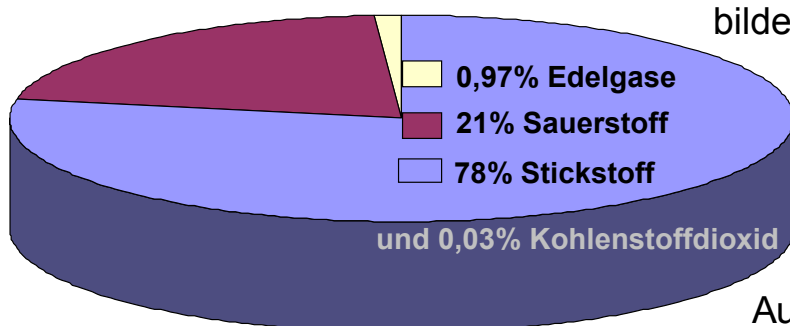
Verbindungen auf. Von keinem anderen Element sind so viele Verbindungen bekannt. Die am häufigsten auftretende und die bekannteste ist Wasser! (Logisch, denn die Formel für Wasser lautet H_2O und damit muss Wasser Wasserstoff und Sauerstoff enthalten.) Wasserstoff kommt auch in allen Lebewesen vor sowie in Mineralien, in Erdöl und Erdgas. Der Hauptbestandteil von Erdgas ist nämlich Methan (CH_4).

Wie wird Wasserstoff nachgewiesen?

Da wie bereits gesagt Wasserstoff ein farb- und geruchloses Gas ist und es außerdem wegen der geringen Dichte stark flüchtig ist, hat man also ohne Hilfsmittel keine Chance, Wasserstoff zu erkennen.

Chemisch wird Wasserstoff zum Beispiel durch seine Verbrennungseigenschaften nachgewiesen. Wasserstoff verbrennt mit ganz ruhiger, schwach bläulicher und sehr heißer Flamme.

Mit Sauerstoff oder Luft (die ja zu etwa 21% aus Sauerstoff besteht)



bildet Wasserstoff allerdings ein hochexplosives Gasgemisch, wenn die Wasserstoffkonzentration zwischen 4% und 75% liegt.

Abb. 5 Zusammensetzung der Luft

Auch diese Eigenschaft lässt sich für einen Nachweis nutzen, nämlich für die so genannte Knallgasprobe.

Dabei hält man ein Reagenzglas, gefüllt mit dem Gasgemisch aus Wasserstoff und Sauerstoff, mit der Öffnung nach unten über eine kleine Flamme und man hört wegen der Verpuffung einen leichten Knall. Hierbei entsteht bei der Verbrennung des Wasserstoffs mit dem Sauerstoff aus der Luft nur Wasser. Aber keine Angst, wegen der geringen Mengen von Wasserstoff kommt es im Schülerlabor zu keiner gewaltigen Explosion.

Physikalisch lässt sich Wasserstoff durch das spezielle Licht, das die Wasserstoffatome aussenden, nachweisen. Wasserstoffgas in einer geschlossenen Röhre wird durch eine sehr hohe Spannung (mehrere Tausend Volt) zum Leuchten angeregt. Die Lichtfarbe dabei ist zwar auch typisch, reicht aber als eindeutiger Nachweis für Wasserstoff noch nicht aus. Dieses Licht wird durch ein Glasprisma oder ein sehr feines Gitter geschickt und danach ergibt sich so etwas wie ein „Fingerabdruck“ von Wasserstoff. Es entstehen ganz charakteristische dünne Linien.

Eine rote, eine blaue und zwei violette Linien heben sich deutlich vor einem dunklen Hintergrund ab. [siehe Abb. 6 neben dem „H“]

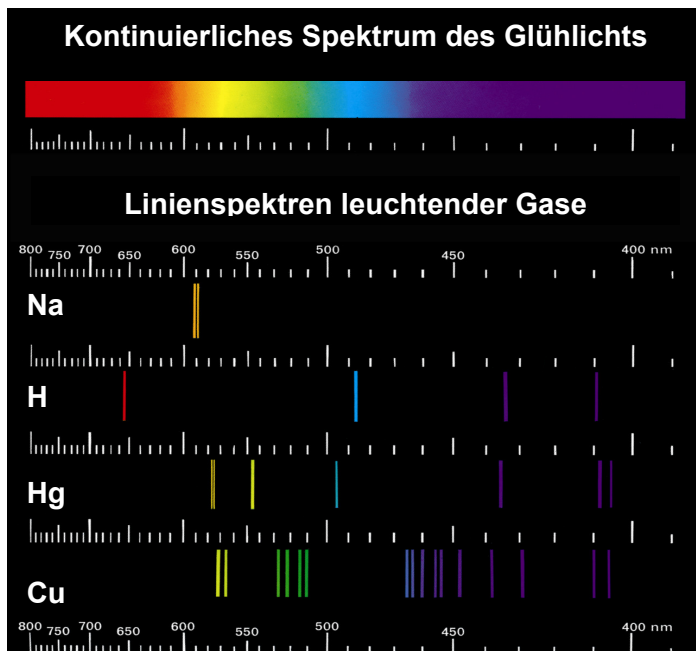


Abb. 6 Spektraltafel

Der Schweizer Mathematik- und Physiklehrer Johann Jakob Balmer fand um 1880 die nach ihm benannte Formel zur Berechnung der Farben solcher Linien. Da noch anderes Licht im nicht sichtbaren Bereich ausgesendet wird, fasst man diese sichtbaren Linien zu einer Serie zusammen – der Balmer-Serie. Diese Linien nennt man auch Spektrum und das Verfahren zur Erkennung eines leuchtenden Gases heißt Spektralanalyse.

Woher kommt das Leuchten?

Das Licht entsteht in der Atomhülle von Wasserstoff. Durch die angelegte Hochspannung wird das Elektron des Wasserstoffatoms in einen angeregten Zustand versetzt. Das bewirken die durch das Gas fliegenden Elektronen (das ist der Stromfluss durch das Gas). Das Elektron des Wasserstoffs erhält zum Beispiel durch Zusammenstöße mit den „Stromelektronen“ eine Energieportion und bewegt sich nun auf einer etwas höheren Umlaufbahn um das Proton. Dieser neue Zustand ist aber für das Elektron sehr instabil und es verbleibt nur eine ganz kurze Zeit (im Mittel nur 10^{-18} Sekunden, eine Trillionstel Sekunde – sehr kurz eben) auf diesem neuen Niveau. Die Portion an Energie, die das Wasserstoffelektron durch den Stromfluss aufgenommen hat, heißt auch

Quant.

Der deutsche Physiker Max Planck fand 1900 eine nach ihm benannte Naturkonstante – das Plancksche Wirkungsquantum – und er gilt als Begründer der Quantenphysik. Das Schülerlabor befindet sich übrigens in der Max-Planck- Straße. Aber schnell zurück zu dem angeregten Elektron des Wasserstoffs, das ja nur eine Trillionstel Sekunde auf dieser höheren Bahn verbringt. (Die Zeit ist bestimmt schon um!) Nach dieser Zeit fällt nämlich das Elektron von selbst, ohne äußere Einflüsse, wieder zurück in seinen Ausgangszustand. Und dabei gibt es genau die Energieportion, den Energiequant ab, den es vorher aufgenommen hat.

Jetzt aber in Form von Lichtenergie. Und je nachdem in welche Höhe es gelangen konnte, ob es also ein, zwei, drei oder vier Energiequanten aufgenommen hat, sendet es beim „Herunterfallen“ rotes, blaues oder violettes Licht aus. Dieses Licht ist also wieder eine Energieportion, ein Quant und beim Licht heißt das „Photon“, also eine Portion Lichtenergie.

Beim Herunterfallen auf die ursprüngliche niedrigere Bahn sendet das Elektron also Licht aus und vollführt einen

Quantensprung.

(Aha, das Schülerlabor Quantensprung in der Max-Planck-Straße...)

Wir sehen im Wasserstoffspektrum also das Ergebnis von Quantensprüngen der Wasserstoffelektronen.

Lichtentstehung in der Elektronenhülle

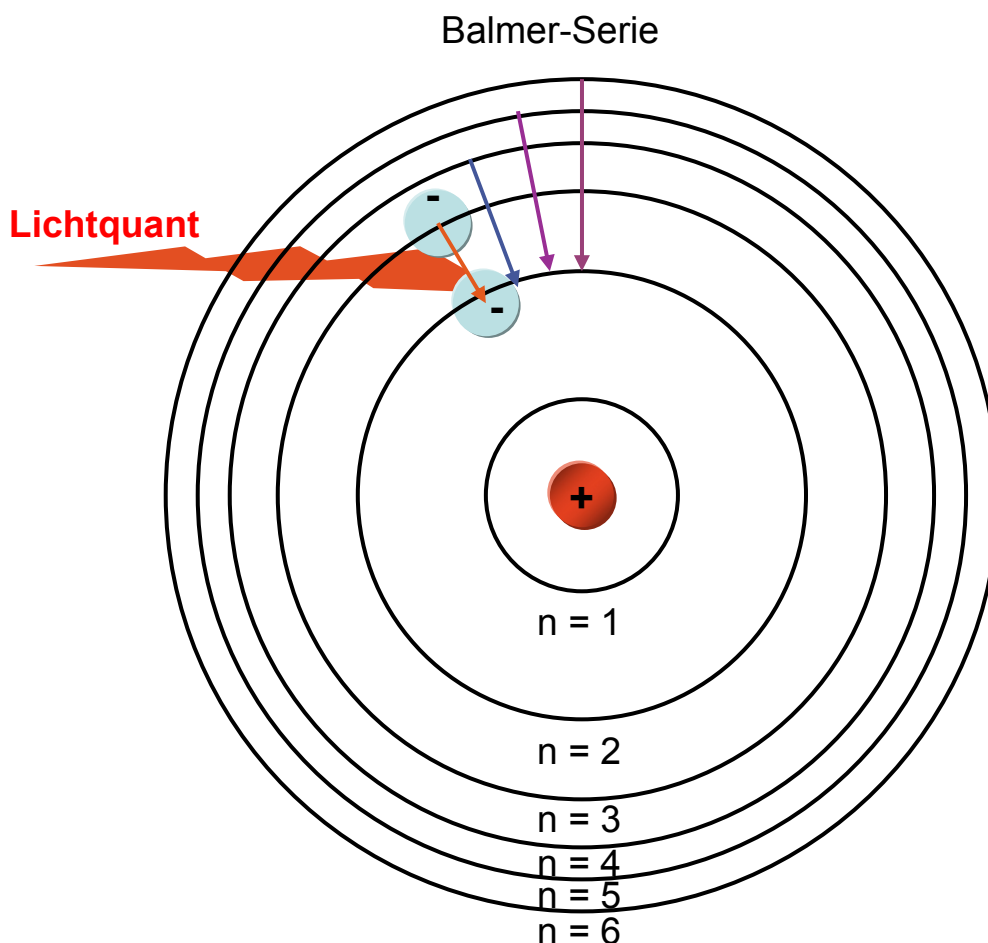


Abb. 7 Quantensprung eines Elektrons vom dritten auf das zweite Energieniveau. Dabei wird Energie in Form eines roten Lichtquants frei.

2. Wie stellt man Wasserstoff und Sauerstoff her?

Auf der Erde liegt Wasserstoff nur in Verbindungen vor, das heißt, es gibt hier keinen reinen Wasserstoff. Aber Wasserstoff lässt sich herstellen. In der Industrie wird Wasserstoff hauptsächlich noch aus Erdgas oder Erdöl gewonnen. Dazu wird erst Methan (CH_4) erzeugt und dieses dann mit Hilfe von Wasserdampf in Kohlenstoffdioxid und Wasserstoff umgewandelt. Kohlenstoffdioxid ist allerdings mit für den Treibhauseffekt verantwortlich. Außerdem handelt es sich bei Erdöl und Erdgas um fossile Energieträger. Deshalb ist die Art der Herstellung nicht sinnvoll, wenn es uns um saubere und zukunftsfähige Energieumwandlungen geht. Eine einfache Herstellung von Wasserstoff im Labor geschieht im Kipp'schen Gasentwickler. Darin tropft Salzsäure auf Zink und es bildet sich Wasserstoff. Da sich Wasserstoff in Wasser nicht löst, kann der Wasserstoff pneumatisch aufgefangen werden, das heißt, der aufsteigende Wasserstoff verdrängt das Wasser aus einem nach unten offenen Reagenzglas und sammelt sich im oberen Teil des Reagenzglases.



Abb. 8 Erdölförderung in Algerien

Die Herstellung aus einer Säure birgt aber Verletzungsmöglichkeiten in sich und eignet sich auch nicht zur großtechnischen Herstellung.

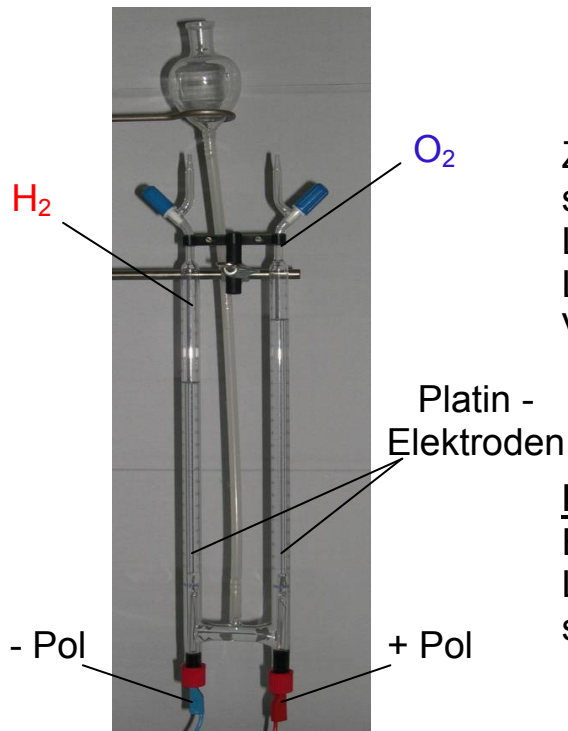
Eine andere Möglichkeit bietet sich in der Elektrolyse. Das bedeutet, dass man einer sauren oder alkalischen Lösung elektrischen Strom zuführt. Dabei zersetzt sich die stromleitende Lösung (der Elektrolyt) und es wird Wasserstoff frei. So ein Elektrolysegerät mit einer sauren oder alkalischen Lösung als Elektrolyt ist der Hoffmannsche Wasserzersetzungsapparat [siehe Abb. 9]. Saure oder alkalische Lösungen zu verwenden ist wieder nicht ungefährlich und auch technisch aufwendig.

Die sauberste Variante wäre es also, Wasser selbst durch Elektrolyse in seine Bestandteile, Wasserstoff und Sauerstoff, zu zersetzen. Dieses Verfahren ist auch schon über 100 Jahre bekannt. Bei der Elektrolyse wird aus Wasser unter Zuführung von elektrischer Energie Wasserstoff und Sauerstoff.



Dabei bedeutet (l) „flüssig“ vom lateinischen Wort „liquidus“ und (g) bedeutet „gasförmig“. In dieser Reaktion werden aus der Flüssigkeit Wasser zwei Gase: Wasserstoff und Sauerstoff.

Das Gerät, das auf diese Art Elektrolyse betreiben kann, heißt Elektrolyseur [siehe Abb. 10].

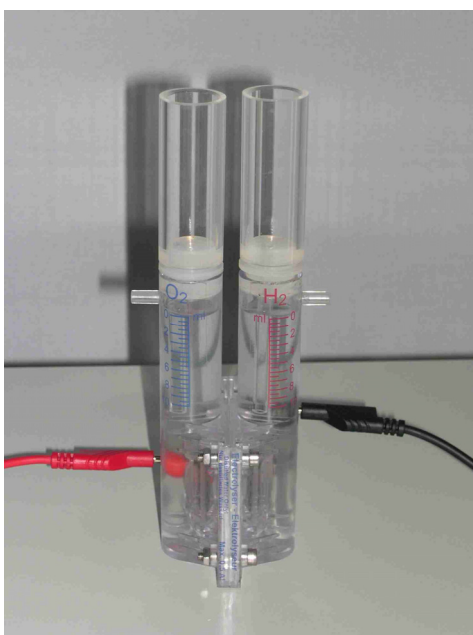


Zwischen den Elektroden befindet sich eine saure oder alkalische Lösung. Diese Lösung stellt die Ladungsträger für die Leitfähigkeit zur Verfügung.

Nachteil:

Es müssen saure oder alkalische Lösungen verwendet werden und es sind große Behälter erforderlich.

Abb. 9 Wasserersetzer nach Hofmann



Zwischen den Elektroden befindet sich eine mit Wasser gesättigte Kunststoffolie – eine so genannte Membran.

Diese Membran enthält die Ladungsträger.

Vorteil:

Es kann auf Zusatz von sauren oder alkalischen Lösungen verzichtet werden und das Gerät wird kleiner.

Abb. 10 Elektrolyseur aus dem Schülerübungskasten

3. Wie arbeitet der Elektrolyseur?

Herzstück des Elektrolyseurs ist die **Polymer – Elektrolyt – Membran** (PEM), die beide Elektrodenbleche voneinander trennt. (Wie die Membran aufgebaut ist, schauen wir uns an späterer Stelle genauer an.) Sie ist ein Elektrolyt und stellt Ladungsträger in Form von Säurerestionen zur Verfügung. Das bedeutet einen großen Vorteil gegenüber dem Hofmannschen Wasserzersetzer, in dem sich eine saure oder alkalische Lösung befinden muss. In unseren Elektrolyseur wird nur destilliertes Wasser eingefüllt, die Ladungsträger sind sozusagen schon da und in Ionenform in die Membranfolie „eingeschweißt“.

Dadurch wird der Elektrolyseur kleiner, handlicher und ungefährlich. Wenn wir in den Elektrolyseur Wasser füllen, lagern sich die Protonen (H^+) an ein Wassermolekül (H_2O) an und bilden ein Oxoniumion (H_3O^+) [siehe Abb. 11]. Das Wasser im Elektrolyseur zersetzt sich nun in Oxoniumionen, Elektronen und Sauerstoff. Die theoretisch dazu notwendige Zersetzungsspannung beträgt $U = 1,23$ Volt.

Nach Anlegen einer Spannung an den Elektrolyseur bewegen sich die H_3O^+ -Ionen nach links zum Minuspol. Dort wird die Ladung (das Proton, H^+) abgegeben und Wasser (H_2O) bleibt zurück. Am Minuspol herrscht Elektronenüberschuss und dadurch können die Protonen hier jeweils ein Elektron (e^-) aufnehmen und zu Wasserstoffatomen werden. Sobald sich zwei gefunden haben, gehen sie eine Atombindung ein, werden zum Wasserstoffmolekül (H_2). (Man erkennt, dass Wasserstoff als Gasbläschen an der negativen Elektrode aufsteigt.) Eine Elektronenaufnahme (was hier die Protonen machen) ist eine Reduktion. Die Reduktionselektrode heißt Kathode.

Die Elektronen bewegen sich zum Pluspol des Elektrolyseurs [siehe Abb. 11]. An dieser Elektrode werden also Elektronen abgegeben, das ist eine Oxidation. Diese Elektrode, an der beim Elektrolyseur der Sauerstoff frei wird, heißt Anode. In der Gleichung in der Abbildung bedeutet (aq) „in Wasser gelöst“ vom lateinischen Wort „aqua“ für Wasser.

Damit haben wir jetzt durch Elektrolyse das flüssige Wasser in seine zwei Bestandteile, die Gase Wasserstoff und Sauerstoff, zerlegt. Die Gase müsste man nur noch geeignet auffangen. Zu den Speichermöglichkeiten von Wasserstoff kommen wir gleich an einer anderen Stelle.

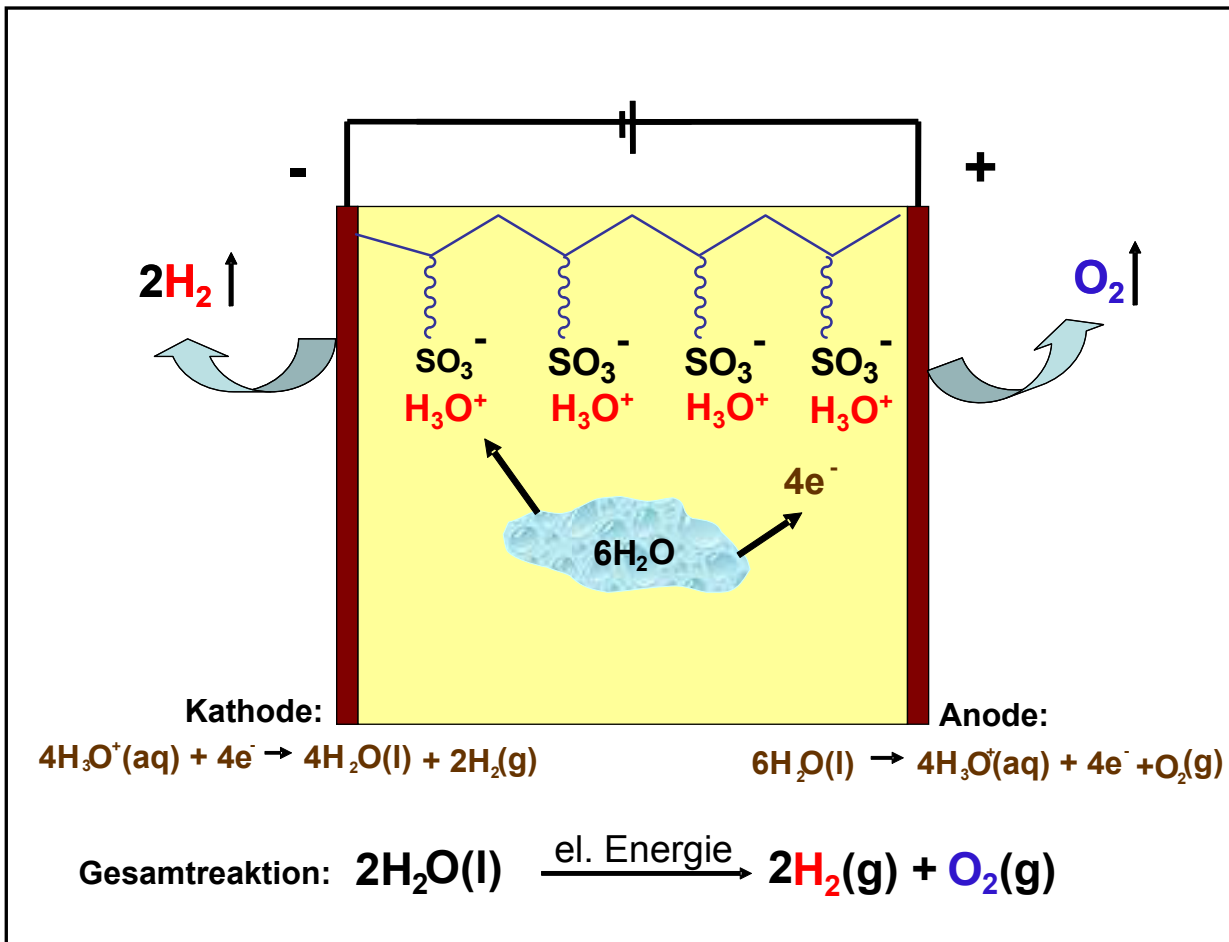


Abb. 11 Vorgänge im Elektrolyseur

Für die Elektrolyse ist also Strom nötig und der sollte dann unbedingt aus regenerativen Energiequellen kommen. Das könnte Solarstrom sein, aber auch Strom aus Wind- oder Wasserkraft kommt in Betracht.

In destilliertem Wasser allein kann kein Strom fließen. Hier fehlen die beweglichen Ladungen. Es müssen immer Ladungsträger von außen, sei es nun über eine saure oder alkalische Lösung oder eine besondere Membran, dazu gegeben werden. Aber wo sind die Ladungsträger in der Membran zu finden? Das klärt der folgende Abschnitt!

Wie funktioniert die Polymer – Elektrolyt - Membran (PEM)?

Um das zu klären, muss zunächst gesagt werden, was eine Membran ist! Grundsätzlich ist eine Membran ein dünnes Häutchen, das manche Stoffe durchlässt und andere nicht. Ein Kaffeefilter ist also eine Art Membran – der fertige Kaffee wird durchgelassen, der Kaffeesatz aber nicht. In dieser Membran gibt es Löcher (wie bei einem Sieb, bloß viel kleiner), die die Teilchen nach Größe sortieren. Die kleineren fallen durch, die größeren nicht.

In der Chemie müssen häufig Stoffgemische getrennt werden. Dazu kann man Membranen verwenden. Kaffeefilter sind aber nicht reißfest genug. Die benutzten Membranen sind Kunststofffolien (wie bei einer Plastiktüte). Kunststoffe (in der Chemie heißen sie Polymere, daher das „P“ bei „PEM“) sind lange Molekülketten, die häufig recht ungeordnet sind (wie z.B. eine Menge gekochte Spaghetti). Wenn man solche Kunststofffolien jetzt auf geeignete Art und Weise herstellt, haben sie Poren einer bestimmten Größe und wir können damit Gemische trennen.

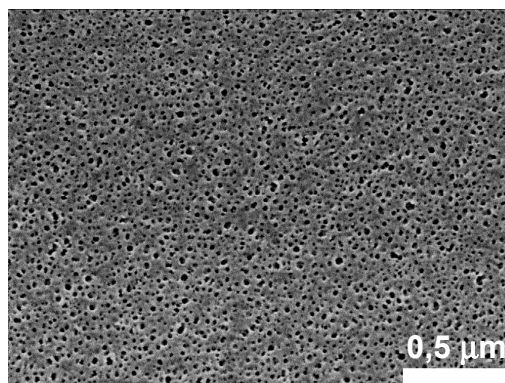


Abb. 12 Poren in einer Membran aus Kunststoff

Ein Beispiel dafür sind übrigens so genannte „atmungsaktive“ Membranen in Jacken oder Schuhen (mit Handelsnamen wie Gore-Tex[®] oder Sympatex[®], dabei bedeutet das [®]: eingetragener und registrierter Markenname). Diese Jacken lassen flüssiges Wasser nicht durch – wir werden also nicht nass, wenn es regnet. Schwitzen wir aber in der Jacke, so ist der Schweiß zunächst dampfförmig (so wie Wasserdampf beim Dampfkessel nur nicht so heiß) und der Dampf wird durch die Membran nach außen abgegeben. In dieser Jacke bleibt es also immer schön trocken.

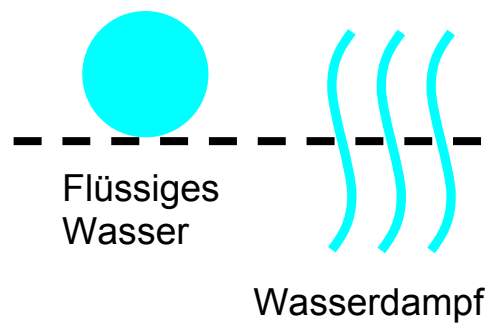


Abb. 13 Prinzip einer atmungsaktiven Membran

Im Elektrolyseur sollen nun so winzige Elementarteilchen voneinander getrennt werden, dass es über „Löcher“ nicht mehr funktionieren würde. Es geht um Protonen und Elektronen, die wir ja schon im ersten Kapitel über den Atomaufbau kennen gelernt haben. Protonen sind etwa 1000-mal größer und 2000-mal schwerer als Elektronen. Trotzdem lässt die Membran Protonen (also die sehr viel größeren Teilchen) durch, Elektronen aber nicht. Daraus folgt: Diese Membran trennt nicht nach Größe, sie kann also keine „Löcher“ haben. Es muss also noch einen anderen Mechanismus geben!

Das, was Protonen und Elektronen neben der Größe am Meisten unterscheidet ist ihre Ladung! Könnte es also etwas mit der Ladung zu tun haben?

Am besten wir schauen uns mal schematisch einen Ausschnitt der Molekülkette an, aus der Nafion[®], der spezielle Kunststoff in einer Membran, aufgebaut ist. Der Kunststoff besteht aus langen Hauptketten [die geraden Linien in Abb. 14], die aus den Elementen Kohlenstoff und Fluor gebildet werden.

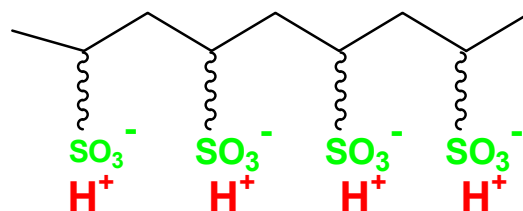


Abb. 14 Schematische Darstellung der Molekülkette einer Membran ähnlich wie Nafion[®]

Von der Hauptkette zweigen Seitenketten ab [die Wellenlinien in Abb. 14], an deren Ende jeweils eine negativ geladene Gruppe (ein Sulfonsäure – Rest) hängt. An jeder dieser negativ geladenen Gruppen befindet sich eine positive Ladung in Form eines Protons (ein Wasserstoffatom dem ein Elektron „fehlt“, ein Wasserstoffion).

Die Hauptketten und die Seitenketten (schwarz) sind sehr unpolar, wohingegen die negativ geladenen Gruppen sehr polar sind.

Polare und unpolare Teilchen wollen übrigens eigentlich gar nichts miteinander zu tun haben – nur untereinander fühlen sie sich richtig wohl. Das sieht man, wenn man einen Wassertropfen (eine polare Flüssigkeit) auf einer unpolaren Oberfläche (z.B. die Anti-Haft-Beschichtung von Pfannen mit Teflon® – übrigens auch ein Kunststoff) mit einem Wassertropfen auf einer polaren Oberfläche vergleicht.

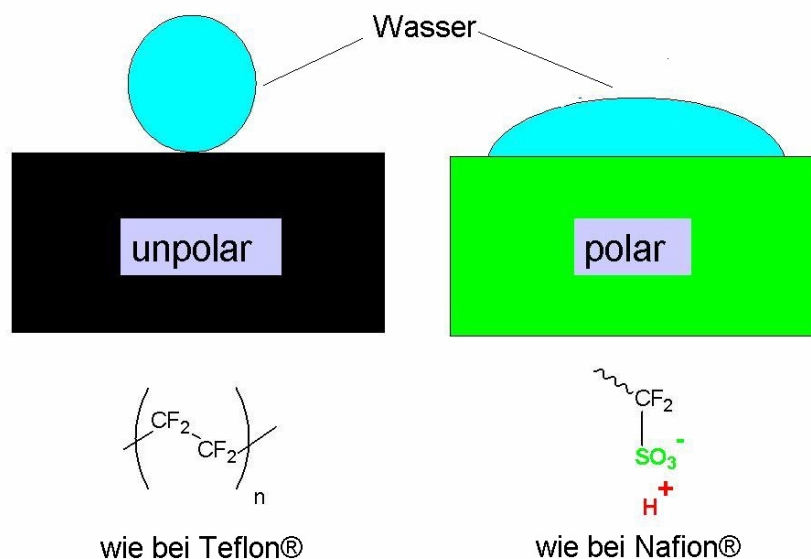


Abb. 15 Das Verhalten eines polaren Wassertropfens auf einer unpolaren und einer polaren Oberfläche.

Auf der unpolaren Oberfläche zieht sich der polare Wassertropfen so zusammen, dass er kaum Kontakt hat. Auf der polaren Oberfläche fühlt er sich hingegen so wohl, dass er den größtmöglichen Kontakt sucht und auf dieser Oberfläche zerläuft.

Was bedeutet das nun für unseren Membrankunststoff, der ja polare und unpolare Anteile hat?

Die polaren Anteile lagern sich zu Kugeln zusammen, weil sie mit den unpolaren Anteilen möglichst wenig in Kontakt kommen wollen. Diese Kugeln sind allerdings untereinander durch kleine Kanälchen verbunden. Der Durchmesser einer solchen Kugel beträgt gerade einmal 4 nm (0,000004 mm) und der Durchmesser der Kanälchen ist noch deutlich kleiner – hier kann also nicht mehr von Löchern gesprochen werden! Wenn man in so ein Kanälchen rein schaut, dann kann man erklären, warum es Protonen durchlässt!

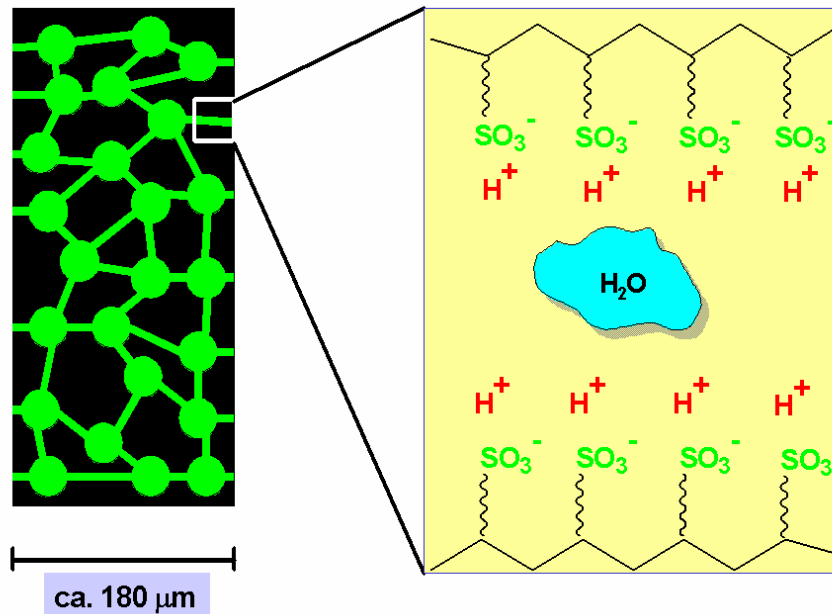


Abb. 16 „Ionenkanälchen“ im Nafion®

Die positiv geladenen Protonen in den Kanälchen sind nur schwach an die negativ geladenen Gruppen angebunden. Wird jetzt Wasser eingefüllt, lagern sich die Protonen (H^+) an ein Wassermolekül (H_2O) an und benutzen es als „Wassertaxi“ [siehe dazu auch Abb. 11]. Es bildet sich ein positiv geladenes Oxoniumion (H_3O^+). Diese Ionen geben nun in dem Kanal ihre positiven Ladungen von Sulfonsäure – Gruppe (SO_3^-) zu Sulfonsäure - Gruppe weiter. Ungleichnamige Ladungen ziehen sich nämlich immer an. Hier klappen Wasserstoff – Brückenbindungen zwischen den Molekülen um und wenn an einem Ende eine positive Ladung dazu kommt, wird quasi zeitgleich am anderen Ende eine Ladung frei. Die Ionen müssen also gar nicht direkt durch den Kanal „schwimmen“.

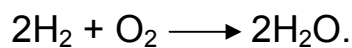
Und warum kommen die Elektronen nicht durch die Membran?

Die negativ geladenen Gruppen, die fest an der Kette gebunden sind, hindern die negativ geladenen Elektronen daran, sich durch die Membran zu bewegen, da sich gleichnamige Ladungen abstoßen! Diese Membran lässt also nur die positiven Ladungen passieren. Nur eine Sorte Ladungsträger, die Oxoniumionen, können in den Ionenkanälchen ihre Ladungen weitergeben. Wenn sich eine Sorte Ladungsträger gerichtet bewegt, ist das ein elektrischer Strom. Und ein Stoff, in dem sich nach Anlegen einer Spannung Ionen gerichtet bewegen können, heißt Elektrolyt. Nun wissen wir endlich auch, wo das „E“ bei der „PEM“ her kommt!

4. Wie und wozu können wir Wasserstoff nutzen?

Als erstes als Brennstoff im wahrsten Sinne des Wortes – zum Verbrennen. Dabei entsteht, neben der charakteristischen leicht bläulichen, fast unsichtbaren Flamme, eine sehr große Hitze. Als Verbrennungsprodukt entsteht Wasserdampf, der dann zu Wasser kondensiert. Es bildet sich also kein kohlenstoffdioxid- oder giftiger kohlenstoffmonoxidhaltiger Rauch. Als Verbrennungsprodukt entsteht nur reines Wasser. Eine sehr saubere Verbrennung also.

Chemisch verbinden sich Wasserstoff und Sauerstoff zu Wasser:



Wegen der großen Hitzeentwicklung kann Wasserstoff zum autogenen Schweißen (zusammen mit Sauerstoff) verwendet werden. Hierbei wird eine Flammentemperatur von 3.300°C erreicht (Eisen und Stahl schmelzen bei einer Temperatur von etwa 1.500°C).



Abb. 17:
Schweißarbeiten im Stahlwerk

Wasserstoff wird für viele weitere Anwendungen eingesetzt. Er dient als Reduktionsmittel und entzieht Metalloxiden dabei den Sauerstoff. Das Verfahren wird bei der Verhüttung von Erzen angewandt und man gewinnt möglichst reine Metalle. Es ist wichtig bei der Ammoniak-Synthese (Haber – Bosch – Verfahren), um daraus Düngemittel und Sprengstoffe herzustellen. Wasserstoff ist auch wichtig in der Lebensmittelindustrie. So werden aus flüssigen Pflanzenölen mit Hilfe von Wasserstoff durch Hydrierung feste (gehärtete) Fette gewonnen, zum Beispiel Margarine. Es ist als Lebensmittelzusatzstoff (E 949) zugelassen und wird als Treibgas zum Beispiel zum Aufschlagen von Sahne verwendet.



Abb. 18 Start der Raumfähre „Endeavor“ in Florida

Aufgrund der geringen Dichte von Wasserstoff kann er als Traggas für Wetterballons benutzt werden. Ebenfalls Anwendung findet Wasserstoff als Raketentreibstoff.

Könnte Wasserstoff ein Energieträger der Zukunft sein?



Abb. 19 Braunkohlenabbau im Tagebau
Kohle in möglicherweise 150 Jahren.

Die Frage ist davon abhängig, ob er zur Stromerzeugung genutzt werden kann, denn der elektrische Strom stellt die Grundlage der Energieversorgung für Haushalte und Industrie dar. Bislang wird Strom hauptsächlich aus den fossilen Energieträgern wie Erdöl, Erdgas und Kohle hergestellt. Diese Vorräte sind aber irgendwann erschöpft, sei es nun bei Öl in vielleicht 50 oder

Tatsache ist, dass man möglichst schnell zu einer Wende in der Energiegewinnung kommen muss, denn ein weiteres Problem ergibt sich



Abb. 20 Steinkohlekraftwerk Bexbach,
Saarland

bei der Verbrennung dieser fossilen Brennstoffe: es werden Kohlenstoffdioxid- und Kohlenstoffmonoxid-Gase frei, die mittlerweile eine sehr große Umweltbelastung darstellen. (Entstand bei der Verbrennung von Wasserstoff nicht nur Wasser?)

Eine größere Menge des Stromes wird auch aus Kernenergie erzeugt. Das gibt zwar keine unmittelbare Umweltbelastung durch Rauch, Asche und Abgase, findet aber durch die Ängste der Bevölkerung vor Katastrophen und das ungeklärte Problem der Endlagerung radioaktiver Produkte keine sehr breite Zustimmung.



Abb. 21 Kernkraftwerk Krümmel

Die Laufzeit der Atomkraftwerke ist ja deshalb auch begrenzt worden. Außerdem gehen auch hier die Uranvorräte in etwa 50 Jahren zu Ende. Wir können aber nicht auf elektrischen Strom verzichten. Der Stromverbrauch wird bestimmt in Zukunft nicht sinken. Also müsste Strom zukünftig aus Energieträgern erzeugt werden, die reichlich vorhanden oder gar wieder verwertbar (erneuerbar, regenerativ) sind. Dabei dürfen keine zusätzlichen Umweltschäden oder Gefahren hervorgerufen werden.



Abb. 22 Wasserkraftwerk Ederfors in Lulea, Schweden

Die Nutzung der Wasserkraft zählt auch zu den erneuerbaren Energien. Dazu muss das Wasser aber eine ausreichend große Strömungsgeschwindigkeit haben, wozu nicht jedes Gewässer geeignet ist. Auch Windkraftanlagen oder Solarzellen nutzen erneuerbare Energien.

Dabei fällt einem aber sofort ein, dass die Sonne hier nur manchmal scheint, nachts sowieso nicht und dass der Wind sicher auch nicht täglich auf die zum Betreiben einer Windkraftanlage nötigen Stärke kommt. Sicher gibt es Gebiete, in denen Sonnen- oder Windkraftwerke sehr günstig sind, in den anderen Gebieten wird die Frage der Speichermöglichkeiten der elektrischen Energie für die „ungünstigen“



Abb. 23 Solarpark in Kalifornien, USA

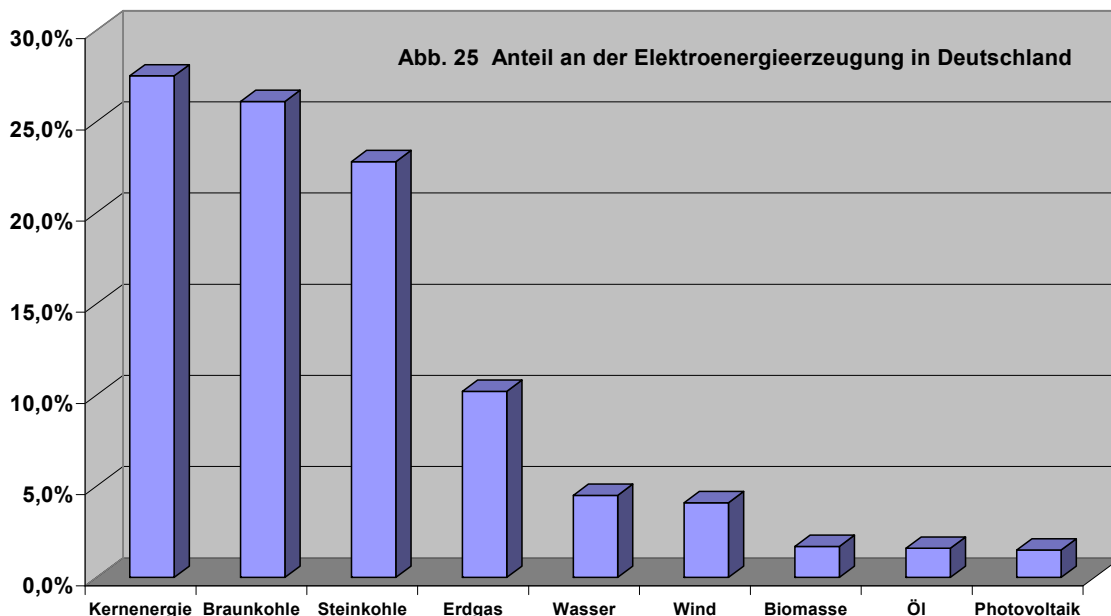


Abb. 24 Offshore Windpark im Kalmarsund, Schweden

Tage eine ganz wichtige sein. Weil die Speicherung von elektrischer Energie in Batterien und Akkus schwierig und deren Kapazitäten sehr begrenzt sind (1,5 Volt aus einer normalen Batterie aber 230 Volt aus der Steckdose), speichert

man lieber einen Stoff, den man schnell und sauber in elektrischen Strom umwandeln kann. Das ist der Wasserstoff!

Bisher werden weltweit etwa 15% der Elektroenergie aus regenerativen Energiequellen erzeugt, in Deutschland sind es etwa 12%.



Strom aus Wasserstoff?

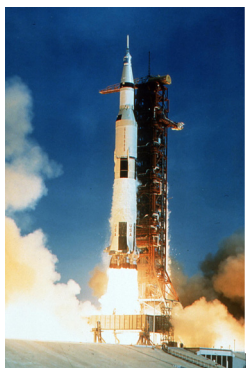


Abb. 26 Start von Apollo 11

Genau den liefert die Brennstoffzelle. Aus Wasserstoff und Sauerstoff entstehen elektrischer Strom, ein wenig Wärme und Wasser. Brennstoffzellen gibt es schon länger, sie lieferten in der Raumfahrt bereits Strom für die Apollo – Flüge.

Ohne Brennstoffzellen wäre die Mondlandung 1969 gar nicht möglich gewesen, da andere Stromerzeuger eine zu große Masse gehabt hätten. Das entstehende Wasser wurde dabei übrigens als Trinkwasser für die Astronauten aufbereitet.

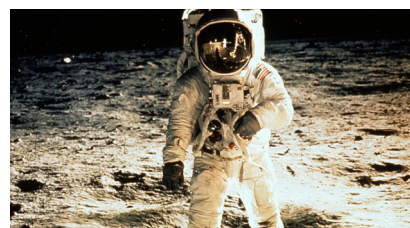


Abb. 27 20.07.1969 – Edwin Aldrin auf dem Mond



Abb. 28 9 Brennstoffzellenbusse sind in Hamburg im Einsatz

Auch in der U-Boot-Technik werden Brennstoffzellen zur Stromerzeugung verwendet. Es sind heute bereits Autos und Busse im Straßenverkehr im Einsatz, bei denen eine Brennstoffzelle in Verbindung mit einem Elektromotor die Räder antreibt.



Abb. 29 Brennstoffzellenfahrzeug „Necar 5“ von Daimler Chrysler



Abb. 30 Wasserdampf als „Abgas“ eines Brennstoffzellenbusses

5. Was ist eine Brennstoffzelle?

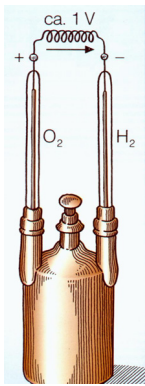


Abb. 31 Brennstoffzellen – Gasbatterie von 1839 nach Sir W. R. Grove

Im Schülerlabor gibt es einen Versuch, bei dem ein Propeller an einen Elektrolyseur angeschlossen wird. Wenn der Elektrolyseur bis zu diesem Zeitpunkt noch Elektrolyse betrieben hatte und sich noch Wasserstoff und Sauerstoff an der Membran befinden, dann wird sich der Propeller drehen. Der Elektrolyseur liefert offensichtlich elektrische Energie an den Propeller. Aber woher hat er die? Nicht etwa als elektrische Energie gespeichert, sondern sie wird in diesem

Moment aus der chemischen Energie der Gase Wasserstoff und Sauerstoff umgewandelt. Dabei entsteht wieder

Wasser. Der Elektrolyseur hat seine Arbeitsrichtung umgekehrt.

Damit wird er zu einer **Brennstoffzelle**.

Führt man der Membran Wasser und elektrische Energie zu, wandelt sie es in die chemische Energie der Gase Wasserstoff und Sauerstoff um. Das ist dann ein Elektrolyseur. Führt man der Membran Wasserstoff und Sauerstoff zu, wandelt sie die chemische Energie der Gase in elektrische Energie und Wasser um. Das ist dann eine Brennstoffzelle.

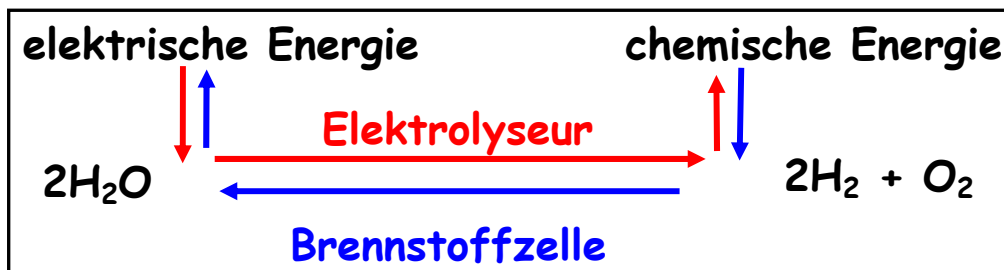


Abb. 32 Die Energie- und Stoffumwandlungen in Elektrolyseur und Brennstoffzelle

Eine Brennstoffzelle ist eigentlich ein Generator, der unter Zuführung von Wasserstoff und Sauerstoff eine elektrische Spannung erzeugen kann. Also ist es so eine Art „Gasbatterie“.

Erfunden wurde sie bereits 1839 durch den englischen Physiker Sir William Robert Grove. Sie konnte sich damals aber gegenüber der Stromerzeugung durch Generatoren mit Spulen und Magneten nicht durchsetzen. Heute ist die Brennstoffzelle im Zusammenhang mit der Suche nach erneuerbaren Energiequellen und den Möglichkeiten zur umweltschonenden Energieerzeugung wieder interessant geworden.



Abb. 33 Sir William Robert Grove, 1811 – 1896, englischer Physiker

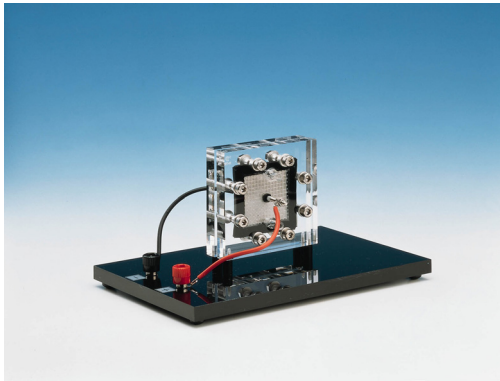


Abb. 34 Brennstoffzelle für Schülerexperimente

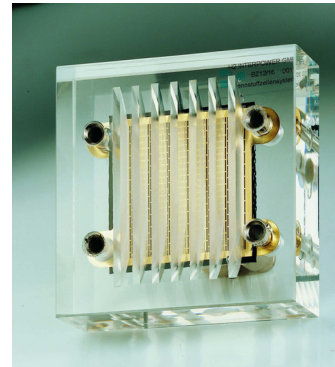


Abb. 35 Luftschlitze auf der Sauerstoffseite einer Brennstoffzelle

Ihre **Vorteile** sind:

Der Brennstoff ist aus Wasser herstellbar, das sozusagen unbegrenzt zur Verfügung steht.

Als Endprodukt entsteht wieder nur Wasser.

Die Brennstoffzelle arbeitet völlig geräuschlos und emissionsfrei.

Es gibt hier eine direkte Umwandlung chemischer Energie in elektrische Energie, ohne Umwege über Wärme- und mechanische Energie.

Die Brennstoffzelle unterliegt keinem mechanischen Verschleiß, da in der Zelle keine beweglichen Teile zum Einsatz kommen.

Der reine elektrische Wirkungsgrad kann bis zu 60% betragen.

Die Brennstoffzelle benötigt keine Ladezeiten. Bei Zufuhr von Wasserstoff und Sauerstoff liefert sie sofort eine Spannung.

Ihr **Nachteil** ist:

Der Wasserstoff muss erst unter Energieaufwand erzeugt werden und ist damit kein auf der Erde vorhandener Primärenergieträger.

Wie erzeugt die Brennstoffzelle Strom?

Was ist überhaupt „Strom“?

Elektrischer Strom ist die gerichtete Bewegung von Ladungsträgern, meist Elektronen. Also müssen sich Elektronen bewegen. Die müssen aber erst einmal da sein und für so eine „Wanderung“ zur Verfügung stehen. Damit sie sich dann bewegen, brauchen sie einen Antrieb, sozusagen „Schwung“ durch eine Pumpe. Dieser „Elektronenantrieb“ heißt physikalisch Spannung mit dem Formelzeichen U . So eine Spannung baut sich zwischen zwei Elektroden immer dann auf, wenn es an einer Seite zu viele Elektronen (Elektronenüberschuss, negativer Pol) und an der anderen Seite zu wenige Elektronen (Elektronenmangel, positiver Pol) gibt. Diesen Ungleichgewichtszustand will die Natur ausgleichen. Wenn jetzt ein Schalter geschlossen wird und die beiden Pole miteinander verbunden werden, dann bewegen sich die Elektronen von der „Überschussseite“ (Minuspole) zur „Mangelseite“ (Pluspol). Das ist dann ein elektrischer Stromfluss, oder einfach Strom genannt. Nun sollen die Elektronen sich nicht einfach nur bewegen, sondern unterwegs etwas tun. Durch ihre Bewegung können Elektronen nämlich Arbeit verrichten und zum Beispiel eine Lampe zum Leuchten bringen oder einen Elektromotor antreiben.

In der Brennstoffzelle müssen also Ladungen räumlich voneinander getrennt werden, so dass an einer Seite (Elektrode) Elektronen zurück bleiben (Elektronenüberschuss) und an der anderen Seite Elektronen fehlen (Elektronenmangel). Damit wird dann zwischen diesen beiden Elektroden eine Spannung aufgebaut. Wenn diese beiden Elektroden jetzt über ein elektrisches Gerät verbunden werden, dann kann der nun fließende Strom eine Lampe leuchten lassen, einen Elektromotor antreiben... .

Woher kommen die Elektronen in der Brennstoffzelle?

Bis zur Erfindung der Brennstoffzelle konnte man elektrische Energie aus einem chemischen Energieträger nur über den Umweg der Verbrennung erzeugen. Dabei entstehen thermische und mechanische Energie als Zwischenstufen, was stets zu einem geringeren Anteil der nutzbaren Energie in einem solchen Prozess führt. Es ging also immer nur außen um die [in Abb. 36] gezeigte „Mauer“ herum. Mit einer Brennstoffzelle kann man diese „Mauer“ in so einer Art „Quantensprung“ durchbrechen. Das Prinzip der Brennstoffzelle ist, die chemische Energie von Wasserstoff und Sauerstoff direkt (ohne Verbrennungsprozess) in elektrische Energie umzuwandeln.

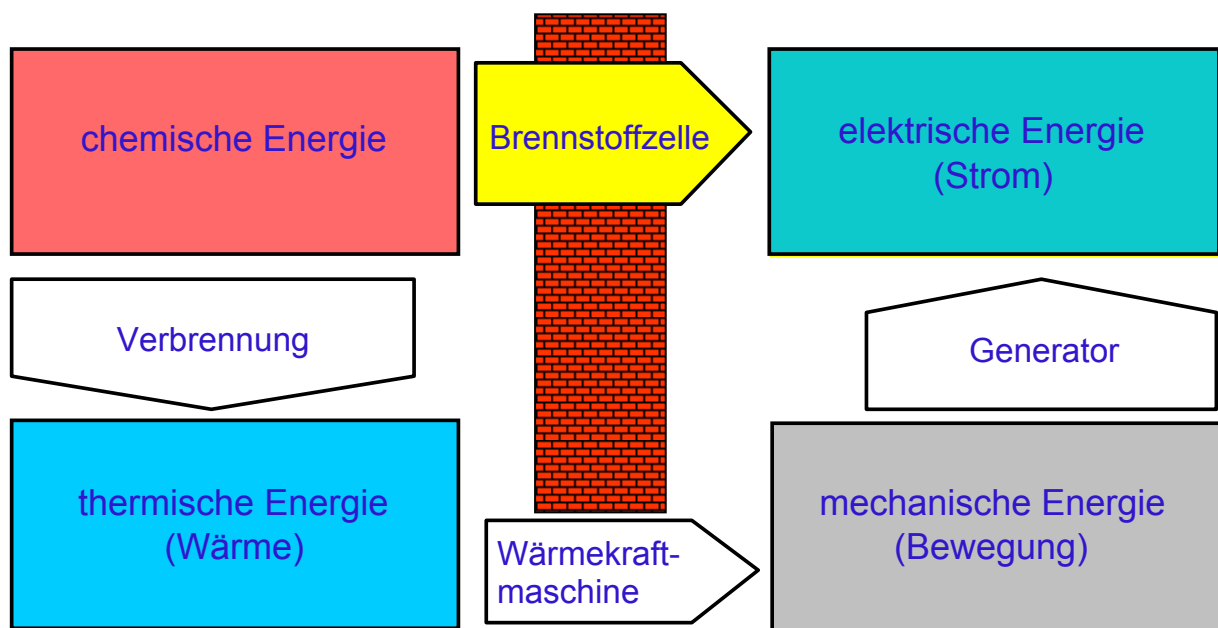
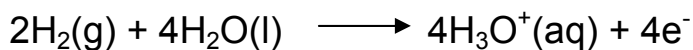


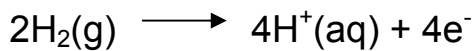
Abb. 36 Energieumwandlungen von der chemischen bis zur elektrischen Energie

Dabei entsteht genau wie bei einer „heißen“ Verbrennung von Wasserstoff mit Sauerstoff (Knallgasreaktion) Wasser, nur dass dieser Prozess bei Umgebungstemperatur abläuft, sozusagen als „kalte“ Verbrennung. Die Ausgangsstoffe, Wasserstoff und Sauerstoff, werden an getrennte Elektroden geführt. Diese Elektroden sind aus einem Material, das die gewünschten Reaktionen in Gang setzen oder beschleunigen kann. In der Chemie heißen solche Stoffe Katalysatoren. In der Brennstoffzelle ist so ein Katalysator meist Platin. Katalysatoren setzen die benötigte Energie (Aktivierungsenergie) herunter, so dass dieser Prozess schon bei Zimmertemperatur ablaufen kann.

Im Wasserstoff sind immer zwei Wasserstoffatome zu einem Molekül verbunden. Durch den Katalysator wird diese Verbindung aufgespalten. Die entstehenden Atome können jeweils noch ein Elektron abgeben, wobei ein Wasserstoffion (ein Proton, H^+) zurück bleibt. Das Proton benutzt wie im Elektrolyseur ein Wassermolekül als „Taxi“ und bildet ein positiv geladenes Oxoniumion (H_3O^+). Die vollständige Gleichung für die Vorgänge an der Elektrode auf der Wasserstoffseite der Brennstoffzelle ist also:



Oder zusammengefasst:



Im vorliegenden Fall haben wir also nur noch freie Elektronen und Protonen (als Oxoniumionen). Das ist schon mal eine gute Voraussetzung für einen Stromfluss. Die Elektrode auf der Wasserstoffseite, an der die gerade beschriebene Reaktion abläuft, heißt Anode. Wasserstoff gibt hier Elektronen ab und wird damit oxidiert.

Der zweite Ausgangsstoff für die Brennstoffzelle, der Sauerstoff, wird auf die andere Seite der Brennstoffzelle, an die andere Elektrode geführt.

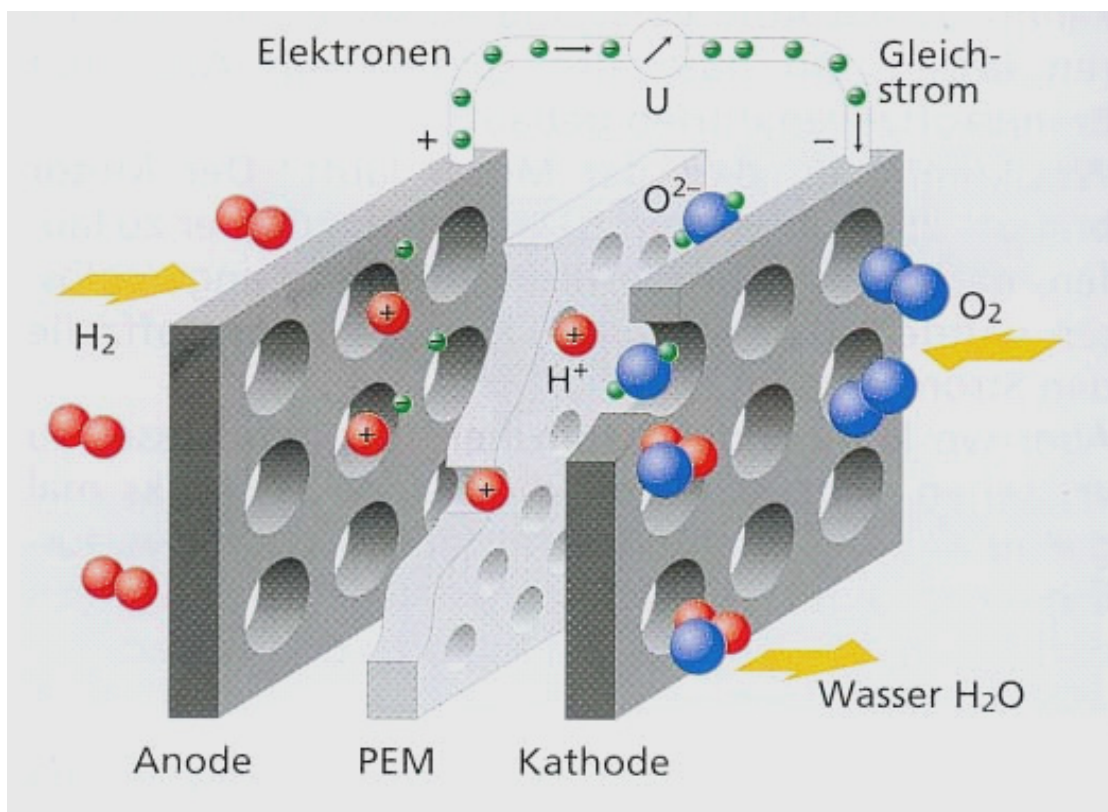


Abb. 37 Vorgänge in einer Brennstoffzelle

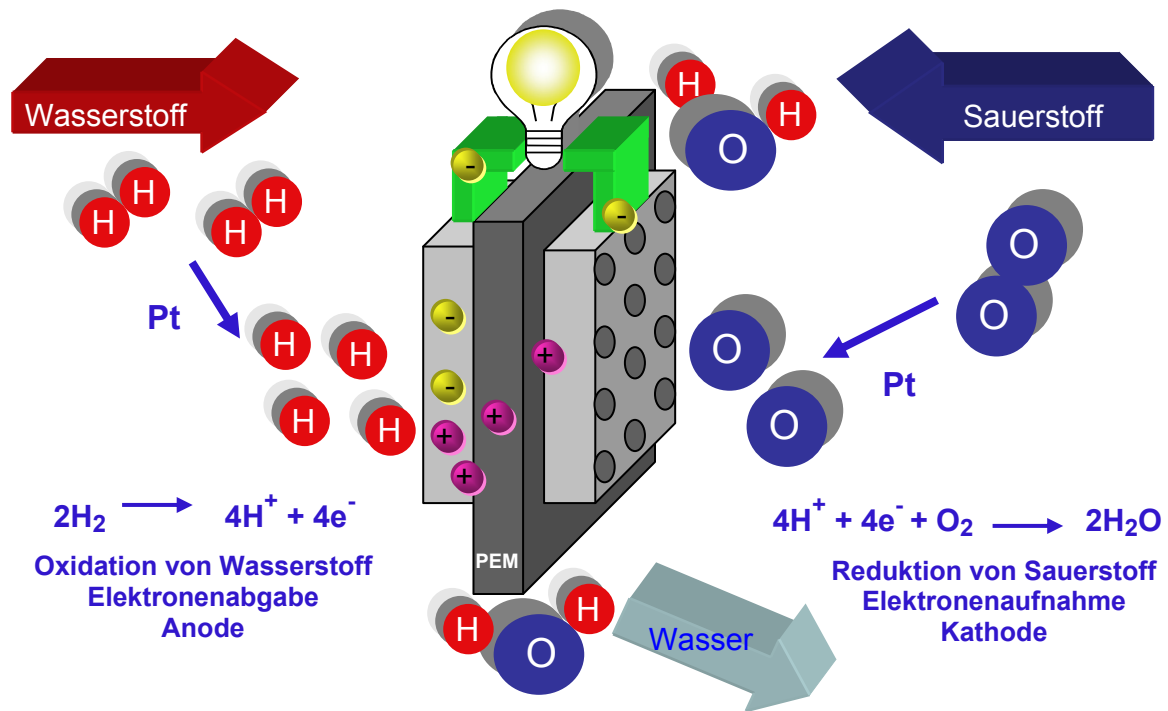


Abb. 38 Abläufe an den einzelnen Elektroden einer Brennstoffzelle

Beide Elektroden sind durch eine dünne Schicht, eine Membran, voneinander getrennt. Es ist die gleiche Membran wie im Elektrolyseur. Sie hieß dort PEM – von Polymer-Elektrolyt-Membran. Damit die Brennstoffzelle auch funktioniert, muss diese Membran eine ganz besondere Eigenschaft haben: sie soll nichts anderes als die Protonen von der Wasserstoffseite auf die Sauerstoffseite durchlassen. Deshalb heißt sie in der Brennstoffzelle auch Protonen – Austausch – Membran, oder englisch **P**roton **E**xchange **M**embrane (wieder: PEM, es ist ja auch die gleiche Membran, nur jetzt nutzt man die Protonenleitfähigkeit). Da Elektronen nicht durch die Membran gelangen können, bleiben sie auf der Wasserstoffseite zurück. Diese Elektrode wird dadurch negativ aufgeladen (Elektronenüberschuss). An der Elektrode auf der Sauerstoffseite sammeln sich zunächst die Protonen, die durch die Membran gelangt sind. Damit wird diese Elektrode positiv aufgeladen (Elektronenmangel).

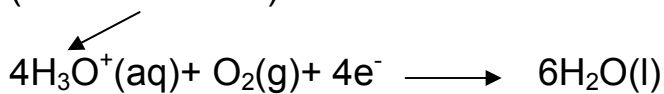
Jetzt ist also die Grundvoraussetzung für einen Stromfluss entstanden. Zwischen den beiden Elektroden hat sich eine elektrische Spannung aufgebaut. An der Wasserstoffseite besteht Elektronenüberschuss, an der Sauerstoffseite herrscht Elektronenmangel. Diese Spannung stellt den Antrieb für die Elektronen dar, die diesen Zustand unbedingt überwinden und zur Sauerstoffseite gelangen wollen. Jetzt muss man ihnen nur den Weg dahin über einen elektrischen Leiter freimachen und schon fließt Strom. Da wir den Strom nutzen wollen, werden die beiden Elektroden natürlich nicht nur einfach verbunden –

das gäbe einen Kurzschluss -, sondern dazwischen kann nun ein elektrisches Gerät geschaltet werden.

Die Elektronen wandern von der Wasserstoffseite der Brennstoffzelle über ein elektrisches Gerät (Elektromotor, Lampe...) zur Sauerstoffseite. Im elektrischen Gerät verrichten sie Arbeit. An der Kathode werden jeweils zwei Elektronen von einem Sauerstoffatom aufgenommen. Chemisch ist dies eine Reduktion. Das Sauerstoffion nimmt dann für den Ladungsausgleich noch zwei Protonen auf und es entsteht Wasser.

Die Reaktion an der Sauerstoffseite ist im Einzelnen:

(durch die PEM)



(über eine elektrische Leitung)

Oder zusammengefasst:



Solange Wasserstoff und Sauerstoff zugeführt werden, bildet sich zwischen diesen beiden Seiten eine Spannung, mit der ein Stromfluss in Gang gesetzt werden kann. Eine Spannungsquelle, die völlig leise und ohne Abgase nur Wasser entstehen lässt.

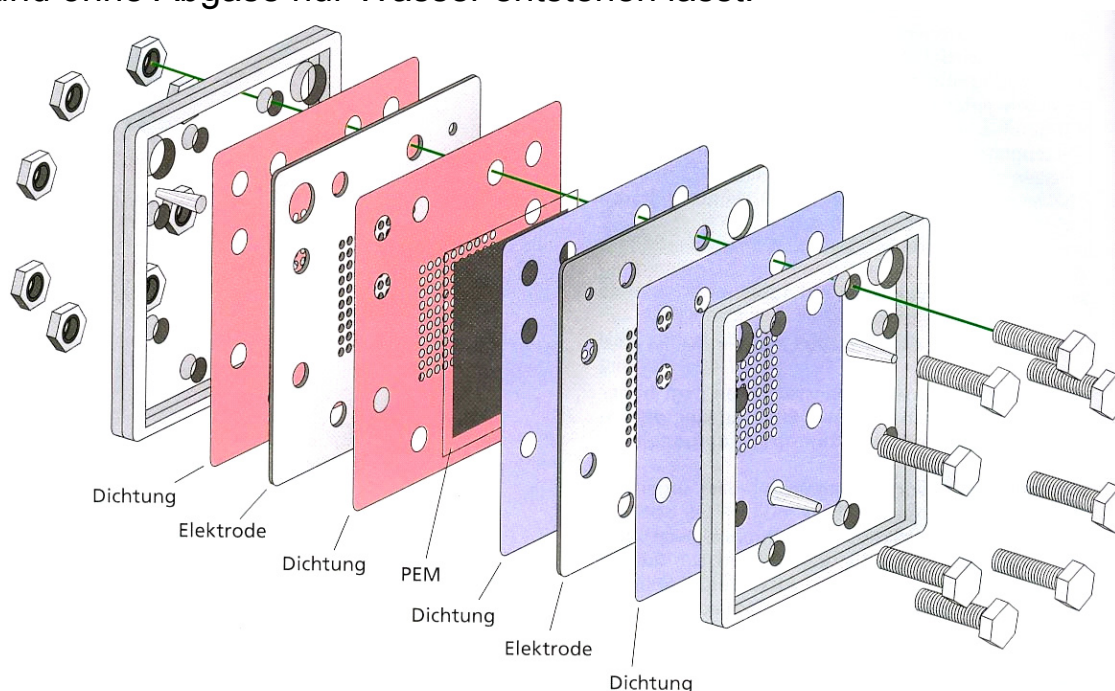


Abb. 39 Explosionszeichnung der Brennstoffzelle

Nun sieht es so aus, als hätten wir gar nichts gewonnen – wir benötigen Strom für die Elektrolyse, um über den Wasserstoff wieder Strom in der Brennstoffzelle zu erzeugen.

Der Widerspruch lässt sich aber lösen. Lassen wir an einem sonnigen Tag durch Solarstrom aus Wasser Wasserstoff und Sauerstoff entstehen, können wir damit an einem verregneten Tag in einer Brennstoffzelle Strom erzeugen. Da taucht das nächste Problem auf:

6. Wie kann man Wasserstoff speichern?

Als Gas nimmt Wasserstoff natürlich einen riesigen Raum ein, denn Wasserstoff hat ja die geringste Dichte. Für sehr wenig Wasserstoff bräuchte man bei normalem Luftdruck gigantische Tanks. Das Gas wird also unter hohem Druck zusammengepresst (komprimiert) und damit



Abb. 40 Druckgasflaschen für den Wasserstoffbus

„verkleinert“. In solchen Druckgasflaschen oder Druckgastanks herrscht ein Druck der über 200-mal größer als der Luftdruck ist. Bisher ist das die gebräuchlichste Form der

Wasserstoffspeicherung, die in vielen Laborbereichen und auch in wasserstoffgetriebenen Fahrzeugen zum Einsatz kommt.

Im flüssigen Zustand nimmt der Wasserstoff 900-mal weniger Volumen ein als im gasförmigen Aggregatzustand bei Normdruck. Aber flüssig wird Wasserstoff erst bei -253°C . Das bedeutet, dass man wieder viel Energie aufwenden müsste, um den Wasserstoff zu kühlen. Das wird außerdem sehr teuer.

Dennoch wird diese Speicherungsmöglichkeit bei mit Wasserstoff angetriebenen Fahrzeugen verwendet.

Wasserstoff kann auch in Form einer geeigneten chemischen Verbindung wie z.B. dem Methanol (CH_3OH) gespeichert sein. Bei der Gewinnung von Wasserstoff aus Methanol mit Wasserdampf entsteht aber immer auch noch etwas Kohlendioxid. Viel weniger als bei Verbrennungsmotoren, aber immerhin: $\text{CH}_3\text{OH} + \text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{CO}_2 + 3\text{H}_2$. Hier in Geesthacht laufen Forschungen und Entwicklungen zur Direkt-Methanol-Brennstoffzelle. Hier wird statt Wasserstoff direkt Methanol als Brennstoff eingesetzt. Diese Technik wird beispielsweise für Laptops und zur Stromversorgung von Segelboten entwickelt. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, Wasserstoff in Metalle einzulagern.



Abb. 41 Metallhydridspeicher aus dem Schülerlabor, Größenvergleich



Abb. 42 Helmholtz-Zentrum Geesthacht - Metallhydridspeicher auf Aluminiumbasis, ca. 1 m lang

Ja, richtig gelesen: Wasserstoff kann in bestimmte Metalle eindringen und dort gespeichert werden. Die kleinen Wasserstoffatome lagern sich in Zwischenräumen des Atomgitters der Metalle an. So wie Sand in die Zwischenräume eines mit kleinen Steinchen gefüllten Gefäßes rieseln kann. Beim Wasserstoff vollzieht sich das allerdings langsam und unter hohen Temperaturen. Beim Helmholtz-Zentrum Geesthacht wird nun geforscht, wie man die Reaktionszeiten für das Be- und Entladen eines Metalls mit Wasserstoff verkürzen kann. Dabei sind schon beachtliche Erfolge erreicht worden. Außerdem ist die Art der Metalle wichtig, damit so ein Speicher nicht zu schwer wird. Man forscht hier an Magnesium- und Aluminiumspeichern. Auch hier sind schon gute Forschungsergebnisse vorzuweisen. Die Speicherung in einem Metall gilt als die effektivste und sicherste Speichermöglichkeit. Ein Metall mit eingelagertem Wasserstoff heißt übrigens Metallhydrid und so ein Speicher Metallhydridspeicher. Hier in Geesthacht befindet sich übrigens der größte Metallhydridspeicher auf Aluminiumbasis in Europa!

1-Liter-Behälter fasst:



1 l H₂ bei 1 bar Druck

500 l H₂ bei 700 bar Druck

700 l H₂ bei -253°C flüssig

1300 l H₂ als Metallhydrid

Abb. 43 Vergleich der Speicherkapazitäten von Wasserstoff

7. Ist die Wasserstofftechnologie nicht gefährlich?

In der Geschichte wurden viele neue, bis dahin für die Menschen unbekannte Technologien zunächst einmal abgelehnt oder gar verteufelt:

1. wegen der zu vermutenden Gefahren,
2. wegen der Angst vor Unbekanntem,
3. wegen des Widerspruchs zum jeweils herrschenden Weltbild oder
4. auch wegen der Reduzierung von Arbeitsplätzen, was eine neue Technik oft mit sich bringt.

Da wurden zu Zeiten der Inquisition Menschen verbrannt, weil sie behaupteten, die Sonne bilde den Mittelpunkt des Universums. Da wurden in England Maschinen gestürmt, in Deutschland sich gegen die Eisenbahn aufgelehnt und Brücken zerstört. In Amerika rissen Farmer die Drähte von Morses erster Telegraphenleitung. Sie sahen darin die Ursache für das schlechte Wetter.

Nun hat sich unser Horizont etwas erweitert, aber wir sind zum Glück immer noch sehr kritisch in der Abwägung von Gefahren. Das ist auch richtig so. Wie wir inzwischen wissen, kann Wasserstoff mit Luft ein hochexplosives Gemisch bilden. Konzentrationen von Wasserstoff in der Luft von über 4% müsse also vermieden werden.

Keine Angst, bei der Elektrolyse im Schülerlabor sind die hergestellten Wasserstoffmengen viel zu klein. Außerdem befindet sich an der Decke eine Öffnung, durch die der Wasserstoff entweichen kann. Da sind auch schon wichtige **Schutzmaßnahmen** genannt worden: Kein Umgang mit Feuer, nicht Rauchen beim Arbeiten mit Wasserstoff, für Abzugsmöglichkeiten (nach oben) sorgen und Wasserstoff und Sauerstoffbehälter immer getrennt lagern.

Nun gab es in der Geschichte mindestens drei Ereignisse, die negativ im Zusammenhang mit Wasserstoff stehen.

Am 06.05.1937 gab es kurz vor der Landung in Amerika einen Brand an Bord des damals größten deutschen **Luftschiffes „Hindenburg“**. Dabei kamen 36 der 98 Passagiere und Besatzungsmitglieder ums Leben. Die Brandursache geht aber auf elektrische Entladungen zwischen dem Farbanstrich der Aluminiumkonstruktion



Abb. 44 Zeppelin - Luftschiff

und

zurück. Die Propeller für den Vortrieb wurden mit Benzin betrieben, welches sich sofort entzündete. Der Ballon war mit 200.000 m³ Wasserstoff als Traggas gefüllt. Eine Wasserstoffexplosion hat es nicht gegeben. Ein weiterer tragischer Unfall ereignete sich am 28. Januar 1986. Die amerikanische **Raumfähre „Challenger“** explodierte nur 73 Sekunden nach dem Start. Ein Metallteil hatte sich gelöst und einen Tank, der mit Wasserstoff und Sauerstoff gefüllt war durchschlagen und zur Explosion gebracht. Alle sieben Besatzungsmitglieder starben.

Auch die **Wasserstoffbombe** wird im Zusammenhang mit der Gefährlichkeit von Wasserstoff genannt. Hier geht es allerdings um ein völlig anderes physikalisches Prinzip: Unter gewaltiger Hitze und mit riesigen Geschwindigkeiten können Wasserstoffkerne miteinander zu einem neuen chemischen Element, zu Helium, verschmelzen. Dabei wird wiederum eine Menge Energie frei. Diese gewaltige Energie des Wasserstoffs soll in einer Bombe in Sprengkraft, Hitze und radioaktive Strahlung umgesetzt werden. Die Wirkung würde die der Atombomben von Hiroshima und Nagasaki um ein Vielfaches übertreffen.

Der Vorgang der Kernverschmelzung heißt Kernfusion. Dieser Prozess findet natürlicherweise auf der Sonne statt und liefert uns das Licht und die Wärme. In jeder Sekunde werden auf der Sonne dazu etwa 500 Millionen Tonnen Wasserstoff verbraucht.

Aber keine Sorge, es sind noch nicht einmal 4% des Wasserstoffvorrates in Helium umgesetzt.

Die Energie des Wasserstoffs lässt sich wahrlich vernünftiger als in einer Bombe nutzen. Die Gefahren lassen sich durch sachgemäßen Umgang beherrschen. Wasserstoff ist damit nicht gefährlicher als Benzintanklastzüge auf der Straße, Erdöltanker auf den Meeren oder Erdgaspipelines und Gastanks vor Einfamilienhäusern. Auch hier sind ja eine Menge Sicherheitsmaßnahmen notwendig.

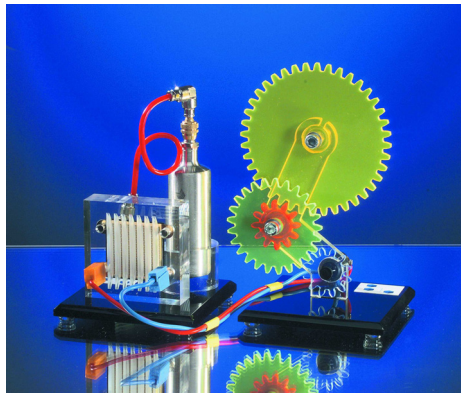


Abb. 45 Brennstoffzelle mit Metallhydridtank treibt einen Motor mit Getriebe an



Abb. 46 Die gleiche Brennstoffzelle treibt einen Propeller an

8. Wie könnte die Zukunft aussehen?

Man wird erkennen, dass aus dem reichlich vorhandenen Wasser eine Menge Energie zu erhalten ist. Vielleicht wird dann durch Elektrolyse das Wasser mittels Strom aus Solaranlagen, Windrädern oder Wasserkraftwerken in Wasserstoff und Sauerstoff zerlegt. Man wird Wüstenregionen für Solaranlagen, Wasserfälle und Stauseen für Wasserkraftwerke und Küstenregionen für Windkraftanlagen nutzen. (Die zurzeit größte Elektrolyse - Anlage gibt es heute am Wasserkraftwerk des Assuan – Staudammes in Ägypten. Hier können 40.000 m^3 (40 Millionen Liter!) Wasserstoff pro Stunde erzeugt werden.) Der Wasserstoff der Zukunft wird dann vielleicht über die vorhandenen Gaspipelines zu den Verbrauchern geleitet. Für mobile Anwendungen könnte es Druckgasflaschen oder Metallhydridspeicher geben. Elektrischen Strom liefern dann hauptsächlich Brennstoffzellen. Als Großanlagen für eine Stadt und die Industrie, als Hausversorgung und natürlich als mobile Anlagen für alle Schiffe, Eisenbahnen, Flugzeuge und Autos. Alle diese Fahrzeuge, das Flugzeug am Himmel wie der LKW auf der Straße, würden sich dann viel leiser und ohne Abgase bewegen. Die Energieversorgung der Menschheit wäre wieder für einige Zeit gesichert. Die Umweltschäden und das Ozonloch würden nicht weiter vergrößert und die Natur hätte eine Möglichkeit, sich etwas zu erholen.

Alles Zukunftsmusik?

Einer der Begründer des Zukunftsromans (der Science – Fiction - Literatur) war der französische Schriftsteller Jules Verne. Er lebte von 1828 bis 1905 und schrieb über 60 spannende Romane und Erzählungen.

In seinem Abenteuerroman „Die geheimnisvolle Insel“ (aus dem Jahre 1875) treffen die Helden der Geschichte auch auf den alternden Kapitän Nemo in seinem Unterwasserboot „Nautilus“ und berichten:

“Die Elektrizität, deren unerschöpfliche Kraft er durch Mittel, die künftig allgemein bekannt sein werden, zu benutzen wusste und die er unerschöpflichen Quellen entnahm, fand für alle Zwecke seines Apparates Verwendung als Antriebskraft, als Licht- und Wärmequelle. Das Meer mit seinen ungezählten Schätzen, ..., deckte vollkommen die Bedürfnisse Kapitän Nemos und seiner Begleitung.“

Hatte Jules Verne sich für die „Nautilus“ einen Brennstoffzellenantrieb erdacht?



Abb. 47 Zum Gedenken an den Schriftsteller Jules Verne, Ausstellung am Eiffelturm in Paris 1998

Im Roman lässt Jules Verne den amerikanischen Ingenieur Cyrus Smith sagen:

“ Ich glaube, dass Wasser eines Tages als Brennstoff dienen wird.“

Wir wissen jetzt, dass Wasser kein Brennstoff ist, man aber daraus den Brennstoff Wasserstoff erzeugen kann.

Genau das machen wir hier im Schülerlabor: Aus Wasser den Brennstoff Wasserstoff und den in elektrische Energie umwandeln.

Wie heißt es noch?

„Vielleicht fängt hier und irgendwann, irgendwo die Zukunft an...“

Literaturverzeichnis

Bücher

- 1.) **Chemie plus,**
Lehrbuch für Klasse 8, Gymnasium Sachsen,
Barbara Arndt, Karin Arnold, Volkmar Dietrich, Klaus Krüger, Bernd Schmiede,
Volk und Wissen Verlag GmbH & Co., 1. Auflage, Berlin 2001
- 2.) **Formeln und Tabellen für die Sekundarstufen I und II,**
Frank-Michael Becker, Gunter Boortz, Volkmar Dietrich, Lutz Engelmann,
Christine Ernst, Günter Fanghänel, Heinz Höhne, Rudi Lenertat, Günter Liesenberg, Lothar Meyer, Christa Pews-Hocke, Gerd-Dietrich Schmidt,
Reinhard Stamm, Karlheinz Weber,
Peatec, Gesellschaft für Bildung und Technik mbH, 6. bearb. Aufl., Berlin 1996
- 3.) **Blickpunkt Chemie,**
herausgegeben von Dieter Frühauf und Hans Tegen,
Schroedel Schulbuchverlag GmbH, Hannover 1993
- 4.) **Duden Basiswissen Schule Chemie,**
herausgegeben von Christine Ernst, Claudia Puhlfürst und Martin Schönherr,
Paetec Gesellschaft für Bildung und Technik mbH, Berlin 2001 und
Bibliographisches Institut & F.A. Brockhaus AG, Mannheim 2001
- 5.) **Duden Basiswissen Schule Physik,**
herausgegeben von Lothar Meyer und Gerd-Dietrich Schmidt,
Paetec Gesellschaft für Bildung und Technik mbH, Berlin 2001 und
Bibliographisches Institut & F.A. Brockhaus AG, Mannheim 2001
- 6.) **Metzler Physik,**
herausgegeben von Joachim Grehn und Joachim Krause,
Schroedel Verlag GmbH, 3. Auflage, Hannover 1998
- 7.) **Grundriss der Atom- und Kernphysik,**
Helmut Lindner,
VEB Fachbuchverlag Leipzig, 15 Auflage, Leipzig 1984
- 8.) **Wer – Was – Wann? Entdeckungen und Erfindungen in
Naturwissenschaft und Technik,**
Walter Conrad u.a.,
VEB Fachbuchverlag Leipzig, 3. Auflage, Leipzig 1985
- 9.) **Brennstoffzelle – Bedienungsanleitung, Methodische
Anregungen, Versuche,**
H-TEC, Wasserstoff-Energie-Systeme GmbH Lübeck

- 10.) **Wasserstoff: Energie für morgen, Grundlagen und Anwendungen,**
Averil Macdonald und Martyn Berry,
heliocentris Energiesysteme GmbH, 1. Auflage, Berlin 2000
- 11.) **Experimentieranleitung KOSMOS Brennstoffzelle,**
Detlef Bahnemann, Francisco Pujiula, Christopher Berge,
Franckh-Kosmos Verlags-GmbH & Co., 1. Auflage, Stuttgart 2000
- 12.) **Solarer Wasserstoff – ein möglicher Energieträger der Zukunft,**
Broschüre zur Ausstellung der Deutschen Forschungsanstalt für Luft- und
Raumfahrt,
herausgegeben von der DLR, Geschäftsstelle Energetik Stuttgart, 5.,
erweiterte und überarbeitete Auflage, Sonderausgabe der Vereinigung der
Deutschen Elektrizitätswerke, Landesgruppe Schleswig Holstein, Hansestadt
Hamburg, Mecklenburg-Vorpommern
- 13.) **Basiswissen zum Thema Kernenergie,**
Martin Volkmer,
Hamburgische Electricitäts-Werke Aktiengesellschaft, Schulinformation, neu
überarbeitete Ausgabe, Hamburg 1993
- 14.) **Experimente mit Solarzellen,**
Martin Volkmer,
Hamburgische Electricitäts-Werke Aktiengesellschaft, Schulinformation, 1.
Auflage, Hamburg 1988
- 15.) **Elektrische Energie aus dem Wind,**
Jürgen Seidel,
Lasbek-Gut 1992
- 16.) **Das Elektroauto – Fakten und Argumente,**
VEBA AG, Düsseldorf 1992

Internetseiten:

A. Prinzip und Grundlagen der Brennstoffzelle

<http://www.dwv-info.de>
<http://www.schuelerlexikon.de>
<http://www.HyWeb.de>
<http://www.diebrennstoffzelle.de>
<http://www.dc2.uni-bielefeld.de/dc2/fc>

B. Anwendungen der Brennstoffzelle

<http://www.brennstoffzellenbus.de>
<http://www.h2guide.de>
<http://www.h2expo.de>

C. Lehr- und Experimentiermaterial

<http://www.h-tec.com>
<http://www.heliocentris.com>

D. Weiterführende Informationen

<http://www.tu-clausthal.de>
<http://techni.tachemie.uni-leipzig.de/BZ/>
http://zeppelin-museum-zeppelinheim.de/die_hindenburg.htm
<http://www.weltraumfaehre.de>
<http://www.hydrogen.org/Einstieg>

Bildquellen

Abb. auf der Titelseite:

nach einer Zeichnung von Bernhard Borchardt

Abb. 1, 2, 3, 8, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 26, 27, 29, 47:

action press GmbH & Co. KG, Hamburg

Abb. 6:

Metzler Physik, Gesamtband, Schroedel Verlag GmbH, Hannover

Abb. 12:

Helmholtz-Zentrum Geesthacht

Zentrum für Material- und Küstenforschung GmbH, Michael Schossig

Abb. 31:

Basiskatalog der PHYWE – Systeme GmbH, Göttingen

Abb. 33, 35, 37, 39, 44:

Experimentieranleitung zur Kosmos Brennstoffzelle,

Franckh – Kosmos Verlags – GmbH & Co., Stuttgart

Abb. 34, 40, 45, 46:

Conrad Electronic GmbH, Hirschau

Abb. 48 und Bilder auf dem Einband:

Christian Geisler, Hamburg

Das Schülerlabor „Quantensprung“:



Abb. 48 Das Schülerlabor von außen



Abb. 49 Labor II: Brennstoffzelle



Abb. 50 Labor I: Wasseranalytik



Abb. 51 Der Schülerlaborbus „Quantenblitz“