



**DLR\_School\_Lab**

Köln

## Brennstoffzellen

### Bald alle Energie verbraucht?

**„Energieverbrauch in Deutschland 2010 deutlich gestiegen. Auch der Preis für Energie wird stetig steigen.“ So konnte man es vor kurzem in einer großen Zeitung lesen. Dass das stimmt, bemerkt jeder an der Tankstelle, oder wenn er einen Blick auf die letzte Strom- oder Gasrechnung wirft. Da hilft es nur wenig, wenn uns die Physiker erklären, dass man Energie gar nicht verbrauchen kann...**

Natürlich ist das richtig, man kann Energie nur von einer Form in eine andere umwandeln. Wir werden uns in diesem Experiment ausführlich damit beschäftigen. Mit „Energieverbrauch“ meint man umgangssprachlich den Verbrauch von primären Energieträgern. In Deutschland sind das im wesentlichen Erdöl, Erdgas, Braunkohle und Steinkohle (Abb. 1), also alles Energieträger auf der Basis des Elementes Kohlenstoff. Sie werden auch fossile Energieträger genannt, weil sie vor Milliarden von Jahren entstanden und die durch Lebewesen umgesetzte Sonnenenergie bewahrt haben. Der Stellenwert der Kernenergie wird in Deutschland nicht erst seit der Katastrophe von Fukushima diskutiert. Erneuerbare (regenerative) Energie spielt bisher in Deutschland nur eine relativ geringe Rolle.

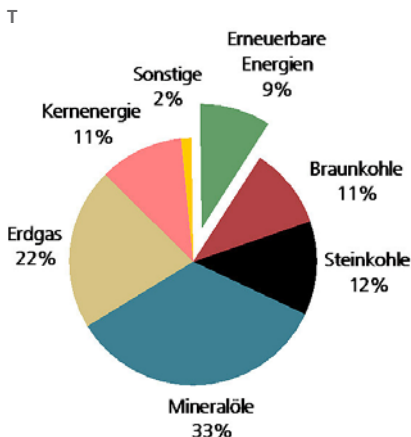


Abb. 1: Primärenergieverbrauch in der Bundesrepublik Deutschland im Jahre 2010. Insgesamt 479,6 PJ (Peta Joule = 10<sup>15</sup> J)

Einen großen Teil der Energie, die während Milliarden von Jahren gespeichert wurde, haben wir in den letzten 200 Jahren verbraucht. Wenn wir so weitermachen, benötigen wir im Jahr 2050 die fossilen Energieträger von drei Erden!

## Die Sonne anzapfen

Dabei steht eigentlich ausreichend Energie zur Verfügung: Die Sonne strahlt auf die Wüsten der Erde in nur 6 Stunden so viel Energie ab, wie die ganze Menschheit in einem Jahr benötigt. Das Problem besteht in Gewinnung, Transport und Speicherung der Energie aus den regenerativen Quellen Sonnenlicht, Wasserkraft, Wind und Biomasse.

## Energieträger Wasserstoff

Wasserstoff könnte ein Energieträger der Zukunft sein. Er ist ein leichtes unsichtbares Gas und verbrennt mit Sauerstoff zu Wasser. Autos, die mit Wasserstoff angetrieben werden, würden als Abgas ausschließlich Wasserdampf produzieren.

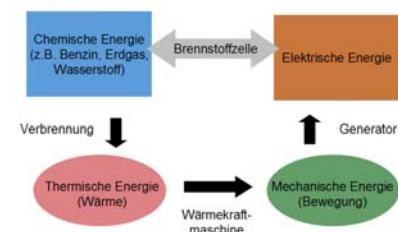


Abb. 2: Umwandlung von Energieformen

## Eine Abkürzung nehmen

Die Umwandlung von Energie von einer Form in die andere ist nicht zum Nulltarif zu haben. Es entsteht bei jedem Schritt Abwärme, die man meist nicht vollständig nutzen kann, oder die sogar stört. Abb. 2 zeigt ein übliches Verfahren zur Gewinnung elektrischer Energie: ein chemischer Energieträger (z. B. Kohle) wird verbrannt. Die entstehende thermische Energie wird auf ein Medium (z. B. Wasser) übertragen. Dieses treibt ein mechanisches Gerät (z. B. Dampfturbine) an, das dann über einen Generator Strom erzeugt. Der Anteil an Energie, der bei jedem Schritt als Abwärme „verloren geht“, wird durch den Wirkungsgrad einer Maschine oder eines Prozesses angegeben:

$$\text{Wirkungsgrad } (\eta) = \frac{\text{Ausgangsleistung } (P_2)}{\text{Eingangsleistung } (P_1)}$$

Eine Brennstoffzelle kann diesen Weg abkürzen. Sie kann direkt chemische Stoffe in elektrischen Strom umwandeln, oder umgekehrt mit Hilfe von elektrischem Strom chemische Verbindungen spalten.

## Energiespeicher

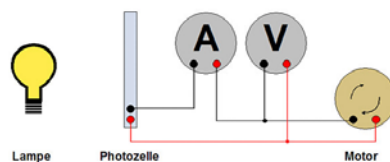


Abb. 3: Schaltschema zum Experiment 1

Probiert es selbst aus: schließt eine Solarzelle an einen Motor an und beleuchtet die Solarzelle. Misst Strom und Spannung. Wie lange dreht sich der Motor nach dem Abschalten des Lichtes?

Wiederholt das Experiment, nachdem ihr eine Brennstoffzelle parallel zum Motor angeschlossen habt. Was ist der Unterschied? Was schließt ihr daraus?

## Wie funktioniert eine Brennstoffzelle?

Wie ihr im Experiment gesehen habt, kann eine Brennstoffzelle im Prinzip in

beide Richtungen betrieben werden. In der Praxis verwendet man für Elektrolyseur und Brennstoffzelle unterschiedliche Materialien.



Abb. 4: Bauteile einer einfachen Brennstoffzelle

Ein wesentlicher Bauteil unserer Brennstoffzelle ist eine Membran aus Nafion<sup>1</sup> (in Abb. 4 in der Mitte, in Abb. 5 gelb), die die beiden Flüssigkeitskammern trennt. An beiden Seiten liegt eine Katalysatorschicht an (in Abb. 4 das schwarze Gewebe aus Kohlefasern, Abb. 4 grau). Als Katalysator verwendet man Platin oder Vanadium. Über Elektroden (in Abb. 4 an den Bohrungen zu erkennen) werden die elektrischen Kontakte hergestellt.

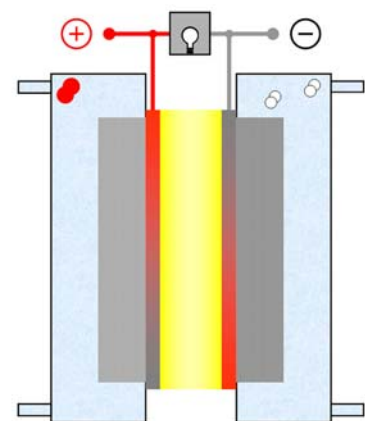
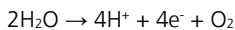


Abb. 5: Schematische Aufbau einer Brennstoffzelle

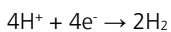
<sup>1</sup> Tetrafluorethylen-Polymer (PTFE), eine Modifikation des Teflon

## Spaltung von Wasser in einem Elektrolyseur

Durch den Katalysator wird schon bei Zimmertemperatur Wasser in seine Bestandteile gespalten. An der Anode entstehen aus 2 Wassermolekülen 4 Protonen, 4 Elektronen und molekularer Sauerstoff:

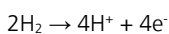


Der Sauerstoff entweicht in die Luft oder kann aufgefangen werden. Die Protonen können die Nafionmembran passieren und wandern zur Kathode. Die Elektronen müssen durch Anlegen einer Spannung auf die andere Seite gebracht werden: Ein Elektrolyseur verbraucht elektrischen Strom. Wenn die 4 Elektronen die Kathode erreicht haben, entsteht dort molekularer Wasserstoff, der aufgefangen wird:

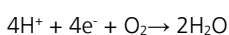


## Reaktionen in einer Brennstoffzelle

In der Brennstoffzelle laufen die Reaktionen genau umgekehrt ab. An der Anode wird katalytisch Wasserstoff gespalten:



Die Protonen diffundieren durch die Membran, die Elektronen wandern jedoch aufgrund des Spannungsgefälles „freiwillig“ zur Kathode, man kann dem System elektrische Leistung entnehmen. An der Kathode vereinigen sich Protonen, Elektronen und der katalytisch gesplante Sauerstoff aus der Luft zu Wasser:



## Vergleich von Wirkungsgraden

Im zweiten Experiment sollt ihr die Wirkungsgrade verschiedener Geräte messen und vergleichen:

Wir erzeugen mit Hilfe einer starken Halogenlampe Licht, das durch eine Solarzelle in Strom umgewandelt wird. Die Lichtenergie, die an der Solarzelle ankommt wird gemessen.

Misst Spannung und Strom der Solarzelle, die den Elektrolyseur speist.

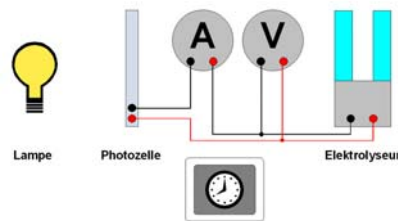


Abb. 6: Verschaltungsschema des Experiments zur Messung von Wirkungsgraden

Bestimmt die Menge an Wasserstoff und Sauerstoff, die der Elektrolyseur innerhalb einer festgelegten Zeit erzeugt.

Verwendet das ausgeteilte Arbeitsblatt und berechnet die Wirkungsgrade der einzelnen Geräte und der Gesamtanlage.

Ist unsere Methode zur Herstellung von Wasserstoff wirtschaftlich? Warum? Was sollte geändert werden?

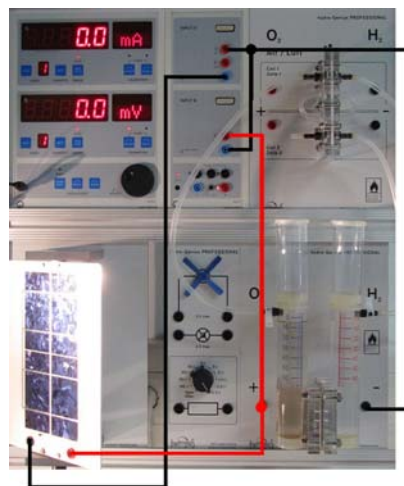


Abb. 7: Demonstrationsanlage, verschaltet entsprechend Abb. 6.

## Anwendungen

Erste Anwendungen fanden Brennstoffzellen in der Raumfahrt. Seit mehr als 40 Jahren werden sie eingesetzt, um Strom, Wärme und Wasser zu erzeugen.

Für irdische Anwendungen sind wir aber von der Serienreife noch entfernt. Vor allem das Problem der Speicherung von Wasserstoff (in Druckflaschen verflüssigt oder als Metallhydrid) ist noch nicht zufriedenstellen gelöst.

Über Brennstoffzellen elektrisch angetriebene Autos fahren immerhin schon. Seit Juli 2004 sind in Hamburg drei Linienbusse mit Brennstoffzellenantrieb unterwegs.



Abb. 8: HH2-Projekt in Hamburg: Mit Hilfe von Brennstoffzellen angetriebener Bus

In Flugzeugen werden Brennstoffzellen inzwischen – wie in der Raumfahrt – für die Erzeugung von Bordstrom eingesetzt. Der anfallende Wasserdampf wird kondensiert und kann im Küchen- oder Sanitärbereich des Flugzeugs verwendet werden.

2008 stellte das DLR mit ANTARES das erste von Brennstoffzellen angetriebene Flugzeug vor (s. Titelbild und Abb. 9).



Abb. 9: ANTARES an der Wasserstofftankstelle

Wasserstoffantrieb für Notebooks ist zwar noch Zukunftsmusik, aber einen mobilen kleinen Stromlieferanten „Mobile-Pack“ als Alternative zum Dieselmotor hat das Institut für Technische

Thermodynamik des DLR bereits zur Serienreife entwickelt.



Mobiles Brennstoffzellensystem „MobilE-Pack“

## Definitionen

Spannung (U), [V]

Strom (I), [A]

elektrische Leistung (P)

$$P = U \cdot I, [W] = [VA]$$

Energie (E)

$$E = P \cdot t, [J] = [Ws]$$

Brennwert von Wasserstoffgas:

$$11,92J/ml$$

## Webseiten

<http://www.dlr.de/tt/>

[http://www.dlr.de/tt/desktopdefault.aspx/tabid-2882/4338\\_read-6451/](http://www.dlr.de/tt/desktopdefault.aspx/tabid-2882/4338_read-6451/)

[http://www.dlr.de/desktopdefault.aspx/tabid-777419\\_read-12190/](http://www.dlr.de/desktopdefault.aspx/tabid-777419_read-12190/)

<http://www.lange-aviation.com/>

## Das DLR im Überblick

Das DLR ist das nationale Forschungszentrum der Bundesrepublik Deutschland für Luft- und Raumfahrt. Seine umfangreichen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten in Luftfahrt, Raumfahrt, Verkehr und Energie sind in nationale und internationale Kooperationen eingebunden. Über die eigene Forschung hinaus ist das DLR als Raumfahrt-Agentur im Auftrag der Bundesregierung für die Planung und Umsetzung der deutschen Raumfahrtaktivitäten sowie für die internationale Interessenswahrnehmung zuständig. Das DLR fungiert als Dachorganisation für den national größten Projektträger.

In den dreizehn Standorten Köln (Sitz des Vorstandes), Berlin, Bonn, Braunschweig, Bremen, Göttingen, Hamburg, Lampoldshausen, Neustrelitz, Oberpfaffenhofen, Stuttgart, Trauen und Weilheim beschäftigt das DLR circa 6.000 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter. Das DLR unterhält Büros in Brüssel, Paris und Washington D.C.



**Deutsches Zentrum  
DLR für Luft- und Raumfahrt e.V.**  
in der Helmholtz-Gemeinschaft

### DLR\_School\_Lab Köln

Linder Höhe  
51147 Köln  
Leitung: Dr. Richard Bräucker  
Telefon: 02203 601-3093  
Telefax: 02203 601-13093  
E-Mail: [schoollab-koeln@dlr.de](mailto:schoollab-koeln@dlr.de)  
[www.schoollab.DLR.de/koeln](http://www.schoollab.DLR.de/koeln)