

## 1080707 Chemischer Energie-Träger-Stromkreis nach Prof. Dieter Plappert, Freiburg i.Br.

### 1. Eigenschaften

In einem kumulativ aufgebauten Physikunterricht spielen wenige grundlegende Konzepte eine zentrale Rolle, die in möglichst vielen Bereichen angewandt werden können. Wie in [1], [2] und [3] ausführlich beschrieben sind hierfür das „Energie-Träger-Konzept“ (Anhang 1) und das „Strom-Antrieb-Konzept“ (Anhang 2) geeignet. Mithilfe des neu konzipierten „chemischen Energie-Träger-Stromkreis“ gelingt es den Schülerinnen und Schülern durch diese Konzepte auf Anhieb, entscheidende Verbindungen zwischen der Physik und der Chemie zu finden. Dieser Stromkreis kann als bildhaftes Beispiel für die vielen lokalen und globalen Stoffkreisläufe stehen, die in Biologie, Chemie und Geographie mit Energietransporten verbunden sind.

### 2. Aufbau

Beim vorhandenen Energie-Träger-Stromkreis (108.0700) wurde der hydraulische Stromkreis (Pumpe, Wassergenerator, Schläuche) (Abb.1) entfernt und durch das auch separat erhältliche Modul „Chemischer Energie-Träger-Stromkreis“ (108.0705) ersetzt, das aus Elektrolyseur (1), Brennstoffzelle (2) und Schläuchen besteht. Die Bezeichnungen  $H_2$  und  $O_2$  auf Elektrolyseur und Brennstoffzelle müssen beim Anschließen der Schläuche beachtet werden. Dabei ist darauf zu achten, dass die Schläuche an keiner Stelle geknickt sind! Mithilfe des dritten Schlauchs wird der „chemische Stromkreis“ geschlossen; dazu wird der  $H_2O$ -Ausgang der Sauerstoffseite der Brennstoffzelle mit dem für diesen Schlauch vorgesehenen Anschluss des Elektrolyseurs verbunden.

**Anmerkung:** Auf diesen Rückleitungsschlauch könnte verzichtet werden, da das in der Brennstoffzelle gebildete Wasser als Gas entsteht und die umgesetzten Stoffmengen sehr gering sind. Aus didaktischen Gründen ist diese

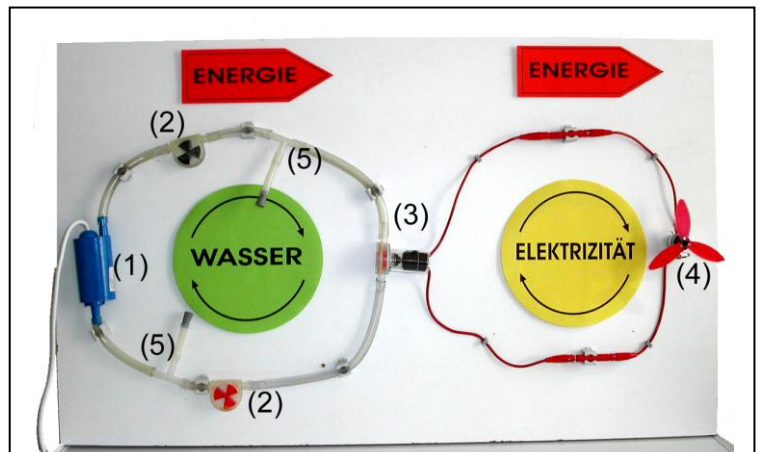


Abb. 1: hydraulischer Energie-Träger-Stromkreis

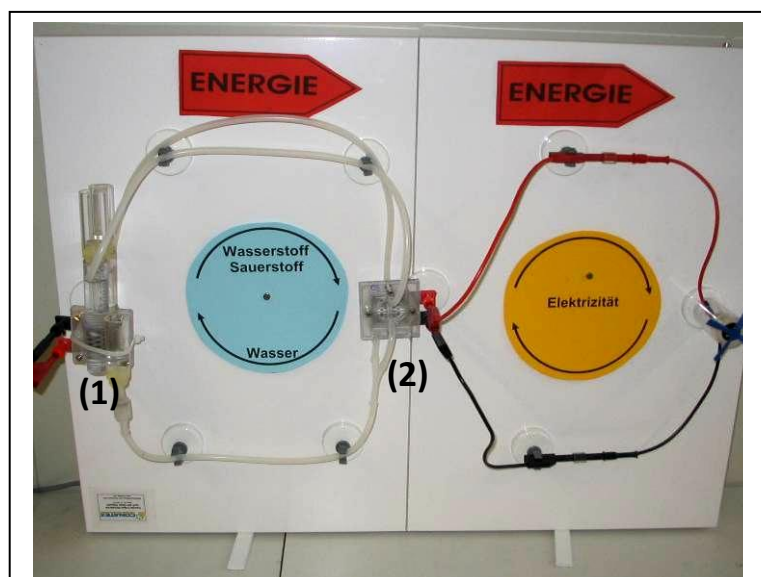


Abb. 2: chemischer Energie-Träger-Stromkreis

Chemischer Energie-Träger-Stromkreis – Best.-Nr.1080707

Rückleitung jedoch von großer Bedeutung: die Schülerinnen und Schüler können so bildhaft den chemischen Energietransport im Gesamtsystem erkennen und verinnerlichen. Wie beim Wasserstrom und beim elektrischen Strom liegt auch hier ein geschlossener „Stromkreis“, ein geschlossenes System vor.

**Anmerkung:**

- Der nicht benötigte hydraulische Energie-Träger-Stromkreis kann mit den überzähligen Haltemagneten auf der Rückseite der Metallaufbauwand „gelagert“ werden.

**3. Inbetriebnahme**

In den Elektrolyseur destilliertes Wasser bis zur Nullmarke füllen.

Der Elektrolyseur kann mit einem Netzgerät (möglichst stromstabilisiert,  $I_{max} = 0,5 A$ ), einem Handgenerator ([100.8012](#)) oder einer Solarzelle ([108.0728](#)) betrieben werden.

Bei der Verwendung von Netzgerät und Handgenerator dauert es etwa eine Minute bis das Schlauchsystem mit den neu gebildeten Gasen gefüllt ist und der Propeller sich zu drehen beginnt. Bei Betrieb mit der Solarzelle dauert dies je nach Lichteinfall erheblich länger. Es kann sinnvoll sein, das Schlauchsystem vor dem Einsatz der Solarzelle mit Handgenerator oder Netzgerät vorzubereiten.

Bitte die Sicherheitshinweise in der speziellen Bedienungsanleitung von Elektrolyseur und Brennstoffzelle beachten:

[http://www.conatex.com/mediapool/betriebsanleitungen/BAD\\_1008164.pdf](http://www.conatex.com/mediapool/betriebsanleitungen/BAD_1008164.pdf)



**Anmerkung:**

- Der Elektrolyseur kann mit destilliertem Wasser gefüllt bleiben. Es können jedoch im Laufe der Zeit hässliche Trocknungsränder entstehen.

#### 4. Energie und Energieträger

**Voraussetzungen:** Im Physikunterricht wurde ein allgemeiner Energiebegriff eingeführt: immer wenn sich etwas bewegt, wenn etwas geheizt wird, ... wird Energie benötigt, die Energie kommt immer irgendwo her, geht immer irgendwo hin. Außerdem wurden z.B. mithilfe des hydraulischen Energie-Träger-Stromkreises (Abb. 1) die Begriffe **Energie und Energieträger** differenziert und die zentralen Regeln formuliert:

- Energie kann nicht alleine strömen. Bei Energietransporten strömt immer etwas Zweites mit, das bildhaft als „Energieträger“ bezeichnet werden kann.
- Energie und Träger können immer dann klar voneinander unterschieden werden, wenn sie **verschiedene Wege** nehmen:

Das Drehen des Propellers zeigt beim Energie-Träger-Stromkreis (Abb. 1) an, dass Energie übertragen wird, dass Energie vom Netzgerät zur Pumpe (1), zum Wassergenerator (3), zum Elektromotor (4) strömt. Von der Pumpe strömt die Energie mit dem Wasser bzw. mit dem Wasserstrom bis zum Wassergenerator, vom Wassergenerator dann mit der Elektrizität bzw. dem elektrischen Strom zum Lüfter. Für das Wasser bzw. die Elektrizität werden jeweils zwei Verbindungen (Schläuche bzw. Kabel) benötigt; Wasser und Elektrizität strömen im *Kreis*. Wasser und Elektrizität nehmen also einen *anderen Weg* als die Energie. Wasser und Elektrizität haben die Aufgabe eines „Energieträgers“: das Wasser wird in der Pumpe mit Energie beladen, es trägt die Energie zur „Turbine“ des Wassergenerators. Dort wird die Energie vom Wasser auf Elektrizität umgeladen. Das Wasser strömt zur Pumpe zurück, um dort von neuem mit Energie beladen zu werden. Entsprechend strömt die Energie vom Wassergenerator mit der Elektrizität zum Elektromotor des Lüfters... Weitere Ausführungen sind in [1] und in der Betriebsanleitung zum hydraulischen Energie-Träger-Stromkreis zu finden.

**Leitfrage:** „Wie findet beim chemischen Energie-Träger-Stromkreis der Energietransport zwischen Elektrolyseur und Brennstoffzelle statt?“

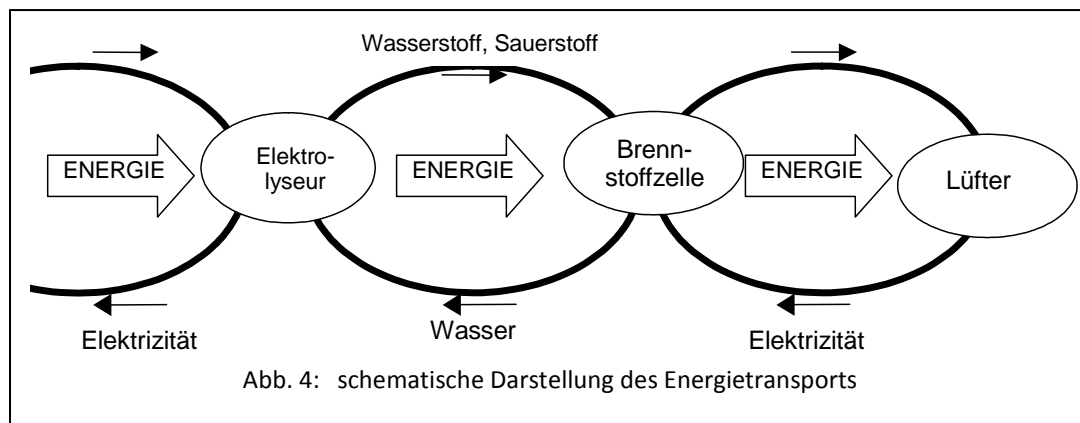
Der Elektrolyseur (1) in Abbildung 2 wird so lange betrieben, bis sich der Propeller deutlich dreht. Das Drehen des Propellers zeigt an, dass dort Energie ankommt. Die Energie kann nur vom Elektrolyseur kommen, der wiederum von einem Netzgerät, einem Handgenerator oder einer Solarzelle angetrieben wird. Somit ist der **Weg des Energiestroms** identifiziert: vom Netzgerät bzw. Handgenerator bzw. Solarzelle zum Elektrolyseur, zur Brennstoffzelle zum „Lüfter“.

Zwischen Elektrolyseur und Brennstoffzelle wird der Energiestrom von stofflichen Strömen begleitet: im Elektrolyseur wird Wasserstoffgas und Sauerstoffgas gebildet. Bei dieser chemischen Reaktion verschwindet Wasser. Die im Elektrolyseur gebildeten Gase strömen durch die zwei getrennten Schläuche zur Brennstoffzelle. Dort findet die umgekehrte chemische Reaktion statt: Wasserstoffgas und Sauerstoffgas verschwinden, Wasser wird gebildet. Bei der chemischen Reaktion im Elektrolyseur wird die Energie aufgenommen. Bei der Umkehrreaktion in der Brennstoffzelle wird diese Energie wieder abgegeben, auf Elektrizität bzw. elektrischen Strom umgeladen und zum Lüfter transportiert. Bei diesem chemischen Energietransport strömt der Energieträger in einem geschlossenen Stromkreis:

Chemischer Energie-Träger-Stromkreis – Best.-Nr.1080707

Wasserstoff und Sauerstoff werden aus Wasser im Elektrolyseur gebildet, strömen zur Brennstoffzelle, bilden Wasser, das zum Elektrolyseur zurückströmt. Diese Stoffströme spielen beim chemischen Energietransport dieselbe Rolle wie Elektrizität und Wasser beim hydraulischen und elektrischen Energietransport: sie transportieren Energie von einer Stelle zu einer anderen, sie haben die Funktion eines „Energieträgers“.

Durch Handbewegungen können die unterschiedlichen Wege von Energie („linear“) und des Energieträgers („im Kreis“) anschaulich verdeutlicht werden. Pfeile, die mit den beiliegenden Haftmagneten befestigt werden können, symbolisieren diese unterschiedlichen Wege.



### Quantitative Untersuchung:

Mithilfe des Mesura Energiemessgeräts ([202.2022](#)) kann die vom Elektrolyseur aufgenommene (Abb. 5) und von der Brennstoffzelle abgegebene Energiestromstärke (Leistung; Wattzahl) gemessen werden und der Wirkungsgrad dieser „Energieübertragung“ quantitativ ermittelt werden.

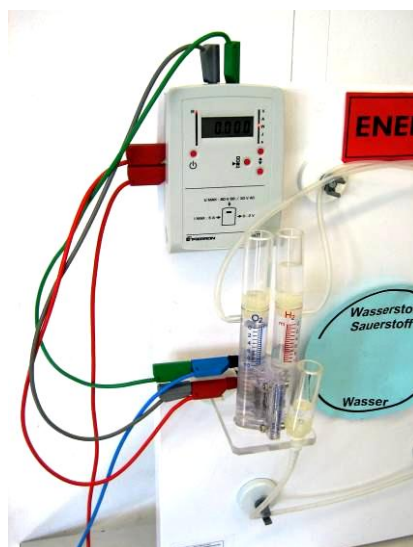
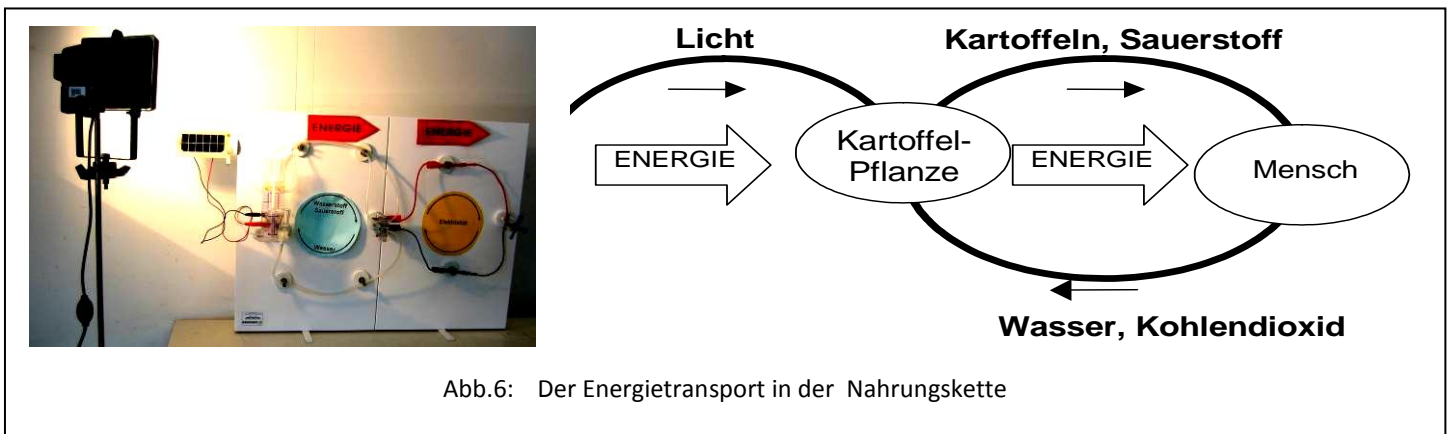


Abb. 5: quantitative Untersuchungen mit dem Energiemessgerät.



## 5. Chemische Energietransporte in biologischen und geografischen Systemen - „regenerativer Energieträger“

Der chemische Energie-Träger-Stromkreis kann im Unterricht für die Schülerinnen und Schüler ein grundlegendes Beispiel für die Vielzahl der Stoffkreisläufe werden, die in Natur und Technik mit Energietransporten verbunden sind. Abbildung 6 zeigt vereinfacht den Nahrungskreislauf des Menschen. Die Solarzelle steht im Experiment anstelle des Blatts (Photosynthese). Da der Stoffkreislauf vollständig geschlossen ist, liegt hier einen „regenerativen Energietransport“ vor. Da in der Technik nur das Wasserstoffgas in Leitungen transportiert wird, wird Wasserstoff als „regenerativer Energieträger“ bezeichnet.



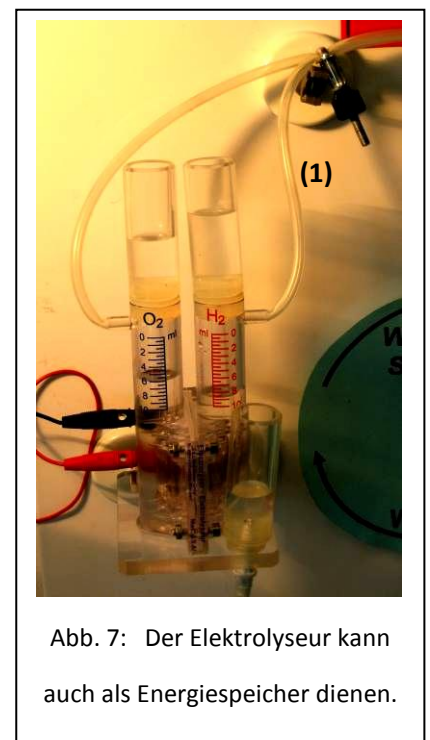
## 6. Wasserstoff als Energiespeicher

**Leitfrage:** Wie kann mithilfe von Wasserstoff Energie gespeichert werden?

Der chemische Energie-Träger-Stromkreis wird von einer Solarzelle ([108.0728](#)) angetrieben. Durch eine Schlauchklemme (1) in Abbildung 7 werden beide Zuleitungsschläuche zwischen Elektrolyseur und Brennstoffzelle unterbrochen. Im Elektrolyseur werden die gebildeten Gase gespeichert; das verdrängte Wasser sammelt sich im Überlaufbehälter an. Nach Entfernen der Schlauchklemme, kann der Lüfter auch bei Dunkelheit betrieben werden. Der Gasspeicher des Elektrolyseurs dient hier als Energiespeicher.

### Quantitative Untersuchung:

Mithilfe des Mesura Energiemessgeräts ([202.2022](#)) kann die vom Elektrolyseur aufgenommene und von der Brennstoffzelle abgegebene Energiemenge gemessen werden und quantitativ der Wirkungsgrad dieses „Energiespeichers“ ermittelt werden.



## 7. Systemdenken

**Leitfrage:** In einer Anzeige finden wir einen Text, dessen Aussage mithilfe unseres chemischen Energie-Träger-Stromkreises beurteilt werden soll. „Experten aus der Chemie- und Automobilindustrie optimieren Brennstoffzellen, die Autos nur noch mit Wasserstoff antreiben. Das ist eines von zahlreichen Beispielen, wie die Chemie hilft, alternative Energiequellen zu erschließen. Damit werden wir alle unabhängiger von Öl und Gas.“ (GEO 04/2006 Seite 39).

Wasserstoffgas kommt in der Natur nicht in großen Mengen vor. Der chemische Energie-Träger-Stromkreis verdeutlicht, dass Wasserstoff mithilfe einer chemischen Reaktion nur unter Energiezugabe erzeugt werden kann. Die entscheidende Frage lautet deshalb, woher diese Energie kommt, welche Energiequellen diese Energie liefern. Von daher ist die Aussage, dass Wasserstoff hilft alternative Energiequellen zu erschließen, dass wir durch Wasserstoff unabhängiger von Öl und Gas werden, so nicht richtig, obwohl Wasserstoff ein „regenerativer Energieträger“ ist.

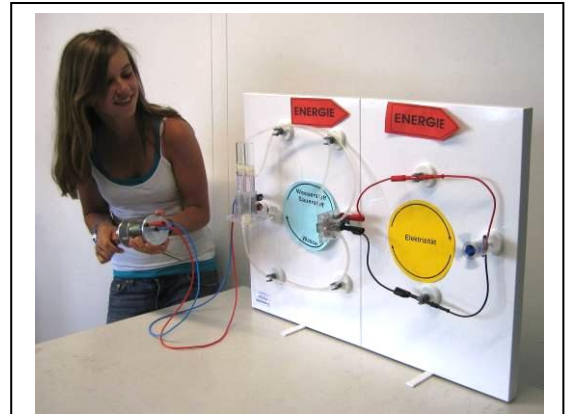


Abb. 8: entscheidend ist, „wer kurbelt“, d.h. wer die Energie für den chemischen Energietransport liefert!

## 8. Das chemische Potenzial

Bei allen im Physikunterricht behandelten Energieträgern haben wir physikalische Größen kennen gelernt, mit deren Hilfe wir erkennen konnten, wie viel Energie ein Träger transportiert (z.B. Druck  $p$  und elektrisches Potenzial  $\varphi$ ) bzw. durch deren Differenz wir angeben konnten, wie viel Energie in einem System auf- bzw. abgeladen wird (z.B. Druckdifferenz  $\Delta p$  und elektrische Potenzialdifferenz  $\Delta\varphi$ , die der elektrischen Spannung  $U$  entspricht.). Auch bei den chemischen Energietransporten gibt es eine analoge Größe. Diese wird von Physikern oft *chemisches Potenzial*  $\mu$  und von Chemikern *molare freie Standardbildungsenthalpie* genannt. Die Maßeinheit dieser Größe ist wie zu erwarten J/mol. Die Werte dieser Größe sind in Tabellenwerken [4], [5], [6] zu finden. Dabei ist zu beachten, dass das chemische Potenzial von Stoffen, die bei Normalbedingungen stabil vorkommen, üblicherweise Null gesetzt wird.

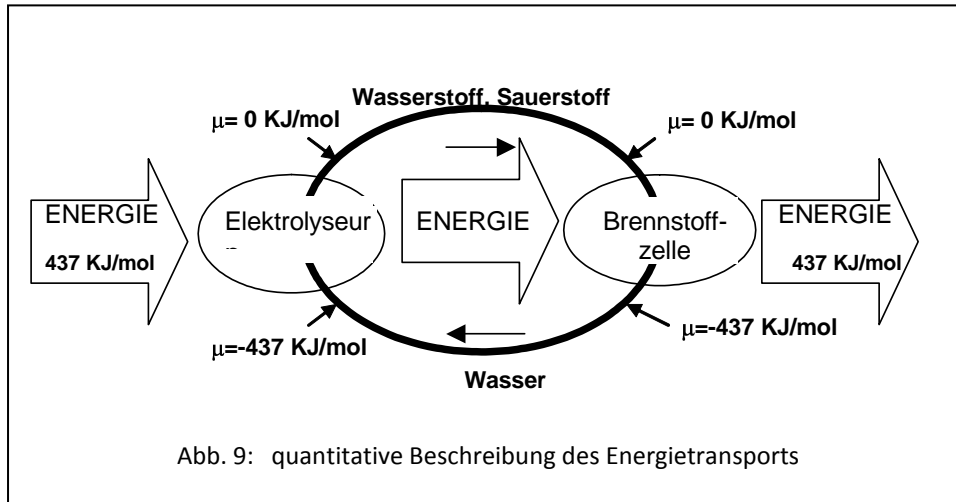
Die Energetik der chemischen Reaktion in der Brennstoffzelle sei hier exemplarisch quantitativ dargestellt.

- Alle an der Reaktion beteiligten Stoffe müssen quantitativ berücksichtigt werden: Bei der vollständig ablaufenden Reaktion ergeben 2 mol Wasserstoff und 1 mol Sauerstoff 2 mol Wasser und umgekehrt.
- Das chemische Potenzial des „beladenen Energieträgers“ beträgt:  

$$\mu(\text{Ausgangsstoffe}) = 2 \cdot \mu(\text{Wasserstoff}) + \mu(\text{Sauerstoff}) = 2 \cdot 0 \text{ kJ/mol} + 0 \text{ kJ/mol} = 0 \text{ kJ/mol}$$
 Alle Stoffe liegen unter Normalbedingungen vor.
- Das chemische Potenzial des „entladenen Energieträgers“ beträgt:  

$$\mu(\text{Endstoffe}) = 2 \cdot \mu(\text{Wasser}) = 2 \cdot (-237,18) \text{ kJ/mol} = -474,36 \text{ kJ/mol}$$
- Die *Differenz* des chemischen Potenzials  $\Delta \mu$  der Ausgangs- und Endstoffe gibt nun an, wie viel Energie an der Brennstoffzelle auf Elektrizität umgeladen werden kann:  

$$\Delta \mu = \mu(\text{Ausgangsstoffe}) - \mu(\text{Endstoffe}) = 474,36 \text{ kJ/mol}$$



**Anmerkung:**

- Durch diese Art der Beschreibung bekommt die in der Chemie gebräuchliche „molare freie Standardenthalpie“ die sehr anschauliche Bedeutung eines „Energiebeladungsmaßes“. Die Differenz  $\Delta \mu$  gibt bei einer chemischen Reaktion an, wie viel Energie zum Umladen auf andere Energieträger „zur freien Verfügung“ steht bzw. wie viel Energie zum Antrieb der chemischen Energie von Außen durch andere Energieträger geliefert werden muss.

## 9. Ausblick: Der Antrieb chemischer Reaktionen

**Leitfrage:** Was treibt eine chemischen Reaktionen an?

In einem Unterricht, in dem die Analogien zwischen den einzelnen Gebieten im Zentrum stehen, liegt es nahe zu frage, ob wie die Druckdifferenz  $\Delta p$  und elektrische Potenzialdifferenz  $\Delta \varphi$  bzw. die elektrische Spannung  $U$  die Differenz des chemischen Potentials  $\Delta \mu$  auch die Rolle des Antriebs einer chemischen Reaktionen spielen kann, ob das im Physikunterricht behandelte Strom-Antrieb-Konzept (Anhang 2) auch auf chemische Reaktionen übertragen werden kann.

Am Beispiel der chemischen Reaktionen beim chemischen Energie-Träger-Stromkreises kann verdeutlicht werden, dass die Reaktion nur vom „*hohen zum tiefen chemischen Potenzial*“ freiwillig, d.h. unter Energieabgabe abläuft und dass für die Umkehrreaktion, die von „*tiefem zu hohem chemischen Potenzial verläuft*“, Energie von Außen zugeführt werden muss. Die Übertragung des Strom-Antrieb-Widerstand-Konzepts auf chemische Reaktionen ist in [6] ausführlich dargestellt.

Es werden **zwei Leitungen** benötigt, damit die an der chemischen Reaktion beteiligten Stoffe hin und zurück fließen kann.

(„Stoffkreislauf“)

Die Umsatzrate  $I_n = \text{Stoffmenge} / \text{Zeit}$  ist in Elektrolyseur und Brennstoffzelle gleich.

Die **Differenz des chemischen Potentials**  $\Delta \mu$  gibt an, wie stark und in welche Richtung die chemische Reaktion **angetrieben** wird.

Der „**Strom-Antrieb-Zusammenhang**“ eines Systems kann durch eine Kennlinie beschrieben werden. Je größer der **Reaktions-Widerstand** des Systems ist, desto größer muss die chemische Spannung  $\Delta \mu$  sein, um eine Umsatzrate der Stärke  $I_n$  zu bewirken.

Abb. 10: Das Strom-Antrieb-Konzept in der

Chemie

## 10. Weiterführende Experimente

Mit dem chemischen Energie-Träger-Stromkreis können viele weiterführende Experimente durchgeführt werden:

- Aufnahmen der Kennlinie von Elektrolyseur und Brennstoffzelle
- Faraday-Gesetze
- Reaktionsgeschwindigkeit...

In dem Kursprogramm für die Sekundarstufe I und II „Wasserstofftechnologie und Brennstoffzellen“ ([100.8163](#)) sind hierzu auf 350 Seiten sehr viele Anregungen zu finden.

## 11. Literatur:

- [1] Dieter Plappert: Verständliche Elektrizitätslehre, Praxis der Naturwissenschaften Physik 7/52, Oktober 2003
- [2] Dieter Plappert: Kumulatives Lernen - die Bildung des Entropiebegriffs in Sekundarstufe I, Praxis der Naturwissenschaften Physik 4/53, Juni 2004
- [3] Dieter Plappert: Umsetzungsbeispiele zu den Bildungsstandards Physik, Leuheft Ph 38.2, Stuttgart 2004. Zu beziehen bei Landesinstitut für Schulentwicklung Rotebühlstr. 131, 70197 Stuttgart, Fax: 0711/6642-102



- [4] Formelsammlung, Patec Verlag Berlin
- [5] unter [www.job-stiftung.de/](http://www.job-stiftung.de/) ist eine Tabelle mit dem chemischen Potenzial von 1300 Stoffen zu finden.
- [6] Seitz, Steinbrenner, Zachmann, LS-heft NW2, Stuttgart 2006. Zu beziehen bei Landesinstitut für Schulentwicklung Rotebühlstr. 131, 70197 Stuttgart, Fax: 0711/6642-102
- [7] Seitz, Steinbrenner, Zachmann: Chemische Reaktionen-physikalisch beschrieben, Praxis der Naturwissenschaften Physik 2/55, März 2006
- [8] Dieter Plappert: physikalische Konzepte angewandt auf chemische Reaktionen, Praxis der Naturwissenschaften Physik 3/54, April 2005

Anhang1 :

### Das „Energie-Träger-Konzept“

Energie strömt nie allein, bzw. wird nie allein ausgetauscht, sondern immer mit einer zweiten physikalischen Größe zusammen. Diese zweite Größe kennzeichnet die „äußere Erscheinungsform“ des Energietransports. Um die Energie klar von den begleitenden Größen zu unterscheiden, wurde der in Abbildung 1 dargestellte Versuchsaufbau ([108.0700](#)) entwickelt, durch den die Schülerinnen und Schüler diesen Unterschied bildhaft erleben können: Eine mit einem Netzgerät verbundene Pumpe (1) treibt Wasser an, das Wasser einen „Wassergenerator“ (3) und dieser einen elektrischer „Lüfter“ (4). Da ein Propeller zum Antrieb Energie benötigt, kann der „Weg“ der Energie zurückverfolgt werden: sie kommt vom „Wassergenerator“, von der Pumpe, vom Netzgerät bzw. von einem Kraftwerk,.... Die Energie ist das, was durch alle Stationen hindurch geht. Dies wird durch die Energiepfeile symbolisiert (Abb. 2). Auf diese Weise wird der „Erhaltungsaspekt“ der Energie betont. Das Wasser und die Elektrizität nehmen dagegen *andere Wege*: sie strömen im Kreis. Deshalb werden zwischen Pumpe und Turbine *zwei* Schläuche, zwischen Generator und Lüfter *zwei* Kabel benötigt. Dass die Energie und die zweite am Energietransport beteiligte physikalische Größe *unterschiedliche Wege* nehmen, ist ein entscheidendes Kriterium, durch das wir die Energie von den sie begleitenden Größen unterscheiden können. Die Tatsache, dass Energie nie alleine strömen kann, sondern immer zusammen mit einer zweiten Größe strömen muss, können wir durch

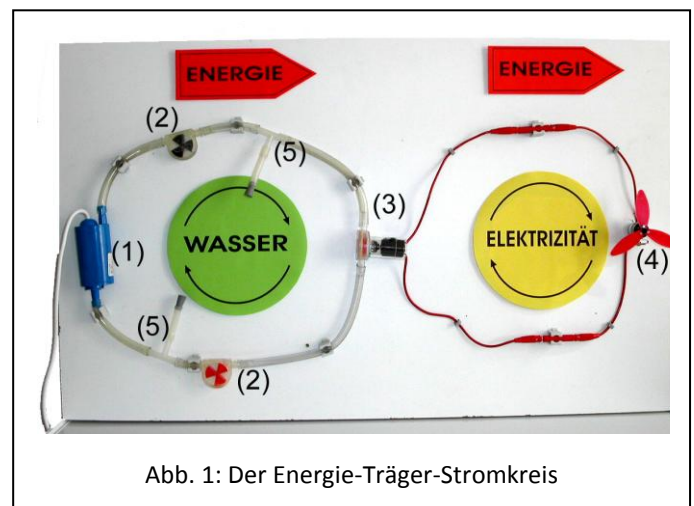


Abb. 1: Der Energie-Träger-Stromkreis

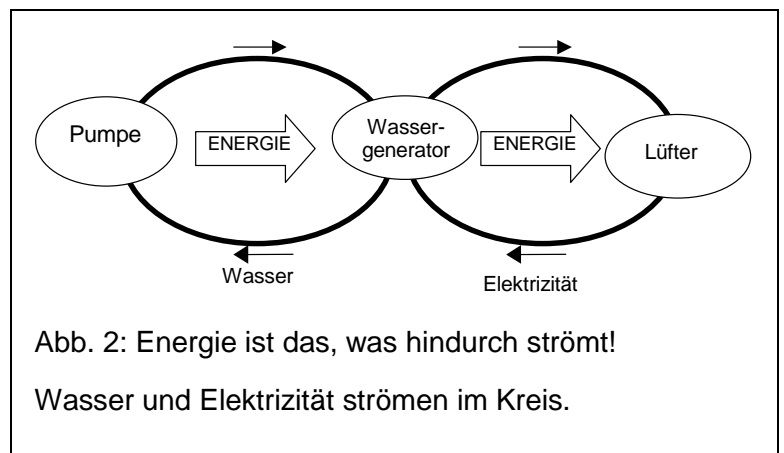


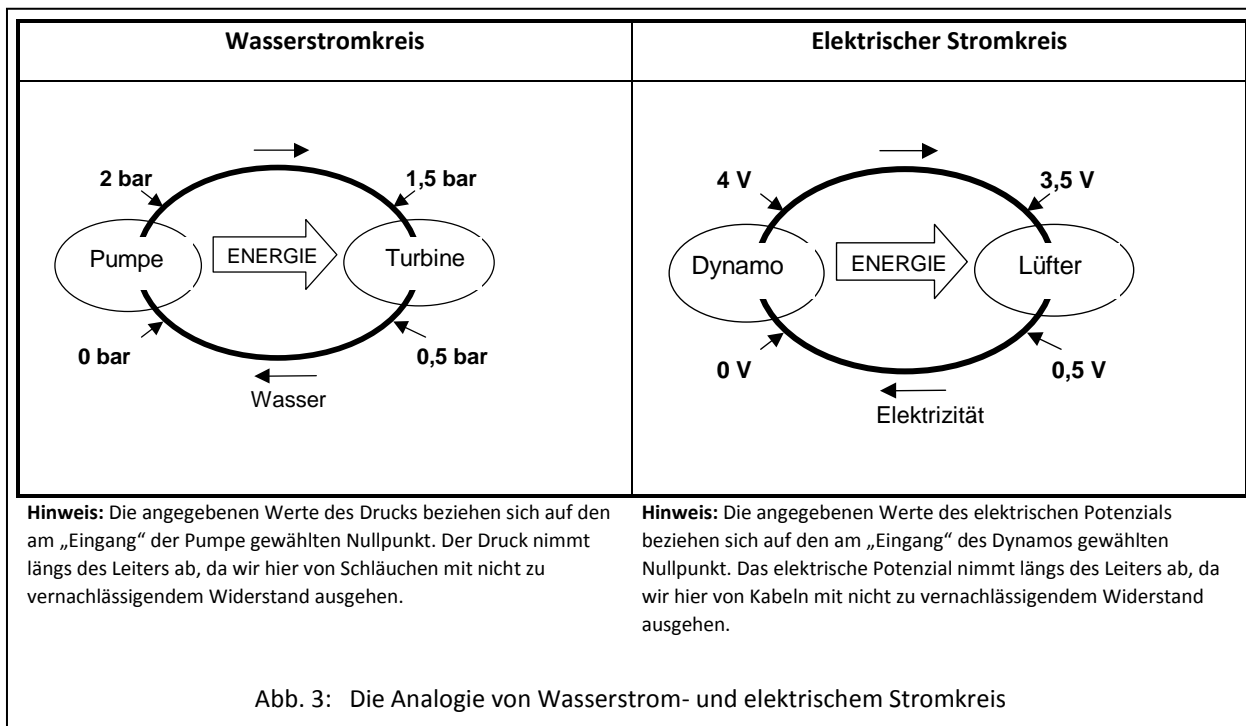
Abb. 2: Energie ist das, was hindurch strömt!

Wasser und Elektrizität strömen im Kreis.

Chemischer Energie-Träger-Stromkreis – Best.-Nr.1080707

das „Energie-Träger-Bild“ verbildlichen. Die zweite physikalische Größe hat die Aufgabe eines „Energieträgers“: in der Pumpe wird Energie auf den Energieträger Wasser, im Generator auf den Energieträger Elektrizität geladen. Das Wasser bzw. die Elektrizität transportieren die Energie zum Wassergenerator bzw. zum Lüfter. Dort wird sie auf einen nächsten Energieträger „umgeladen“. Das Wasser bzw. die Elektrizität strömen durch die zweite Verbindung zurück, um von Neuem mit Energie beladen zu werden.

Fragen wie: „Worin unterscheidet sich eigentlich das Wasser in Abbildung 1 vor und nach dem Wassergenerator?“ „Worin unterscheidet sich die Elektrizität vor und nach dem Lüfter?“ führen zu den Begriffen „Druck  $p$ “ und „elektrisches Potenzial  $\varphi$ “. Beide physikalische Größen haben eine analoge Bedeutung: sie geben an, wie viel Energie von dem jeweiligen Energieträger transportiert wird. Ihre Differenz  $\Delta p$  bzw.  $\Delta\varphi$  gibt an, wie viel Energie in einem System vom Wasser bzw. von der Elektrizität aufgeladen, bzw. abgeladen wird. In der angegebenen Literatur wird ausführlich dargelegt, wie diese im Anfängerunterricht bildhaft eingeführten Konzepte im weiterführenden Unterricht immer weiter geschärft und präzisiert werden können. In Abbildung 3 und 4 ist das Energie-Träger-Konzept übersichtsartig zusammengefasst.

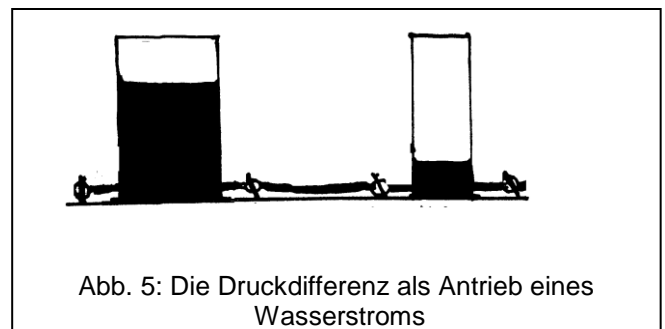


Wasserstromkreis	Elektrischer Stromkreis
Es strömt Energie von der Pumpe zur Turbine.	Es strömt Energie vom Dynamo zum Motor.
Das Wasser ist der Energieträger.	Die Elektrizität ist der Energieträger
Die Pumpe belädt das Wasser mit Energie.	Der Dynamo belädt die Elektrizität mit Energie
Die Turbine lädt Energie vom Wasser ab.	Der Motor lädt Energie von der Elektrizität ab.
Die <b>Druckdifferenz <math>\Delta p</math></b> gibt an, wie viel Energie in einem Umlader auf bzw. vom Wasser abgeladen wird.	Die <b>Differenz des el. Potentials <math>\Delta \varphi = U</math> (el. Spannung)</b> gibt an, wie viel Energie in einem Umlader auf bzw. von der Elektrizität abgeladen wird.
Die <b>Energiestromgleichung <math>I_E = \Delta p \cdot I_W</math></b> gibt die <b>Stärke des Energiestroms</b> an, der in einem Umlader mit einem Wasserstrom verbunden bzw. von einem Wasserstrom getrennt wird.	Die <b>Energiestromgleichung <math>I_E = U \cdot I_Q</math></b> gibt die <b>Stärke des Energiestroms</b> an, der in einem Umlader mit einem elektrischen Strom verbunden bzw. von einem elektrischen Strom getrennt wird.

Abb. 4: Das Energie-Träger-Konzept

## Anhang 2: Das Strom – Antrieb – Konzept

Öffnen wir den Hahn im Schlauch (Abb. 5), der die zwei wassergefüllten Gefäße miteinander verbindet, beginnt das Wasser zu strömen. Wie lange strömt das Wasser von dem einen Behälter [4] in den anderen? Intuitiv ist für alle Schülerinnen und Schülern klar, dass das Wasser strömt, solange es eine Druckdifferenz  $\Delta p$  gibt. Die Frage ist nur: hängt der Wasserdruck von der Höhe oder vom Volumen der Wassersäule ab. Der Versuch zeigt dann, dass die Höhendifferenz  $\Delta h$  ein Maß für die den Wasserstrom antreibende Druckdifferenz  $\Delta p$  ist [1].



Auf diese Weise bekommt die Druckdifferenz die Rolle des „Antriebs“ bzw. der „Ursache“ der Strömung. In Abbildung 6 ist das Strom-Antrieb-Konzept übersichtsartig zusammengefasst.

Chemischer Energie-Träger-Stromkreis – Best.-Nr.1080707

Das „Energie-Träger-Konzept“ und das „Strom-Antrieb-Konzept“ sind miteinander verbunden: die meisten Ströme fließen nicht widerstandsfrei, sondern sie benötigen wegen des „*Strömungswiderstandes*“ Energie zum Strömen, also einen Antrieb. Nur Supraströme fließen ohne Antrieb.

Wasserstromkreis	Elektrischer Stromkreis
Es werden <b>zwei Leitungen</b> benötigt, damit das Wasser hin und zurück fließen kann. („Wasserstromkreis“)	Es werden <b>zwei Leitungen</b> benötigt, damit die Elektrizität hin und zurück fließen kann. („elektr. Stromkreis“)
Die <b>Wasserstromstärke <math>I_w = \text{Menge} / \text{Zeit}</math></b> ist im unverzweigten Stromkreises an jeder Stelle gleich.	Die <b>el. Stromstärke <math>I_Q = \text{Elektrizitätsmenge} / \text{Zeit}</math></b> ist im unverzweigten Stromkreises an jeder Stelle gleich.
Die <b>Druckdifferenz <math>\Delta p</math></b> gibt an, wie stark der Wasserstrom <b>angetrieben</b> wird.	Die <b>Differenz des el. Potentials <math>\Delta\phi = U</math> (el. Spannung)</b> gibt an, wie stark der el. Strom <b>angetrieben</b> wird.
Der „ <b>Strom-Antrieb-Zusammenhang</b> “ eines Systems kann durch eine Kennlinie beschrieben werden. Je größer der <b>hydraulische Widerstand</b> des Systems ist, desto größer muss die Druckdifferenz $\Delta p$ sein, um einen Wasserstrom der Stärke $I_w$ zu bewirken.	Der „ <b>Strom-Antrieb-Zusammenhang</b> “ eines Systems kann durch eine Kennlinie beschrieben werden. Je größer der <b>elektrische Widerstand</b> des Systems ist, desto größer muss die elektrische Spannung $U$ sein, um einen elektrischen Strom der Stärke $I$ zu bewirken.

Abb. 6: Das Strom-Antrieb-Konzept

### Anlage 3: Kopiervorlage

Kopieren Sie die abgebildeten Pfeile auf Karton, schneiden Sie diese aus und befestigen Sie diese mit den beiliegenden Magneten auf der Metalltafel.