

zahl der Elementarreaktionen pro Sekunde: die Anzahl der Kerne, die zerfallen sind, oder die gebildet worden sind. Wir führen das Becquerel ein und es gilt:

$$1 \text{ mol/s} = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ Bq.}$$

Oft möchte man eine chemische Reaktion beschleunigen, man möchte die Umsatzrate vergrößern. Man kann das mit zwei verschiedenen Methoden erreichen:

- durch Erhöhen der Temperatur;
- durch Zugabe eines Katalysators (eines Stoffs, dessen Menge sich beim Reaktionsablauf nicht ändert).

Genauso kann man nun bei Kernreaktionen verfahren.

Kernreaktionen lassen sich wie chemische Reaktionen beschleunigen durch

- *Temperaturerhöhung;*
- *Verwendung eines Katalysators.*

Um die Umsatzrate durch Temperaturerhöhung merklich zu vergrößern, braucht man allerdings Temperaturen, die um etwa einen Faktor eine Million höher sind, als die Temperaturen, die in der normalen Chemie wirksam sind. Die Energieproduktion in der Sonne und in anderen Sternen funktioniert über Kernreaktionen. Die Temperatur im Innern der Sonne beträgt etwa 15 Millionen Kelvin. Für eine Kernreaktion ist das allerdings noch eine recht niedrige Temperatur. Ein anderes Beispiel für die Erhöhung der Umsatzrate mithilfe hoher Temperaturen ist der Fusionsreaktor. Hier heizt man die Edukte auf eine Temperatur von etwa 100 Millionen Kelvin.

Die katalytische Beschleunigung einer Kernreaktion geschieht ebenfalls in der Sonne. Als Katalysator wirken hier Kohlenstoffkerne. Auch die Uranspaltung, die man in Kernreaktoren ausnutzt, würde unter normalen Umständen viel zu langsam laufen. Sie wird im Reaktor katalytisch beschleunigt. Als Katalysator wirken hier Neutronen.

4.7 Die Sonne

Es folgt unsere wichtigste Anwendung. Diese wurde schon an anderer Stelle beschrieben [4, 5].

4.8 Der Kernreaktor

Auch dem Kernreaktor wird recht viel Zeit gewidmet. Wir machen hier nur einige kurze Bemerkungen.

Eine Reaktion, bei der Uran-235 unter Energieabgabe zerfällt, hatten wir schon kennen gelernt:



Wir hatten auch schon gelernt, dass die Reaktion einen sehr hohen Reaktionswiderstand hat, und von selbst praktisch nicht abläuft. Nun lässt sich die Reaktion besonders bequem katalytisch beschleunigen, nämlich mit Neutronen. Eine Besonderheit dieser Reaktion besteht nun darin, dass der Katalysator bei der Reaktion selbst entsteht. Die Chemiker nennen eine solche Reaktion eine autokatalytische Reaktion.

Literatur

- [1] *Friedrich Herrmann*: Kernreaktionen und Radioaktivität, Altlasten der Physik, AULIS Verlag Deubner, Köln, 2002, S. 215.
 [2] *Friedrich Herrmann*: Der Karlsruher Physikkurs, Ein Lehrbuch für den Unterricht der Sekundarstufe I, AULIS Verlag Deubner, Köln, 1998.
 [3] ((Aufsatz Steinbrenner etc. in diesem Heft))
 [4] *H. Hauptmann* und *F. Herrmann*: Das Thema „Sonne“ im Physikunterricht, MNU 50 (1997), S. 239.
 [5] *F. Herrmann* und *H. Hauptmann*: Understanding the stability of stars by means of thought experiments with a model star, Am. J. Phys. 65 (1997), p. 292-295.

Anschrift der Verfasser:

Prof. Dr. *Friedrich Herrmann*, Dr. *Holger Hauptmann*, Abteilung für Didaktik der Physik, Universität, 76128 Karlsruhe

What comes down must go up

M. Pohlig

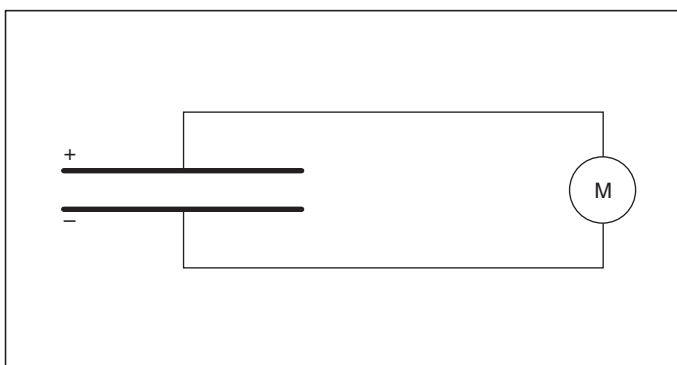


Abb. 1: Elektrizität fließt freiwillig von Stellen höheren zu Stellen niedrigeren Potentials.

1 Ein Kondensator als Energiequelle

Seit es im Handel billige Kondensatoren großer Kapazität ($C > 1 \text{ F}$) gibt, ist es leicht, im Unterricht Kondensatoren als Energiespeicher zu demonstrieren. Kleine Lampen oder Motoren lassen sich eine Minute oder länger betreiben, bevor ein solcher Kondensator leer ist und wieder neu geladen werden muss.

Beim Entladen des Kondensators wird die Energie mit Elektrizität¹⁾ transportiert. Diese strömt freiwillig von Stellen

¹⁾ Mit Elektrizität ist immer positive elektrische Ladung gemeint. Es wird Wert darauf gelegt, dass zwischen Elektrizität, also elektrischer Ladung, und dem Ladungsträger unterschieden wird.

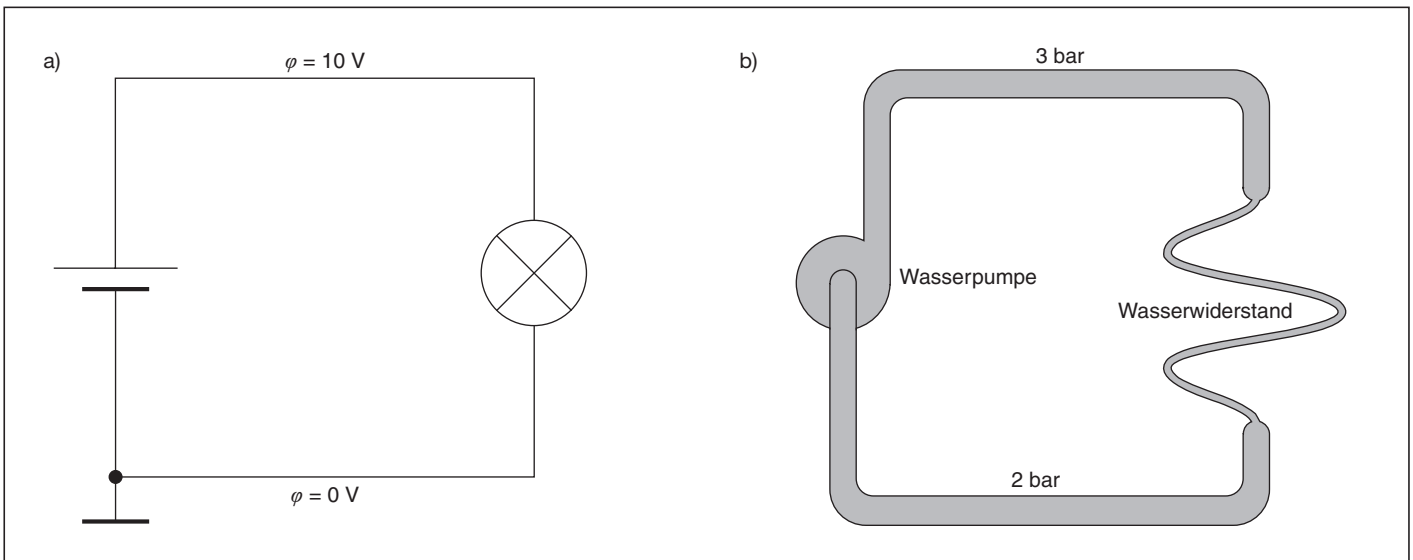


Abb. 2: Elektrischer Stromkreis mit einem Lämpchen als Widerstand (a) und (b) Wasserstromkreis mit einer Rohrverengung als Widerstand

len höheren zu Stellen niedrigeren elektrischen Potentials (Abb. 1), also von der oberen Kondensatorplatte durch den Motor zu der unteren Platte. Mit der dadurch bedingten Abnahme der elektrischen Ladung auf den Platten gleicht sich aber auch der Potentialunterschied zwischen ihnen aus, der Antrieb für die Elektrizität verschwindet und der elektrische Strom kommt schließlich zum Erliegen.

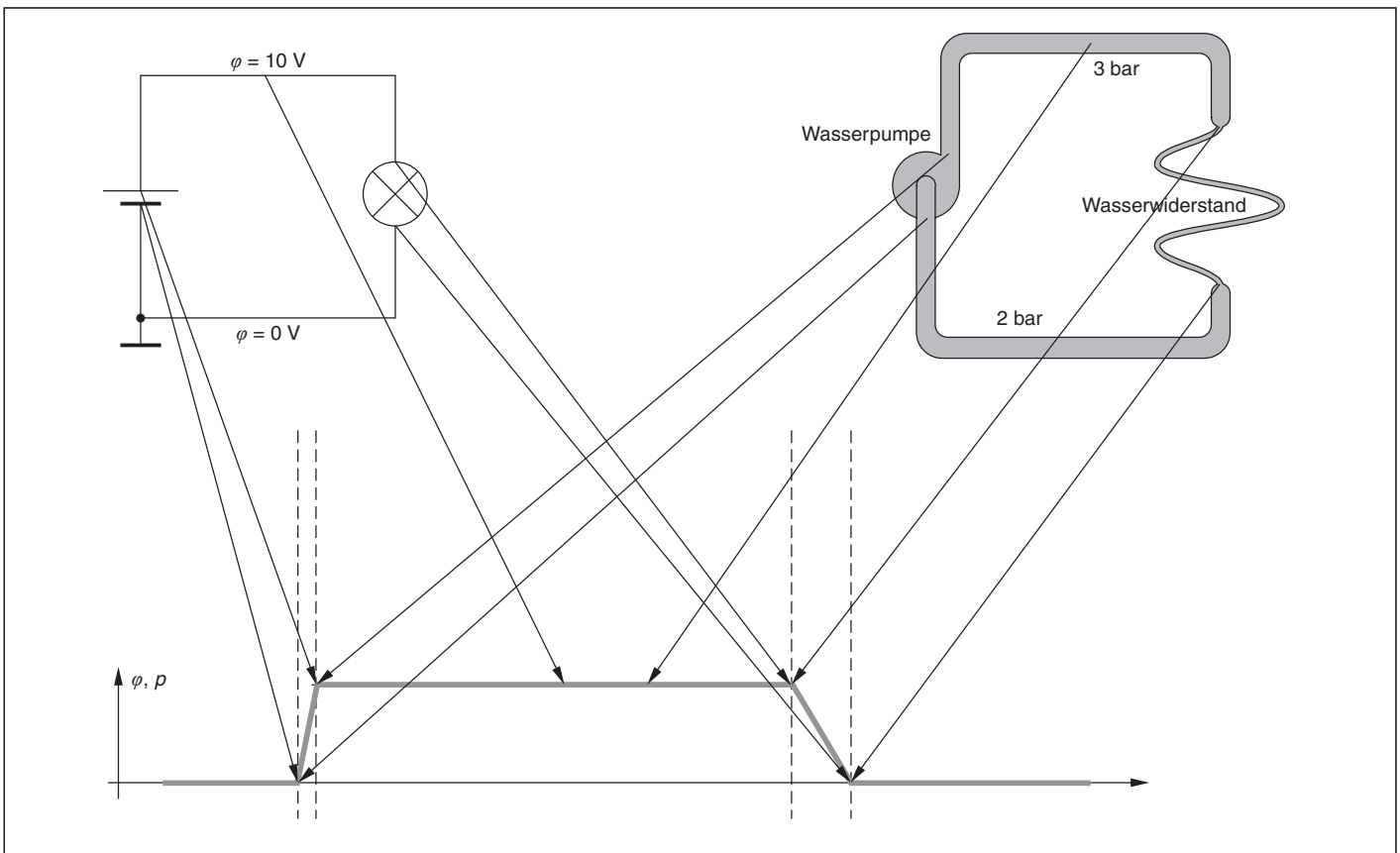
Abb. 2a und Abb. 2b veranschaulichen die Analogien zwischen einem elektrischen Stromkreis und einem Wasserstromkreis. Die Wasserpumpe entspricht der elektrischen Energiequelle, die Schikane, also die Rohrverengung, dem elektrischen Widerstand, die Rohrleitungen mit großem Querschnitt den elektrischen Leitungen.

Dem höheren elektrischen Potential, in unserem Beispiel 10 Volt, entspricht der höhere Wasserdruck von 3 bar in der oberen Wasserleitung, in der das Wasser von der Pumpe zur Rohrverengung fließt. Im Lämpchen sinkt das elektrische Potential von 10 V am Eingang auf 0 Volt am Ausgang²⁾. Entsprechend sinkt der Druck in der Schikane von 3 bar auf 2 bar³⁾. Fassen wir zusammen: Beginnend beim Ausgang der Pumpe fließt das Wasser auf seinem Weg durch die Rohrverengung und zurück zum Eingang der Pumpe einen Druckberg hinunter. Und analog gilt für

²⁾Die Hin- und Rückleitungen sollen keinen elektrischen Widerstand haben.

³⁾Die hin- und rückführenden Leitungsrohre sollen keinen Widerstand haben.

Abb. 3: What comes down must go up



den elektrischen Stromkreis: Beginnend beim Ausgang der elektrischen Energiequelle fließt die Elektrizität auf ihrem Weg durch den Widerstand zurück zum Eingang der elektrischen Energiequelle einen Potenzialberg hinunter.

Damit das Wasser kontinuierlich weiterströmen kann, muss es in der Pumpe den Druckberg wieder nach oben strömen. What comes down must go up. Entsprechendes gilt für die elektrische Energiequelle, Elektrizität muss in der ihr den Potenzialberg hinauf transportiert werden, den sie außerhalb der Energiequelle wieder herunterfließt.

Wenden wir uns noch einmal unserem Kondensator zu. Auch ihn könnten wir kontinuierlich betreiben, wenn es uns gelänge, Elektrizität auf dem kurzen Weg, also von der unteren Platte direkt zur oberen Platte zu transportieren; der Kondensator bliebe dann immer gleich geladen. Einen solchen, doch schon exotisch anmutenden Kondensator bietet uns die Natur.

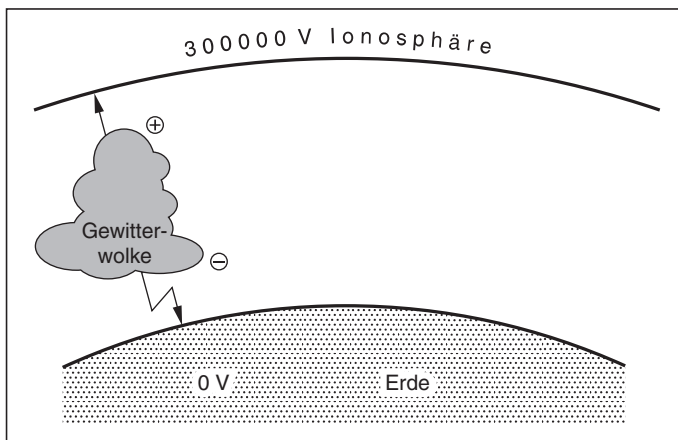
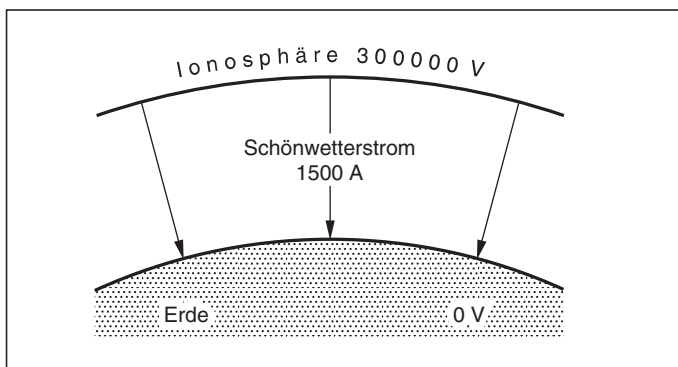


Abb. 4 (oben): Erdoberfläche und Ionosphäre bilden einen großen Kugelkondensator.

Abb. 5 (Mitte): Gewitterwolke als Pumpe für Elektrizität von niedrigem zu höherem elektrischem Potenzial

Abb. 6 (unten): Blitz zwischen Gewitterwolke und Ionosphäre, Quelle: <http://elf.gi.alaska.edu>

2 Gewitter

Die Ionosphäre beginnt in ca. 50 km Höhe. Sie ist elektrisch leitfähig und gegenüber der Erdoberfläche auf einem um 300 000 Volt höheren elektrischen Potenzial. Ionosphäre und Erdoberfläche wirken wie die „Platten“ eines riesigen Kugelkondensators (Abb. 4).

Die Erdatmosphäre hat einen elektrischen Widerstand von ca. 200 Ω, sodass sich dieser Kondensator mit einem Schönwetterstrom von ca. 1500 A wieder entlädt⁴⁾. Nach etwa 30 min wäre der Kondensator leer. Die Tatsache also, dass sich die Ionosphäre auf hohem elektrischem Potenzial befindet, legt es nahe, nach einem Mechanismus zu suchen, der diesen Kugelkondensator kontinuierlich auflädt. Ihn finden wir im Gewitter, genauer in der Thermik der Gewitterwolken.

In den Gewitterwolken, die bei uns eine Höhe von 12 km erreichen können, kommt es zu turbulenten Auf- und Abwinden. Große, elektrisch negativ geladene Teilchen, wie große Wassertropfen, Graupel oder Hagel sinken nach unten, die leichteren positiv geladenen Teilchen bewegen sich nach oben. Dies führt dazu, dass das elektrische Potenzial der obersten Schichten in den Gewitterwolken auf bis zu 10 000 000 Volt ansteigt. Entsprechend liegen die unteren Schichten auf einem elektrischen Potenzial von -10 000 000 Volt. Zwischen Gewitterwolke und Ionosphäre strömt infolge des elektrischen Potenzialunterschieds in gigantischen Blitzen Elektrizität in die Ionosphäre (Abb. 6). Der große Abstand zwischen Gewitterwolke und Ionosphäre wird durch die höhere Leitfähigkeit in dieser Höhe kompensiert. Auch zwischen unterer Schicht der Gewitterwolke und Erdoberfläche ist der elektrische Potenzialunterschied Antrieb für elektrische Ströme in Form von Blitzen. Hier ist die elektrische Leitfähigkeit gering, dafür sind aber die Abstände auch kleiner.

Der elektrische Stromkreis wird durch die Blitze geschlossen. Das in dieser Pumpe wirkende Prinzip wollen wir verallgemeinern und auf andere elektrische Energiequellen anwenden.

3 What comes down must go up

In einem Stromkreis fließt elektrische Ladung nie allein. Sie ist immer an Ladungsträger gebunden. In metallischen Drähten sind es die Elektronen. Außerhalb einer Energiequelle bewegt sich ein Elektron, weil ein elektrisches Feld an seiner Ladung zieht. Es bewegt sich dabei so, dass (positive) elektrische Ladung den elektrischen Potenzialberg herunterströmt (what comes down ...). In der elektrischen Energiequelle nützt man nun aus, dass ein Ladungsträger neben der elektrischen Ladung auch andere mengenartige Größen besitzt, über die ebenfalls an den Ladungsträgern gezogen werden kann. So besitzt ein Ladungsträger neben der elektrischen Ladung auch Masse, Entropie, Stoffmenge usw. Tab. 1 zeigt einen Auszug von mengenartigen Größen, deren Werte für einen Ladungsträger von null verschieden sein können, und die dazugehörigen Potenziale, die für den Antrieb verantwortlich sind.

Die Reihe in Tab. 1 ließe sich fortsetzen. Im Fall der Gewitterwolke waren die Ladungsträger Wassertropfen,

⁴⁾Die Stromdichte ist allerdings nur $9 \cdot 10^{-12} \text{ A/m}^2$ und damit nicht spürbar.

An wem wird gezogen?	Zugehöriges Potenzial	Wer zieht? – Gradient
Q	φ	des elektrischen Potentials
m	$gh^{5)}$	des Gravitationspotentials
S	T	der Temperatur
n	μ	des chemischen Potentials

Tab. 1: Wer zieht am Ladungsträger?

Graupel und Hagel. In der Gewitterwolke und damit lokal begrenzt, ziehen an diesen Ladungsträgern Gravitationsfeld und andere Antriebe, die wir hier, der Einfachheit halber, kurz Thermik nennen wollen.

Wir haben damit eine Regel gefunden, die elektrische Energiequellen wie „chemische Brennstoffzelle“, „Thermoelement“ und „Photozelle“ einheitlich zu beschreiben erlaubt. Die Regel heißt:

In einer elektrischen Energiequelle nutzt man den Antrieb für eine andere mengenartige Größe des Ladungsträgers.

Dieser zweite Antrieb darf nur auf einem Teil des geschlossenen Weges des elektrischen Ladungsträgers wirksam werden, dort nämlich, wo der Ladungsträger auf seinem Weg im Stromkreis den elektrischen Potenzialberg hinauf muss (...must go up), also innerhalb der Energiequelle. Das für den zweiten Antrieb verantwortliche Potenzial (Gravitationspotenzial, Temperatur, chemisches Potenzial) hat in der Energiequelle ein Gefälle. Würde nun dieses zweite Potenzial entlang des ganzen Stromkreises wirken, wäre der gewünschte Effekt zunichte, denn auch für das zweite Potenzial gilt: what comes down must go up. Außerhalb der Energiequelle würde der Ladungsträger also einen Berg für das zweite Potenzial hinauf laufen müssen.

4 Wasserstoff-Druckzelle

Dieser Abschnitt beschreibt die Funktionsweise der Wasserstoff-Druckzelle (WDZ). Diese Zelle wird nicht gebaut, aber als Vorstufe zur (Wasserstoff) Brennstoffzelle macht sie vieles klar.

In der WDZ nützen wir als zweiten und lokalen Antrieb den chemischen Potenzialunterschied aus.

Die Verbindung zwischen den beiden Wasserstoffbehältern besteht aus drei Schichten, zwei äußeren Platinschichten und einer mittleren, dritten Schicht, einem Elektrolyten (Abbn. 7 und 8). In den beiden Platinschichten dissoziiert der Wasserstoff der angrenzenden Behälter zu Protonen und Elektronen. Wegen der unterschiedlichen Wasserstoffkonzentrationen sind die chemischen Potentiale von Protonen und Elektronen in der linken Platinschicht größer als in der rechten. Wir haben einen Antrieb für Protonen und Elektronen von der linken zur rechten Platinschicht. Der Elektrolyt zwischen den beiden ist ein selektiver Leiter, leitfähig für Protonen, aber undurchlässig für Elektronen. Wir verbinden beide Platinschichten mit einem Kupferdraht. Auch er ist ein selektiver Leiter, undurchlässig für Protonen aber leitend für Elektronen. Der Stromkreis ist geschlossen. Denn Elektrizität fließt von der rechten Platinschicht durch den Motor zur linken Platinschicht und damit den elektrischen Potenzialberg hinunter;

⁵⁾ Gilt nur im homogenen Feld.

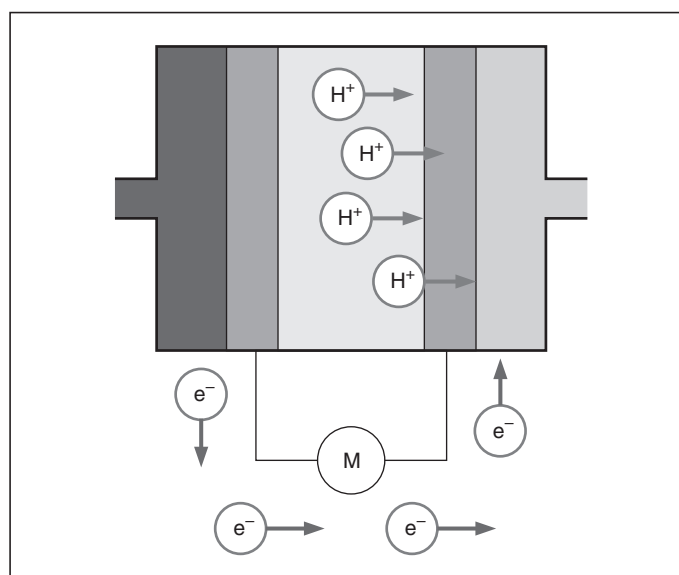
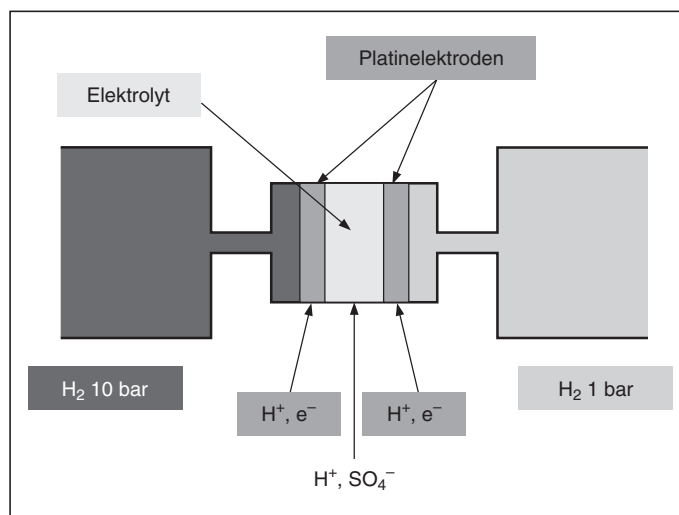


Abb. 7 (oben): Wasserstoff-Druckzelle

Abb. 8 (unten): Die Verbindung zwischen den Behältern

den elektrischen Potenzialberg hinauf fließt die Elektrizität an den Ladungsträger Protonen gebunden, deren Antrieb das unterschiedliche chemische Potenzial der Protonen in der linken und rechten Platinschicht ist.

Setzen wir den elektrischen Strom durch den Motor in Analogie zum Schönwetterstrom durch die Atmosphäre (vgl. die Abschnitte 2 und 3), so übernimmt der Elektrolyt die Rolle der Gewitterwolke.

5 Wasserstoff-Brennstoffzelle

Mit nur wenigen Veränderungen machen wir aus der WDZ eine Wasserstoff-Brennstoffzelle.

Wir ersetzen auf der linken Seite der WDZ den Wasserstoff hohen Drucks durch Wasserstoff mit Umgebungsdruck, also ca. 1 bar. Auf der rechten Seite haben wir zunächst keinen Wasserstoff, sondern Sauerstoff. Ankommender Wasserstoff reagiert mit dem Sauerstoff. Der Partialdruck des Wasserstoffs auf der rechten Seite, des Wasserstoffs also, der noch nicht reagiert hat, bleibt damit immer weit unter 1 bar und der gewünschte Antrieb für den Wasserstoff vom linken zum rechten Behälter bleibt

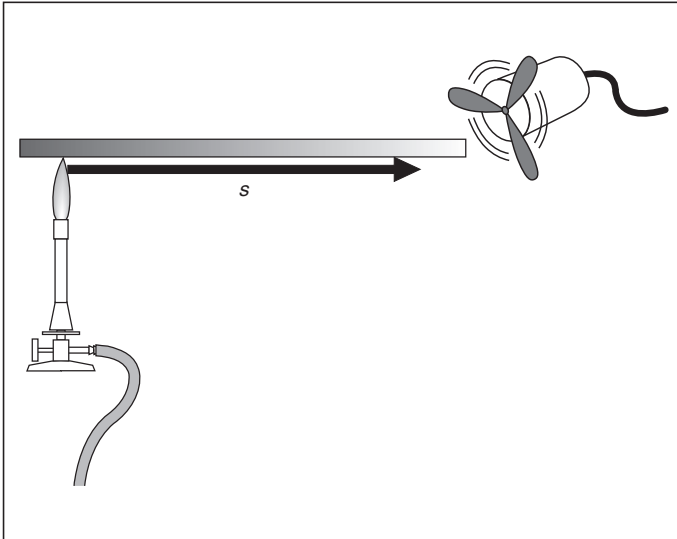


Abb. 9: Entropie strömt von links nach rechts und nimmt dabei auch Elektrizität mit.

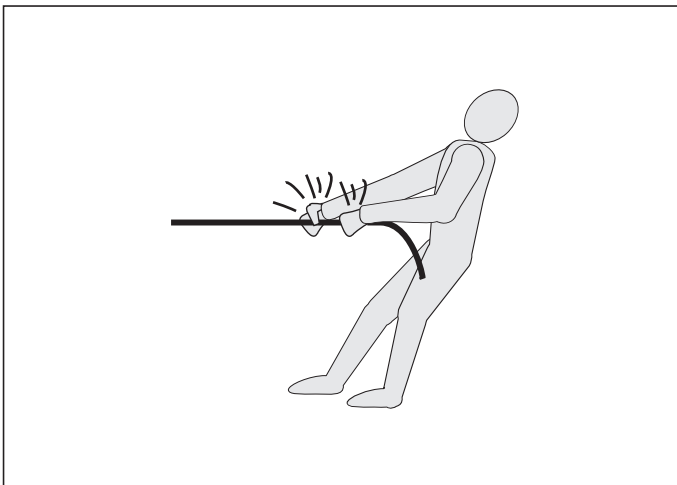
erhalten. Die Reaktion des Wasserstoffs mit dem Sauerstoff geschieht bei Umgebungstemperatur. Bei dieser Temperatur ist der Reaktionswiderstand normalerweise sehr groß, aber das Platin wirkt für diese Reaktion als Katalysator. Als Elektrolyt wird eine PEM (Polymer-Elektrolyt-Membran) - Folie benutzt, eine Kunststoffolie, die, wie ihr englischer Name PEM (Proton Exchange Membran) verrät, ein selektiver Leiter für Protonen ist.

6 Thermoelement

In der Brennstoffzelle war der Ladungstransport in der Energiequelle an einen Stoffmengentransport (Protonen) gekoppelt. Angetrieben wurde dieser Stoffmengentransport von einem Konzentrationsgefälle (chemische Potenzialdifferenz). Im nächsten Beispiel wollen wir einen Ladungstransport betrachten, der in der Energiequelle an einen Entropietransport gekoppelt ist, also von einem Temperaturgefälle angetrieben wird.

Abb. 9 zeigt, wie einem Metallstück, z.B. Eisendraht, am linken Ende Entropie zugeführt wird. Die Entropie strömt

Abb. 10: Die Kopplung zwischen Entropiestrom und Elektronenstrom ist vergleichbar dem Ziehen an einem Seil, wobei das Seil etwas durch die Hände rutscht, sich also nur ein bisschen bewegt. Die Geschwindigkeit der ziehenden Hand ist deshalb größer als die des Seilstücks.



wegen des Temperaturgefälles nach rechts. An diesen Entropiestrom ist ein Elektronenstrom gekoppelt. Diese Kopplung ist schwach und wir dürfen sie uns vorstellen wie die Kopplung zwischen einem Seil und den rutschigen Händen einer Person, die das Seil zu ziehen versucht (Abb. 10). Das Seil rutscht nicht vollständig durch die Hände, sondern wird zumindest etwas gezogen. Mit den an die Entropie gekoppelten Elektronen strömt auch Elektrizität. Dem rechten Ende des Eisendrahts wird die ankommende Entropie durch Kühlung entzogen. Damit bleibt die Temperaturdifferenz erhalten und die Entropie sowie der an sie gekoppelte Elektronenstrom kann, zumindest auf den ersten Blick, aufrechterhalten werden.

Tatsächlich kommt der Elektrizitätsstrom zum Erliegen, denn am rechten Ende des Drahtes werden Elektronen angehäuft und am linken Ende kommt es zu einem Elektronenmangel. Das hat ein nach rechts gerichtetes elektrisches Feld zur Folge, das den Elektronenstrom hemmt, der schließlich zum Erliegen kommt. Man könnte auf die Idee kommen, den Elektronenstau dadurch zu verhindern, dass man einen zweiten Eisendraht als Rückleitung anbringt. Aber auch auf diesem Wege sind die Elektronen an Entropie gekoppelt und die Entropie müsste gegen den Temperaturberg anlaufen. Der Temperaturgradient würde auch durch diese Leitung einen Elektronenstrom von links nach rechts antreiben. Abb. 11 veranschaulicht die Situation.

Verwenden wir für Rückleitung aber einen Leiter, bei dem die Kopplung der Elektronen an die Entropie weniger stark ist (in Kupfer z. B. ist die Kopplung an die Elektronen um den Faktor 10 kleiner als in Eisen) ist das Problem gelöst.

Literatur

- [1] G. Falk u. W. Ruppel: Elektrische Vorgänge und Reaktionen; in G. Falk u. F. Herrmann (Hrsg.): Konzepte eines zeitgemäßen Physikunterrichts Heft 4, Schroedel 1981.
- [2] F. Herrmann (Hrsg.): Karlsruher Physikkurs SII Band 3: Thermodynamik, Aulis 2004

Anschrift des Verfassers:

StD Michael Pohlig, Wilhelm-Hausenstein-Gymnasium, Weißenburger Str. 42, 76448 Durmersheim

Abb. 11: Das Seil rutscht bei beiden Personen gleich stark durch die Hände. Das Seil kann sich erst dann bewegen, wenn bei einer der beiden Personen das Seil weniger durchrutscht als bei der anderen, die ihre Hände z. B. eingefettet hat.

