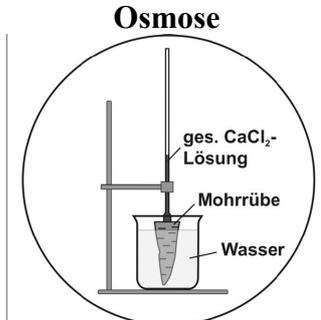


Arbeitsblatt: Denken in Analogien – Warum bringt Salz Eis zum Schmelzen?

Idee: Zwei Phänomene des Zirkels „Auftausalz“ sollen mit zentralen Konzepten des Physikunterrichts verbunden, d. h. verstanden werden¹. Dabei soll die Kompetenz „Strukturen erkennen und Analogien hilfreich einsetzen“ (BS-Physik Kl. 10) im Blickpunkt stehen.

1. Phänomene und Leitfragen



Je höher die Salzkonzentration ist, desto mehr Wasser strömt in die Möhre, desto höher steigt das Wasser in der Möhre.

Abb. 1: Wer treibt das Wasser in die Höhe?

Salz bringt Eis zum Schmelzen



Je höher die Salzkonzentration ist, desto mehr Eis schmilzt, desto tiefer sinkt die Schmelz-(Gefrier-)Temperatur

Abb. 2: Wer treibt das Eis zum Schmelzen an?

2. Das Strom-Antrieb-Konzept

Im Physikunterricht lernen die Schüler das Strom-Antrieb-Konzept, z. B. an dem in Abbildung 3 dargestellten Versuchsaufbau kennen.

- Das Wasser *strömt von allein*, d. h. ohne Energiezufuhr, vom hohen Druck p_1 zum tiefen Druck p_2 .
- Die Druckdifferenz Δp hat für das Wasser die Funktion eines „Antriebs“.
- Hat der Druck in beiden Behältern denselben Wert, d. h. $p_1 = p_2$, so sind beide Behälter in einem „hydraulischen“ Gleichgewicht.
- Mithilfe einer Pumpe kann Wasser vom tiefen zum hohen Druck gepumpt werden. Dazu wird Energie benötigt.

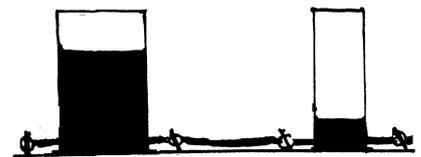


Abb. 3: Die Druckdifferenz treibt den Wasserstrom an.

Das Strom-Antrieb-Konzept soll nun auf elektrische Ströme übertragen werden. Den zwei Wasserbehältern entspricht ein „Kondensator“, ein elektrisches Bauteil mit zwei Anschlüssen. Jeder Anschluss führt zu einem „Elektrizitätsbehälter“.

- Laden Sie den Kondensator mit der Batterie auf. Messen Sie mithilfe des Multimeters, ob der Kondensator geladen ist. Erklären Sie das „Laden des Kondensators“ mithilfe der Wasseranalogie.
- Schließen Sie den „Lüfter“ an den Kondensator an. Interpretieren Sie mithilfe der Wasseranalogie Ihre Beobachtungen.
- Übersetzen Sie die obigen Sätze zum Strom-Antrieb-Konzept in analoge Sätze für elektrische Ströme.



Abb. 4: Ein Kondensator wird untersucht

3. Das Strom-Antrieb-Konzept bei der Osmose

Das Strom-Antrieb-Konzept soll nun auf die Osmose übertragen werden!

Beantworten Sie zunächst die folgenden Fragen:

- Was können wir aus der Beobachtung schließen, dass Wasser in Abb. 5 trotz des hydraulischen Gleichgewichts durch die Membran in das Zuckerwasser strömt?
- Was können wir aus der Beobachtung schließen, dass Wasser bei einer bestimmten Druckdifferenz zu strömen aufhört und dass die Steighöhe umso größer ist, je höher die Konzentration des gelösten Stoffes ist?

Wasser „strömt“ durch die Membran in den Bereich des gelösten Stoffes. Durch das Lösen des Stoffes muss eine „Eigenschaft“ des Wassers kleiner geworden sein, so dass die Differenz dieser Eigenschaft

als Antrieb funktioniert. Diese Eigenschaft des Wassers wird „**chemisches Potenzial μ** “ genannt. Aus unseren Beobachtungen können wir nun die folgenden Eigenschaften des chemischen Potentials erschließen:

- Das chemische Potenzial des Wassers μ wird durch das Lösen von Zucker oder Salz kleiner.
- Je höher die Konzentration des gelösten Stoffes ist, desto mehr nimmt der Wert des chemischen Potentials ab.
- Die Differenz des chemischen Potentials $\Delta\mu$ ist der *chemische Antrieb* für das Wasser durch die Membran.
- Durch das Wasser, das von dem einen zum anderen Behälter gelangt, entsteht eine Druckdifferenz Δp , die dem chemischen Antrieb entgegen wirkt.
- Im „osmotischen Gleichgewicht“ sind beide „Antriebe“ gleich groß geworden; sie kompensieren sich.²

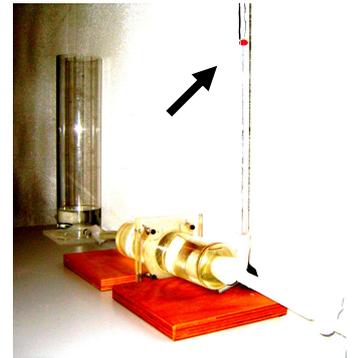
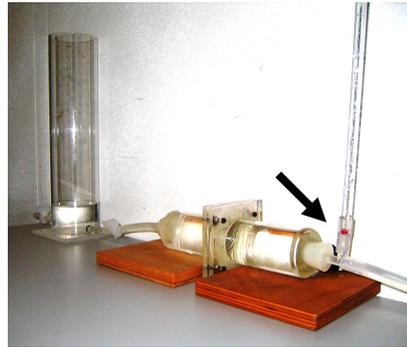


Abb. 5: Zunächst ist der Wasserstand auf beiden Seiten gleich, dann beginnt das Wasser links zu steigen.

Zusatzfrage:

- Was geschieht, wenn im „osmotischen Gleichgewicht“ der Druck z.B. durch das Heben der linken Wassersäule vergrößert wird?
- Wofür kann diese „Umkehrosmose“ eingesetzt werden?

4. Warum bringt Salz Eis zum Schmelzen?

In Abbildung 6 sind bei 0°C Eis („festes Wasser“) und Wasser („flüssiges Wasser“) im Phasengleichgewicht.

- Was folgt dann für das chemische Potenzial von Eis und Wasser bei 0°C?
- Erklären Sie nun mithilfe des chemischen Potentials, warum bei Zugabe von Salz Eis zu schmelzen beginnt.



Abb. 6: Eis und reines Wasser im Phasengleichgewicht.

5. Warum wird das Wasser kalt, wenn das Eis schmilzt?

Durch Salzzugabe, nimmt das chemische Potenzial des Wassers ab und wird somit kleiner als das chemische Potenzial des Eises. Die chemische Potenzialdifferenz ist hier der „*chemische Antrieb*“ für das Schmelzen des Eises.

Die folgenden Fragen können helfen zu verstehen, warum beim Schmelzen des Eises die Temperatur sinkt.

- Um das Eis in Abbildung 6 zu schmelzen, müsste „Wärme“³zugeführt werden. Die zugeführte „Wärme“ hätte nur das Schmelzen des Eises, nicht aber eine Temperaturerhöhung zur Folge. Was können wir daraus schließen?
- Beginnt Eis durch Salzzugabe, d. h. durch den chemischen Antrieb zu Schmelzen, wird „Wärme“ benötigt. Diese wird dem flüssigen Wasser entzogen, deshalb sinkt die Temperatur des Wassers.
- Zusatzfrage: Bringt Zucker auch das Eis zum Schmelzen?



Abb. 7: Bei Salzzugabe beginnt das Eis zu schmelzen.

6. Warum hört das Schmelzen je nach Salzzugabe bei unterschiedlichen Temperaturen auf?

- Welche Folgerungen können aus Abb. 8 über die Temperaturabhängigkeit des chemischen Potentials gezogen werden?
- Erklären Sie, warum bei Salzzugabe wie in Abb. 7 das Eis bei einer bestimmten „Gleichgewichtstemperatur“ aufhört zu schmelzen.²
- Erklären Sie, warum diese Temperatur bei höheren Salzkonzentrationen tiefer ist.
- Erklären Sie den Zusammenhang von Streudichte eines Salzstreufahrzeuges und der Außentemperatur.

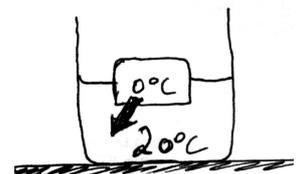


Abb. 8: Das Eis schmilzt so lange, bis das Wasser die Temperatur 0°C hat.

¹Im Sinne von „NW 1: Knotenpunkte der Naturwissenschaften - Auf dem Weg zu einer gemeinsamen Fachsprache der Naturwissenschaften“ <http://www.ls-bw.de/allg/publikationen/online>

²Mithilfe dieser Idee wird in [1] die Van't Hoffsche Gleichung, das Raoult'sche Gesetz und der Zusammenhang von Konzentration des gelösten Stoffes und Gefrierpunktniedrigung quantitativ hergeleitet.

³Hier ist mit der umgangssprachlichen Bezeichnung „Wärme“ Entropie gemeint. Ab 2009 werden alle Schüler den Entropiebegriff im Physikunterricht kennen gelernt haben.

[1] Georg Job, Regina Rüffler: physikalische Chemie; Teubner 2007 download unter <http://www.job-stiftung.de>

Anhang:

Was heißt Verstehen?

Martin Wagenschein: Verstehen heißt verbinden. Alles Verstehen ist relativ. Im Seltsamen (Erstaunlichen, Verwunderlichen) wird ein Gewohntes erkannt.

F. Herrmann: „Erklären“ heißt eine Erscheinung auf eine andere zurückführen, die man für fundamental und nicht mehr erklärungsbedürftig hält.

„elektrisches“ Gleichgewicht

Ein Kondensator, ein elektrisches Bauteil mit zwei Anschlüssen, entspricht den beiden Wasserbehältern. Wird der Kondensator z.B. mit einer Batterie geladen, so wird „Elektrizität“ von dem einen Behälter in den anderen „gepumpt“. Der Druckdifferenz entsprechend ist eine elektrische Potenzialdifferenz $\Delta\varphi$, also eine elektrische Spannung U zu messen. Werden die beiden Anschlüsse des Kondensators mit den Anschlüssen eines Motors verbunden, dann „entleert“ sich der Kondensator, die Elektrizität fließt von dem einen „Behälter“ zum anderen bis das elektrische Potenzial φ beider Anschlüsse denselben Wert hat, d. h. bis $\varphi_1 = \varphi_2$. Es hat sich dann ein „elektrisches“ Gleichgewicht eingestellt. Die elektrische Potenzialdifferenz $\Delta\varphi = U$, d. h. die elektrische Spannung U hat für die Elektrizität die Funktion eines Antriebs.

**Das chemische Potenzial μ** **Grundmerkmale des chemischen Potenzials [1]**

Ehe wir versuchen, diesen für uns neuen Begriff zu quantifizieren, wollen wir uns einen Überblick verschaffen, was mit diesem Begriff gemeint ist, wozu er gut ist und wie man ihn handhabt. Dazu stellen wir zunächst die wichtigsten Merkmale des chemischen Potenzials in einer Art kurzer Merksätze zusammen, die wir anschließend genauer erläutern wollen.

- Die Neigung eines Stoffes
 - sich mit irgendwelchen anderen Substanzen *umzusetzen*,
 - sich in irgendeine andere Zustandsform *umzuwandeln*,
 - sich im Raum irgendwie *umzuverteilen*,
 lässt sich durch ein und dieselbe Größe – sein chemisches Potenzial μ – ausdrücken.
- Die Stärke dieser Neigung, das heißt der Zahlenwert von μ
 - wird sowohl durch die *Art* des Stoffes bestimmt,
 - als auch durch das *Umfeld*, in dem er sich befindet,
 aber *weder* durch die Art seiner Reaktionspartner *noch* der entstehenden Produkte.
- Eine *Umsetzung*, *Umwandlung*, *Umverteilung* usw. kann freiwillig nur eintreten, wenn die Neigung hierzu im Ausgangszustand stärker ausgeprägt ist als im Endzustand.

Umkehrosmose

Umkehr-Osmose ist eine Filterung durch eine Membran, bei der durch Druck aus einer Salzlösung das Wasser quasi "herausgepresst" wird.

Bei der normalen Osmose wandert das Wasser von allein, durch die Membran in die Salzlösung und verdünnt diese. Bei der Umkehr-Osmose wird mit erhöhtem Druck das Wasser aus der Salzlösung „herausgepresst“. Am Ende der Umkehr-Osmose verbleibt also auf der einen Seite der Membran eine hochkonzentrierte Salzlösung und auf der anderen Seite (ziemlich) klares Wasser.

Anwendungsbeispiele:

Meerwasserentsalzung, Abwasserreinigung, Konzentrierung von Fruchtsäften, Anwendung in der pharmazeutischen und kosmetischen Industrie.

Ergebnisse dieser Station

- **Durch das Lösen von Substanzen in Wasser sinkt das chemische Potenzial von Wasser.**
- **Die chemische Potenzialdifferenz treibt die Osmose und das Schmelzen von Eis an.**
- **Das osmotische Gleichgewicht entsteht wenn die chemische Potenzialdifferenz durch die Druckdifferenz „ausgeglichen“ wird. Das chemische Potenzial steigt nämlich bei steigendem Druck.**
- **Bei Salzzugabe entsteht das Phasengleichgewicht bei derjenigen Temperatur, bei der die chemische Potenzialdifferenz durch die Temperaturdifferenz ausgeglichen wird; das chemische Potenzial steigt nämlich bei abnehmender Temperatur.**

Dieter Plappert: Physikalische Konzepte angewandt auf chemische Reaktionen

Auszug eines in Praxis der Naturwissenschaften 3/54 2005 erschienenen Artikels; Download des ganzen Artikels unter www.plappert-freiburg.de

1. Einleitung

In einem kumulativ aufgebauten Physikunterricht spielen wenige grundlegende Konzepte, die in möglichst vielen Bereichen angewandt werden können, eine zentrale Rolle. Wie ausführlich in [1], [2] und [3], beschrieben sind hier für das „Energie-Träger-Konzept“ und das „Strom-Antrieb-Konzept“ 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. Die beiden physikalischen Konzepte

Das „Energie-Träger-Konzept“ und das „Strom-Antrieb-Konzept“ sind ausführlich beschrieben. Im Folgenden sei nur so viel dargestellt, wie für das weitere Verständnis notwendig sein wird.

2.1. 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 [4] 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 Größe unterscheiden können. Die Tatsache, dass Energie nie alleine strömen kann, sondern immer zusammen mit einer zweiten Größe strömen muss, können wir durch 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, 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 ϕ “. Beide physikalische Größen haben eine analoge Bedeutung: sie geben an, wie viel Energie von dem jeweiligen Energieträger transportiert wird. Ihre Differenz Δp bzw. $\Delta \phi$ gibt an, wie viel Energie in einem System vom Wasser bzw. von der Elektrizität aufgeladen, bzw. abgeladen wird. In angegebenen Literatur wird ausführlich dargelegt, wie diese im Anfängerunterricht bildhaft eingeführten Konzepte im weiterführenden Unterricht immer weiter geschärft und präzisiert werden können.

3. chemische Energieträger

Mit dem neu konzipierten chemischen Energie-Träger-Stromkreis, kann nun die Brücke zur Chemie geschlagen werden. Der in Abbildung 1 abgebildete hydraulische Stromkreis wird ersetzt durch einen „chemischen Stromkreis“, der aus einem Elektrolyseur (1), einer Brennstoffzelle (2) und den zugehörigen Verbindungsschläuchen besteht. In einem einführenden Versuch ist der Elektrolyseur an einem Netzgerät angeschlossen. Kurze Zeit nach dem Einschalten beginnt sich der Lüfter zu drehen. Die Schülerinnen und Schüler können nun beginnen die zuvor am „hyd-

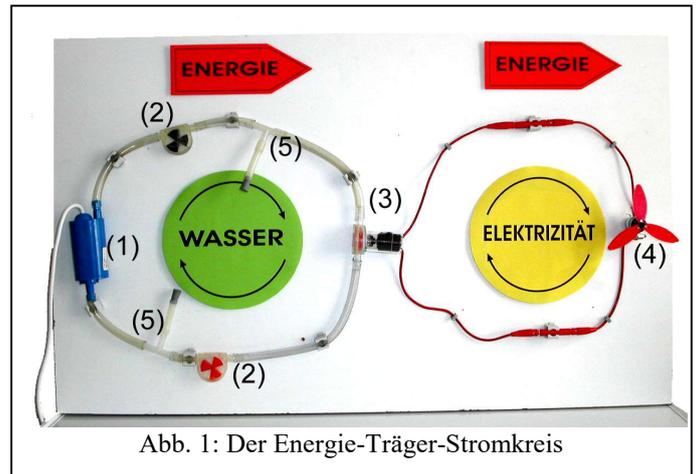


Abb. 1: Der Energie-Träger-Stromkreis

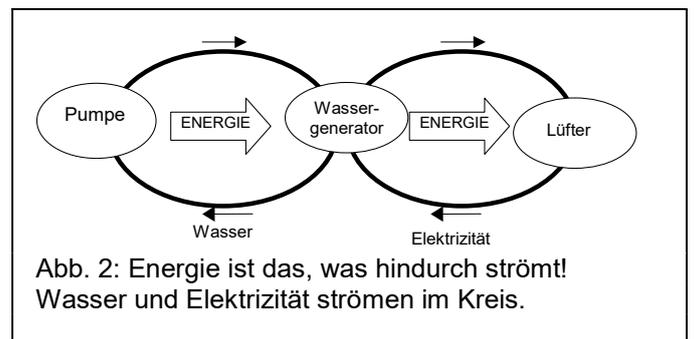


Abb. 2: Energie ist das, was hindurch strömt! Wasser und Elektrizität strömen im Kreis.

raulischen Energie-Träger-Stromkreis“ erarbeiteten physikalischen Begriffe und Konzepte auf diesen neuen Stromkreis übertragen: die Energie strömt von Netzgerät zum Elektrolyseur, zur Brennstoffzelle, zum Lüfter, ... Das Neue an dem veränderten Energie-Träger-Stromkreis kann nun im Einzelnen betrachtet und erläutert werden: im Elektrolyseur entstehen zwei Gase, Wasserstoff und Sauerstoff, diese werden getrennt, durch zwei Schläuche, zur Brennstoffzelle geleitet. Durch den unteren Schlauch, der die Brennstoffzelle mit dem Elektrolyseur verbindet, strömt Wasser zum Elektrolyseur zurück. Der hinströmende Wasserstoff und Sauerstoff und das zurückströmende Wasser spielen bei diesem Stromkreis die Rolle des Energieträgers: im Elektrolyseur werden Wasserstoff und Sauerstoff gebildet, dabei werden die beiden Stoffe zusammen mit der Energie beladen, die sie in der Brennstoffzelle wieder abgeben. Diese „freigewordene Energie“ wird dann von dort mithilfe der Elektrizität weitertransportiert. Für den Energietransport zwischen Elektrolyseur und Brennstoffzelle werden im Gegensatz zu allen bisher im Unterricht behandelten Beispielen nicht nur ein „Stoff“ sondern drei verschiedene Substanzen benötigt. Diese hängen durch chemische Reaktionen miteinander zusammen

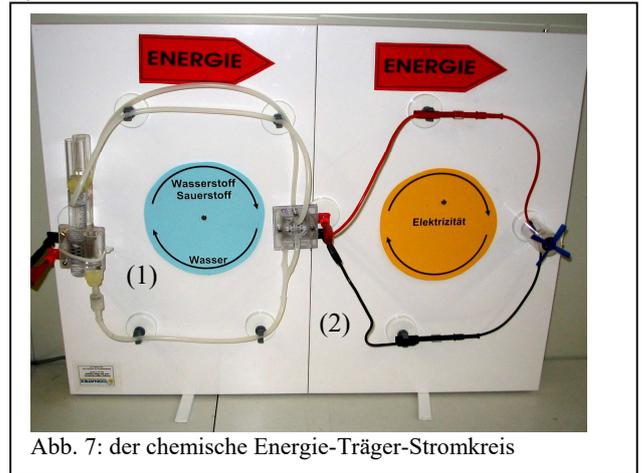


Abb. 7: der chemische Energie-Träger-Stromkreis

Anmerkungen:

- Durch den dargestellten Aufbau des chemischen Energie-Träger-Stromkreises kann nicht nur die Analogie zu den anderen Energietransporten hergestellt werden, sondern der Systemgedanke bildhaft erlebbar werden: Elektrolyseur und Brennstoffzelle stehen durch Hin- und Rückleitung miteinander in Verbindung. Der hinfließende Wasserstoff und Sauerstoff und das zurückfließende Wasser bilden einen Stoffkreislauf, durch den Energie transportiert wird. Dass zur Erzeugung des Wasserstoffs Energie benötigt wird, die immer auch irgendwo her kommen muss, ist ein Aspekt, der oft z.B. bei der Beschreibung der Brennstoffzellentechnologie in den Hintergrund tritt. Der chemische Energie-Träger-Stromkreis kann im Unterricht für die Schülerinnen und Schüler ein bildhaftes Beispiel für die Vielzahl der Stoffkreisläufe werden, die in Natur und Technik mit Energietransporten verbunden sind.

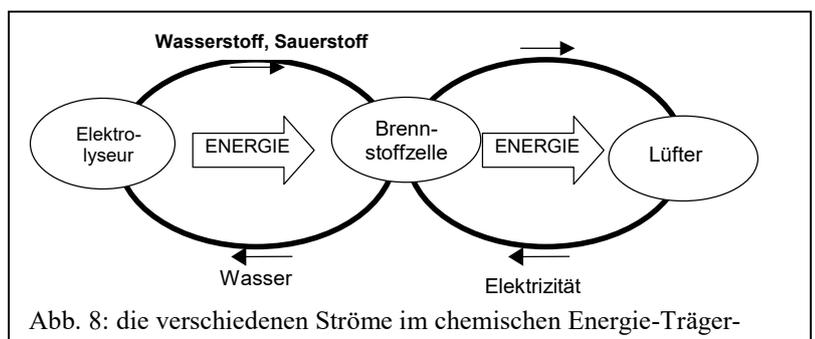


Abb. 8: die verschiedenen Ströme im chemischen Energie-Träger-

4. das chemische Potenzial

Bei allen bisher behandelten Energieträgern haben wir physikalische Größen kennen gelernt, mit deren Hilfe wir erkennen konnten, wie viel Energie ein Träger transportieren bzw. durch deren Differenz wir angeben konnten, wie viel Energie in einem System auf- bzw. abgeladen wird. Auch bei den chemischen Energietransporten gibt es eine analoge Größe: das chemische Potenzial μ . Die Maßeinheit ist, wie zu erwarten, KJ / mol. Die Werte des chemischen Potenzials für „Reinstoffe“ bei Normalbedingungen (Druck 1 bar, Temperatur 25 °C) sind in Tabellenwerken und Formelsammlungen [8] und [9] zu finden. Betrachten wir diese, so stellen wir fest, dass als Nullpunkt des chemischen Potenzials diejenigen Reinstoffe gewählt wurde, die unter Normalbedingungen sich in einem stabilen Zustand befinden. Für energetische Überlegungen bei chemischen Reaktionen müssen immer alle beteiligten Stoffe berücksichtigt werden. Wie dies geschehen kann, wollen wir am Beispiel der Brennstoffzelle ausführen: Bei der chemisch vollständig verlaufenden Reaktion ergeben 1 mol Wasserstoff und 1 mol Sauerstoff 2 mol Wasser und umgekehrt. Die *Differenz* des chemischen Potenzials $\Delta \mu$ der Ausgangs- und Endstoffe spielt die entscheidende Rolle, mit $\Delta \mu = \mu(\text{Ausgangsstoffe}) - \mu(\text{Endstoffe})$. Das chemische Potenzial der Ausgangs- bzw. der Endstoffe erhalten wir jeweils durch die Summe der beteiligten Einzelstoffe, wobei das Verhältnis der einzelnen Stoffmengen berücksichtigt werden muss. Für unser Beispiel gilt:

$\mu(\text{Ausgangsstoffe}) = 2 \cdot \mu(\text{Wasserstoff}) + \mu(\text{Sauerstoff}) = 2 \cdot 0 \text{ KJ/mol} + 0 \text{ KJ/mol} = 0 \text{ KJ/mol}$. Wir erhalten hier den Wert 0 KJ/mol, da wir sowohl Wasserstoff als auch Sauerstoff als Reinstoffe unter Normalbedingungen verwendet wollen.

$\mu(\text{Endstoffe}) = 2 \cdot \mu(\text{Wasser}) = 2 \cdot (-237,18) \text{ KJ/mol} = -474.36 \text{ KJ/mol}$.

Für unser Beispiel ergibt sich dann $\Delta \mu = \mu(\text{Ausgangsstoffe}) - \mu(\text{Endstoffe}) = 474.36 \text{ KJ/mol}$. Reagieren in einer Brennstoffzelle 2 mol Wasserstoff und 1 mol Sauerstoff, so wird im Idealfall die Energiemenge von 474.36 KJ „freigesetzt“.

Literatur und Bezugsquellen

Dieter Plappert: Verständliche Elektrizitätslehre, Praxis der Naturwissenschaften Physik 7/52, Oktober 2003
Experimente der Analogieserie: Conatex, Postfach 1407, 66514 Neunkirchen, 06821/94110, www.conatex.com