

- [12] Finke, U., Schmidt, F. K.: Die Gibbs-Helmholtz-Gleichung unter dem Aspekt von Wärme und Arbeit, *chimica didactica* 30, Heft 1/2, S. 111, 2004.
- [13] Niedersächsisches Kultusministerium (Hrsg.): Rahmenrichtlinien für das Gymnasium Schuljahrgänge 7-10 Physik, Schroedel Schulbuchverlag: Hannover 1994.
- [14] Bader, M., Wiesner, H.: Das „Münchener Unterrichtskonzept“ zur Einführung in die mechanische Energie und Wärmelehre, *Physik in der Schule* 37, S. 363, 1999.
- [15] Burger, J., Gerhardt, A.: Energie im biologischen Kontext, *MNU* 56/6, S. 324, 2003.
- [16] Melle, I., Baur, V., Gerlach, S., Hesselink, B.: Energie und nachwachsende Rohstoffe als Thema in der Oberstufe, *MNU* 52/7, S. 414, 1999.
- [17] Melle, I., Flintjer, B., Jansen, W.: Chemische Energetik – Neues experimentelles Konzept zur Behandlung in der gymnasialen Oberstufe, *PdN-Chemie* 2/42, S. 5, 1993.
- [18] Versuchsanleitungen zum Thermit-Verfahren finden Sie im Internet zum Beispiel unter: <http://dc2.uni-bielefeld.de/dc2/gefahr/thermit.htm>, <http://www.seilnacht.com/versuche/redureak.html#1>, http://www.chemieexperimente.de/redox/4_4.htm.
- [19] Matthues, G.W.: Demonstration of Spontaneous Endothermic Reaction, *J. Chem. Ed.* 43, S. 476, 1966.
- [20] Schmidkunz, H.: Spontane endotherme Reaktion fester, kristalliner Stoffe, *NiU-Chemie* 1, Nr.2, S. 65, 1990.
- [21] Schmidkunz, H.: Endotherme chemische Reaktionen, *NiU-Chemie* 4, Nr. 18, S. 350.
- [22] Melle, I.: Energie – Experimentelle Erschließung eines grundlegenden Begriffs, *PdN-Chemie* 5/47, S. 12, 1998.
- [23] Melle, I., Flintjer, B., Jansen, W.: Der Satz von Hess – Enthalpie, Freie Enthalpie und Entropie als Zustandsgrößen, *PdN-Chemie* 2/43, S. 2, 1994.
- [24] Melle, I., Flintjer, B., Jansen, W.: Die Bestimmung energetischer Größen - am Beispiel der Reaktion von Zink mit Salzsäure, *PdN-Chemie* 2/43, S. 7, 1994.
- [25] Melle, I., Flintjer, B., Latzel, G., Jansen, W.: Experimentelle Bestimmung der Bildungsenthalpie von Lithiumhydrid – eine Anwendung des Satzes von Hess, *PdN-Chemie* 2/43, S. 10, 1994.
- [26] Schmidkunz, H.: Die thermische Energiespeicherung und deren Bearbeitung im Unterricht, *NiU-Chemie* 10, Nr.54, S. 262, 1999.
- [27] Lutz, B.: Das System Zeolith – Wasser – ein Modell zur Energiespeicherung für den Unterricht, *NiU-Chemie* 10, Nr.54, S. 270, 1999.
- [28] Schmidkunz, H.: Salzhydrate als chemische Wärmespeicher, *NiU-Chemie* 10, Nr.54, S. 272, 1999.
- [29] Lehmann, V.: Brennstoffzellen im Unterricht, *NiU-Chemie* 10, Nr.54, S. 292, 1999.
- [30] Atkins, P.W.: *Physikalische Chemie*, WILEY-VCH Verlag GmbH: Weinheim 2001 (3. Auflage).
- [31] Kęcki, Z.: Entropie einmal anders – Energetik chemischer Reaktionen, *PdN-Chemie* 2/42, S. 15, 1993.
- [32] Asselborn, W., Jäckel, M., Risch, K.T. (Hrsg.): *Chemie heute – Sekundarbereich II*, Schroedel Verlag: Hannover 1998.
- [33] Çengel, Y.: *Introduction to Thermodynamics and Heat Transfer*, Irwin/McGraw-Hill: Boston 1997.
- [34] Schlösser, K.: Gedanken zur Energetik im Chemieunterricht, *NiU-Chemie* 4, Nr. 18, S. 336, 1993.
- [35] Kuhn, W. (Hrsg.): *Kuhn Physik 2 – Lehrbuch der Physik*, Westermann Schulbuchverlag GmbH: Braunschweig 2000.
- [36] Herrmann, F.: *Karlsruher Physikkurs SI, Teil1: Energie Impuls, Entropie*, Aulis Verlag Deubner: Köln 2003 (6. Auflage).
- [37] Job, G.: Wie schädlich ist der erste Hauptsatz?, *chimica didactica* 30, Heft 1/2, S. 88, 2004.

Anschrift der Verfasserin:

Dr. Susanne Metzger, TU Braunschweig, Institut für Fachdidaktik der Naturwissenschaften, Abteilung Physik und Physikdidaktik, Pockelsstraße 11, 38106 Braunschweig

Physikalische Konzepte angewandt auf chemische Reaktionen

D. Plappert

1 Einleitung

In einem kumulativ aufgebauten Physikunterricht spielen wenige grundlegende Konzepte eine zentrale Rolle, die in möglichst vielen Bereichen angewandt werden können. Wie ausführlich in [1], [2] und [3] beschrieben sind hierfür das „Energie-Träger-Konzept“ und das „Strom-Antrieb-Konzept“ geeignet. Mithilfe des neu konzipierten „chemischen Energie-Träger-Stromkreis“ gelingt es den Schülerinnen und Schülern mithilfe dieser Konzepte auf Antrieb, 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“ werden im Folgenden nur so weit dargestellt, wie für das weitere Verständnis notwendig ist.

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 Abb. 1 dargestellte Versuchsaufbau [4] entwickelt, durch den die Schülerinnen und Schüler diesen Unterschied bildhaft erleben können: Eine mit einem Netzgerät

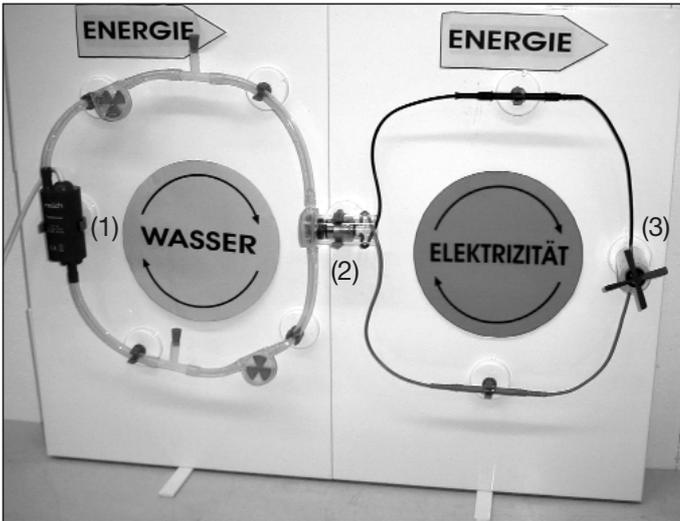


Abb. 1: Der Energie-Träger-Stromkreis

verbundene Pumpe (1) treibt Wasser an, das Wasser einen „Wassergenerator“ (2) und dieser einen elektrischer „Lüfter“ (3). 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 in den 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 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

Abb. 3: Die Analogie von Wasserstrom- und elektrischem Stromkreis

Wasserstromkreis	Elektrischer Stromkreis
<p>Hinweis: Die angegebenen Werte des Drucks beziehen sich auf den am „Eingang“ der Pumpe gewählten Nullpunkt. Der Druck nimmt längs des Leiters ab, da wir hier von Schläuchen mit nicht zu vernachlässigendem Widerstand ausgehen.</p>	<p>Hinweis: Die angegebenen Werte des elektrischen Potentials beziehen sich auf den am „Eingang“ des Dynamos gewählten Nullpunkt. Das elektrische Potential nimmt längs des Leiters ab, da wir hier von Kabeln mit nicht zu vernachlässigendem Widerstand ausgehen.</p>

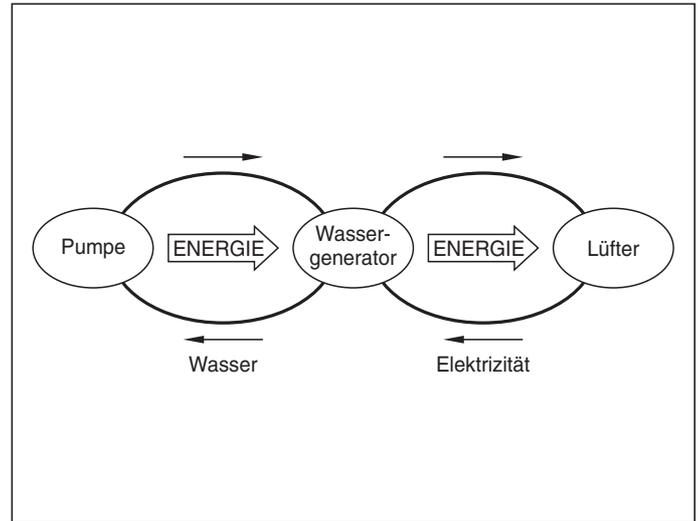


Abb. 2: Energie ist das, was hindurch strömt! Wasser und Elektrizität strömen im Kreis.

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 Abb. 1 vor und nach dem Wassergenerator?“ „Worin unterscheidet sich die Elektrizität vor und nach dem Lüfter?“ führen zu den Begriffen „Druck p “ und „elektrisches Potential 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 der angegebenen Literatur wird ausführlich dargelegt, wie diese im Anfängerunterricht bildhaft eingeführten Konzepte im weiterführenden Unterricht immer weiter geschärft und präzisiert werden können. In Abb. 3 und 4 ist das Energie-Träger-Konzept übersichtsartig zusammengefasst.

2.2 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

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 <i>Druckdifferenz</i> Δp gibt an, wie viel Energie in einem Umlader auf bzw. vom Wasser abgeladen wird.	Die Differenz des <i>el. Potentials</i> $\Delta\varphi = U$ (<i>el. Spannung</i>) gibt an, wie viel Energie in einem Umlader auf- bzw. von der Elektrizität abgeladen wird.
Die <i>Energiestromgleichung</i> $I_E = \Delta p I_W$ gibt die <i>Stärke des Energiestroms</i> an, der in einem Umlader mit einem Wasserstrom verbunden bzw. von einem Wasserstrom getrennt wird.	Die <i>Energiestromgleichung</i> $I_E = \Delta\varphi I_Q$ gibt die <i>Stärke des Energiestroms</i> an, der in einem Umlader mit einem el. Strom verbunden bzw. von einem el. Strom getrennt wird.

Abb. 4: Das Energie-Träger-Konzept

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

Abb. 6: Das Strom-Antrieb-Konzept

einen Behälter [4] in den anderen? Intuitiv ist für alle Schülerinnen und Schülern klar, dass das Wasser strömt, solange es eine Druckdifferenz Δp gibt. Die Frage ist nur: hängt der Wasserdruck von der Höhe oder vom Volumen der Wassersäule ab. Der Versuch zeigt dann, dass die Höhendifferenz Δh ein Maß für die den Wasserstrom antreibende Druckdifferenz Δp ist [1].

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

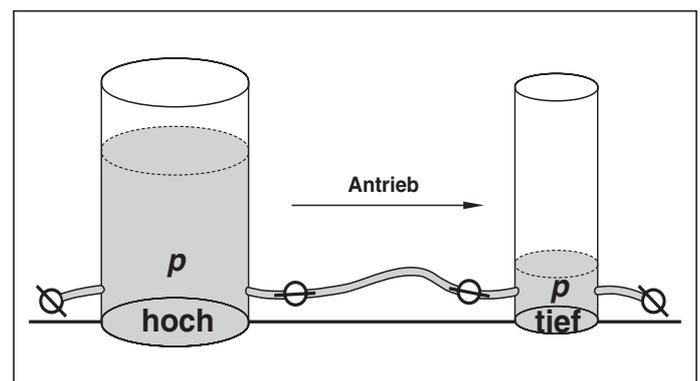
Das „Energie-Träger-Konzept“ und das „Strom-Antrieb-Konzept“ sind miteinander verbunden: die meisten Ströme fließen nicht widerstandsfrei sondern sie benötigen wegen des „*Strömungswiderstandes*“ Energie zum Strömen, also einen Antrieb. Nur Supraströme fließen ohne Antrieb.

3 Chemische Energieträger

Mit dem neu konzipierten chemischen Energie-Träger-Stromkreis, kann nun die Brücke zur Chemie geschlagen werden. Der in Abb. 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 ein-

führenden 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 „hydraulischen Energie-Träger-Stromkreis“ erarbeiteten physikalischen Begriffe und Konzepte auf diesen neuen Stromkreis zu 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 Brenn-

Abb. 5: Die Druckdifferenz als Antrieb eines Wasserstroms



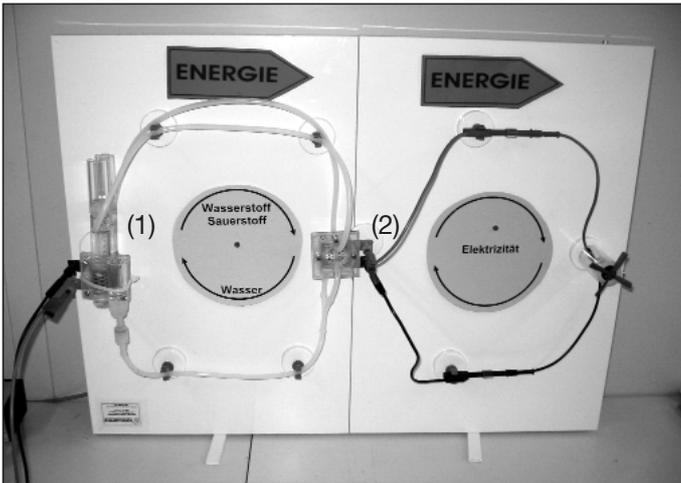


Abb. 7: Der chemische Energie-Träger-Stromkreis

stoffzelle 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 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.

Anmerkungen:

- Wie nun im Unterricht die Brücke zur Chemie im Einzelnen geschlagen wird, kann hier nicht weiter ausgeführt werden, auch nicht, wie mol als Maßeinheit der Stoffmenge und die Umsatzrate als die der Wasserstrom- und elektrischen Stromstärke analoge Größe eingeführt werden können. Dies ist in [6] und [7] ausführlich dargestellt.
- Durch den dargestellten Aufbau des chemischen Energie-Träger-Stromkreises kann nicht nur die Analogie zu den anderen Energietransporten hergestellt, sondern der Systemgedanke verdeutlicht 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 trans-

Abb. 9: Ein Energietransport durch die Nahrungskette

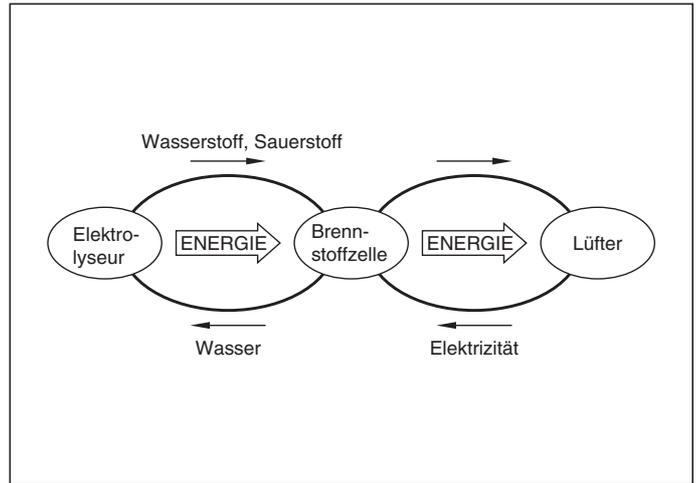
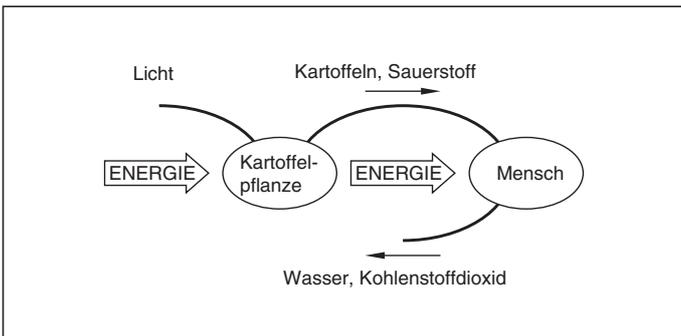


Abb. 8: Die Ströme im chemischen Energie-Träger-Stromkreis

portiert wird. Dass zur Erzeugung des Wasserstoffs Energie benötigt wird, die immer auch irgendwo her kommen muss, ist ein Aspekt, der oft, beispielsweise bei der Beschreibung der Brennstoffzellentechnologie, in den Hintergrund tritt. 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. Abb. 9 zeigt vereinfacht den Nahrungskreislauf des Menschen.

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 Potentials 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 Potentials diejenigen Reinstoffe gewählt wurden, 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 2 mol Wasserstoff und 1 mol Sauerstoff 2 mol Wasser und umgekehrt. Die *Differenz* des chemischen Potentials $\Delta\mu$ 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:

$$\begin{aligned} \mu(\text{Ausgangsstoffe}) &= 2 \mu(\text{Wasserstoff}) + \mu(\text{Sauerstoff}) \\ &= 2 \cdot 0 \text{ kJ/mol} + 0 \text{ kJ/mol} = 0 \text{ kJ/mol.} \end{aligned}$$

Wir erhalten hier den Wert 0 kJ/mol, da wir sowohl Wasserstoff als auch Sauerstoff als Reinstoffe unter Normalbedingungen verwendet wollen.

$$\begin{aligned}\mu(\text{Endstoffe}) &= \\ &= 2 \cdot \mu(\text{Wasser}) \\ &= 2 \cdot (-237,18) \text{ kJ/mol} \\ &= -474,36 \text{ kJ/mol}.\end{aligned}$$

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 „abgeladen“.

Im Unterricht sollte diese Art von Rechnungen nur exemplarischen Charakter haben. Wichtiger ist die dahinter stehende Begrifflichkeit: es soll deutlich werden, dass z. B. die Brennwerte von fossilen Energieträgern im Grunde genommen chemische Potenzialdifferenzen sind und damit angeben, wie viel Energie bei einer ganz bestimmten chemischen Reaktion abgegeben, d. h. anderen Energieträgern zur Verfügung gestellt werden kann. In Abb. 10 ist das chemische Energieträgerkonzept übersichtsartig dargestellt.

Anmerkungen:

- Es würde den Rahmen dieses Aufsatzes sprechen, darzustellen, wie die Werte des chemischen Potentials von Temperatur, Druck und anderen Größen abhängen. Stattdessen sei verwiesen auf [6] und [7].
- In manchen Formelsammlungen [10] tritt das chemische Potenzial unter der Bezeichnung „freie Standardbildungsenthalpie“ auf.

5 Strom-Antrieb-Konzept

In einem Unterricht, in dem die Analogien zwischen den einzelnen Gebieten im Zentrum stehen, fragen einige Schülerinnen und Schüler selbständig nach der Übertragung des Strom-Antrieb-Konzepts auf chemische Reaktionen. Sie können das in Abb. 6 dargestellte hydraulische Beispiel mehr oder weniger selbständig auf chemische Reaktionen übertragen: die beiden Behälter stehen für die Ausgangs- und Endstoffe. So wie die Druckdifferenz Δp bestimmt, in welche Richtung das Wasser strömt, so bestimmt die Differenz des chemischen Potentials $\Delta\mu$ die Richtung, in der die chemische Reaktion verläuft. In Abb. 11 ist das chemische Strom-Antrieb-Konzept übersichtsartig dargestellt.

Abb. 11: Das Strom-Antrieb-Konzept in der Chemie

Es werden zwei „Leitungen“ benötigt, damit die an der chemischen Reaktion beteiligten Stoffe hin und zurück fließen können. („Stoffkreislauf“)

Die Umsatzrate $I_n = \text{Umsatz} / \text{Zeit}$ 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 Reaktionswiderstand des Systems ist, desto größer muss die chemische Spannung $\Delta\mu$ sein, um eine Umsatzrate der Stärke I_n zu bewirken.

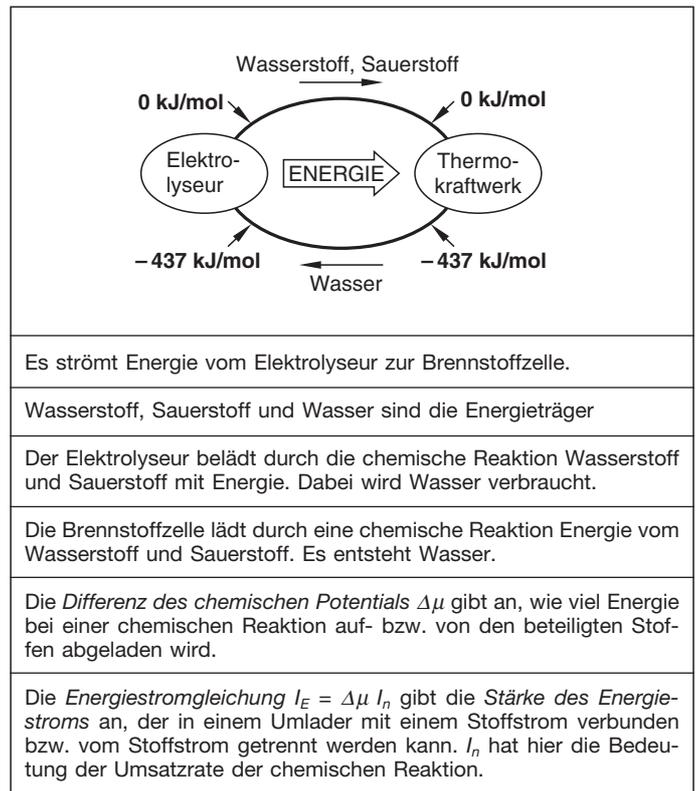


Abb. 10: Das Energie-Träger-Konzept in der Chemie

6 Schlussbemerkungen

Dieser Artikel zeigt in einem Beispiel, wie der Unterricht in den einzelnen naturwissenschaftlichen Fächern miteinander verzahnt werden kann: durch den analogen Aufbau des hydraulischen und des chemischen Energie-Träger-Stromkreis liegt die Übertragung der im Physikunterricht behandelten Konzepte auf chemische Phänomene fast auf der Hand. Diese Konzepte können sich in einem vertiefenden Unterricht gegenseitig stützen: das auf diese Weise von den Schülerinnen und Schülern erworben Netz naturwissenschaftlicher Begriffe wird immer stabiler und präziser. Dieser vernetzende naturwissenschaftliche Unterricht kann jedoch nur gelingen, wenn die in Chemie und Physik unterrichtenden Lehrer diese Konzepte kennen und anwenden.

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 unter www.leu.bw.schule.de/allg/publikationen
- [4] Analogieserie zu beziehen bei: Conatex, Postfach 1407, 66514 Neunkirchen, 06821/94110, www.conatex.com
- [5] wird 2005 bei Conatex erhältlich sein
- [6] Friedrich Herrmann: Der Karlsruher Physikkurs Band 3, S I, Aulis Verlag Köln
- [7] Georg Job: Antrieb chemischer Reaktionen, MNU 57 (2004), Heft 4
- [8] unter www.job-stiftung.de/ ist eine Tabelle mit dem chemischen Potenzial von 1300 Stoffen zu finden.
- [9] in [6] im Anhang
- [10] Formelsammlung, Paetec Verlag Berlin 2003

Anschrift des Verfassers:

StD Dieter Plappert, Staatliches Seminar für Didaktik und Lehrerbildung, Kunzenweg 21, 79117 Freiburg