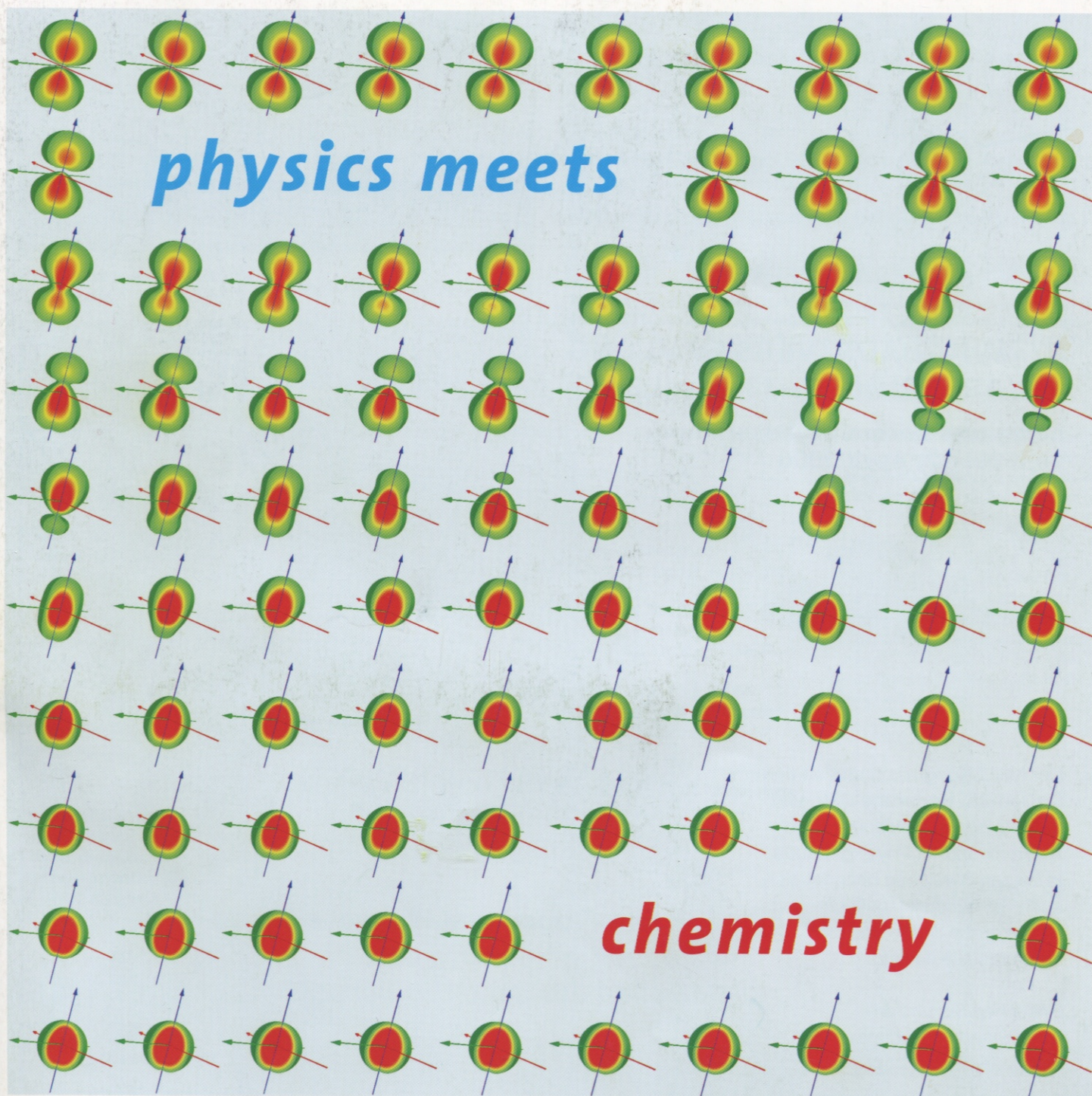


# Praxis der Naturwissenschaften **Physik in der Schule**

Aulis Verlag Deubner · Köln und Leipzig



# Eine Analogie zwischen Mechanik, Elektrizitätslehre, Wärmelehre und Stofflehre

F. Herrmann

## 1 Analogien in der Naturwissenschaft

Wir sprechen in der Naturwissenschaft von einer Analogie zwischen zwei Themenbereichen, wenn diese durch dieselben mathematischen Strukturen beschrieben werden. Ein bekanntes Beispiel sind Schwingungserscheinungen. Es gibt Schwingungen der verschiedensten Art, die man durch denselben Differenzialgleichungstyp beschreiben kann.

Zu jeder Analogie lässt sich eine Übersetzungstabelle anlegen, eine Art zweisprachiges Wörterbuch. Einer physikalischen Größe in der einen Spalte der Tabelle entspricht eine andere Größe in der anderen Spalte und einer Beziehung zwischen Größen der einen Spalte entspricht eine Beziehung zwischen Größen der anderen Spalte. Außer Größen und Gleichungen kann man noch andere Begriffe in das Wörterbuch eintragen: Namen von physikalischen Erscheinungen, von Teilchen, von Geräten usw.

Es gibt keine Vorschriften darüber, wie weit eine Analogie zu gehen hat. In manchen Fällen ist die Übereinstimmung gering, die Tabelle hat nur wenige Einträge. In anderen Fällen ist die Übereinstimmung groß, und es gibt es viele Einträge. Es gibt auch keine Vorschrift darüber, welcher mathematischen Natur die eingetragenen Größen sein müssten. So kann einem Skalar in der einen Spalte ein Vektor, ein Tensor oder ein Differenzialoperator in der anderen gegenüberstehen. Bei der bekannten Analogie zwischen elektrischem und magnetischem Feld entspricht der vektoriellen elektrischen Feldstärke  $\vec{E}$  die vektorielle magnetische Induktion  $\vec{B}$ , dem skalaren elektrischen Potenzial  $\phi$  das magnetische Vektorpotenzial  $\vec{A}$  und der skalaren Ladungsdichte  $\rho$  die vektorielle elektrische Stromdichte  $\vec{j}$ . Bei der Analogie zwischen klassischer Mechanik und Quantenmechanik entsprechen den Variablen der klassischen Mechanik die quantenmechanischen Operatoren.

Hier einige weitere Beispiele von Analogien:

1. Allein innerhalb der Elektrodynamik gibt es drei verschiedene Analogien zwischen elektrischen und magnetischen Erscheinungen [1].
2. Transportvorgänge können auf analoge Art beschrieben werden: Wärmeleitung, Diffusion und Impulstransport befolgen analoge Gleichungen [2].
3. Die Theorien von Licht und Schall sind analog zueinander, und zwar nicht nur die Wellentheorien, sondern auch die Strahlentheorien und die entsprechenden Quantentheorien. Der elektromagnetischen Lichtwelle entspricht die mechanische Schallwelle. Den Feldstärken  $\vec{E}$  und  $\vec{H}$  entsprechen bei der Schallwelle Druck und Geschwindigkeit. Der elektrischen Antenne entspricht etwa die Orgelpfeife, den Photonen entsprechen die Phononen.

4. In der Teilchenphysik sind Analogien ein fundamentales Ordnungsprinzip. Dabei entsprechen sich die vier Wechselwirkungen: die elektromagnetische, die starke, die schwache und die gravitative. In den supersymmetrischen Theorien entspricht jedem Fermion ein Boson und jedem Boson ein Fermion.

Die beiden (oder mehr) Bereiche der Naturwissenschaft, die über eine Analogie zusammenhängen, wurden oft unabhängig voneinander entdeckt und bearbeitet, gewöhnlich von verschiedenen Personen und zu verschiedenen Zeiten. Oft erkannte man den Zusammenhang erst nachträglich. So waren Elektrizität und Magnetismus schon recht weit entwickelt, als *Faraday* die Übereinstimmung zwischen den beiden Fachgebieten entdeckte.

Es gibt auch Fälle, wo das Zusammenführen von zwei Analogie-Kandidaten noch nicht stattgefunden hat, und man kann vermuten, dass das Vereinfachungspotenzial durch noch nicht entdeckte Analogien noch recht groß ist.

## 2 Die Analogie zwischen Mechanik, Elektrizitätslehre, Wärmelehre und Stofflehre

Bei der Analogie, die hier vorgestellt werden soll, und die auch mit den anderen Aufsätzen dieses Heftes zusammenhängt, entsprechen sich die vier naturwissenschaftlichen Gebiete Mechanik, Wärmelehre, Elektrizitätslehre und Stofflehre. (Wir haben absichtlich nicht die Bezeichnungen Thermodynamik, Elektrodynamik und Chemie verwendet, denn diese drei Gebiete umfassen mehr als nur die reine Wärme-, Elektrizitäts- bzw. Stofflehre.) Diese Analogie kam nicht mit einem Paukenschlag, sondern eher unauffällig in die Physik. Man begegnet ihr mal hier und mal dort und meist ohne dass ausdrücklich darauf hingewiesen wird, dass es sich um eine Analogie handelt. Obwohl es eine Analogie zwischen vier Bereichen ist (also einem viersprachigen Wörterbuch entsprechend), findet man manchmal nur zwei oder drei Partner erwähnt. Besonders die Analogie zwischen Mechanik und Elektrizitätslehre ist bei den Ingenieuren sehr beliebt, und es gibt eine eigene Fachliteratur [3] und eigene Vorlesungen dazu. Alle vier Partner trifft man manchmal an in Lehrbüchern der Thermodynamik irreversibler Prozesse [4]. Da dieses Gebiet als schwierig gilt und daher in einer typischen Grundvorlesung der Hochschule kaum angesprochen wird, ist die Analogie nie zum Standardwissen von Physikern und Physiklehrern geworden. Eine Elementarisierung für die Schule, die leicht möglich ist, hat zunächst nicht stattgefunden. Ein Buch, das die Analogie auf dem Niveau einer Kursvorlesung darstellt,

<b>Mechanik</b>	Impuls $p$	Geschwindigkeit $v$	Impulsstrom (Kraft) $F$
<b>Elektrizitätslehre</b>	elektrische Ladung $Q$	elektrisches Potenzial $\varphi$	elektrischer Strom $I$
<b>Wärmelehre</b>	Entropie $S$	absolute Temperatur $T$	Entropiestrom $I_S$
<b>Stofflehre</b>	Stoffmenge $n$	chemisches Potenzial $\mu$	Stoffstrom $I_n$

Tab. 1: Die wichtigsten Größen der Analogie

ist die „Energie und Entropie“ von *Falk* und *Ruppel* [5]. Tab. 1 zeigt den Anfang des entsprechenden Wörterbuchs, nämlich einige der zueinander analogen Größen. Zunächst, Spalte 2, entsprechen sich die extensiven Größen Impuls  $p$ , elektrische Ladung  $Q$ , Entropie  $S$  und Stoffmenge  $n$ . Zu jeder dieser extensiven Größen gehört eine so genannte energiekonjugierte intensive Größe, Spalte 3: die Geschwindigkeit  $v$ , das elektrische Potenzial  $\varphi$ , die absolute Temperatur  $T$  bzw. das chemische Potenzial  $\mu$ . (Das Produkt aus extensiver und konjugierter intensiver Größe hat die Dimension der Energie.) Zu jeder extensiven Größe lässt sich ein Strom erklären, Spalte 4: der Impulsstrom  $\vec{F}$  (= die Kraft), der Entropiestrom  $I_S$ , der elektrische Strom  $I$  und der Stoffstrom  $I_n$ . Außerdem entsprechen sich Widerstände, Kapazitäten und noch andere Größen.

Auf die Beziehungen zwischen diesen Größen und weitere Auswirkungen der Analogie kommen wir in Abschnitt 5 zu sprechen.

### 3 Die gemeinsamen Anschauungen in Mechanik, Elektrizitätslehre, Wärmelehre und Stofflehre

Da sich die vier analogen Gebiete historisch unabhängig voneinander entwickelt haben, haben sich in ihnen sehr unterschiedliche Anschauungen und Modelle herausgebildet. Das hat dazu geführt, dass die Analogie zunächst nur schwer zu erkennen war. So treten uns in der traditionellen Lehre die vier extensiven Größen auf recht unterschiedliche Art entgegen: Den Impuls lernen wir kennen als Abkürzung für das Produkt aus Masse und Geschwindigkeit und als praktische Invariante bei Stoßprozessen. Die elektrische Ladung ist ein Maß für die Menge von etwas, das man sich als eine Art Fluidum vorstellt, und das auf elektrisch geladenen Körpern sitzt. Von der Entropie bildet man sich nur über die mikroskopisch-statistische Deutung eine Anschauung. Die Stoffmenge schließlich scheint nichts anderes zu sein als ein Maß für die Zahl der elementaren Bausteine.

So verschieden wie diese Deutungen der extensiven Größen sind auch die der intensiven Größen, der Ströme, der Beziehungen zwischen den Größen und der durch sie beschriebenen Vorgänge. Es liegt nun auf der Hand, die Beschreibung der vier Gebiete so zu wählen, dass die Analogie deutlich wird. Dadurch wird die Physik einheitlicher und übersichtlicher.

Um die Analogie zur Wirkung kommen zu lassen, kann man auf verschiedene Arten vorgehen. Man lässt zum Beispiel die Mechanik wie sie ist und verändert die anderen drei Gebiete so, dass sie in ihrer Struktur der Mechanik entsprechen. Was dabei herauskommt, ist allerdings so abstoßend, dass man schnell davon ablassen wird. Das spricht

nicht gegen die Analogie, sondern vor allem gegen die derzeitige Darstellung der Mechanik. Dass die Mechanik als Vorbild so ungeeignet ist, liegt daran, dass sie mit Fernwirkungen operiert. Das wollen wir natürlich nicht auf die ganze Physik übertragen.

Wenn die Mechanik als Vorbild nicht in Frage kommt, so könnte man es vielleicht mit der Wärmelehre versuchen. Wieder kommt aber etwas heraus, was man ohne zu zögern als inakzeptabel einstufen wird. Das Problem bei der Wärmelehre ist, dass man hier die zentrale und einfache Größe Entropie erst spät (wenn überhaupt) und auf sehr undurchsichtige Art einführt. Wenn wir die Elektrizitätslehre nach dem Muster der Wärmelehre aufbauen wollten, so müssten wir sie weitgehend ohne elektrische Ladung und ohne elektrische Ströme darstellen, so wie ja in der Wärmelehre Entropie und Entropieströme praktisch nicht vorkommen. Das geht zwar, bedeutet aber, dass die Elektrizitätslehre genau so unhandlich würde, wie es jetzt die Wärmelehre ist. Wie eine solche Elektrizitätslehre aussehen würde, hat *Fuchs* [6] in einem sehr amüsanten Aufsatz vorgeführt.

Man sieht: Bevor man ans Angleichen geht, sollte man nachsehen, ob sich überhaupt eines der vier Gebiete in einem Zustand befindet, der unserer heutigen Sicht der Naturwissenschaft entspricht. Tatsächlich kann man das von der Elektrizitätslehre sagen. Wir wollen daher den Aufbau von Mechanik, Wärmelehre und Stofflehre so einrichten, dass diese Gebiete der gegenwärtigen Elektrizitätslehre ähnlich werden. Dazu gehört nicht nur, dass wir den Ablauf des Unterrichts, also die Reihenfolge, in der Größen eingeführt und Gleichungen abgeleitet werden, aufeinander abstimmen, sondern dass wir auch ähnliche Modellvorstellungen verwenden. Dieses Angleichen der Modellvorstellungen ist es vor allem, was das Lernen dann so viel ökonomischer macht. Außerdem gewinnen aber die drei angepassten Gebiete auch einzeln an Klarheit. Man hat also einen doppelten Nutzen.

### 4 Fehlende Größen

Wir wollen die Analogie noch in einem anderen Licht betrachten. Bekanntlich kommen einige der Größen der Tab. 1 im Unterricht nicht oder fast nicht vor: die Entropie, der Entropiestrom und das chemische Potenzial. Tab. 2 gibt noch mal die ersten drei Spalten von Tab. 1 wieder, nur wurden hier Entropie und chemisches Potenzial weggelassen. Die Tabelle erinnert jetzt an das Periodensystem der Elemente gegen Ende des 19. Jahrhunderts. Die Systematik war offensichtlich, und es war auch offensichtlich, dass einige Elemente noch fehlten. Es war klar, dass die Tabelle irgendwann einmal vervollständigt werden würde. Ähnlich steht es mit den Größen, die wir im Unterricht be-

<b>Mechanik</b>	$p$	$v$
<b>Elektrizitätslehre</b>	$Q$	$\varphi$
<b>Wärmelehre</b>		$T$
<b>Stofflehre</b>	$n$	

Tab. 2: Entropie  $S$  und chemisches Potenzial  $\mu$  kommen im Unterricht nicht vor.

<b>Mechanik</b>	$\frac{d\vec{p}}{dt} = \vec{F}$	$P = \vec{v} \cdot \vec{F}$
<b>Elektrizitätslehre</b>	$\frac{dQ}{dt} = I$	$P = UI$
<b>Wärmelehre</b>	$\frac{dS}{dt} = I_S + \Sigma_S$	$P = T I_S$
<b>Stofflehre</b>	$\frac{dn}{dt} = I_n + \Sigma_n$	$P = \mu I_n$

Tab. 3: Einige analoge Gleichungen

nutzen. Tab. 2 sagt uns, dass das Lehrgebäude noch unvollständig ist. Irgendwann müssen Entropie und chemisches Potenzial in den Unterrichtskanon aufgenommen werden.

Als Physiker mag man versucht sein abzuwiegeln: Das chemische Potenzial sei ja, wie es der Name deutlich macht, eine Größe der Chemie. Hier ist aber zu entgegnen, dass die Namenswahl nicht besonders glücklich war. Das chemische Potenzial ist für so genannte physikalische Vorgänge so wichtig, wie sein enger Verwandter, die Temperatur. (Die Verwandtschaft wird besonders deutlich in der statistischen Physik.) Man stelle sich ein Physikbuch vor, in dem die Temperatur nicht vorkommt! Einen ganz ähnlichen Mangel haben unsere Physikbücher tatsächlich: Es fehlt das chemische Potenzial. Das äußert sich zum Beispiel darin, dass wir nicht in der Lage sind, die Ursache oder den Antrieb für einen Phasenübergang zu beschreiben.

### 5 Einzelheiten der Analogie

Im Folgenden wird die Analogie in groben Zügen vorgestellt. Die wichtigsten der sich entsprechenden Größen wurden schon genannt. Im Mittelpunkt eines jeden der vier Gebiete steht die extensive oder mengenartige Größe aus Spalte 2 in Tab. 1. Von jeder von ihnen bildet man sich leicht eine konkrete Anschauung: Jede ist ein Mengenmaß für etwas, was für die mechanischen elektrischen, thermischen bzw. chemischen Vorgänge charakteristisch ist: Der Impuls ist das, was man umgangssprachlich als Schwung oder Elan bezeichnen würde. Man kann auch sagen, der Impuls ist die „Menge an Bewegung“, die in einem Körper steckt. *Newton* und *Descartes* nannten die Größe Bewegungsmenge. Die elektrische Ladung beschreibt das, was sich auf einer geladenen Konduktorkugel befindet und über eine Funkenstrecke in die Erde abfließt. Die Entropie ist das, was man umgangssprachlich Wärmemenge nennen würde. Ein großer und heißer Körper enthält viel En-

tropie, ein kleiner kalter enthält wenig. Bei der Stoffmenge sagt der Name schon recht deutlich, was sie bedeutet. Eigentlich wäre es geschickt, die Namen der Größen entsprechend zu wählen: Bewegungsmenge, Elektrizitätsmenge, Wärmemenge und Stoffmenge. Die Ströme könnte man entsprechend benennen: Bewegungsstrom, Elektrizitätsstrom, Wärmestrom und Stoffstrom. Da wir nicht die Freiheit haben, Größen umzubenennen, bleiben wir bei den etablierten Namen.

Die Spalten 2 und 3 von Tab. 3 enthalten Beispiele für Beziehungen zwischen den Größen. Die Gleichungen in Spalte 2 kann man als Bilanzgleichungen der entsprechenden extensiven Größen betrachten. Sie sagen uns, dass eine Änderung des Wertes der extensiven Größe in einem Raumbereich auf zwei Arten zustande kommen kann:

- durch Zu- oder Wegstrom durch die Oberfläche des Raumbereichs;
- durch Erzeugung oder Vernichtung.

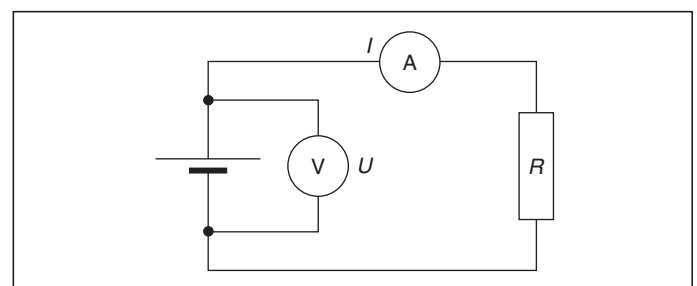
Bei Größen, die einem allgemeinen Erhaltungssatz genügen, ist der Erzeugungsterm  $\Sigma$  null.

Die vier Gleichungen in Spalte 3 beschreiben Energie Transporte: einen mechanischen (z. B. über eine Fahrradkette), einen elektrischen (über ein elektrisches Kabel), einen thermischen (durch „Wärmeleitung“) und einen chemischen (z. B. mit einem brennbaren Stoff). Man sieht, dass bei dieser Analogie die Energie in sich selbst übersetzt wird. Dasselbe gilt auch für die Zeit.

Einen weiteren Zusammenhang erläutern wir am Beispiel des vertrauten elektrischen Stroms. Für die Größen von Abb. 1 gilt  $I = U/R$ . Die Gleichung sagt uns, dass man die Größe  $I$  auf zweierlei Art beeinflussen kann. Entweder man verändert den Wert der Größe  $U$ , indem man an einem Knopf des Netzgerätes dreht, oder man verändert  $R$ , die Größe, die den kastenförmigen Gegenstand charakterisiert. Man deutet nun die Gleichung auf die folgende Art: Die Größe  $I$ , die „Stromstärke“, ist ein Maß für die Intensität eines gedachten Stroms. Der „Widerstand“ genannte Gegenstand stellt ein Hindernis für den Strom da, er setzt ihm einen Widerstand entgegen. Die Größe  $R$  ist ein Maß für diesen Widerstand. Außerdem ist die Stromstärke um so größer, je größer  $U$  ist. Man interpretiert  $U$  als ein Maß für einen Antrieb des Stroms, so wie eine Druckdifferenz ein Antrieb für einen Wasserstrom ist.

Diese Interpretation hat sich in der Elektrizitätslehre sehr bewährt, und sie hat sich so etabliert, dass wir geneigt sind zu vergessen, dass es sich nur um ein Modell handelt. In der Tat: Die Aussage, es fließe ein Strom elektrischer Ladung, kann nur eine einem Modell entlehnte Sprechweise sein, denn genau genommen kann elektrische Ladung so wenig fließen wie etwa eine Masse an einer Feder hängen kann. Ladung und Masse sind Variablen, also mathematische Ob-

Abb. 1: Man interpretiert  $I$  als ein Maß für die Intensität eines Stroms,  $U$  als Maß für den Antrieb des Stroms und  $R$  als Maß dafür, wie stark der Strom behindert wird.



<b>Mechanik</b>	Impuls fließt von selbst vom Körper höherer zum Körper niedrigerer Geschwindigkeit	Eine Impulspumpe (Motor) befördert den Impuls vom Körper niedrigerer zum Körper höherer Geschwindigkeit.
<b>Elektrizitätslehre</b>	Elektrische Ladung fließt von selbst vom Körper höheren zum Körper niedrigeren elektrischen Potentials.	Eine Elektrizitätspumpe (Batterie, Generator) befördert die elektrische Ladung von Stellen niedrigerem zu Stellen höheren elektrischen Potentials.
<b>Wärmelehre</b>	Entropie fließt von selbst vom Körper höherer zum Körper niedrigerer Temperatur.	Eine Entropiepumpe (Wärmepumpe) befördert Entropie von Stellen niedrigerer zu Stellen höherer Temperatur.
<b>Stofflehre</b>	Eine Reaktion läuft von selbst vom höheren zum niedrigeren chemischen Potentials.	Eine Reaktionspumpe (Elektrolysezelle) treibt eine Reaktion vom niedrigeren zum höheren chemischen Potenzial.

Tab. 4: Analoge Vorgänge

jekte, und als solche können sie weder fließen noch hängen. Das Modell von der fließenden Ladung, dem Antrieb und dem Widerstand hat sich nun so gut bewährt, dass wir es auch auf die anderen, analogen Bereiche, nämlich Mechanik, Wärmelehre und Chemie übertragen wollen.

Wir kommen damit zu der folgenden Deutung von Vorgängen der Mechanik, der Wärmelehre und der Chemie.

1. Die Kraft ist ein Maß für die Stärke eines Impulsstroms.
2. Bei einem Reibungsvorgang setzt das reibende Medium dem Impulsstrom einen Widerstand entgegen, bei einem Wärmetransport setzt der Wärmeleiter dem Entropiestrom einen Wärmewiderstand entgegen, bei einem Diffusionsvorgang wird der Stoffstrom durch einen Widerstand behindert und eine chemische Reaktion oder ein Phasenübergang hat einen Reaktionswiderstand zu überwinden.
3. Der Antrieb für einen Impulsstrom ist eine Geschwindigkeitsdifferenz, für einen Entropiestrom eine Temperaturdifferenz und für einen Diffusionsvorgang oder eine chemische Reaktion eine chemische Potenzialdifferenz.

Aus dieser Interpretation ergibt sich dann eine für jedes der vier Teilgebiete geltende einfache Regel:

- Impuls geht von selbst von einem Körper höherer zu einem Körper niedrigerer Geschwindigkeit.
- Elektrische Ladung fließt von selbst von einem Körper höheren zu einem Körper niedrigeren elektrischen Potentials.
- Entropie strömt von selbst vom wärmeren zum kälteren Körper.
- Stoffe diffundieren von selbst von Stellen höheren zu Stellen niedrigeren chemischen Potentials. Auch chemische Reaktionen laufen in Richtung abnehmenden chemischen Potentials.

Noch einmal zurück zur Elektrizität. Die elektrische Ladung folgt selbstständig dem elektrischen Potenzialgefälle, sie fließt den Potenzialberg hinunter. Damit sie in einem Stromkreis den Potenzialberg hinunter fließen kann, muss sie an einer anderen Stelle wieder hinaufgelangen. Das macht sie zwar nicht freiwillig, aber man kann sie unter Energieaufwand dazu zwingen. Man macht das bekanntlich mit einer Batterie, einem Generator, einem Thermoelement oder einer Solarzelle, man kann auch sagen: mit einer „Elektrizitätspumpe“.

Entsprechend kann man auch die anderen Ströme gegen ihre natürliche Tendenz den entsprechenden Potenzialberg hinaufzwingen: einen Impulsstrom vom langsamen zum schnellen Körper mit einer „Impulspumpe“, d. h. mit einem Motor, die Entropie von kalt nach warm mit einer „Entro-

piepumpe“, technisch Wärmepumpe genannt und eine chemische Reaktion mit einer „Reaktionspumpe“. In einem der folgenden Aufsätze wird gezeigt, dass eine galvanische Zelle ein Beispiel einer solchen Reaktionspumpe ist.

## 6 Schlussbemerkungen

Es geht in diesem Heft um Themen, die sowohl im Physik- als auch im Chemieunterricht wichtig sind. Die wichtigsten Lehren aus unseren Analogiebetrachtungen sind daher:

1. Die Wärmelehre wird so gestaltet, dass die Entropie im Mittelpunkt steht. Sie beginnt mit der Entropie. Die Entropie ist ein Maß dafür, was man umgangssprachlich Wärmemenge nennen würde. Eine Temperaturdifferenz erscheint als Antrieb für einen Entropiestrom.
2. Das chemische Potenzial wird ähnlich eingeführt wie das elektrische Potenzial. Eine chemische Potenzialdifferenz wirkt als Antrieb für Diffusionsströme, für Phasenübergänge und für „chemische“ Reaktionen.

Man könnte befürchten, dass durch die Einführung von zwei neuen Größen im Unterricht der Stoffumfang zunimmt. Tatsächlich ist das Gegenteil der Fall, denn gerade dadurch, dass einem Entropie und chemisches Potenzial zur Verfügung stehen, fallen gleich mehrere Größen, die man sonst braucht, und die sich nur als Ersatzkonstruktionen für die Entropie oder für das chemische Potenzial erweisen, weg, nämlich die so genannte „Wärme“ (die schwierige Prozessgröße, mit der kaum jemand umgehen kann), außerdem die thermodynamischen Potentiale Enthalpie, freie Energie und freie Enthalpie. Ebenfalls nicht gebraucht wird das Konzept der Energieentwertung sowie die damit zusammenhängende Exergie.

### Literatur

- [1] *F. Herrmann*: Der Karlsruher Physikkurs, Elektrodynamik, Unterrichtshilfen, Aulis Verlag Deubner, Köln 2002, 9.
- [2] *Gerthsen, Kneser, Vogel*: Physik, Springer-Verlag, Berlin 1977, 170 f.
- [3] *H. F. Olson*: Dynamical Analogies, N. J. van Nostrand, Princeton 1958.
- [4] *S. R. de Groot*: Thermodynamik irreversibler Prozesse, Bibliographisches Institut, Mannheim 1960.
- [5] *G. Falk und W. Ruppel*: Energie und Entropie, Springer, Berlin 1976.
- [6] *H. Fuchs*: A surrealistic tale of electricity, Am. J. Phys. 54, 907-9.

### Anschrift des Verfassers:

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

# Chemische Reaktionen – physikalisch beschrieben

M. Seitz, M. Steinbrenner, P. Zachmann

## 1 Einführung

Ein Ziel der aktuellen Bildungsreform ist es, Schülerinnen und Schülern Methoden zum „lebenslangen Lernen“ zu vermitteln, mit deren Hilfe sie sich auch nach ihrer Schulzeit selbstständig weitere Fähigkeiten und Kenntnisse aneignen können. Dies wird in den KMK-Bildungsstandards für das Fach Physik in einem Abschnitt zum Kompetenzbereich „Erkenntnisgewinnung“ berücksichtigt. Neben den experimentellen Fertigkeiten und der Fähigkeit, Schlüsse aus gewonnenen Daten zu ziehen, wird unter anderem auch gefordert, dass die Schülerinnen und Schüler Analogien und Modellvorstellungen zur Wissensgenerierung nutzen können. Der Einsatz von Analogien ist im Physikunterricht durchaus üblich, z. B. bei der Einführung von elektrischen Stromkreisen mit Hilfe von Wasserstromkreisen oder bei einfachen Vergleichen von elektrischem Feld und Gravitationsfeld. Allerdings wird die Möglichkeit, Analogien zwischen den verschiedenen Teilgebieten der Physik auszunutzen, in den meisten Lehrwerken für die Mittelstufenphysik nicht ausgeschöpft. In der Regel stehen die einzelnen Gebiete der Physik doch relativ unabhängig nebeneinander. Dabei bieten gerade die Querverbindungen die Chance für ein tiefergehendes Verständnis und auch für eine Straffung des Lernstoffes. Wie sich Strukturen und Analogien zwischen den einzelnen Gebieten der Physik vermitteln lassen, findet man z. B. im KPK [1] und den LEU-Heften von *F. Kranzinger* [2] und *D. Plappert* [3].

In vielen Schulbüchern für das Fach Physik ist es üblich, neue physikalische Größen entweder über andere, dem Schüler möglichst bekannte Größen zu definieren oder aber über eine Messvorschrift festzulegen. Wir sind der Meinung, dass man bekannte Analogien und Strukturen auch nutzen darf, um auf anschauliche Art und Weise physikalische Größen einzuführen. An dieser Stelle wollen wir zeigen, wie sich Analogien zwischen der Elektrizitätslehre und der physikalischen Chemie nutzen lassen, um auch im Physikunterricht einen schnellen Überblick über den Antrieb chemischer Reaktionen, die damit erzielbare „Energiegewinnung“ und die Wärmebilanz zu bekommen. Eine ausführliche Darstellung des Unterrichtsgangs mit Praktika wird im LS-Heft NW 2 „Strukturen und Analogien – Antrieb chemischer Reaktionen“ [4] beschrieben.

Eine sehr effiziente Ordnungsstruktur, die sich in den verschiedenen Teilgebieten der Physik finden lässt, wird häufig als das „Strom-Antrieb-Konzept“ bezeichnet. Dieses Konzept findet z. B. seine Anwendung in der Analogie zwischen Strömungen von Wasser und elektrischen Strömen. Ein geeigneter experimenteller Aufbau dazu ist der Wasserkreislauf nach *D. Plappert* (Firma Conatex), mit dem sich im Unterricht die einander entsprechenden Phänomene und Größen verdeutlichen lassen, Abb. 1a und 1b.

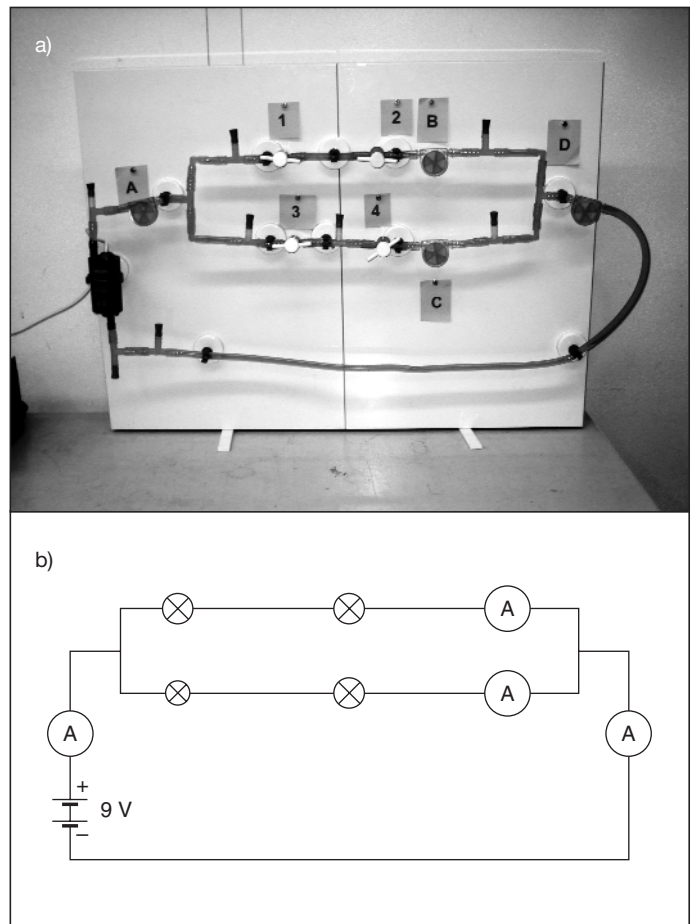


Abb. 1: Wasserkreislauf nach *D. Plappert* der Firma Conatex (a). An den Stellen A, B, C und D befinden sich Stromstärke-Messgeräte. Analoger elektrischer Stromkreis (b)

In beiden Kreisläufen fließt eine Art Stoff (Wasser bzw. elektrische Ladung), es gibt eine Pumpe (Wasserpumpe bzw. Batterie), die einen Antrieb (Druckunterschied bzw. elektrischer Potenzialunterschied) für einen entsprechenden Strom erzeugt. Die Stromstärke in den beiden Kreisläufen hängt aber nicht nur von der Höhe des Antriebs ab, sondern auch von Widerständen, die in den Kreisläufen durch Verengungen bzw. Lämpchen realisiert werden. Weitere Analogien zu Reihen- und Parallelschaltung und entsprechenden Messgeräten lassen sich leicht herausarbeiten.

## 2 Das Strom-Antrieb-Konzept in der Chemie

### 2.1 Der Antrieb chemischer Reaktionen

Das Strom-Antrieb-Konzept der Elektrizitätslehre lässt sich in weitere Gebiete der Naturwissenschaften übertragen, z. B.

in die Wärmelehre (siehe KPK [1], D. Plappert [3]) und in die Chemie. Im Rahmen des Chemieunterrichts hat man bei einer solchen Vorgehensweise die Möglichkeit, mit Schülerinnen und Schülern am Ende von Klasse 10 interessante Probleme zu behandeln, die sonst erst im Chemieunterricht der Sekundarstufe II angesprochen werden können:

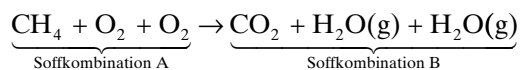
- Wodurch ist festgelegt, in welche Richtung chemische Reaktionen ablaufen können?
- Warum laufen manche Reaktionen sofort ab und bei anderen muss man „nachhelfen“?
- Wie viel elektrische Energie kann man gewinnen, wenn man eine bestimmte Reaktion in einer galvanischen Zelle ablaufen lässt?
- Woran liegt es, dass einige Reaktionen exotherm und andere endotherm verlaufen?

Im Unterricht haben die Schülerinnen und Schüler im Zusammenhang mit dem Strom-Antrieb-Konzept gelernt, dass Vorgänge einen Antrieb benötigen, um ablaufen zu können. Dies gilt nicht nur für Strömungen von Wasser oder von elektrischer Ladung, sondern auch für chemische Reaktionen. Die Größe, die für den Antrieb chemischer Reaktionen verantwortlich ist, wird chemisches Potenzial genannt, bekommt das Symbol  $\mu$  und die Einheit 1 G (Gibbs), zu Ehren ihres Erfinders *Josiah Willard Gibbs* (1839 – 1903). Diese Tatsachen werden im Unterricht mitgeteilt, die physikalische Größe „chemisches Potenzial“ wird also über eine Analogiebetrachtung eingeführt. Die Zahlenwerte für die chemischen Potentiale vieler Reinstoffe findet man in thermodynamischen Tabellenwerken (siehe z. B. [5]) unter dem Namen „molare freie Standardbildungsenthalpie“. Ein Beispiel für ein Messverfahren folgt an späterer Stelle im Unterricht. Im Unterricht kommt man zunächst mit wenigen Werten aus (siehe Tab. 2).

Es bietet sich an, den Umgang mit dem chemischen Potenzial anhand von Reaktionen zu veranschaulichen, die den Schülerinnen und Schülern vom Alltag oder aus der Technik bekannt sind, wie z. B. die Verbrennung von Methan (Hauptbestandteil des Erdgases):



In den thermodynamischen Tabellenwerken findet man nur die chemischen Potentiale von Reinstoffen. Um den Antrieb einer Reaktion zu bestimmen, an dem mehrere Edukte und Produkte beteiligt sind, schreiben wir die Reaktionsgleichung ausführlicher:



Das chemische Potenzial der Stoffkombinationen lässt sich nach der folgenden einfachen Regel bestimmen: Die chemischen Potenzialwerte der beteiligten Reinstoffe werden addiert. Ist ein Stoff mehrfach aufgeführt, so muss auch das chemische Potenzial mehrfach addiert werden:

$$\begin{aligned} \mu(\text{A}) &= \mu(\text{CH}_4) + \mu(\text{O}_2) + \mu(\text{O}_2) = \mu(\text{CH}_4) + 2 \mu(\text{O}_2) \\ &= -50,81 \text{ kG} + 2 \cdot 0,00 \text{ kG} = -50,81 \text{ kG} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mu(\text{B}) &= \mu(\text{CO}_2) + \mu(\text{H}_2\text{O} (\text{g})) + \mu(\text{H}_2\text{O} (\text{g})) \\ &= \mu(\text{CO}_2) + 2 \mu(\text{H}_2\text{O} (\text{g})) \\ &= -394,36 \text{ kG} + 2 (-228,56 \text{ kG}) = -851,54 \text{ kG} \end{aligned}$$

Das chemische Potenzial der Edukte (Stoffkombination A) ist – wie zu erwarten war – höher als das der Produkte

	Strömungen von Flüssigkeiten und Gasen	Elektrizitätslehre	Chemie
Antrieb	Druckunterschied	Elektrischer Potenzialunterschied (elektrische Spannung)	Chemischer Potenzialunterschied

Tab. 1: Der „Antrieb“ in verschiedenen Teilgebieten

Chemische Formel	Phase	$\mu$ in kG
Br <sup>-</sup>	aq	-103,97
CH <sub>4</sub>	g	-50,81
CO <sub>2</sub>	g	-394,36
Cl <sup>-</sup>	aq	-131,26
Cu	s	0,00
Cu <sup>2+</sup>	a	65,56
H <sub>2</sub>	g	0,00
H <sub>2</sub> O	l	-237,18
H <sub>2</sub> O	g	-228,59
H <sub>3</sub> O <sup>+</sup>	aq	-237,18
I <sup>-</sup>	aq	-51,59
Mg	s	0,00
Mg <sup>2+</sup>	aq	-456,01
NaHCO <sub>3</sub>	s	-851,86
NaCl	aq	-384,04
O <sub>2</sub>	g	0,00
Zn	s	0,00
Zn <sup>2+</sup>	aq	-147,03
ZnBr <sub>2</sub>	aq	-354,97

Tab. 2: Werte des chemischen Potentials bei Standardbedingungen

(Stoffkombination B). Die Reaktion läuft daher unter Standardbedingungen von links nach rechts ab.

Allgemein gilt:

**$\mu(\text{A}) > \mu(\text{B})$ : Stoffkombination A verschwindet, B entsteht.**

**$\mu(\text{B}) > \mu(\text{A})$ : Stoffkombination B verschwindet, A entsteht.**

Die chemische Potenzialdifferenz  $\Delta\mu = \mu(\text{A}) - \mu(\text{B})$  ist ein Antrieb für eine Reaktion  $\text{A} \rightarrow \text{B}$ . Ist  $\mu(\text{A}) > \mu(\text{B})$ , also  $\Delta\mu$  positiv, so kann die Reaktion  $\text{A} \rightarrow \text{B}$  ablaufen.

Damit die Schülerinnen und Schüler Vertrauen in den Umgang mit dem chemischen Potenzial bekommen, werden weitere aus dem täglichen Leben oder aus dem Chemieunterricht bekannte Reaktionen betrachtet und die Werte der chemischen Potentiale der Edukte und der Produkte verglichen. Hier bieten sich z. B. an:

- die Knallgasreaktion
- das Rosten von Eisen oder auch das "Nichtrosteln" von Gold oder Platin
- Verbrennen von Kohle, Schwefel, Benzin oder Alkohol
- Reaktion zwischen Kalk und Säure (Entkalken)
- Reaktionen von Metallen mit Säuren: Eisen und Salzsäure reagieren miteinander, Platin und Salzsäure hingegen reagieren nicht.
- Reaktionen von Metallen mit Halogenen: z.B. von Natrium mit Chlor und Aluminium mit Brom.

## 2.2 Die „Stromstärke“ bei chemischen Reaktionen

Um die Analogie zur Elektrizitätslehre weiter ausbauen zu können, benötigen wir eine Art „Stromstärke“ bei den chemischen Reaktionen. Dabei geht es in diesem Zusammen-

	Strömungen von Flüssigkeiten und Gasen	Elektrizitätslehre	Chemie
Stromstärke	z.B. Wasserstromstärke	elektrische Stromstärke	Umsatzrate

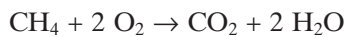
Tab. 3: Die „Stromstärke“ in verschiedenen Teilgebieten

hang nicht um räumliche Ströme, sondern um Stoffumwandlungen: Eine Stoffkombination A verschwindet und eine Stoffkombination B entsteht:

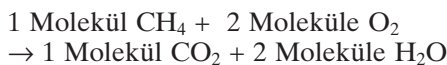


Eine solche Stoffumwandlung lässt sich als Strom im übertragenen Sinne auffassen, zu vergleichen etwa mit einem Geldstrom von einem deutschen Konto auf ein schweizer Konto, bei dem auch kein Geldtransporter von Deutschland in die Schweiz fährt. Statt dessen verschwinden auf dem deutschen Konto Euros und es tauchen auf dem schweizer Konto Franken wieder auf.

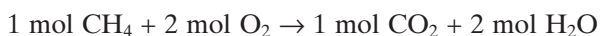
Zur quantitativen Beschreibung einer Stoffumwandlung braucht man eine mengenartige Größe, die angibt, wie viel bei einer bestimmten Reaktion umgesetzt wird. Wir nennen diese Größe „Reaktionsumsatz“ und erläutern sie z. B. anhand der Reaktion von Methan mit Sauerstoff:



Der kleinstmögliche Reaktionsumsatz wäre der folgende:



Weniger kann auf diese Weise nicht miteinander reagieren, deshalb bezeichnet man eine solche Reaktion als Elementarreaktion. Wenn nun  $6,02 \cdot 10^{23}$  solcher Elementarreaktionen stattfinden, so beträgt der „Reaktionsumsatz“ 1 mol, abgekürzt mit  $n(R) = 1 \text{ mol}$ . Es reagieren dann also:



Laufen  $12,04 \cdot 10^{23}$  Elementarreaktionen ab, so ist  $n(R) = 2 \text{ mol}$  usw.

Die Größe „Reaktionsumsatz“ wird demnach in der gleichen Maßeinheit angegeben wie die Stoffmenge. In der gängigen Literatur findet man für den „Reaktionsumsatz“ auch die Begriffe „Formelumsatz“, „Gleichungsumsatz“ oder „Reaktionslaufzahl“. Der Reaktionsumsatz ist diejenige Größe, die in unserer Analogiebetrachtung der elektrischen Ladung oder der Wassermenge entspricht. Die zur Stromstärke analoge Größe wird Umsatzrate  $I_{n(R)}$  genannt. Sie gibt an, wie groß der Reaktionsumsatz in einer bestimmten Zeiteinheit ist:  $I_{n(R)} = n(R)/t$ .

Tab. 4: Vergleich der chemischen Potenzialdifferenzen und der Umsatzraten bei den Reaktionen verschiedener Metalle mit Salzsäure

Reaktionsgleichung	Chemische Potenzialdifferenz	Umsatzrate
$\text{Mg} + 2 \text{H}_3\text{O}^+ + 2 \text{Cl}^- \rightarrow \text{Mg}^{2+} + 2 \text{Cl}^- + \text{H}_2 + 2 \text{H}_2\text{O}$	456,01 kG	groß
$\text{Zn} + 2 \text{H}_3\text{O}^+ + 2 \text{Cl}^- \rightarrow \text{Zn}^{2+} + 2 \text{Cl}^- + \text{H}_2 + 2 \text{H}_2\text{O}$	147,03 kG	mittel
$\text{Cu} + 2 \text{H}_3\text{O}^+ + 2 \text{Cl}^- \rightarrow \text{Cu}^{2+} + 2 \text{Cl}^- + \text{H}_2 + 2 \text{H}_2\text{O}$	-65,52 kG	Null

In der Elektrizitätslehre haben die Schülerinnen und Schüler gelernt, dass ein Strom durch ein bestimmtes Gerät umso stärker ist, je höher die angelegte Spannung, also der Antrieb, ist. Die Rolle der elektrischen Stromstärke übernimmt in der Chemie die Umsatzrate, die der elektrischen Spannung die „chemische Spannung“, also die chemische Potenzialdifferenz. Allein durch Analogiebetrachtung kann man formulieren:

**Die Umsatzrate einer chemischen Reaktion ist umso größer, je größer die chemische Potenzialdifferenz ist.**

Diese Vermutung lässt sich zum Beispiel mithilfe der Reaktionen von Metallen mit Salzsäure bestätigen:

### 2.3 Der Reaktionswiderstand

Die Unterrichtserfahrung zeigt, dass gute Schülerinnen und Schüler sehr schnell erkennen, dass die Umsatzrate einer Reaktion nicht nur von der chemischen Spannung abhängen kann, so wie auch die elektrische Stromstärke in einem Stromkreis nicht nur von der elektrischen Spannung abhängt. Z. B. ist die chemische Spannung bei der Reaktion von Methan mit Sauerstoff deutlich höher als die bei der Reaktion von Magnesium mit Salzsäure, aber die zweite Reaktion läuft im Gegensatz zur Erstgenannten sofort spontan ab, wenn man die Stoffe zusammenbringt. So wie es einen elektrischen Widerstand gibt, existiert offensichtlich auch ein „Reaktionswiderstand“. Der Widerstand einer Reaktion lässt sich auf verschiedene Weise ändern. Zunächst einmal verringert er sich stark, wenn man die Stoffe eng zusammenbringt, eventuell zerkleinert und miteinander vermischt. Bei vielen Reaktionen reicht aber eine gute Vermischung noch nicht aus, um sie in Gang zu setzen. Man benötigt daher weitere Methoden, den Reaktionswiderstand herabzusetzen. So kann man z. B. die Temperatur der beteiligten Stoffe erhöhen oder einen Katalysator einsetzen.

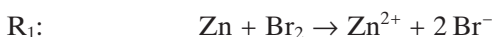
## 3 Energiebetrachtungen

Im Zusammenhang mit Strömungen von z. B. Luft haben die Schülerinnen und Schüler gelernt, dass Luft nie von allein von Stellen niedrigen Drucks zu Stellen höheren Drucks strömt. Ein platter Fahrradreifen füllt sich nicht von allein wieder, ein Luftballon bläst sich ebenfalls nicht von allein auf. Man benötigt eine Pumpe, um Luft oder Wasser zu einer Stelle höheren Drucks zu bringen.

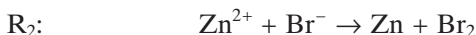
Die bereits behandelten Analogien legen nun die folgende Frage nahe: Kann man auch eine Reaktion entgegen ihrem „natürlichen“ Antrieb durchführen? Also so ablaufen lassen, dass sich die Produkte auf höherem Potenzial befinden als die Edukte? Gibt es so eine Art „Reaktionspumpe“? Es bietet sich an dieser Stelle im Unterricht an, dazu bereits behandelte Reaktionen zu betrachten, wie etwa die



Reaktion von Zink mit Brom zu Zinkbromid, die spontan abläuft:



Genauso wie man eine Wasserpumpe benötigt, um Wasser von Stellen niedrigen zu Stellen hohen Drucks zu bringen, brauchen wir für die Umkehrung der Reaktion eine Art „Reaktionspumpe“, in der aus einer Stoffkombination mit niedrigem chemischen Potenzial eine mit höherem entsteht:



Eine solche Reaktionspumpe ist eine Elektrolysezelle. Für die oben angegebene Reaktion  $R_2$  kann man ein U-Rohr mit zwei Kohleelektroden verwenden, die in eine Zinkbromidlösung eintauchen und an ein Netzgerät angeschlossen werden. Die Kathode (Minuspol) überzieht sich mit Zink, an der Anode (Pluspol) bildet sich Brom.

Der mit der elektrischen Ladung in die Elektrolysezelle fließende Energiestrom lässt sich berechnen nach:

$$P = (\varphi_A - \varphi_B) I = U I$$

Es folgt unter der Verwendung von  $P = E/t$  und  $I = Q/t$ :  $E = U Q$ .

Eine ganz analoge Gleichung gilt für den Zusammenhang zwischen der Energiestromstärke, der chemischen Potenzialdifferenz und der Umsatzrate:

$$P = (\mu_A - \mu_B) I_{n(R)} = \Delta\mu I_{n(R)}$$

Mit  $P = E/t$  und  $I_{n(R)} = n(R)/t$  folgt:  $E = \Delta\mu n(R)$ .

Wenn man aber elektrische Energie in die Elektrolysezelle hineinsteckt, um die Reaktion  $R_2$  zu erzwingen, sollte man beim Ablauf der umgekehrten Reaktion  $R_1$  diese Energiemenge auch wieder gewinnen können. Um das zu zeigen, verbindet man die Kohleelektroden, an welchen sich inzwischen Zink und Brom gebildet haben, mit einem „Energieverbraucher“, z. B. einem Elektromotor. Jetzt reagieren Zink und Brom wieder zu Zinkbromid; das heißt, wir haben die Umkehrung der „Reaktionspumpe“ erschaffen, bei welcher elektrische Energie entnommen werden kann. Eine solche Umkehrung der Elektrolysezelle nennt man galvanische Zelle (Abb. 3).

Es sei erwähnt, dass sich galvanische Zellen besonders gut eignen, um chemische Potenziale zu bestimmen. Da man elektrische Potenzialdifferenzen leicht und genau messen kann, lassen sich chemische Potenzialdifferenzen aufgrund folgender Energiebilanz leicht ermitteln:

$$E_{\text{hinein}} = E_{\text{heraus}}$$

$$\Delta\mu n(R) = U Q$$

#### 4 Endotherme und exotherme Reaktionen

Hat man im Physikunterricht bereits die Entropie eingeführt, so lässt sich an dieser Stelle im Unterricht auch klären, warum einige Reaktionen exotherm verlaufen und andere endotherm. Die Schülerinnen und Schüler sollten dafür Vorkenntnisse mitbringen, die sich zum Teil mithilfe des Entropie-Temperatur-Diagramms (Abb. 4) wiederholen lassen:

	Strömungen von Flüssigkeiten und Gasen	Elektrizitätslehre	Chemie
Gegen den „natürlichen“ Antrieb	Wasser und Luft strömen nicht von allein von Stellen niedrigen zu Stellen hohen Drucks. Man benötigt dazu eine Pumpe.	Elektrische Ladung strömt nicht von allein von Stellen niedrigen Potentials zu Stellen hohen Potentials. Man benötigt dazu eine „Elektrizitätspumpe“ (z. B. Batterie, Netzgerät).	Eine Reaktion läuft nicht von allein so ab, dass aus einer Stoffkombination mit niedrigerem chemischen Potenzial eine Stoffkombination mit höherem chemischen Potenzial entsteht. Man benötigt dafür eine „Reaktionspumpe“ (Elektrolysezelle).

Tab. 5: Um etwas gegen den „natürlichen“ Antrieb zu befördern, benötigt man eine Pumpe.

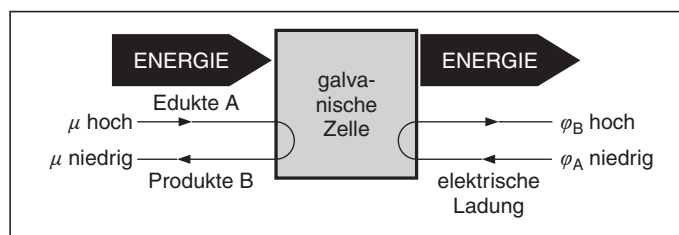
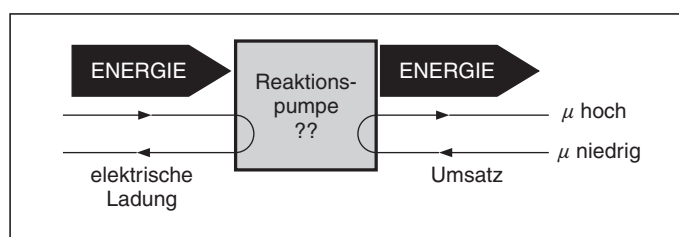


Abb. 2 (oben): Energieflussbild einer „Reaktionspumpe“

Abb. 3 (unten): Energieflussbild einer galvanischen Zelle

- Bei 0 K enthält ein Körper keine Entropie.
- Je höher die Temperatur ist, desto mehr Entropie steckt in einem Körper.
- Verschiedene Stoffe enthalten bei gleicher Temperatur verschieden viel Entropie.

Weiterhin sollten die Schülerinnen und Schüler im Rahmen eines Unterrichtsgangs zur Entropie die folgenden Kenntnisse erworben haben:

- Je größer die Masse bzw. die Stoffmenge ist, desto mehr Entropie steckt (bei gleicher Temperatur) in einem Körper.
- Entropie strömt so lange von Stellen hoher Temperatur zu Stellen niedriger Temperatur, bis die Temperatur an beiden Stellen gleich hoch ist. Anders ausgedrückt: Die Temperaturdifferenz ist ein Antrieb für einen Entropiestrom.
- Entropie ist ein „Energieträger“. Für die Energiemenge  $E$ , die mit einer bestimmten Entropiemenge  $S$  transportiert wird, gilt:  $E = T S$ .
- Entropie kann man erzeugen, aber nicht vernichten. Bei Reibungsvorgängen wird immer Entropie erzeugt. Um Entropie zu erzeugen, braucht man Energie.

Ausführlich beschriebene Unterrichtsgänge dazu findet man im LEU-Heft von *D. Plappert* [3] und im KPK, Band 2 [1]. In einer galvanischen Zelle wandeln sich Stoffe mit höherem chemischen Potenzial in Stoffe mit niedrigerem che-

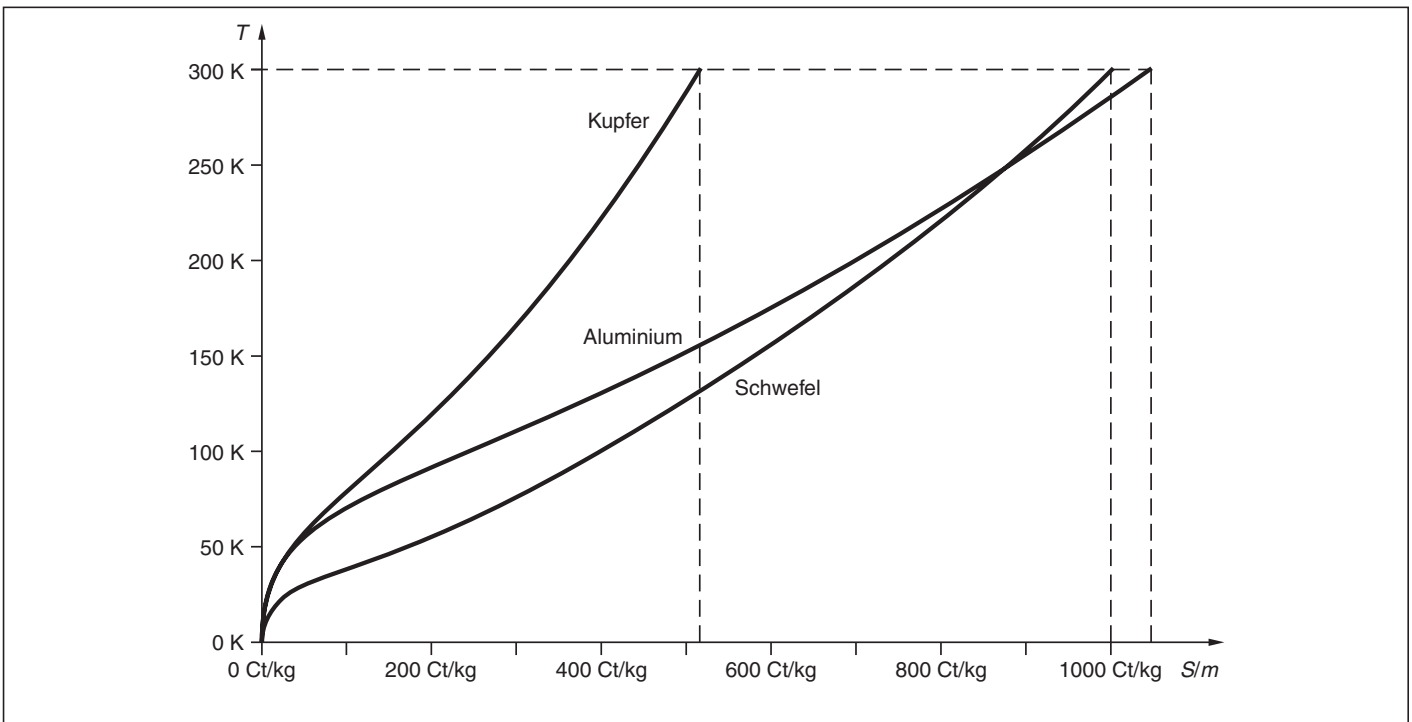


Abb. 4: Entropie-Temperatur-Zusammenhang für jeweils 1 kg von drei verschiedenen Stoffen

mischen Potenzial um. Die bei der chemischen Reaktion abgegebene Energie fließt mit der elektrischen Ladung aus der galvanischen Zelle heraus. Mit ihr kann man z. B. einen Elektromotor betreiben. Er stellt sich nun die Frage: wo bleibt die Energie, wenn diese Reaktion nicht in einer galvanischen Zelle, sondern völlig frei abläuft?

Wir nutzen wieder die Analogie zur Elektrizitätslehre: Wo bleibt die Energie, wenn die elektrische Ladung nicht über ein Gerät vom Pluspol zum Minuspol einer Batterie gelangt, sondern die Batterie mit einem Draht kurzgeschlossen wird? Der Draht wird heiß, d. h., die Energie wird zur Entropieerzeugung benötigt.

Bei frei ablaufenden chemischen Reaktionen verhält es sich ganz analog, auch bei diesen wird Entropie erzeugt, wobei gilt:

$$E = T S_{\text{erz}}$$

Wie bereits gezeigt, lässt sich die bei der Reaktion freiwerdende Energiemenge angeben als:

$$E = \Delta\mu n(R)$$

Aus der Energieerhaltung folgt:

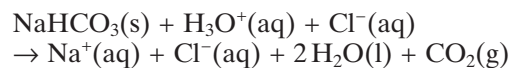
$$\Delta\mu n(R) = T S_{\text{erz}}$$

Damit ist es möglich, die bei einer frei ablaufenden Reaktion erzeugte Entropiemenge zu bestimmen:

$$S_{\text{erz}} = \frac{\Delta\mu n(R)}{T}$$

Geht man nun davon aus, dass bei jeder frei ablaufenden Reaktion Entropie erzeugt wird, so ist zunächst nicht klar, warum es auch Reaktionen gibt, bei denen die Produkte kälter sind als die Edukte. Das kann man erst verstehen, wenn man berücksichtigt, dass auch die Entropieinhalte der Edukte und der Produkte eine Rolle spielen.

Ein Beispiel für eine solche endotherme Reaktion ist die Reaktion von Natriumhydrogencarbonat mit Salzsäure:



Für einen Umsatz von 1 mol findet man mit Hilfe von Tab. 2:

$$\begin{aligned} S_{\text{Edukte}} &= 102,09 \text{ J/K} + 69,91 \text{ J/K} + 56,48 \text{ J/K} \\ &= 228,48 \text{ J/K} \\ S_{\text{erz}} &= 41570 \text{ G} \cdot 1 \text{ mol} / 298 \text{ K} \\ &= 139,50 \text{ J/K} \end{aligned}$$

Tab. 6: Entropiewerte von 1 mol eines Stoffes bei Standardbedingungen

Chemische Formel	Phase	S in J/K (pro Mol eines Stoffes)
Br <sup>-</sup>	aq	82,42
CH <sub>4</sub>	g	186,10
CO <sub>2</sub>	g	213,64
Cl <sup>-</sup>	aq	56,48
Cu	s	33,11
Cu <sup>2+</sup>	a	-99,58
H <sub>2</sub>	g	130,57
H <sub>2</sub> O	l	69,91
H <sub>2</sub> O	g	188,72
H <sub>3</sub> O <sup>+</sup>	aq	69,91
I <sup>-</sup>	aq	111,29
Mg	s	32,69
Mg <sup>2+</sup>	aq	-177,99
NaHCO <sub>3</sub>	s	102,09
NaCl	aq	115,47
O <sub>2</sub>	g	205,03
Zn	s	41,63
Zn <sup>2+</sup>	aq	-112,13
ZnBr <sub>2</sub>	aq	-206,47

Für die Produkte steht demnach zur Verfügung:

$$S_{\text{ges}} = S_{\text{Edukte}} + S_{\text{erz}} \\ = 228,48 \text{ J/K} + 139,50 \text{ J/K} = 367,98 \text{ J/K}$$

Damit die Produkte Zimmertemperatur annehmen, wird aber die folgende Entropiemenge benötigt:

$$S_{\text{Produkte}} = 58,99 \text{ J/K} + 56,48 \text{ J/K} + 2 \cdot 69,61 \text{ J/K} \\ + 213,64 \text{ J/K} \\ = 468,93 \text{ J/K}$$

Demnach steht für die Produkte nicht genug Entropie zur Verfügung, sie sind kälter als die Edukte. Pro mol Umsatz werden zusätzlich

$$S_{\text{zu}} = 468,93 \text{ J/K} - 367,98 \text{ J/K} = 100,95 \text{ J/K}$$

benötigt, die aus der Umgebung zufließen.

Die meisten chemischen Reaktionen verlaufen exotherm, d. h., die Produkte haben eine höhere Temperatur als die Edukte. Bei diesen Vorgängen steht den Produkten mehr Entropie zur Verfügung, als sie zum Erreichen der Zimmertemperatur benötigen.

#### Literatur

- [1] *Friedrich Herrmann*: Der Karlsruher Physikkurs, Sekundarstufe 1, Band 1, 2 und 3
- [2] *Franz Kranzinger*: Umsetzungsbeispiele zu den Bildungsstandards Physik (Impuls, elektrisches Potenzial), LEU-Heft Ph 38.1
- [3] *Dieter Plappert*: Umsetzungsbeispiele zu den Bildungsstandards Physik (Wahrnehmung und Messung, Strukturen und Analogien, Elektrizitätslehre, Entropie), LEU-Heft Ph 38.2
- [4] Landesinstitut für Schulentwicklung in Stuttgart: Knotenpunkte der Naturwissenschaften, Strukturen und Analogien, Antrieb chemischer Reaktionen, Heft NW 2
- [5] *Robert C. Weast*: Handbook of Chemistry and Physics, 1st Student Edition, CRC Press
- [6] *Georg Job*: Antrieb chemischer Reaktionen, MNU 57/4 (1. 6. 2004), S.223-230
- [7] *Dieter Plappert*: Physikalische Konzepte angewandt auf chemische Reaktionen, PdN-PhiS, 3/54, Jg. 2005, S. 13-17
- [8] *Petra Morawietz*: Wärmelehre und physikalische Chemie – ein Unterrichtsvorschlag für die Sekundarstufe I, Dissertation 1991
- [9] *G. H. Aylward, T.J.V. Findlay*: Datensammlung Chemie in SI-Einheiten, Wiley-VCH
- [10] *Claudia Synowietz, Klaus Schäfer*: Chemie-Kalender, Springer Verlag

#### Anschriften der Verfasser:

StD *Michael Seitz*, Theodor-Heuss-Gymnasium, Rappstr. 9, 75417 Mühlacker; OStR *Martin Steinbrenner*, StD'in *Petra Zachmann*, Bismarck-Gymnasium, Bismarckstr. 8, 76133 Karlsruhe

# Antrieb und Wärmebilanz bei Phasenübergängen

M. Pohlig

Gewöhnlich beschreibt man Phasenwechsel, im Wesentlichen Schmelzen und Sieden bzw. Erstarren und Kondensieren, mithilfe der Größe Energie. Dass dies oft mit Unbehagen geschieht, zeigt das folgende Zitat: „Wird einer Flüssigkeit Wärme<sup>1)</sup> zugeführt, so geht sie bei der Siedetemperatur  $\vartheta_v$  vom flüssigen in den gasförmigen Aggregatzustand über. Durch Wärmeabgabe geht das Gas bei der Kondensationstemperatur wieder in den flüssigen Aggregatzustand über. Während des Siedens und des Kondensierens ändert sich die Temperatur nicht. Es ändert sich aber die Struktur des Stoffes und seine innere Energie. Beim Sieden vergrößert sie sich, beim Kondensieren verkleinert sie sich entsprechend.“ [1]. Interessant an diesem Satz ist, was der Autor nicht sagt. Er vermeidet nämlich eine Auskunft über den Verbleib der beim Sieden zugeführten Energie. Es heißt, die innere Energie des Gases vergrößere sich, tatsächlich steckt aber nur ein Teil der beim Sieden zugeführten Energie in dem bei diesem Prozess entstandenen Gas. Der Satz ist demnach korrekt, kritisieren kann man aber, dass bei einem Leser der Eindruck entsteht, die beim Sieden zu-

geführte Energie stecke ganz im Gas, was falsch wäre, denn die Differenz zwischen zugeführter Energie und der Energie, die im Gas ist, befindet sich im Gravitationsfeld. Wir kommen später darauf zurück.

Anders als bei der herkömmlichen Beschreibung eines Phasenwechsels, bei der die Energie im Mittelpunkt steht, favorisieren wir die Größen chemisches Potenzial und Entropie, beschreiben ihn demnach als chemische Reaktion [2]. Schwierigkeiten, wie wir sie oben angedeutet haben, werden vermieden und zusätzlich lassen sich viele Phasenübergänge, die wir aus Natur und Technik kennen, leichter und umfassender erklären.

## 1 Chemisches Potenzial als Antrieb für einen Phasenwechsel

Der Begriff der Phase ist etwas allgemeiner gefasst als der Begriff des Aggregatzustands. Neben den Phasen *fest*, *flüssig* und *gasig* kennt die Physik noch weitere. So unterscheiden wir beim Wasserstoff die Phasen H und H<sub>2</sub>, oder beim Kohlenstoff die Phasen Graphit und Diamant. Über-

<sup>1)</sup> Mit Wärme ist hier die Energieaustauschform im Sinne von  $TdS$  gemeint.

gänge zwischen den Phasen fest – flüssig (Schmelzen bzw. Erstarren) und flüssig – gasig (Verdampfen bzw. Kondensieren) sind in der Regel unstetig<sup>2)</sup>. Die Übergänge können wir als chemische Reaktion beschreiben. Wie bei der Knallgasreaktion ( $2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$ ), bei der z. B. zwei Mol des Stoffes  $\text{H}_2$  und ein Mol des Stoffes  $\text{O}_2$  verschwinden und dafür ein Mol  $\text{H}_2\text{O}$  erzeugt wird, so verschwindet beim Schmelzen von Eis z. B. ein Mol Eis (Stoff A) und entsteht dafür ein Mol flüssiges Wasser (Stoff B). Die Reaktionsgleichung hat dabei die einfache Gestalt:  $\text{A} \rightarrow \text{B}$ . In allgemeiner Form geschrieben,  $\text{X}_{\text{Phase I}} \leftrightarrow \text{X}_{\text{Phase II}}$ , steht sie dann für einen Phasenwechsel, der in beide Richtungen ablaufen kann. In welche Richtung die Reaktion  $\text{X}_{\text{flüssig}} \leftrightarrow \text{X}_{\text{gasig}}$  ablaufen wird, hängt von den chemischen Potenzialen  $\mu_{\text{X,flüssig}}$  und  $\mu_{\text{X,gasig}}$  ab [3]. Wir unterscheiden die drei Fälle:

- $\mu_{\text{X,gasig}} > \mu_{\text{X,flüssig}}$
- $\mu_{\text{X,gasig}} < \mu_{\text{X,flüssig}}$
- $\mu_{\text{X,gasig}} = \mu_{\text{X,flüssig}}$

Im ersten Fall haben wir einen Antrieb für das Kondensieren, im zweiten Fall für das Verdampfen. Schließlich liegen im dritten Fall beide Phasen im chemischen Gleichgewicht, die (Netto)umsatzrate ist also 0. In Tab. 1 sind einige chemische Potenziale aufgelistet.

Um sagen zu können, ob ein Phasenübergang stattfinden wird, und wenn er stattfindet, in welche Richtung er ablaufen wird, müssen wir das Verhalten des chemischen Potenzials  $\mu_{\text{X}}$ , genauer  $\mu_{\text{X}}(T, p)$ , also seine Abhängigkeit von Temperatur und Druck genauer untersuchen. Bei Größen, deren Werte von zwei Parametern abhängen, unterteilt man die Vorgänge gerne in zwei Klassen. Diese Einteilung geschieht dadurch, dass man den Wert des einen Parameters variiert und den Wert des anderen festhält. Für uns ergeben sich also folgende zwei Fälle:

- $\mu_{\text{X}}(T, p = \text{const})$
- $\mu_{\text{X}}(T = \text{const}, p)$

**2 Phasenübergang durch Temperaturänderung bei konstantem Druck**

In diesem Abschnitt beschränken wir uns auf Prozesse, bei denen der Druck konstant gehalten wird. Dann gilt für alle Stoffe und für alle Phasen, dass das chemische Potenzial mit steigender Temperatur abnimmt<sup>5)</sup>. Bei Gasen ist die Abnahme generell stärker als bei Flüssigkeiten und bei

<sup>2)</sup> Eis ist hart und Wasser nicht. Beim Übergang von flüssig zu gasig, ändert sich die Dichte sprunghaft. Bei sehr hohem Druck wird dieser Übergang stetig. Stetige Übergänge können wir aber auch bei Normaldruck beobachten, wie das Beispiel Glas zeigt. Beim Erwärmen wird es stetig weicher, bis es schließlich flüssig ist.

<sup>3)</sup> Wir geben den Wert des chemischen Potenzials in Gibbs (G) an. Wenn wir die Stoffmenge in Mol angeben ist  $1\text{ G} = 1\text{ J/Mol}$

<sup>4)</sup> Wie das elektrische Potenzial hat auch das chemische Potenzial keinen absoluten Wert, d.h., in der Wahl des Nullpunktes sind wir frei. Dies gilt für alle intensiven Größen, deren dazugehörige extensive Größen Erhaltungsgrößen sind. Tatsächlich ist die zum chemischen Potenzial gehörende extensive Größe die Teilchenzahl  $N$ , die bei chemischen Reaktionen eine Erhaltungsgröße ist: Bei einer Knallgasreaktion etwa sind auf beiden Seiten der Reaktionsgleichung die Mengen der Wasserstoff- und Sauerstoffatome gleich. Also legt man für alle chemischen Elemente den Wert des chemischen Potenzials mit 0 G fest. Phasenübergänge sind nun Reaktionen, wo der Stoff erhalten bleibt, so dass wir für jeden Stoff für die am häufigsten vorkommende Phase auf 0 G setzen. Anders ist es bei der Entropie, sie ist keine Erhaltungsgröße. Für die zur Entropie gehörende intensive Größe, die Temperatur, können wir den Nullpunkt nicht frei wählen. Wir sprechen deshalb auch von der absoluten Temperatur.

Stoffe in verschiedenen Phasen	$\mu$ in kG <sup>3)</sup>
Wasser, H <sub>2</sub> O flüssig fest gasig	0 0,59 8,59
Kohlenstoffdioxid CO <sub>2</sub> gasig (1 bar) wässrige Lösung (1-molar)	0 8,36
Chlor, Cl <sub>2</sub> gasig (1bar) wässrige Lösung (1-molar)	0 6,9
Wasserstoff H <sub>2</sub> gasig (1 bar) H gasig (1 bar)	0 203,26
Sauerstoff O <sub>2</sub> gasig (1 bar) O gasig (1 bar) O <sub>3</sub> (Ozon) gasig (1 bar)	0 231,75 163,18
Kohlenstoff C Graphit Diamant	0 2,9
Schwefel S rhombisch monoklin	0 0,04
Zinn, Sn weiß grau	0 0,13

**Tab. 1: Chemische Potenziale für Stoffe in unterschiedlichen Phasen. Für die am häufigsten vorkommenden Phasen setzen wir den Wert des chemischen Potenzials auf 0 G <sup>4)</sup>.**

Flüssigkeiten wiederum stärker als bei Gasen<sup>6)</sup>. Wie zwei Geraden mit unterschiedlicher Steigung sich immer in einem Punkt schneiden, schneiden sich auch die Kurven  $\mu_{\text{X,flüssig}}(T, p = \text{const})$  und  $\mu_{\text{X,gasig}}(T, p = \text{const})$  in einem Punkt (siehe Abb. 1). Der Schnittpunkt der beiden Grafen kennzeichnet die Temperatur, bei der chemisches Gleichgewicht herrscht.

Da im Schnittpunkt beide chemischen Potenziale den gleichen Wert haben, gibt es für einen Phasenübergang keinen Antrieb. Eis und Wasser von 0° C existieren nebeneinander. Wir nennen diese Temperatur Schmelztemperatur. Entsprechendes gilt für die  $\mu_{\text{Wasserdampf}}-T$ - und  $\mu_{\text{Wasser}}-T$ -Kurven. Ihr Schnittpunkt bei 100 °C definiert das Gleichgewicht, in dem Wasser und Wasserdampf nebeneinander

<sup>5)</sup> Die Monotonie wird deutlich, wenn man die Maxwellbeziehung

$$-\left(\frac{\partial \mu}{\partial T}\right)_n = \left(\frac{\partial S}{\partial n}\right)_T$$

benutzt. Die rechte Seite ist immer positiv und damit die linke immer negativ.

<sup>6)</sup> Auch das erkennt man leichter, wenn man die Relationen nach Anwendung der Maxwellbeziehung betrachtet. Denn es ist

$$\left(\frac{\partial S}{\partial n}\right)_{T, \text{gasig}} > \left(\frac{\partial S}{\partial n}\right)_{T, \text{flüssig}}$$

und

$$\left(\frac{\partial S}{\partial n}\right)_{T, \text{flüssig}} > \left(\frac{\partial S}{\partial n}\right)_{T, \text{fest}}$$

existieren. Die Temperatur dieser Gleichgewichtslage heißt Siedetemperatur. In Tab. 2 sind für einige Stoffe Schmelz- und Siedetemperatur bei 1 bar aufgelistet.

### 3 Phasenübergang durch Druckänderung bei konstanter Temperatur

Wir untersuchen jetzt Phasenübergänge, bei denen der Druck sich ändert, die Temperatur aber gleich bleiben soll. Nimmt der Druck zu, nimmt auch das chemische Potenzial zu<sup>7)</sup>. Die Zunahme des chemischen Potenzials in der gasigen Phase ist um Größenordnungen größer als die Zunahme bei Flüssigkeiten, deshalb erscheint in einem gemeinsamen  $\mu$ - $p$ -Diagramm das chemische Potenzial der Flüssigkeit praktisch als eine Parallele zur  $p$ -Achse. Die Kurven schneiden sich wieder in einem Punkt. Beide Phasen befinden sich auch hier wieder in einem chemischen Gleichgewicht. Der Druck, der im Gleichgewicht herrscht, ist der Sättigungsdruck. Bei 20° C liegt er für Butan bei 2,01 bar. Die Tab. 3 zeigt weitere Sättigungsdrücke bei einer Temperatur von  $T = 293$  K.

### 4 Gleichgewichtskurve

In den Abschnitten 2 und 3 haben wir gesehen, dass die Gleichgewichtstemperatur vom Druck und der Gleichgewichtsdruck von der Temperatur abhängen. Für die Anwendung sind die Gleichgewichtskurven wichtig. Sie sind Diagramme, die die Gleichgewichtstemperaturen in Abhängigkeit vom Druck und Gleichgewichtsdrücke in Abhängigkeit von der Temperatur zeigen. Wir beschränken uns im Nachfolgenden auf die Phasenübergänge flüssig – gasig bei Wasser. Abb. 3 zeigt die Gleichgewichtskurve  $p$ - $\vartheta$  für Wasser. Die Darstellung wird häufig auch als Zustandsdiagramm des Wassers bezeichnet. Die  $p(\vartheta)$ -Kurve entspricht Zuständen, in denen Wasser und Eis im chemischen Gleichgewicht sind.

Die Messung der Funktion  $p(\vartheta)$  ist nicht schwer, wenn ein Behälter, der hohe Drücke aushält, zur Verfügung steht. Abb. 4 zeigt das Experiment, mit dessen Hilfe man die Werte für die Kurve in Abb. 3 erhält. Damit die Luft über der Flüssigkeit nicht stört, muss man sie zunächst abpumpen. Den Druck misst man dann in Abhängigkeit von der eingestellten Temperatur. Tab. 4 zeigt die Ergebnisse einer solchen Messung.

### 5 Wärmebilanz bei Phasenübergängen

Wie schon bei chemischen Reaktionen ist auch bei Phasenübergängen neben der Frage nach dem Antrieb auch die Wärmebilanz von großer Bedeutung. In einem einfachen Experiment bestimmt man die Entropiezunahme von Wasser beim Erwärmen. Zur Messung der Entropiemenge benutzt man z. B. einen 1000-Watt-Tauchsieder. Misst man zusätzlich die Temperatur, so steht uns über  $I_S = P/T$  die Stärke des Entropiestromes zur Verfügung. Wir messen in regelmäßigen Abständen, z. B. alle 10 Sekunden die Temperatur. Das Zeitintervall ist kurz genug, sodass wir, ohne große Fehler zu machen, annehmen dürfen, dass  $I_S$  kon-

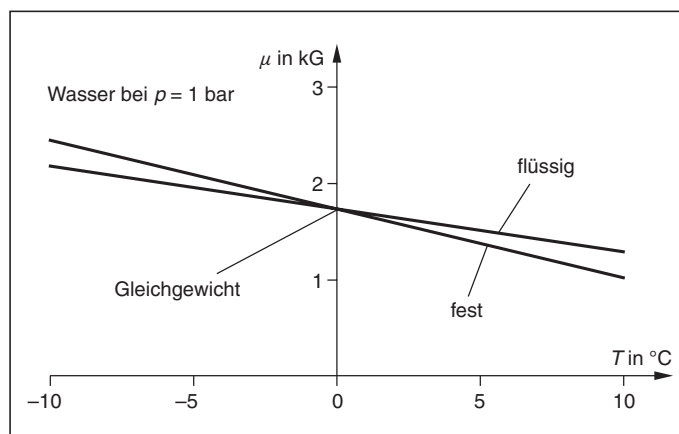


Abb. 1: Die  $\mu_{\text{Wasser}}-T$ - und  $\mu_{\text{Eis}}-T$ - Kurven schneiden sich in einem Punkt. Die Temperaturen sind in der Grafik in °C angegeben.

Stoff	Schmelztemperatur in °C	Siedetemperatur in °C
Eisen	1535	2880
Kupfer	1083	2590
Aluminium	660	2450
Wasser	0	100
Ethanol	-114,5	78,3
Sauerstoff	-218,8	-183,0
Stickstoff	-210,0	-195,8
Wasserstoff	-259,2	-252,2

Tab. 2: Gleichgewichtstemperaturen für die Phasenübergänge fest – flüssig und flüssig – gasig bei einem konstanten Druck von 1 bar.

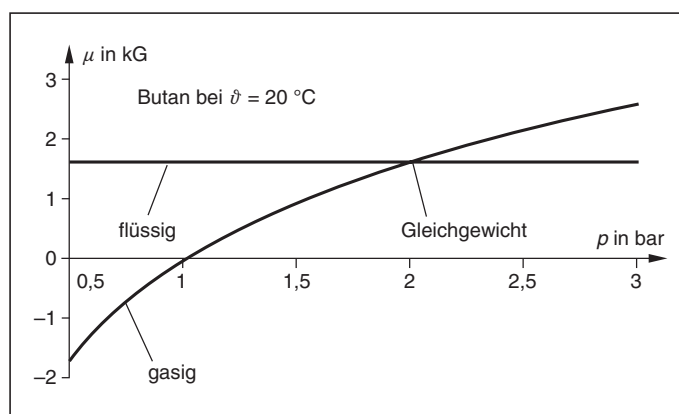


Abb. 2: Die  $\mu_{\text{Butan, fest}}-T$ - und  $\mu_{\text{Butan, flüssig}}-T$ -Kurven (bei 20 °C) schneiden sich in einem Punkt. Der Druck, bei dem sich die beiden Kurven schneiden, ist der Sättigungsdruck. Herrscht Sättigungsdruck, befinden sich beide Phasen im Gleichgewicht.

Stoff	Sättigungsdruck in bar
Wasser	0,023
Kohlenstoffdioxid	57,3
Quecksilber	0,00000163
Ethanol	0,0587
Propan	7,9
Butan	2,01

Tab. 3: Gleichgewichtsdruck für die Phasenübergänge flüssig – gasig bei der Temperatur  $T = 293$  K

<sup>7)</sup> Auch hier hilft wieder eine Maxwell'sche Beziehung:

$$\left(\frac{\partial \mu}{\partial p}\right)_n = \left(\frac{\partial V}{\partial n}\right)_p$$

Die rechte Seite ist immer positiv, also auch die linke.

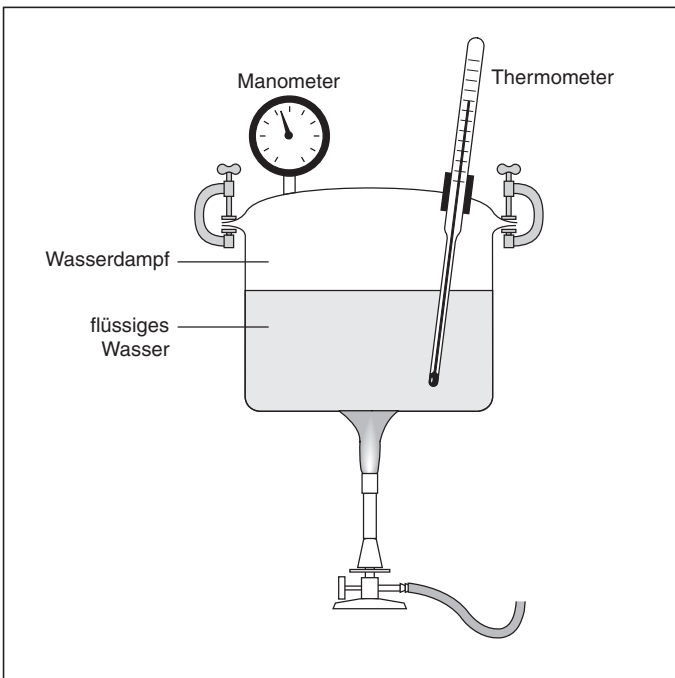
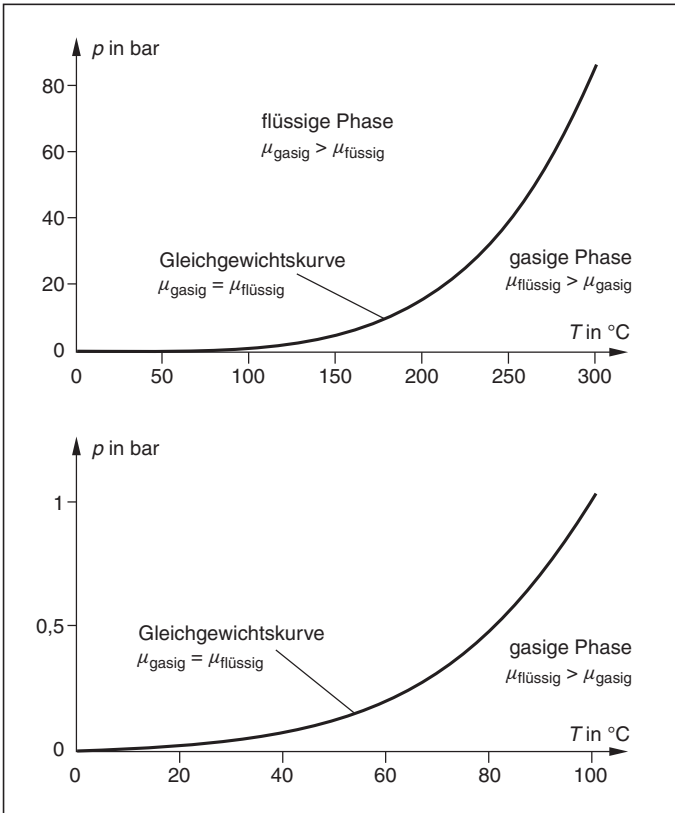


Abb. 3 (oben): Zustandsdiagramm des Wassers. Dargestellt ist das Diagramm in unterschiedlichen Intervallen und Maßstäben. Man erkennt, dass der Verlauf der Kurven in beiden Fällen im Prinzip gleich ist.

Abb. 4 (unten): Flüssiges Wasser und Wasserdampf im chemischen Gleichgewicht.

stant ist. Die in einem solchen Zeitintervall an das Wasser abgegebene Entropiemenge ist

$$\Delta S = I_S \Delta t = \frac{P}{T_M} \Delta t.$$

Dabei ist  $T_M$  die mittlere Temperatur des jeweiligen Zeitintervalls.

Sind 100 °C erreicht, so hat eine weitere Entropiezufuhr keine Temperaturerhöhung mehr zur Folge, das Wasser kocht. Das Wasser wird zu Wasserdampf und die weiter zugeführte Entropie geht in die gasige Phase des Wassers. Die Entropiemenge, die z. B. in 1 kg Wasserdampf von 100 °C mehr steckt als in 100 °C heißem Wasser, lässt sich noch leichter messen. Der Entropiestrom ist jetzt konstant

$$I_S = \frac{1000 \text{ W}}{373 \text{ K}} \approx 2,7 \frac{\text{Ct}}{\text{s}}.$$

In einem mit Schülern durchgeführten Experiment verdampften in 5 min = 300 s 140 g Wasser. Eine einfache Rechnung liefert eine Entropiemenge von 5786 Ct<sup>8)</sup>, die man benötigt, um 1 kg 100 °C heißes Wasser in 100 °C heißen Wasserdampf zu überführen. Dass dieser Wasserdampf weiter Entropie aufnehmen kann, zeigt wieder ein Experiment (Abb. 6). Hier wird dem beim Kochen entstehenden Wasserdampf Entropie zugeführt. Die Zunahme der Entropie zeigt sich in einem Ansteigen der Temperatur des Wasserdampfes.

Die Messungen des Experiments, wie es in Abb. 5 dargestellt ist, bestätigen Teile des Schaubildes in Abb. 7.

### 6 Sieden und Verdunsten

Wir setzen die Gültigkeit der Regel voraus, dass der Druck eines Gasgemisches gleich der Summe aus den Partialdrücken ist [2].

Wir betrachten Wasser in einem offenen Gefäß bei einer Temperatur von z. B. 20 °C. Unmittelbar über der Wasseroberfläche befindet sich Wasserdampf. Wasser und Wasserdampf befinden sich im Gleichgewicht. Der Wasserdampfdruck (Partialdruck) ist 0,02337 bar (vgl. Tab. 3). In diesem Bereich beträgt die Luftfeuchtigkeit 100%. Etwas weiter von der Wasseroberfläche entfernt ist die Luftfeuchtigkeit geringer. Ist sie z. B. 40%, so herrscht dort ein Wasserdampfdruck von  $0,4 \cdot 0,02337 \text{ bar} = 0,00935 \text{ bar}$ . Dieser Druckunterschied ist ein Antrieb für den Wasserdampf. Er diffundiert von der Oberfläche weg durch die Luft in Richtung Stellen niedrigeren Dampfdrucks und damit geringerer relativer Luftfeuchtigkeit. Wir sagen, das

<sup>8)</sup> Wir geben die Entropie in Carnot (Ct) an. Dabei ist  $1 \text{ Ct} = 1 \text{ J/K}$ . Die Einheit Carnot ist somit SI-kompatibel.

Tab. 4: Druck als Funktion der Temperatur im Gleichgewicht zwischen Wasser und Wasserdampf

$\vartheta$ in °C	$p$ in bar
0	0,006107
20	0,02337
40	0,07374
60	0,1992
80	0,4736
100	1,013
120	1,9853
140	3,614
160	6,18
180	10,027
200	15,551

Wasser verdunstet. Um den Dampfdruck über der Wasseroberfläche bei 0,02337 bar zu halten, muss Wasser aus dem Behälter in die gasige Phase nachgeliefert werden. Der Phasenwechsel kostet Entropie, die dann im Wasserdampf steckt. Als Entropielieferant kommt nur das verbleibende Wasser im Behälter in Frage. Betrachten wir den gleichen Vorgang bei höherer Wassertemperatur. Der Verdunstungsvorgang ist beschleunigt, denn bei höherer Temperatur ist der Gleichgewichtsdruck des Wasserdampfes über der Wasseroberfläche ebenfalls höher und damit der Antrieb für die Diffusion. Kocht schließlich das Wasser, so ist der Dampfdruck über der Oberfläche 1 bar. Es gibt also gar keine Luft mehr über der Wasseroberfläche. Der Wasserdampf diffundiert jetzt nicht mehr durch die Luft, sondern schiebt die Luft nach oben weg. An dieser Stelle erkennt man, warum bei der Beschreibung von Phasenübergängen der Entropie gegenüber der Energie Vorrang eingeräumt werden sollte. Neben der Entropie strömt auch Energie vom Wasser in den Wasserdampf. Während aber die Entropie im Wasserdampf bleibt, wird ein Teil der Energie dazu benutzt, den Wasserdampf und die Luft über der Wasserdampfatmosphäre anzuheben. Ein Teil der Energie steckt somit im Gravitationsfeld.

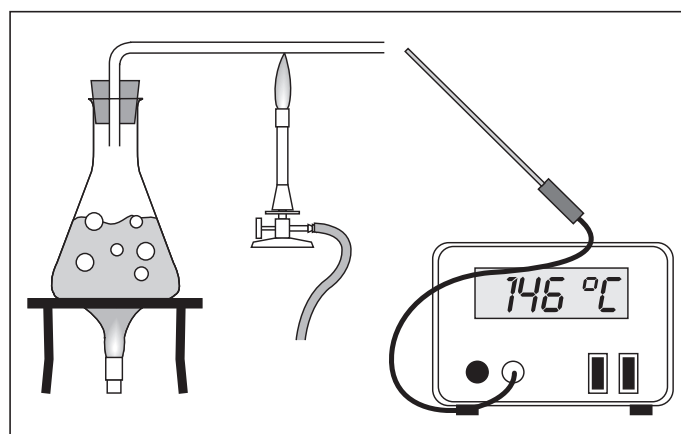
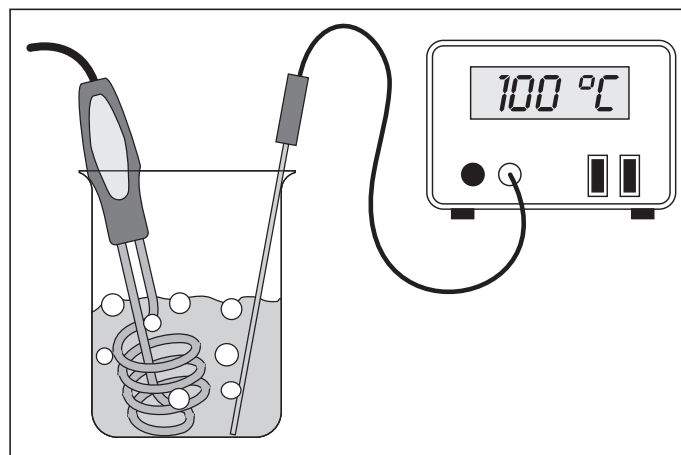


Abb. 5 (oben): Messung der Entropiezunahme in einem Liter Wasser bis zu einer Temperatur von 100 °C.

Abb. 6 (unten): Eine weitere Zufuhr von Entropie lässt die Temperatur des Wasserdampfes steigen über 100 °C steigen.

**7 Versuche zu Phasenübergängen in Natur und Technik**

**7.1 Wasser wird beim Kochen kälter**

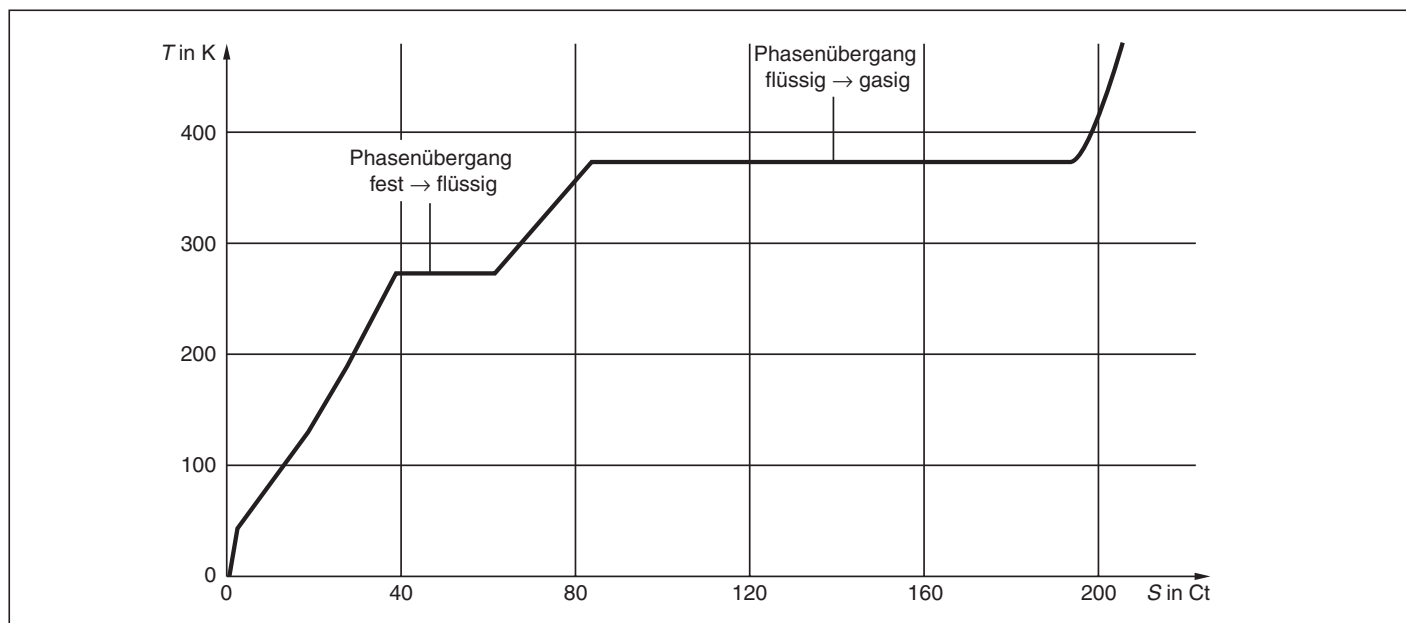
*Versuch:* Wasser mit Umgebungstemperatur<sup>9)</sup> befindet sich in einem Behälter, den man unter die Glocke einer Vakuumpumpe stellt. Ein Thermometer zeigt die Temperatur des Wassers an. Bald nach dem Einschalten beginnt das Wasser zu kochen. Gleichzeitig beobachtet man ein deutliches Sinken der Temperatur.

*Erklärung:* Zunächst wird Luft aus der Glocke herausgepumpt. Der Druck nimmt ab, sinkt aber nicht unter den Gleichgewichtsdruck des Wassers. Dieses beginnt nämlich

<sup>9)</sup> Am besten verwendet man für den Versuch abgekochtes und wieder auf Umgebungstemperatur abgekühltes Wasser.

zu kochen und liefert dabei gerade so viel Wasserdampf, wie durch weiteres Pumpen verloren geht. Der Zustand des Wassers und des Wasserdampfes entspricht einem durch die Wassertemperatur festgelegten Punkt auf der Gleichgewichtskurve in Abb. 3 b. Die für den beschriebenen Phasenwechsel nötige Entropie kommt aus dem Wasser, dessen Temperatur infolge dessen sinkt.

Abb. 7: Zusammenhang von Temperatur und Entropieinhalt bei 1 mol Wasser.



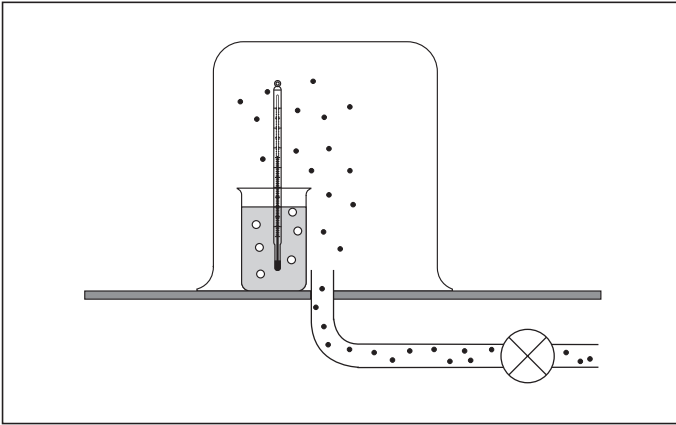


Abb. 8: Wasser kühlt beim Kochen ab.

Der Punkt, der den Zustand von Wasser und Wasserdampf beschreibt, wandert somit auf der Gleichgewichtskurve nach links. Damit das Wasser weiter kochen kann, muss der Druck weiter sinken.

## 7.2 Vereisungsspray zum Kühlen

*Versuch:* Ein Wattebausch wird an der Spitze eines digitalen Thermometers befestigt und mit Chloräthyl<sup>10)</sup> getränkt. Die Temperatur sinkt deutlich unter 0 °C. Der Vorgang wird beschleunigt, wenn man Thermometer samt Wattebausch in den Luftstrom eines Haarföhns hält. Benötigt wird dazu einen Haarföhn, den man bei ausgeschalteter Heizung betreiben kann.

*Erklärung:* Bei Umgebungstemperatur und Normaldruck ist Chloräthyl in gasiger Phase. Das flüssige Chloräthyl auf dem Wattebausch ist in einem Zustand, bei dem gilt  $\mu_{\text{gasig}} < \mu_{\text{flüssig}}$ . Der Reaktionsantrieb sorgt dafür, dass Chloräthyl in die gasige Phase übergeht. Die für den Phasenwechsel nötige Entropie kommt aus dem Thermometer selbst, das dabei abkühlt. Um den Wattebausch entsteht eine Chloräthylatmosphäre, in der Gleichgewichtsdruck herrscht. Wie in Abschnitt 6 beschrieben, verdunstet Chloräthyl. Man beschleunigt den Vorgang dadurch, dass man die Chloräthylatmosphäre durch einen Luftstrom beseitigt, das Gleichgewicht also stört. Auf diese Weise kann man Temperaturen unter -40 °C erreichen. Mit der Zeit bildet sich Reif auf dem Wattebausch, ein weiterer Phasenwechsel, den man mit den Schülern diskutiert.

## 7.3 Schwitzen kühlt

Jeder hat schon einmal die Erfahrung gemacht, dass man nach dem Schwimmen im Freibad zu frieren beginnt, wenn etwas Wind weht und man sich noch nicht abgetrocknet hat. Die Erklärung zum Versuch in Beispiel 7.2 erklärt nicht nur dieses Phänomen, sondern auch den kühlenden Effekt des Schwitzens<sup>11)</sup>.

## 7.4 Kältemischung

*Versuch:* In Eiswasser, also ein Gemisch von Eis und Wasser bei 0 °C, wird Salz gestreut. Die Temperatur des Gemisches sinkt.

*Erklärung:* Der Schnittpunkt der Graphen von  $\mu_{\text{flüssig}}(\vartheta)$

<sup>10)</sup> Das Chloräthyl befindet sich unter erhöhtem Druck in flüssiger Phase in einem Glas oder einer Spraydose.

<sup>11)</sup> Ein Beispiel, das man durch das gleiche Muster erklärt, ist das Blasen über die Oberfläche eines zu heißen Kaffees.

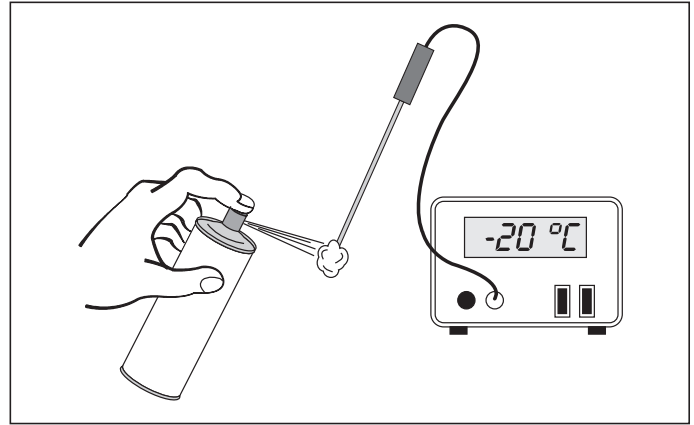


Abb. 9: Erzeugen von Temperaturen weit unter 0 °C.

mit  $\mu_{\text{fest}}(\vartheta)$  verschiebt sich nach links, also zu einer Temperatur unter 0 °C. Das Eis beginnt zu schmelzen. Die dafür benötigte Entropie wird dem Gemisch entzogen, das so lange abkühlt, bis es wieder im Gleichgewicht ist.

## 7.5 Wärmekissen

Um eine unterkühlte Flüssigkeit herzustellen, verwendet man z. B. Natriumacetattri-hydrat. Man bekommt es häufig in ein Kunststoffkissen eingeschweißt. Erhitzt man diesen kristallinen Stoff, wird er flüssig und bleibt es auch nach vorsichtigem Abkühlen. Bei Zimmertemperatur gilt für Natriumacetattri-hydrat  $\mu_{\text{fest}} > \mu_{\text{flüssig}}$ . Trotzdem findet der Phasenwechsel nicht statt. Wir sagen, die Flüssigkeit ist unterkühlt. Der Grund für den nicht stattfindenden Phasenwechsel ist der hohe Reaktionswiderstand. Wie man bei gehemmten chemischen Reaktionen den Reaktionswiderstand erniedrigen kann, können wir auch den Reaktionswiderstand des Phasenwechsels erniedrigen. In das Wärmekissen eingeschweißt ist ein kleines, gebogenes, unter Spannung stehendes Metallblättchen, das man durch Druckausübung schnappen lassen kann. Die beim Schnappen erzeugte Druckwelle senkt den Reaktionswiderstand lokal und der Phasenwechsel setzt ein. Die beim Phasenwechsel fest – flüssig benötigte und in der flüssigen Phase gespeicherte Entropie wird frei und heizt die Umgebung, also in erster Linie das fest werdende Natriumacetattri-hydrat selbst. Neben dem wärmenden Effekt des Kissens zeigt der Versuch auch, dass man mithilfe eines Phasenwechsels Entropie bequem transportieren kann. Das hilft uns das letzte Beispiel zu verstehen.

## 7.6 Kühltank

Ein Kühltank, allgemein eine Wärmepumpe, transportiert Entropie von Stellen tieferer zu Stellen höherer Temperatur. Für den Entropietransport benutzt man ein Material, Kühlmittel genannt, das auf seinem Weg durch die Wärmepumpe zwei Mal seine Phase wechselt.

In Kühltanks wird üblicherweise ein Kühlmittel verwendet, das bei einem Druck von 1 bar seine Siedetemperatur bei -30 °C, und bei einem Druck von 9 bar bei 40 °C hat. Wir begleiten eine Portion des Kühlmittels auf seinem Rundweg durch das Rohrsystem (Abb. 12). Um die Beschreibung zu vereinfachen, gehen wir davon aus, dass der Kühltank schon längere Zeit eingeschaltet ist; wir überspringen also den „Einschaltvorgang“. Die „Reise“ beginnt an der Stelle 1, dort also, wo das Kühlmittel in den linken Raum eintritt. Das Kühlmittel, noch flüssig und mit einem Druck von 1 bar, sollte eigentlich gasig sein, denn wie ge-



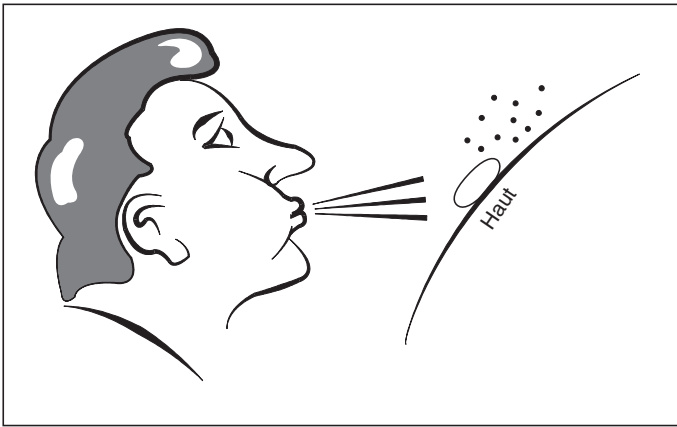


Abb. 10: Feuchte Haut kühlt. Der Effekt wird größer, wenn der Wind bläst.

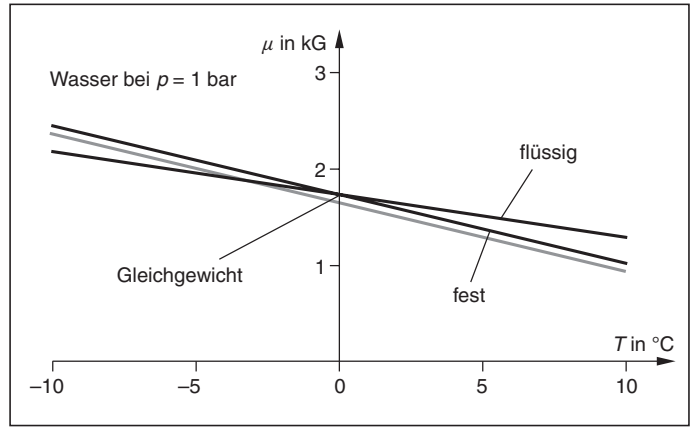


Abb. 11:  $\mu_{\text{flüssig}}$  sinkt bei Zugabe von Salz

sagt, seine Siedetemperatur liegt jetzt bei ca.  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Es herrscht also ein großer Antrieb für einen Phasenwechsel: Das Kühlmittel verdampft. Die für den Phasenwechsel nötige Entropie stammt im Wesentlichen aus dem Kühlmittel selbst, dessen Temperatur unter die Temperatur des linken Raumes sinkt. Dieser so entstandene Temperaturunterschied ist ein Antrieb für einen Entropiestrom aus dem linken Raum in das Kühlmittel. Das Rohrsystem, in dem der Phasenwechsel stattfindet, heißt Verdampfer. Der Phasenwechsel und die damit verbundene Entropieaufnahme sind an der Stelle 2 abgeschlossen. Gleich nach Eintritt in den rechten Raum wird in einem Kompressor der Druck des Kühlmittels auf ca. 9 bar erhöht. Die Kühlmitteltemperatur steigt dabei auf über  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ , ohne dass ein Phasenübergang stattfindet (Stelle 3). Wieder gibt es einen Antrieb für einen Entropiestrom. Dieses Mal strömt die Entropie aus dem über  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$  warmen Kühlmittel in die kühlere Umgebung des rechten Raumes. Die Temperatur des Kühlmittels sinkt bis zur Siedetemperatur von  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Das Kühlmittel geht in die flüssige Phase über und gibt die bei dem Phasenwechsel frei werdende Entropie an die Um-

gebung ab. Das Rohrsystem im rechten Raum heißt deshalb auch Verflüssiger oder Kondensator. Vor dem Wiedereintritt in den linken Raum (Stelle 4) wird der Druck der Kühlflüssigkeit in einem Reduzierventil (Drossel) wieder auf 1 bar erniedrigt. Der Kreis ist geschlossen und das Spiel beginnt von vorne. Die Bilanz zeigt: Entropie wird vom linken in den rechten Raum transportiert. Das Beladen bzw. Entladen des Kühlmittels mit Entropie geschieht in der Hauptsache bei Phasenübergängen.

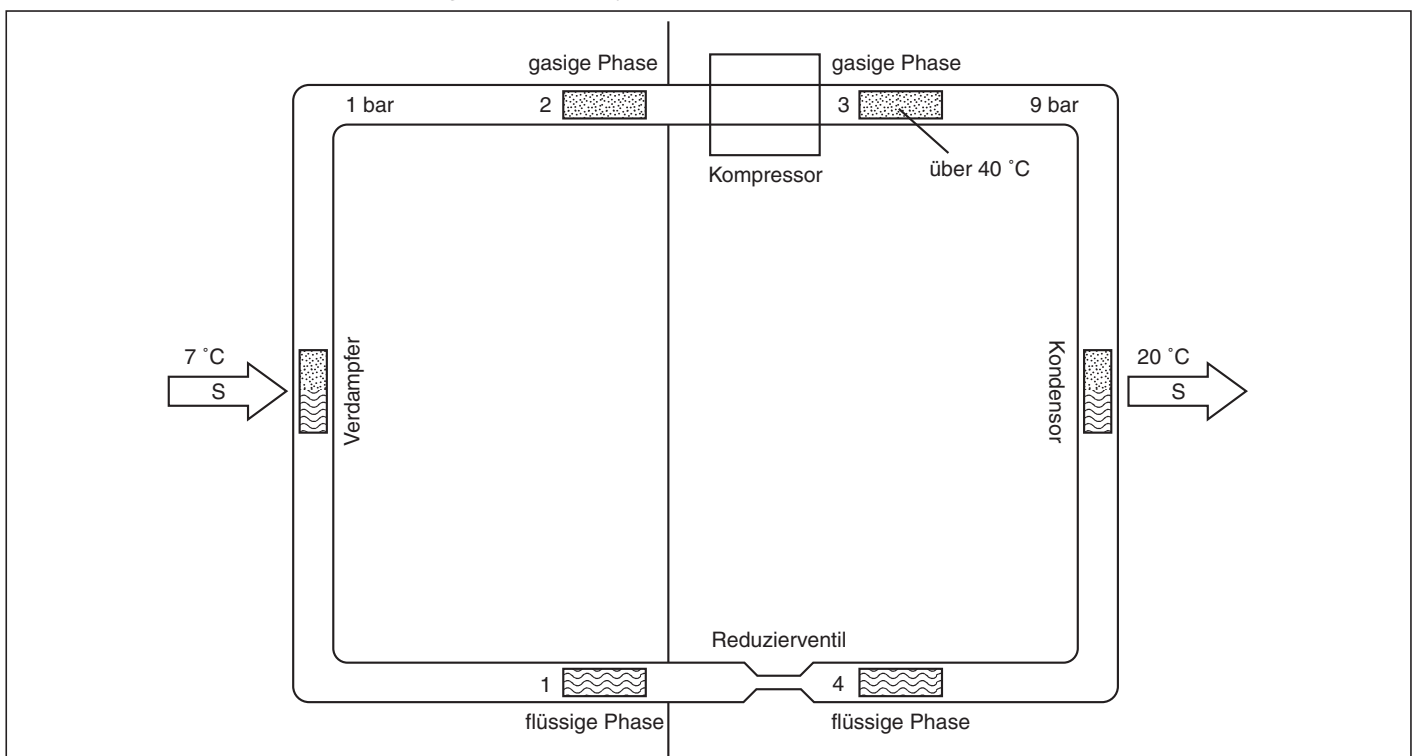
**Literatur**

- [1] Physik in der Oberstufe, Duden PAETEC, 2004
- [2] KPK Band 2 Thermodynamik, Ein Lehrbuch für die Sekundarstufe II, Aulis, 1999
- [3] M. Seitz, M. Steinbrenner, P. Zachmann: Chemische Reaktionen – physikalisch beschrieben, in diesem Heft.
- [4] G. Job: Neudarstellung der Wärmelehre, Akademische Verlagsgesellschaft Frankfurt am Main, 2001

**Anschrift des Verfassers**

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

Abb. 12: Ein „Kühlmittelpaket“ auf seinem Weg durch das Rohrsystem eines Kühlschranks



# Wie sieht ein Atom aus?

P. Bronner, H. Hauptmann u. F. Herrmann,

## 1 Bilder von Atomen

Das Aussehen eines Gegenstandes beinhaltet seine Größe, Gestalt und Farbe, seine Transparenz und seine Oberflächenbeschaffenheit. Ein Atom hat aber die meisten dieser Eigenschaften nicht. Man könnte also auf die Frage der Überschrift gleich antworten: Das Atom hat kein Aussehen. Dann würde man aber vergessen, dass man sonst gar kein Problem damit hat, sich ein Bild zu machen, oder Bilder zu machen von Dingen, die unsichtbar sind, oder die kein Aussehen haben. So enthält ein Atlas „Ansichten“ der Erdoberfläche, die es in Wirklichkeit gar nicht gibt. Wir finden im Atlas physische Karten, politische Karten, geologische, klimatologische Karten, Karten mit Waren- und mit Touristenströmen. Auch Physikbücher enthalten Bilder auf denen Dinge oder Erscheinungen „zu sehen“ sind, die in Wirklichkeit unsichtbar sind: den Fluss der elektrischen Ladung in einem Leiter, elektrische und magnetische Felder, die Temperaturverteilung in einem Gegenstand, Röntgenstrahlen, Infrarotstrahlen und vieles andere mehr. So können wir natürlich auch Bilder vom Atom erzeugen. Wir wollen daher im Folgenden nicht fragen: „Wie sieht ein Atom aus?“, sondern: „Was für Bilder kann man vom Atom erzeugen?“, und damit auch: „Was für ein Bild kann man sich vom Atom machen?“

Die Bilder des Atoms, die wir betrachten werden, sind, genauso wie die Bilder von elektrischen oder magnetischen Feldern, Schöpfungen des menschlichen Geistes. Und doch sind sie nicht reine Fiktion. Sie beruhen auf Zahlenwerten und diese wiederum stammen aus Messungen oder aus einer Theorie, die sich bewährt hat.

Manche physikalischen Erscheinungen kann man durch mehrere unterschiedliche Theorien beschreiben, und es kann sein, dass die eine Theorie andere Bilder nahe legt oder ermöglicht als die andere. Genau das ist bei der Quantentheorie der Fall: Es gibt zwei Versionen von ihr, die *Heisenberg'sche* Matrizen-Mechanik und die *Schrödinger'sche* Fassung, die mit Differenzialgleichungen operiert. Die Bilder, die wir hier zeigen, beruhen auf der *Schrödinger'schen* Version der Quantenphysik. Sie sind grafische Darstellungen der Lösungen der Schrödingergleichung.

Man sieht diesen Bildern viele Eigenschaften des Atoms unmittelbar an: seinen Platzbedarf, seinen Drehimpuls und seinen Magnetismus. Man sieht, warum das Atom in bestimmten Zuständen nicht strahlt und warum es in anderen strahlt. Man sieht, ob die Strahlung stark oder schwach ist, und ob sie linear oder zirkular polarisiert ist. Am Ende mag man sogar das Gefühl haben, man wisse doch, wie das Atom aussieht.

Wir beschränken uns hier auf das Wasserstoffatom, da die entsprechenden Lösungen der Schrödingergleichung analytisch angegeben werden können. Die Berechnung der Bilder und Animationen ist daher sehr bequem.

## 2 Das Verfahren

Wir betrachten die Schrödingergleichung für ein Eielektronensystem:

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \psi(\vec{r}, t) = \left( -\frac{\hbar^2}{2m} \Delta + V(\vec{r}) \right) \psi(\vec{r}, t).$$

Die Lösungen nennt man Wellenfunktionen. Wir definieren mithilfe der Wellenfunktion  $\psi(\vec{r}, t)$ , d. h., einer Lösung der Schrödingergleichung, zwei Ausdrücke. Erstens:

$$\rho := \psi^* \psi \quad (1)$$

und zweitens:

$$\vec{j} := \frac{\hbar^2}{2mi} (\psi^* \nabla \psi - \psi \nabla \psi^*). \quad (2)$$

Die Kenntnis der beiden Funktionen  $\rho(\vec{r}, t)$  und  $\vec{j}(\vec{r}, t)$  ist bei Eielektronensystemen zur Kenntnis der Wellenfunktion äquivalent. Jede Aussage, die aus der Wellenfunktion folgt, folgt also auch aus  $\rho(\vec{r}, t)$  und  $\vec{j}(\vec{r}, t)$ .

Unter Verwendung der Schrödingergleichung und der Ausdrücke (1) und (2) erhält man [1]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div} \vec{j} = 0. \quad (3)$$

Diese Gleichung hat die Form einer Kontinuitätsgleichung. Multipliziert man die Größen  $\rho$  und  $\vec{j}$  mit der Elektronenladung  $e$ :

$$\rho_e = e \rho,$$

$$\vec{j}_e = e \vec{j},$$

so kann man Gleichung (3) auch schreiben:

$$\frac{\partial \rho_e}{\partial t} + \operatorname{div} \vec{j}_e = 0. \quad (4)$$

Wenn man  $\rho$  und  $\vec{j}$  mit der Elektronenmasse  $m$  multipliziert, also:

$$\rho_m = m \rho,$$

$$\vec{j}_m = m \vec{j},$$

so erhält man aus (3):

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \operatorname{div} \vec{j}_m = 0. \quad (5)$$

Man kann nun Gleichung (4) als Kontinuitätsgleichung der elektrischen Ladung und Gleichung (5) als Kontinuitätsgleichung der Masse lesen.

Wir erinnern daran, welche Aussage eine Kontinuitätsgleichung macht: Wenn der Wert der Ladung (bzw. Masse) an einer Stelle abnimmt, so muss von dieser Stelle ein Ladungs- (bzw. Massen-)strom wegfließen. Nimmt die Ladung (bzw. Masse) zu, so muss ein entsprechender Strom hinfließen. Die Kontinuitätsgleichung bringt also einfach die Erhaltung einer im Raum verteilten extensiven Größe zum Ausdruck.

Diese Interpretation bedeutet, dass man sich vorstellt, die Hülle des Atoms bestehe aus einem kontinuierlich in der Umgebung des Kerns verteilten Stoff, der im Allgemeinen auch strömt. *Döring* [2] bezeichnet diesen gedachten Stoff als „Elektronenmaterie“. Wir wollen ihn etwas kürzer „Elektronium“ nennen.

Das Elektron besteht in diesem Modell aus Elektronium, so wie ein See aus Wasser oder eine Münze aus Metall. Das Modell ist so alt wie die Quantenmechanik selbst. Es wurde bereits von *Schrödinger* vorgeschlagen [3]. Man findet es aber auch in neueren Lehrbüchern zur Quantenphysik. Besondere Unterstützung hat es in jüngerer Zeit durch die Dichtefunktionaltheorie [4] erfahren.

Wir wollen nun untersuchen, wie sich unsere Dichte und Stromdichte für verschiedene Lösungstypen der Schrödingergleichung verhalten. Die Schrödingergleichung hat spezielle Lösungen der folgenden Gestalt:

$$\psi(\vec{r}, t) = u_k(\vec{r}) e^{-\frac{i}{\hbar} E_k t} \quad (6)$$

Die zugehörigen Zustände nennt man Eigenzustände. Die Lösungen und die entsprechenden Zustände sind durchnummeriert mit dem Index  $k$ . Zu jeder solchen Lösung gehört ein bestimmter Wert  $E_k$  der Energie, der Energie-Eigenwert. Man beachte, dass in (6) die Orts- und die Zeitabhängigkeit schön voneinander getrennt sind. Die Ortsabhängigkeit steckt nur im ersten Faktor  $u_k(\vec{r})$ , die Zeitabhängigkeit nur in der Exponentialfunktion.

Nun ist auch jede Linearkombination dieser Eigenzustandslösungen eine Lösung der Schrödingergleichung:

$$\psi(\vec{r}, t) = \sum_k a_k u_k(\vec{r}) e^{-\frac{i}{\hbar} E_k t}.$$

Die Zustände, die durch eine solche Summe beschrieben werden, nennt man Überlagerungszustände, denn sie stellen eine Überlagerung von Eigenzuständen dar.

Wenn man von den Lösungen der Schrödingergleichung spricht, so denkt man oft nur an die Eigenzustände. Der Grund dafür ist, dass diese sich von den Überlagerungszuständen in einer wichtigen Eigenschaft unterscheiden: Für die Eigenzustände sind Dichte und Stromdichte zeitunabhängig, für die Überlagerungszustände nicht. Wir wollen das kurz zeigen:

Für einen Eigenzustand ergibt sich für die Dichte des Elektroniums:

$$\begin{aligned} \rho(\vec{r}, t) &= u_k^*(\vec{r}) e^{\frac{i}{\hbar} E_k t} u_k(\vec{r}) e^{-\frac{i}{\hbar} E_k t} \\ &= u_k^*(\vec{r}) u_k(\vec{r}). \end{aligned}$$

Das Produkt der beiden Exponentialfunktionen ist gleich eins, die Zeitabhängigkeit verschwindet also oder in ande-

ren Worten: Die Dichte ist zeitlich konstant. Die Berechnung der Stromdichte ergibt ein entsprechendes Ergebnis. Auch sie ist zeitlich konstant (aber nicht unbedingt null). Man nennt daher die Eigenzustände auch stationäre Zustände.

Wir betrachten nun einen Überlagerungszustand. Wir nehmen dazu das einfachste Beispiel, das man sich denken kann: die Überlagerung von nur zwei Eigenzuständen. Die Summe besteht also aus nur zwei Summanden:

$$\psi(\vec{r}, t) = c_A \psi_A(\vec{r}, t) + c_B \psi_B(\vec{r}, t)$$

mit

$$\psi_A(\vec{r}, t) = u_A(\vec{r}) e^{-\frac{i}{\hbar} E_A t} \quad \text{und} \quad \psi_B(\vec{r}, t) = u_B(\vec{r}) e^{-\frac{i}{\hbar} E_B t}.$$

Da die Berechnung von  $\rho$  etwas umständlich ist, führen wir sie hier nicht aus, sondern geben nur das Ergebnis an. Es ist ein Ausdruck der Form

$$\rho(\vec{r}, t) = C_0(\vec{r}) + C_1(\vec{r}) \cos(\omega t) + C_2(\vec{r}) \sin(\omega t).$$

Man sieht, dass die Dichte zeitabhängig ist. Dabei ist  $\omega = (E_A - E_B)/\hbar$ . Wir sehen auch noch genauer: Die Dichte setzt sich zusammen aus einem nur ortsabhängigen Term, und einem Rest, der harmonisch schwingt. Auch hier gilt das Entsprechende für die Stromdichte. Diese Zustände sind also nicht-stationär.

### 3 Bilder und Animationen

Alle Bilder des Wasserstoffatoms, die wir zeigen und interpretieren, sind Darstellungen der Dichte und der Stromdichte des Elektroniums. Für stationäre Zustände werden wir meist stehende Bilder betrachten, während wir nicht-stationäre Zustände als Animationen darstellen. Im Text erscheinen allerdings nur einige wenige Abbildungen. Viel mehr Bilder sowie alle Animationen befinden sich auf der diesem Heft beiliegenden CD. Die CD enthält auch Programme, mit denen man Bilder und Animationen selbst berechnen kann.

#### 3.1 Die Gestalt des Atoms

Wir betrachten zunächst die Dichteverteilung des Elektroniums in verschiedenen stationären Zuständen, Abb. 1 (siehe auch wie alle folgenden Abbildungen farbig auf der letzten Umschlagseite). Zur Bezeichnungsweise: Ein Eigenzustand der Energie ist charakterisiert durch die drei Quantenzahlen  $n$ ,  $l$  und  $m$ . Die Bezeichnung (4, 3, 2) bedeutet entsprechend  $n = 4$ ,  $l = 3$  und  $m = 2$ . Der Spin wird in unseren Bildern nicht visualisiert. In den meisten Bildern entspricht einem bestimmten Dichtewert eine bestimmte Farbe. Blau bedeutet Dichte gleich Null, Rot ist maximale Dichte. Dabei ist die Zuordnung zwischen Dichtewert und Farbe für verschiedene Abbildungen im Allgemeinen unterschiedlich.

Man sieht diesen Bildern zunächst die Gestalt des Atoms in den verschiedenen Zuständen an. In manchen Zuständen ist das Atom kugelförmig, in anderen hat es eine geringere Symmetrie.

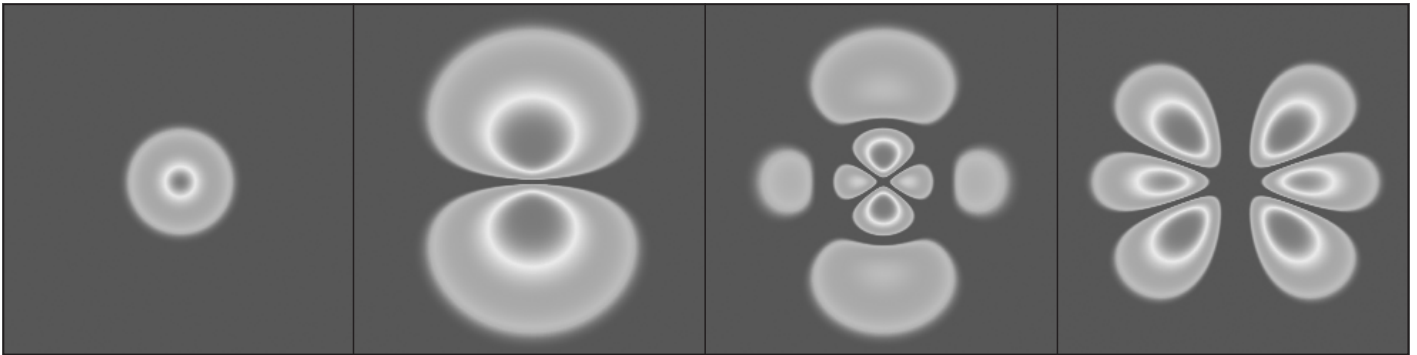


Abb. 1: Elektroniumdichte im H-Atom in den stationären Zuständen (1, 0, 0), (2, 1, 0), (4, 2, 0) und (6, 5, 3)

### 3.2 In stationären Zuständen strahlt das Atom nicht.

Bisher haben wir uns nur die Dichte des Elektroniums angesehen. Die Stromdichte ist nur für Zustände mit  $m \neq 0$  von null verschieden. Da die Stromdichte eine Vektorgroße ist, ist ihre Darstellung schwieriger. Abb. 2 zeigt für den Zustand (3,2,1) links oben die Dichte, darunter die Stromdichte, genauer: den Betrag der Stromdichte, in einer Schnittebene durch den Kern. Der Stromdichtevektor steht senkrecht zur Zeichenebene. Die Farbe Blau bedeutet, dass der Strom in die Bildebene hineinfließt, Rot bedeutet, dass er aus ihr herausfließt. Das rechte, große Teilbild zeigt noch eine Kombination von Dichte und Stromdichte. Die Stromdichte ist hier durch Pfeile angedeutet. Was kann man aus diesen Bildern lernen?

Aus der Tatsache, dass sowohl die Ladungsverteilung als auch die Stromverteilung zeitlich konstant sind, können wir schließen, dass das Atom keine Strahlung emittiert. Eine unbewegte Ladung hat ein statisches elektrisches Feld und ein konstanter Strom hat ein stationäres magnetisches Feld. Nach dem *Bohr*'schen Modell mit den umlaufenden Körperchen bekommen wir bekanntlich einen Widerspruch zur Elektrodynamik, denn die Körperchen müssten strahlen. Man setzt in diesem Fall die Elektrodynamik mithilfe des ersten *Bohr*'schen „Postulats“ kurzerhand außer Kraft. Wenn man das Elektroniummodell verwendet, braucht man dieses Postulat nicht. Man braucht die Elektrodynamik nicht außer Kraft zu setzen. Im Gegenteil: Genau sie sagt uns, dass das Atom nicht emittiert [2].

### 3.3 Drehimpuls und magnetisches Moment

Wir betrachten noch einmal die Stromdichte. In Zuständen mit  $m \neq 0$  existiert eine Strömung des Elektroniums mit kreisförmigen Stromlinien. Wir haben damit einen kreisförmigen Strom von Masse und von elektrischer Ladung. Dass ein kreisförmiger Massenstrom vorliegt, bedeutet aber, dass das System Drehimpuls hat. Diesen kann man aus der Massestromverteilung (die ja bekannt ist) berechnen. Man findet denselben Wert, den auch die quantenmechanische Eigenwertgleichung liefert. Das ist kein Wunder, denn schließlich enthält ja die Stromdichteverteilung, von der wir bei der Berechnung ausgehen, die Lösung der Schrödingergleichung. Man kann damit sagen, dass man den Bildern, die die Elektroniumstromdichte zeigen, den Drehimpuls des Atoms regelrecht ansieht.

Außer einem Massenstrom haben wir in den Zuständen mit  $m \neq 0$  auch noch einen elektrischen Kreisstrom. Ein solcher Strom bedeutet, dass das Atom ein magnetisches Moment hat. Auch dieses kann man aus der Stromverteilung berechnen. Und wieder stimmt das Ergebnis mit dem der Quantenmechanik überein. Wir sehen unseren Bildern also

auch das magnetische Moment des Atoms an. Genauer müsste man sagen: das Bahnmoment. Denn der Spin ist auf unseren Bildern nicht wiedergegeben.

### 3.4 Übergänge zwischen Zuständen

Bisher haben wir nur stationäre Zustände betrachtet. Wir kommen jetzt zu den nichtstationären Überlagerungszuständen. Dabei beschränken wir uns auf die Überlagerung von zwei Zuständen:

$$\psi(\vec{r}, t) = c_A \psi_A(\vec{r}, t) + c_B \psi_B(\vec{r}, t) \quad (7)$$

Wir hatten in Abschnitt 2 gesehen, dass für solche Zustände Dichte und Stromdichte mit der Kreisfrequenz

$$\omega = \frac{E_A - E_B}{\hbar}$$

oszillieren.

Als erstes Beispiel betrachten wir den Überlagerungszustand aus (2,1,0) und (1,0,0), wobei die beiden Teilzustände zu je 50% in der Überlagerung enthalten sein sollen. Die Dichte des Elektroniums im Überlagerungszustand ist zeitlich nicht konstant. Aus dieser Tatsache ziehen wir eine wichtige Lehre: In einem solchen Zustand kann das Atom nicht verharren. Wir haben ja eine schwingende Ladungsverteilung und auch eine schwingende Stromverteilung. Eine schwingende Ladungs- und Stromverteilung führt aber im Allgemeinen zur Emission einer elektromagnetischen Welle. Dadurch verliert das Atom Energie. Und das bedeutet, dass das Atom nicht in dem Zustand bleiben kann, den wir als Anfangszustand angenommen hatten. Es geht viel mehr nach und nach in den Zustand niedrigerer Energie über. Der Anteil von  $\psi_A(\vec{r}, t)$ , der der höheren Energie entspricht, nimmt ab, der von  $\psi_B(\vec{r}, t)$  nimmt zu. Für einen nicht stationären Zustand müssen also die Gewichtungsfaktoren in Gleichung (7) zeitabhängig sein:

$$\psi(\vec{r}, t) = c_A(t) \psi_A(\vec{r}, t) + c_B(t) \psi_B(\vec{r}, t)$$

Wir nehmen nun an, das Atom sei am Anfang in einem angeregten, stationären Zustand, d. h.,  $c_A = 1$  und  $c_B = 0$ . Der Übergang in den Zustand B kann nun allerdings ohne fremde Hilfe nicht beginnen. Tatsächlich verharret ein Atom auch

eine gewisse Zeit in einem solchen angeregten Zustand. Das Gleichgewicht ist aber prekär. Eine kleine Störung genügt, um den Übergang einzuleiten. Hierfür sorgen Stöße mit anderen Atomen oder die Fluktuationen des elektromagnetischen Feldes in seinem Grundzustand. Diese Beschreibung eines elektronischen Übergangs, bei der das Elektron quantenmechanisch, die Strahlung aber klassisch behandelt wird, nennt man „halbklassisch“.

Der Energieverlust pro Schwingungsperiode durch Abstrahlung ist nun allerdings außerordentlich gering. Der Übergang  $(2, 1, 0) \rightarrow (1, 0, 0)$  dauert etwa  $10^{-8}$  s, die Schwingungsdauer ist etwa  $10^{-15}$  s. Das Elektronium macht also während des Übergangs etwa  $10^7$  Schwingungen. Während dieser Zeit nimmt der Anteil von  $\psi_A(\vec{r}, t)$  von 100% auf 0% ab, der von  $\psi_B(\vec{r}, t)$  nimmt von 0% auf 100% zu.

Die gesamten  $10^7$  Schwingungen kann man natürlich nicht als Animation darstellen. Wenn in der Animation eine Schwingung eine Sekunde dauern würde, so würde man für den ganzen Übergang ungefähr ein halbes Jahr brauchen. Um den Vorgang mithilfe einer Animation sichtbar zu machen, wurden verschiedene Verfahren angewendet. Bei einigen Animationen überspringt die Darstellung größere Zeitintervalle. Man sieht also Teile des Übergangs zu verschiedenen Zeiten, und zwar am Anfang, dann nachdem etwa 20 % des Übergangs abgelaufen sind, dann nach 40%, 60 %, 80% und schließlich 100%. Noch eleganter ist eine andere Methode, die man als stroboskopisches Verfahren bezeichnen könnte: Es werden Momentaufnahmen des Übergangs aneinander gereiht, die in gleichmäßigen, größeren Zeitschritten aufgenommen werden. Die Zeitpunkte sind so gewählt, dass die Phase der Schwingung zwischen zwei aufeinander folgenden Bildern nur wenig zunimmt. So entsteht der Eindruck einer langsamen Schwingung. Abb. 3 (siehe letzte Umschlagseite) zeigt einige Momentaufnahmen aus dem Übergang  $(2, 1, 0) \rightarrow (1, 0, 0)$ .

Man sieht an der entsprechenden Animation, dass die Ladung oszilliert, und zwar ähnlich wie die einer makroskopischen Dipolantenne. Man kann also direkt schließen, dass das Atom bei diesem Übergang stark emittiert. Einen solchen Dipolcharakter hat die Ladungsschwingung immer dann, wenn für den Übergang  $\Delta l = \pm 1$  ist. Die entsprechenden Übergänge heißen Dipolübergänge. Bei einem Dipolübergang strahlt das Atom stark, und das bedeutet, dass der Übergang schnell abläuft. Man sagt auch, der Übergang sei erlaubt.

### 3.5 Langsame Übergänge

Wie schnell ein Übergang ist, d. h., wie schnell sich die Gewichtsfaktoren  $c_A$  und  $c_B$  ändern, hängt davon ab, wie stark die schwingende Ladung elektromagnetische Strahlung emittiert, und das hängt von der räumlichen Verteilung und der zeitlichen Änderung von Ladungs- und Stromdichte ab. Mit etwas Übung sieht man einer Animation der Funktion  $\rho(\vec{r}, t)$  an, ob der Übergang schnell, langsam oder gar nicht vonstatten geht. (Die Dauer der Animation ist natürlich kein Maß für die Dauer des Übergangs, denn wir haben ja die Stroboskopfrequenz willkürlich vorgegeben.)

Wir hatten gesehen, dass die Ladungsschwingung für  $\Delta l = \pm 1$  Dipolcharakter hat, und dass das Atom in diesem Fall stark emittiert – genau so wie eine makroskopische Dipolantenne. Ist  $\Delta l$  gleich 0 oder  $\pm 2$ , so hat die Schwingung Quadrupolcharakter, und das Atom strahlt viel schwächer – genau so wie es eine makroskopische Quadrupolantenne machen würde (d.h. zwei nebeneinander stehende, im Gegentakt

schwingende Dipolantennen). Abb. 4 zeigt einige Momentaufnahmen aus dem Übergang  $(5, 2, 0) \rightarrow (4, 0, 0)$ .

Ein interessanter Überlagerungszustand ist der, bei dem für beide beteiligten Zustände  $l = 0$  ist. Die Ladungsverteilung hat hier immer Kugelsymmetrie. Sie kann daher prinzipiell nicht emittieren. Ein Übergang kann nicht stattfinden.

### 3.6 Die Polarisation der Strahlung

Wenn die Quantenzahl  $m$  in Anfangs- und Endzustand denselben Wert hat (und  $\Delta l = \pm 1$  ist), so macht das Elektronium eine Hin- und Herbewegung. Es strahlt wie eine gewöhnliche Dipolantenne, d.h., es strahlt linear polarisiertes Licht ab. Das war der Fall für die Dipolübergänge, die wir betrachtet hatten. Wenn sich die magnetischen Quantenzahlen  $m$  der beteiligten Zustände aber um eins unterscheiden, wenn also  $\Delta m = \pm 1$  ist, so macht die Ladungsverteilung eine Art Kreisbewegung, Abb. 5 (auf der letzten Umschlagseite oder die entsprechende Animation auf der CD). Das Atom emittiert eine zirkular polarisierte Welle.

## 4 Schlussbemerkungen

Mithilfe der Wellenfunktion eines Eielektronensystems lassen sich zwei Größen  $\rho$  und  $\vec{j}$  definieren, die in einer Gleichung auftreten, welche man als Kontinuitätsgleichung lesen kann. Das legt nahe, diese Größen als Dichte bzw. Stromdichte der elektrischen Ladung bzw. der Masse eines im Raum verteilten gedachten Stoffes zu interpretieren. Aus der Verteilung dieses „Elektroniums“ und aus ihrer zeitlichen Änderung lassen sich mehrere Eigenschaften des Atoms mit Hilfe von bewährten physikalischen Gesetzen korrekt vorhersagen.

- Da Ladungsdichte und elektrische Stromdichte stationär sind, folgt, dass ein Atom in einem Eigenzustand der Energie nicht strahlt. Das erste *Bohr*'sche Postulat wird also nicht gebraucht.
- Aus der Massen- und Ladungsstromverteilung folgt der korrekte Wert des Bahndrehimpulses und des magnetischen Moments.
- Aus der Art wie die Ladungsverteilung eines Überlagerungszustandes schwingt, kann man ablesen, ob das Atom stark oder schwach oder gar nicht strahlt (ob ein Übergang erlaubt oder verboten ist).
- An der Schwingung der Ladungsverteilung erkennt man wie die emittierte Strahlung polarisiert ist.

### Literatur

- [1] W. Döring: Einführung in die Quantenmechanik, Vandenhoeck & Ruprecht, Göttingen 1960, S. 147 ff.
- [2] W. Döring: Atomphysik und Quantenmechanik, II. Die allgemeinen Gesetze, Walter de Gruyter, Berlin 1976, S. 20: „Die [...] Bohr'schen Postulate ergeben sich ohne Schwierigkeiten aus bekannten physikalischen Gesetzen, wenn man nicht das Partikelmodell, sondern das Wellenmodell für die Elektronen zugrunde legt, wenn man also annimmt, dass die Elektronenmaterie kontinuierlich verteilt ist mit einer Dichte proportional zum Absolutquadrat  $|\Psi|^2$  einer komplexen Wellenfunktion....“
- [3] E. Schrödinger: Quantisierung als Eigenwertproblem, Erste Mitteilung. Ann. Phys. 79 (1926), S. 361.
- [4] S. K. Gosh and B. M. Deb: Densities, density-functionals and electron fluids. Physics reports 92 (1982), S. 1 - 44.

### Anschrift der Verfasser:

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

# Kernreaktionen – chemisch beschrieben

F. Herrmann u. H. Hauptmann

## 1 Einleitung

Die Kernphysik macht im Vergleich zu anderen Bereichen der Physik einen etwas inkohärenten Eindruck. Es ist schwer, eine Systematik zu erkennen [1]. Die Schülerinnen und Schüler lernen viele Einzelfakten, aber sie lernen kaum Methoden, mit denen sie kernphysikalische Aufgaben lösen können. Offenbar tut sich die Physik schwer mit einem ihrer Teilgebiete. Eine Verbesserung dieses Zustandes ist aber durchaus möglich, und zwar durch Anwendung von Werkzeugen und Methoden der „Konkurrenz“, nämlich der Chemie. Tatsächlich haben die wichtigsten kernphysikalischen Vorgänge ein chemisches Analogon, und die entsprechenden Beschreibungsweisen und Problemlösungsverfahren haben sich in der Chemie längst bewährt. Im Folgenden wird zunächst gezeigt, welche chemischen Entsprechungen die verschiedenen kernphysikalischen Erscheinungen haben. Dann wird ein etwa 15-stündiger Unterrichtsgang skizziert, der die in der Chemie entwickelten Methoden und zum Teil auch die in der Chemie übliche Sprache verwendet. Der Unterricht ist Teil des Karlsruher Physikkurses [2]. Er wurde von zahlreichen Lehrerinnen und Lehrern erprobt. Die Autoren selbst haben ihn sowohl in zehnten als auch in zwölften und dreizehnten Klassen eingesetzt, und die Themen waren auch schon Gegenstand der Abiturprüfung.

## 2 Gemeinsamkeiten von Kernphysik und Chemie

### 2.1 Klassifizierung von Prozessen

In der Kernphysik werden oft Unterschiede zwischen Prozessen betont, während das Gemeinsame nicht angesprochen wird. Eine Folge davon ist, dass die Lernenden glauben, es mit verschiedenen Vorgängen zu tun zu haben, wo es sich tatsächlich nur um wenig unterschiedliche Varianten ein und desselben Prozessstyps handelt.

So unterscheidet man zwischen Radioaktivität, Kernzerfall, Kernspaltung, Kernfusion und Kernreaktion. Jemand, der in der Chemie geschult ist, sieht hier einfach verschiedene Varianten von Stoffumwandlungen. Er würde alle diese Vorgänge Kernreaktionen nennen und würde sie alle mit denselben Regeln und Gesetzen beschreiben. Dass in manchen der Prozesse nur ein Edukt und zwei Produktstoffe, in anderen zwei Edukte und zwei oder drei Produkte etc. auftreten, würde er als ein für das allgemeine Verständnis unwesentliches Detail betrachten. Noch weniger wichtig ist aus dieser Sicht die Unterteilung in natürliche und künstliche Radioaktivität.<sup>1)</sup>

### 2.2 Unterschiedliche Bezeichnungen für Konzepte in Kernphysik und Chemie

In der Kernphysik werden einige Konzepte eingeführt, ohne dass man darauf hinweist, dass es diese, oft unter anderem Namen, in der Chemie oder in der Physik der Atomhülle auch gibt.

Was in der Kernphysik ein Kernzerfall oder eine spontane Kernspaltung ist, ist bei der Atomhülle eine monomolekulare Reaktion. Was in der Kernphysik Kettenreaktion heißt, ist bei den Chemikern eine autokatalytische Reaktion. Was in der Kernphysik ein Prozess mit  $\gamma$ -Strahlung genannt wird, heißt in der Chemie Lumineszenz.

Was in der Kernphysik Aktivität genannt wird und die Maßeinheit Becquerel hat, heißt in der Chemie Reaktionsgeschwindigkeit oder Umsatzrate und wird in mol/s gemessen.

Man schildert in der Kernphysik das exponentielle Abklingen von Stoffmengen, als wäre es eine Besonderheit von Kernprozessen. Dabei sind solche Vorgänge in der Chemie gang und gäbe.

Dass man Kernreaktionen mit denselben Methoden beschleunigen kann, wie Reaktionen der Atomhülle, nämlich erstens durch Erhöhen der Temperatur – wie im Fusionsreaktor – und zweitens durch Zugabe eines Katalysators – wie im normalen Kernreaktor –, wird den Lernenden selten bewusst gemacht.

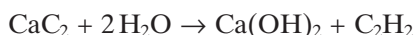
## 3 Die Ziele einer „chemischen“ Kernphysik

Die Ziele, die wir im Unterricht erreichen wollen, sind im Wesentlichen dieselben wie die der Chemie. Der einzige wichtige Unterschied ist, dass die stofflichen Veränderungen, mit denen sich die Chemie befasst, auf Änderungen der Atomhüllen beruhen, während Kernprozesse, wie der Name sagt, mit Änderungen der Kernstruktur zu tun haben.

Wir wollen an die wichtigsten Aufgaben der Chemie erinnern. Eines der zentralen Anliegen der Chemie ist die Synthese von Stoffen. Das erste was man macht, wenn man einen neuen Stoff herstellen will, ist, eine Reaktionsgleichung einzurichten. Was tut man dabei eigentlich? Wir er-

<sup>1)</sup>Die historischen Ursachen für diese Unterscheidungen sind leicht zu sehen: Die Vorgänge schienen ja tatsächlich ganz verschiedener Natur zu sein. Besonders deutlich ist das bei den so genannten radioaktiven Prozessen. Was man feststellte, war zunächst nicht eine Reaktion, d.h. das Verschwinden oder Auftauchen neuer Stoffe, sondern man beobachtete Strahlungen. Die Natur dieser Strahlungen war zunächst noch nicht bekannt. Es war also natürlich, solchen Strahlungen als erstes Namen zu geben:  $\alpha$ -,  $\beta$ - und  $\gamma$ -Strahlung. Erst später stellte sich heraus, dass es sich dabei um bekannte Stoffe handelte, und dass bei der Kernreaktion auch noch andere Stoffe entstanden waren, die sich nur nicht so auffällig bemerkbar gemacht hatten.

läutern es an einem Beispiel. Wir wollen Ethin herstellen. Wir finden, dass es so gehen könnte:



Was haben wir beim Einrichten der Gleichung gemacht? Wir haben dafür Sorge getragen, dass bestimmte Erhaltungssätze befriedigt werden. Für die Reaktionen der Chemie gilt die Erhaltung der Stoffmengen aller chemischen Elemente. Es gibt also grob 100 Erhaltungssätze. Diese wurden beim Einrichten der Gleichung beachtet. Außerdem wurde noch einem weiteren Erhaltungssatz Rechnung getragen – der Ladungserhaltung. Man sieht es etwa an der folgenden Reaktionsgleichung:



Die nächste Frage, die sich gewöhnlich stellt, ist: In welche Richtung läuft die Reaktion? Läuft sie in die Richtung, die wir möchten? Diese Frage beantwortet die Chemie, indem sie die Differenz der chemischen Potenziale von Edukten und Produkten berechnet [3].

Als Nächstes wird man danach fragen, wie schnell die Reaktion läuft. Läuft sie schnell genug für unsere Zwecke, wie kann man sie eventuell beschleunigen? Man fragt also nach dem Reaktionswiderstand, und danach, wie man ihn beeinflussen kann.

Schließlich fragt man noch nach der Energie- und der Wärmebilanz der Reaktion.

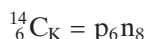
Genau diese Fragen sind es, die wir auch zu den wichtigen Fragen im Kernphysikunterricht machen wollen.

## 4 Der Unterricht

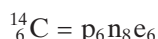
### 4.1 Die ersten Stunden im Überblick

Den ersten Teil des Kurses schildern wir nur in groben Zügen. Wir beginnen mit dem Aufbau der Kerne aus Protonen und Neutronen und mit den Eigenschaften dieser Bausteine. Die Begriffe Element, Nuklid und Isotop werden eingeführt. Die Schüler lernen die symbolische Darstellung von Nukliden kennen, also etwa  $^{14}_6\text{C}$  und  $^{14}_7\text{N}$ . Wenn wir nur die Kerne meinen, hängen wir noch den Index K an, also z. B.:  $^{14}_6\text{C}_K$ .

Wir führen aber noch eine andere Schreibweise ein, eine Darstellung, die sich an der Chemie orientiert – nämlich als Gehaltsformel. So schreiben wir für den C-14-Kern, der ja aus 6 Protonen (p) und 8 Neutronen (n) besteht:



Beim ganzen Atom kommen noch 6 Elektronen hinzu:



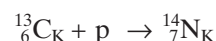
Die Schüler lernen, dass man Kerne, genauso wie die Hülle, anregen kann, und dass bei der Rückkehr in den Grundzustand ein Photon emittiert wird.

Sie erfahren auch schon gleich zu Anfang des Kernphysikunterrichts, dass Reaktionen stattfinden können, bei denen sich die Kerne verändern. Sie kennen von früher her die Gleichheit von Masse und Energie, und sie kennen den Begriff Ruhenergie.

Wir diskutieren dann die Möglichkeit, einen Kern auseinander zu nehmen. Um ein Proton oder ein Neutron abzutrennen, braucht man eine bestimmte Energiemenge. Die Schüler bekommen eine Tabelle, in der für jedes Nuklid die Trennenergie<sup>1)</sup> aufgeführt ist: die Energie, die man braucht, um den Kern des Nuklids vollständig, d. h. in alle seine einzelnen Protonen und Neutronen zu zerlegen.

### 4.2 Erhaltungsgrößen

Von hier an beschreiben wir den Unterricht etwas genauer. Es ist unser Ziel, Kernreaktionen zu beschreiben. Die Fragen, die wir stellen, sind denen ganz ähnlich, die sich die Chemiker stellen. Welche Reaktionen sind möglich? In welche Richtung läuft eine Reaktion? Wie kann man die Reaktionsgeschwindigkeit beeinflussen? Wie ist die Energiebilanz? Wir beginnen damit, dass wir daran erinnern, wie man eine chemische Reaktionsgleichung einrichtet, und dass man sich dabei die Erhaltung bestimmter Größen zunutze macht. Wir betrachten eine Kernreaktion, von der wir wissen, dass sie stattfinden kann:



und wir stellen fest, dass hier die Regel der Chemiker nicht gilt, derzufolge die Stoffmengen der Elemente links und rechts gleich sind. Welche Kernreaktionen sind denn nun erlaubt? Ist etwa jede beliebige Kernumwandlung möglich? Keineswegs! Die Beobachtung von Kernreaktionen hat gezeigt, dass manche Reaktionen möglich sind, viele andere aber nicht. Aus der systematischen Untersuchung solcher Reaktionen hat man geschlossen, dass auch für Kernreaktionen Erhaltungsgrößen zuständig sind. Zum einen muss auch hier die elektrische Ladung erhalten sein. Außerdem, so hat man festgestellt, sind noch zwei weitere Erhaltungsgrößen wirksam, die man bis dahin noch nicht kannte. Man hat sie erst durch das Studium von Kernreaktionen entdeckt. Man nennt sie die *baryonische Ladung* und die *leptonische Ladung*.

Für jeden Kern oder jedes andere Teilchen hat sowohl die baryonische als auch die leptonische Ladung einen bestimmten Wert. Die baryonische Ladung muss nun für die Stoffe auf der linken Seite der Reaktionsgleichung denselben Wert haben wie für die Stoffe auf der rechten Seite, und das Analoge muss für die leptonische Ladung gelten. Man sieht: Es ist genauso wie bei der elektrischen Ladung, für die die Gleichheit natürlich nach wie vor gelten muss.

- Bei chemischen Reaktionen sind die Anzahlen der Atome der Elemente und die elektrische Ladung Erhaltungsgrößen.
- Bei Kernreaktionen sind elektrische Ladung, baryonische Ladung und leptonische Ladung Erhaltungsgrößen.

Bevor wir unser Ziel, d. h. das Einrichten einer Reaktionsgleichung, weiter verfolgen, müssen wir unsere Kenntnisse über Elementarteilchen erweitern.

### 4.3 Teilchen und Antiteilchen

Uns waren als Bestandteile von Kern und Hülle bisher drei verschiedene Arten von elementaren Teilchen begegnet: die Elektronen, die Protonen und die Neutronen. Darüber hinaus kennen wir noch das Photon. Man hat nun außer

<sup>1)</sup> Tabelle der Trennenergien: <http://www.physikdidaktik.uni-karlsruhe.de/divers/trennenergien.pdf>

diesen vier Teilchen noch einige andere entdeckt. Die meisten von ihnen kommen aber in der Natur fast nicht vor. Sie werden vorwiegend künstlich erzeugt.

Die Betrachtung dieser neuen Teilchen scheint unsere Aufgabe zunächst komplizierter zu machen. Wir werden aber schnell sehen, dass sich am Ende eine Vereinfachung ergibt. Alle Teilchen, mit denen wir es zu tun haben werden, sind in Tab. 1 aufgeführt. Ihre Namen stehen in der linken Spalte. Wir wollen die verschiedenen Zeilen durchgehen.

**Die alten Bekannten**

Vier der Teilchen sind alte Bekannte: das Photon, das Elektron, das Proton und das Neutron.

**Das Neutrino**

Eigentlich sollte es auch ein alter Bekannter sein, denn die Welt ist voll davon. Es sind Teilchen, von denen sehr viele frei herumfliegen. Sie kommen vor allem von der Sonne. Man merkt von diesen Neutrinos so wenig, weil sie alle Materie fast ungehindert durchdringen. Es gibt daher fast keine Reaktion, mit der man sie nachweisen könnte. Die meisten der Sonnenneutrinos durchdringen die ganze Erde, ohne mit irgendeinem anderen Teilchen zu reagieren.

- *Neutrinos reagieren nur sehr schwach mit anderen Teilchen.*

**Antiteilchen**

Die Tabelle enthält noch vier weitere Teilchen. Die Namen dieser Teilchen beginnen alle mit dem Bestimmungswörtchen „Anti-“: das Antielektron, das Antineutrino, das Antiproton und das Antineutron. Man überzeugt sich leicht davon, dass sie eine große Ähnlichkeit mit den entsprechenden Teilchen ohne das Bestimmungswort haben: Sie stimmen mit diesen überein, bis auf die Vorzeichen der drei Ladungen. So hat das Proton eine positive elektrische und eine positive baryonische Ladung, das Antiproton hat negative elektrische und baryonische Ladung. Man sagt, das Antiproton sei das Antiteilchen zum Proton, und das Proton sei das Antiteilchen zum Antiproton. Teilchen und Antiteilchen bilden also ein Pärchen von zwei sehr ähnlichen Partnern.

- *Teilchen und Antiteilchen unterscheiden sich im Vorzeichen von elektrischer, baryonischer und leptonischer Ladung.*

Name, Symbol	Ruhenergie	Ladung		
		elektrische	baryonische	leptonische
Photon $\gamma$	0 pJ	0	0	0
Elektron e	0,082 pJ	-1	0	1
Antielektron $\bar{e}$	0,082 pJ	1	0	-1
Neutrino $\nu$	0 pJ <sup>2)</sup>	0	0	1
Antineutrino $\bar{\nu}$	0 pJ <sup>2)</sup>	0	0	-1
Proton p	150,320 pJ	1	1	0
Antiproton $\bar{p}$	150,320 pJ	-1	-1	0
Neutron n	150,525 pJ	0	1	0
Antineutron $\bar{n}$	150,525 pJ	0	-1	0

**Tab. 1: Ruheenergie, sowie elektrische, baryonische und leptonsche Ladung einiger Teilchen**

<sup>2)</sup> Die Neutrinoenergie ist kleiner als die Genauigkeit, die wir brauchen, um die Richtung einer Kernreaktion zu berechnen. Sie kann also als 0 pJ angenommen werden.

	n	$\leftrightarrow$	p + e
elektrische Ladung	0		1 + (-1)
baryonische Ladung	1		1 + 0
leptonische Ladung	0		0 + 1

**Tab. 2: Die Bilanz der leptonschen Ladung stimmt nicht.**

	n	$\leftrightarrow$	p + e + $\bar{\nu}$
elektrische Ladung	0		1 + (-1) + 0
baryonische Ladung	1		1 + 0 + 0
leptonische Ladung	0		0 + 1 + (-1)

**Tab. 3: Alle Ladungsbilanzen stimmen.**

Außerdem entnehmen wir der Tabelle:

- *Elektronen und Neutrinos, sowie deren Antiteilchen tragen leptonsche Ladung;*
- *Protonen und Neutronen, sowie deren Antiteilchen tragen baryonische Ladung;*
- *zum Photon gibt es kein Antiteilchen.*

**4.4 Ladungsbilanzen – Einrichten der Reaktionsgleichung**

Wir sind nun in der Lage, eine Reaktionsgleichung einzurichten. Wir betrachten zunächst einige einfache Beispiele. Gibt es eine Reaktion

$$n \leftrightarrow p + e,$$

bei der sich ein Neutron in ein Proton und ein Elektron verwandelt? Wir machen die Bilanzen von elektrischer, baryonischer und leptonscher Ladung (Tab. 2).

Die elektrische Ladung von Edukten und Produkten ist dieselbe, nämlich null. Die Erhaltung der elektrischen Ladung wird also befolgt. Auch die baryonische Ladung hat links und rechts denselben Wert, nämlich 1. Die leptonsche Ladung dagegen bliebe bei der Reaktion nicht erhalten: Sie ist null für die linke und eins für die rechte Seite. Die Reaktion kann daher nicht ablaufen, und zwar weder von links nach rechts, noch von rechts nach links.

Wir können die Reaktionsgleichung aber leicht reparieren, etwa indem wir rechts noch ein Antineutrino hinzufügen:

$$n \leftrightarrow p + e + \bar{\nu},$$

Diesmal stimmt die Bilanz (Tab. 3). Auch die leptonsche Ladung ist jetzt links und rechts gleich, nämlich null.

**4.5 Die Reaktionsrichtung**

Eine wichtige Frage ist noch offen: In welche Richtung läuft die Reaktion, die wir eingerichtet haben?

Die Entscheidung hierüber können wir wieder durch Anwendung eines Erhaltungsgesetzes treffen. Wir haben bis jetzt noch nicht die Energieerhaltung berücksichtigt. Auch die Energiebilanz einer Reaktion muss natürlich stimmen. Die Energie von Edukten und Produkten muss gleich sein. Wenn wir die Ruheenergie der Teilchen auf der einen Seite einer Reaktionsgleichung mit der der anderen Seite vergleichen, so werden wir es allerdings nie erleben, dass diese genau gleich sind. Tatsächlich brauchen aber die Ruheenergien auch gar nicht übereinzustimmen.



Wenn die Ausgangskerne oder -teilchen ruhen, so ist die Energie der Ausgangsteilchen gleich der Summe der Ruhenergien dieser Teilchen. Die gesamte Ruhenergie der entstehenden Teilchen darf sicher nicht größer sein als die der Ausgangsteilchen. Sie darf aber sehr wohl kleiner sein. In diesem Fall bliebe etwas Energie übrig, und diese übrige Energie lässt sich immer unterbringen: Sie kann den entstehenden Teilchen einfach als kinetische Energie mitgegeben werden. Also:

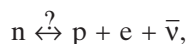
*Eine Kernreaktion läuft so, dass die Ruhenergie der beteiligten Kerne und Teilchen abnimmt.*

Um zu entscheiden, in welche Richtung eine Reaktion läuft, müssen wir daher die gesamte Ruhenergie der Teilchen der linken Seite mit der der rechten vergleichen.

Wir gehen nun mit unseren neuen Werkzeugen an die Arbeit. Wir wollen untersuchen, in welche Richtung eine Reaktion läuft.

### Sind Neutronen stabil?

Die Reaktion



ist in Ordnung, was die Bilanz von elektrischer, baryonischer und leptonischer Ladung betrifft. Wir hatten uns davon schon überzeugt. Es fehlt aber noch die Energiebilanz. Wir fügen sie in die Tafel mit den Ladungsbilanzen ein: die Summe der Ruhenergien der linken Seite und die Summe der Ruhenergien der rechten Seite (siehe Tab. 4). Wir entnehmen die Ruhenergien der einzelnen Teilchen Tab. 1.

Die Ruhenergie des Neutrons ist größer als die von Proton, Elektron und Antineutrino zusammen. Die Reaktion läuft also von links nach rechts.

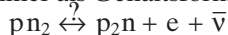
Tatsächlich beobachtet man, dass freie Neutronen, d.h. Neutronen, die nicht in einem Kern gebunden sind, von selbst zerfallen. Man kann Neutronen künstlich erzeugen. Sie zerfallen aber, wenn man sie vorsichtig aufbewahrt, in wenigen Minuten. Tatsächlich ist ihre Lebensdauer meist viel kürzer, denn sie sind sehr reaktionsfreudig und verbinden sich schnell mit den verschiedensten Atomkernen, die sie antreffen.

### Ist Tritium stabil?

Wir versuchen es mit einem Zerfall in einen Heliumkern, ein Elektron und ein Antineutrino:



Der Übersichtlichkeit halber tragen wir die Reaktionsgleichung in Zukunft immer als Gehaltsformel in die Tabelle ein.



Die Ladungsbilanzen sind in Ordnung (Tab. 5).

Wir berechnen die Ruhenergie eines Kerns, indem wir von der Ruhenergie der Teilchen, aus denen er besteht, die Trennenergie abziehen. Die Trennenergien von  $pn_2$  und  $p_2n$  wurden aus der Tabelle, die die Schüler haben, abgelesen. Die linke Summe ist größer als die rechte, die Reaktion kann also von links nach rechts laufen. Tatsächlich ist Tritium instabil. Die Schüler lernen, dass Tritium in gewöhnlichem Wasser auftritt, und dass es durch die kosmische Strahlung entsteht.

Wir beherrschen jetzt das Verfahren, das es uns gestattet, von jeder beliebigen Kernreaktion zu entscheiden, ob sie

	$n$	$\leftrightarrow$	$p + e + \bar{\nu}$
elektrische Ladung	0		1 + (-1) + 0
baryonische Ladung	1		1 + 0 + 0
leptonische Ladung	0		0 + 1 + (-1)
Ruhenergie	150,525 pJ		(150,320 + 0,082 + 0) pJ
Summe	150,525 pJ		150,402 pJ

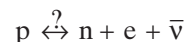
Tab. 4: Die Energiebilanz entscheidet über die Richtung der Reaktion.

	$pn_2$	$\leftrightarrow$	$p_2n + e + \bar{\nu}$
elektrische Ladung	1		2 + (-1) + 0
baryonische Ladung	3		3 + 0 + 0
leptonische Ladung	0		0 + 1 + (-1)
Ruhenergie der Teilchen	150,320 pJ + 2 · 150,525 pJ		2 · 150,320 pJ + 150,525 pJ + 0,082 pJ
- Trennenergie	-1,36 pJ		- 1,24 pJ
Summe	450,010 pJ		450,007 pJ

Tab. 5: Bei zusammengesetzten Kernen muss die Trennenergie berücksichtigt werden.

möglich ist oder nicht, und wir betrachten noch eine ganze Reihe von Beispielen:

1) Wir zeigen, dass Protonen stabil sind:



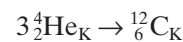
2) Wir zeigen, dass das Kohlenstoffisotop C-14 zerfällt:



3) Wir zeigen, dass U-235 zum Beispiel auf die folgende Art zerfällt:



4) Wir untersuchen eine Reaktion, die in Sternen abläuft, und die für die Entstehung des Kohlenstoffs im Universum zuständig ist:



5) Wir untersuchen die Reaktionen, die man als Strahlungen bezeichnet, genauer, die Alpha-, die Betaplus- und die Betaminusstrahlung.

### 4.6 Die Umsatzrate von Kernreaktionen

Dass wir von Kernreaktionen im täglichen Leben so wenig merken, liegt daran, dass diese Reaktionen im Allgemeinen sehr langsam laufen. Wir vergleichen die Umsatzraten typischer Kernreaktionen mit denen typischer chemischer Reaktionen. In der Chemie misst man die Umsatzraten in mol pro Sekunde.

Bei Kernreaktionen sind die Umsatzraten oft so gering, dass man auch mit den bekannten Bestimmungswörtern nano, pico, femto usw. nicht mehr auskommt. Man gibt daher den Umsatz nicht in mol/s an, sondern durch die An-

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

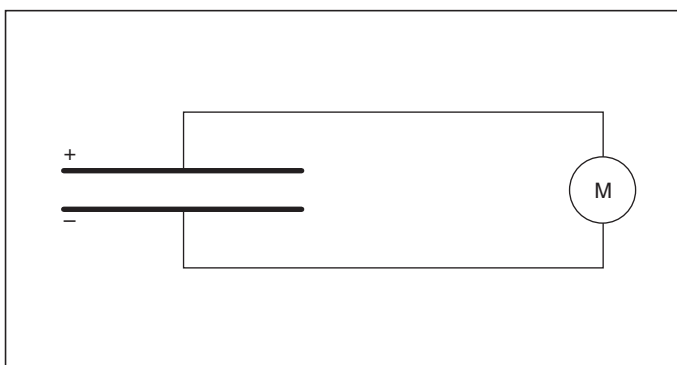


Abb. 1: Elektrizität fließt freiwillig von Stellen höheren zu Stellen niedrigeren Potentials.

## 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 Elektrizität<sup>1)</sup> transportiert. Diese strömt freiwillig von Stellen

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

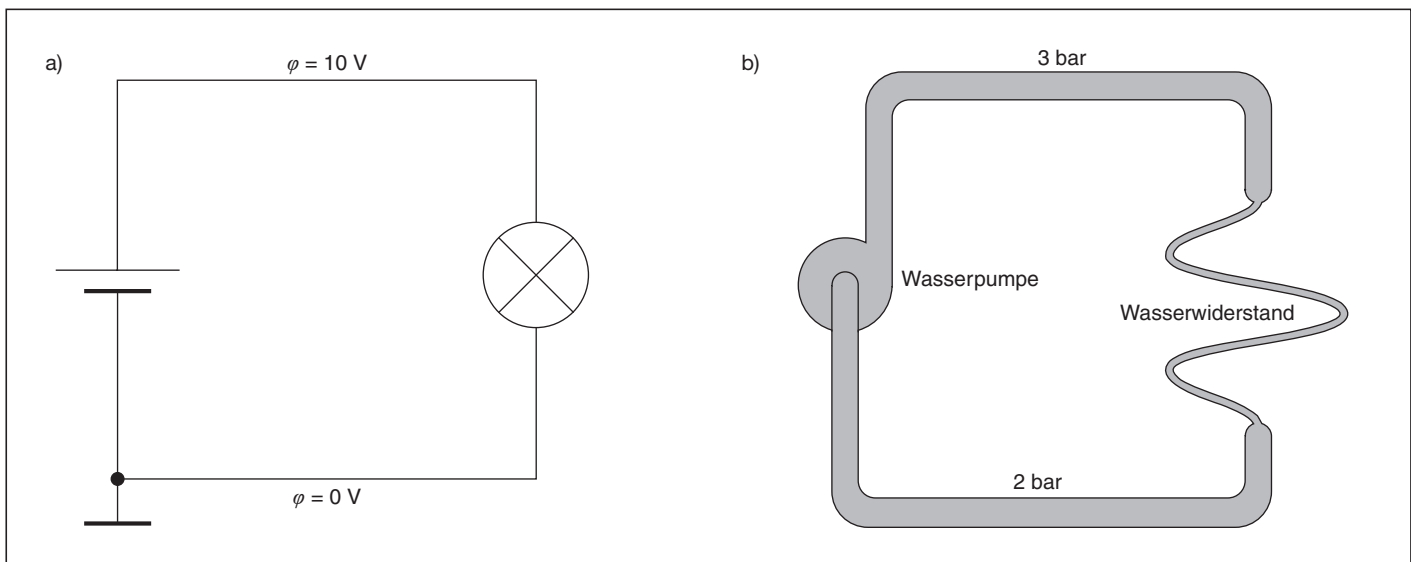


Abb. 2: Elektrischer Stromkreis mit einem Lämpchen als Widerstand (a) und (b) Wasserstromkreis mit einer Rohrverengung als Widerstand

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.

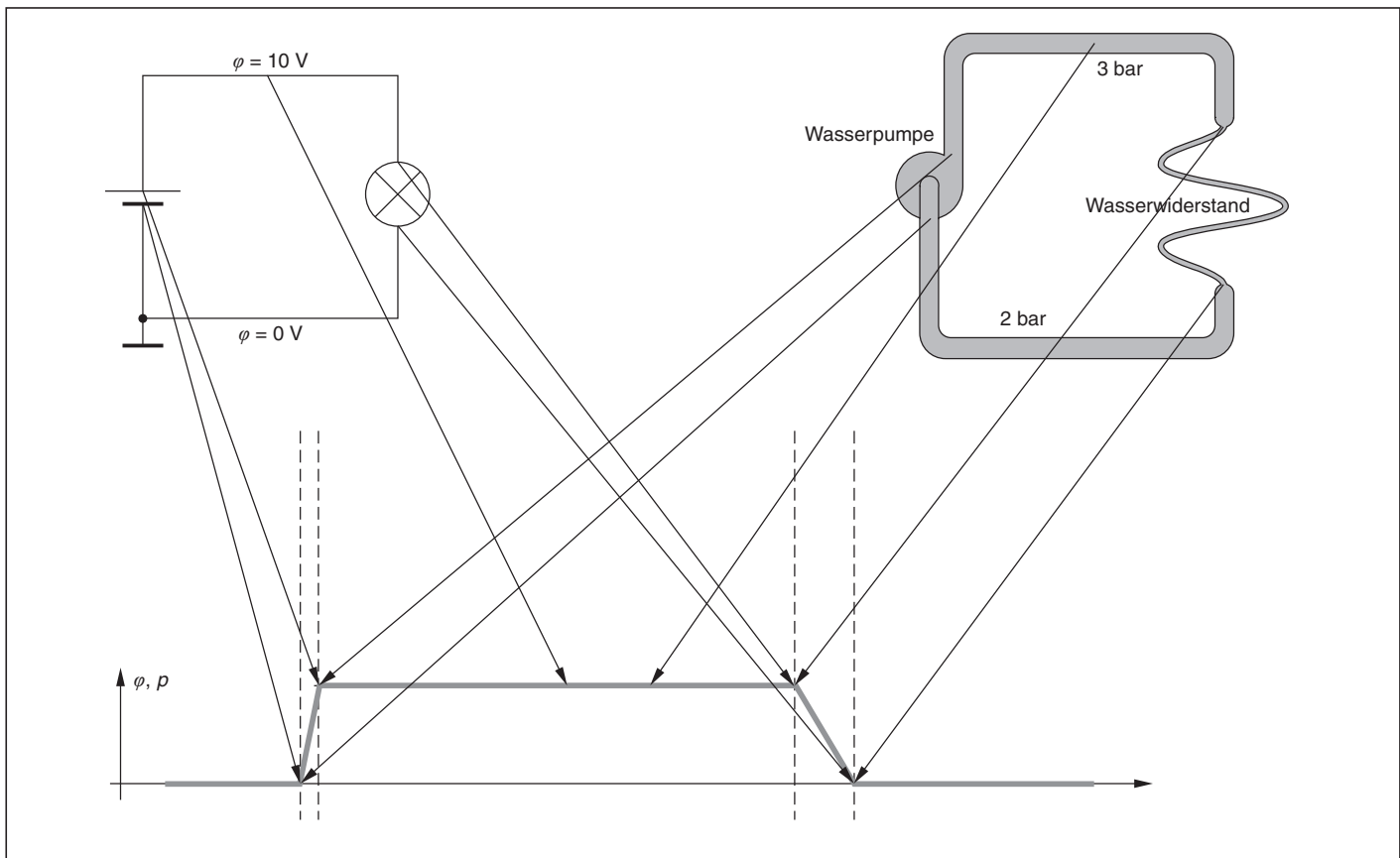
Abb. 2a und Abb. 2b veranschaulichen die Analogien zwischen einem elektrischen Stromkreis und einem Wasserstromkreis. Die Wasserpumpe entspricht der elektrischen Energiequelle, die Schikane, also die Rohrverengung, dem elektrischen Widerstand, die Rohrleitungen mit großem Querschnitt den elektrischen 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 Ausgang<sup>2)</sup>. Entsprechend sinkt der Druck in der Schikane von 3 bar auf 2 bar<sup>3)</sup>. 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

<sup>2)</sup>Die Hin- und Rückleitungen sollen keinen elektrischen Widerstand haben.

<sup>3)</sup>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.

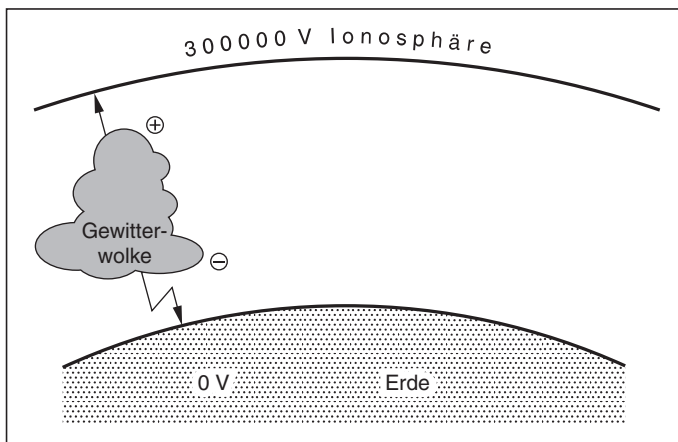
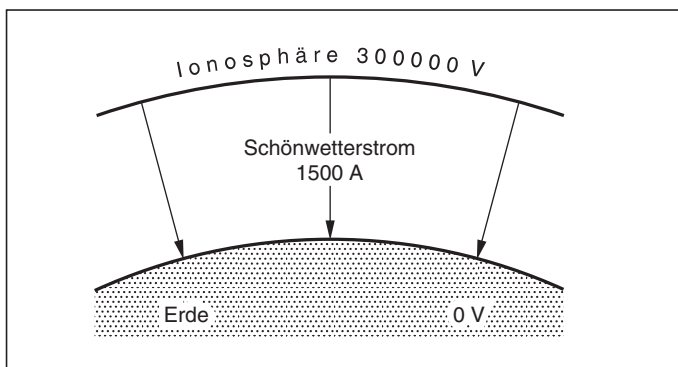


Abb. 4 (oben): Erdoberfläche und Ionosphäre bilden einen großen Kugelkondensator.

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 entlädt<sup>4)</sup>. 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,

<sup>4)</sup>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	$\varphi$	des elektrischen Potentials
m	$gh^{5)}$	des Gravitationspotentials
S	T	der Temperatur
n	$\mu$	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;

<sup>5)</sup> Gilt nur im homogenen Feld.

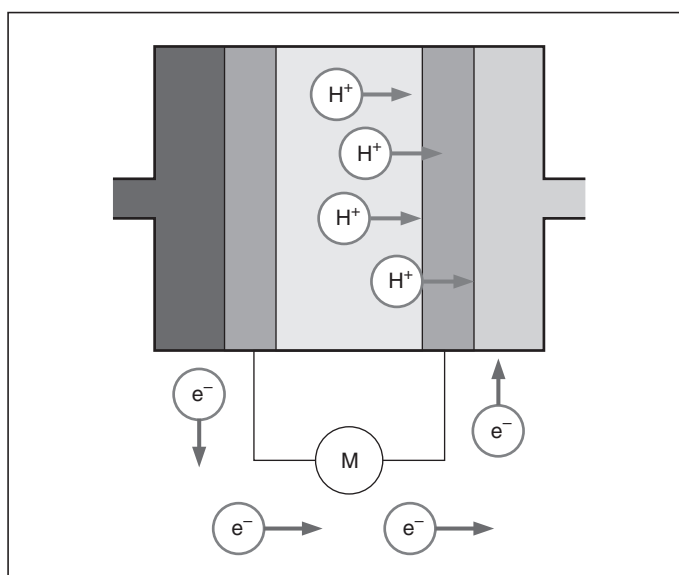
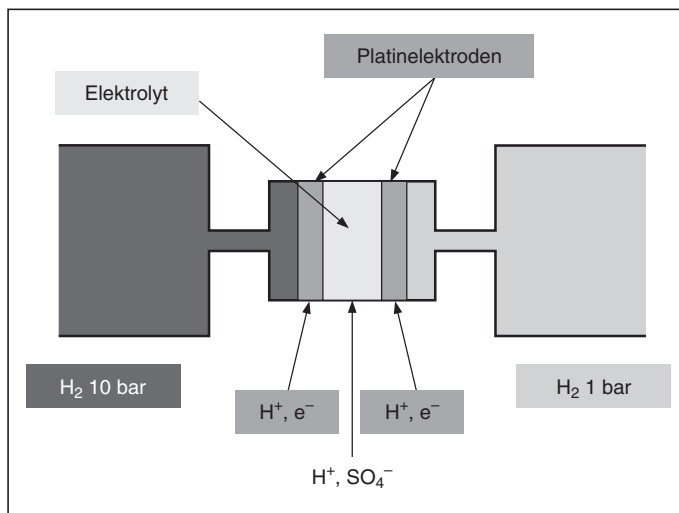


Abb. 7 (oben): Wasserstoff-Druckzelle

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

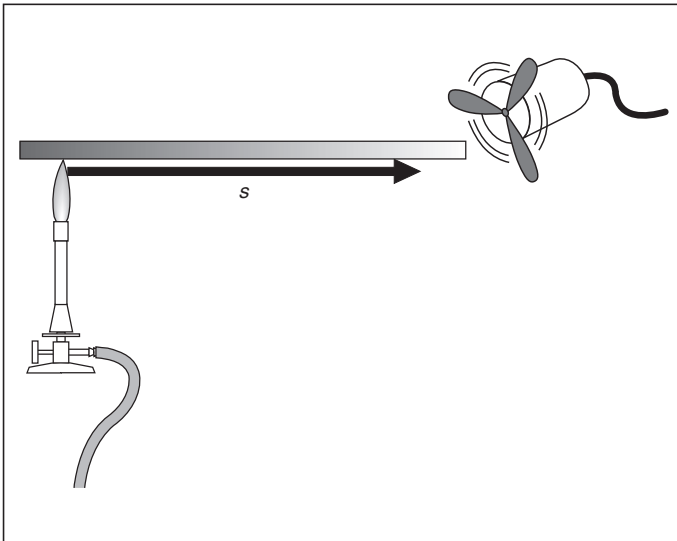


Abb. 9: Entropie strömt von links nach rechts und nimmt dabei auch Elektrizität mit.

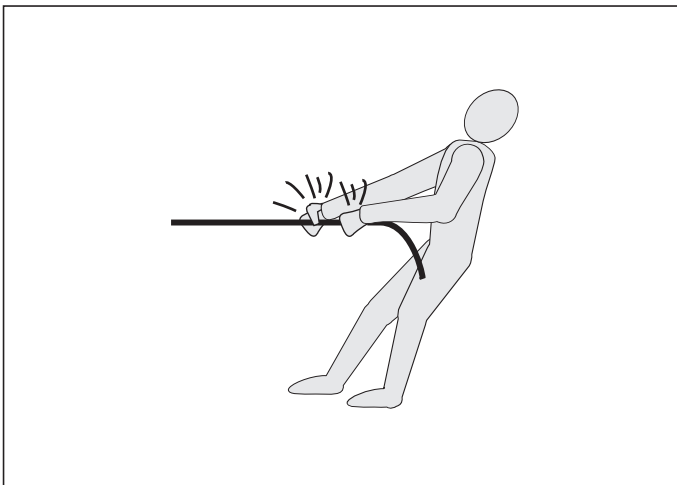
erhalten. Die Reaktion des Wasserstoffs mit dem Sauerstoff geschieht bei Umgebungstemperatur. Bei dieser Temperatur ist der Reaktionswiderstand normalerweise sehr groß, aber das Platin wirkt für diese Reaktion als Katalysator. Als Elektrolyt wird eine PEM (Polymer-Elektrolyt-Membran) - Folie benutzt,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

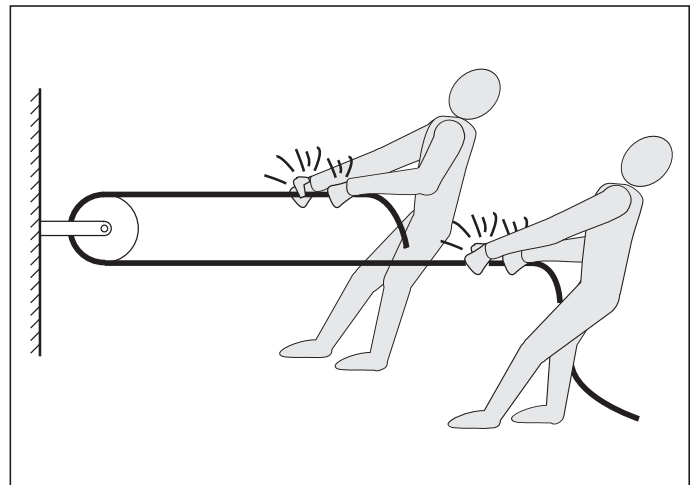


Abb. 5 zum Beitrag P. Bronner, H. Hauptmann u. F. Herrmann: Wie sieht ein Atom aus?

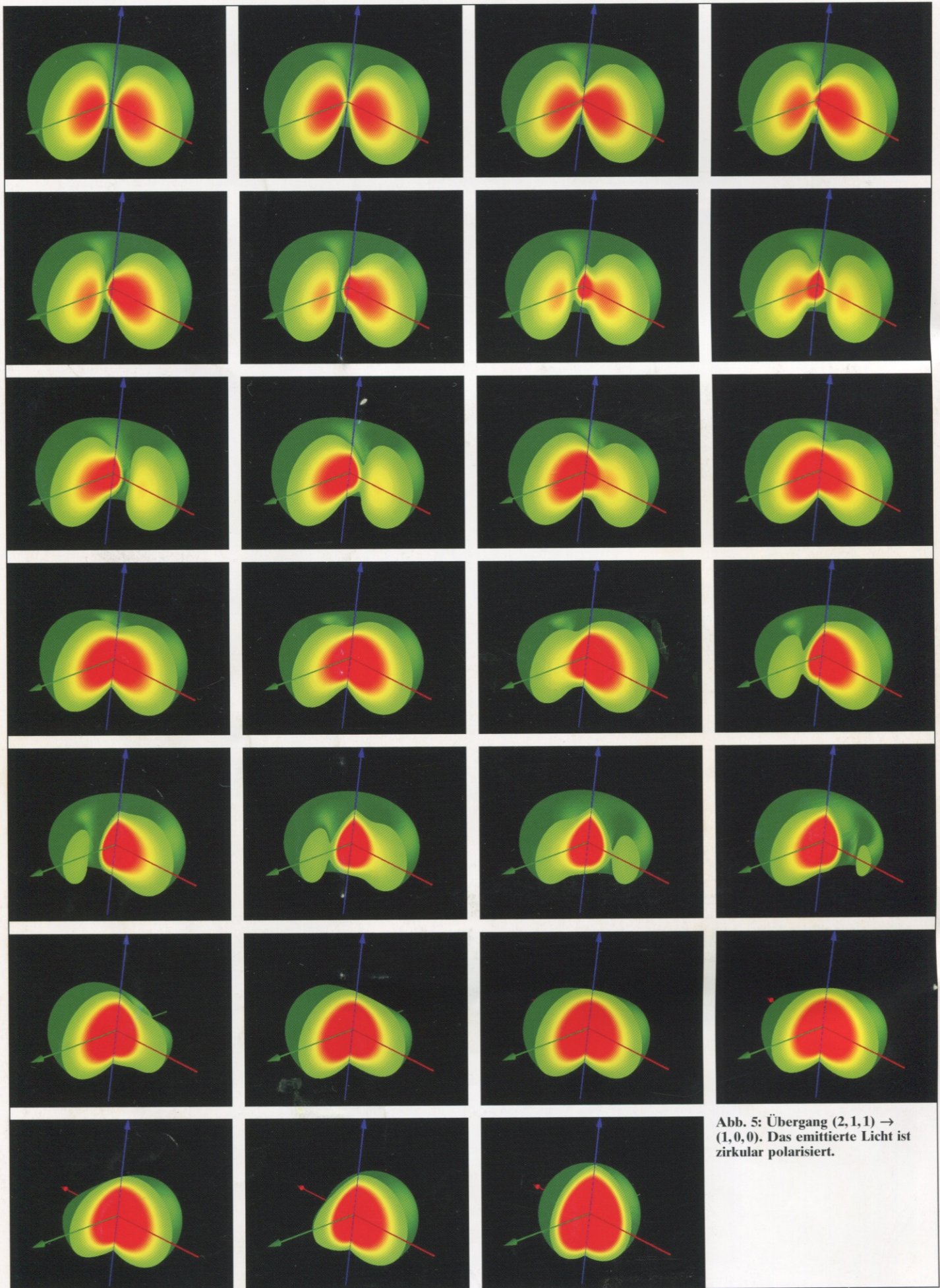


Abb. 5: Übergang  $(2, 1, 1) \rightarrow (1, 0, 0)$ . Das emittierte Licht ist zirkular polarisiert.