

Kumulatives Lernen - die Bildung des Entropie- begriffs in der Sekundarstufe I

D. Plappert

1 Vorbemerkungen

An einen modernen Physikunterricht werden vielfältige Anforderungen gestellt. Er soll einerseits kontext-, problem-, handlungs- und projektorientiert sein und andererseits die Schülerinnen und Schüler anregen, sich kumulatives Wissen anzueignen. Dies setzt voraus, dass sich die Schülerinnen und Schüler, durch den Unterricht angeregt, grundlegende begriffliche Strukturen bilden, mit deren Hilfe sie das „Neue“ mit dem „Alten“ in Verbindung bringen können. Am Beispiel der Wärmelehre soll gezeigt werden, wie von Phänomenen der Wärmelehre ausgehend schrittweise ein immer tieferes Verständnis erreicht werden kann, durch das mit wenigen grundlegenden physikalischen Konzepten die Verbindung zu anderen Phänomenbereichen hergestellt werden kann. Die Entropie erscheint dabei als die für die Wärmelehre charakteristische physikalische Größe, die, wie es die neuen Bildungsstandards von Baden-Württemberg fordern [1], auf diese Weise altersgemäß in der Sekundarstufe I eingeführt werden kann.

2 Der physikalische Entropiebegriff

In dem Buch „Statistische Thermodynamik“ zeigen die Autoren *Hartmann Römer* und *Thomas Filk* [2], dass es die folgenden drei Möglichkeiten gibt, den physikalischen Entropiebegriff zu bilden:

1. Die *thermodynamische Entropie* S , die sich als Zustandsgröße zum Energieaustausch durch Wärme in der Thermodynamik darstellt:

$$dQ = T dS$$

Allgemeiner folgt aus der *Gibbs'schen* Fundamentalform:

$$dE = TdS + \sum_i \xi_i dX_i$$

2. Die *statistische Entropie* S im Sinne von *Boltzmann*, die im Wesentlichen gleich dem Logarithmus der Anzahl der Zustände bei festgehaltenen makroskopischen Parametern ist:

$$S = k \ln \Omega(E, X).$$

3. Die *informationstheoretische Entropie*, die S als ein Maß für die Unkenntnis des Mikrozustandes bei Kenntnis des Makrozustands, bzw. bei Kenntnis der Wahrscheinlichkeitsverteilung $\{w_i\}$, interpretiert:

$$S = -k \sum_i w_i \ln w_i.$$

Die Autoren zeigen außerdem, dass der statistische und der thermodynamische Entropiebegriff gleichwertig sind. Oft wird angeführt, der statistische Entropiebegriff sei fundamentaler als der thermodynamische.

Hartmut Römer begründet, warum man auch anderer Meinung sein kann [3]:

„Noch wichtiger ist das Auftreten unterschiedlicher physikalischer Theorien mit verschiedenen aber durchaus nicht völlig getrennten Anwendungsbereichen. Die *Thermodynamik* macht Aussagen über das Verhalten aller makroskopischen Systeme, die sich in den drei oder vier thermodynamischen Hauptsätzen zusammenfassen lassen. Der zweite Hauptsatz besagt, dass eine Grundgröße der Thermodynamik, Entropie genannt, im abgeschlossenen System niemals abnimmt. Der Anwendungsbereich der Thermodynamik ist gewaltig, und ihre Hauptsätze erreichen einen solchen Grad an Gewissheit, dass sie wohl niemals überholt und ungültig sein werden.

Die Gesetze der Thermodynamik sind weitgehend unabhängig und völlig verschieden von denen der Mikrophysik elementarer Einheiten, die ebenfalls Aussagen über das Ganze der physikalischen Welt macht. Eine Zurückführung der Thermodynamik auf Mikrophysik ist aus verschiedenen Gründen nicht gelungen:

Erstens erweist sich das Programm, die thermodynamischen Hauptsätze durch Hinzuziehen von Begriffen und Methoden der Statistik auf die Mikrophysik zurückzuführen, zwar als viel versprechend aber auch als unerwartet schwierig. Es kann bis heute nicht als wirklich erfüllt angesehen werden.

Zweitens und wichtiger, sind die Grundbegriffe der Thermodynamik, wie Temperatur und Entropie, nicht aus der Mikrophysik ableitbar. Es entspricht ihnen einfach nichts, was aus einem mikroskopisch betrachteten System ersichtlich und entnehmbar wäre, sie sind grundsätzlich andersartige Begriffe, deren Anwendbarkeit erst mit einem hohen mikroskopischen Komplexitätsgrad der betrachteten Systeme beginnt.“

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

2. Wo man etwas Staunenswertes, A, zurückgeführt hat auf ein anderes, B, das nicht so verwunderlich ist, da hat man schon etwas verstanden, mag auch B noch merkwürdig genug sein. Man muss nicht alles auf einmal tun wollen.

3. Man lerne und lehre solches Verstehen auf den schlichtesten Wegen. Das gilt für die experimentellen Hilfsmittel wie für die Denkmittel.

4. Zahlen und Formeln allein sind keine Ausweise der Exaktheit und Wissenschaftlichkeit, denn man kann sie auch einsichtslos gebrauchen. Was man ohne sie verständlich machen kann, hat man besser verstanden als das, wozu man unnötigerweise ihr schweres Geschütz auffährt.

5. Man bleibe bei den Phänomenen, solange wie möglich, und verbinde sie verstehend untereinander. Wo aber Bilder sich aufdrängen, weiche man ihnen nicht aus.

Abb. 1: Das Verstehen bei M. Wagenschein [5]

„Erklären“ hieß eine Erscheinung auf eine andere zurückführen, die man für fundamental und nicht mehr erklärungsbedürftig hielt.

Abb. 2: Das Erklären bei F. Herrmann [6]

3 Didaktische Grundsätze zur Einführung physikalischer Begriffe

In den Bildungsstandards Physik von Baden-Württemberg [1] wird der folgende didaktische Weg zur Einführung physikalischer Sachverhalte dargestellt: „Am Anfang eines Physikverständnisses steht die Auseinandersetzung mit den Vorstellungen der Schülerinnen und Schüler, die sie in den Unterricht mitbringen. Phänomene führen zu physikalischen Fragestellungen. Erklärungen werden in Bildern, Modellen und Experimenten veranschaulicht und schrittweise mithilfe der physikalischen Fachsprache gefasst. Das im Rahmen der physikalischen Grundbildung an speziellen Beispielen erworbene Wissen über Fakten und begriffliche Strukturen sowie die dabei entwickelten Fähigkeiten müssen auf neue Fragestellungen anwendbar sein“. Wird dieser Weg zur Einführung der physikalischen Größe Entropie gewählt, so kommt dem „thermodynamischen Entropiebegriff“ eine besondere Bedeutung zu: nur er kann schrittweise aus den Vorerfahrungen der Schülerinnen und Schüler mit dem Phänomenbereich „Wärme“ herausgearbeitet werden. An dieser Stelle wollen wir anmerken, dass wir im Unterricht „Wärme“ nur als Wort der Umgangssprache verwenden und nicht zur Bezeichnung einer physikalischen Größe. Die umgangssprachliche Bedeutung von „Wärme“ ist so vielfältig, dass es Überschneidungen gibt mit den physikalischen Größen Energie, Temperatur und Entropie und der „Wärmeempfindung“. Das bedeutet, dass die Energieform $\Delta E = T\Delta S$ entweder keinen eigenen Namen bekommt und wir sagen „die Energie, die mit En-

tropie zusammen ausgetauscht wird“ oder wir sie abkürzend „thermische Energie“ nennen. Auch die Entropie wollen wir nicht „Wärme“ nennen, obwohl, wie in [4] erläutert, die alltagsprachliche Bedeutung von „Wärme“ dem thermodynamischen Entropiebegriff sehr nahe kommt.

4 „Verstehen heißt verbinden“

Verstehen heißt Erscheinungen gedanklich miteinander verbinden (Abb. 1). Dabei können „Prinzipien“ entdeckt werden, die je nach Aufbau eines Unterrichtsgangs, verschieden sein können. (Abb. 2).

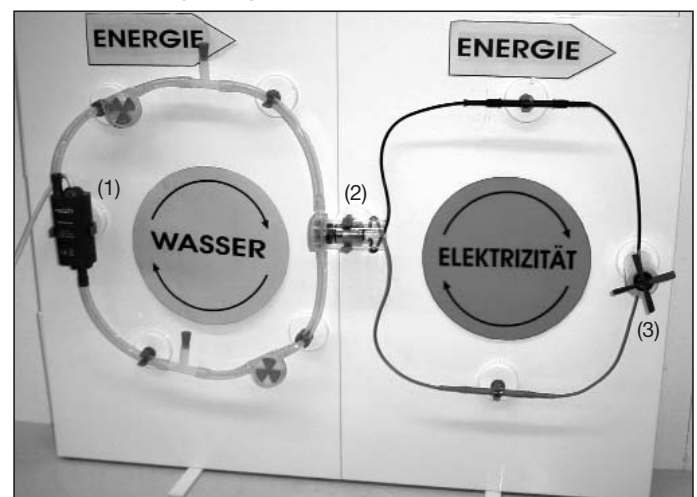
5 Die „fundamentalen Konzepte“

Der im Folgenden skizzierte Unterrichtsgang soll auf zwei zentrale Konzepte aufgebaut werden, die zuvor, wie in [7] und [8] ausführlich beschrieben, mithilfe von Wasserströmen entwickelt und dann auf elektrische Ströme übertragen worden sind.

5.1 Das „Energie-Träger-Konzept“

Physikalisch betrachtet, strömt Energie nie allein, bzw. wird nie allein ausgetauscht, sondern immer mit einer zweiten physikalischen Größe zusammen. Diese zweite Größe kennzeichnet die „äußere Erscheinungsform“ des Energietransports. Ein wesentliches Ziel des Unterrichts sollte sein, die Energie klar von diesen Größen zu unterscheiden. Die Schülerinnen und Schüler sollen erkennen, dass Energie nicht Licht, Zucker, Strom, Schwung, ... ist oder physikalisch genauer, dass Energie nicht Elektrizität, Impuls, Drehimpuls, Entropie, ... ist. Damit die Schülerinnen und Schüler in einem Anfangsunterricht diesen Unterschied bildhaft erleben können, wurde der in Abb. 3 dargestellte Versuchsaufbau [9] entwickelt: Eine mit einem Netzgerät verbundene Pumpe (1) treibt Wasser an, das Wasser einen „Wassergenerator“ (2) und dieser einen elektrischer „Lüfter“ (3). Ist im vorhergegangenen Unterricht geklärt, dass ein Propeller zum Antrieb Energie benötigt ([7] und [8]), kann der „Weg“ der Energie zurückverfolgt werden: sie kommt vom „Wassergenerator“, von der Pumpe, vom

Abb. 3: Der Energie-Träger-Stromkreis



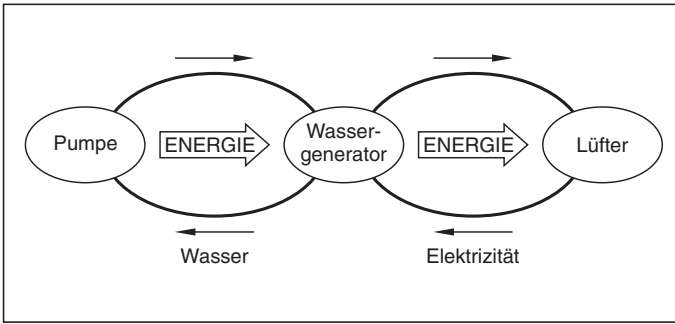


Abb. 4: Energie ist das, was hindurch strömt! Wasser und Elektrizität strömen im Kreis.

Netzgerät bzw. von einem Kraftwerk, ... Die Energie ist das, was durch alle Stationen hindurch geht. Dies wird durch die Energiepfeile symbolisiert (Abb. 4). Auf diese Weise wird der „Erhaltungsaspekt“ der Energie betont. Das Wasser dagegen nimmt *einen anderen Weg*: es strömt im Kreis. Deshalb werden zwischen Pumpe und Turbine zwei Schläuche benötigt. Dass die Energie und die zweite am Energietransport beteiligte physikalische Größe *unterschiedliche Wege* nehmen, wird im Weiteren das zentrale Kriterium sein, mit dessen Hilfe wir diese beiden Größen unterscheiden können.

Die Tatsache, dass Energie nie alleine strömen kann, sondern immer zusammen mit einer zweiten Größe strömen muss, verbildlichen wir durch das „Energie-Träger-Konzept“: Die zweite physikalische Größe hat die Aufgabe eines „Energieträgers“. Auf diese Weise wird der Zusammenhang dieser beiden physikalischen Größen in ein mentales Bild gebracht, das den Schülerinnen und Schülern hilft, diese beiden Größen einerseits zu differenzieren und andererseits miteinander in Verbindung zu bringen. Manfred Euler (IPN-Kiel) [10] weist auf die Bedeutung solcher mentaler Bilder hin. Mit dem „Energie-Träger-Bild“ können wir dann den Energietransport im „Energie-Träger-

Abb. 5: Das Energie-Träger-Konzept

Das Energie-Träger-Konzept

Es strömt Energie von der Pumpe zur Turbine. Das Wasser ist der Energieträger. Die Pumpe belädt das Wasser mit Energie. Die Turbine lädt Energie vom Wasser ab. Die *Druckdifferenz* Δp gibt an, wie viel Energie in einem Umlader auf bzw. vom Wasser abgeladen wird. Der *Energiestrom* der in einem Umlader von einem Wasserstrom abgeladen bzw. von einem Wasserstrom aufgeladen wird ist umso größer, ...
 je größer die Wasserstromstärke I_w ist und
 je größer die Druckdifferenz Δp ist.

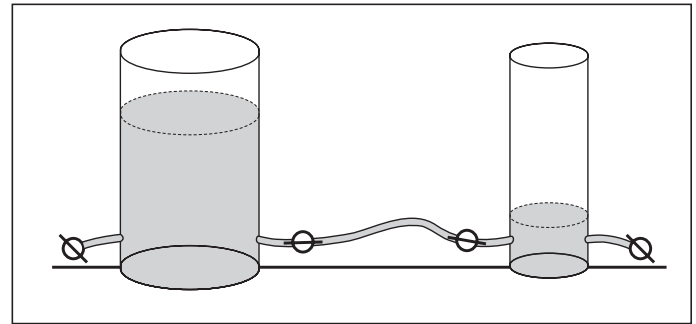


Abb. 6: Die Druckdifferenz als Antrieb eines Wasserstroms, hier von links nach rechts

Stromkreis“ (Abb. 3) auf die folgende Weise beschreiben: In der Pumpe wird Energie auf den Energieträger Wasser geladen. Das Wasser transportiert sie zum Wassergenerator. Dort wird sie vom Wasser ab und auf den Energieträger Elektrizität umgeladen. Das Wasser strömt zur Pumpe zurück um von neuem mit Energie beladen zu werden Beim Betrachten anderer Beispiele können wir feststellen: Energie benötigt zum Transport immer einen Träger. In vielen Geräten wird Energie von einem Träger auf einen anderen umgeladen, im Wassergenerator z. B. von Wasser auf Elektrizität. Wasser, Elektrizität, Licht, Brennstoffe, Nahrungsmittel sind also nicht die Energie selbst, sondern sie werden zum Energietransport benötigt, sie „tragen“ die Energie. Das plastisch, innerlich erlebbare „Energie-Träger-Bild“ kann im nachfolgenden Unterricht immer weiter geschärft und erweitert werden. An geeigneter Stelle kann darauf hingewiesen werden, dass dieses Bild physikalische Zusammenhänge versinnbildlicht, dass es funktional gemeint ist und nicht so, dass z. B. die Elektrizität Energie wie in einem Rucksack trägt. Das erkennen wir daran, dass bei einem elektrischen Energietransport die Energie nicht durch die Kabel sondern durch die Felder im Raum um die Kabel herum strömt. Elektrizität als „Energieträger“ ist in

Abb. 7: Das Strom-Antrieb-Konzept

Das Strom-Antrieb-Konzept

Die Druckdifferenz ist der Antrieb des Wasserstroms! In einem Wasserstromkreis werden *zwei Leitungen* benötigt, damit das Wasser hin und zurück fließen kann. Die *Wasserstromstärke* $I_w = \text{Menge} / \text{Zeit}$ ist im unverzweigten Stromkreis an jeder Stelle gleich. Die *Druckdifferenz* Δp gibt an, wie stark der Wasserstrom *angetrieben* wird. Der „*Strom-Antrieb-Zusammenhang*“
 Je größer der Strömungswiderstand des Systems ist, desto größer muss die Druckdifferenz Δp sein, um einen Wasserstrom der Stärke I_w zu bewirken.

demselben Sinne gemeint wie CD als „Tonträger“: Auf der CD selbst sind nicht die Töne enthalten, die wir beim Anhören hören. Trotzdem plädiere ich dafür, das „Energie-Träger-Bild“ im Anfängerunterricht zu verwenden,

- weil der alltagssprachliche Name „Energieträger“ mit seinen verbundenen Präkonzepten im Unterricht aufgegriffen werden kann,
- weil ein tragfähiges, gut zu handhabendes Bild entsteht, das sicher angewendet werden kann, und das den Schülerinnen und Schülern hilft, die Energie und die zweite, am Energietransport beteiligte Größe nachhaltig zu unterscheiden und miteinander in Verbindung zu bringen.

5.2 Das Strom – Antrieb – Konzept

Öffnen wir den Hahn im Schlauch (Abb. 6), der die zwei wassergefüllten Gefäße miteinander verbindet, beginnt das Wasser zu strömen. Wie lange strömt das Wasser von dem einen Behälter [9] in den anderen? Intuitiv ist für alle Schülerinnen und Schülern klar, dass das Wasser strömt, solange es eine Druckdifferenz Δp gibt. Die Frage ist nur: hängt der Wasserdruck von der Höhe oder vom Volumen der Wassersäule ab. Der Versuch zeigt dann, dass die Höhendifferenz Δh ein Maß für die den Wasserstrom antreibende Druckdifferenz Δp ist [7].

Auf diesem Weg bekommt die Druckdifferenz die Rolle des „Antriebs“ bzw. der „Ursache“ der Strömung.

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

6 Die Skizze eines Unterrichtsgangs

Im Folgenden wollen wir skizzieren, wie es mithilfe des „Energie-Träger-Konzepts“ und des „Strom-Antrieb-Konzepts“ möglich wird, die Entropie thermodynamisch nicht nur anschaulich sondern auch so stabil einzuführen, dass die in verschiedenen Gebieten behandelten Inhalte miteinander vernetzt werden. Auf diese Weise tritt das Besondere der Entropie, dass sie zwar erzeugt aber nicht vermindert werden kann, besonders deutlich hervor. Der statistische und der informationstheoretische Entropiebegriff [11] können an geeigneten Stellen zur Vertiefung und Erweiterung hinzukommen.

6.1 Was treibt einen Wirbelsturm an?

Tropische Wirbelstürme sind die zerstörerischsten Stürme, die es auf der Welt gibt. Diese gigantischen Wolkenwirbel erreichen einen Durchmesser von fast 1000 km. In ihnen herrschen mittlere Windgeschwindigkeiten von 120 bis 240 km/h, in Böen bis 300 km/h [12]. Wer treibt einen solchen Wirbel an? Woher bekommt er die benötigte Energie?

6.2 Phänomene der Wärmelehre

Die Tatsache, dass die zerstörerischsten Stürme nur in den Tropen vorkommen, legt die Vermutung nahe, dass ihr Vorkommen ein „Wärmephänomen“ ist. Die Vorerfahrungen der Schülerinnen und Schüler aus diesem Bereich können nun gesammelt und durch neue, motivierende Versuche, wie in [13] beschrieben, erweitert werden.



Abb. 8 (oben): Ein Hurrikan

Abb. 9 (unten): Kanisterversuch [13]

6.3 „Nur mit heiß und kalt – geht’s halt!“

Nach dem Betrachten vieler Eigenschaften und Anwendungen thermischer Prozesse, tritt das Bedürfnis nach einem tieferen Verständnis auf. Wie zuvor beschrieben, heißt verstehen, Erscheinungen gedanklich miteinander zu verbinden.

Betrachten wir den Kanisterversuch [13] (Abb. 9), die Dampfmaschine [14] (Abb. 10), das Thermokraftwerk [15] (Abb. 11) so können wir feststellen, dass immer eine hohe und eine tiefe Temperatur zugleich benötigt wird, damit etwas „geschieht“. Dieses Prinzip können wir schlagwortartig mit der Parole „nur mit heiß und kalt – geht’s halt!“ zusammenfassen.

Damit eine Maschine angetrieben werden kann, damit thermische Energie nutzbar gemacht werden kann, wird also eine Temperaturdifferenz benötigt.

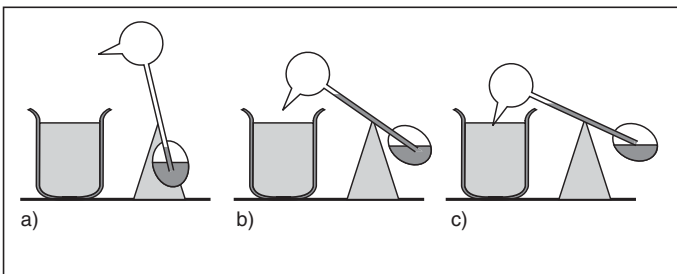
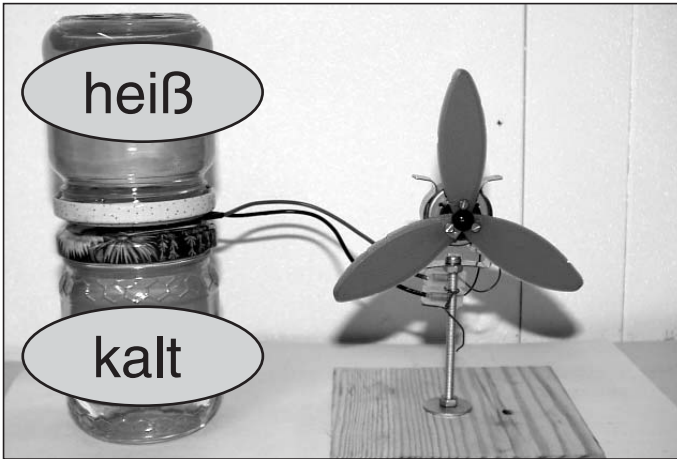
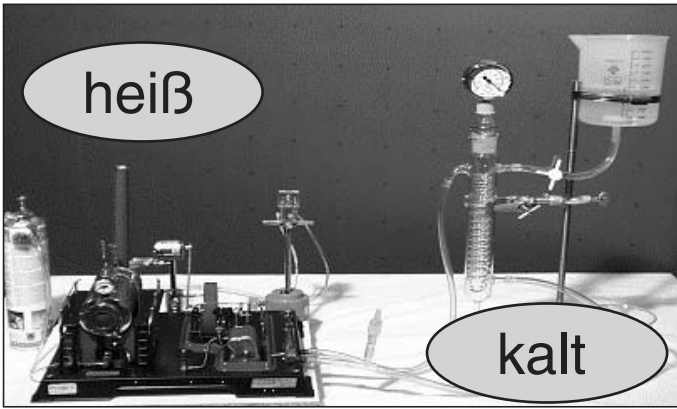


Abb. 10 (oben): Modelldampfmaschine mit Kondensator [14]

Abb. 11 (Mitte oben): Thermokraftwerk mit Thermoelement [15]

Abb. 12 (Mitte unten): Die warme Hand reicht zum Antrieb des Stirlingmotors [16] aus. Durch Kühlen der oberen Platte mit Eis läuft der Motor schneller und kräftiger.

Abb. 13 (unten): Wo ist hier „heiß“ und „kalt“?

Untersuchungen mit Dampfmaschinen haben im 18. Jahrhundert gezeigt, dass zwar durch geeignete Wahl des Mediums, die Differenz von Kesseldruck und Atmosphärendruck wesentlich vergrößert werden kann. Energetische Messungen haben aber ergeben, dass der Wirkungsgrad der Maschine dadurch nicht verbessert wird. *Sadi Carnot* konnte zeigen, dass der Wirkungsgrad von thermischen Kraftmaschinen nur von der Temperaturdifferenz zwischen Ein- und Ausgang („heiß“ und „kalt“) abhängt.

Das Prinzip: „ein thermisches Kraftwerk kann nur mit einer Temperaturdifferenz angetrieben werden“ kann auch auf neue Probleme angewandt werden (z. B. der *Stirlingmotor* [16] (Abb. 12) und die „trinkende Ente“ (Abb. 13) und zeigt dabei seine allgemeine Gültigkeit.

Trotz größter Anstrengungen wurde keine Maschine gefunden, die nur durch Abkühlen, also ohne Temperaturdifferenz, Energie aufnehmen und umladen kann.

6.4 Der Antrieb des Wirbelsturms

Betrachten wir den in Abb. 14 dargestellten schematischen Aufbau eines Wirbelsturms, so können wir deutlich erkennen, wodurch er angetrieben wird: die Temperaturdifferenz zwischen dem Meerwasser und der Luft unterhalb der Tropopause. Wirbelstürme sind also gigantische thermische Kraftwerke.

6.5 Temperaturdifferenz als Antrieb

Durch die Leitfrage: „Wieso benötigen thermische Kraftwerke eine Temperaturdifferenz zum Antrieb? Wie können wir das verstehen?“, können die Schülerinnen und Schüler das hier erkannte Prinzip mit dem zuvor im Unterricht erarbeiteten „Energie-Träger-Konzept“ und dem „Strom-Antrieb-Konzept“ in Verbindung bringen.

- Die Druckdifferenz Δp treibt den Wasserstrom an. Vom strömenden Wasser wird in der Wasserturbine Energie abgeladen (Abb. 15).
- Die Differenz des elektrischen Potentials $\Delta \phi$, die elektrische Spannung U , treibt den elektrischen Strom an. Von der strömenden Elektrizität wird im Elektromotor Energie abgeladen (Abb. 16).

Übertragen wir dies auf das Thermokraftwerk, so können wir analog formulieren:

- Die Temperaturdifferenz treibt den X -strom an. Von dem strömenden X wird im Thermokraftwerk Energie abgeladen (Abb. 17).

Bisher strömte Energie nie allein, sondern immer mit einer zweiten Größe zusammen. Wir übertragen diese Gesetzmäßigkeit zunächst hypothetisch auf die Wärmelehre und fragen: „Wie heißt diese Größe, die beim „thermischen Energietransport“ beteiligt ist?“ „Was strömt durch das Thermokraftwerk hindurch?“ „Von was wird im Thermokraftwerk die Energie abgeladen?“

6.6 Die Entropie

Das, was durch das Thermokraftwerk hindurchströmt, das nennen die Schülerinnen und Schüler spontan „Wärme“. Sie begründen dies damit, dass die Temperaturabnahme des einen wassergefüllten Glases zeigt, dass dort „Wärme“ wegströmt und dass die Temperaturzunahme des anderen zeigt, dass dort „Wärme“ ankommt. Wir erläutern ihnen an dieser Stelle, dass das alltagssprachliche Wort „Wärme“ vielfältige Bedeutungen hat, z. B. kann es Energie, Temperatur und „Wärmeempfindung“ bedeuten. Das, was

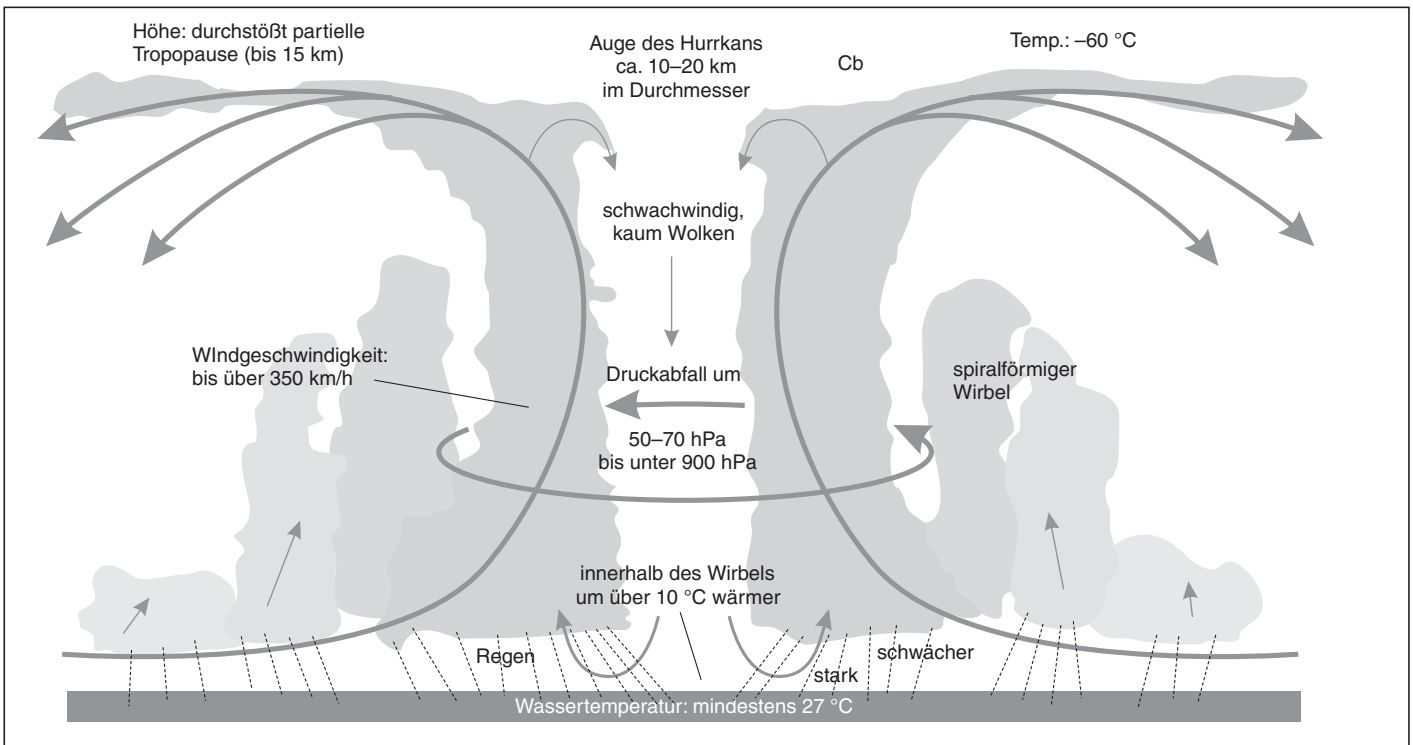
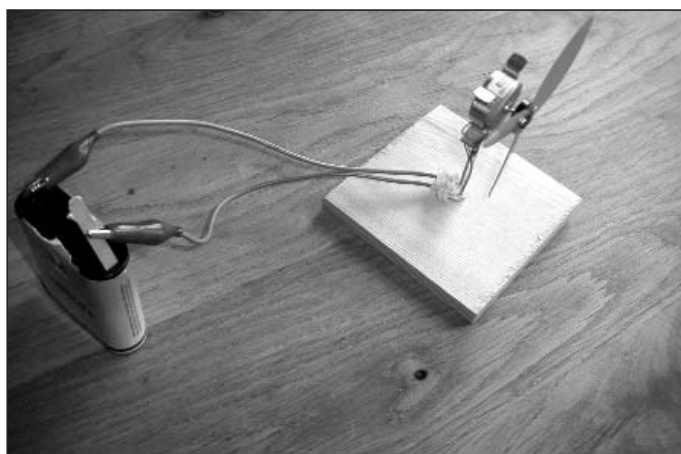
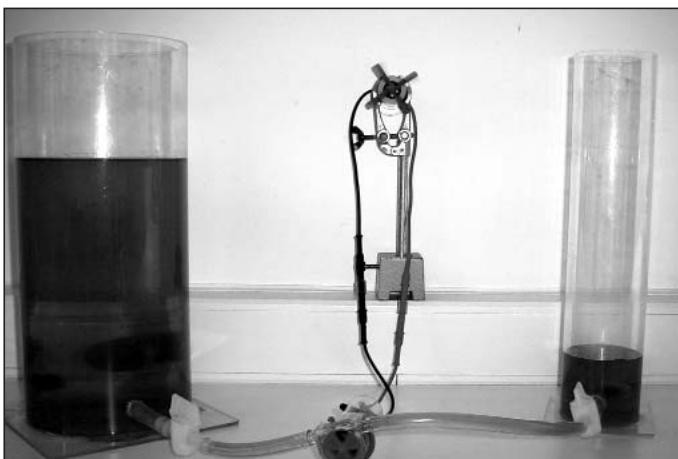


Abb. 14: Schematisches Profil eines Wirbelsturms [17]

durch das Thermokraftwerk hindurchströmt, was wie Wasser und Elektrizität Energie transportiert, ist jedoch noch

Abb. 15 (oben): Eine Druckdifferenz Δp treibt eine Wasserturbine an!

Abb. 16 (unten): Eine elektrische Potenzialdifferenz $\Delta\phi$ treibt einen Elektromotor an!



etwas anderes, es wird in der Physik Entropie genannt. Somit können wir formulieren:

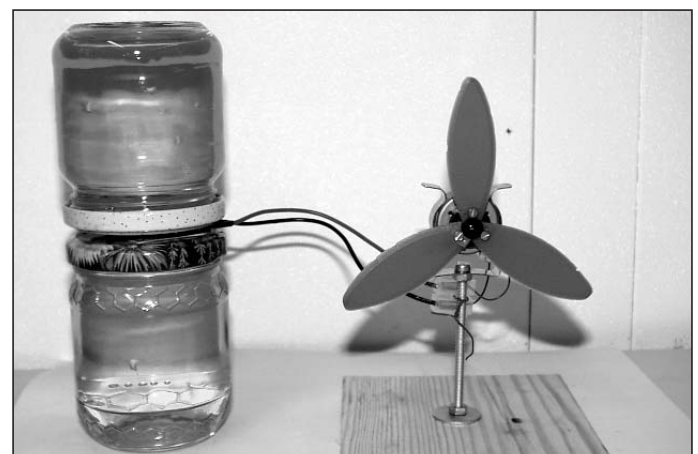
- Eine Temperaturdifferenz ΔT treibt einen Entropiestrom an (dazu [9]).
- Im Thermokraftwerk, im Stirlingmotor und in der Dampfmaschine wird von der strömenden Entropie Energie auf dieselbe Weise abgeladen, wie im „Wasserkraftwerk“ [10] (Abb. 18) Energie vom strömenden Wasser abgeladen wird. In beiden Beispielen nimmt der Energieträger einen anderen Weg als die Energie; Entropie ist also wie Wasser nicht die Energie selbst, sondern nur ein Energieträger.

6.7 Weitere Eigenschaften der Entropie

Um die Entropie besser kennen zu lernen, wollen wir im Folgenden untersuchen, welche weiteren Gemeinsamkeiten Entropie, Wasser und Elektrizität haben.

Wird ein Becherglas A mit Wasser hoher Temperatur in ein Becherglas B mit Wasser tiefer Temperatur gestellt (Abb. 19), so können wir beobachten, dass sich im Lauf der

Abb. 17: Eine Temperaturdifferenz ΔT treibt ein Thermokraftwerk an!



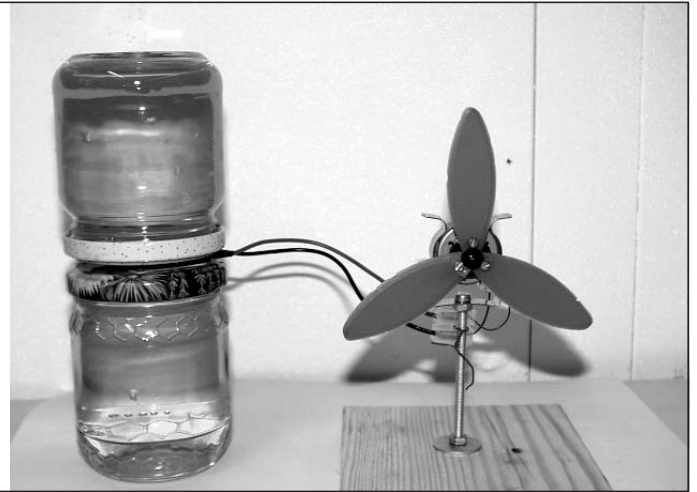
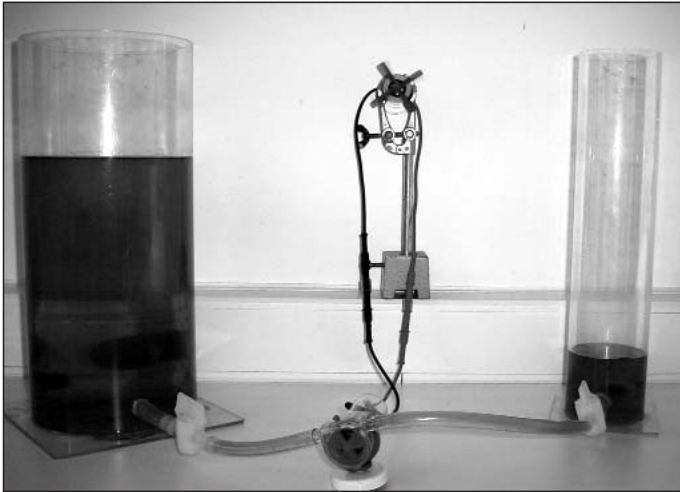


Abb. 18: So wie das Wasser vom Behälter mit dem hohen Druck in den Behälter mit tiefem Druck strömt, so strömt die Entropie vom Glas hoher Temperatur zum Glas mit tiefer Temperatur. So wie im „Wasserkraftwerk“ Energie vom Wasser abgeladen wird, so wird im „Thermokraftwerk“ Energie von der Entropie abgeladen. In beiden Fällen wird diese Energie zum Antrieb des Propellers genutzt.

Zeit in beiden Gefäßen dieselbe Temperatur ergibt. Es stellt sich ein thermisches Gleichgewicht ein. Die in Abb. 20 dargestellte Analogie wird deutlich.

Die Temperatur des Wassers in Gefäß A sinkt, es strömt Entropie weg; gleichzeitig steigt die Temperatur des Wassers in Gefäß B, es kommt Entropie an. Daraus folgern wir:

- Je höher die Temperatur des Wassers ist, desto mehr Entropie enthält es.

Ist die Wassermenge von B deutlich größer als die von A, dann steigt die Temperatur in B deutlich weniger an als die Temperatur in A absinkt. Daraus folgern wir:

- Je größer die Wassermenge ist, desto mehr Entropie enthält es bei derselben Temperatur.

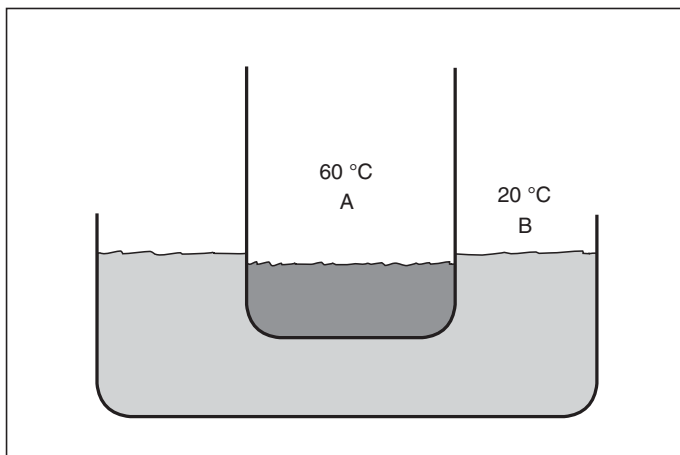
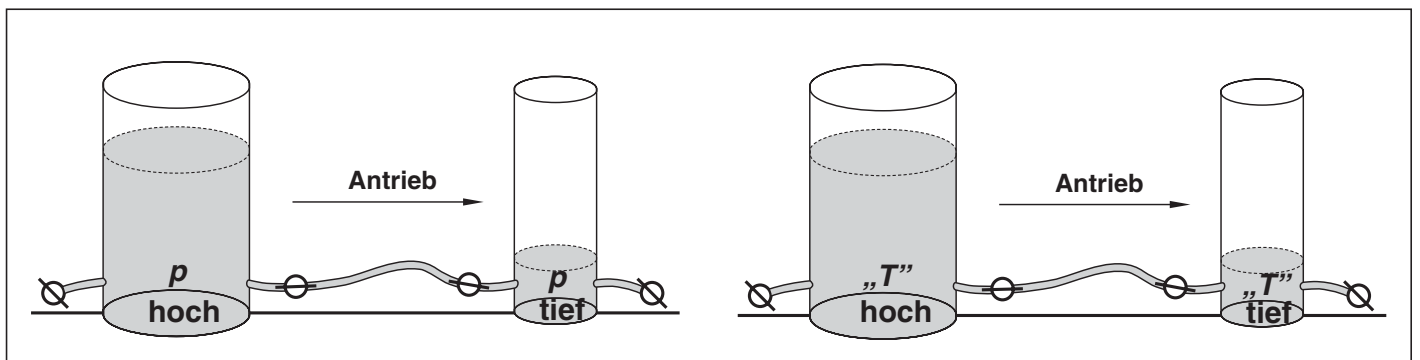


Abb. 19: Nach einiger Zeit gleichen sich die Temperaturen an

Abb. 20: Die Temperaturdifferenz ist der Antrieb des Entropiestroms wie die Druckdifferenz der Antrieb des Wasserstroms ist.



Schließen wir an die beiden Anschlüsse des Thermoelements [16] eine Batterie an so kann man nach einer kurzen Zeit spüren, wie die eine Seite des „Thermoelements“ kalt, die andere warm wird (Abb. 21). Es entsteht eine Temperaturdifferenz zwischen den beiden Platten des Thermoelements. Durch das „Wegpumpen“ von Entropie aus der einen Keramikplatte entsteht die „kalte Seite“, durch das „Hineinpumpen“ der Entropie in die andere Keramikplatte die „warme Seite“. Um Entropie von einer tiefen Temperatur zu einer hohen Temperatur zu pumpen wird Energie benötigt, ebenso wie Energie benötigt wird, um Wasser von tiefem Druck zu hohem Druck und wie Elektrizität von tiefem Potenzial zu hohem Potenzial zu pumpen.

Wird das Thermoelement zwischen zwei wassergefüllte Marmeladengläser eingebaut (Abb. 22), so steigt die Temperatur des Wassers in dem einen Glas während die Temperatur des Wassers in dem anderen Glas sinkt. Daraus folgern wir:

- Es gibt Entropiepumpen, die Entropie entgegen einer Temperaturdifferenz pumpen.

Jeder Kühlschrank ist eine Entropiepumpe, die Entropie aus dem Inneren des Kühlschranks weg- und zur Rückseite des Kühlschranks hinpumpt. Dort wird sie an die Außenluft abgegeben.

Versucht man aus einem Gegenstand mit dem besten nur denkbaren „Kühlschrank“ Entropie herauszupumpen, so stellt man fest, dass zwar zunächst die Temperatur immer mehr abnimmt, aber eine tiefste Temperatur nicht unterschritten werden kann. Diese tiefste Temperatur beträgt $-273,15\text{ °C}$. Sie wird als Nullpunkt der „absoluten Tempe-

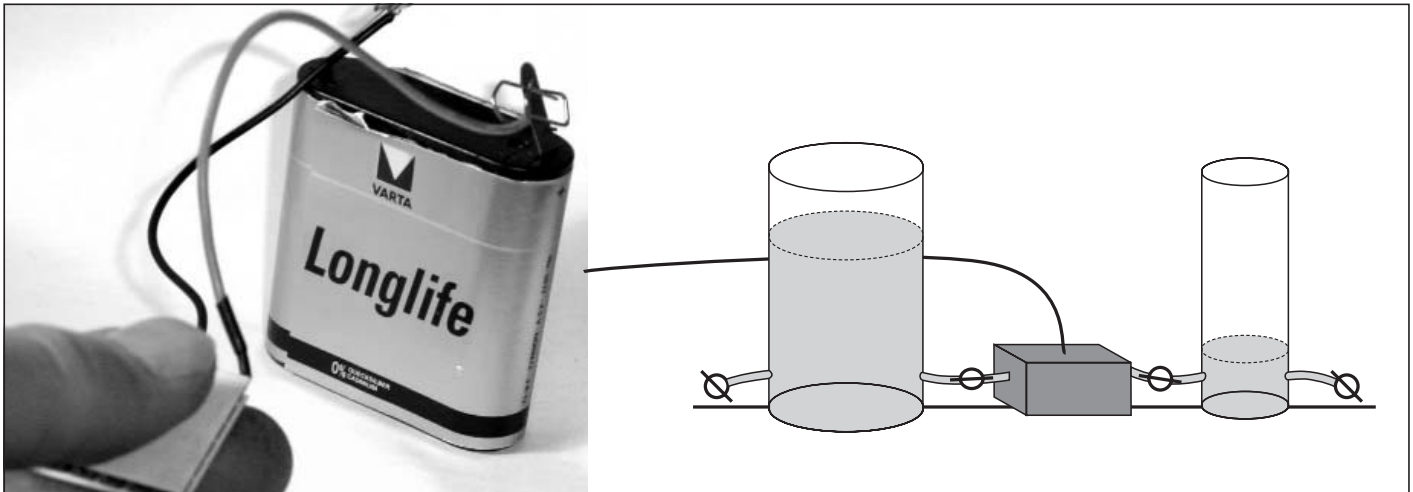


Abb. 21: Durch das Anschließen einer Batterie wird das Thermoelement zu einer „Wärmepumpe“. Die Entropie wird von der kalten Seite zur heißen Seite gepumpt. Analog dazu entsteht eine Druckdifferenz, wenn mithilfe einer Pumpe Wasser gepumpt wird. Das Wasser wird von dem Behälter mit dem niedrigen Wasserstand zu dem mit dem hohen Wasserstand gepumpt.

ratursskala“ gewählt, deren Temperaturwerte in der Maßeinheit 1 K (Kelvin) angegeben werden. Die Existenz des absoluten Temperaturnullpunktes wird physikalisch auf die folgende Weise gedeutet: Alle Gegenstände sind bei 0 K „entropie leer“; deshalb kann mithilfe einer Entropiepumpe nicht noch mehr Entropie herausgepumpt werden und deshalb kann die Temperatur nicht weiter gesenkt werden.

- *Der absolute Temperaturnullpunkt ist zugleich auch der Entropienullpunkt jedes Gegenstandes.*

Die Entropiemenge, die in einem Gegenstand enthalten ist, kann in Zahlenwerten angegeben werden: 1 g flüssiges Wasser enthält bei Zimmertemperatur und Normaldruck etwa 4 J/K, 1 g gasförmiges Wasser etwa 10,5 J/K, 1 g Kupfer etwa 0,5 J/K, 1 g Sauerstoffgas etwa 13 J/K. Die Entropiewerte weiterer Stoffe sind in den üblichen Tabellenwerken zu finden. Mithilfe dieser Werte kann der im Physikunterricht gebildete Entropiebegriff auch in der Chemie erfolgreich eingesetzt werden. Da die Entropie eine fundamentale Größe ist, kann ihr, wie im Karlsruher Physikurs [19] beschrieben, eine eigenständige Maßeinheit gegeben werden: 1 J/K = 1 Ct (Carnot).

6.8 Gibt es auch „Entropiestromkreise“?

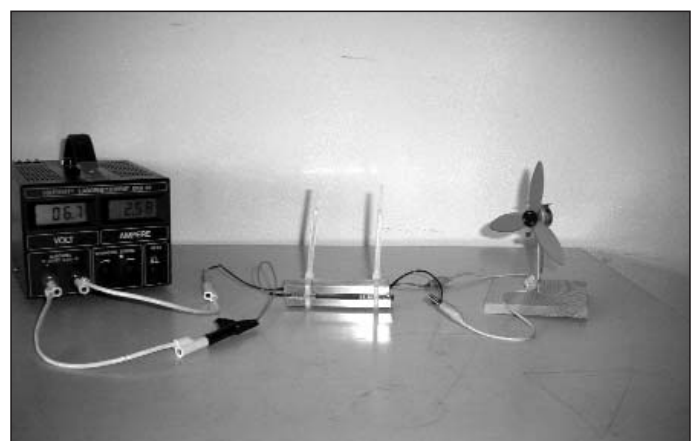
Analog der Hydraulik und der Elektrizitätslehre können wir nun einen Entropie-Stromkreis aufbauen (Abb. 24 und 25). Dazu werden zwei „Thermoelemente“ zwischen zwei Kupferstangen [20] gebracht, die durch Kabelbinder zusammengedrückt werden. Das Thermoelement, das mit einem Netzgerät verbunden ist, wirkt als „Entropiepumpe“: es treibt den Entropiestrom an, belädt ihn mit Energie. Dieser fließt dann durch das Kupfer zum Thermokraftwerk. Dort wird die Energie von der Entropie abgeladen, mit der der Lüfter betrieben wird. Die Entropie strömt dann zur „Entropiepumpe“ zurück. An der Temperaturdifferenz zwischen zwei Stellen können wir erkennen, ob dazwischen Energie auf die Entropie geladen bzw. von ihr abgeladen wird.

6.9 Die Analogie von elektrischen Strom und Entropiestrom

Unsere bisher gefundenen Eigenschaften der Entropie können wir in der Analogie (Kasten 1 und Kasten 2) tabellarisch mit den Eigenschaften der Elektrizität vergleichen.

Abb. 22 (oben): Es wird Entropie von dem einem Glas in das andere gepumpt

Abb. 23 (unten): Energie fließt vom Netzgerät zur „Wärmepumpe“, zum „Thermokraftwerk“, zum sich drehenden Lüfter.



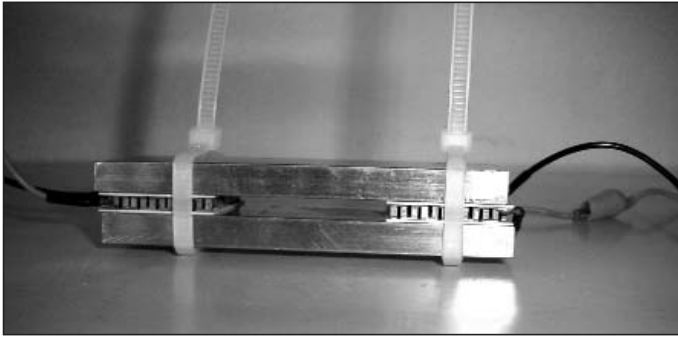


Abb. 24: Der Entropiestromkreis

6.10 Entropieerzeugung

Die entscheidende Eigenschaft, die die Entropie von den anderen analogen Größen unterscheidet, können wir auf die folgende Weise im Unterricht erarbeiten:

In Abb. 26 wird Wasser durch einen Tauchsieder erhitzt. An der Temperaturzunahme des Wassers können wir erkennen, dass die Entropie des Wassers größer geworden ist. Da es beim Tauchsieder im Gegensatz zu einer Wärmepumpe keine „kalte Seite“ gibt, kann die Entropie nicht von außen zugeströmt sein. Die zugenommene Entropie muss dann aber erzeugt worden sein. Weitere Betrachtungen alltäglicher Erscheinungen führen zu der folgenden Erkenntnis:

- Immer wenn im Alltag von „Wärme erzeugen“ gesprochen wird, wird Entropie erzeugt.

Viele Vorgänge, viele Geräte können wir umkehren: z. B. funktioniert ein Motor oft auch als Dynamo, unser Thermoelement als Wärmepumpe, ... Können wir die Entropieerzeugung auch umkehren, so dass wir Entropie vernichten? Gibt es die Umkehrung des in Abb. 26 dargestellten Tauchsieders? Gibt es den in Abb. 27 dargestellten „Tauchgefrierer“, der das Wasser abkühlt, ihm die Energie entzieht, die der Lüfter zum Antrieb benötigt und dabei Entropie vernichtet?

Vom energetischen Standpunkt aus ist das durchaus möglich. Jedoch wurde trotz größter Anstrengungen kein Gerät gefunden, das ohne äußere Temperaturdifferenz, Energie aufnimmt und auf einen anderen Energieträger umlädt. So gibt es z. B. kein Schiff, das mit einer Art „Tauchgefrierer“ das Meerwasser immer nur abkühlt und dabei dem Meer Energie entnimmt, um seine Motoren damit anzutreiben.

Kasten: Elektrischer Stromkreis und Entropiestromkreis im Vergleich

Elektrischer Stromkreis	Entropiestrom
<p>Hinweis: Die angegebenen Werte des elektrischen Potentials beziehen sich auf den am „Eingang“ des Dynamos gewählten Nullpunkt. Das elektrische Potenzial nimmt längs des Leiters ab, da wir hier von Kabeln mit nicht zu vernachlässigendem Widerstand ausgehen.</p>	<p>Hinweis: Die angegebenen Werte der Temperatur sind absolute Werte. Die Temperatur nimmt längs des Leiters ab, da wir hier den „Entropie“-Widerstand nicht vernachlässigen können.</p>

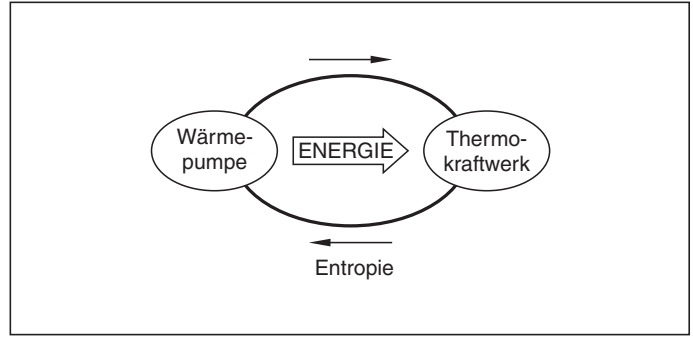


Abb. 25: Der Energietransport mit Entropie

Diese gesuchte aber nicht gefundene Maschine wird „Perpetuum mobile 2. Art“ genannt. Aus der vergeblichen Suche wird gefolgert, dass Entropie nicht vernichtet werden kann. Dies ist der Inhalt des „2. Hauptsatz der Thermodynamik“:

- Entropie kann zwar erzeugt, jedoch nicht vernichtet werden.

Das ist die tiefere Ursache dafür, dass manche Vorgänge in der Natur nicht umkehrbar, also „irreversibel“ sind: Ein einmal angeworfenes Pendel kommt von allein nach einiger Zeit zum Stillstand; jedoch kommt kein still stehendes Pendel von allein zum Schwingen. Beim angeworfenen Pendel wird durch Reibung Entropie erzeugt, die Umgebung aufgewärmt. Es gibt aber kein Pendel, das die Entropie der Umgebung vernichtet, diese dabei „abkühlt“ und die dabei aufgenommene Energie zum Antrieb des Pendels benützt.

Wir haben damit ein physikalisches Kriterium für die Richtung der Zeit gefunden:

- Die Zeit läuft in die Richtung, in der Entropie erzeugt wird.

Eine Kerze kann nicht durch Abkühlen der Welt „zurückbrennen“ (Abb. 29).

6.11 „Energieverbrauch“ und Entropieerzeugung

Energie kann weder erzeugt noch vernichtet werden. Warum ist dann die Energieversorgung eines Landes überhaupt ein Problem? Warum kann die verbrauchte Energie nicht wieder verwendet werden? Der tiefere Grund liegt in der Entropieerzeugung. Um dies verständlich zu machen, betrachten wir von neuem den in Abb. 26 dargestellten

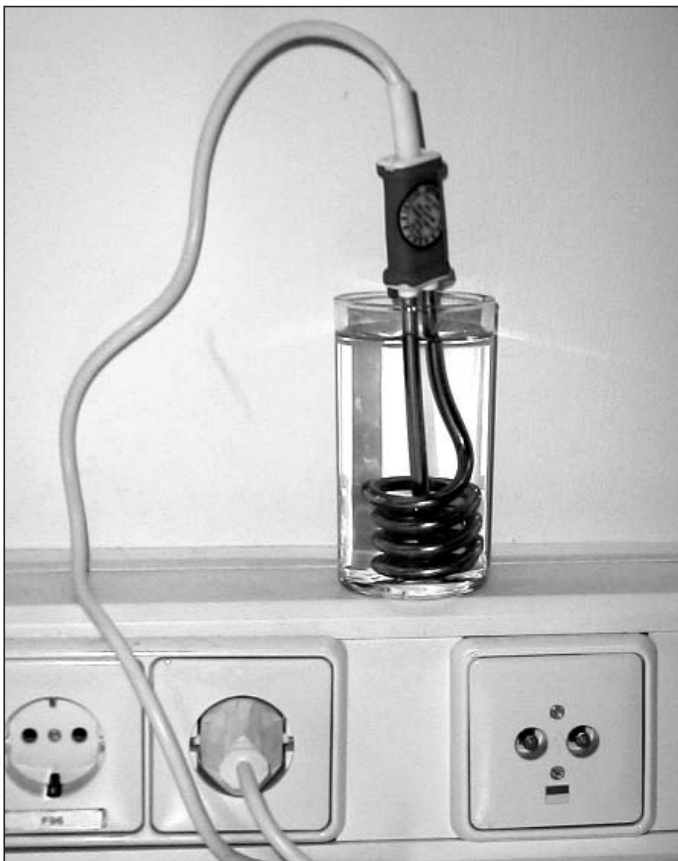
Das Energie-Träger-Konzept	
Es strömt Energie vom Dynamo zum Motor.	Es strömt Energie von der Wärmepumpe zum Kraftwerk.
Die Elektrizität ist der Energieträger.	Die Entropie ist der Energieträger.
Der Dynamo belädt die Elektrizität mit Energie.	Die Wärmepumpe belädt die Entropie mit Energie.
Der Motor lädt Energie von der Elektrizität ab.	Das Kraftwerk lädt Energie von der Entropie ab.
Die Differenz des <i>el. Potentials</i> $\Delta\phi = U$ (<i>el. Spannung</i>) gibt an, wie viel Energie in einem Umlader auf- bzw. von der Elektrizität abgeladen wird.	Die <i>Temperaturdifferenz</i> ΔT gibt an, wie viel Energie in einem Umlader auf- bzw. von der Entropie abgeladen wird.
Die <i>Energiestromgleichung</i> $I_E = \Delta\phi I_Q$ gibt die <i>Stärke des Energiestroms</i> an, der in einem Umlader mit einem el. Strom verbunden bzw. von einem el. Strom getrennt wird.	Die <i>Energiestromgleichung</i> $I_E = \Delta T I_S$ gibt die <i>Stärke des Energiestroms</i> an, der in einem Umlader mit einem Entropiestrom verbunden bzw. von einem Entropiestrom getrennt wird.

Kasten 1

Das Strom-Antrieb-Konzept	
Es werden <i>zwei Leitungen</i> benötigt, damit die Elektrizität hin und zurück fließen kann. („elektrische Stromkreis“)	Es werden <i>zwei Leitungen</i> benötigt, damit die Entropie hin und zurück fließen kann. („Entropiestromkreis“)
Die <i>el. Stromstärke</i> $I_Q = \text{Elektrizitätsmenge} / \text{Zeit}$ ist im unverzweigten Stromkreis an jeder Stelle gleich.	Die <i>Entropiestromstärke</i> $I_S = \text{Entropiemenge} / \text{Zeit}$ ist im unverzweigten Stromkreis an jeder Stelle gleich.* * dass diese Zeile für den Entropiestrom nicht allgemein gilt, wird erst im späteren Unterricht problematisiert.
Die <i>Differenz des el. Potentials</i> $\Delta\phi = U$ (<i>el. Spannung</i>) gibt an, wie stark der el. Strom angetrieben wird.	Die <i>Temperaturdifferenz</i> ΔT gibt an, wie stark der Entropiestrom angetrieben wird.
Der „ <i>Strom-Antrieb-Zusammenhang</i> “ eines Systems kann durch eine Kennlinie beschrieben werden. Je größer der elektrische Widerstand des Systems ist, desto größer muss die elektrische Spannung U sein, um einen elektrischen Strom der Stärke I_Q zu bewirken.	Der „ <i>Strom-Antrieb-Zusammenhang</i> “ eines Systems kann durch eine Kennlinie beschrieben werden. Je größer der Entropiewiderstand des Systems ist, desto größer muss die Temperaturdifferenz ΔT sein, um einen Entropiestrom der Stärke I_S zu bewirken.

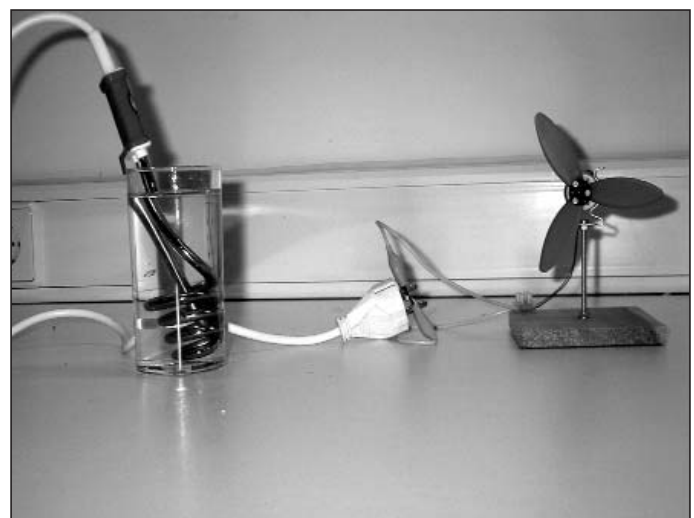
Kasten 2

Abb. 26: „Wärmeerzeugung“



Tauchsieder. Der mit Elektrizität aufgenommene Energiestrom verlässt den Tauchsieder vollständig mit erzeugter Entropie. Diese Energie könnte theoretisch wieder vollständig von der erzeugten Entropie abgeladen werden, wenn wir ein Kraftwerk hätten, das am Entropieausgang eine Temperatur von 0 K, also von $-273,15\text{ °C}$ hätte. Bei den meisten realen thermischen Kraftwerken haben wir als tiefste Temperatur jedoch bestenfalls die Temperatur des Kühlwassers von Flüssen oder die Temperatur der umge-

Abb. 27: Der „Tauchgefrierer“ kühlt das Wasser ab, und treibt mit der dem Wasser entzogenen Energie den Lüfter an



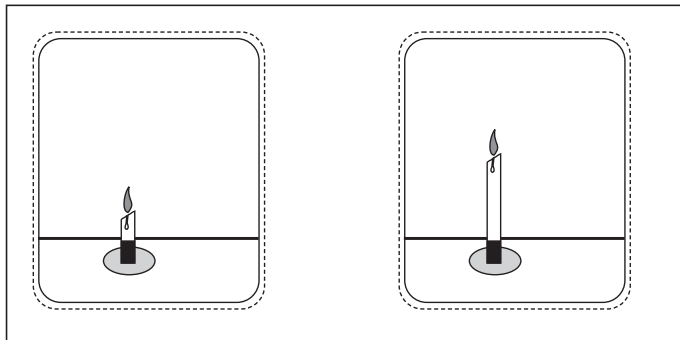


Abb. 28 (oben): Es gibt keinen Schiffsantrieb, der die zum Antrieb benötigte Energie durch Abkühlen dem Meer entnimmt.

Abb. 29 (Mitte): Die beiden Bilder sind zeitlich falsch geordnet: aufwärts brennende Kerzen, die die Luft der Umgebung abkühlen und dabei die Energie in frisch gebildetem Kerzenwachs speichern, gibt es nicht!

Abb. 30 (unten): Ein tobender Wasserfall: die Energie wird nur zur Entropieerzeugung verwendet.

benden Luft, also etwa 300 K. Deshalb kann von der bei der Erzeugung der Entropie eingesetzten Energie nur ein kleiner Teil wieder „zurück gewonnen“ werden. Der Rest wird ungenutzt mit der zuvor erzeugten Entropie an die Umgebung abgegeben.

- *Entropieerzeugung bedeutet immer „Energieverbrauch“ in dem Sinne, dass ein bestimmter Teil der Energie, die von erzeugter Entropie getragen wird, nicht mehr genutzt werden kann, also „verloren geht“.*

6.12 Das Minimieren der Entropieerzeugung

Natürliche Vorgänge haben immer eine mehr oder weniger große Entropieerzeugung zur Folge. Reversible Vorgänge im strengen Sinn finden wir nicht. Immer wird mehr oder weniger Entropie erzeugt. Es scheint, als ob die Welt einem Entropiemaximum zustrebt. Der Erfindergeist des Menschen versucht nun aber die Entropieproduktion zu verringern: Es werden Fahrzeuge mit möglichst geringem Luft- und Reibungswiderstand, elektrische Leitungen mit möglichst geringem elektrischen Widerstand, Kraftwerke, mit möglichst geringer Entropieproduktion, ... gesucht und konstruiert. Statt dass die Energie eines Wasserfalls „dissipiert“ (Abb. 30), d.h. auf erzeugte Entropie geladen wird, wird in Wasserkraftwerken versucht, sie möglichst ohne Entropieerzeugung auf Elektrizität umzuladen, um sie für eine sinnvolle Nutzung bereit zu stellen.

- *Natürliche Vorgänge streben eine maximale Entropieproduktion an, der Mensch versucht durch technische Entwicklungen diese zu minimieren.*

6.13 Qualitative Ergebnisse

Nun verstehen wir,

- warum thermische Kraftwerke „Kühlausgänge“ benötigen: die bei der „Wärmeerzeugung“ produzierte Entropie muss nach außen abgeführt werden.
- dass ein Auto, das von einer Brennstoffzelle angetrieben wird, weniger Energie benötigt: bei der chemischen Umsetzung der Energie wird weniger Entropie erzeugt als bei der Verbrennung des Benzins in einem Automotor.
- warum zum Heizen eines Hauses ein „Blockheizkraftwerk¹⁾“ sinnvoller ist als eine Gasheizung: die Energie wird doppelt genutzt. Zunächst wird von der Entropie, die beim Verbrennen des Gases erzeugt wurde, ein Teil der Energie mithilfe eines Motors abgeladen, die dann als elektrische Energie zur Verfügung steht. Danach wird die „Abwärme“, die Energie, die mit der erzeugten Entropie den Motor verlässt, zu Heizzwecken genutzt.
- warum gasbetriebene Wärmepumpen zum Heizen ökologisch sinnvoller sind als Gasheizungen: statt die zum Heizen benötigte Entropie zu erzeugen, wird sie von der Umwelt aufgenommen, die dann nur noch auf Raumtemperatur „gehoben“ werden muss.

6.14 Qualitative Überlegungen

Beispiel 1: Die Entropiestromstärke eines Tauchsieders

Ein 200 W Tauchsieder hält Wasser beim Sieden. Die Temperatur beträgt konstant 100 °C. Die Energie verlässt den

¹⁾ Blockheizkraftwerke sind öl- bzw. gasbetriebene Motoren, die Generatoren antreiben und deren „Abwärme“ zum Heizen verwendet werden. Die vom Generator bereitgestellte Energie wird in das elektrische Netz eingespeist.

Tauchsieder vollständig mit Entropie. Analog der anderen Energietransporte gilt auch hier:

$P = T I_S$, wobei I_S die Stärke des Entropiestroms bedeutet. Wir können somit $I_S = P/T = 200 \text{ W}/372 \text{ K} = 0,54 \text{ W/K} = 0,54 \text{ J/(Ks)}$ berechnen.

Beispiel 2: Vergleich von Heizung und Wärmepumpe

Das Wasser eines Schwimmbads muss erwärmt werden. Die Heizung muss dazu 20 kW bei 47 °C abgeben können. Die Stärke des Entropiestroms I_S , der die Heizung verlässt, beträgt somit $I_S = 20 \text{ kW} / 320 \text{ K} = 62,5 \text{ J/(Ks)}$. In einer Gasheizung wird dieser Entropiestrom vollständig erzeugt. Dazu werden 20 kW benötigt. Eine Wärmepumpe, die denselben Entropiestrom mit der Temperatur von -13 °C aus der Umgebung aufnimmt, benötigt im idealen Fall $P = \Delta T I_S = 60 \text{ K} \cdot 62,5 \text{ J/Ks} = 3,8 \text{ kW}$. Wird die Wärmepumpe mit Gas betrieben, so wird also 5mal weniger Energie benötigt um dieselbe „Energiedienstleistung“ zu bekommen.

6.15 Entropie-Aufgaben

- „Ein Kühlschrank erzeugt Kälte“. Ist das nicht ein Widerspruch zum 2. Hauptsatz der Thermodynamik? Nimm dazu Stellung.
- Vergleiche den Wasserfall aus Abb. 30 mit einer Heizung, in der der Brennstoff nur verbrannt wird, ohne dass die Temperaturdifferenz sinnvoll verwendet wird.
- Ein Haus könnte mit einer Gasheizung oder einer elektrisch betriebenen Wärmepumpe geheizt werden. Vergleiche beide Möglichkeiten unter physikalischen und ökologischen Gesichtspunkten.

7 Rückblick

Die Abb. 31 und 32 verbildlichen zusammenfassend die beiden zentralen Konzepte, durch die den Schülerinnen und Schülern kumulatives Lernen ermöglicht werden soll. Die Entropie wird mit den zuvor behandelten analogen Größen in Verbindung gebracht; es entsteht ein immer stabiler werdendes Geflecht von physikalischen Zusammenhängen.

Als besondere Eigenschaft der Entropie kommt hinzu (Abb. 33), dass sie zwar erzeugt, aber nicht wieder vernichtet werden kann.

Literatur und Bezugsquellen

- [1] www.bildungsstandards-bw.de <<http://www.bildungsstandards-bw.de>> unter Gymnasium, Physik
- [2] *Hartmann Römer, Thomas Filk*: Statistische Mechanik; VCH Weinheim 1994 Seite 92
- [3] *Hartmann Römer*: Naturgegeben oder frei erfunden? Wie viel Freiheit gibt es in der Physik; Philosophisches Jahrbuch 1999, Verlag Alber Freiburg
- [4] *Georg Job*: Neudarstellung der Wärmelehre; Akademische Verlagsgesellschaft Frankfurt 1972
- [5] *Martin Wagenschein*: Die Pädagogische Dimension der Physik; Hahner Verlagsgesellschaft, Aachen 1995
- [6] *Friedrich Herrmann*: Atlanten der Physik Nr. 64; Praxis der Naturwissenschaften 1. März 2003
- [7] *Dieter Plappert*: Verständliche Elektrizitätslehre, Praxis der Naturwissenschaften Physik 7/52, Oktober 2003
- [8] *Dieter Plappert*: Umsetzungsbeispiele zu den Bildungsstandards Physik, Leuheft Ph 38.2, Stuttgart 2004. Zu beziehen unter www.leu.bw.schule.de/allg/publikationen
- [9] *Heiner Schwarze* (Hrsg.): Unterricht Physik Bd. 23: Entropielehre I – Temperaturdifferenz und Entropiestrom, Aulis Verlag, Köln 2004
- [10] Analogieserie zu beziehen bei: Conatex, Postfach 1407, 66514 Neunkirchen, 06821/94110, www.conatex.com

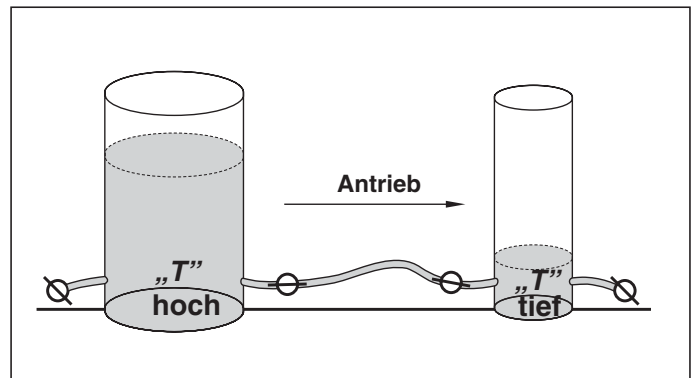
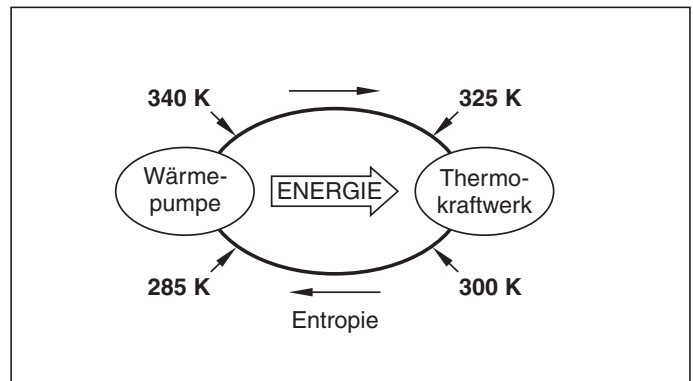


Abb. 31 (oben): Entropie transportiert Energie

Abb. 32 (Mitte): Temperaturdifferenz als Antrieb des Entropiestroms

Abb. 33 (unten): Entropie kann erzeugt werden

- [11] *Manfred Euler*: Einsicht in die Metamorphosen innerer Bilder, Praxis der Naturwissenschaften-Physik 4/49 (2000) 10
- [12] *Wolfgang Salm*: Entropie und Information; Aulis Verlag Köln 1997
- [13] *Inge Niedek, Harald Frater*: Naturkatastrophen; Springer
- [14] *Dieter Plappert*: Phänomenorientierte Wärmelehre; www.plappert-freiburg.de/physik <<http://www.plappert-freiburg.de/physik>>
- [15] Modelldampfmaschine mit Glaskondensator: www.plappert-freiburg.de/physik
- [16] Versuchsanleitung des Bausatzes „Energiewerke“ unter www.plappert-freiburg.de/physik <<http://www.plappert-freiburg.de/physik>> Bestellung unter www.opitec.de <<http://www.opitec.de>> Bausatz Nr 123.987 zu 12,90 €
- [17] www.exergia.de <<http://www.exergia.de>>
- [18] *Berthold Wiedersich*: Taschenatlas Wetter; Klett Perthes
- [19] *Friedrich Herrmann*: Der Karlsruher Physikkurs Band 1 Sek 1 und Thermodynamik Sek. 2, Aulis Verlag Köln
- [20] Kupfer ist im Metallhandel erhältlich. Maße: 100 x 40 x 8 mm

Anschrift des Verfassers:

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