

## 107.0703 Modul „thermischer Energie-Träger-Stromkreis“ nach Prof. Dieter Plappert, Freiburg i.Br.

### 1. Didaktische Vorbemerkungen

In einem kumulativ aufgebauten Physikunterricht spielen wenige grundlegende Konzepte eine zentrale Rolle, die in möglichst vielen Bereichen angewandt werden können. Wie in [1] und [2] ausführlich beschrieben sind das „Energie-Träger-Konzept“ und das „Strom-Antrieb-Konzept“ (Anhang 1) geeignet, sehr viele Phänomenbereiche miteinander zu vernetzen. Durch den neu konzipierten „thermischen Energie-Träger-Stromkreis“ (108.0703) und dem neu entwickelten „Quick-Cool-ThermoSchülerSet“ (107.7102) können die Schülerinnen und Schülern die zuvor in anderen Gebieten entwickelten Konzepte fast wie selbstverständlich auf Erscheinungen der Wärmelehre zu übertragen. Durch Fragestellungen aus ihrer Erfahrungswelt gelingt es ihnen nicht nur den thermodynamischen Entropiebegriff anschaulich zu bilden und gegen den Energiebegriff abzugrenzen, sondern diesen auch selbständig auf neue Fragestellungen anzuwenden: „Sind elektrische Wärmepumpen ökologisch sinnvoll?“ „Warum brauchen thermische Kraftwerke eine Kühlung?“ „Warum kann die thermische Energie der Weltmeere nicht für unsere Energieversorgung verwendet werden?“ Auf dem auf diese Weise im Physikunterricht eingeführten Entropiebegriff kann auch in anderen Naturwissenschaften, z. B. in der Chemie der Kursstufe, gewinnbringend zurückgegriffen werden. In [3] und [4] ist ein entsprechender Unterrichtsgang ausführlich beschrieben.

### 2. Das Modul „thermischer Energie-Träger-Stromkreis“

Das Modul „thermischer Energie-Träger-Stromkreis“ (Abb. 1) besteht aus

- zwei Aluelemente mit verklebten Peltierelementen,
- drei weiteren Aluelemente,
- zwei Alukörper,
- zwei Heatpipes,
- drei Kammern .



### 3. Aufbau des thermischen Energie-Träger-Stromkreis

- Die Enden der gebogenen Heatpipes werden **vor-sichtig (!)** so weit in die Aluelemente gedreht, dass das Ende der Heatpipe gerade auf der anderen Seite herausschaut.
- Die Bohrungen für die Temperaturfühler sollen immer an der oberen Seite liegen.
- Die Heatpipes dürfen dabei nicht verbogen werden; bitte großflächig mit der Hand drücken!! Die Aluelemente mit verklebtem Peltierelement sollen sich beide an derselben Heatpipe befinden.
- Die beiden „Leitungen“ mit Hilfe der Klammern zusammen klemmen. Auf bestmöglichsten Wärmekontakt achten.
- Beim vorhandenen Energie-Träger-Stromkreis ([108.0700](#)) wird der hydraulische Stromkreis (Pumpe, Wassergenerator, Schläuche) (Abb.2) entfernt und durch das Modul „thermischer Energie-Träger-Stromkreis“ ([108.0703](#)) ersetzt (Abb. 3).

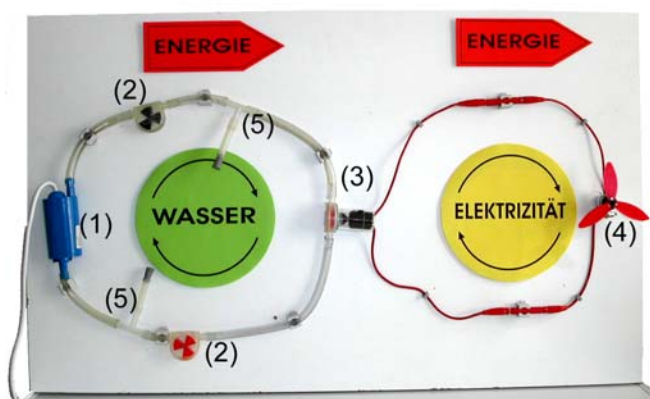
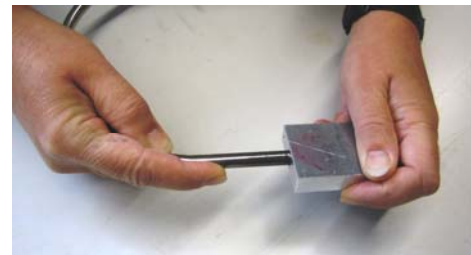


Abb. 2: hydraulischer Energie-Träger-Stromkreis

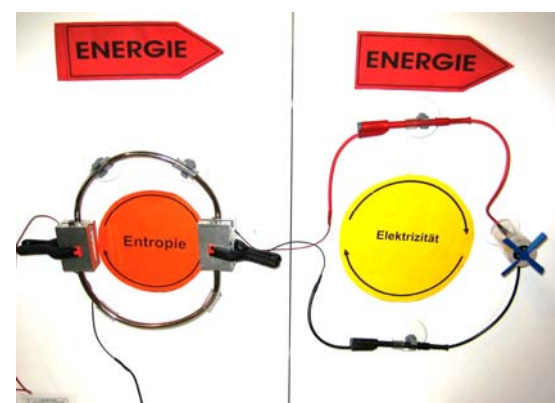


Abb. 3: thermischer Energie-Träger-Stromkreis

#### Anmerkung:

- Das nicht benötigte hydraulische Energie-Träger-Modul kann mit den überzähligen Haltemagneten auf der Rückseite der Metallaufbauwand „gelagert“ werden.

## 4. Inbetriebnahme

Der thermische Energie-Träger-Stromkreis kann mit einem Netzgerät (Gleichstrom, maximal 6 A und 15 V) bzw. einem Handgenerator ([100.8012](#)) betrieben werden. Bei 1,0 A dauert es etwa 30 Sekunden bis sich der Propeller zu drehen beginnt. Etwas länger dauert es, wenn mit dem Handgenerator kräftig gedreht wird.

## 4. Energie und Energieträger

**Voraussetzungen:** Im Physikunterricht wurde ein allgemeiner Energiebegriff eingeführt: immer wenn sich etwas bewegt, wenn etwas geheizt wird, ... wird Energie benötigt, die Energie kommt immer irgendwo her, geht immer irgendwo hin. Außerdem wurden z.B. mithilfe des hydraulischen Energie-Träger-Stromkreises (Abb. 2) die Begriffe **Energie und Energieträger** differenziert und die zentralen Regeln formuliert:

- Energie kann nicht alleine strömen. Bei Energietransporten strömt immer etwas Zweites mit, das bildhaft als „Energieträger“ bezeichnet werden kann.
- Energie und Träger können immer dann klar voneinander unterschieden werden, wenn sie **verschiedene Wege** nehmen:

Das Drehen des Propellers zeigt beim hydraulischen Energie-Träger-Stromkreis (Abb. 2) an, dass Energie übertragen wird, dass Energie vom Netzgerät zur Pumpe (1), zum Wassergenerator (3), zum Elektromotor (4) strömt. Von der Pumpe strömt die Energie mit dem Wasser bzw. mit dem Wasserstrom bis zum Wassergenerator, vom Wassergenerator dann mit der Elektrizität bzw. dem elektrischen Strom zum Lüfter. Für das Wasser bzw. die Elektrizität werden jeweils zwei Verbindungen (Schläuche bzw. Kabel) benötigt; Wasser und Elektrizität strömen im *Kreis*. Wasser und Elektrizität nehmen also einen *anderen Weg* als die Energie. Wasser und Elektrizität haben die Aufgabe eines „Energieträgers“: das Wasser wird in der Pumpe mit Energie beladen, es trägt die Energie zur „Turbine“ des Wassergenerators. Dort wird die Energie vom Wasser auf Elektrizität umgeladen. Das Wasser strömt zur Pumpe zurück, um dort von neuem mit Energie beladen zu werden. Entsprechend strömt die Energie vom Wassergenerator mit der Elektrizität zum Elektromotor des Lüfters... Weitere Ausführungen sind in [1] und in der Betriebsanleitung zum hydraulischen Energie-Träger-Stromkreis zu finden.

**Leitfrage:** „Wie findet beim thermischen Energie-Träger-Stromkreis der Energietransport zwischen den beiden Peltierelementen statt?“

Der thermische Energie-Träger-Stromkreis (Abb. 3) wird so lange betrieben, bis sich der Propeller deutlich zu drehen beginnt. Das Drehen des Propellers zeigt an, dass dort Energie ankommt. Die Energie kann nur vom ersten Peltierelement kommen, das wiederum von einem Netzgerät, bzw. einem Handgenerator angetrieben wird. Somit ist der **Weg des Energiestroms** identifiziert: vom Netzgerät bzw. Handgenerator zum 1. Peltierelement, zum 2. Peltierelement, zum „Lüfter“. Damit die Energie dauerhaft vom ersten zum zweiten Peltierelement strömen kann, müssen beide Peltierelemente durch zwei „Leitungen“ miteinander verbunden

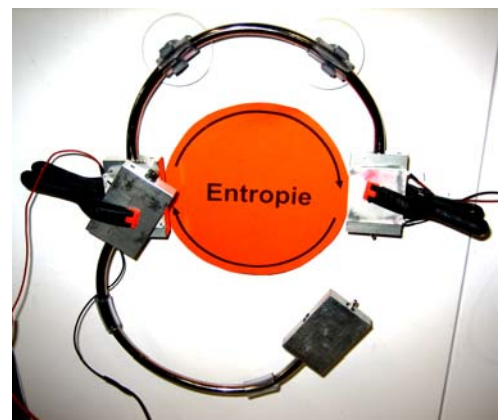
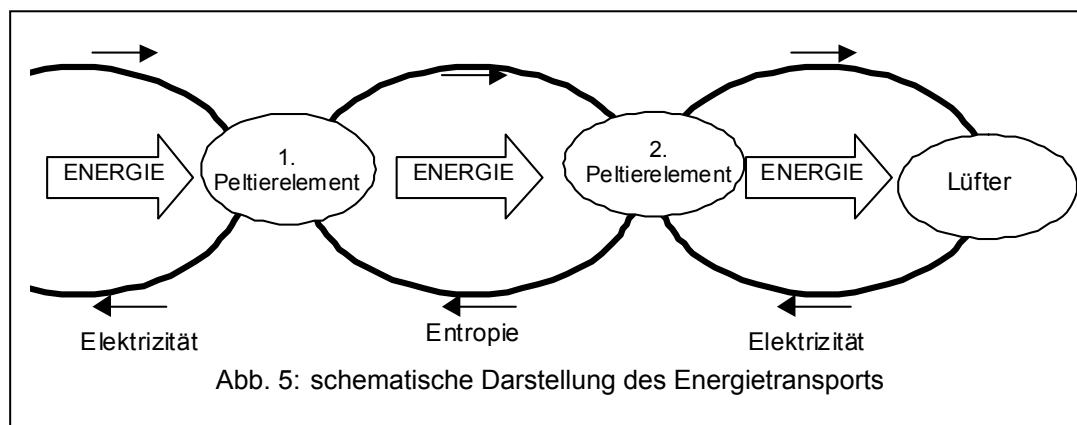


Abb. 4: der „Stromkreis“ ist unterbrochen

sein. Unterbrechen wir die Verbindung nach dem 2. Peltierelement (Abb. 4), dann dreht sich der Propeller immer langsamer, der Energietransport kommt zum Erliegen. Wird die Verbindung wieder geschlossen, so beginnt sich der Propeller sofort wieder kräftig zu drehen.

**Leitfrage:** Mit welchem Träger findet der thermische Energietransport statt?

Für einen dauerhaften Energietransport werden zwei „Leitungen“ benötigt. Der Energieträger strömt hier im Kreis, wie das Wasser im hydraulischen und die Elektrizität im elektrischen Stromkreis. Der Energieträger, der hier den Energietransport übernimmt, könnte „Wärme“ genannt werden; in der Physik wird er jedoch **Entropie** genannt. Im 1. Peltierelement wird die Entropie mit Energie beladen. Sie strömt dann mit der Entropie durch die 1. Heatpipe zum 2. Peltierelement. Dort wird die Energie von der Entropie ab und auf Elektrizität umgeladen. Durch die 2. Heatpipe strömt die Entropie dann zum 1. Peltierelement zurück um von Neuem mit Energie beladen zu werden. Wie beim elektrischen Stromkreis können wir den Energieträger hier nicht direkt sehen. Energie und Entropie nehmen wie das Wasser im hydraulischen und die Elektrizität im elektrischen Stromkreis verschiedene Wege.



**Anmerkungen:**

- Das 1. Peltierelement hat die Funktion einer **Entropiepumpe**; im Alltag werden entsprechende Entropiepumpen „**Wärmepumpen**“ genannt und zu Heizzwecken bzw. beim Kühlschrank und Klimaanlage zu Kühlzwecken benutzt.
- Das 2. Peltierelement hat die Funktion eines **thermischen Kraftwerks**.

**Leitfrage:** Woran erkennt man, dass die Entropie vor dem 2. Peltierelement mehr Energie trägt als danach?

Bei allen bisher im Physikunterricht behandelten Energieträgern haben wir physikalische Größen kennen gelernt, mit deren Hilfe wir erkennen konnten, wie viel Energie ein Träger transportiert (z.B. Druck  $p$  und elektrisches Potenzial  $\varphi$ ) bzw. durch deren Differenz wir angeben konnten, wie viel Energie in einem System auf- bzw. abgeladen wird. ( z.B. Druckdifferenz  $\Delta p$  und elektrische Potenzialdifferenz  $\Delta\varphi$ , die der elektrischen Spannung  $U$  entspricht). Auch bei den thermischen Energietransporten gibt es eine entsprechende physikalische Größe. Berühren wir die 1. Heatpipe, so stellen wir fest, dass deren Temperatur höher ist als die der 2. Heatpipe. Messen wir wie in Abbildung 6 dargestellt die Temperatur an verschiedenen Stellen des Entropiestromkreises, so können wir sehen, dass wir bei thermischen Energietransporten an der Temperatur erkennen können, wie stark die Entropie mit Energie beladen ist. Die Temperaturdifferenz  $\Delta T$  gibt dann entsprechend an, wie viel Energie in einem System auf die Entropie auf- bzw. abgeladen wird.

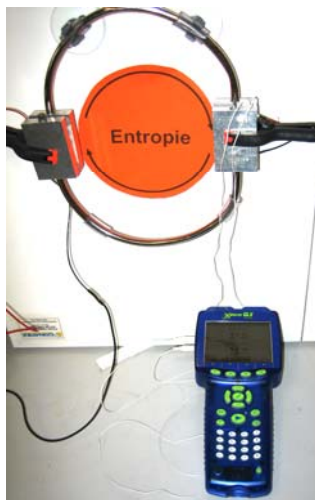


Abb. 6: Temperaturmessung vor und nach dem Peltierelement

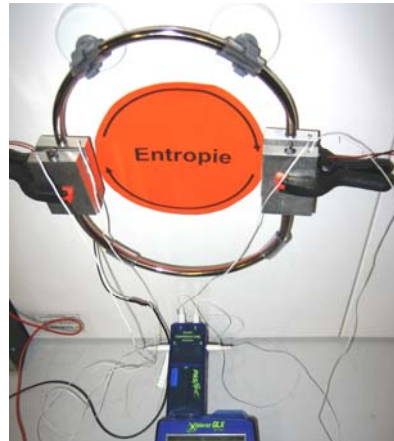
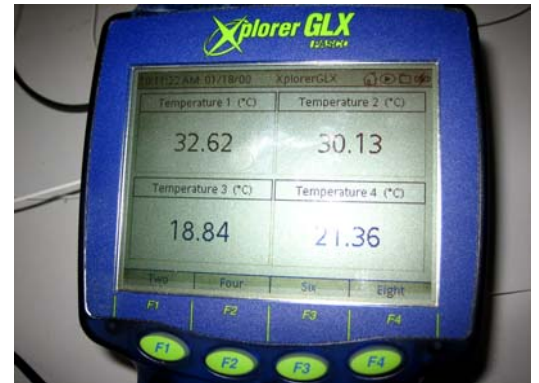
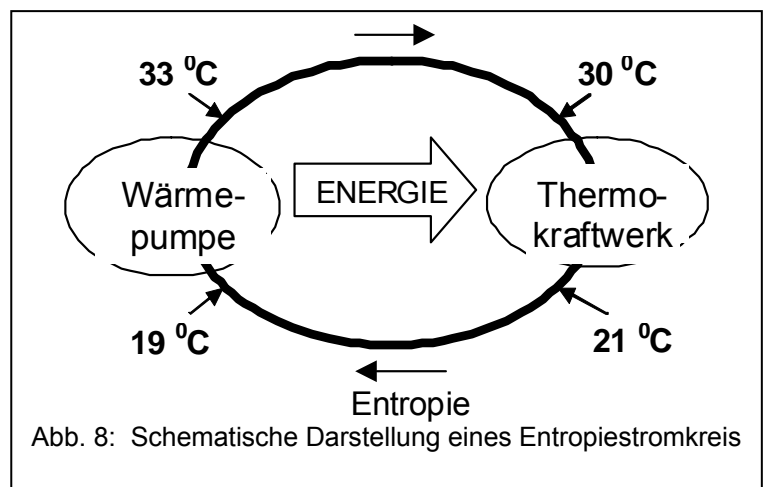


Abb. 7: Mit dem 4-fach Temperatursensor ([104.1032](#)) können die Temperaturen an vier Stellen des Stromkreises gleichzeitig gemessen und angezeigt werden.



## Anmerkungen:

- Analog des Wasserstrom- und des elektrischen Stromkreises nimmt der Wert der Temperatur längs des Stromkreises stetig ab, auch längs einer Heatpipe. Wegen des Entropiewiderstands wird Energie benötigt, damit die Entropie durch die Heatpipe hindurch strömen kann.
- Analog der anderen Stromkreise steigen deshalb bei längerem Betrieb alle Temperaturen im Stromkreis. Entsprechender Temperaturanstieg ist auch bei einem Wasserstromkreis messbar.



## quantitative Untersuchung:

Mithilfe des Mesura Energiemessgeräts ([202.2022](#)) kann die vom 1. Peltierelement aufgenommene (Abb. 9) oder die vom 2. Peltierelement abgegebene Energiestromstärke (Leistung; Wattzahl) gemessen werden und der Wirkungsgrad dieser „Energieübertragung“ quantitativ ermittelt werden.

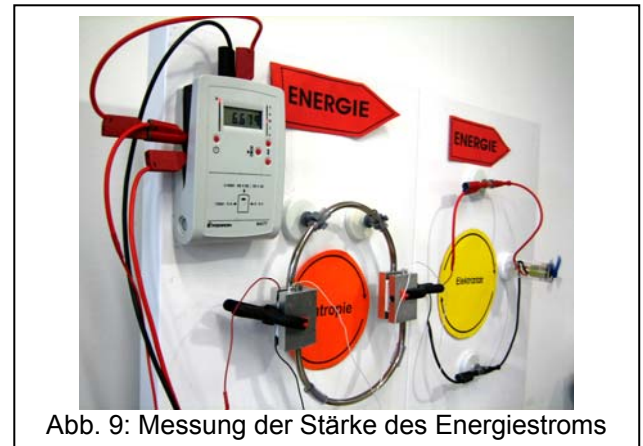


Abb. 9: Messung der Stärke des Energiestroms

## 5. „Entropie-Eimer“

**Leitfrage:** Warum strömt keine Energie beim offenen Entropiestromkreis (Abb. 4)?

Im offenen Entropiestromkreis steigt die Temperatur im Betrieb immer höher, der Propeller dreht sich jedoch nicht; es wird also keine Energie im 2. Peltierelement von der Entropie abgeladen. Befestigen wir am Entropieausgang des 2. Peltierelements einen Alukörper, der zunächst Zimmertemperatur hat, so beginnt sich der Propeller sofort zu drehen. Befestigen wir einen im Kühlfach gekühlten Alukörper, so dreht sich der Propeller kräftiger. Befestigen einen erwärmten Alukörper, so kommt die Drehung des Propellers zum Erliegen. Aus dieser Versuchsreihe können wir schließen:



Abb. 10: Der Alukörper ist ein „Entropie-Eimer“

- Der Alukörper hat die Funktion eines „Entropie-eimers“; je tiefer seine Temperatur ist, desto weniger Entropie enthält er, desto „entropieleerer“ ist er.
- Ohne Alukörper ist der Entropieausgang des Peltierelements „verstopft“.
- Nur mit einer Temperaturdifferenz zwischen Ein- und Ausgang des Peltierelements kann Energie von der Entropie abgeladen werden.
- Je größer diese Temperaturdifferenz ist, umso mehr Energie kann im Peltierelement abgeladen werden.
- In thermischen Kraftwerken wird umso mehr Energie von der Entropie geladen, je größer die Temperaturdifferenz ist.
- Auch bei einem Kohlekraftwerk kommt es auf die Temperaturdifferenz zwischen Kessel und Kühlwasser an (Anhang 2).
- Je größer die Temperaturdifferenz ist, umso mehr Energie wird im Kraftwerk von der Entropie abgeladen, umso größer ist der Wirkungsgrad eines thermischen Kraftwerks.
- Der „Kühlausgang“ eines Kraftwerks hat eine dem Wasserabfluss eines Wasserkraftwerks analoge Bedeutung: dort strömt die Entropie aus dem Kraftwerk heraus, in den Fluss bzw. den Kühlturm.

## 6. Zwei analoge Behälterversuche

**Leitfrage:** *Wie sieht der zu Abbildung 11 analoge thermische Versuchsaufbau aus?*

Abbildung 12 zeigt den entsprechenden thermischen Versuchsaufbau: den verschieden gefüllten Wasserbehältern entsprechen die Alukörper verschiedener Temperatur, den Schläuchen die Heatpipes, dem „Wassergenerator“ (108.0701) das Peltierelement, das die Funktion eines „Thermogenerators“ hat. Wie das Wasser von einem Behälter zum anderen strömt, strömt die Entropie von einem Alukörper zum anderen. Das Abfließen der Entropie wird durch die Temperaturabnahme des einen Alukörpers angezeigt, das Zuströmen der Entropie durch die Temperaturzunahme des zweiten Alukörpers.

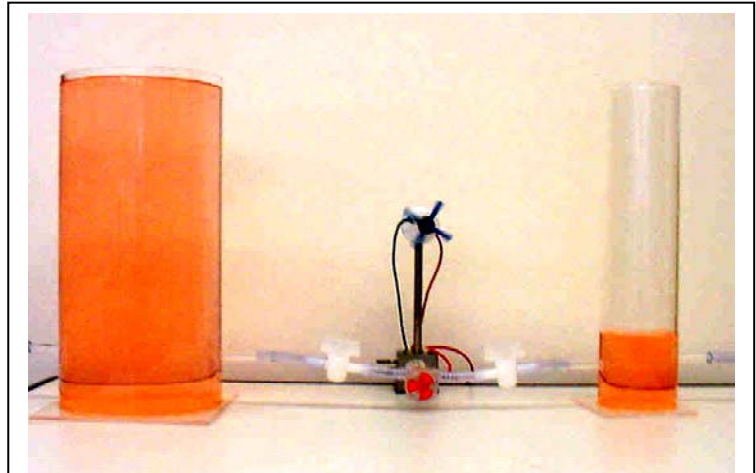


Abb. 11: Wasser strömt vom Behälter hohem Drucks zum Behälter tiefen Drucks; der Wassergenerator lädt Energie vom Wasser.

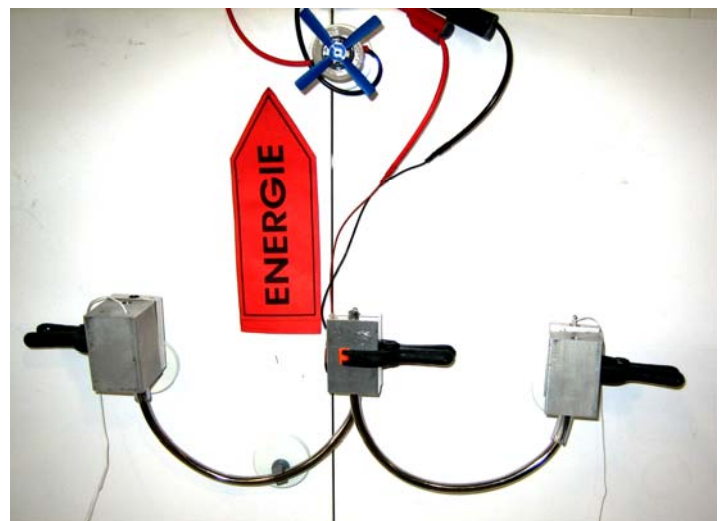
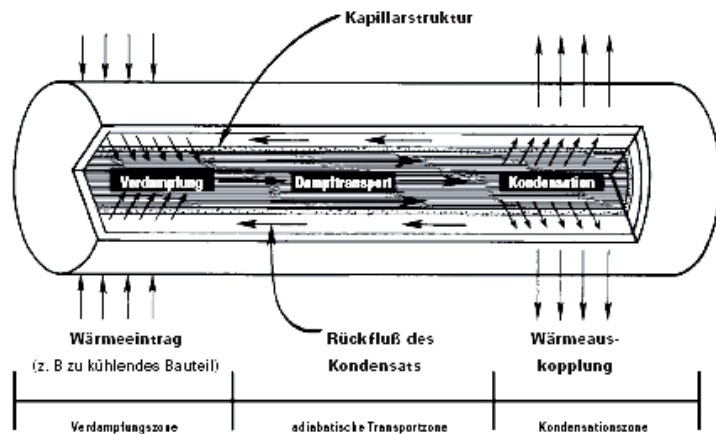


Abb. 12: Entropie strömt vom Behälter hoher Temperatur zum Behälter tiefer Temperatur; der Thermogenerator lädt Energie von der Entropie.

## 7. Heatpipe als „Entropieleiter“

**Leitfrage:** Wie funktioniert eine Heatpipe?

Halten wir eine Heatpipe in warmes Wasser, so spüren wir fast augenblicklich eine Temperaturzunahme am anderen Ende der Heatpipe. Die Heatpipe, oft auch Wärmerohr genannt, ist also ein sehr guter Entropieleiter. Vergleicht man die Entropieleitfähigkeit mit der eines massiven Kupferstabs gleicher Länge, so stellt man fest, dass die Heatpipe Entropie 100 bis 1000 mal besser leitet. Die Heatpipe ist hohl, auf ihrer Innenseite befindet sich eine „kapillare Schicht“. An der



warmen Seite, dem Entropieeingang, verdampft ein Stoff und nimmt dabei sehr viel Entropie und Energie auf. Dieser Stoff kondensiert an der kalten Seite und gibt dabei die Entropie und die Energie wieder ab. Der Rücktransport des kondensierten Dampfes erfolgt aufgrund der Kapillarität in der kapillaren Schicht. Heatpipes werden zur Kühlung von Prozessoren in Computern genutzt.

## 8. „Thermo-Transformator“

**Leitfrage:** Hat der in Abbildung 13 dargestellte Versuchsaufbau einen Sinn?

Wird der Lüfter von Abb. 12 durch das 2. Peltierelement ersetzt, so erhalten wir den in Abbildung 13 dargestellten Versuchsaufbau. Bei einem großem Temperaturunterschied zwischen den Alukörpern ist ein Temperaturunterschied zwischen den beiden Flächen des 2. Peltierelements zu messen. Die im ersten Peltierelement abgeladene Energie wird benützt, um mit dem 2. Peltierelement Entropie zu pumpen. Abbildung 13 ist ein Modell einer elektrisch betriebene Wärmepumpe, die von einem thermischen Kraftwerk angetrieben wird. Solche elektrischen Wärmepumpen werden zu Heiz- bzw. Kühlzwecken eingesetzt. Beim Heizen mit einer Wärmepumpe wird Entropie aus dem Erdreich in das Haus gepumpt werden. In [4] ist hierzu eine quantitative Abschätzung zu finden.

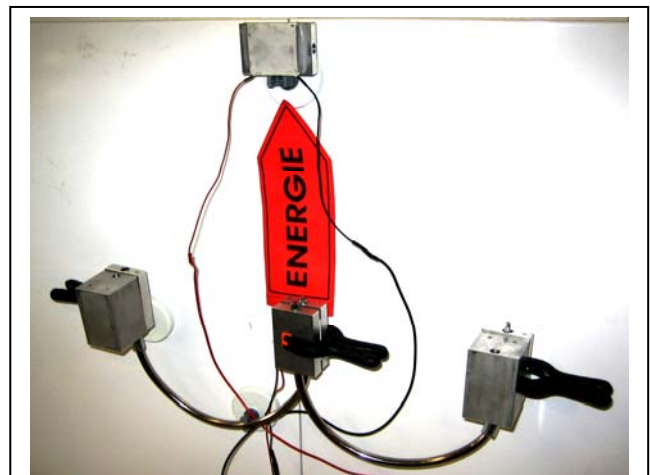


Abb. 13: Hat das einen Sinn?



## 9. Messung der Entropiestromstärke

**Frage:** Was kann man an der Spannung eines Peltierelements erkennen?



Abb. 14: Die angezeigte Spannung ist umso größer, je größer die Stärke des Entropiestroms ist, der durch das Peltierelement hindurchfließt.

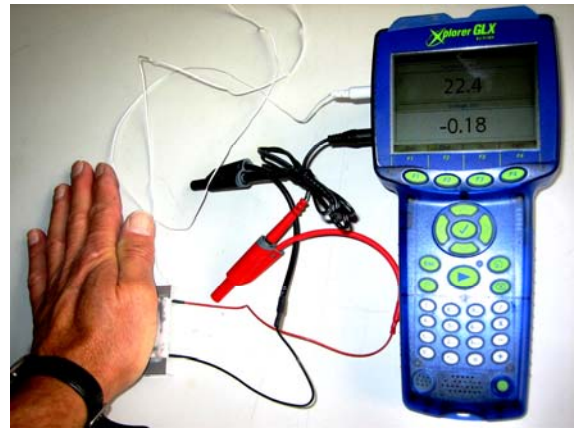


Abb. 15 Mithilfe des GLX kann die Entropiestromstärke direkt angezeigt werden.

Je größer die Stärke des Entropiestroms ist, der durch ein Peltierelement hindurch fließt, desto größer ist die am Peltierelement gemessene („Leerlauf“-)Spannung. Deshalb kann ein Peltierelement zur Messung der Entropiestromstärke und zum Vergleich der Entropieleitfähigkeit verschiedener Materialien verwendet werden. Viele Messwerterfassungssysteme erlauben, dass mehrere Größen gleichzeitig gemessen und verrechnet werden können. Die Stärke des Entropiestroms kann dann auf dem folgenden Weg „berechnet“ und direkt angezeigt werden:

Für den thermischen Energiestrom gilt  $P = T \cdot I_s$  wobei  $I_s$  die Stärke des am Energiestrom beteiligten Entropiestroms bedeutet. Lösen wir die Gleichung nach  $I_s$  auf, so erhalten wir

$$I_s = \frac{P}{T}$$

Aus den technischen Daten des Peltierelements können wir den Zusammenhang von der gemessenen Leerlaufspannung  $U$  und der Stärke des thermischen Energiestroms  $P$ , der durch das Modul hindurchfließt, entnehmen.

$$\text{Für } P \text{ gilt dann } P = U \cdot p_{\text{Peltier-Modul}}$$

Somit erhalten wir für die Entropiestromstärke die Formel

$$I_s = U \cdot p_{\text{Peltier-Modul}} / T$$

mit der wir das Messerfassungssystem programmieren können.

## 10. Entropie kann erzeugt aber nicht vernichtet werden!\*

**Leitfrage:** Wenn der Entropieausgang „verstopft“ ist, dreht sich der Propeller nicht; ist der Entropieeingang „verstopft“, dreht er sich dagegen kräftig weiter! Wie können wir diese Unsymmetrie verstehen?

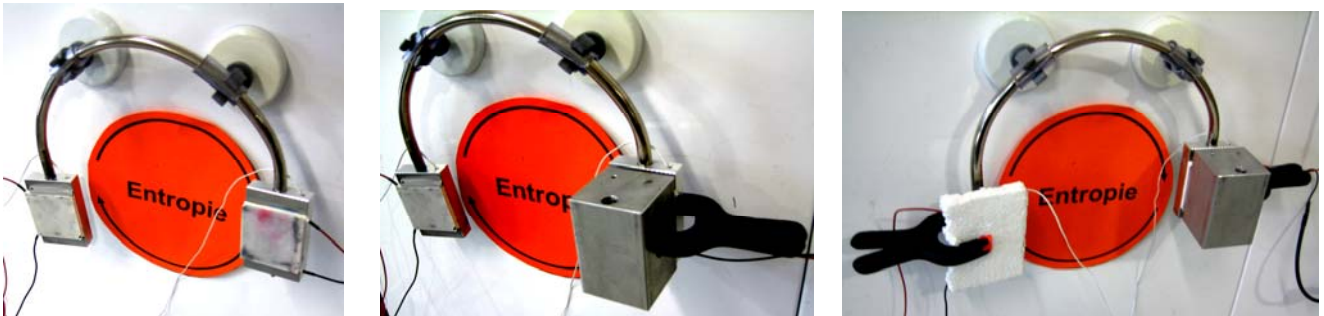


Abb. 16. Wenn der Entropieausgang „verstopft“ ist (1. Bild), dreht sich der Propeller nicht; ist der Entropieeingang mit Styropor „verstopft“, dreht er sich dauerhaft kräftig weiter!

Wenn der Entropieausgang des Peltierelements „verstopft“ ist, funktioniert die thermische Energieübertragung nicht mehr. Entropie kann nicht einfach vernichtet werden. Damit Entropie durch das Peltierelement hindurch fließen kann, muss sie das Peltierelement beim Entropieausgang verlassen können. Obwohl im dritten Bild der Entropieeingang des Peltierelements durch eine Styroporplatte „verstopft“ ist, strömt Entropie auch dauerhaft vom 1. Peltierelement zum 2. Peltierelement in den Alukörper hinein. Diese Entropie kann vom 1. Peltierelement nicht von „Außen“ weggepumpt worden sein, da der Entropieeingang „verstopft“ ist. Diese Entropie muss im Peltierelement erzeugt worden sein. Die Unsymmetrie der in Abbildung 16 dargestellten Versuchsreihe spiegelt sich im unsymmetrischen Verhalten der Entropie wider: Entropie kann zwar erzeugt aber nicht vernichtet werden.

## 11. Literatur

- [1] Plappert, D.: Der Energiebegriff - die Verzahnung der Naturwissenschaften durch eine gemeinsame Fachsprache, Praxis der Naturwissenschaften Physik 6/55, September 2006
- [2] Plappert, D.: Verständliche Elektrizitätslehre, Praxis der Naturwissenschaften Physik 7/52, Oktober 2003
- [3] Plappert, D.: Kumulatives Lernen - die Bildung des Entropiebegriffs in der Sek I, Praxis der Naturwissenschaften Physik 4/53, Juni 2004
- [4] Petrich Horst, Plappert, Dieter, Schwarze Heiner: Entropielehre II; Unterricht Physik Aulis Verlag Deubner Köln, erschein Anfang 2008

## 12. Technische Daten der Peltierelemente

## Anhang 1 :

### Das „Energie-Träger-Konzept“

Energie strömt nie allein, bzw. wird nie allein ausgetauscht, sondern immer mit einer zweiten physikalischen Größe zusammen. Diese zweite Größe kennzeichnet die „äußere Erscheinungsform“ des Energietransports. Um die Energie klar von den begleitenden Größen zu unterscheiden, wurde der in Abbildung 1 dargestellte Versuchsaufbau [4] entwickelt, durch den die Schülerinnen und Schüler diesen Unterschied bildhaft erleben können: Eine mit einem Netzgerät verbundene Pumpe (1) treibt Wasser an, das Wasser einen „Wassergenerator“ (3) und dieser einen elektrischer „Lüfter“ (4). Da ein Propeller zum Antrieb Energie benötigt, kann der „Weg“ der Energie zurückverfolgt werden: sie kommt vom „Wassergenerator“, von der Pumpe, vom Netzgerät bzw. von einem Kraftwerk,.... Die Energie ist das, was durch alle Stationen hindurch geht. Dies wird durch die Energiepfeile symbolisiert (Abb. 2). Auf diese Weise wird der „Erhaltungsaspekt“ der Energie betont. Das Wasser und die Elektrizität nehmen dagegen *andere Wege*: sie strömen im Kreis. Deshalb werden zwischen Pumpe und Turbine *zwei* Schläuche, zwischen Generator und Lüfter *zwei* Kabel benötigt. Dass die Energie und die zweite am Energietransport beteiligte physikalische Größe *unterschiedliche*

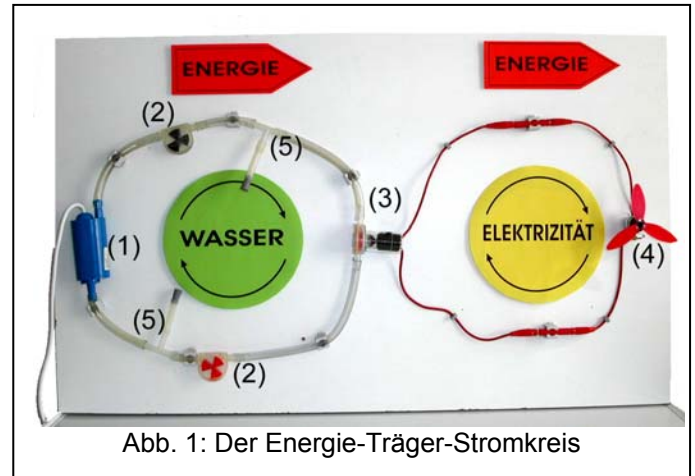


Abb. 1: Der Energie-Träger-Stromkreis

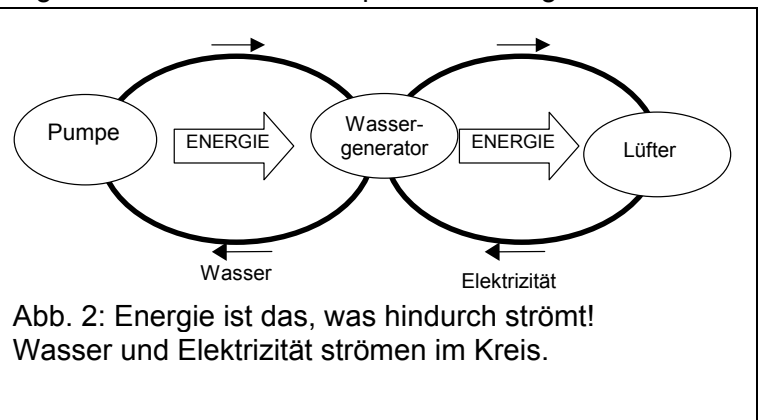
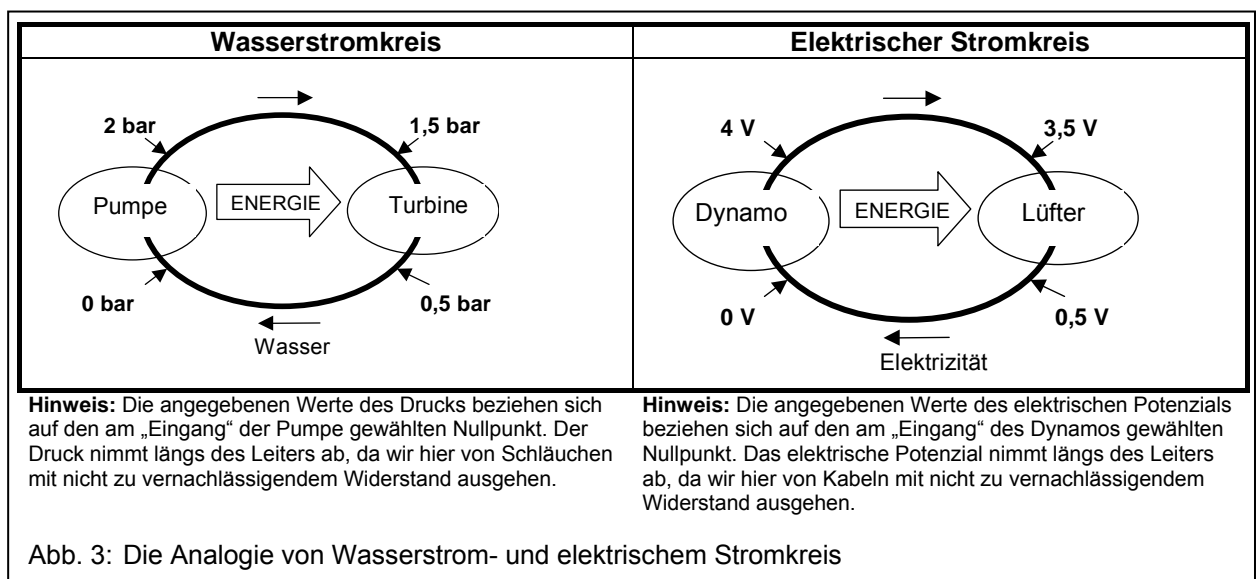


Abb. 2: Energie ist das, was hindurch strömt!  
Wasser und Elektrizität strömen im Kreis.



Wege nehmen, ist ein entscheidendes Kriterium, durch das wir die Energie von den sie begleitenden Größe unterschieden können. Die Tatsache, dass Energie nie alleine strömen kann, sondern immer zusammen mit einer zweiten Größe strömen muss, können wir durch das „Energie-Träger-Bild“ verbildlichen. Die zweite physikalische Größe hat die Aufgabe eines „Energieträgers“: in der Pumpe wird Energie auf den Energieträger Wasser, im Generator auf den Energieträger Elektrizität geladen. Das Wasser bzw. die Elektrizität transportieren die Energie zum Wassergenerator bzw. zum Lüfter. Dort wird sie auf einen nächsten Energieträger „umgeladen“. Das Wasser bzw. die Elektrizität strömen durch die zweite Verbindung zurück, um von Neuem mit Energie beladen zu werden.

Fragen wie: „Worin unterscheidet sich eigentlich das Wasser in Abbildung 1 vor und nach dem Wassergenerator?“ „Worin unterscheidet sich die Elektrizität vor und nach dem Lüfter?“ führen zu den Begriffen „Druck  $p$ “ und „elektrisches Potenzial  $\phi$ “. Beide physikalische Größen haben eine analoge Bedeutung: sie geben an, wie viel Energie von dem jeweiligen Energieträger transportiert wird. Ihre Differenz  $\Delta p$  bzw.  $\Delta \phi$  gibt an, wie viel Energie in einem System vom Wasser bzw. von der Elektrizität aufgeladen, bzw. abgeladen wird. In der angegebenen Literatur wird ausführlich dargelegt, wie diese im Anfängerunterricht bildhaft eingeführten Konzepte im weiterführenden Unterricht immer weiter geschärft und präzisiert werden können. In Abbildung 3 und 4 ist das Energie-Träger-Konzept übersichtsartig zusammengefasst.

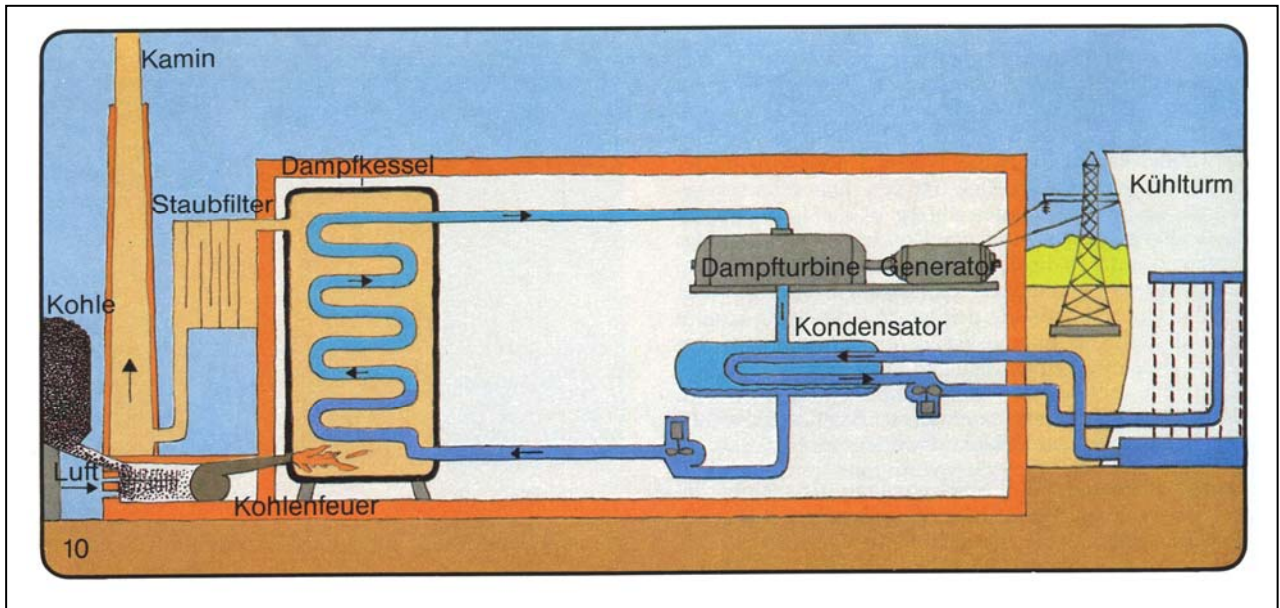
Wasserstromkreis	Elektrischer Stromkreis
Es strömt Energie von der Pumpe zur Turbine.	Es strömt Energie vom Dynamo zum Motor.
Das Wasser ist der Energieträger.	Die Elektrizität ist der Energieträger
Die Pumpe belädt das Wasser mit Energie.	Der Dynamo belädt die Elektrizität mit Energie
Die Turbine lädt Energie vom Wasser ab.	Der Motor lädt Energie von der Elektrizität ab.
Die <b>Druckdifferenz <math>\Delta p</math></b> gibt an, wie viel Energie in einem Umlader auf bzw. vom Wasser abgeladen wird.	Die <b>Differenz des el. Potentials <math>\Delta \phi = U</math> (el. Spannung)</b> gibt an, wie viel Energie in einem Umlader auf bzw. von der Elektrizität abgeladen wird.
Die <b>Energiestromgleichung <math>I_E = \Delta p \cdot I_W</math></b> gibt die <b>Stärke des Energiestroms</b> an, der in einem Umlader mit einem Wasserstrom verbunden bzw. von einem Wasserstrom getrennt wird.	Die <b>Energiestromgleichung <math>I_E = U \cdot I_Q</math></b> gibt die <b>Stärke des Energiestroms</b> an, der in einem Umlader mit einem elektrischen Strom verbunden bzw. von einem elektrischen Strom getrennt wird.

Abb. 3: Das Energie-Träger-Konzept

## Anhang 2

### zur Physik thermischer Kraftwerke

Im Prinzip sind alle thermischen Kraftwerke gleich aufgebaut: in einem Kessel wird Wasser verdampft, der Dampf treibt Turbinen an und wird im Kondensator kondensiert; das dabei entstehende Wasser wird durch eine Speisewasserpumpe in den Kessel zurücktransportiert.

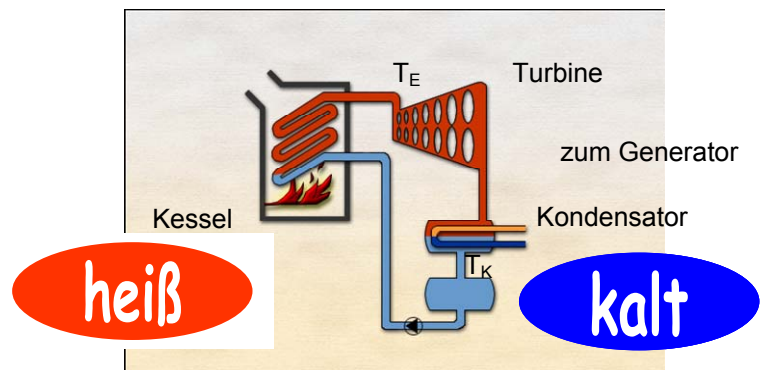


Nur ein Teil der zugeführten Energie kann von der Turbine vom Dampf abgeladen werden. Das Verhältnis von genutzter zu zugeführter Energie wird üblicherweise der Wirkungsgrad genannt. Der Wirkungsgrad von Kohlekraftwerk beträgt etwa 40 %, der eines Kernkraftwerks etwa 30 %. Die Überlegungen von Sadi Carnot (...) führten zu der Überzeugung, dass der Wirkungsgrad nicht von den Druckdifferenzen zwischen Eingang und Ausgang der Turbine sondern ausschließlich von der Temperaturdifferenz zwischen Eingang und Ausgang der Turbine abhängig ist. Carnots Überlegung ist in (Material historisch) dargestellt.

### Wozu braucht ein thermisches Kraftwerk einen Kühlturm?

#### Energiebetrachtung:

Im Kessel wird beim Verbrennen die Energie der Brennstoffe zum Erhitzen und Verdampfen des Wassers verwendet. Ein Teil dieser Energie (Kernkraftwerk 30 %, Kohlekraftwerk 40%) wird in der Turbine vom Dampf „abgeladen“, zum Generator geleitet und dort anschließend mit dem elektrischen Strom weitertransportiert. Ein Großteil der Energie verlässt mit dem Kühlwasser des Kondensators das Kraftwerk ungenutzt<sup>1</sup>. Carnot



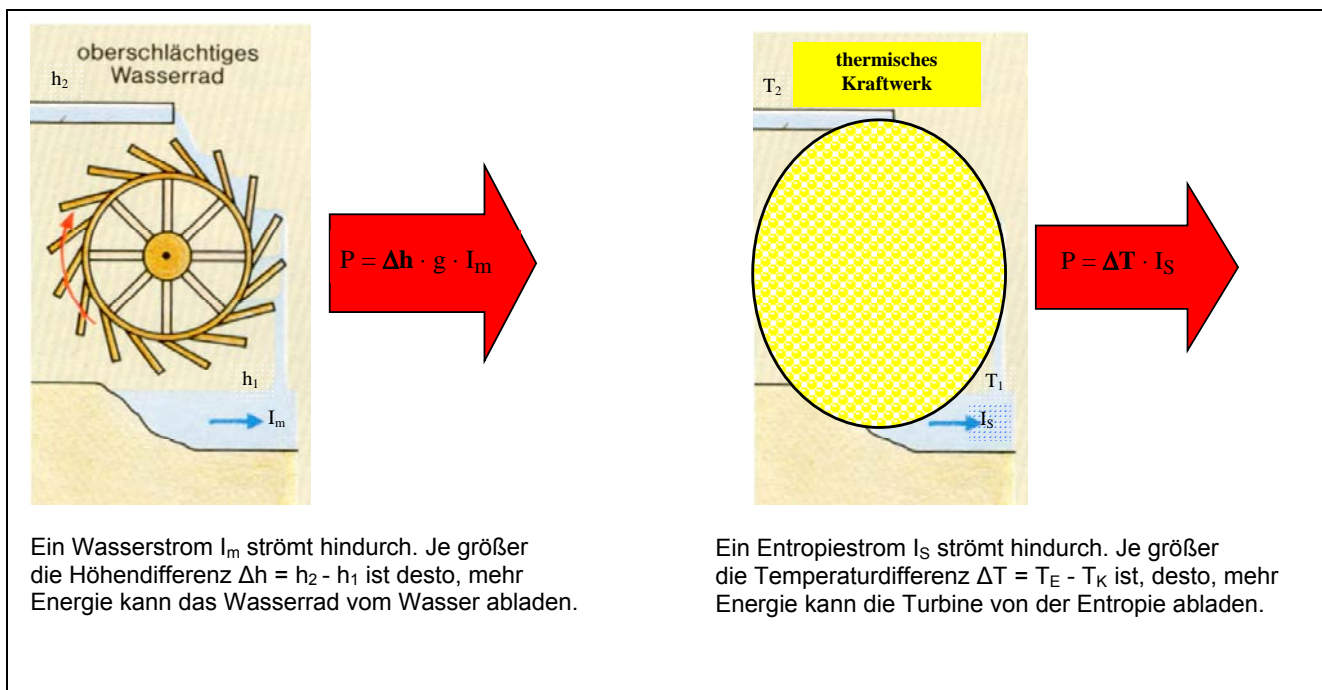
<sup>1</sup> Dass ein Teil der bei der Verbrennung umgesetzten Energie mit den erwärmten Abgasen das Kraftwerk verlässt (5 - 10 %), sei bei den nachfolgenden Betrachtungen vernachlässigt.

hat theoretisch gezeigt, dass das Verhältnis von nutzbarer zu eingesetzter Energie umso größer ist, je größer die Differenz der Temperatur des Dampfes  $T_E$ , der in die Turbine eintritt und der Temperatur des Dampfes  $T_K$ , mit der er im Kondensator kondensiert, ist. Alle praktischen Versuche, den Wirkungsgrad durch die Wahl von geeigneten Stoffen zu verbessern, die bei gleicher Temperaturdifferenz größere Druckdifferenzen erzeugen, waren zuvor gescheitert.

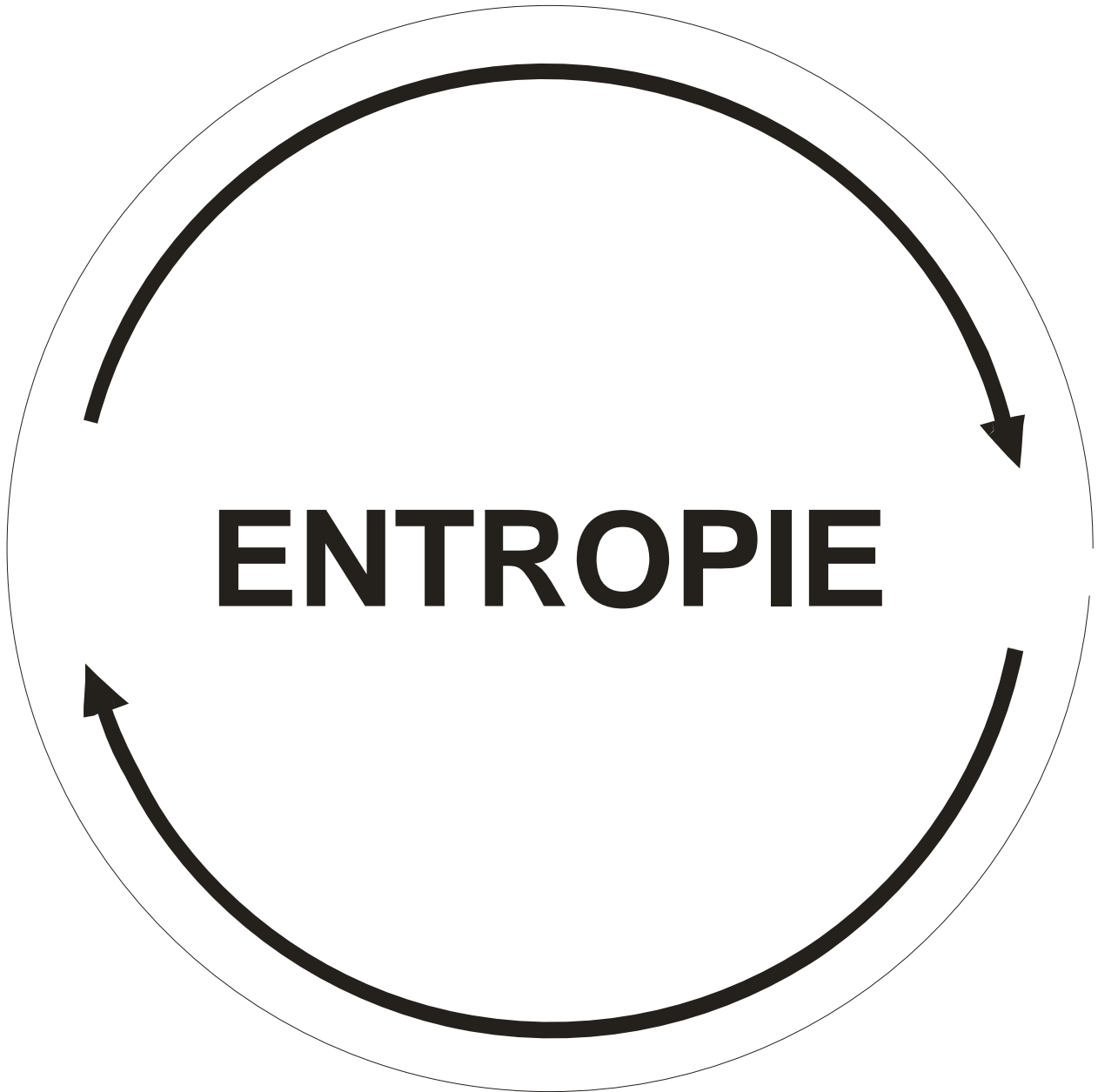
### Entropiebetrachtung (nach Carnot):

Die Energie strömt mit der Entropie, zusammen durch die Turbine. Je größer die Temperaturdifferenz  $\Delta T = T_E - T_K$  ist, desto mehr Energie lädt die Turbine von der Entropie ab, so wie ein Wasserrad von strömendem Wasser umso mehr Energie abladen kann, je größer die Höhendifferenz  $\Delta h = h_2 - h_1$  zwischen Ein- und Ausgang ist.

Die Entropie, die das Kraftwerk verlässt, wurde im Kraftwerk erzeugt; in erster Linie beim Verbrennen der Brennstoffe. Die Entropie kann dann nicht mehr vernichtet werden; wie eine Art „Wärmestoff“ verlässt sie das Kraftwerk durch den Kühlausgang.



## Anhang 3:



Bitte auf Karton kopieren, ausschneiden und mit dem beigefügten Magnetplättchen auf der Metalltafel befestigen