

# Entropie

Hans M. Strauch

Kurfürst-Ruprecht-Gymnasium

67433 Neustadt/W.



Bei meinem Vortrag liegt die Betonung auf denjenigen Teilen des Unterrichts über Entropie, die die **Chemielehrer** benötigen. Eigentlich gibt es im tatsächlichen Unterricht noch weitere Kapitel. Wer sich dafür interessiert kann die betreffenden Kapitel im Skriptum Band 1 nachlesen.

## 10.1 Entropie und Temperatur



Mit der Hand kann man die Wärme fühlen, die aus einer Heizplatte, einem Heizkörper, einem Feuer etc. kommt.

Wenn wir Wasser erhitzen, führen wir ihm Wärme zu. Je länger der Tauchsieder in Betrieb ist, desto mehr Wärme führen wir dem Wasser zu, desto wärmer wird es.

Füllen wir dann heißes Wasser in eine Wärmeflasche, Thermoskanne oder in ein Glas um, dann enthält nun die Wärmeflasche, die Thermoskanne, das Glas die Wärme.

Hinweis auf **Arbeitsblatt** der Teilnehmer.

## Arbeitsblatt

## Tante Erna spricht über ihre Wärmeflasche



Das ist meine Wärmeflasche.  
Ich stelle dann Wasser auf  
den Herd, auf Stufe 6, erwär-  
me das und gieße das Wasser  
in meine Wärmeflasche. Dann  
ist die Wärme da drin.

Wenn ich sie gerne wärmer  
hätte, dann stelle ich den  
Herd auf Stufe 12, bis das Was-  
ser kocht.  
Höher geht es ja nicht.



Wenn ich die Wärmeflasche  
ins Federbett packe, dann  
bleibt sie lange warm, drau-  
ßen kühlt sie schnell ab.



Halte ich meine Füße daran,  
so werden sie wohlig warm.

Die Wärmeflasche hat zwei  
Seiten. Bei der glatten ver-  
brenne ich mir die Füße, die  
mit den Rippen ist angenehm.



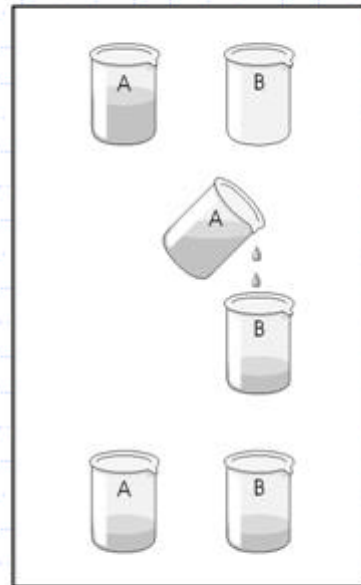
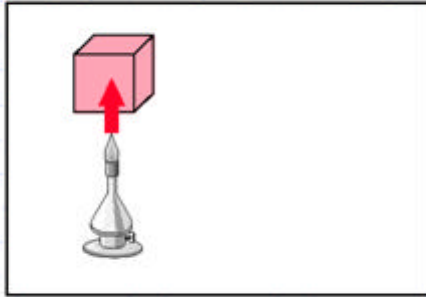
Letztlich war mein Herd ka-  
putt, und da habe ich das  
Wasser mit einem Holzfeuer  
erwärmt.

Dieses Arbeitsblatt soll an den Vorkenntnissen der Schüler anknüpfen und den Wärme/Entropiebegriff festigen.

## 10.1 Entropie und Temperatur

Wir beginnen die Wärmelehre mit 2 Größen:

- Temperatur (bekannt)
- „Wärme“ (umgangssprachlich)  
Entropie  $S$ , Einheit Ct
- Unterschied



Wie jedes mal, wenn wir mit einem neuen Gebiet der Physik beginnen, müssen wir die **physikalischen Größen** kennen lernen, mit denen wir arbeiten werden. Wie auch in anderen Teilbereichen beginnen wir mit 2 Größen:

Die **Temperatur** charakterisiert den Zustand des Warmseins eines Körpers, unabhängig von dessen Größe. Man bezeichnet sie mit  $\vartheta$  und misst sie in  $^{\circ}\text{C}$ . Hier kann man verschiedene Sorten von Thermometern und die Messung der Temperatur üben / wiederholen.

Die **Wärme** dagegen stellen wir uns wie einen **Stoff** vor, den wir beim Erhitzen einem Körper zuführen und der solange im Körper enthalten ist, wie er seine Temperatur behält. Beim Abkühlen wird Wärme wieder abgegeben (Analog wie man Luft in einen Autoreifen oder Wasser in ein Gefäß bringt).

In der Physik wird die umgangssprachliche Wärme (Wärmemenge) als **Entropie** bezeichnet, mit dem Symbol  $S$  abgekürzt und in Carnot (Ct) gemessen.

Warum benötigen wir 2 Größen? Was ist der Unterschied zwischen den beiden?

Wir erhitzen Wasser, dabei führen wir ihm Entropie zu und füllen dann etwas in ein Glas. Dieses enthält nun die Entropie  $S$  und hat die Temperatur  $\vartheta$ . Füllen wir jetzt die Hälfte des Wassers in ein anderes Glas, dann enthält jetzt jedes Glas nur noch  $S/2$ , hat aber immer noch dieselbe Temperatur  $\vartheta$ .

## 10.1 Entropie und Temperatur

- Je höher die **Temperatur** eines Gegenstandes ist, desto mehr **Entropie** enthält er.



- Je größer die **Masse** eines Gegenstandes ist, desto mehr **Entropie** enthält er.

- **1 cm<sup>3</sup> Wasser von Normaltemperatur enthält etwa 4 Ct.**



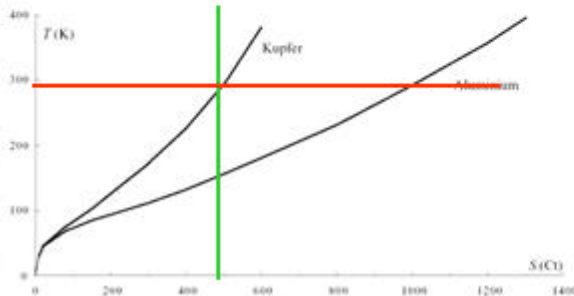
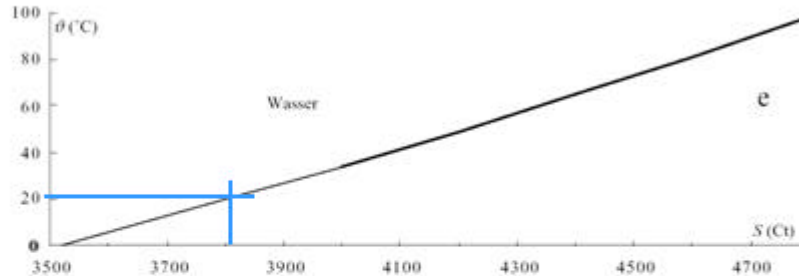
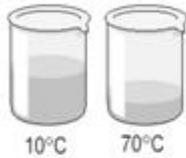
Wir erwärmen zwei gleiche Wassermengen auf **unterschiedliche Temperaturen** und vergleichen sie: Das Wasser in einem Gefäß hat eine höhere Temperatur, es enthält mehr Entropie (Temperatur als „Füllstandsanzeiger“ der Entropie).

Wir füllen **unterschiedlich viel** Wasser (z.B. 2:1) derselben Temperatur Wasserkessel in zwei Gefäße. Dann enthält die größere Wassermenge auch entsprechend mehr Entropie (Die große Wassermenge = 2 x kleine Wassermenge).

Betrachten wir jedoch eine große Wassermenge niedriger Temperatur mit einer kleineren Wassermenge höherer Temperatur, so können wir zum jetzigen Zeitpunkt nicht sagen, welche mehr Entropie enthält (erst wenn uns Formeln zur Verfügung stehen).

Um sich unter der neuen Einheit Carnot etwas vorstellen zu können eine grobe Merkregel: 1 cm<sup>3</sup> Wasser von 25°C enthält (3,88 Ct) etwa 4 Ct.

## 10.1 Entropie und Temperatur



Der Entropieinhalt hängt vom Material ab

Physics meets Chemistry - Bad Wildbad 2008: Entropie

6

Der Temperatur-Entropiezusammenhang für 1 kg Wasser ist in den Skripten enthalten und kann zum Ermitteln von Entropiemengen herangezogen werden. Dabei wird gleichzeitig der Umgang mit Diagrammen geübt.

1 kg Wasser von 20 °C von 20 °C enthält ca. 4000 Ct

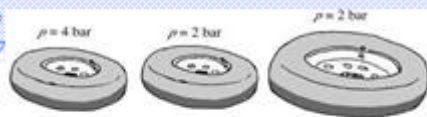
Die Frage, ob die kalte große Wassermenge mehr oder weniger Entropie enthält als die heiße kleine Wassermenge kann mit Hilfe des Diagramms entschieden werden.

1kg Aluminium von 20 °C enthält ca. 1000 Ct

1 kg Kupfer von 20 °C enthält ca. 500 Ct

Der Entropieinhalt hängt vom **Material** ab

5



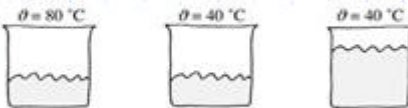
Ein Behälter enthält um so mehr Luft  
 – je größer er ist;  
 – je höher der Druck ist.



Ein Körper enthält um so mehr elektrische Ladung  
 – je größer er ist;  
 – je höher sein elektrisches Potenzial ist.



Ein Behälter enthält um so mehr Impuls  
 – je größer seine Masse ist;  
 – je höher seine Geschwindigkeit ist.

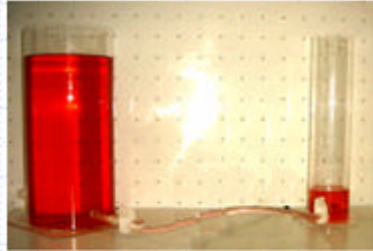


Ein Behälter enthält um so mehr Entropie  
 – je größer er ist;  
 – je höher seine Temperatur ist.

VR

## 10.2 Der Temperaturunterschied als Antrieb für einen Entropiestrom

- Entropie strömt **von selbst** von Stellen höherer zu Stellen niedrigerer Temperatur.
- Ein Temperaturunterschied ist ein **Antrieb** für einen Entropiestrom.
- Den Zustand der Temperaturengleichheit, der sich am Ende einstellt, nennt man **thermisches Gleichgewicht**.



Entropie kann - wie Wasser aus einem Gefäß ins andere strömen - **von einem Körper zum anderen übergehen/strömen**. Die Schüler können selbst einige Beispiele aus ihrer Erfahrung nennen:

Eine heiße Tasse Kaffee, Teller Suppe etc. wird im Laufe der Zeit immer kälter und hat am Schluss Raumtemperatur.

Ein kaltes Getränk, das im Sommer aus dem Kühlschrank geholt und vergessen wird, wird immer wärmer und hat nach einiger Zeit Umgebungstemperatur.

Im Winter wird ein anfänglich warmes Zimmer nach Abschalten der Heizung allmählich kälter.

Ein Gefäß mit Wasser von höherer Temperatur wird in ein größeres mit Wasser von niedrigerer Temperatur gebracht. Mit Hilfe zweier Thermometer wird die Entwicklung der Temperaturen verfolgt und inzwischen diskutiert man mit den Schülern das erwartete Ergebnis.

Bei der Formulierung des Ergebnisses ist es wichtig „von selbst“ zu verwenden (/ergänzen falls, die Schüler es nicht nennen).

Ein Temperaturunterschied ist ein **Antrieb** für einen Entropiestrom.

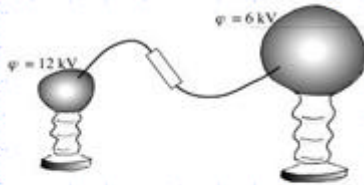
Sobald die Temperaturen gleich geworden sind, ist der Antrieb für den Entropiestrom verschwunden. Deshalb hört der Entropiestrom auf. Man nennt diesen Zustand **thermisches Gleichgewicht**.

Wenn sich eine Tasse Kaffee oder ein Teller Suppe abkühlt und also Entropie an die Umgebung geflossen ist, warum wird dann die Umgebung nicht wärmer? Wenn man es genau nimmt hat die Temperatur der Umgebung zugenommen aber praktisch merkt man nichts davon (vergl. Eimer Wasser in Bodensee).

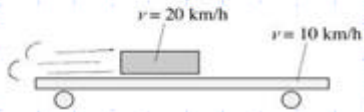




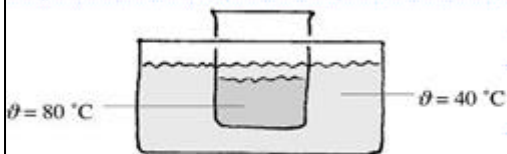
Luft fließt von selbst von Stellen hohen zu Stellen niedrigen Drucks.



Elektrische Ladung fließt von selbst von Stellen hohen zu Stellen niedrigen Potentials.



Impuls fließt von selbst von Körpern hoher zu Körpern niedriger Geschwindigkeit.



Entropie fließt von selbst von Körpern hoher zu Körpern niedriger Temperatur.



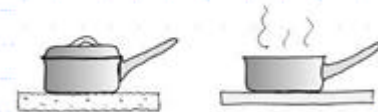
Die Atmosphäre nimmt Luft auf, ohne dass sich ihr Druck ändert.



Die Atmosphäre nimmt Luft auf, ohne dass sich ihr Druck ändert.



Die Erde nimmt Impuls auf, ohne dass sich ihre Geschwindigkeit ändert.



Die Erde nimmt Impuls auf, ohne dass sich ihre Geschwindigkeit ändert.

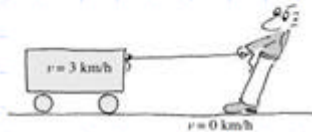
W/S



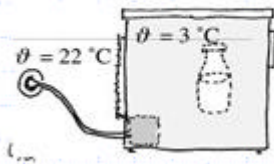
Um Luft vom niedrigen zum hohen Druck zu bringen, braucht man eine Luftpumpe.



Um elektrische Ladung vom niedrigen zum hohen Potenzial zu bringen, braucht man eine Ladungspumpe (Batterie, Generator).



Um Impuls von niedriger zu hoher Geschwindigkeit zu bringen, braucht man eine Impulspumpe (Motor).

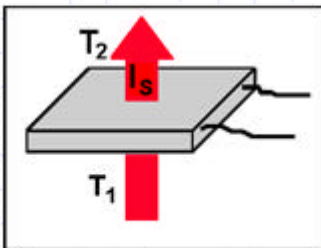


Um Entropie von niedriger zu hoher Temperatur zu bringen, braucht man eine Entropiepumpe (Wärmepumpe).

### 10.3 Die Wärmepumpe



- Eine Wärmepumpe befördert Entropie von Stellen niedrigerer zu Stellen höherer Temperatur.
- Eine Wärmepumpe benötigt Energie



WZ

Von selbst fließt Luft von Stellen höheren zu Stellen niedrigeren Drucks. Möchte man dagegen, dass die Luft von Stellen niedrigeren zu Stellen höheren Drucks fließt, so benötigt man eine Luftpumpe.

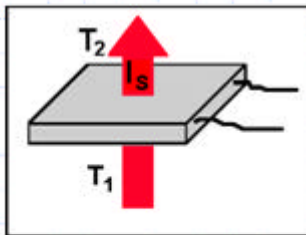
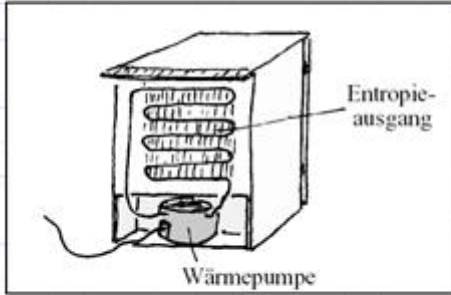
Entsprechendes gilt für Entropie:

Von selbst fließt die Entropie von Stellen höherer zu Stellen niedrigerer Temperatur. Möchte man aber Entropie in die umgekehrte Richtung befördern, etwa im Sommer Entropie aus dem Inneren des Hauses nach draußen schaffen, wo es wärmer ist, so benötigt man ein Gerät das die Wärme nach draußen „pumpt“ (analog zur Luftpumpe, Ladungspumpe, Impulspumpe). Man nennt es eine **Wärmepumpe**.

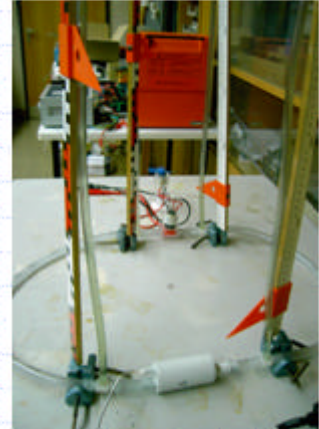
Wir verwenden ein Peltierelement (an Teilnehmer austeilen!), das an eine elektrische Energiequelle (oder falls vorhanden ein Dynamot) angeschlossen ist und spüren nach kurzer Zeit eine Abkühlung der einen und eine Erwärmung der anderen Seite. Hier sind etliche Experimente machbar: Peltier + Batterie, Peltier + Dynamot, Gerät von Conatex + Netzteil und zwei Wassergefäße, Kühlschrank etc.

Die Verwendung eines Dynamots läßt für die Schüler besonders deutlich werden, dass zum Pumpen von Entropie Energie erforderlich ist. Man kann dies aber auch anhand der anderen Energiequellen verdeutlichen.

## 10.3 Die Wärmepumpe

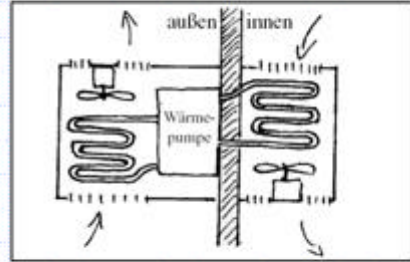


- Die Temperatur am **Entropieausgang** ist **höher** als die Temperatur am **Entropieeingang**.



Bei der Wasserpumpe liegt am Eingang ein niedrigerer Druck vor als am Ausgang. Beim Peltierelement kann jeder Schüler direkt die Temperaturverhältnisse erfahren und damit Entropieeingang und Entropieausgang in Analogie zur Luft- oder Wasserpumpe erkennen. Auch am Kühlschrank sind die beiden Bereiche leicht zu identifizieren: Der Entropieeingang als Ort, an dem Entropie weggenommen wird an der tieferen Temperatur, der Entropieausgang an der Rückseite, wo die Entropie wieder abgegeben wird, an der höheren Temperatur.

## 10.3 Die Wärmepumpe



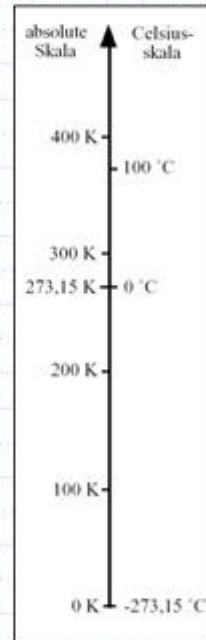
VR

Schließlich kann man **Anwendungen der Wärmepumpe** im Unterricht besprechen: **Kühlbox** fürs Auto mit Peltierelement, **Klimaanlage** im Haus und im Auto und schließlich das **Heizen eines Gebäudes mit einer Wärmepumpe** (vergl. Aufgabe auf dem Arbeitsblatt).

## 10.4 Die absolute Temperatur

Wie viel Entropie kann man aus einem Gegenstand herausholen?

- Die tiefste Temperatur, die ein Gegenstand haben kann, ist  $-273,15\text{ °C}$ .
- Bei dieser Temperatur enthält er keine Entropie mehr:  
Bei  $\vartheta = -273,15\text{ °C}$  ist  $S = 0\text{ Ct}$ .
- Der Nullpunkt der absoluten Temperaturskala liegt bei  $-273,15\text{ °C}$ . Die Maßeinheit der absoluten Temperatur ist das Kelvin.



In einem Gedankenexperiment wird überlegt, wie man möglichst viel Entropie aus einem Gegenstand, z.B. einem Ziegelstein oder einem Metallstück, herauspumpen könnte: Zunächst legt man ihn in einem Kühlschrank und erreicht  $-5\text{ °C}$ , mehr schafft der Kühlschrank nicht. Man möchte dem Stein aber noch mehr Entropie entziehen und legt ihn in eine Gefriertruhe. Die Temperatur sinkt auf  $-18\text{ °C}$ . Benutzt man immer bessere, leistungsfähigere (und auch teurere Wärmepumpen dann kommt man auf  $-200\text{ °C}$ . Bei dieser Temperatur ist Luft schon flüssig. Benutzt man noch bessere Wärmepumpe so erreicht man  $-250\text{ °C}$ ,  $-260\text{ °C}$   $-270\text{ °C}$  und schließlich  $-273\text{ °C}$ . Trotz größter Anstrengungen hört der Vorgang bei  $-273,15\text{ °C}$  auf. Die lässt sich so erklären:

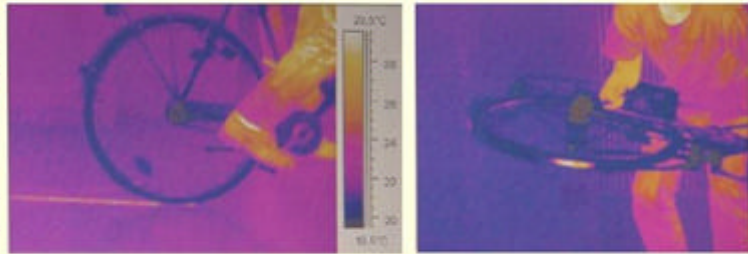
1. Bei dieser Temperatur enthält der Stein keine Entropie mehr.
2. Die Entropie kann keine negativen Werte annehmen.

Dies nimmt man als Anlass eine neue Temperaturskala zu definieren: Ihr Nullpunkt liegt bei  $-273,15\text{ °C}$ . Ihre Maßeinheit ist das Kelvin

## 10.5 Entropieerzeugung

Entropie kann erzeugt werden

- bei einer chemischen Reaktion;
- durch mechanische Reibung.



Um einen Raum zu heizen kann man mit einer Wärmepumpe Entropie von draußen hereinholen. Meistens benutzt man aber andere Verfahren:

-Man verbrennt Heizöl, Kohle Holz oder Erdgas. Die Verbrennung ist eine chemische Reaktion, bei der der Brennstoff und Sauerstoff in andere Stoffe verwandelt werden. Woher kommt dabei die Entropie, die von der Flamme abgegeben wird? Sie war vorher weder im Brennstoff noch im Sauerstoff enthalten, denn beide Stoffe waren kalt (Umgebungstemperatur). Offenbar entsteht sie bei der Verbrennung neu: **Entropie kann bei einer chemischen Reaktion (z.B. Verbrennung) erzeugt werden.**

-Wenn man eine Kletterstange schnell herunterrutscht, spürt man das Entstehen der Entropie auf unangenehme Weise. Der Effekt ist in abgeschwächter Form zu erfahren, wenn man mit der Hand über die Tischplatte hin- und herfährt. Man merkt es auch, wenn man mit einem stumpfen Bohrer bohrt oder das Fahrrad abbremst: An der Berührungsfläche der aneinander reibenden Gegenstände wird Entropie erzeugt.

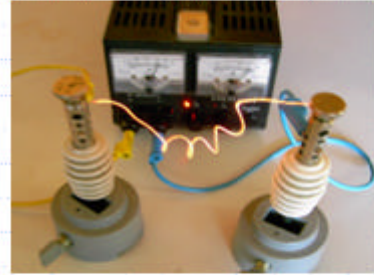
**-Entropie kann bei durch Reibung erzeugt werden.**



## 10.5 Entropieerzeugung

Entropie kann erzeugt werden

- in einem Draht, durch den ein elektrischer Strom fließt;



- um Entropie zu erzeugen, braucht man Energie



-Durch einen dünnen Draht wird ein starker elektrischer Strom geschickt; dabei erwärmt sich der Draht:

**-Entropie kann in einem Draht, durch den ein elektrischer Strom fließt, erzeugt werden.**

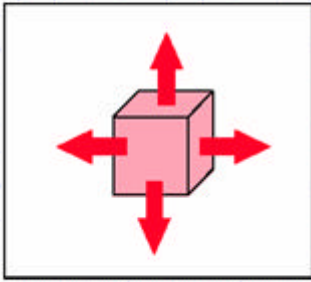
Viele elektrische Geräte arbeiten nach diesem Prinzip: die Kochplatte, das Bügeleisen, der Tauchsieder, die Elektroheizung, der Toaster, die Heizung des Föns, die Glühlampe etc..

Falls „Dynamots“ zur Verfügung stehen, können die Schüler selbst durch schnelles Drehen einen dünnen Draht oder eine Bleistiftmine zum Glühen bringen.

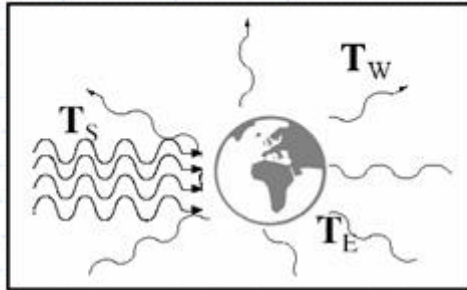
Alle die beschriebenen Vorgänge, besonders der mit den Dynamots, zeigen: Um Entropie zu erzeugen, braucht man **Energie**.

Man kann übrigens alle diese Vorgänge als eine Art Reibung auffassen: Immer wenn etwas durch eine Verbindung oder Leitung fließt, die dem entsprechenden Strom einen Widerstand entgegensetzt findet „Reibung“ statt

## 10.5 Entropieerzeugung



Entropieabgabe

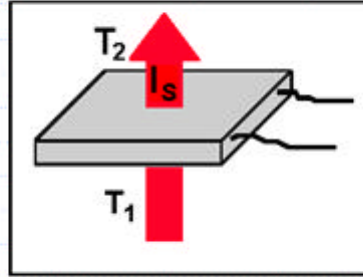
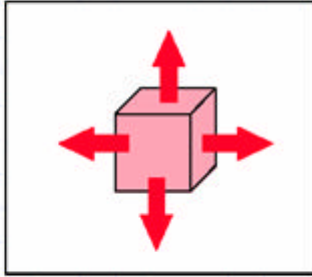


Entropieerzeugung bei Absorption

Daraus ergibt sich ein ernstes Problem. Entropie entsteht neu in unzähligen Vorgängen auf der Erde. Neben den Verbrennungen in Heizkesseln, Automotoren, Industrieanlagen laufen auch in der Natur ständig Prozesse mit Entropieerzeugung ab: In allen Lebewesen, von Mikroben bis Säugetieren laufen ständig Oxidationsreaktionen ab. Der größte Anteil an Entropieerzeugung geschieht jedoch bei der Absorption der Sonnenstrahlung (Die Sonne hat an ihrer Oberfläche eine Temperatur von etwa 6000 K, die Temperatur der Erdoberfläche beträgt etwa 300 K.).

Müsste nicht die Entropiemenge der Erde immer größer werden, müsste nicht die Temperatur der Erde immer höher werden? Tatsächlich ist die Temperatur der Erde, von recht kleinen Schwankungen abgesehen, über Jahrtausende konstant geblieben. Die Erklärung: Wie die heiße Suppe Entropie an die kältere Umgebung abgibt, gibt auch die Erde an den Weltraum mit seiner Temperatur von etwa 3K wieder Entropie ab. Sie wird von Infrarotlicht getragen. Es hat sich ein Fließgleichgewicht eingestellt, bei dem gerade soviel Entropie abfließt wie (bisher) zufließt, sodass die Temperatur der Erde nahezu konstant bleibt (blieb).

## 10.5 Entropieerzeugung



Entropieabgabe an Umgebung

- **Entropie** kann *erzeugt*, aber *nicht vernichtet* werden.
- **Energie** kann *weder erzeugt noch vernichtet* werden.
- **Impuls** kann *weder erzeugt noch vernichtet* werden.



Nun wollen wir uns mit dem umgekehrten Problem befassen: Ein Gegenstand soll **gekühlt** werden.

Eine Methode funktioniert nur dann wenn, der Gegenstand eine höhere Temperatur hat als seine Umgebung. Man wartet einfach ab. Die Entropie fließt von allein in die Umgebung ab.

Eine zweite Methode funktioniert auch wenn der Gegenstand nicht wärmer ist als seine Umgebung. Man kann Entropie aus dem Gegenstand mit einer Wärmepumpe herauspumpen.

In beiden Fällen taucht die Entropie, die aus dem zu kühlenden Gegenstand verschwindet, an einer anderen Stelle wieder auf.

Könnte man die Entropie irgendwie endgültig verschwinden lassen, ohne dass sie anderswo wieder auftaucht? Könnte man sie nicht vernichten? (Schließlich kann man sie ja auch erzeugen)

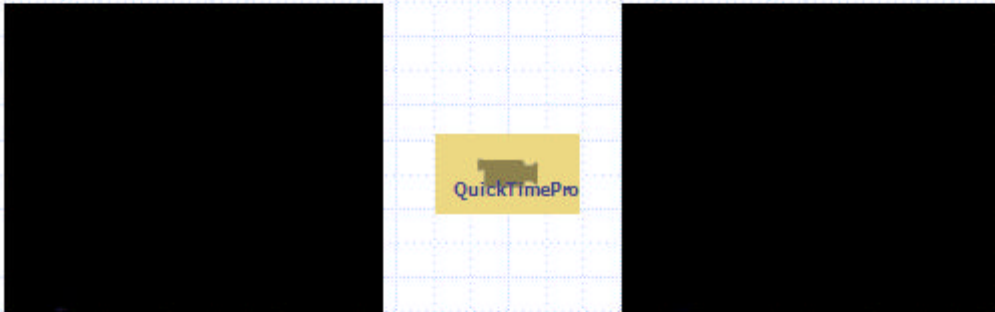
Viele Erfinder und viele Naturwissenschaftler haben dies versucht – ohne Erfolg. Wir sind heute fest davon überzeugt, dass man Entropie nicht vernichten kann.

Erinnern wir uns an zwei andere Größen: Energie und Impuls. Diese können weder erzeugt noch vernichtet werden.

## 10.5 Entropieerzeugung



Vorgänge, die nur in eine Richtung ablaufen können, nennt man **nicht umkehrbar**.



Vorgänge, bei denen **Entropie erzeugt** wird, sind **nicht umkehrbar**.

Dass man Entropie erzeugen, aber nicht vernichten kann, hat noch eine andere merkwürdige Konsequenz. Wir lassen einen Film ablaufen und sagen nicht dazu, ob er vorwärts oder rückwärts läuft: *Kerze\_reversibel, Pendel\_reversibel*.

**Wenn man erkennen kann, in welche Richtung der Film läuft,** weil eine Richtung eine Situation zeigt, die es in Wirklichkeit nicht gibt, dann spricht man von einem **unumkehrbaren** Vorgang.

Warum ist der Vorgang **nicht umkehrbar**? Die Beispiele zeigen Situationen, bei denen Entropie erzeugt wird: (*Kerze*), *fradbrb*. Auch bei weiteren Beispielen liegt Entropieerzeugung vor, auch wenn dies nicht auf den ersten Blick zu erkennen ist: *Butter schmelzen, knetm, crash3, turmsprengung*, etc. Nun können wir die Frage beantworten, warum viele Vorgänge unumkehrbar sind: Weil bei ihnen **Entropie erzeugt wird**.

Eine Umkehrung dieser Vorgänge würde bedeuten, dass Entropie vernichtet wird – und das geht nicht.

Es gibt aber durchaus Vorgänge, die sowohl vorwärts als auch rückwärts ablaufen können (bzw. der Vorgang könnte auch so ablaufen wie im rückwärts laufenden Film): Alle Vorgänge bei denen (fast) keine Entropie erzeugt wird: (*pendel*), *celia höhen*, *looping*, *ball1*, *ball3*

Wir überspringen 10.6  
Die Entropiestromstärke

Wir überspringen 10.7  
Der Wärmewiderstand

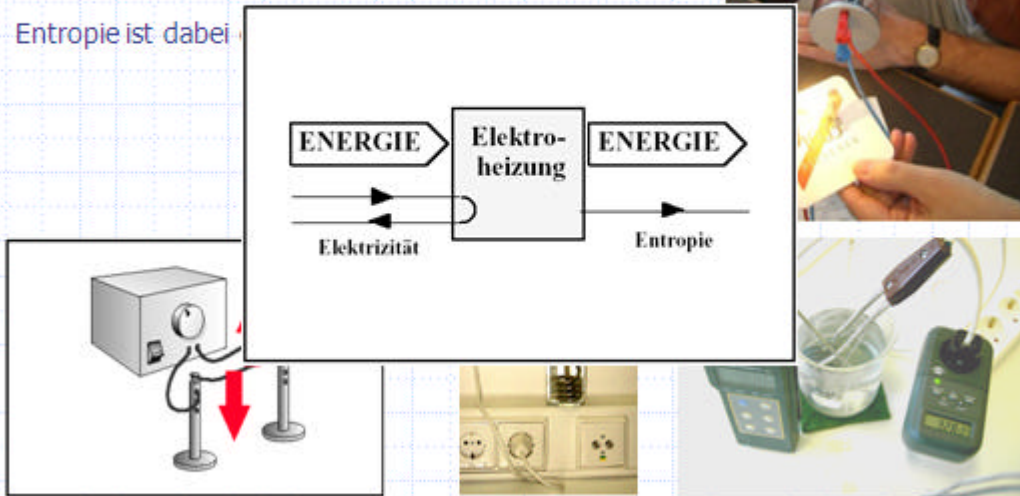


Wir überspringen 10.8  
Entropietransport durch  
Konvektion

## 11.1 Entropie als Energieträger

Der stromdurchflossene Leiter gibt Energie ab

Entropie ist dabei



Physics meets Chemistry - Bad Wildbad 2008: Entropie

24

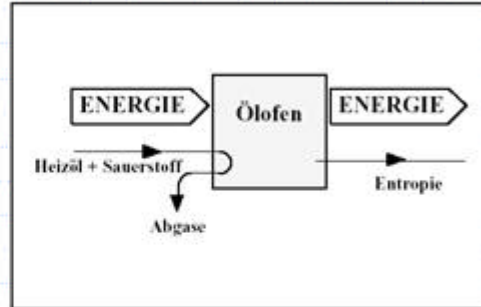
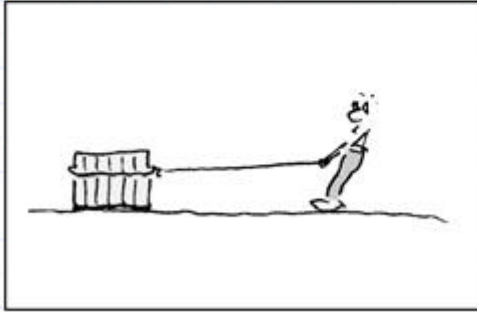
Wir wollen Bilanzen für „**Elektroheizungen**“, wie wir sie bei der Entropieerzeugung kennen gelernt haben (stromdurchflossener Draht, Tauchsieder etc.), machen. Wir wissen einerseits, dass in der Heizung **Entropie erzeugt wird**, die sie während des Betriebes abgibt. Andererseits wissen wir, dass die Elektroheizung beim Betrieb **Energie benötigt**, die durch das Anschlusskabel mit dem Träger Elektrizität **hineinfließt**. Wenn man die bereits erwähnten Dynamots zur Verfügung hat, haben die Schüler bereits bei der Entropieerzeugung die Energiezufuhr durch Kurbeln erfahren. Nun muss aber diese Energie auch wieder herauskommen. Die Frage ist, mit welchem Träger? Da neben der Energie auch Entropie aus der Heizung herauskommt, ist die Antwort nahe liegend: **Entropie ist der Energieträger**.

Die Elektroheizung gehört zu den Geräten, die wir früher Energieumlader genannt haben: Die Energie geht mit dem Träger Elektrizität in das Gerät hinein. Im Gerät wird Entropie erzeugt, und die Energie verlässt das Gerät mit dieser erzeugten Entropie. (siehe das entsprechende Energieflußdiagramm). Sie wird also auf Entropie umgeladen (Analogie: **Getränkeabfüllung**).

Eine Elektroheizung **lädt** die gelieferte Energie zu **100%** auf den Träger Entropie um.



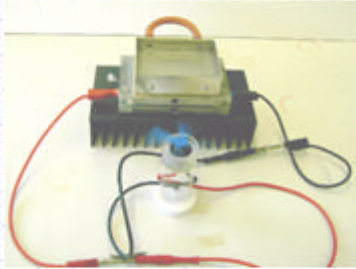
## 11.1 Entropie als Energieträger



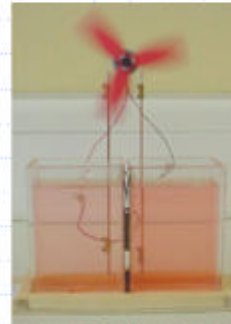
Die genannten Überlegungen lassen sich auch auf andere Vorgänge übertragen, bei denen Entropie erzeugt wird. Hier das Flußbild eines Ölofens.

Der Mann zieht eine schwere Kiste über den Boden. An der Unterseite der Kiste wird Entropie erzeugt. (Vergleiche Aufgabe auf den Übungsblatt).

## 11.1 Entropie als Energieträger



Experimente

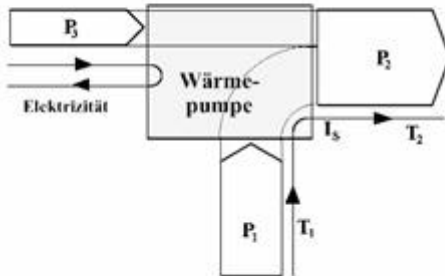


Man kann **experimentell** nachweisen, dass Entropie Energie trägt, indem man mit dem Energiestrom, den der Entropiestrom trägt, ein **Gerät antreibt**:

- Von dem heißen Wasser im Behälter fließt Entropie von selbst zum Kühler. Dieser Entropiestrom wird dabei durch ein Peltierelement geleitet, das nun umgekehrt als Thermogenerator betrieben wird und dabei Energie mit dem Träger Elektrizität abgibt. Man kann z.B. einen kleinen Motor damit antreiben.
- Eine Variante dieses Experiments könnte als Schülerexperiment mit einem Peltierelement zwischen einem Gefäß mit heißem Wasser einem Gefäß mit kaltem Wasser betrieben werden, das einen leichtgängigen Solarmotor antreibt.
- Verwendet man einen **Stirlingmotor**, so verlässt die vom Entropiestrom gelieferte Energie, den Motor mit dem Träger Drehimpuls.

## 11.2 Der Zusammenhang zwischen Energiestrom und Entropiestrom

$$P \sim I_S$$



Derselbe Entropiestrom  $I_S$  trägt zwei verschieden starke Energieströme  $P_1$  und  $P_2$ . Weil  $P_2 = P_1 + P_3$  gilt:  $P_2 > P_1$

Da die einzige weitere Größe  $T$  ist und weil  $T_2 > T_1$  ist, gilt:  $P = T \cdot I_S$

$$P_1 = T_1 \cdot I_S, P_2 = T_2 \cdot I_S, P_3 = P_2 - P_1 \text{ ergibt: } P_3 = (T_2 - T_1) \cdot I_S$$

Wenn ein Tauchsieder (oder eine andere Elektroheizung) in Betrieb ist, so liefert er mit dem Entropiestrom der Stärke  $I_S$  den Energiestrom der Stärke  $P$  ins Wasser. Wobei  $P$  gleich der Stärke des aufgenommenen Energiestromes ist, und daher leicht gemessen werden kann.

Sind (zwei) drei... gleichartige Tauchsieder gleichzeitig in Betrieb, so liefern sie zusammen einen Entropiestrom der Stärke  $(2 \cdot I_S)$ ,  $3 \cdot I_S$ , ... . Außerdem liefern sie zusammen auch den Energiestrom  $(2 \cdot P)$ ,  $3 \cdot P$ , ...: Es gilt also  $P \sim I_S$ .

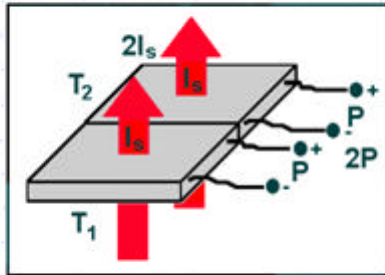
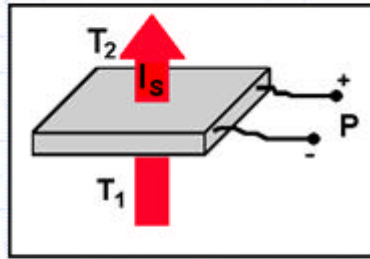
Nun fehlt der **Proportionalitätsfaktor** zwischen  $P$  und  $I_S$ . Dazu betrachten wir ein Gerät, bei dem wir **zwei gleichstarke Entropieströme** haben, die unterschiedlich starke Energieströme tragen: Eine elektrische Wärmepumpe. Die Elektrizität liefert einen Energiestrom der Stärke  $P_3$  ins Gerät. Der gesamte Entropiestrom, der aus der Umgebung ins Gerät hineinfließt verlässt es auch wieder. Da Entropie ein Energie-träger ist, sind beide Entropieströme von einem Energiestrom begleitet. Es fließen zwei Energieströme  $P_3$  und  $P_1$  hinein und addieren sich zu dem heraus fließenden Energiestrom  $P_2$ , der deshalb um  $P_3$  stärker ist als  $P_1$ . Wir haben also zwei verschieden starke Energieströme, die von demselben Entropiestrom getragen werden. In welcher weiteren physikalischen Größe unterscheiden sie sich?

Am Entropieeingang liegt bekanntlich eine niedrigere Temperatur  $T_1$  vor, als  $T_2$  am Entropieausgang. Der gesuchte Proportionalitätsfaktor hängt also von  $T$  ab.

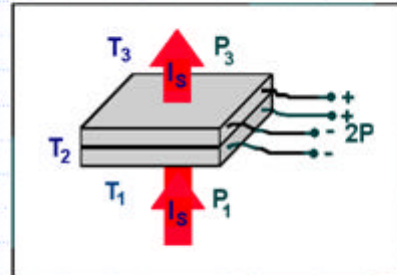
Tatsächlich ist der Proportionalitätsfaktor einfach die absolute Temperatur:  $P = T \cdot I_S$  Die absolute Temperaturskala ist nämlich über diese Gleichung definiert.

Damit gilt für die beiden Energieströme:  $P_1 = T_1 \cdot I_S$  und  $P_2 = T_2 \cdot I_S$ . Wegen  $P_3 = P_2 - P_1$  folgt  $P_3 = (T_2 - T_1) \cdot I_S$ .

## Veranschaulichung



$P \sim I_s$ ; bei gleichem  $\Delta T = T_2 - T_1$



$P \sim \Delta T$ ; bei gleichem  $I_s$

Eine Wärmepumpe, die mit dem Energiestrom der Stärke  $P$  betrieben wird, befördert den Entropiestrom der Stärke  $I_s$  von  $T_1$  nach  $T_2$ .

- Wenn zwei Wärmepumpen **parallel** arbeiten, wird der **doppelte Entropiestrom** bei gleicher Temperaturdifferenz gepumpt. Sie benötigen dabei auch die doppelte Energiestromstärke  $2P$ . Also gilt:  $P \sim I_s$  bei gleichem  $\Delta T$ .

- Wenn zwei Wärmepumpen **hintereinander** arbeiten, wird derselbe Entropiestrom um die **doppelte Temperaturdifferenz** „hochgehoben“. Auch sie benötigen dazu die doppelte Energiestromstärke  $2P$ . Hier gilt:  $P \sim \Delta T$  bei gleichem  $I_s$ .

Eine andere Möglichkeit, sich die hergeleitete Formel plausibel zu machen, besteht in der Betrachtung eines Kühlschranks:

- Je **mehr zu kühlende Körper** im Kühlschrank sind, desto **stärker** ist der zu pumpende **Entropiestrom** und umso **mehr Energie** muss aufgewandt werden (der Kompressor arbeitet zwar bei gleicher Energiestromstärke aber er ist häufiger aktiv).

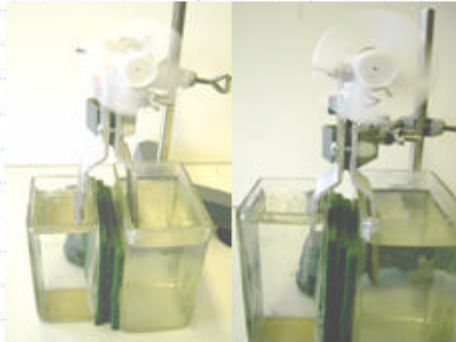
- Je **größer** die gewünschte **Temperaturdifferenz** zwischen innen und außen sein soll, desto **mehr Energie** muss aufgewandt werden (vergl. oben).

Nun kann die **Heizung eines Hauses** auf zwei Arten berechnet und verglichen werden (Aufgabe).

## Experimentelle Bestätigung

Die Wassermengen werden auf **unterschiedliche Temperaturdifferenzen** gebracht:

Je **größer** die Temperaturdifferenz  $\Delta T$  desto **mehr Energie** gibt der Wärmemotor ab.



Die Metallbeine werden unterschiedlich tief ins Wasser eingetaucht (Kontaktfläche vergrößert) und damit  **$I_S$  variiert**:

Je **größer** die Entropiestromstärke  $I_S$ , desto **mehr Energie** gibt der Wärmemotor ab.

Es gibt auch die Möglichkeit im Experiment die beiden Abhängigkeiten zu demonstrieren. Wir verwenden dazu ein kleines „Wärmekraftwerk“ aus einem Peltierelement und zwei metallenen Wärmeleitern, sowie einem angeschlossenen Elektromotor:

- Indem man die **Temperaturdifferenz** der beiden Wassermengen variiert und dabei den Motor beobachtet (eine gewisse Trägheit ist nicht zu vermeiden) bestätigt, dass mit **zunehmender Temperaturdifferenz  $\Delta T$**  die Stärke  **$P$**  des **Energiestromes** aus dem Kraftwerk zunimmt.
- Durch Verändern der Eintauchtiefe der Metallfüße ins Wasser wird die Kontaktfläche und damit die Stärke des Entropiestromes durch das Kraftwerk variiert. Die Drehgeschwindigkeit des Motors zeigt uns, dass mit **zunehmender Entropiestromstärke  $I_S$**  die Stärke  **$P$**  des **Energiestromes** zunimmt.

Dies ist bereits ein Vorgriff auf das spätere Kapitel **11.4 Wärmemotoren**

## 11.2 Aufgabe 5

5. (a) Ein Haus wird mit einer Wärmepumpe geheizt. Die Außentemperatur beträgt  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , die Temperatur im Haus  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Die Wärmepumpe fördert  $30\text{ Ct/s}$ . Wie hoch ist ihr Energieverbrauch?
- (b) Dasselbe Haus wird mit einer gewöhnlichen Elektroheizung geheizt, d. h. die  $30\text{ Ct/s}$  werden nicht von draußen hineingepumpt, sondern im Haus erzeugt. Wie hoch ist der Energieverbrauch?

### Lösung

5. (a) Gegeben:  $T_A - T_B = 25\text{ K}$   $I_S = 30\text{ Ct/s}$

Gesucht:  $P$

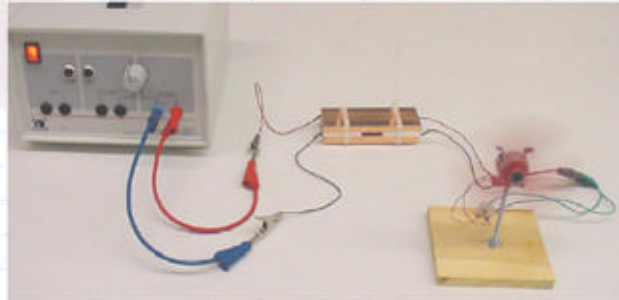
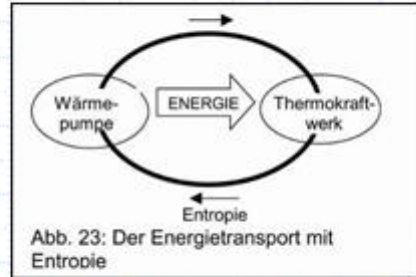
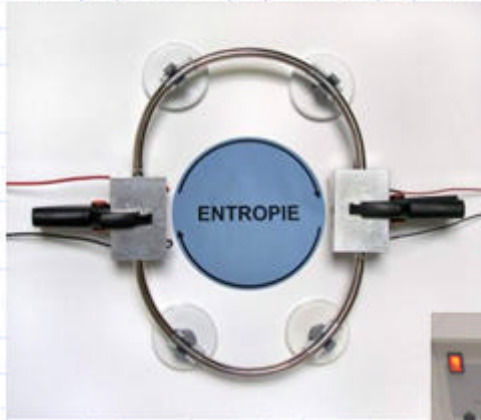
$$P = (T_A - T_B) \cdot I_S = 25\text{ K} \cdot 30\text{ Ct/s} = 750\text{ KJ}/(\text{K}\cdot\text{s}) = 750\text{ W}$$

- (b) Gegeben:  $T = (273 + 25)\text{K} = 298\text{ K}$   $I_S = 30\text{ Ct/s}$

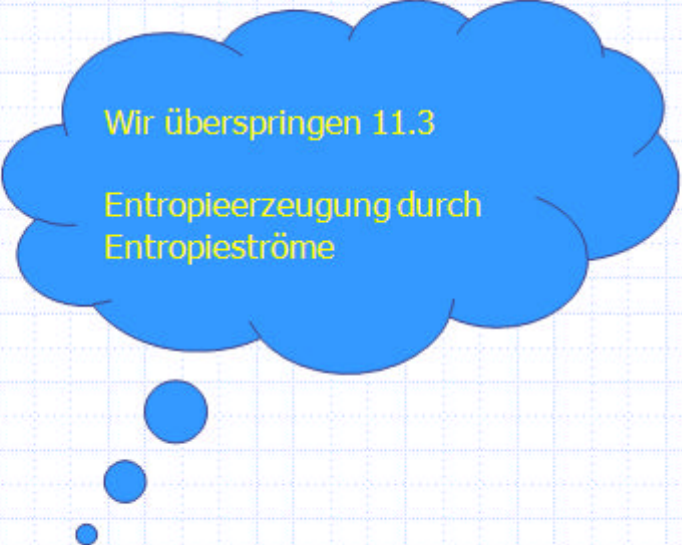
Gesucht:  $P$

$$P = T \cdot I_S = 298\text{ K} \cdot 30\text{ Ct/s} = 8940\text{ W}$$

## Thermischer Energieträger Stromkreislauf



Ein Wärmekreislauf analog zum Wasserkreislauf (vergl. Plappert, Conatex) bestehend aus einem Peltierelement als Wärmepumpe, das Energie auf Entropie umlädt. Zusammen mit der Entropie strömt die Energie zum zweiten Peltierelement, das Energie auf Elektrizität umlädt (als Wärmekraftwerk fungiert). Die Entropie fließt mit weniger Energie zur Wärmepumpe zurück.



Wir überspringen 11.3  
Entropieerzeugung durch  
Entropieströme



Wir überspringen 11.4  
Wärmemotoren

Wir überspringen 11.5

Entropiequellen für  
Wärmemotoren

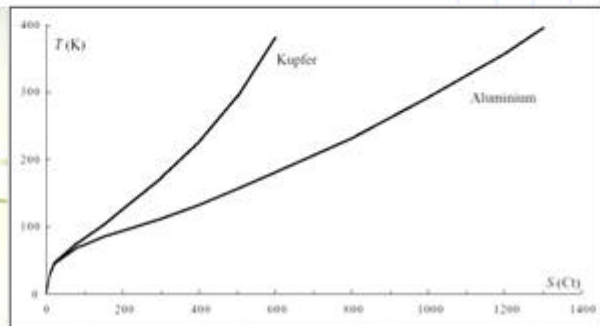
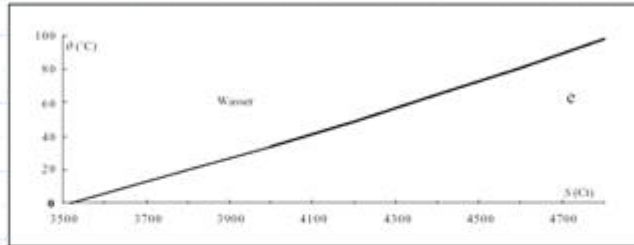


Wir überspringen 11.6  
Der Energieverlust

## 11.7 Der Zusammenhang zwischen Entropieinhalt und Temperatur

$$P = T \cdot I_S$$

$$I_S = P/T$$



Physics meets Chemistry - Bad Wildbad 2008: Entropie

36

Der gefundene Zusammenhang  $P = T \cdot I_S$  erlaubt eine einfache Messung von Entropiestromstärken, die eine elektrische Heizung verlassen:

Nach  $I_S$  aufgelöst erhält man:  $I_S = P/T$ . D.h.  $I_S$  ist von der Temperatur des Wassers abhängig. Deshalb legen wir eine „Eichtabelle“ an, indem wir mit dem Wattmeter die Stärke des Energiestromes in den Tauchsieder messen (die aufgedruckten Werte sind nicht immer verlässlich). Außerdem überzeugt man sich dabei, dass  $P$  unabhängig von  $T$  ist. In kleinen Temperaturschritten (z.B. 20 K) teilt man die Temperaturen zwischen 273 K und 373 K und erhält so, die Entropiestromstärkewerte für die jeweiligen Temperaturintervalle (Mittelwerte der Intervalle verwenden):  $I_S = P/T$ .

Stoppt man zusätzlich noch die Zeiten, die vergehen bis die nächste Temperatur erreicht wird, kann man aus  $I_S$  und  $\Delta t$  schließlich die zugeführte Entropie  $\Delta S$  bestimmen:  $\Delta S = I_S \cdot \Delta t = P/T \cdot \Delta t$ . Eigentlich erhält man nur Entropiedifferenzen zu der Entropie bei 273 K. Durch Abkühlen eines Körpers auf 0 K und anschließendes Aufheizen mit einer elektrischen Heizung kann man schrittweise die zugeführte Entropie bestimmen und erhält dadurch absolute  $S$ -Werte.

Damit kann man auch erklären, wie die  $S$ - $T$ -Diagramme von Wasser und anderen Stoffen ermittelt wurden, die bereits früher benutzt wurden.

Mit dieser Vorgehensweise lassen sich auch die Entropiemengen bestimmen, die bei **Phasenübergängen** auftreten.

Wir überspringen 11.8

Der Zusammenhang  
zwischen Energiezufuhr  
und Temperaturerhöhung

Wir überspringen 12  
Phasenübergänge

Wir überspringen 13

Gase

Wir überspringen 14  
Licht



Vielen Dank für Ihr Interesse

## Die verschiedenen Gesichter der Entropie

A

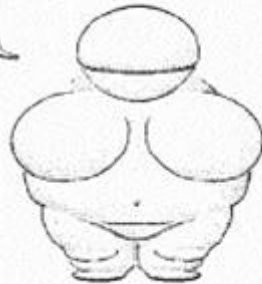


**A: Das alltägliche Gesicht**  
Jeder Mensch spürt sie als Wärme.

**B: Das philosophische Gesicht**  
Der Philosoph erblickt in ihr die Herrschaft  
des Zufalls.

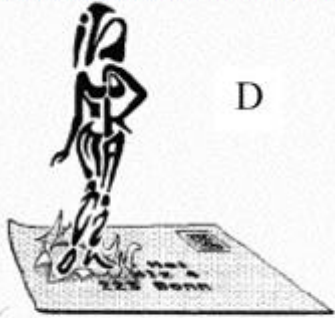


C



**C: Das statistische Gesicht**  
Für den statistischen Physiker repräsentiert  
sie ein vieldimensionales Volumen.

## Die verschiedenen Gesichter der Entropie



**D: Das informationstheoretische Gesicht**  
Der Informatiker beschreibt mit ihr den Umfang einer Nachricht.

**E: Das chemische Gesicht**  
Für den Chemiker ist sie Inbegriff der Unordnung.



**F: Das thermodynamische Gesicht**  
Der traditionelle Thermodynamiker sublimiert daraus eine formalistische Essenz.

