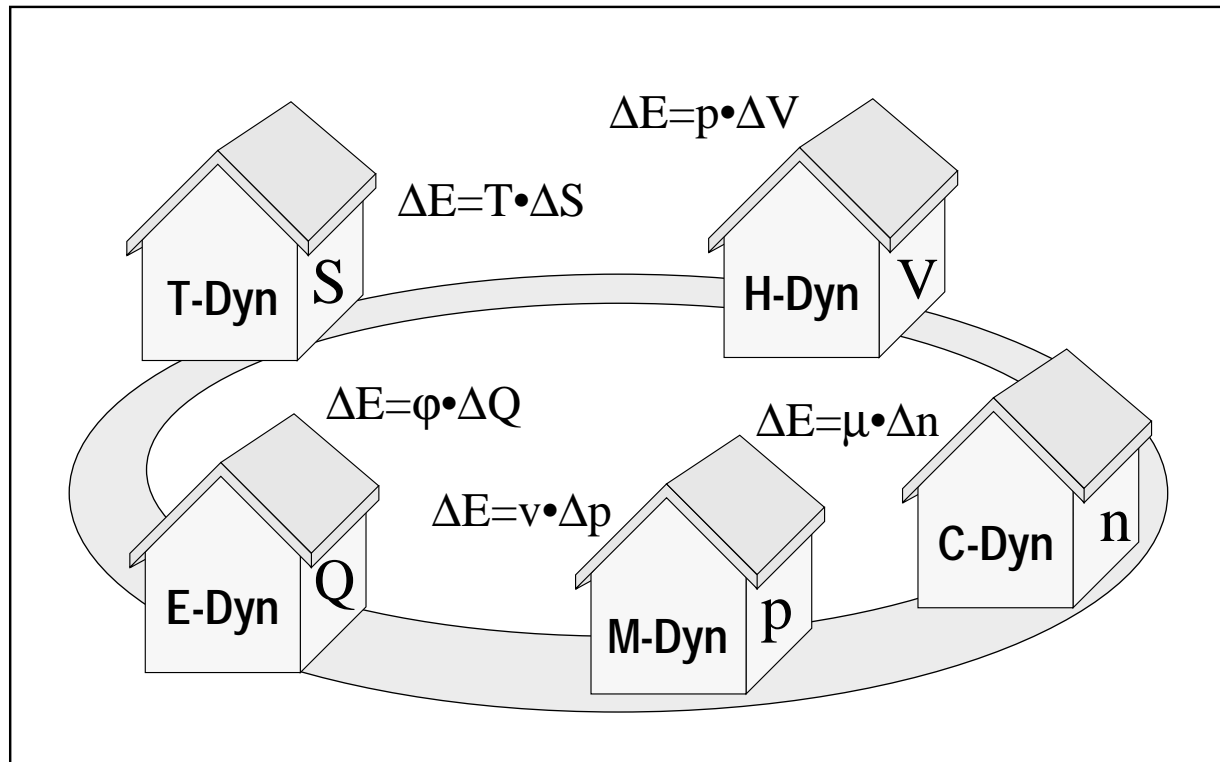




Energie und Entropie



In den "PZ-Informationen" werden Ergebnisse aus Arbeitsgruppen von Lehrerinnen und Lehrern aller Schularten veröffentlicht, die gemeinsam mit Fachwissenschaftlern und Fachdidaktikern erarbeitet worden sind. Hier werden Anregungen gegeben, wie auf der Grundlage des Lehrplans in der Schule gearbeitet werden kann. Im Mittelpunkt steht dabei immer der tägliche Unterricht und damit verbunden die Absicht, seine Vorbereitung und Durchführung zu bereichern. Für Lehrerinnen und Lehrer, die diese Anregungen aufgreifen und durch eigene Erfahrungen und Ergebnisse verändern oder ergänzen wollen, ist das Pädagogische Zentrum ein aufgeschlossener Partner, der besucht oder telefonisch erreicht werden kann.

Die "PZ-Informationen" erscheinen unregelmäßig. Eine chronologische Liste aller Veröffentlichungen des Pädagogischen Zentrums einschließlich einer inhaltlichen Kommentierung kann im PZ Bad Kreuznach angefordert werden (Rückporto). Unser Materialangebot finden Sie auch im Internet auf dem Landesbildungsserver unter folgender Adresse:

<http://bildung-rp.de/PZ>

Herausgeber:

Pädagogisches Zentrum Rheinland-Pfalz (PZ)
Europaplatz 7 - 9, 55543 Bad Kreuznach
Postfach 2152, 55511 Bad Kreuznach
Telefon (0671) 84088-0
Telefax (0671) 8408810
e-mail: pzkh@sparkasse.net
URL: <http://bildung-rp.de/PZ>

Autor:

Josef Leisen, Staatl. Studienseminar für das Lehramt an Gymnasien in Koblenz,
Leiter der Fachdidaktischen Kommission Physik - Sekundarstufe II

unter Mitarbeit der Mitglieder der Fachdidaktischen Kommission Physik:

Dietmar Fries, Gymnasium Birkenfeld
Dr. Jörg Luggen-Hölscher, Goethe-Gymnasium Germersheim

Skriptbearbeitung und Layout:

Josef Leisen

Redaktion:

Angela Euteneuer

© Bad Kreuznach 1999

Nicht alle Copyright-Inhaber konnten ermittelt werden. Deren Urheberrechte werden hiermit vorsorglich und ausdrücklich anerkannt.

Die vorliegende PZ-Veröffentlichung wird gegen eine Schutzgebühr von DM 5,00 zzgl. Versandkosten abgegeben.

I. Didaktischer Teil

1. Der lange Weg zur Entropie	5
2. Der kurze Weg zur Entropie	7
3. Entropieerfahrungen im Alltag	11
3.1. Grundbegriffe der Wärmelehre: Temperatur, Entropie und Energie	
3.2. Der Temperaturunterschied als Antrieb für einen Entropiestrom	
3.3. Die Entropiekapazität	
3.4. Die Entropieerzeugung	
3.5. Die Entropiedissipation	
4. Historische Altlasten und die didaktische Inkonsequenz	14
5. Energie- und Entropieströme	15
6. Entropische Betrachtungen	19
6.1 Der Mensch - entropisch betrachtet	
6.2 Die Pflanzen - entropisch betrachtet	
6.2 Die Erde - entropisch betrachtet	
7. Exkurse	23
7.1 Die verschiedenen Gesichter der Entropie (nach G. Job)	
7.2 Meinungsvielfalt zum Wärmebegriff (nach G. Job)	
7.3 Warum die Energieform Wärme nicht in einem System enthalten sein kann	
7.4 Zur Geschichte des Wärmebegriffs	
7.5 Die Festlegung der Skalen und die Messung von Temperatur und Entropie	
7.6 Altlasten der Physik: Entropie (von G. Job)	
7.7 Altlasten der Physik: Die Äquivalenz von Wärme und Arbeit (von G. Job)	
7.8 Altlasten der Physik: Die Messung der Entropie (von F. Herrmann)	

II. Unterrichtspraktischer Teil - Ein Unterrichtsvorschlag

1. Didaktischer Kommentar	33
2. Bausteine im Lehrplan Physik	34
2.1 Bausteine des Grundfaches	
2.2 Bausteine des Leistungsfaches	
2.3 Bausteine im Lehrplan zum fachübergreifenden und fächerverbindenden Arbeiten am Thema Treibhauseffekt	
3. Gliederung der Unterrichtsreihe	36

III. Unterrichtsmaterialien

1. Folien und Arbeitsblätter	41
2. Aufgaben mit Lösungen	61

IV. Literatur

68

V. Anhang

69

I. Didaktischer Teil

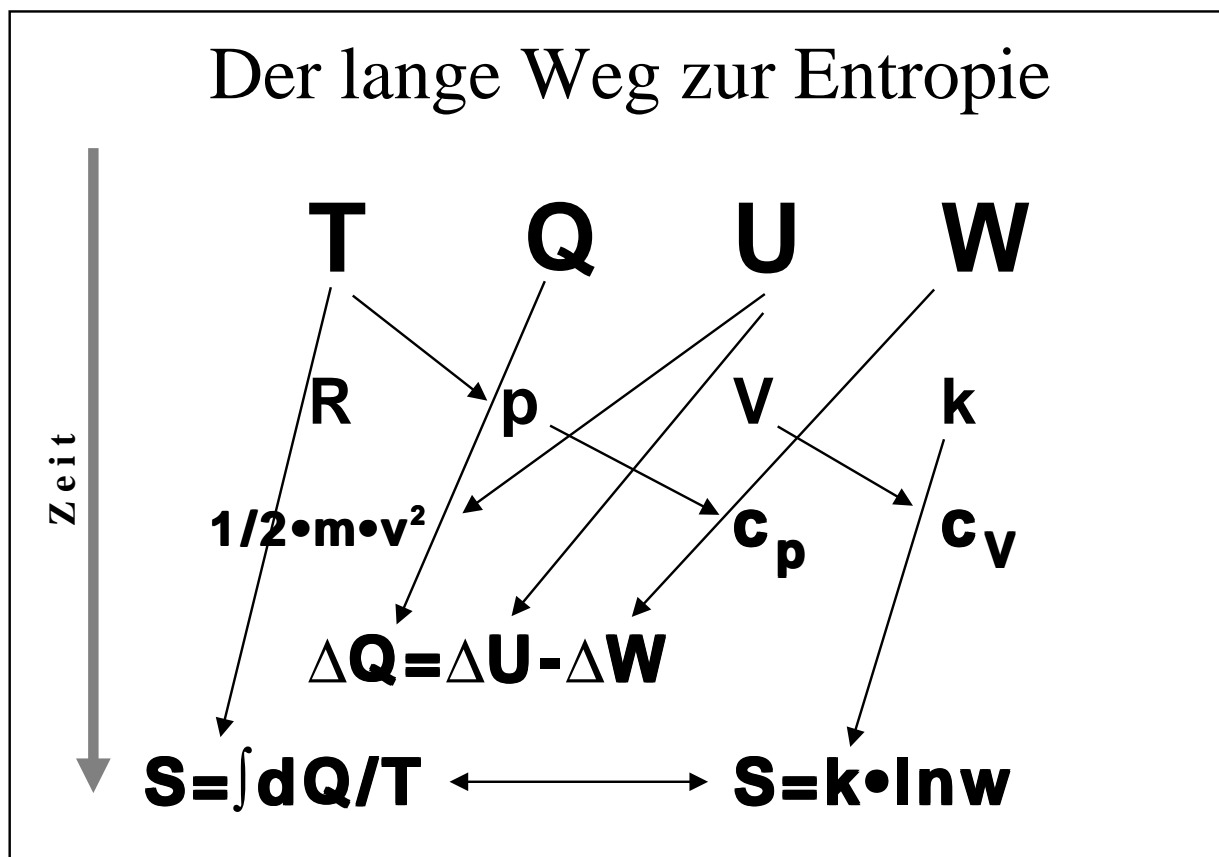
1. Der lange Weg zur Entropie

Entropie in der Schule, und dann noch in zehn Stunden? Unmöglich. Es ist gängige Meinung, dass die Entropie ein schwieriger, unanschaulicher, abstrakter, komplizierter, ... Begriff ist. Dabei besteht bei allen Physiker-innen und Physikern Einigkeit über Folgendes:

- *Fachliche Relevanz der Entropie:*
Die Entropie ist ein tragender Begriff des Strukturgebäudes der Physik.
- *Didaktische Relevanz der Entropie:*
Die Entropie ist eine beziehungshaltige und vernetzende Größe.
- *Umweltpolitische Relevanz der Entropie:*
Die Energieproblematik ist eigentlich eine Entropieproblematik.

Wenn Einigkeit über die Relevanz und Bedeutung des Entropiebegriffes unter den Physiklehrkräften besteht, dann ist es doch eine Schande, dass Schüler die Schule verlassen, ohne den Begriff kennengelernt zu haben. Nicht minder traurig ist die Tatsache, dass die meisten Physiker ein gebrochenes Verhältnis zum Entropiebegriff haben. Das hat aber seine guten Gründe, denn die Geschichte des Entropiebegriffs ist ziemlich dumm gelaufen. Aus historischen Gründen ist der Entropiebegriff innerhalb des Strukturgebäudes der Physik unhandlich und nicht zugriffsfreudig platziert.

Verfolgt man die Lerngeschichte eines Physikers über Entropie in der normalen Physikerausbildung, so stellt man fest, dass es üblicherweise zu einem ersten berührenden Kontakt mit der Entropie in der Vorlesung zur Experimentalphysik kommt: Nach viel idealem Gas mit c_p und c_v , reichlich vielen Zustandsänderungen, gelangt die



Vorlesung über den Carnotschen Kreisprozess zur thermodynamischen Temperaturskala und dann taucht diese Funktion S auf, "die wir als Entropie des Zustandes bezeichnen und deren vollständiges Differential dS bei einer reversiblen Änderung dQ/T ist, wobei dQ die aufgenommene Wärmemenge, T die Temperatur ist, bei der die Aufnahme erfolgt." ([1], S. 149)

"Das ist also die berühmte Entropie!", sagt sich der angehende Physiker und bevor er sich damit näher vertraut machen kann, ist die Vorlesung auch schon zu Ende, da dieses Kapitel meistens in der vorletzten Semesterwoche gelesen wird. Immer wieder zwischendurch taucht die Entropie in den verschiedensten Vorlesungen und Praktika auf, allerdings sind die Situationen immer so, "dass man dann so drübersurft". Es sind weder Faulheit noch böser Wille, welche die Studierenden davon abhalten, ein vertrautes Verhältnis zum Entropiebegriff zu entwickeln. "Das Schwierige an der Entropie liegt in der Natur der Sache", denkt sich der angehende Physiker. Mit dieser Meinung ist er in guter Gesellschaft, wenn er sich bei den Mitstudierenden umhört.

Die Ausbildung in der Physik macht das Verständnis schwer, und dem Studierenden stellen sich eine Reihe von Verständnishürden:

- Eingeführt als Zustandsfunktion über ein totales Differenzial bei einem **reversiblen** Kreisprozess, soll es ein Maß für **Irreversibilität** sein. Das klingt dem Lernenden paradox.
- Der lange Zugangsweg zum Entropiebegriff über Gastheorie und Carnot-Prozess verhindert eine spontane, unverkrampfte Handhabung des Begriffs. Man ist immer versucht, dem langen Zugang und dem Begründungsgeflecht im Zeitraffer nachzulaufen, um im Verständnis auf sicheren

Boden zu gelangen. Der Begriff taucht eben am Ende und nicht am Anfang eines langen Begriffsnetzes auf.

- Die Entropie tritt uns überraschenderweise in den verschiedensten Verkleidungen (thermisch, statistisch, informationstheoretisch, ...) und in den unterschiedlichsten Teilgebieten der Physik entgegen. Das eröffnet dem Lernenden zwar verschiedene Zugangsmöglichkeiten (Konsequenz: Es gibt verschiedene didaktische Zugänge!), aber es verwirrt ihn auch, solange er nicht mit den Schnittstellen vertraut ist. Darüber hinaus wird der Entropiebegriff in der fachwissenschaftlichen Literatur nicht einheitlich benutzt (vgl. EXKURS 1).

Der Lernende kommt zu der Überzeugung, dass Entropie ein zentraler, wichtiger Begriff der Physik ist, gleichzeitig fühlt er sich unsicher damit. Das ist die Lerngeschichte des "normalen" Physikers. Möglicherweise kommt noch eine Spezialvorlesung zur Thermodynamik dazu, was den Berührungsgrad und die Vertrautheit mit dem Entropiebegriff sicherlich wesentlich erhöht, aber selten zur didaktischen Elementarisierung beiträgt. Und dann gibt es noch die Physiker, die gleichzeitig auch Chemiker sind. Die Chemiker gehen wiederum anders mit der Entropie um, so dass es fast scheinen mag, sie sei ein chemischer Begriff und gehöre nur in den Chemie- und nicht in den Physikunterricht.

Kurzum, der Entropiebegriff erweist sich im Zugang als sperrig und das gilt erst recht für die Schule. In dieser Auffassung wird man beim Blick in gängige Schulbücher nur bestätigt. Nach viel kinetischer Gastheorie, manchen Zustandsänderungen, einigen Kreisprozessen, den Erhaltungssätzen, gelangen die Bücher auf der vorletzten Seite des Lehrbuchteils über Wärmelehre zur Entropie.

Ein Beispiel:

"Es ist daher zweckmäßig, eine weitere Zustandsgröße S einzuführen, deren Änderung ΔS diesen Vorgang erfasst. Diese Zustandsgröße heißt **Entropie**. Die Entropieänderung ΔS ist der Quotient aus der reversibel aufgenommenen Wärmemenge Q und der absoluten Temperatur T bei der Aufnahme $\Delta S = Q_{\text{rev}}/T$. Die Einheit der Entropie ist $[S] = 1 \text{ J/K}$." ([2], S. 176)

Ein Vergleich der Gliederung der Vorlesung mit dem Inhaltsverzeichnis des Schulbuches zeigt Strukturgleichheit, und man mag glauben, dass die Elementarisierung darin besteht, die totalen Differenziale durch Differenzengrößen zu ersetzen.

Es dürfte deutlich geworden sein, dass man keinen Unterricht über Energie und Entropie auf dem traditionellen Weg der Thermodynamik in zehn Unterrichtsstunden angehen kann. Alle Zugangsversuche über den traditionellen Weg zeigen, dass die Entropie erst ganz am Ende und damit zu spät vorkommt. Dieser Unterricht, so wertvoll er ist, muss die Überschrift "Kinetische Gastheorie" oder "Wärmekraftmaschinen" oder "Thermodynamik" (vgl. entsprechende Wahlpflichtbausteine) tragen, aber nicht die Überschrift "Energie und Entropie". Ein Baustein, welcher der tragenden Rolle von Energie und Entropie gerecht werden will, muss diese Begriffe von Anfang an benutzen. Es muss einer "Entropie-Didaktik" gelingen, den Entropiebegriff an den Anfang zu stellen und im Blick auf seine zentrale Stellung direkt anzugehen. Die traditionelle Thermodynamik versucht mit allen Mitteln, Thermodynamik ohne Entropie abzuhandeln. Das Ergebnis ist ein langer Weg zur Entropie.

2. Der kurze Weg zur Entropie

Zwei Fragen:

1. Frage: Können Sie sich vorstellen, die Elektrizitätslehre zu unterrichten, ohne den Begriff Elektrizität (bzw. elektrische Ladung) zu verwenden?

2. Frage: Können Sie sich vorstellen, die Wärmelehre zu unterrichten, ohne den Begriff Entropie zu verwenden?

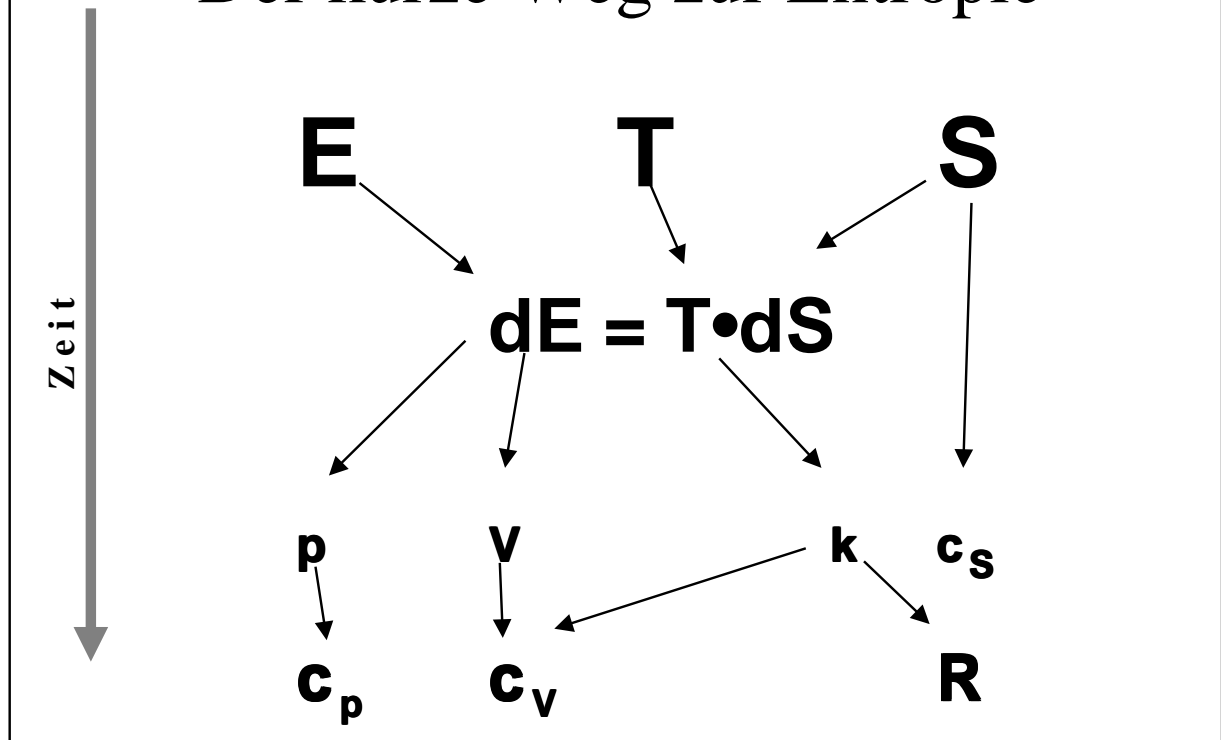
Die Antwort ist bei beiden Fragen ein klares "Nein!", denn:

Wärmelehre ohne Entropie ist wie Elektrizitätslehre ohne Elektrizität (elektrische Ladung).

Mit der Elektrizität tun sich alle Physiklehrkräfte leicht, und sie hat einen festen Platz im Physikunterricht. Mit der Entropie hingegen tun sich viele Physiklehrkräfte schwer, und die Entropie hat keinen Platz in der Schulphysik.

Der kurze Weg zur Entropie eröffnet sich über die sogenannte gibbssche Fundamentalform. Entropie und Temperatur spielen aus fachlicher Sicht für thermische Vorgänge dieselbe Rolle wie elektrische Ladung und elektrisches Potenzial (elektrische Spannung) für die elektrischen Vorgänge. Da man wohl kaum eine Elektrizitätslehre aufbaut unter Vermeidung des Begriffs der elektrischen Ladung, so sollte man das auch nicht in der Thermodynamik tun, indem man den Entropiebegriff tunlichst vermeidet. Im Gegenteil, aus fachlicher Sicht gehört er an den Anfang, genauso wie der Ladungsbegriff am Anfang der Elektrizitätslehre steht. Entropieströme spielen in der Thermodynamik nämlich dieselbe Rolle wie die elektrischen Ströme in der Elektrodynamik. Indem man diese Analogie aus-

Der kurze Weg zur Entropie



nutzt, eröffnet sich ein frappierend einfacher und kurzer Weg zur Entropie. Der kurze Weg basiert auf dem Karlsruher-Physikkurs, kurz KPK genannt [3] - [6].

Jeder, der die Elektrizitätslehre verstanden hat, versteht die Wärmelehre ganz analog, wie die folgende Gegenüberstellung zeigt:

Eigenschaften der Entropie und Gesetze für Entropieströme

Alltagserfahrungen als Entropieerfahrungen und Entropieexperimente führen zu folgenden Regeln und Gesetzen:

- 1 Jeder (warme) Körper enthält Entropie. Die (Wärme) Entropie S ist eine mengenartige Größe. Sie kann nur positive Werte annehmen.
- 2 Je größer die Masse m eines Gegenstandes, desto mehr Entropie S enthält er.
- 3 Je höher die Temperatur T eines Körpers (physikalischen Systems) ist, desto mehr Entropie S enthält er (es).
- 4 Entropie strömt von selbst von Stellen höherer Temperatur zu Stellen niedrigerer Temperatur. Ein Temperaturunterschied ΔT ist ein Antrieb für einen Entropiestrom $I_S = \Delta S / \Delta t$.
- 5 Je größer die Temperaturdifferenz ΔT , desto stärker ist der Entropiestrom: $I_S = L_S \cdot \Delta T$, wobei L_S der Entropieleitwert oder der reziproke Entropiewiderstand ist (fouriersches Gesetz).
- 6 Jede Leitung setzt dem hindurchfließenden Entropiestrom einen Widerstand entgegen. Dieser Entropiewiderstand ist umso größer, je kleiner die Querschnittsfläche der Leitung und je größer ihre Länge ist. Er hängt außerdem vom Material der Leitung ab: $R_S = l / (\sigma_S \cdot A)$.
- 7 Je höher die Temperatur T eines Körpers (physikalischen Systems) ist, desto mehr Entropie S enthält er (es). Die Entropiezunahme pro Temperaturzunahme heißt Entropiekapazität eines Systems $C_S = \Delta S / \Delta T$. Die Entropie S , und somit

Eigenschaften elektr. Ladungen und Gesetze für Ladungsströme

Alltagserfahrungen zur Elektrizität und Elektrizitätsexperimente führen zu folgenden Regeln und Gesetzen:

- 1 Jeder Körper enthält Elektrizität. Die (Elektrizitätsmenge, Ladungsmenge) Ladung Q ist eine mengenartige Größe. Die Ladung Q kann positive und negative Werte annehmen.
- 2 Je größer die Masse m eines Gegenstandes, desto mehr Ladung Q enthält er.
- 3 Je höher das Potenzial ϕ eines Körpers (physikalischen Systems) ist, desto mehr Ladung Q enthält er (es).
- 4 Ladung strömt von selbst von Stellen höheren Potenzials zu Stellen niedrigeren Potenzials. Ein Potenzialunterschied $\Delta \phi = U$ ist ein Antrieb für einen Ladungsstrom $I = \Delta Q / \Delta t$.
- 5 Je größer die Potenzialdifferenz $\Delta \phi = U$, desto stärker ist der Ladungsstrom: $I = L \cdot U$, wobei $L = 1/R$ der Leitwert oder der reziproke elektrische Widerstand ist (ohmsches Gesetz).
- 6 Jede Leitung setzt dem hindurchfließenden Ladungsstrom einen Widerstand entgegen. Dieser elektrische Widerstand R ist umso größer, je kleiner die Querschnittsfläche der Leitung und je größer ihre Länge ist. Er hängt außerdem vom Material der Leitung ab: $R = l / (\epsilon \cdot A)$.
- 7 Je höher das Potenzial ϕ eines Körpers (physikalischen Systems) ist, desto mehr Ladung Q enthält er (es). Die Ladungszunahme pro Potenzialzunahme heißt Kapazität eines Körpers $C = Q/U$.

auch die Entropiekapazität C_S hängen nicht nur von T , sondern auch von anderen Größen, z. B. Masse m , Volumen V , Druck p , Stoffmenge n , etc. ab. Bei Phasenübergängen ändert sich die Entropiekapazität sehr stark.

- 8 Entropie kann erzeugt werden bei einer chemischen Reaktion durch mechanische Reibung, durch elektrische Ströme in elektrischen Widerständen, durch Entropieströme in Wärmewiderständen, usw.. Entropie kann zwar erzeugt, aber nicht vernichtet werden (2. Hauptsatz der Thermodynamik). Dieser grundlegende Satz hat denselben erkenntnistheoretischen Status wie der Energieerhaltungssatz. Es ist ein Glaubenssatz.
- 9 Prozesse, bei denen Entropie erzeugt wird, können nicht von selbst rückwärts laufen, sie sind irreversibel.
- 10 Entropie ist ein Energieträger. Ein Entropiestrom der Stärke I_S ist immer mit einem Energiestrom der Stärke $I_E = T \cdot I_S$ oder $\Delta E = T \cdot \Delta S$ begleitet. Die Temperatur gibt an, wie stark ein Entropiestrom mit Energie beladen ist. (Die Energiestromstärke ist die Leistung $P = I_E$.)
- 11 Versucht man mit einer sehr guten Wärmepumpe einem Körper immer mehr Energie zu entziehen, so stellt man zweierlei fest:
 - Man kommt der Temperatur 0 K sehr nahe, kann sie aber nicht unterschreiten, es gibt eine absolut tiefste Temperatur.
 - Bei dieser Temperatur fördert die Pumpe keine Entropie mehr; absolut kalte Körper enthalten keine Entropie.
- 12 Die Einheit der Entropie ist $[S] = 1 \text{ J/K}$. Es ist diejenige Entropiemenge, mit der man bei Normaldruck $0,893 \text{ cm}^3$ Eis schmilzt.
- 8 Ladung kann weder erzeugt noch vernichtet werden (Ladungserhaltungssatz). Dieser grundlegende Satz hat denselben erkenntnistheoretischen Status wie der Energieerhaltungssatz. Die Physiker glauben daran.
- 10 Ladung ist ein Energieträger. Ein Ladungsstrom der Stärke I ist immer mit einem Energiestrom der Stärke $I_E = \varphi \cdot I_Q$ oder $\Delta E = \varphi \cdot \Delta Q$ begleitet. Das Potenzial gibt an, wie stark ein Ladungsstrom mit Energie beladen ist. (Die Energiestromstärke ist die Leistung $P = I_E$.)
- 12 Die Einheit der Ladung ist $[Q] = 1 \text{ C}$. Es ist diejenige Ladungsmenge, die bei einer zeitlich konstanten Stromstärke von 1 A während der Zeit von 1 s durch den Leiter fließt.

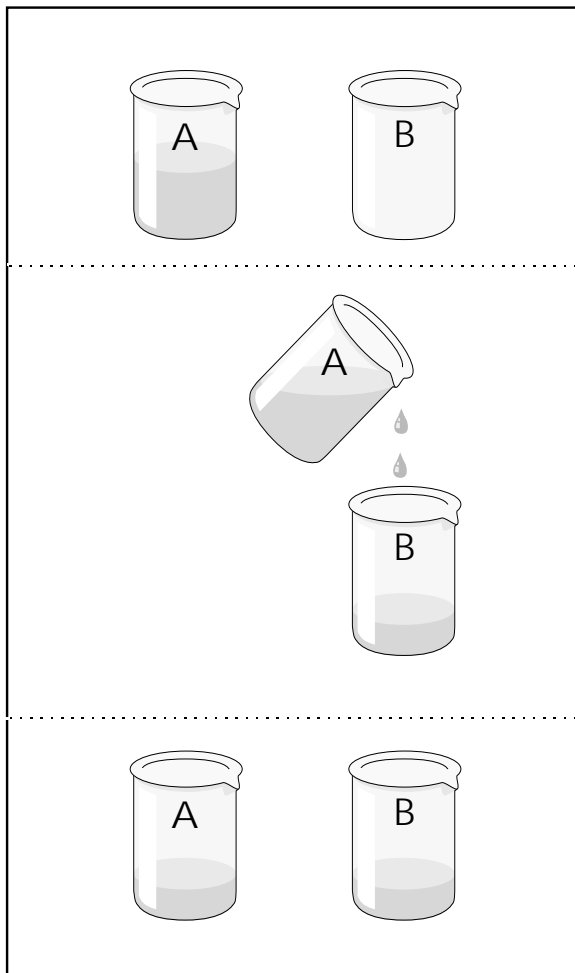
3. Entropieerfahrungen im Alltag

3.1. Grundbegriffe der Wärmelehre: Temperatur, Entropie und Energie

Grundbegriffe der Wärmelehre sind Energie, Temperatur und Entropie.

Den Unterschied zwischen den drei Größen kann man sich an einfachen Überlegungen klarmachen.

Die Hälfte des Wassers in A wird in B gegossen. Die Temperatur in A bleibt gleich, aber die Wärme und die Energie halbieren sich.



Die **Temperatur** charakterisiert den Zustand des Warmseins eines Körpers, unabhängig von dessen Größe, Masse, Materi-

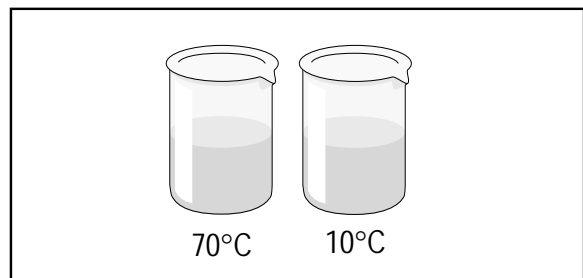
al, etc..

Die **Wärme** (= **Entropie**) ist etwas, das in dem Körper enthalten ist, abhängig von dessen Größe, Masse, Material, Temperatur, ...

Die **Energie** ist etwas, das in allem enthalten ist. Alles ist Energie und für alles braucht man Energie. Mit Wärme kann man Energie übertragen.

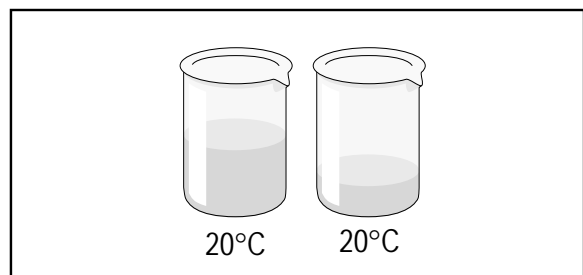
Die folgenden Überlegungen untermauern die Begriffserklärungen.

- Das Wasser mit der Temperatur 70°C enthält mehr Entropie (= Wärme) als die gleiche Wassermenge der Temperatur 10°C.

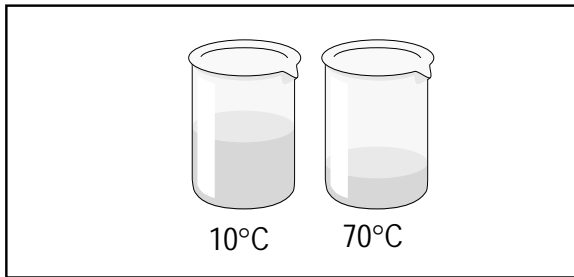


Je höher die Temperatur eines Gegenstandes ist, desto mehr Entropie enthält er.

- Von zwei Wassermengen gleicher Temperatur enthält die größere mehr Entropie als die kleinere.

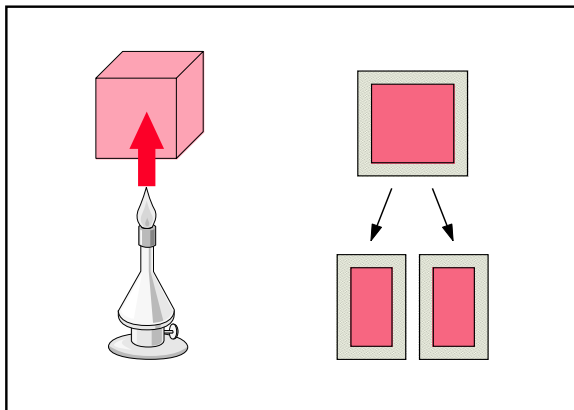


Je größer die Masse eines Gegenstandes ist, desto mehr Entropie enthält er.



- Bei zwei Wassermengen unterschiedlicher Masse und unterschiedlicher Temperatur braucht man zum Vergleich der Entropiemengen quantitative Gesetzmäßigkeiten.

Hält man einen Gegenstand, z. B. ein Stück Eisen, über eine Gasflamme, so wird er wärmer, seine Temperatur steigt. In den Gegenstand strömt Entropie hinein. Je mehr Entropie man in das Eisenstück hineinfließen lässt, desto höher wird seine Temperatur. Nimmt man den Gegenstand von der Flamme weg und packt ihn in Styropor ein, so bleibt die Entropie in ihm drin.

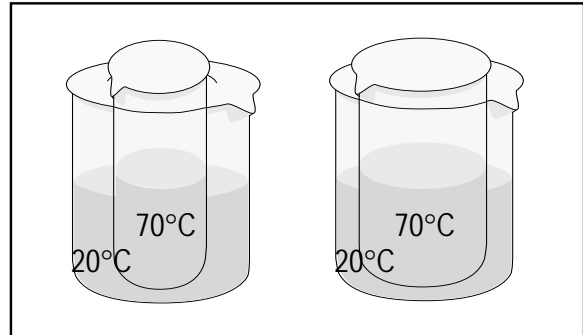


Entropie ist eine mengenartige Größe, die in einem Körper enthalten ist.

3.2. Der Temperaturunterschied als Antrieb für einen Entropiestrom

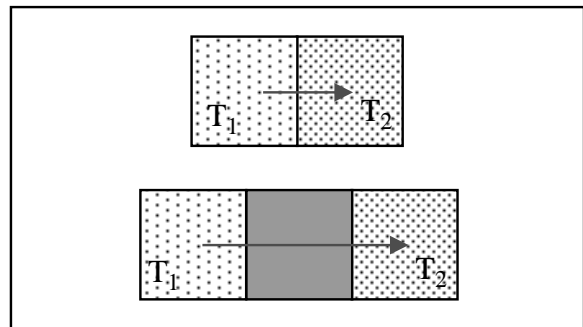
- Taucht man einen Behälter A mit Wasser der Temperatur 70°C in ein Wasserbad B der Temperatur 20°C , so fließt solange Entropie von A nach B, bis die Temperaturen

gleich sind. Es stellt sich ein thermisches Gleichgewicht ein. Die Gleichgewichtstemperatur hängt ab vom Verhältnis der Wassermengen.



Entropie strömt von selbst von Stellen höherer Temperatur zu Stellen niedriger Temperatur. Ein Temperaturunterschied ist ein Antrieb für einen Entropiestrom.

- Ob die Entropie gut von einem warmen zu einem kalten Gegenstand fließt, hängt aber auch noch von der Art des Kontakts, der Verbindung, ab. Sind die Gegenstände durch Holz verbunden, so fließt die Entropie schlechter als wenn sie durch Metall verbunden sind.



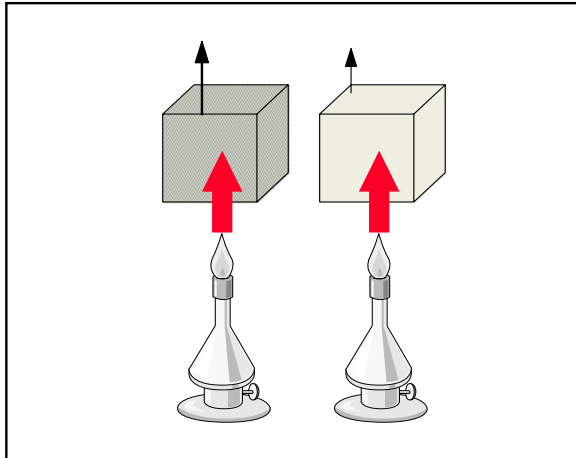
Es gibt also gute und schlechte Entropieleiter.

- Um Entropie entgegen dem Temperaturgefälle strömen zu lassen, benötigt man eine Entropiepumpe (= Wärmepumpe).

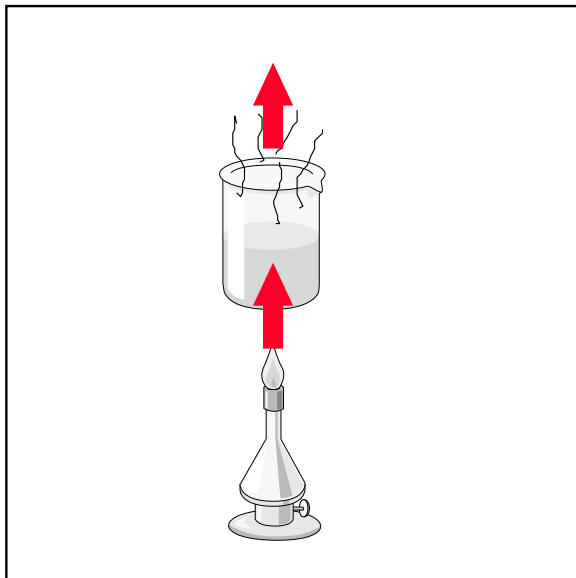
Eine Wärmepumpe transportiert Entropie von Stellen niedriger Temperatur zu Stellen höherer Temperatur.

3.3. Die Entropiekapazität

Hält man einmal einen Behälter mit Luft und einmal einen gleich großen Behälter mit Wasser über eine Flamme, so stellt man fest, dass sich die Luft schneller erwärmt, d. h. schneller eine bestimmte Temperatur erreicht als das Wasser.

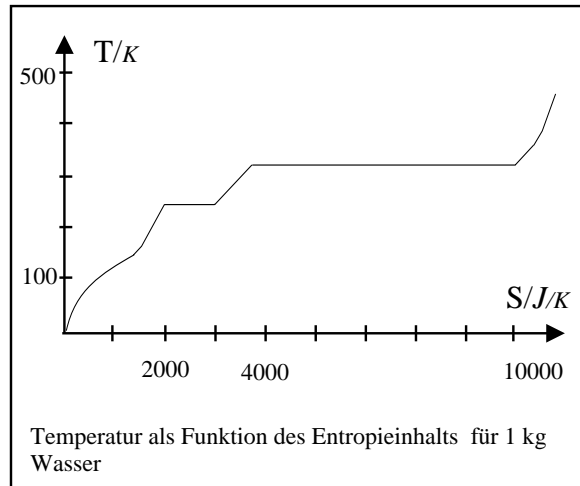


Man muss also in das Wasser mehr Entropie hineinstecken, um diese Temperatur zu erreichen. Wasser hat eine größere Entropiekapazität als Luft.



Man kann einem "System" auch Wärme (Entropie) zuführen, ohne dass die Temperatur steigt. Lässt man siedendes Wasser auf der Flamme stehen, so fließt dauernd Entropie in das Wasser hinein. Seine Tem-

peratur erhöht sich nicht mehr, aber dafür wird ständig Wasser verdampft. Der Dampf muss also die Entropie forttragen.



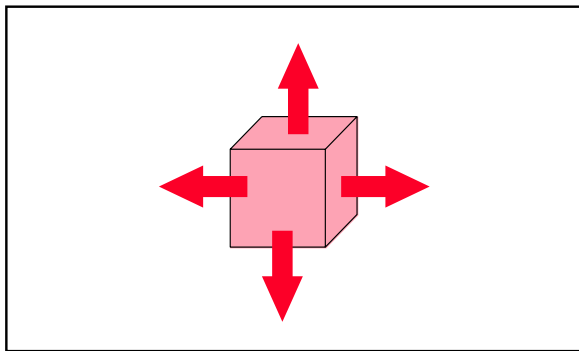
Ein Gramm Dampf enthält also (viel) mehr Entropie als ein Gramm flüssiges Wasser.

In dem Bereich der normalen Umgebungstemperatur ist die Kurve fast eine Gerade. Die Entropiekapazität ist dort konstant und gleiche Entropieportionen ΔS erhöhen die Temperatur um den gleichen Betrag ΔT .

3.4. Die Entropiedissipation

Lässt man den Gegenstand, den man vorher erwärmt hat, eine Weile stehen (ohne weiter zu heizen), so fließt die Wärme (Entropie) aus ihm heraus, sie verteilt sich in der Umgebung.

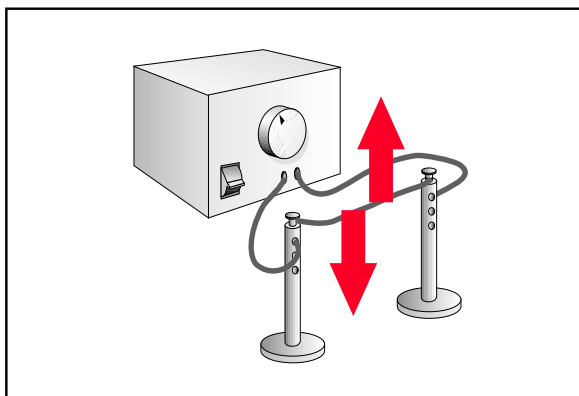
Dabei verdünnt sie sich so stark, dass man nicht mehr erkennt, wo sie sich genau befindet. Trotzdem ist sie irgendwo, sie ist nicht verschwunden im Sinne von "vernichtet", sondern nur verschwunden im Sinne von "versteckt" oder "verstreut".



Entropie kann nicht vernichtet werden.

3.5. Die Entropieerzeugung

Man kann Entropie nicht vernichten, aber man kann sie erzeugen, z. B. in einer Flamme, in einem elektrischen Widerstand oder durch "Reibung".



Um Entropie zu erzeugen, braucht man Energie. Da wir an die Erhaltung der Energie glauben, schließen wir, dass mit der Entropie, die von einem elektrischen Widerstand wegfleht, auch Energie wegfleht. ([4], [6], S. 11-12)

4. Historische Altlasten und die didaktische Inkonsequenz

Oben sind Alltags-Entropieerfahrungen geschildert, die jeder Schüler verstehen kann und die verdeutlichen, dass Entropie eben kein schwieriger Begriff ist, ganz im Gegenteil. Nicht der Entropiebegriff ist schwer und kompliziert, sondern die verwickelte Begriffsgeschichte hat es den Lernenden immer wieder schwer gemacht. (Zur Geschichte des Entropiebegriffs vgl. EXKURS 4.)

Dabei ist der Weg zum Entropiebegriff nicht schwerer und leichter als der Weg zum Ladungsbegriff. Die elektrische Ladung kann man genauso wenig sehen wie die Entropie, und sie ist auch nicht anschaulicher als diese. Es kommt hinzu, dass jeder Schüler weniger Primärerfahrungen mit der elektrischen Ladung hat als mit der Wärme (=Entropie). Es gehört zur didaktischen Inkonsequenz, dass man aus elektrischen Grunderfahrungen und Experimenten die elektrische Ladung postuliert und ihr Eigenschaften zuschreibt, der Entropie hingegen all das vorenthält, obwohl die Wärmeerfahrungen von gleicher Qualität sind. "Anschaulich ist das, woran man sich gewöhnt hat", sagte Ludwig Boltzmann. Didaktisch ins Positive gewendet, sollten wir uns umgewöhnen und die Entropie genauso behandeln wie elektrische Ladung, und sie wird uns dann genauso "anschaulich" und vertraut wie diese. Die strikte Analogie zwischen elektrischer Ladung Q und Entropie S , zwischen dem elektrischen Potenzial φ und der Temperatur T in der gibbsschen Fundamentalform rechtfertigt es fachlich und erzwingt es didaktisch. Aus didaktischer Sicht hat man doch den Vorteil, dass die Eigenschaften der physikalischen Größe Entropie sehr gut mit den

Eigenschaften des **umgangssprachlichen** Begriffs "Wärme" übereinstimmen. So gesehen hat Tante Erna eine sehr gute Vorstellung von der Entropie: Es ist das, was Tante Erna in der Wärmflasche hat. (Siehe "Tante Erna und die Wärmflasche" im Unterrichts-vorschlag.) Nur die Physiker tun sich in der Bezeichnung "Wärme" schwer, und das hat, wie bereits mehrfach erwähnt, historische Gründe.

5. Energie- und Entropieströme

Wir wissen: In allem ist Energie. Energie ist in jedem Körper, in jedem Feld in jedem physikalischen System. Alles ist Energie und für alles braucht man Energie. Energie kann weder vernichtet noch erzeugt werden. Schon die Frage, ob der Energieerhaltungssatz ein Wissens- oder ein Glaubenssatz ist, verweist auf die fundamentale Bedeutung des Energiebegriffs. Er ist ein Glaubenssatz und ein Erfahrungssatz mit einem extrem hohen Grad an Gewissheit. Energie ist eine zentrale Größe der Physik, ja **die** zentrale Größe der Physik überhaupt. Energie ist eine Art "universaler Treibstoff" für physikalische, biologische und chemische Vorgänge. Wegen der Äquivalenz von Masse und Energie ist diese reichlich vorhanden, aber nur bedingt nutzbar. Physikalisch interessant ist weniger der Energie**inhalt**, sondern es sind vielmehr die Energie**ströme**, weil die Energieströme Vorgänge und Prozesse charakterisieren.

Die Geschichte des Energiebegriffs ist vertrackt und verquer, so dass die Energie im Ruf steht, sie sei eine "schwierige Größe". Dies geschieht völlig zu Unrecht: Die Energie ist didaktisch eine der einfachsten Größen überhaupt, denn sie besitzt Mengencharakter. Die Energie ist zwar eine abstrakte Größe, aber man kann sehr anschaulich-konkret über sie denken und sprechen.

Die Größen mit Mengencharakter, also auch die Energie, haben den großen Vorzug, dass man sie sich als Stoff vorstellen kann. Mit der *Vorstellung* von Energie als mengenartige Größe sagt man nicht, dass die Energie ein Stoff *ist*. Damit wird keine ontologische Aussage gemacht, sondern damit ist gemeint, dass man physikalisch korrekt mit der Energie umgeht, wenn man über sie denkt und spricht, so wie man über einen Stoff spricht. Beispiele:

- "Der Körper enthält so und so viel Energie."
- "Die Energie strömt (oder fließt) aus dem einen Körper heraus und in den anderen hinein."
- "Der Energiestrom hat die und die Stärke."
- "In den Körper fließt ein Energiestrom mit der und der Größe hinein."

Stellt man fachlich und didaktisch die Energieströme in den Vordergrund des Physikunterrichts über Energie, so bringt das etliche Vorteile:

- Man konzentriert sich auf das, was in der Physik interessant ist, nämlich Prozesse und nicht statische Zustände.
- Man kann mit anschaulichen Strömungsvorstellungen arbeiten und sprachlich einfach operieren.
- Man kann leicht mit einfachen Gleichungen bilanzierend operieren und rechnen (z. B. Kontinuitätsgleichung: was reinfließt muss auch wieder herausfließen ...).
- Man kann verschiedene Gebiete der Physik strukturell mit einem einheitlichen Schema angehen und begriffliche Vereinheitlichungen und Vereinfachungen erreichen.

Jede Energieströmung, jeder Energietrans-

port hat nun die Eigenschaft, dass neben der Energie mindestens noch eine weitere mengenartige Größe mitströmt.

Energie strömt nie allein, sondern braucht einen Energieträger. Energieströmung ohne Energieträger gibt es nicht.

Diese Energieträger sind bekannte physikalische Größen: Impuls \mathbf{p} , Drehimpuls \mathbf{L} , elektrische Ladung Q , Stoffmenge n , ... und Entropie S .

Der Zusammenhang zwischen dem Energiestrom und dem Energieträgerstrom ist sehr einfach, nämlich proportional, und hängt nur von dem Beladungsmaß ab. Dahinter verbergen sich bekannte Formeln:

elektrischer Energietransport: $\Delta E = \varphi \cdot \Delta Q$

thermischer Energietransport: $\Delta E = T \cdot \Delta S$

mechanischer Energietransport: $\Delta E = \mathbf{v} \cdot \Delta \mathbf{p}$

hydromechan. Energietransport: $\Delta E = p \cdot \Delta V$

chemischer Energietransport: $\Delta E = \mu \cdot \Delta n$.

- Die erste Formel ist die bekannte Formel der elektrischen Arbeit $W = U \cdot Q$.
- Die zweite Formel beschreibt ganz analog den Energietransport mittels Entropie (=Wärme) auf dem Temperaturniveau T .
- Aus der dritten Formel ergibt sich durch Integration nach dem Impuls p die Formel der kinetischen Energie: $\Delta E = \mathbf{v} \cdot \Delta \mathbf{p} = p/m \cdot \Delta p \rightarrow E = p^2/2m = 1/2 \cdot m \cdot v^2$.
- Die vierte Formel ist die Formel für die Arbeit der Volumenausdehnung, z. B. eines Gases des Volumen V und dem Druck p : $W = F \cdot \Delta s = p \cdot A \cdot \Delta s = p \cdot \Delta V$.
- Die fünfte Formel ist unter Physikern weniger bekannt und beschreibt den Energietransport als Stofftransport entlang eines chemischen Potentials.

Die Potentiale geben an, mit wieviel Energie der Energieträger beladen ist. Strömt

der mengenartige Energieträger auf einem hohen Potenzial, so ist er mit mehr Energie beladen, als wenn er auf niedrigem Potenzial strömt. Mengenartige Größen genügen grundsätzlich der Kontinuitätsgleichung, und zu jeder mengenartigen Größe kann man ihre Stromstärke definieren. Die Energiestromstärke ist nichts anderes als die allseits bekannte Leistung $P = \Delta E / \Delta t$.

Schreibt man die Energiestromstärke mit dem Index des jeweiligen Energieträgers, so erhält man einen Satz sehr einfacher und bekannter Formeln:

elektrischer Energietransport: $I_E = \varphi \cdot I_Q$

thermischer Energietransport: $I_E = T \cdot I_S$

mechanischer Energietransport: $I_E = \mathbf{v} \cdot I_p$

hydromechan. Energietransport: $I_E = p \cdot I_V$

chemischer Energietransport: $I_E = \mu \cdot I_n$.

(Die erste Formel ist in der gewöhnlichen Schreibweise $P = U \cdot I$.) Die Energiestromstärke ist proportional zur Stromstärke des Energieträgers. Der Proportionalitätsfaktor ist gerade das Beladungsmaß, nämlich das Potenzial auf dem der Träger bzw. die Energie strömt.

Das lässt sich auch verallgemeinern.

Jede Energieänderung (Energieströmung, Energiefluss, Energietransport) dE eines Systems ist verbunden mit der Änderung, Strömung, dem Fluss, Transport, ... mindestens einer anderen mengenartigen Größe dX , und dE lässt sich schreiben als Summe:

$$dE = \varphi \cdot dQ + T \cdot dS + \mu \cdot dn + p \cdot dV + \mathbf{F} \cdot d\mathbf{r} + \mathbf{v} \cdot d\mathbf{p} + \omega \cdot d\mathbf{L} + gh \cdot dm + \mathbf{M} \cdot d\alpha + \sigma \cdot dA + \dots$$

Diese Form nennt man **gibbssche Fundamentalform**.

Man kann die gibbssche Fundamentalform

und die dahinter stehenden physikalischen Vorgänge auf der Basis hydrodynamischer Vorstellungen (Strömungsmodell) interpretieren. Jeder Energiestrom dE ist gekoppelt an den Strom von mindestens einem Energieträger dX . Eine "Hucke-Pack-Vorstellung", wo die Energieströmung vom Energieträger "Hucke-Pack" genommen wird, ist allerdings nicht korrekt, da Strömungsgeschwindigkeiten von Energie und Energieträger nicht immer gleich sind.

Welche Größen tauchen in der gibbsschen Fundamentalform auf? Es sind die fundamentalen mengenartige Größen des betref-

fenden Teilgebiets. Es sind gewissermaßen die 'Türhütergrößen'. Deshalb ist es kein Wunder, dass die gibbssche Fundamentalform das 'verbindende Band' der physikalischen Gebiete darstellt. Didaktisch lässt sich das in zwei Richtungen ausschichten.

Die gibbssche Fundamentalform

- verbindet die in der Schule so oft zu getrennt liegenden Gebiete der Physik
- ist Grundlage für das fachlich und didaktisch wertvolle Analogiedenken
- schafft Klarheit und Struktur.

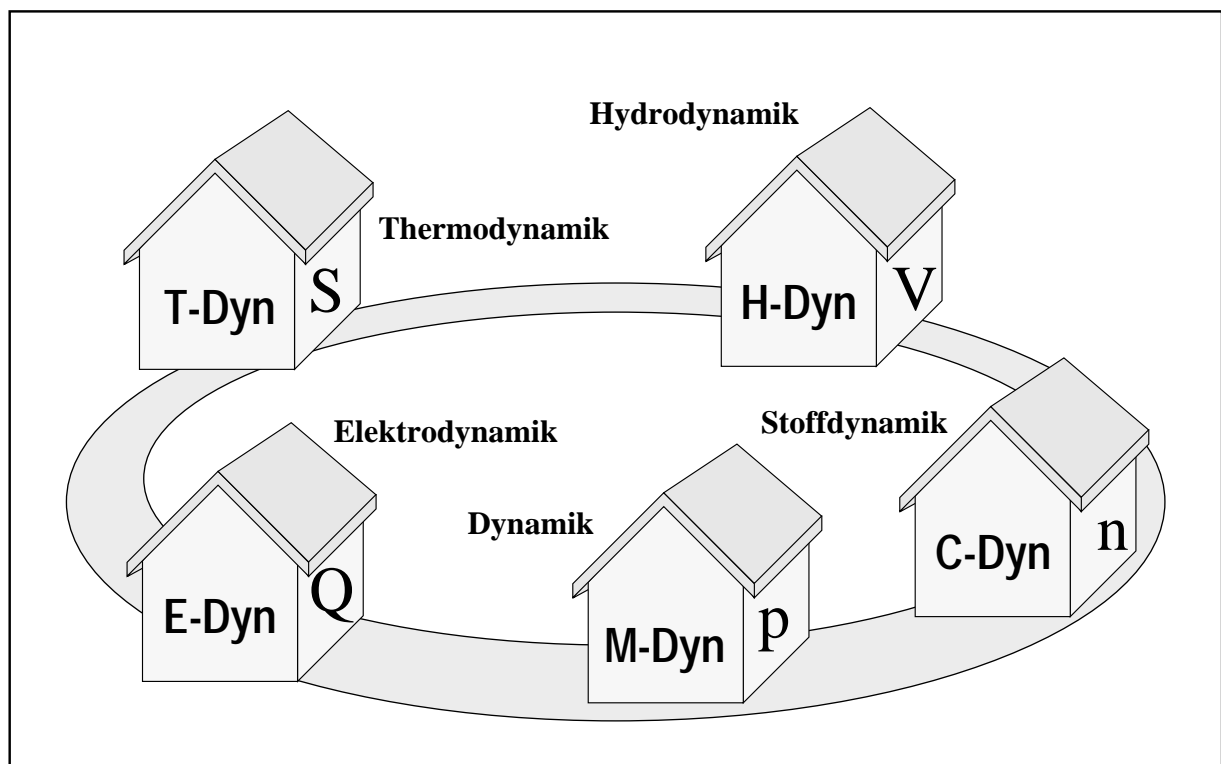


Bild: Die gibbssche Fundamentalform als verbindendes Band

Name	extensive Größe	intensive Größe	dE = $\xi \cdot dX$
elektrische Energie	Q elektrische Ladung	φ elektrisches Potenzial	$dE = \varphi \cdot dQ$
Wärmeenergie	S Entropie	T Temperatur	$dE = T \cdot dS$
chemische Energie	n Stoffmenge	μ chemisches Potenzial	$dE = \mu \cdot dn$
Kompressionsenergie	V Volumen	p Druck	$dE = p \cdot dV$
Verschiebungsenergie	r Verschiebung	F Kraft	$dE = \mathbf{F} \cdot d\mathbf{r}$
kinetische Energie	p Impuls	v Geschwindigkeit	$dE = \mathbf{v} \cdot d\mathbf{p}$
Rotationsenergie	L Drehimpuls	ω Winkelgeschwindigkeit	$dE = \omega \cdot dL$
potenzielle Energie	m Masse	gh Gravitationspotenzial	$dE = gh \cdot dm$
Drillenergie	α Verdrehung	M Drehmoment	$dE = \mathbf{M} \cdot d\alpha$
Oberflächenenergie	A Fläche	σ Oberflächenspannung	$dE = \sigma \cdot dA$

6. Entropische Betrachtungen

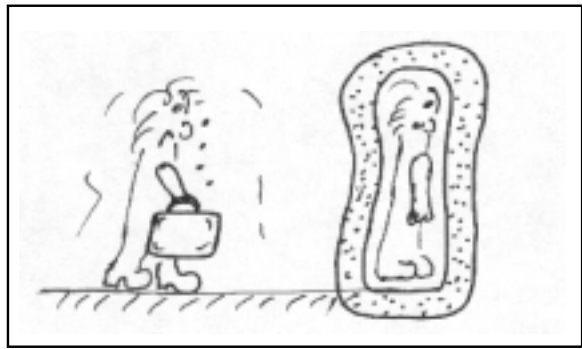
Wenn die Entropie im Weltall immer nur zunimmt und wenn alles auf ein Temperaturgleichgewicht zusteuert, dann muss das Weltall eines Tages den Wärmetod sterben. Lange Zeit besetzte die Idee des Wärmetodes und der zerstörenden Wirkung der Entropie die Köpfe der Wissenschaftler. Erst im Zusammenhang mit der Untersuchung offener Systeme kam man dem Verständnis der Strukturbildung in der Natur, in Systemen und in Organismen wesentlich näher. Hier spielen die Entropieproduktionsrate und der Entropieexport die entscheidende Rolle. Drei wichtige Systeme seien kurz entropisch beleuchtet, nämlich der Mensch, die Pflanze und unsere Erde.

6.1 Der Mensch - entropisch betrachtet

Eine häufig gestellte Rechenaufgabe in der Mechanik lautet:

Ein Kofferträger trägt einen Koffer mit der Masse 30kg auf waagerechter Strecke 100 m weit. Welche Arbeit verrichtet er?

Die überraschende Antwort lautet dann: keine. Die Begründung ist leicht: Arbeit = Kraft mal Weg, wenn Kraft und Weg in dieselbe Richtung zeigen (allgemein: $W = F \cdot s \cdot \cos\alpha$). Da nun Kraft und Weg beim Kofferträger senkrecht zueinander stehen, ist die verrichtete Arbeit 0 J. Der Kofferträger fragt sich allerdings, warum er vom vielen Kofferschleppen bloß so hungrig wird.



Der Mensch ist kein von seiner Umgebung abgeschlossenes System. Jedes Lebewesen würde binnen kürzester Zeit an Entropieverstopfung sterben, wenn es entropiedicht in Styropor eingepackt von der Umgebung abgeschlossen würde. Um nämlich den Organismus energetisch in Gang zu halten, muss er entropiearme (chemische) Energie, die er mit der Nahrung aufnimmt, durch 'kalte Verbrennung' in den Muskeln in entropiereichere Energie, nämlich Energie mit der Entropie als Träger und in mechanische Energie umwandeln. Der Verbrennungsvorgang im Körper ist ein irreversibler Prozess, bei dem eine Entropieproduktion stattfindet. So werden pro Sekunde etwa $\Delta S = 1,4 \text{ J/K}$ erzeugt. Da die Körpertemperatur konstant bleiben soll, muss er diese Entropie an die Umgebung abgeben. Deshalb schwitzt der Kofferträger, weil das Schwitzen die Entropieabgabe erhöht. Selbst während des Schlafens kann der Mensch verhungern, produziert er doch immer noch pro Sekunde eine Entropie von $\Delta S = 0,2 \text{ J/K}$, die er exportieren muss. Lebewesen sind offene, entropieproduzierende Systeme, die auf Entropieexport angewiesen sind. Ausgewachsene, normal funktionierende Lebewesen arbeiten nach dem Prinzip der minimalen Entropieproduktion. Das gilt aber nicht unbedingt für schnell wachsende (evolvierende) Systeme. So wurde zum Beispiel die spezifische Wärmeentwicklung in befruchteten Hühnereiern am vierten Tag mit $0,32 \text{ J/(s}\cdot\text{g)}$ gemessen, während sie am

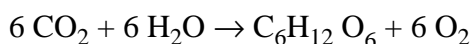
sechzehnten Tag auf ein Sechstel dieses Wertes abgesunken war.

Der menschliche Organismus arbeitet allerdings anders als eine Wärmekraftmaschine. Die Wärmekraftmaschine lädt die ganze Energie erst auf die Entropie und dann auf den Impuls als Träger um. Der menschliche Organismus lädt die Energie durch die 'kalte Verbrennung' direkt auf den Träger Impuls um und einen Teil auf die dabei erzeugte Entropie.

6.2 Die Pflanzen - entropisch betrachtet

Lebewesen wie Tiere und Menschen brauchen Energiezuflüsse mit weniger Entropie und Energieabflüsse mit mehr Entropie, um Entropieverstopfungen zu vermeiden. In der Nahrungskette stehen am Anfang "niederentropische Nahrungen" und am Ende "hochentropische Nahrungen". Für grüne Pflanzen, die am Anfang der Nahrungskette stehen, ist das Sonnenlicht die niederentropische Nahrung, die sie mit der Fotosynthese 'verdauen'. Das zeigt die Entropiebilanz bei der Kohlehydratsynthese in einer Pflanze.

Die Pflanze baut aus je sechs Mol Wasser und Kohlendioxid ein Glukosemolekül auf. Sechs Sauerstoffmoleküle bleiben übrig und werden an die Atmosphäre abgegeben. Die Reaktionsgleichung der Stoffbilanz lautet:



Diese Reaktion kann nur ablaufen, wenn der Energiesatz und der Entropiesatz eingehalten werden. Die Energiebilanz wird durch die Absorption des Sonnenlichtes ausgeglichen: $\Delta E = E_{\text{ein}} - E_{\text{aus}} = 0 \text{ J}$.

Die Entropie für 1 mol Umsatz der Edukte beträgt:

$$\begin{aligned} S_{\text{ein}} &= 6 \cdot S(\text{CO}_2, \text{ gasförmig}) + 6 \cdot S(\text{H}_2\text{O}_{\text{flüssig}}) + \\ &S(\text{Strahlung}) = 6 \cdot 214 + 6 \cdot 70 + S(\text{Strahlung}) \\ &= 1704 \text{ J/K} + S(\text{Strahlung}) \approx 1704 \text{ J/K}. \end{aligned}$$

Die Werte für die molaren Entropien kann man Tabellen entnehmen. Die Strahlungs-entropie ist im Vergleich zu den chemischen Beiträgen sehr gering und kann hier vernachlässigt werden.

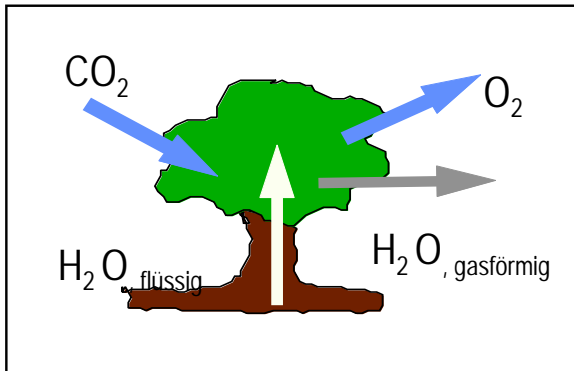
(Die Entropiedichte der Strahlung ist $\rho_S(T) = 4/3aT^3$ mit $a = 7,6 \cdot 10^{-16} \text{ J/m}^3\text{K}^4$. Mit der Sonnentemperatur $T = 5700 \text{ K}$ und der Wirkungsfläche eines Chlorophyll-Moleküls und der Reaktionszeit, erhält man einen vernachlässigbaren Wert.)

Die Aggregatzustände müssen angegeben werden, da die Entropiewerte sehr vom Aggregatzustand abhängen. Die Reaktionsprodukte enthalten die Entropie:

$$\begin{aligned} S_{\text{aus}} &= S(\text{Glukose}_f) + 6 \cdot S(\text{O}_2) = 212 \text{ J/K} + \\ &6 \cdot 205 \text{ J/K} = 1442 \text{ J/K}. \end{aligned}$$

Es ist also $S_{\text{aus}} < S_{\text{ein}}$. Diese Differenz lässt sich allerdings einfach erklären. Das Glukosemolekül hat eine komplexere Struktur als die Ausgangssubstanzen. Folglich muss sein Entropiewert geringer sein. Der Prozess der Fotosynthese ist ein Entropieverminderungsprozess, bei dem komplexere Strukturen hergestellt werden. Das allerdings geht nur, indem Entropie exportiert wird.

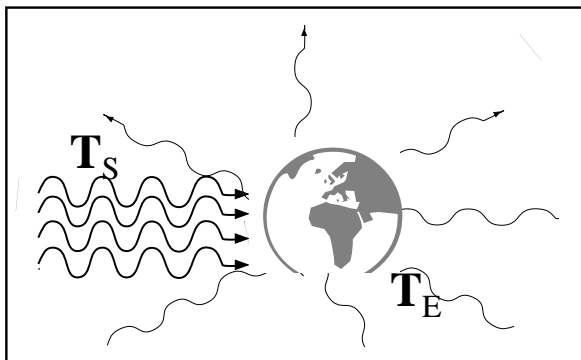
Die Evolution hat dazu folgenden genialen Trick erfunden:



Außer den sechs Wassermolekülen, die die Pflanze zum Aufbau eines Glukosemoleküls braucht, nimmt sie noch weiteres Wasser in flüssiger Form auf, das sie chemisch unverändert, aber im gasförmigen Aggregatzustand wieder an die Atmosphäre abgibt. Bei der Verdunstung geht Wasser vom entropiearmen flüssigen Zustand in den entropiereicheren gasförmigen Zustand über. Und genau dieser Wasserdampf steht bei der Glukosereaktion als Entropietransportmittel für die überschüssige Entropie zur Verfügung.

6.3 Unsere Erde - entropisch betrachtet

Die Energiebilanz der Erde ist ausgeglichen. Die Energie, die auf eine halbe Erdkugel von der Sonne mit der Oberflächentemperatur $T_S=6000\text{ K}$ eingestrahlt wird, wird von der ganzen Erdkugel der Temperatur $T_E=300\text{ K}$ in Form von infrarotem Licht wieder abgestrahlt.



$$\text{Energiebilanz: } \Delta E = E_{\text{ein}} - E_{\text{aus}} = 0\text{ J}$$

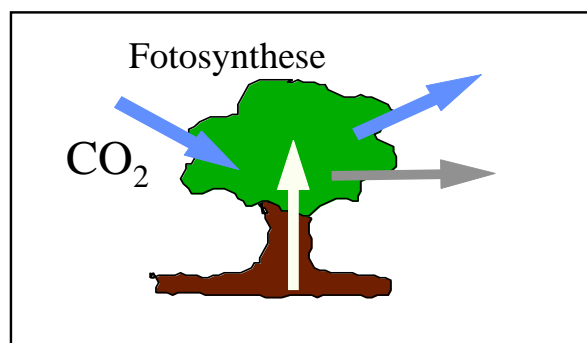
$$\text{Entropiebilanz: } \Delta S = S_{\text{ein}} - S_{\text{aus}} + S_{\text{erzeugt}} =$$

$$= E_{\text{ein}}/T_S - E_{\text{aus}}/T_E + S_{\text{erzeugt}}$$

$$= E_{\text{ein}}/(20 \cdot T_E) - E_{\text{aus}}/T_E + S_{\text{erzeugt}}$$

$$= -E_{\text{ein}} \cdot 19/(20 \cdot T_E) + S_{\text{erzeugt}} = 0\text{ J/K.}$$

Mit dem infraroten Licht wird mehr Entropie in das Weltall exportiert als von der Sonne empfangen wird. Ein sichtbares 'Sonnenphoton' hat wegen $E=h \cdot f$ die 20-fache Energie eines infraroten Photons. Wegen der ausgeglichenen Energiebilanz muss die Anzahl der infraroten Photonen etwa 20 mal größer sein als die Anzahl der sichtbaren Photonen des Sonnenlichts. Damit findet der Entropiemüllexport in das Weltall seine Erklärung. Die chemische Organisation unseres Planeten, die Vermehrung der Lebewesen, die Entstehung der Biosphäre stehen also nicht im Widerspruch zum 2. Hauptsatz der Thermodynamik. Unsere Erde als offenes System exportiert die überschüssige Entropie ins Weltall. Würde sie das nicht tun, würde sie den Wärmetod sterben, genauso wie ein in Styropor eingepackter Mensch. Genau hier spielt der Treibhauseffekt hinein. Die CO_2 angereicherte Atmosphäre wirkt für die infrarote Strahlung wie eine Styroporisolation, Die Strahlung wird absorbiert, damit verbleibt deren Entropie und Energie in der Erdatmosphäre und die Temperatur steigt.



Das Fließgleichgewicht von CO₂-Produktion durch Verwesung von Biomasse bzw. Atmung und von CO₂-Abbau durch Photosynthese muss bestehen bleiben. Durch Abholzung und durch fossile Verbrennung kann dieses Fließgleichgewicht zerstört werden.

Im Folgenden kann noch die Entropieentsorgungskapazität der Erde abgeschätzt werden.

Für Strahlung im thermischen Gleichgewicht lautet die Beziehung zwischen dem Entropiestrom I_S und dem Energiestrom I_E:

$I_S = 4 I_E / 3T$, wobei T die jeweilige Temperatur ist. Auf 1m² der Erdoberfläche trifft pro Sekunde die Energie σ , die sogenannte Solarkonstante, $\sigma = \Delta E / (A \cdot \Delta t) = 1367 \text{ W/m}^2$ ein. Diesem Energiestrom stellt die Erde die absorbierende Querschnittsfläche $A = \pi R^2$ entgegen, wobei R der Erdradius ist. Die Erde absorbiert aber nicht vollständig die einfallende Energie, sondern nur etwa 70%. Durch die Erdrotation und durch Konvektion verteilt sich die absorbierte Strahlungsenergie über die gesamte Erdoberfläche $A = 4\pi R^2$ (Kugeloberfläche). Damit ist der Energiestrom der Erdabstrahlung $I_E = P/A = 0,7 \cdot \sigma/4$.

Dann ist der Entropiezufluss

$I_{S\text{ein}} = 0,7 \cdot \sigma / 3T_1$ und der Entropieabfluss

$I_{S\text{aus}} = 0,7 \cdot \sigma / 3T_2$. Die Differenz zwischen Export und Import ist die entropische Entsorgungskapazität C_S pro m² der Erdoberfläche:

$$C_S = 0,7 \cdot \sigma \cdot [1/3T_2 - 1/3T_1]$$

Für die Sonnenstrahlung setzt man die Temperatur T₁ = 5700 K ein und für die Erdoberflächentemperatur T₂ = 254 K. Man erhält dann den Wert C_S = 1,2 W/(K•m²).

Es lohnt sich, diesen Wert zu interpretieren und in Zusammenhang mit anderen Werten zu betrachten.

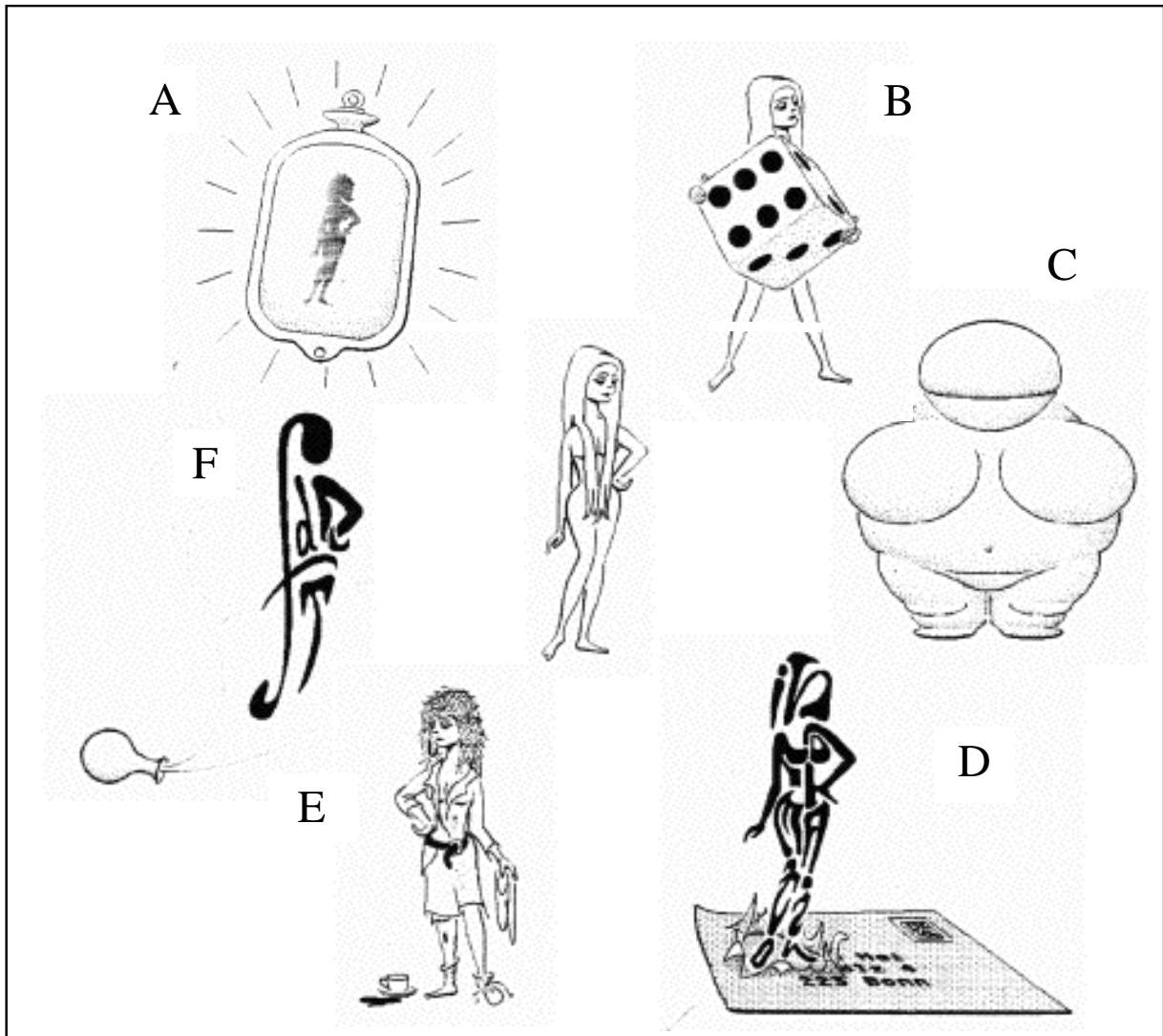
infrarote Entsorgungskapazität der Erde pro m ²	1,2
Entropieabsenkung durch Fotosynthese pro m ²	-0,0013
tägliche Entropieproduktion eines Menschen	0,5
tägliche Zusatzentropieproduktion pro Einwohner:	
• im Weltdurchschnitt	10
• in den USA	35
• in Indien	2
• tägliche Zusatzentropie pro m ² in New York	4

Das negative Vorzeichen der Entropiekapazität von -0,0013 W/K pro m² durch Fotosynthese besagt, dass die Entropie abgesenkt wird. Würden sich die Menschen ausschließlich von Pflanzen ernähren, so brauchte jeder Mensch, um die Entropieproduktion im Körper durch Fotosynthese wettzumachen, eine Grünfläche von ungefähr 400 m² (genauer: 0,5/0,0013 = 385). Das ist eine Fläche von 20m mal 20m im Quadrat. Umgerechnet auf die maximale Bevölkerungsdichte ergibt das 2500 Einwohner pro km². Viele Regionen unserer Erde (Holland) sind an dieser Grenze.

Durch einen aufwendigen Lebensstil kann die tägliche Zusatzentropieproduktion (Kühlschränke, Auto, Heizung, Warmwasser, ...) schnell um das 50-fache erhöht werden. In Städten wie New York ist die lokale Entropieproduktion um das dreifache höher als die infrarote Entsorgungskapazität der Erde auf dem Gebiet von New York. Deshalb muss ein Ballungsraum wie New York Entropie in die Umgebung (durch Luftzirkulation) exportieren. (vgl. auch [13])

7. EXKURSE

7.1 Die verschiedenen Gesichter der Entropie (nach G. Job)



Im Verlaufe der Geschichte hat die Entropie viele Gesichter angenommen. Entsprechend dem Zugang erscheint sie in unterschiedlichem Gewand. Alle Gesichter haben ihre fachliche Berechtigung und ermöglichen unterschiedliche didaktische Zugänge für die Schule.

A: Das alltägliche Gesicht

Jeder Mensch spürt sie als Wärme.

B: Das philosophische Gesicht

Der Philosoph erblickt in ihr die Herrschaft des Zufalls.

C: Das statistische Gesicht

Für den statistischen Physiker repräsentiert sie ein vieldimensionales Volumen.

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.

7.2 Meinungsvielfalt zum Wärmebegriff - Anthologia Calorica (von G. Job)

Die Überzeugung, dass Wärme eine Energieform darstellt, ist anderthalb Jahrhunderte alt. Man sollte erwarten, dass vielleicht nicht jedes Kind, aber doch wenigstens jeder Physiker oder zumindest jeder Physikprofessor heute ohne viel Wenn und Aber angeben kann, um welche Energieform es sich dabei handelt. Aber diese Erwartung trügt.

Zur Frage, was Wärme eigentlich ist oder wie man sie auffassen sollte, gibt es ein buntes Spektrum von Lehrmeinungen. Diese Vielfalt der Auffassungen über einen zentralen Begriff erinnert mehr an den Meinungspluralismus in den Geisteswissenschaften als an den sonst vorherrschenden Meinungskonformismus in den Naturwissenschaften. Um eine gewisse Ordnung in diese Vielfalt zu bringen, bietet sich als Gliederungsmerkmal diejenige Größe an, durch die die Wärme *hauptsächlich* beschrieben wird. In der nachstehenden Liste finden sich auch zwei überlebte, aber in verschiedenen Redewendungen und Begriffsbildungen noch nachklingende oder wieder auftauchende Auffassungen. Der Wärmegröße ist jeweils eine knappe Kennzeichnung des Wärmebegriffes nachgestellt.

1: orthodox: $\Delta U - W$
Wärme ist die durch thermische Kontakte einem System zugeführte Energie.
(Unter Thermodynamikern die verbreitetste Auffassung)

2: mechanistisch: $f/2 \cdot N \cdot k \cdot T$
Wärme ist die in der unsichtbaren Molekularbewegung steckende Energie.
(Die herrschende Meinung in einführen-

den Büchern)

3: chaoskalorisch: $U(S, \dots) - U(0, \dots)$
Wärme ist ungeordnete Bewegung.
(Verallgemeinerung der zu engen mechanistischen Auffassung)

4: reformiert: $\int T dS$
Wärme ist die zu Entropiezufuhr oder Entropieerzeugung erforderliche Energie. (Erweiterung der restrikten orthodoxen Auffassung)

5: anergisch: $T \cdot S$
Wärme ist der isotherm nicht als Arbeit verfügbare Teil der inneren Energie.
(Versuch einer klaren Definition des Begriffs Wärmehalt)

6: akalorisch; ----
Wärme ist wie Arbeit ein überflüssiger Begriff, ähnlich wie der Begriff Arbeit.
(Radikalkur zu Vermeidung der Probleme)

7: entropokalorisch: S
Wärme ist keine Energie, sondern identisch mit der Entropie.
(Verzicht auf die fixe Idee, Wärme sei eine Energieform)

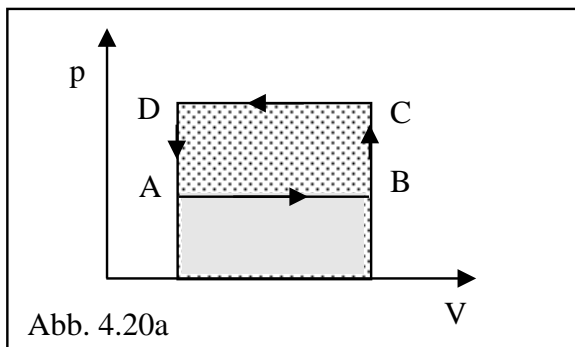
8: kalorizistisch: S_{rev}
Wärme ist ein der elektrischen Ladung vergleichbares Fluidum.
(Wärmeauffassung von 1750 bis 1850)

9: kinekalorisch ---
Wärme ist die Folge unsichtbarer Teilchen- oder Ätherschwingungen.
(qualitative Vorstufe der kinetischen Wärmetheorie, vor Clausius und Maxwell)

7.3 Warum die Energieform Wärme nicht in einem System enthalten sein kann

"Wir hatten bereits betont, daß es ein sehr unglücklicher Griff war, als man dem Ausdruck $T \cdot dS$ einen eigenen Namen gegeben hat. Er heißt aber nun einmal Wärme, und das hat erfahrungsgemäß zur Folge, daß man bestimmte Erwartungen an ihn knüpft, die er nicht erfüllen kann - besonders diese: 'Wenn ein System Wärme aufnimmt, so muß diese, nachdem es sie aufgenommen hat, drinstecken.'

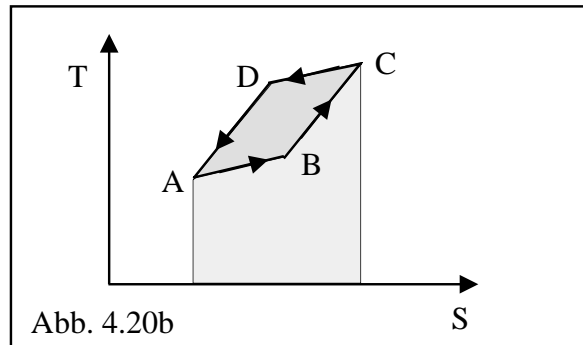
Um uns davon zu überzeugen, daß dieser Satz falsch ist, betrachten wir ein Gas und bringen es auf zwei verschiedene Arten in je zwei Schritten aus einem Anfangszustand in einen Endzustand: Wir gehen von Zustand A einmal über B, und einmal über D in Zustand C und fragen beide Male nach der aufgenommenen Energie.



Auf dem Weg A-B-C nimmt das Gas den der hellgrauen Fläche in Abb. 4.20a entsprechenden Betrag an Wärme auf, denn diese Fläche stellt gerade $\int TdS$ dar. Außerdem gibt es den in Abb. 4.20b hellgrauen Betrag an Arbeit ab.

Auf dem Weg A-D-C nimmt das Gas den der gesamten Fläche (Abb. 4.20a) entsprechenden Betrag an Wärme auf und gibt den in Abb. 4.20b gesamten Betrag an Arbeit ab.

Anfangs- und Endzustand sind auf beiden Wegen gleich, die aufgenommene Wärme ist aber verschieden. Um wieviel hat die Wärme des Gases zugenommen? Offenbar eine sinnlose Frage. Das entsprechende gilt auch für die Arbeit.



Sinnvoll dagegen sind alle Fragen nach den Werten physikalischer Größen:

- Um wieviel hat die Entropie oder das Volumen zugenommen?
- Um wieviel haben sich die Werte von Temperatur und Druck geändert?

Bei mengenartigen Größen darf und soll man die Frage sogar so formulieren: "Wieviel davon steckt in dem System, wieviel ist darin enthalten?" ([6], S. 60-62)

"Die Zuordnung des Wortes Wärme zu der Energieform TdS schlechthin darf nicht darüber hinwegtäuschen, daß die Energieform TdS , ebenso wenig wie irgendeine andere Energieform, eine Variable eines physikalischen Systems ist. Eine Energieform ist ja nur Zustandsänderungen zugeordnet, aber nicht den Zuständen des Systems selbst. ... Anstatt also von Wärmeaustausch oder -erzeugung eines Systems zu sprechen, ist es unmißverständlicher und an das Begriffsschema von physikalischen Größen oder Variablen besser angepaßt, von Entropieänderungen zu sprechen, wobei zusätzlich die Temperatur anzugeben ist, bei der die Entropieänderung erfolgt." ([3], S. 260-261)

7.4 Zur Geschichte des Wärmebegriffs

"Bis etwa 1840 nannte man das Wärme, was die Physiker heute Entropie, und was Nichtphysiker auch heute noch Wärme nennen. Dieser Wärmebegriff etablierte sich in der Physik im Laufe des 18. Jahrhunderts. Die ersten wichtigen Beiträge verdanken wir dem Chemiker und Arzt Joseph Black (1728-1799). Er erkannte die Wärme als mengenartig und unterschied sie von der damals bereits bekannten Temperatur. Black führte auch die Größe Wärmekapazität ein, nämlich die Größe dS/dT , die heute Entropiekapazität heißt.

Der nächste entscheidende Schritt wurde von Sadi Carnot (1796-1832) getan. In seiner Schrift "Réflexions sur la puissance motrice du feu" (1824) vergleicht er einen Wärmemotor mit einem Wasserrad. Wie Wasser Arbeit leistet, wenn es aus größerer Höhe über ein Wasserrad auf ein niedrigeres Niveau hinunterfließt, so leistet Wärme ("calorique" oder "chaleur") Arbeit, wenn sie in einer Wärmekraftmaschine von höherer zu niedrigerer Temperatur gelangt. Carnot verknüpft also, in moderner Sprache ausgedrückt, Entropie und Energie. Von der Entropie hatte er, wie Black, eine mengenartige Vorstellung, von der Energie wohl noch nicht. Tatsächlich wurde die Energie als eigene Größe, und als Erhaltungsgröße, erst 20 Jahre später eingeführt (ihre Mengenartigkeit hat sich bis heute noch nicht etabliert).

Als um die Jahrhundertmitte die Erhaltungsgröße Energie entdeckt wurde, schloß man, Carnots Arbeiten seien falsch und man bezeichnete als Wärme eine sogenannte "Form" der Energie. Damit war "Wärme" nicht mehr der Name einer physikalischen Größe, sondern eines Gebildes der Form

$x \cdot dX$, also einer sogenannten Differentialform, genauso übrigens wie "Arbeit". Kurze Zeit später wurde die Entropie durch Clausius (1822-1888) neu erfunden. Clausius' Konstruktion der Entropie ist zwar geistreich, leider aber auch sehr unanschaulich. Diese Konstruktion, zusammen mit der Vertauschung der Namen, ist der Grund dafür, daß noch heute die Entropie als eine der abstraktesten physikalischen Größen gilt.

Es bleiben noch zwei wichtige Namen zu erwähnen. Gibbs (1839-1903) hat der Thermodynamik eine Form gegeben, in der sie weit mehr zu beschreiben gestattet, als was man einfach Wärmelehre nennt. Die Analogien, die in dieser Vorlesung immer wieder ausgenutzt werden, beruhen auf den gibbsschen Arbeiten.

Boltzmann (1844-1906) versuchte, die Thermodynamik auf die Mechanik zurückzuführen, indem er thermische Erscheinungen durch die Bewegung kleiner Teilchen erklärte. Temperatur und Entropie bekamen eine mechanische Deutung. Dazu mußte er die statistische Physik erfinden. Deren Bedeutung geht weit über die in ihrer Herleitung benutzten mechanischen Modelle hinaus." ([6], S. 28-29)

7.5 Die Festlegung der Skalen und die Messung von Temperatur und Entropie

Um eine physikalische Größe zu definieren, muß eine Skala festgelegt werden, indem eine Einheit und eine Vorschrift für die Konstruktion von Vielfachen der Einheit festgelegt wird.

Die Temperatur ist eine SI-Basisgröße, deren Basiseinheit 1 K als der 273,16te Teil der thermodynamischen Temperatur des Tripelpunktes des Wassers festgelegt ist. Der Tripelpunkt ist diejenige Temperatur, bei der festes, flüssiges und gasförmiges Wasser koexistieren. Seine Eignung zur Festlegung ergibt sich aus der Tatsache, dass keine zusätzlichen Angaben über andere Werte gemacht werden müssen.

Die Einheit der Energie 1 J ist als abgeleitete Größe über die SI-Basiseinheiten

$1\text{J} = 1\text{kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}^2$ festgelegt. Die Vielfachen der Energie und Entropie ergeben sich trivialerweise aus der Mengenartigkeit der beiden Größen. Die Vielfachen der Temperatur und die Einheit der Entropie sind über die Gleichung $P=T\cdot I_s$ oder $\Delta E=T\cdot \Delta S$ mit $[S]=1\text{J/K}$ festgelegt. Es ist diejenige Entropiemenge, mit der man bei Normaldruck $0,893\text{cm}^3$ Eis schmilzt. Der 'krumme' Wert bei der Festlegung der Temperatureinheit ergab sich aus der Forderung, die Temperaturdifferenz 1 K mit der früher festgelegten Celsius-Skala in Übereinstimmung zu bringen. Die Temperatur in Kelvin errechnet sich aus der um 273,15 erhöhten Maßzahl in Grad Celsius.

Zur Messung der Temperatur gibt es reichlich viele Verfahren: thermische Ausdehnung von Festkörpern (Bimetall), Flüssigkeiten (Quecksilber), Gasen (Gasthermo-

meter), thermoelektrische Effekte, Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstands (Halbleiter), Strahlungsgesetze (Strahlungspyrometer), Temperaturabhängigkeit chemischer Verbindungen (Farbthermometer). Das Thermometer wird dabei mit dem Körper oder System in Verbindung gebracht, bis beide ins thermische Gleichgewicht gekommen sind. Dabei muss das Thermometer eine kleine Entropiekapazität und kein thermisches Leck haben.

Die Entropiemessung scheint in der Praxis schwieriger, da die Entropie keine Erhaltungsgröße ist. Lässt man beispielsweise analog der Ladungsmessung Entropie über einen Entropieleiter in einen geeichten Entropiemesser (Flüssigkeit mit Thermometer analog einem Elektrometer) fließen, so entsteht beim Entropiefluss neue Entropie. Man müsste also eine reversibel arbeitende Wärmepumpe dazwischenschalten. Das Verfahren ist höchst unpraktikabel.

Man kann die Entropie aber bereits mit Gerätschaften messen, die man in jeder Küche findet. Ein höchst einfaches Verfahren ist folgendes:

Will man beispielsweise die Entropiedifferenz zwischen 1 Liter Wasser von 80°C und 20°C messen, so kühlt man das 80°C warme Wasser auf 20°C ab und heizt es anschließend mit einem elektrischen Tauchsieder unter adiabatischem Abschluss wieder auf 80°C auf. Man erzeugt also die vorher entzogene Entropie neu und misst diese leicht über $\Delta S = \Delta E/T = P \cdot \Delta t/T$, wenn die Leistung (=Energiestromstärke) des Tauchsieders bekannt ist. Da sich die Temperatur des Wassers beim Heizen ändert, muss man aufsummieren (besser aufintegrieren) $\Delta S = P \cdot \int \Delta t_i/T_i$. Ist die Temperaturänderung klein gegen die mittlere absolute Temperatur, so kann man die mittlere Temperatur

T_m verwenden: $\Delta S = P \cdot \Delta t / T_m$.

Natürlich könnte man zur Entropiemessung auch Eismengen schmelzen lassen. Abgesehen von der Unhandlichkeit wird dabei Entropie erzeugt. Man müsste also auch hier wieder eine Wärmepumpe dazwischenschalten. Entropieströme durch eine Fläche lassen sich hingegen mit einem geeichten Peltier-Element messen.

7.6 Altlasten der Physik: Entropie (von G. Job)

Gegenstand: Als Entropie S wird eine Größe bezeichnet, die in der klassischen Thermodynamik als eine durch ein Integral definierte, abstrakte Funktion eingeführt wird. Dieser Zugang verleiht der Größe einen derart abgehobenen Charakter, daß selbst die Spezialisten ihres Faches Mühe im Umgang mit diesem Begriff haben. Inzwischen kennt man andere, leichtere Zugänge, die die Entropie in die Reichweite des Schulunterrichts gerückt haben. Zur Zeit ist ihre Deutung als Unordnungsmaß ein vor allem unter Chemikern beliebter Ansatz, um wenigstens ein grobes Verständnis von ihrer Bedeutung zu vermitteln.

Mängel: Daß die Entropie qualitativ erfaßbar wird, ist zwar ein Fortschritt, genügt aber nicht dem Anspruch eines Physikers. Ihm gilt eine Größe erst dann als definiert, wenn er ein direktes oder indirektes Verfahren zu ihrer Quantifizierung angeben kann. Störend ist auch der Umstand, daß der makroskopisch definierbaren Größe anscheinend kein einfaches makroskopisches Merkmal zugeordnet werden kann.

Herkunft: In der ersten Hälfte des vorigen Jahrhunderts wurde mit zunehmender Erfahrung immer deutlicher, daß die von S. CARNOT und anderen angenommene Erhaltung der Wärme unhaltbar ist. Das veranlaßte R. CLAUSIUS im Jahre 1850, eine Neuordnung der Wärmelehre aufgrund der Annahme zu versuchen, daß Wärme und Arbeit ineinander umwandelbar sind /1/. Im Zuge dieser Umgestaltung konstruierte CLAUSIUS auch die Größe S , um die Beschränkungen beschreiben zu können, denen diese wechselseitige Umwandlung unterliegt.

Entsorgung: In einem Festvortrag vor der Physical Society of London wies ihr damaliger Präsident H. CALLENDAR /2/ im Jahre 1911 darauf hin, daß S nichts weiter ist als eine komplizierte, abstrakte Rekonstruktion derjenigen Größe, die bei CARNOT Wärme hieß. Der einzige Unterschied war, daß die Wärme nun erzeugbar, aber wie bisher unzerstörbar war. Dieses Erkenntnis kam ein halbes Jahrhundert zu spät, um die Entwicklung noch korrigieren zu können. Man kann aber daraus schließen, daß die Größe S nicht nur eine ähnlich sinnfällige Bedeutung besitzen muß wie die Wärme früher, sondern auch auf ähnlich einfache Weise quantifizierbar sein muß. Dadurch sollte sich das formalistische Gespenst S der klassischen Thermodynamik auf einen bereits für Mittelstufenschüler faßbaren und handhabbaren Begriff reduzieren und zugleich das damit überflüssig werdende Arsenal mathematischer Hilfsmittel entsorgen lassen. Diese Erwartung wird inzwischen durch vielerlei Schulerfahrung bestätigt /3/. In der Rolle der Wärme wird S selbst unter dem nichtssagenden Namen Entropie zu einer Größe, die kaum anspruchsvoller ist als die Begriffe Länge, Dauer, Masse. Daß die Größe in der Informatik, der statistischen Physik oder den

atomistischen Vorstellungen der Chemiker in einem anscheinend ganz anderen Gewand auftritt, steht ihrer Rolle als Wärme in der Makrophysik keineswegs im Wege.

/1/ Auch diese Annahme, die Gegenstand eines späteren Beitrages sein soll, ist eine Altlast, an der die Physik schwer zu tragen hat.

/2/ H. L. CALLENDAR: Proc. Phys. Society of London 23 (1911) 153. Hier findet sich auch der Vorschlag, die Einheit J/K, die heute die gesetzliche Entropieeinheit ist, als "Carnot" zu bezeichnen.

/3/ Neben den Erfahrungen einzelner Lehrer auch ein Großversuch in den letzten 7 Jahren mit insgesamt etwa 7000 Schülern im Rahmen der Erprobung des Karlsruher Physikkurses.

Georg Job

entnommen aus: JOB, G.: Altlasten der Physik (10), Entropie. In: Physik in der Schule 33 (1995).

7.7 Altlasten der Physik: Äquivalenz von Wärme und Arbeit (von G. Job)

Gegenstand: Wärme ist ungeordnete Energie meinen die einen /1/, die kinetische Energie der ungeordneten Molekülbewegung die anderen /2/, die kinetische und potentielle Energie der thermischen Molekülbewegung die dritten /3/, einem Gegenstand durch thermischen Kontakt zuführbare Energie die vierten /4/, ein Kurzname für den Ausdruck $\Delta U - W$ die fünften /5/, die gebundene Energie TS die sechsten /6/, das Integral $\int TdS$ die siebten /7/, ein fragwürdiger und überflüssiger Begriff die achten /8/. Was ist sie wirklich?

Herkunft: Die Frage ist so alt wie die Physik. Die Antwort, die R. CLAUSIUS darauf 1850 in seinem ersten Hauptsatz gab, in dem er die Äquivalenz von Wärme und Arbeit

fordert, ist in der Kernaussage bis heute gültig, aber offenbar vieldeutig.

Mängel: CLAUSIUS selbst benutzte zwei Wärme Größen, die in einem Gegenstand

"enthaltene Wärme" H , die er sich als Bewegungsenergie der Moleküle vorstellte, und die einem Gegenstand "zugeführte Wärme" Q , wobei $Q = \Delta H$ jedoch nur in Ausnahmefällen gilt. Unter den oben genannten Beispielen erkennt man unschwer die Nachfahren dieser beiden Eltern wieder. Die Meinungsvielfalt ist Ausdruck des ärgerlichen Umstandes, daß es keine Energiegröße gibt, die gleichzeitig alle wünschenswerten Aspekte des Wärmebegriffes abzubilden vermag. Wie bei einer zu kurzen Bettdecke, ist man gezwungen, auf die eine oder andere Eigenschaft zu verzichten. Je nachdem, was man für besonders betonenswert erachtet, fällt der Kompromiß anders aus. Daß man trotz dieser Vieldeutigkeit zu denselben Rechenergebnissen gelangt, läßt darauf schließen, daß die von CLAUSIUS geforderte Äquivalenz für den hermodynamischen Kalkül belanglos ist. Wofür ist sie dann aber gut?

Entsorgung: Wenn wir auf diese Forderung verzichten, gewinnen wir eine neue Freiheit. Um den Energiesatz aufzustellen, benötigen wir sie nicht. Um die Wärme zu definieren, auch nicht. Der Wärmebegriff läßt sich leicht "fundamental metrisieren", wie man in der Wissenschaftstheorie sagt. Dieses Verfahren wird in der Physik meist nur zur Definition einiger Basisgrößen benutzt, etwa Länge, Dauer, Masse, indem beispielsweise festgelegt wird, wie Gleichheit und Vielfachheit der Werte festzustellen sind und was als Einheit gelten soll. Man kann jedoch dieses Verfahren, das einen gegebenen Begriff direkt auf eine Größe abbildet, auch in vielen anderen Fällen heranziehen, etwa zur Definition von Energie, Impuls, Drehimpuls, Ladung, Stoffmenge, Entropie oder zur Metrisierung

von Begriffen wie Wärmemenge, Datenmenge, Unordnung oder Zufälligkeit. Das verblüffendste Ergebnis hierbei ist, daß der landläufige, wissenschaftlich unbelastete Begriff Wärmemenge hierbei keine energetische Größe liefert, sondern direkt die CLAUSIUSsche Entropie S /9/. Dieser spielende Zugang zu der neben der Temperatur wichtigsten thermodynamischen Größe erlaubt eine weitgehende Entrümpelung der Thermodynamik. Begriffe wie Enthalpie, freie Energie, Energieentwertung, Prozeßgröße, Zustandfunktion lassen sich gleich mitentsorgen. – Daß ein Mißgriff nicht im Kalkül einer Wissenschaft, sondern in ihrer Semantik so weitreichende Folgen haben kann, sollte Theoretiker warnen, deren Augenmerk allein der Stimmigkeit des Kalküls gilt, und Didaktiker alarmieren, die sich mit diesen Folgen herum-schlagen müssen.

/1/ F. J. DYSON: "What is heat?" Scientific American 1954, 191 (No. 3), S. 58 - 63.

/2/ R. W. POHL: "Mechanik, Akustik, Wärmelehre"; Springer: Berlin 1962, S. 248.

/3/ C. GERTHSEN, O. H. KNESER, H. VOGEL: "Physik"; Springer: Berlin 1986, S.193 - 197.

/4/ C. KITTEL: "Physik der Wärme"; Wiley & Sons: Frankfurt 1973, S. 133.

/5/ M. BORN: Physikal. Zeitschr. 1921, **22**, S. 218 - 286.

/6/ H. H. STEINOUR: "Heat and Entropy"; J. Chem. Educ. 1948, **25**, S. 15 - 20.

/7/ G. FALK, W. RUPPEL: "Energie und Entropie"; Springer: Berlin 1976, S. 92.

/8/ G. M. BARROW: "Thermodynamics..."; J. Chem. Educ. 1988, **65**, S. 122 - 125.

/9/ Folgende Annahmen zusammen mit der Wahl einer Wärmeeinheit genügen bereits zur eindeutigen Metrisierung:

1) Jeder Gegenstand enthält Wärme, deren Menge nicht abnehmen kann, wenn er wärmedicht umhüllt ist.

2) Nach Art und Zustand gleiche Gegenstände enthalten gleiche Wärmemengen.

3) Der Wärmehalt eines zusammengesetzten Gegenstandes ist die Summe der Wärmehalte seiner Teile.

Georg Job

entnommen aus: JOB, G.: Altlasten der Physik (10), Die Äquivalenz von Wärme und Arbeit. In: Physik in der Schule 33 (1995).

7.8 Altlasten der Physik: Die Messung der Entropie (von F. Herrmann)

Gegenstand: Die Entropie wird, wenn überhaupt, so eingeführt, daß der Eindruck entsteht, es handle sich um eine Größe, deren Werte man nur durch komplizierte mathematische Berechnungen erhalten kann.

Mängel: Die Entropie ist, neben der Temperatur, die wichtigste Größe der Wärmelehre. Sie ist die zur intensiven Temperatur gehörende extensive Größe. Entropie und Temperatur gehören genauso zusammen wie elektrische Ladung und elektrisches Potential oder wie Impuls und Geschwindigkeit. Entropieströme müßten in der Wärmelehre dieselbe Rolle spielen, wie elektrische Ströme in der Elektrizitätslehre oder Kräfte (Impulsströme) in der Mechanik.. Die übliche Einführung der Entropie wird dieser wichtigen Rolle nicht gerecht. Bei ihrer ersten Erwähnung wird uns die Entropie oft präsentiert als "Zustandfunktion" /1/.

Warum wird ausgerechnet bei der Entropie betont, sie sei eine Funktion? Die Entropie ist zunächst eine physikalische Größe. Zur Funktion wird sie erst, wenn man sie in Abhängigkeit von anderen Größen darstellt. Je

nachdem, welche anderen Größen man wählt, ist der funktionale Zusammenhang natürlich ein anderer.

Und warum wird betont, sie sei eine *Zustandsfunktion* oder *Zustandsgröße*? Alle extensiven physikalischen Größen sind Zustandsgrößen (und noch viele andere mehr), aber diese Tatsache ist so selbstverständlich, daß man sie normalerweise nicht erwähnt. Daß man sich bei der Entropie an diese Eigenschaft klammert, erklärt sich dadurch, daß die komplizierte, übliche Einführung so wenig Anschaulichkeit für die Größe vermittelt, daß man sich an diese eine Eigenschaft klammert, um das Defizit an Anschaulichkeit wenigstens etwas zu vermindern. Der wohl wichtigste Mangel bei der Einführung der Entropie ist, daß man kein Meßverfahren vorstellt. Selbstverständlich entsteht so der Eindruck, die Messung der Größe sei sehr schwierig, vielleicht sogar unmöglich. Tatsächlich ist die Entropie aber eine der am leichtesten zu messenden Größen überhaupt. Man kann Entropiewerte mit recht guter Genauigkeit mit Hilfe von Geräten bestimmen, die man in jeder Küche findet.

Herkunft: Siehe /2/

Entsorgung: Es geht natürlich nicht um die "Entsorgung" der Entropie oder deren Messung, sondern um die Beseitigung des Vorurteils, die Entropie sei schwer zu messen. Wie mißt man Entropien? Wir formulieren zunächst die Meßaufgabe genauer: Man bestimme die Entropiedifferenz zwischen 5 Liter Wasser von 60 °C und 5 Liter Wasser von 20 °C. Man beginnt mit dem Wasser bei 20 °C und heizt es mit einem Tauchsieder auf 60 °C. Man rührt gut um, sodaß die Temperatur überall im Wasser

gleich ist, und man mißt die Temperatur als Funktion der Zeit. Der Energiestrom P , der aus dem Tauchsieder ins Wasser fließt (die Leistung) ist bekannt. Aus $dE = T \cdot dS$ folgt $dS = dE/T = Pdt/T$.

Eine kleine Entropiezunahme dS erhält man also einfach als Quotienten aus der Energiezufuhr $dE = Pdt$ und der Temperatur T . Da sich die Temperatur des Wassers beim Heizen ändert, muß man, um die gesamte zugeführte Entropie zu erhalten, aufsummieren: Solange die Temperaturänderung beim Heizen klein gegen die mittlere absolute Temperatur ist, kann man aber statt der veränderlichen Temperatur getrost eine konstante, mittlere Temperatur verwenden, und man erhält also: Energiestrom des Tauchsieders mal Heizzeit durch mittlere Temperatur.

/1/ Gerthsen – Kneser – Vogel: Physik. – Springer-Verlag, Berlin, 1977. – S. 183

/2/ Job, G.: Altlasten der Physik (8), Entropie. – In: Physik in der Schule 33 (1995).

Friedrich Herrmann

entnommen aus: HERRMANN, F.: Altlasten der Physik (16), Die Messung der Entropie. – In: Physik in der Schule 36 (1996). S. 162.

II. Unterrichtspraktischer Teil - Ein Unterrichtsvorschlag

1. Didaktischer Kommentar

Der Baustein Energie und Entropie **beabsichtigt**:

- den Energiebegriff als gebietsübergreifendes Band in der Physik herauszustellen,
- den Mengencharakter der Energie zu unterstreichen,
- zu verdeutlichen, dass Energieströmung immer an die Strömung einer anderen mengenartigen Größe gebunden ist, die einem Potenzialunterschied einer intensiven Größe unterliegt (gibbssche Fundamentalform),
- Entropie einzuführen als die mengenartige Größe und als Energieträger,
- einen raschen, direkten Zugang zum Entropiebegriff zu ermöglichen,
- die Entropie als zentralen Begriff der Physik herauszustellen,
- eine Begriffsreduktion gegenüber der traditionellen Thermodynamik zu ermöglichen,
- die Option auf einen Ausbau in Richtung Thermodynamik (Wahlpflichtbaustein) oder offene Systeme,
- die Option auf einen Einblick in die statistische Interpretation oder die informationstheoretische Interpretation der Entropie.

Die **allgemeinen Zielsetzungen** des Bausteins sind:

- Entwicklung und Förderung des Denkens in Flüssen bzw. Strömen,
- Entwicklung und Förderung des Denkens in Analogien,
- Bekanntes und Vertrautes (Wissen, Formeln, Gesetze, Vorstellungen, ...) in einen gemeinsamen Zusammenhang, in ein System bringen und damit Disparates und angeblich weit auseinanderliegendes näherbringen (systemisches Denken).

Entsprechend dem **Charakter** des Bausteins Energie und Entropie trägt der Unterricht einige Merkmale, die ihn vom Unterrichten anderer Gebiete unterscheidet:

- Die Begriffsbildung erfolgt in Anknüpfung an die Alltagserfahrungen zu den begriffen Temperatur, Energie und Wärme.
- Durch die Betonung des Denkens in Analogien treten Strukturen in den Vordergrund und der Unterricht erhält einen formalen Charakter.
- Das Denken und Sprechen in Flüssen bringt Anschaulichkeit in den Unterricht.
- Der Unterricht enthält keine zentralen großen Experimente, sondern eher Anschauungsbeispiele aus dem Alltag im Sinne von 'Freihandexperimenten' und 'Anschauungsmaterialien'. (Messexperimente fehlen fast völlig, es sei denn, man steigt tiefer in die Untersuchung von Entropieströmen mittels Peltier-Elementen ein. Dafür ist aber der Zeitanatz in diesem Baustein zu knapp.)

2. Bausteine im Lehrplan Physik

2.1 Bausteine des Grundfaches

Entropie		10
<ul style="list-style-type: none"> - Entropie als Wärme - Entropieerzeugung und Entropiestrom - entropische Betrachtung von Naturphänomenen 	<ul style="list-style-type: none"> • Die fundamentale gebietsübergreifende Bedeutung des Entropiebegriffs zur Einsicht bringen. • Eine eventuelle Ergänzung mit dem Wahlbaustein Energiegewinnung bedenken. Zur Darstellung von Strömen eignen sich Modellbildungssysteme. 	

Wärmekraftmaschinen		10
<ul style="list-style-type: none"> - Gesetze des idealen Gases - thermodynamische Maschinen (Wärmepumpe, Stirling-Motor) 	<ul style="list-style-type: none"> • Ein Verständnis für Möglichkeiten und Grenzen thermodynamischer Maschinen schaffen. • Das Gas als Arbeitsmittel thermodynamischer Maschinen und die Entropie als Energieentwertung als Leitidee herausstellen. Eine Kombination mit den Bausteinen Entropie und Energiegewinnung ist bedenkenwert. 	

Energiegewinnung		10
<ul style="list-style-type: none"> - Energieerzeugungstechniken - Leistungsvergleiche - Schutz der Erdatmosphäre 	<ul style="list-style-type: none"> • Inhaltliche Grundlagen für Bewertungsansätze schaffen. • Fachübergreifende Aspekte der Thematik nutzen. Schwerpunktsetzung nach Rahmenbedingungen (Unterrichtsform, örtliche Gegebenheiten, Interessen, ...) vornehmen. Eventuelle Vorbereitung durch geeignete Bausteine bedenken. 	

2.2. Bausteine des Leistungsfaches

Energie und Entropie		10
<ul style="list-style-type: none"> - Energieströme und Energieträger - Entropie als Energieträger; Entropieerzeugung und Entropiestrom - entropische Betrachtungen 	<ul style="list-style-type: none"> • Die Aspekte und die fundamentale, gebietsübergreifende Bedeutung des Energiebegriffs und des Entropiebegriffs zur Einsicht bringen. • Eine eventuelle Ergänzung durch die Wahlbausteine Energiegewinnung und Thermodynamik bedenken. Empfehlenswert ist der direkte Zugang zum Entropiebegriff über die Entropie als Energieträger $\Delta E = T \cdot \Delta S$. 	

Energiegewinnung		10
<ul style="list-style-type: none"> - Energietechniken - Leistungsvergleiche - Energiespeicher 	<ul style="list-style-type: none"> • Inhaltliche Grundlagen für Bewertungsansätze schaffen. • Fachübergreifende Aspekte der Thematik nutzen. Schwerpunktsetzung nach Rahmenbedingungen (Unterrichtsform, örtliche Gegebenheiten, Interessen, ...) vornehmen. Eventuelle Vorbereitung durch geeignete Bausteine bedenken. 	

Thermodynamik		10
<ul style="list-style-type: none"> - Gesetze des idealen Gases - thermodynamische Maschinen (Wärmepumpe, Stirling-Motor) - Entropie als Energieentwertung 	<ul style="list-style-type: none"> • Ein Verständnis für Möglichkeiten und Grenzen thermodynamischer Maschinen erreichen. • Das Gas als Arbeitsmittel thermodynamischer Maschinen und die Entropie als Energieentwertung als Leitidee herausstellen. Eine Kombination mit dem Baustein Energie und Entropie ist bedenkenswert. Fachübergreifende Bezüge nutzen. 	

2.3 Bausteine im Lehrplan zum fachübergreifenden und fächerverbindenden Arbeiten am Thema Treibhauseffekt

Treibhauseffekt	
<p>Beiträge des Faches Physik:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Temperaturstrahlungsgesetze - Absorptionverhalten der Treibhausgase - Sechs-Effekte-Modell des Treibhauseffektes; CO₂-Dynamik <p>Beiträge des Faches Biologie:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Anteil und Rolle der Fotosynthese - Entropieverminderungsfunktion <p>Beiträge des Faches Chemie:</p> <ul style="list-style-type: none"> - chemische Zusammensetzung der Erdatmosphäre - Treibhausgase; chemische Reaktionen <p>Beiträge des Faches Erdkunde</p> <ul style="list-style-type: none"> - anthropogene Beiträge zum Treibhauseffekt 	<p>Hinweise:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Eine adressatengerechte Darstellung der Gesetze wählen (Texte, Bilder, Grafiken, Formeln, ...). • Eine Modellierung der CO₂-Dynamik mit einem Modellbildungssystem ist empfehlenswert. • Modellexperimente zu Einzeleffekten durchführen. • Anteil und Rolle der Verbrennung fossiler Brennstoffe, der Treibhausgasemissionen aus Industrie und Verkehr, der Massentierhaltung und des Nassreisanbaus, Pufferwirkung des Ozeans diskutieren. • Reichhaltiges Informationsmaterial auf klassischen und elektronischen Datenträgern, in Datenbanken durch Telekommunikation nutzen.

3. Gliederung der Unterrichtsreihe

1. Vorstellungen der Schüler zu Temperatur, Wärme und Energie
2. Entropieexperimente
3. Übungen an der Wärmflasche
4. Strukturierung mit Begriffswortfeldern und Begriffsnetzen
5. Entropiestromgesetze
6. Entropiemessung
7. Übungen zu Entropieströmen
8. Entropische Betrachtungen von Naturphänomenen
(Strukturbildung und Entropieexport / Treibhauseffekt)

Ist das Thema **Energie und Entropie** auch ein Thema für den Grundkurs? Ist die fachliche und didaktische Schwelle nicht zu hoch? Die Antwort ist erfreulicherweise ein klares 'Nein'; denn der Einstieg und Aufstieg ist auf unterschiedlichen Ebenen und Niveaustufen möglich, ohne im Kern fachliche Abstriche machen zu müssen. So gesehen ist es auch ein Thema für die Mittelstufe, für alle Schulstufen.

Ausgangspunkt sind die Alltagserfahrungen und die damit verbundenen Vorstellungen zu den Begriffen Energie, Temperatur und Wärme (=Entropie). Nach dem Unterschied zwischen Temperatur und Wärme befragt, erhält man von Schülerinnen und Schülern folgende Antworten (Auswahl aus einer Befragung in einem Grundkurs 12):

- Wärme kann man spüren, Temperatur nicht. Die Wärme ist die fühlbare Größe, wohingegen die Temperatur eine messbare Größe ist.
- Man misst Wärme und Kälte in Grad. Das nennt man Temperatur.
- Wärme betrifft die Sinne des Menschen, mit denen man Dinge begreift, und mit der Temperatur bestimmt man die Wärme durch Messungen. Wärme ist ein Begriff für angenehme Temperatur.
- Wärme ist der warme Teil des Spektrums und Temperatur umfasst den ganzen Teil des Spektrums.

- Wärme ist immer warm, Temperatur kann auch kalt sein.

Nach Schülervorstellungen vor dem Unterricht ist die Temperatur der objektiv messbare Teil der Wärme. Einfachste Experimente zeigen hingegen, dass Wärme eine extensive Größe ist und Temperatur eine intensive Größe. Extensive Größen sind mengenartig und deren Werte beziehen sich auf einen Raumbereich. Die Werte intensiver Größen hingegen beziehen sich auf einen Punkt. Das lässt sich an Alltagsvorgängen (z. B. Tante Ernas Wärmflasche) einsichtig darlegen. Energie ist eine Art universeller Treibstoff, der für Prozesse aller Art erforderlich ist. Wärme (=Entropie) ist ein Energieträger und die Temperatur gibt an, wie energiebeladen die betreffende Entropiemenge ist.

Im Unterschied zu anderen Unterrichtsthemen sollte man in diesem Themenbereich die Begriffe nicht sukzessive nacheinander einführen, sondern in ihrer Gesamtheit an die Schülerinnen und Schüler herantragen und auf die Abgrenzungen und Zusammenhänge hinarbeiten. Dies ist durch Bezugnahme und Analogiebildung zur Elektrizitätslehre leicht möglich.

1. Vorstellungen der Schüler zu Temperatur, Wärme und Energie

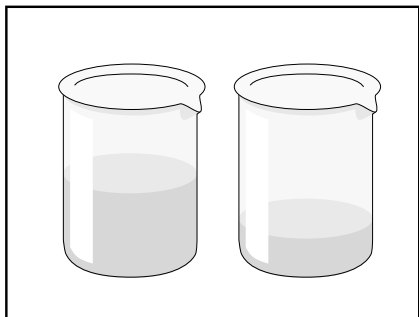


Den Schülern wird folgende Frage vorgelegt (Tafelanschrieb), die sie schriftlich auf einem Blatt beantworten:

1. Was ist Temperatur, Wärme, Energie ?
2. Was unterscheidet die Begriffe ?

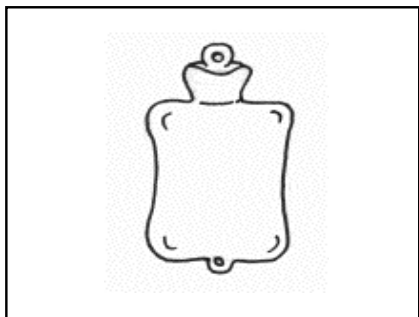
Die Interferenz der Begriffe verweist auf Schülervorstellungen und verdeutlicht die Notwendigkeit einer begrifflichen Ausschärfung.

2. Entropieexperimente



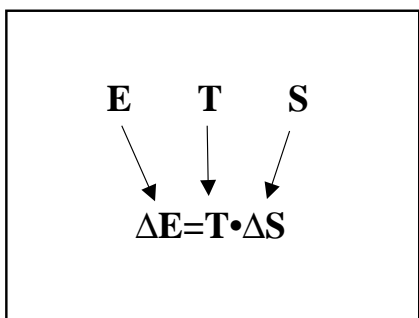
Anhand einfachster Entropieexperimente können die Begriffe eingeführt und Eigenschaften der Entropie (=Wärme) formuliert werden. Der Alltagswärmebegriff wird fachsprachlich mit dem Begriff Entropie belegt. Besonderer Wert sollte auf Strömungsvorstellungen gelegt werden. Hier ist weniger an eine Erarbeitung gedacht, als an die systematische Zusammenstellung von Vorwissen und bekannten Alltagserscheinungen.

3. Übungen an der Wärmflasche



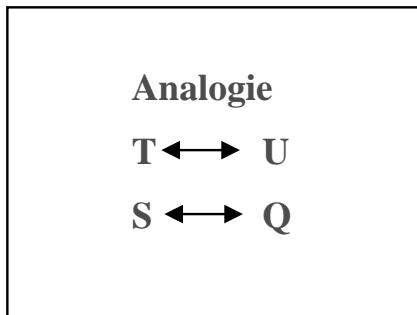
Anhand eines allgemeinsprachlich gehaltenen Textes (Anlage) über eine Wärmflasche, der wesentliche Bereiche der Wärmelehre aufreißt, können die Begriffe und Gesetze eingeübt werden, indem der Text in eine korrekte Fachsprache übersetzt wird. Der Text kann auch als Einstieg dienen, um anschließend die Entropieexperimente durchzuführen.

4. Strukturierung mit Begriffswortfeldern und Begriffsnetzen



Die Begriffe können auch anhand von Begriffswortfeldern und Begriffsnetzen eingeübt aber auch eingeführt werden. Das könnte selbsterschließend und nicht induktiv fragend erarbeitet werden. Dazu wird der gesamte Begriffsapparat mit dem Auftrag zur Strukturierung vorgegeben. Die kann vor oder nach der Analogiebetrachtung zur Elektrizitätslehre erfolgen.

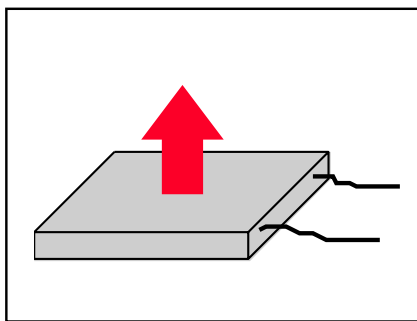
5. Entropiestromgesetze



Der bearbeitete Begriffsbestand wird experimentell begleitet und in strikter Analogie zu den bekannten Gesetzen des elektrischen Stromkreises in Bezug gesetzt.

Unterschiede (z.B. Entropie ist eine Quasi-Erhaltungsgröße) und Gemeinsamkeiten werden erarbeitet und festgehalten.

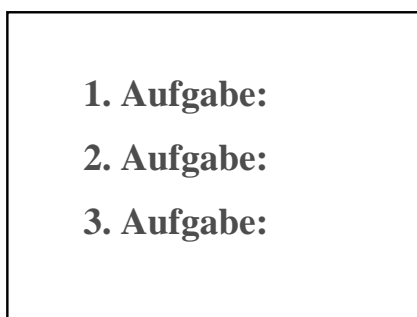
6. Entropiemessung



Ein Peltier-Element kann als Entropiestrommesser benutzt werden, und damit werden Stromstärkemessungen und Stromkreisgesetze experimentell untersucht.

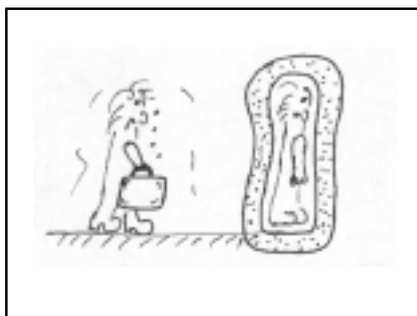
Die Entropieerzeugung eines Tauchsieders kann mit sehr einfachen Mitteln gemessen werden.

7. Übungen zu Entropieströmen



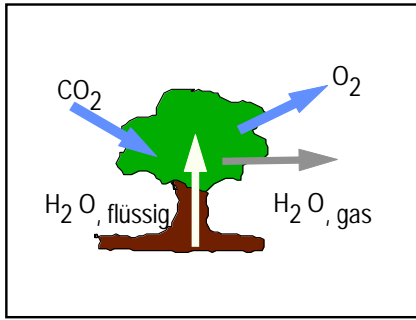
Anhand von Aufgaben und Übungen wird der Intensitätsgrad der Beschäftigung erhöht.

8. Entropische Betrachtungen (Strukturbildung und Entropieexport / Treibhauseffekt)



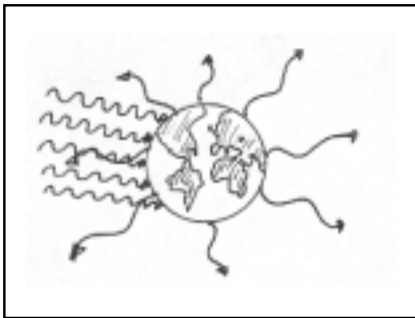
Mit dem Energie- und Entropiebegriff und mit den Entropiestromgesetzen können Wärme- und Entropieprobleme aus dem Alltag und aus der Natur behandelt werden. Hier muss eine exemplarische Auswahl getroffen werden:

- die Behandlung von Lebewesen als offene Systeme



oder:

- die Strukturbildung beim Pflanzenwachstum.



oder:

- die entropische Betrachtung des Treibhauseffektes.

III. Unterrichtsmaterialien - Folien und Arbeitsblätter

1. Meine Vorstellungen zu Wärme und Temperatur
2. Entropieexperimente
3. Übungen an der Wärmflasche:
 - Tante Erna spricht über ihre Wärmflasche
 - Fragen zu Tante Ernas Wärmflasche
 - Der Physiker spricht über die Wärmflasche
4. Strukturierungen:
 - Begriffswortfeld
 - Begriffswortfeld mit Symbolen
 - Sortiertes Begriffswortfeld
 - Begriffsschubladen
 - Begriffnetz
5. Analogie zwischen Elektrizität und Entropie
6. Entropiemessung:
 - Messung des Entropiestromes mit dem Peltier-Element
 - Entropiemessung am Beispiel der Entropieerzeugung am Tauchsieder
7. Aufgaben mit Lösungen

Meine Vorstellungen zu Wärme und Temperatur

1. Auf dem Tisch liegen ein Wollpullover und ein Stück Eisen. Beide fühlen sich unterschiedlich warm an.

Wie erklärst du das?

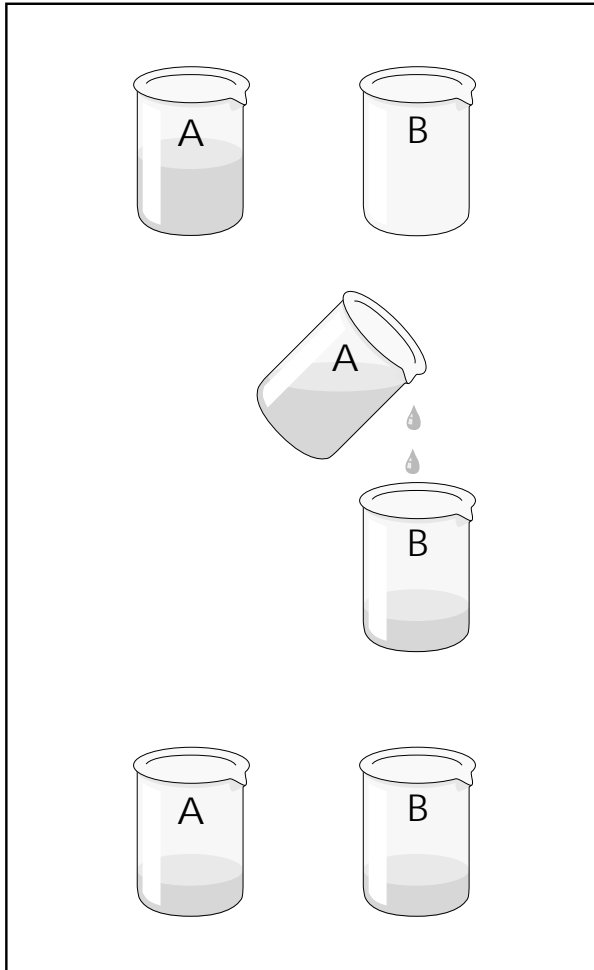
2. Erkläre jemandem den Unterschied zwischen Temperatur, Wärme und Energie.

3. Was ist Kälte?

4. Du steigst aus dem Schwimmbad und frierst. Begründe das.

Entropieexperimente

1. Experiment:



Die Hälfte des Wassers in A wird in B gegossen. Die Temperatur in A bleibt gleich, aber die Wärme und die (Wärme-) Energie halbieren sich.

1. Grundbegriffe der Wärmelehre:

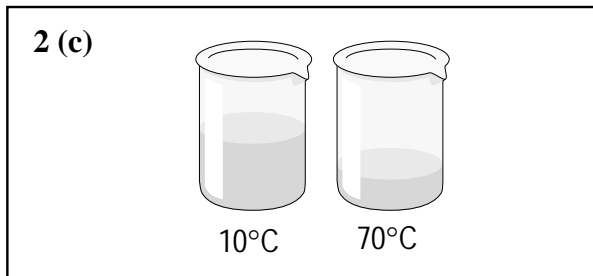
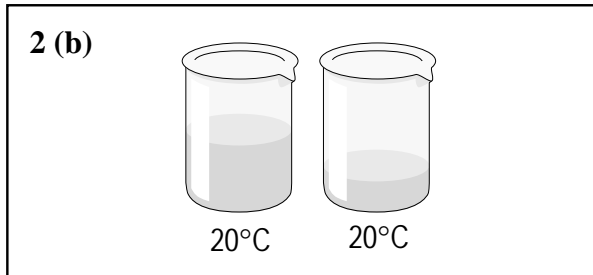
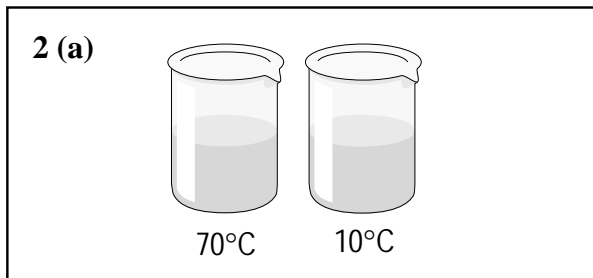
Temperatur, Entropie und Energie

Die **Temperatur** charakterisiert den Zustand des Warmseins eines Körpers, unabhängig von dessen Größe, Masse, Material, etc..

Die Wärme (= Entropie) ist etwas, das in dem Körper enthalten ist, abhängig von dessen Größe, Masse, Material, Temperatur, etc..

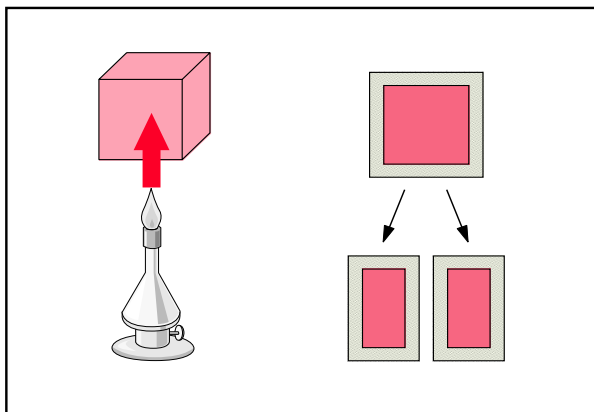
Die **Energie** ist etwas, das in allem enthalten ist. Alles ist Energie und für alles braucht man Energie. Mit Wärme kann man Energie übertragen.

2. Experiment:



Welche Wassermenge enthält mehr Wärme (=Entropie)?

3. Experiment:



Man erwärmt einen Gegenstand, z. B. ein Stück Eisen, über einer Gasflamme. Anschließend nimmt man die Flamme weg und packt den Gegenstand in Styropor ein.

2. Feststellung:

Das Wasser mit der Temperatur 70°C enthält mehr Entropie (= Wärme) als die gleiche Wassermenge der Temperatur 10°C.

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

Von zwei Wassermengen gleicher Temperatur enthält die größere mehr Entropie als die kleinere.

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

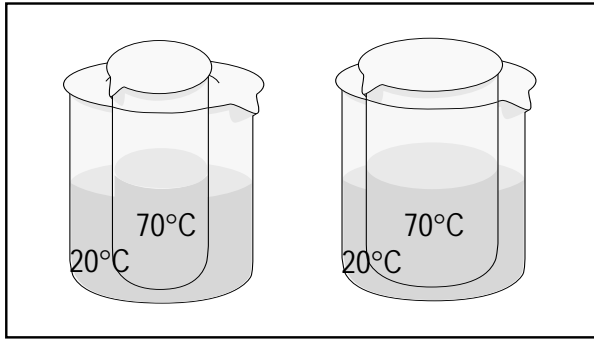
Bei zwei Wassermengen unterschiedlicher Masse und unterschiedlicher Temperatur braucht man zum Vergleich der Entropiemengen quantitative Gesetzmäßigkeiten.

3. Feststellung:

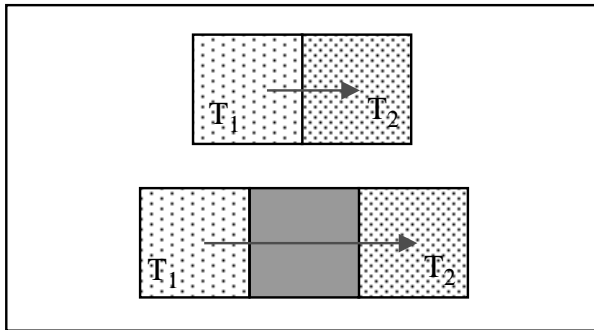
Hält man einen Gegenstand, z. B. ein Stück Eisen, über eine Gasflamme, so wird er wärmer, seine Temperatur steigt. In den Gegenstand strömt Entropie hinein. Je mehr Entropie man in das Eisenstück hineinfließen lässt, desto höher wird seine Temperatur. Nimmt man den Gegenstand von der Flamme weg und packt ihn in Styropor ein, so bleibt die Entropie in ihm drin.

Entropie ist eine mengenartige Größe, die in einem Körper enthalten ist.

4. Experiment:

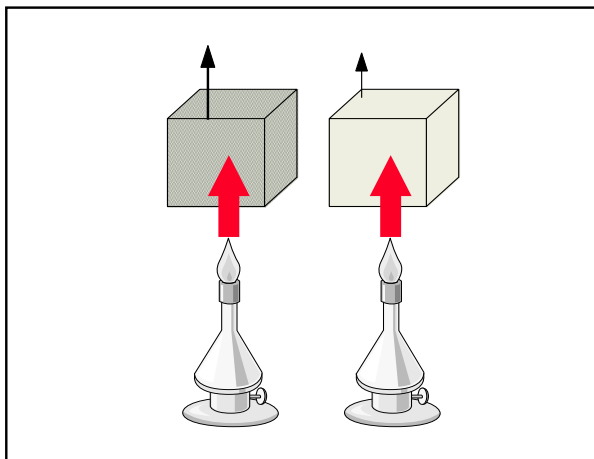


Man taucht einen Behälter A mit Wasser der Temperatur 70°C in ein Wasserbad B der Temperatur 20°C .



Wovon hängt der Wärmefluß ab?

5. Experiment:



Man hält einmal einen Behälter mit Luft und einmal einen gleich großen Behälter mit Wasser über eine Flamme.

4. Feststellung:

Taucht man einen Behälter A mit Wasser der Temperatur 70°C in ein Wasserbad B der Temperatur 20°C , so fließt solange Entropie von A nach B bis die Temperaturen gleich sind. Es stellt sich ein thermisches Gleichgewicht ein. Die Gleichgewichtstemperatur hängt ab vom Verhältnis der Wassermengen.

Entropie strömt von selbst von Stellen höherer Temperatur zu Stellen niedriger Temperatur. Ein Temperaturunterschied ist ein Antrieb für einen Entropiestrom.

Eine Wärmepumpe transportiert Entropie von Stellen niedriger Temperatur zu Stellen höherer Temperatur.

Ob die Entropie gut von einem warmen zu einem kalten Gegenstand fließt, hängt aber auch noch von der Art des Kontakts, der Verbindung, ab.

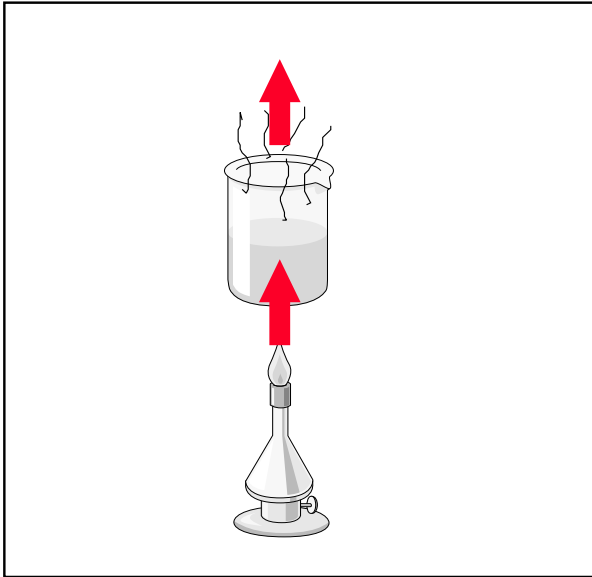
Es gibt also gute und schlechte Entropieleiter.

5. Feststellung:

Hält man einmal einen Behälter mit Luft und einmal einen gleich großen Behälter mit Wasser über eine Flamme, so stellt man fest, dass sich die Luft schneller erwärmt, d. h. schneller eine bestimmte Temperatur erreicht als das Wasser.

Man muss also in das Wasser mehr Entropie hineinstecken, um diese Temperatur zu erreichen. Wasser hat eine größere Entropiekapazität als Luft.

6. Experiment:

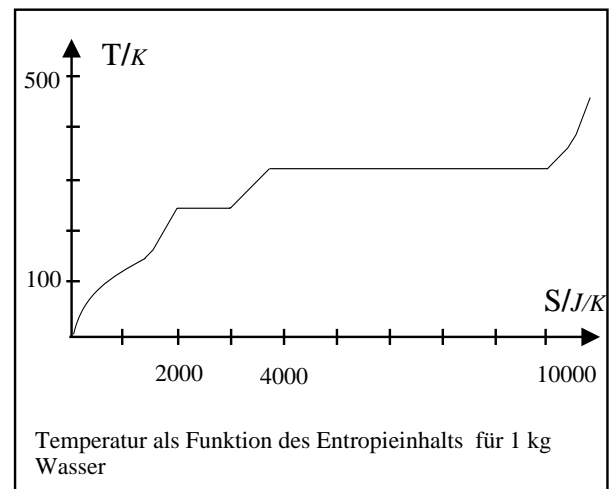


Man lässt siedendes Wasser auf der Flamme stehen und misst die Temperatur.

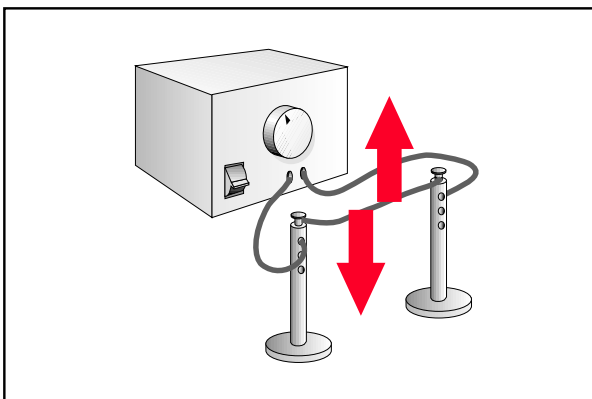
6. Feststellung:

Man kann einem "System" auch Entropie zuführen, ohne dass die Temperatur steigt. Lässt man siedendes Wasser auf der Flamme stehen, so fließt dauernd Entropie in das Wasser hinein. Seine Temperatur erhöht sich nicht mehr, aber dafür wird ständig Wasser verdampft. Der Dampf muss also die Entropie forttragen.

Ein Gramm Dampf enthält also (viel) mehr Entropie als ein Gramm flüssiges Wasser.



7. Experiment:



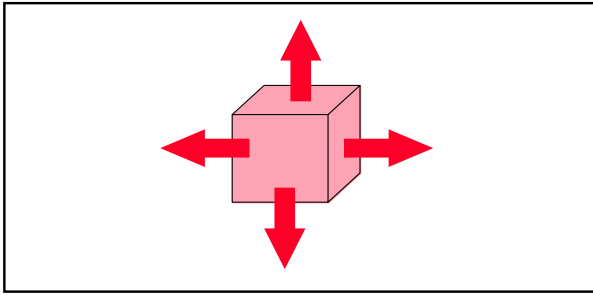
Man erhitzt einen Draht elektrisch.

7. Feststellung:

Man kann Entropie erzeugen, z. B. in einer Flamme, in einem elektrischen Widerstand oder durch "Reibung".

Entropie kann erzeugt werden.

8. Experiment:



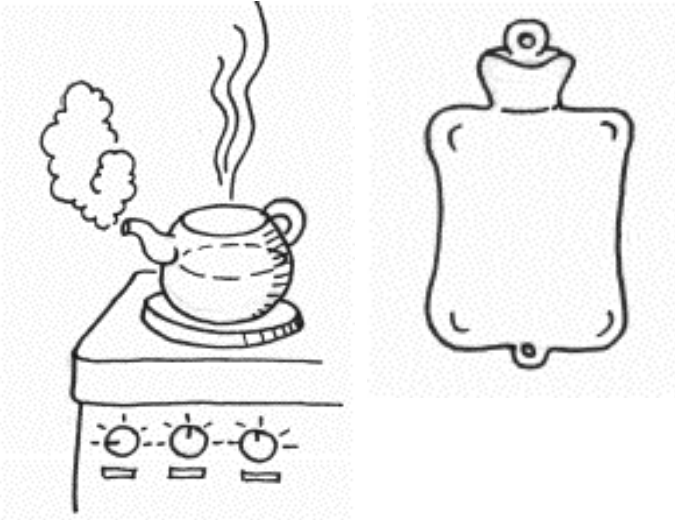
Man lässt den erwärmten Gegenstand eine Weile stehen ohne weiter zu heizen.

8. Feststellung:

Lässt man den Gegenstand, den man vorher erwärmt hat, eine Weile stehen, so fließt die Entropie aus ihm heraus, sie verteilt sich in der Umgebung. Dabei verdünnt sie sich so stark, dass man nicht mehr erkennt, wo sie sich genau befindet. Trotzdem ist sie irgendwo, sie ist nicht verschwunden im Sinne von "vernichtet", sondern nur verschwunden im Sinne von "versteckt" oder "verstreut".

Entropie kann erzeugt, aber nicht vernichtet werden. (2. Hauptsatz)

Tante Erna spricht über ihre Wärmeflasche



Das ist meine Wärmeflasche.

Ich stelle dann Wasser auf den Herd, auf Stufe 6, erwärme 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 Wasser kocht.

Höher geht es ja nicht.

Wenn ich die Wärmeflasche ins Federbett packe, dann bleibt sie lange warm, draußen 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 kaputt, und da habe ich das Wasser mit einem Holzfeuer erwärmt.

Fragen zu Tante Ernas Wärmflasche

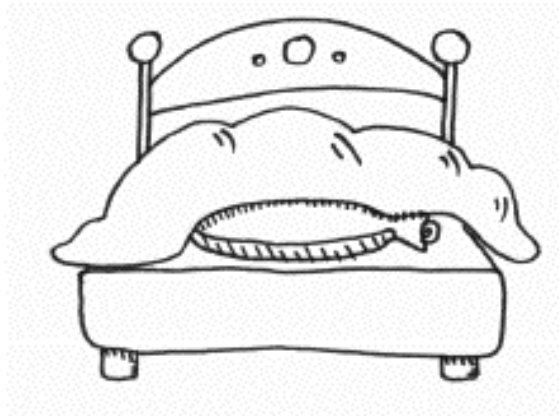
1. Was hat Tante Erna in ihrer Wärmflasche?
2. Wie kommt die Wärme in den Wasserkessel?
Wo kommt sie her?
3. Wieso wird das Wasser nicht beliebig warm?
4. Wieso kühlt die Wärmflasche wieder ab?
Wohin geht die Wärme?
5. Kann man die Wärme, Temperatur, Energie erzeugen?
Wenn ja, wie geht das?
6. Übersetze den Tante-Erna-Bericht in die physikalische Fachsprache.

Der Physiker spricht über die Wärmeflasche



Das Wasser in der Wärmeflasche ist ein Energie- und Entropiespeicher.

Im Elektroherd als Energiewandler wird der Energieträger gewechselt. Elektrische Energie fließt mit Ladungen hinein und Wärmeenergie fließt mit Entropie hinaus. Durch Wärmeleitung fließt die Entropie über den Kessel in das Wasser.



Mit zunehmendem Entropieinhalt des Wassers wächst dessen Temperatur bis zur Siedetemperatur.

Das Federbett ist ein Entropieisolator und hat eine extrem geringe Entropieleitfähigkeit, so dass kaum eine Entropieleitung stattfindet und die Temperatur fast konstant bleibt.



Durch die Füße kann Entropieleitung stattfinden. Die beiden Seiten der Wärmeflasche haben einen unterschiedlichen Entropiewiderstand. Durch Lufteinschluss der gerippten Seite ist die Entropieleitung gering, weil Luft ein schlechter Entropieleiter ist.



Die Entropieerzeugung kann auch durch Verbrennung (Oxidation) erfolgen.

Begriffswortfeld

Entropie Thermometer
 Temperatur
 Wärme Entropieisolator
 Energiedifferenz Energie Entropieleiter
 Entropieleitung Wärmeenergieleiter
 Entropiewiderstand Entropiemesser
 Entropiestrom Energieströmung Entropiemenge
 Entropiepumpe Entropieströmung Energiemesser
 Entropiekapazität Energieträger
 Entropiedifferenz Entropiestromstärke
 Energiestromstärke
 Entropiewiderstand Entropieleitfähigkeit
 Temperaturdifferenz reversibel
 Verbrennung Reibung irreversibel

Aufgaben:

1. Notiere Symbole an die Begriffe.
2. Bilde "Begriffsschubladen" und sortiere die Begriffe.
3. Bilde Begriffsnetze.
4. Übersetze den Tante-Erna-Bericht in die physikalische Fachsprache.

Begriffswortfeld mit Symbolen

Entropie **S** Thermometer
 Temperatur **T**
 Wärme Entropieisolator
 Energiedifferenz **ΔE** Energie **E** Entropieleiter
 Entropieleitung Wärmeenergieleiter
 Entropiewiderstand **R_S** Entropiemesser
 Entropiestrom Energieströmung Entropiemenge
 Entropiepumpe Entropieströmung Energiemesser
 Entropiekapazität **$C_S = \Delta S / \Delta T$** Energieträger
 Entropiedifferenz **ΔS** Entropiestromstärke **$I_S = \Delta S / \Delta t$**
 Energiestromstärke **$P = I_E = \Delta E / \Delta t$**
 Entropiewiderstand Entropieleitfähigkeit **σ_S**
 Temperaturdifferenz **ΔT** reversibel
 Verbrennung Reibung irreversibel

Sortiertes Begriffswortfeld

Entropie
Wärme
Energiedifferenz
Entropieleitung
Entropiewiderstand
Entropiestrom
Entropiepumpe
Entropiekapazität
Entropiedifferenz
Energiestromstärke
Entropiewiderstand
Temperaturdifferenz
Verbrennung

Temperatur
Energie
Wärmeenergieleiter
Entropiemesser
Energieströmung
Entropieströmung
Entropiestromstärke
Entropieleitfähigkeit
reversibel
Reibung

Thermometer
Entropieisolator
Entropieleiter
Wärmeenergieleiter
Entropiemesser
Entropiemenge
Energiesmesser
Energieträger
irreversibel

Begriffsschubladen

Energieströmung

Energie
Energiedifferenz
Energieträger
Energiestromstärke

Energiemesser
Wärmeenergieleiter

Entropieströmung

Entropie
Wärme
Entropiemenge
Entropiestrom
Entropiedifferenz
Entropiestromstärke
Entropiewiderstand
Entropieleitfähigkeit
Entropiekapazität

Entropiepumpe
Entropieleiter
Entropiewiderstand
Entropieisolator
Entropiemesser

Entropieleitung

Verbrennung

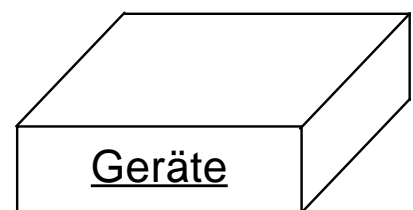
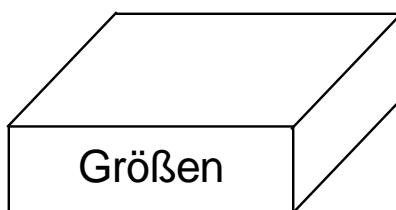
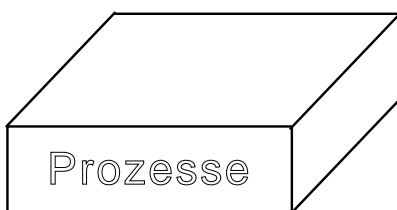
Reibung

reversibel

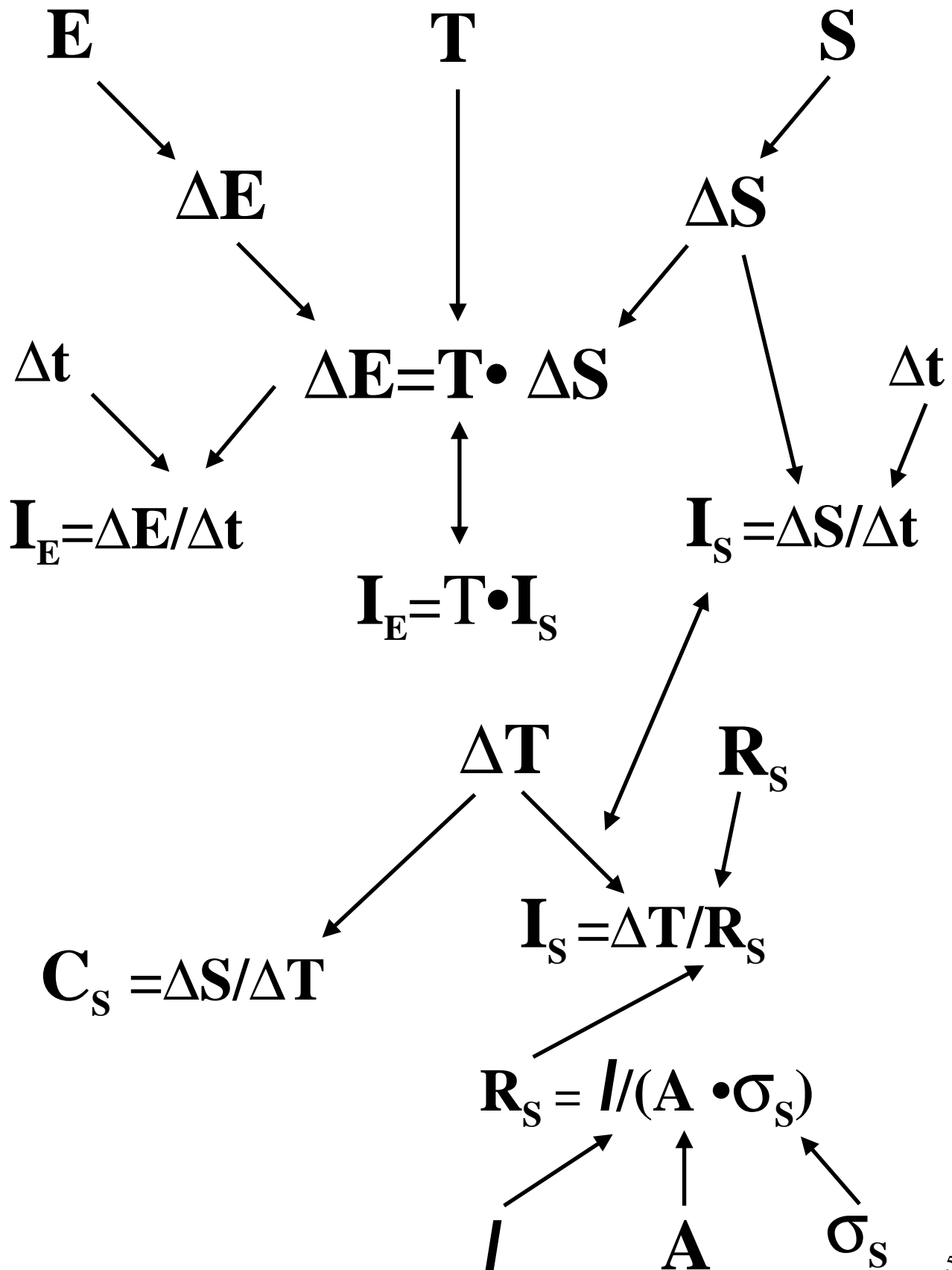
irreversibel

Temperatur
Temperaturdifferenz

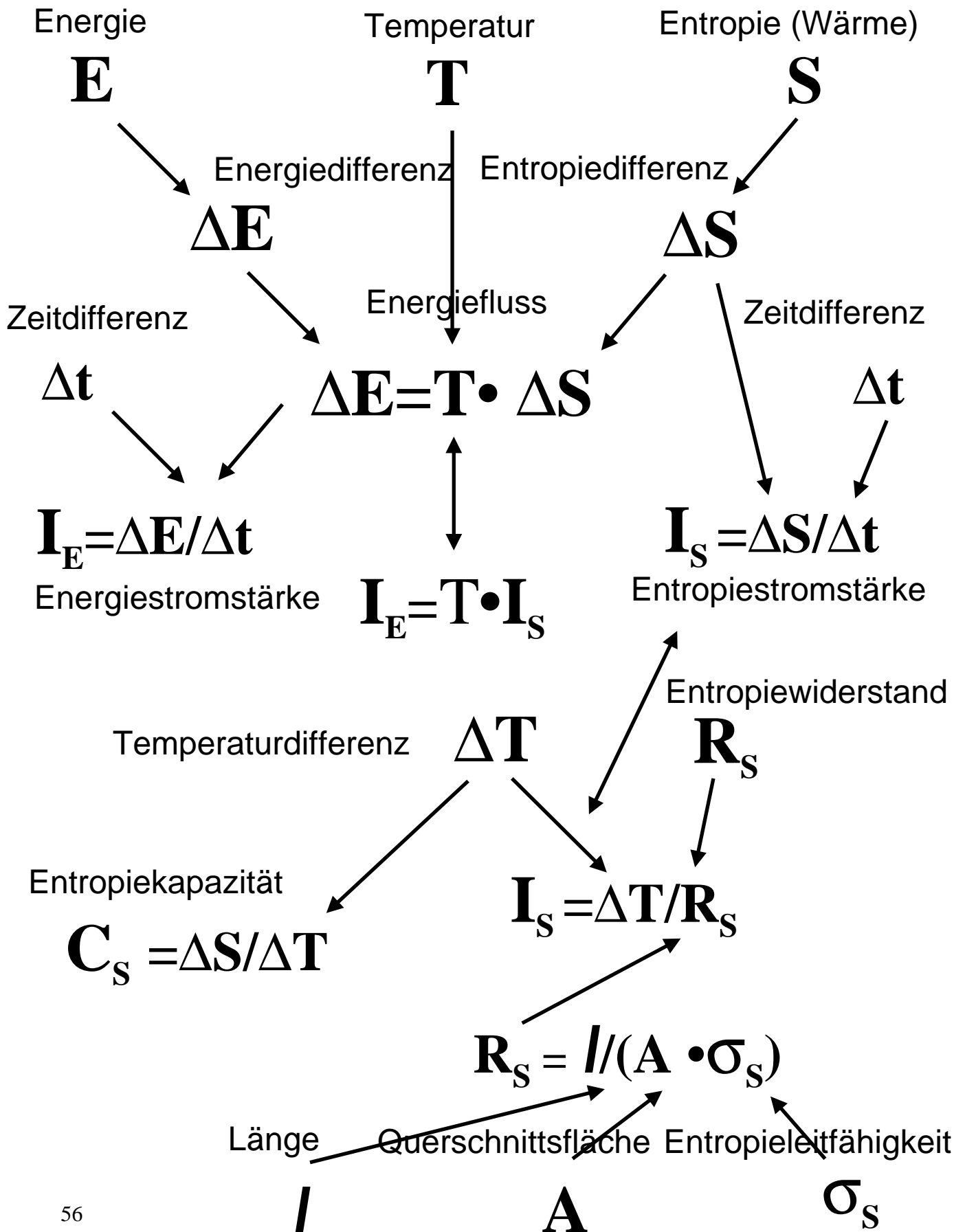
Thermometer



Begriffsnetz zur Wärmelehre



Begriffsnetz zur Wärmelehre



Analogie zwischen Elektrizität und Entropie

Eigenschaften elektrischen Ladungen und Gesetze für Ladungsströme

Alltagserfahrungen zur Elektrizität und Elektrizitätsexperimente führen zu folgenden Regeln und Gesetzen:

- 1 Jeder Körper enthält Elektrizität.
Die (Elektrizitätsmenge, Ladungsmenge) Ladung Q ist eine mengenartige Größe.
Die Ladung Q kann positive und negative Werte annehmen.
- 2 Je größer die Masse m eines Gegenstandes, desto mehr Ladung Q enthält er.
- 3 Je höher das Potenzial ϕ eines Körpers (physikalischen Systems) ist, desto mehr Ladung Q enthält er (es).
- 4 Ladung strömt von selbst von Stellen höheren Potenzials zu Stellen niedrigeren Potenzials. Ein Potenzialunterschied $\Delta\phi = U$ ist ein Antrieb für einen Ladungsstrom $I = \Delta Q / \Delta t$.
- 5 Je größer die Potentialdifferenz $\Delta\phi = U$, desto stärker ist der Ladungsstrom:
 $I = L \cdot U$, wobei $L = 1/R$ der Leitwert, oder der reziproke elektrische Widerstand ist (ohmsches Gesetz).
- 6 Jede Leitung setzt dem hindurchfließenden Ladungsstrom einen Widerstand entgegen. Dieser elektrische Widerstand R ist umso größer, je kleiner die Querschnittsfläche der Leitung und je größer ihre Länge ist. Er hängt außerdem vom Material der Leitung ab. $R = l / (\epsilon \cdot A)$.
- 7 Je höher das Potenzial ϕ eines Körpers (physikalischen Systems) ist, desto mehr Ladung Q enthält es. Die Ladungszunahme pro Potenzialzunahme heißt Kapazität eines Körpers $C = Q/U$.

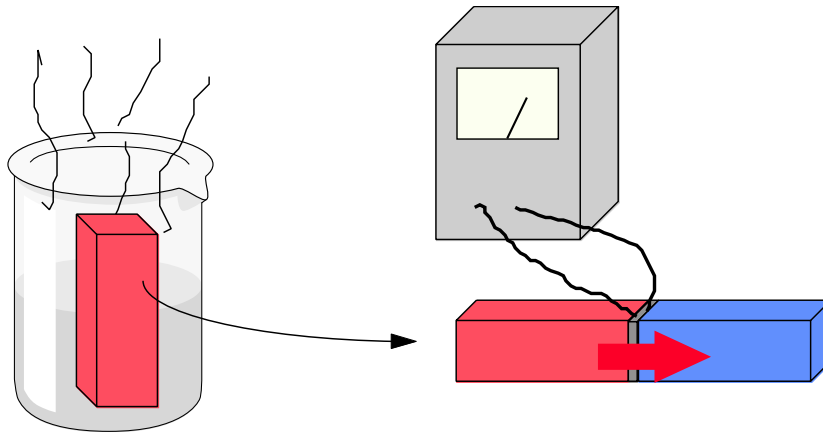
Eigenschaften der Entropie und Gesetze für Entropieströme

Alltagserfahrungen als Entropieerfahrungen und Entropieexperimente führen zu folgenden Regeln und Gesetzen:

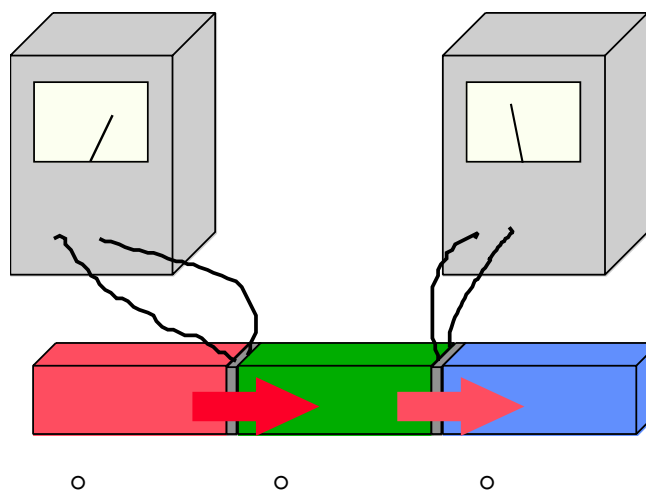
- 1 Jeder (warme) Körper enthält Entropie.
Die (Wärme) Entropie S ist eine mengenartige Größe. Sie kann nur positive Werte annehmen.
- 2 Je größer die Masse m eines Gegenstandes, desto mehr Entropie S enthält er.
- 3 Je höher die Temperatur T eines Körpers (physikalischen Systems) ist, desto mehr Entropie S enthält er (es).
- 4 Entropie strömt von selbst von Stellen höherer Temperatur zu Stellen niedrigerer Temperatur. Ein Temperaturunterschied ΔT ist ein Antrieb für einen Entropiestrom $I_S = \Delta S / \Delta t$.
- 5 Je größer die Temperaturdifferenz ΔT , desto stärker ist der Entropiestrom:
 $I_S = L_S \cdot \Delta T$, wobei L_S der Entropieleitwert, oder der reziproke Entropiewiderstand ist (fouriersches Gesetz).
- 6 Jede Leitung setzt dem hindurchfließenden Entropiestrom einen Widerstand entgegen. Dieser Entropiewiderstand ist umso größer, je kleiner die Querschnittsfläche der Leitung und je größer ihre Länge ist. Er hängt außerdem vom Material der Leitung ab. $R_S = l / (\sigma_S \cdot A)$.
- 7 Je höher die Temperatur T eines Körpers (physikalischen Systems) ist, desto mehr Entropie S enthält er (es). Die Entropiezunahme pro Temperaturzunahme heißt Entropiekapazität eines Systems

- $C_S = \Delta S / \Delta T$. Die Entropie S , und die Entropiekapazität C_S hängen nicht nur von T , sondern auch von andern Größen, z. B. Masse m , Volumen V , Druck p , Stoffmenge n , etc. ab. Bei Phasenübergängen ändert sich die Entropiekapazität sehr stark.
- 8 Ladung kann weder erzeugt, noch vernichtet werden (Ladungserhaltungssatz). Dieser grundlegende Satz hat denselben erkenntnistheoretischen Status wie der Energieerhaltungssatz. Die Physiker glauben daran.
- 10 Ladung ist ein Energieträger. Ein Ladungsstrom der Stärke I ist immer mit einem Energiestrom der Stärke $I_E = \varphi \cdot I_Q$ oder $\Delta E = \varphi \cdot \Delta Q$ begleitet. Das Potenzial gibt an, wie stark ein Ladungsstrom mit Energie beladen ist. (Die Energiestromstärke ist die sogenannte Leistung $P = I_E$.)
- 12 Die Einheit der Ladung ist $[Q] = 1 \text{ C}$. Es ist die Ladungsmenge, die bei einer zeitlich konstanten Stromstärke von 1 A während der Zeit von 1 s durch den Leiter fließt.
- 8 Entropie kann erzeugt werden bei einer chemischen Reaktion, durch mechanische Reibung, durch elektrische Ströme in elektrischen Widerständen, durch Entropieströme in Wärmewiderständen, u.v.a.m. Entropie kann zwar erzeugt, aber nicht vernichtet werden. (2. Hauptsatz der Thermodynamik) Dieser grundlegende Satz hat denselben erkenntnistheoretischen Status wie der Energieerhaltungssatz. Die Physiker glauben daran.
- 9 Prozesse, bei denen Entropie erzeugt wird, können nicht von selbst rückwärts laufen, sie sind irreversibel.
- 10 Entropie ist ein Energieträger. Ein Entropiestrom der Stärke I_S ist immer mit einem Energiestrom der Stärke $I_E = T \cdot I_S$ oder $\Delta E = T \cdot \Delta S$ begleitet. Die Temperatur gibt an, wie stark ein Entropiestrom mit Energie beladen ist. (Die Energiestromstärke ist die sogenannte Leistung $P = I_E$.)
- 11 Versucht man mit einer sehr guten Wärmepumpe einem Körper immer mehr Energie zu entziehen, so stellt man zweierlei fest:
 - Man kommt der Temperatur 0 K nahe, kann sie aber nicht unterschreiten, d. h., es gibt eine absolut tiefste Temperatur.
 - Bei dieser Temperatur fördert die Pumpe keine Entropie mehr, d. h., absolut kalte Körper enthalten keine Entropie.
- 12 Die Einheit der Entropie ist $[S] = 1 \text{ J/K}$. Es ist die Entropiemenge, mit der man bei Normaldruck $0,893 \text{ cm}^3$ Eis schmilzt.

Messung des Entropiestromes mit dem Peltier-Element



Messung des Entropiestromes durch einen Entropieleiter



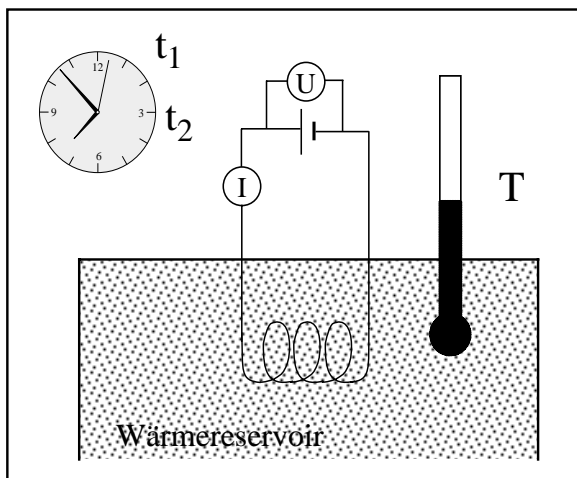
Zu den Experimenten mit Peltier-Elementen siehe Anhang.

Entropiemessung am Beispiel der Entropieerzeugung am Tauchsieder

gibbssche Fundamentalform: $dE = T \cdot dS = U \cdot dQ \rightarrow$

$$dS = U/T \cdot dQ = U \cdot I/T \cdot dt \rightarrow \Delta S = \int U(t) \cdot I(t)/T \cdot dt$$

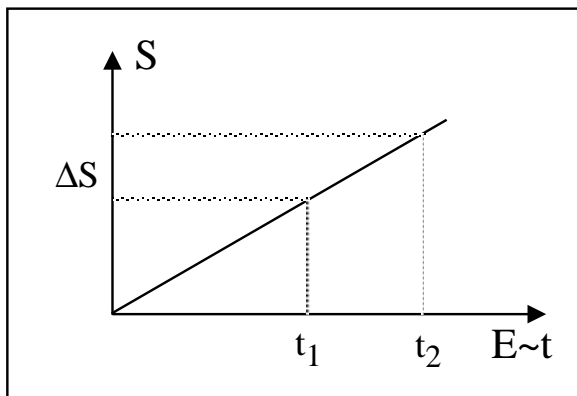
Entropieerzeugung eines Tauchsieders bei konstanter Temperatur:



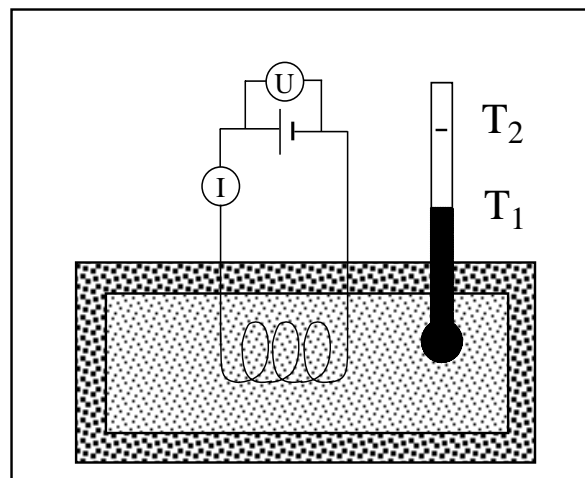
Die gesamte erzeugte Entropie wird an das Wasser abgegeben, führt aber zu keiner Temperaturerhöhung, weil ein Wärmereservoir vorliegt (=sehr große Wassermenge mit guter Durchmischung)

$$\Delta S = \int_{t_1}^{t_2} U \cdot I/T dt = U \cdot I/T \cdot (t_2 - t_1)$$

Entropiemessung = Zeitmessung



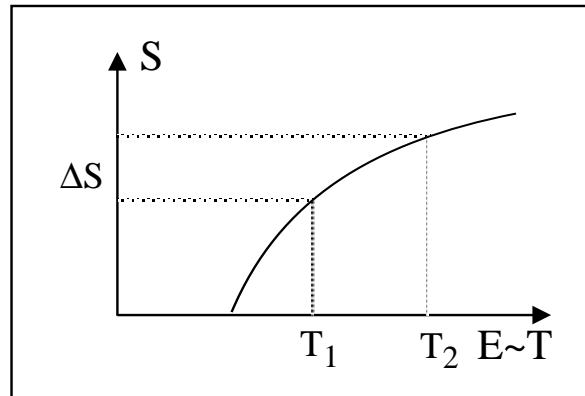
Entropieerzeugung eines Tauchsieders bei nichtkonstanter Temperatur:



Wegen des adiabatischen Abschlusses wird die gesamte erzeugte Entropie an das Wasser abgegeben und lässt sich als aufgenommene Entropie messen.

$$\Delta S = \int_{t_1}^{t_2} U \cdot I/T dt = \int_{T_1}^{T_2} C/T dT = C \cdot \ln T_2/T_1$$

Entropiemessung = logarithmische Temperaturmessung



III. Unterrichtsmaterialien - Aufgaben mit Lösungen

- A. Aufgaben zu Energie- und Entropieströmen**
- B. Aufgaben zur Entropieerzeugung durch Entropieströme**
- C. Aufgaben zu Entropieströmen und Energieverlusten**
- D. Aufgaben zu Entropieinhalt und Temperatur**
- E. Aufgaben zur gibbsschen Fundamentalform und zu Energie- und Entropieströmen**

A. Aufgaben zu Energie- und Entropieströmen (aus: [4], Band 1)

1. Ein Haus, das mit einer Ölheizung auf eine Temperatur von 20°C geheizt wird, hat einen Wärmeverlust von 35 J/Ks . Wie hoch ist der Energieverbrauch der Heizung?
2. Der Kühler eines Autos, dessen Temperatur 90°C beträgt, gibt pro Sekunde 60 J/K an die Luft ab. Wie groß ist der Energiestrom, der aus dem Kühler heraus in die Luft fließt?
3. Die Temperatur an der Unterseite eines 1000 W -Bügeleisens beträgt 300°C . Wieviel Entropie kommt pro Sekunde aus dem Bügeleisen heraus?
4. Ein Schwimmbad wird mit einer Wärmepumpe geheizt. Die Wärmepumpe nimmt die Entropie aus einem vorbeifließenden Bach. Die Temperatur des Wassers im Bach ist 15°C , die des Wassers im Schwimmbecken 25°C . Das Wasser im Schwimmbad verliert ständig Entropie an die Umgebung, und zwar pro Sekunde 500 J/K . Damit es seine Temperatur behält, muss die Wärmepumpe diese Entropie ständig nachliefern. Wie hoch ist der Energieverbrauch der Wärmepumpe?
5. Ein Haus wird mit einer Wärmepumpe geheizt. Die Außentemperatur beträgt 0°C , die Temperatur im Haus 25°C . Die Wärmepumpe fördert 30 J/Ks .
 - (a) Wie hoch ist ihr Energieverbrauch?
 - (b) Dasselbe Haus wird mit gewöhnlicher Elektroheizung erwärmt, d. h. 30 J/Ks werden nicht von draußen hineingepumpt, sondern im Haus erzeugt. Wie hoch ist der Energieverbrauch?

B. Aufgaben zur Entropieerzeugung durch Entropieströme

6. Ein Haus wird mit 20 kW geheizt. Die Innentemperatur ist 20°C , die Außentemperatur -5°C .
 - (a) Wie stark ist der nach draußen fließende Entropiestrom an der Innenwand des Hauses?
 - (b) Wie stark ist er an der Außenwand?

(c) Wieviel Entropie wird pro Sekunde beim Herausfließen der Entropie erzeugt?

7. Der Heizdraht einer 1000 W -Kochplatte hat eine Temperatur von 1000 K .
 - (a) Wieviel Entropie pro Sekunde wird im Heizdraht erzeugt?
 - (b) Auf der Kochplatte steht ein Topf mit Wasser; die Wassertemperatur beträgt 373 K . Wie viel Entropie kommt pro Sekunde im Wasser an?
 - (c) Wie viel Entropie wird auf dem Weg vom Heizdraht zum Wasser erzeugt?

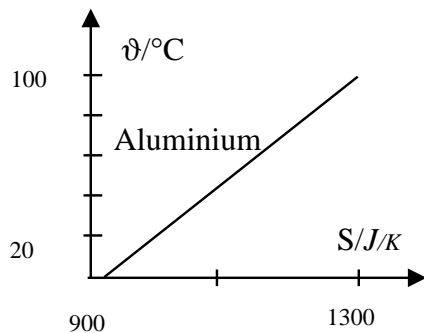
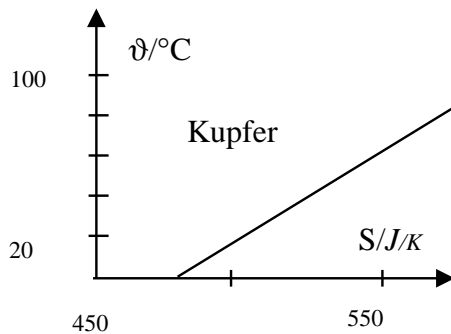
C. Aufgaben zu Entropieströmen und Energieverlusten

8. Ein Kraftwerk gibt mit der Elektrizität einen Energiestrom von 1000 MW ab. Die Temperatur des Dampfes am Eingang der Turbine beträgt 750 K , am Ausgang 310 K .
 - (a) Wie stark ist der Entropiestrom, der mit dem Kühlwasser wegfließt?
 - (b) Wie stark ist der Energiestrom, den dieser Entropiestrom trägt?
9. Überlegen Sie sich Möglichkeiten, wie man in der Natur vorkommende Entropie auf hoher Temperatur ausnutzen könnte. Diskutieren Sie auch Möglichkeiten, die Ihnen unrealistisch erscheinen.
10. Ein Elektromotor, dessen Verlust 40% beträgt, verbraucht 10 W . Wie viel Energie gibt er pro Sekunde mit ab? Wie viel Entropie erzeugt er pro Sekunde? (Die Umgebungstemperatur beträgt 300 K .)
11. Ein Generator, der einen Verlust von 8% hat, gibt mit der Elektrizität einen Energiestrom der Stärke 46 kW ab.
 - (a) Wie stark ist der Energiestrom, der über die Welle in den Generator hineinfließt?
 - (b) Wie stark ist der Verlustenergiestrom?
 - (c) Wie stark ist der Strom der erzeugten Entropie? (Die Umgebungstemperatur beträgt 300 K .)

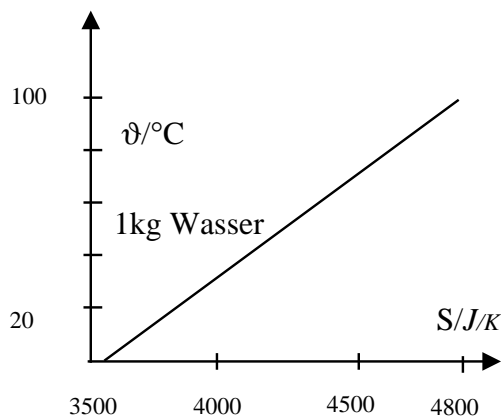
D. Aufgaben zu Entropieinhalt und Temperatur

12. Einem Kilogramm Kupfer und einem Kilogramm Aluminium mit einer Anfangstemperatur von 25°C werden je 80 J/K zugeführt.

- (a) Welches Material erwärmte sich stärker?
 (b) Um welchen Faktor unterscheiden sich die Temperaturänderungen?



13. Wieviel Entropie braucht man, um 100 l Wasser von 20°C auf 100°C zu erwärmen?



14. Ein halber Liter Wasser soll mit einem 500-W -Tauchsieder von 25°C auf 100°C erhitzt werden. Wie lange braucht man dazu?

E. Aufgaben zur gibbsschen Fundamentalforn und zu Energie- und Entropieströmen (vgl. [12], S. 159)

15. Eine Flüssigkeitsoberfläche vergrößert sich. Stellen Sie diese Energiezufuhr mathematisch dar.

16. Stellen Sie die durch eine Kraft F einem Körper der Masse m in der Zeit Δt zugeführte Energie so dar, dass die Impulsänderung Δp als extensive Größe vorkommt.

17. Berechnen Sie die erzeugten Entropieströme, wenn eine Heizwendel in Wasser
 (a) von 100°C und

(b) der Glühfaden einer Lampe mit der Temperatur $T=2500\text{ K}$ mit einer elektrischen Leistung von 100 W gespeist werden.

18. 10^8 Nebeltröpfchen von je $0,001\text{ mm}$ Durchmesser vereinigen sich zu einem einzigen Tropfen.

(a) Ist der Prozess reversibel oder irreversibel?

(b) Welche Energie wird dabei frei?

(c) Was geschieht mit dieser Energie?

(d) Welche Entropiezunahme tritt bei $T=20^\circ\text{C}$ auf?

19. Unter welchen Bedingungen kann die Entropie eines nicht abgeschlossenen Systems

(a) zunehmen

(b) abnehmen

(c) weder zunehmen noch abnehmen?

20. Unter welchen Bedingungen kann die Entropie eines abgeschlossenen Systems

(a) zunehmen

(b) abnehmen

(c) weder zunehmen noch abnehmen?

21. Zeichnen Sie das Energieflussbild und das Entropieflussbild für einen reversiblen Kreisprozess zwischen den Temperaturen $T_1=6000\text{ K}$ und $T_2=300\text{ K}$.

22. Ein Elektroofen hat die Leistung $P=6\text{ kW}$ und heizt ein Zimmer, das eine konstante Temperatur von 20°C hat. Die Ofentemperatur beträgt 70°C und die Außentemperatur 0°C . Berechnen und zeichnen Sie maßstabsgerecht Energie- und Entropieflüsse für den Fall, dass ein Zimmer

- (a) elektrisch geheizt wird
 (b) mit vorgeschalteter Wärmepumpe betrieben wird.
 (c) Welchen Entropiestrom trägt der elektrische Strom? Berechnen Sie den Leistungsfaktor.
 (d) Berechnen Sie die Leistung der Wärmepumpe.

Lösungen:

A. Aufgaben zu Energie- und Entropieströmen

1. Gegeben: $T=(273 + 20)\text{K}=293\text{K}$
 $I_S=35\text{ J/Ks}$
 Gesucht: P
 Lösung: $P=T \cdot I_S=293\text{K} \cdot 35\text{ J/Ks}$
 $=10255\text{W} \approx 10\text{ kW}$
2. Gegeben: $T=(273 + 90)\text{K}=363\text{ K}$
 $I_S = 60\text{ J/Ks}$
 Gesucht: P
 Lösung: $P=T \cdot I_S=363\text{K} \cdot 60\text{ J/Ks}$
 $=21780\text{W} \approx 22\text{ kW}$
3. Gegeben: $T=(273 + 300)\text{K}=573\text{K}$
 $P=1000\text{ W}$
 Gesucht: I_S
 Lösung: $P=T \cdot I_S \rightarrow I_S=P/T =$
 $1000\text{W}/573\text{K} = 1,7\text{ J/Ks}$
4. Gegeben: $T_A-T_B=10\text{K}$
 $I_S = 500\text{ J/Ks}$

Gesucht: P

Lösung: $P=(T_A-T_B) \cdot I_S=10\text{K} \cdot 500\text{ J/Ks}$
 $=5000\text{W}$

5. (a)

Gegeben: $T_A-T_B=25\text{K}$

$I_S = 30\text{ J/Ks}$

Gesucht: P

Lösung: $P=(T_A-T_B) \cdot I_S=25\text{K} \cdot 30\text{ J/Ks}$
 $=750\text{W}$

(b)

Gegeben: $T=(273+25)\text{K}=298\text{K}$

$I_S = 30\text{ J/Ks}$

Gesucht: P

Lösung: $P=T \cdot I_S=298\text{K} \cdot 30\text{ J/Ks}$
 $=8940\text{W}$

B. Aufgaben zur Entropieerzeugung durch Entropieströme

6. Gegeben: $P=20\text{ kW}$
 $T_1=(273-5)\text{K}=268\text{K}$
 $T_2=(273+20)\text{K}=293\text{K}$
 Gesucht: $I_{S2}, I_{S1}, I_{\text{Serzeugt}}$
 Lösung: $P=T \cdot I_S \rightarrow I_S=P/T$
- (a) $I_{S2}=P/T_2=20\text{ kW}/293\text{K}=$
 $68,3\text{ J/Ks}$
- (b) $I_{S1}=P/T_1=20\text{ kW}/268\text{K}=$
 $74,6\text{ J/Ks}$
- (c) $I_{\text{Serzeugt}} = I_{S1}-I_{S2}= 6,3\text{ J/Ks}$
7. Gegeben: $P=1000\text{ W}$
 $T_1=373\text{K}$
 $T_2=1000\text{K}$
 Gesucht: $I_{S2}, I_{S1}, I_{S1} - I_{S2}$
 Lösung: $P=T \cdot I_S \rightarrow I_S=P/T$
- (a) $I_{S2}=P/T_2=1000\text{W}/1000\text{K}=$
 1 J/Ks

- (b) $I_{S1} = P/T_1 = 1000\text{W}/373\text{K} = 2,7 \text{ J/Ks}$
- (c) $I_{S1} - I_{S2} = 1,7 \text{ J/Ks}$

C. Aufgaben zu Entropieströmen und Energieverlusten

8. Gegeben: $P = 1000 \text{ MW}$

$$T_A = 750 \text{ K}$$

$$T_B = 310 \text{ K}$$

Gesucht: I_S, P

Lösung: $T_A - T_B = 750\text{K} - 310\text{K} = 440\text{K}$

- (a) $P = (T_A - T_B) \cdot I_S \rightarrow$
 $I_S = P / (T_A - T_B) =$
 $1000 \text{ MW} / 440\text{K} = 2,27 \text{ M J/Ks}$
- (b) $P_B = T_B \cdot I_S =$
 $310\text{K} \cdot 2,27 \text{ M J/Ks} = 704 \text{ MW}$

9. Man könnte eine Wärmekraftmaschine laufen lassen

- zwischen dem Wasser eines kalten Gebirgssees und dem wärmeren Wasser eines Sees im Tal
- zwischen dem Meerwasser am Äquator und dem Meerwasser am Nordpol
- zwischen einem Eisberg, den man mit Schiffen zum Äquator geschleppt hat, und dem warmen Meerwasser
- zwischen der Erde und dem Weltraum, der eine Temperatur von 2,7K hat.

10. Gegeben: $V = 40\%$

$$P_{\text{hinein}} = 10 \text{ W}$$

$$T = 300 \text{ K}$$

Gesucht: P_{heraus}, I_S

Lösung: $V = (P_V / P_{\text{hinein}}) \cdot 100\% \rightarrow$
 $P_V = (V / 100\%) \cdot P_{\text{hinein}} =$
 $(40/100) \cdot 10\text{W} = 4\text{W}$

$$P_{\text{heraus}} = P_{\text{hinein}} - P_V = 10\text{W} - 4\text{W} = 6\text{W}$$

$$I_S = P_V / T = 4\text{W} / 300\text{K} = 0,013 \text{ J/Ks}$$

11. Gegeben: $V = 8\%$

$$P_{\text{heraus}} = 46 \text{ kW}$$

$$T = 300 \text{ K}$$

Gesucht: $P_{\text{hinein}}, P_V, I_{\text{Serzeugt}}$

Lösung: 46 kW entspricht 92% von P_{hinein}

$$P_{\text{hinein}} / P_{\text{heraus}} = P_{\text{hinein}} / 46\text{kW}$$

$$= 100\% / 92\%$$

- (a) $P_{\text{hinein}} = 46\text{kW} \cdot 100/92 = 50\text{kW}$
- (b) $P_V = P_{\text{hinein}} - P_{\text{heraus}} = 4 \text{ kW}$
- (c) $I_{\text{Serzeugt}} = P_V / T = 4000\text{W} / 300\text{K}$
 $= 13,3 \text{ J/Ks}$

D. Aufgaben zu Entropieinhalt und Temperatur

12. Gegeben: Diagramm 1

$$\Delta S = 80 \text{ J/Ks}$$

Gesucht: $\Delta T_{\text{Cu}}, \Delta T_{\text{Al}}$

Lösung: Aus den Diagrammen entnimmt man:

- (a) $\Delta T_{\text{Cu}} = 70\text{K}$ und $\Delta T_{\text{Al}} = 27\text{K}$
Das Kupfer erwärmt sich stärker.
- (b) $\Delta T_{\text{Cu}} / \Delta T_{\text{Al}} = 70\text{K} / 27\text{K} = 2,6$

13. Gegeben: Diagramm 2

$$\vartheta_1 = 20^\circ\text{C}$$

$$\vartheta_2 = 100^\circ\text{C}$$

$$m = 100 \text{ kg}$$

Gesucht: ΔS

Lösung: Aus dem Diagramm entnimmt man für 1 kg Wasser:

$$\Delta S = 1030 \text{ J/Ks für 1 kg Also:}$$

$$\Delta S = 103000 \text{ J/Ks für 100 kg.}$$

14. Gegeben: $\vartheta_1 = 25^\circ\text{C}$

$$\vartheta_2 = 100^\circ\text{C}$$

$$m = 0,5 \text{ kg}$$

$$P = 500 \text{ W}$$

Gesucht: t

$$\text{Lösung: } P = \Delta E / t \rightarrow t = \Delta E / P \rightarrow$$

$$t = c \cdot m \Delta T / P = 4180 \text{ J/kg} \cdot 0,5 \text{ kg} \cdot 75 \text{ K} / 500 \text{ J/s} = 313,5 \text{ s} = 5 \text{ min}$$

E. Aufgaben zur gibbsschen Fundamentalfarm und zu Energie- und Entropieströmen

15. Oberflächenenergie: $\Delta E = \sigma \cdot \Delta A$

16. Herleitung über die Arbeit:

$$\Delta E = F \cdot \Delta s = F \cdot v \cdot \Delta t = v \cdot F \cdot \Delta t = v \cdot \Delta p \text{ für } m = \text{const}$$

Herleitung über die kinetische Energie:

$$E = 1/2 m v^2 = p^2 / 2m \rightarrow$$

$$\Delta E / \Delta p = 2p / 2m \cdot \Delta p = v \cdot \Delta p$$

17. (a) $\Delta S = \Delta E / T \rightarrow \Delta S / \Delta t = P / T = 100 \text{ W} / 373 \text{ K} = 0,268 \text{ W/K}$

(b) $\Delta S / \Delta t = P / T = 100 \text{ W} / 2500 \text{ K} = 0,04 \text{ W/K}$

18. (a) irreversibel

(b) Oberflächenenergie: $\Delta E = \sigma \cdot \Delta A = \sigma \cdot N \cdot \pi r^2 = 2,26 \cdot 10^{-5} \text{ J}$

(c) Sie wird in die Umgebung dissipiert.

(d) $\Delta S = \Delta E / T = 7,7 \cdot 10^{-8} \text{ J/K}$

19. (a) Entropieerzeugung durch irreversible Prozesse.

(b) Nach dem Entropiesatz nicht möglich.

(c) bei reversiblen Prozessen.

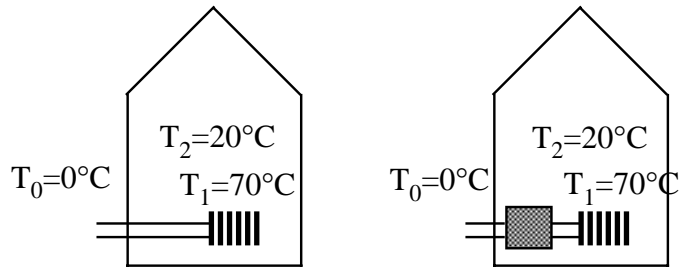
20. (a) Entropieübetragung, Entropieerzeugung

(b) Entropieübetragung

(c) Entropieübetragung

22. vgl. u.

Lösung Aufgabe 22.:

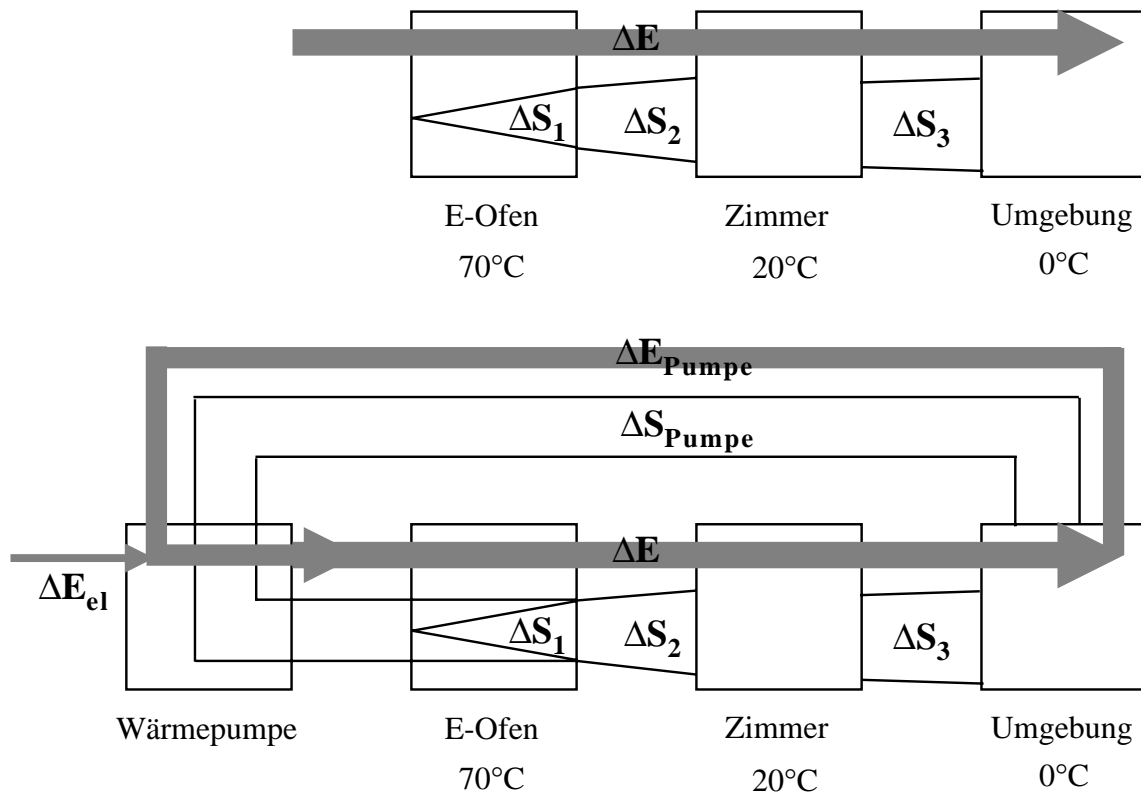


Energiefluss: $\Delta E/\Delta t = 6 \text{ kW}$

Entropiefluss: $\Delta S_1/\Delta t = \Delta E/T_1 \Delta t = 6 \text{ kW}/343 \text{ K} = 17,5 \text{ J/Ks} = \Delta S_{\text{erzeugt}}/\Delta t = 17,5 \text{ J/Ks}$

$\Delta S_2/\Delta t = \Delta E/T_2 \Delta t = 6 \text{ kW}/293 \text{ K} = 20,5 \text{ J/Ks} \rightarrow \Delta S_{\text{2erzeugt}}/\Delta t = 3 \text{ J/Ks}$

$\Delta S_3/\Delta t = \Delta E/T_0 \Delta t = 6 \text{ kW}/273 \text{ K} = 22,0 \text{ J/Ks} \rightarrow \Delta S_{\text{3erzeugt}}/\Delta t = 1,5 \text{ J/Ks}$



Leistungsfaktor: $\eta = T_1/(T_1 - T_2) = 343 \text{ K}/(343 \text{ K} - 273 \text{ K}) = 5$

$\Delta E_{\text{elektrisch}} + \Delta E_{\text{Pumpe}} = \Delta E = 6 \text{ kJ}$

$5 \cdot \Delta E_{\text{elektrisch}} = \Delta E = 6 \text{ kW} \rightarrow \Delta E_{\text{elektrisch}} = 1,2 \text{ kJ}$

} Also ist $\Delta E_{\text{Pumpe}} = 4,8 \text{ kJ}$

$\Delta S_{\text{Pumpe}} = \Delta E_{\text{Pumpe}}/T_0 = 4,8 \text{ kJ}/273 \text{ K} = 17,5 \text{ J/K}$

Reversibilität: $\Delta S_{\text{Pumpe}} = \Delta E_{\text{Pumpe}}/T_0 = \Delta E/T_1 \rightarrow \Delta E_{\text{Pumpe}} = T_0/T_1 \cdot \Delta E = 4,8 \text{ kJ}$

IV. Literatur

- [1] GERTHSEN, C. und H.O. KNESER: Physik. Ein Lehrbuch zum Gebrauch neben Vorlesungen. Berlin, Heidelberg, New York: Springer 1969.
- [2] GREHN, J. (Hrsg.): Metzler Physik. Stuttgart: J.B. Metzlersche Verlagsbuchhandlung 1988.
- [3] FALK, G. und W. RUPPEL: Energie und Entropie. Eine Einführung in die Thermodynamik. Berlin, Heidelberg, New York: Springer 1976.
- [4] HERRMANN, F. (Hrsg.): Der Karlsruher Physikkurs. Ein Lehrbuch für den Unterricht der Sekundarstufe I. Drei Bände und Gesamtband für Lehrer. Köln: Aulis 1998.
- [5] HERRMANN, F. (Hrsg.): Der Karlsruher Physikkurs. Ein Lehrbuch für den Unterricht der Sekundarstufe II. Thermodynamik. Karlsruhe: Universität 1999 (Vorabdruck).
- [6] HERRMANN, F.: Physik III. Thermodynamik. Skripten zur Experimentalphysik. Karlsruhe: Universität 1994.
- [7] FUCHS, H. U.: The Dynamics of Heat. New York, Berlin, Heidelberg: Springer 1996.
- [8] JOB, G.: Neudarstellung der Wärmelehre. Frankfurt a.M.: Akademische Verlagsgesellschaft 1972.
- [9] JOB, G.: Entropie aus molekularkinetischer Sicht. Der mathematische und naturwissenschaftliche Unterricht 8 (1984), 459-467.
- [10] FALK, G. und F. HERRMANN: Thermodynamik - nicht Wärmelehre, sondern Grundlage der Physik. 1. Teil Energie und Entropie. Konzepte eines zeitgemäßen Physikunterrichts Heft 1. Hannover: Schroedel 1977.
- [11] HERRMANN, F.: Wärmelehre. Praxis der Naturwissenschaften-Physik 6(1993), 17-24.
- [12] SCHREINER, J. und W. SCHREINER: Anschauliche Thermodynamik. Frankfurt a.M; Berlin; München: Diesterweg, 1983.
- [13] STAHL, A.: Die Ökologie als Fundgrube für Anwendungen des Entropiegesetzes. Praxis der Naturwissenschaften-Physik 8(1997), 21-27.
- [14] BADER, F.: Entropie Herrin der Energie. Synergetik am Dynamo. Hannover: Schroedel 1993.

V. Anhang

- A. SCHWARZE, H.: Aufgabenvorlagen Teil 3: Temperaturdifferenz und Wärmestrom. Praxis der Naturwissenschaften Physik 8(1994), 28-33.

© Aulis Verlag, Köln

- B. DITTMANN, H. und W.B. SCHNEIDER: Der Wärme auf der Spur - Ein Beitrag zur Wärmelehre in der Sekundarstufe I. Der mathematische und naturwissenschaftliche Unterricht 7(1992), 397-403.

© Ferd. Dümmler Verlag, Bonn

Wir danken den Verlagen für die erteilte Abdruckerlaubnis.

Niemand bezweifelt, dass Energie und Entropie fundamentale Begriffe der Physik, ja sogar aller Naturwissenschaften sind. Aus fachlicher Sicht gehören beide Begriffe in den Kanon naturwissenschaftlicher Grundbildung. Darüber hinaus haben sie ein großes didaktisches Potenzial. Physikunterricht darf nur dann darauf verzichten, wenn es unüberwindbare didaktische Hürden gibt.

Während das Energiekonzept in zunehmendem Maße Eingang in den Physikunterricht fand, blieb dies dem Entropiekonzept versagt, erwies sich der Entropiebegriff für die Schule doch als sehr sperrig. Der lange Weg zur Entropie über die traditionelle Thermodynamik war zu weit und zu beschwerlich. Allzuleicht versickerte der Bildungsgelbst auf dem langen Marsch zum Entropiebegriff.

Erst neuere didaktische Konzepte ermöglichen einen fachlich abgesicherten kurzen Weg zur Entropie, der in dieser Handreichung beschrrieben wird. Dadurch wird es möglich, das Energie- und Entropiekonzept in einem relativ kurzen Zeitansatz anzugehen. Nur auf diesem Hintergrund ist der Baustein Energie und Entropie zu sehen, der sich an dem Karlsruher Physikkurs orientiert. Der lange Weg zur Entropie über die Thermodynamik ist dabei, unter Hinzunahme entsprechender Wahlbausteine, im Lehrplan nicht ausgeschlossen.

Die Handreichung umfasst einen didaktischen Teil, einen unterrichtspraktischen Teil und enthält etliche Unterrichtsmaterialien.