

Entropie lehren mit Spaß



Regina Rüffler, Georg Job



c/o. Institut für Physikalische Chemie,
Universität Hamburg

64. MNU-Tagung Bremerhaven

Bremerhaven, 20.11.2017

Gliederung

1. Einführung – Entropie
2. Makroskopische Eigenschaften der Entropie
3. Entropieübertragung
4. Entropie messen
5. Anwendung des Entropiebegriffes
6. Ausblick

1. Einführung – Entropie



Einführung

Auch, wenn der Nutzen der Thermodynamik außer Frage steht, so gilt sie doch als schwer zu erlernen. Gerade auch eine der grundlegenden Größen, die **Entropie S** , meist beschrieben als abstrakter mathematischer Ausdruck,



$$S(p, T) = S_0 + \int_{p_0, T_0}^{p, T} \frac{dQ_{\text{rev}}}{T},$$

der Wärme und Temperatur umfasst, steht in dem Ruf, besonders unanschaulich zu sein.

Daher kann sie als eine Art „schwarzes Schaf“ der thermodynamischen Größen angesehen werden.

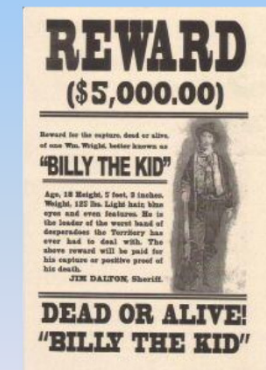


Entropie als Grundbegriff

Es gibt jedoch eine einfachere Herangehensweise an diese Größe ohne eine die SchülerInnen oft abschreckende mathematische „Überfrachtung“.

~~$$S(p, T) = S(p_0, T_0) + \int_{p_0, T_0}^{p, T} \frac{dQ_{\text{rev}}}{T}$$~~

Wir schlagen vor, S direkt als ein in Materie verteiltes, mehr oder weniger bewegliches Etwas einzuführen, das zunächst durch seine wichtigsten und leicht erkennbaren Merkmale charakterisiert wird wie eine gesuchte Person durch einen „Steckbrief“.



Diese *phänomenologische Definition* wird ergänzt durch die Angabe eines direkten Messverfahrens, eine Vorgehensweise, wie sie bei verschiedenen Basisgrößen wie Länge, Zeit, Masse üblich ist.

Anwendung

Die vorgeschlagene Herangehensweise erlaubt es, die Größe unmittelbar einzusetzen, um praktisch verwertbare Ergebnisse zu erzielen. Da keine speziellen Vorkenntnisse erforderlich sind, ist sie selbst für den Anfängerunterricht interessant.

Eine Vielzahl von ausgewählten Demonstrationsexperimenten soll helfen, das Interesse der SchülerInnen zu wecken, das Verständnis zu vertiefen und eine Brücke zur Alltagserfahrung zu schlagen.



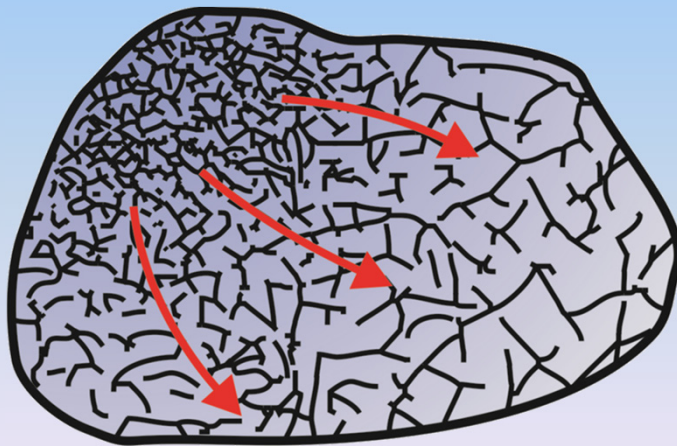
2. Makroskopische Eigenschaften der Entropie



“Steckbrief” der Entropie

Entropie kann aufgefasst werden als

- ein in Materie verteiltes,
- mehr oder weniger bewegliches, gewichtsloses Etwas
- mit der besonderen Eigenschaft, erzeugbar, aber nicht zerstörbar zu sein.



Diese Annahmen erlauben es uns, die Entropie als eine stoffähnliche Größe zu beschreiben, die in analoger Weise wie die elektrische Ladung vermittelt werden kann.

“Steckbrief” der Entropie

Entropie verändert den Zustand eines Objektes in auffälliger Weise.

Enthält es wenig Entropie, empfindet man es als *kalt*.

Enthält dasselbe Objekt mehr oder sehr viel Entropie, empfindet man es als warm oder sogar *heiß*.

Wenn die Entropiemenge in ihm ständig erhöht wird,

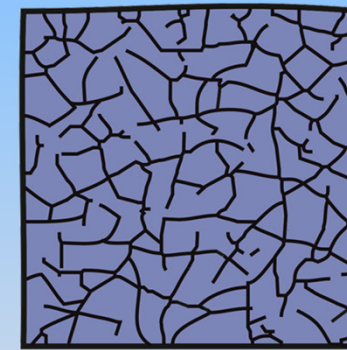
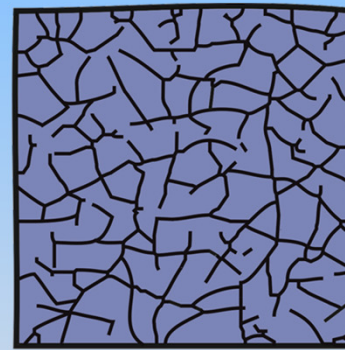
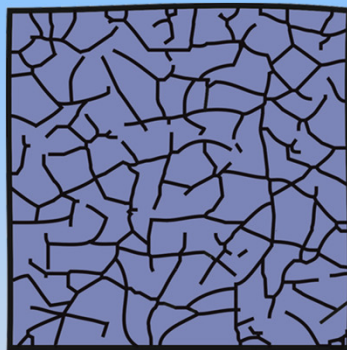
- beginnt es zu glühen,
- dann zu schmelzen und
- schließlich zu verdampfen.

Entropie ist bei allen Wärmeeffekten im Spiele, sie kann als deren eigentliche Ursache angesehen werden.



“Steckbrief” der Entropie

1. Jedes Objekt *enthält* mehr oder weniger Entropie.
Nach Art, Größe und Zustand gleiche Objekte enthalten gleiche Entropiemengen.



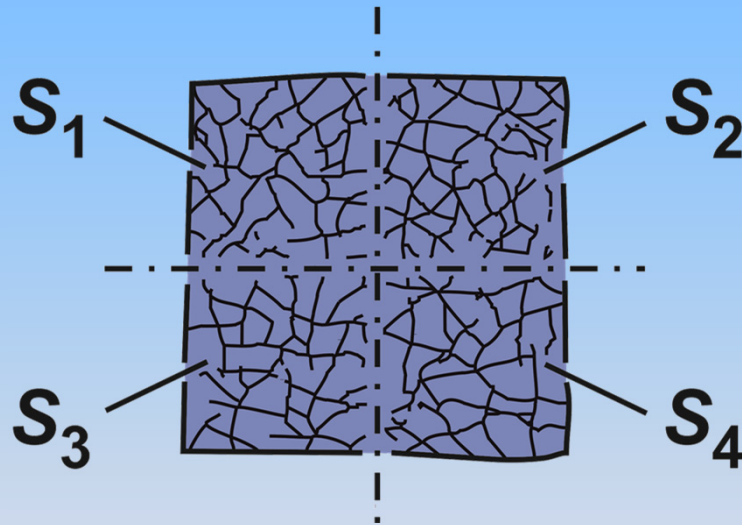
$$S_1 = S_2 = S_3$$

Mit anderen Worten:

“Die Entropie ist eine **Zustandsgröße**.”

“Steckbrief” der Entropie

2. Die Entropie eines zusammengesetzten Objekts ist die Summe der Entropien seiner Teile.



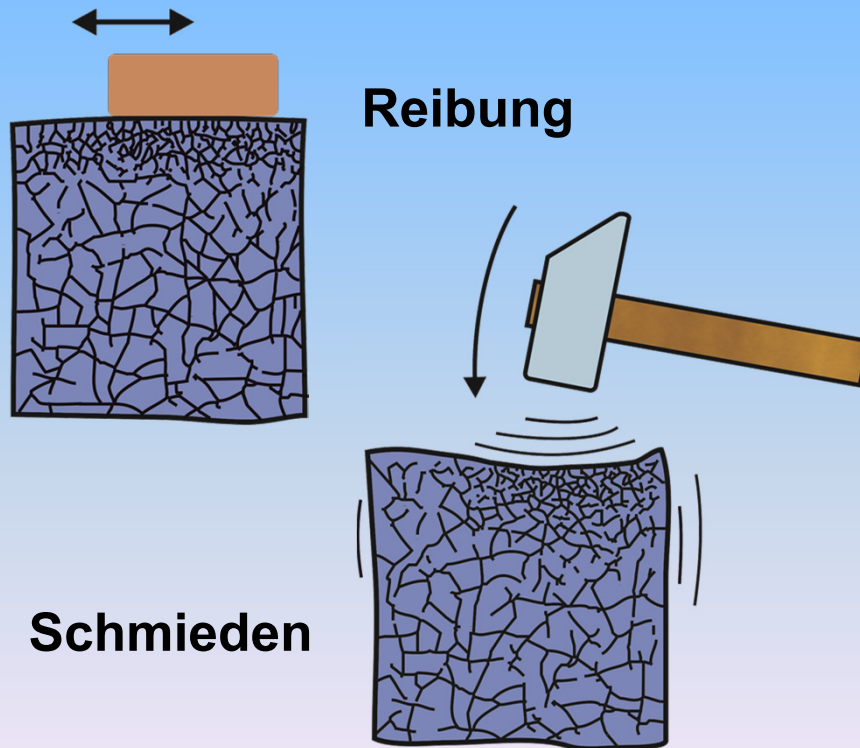
$$S_{\text{ges}} = S_1 + S_2 + S_3 + S_4$$

Mit anderen Worten:

“Die Entropie ist eine *extensive Größe*”.

“Steckbrief” der Entropie

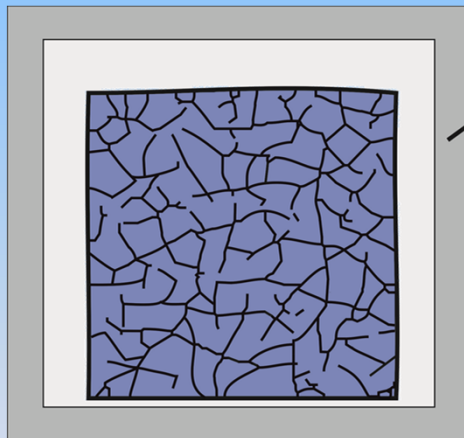
3. Entropie kann durch vielerlei Prozesse *erzeugt* werden, *aber* nicht zerstört.



“Steckbrief” der Entropie

4. Entropie kann nicht durch thermisch isolierende Wände fließen.

Fazit: In einem isolierten Objekt kann die Entropie zwar zunehmen, aber nie abnehmen; allenfalls bleibt ihre Menge erhalten.



Isolierung

$$\Delta S \geq 0$$

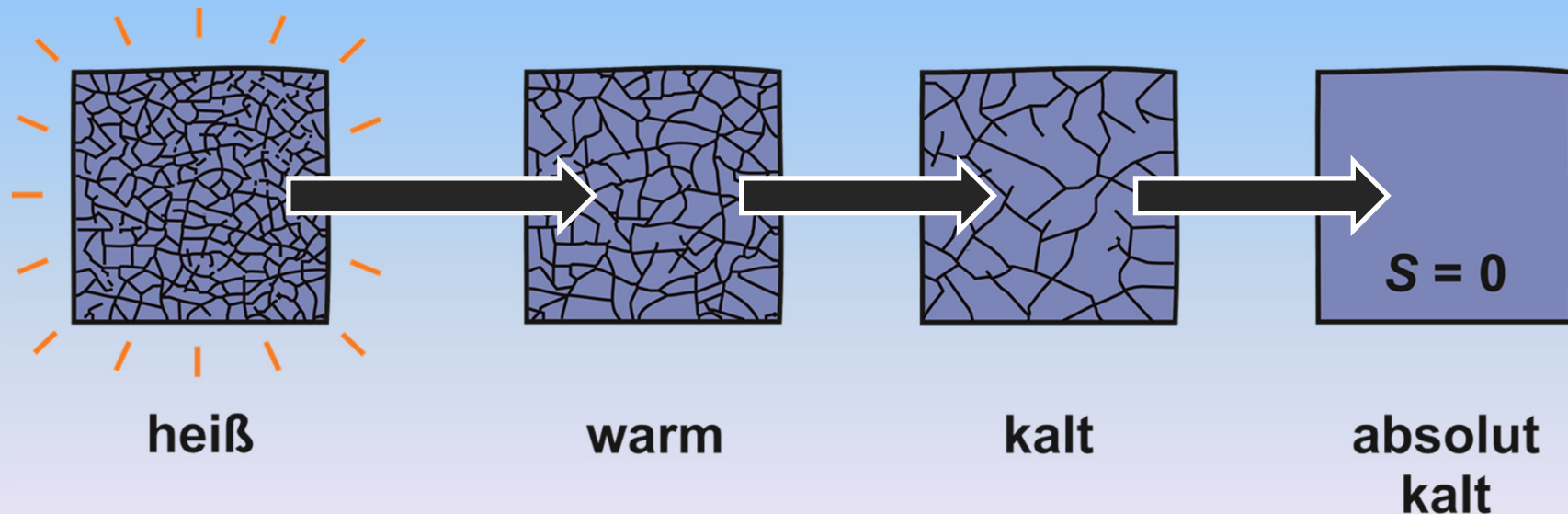
auch bekannt als

“2ter Hauptsatz der Thermodynamik”

“Steckbrief” der Entropie

5. Als *Hauptwirkung* steigender Entropie wird das Objekt *wärmer* (vgl. Experiment zum Schmieden).

Von sonst gleichen Gegenständen ist der entropiereichste der wärmste, ein entropieleerer absolut kalt.

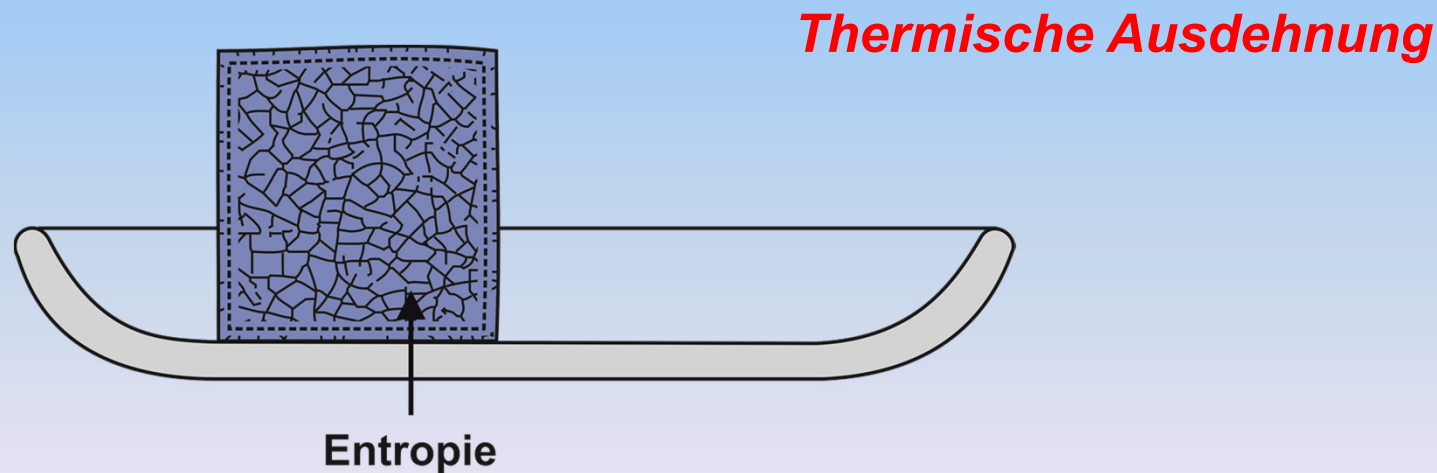


Entropie fließt freiwillig stets vom wärmeren zum kälteren Objekt.

“Steckbrief” der Entropie

6. Ein Entropiezuwachs kann auch zahlreiche **Nebeneffekte** verursachen.

Einer der wichtigsten Effekte ist eine *Änderung des Volumens*:
Gewöhnlich dehnt sich das Objekt aus.

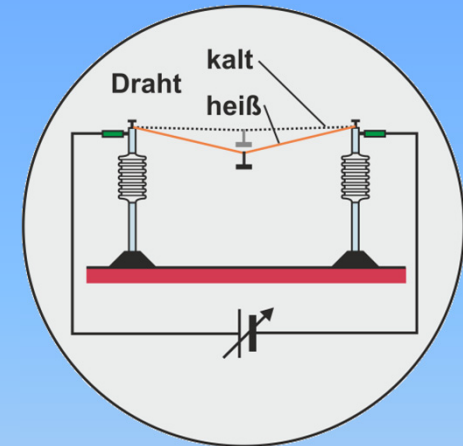


Ausdehnung eines stromdurchflossenen Drahtes

1

Versuchsdurchführung:

Zuerst wird die Stromstärke langsam heraufgeregelt. Anschließend wird sie wieder heruntergeregelt.



Ausdehnung eines stromdurchflossenen Drahtes

1

Versuchsdurchführung:

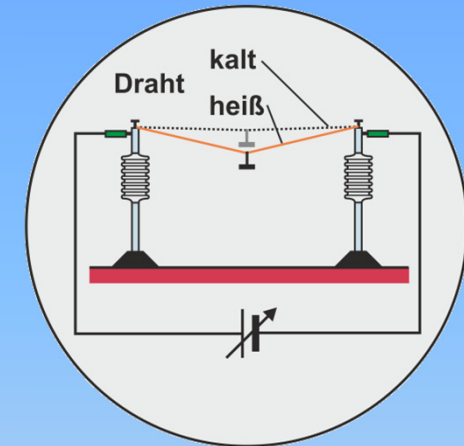
Zuerst wird die Stromstärke langsam heraufgeregelt. Anschließend wird sie wieder heruntergeregelt.

Beobachtung:

Mit wachsender Stromstärke sinkt das Gewicht in der Drahtmitte langsam nach unten. Bei höheren Stromstärken beginnt der Draht auch zu glühen. Bei fallender Stromstärke steigt das Gewicht wieder nach oben.

Erklärung:

Durch den Stromfluss wird Entropie erzeugt. Als **Hauptwirkung** des Entropiezuwachses wird der Draht wärmer und beginnt schließlich zu glühen, als **Nebeneffekt** dehnt er sich merklich aus, leicht beobachtbar durch die Absenkung des Gewichtes. Wird die Stromstärke heruntergeregelt, so kühlt der Draht ab und spannt sich wieder.



„Bimetallische Schnappscheibe“

2

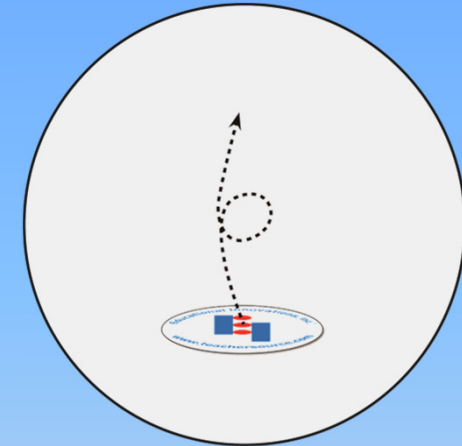


Versuchsdurchführung:

Die Scheibe wird erwärmt, in die „umgekehrte“ Richtung gebogen und danach auf den Tisch gelegt.

Beobachtung:

Nach kurzer Zeit kehrt die Scheibe plötzlich in ihren Ausgangszustand zurück und springt dabei hoch in die Luft.



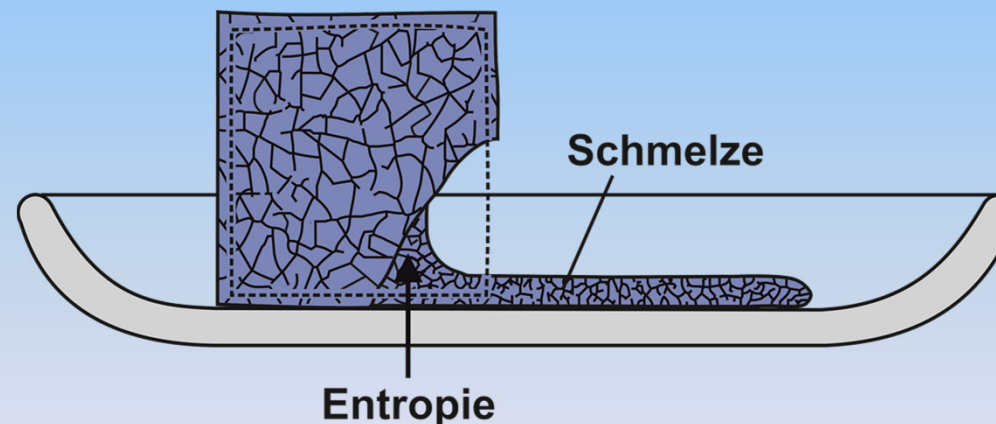
Erklärung:

Die Scheibe besteht aus zwei Schichten unterschiedlicher Metalle (sog. „Bimetall“). Erhöht man die Entropie in der Scheibe, so dehnen sich die beiden Metalle unterschiedlich stark aus und oberhalb einer Temperatur von ca. 310 K verbleibt die Scheibe daher in der „umgekehrten“ Position. Kühlt sich die Scheibe ab, so klappt sie nach kurzer Zeit plötzlich in den Ausgangszustand zurück.

“Steckbrief” der Entropie

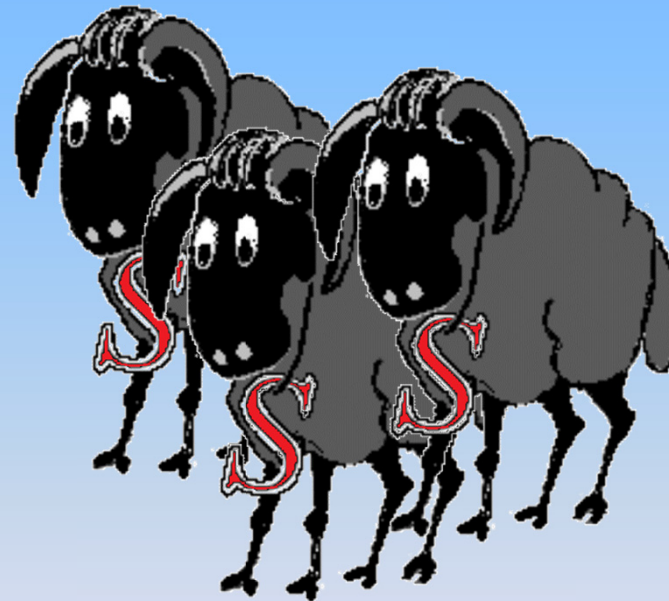
7. Wird die Entropie kontinuierlich erhöht, so **schmilzt** die Substanz schließlich (*Wechsel des Aggregatzustandes*).

Bei der Schmelztemperatur sammelt sich die hinzukommende Entropie in der entstehenden Flüssigkeit. Die Schmelze ist folglich entropiereicher als der gleich warme Feststoff.



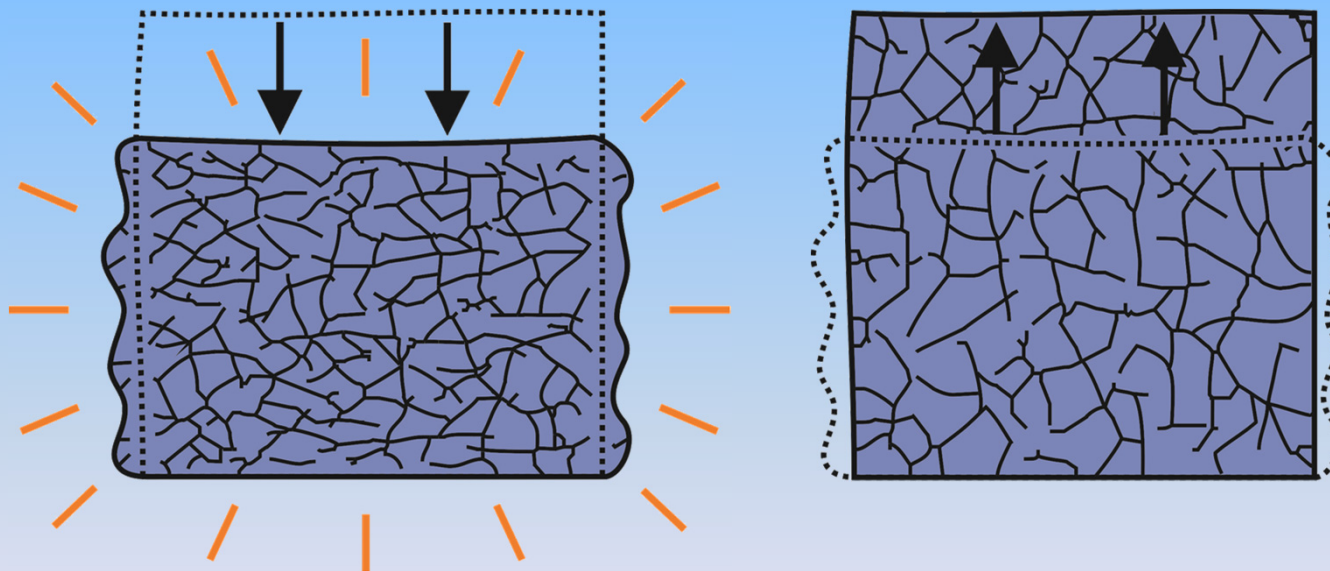
Wechselt eine Substanz an ihrem Schmelzpunkt vollständig vom festen in den flüssigen Zustand über, dann nimmt die Entropie im Innern um einen ganz **bestimmten** Betrag zu.

3. Entropieübertragung



Entropie und Volumen

Ein Stoff, der sich bei Entropiezufuhr ausdehnt, wird umgekehrt beim Verdichten wärmer und beim Ausdehnen kälter (LE CHATELIERSches Prinzip).



Diese Vorgänge beim Verdichten und Dehnen lassen sich besonders gut bei leicht zusammendrückbaren Stoffen wie Gasen beobachten.

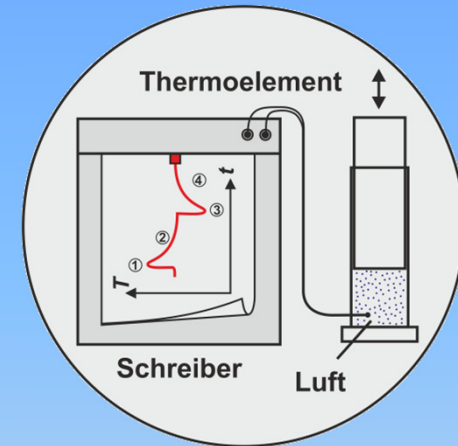
Entropieaustausch durch Verdichten

3



Versuchsdurchführung u. Beobachtung:

Der Kolben wird schnell in den Zylinder mit eingebautem Thermoelement gepresst. Man beobachtet einen Temperaturanstieg. Der Kolben wird solange festgehalten, bis die Temperatur wieder den Ausgangswert erreicht hat, und dann losgelassen. Die Expansion ist mit einem Temperaturabfall verbunden.

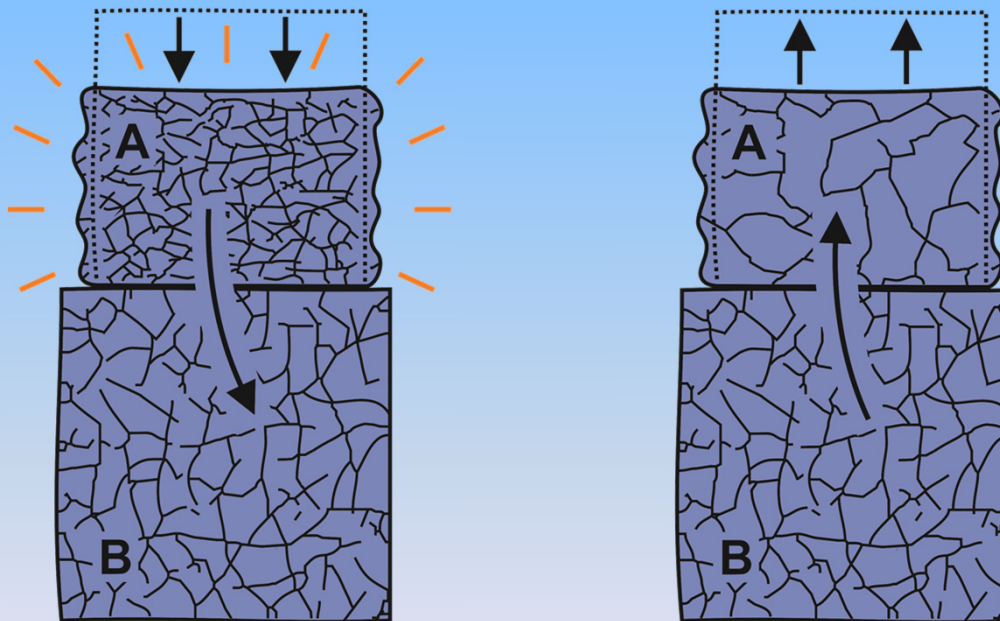


Erklärung:

Beim Verdichten der Luft wird das Gas wärmer (Phase 1). Wartet man etwas, dann kühlt sich das Gas wieder auf den Ausgangswert ab, da es gegen die Zylinderwände nicht isoliert ist (Phase 2). Die Expansion des Kolbens führt zu einer weiteren Abkühlung (Phase 3). Beim anschließenden Warten fließt jedoch wieder Entropie zu und das Gas wärmt sich auf (Phase 4).

Gelenkter Austausch von Entropie

Ein Objekt A in Kontakt mit einem gleich warmen Object B gibt Entropie an B ab, wenn man es zusammenpresst ...
und nimmt Entropie aus B auf, wenn es sich ausdehnt.

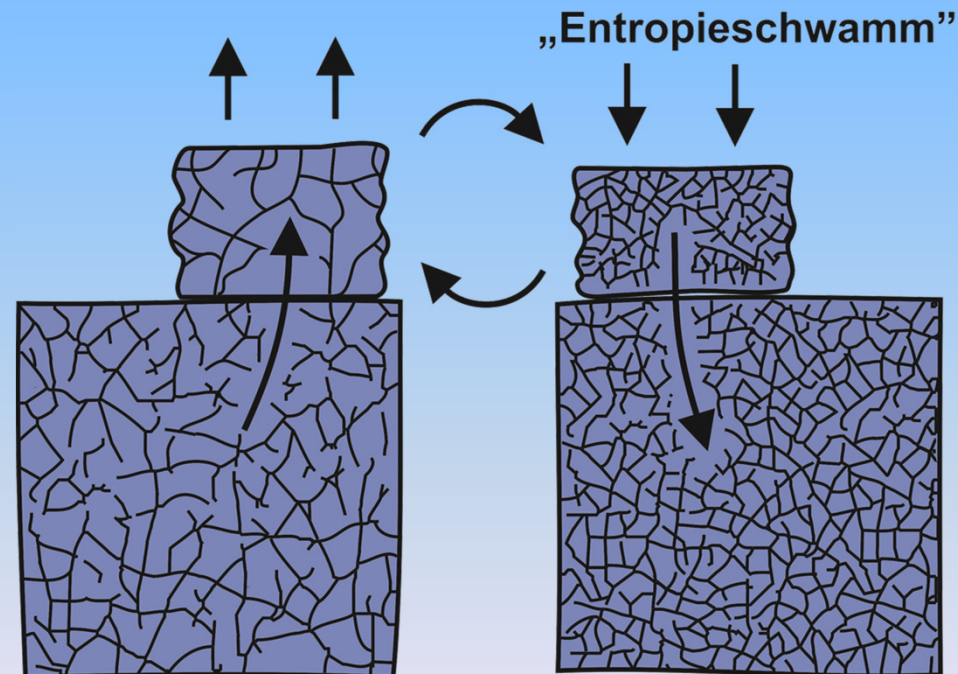


Daher kann das Objekt A als eine Art „Entropie-schwamm“ aufgefasst werden.



Entropieübertragung

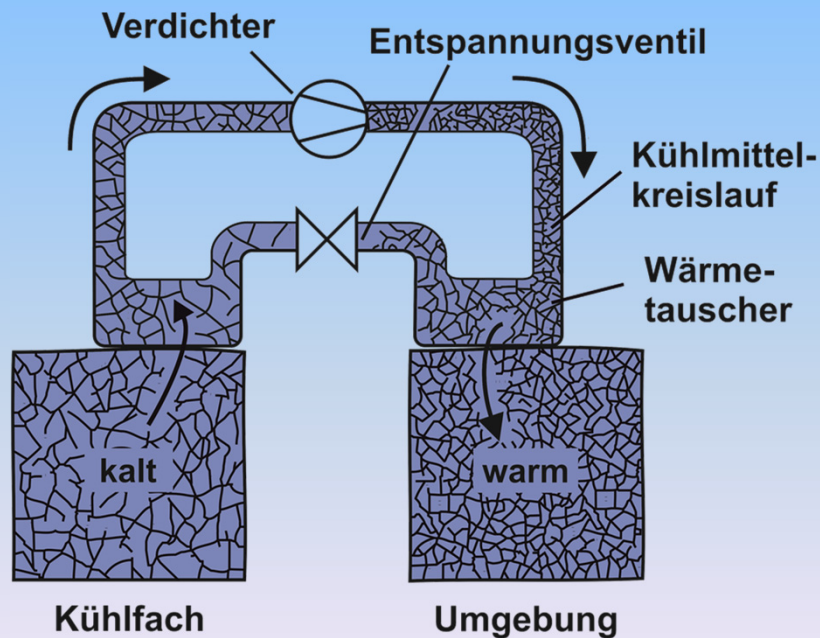
Solch ein „Entropieschwamm“ kann benutzt werden, um Entropie von einem kalten auf ein heißes Objekt zu übertragen (das heißt gegen den Temperaturgradienten).



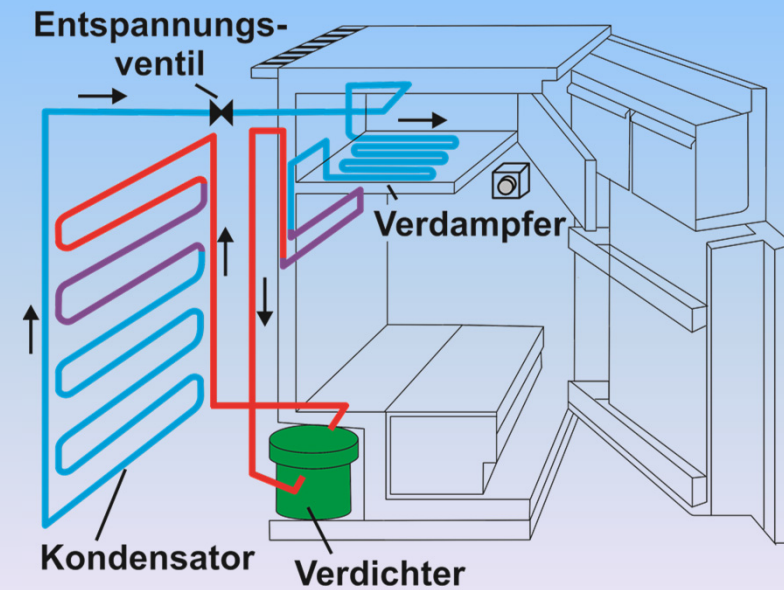
Um Entropieerzeugung zu vermeiden, müssen alle Schritte *reversibel* sein.

Kühlschrank

Jeder Kühlschrank pumpt auf diese Weise Entropie aus dem Kühlfach in die warme Zimmerluft. Das niedrigsiedende Kühlmittel (in der Funktion des „Entropieschwammes“) zirkuliert dabei in einem geschlossenen Kreislauf.



Funktionsprinzip



Technische Realisierung

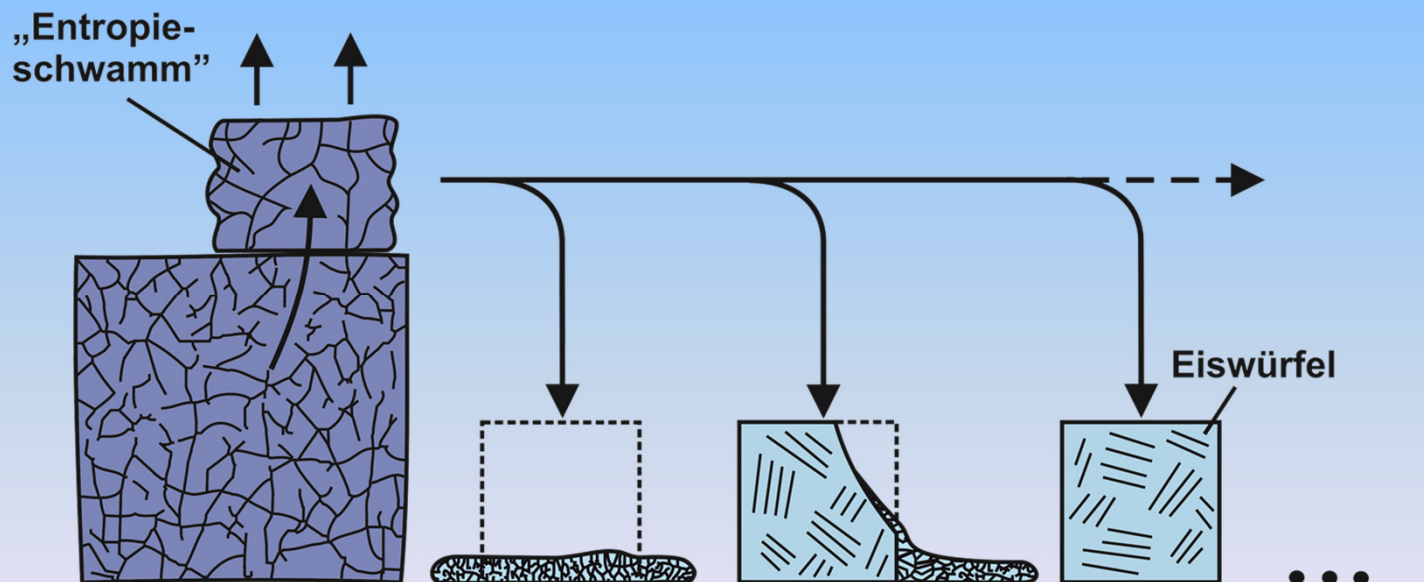
4. Entropie messen



Entropie messen

Die Übertragbarkeit der Entropie eröffnet eine Möglichkeit, die Menge, die davon in einem Körper enthalten ist, direkt zu messen.

Als Einheit kann beispielsweise die Entropiemenge dienen, die nötig ist, um einen Eiswürfel zu schmelzen.

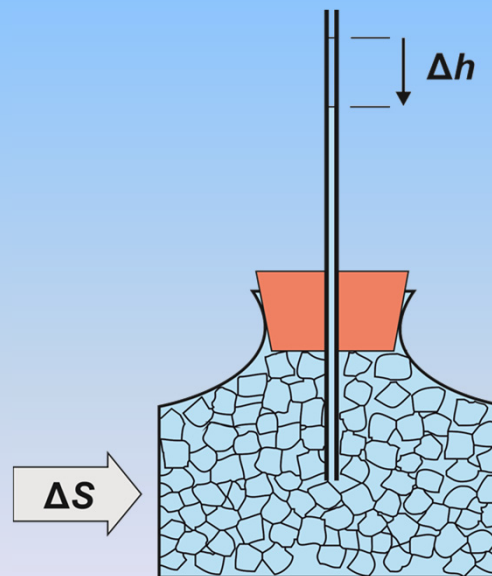


Die Entropiemenge, die einen Eiswürfel von $0,893 \text{ cm}^3$ schmilzt, entspricht genau der SI-kompatiblen Einheit 1 Ct (Carnot) (= 1 J/K).

Eis-Wasser-Flasche

Statt Eiswürfel zu zählen, ist es einfacher und genauer, die beim Schmelzen entstandene Wassermenge als Maß zu verwenden.

Eine Flasche mit aufgesetzter Kapillare, die mit einem Eis-Wasser-Gemenge gefüllt ist, kann als „Entropiemessgerät“ genutzt werden.



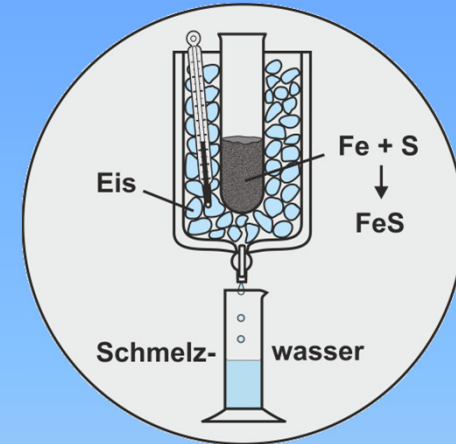
Da Schmelzwasser ein kleineres Volumen als Eis einnimmt, kann der Volumenschwund zur Messung der zugeführten Entropie dienen.

Eiskalorimeter

4

Versuchsdurchführung:

Die Eisen-Schwefel-Mischung im Reagenzglas wird gezündet.



Eiskalorimeter

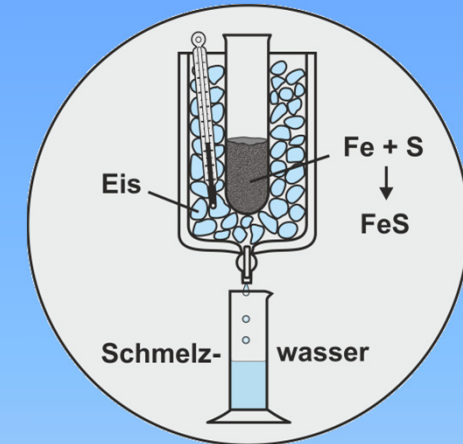
4

Versuchsdurchführung:

Die Eisen-Schwefel-Mischung im Reagenzglas wird gezündet.

Beobachtung:

Die Mischung reagiert unter dunkelrotem Leuchten und Entwicklung schwefelhaltiger Dämpfe. Ein Teil des Eises schmilzt; seine Temperatur bleibt konstant.



Erklärung:

Eisen reagiert mit Schwefel zu Eisensulfid:



Bei dieser Umsetzung wird eine beträchtliche Menge an Entropie abgegeben. Aus dem Volumen an Wasser, das im Messzylinder aufgefangen wurde, kann auf diese Entropiemenge zurückgeschlossen werden (0,82 mL Schmelzwasser entsprechen der Entropieeinheit).

5. Anwendung des Entropiebegriffes



Erste Anwendungen

Um einen Eindruck von den Werten der Entropie zu bekommen, betrachten wir einige Beispiele.

Ein Stück Tafelkreide enthält ca. 8 Ct (J/K) an Entropie. Bricht man es in der Mitte auseinander, dann enthält jede Hälfte ca. 4 Ct, da es sich bei der Entropie um eine extensive Größe handelt.



Ein Eisenwürfel von 1 cm^3 enthält ebenfalls ca. 4 Ct, obwohl das Stück deutlich kleiner ist; während in 1 L Zimmerluft nur ca. 8 Ct! enthalten sind.

Drückt man die Luft auf $1/10$ des Volumens zusammen, dann wird sie glühend heiß.

Pneumatisches Feuerzeug

5



Versuchsdurchführung:

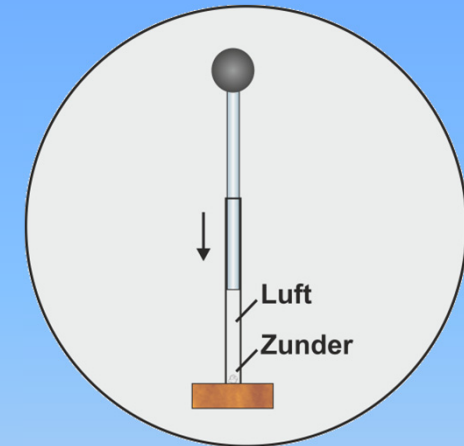
Der Kolben des Feuerzeugs wird kräftig und schnell nach unten gedrückt.

Beobachtung:

Der Zunder (z. B. ein kleiner Wattebausch) flammt auf.

Erklärung:

Wird eine bestimmte Gasmenge wie z. B. Luft schnell komprimiert, so wird sie glühend heiß (*adiabatische Kompression*). Dieser Effekt kann ausgenutzt werden, um einen Zunder zum Glühen zu bringen. Dabei wirkt der in der Luft enthaltene Sauerstoff gleichzeitig als Oxidationsmittel.



Dieselmotor

Dieser Effekt wird auch in Dieselmotoren genutzt, um das Treibstoff-Luft-Gemisch zu zünden.



Entropie und Temperatur

Die Temperatur kann als eine Art thermische „Spannung“, die auf der Entropie lastet, angesehen werden und damit als Ursache für einen Entropiefluss.

Beispiel:

hohe thermische „Spannung“
warm



Ausbreitung der Entropie
in einem Objekt

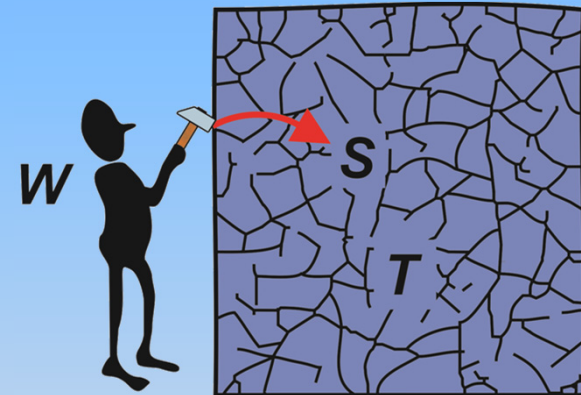
geringe thermische „Spannung“
kalt

Entropie und Temperatur

Es kostet Energie, Entropie gegen diese „Spannung“ in ein Objekt zu drücken (z.B. beim Zusammendrücken des „Entropieschwamms“) (oder in dem Objekt zu erzeugen).

Je höher die „Spannung“, d. h. je höher die Temperatur ist, desto größer ist die aufzuwendende Energie.

Ebenso muss der Energieaufwand wachsen, je größer die zugeführte oder erzeugte Entropiemenge ist.



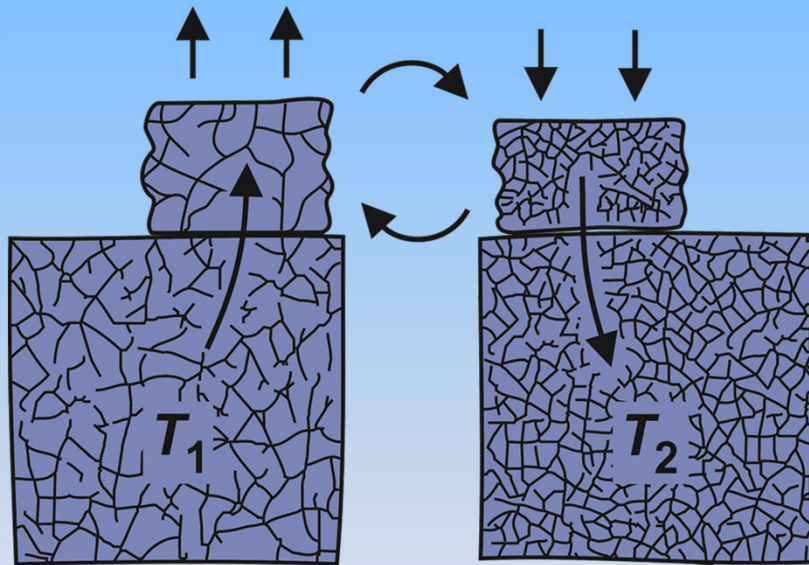
$$\curvearrowright W = T \cdot S$$

Da sowohl Energie als auch Entropie messbare Größen sind, hat die „thermodynamische“ Temperatur T einen wohldefinierten Wert.

$$\curvearrowright T = \frac{dW}{dS}$$

Energie zur Entropieübertragung

Die Energieaufwand $W_{\ddot{u}}$ für die Übertragung einer Entropiemenge $S_{\ddot{u}}$ von einem Objekt mit niedrigerer Temperatur T_1 auf ein Objekt mit höherer Temperatur T_2



- ist gleich der Energie $W_2 = T_2 \cdot S_{\ddot{u}}$, die nötig ist, um die Entropie in das wärmere Objekt zu drücken
- minus der Energie $W_1 = T_1 \cdot S_{\ddot{u}}$, die man gewinnt, wenn man die Entropie dem kälteren Körper entzieht.



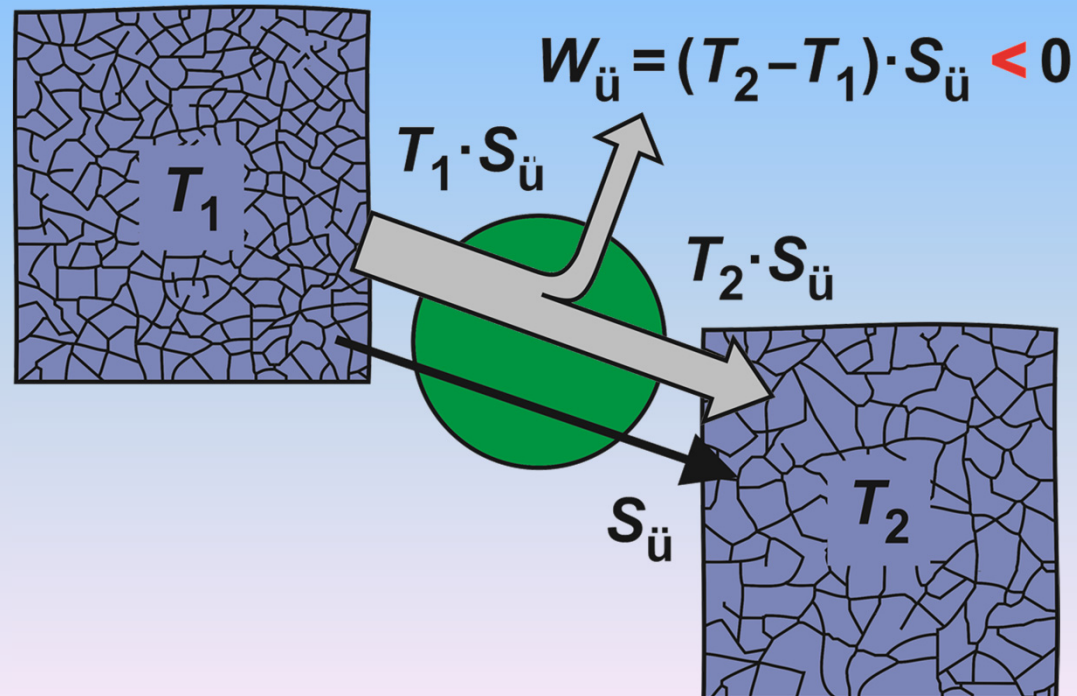
$$W_{\ddot{u}} = (T_2 - T_1) \cdot S_{\ddot{u}} > 0$$

Wärmepumpe (z.B. Kühlschrank)

Wärmekraftmaschinen

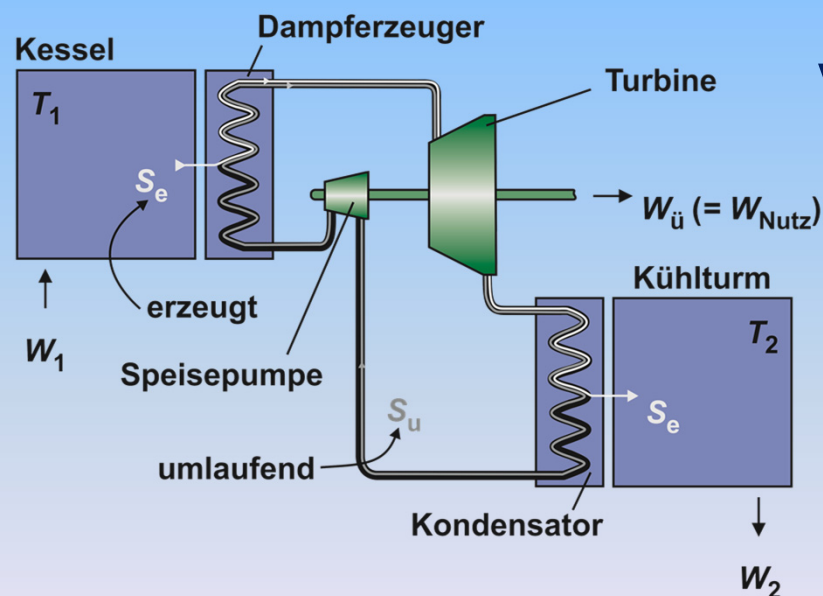
In einer **Wärmekraftmaschine** hingegen wird Entropie von einem Objekt mit höherer Temperatur T_1 auf ein Objekt mit niedrigerer Temperatur T_2 übertragen.

Dabei wird die Energie $W_{\dot{u}}$ gewonnen.

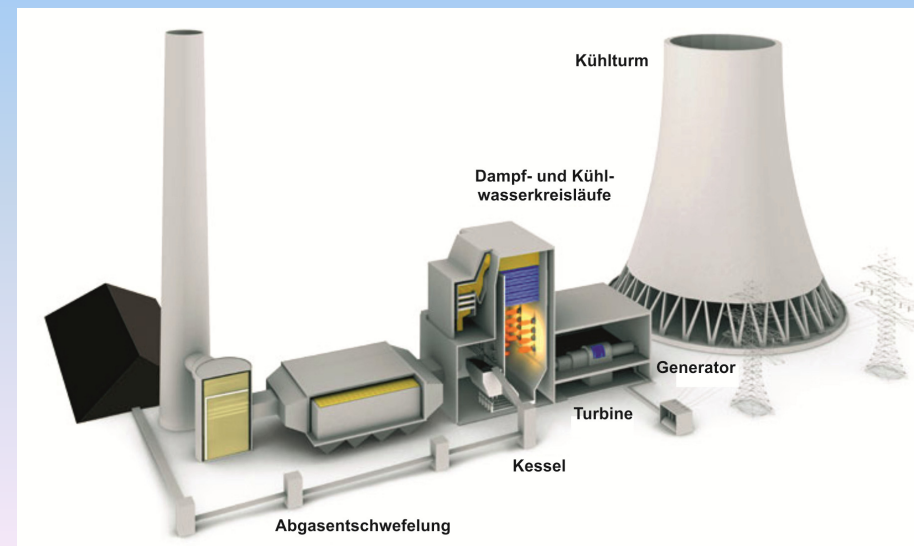


Dampfkraftwerk

Vereinfachend wird in einem Dampfkraftwerk die Energie $W_{\dot{u}}$ genutzt ($= W_{\text{Nutz}}$), die bei der Übertragung der Entropie aus dem Dampfkessel in den Kühlturm gewinnbar ist, wobei die Entropie selbst erst unter dem Energieaufwand W_1 im Kessel erzeugt werden muss.



Vereinfachtes Schema



Knatterboot

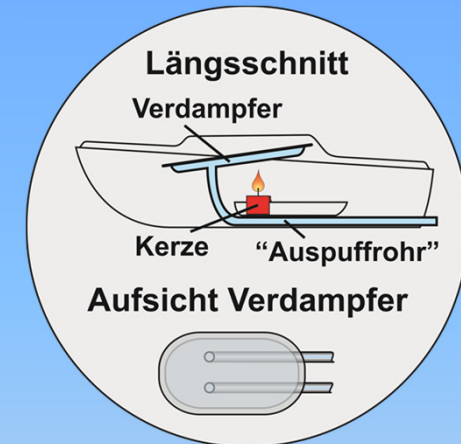
6

Versuchsdurchführung:

Der Verdampfer im Boot wird mit Wasser gefüllt. Anschließend wird die Kerze angezündet und in das Boot eingesetzt.

Beobachtung:

Nach kurzer Zeit fährt das Boot knatternd los.



Erklärung:

Das Knatterboot wird von einem sehr einfachen „Wärmemotor“ ohne bewegliche Teile angetrieben. Die freiwerdende Energie wird zum Antrieb des Bootes genutzt.

Niedertemperatur-Stirlingmotor

7



Versuchsdurchführung:

Die Tasse wird mit heißem Wasser gefüllt und der Stirlingmotor aufgesetzt. Nach kurzer Wartezeit wird das Schwungrad angestoßen.

Beobachtung:

Der Stirlingmotor läuft, solange das Wasser in der Tasse ausreichend warm ist.



Erklärung:

Stirlingmotoren nutzen eine Temperaturdifferenz für den Antrieb. Die Verdrängung der Luft vom heißen in den kalten Bereich des Motors und umgekehrt mit Hilfe der Verdrängerplatte führt zu einer periodischen Kompression und Expansion des Gases, die wiederum eine periodische Bewegung des Arbeitskolbens zur Folge hat.

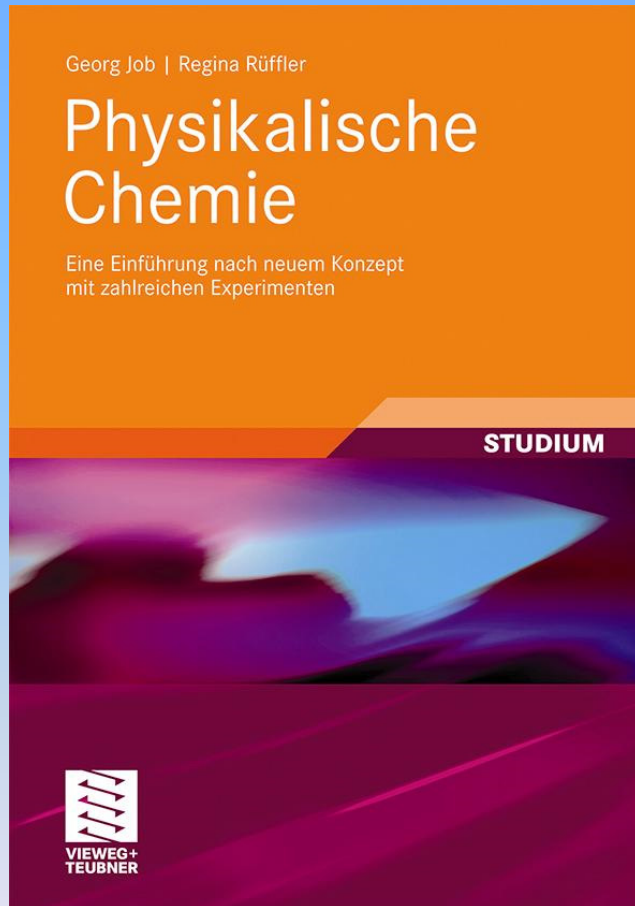
Niedertemperatur-Stirlingmotor

Prinzip des Motors (3D-Animation)



6. Ausblick





Georg Job, Regina Ruffler

Physikalische Chemie

**Eine Einführung nach neuem Konzept
mit zahlreichen Experimenten**

Studienbücher Chemie

Springer-Verlag

584 Seiten, fast 400 Abbildungen

ISBN 978-3835100404

auch in elektronischer Form verfügbar



**Vielen Dank für
Ihre Aufmerksamkeit.**

Weitere Informationen

(Versuchsbeschreibungen, Videos etc.):

www.job-stiftung.de