

Thermodynamik mit Entropie und Temperatur

michael@kit.edu



1 Wärme und Entropie

2 Entropie und Temperatur

3 Entropiestrom

4 Entropie und „zweiter Hauptsatz“

5 Entropie und Energie

6 Messen von Entropiemengen

Entropie ist ein schwieriger Begriff

Hüfner und Löhken – MNU Juni 2011

Das Konzept der Entropie ist ohne Zweifel eins der
okkultesten Konzepte der Physik

H. Heuser – Unendlichkeiten 2010

If you can live with entropy you can live with anything.

amerikanischer Cartoonist zitiert v. H.Heuser

Entropie kann man auf eine Art einführen
“**which every schoolboy could understand**”
(Callendar, 1911).



Callendar
(1863-1930)

Die physikalische Größe “Wärme” ist eine Austauschgröße (Prozessgröße).

Das Wort “Wärme” steht in der Umgangssprache für etwas, das man irgendwo hinein tut während man es erwärmt.

Die Bedeutung der physikalischen Größe “Wärme” passt nicht zu dem, was Nicht-Physiker darunter verstehen.

Die Bedeutung der physikalischen Größe “Entropie” passt sehr gut zu dem, was Nicht-Physiker unter Wärme verstehen.

Ersetze in einem deutschen Satz (Nichtphysiker, SchülerIn) durch Entropie und der Satz bleibt (auch für Physiker) richtig

Welche Größe drückt das „das wie warm sein sein“ aus?

S, T

Q, φ

p, v

1 Wärme und Entropie

2 Entropie und Temperatur

3 Entropiestrom

4 Entropie und „zweiter Hauptsatz“

5 Entropie und Energie

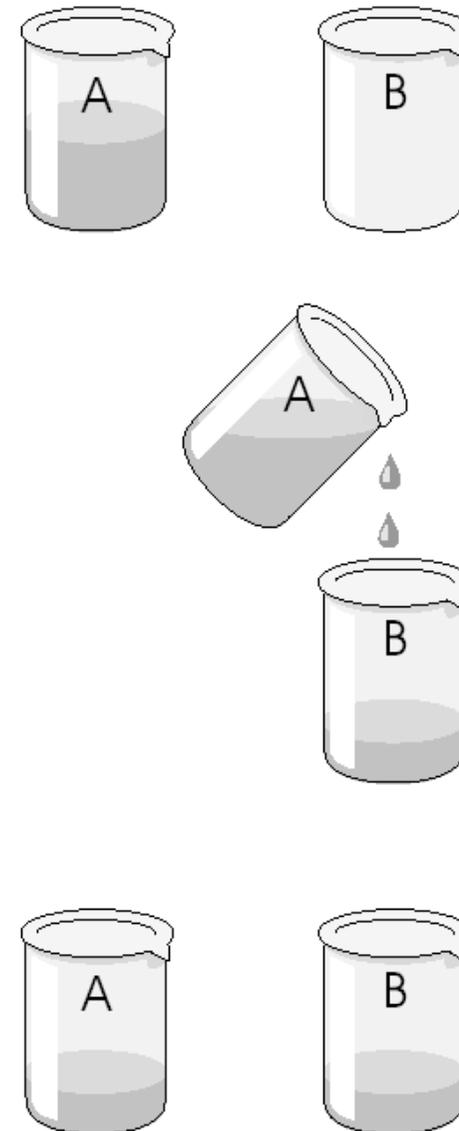
6 Messen von Entropiemengen

2 Entropie und Temperatur

Temperatur (in °C)

Wärme (Alltagssprache) wird
auf die beiden Bechergläser
verteilt

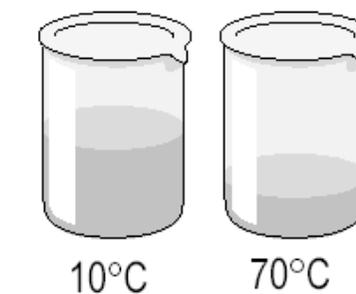
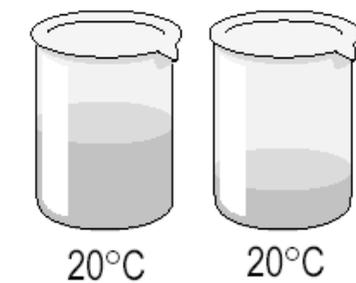
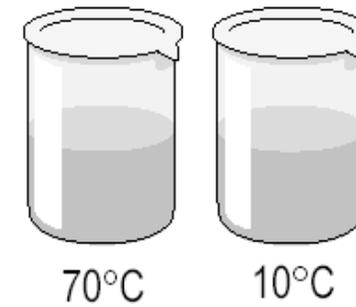
Wärme (Alltagssprache) =
Entropie in der Fachsprache



2 Entropie und Temperatur

Ein Körper enthält umso mehr Entropie

- Je größer der Körper ist.
- Je höher seine Temperatur ist



| Name d. Größe | Abkürzung | Einheit | Abkürzung |
|---------------|-----------|---------|-----------|
| Entropie | S | Carnot | Ct |

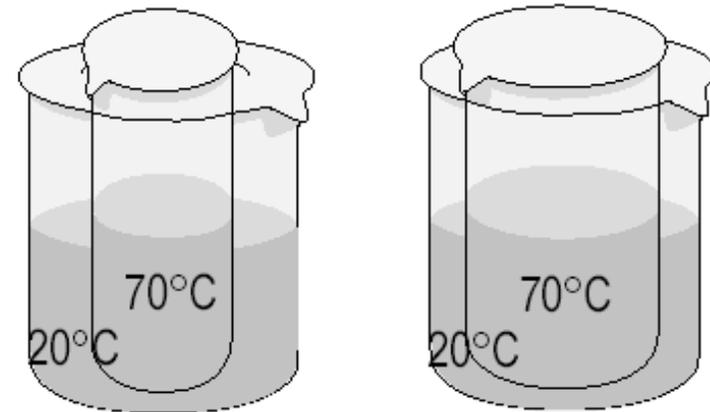
SI-Einheiten - SI-kompatible Einheiten

1 cm³ Wasser von Normaltemperatur enthält etwa 4 Ct.

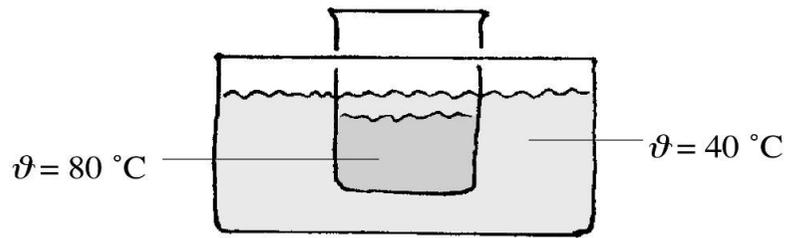
2 Entropie und Temperatur

Entropie strömt freiwillig von Stellen höheren zu Stellen niedrigerer Temperatur

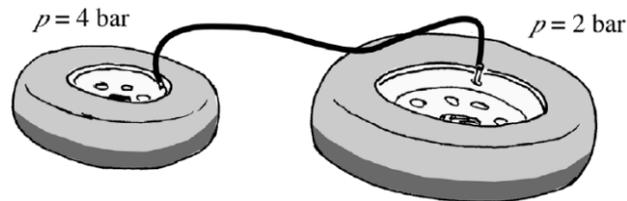
Ein Temperaturunterschied ist ein Antrieb für einen Entropiestrom.



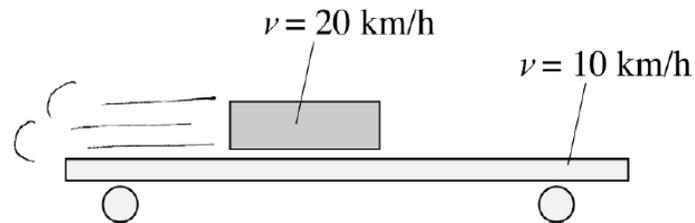
Den Zustand der Temperaturgleichheit, der sich am Ende einstellt, nennt man ***thermisches Gleichgewicht***.



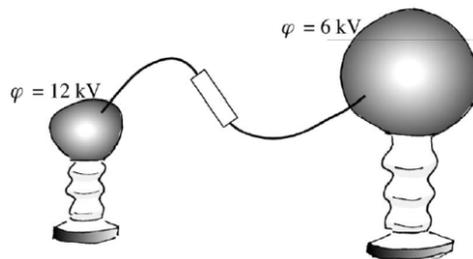
Entropie fließt von selbst von Körpern höherer zu Körpern niedrigerer Temperatur.



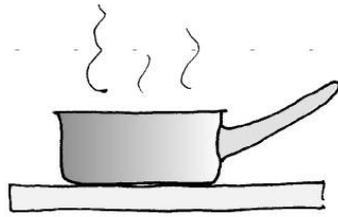
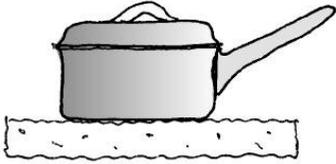
Luft strömt freiwillig von Stellen höheren zu Stellen niedrigeren Drucks



Impuls strömt freiwillig von Stellen höherer zu Stellen niedrigerer Geschwindigkeit.

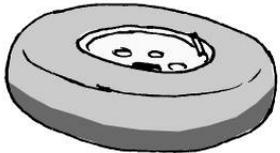


Elektrizität strömt freiwillig von Stellen höheren zu Stellen niedrigeren elektrischen Potenzials.



Die Umgebung nimmt Entropie auf, ohne dass sich ihre Temperatur ändert.

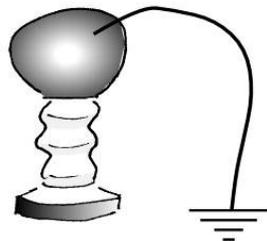
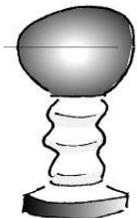
12



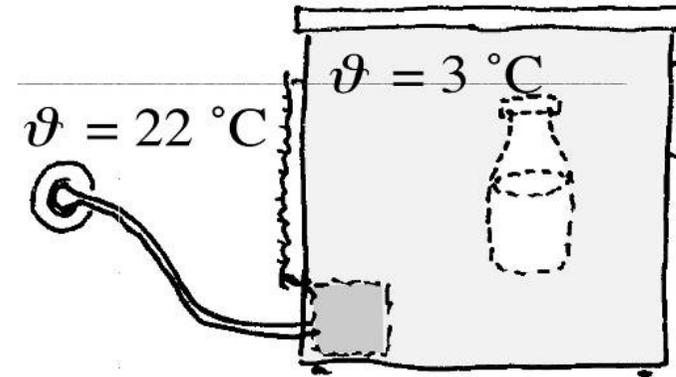
Die Atmosphäre nimmt Luft auf, ohne dass sich ihr Druck ändert.



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

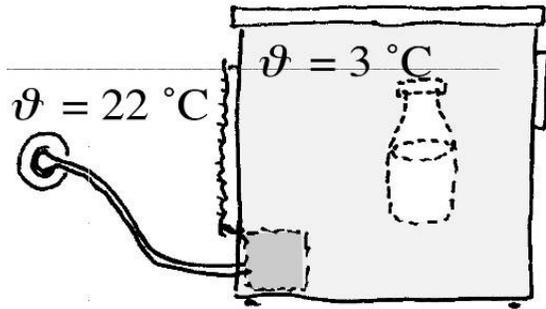


Die Erde nimmt Elektrizität auf, ohne dass sich ihr Potenzial ändert.

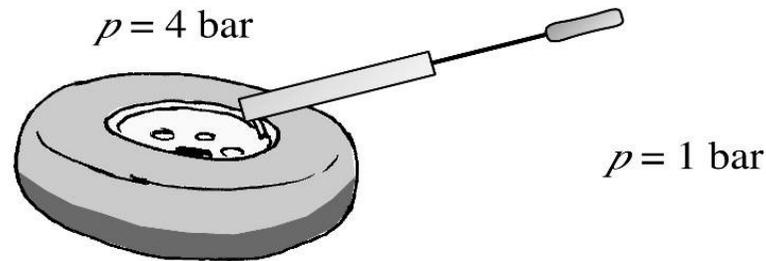


Entropiepumpen
(Wärmepumpen) befördern
Entropie von Stellen
niedrigeren zu Stellen
höherer Temperatur.

Um Entropie von niedrigerer zu höherer Temperatur zu bringen, braucht man eine Entropiepumpe (Wärmepumpe).



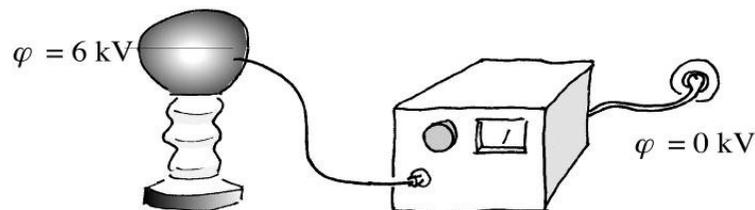
Um Luft vom niedrigerem zu höherem Druck zu bringen, braucht man eine Luftpumpe.



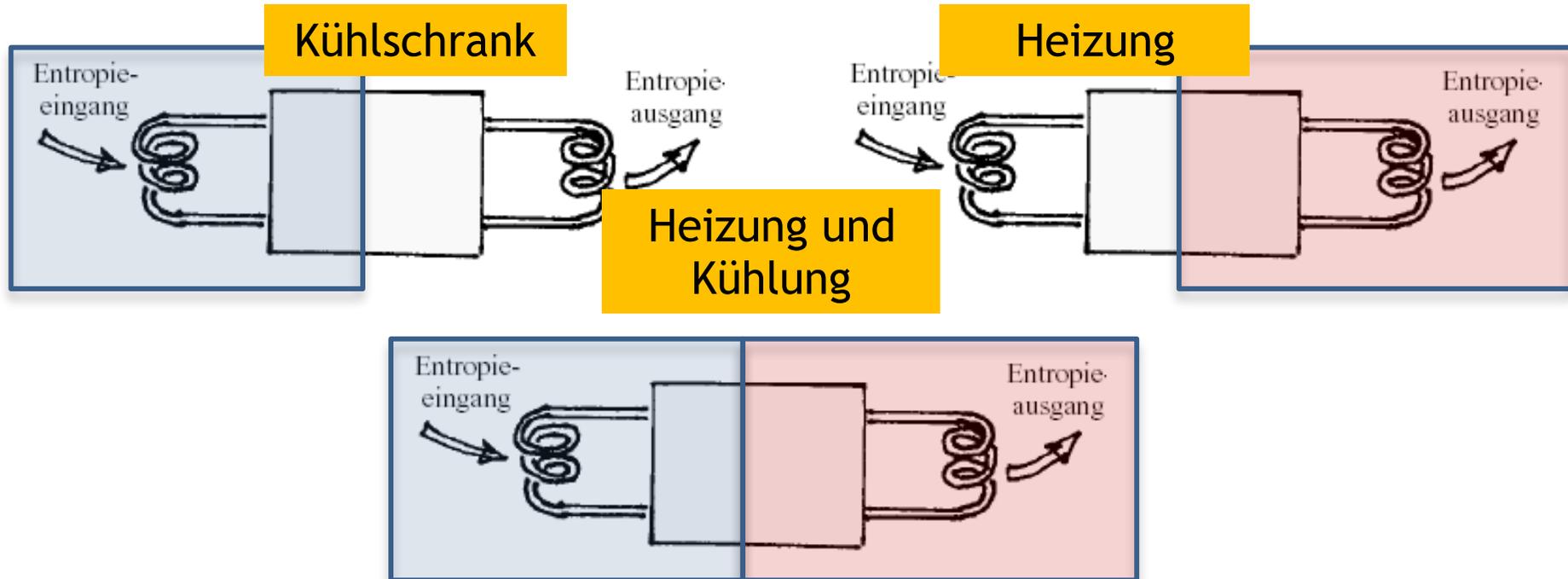
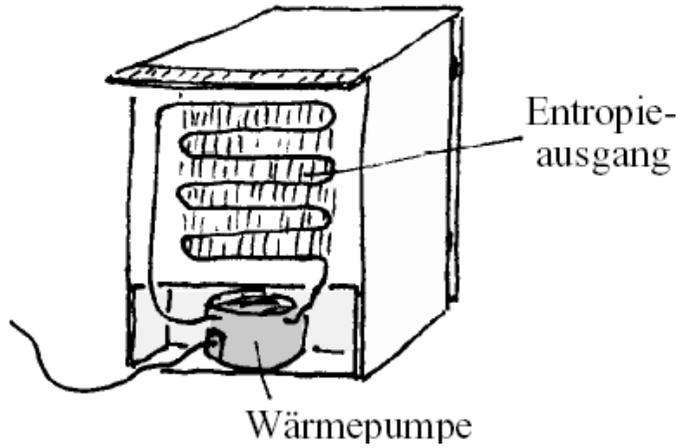
Um Impuls vom niedrigerer zu höherer Geschwindigkeit zu bringen, braucht man eine Impulspumpe (Motor, Feder, Mensch).



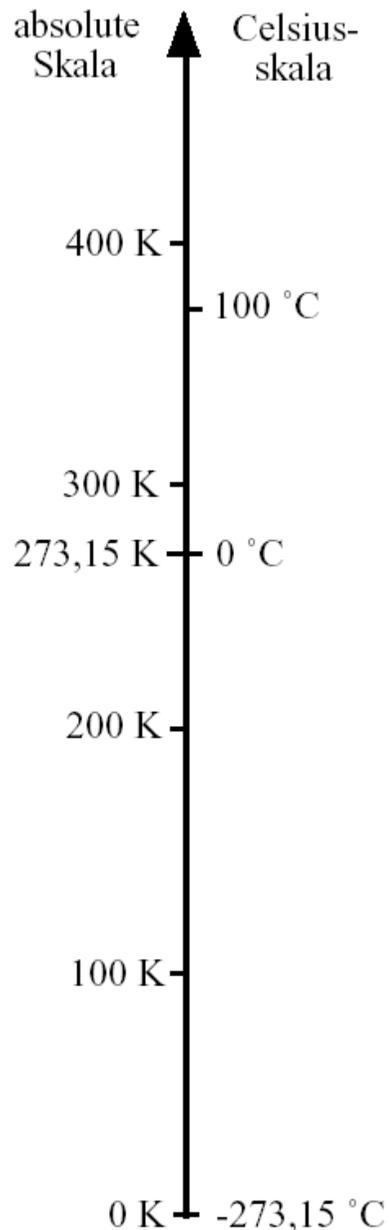
Um elektrische Ladung vom niedrigen zum hohen Potenzial zu bringen, braucht man eine Ladungspumpe (Batterie, Generator).



2 Entropie und Temperatur

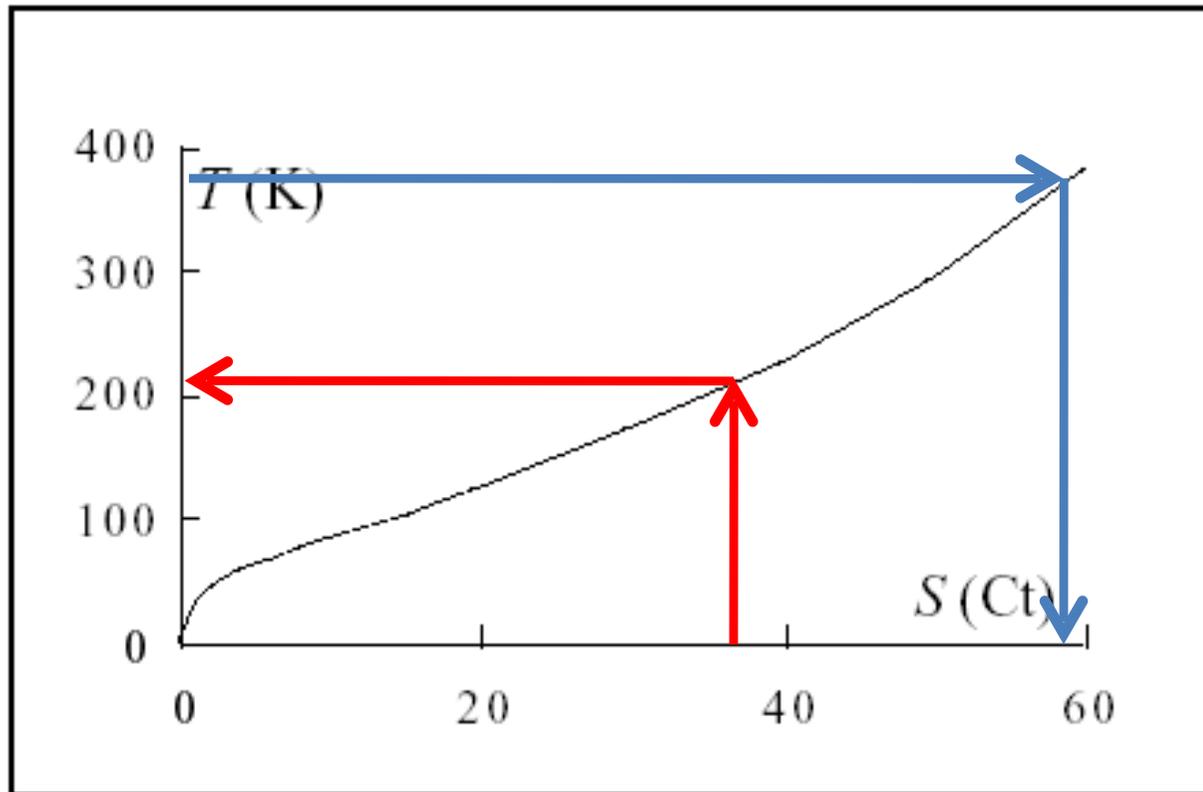


2 Entropie und Temperatur



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

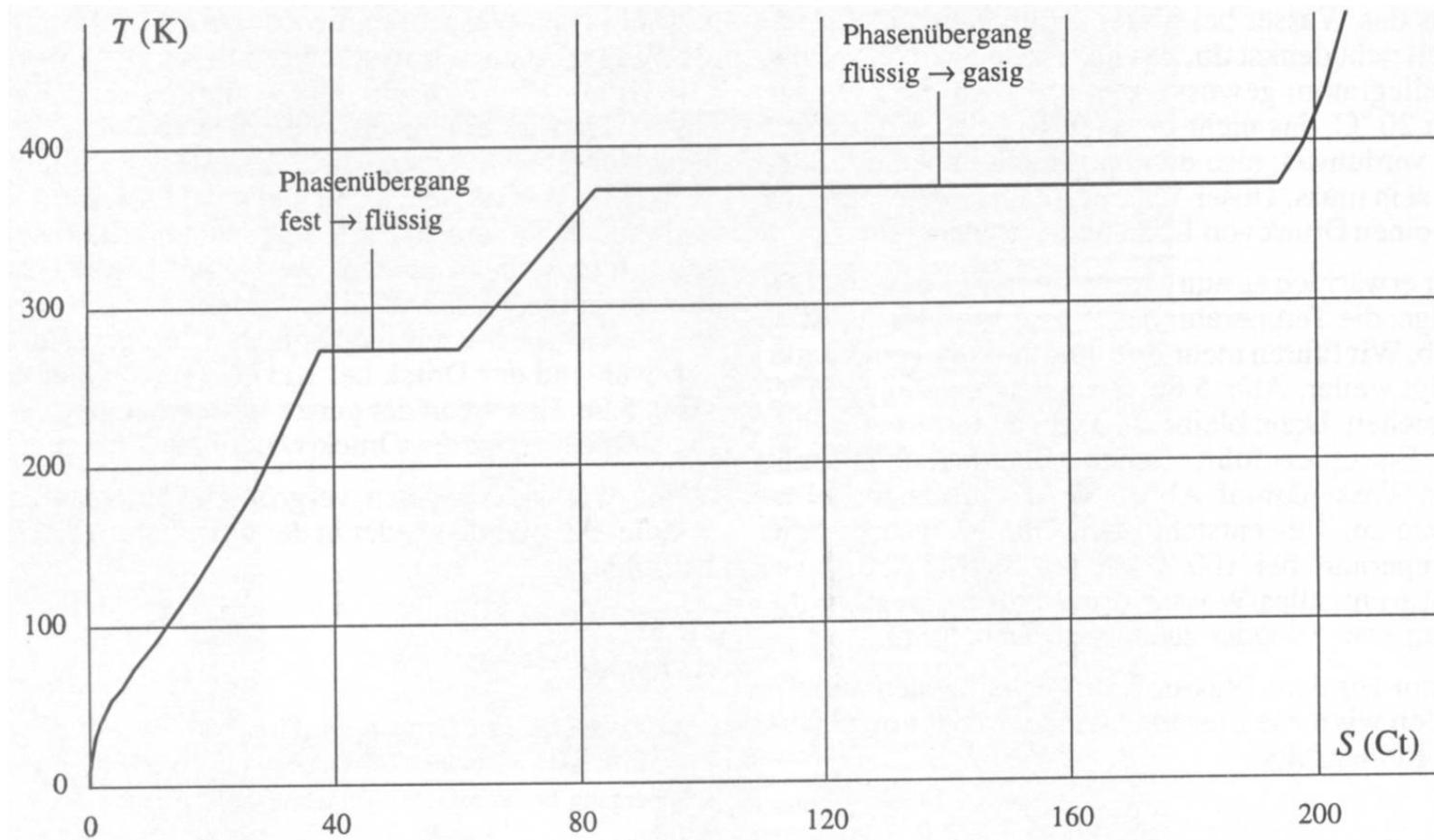
2 Entropie und Temperatur



Temperatur als
Funktion der Entropie
für 100 g Kupfer

2 Entropie und Temperatur

T-S-Diagramm von 1 Mol Wasser



1 Wärme und Entropie

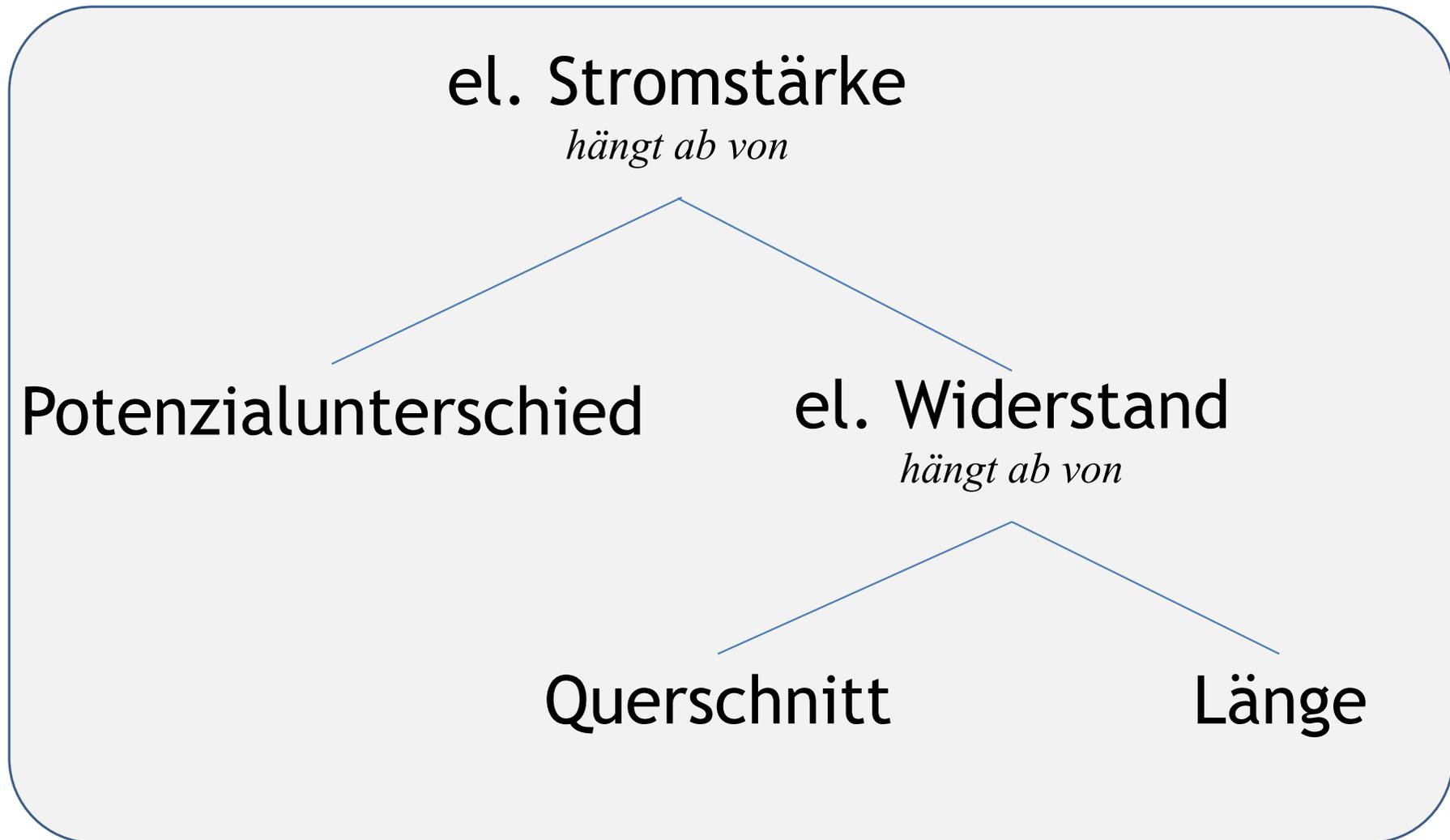
2 Entropie und Temperatur

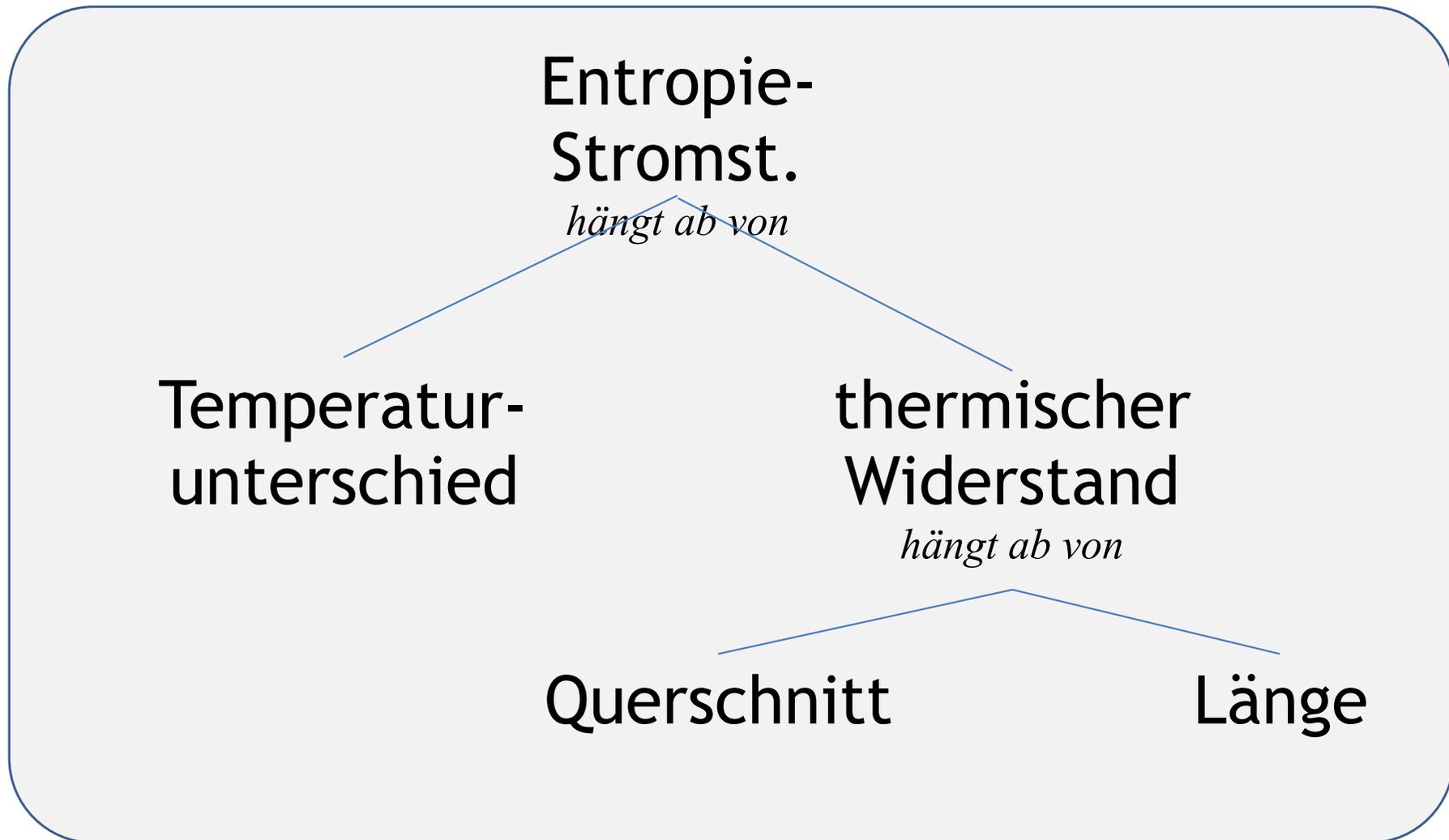
3 Entropiestrom

4 Entropie und „zweiter Hauptsatz“

5 Entropie und Energie

6 Messen von Entropiemengen





1 Wärme und Entropie

2 Entropie und Temperatur

3 Entropiestrom

4 Entropie und „zweiter Hauptsatz“

5 Entropie und Energie

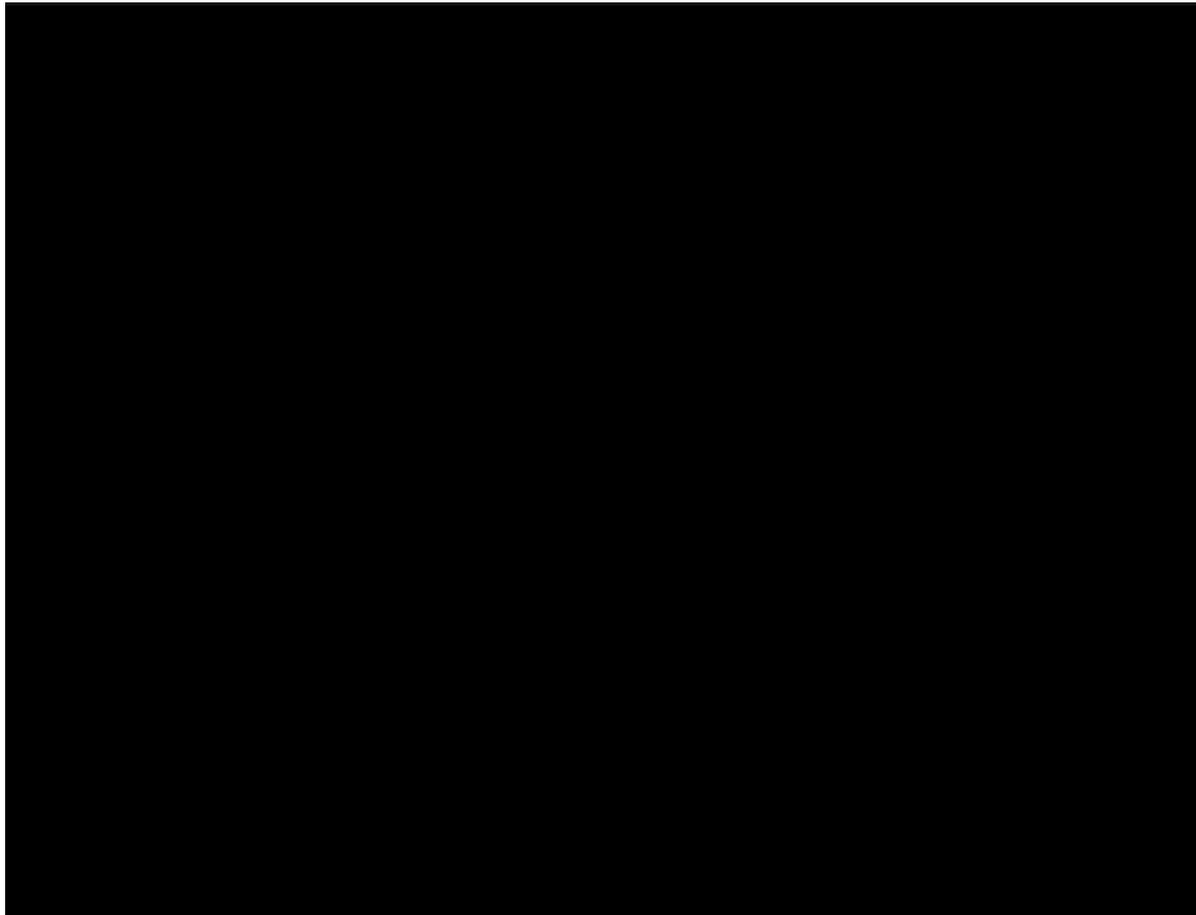
6 Messen von Entropiemengen

4 Entropie und „zweiter Hauptsatz“

1. bei chemischen Reaktionen (z.B. Verbrennen)
2. durch mechanische Reibung
3. in einem Draht, durch den Elektrizität fließt.

Entropie kann erzeugt aber nicht vernichtet werden





Vorgänge, bei denen Entropie erzeugt wird, sind nicht umkehrbar (irreversibel).

1 Wärme und Entropie

2 Entropie und Temperatur

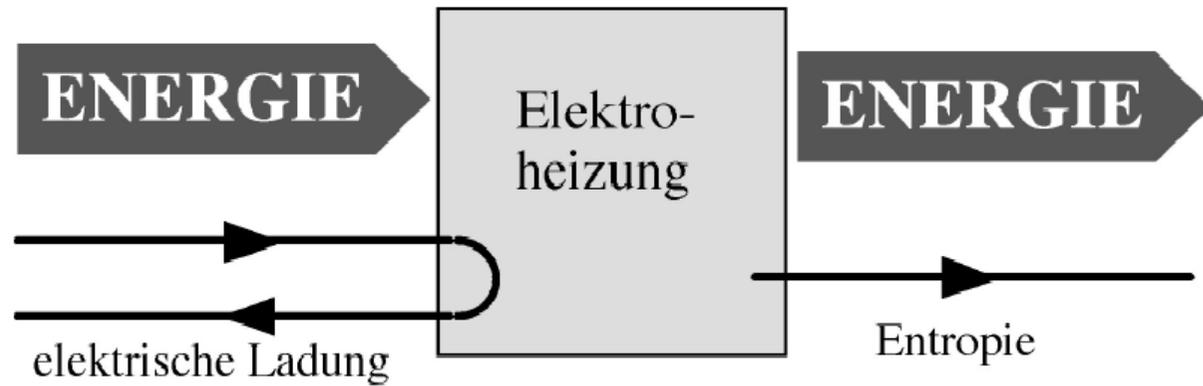
3 Entropiestrom

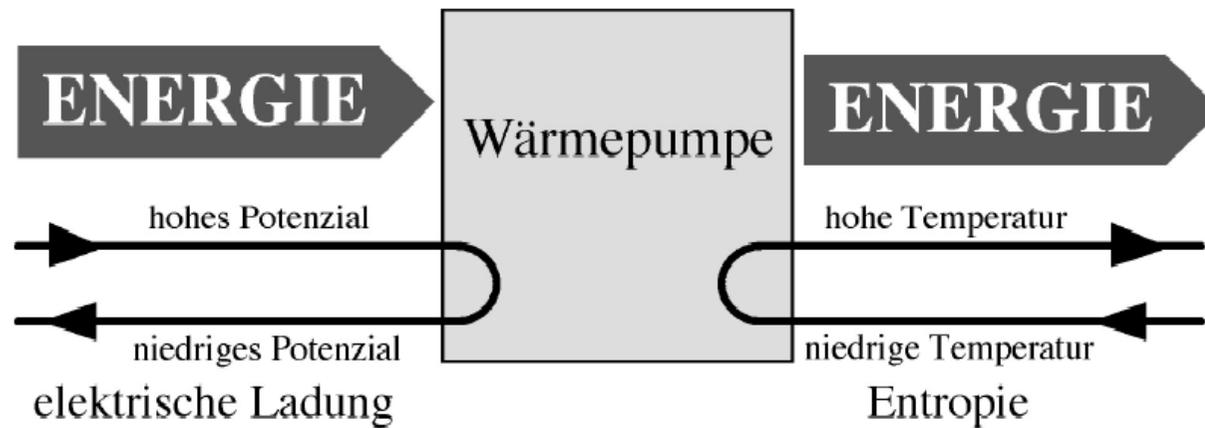
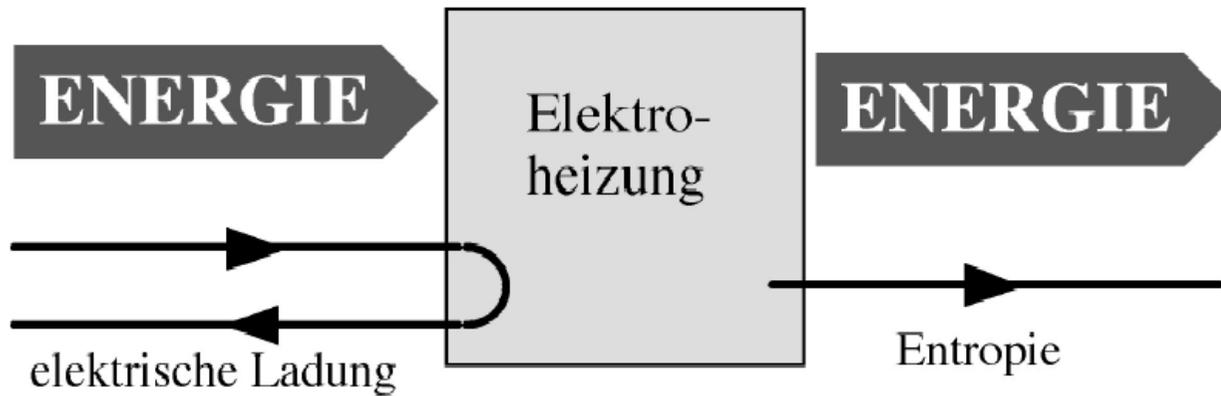
4 Entropie und „zweiter Hauptsatz“

5 Entropie und Energie

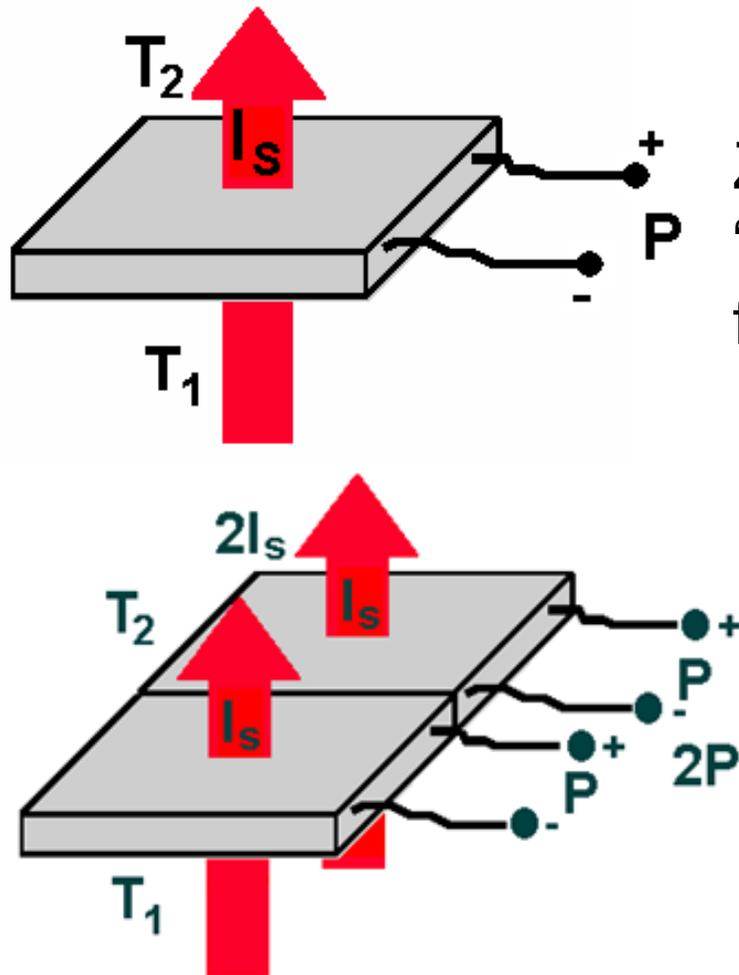
6 Messen von Entropiemengen

Entropie ist ein Energieträger



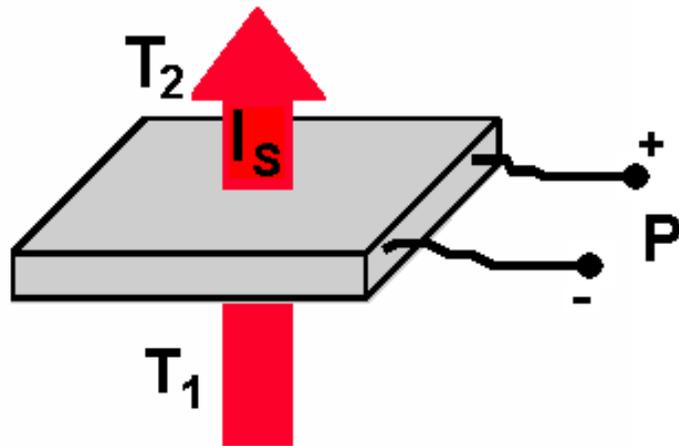


Je höher die Temperatur ist, desto mehr Energie transportiert die Entropie.



Zwei "parallel geschaltete"
"Wärmepumpen"
fördern doppelt so viel Entropie und

$$P \sim I_s$$



$$P \sim I_S$$

$$P \sim \Delta T \text{ bei } I_S = \text{const.}$$

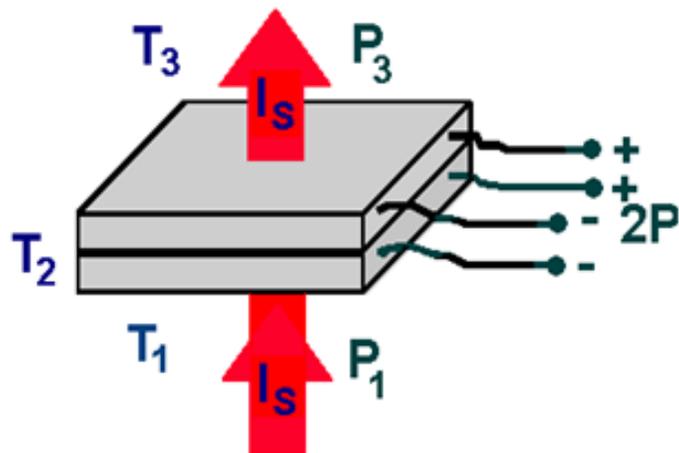
$$P \sim \Delta T \cdot I_S$$

$$P = k \cdot \Delta T \cdot I_S$$

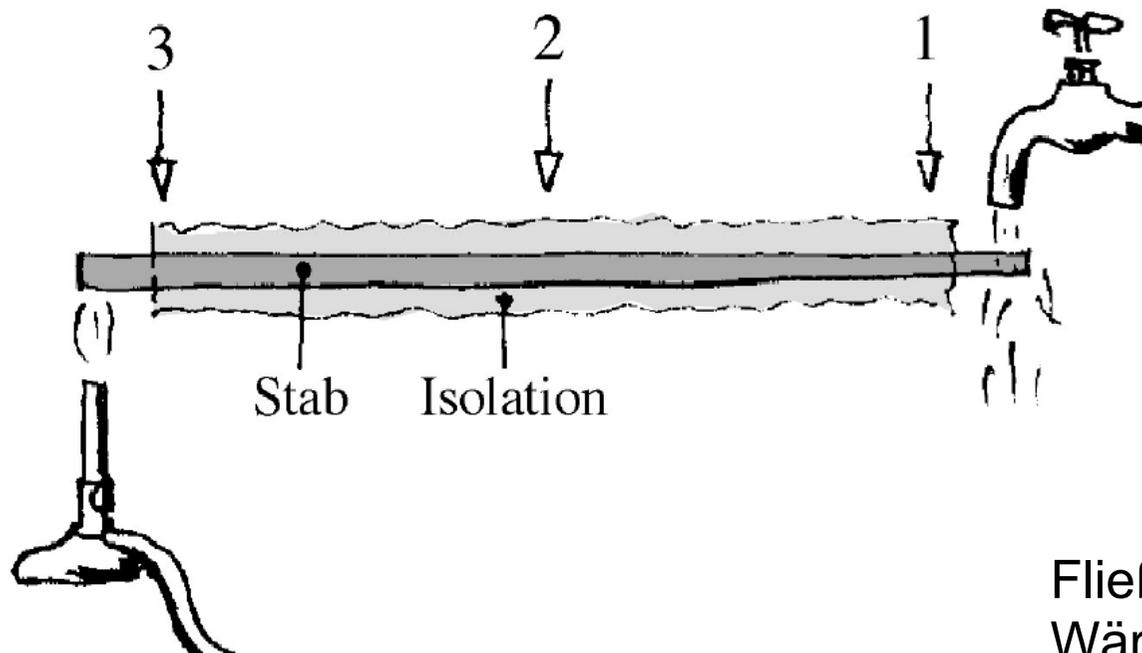
$$P = \Delta T \cdot I_S$$

$$P = (T_2 - T_1) I_S$$

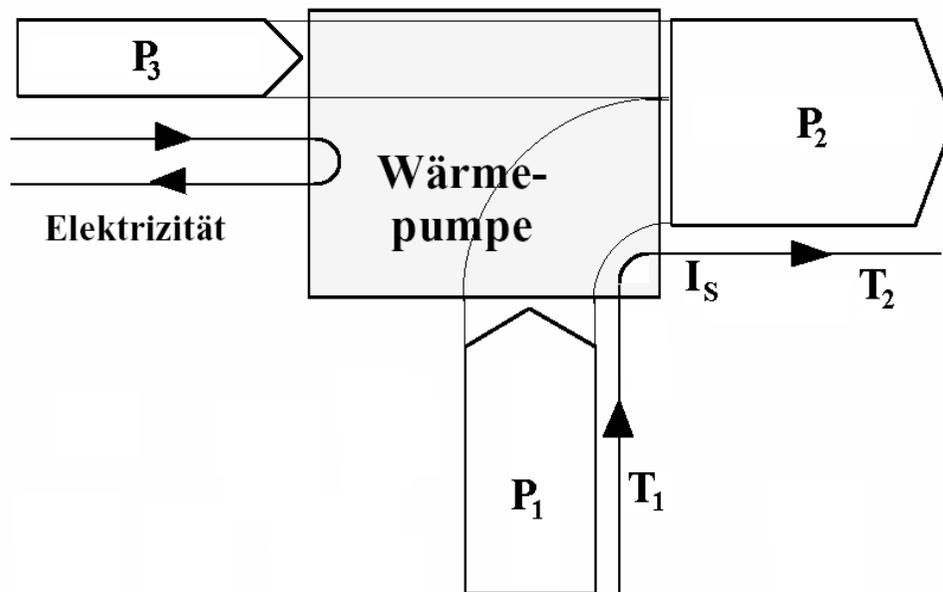
$$= T_2 \cdot I_S - T_1 \cdot I_S$$



| Teilgebiet | Extensive Größe | Intensive Größe | Strom | Energiestrom |
|--------------------------|-----------------|-----------------|-------|---------------------------------------|
| <i>E-Lehre</i> | Q | φ | I | $P = (\varphi_2 - \varphi_1) \cdot I$ |
| Thermodynamik | S | T | I_S | $P = (T_1 - T_2) \cdot I_S$ |
| <i>Mechanik</i> | p | v | F | $P = (v_2 - v_1) \cdot F$ |
| Chemie | n | μ | I_n | $P = (\mu_2 - \mu_1) \cdot I_n$ |
| <i>Rotationsmechanik</i> | L | ω | M | $P = (\omega_2 - \omega_1) \cdot M$ |
| ... | ... | ... | ... | ... |



Fließt Entropie durch einen Wärmewiderstand, so wird zusätzliche Entropie erzeugt.



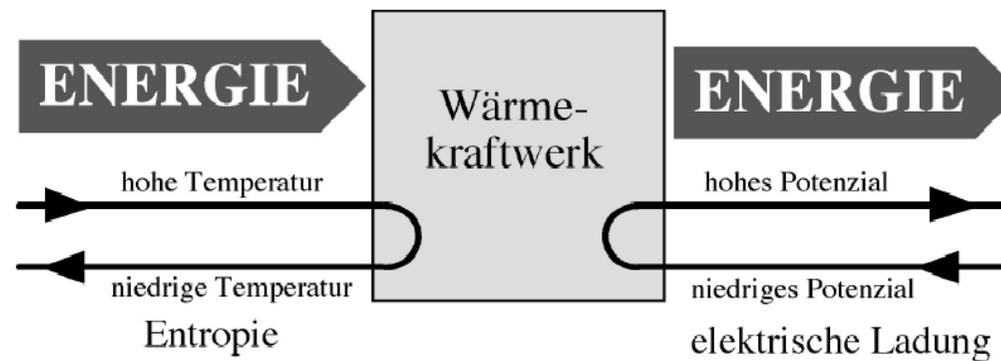
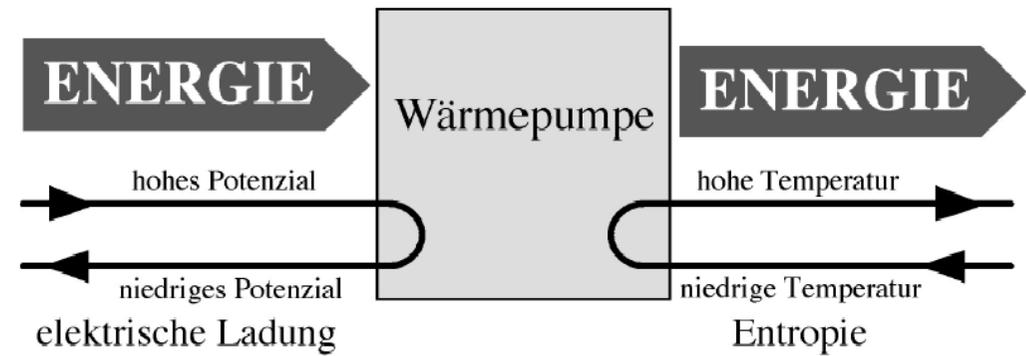
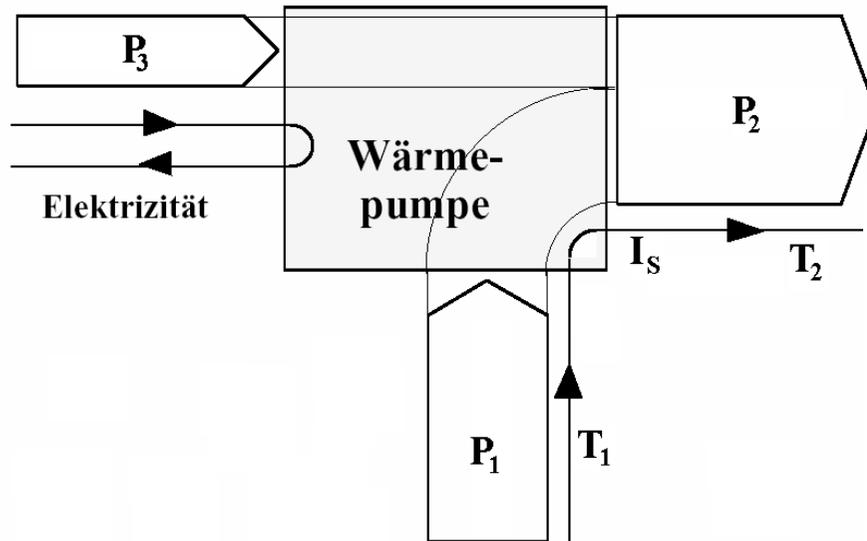
Ein Entropiestrom der Stärke I_S trägt einen Energiestrom der Stärke $T \cdot I_S$.

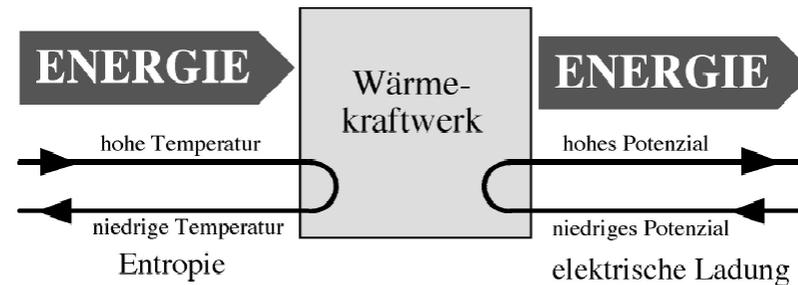
Die Temperatur gibt an, wie stark ein Entropiestrom mit Energie beladen ist.

Die Wärmepumpe verbraucht um so mehr Energie

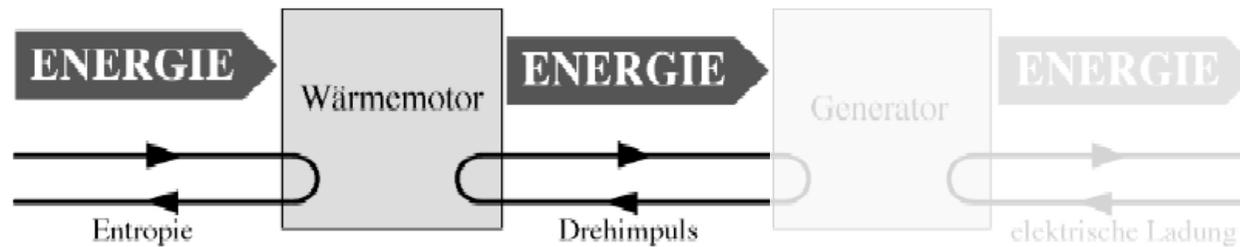
- je mehr Entropie sie fördern muss
- je größer der Temperaturunterschied ist, den sie zu überwinden hat .

5 Entropie und Energie





Wo kommt die Entropie her?



Natürliche Energiequellen

Künstliche Energiequellen

Wärme-kraftwerk (S erzeugen und konvektiv zuführen.

Verbrennungsmotoren (S an ‚Ort und Stelle‘ erzeugen)

[Stirlingmotor (nicht konvektiv)]

1 Wärme und Entropie

2 Entropie und Temperatur

3 Entropiestrom

4 Entropie und „zweiter Hauptsatz“

5 Entropie und Energie

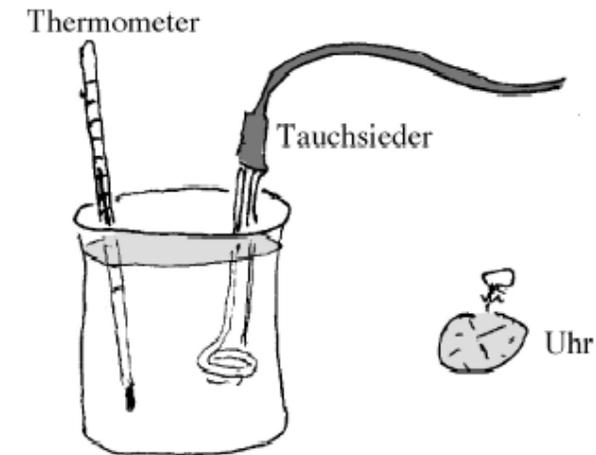
6 Messen von Entropiemengen

6 Messen von Entropiemengen

| $\vartheta(^{\circ}\text{C})$ | $T(\text{K})$ | $P(\text{W})$ | $I_S = P/T (\text{Ct/s})$ |
|-------------------------------|---------------|---------------|---------------------------|
| 10 | 283 | 800 | 2,84 |
| 50 | 323 | 800 | 2,48 |

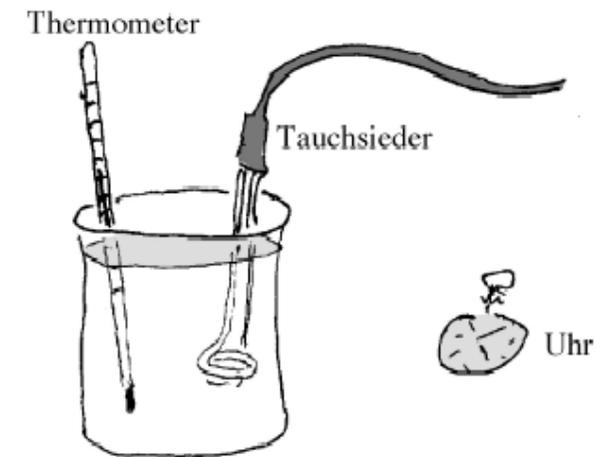
$$\bar{I}_S = \frac{2,84 + 2,48}{2} \text{Ct/s} = 2,66 \text{Ct/s}$$

$$\Delta S = \bar{I}_S \cdot \Delta t = 2,66 \text{Ct/s} \cdot 2100 \text{s} = 558 \text{Ct}$$



6 Messen von Entropiemengen

| t (s) | T (K) | I_S (Ct/s) | \bar{I}_S (Ct/s) | ΔS_i (Ct) |
|---------|---------|--------------|--------------------|-------------------|
| 0 | 283 | 2,83 | 2,80 | 840 |
| 300 | 288,7 | 2,77 | 2,745 | 823 |
| 600 | 294,5 | 2,72 | 2,69 | 807 |
| 900 | 300,2 | 2,66 | 2,635 | 790 |
| 1200 | 306,0 | 2,61 | 2,59 | 777 |
| 1500 | 311,7 | 2,57 | 2,545 | 764 |
| 1800 | 317,4 | 2,52 | 2,50 | 750 |
| 2100 | 323,2 | 2,48 | | |



$$\Delta S = \sum_i \Delta S_i = 5551 \text{ Ct}$$

EN

DE