

Definition der absoluten Temperatur T

Wirkungsgrad $\eta \rightarrow$ Temp. T unabh. von
Thermometersubstanz

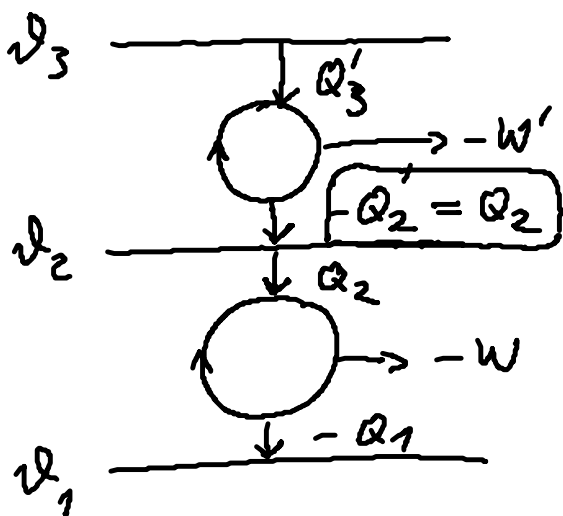
Ausgangspunkt: willkürliche Temperaturskala ϑ
def. durch Thermometersubst. (ϑ)

Sei $\vartheta_1 < \vartheta_2$

$f(\vartheta_1, \vartheta_2) := 1 - \eta(\vartheta_1, \vartheta_2) = -\frac{Q_1}{Q_2}$ ist universelle
Fkt.

2 reversible Carnot-Maschinen:

$\vartheta_1 < \vartheta_2 < \vartheta_3$



$$f(\vartheta_1, \vartheta_3) = -\frac{Q_1}{Q'_3} = \underbrace{\left(-\frac{Q_1}{Q_2}\right)}_{f(\vartheta_1, \vartheta_2)} \underbrace{\left(-\frac{Q'_2}{Q'_3}\right)}_{f(\vartheta_2, \vartheta_3)}$$

$$\Rightarrow \frac{f(\vartheta_1, \vartheta_3)}{f(\vartheta_1, \vartheta_2)} = f(\vartheta_2, \vartheta_3)$$

hängt nicht
von ϑ_1 ab

$$\Rightarrow f(\vartheta_1, \vartheta_3) = a(\vartheta_1) b(\vartheta_3)$$

Funktionalgl.:

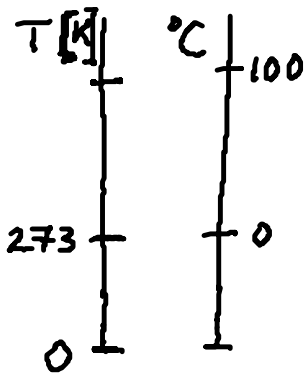
$$a(\nu_1) b(\nu_3) = \underbrace{a(\nu_1) b(\nu_2)} a(\nu_2) b(\nu_3)$$

$$\Rightarrow f(\nu_1, \nu_2) = \underbrace{a(\nu_1) b(\nu_2)} = \frac{a(\nu_1)}{a(\nu_2)}$$

Setze $T(\nu) := a(\nu)$ absolute Temp.
(universelle Fkt.)

$$\Rightarrow f(\nu_1, \nu_2) = \frac{T_1}{T_2} \Rightarrow \boxed{\eta = 1 - \frac{T_1}{T_2}}$$

Festlegung läßt noch Skalenfaktor $\propto T$ offen,
der durch Celsius-Temperatur festgelegt wird
(Abstand Siede - Gefrierpkt. des Wassers bei
Standardbed. 100 Grad)



Phänomenolog. Entropie

2. Hauptsatz (3. Formul.): rev. Carnot-Prozess hat
Wirkungsgrad $\eta = 1 + \frac{Q_1}{Q_2} = 1 - \frac{T_1}{T_2}$

$$\Rightarrow \frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} = 0$$

Für infinitesimalen reversiblen Wärmeaustausch gilt

$$\frac{\delta Q_1}{T_1} + \frac{\delta Q_2}{T_2} = 0$$

Wird quasistatisch eine Folge von Gleichgewichtszuständen $T_0 < T_1 < T_2 < \dots < T_n$ durchlaufen, so gilt

$$\oint \frac{\delta Q_r}{T} = 0 \text{ für jeden rev. Kreisprozess}$$

es ex. eine Zustandsfkt. S mit
(Entropie)

$$dS = \frac{\delta Q_r}{T}$$

d. h. der 2. HS ergibt die Existenz des integrierenden Faktors $\frac{1}{T}$ für δQ_r
(revers. aufgenommene Wärmemenge)

Entropie (Clausius 1867) = $\eta_{\text{pot}} \rightarrow$ Verwandlung

(Maß für den Anteil der Energie, der in eine nicht mehr beliebig nutzbare Form verwandelt wurde \rightarrow § 3.2 Entropie und Ökologie)

* Ökolog. Bedeutung der Entropieerzeugung statt „Energieverbrauch“!

Irreversibler Kreisprozess

Nach dem 2. HS (3. Formulierung):

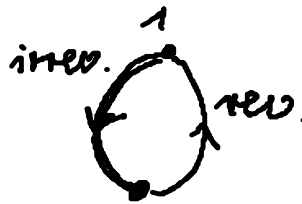
$$\eta \equiv 1 + \frac{Q_1}{Q_2} \leq 1 - \frac{T_1}{T_2} \equiv \eta_{\text{reversibel}}$$

(gewonnene Arbeit \leq rev. Arbeit)

$$\Leftrightarrow \frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} \leq 0$$

infinites. Schritte:

$$\oint \frac{\delta Q}{T} \leq 0$$



$$0 \geq \oint \frac{\delta Q}{T} = \int_1^2 \frac{\delta Q}{T} \Big|_{\text{irrev.}} + \int_2^1 \frac{\delta Q_r}{T} \Big|_{\text{rev.}}$$

$$\Leftrightarrow S_2 - S_1 \geq \int_1^2 \frac{\delta Q}{T}$$

infinitesimal: $dS \geq \frac{\delta Q}{T}$

also $\delta W = dU - \delta Q \geq dU - TdS$

reversibel $\delta W_r = dU - TdS$

$$\delta W \geq \delta W_r$$

Adiabatische Prozesse: $\delta Q = 0$ (ohne Wärmeaustausch mit der Umgebung, aber Austausch von mech., el., magn. Energie zugelassen)

$$\Delta S \geq \int_1^2 \frac{\delta Q}{T} = 0$$

reversible adiabatische Prozesse:

$$\Delta S = \int_1^2 \frac{\delta Q_r}{T} = 0 \quad (= \text{isentropisch})$$

Def. isoliertes System ($\delta Q = \delta W = 0$)

4. Formulierung des 2. HS

Es gibt eine Zustandsfkt. S mit $dS = \frac{\delta Q_r}{T}$, die sich in rev. adiab. Prozessen nicht ändert.

Bei irrev. Prozessen in adiabatisch abgeschlossenes Systemen gilt $dS > 0$, also Entropie nimmt zeitlich zu.

Weitere äquivalente Formulierungen des 2. HS

5. Wärmeleitung ist ein irrev. Prozess
6. Erzeugung von Reibungswärme ist ein irrev. Prozess
7. Expansion eines Gases ohne Arbeitsleist. ist ein irrev. Prozess

3.2 Entropie und Ökologie

Lit. : Arne Stahl : "Du sollst nicht leichtfertig Entropie erzeugen!"
(Thermodyn. Grundlagen einer Ökolog. Ethik)

in: S. Daech (ed.), Naturwiss. u. Religion
(B. Mannheim 1992)
A. Stahl: Praxis der Naturwiss.-Physik 8, 21
(1997)

* Ökolog. Bedeutung der Entropie als Maß für den Anteil der Energie, der in eine nicht mehr beliebig nutzbare Form verwandelt wurde.

Klimakatastrophe, CO_2 -Emission

Durchschnittl. Energie „verbrauch“ eines Mitteleuropäers 150 kWh/Tag

Aber: Energie ist Erhaltungsgröße
→ nicht verbraucht, sondern umgewandelt in „Wärmemüll“

→ Wertverlust der Energie

Energie „verbrauch“ = Umwandlung von hohen-
in niedrigwertige
Energie

Quantitativer Wertmaßstab: Entropie (2. HS)

$$\text{Wertverlust} = \text{Entropiezunahme}$$

Beispiele

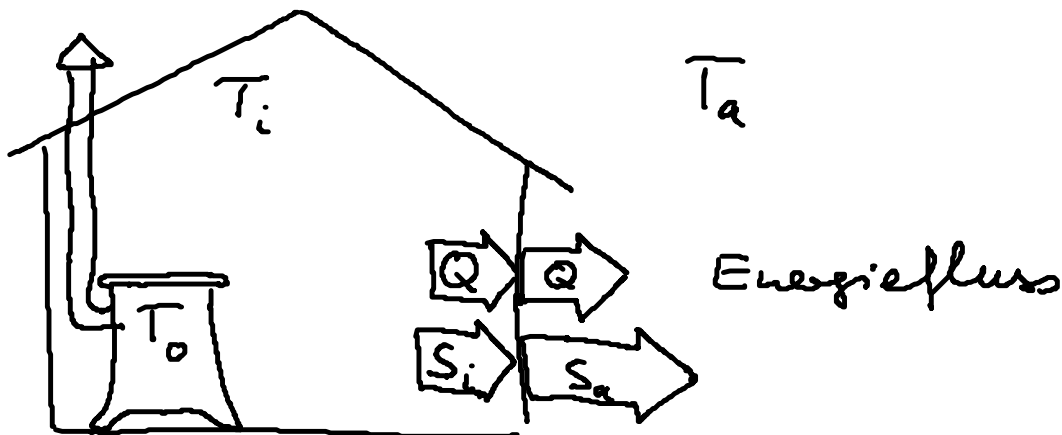
(i) Umweltverschmutzung → Entropiezunahme

(z. B. Verteilung von in Wasser gelösten
Schadstoffen auf eine größere Wassermenge
→ Mischungsentropie

(ii) Ausrottung von Tier- und Pflanzenarten
(Zerstörung der genet. Inform.)

→ Zuwachs der Informationsentropie
ca. $10^{-22} \frac{J}{K}$ pro Bit

(iii) Wärmeverlust der Heizung eines Hauses



$$S_i = \frac{Q}{T_i} < S_a = \frac{Q}{T_a}$$
$$T_i > T_a$$

\Rightarrow Entropieproduktion $\Delta S = Q \left(\frac{1}{T_a} - \frac{1}{T_i} \right)$
in der Wand

allg.

Wertverlust beim Verbrauch und Rohstoffe

= Entropieproduktion

Ökolog. sinnvoll wäre „Entropiesteuer“ !