

# Definition der absoluten Temperatur T

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

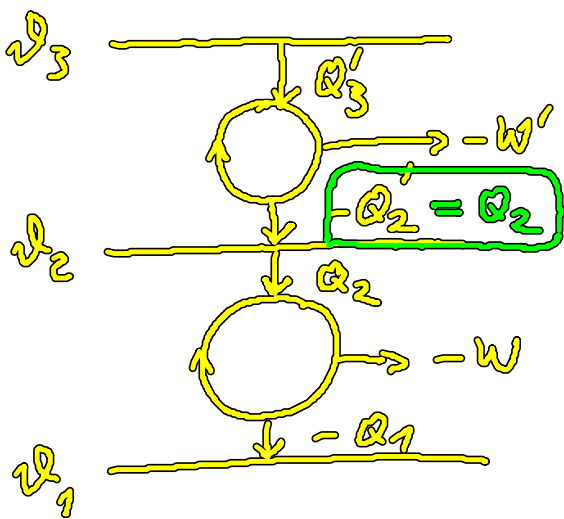
Ausgangspunkt: willkürliche Temperaturskala  $\vartheta$   
def. durch Thermometersubst. ( $\vartheta_1$ )

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  $\vartheta_1$  ab

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

Funktionalgl. :

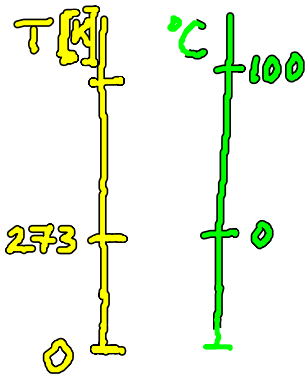
$$a(\alpha_1) b(\alpha_3) = \underbrace{a(\alpha_1) b(\alpha_2)} \underbrace{a(\alpha_2) b(\alpha_3)}$$

$$\Rightarrow f(\alpha_1, \alpha_2) = \underbrace{a(\alpha_1) b(\alpha_2)} = \frac{a(\alpha_1)}{a(\alpha_2)}$$

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

$$\Rightarrow f(\alpha_1, \alpha_2) = \frac{T_1}{T_2} \Rightarrow \boxed{\eta = 1 - \frac{T_1}{T_2}}$$

Festlegung läßt noch Skalenfaktor  $\times T$  offen,  
der durch Celsius-Temperatur festgelegt wird  
(Abstand Siede - Gefrierpt. 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

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

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  $\delta Q_r$   
(revers. aufgenommene Wärmemenge)

Entropie ( Clausius 1867 ) = zergottz = 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) :

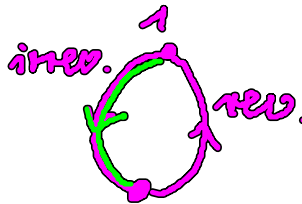
$$\eta \equiv 1 + \frac{Q_1}{Q_2} \leq 1 - \frac{T_1}{T_2} \equiv \eta_{\text{reversibel}}$$

( gewonnene Arbeit  $\leq$  rev. Arbeit )

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

infinites. Schritte:

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



$$0 \geq \oint \frac{\delta Q}{T} = \int_1^2 \frac{\delta Q}{T} + \int_2^1 \frac{\delta Q_r}{T}$$

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

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

$$\text{also } \delta W = dU - \delta Q \geq dU - TdS$$

$$\text{reversibel } \delta W_r = dU - TdS$$

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

Adiabatische Prozesse:  $\delta Q = 0$

(ohne Wärmeaustausch mit der Umgebung, aber Austausch von mech., el., mag. 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 irrevers. Prozessen in adiabatisch abgeschlossenen Systemen gilt  $dS > 0$ , also Entropie nimmt zeitlich zu.

## Weitere äquivalente Formulierungen des 2. HS

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

## 3.2 Entropie und Ökologie

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

in: S. Daede (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.

Wahrscheinlichkeitskatastrophen,  $\text{CO}_2$ -Emissionen

Durchschnittl. Energieverbrauch eines  
Mittelwäpianers 150 kWh/Tag

Aber: Energie ist Erhaltungsgröße  
→ nicht verbraucht, sondern ungewandelt  
in "Wärmewill"

→ Wertverlust der Energie

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

Quantitativer Wertmaßstab: Entropie (2. HS)

Wertverlust = Entropiezunahme

Beispiele

(i) Umweltverschmutzung → Entropiezunahme

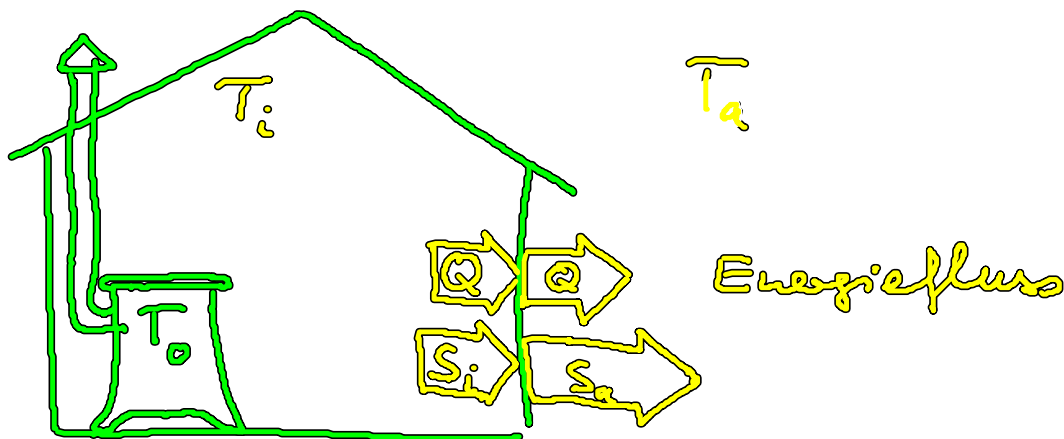
(z.B. Verteilung von in Wasser gelösten  
Schadstoffen auf eine größere Wassermenge  
→ Mischungsentropie

(ii) Ausrottung von Tier- und Pflanzenarten

(Zerstörung der genet. Inform.)

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

(iii) Wärmeverlust der Heizung eines Hauses



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

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

allg.

Wertverlust beim Verbau und Rohstoffe

= Entropieproduktion

ökolog. sinnvoll wäre „Entropiesteuer“ !