

## 3.2 Entropie und Ökologie

A. Stahl "Du sollst nicht leichtfertig Entropie erzeugen!"

Lit. : 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.

Durchschnittl. Energieverbrauch eines Mitteleuropäers

150 kWh / Tag

Aber: Energie ist Erhaltungsgröße  $\rightarrow$  nicht "verbraucht"  
sondern in "Wärmemüll" (niedrigwertige Energie)

Quantitativer Wertmaßstab der Energie: Entropie (2. HS)

Wertverlust der Energie = Entropiezunahme

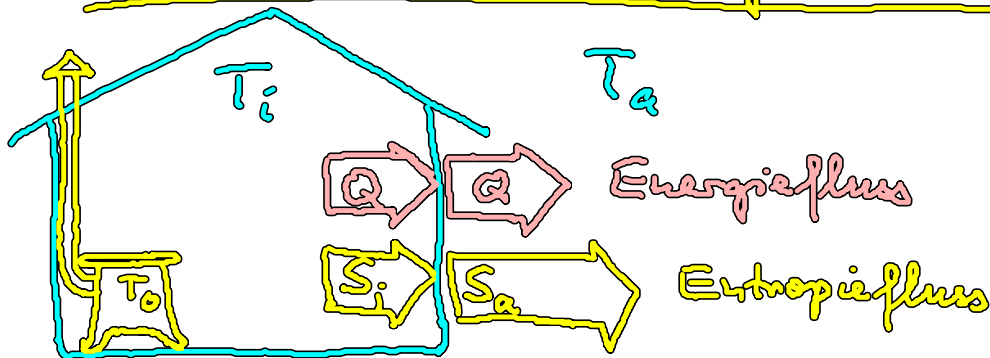
Beispiele :

(i) Umweltverschmutzung  $\rightarrow$  Entropiezunahme

(z.B. Verteilung von in Wasser gelösten Schadstoffen auf eine größere Wassermenge  $\rightarrow$  Mischungsentropie)

(ii) Ausrottung von Tier- u. Pflanzenarten  
(Zerstörung der genetischen Information)  
 $\rightarrow$  Zuwachs der Informationseutropie  
ca.  $10^{-22} \frac{J}{K}$  pro Bit

(iii) Wärmeverlust der Heizung eines Hauses



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

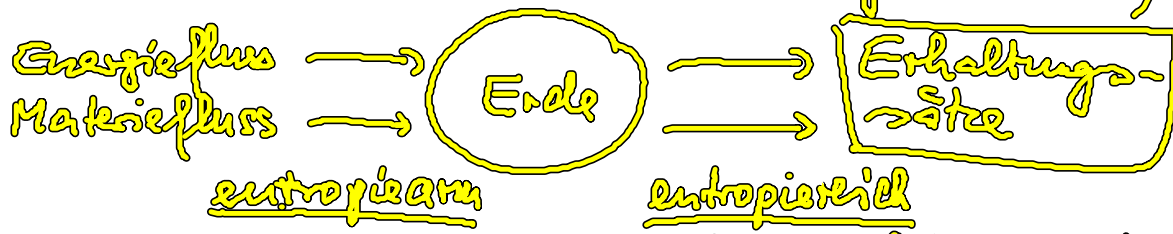
da  $T_i > T_a$

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

allg.: Wertverlust beim "Verbrauch" von Energie u. Rohstoffen = Entropieproduktion

Ökologisch sinnvoll wäre eine "Entropiesteuer"!

# Offene dissipative Systeme (Lebewesen, Ökonomie, System Erde)

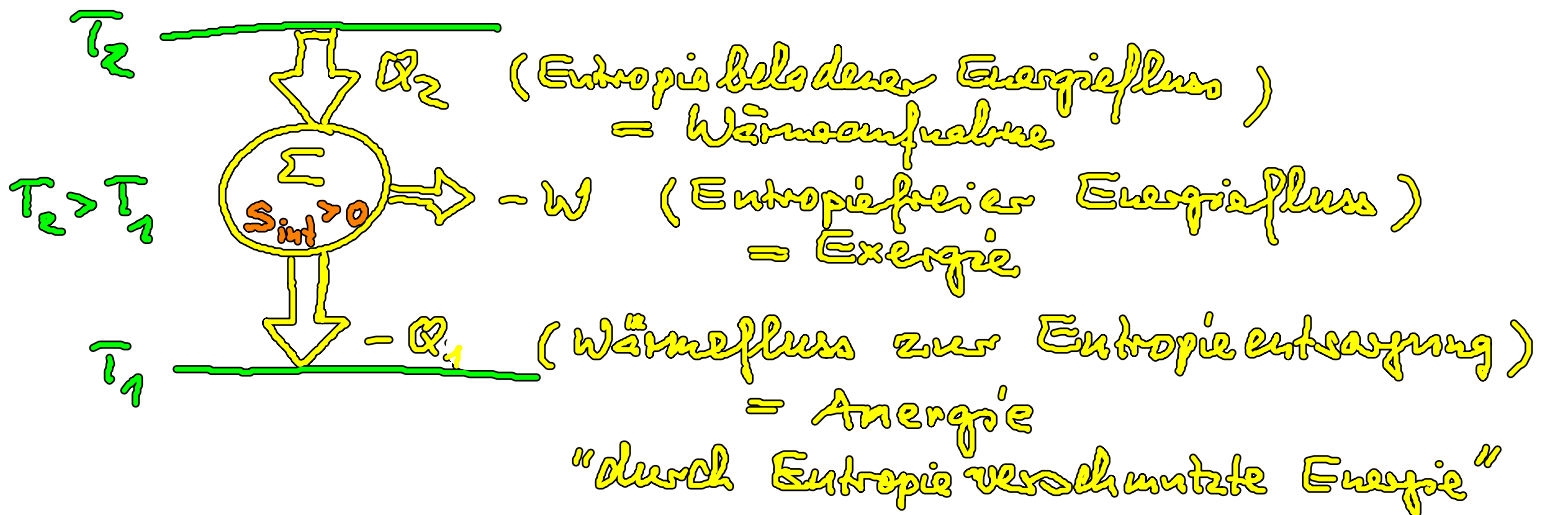


Entropieabfuhr  $\hat{=}$  Müllabfuhr

Entropie bei irreversiblen Prozessen: keine Erhaltungsgröße

Beispiel:

## (i) Irreversible Wärmekraftmaschine



$$Q_1 + Q_2 + W = 0 \quad \text{Energiebilanz}$$

$$\frac{-Q_1}{T_1} = \frac{Q_2}{T_2} + S_{int} \quad \text{Entropieabgabe}$$

$> 0$  (irrev. in der Maschine erzeugte Entropie)

irreversibler Wirkungsgrad  $\eta_{in} = \frac{-W}{Q_2} = 1 + \frac{Q_1}{Q_2}$

$$\eta_{in} = 1 - \frac{T_1}{T_2} - \frac{S_{int}}{Q_2} \quad \left( \frac{T_1}{T_2} > 0 \right)$$

## (ii) Müllentropfung

Müll = entropiereiche Materie

Zerstreung u. Vermischung von Materie

z.B.  $N_G$  Getränkedosen

$N_Z$  Fegeklutbecher

$N_M$  Milchtüten

$N_Z$  Zahnpastatuben

$$N = N_G + N_Z + N_M + N_Z$$

Gegenstände u

Mülltonne

vorher: Entropie von 1 Getränkedose herausgeholt aus einer Ansammlung von  $N_G$ :  $S = -k \ln \frac{1}{N_G}$

Entropie  $N_G$  Getränkedosen (ext.)  $S = -k N_G \ln \frac{1}{N_G}$

Entropie von  $N_i$  Gegenständen ( $i=1,2,3,4$ ),

geordnet in 4 Behältern:  $S_{\text{vor}} = -k \sum_{i=1}^4 N_i \ln \frac{1}{N_i}$

nachher: Entropie von  $N = \sum_{i=1}^4 N_i$  Gegenständen nach Vermischung:

$$S_{\text{nach}} = -k N \ln \frac{1}{N} = -k \sum_{i=1}^4 N_i \ln \frac{1}{N}$$

Mischungsentropie  $S_{\text{mix}} = S_{\text{nach}} - S_{\text{vor}}$

$$= -k \sum_{i=1}^4 N_i \left( \ln \frac{1}{N} - \ln \frac{1}{N_i} \right)$$

$$= -k \sum_{i=1}^4 N_i \ln \frac{N_i}{N} > 0$$

Interpretation

Stirling-Formel  $\ln(n!) \approx n \ln n$  ( $n$  groß)

$$\Rightarrow S_{\text{mix}} = -k \left( \underbrace{\sum_{i=1}^4 N_i \ln N_i}_{\approx \ln(N_i!)} - \underbrace{N \ln N}_{\approx \ln(N!)} \right)$$

$$\approx k \ln \frac{N!}{N_G! N_J! N_H! N_Z!}$$

$\Omega$  ist Zahl der Möglichkeiten der Anordnung der Elemente der Mülltonne  
(Permutationen mit Wiederholung)

- $\log_2 \Omega$  ist die Bitzahl (Information), um sämtl. mögl. Anordnungen durchzunummerieren
- z.B.  $N_G, N_J, N_H, N_Z \sim 10 \dots 100$

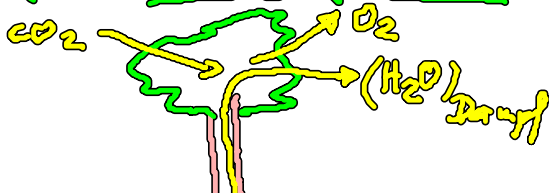
$$\Rightarrow S_{\text{mix}} \sim k \approx 10^{-23} \frac{\text{J}}{\text{K}}$$

$\frac{\text{J}}{\text{K}}$  ist keine angepasste Entropieeinheit für Makroobjekte  
sinnvoll wäre die Entropieeinheit "Bit"

$$S_{\text{mix}} = \log_2 \Omega$$

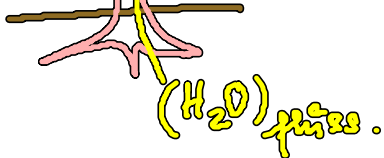
$$10^{23} \text{ Bit} = 1 \frac{\text{J}}{\text{K}}$$

### (iii) Photosynthese



Entropiebilanz pro Mol:





$$S_{in} = 6 S_{(CO_2)_{\text{gas}}} + 6 S_{(H_2O)_{\text{flüssig}}} + S_{\text{Stahl klein}}$$

$$S_{out} = S_{(\text{Glukose})_{\text{fest}}} + 6 S_{O_2}$$

2. HS?  $S_{out} \geq S_{in}$

$$\Rightarrow S_{out} < S_{in}$$

( $\Delta S = -40$  Bit pro Glukosemolekül)

Erniedrigung der Entropie durch Biosynthese

Entsorgung der Entropie?  $(H_2O)_{\text{flüssig}}$  <sup>Verdunstung</sup>  $\rightarrow$   $(H_2O)_{\text{Dampf}}$   
 entropiarmer  entropiereich

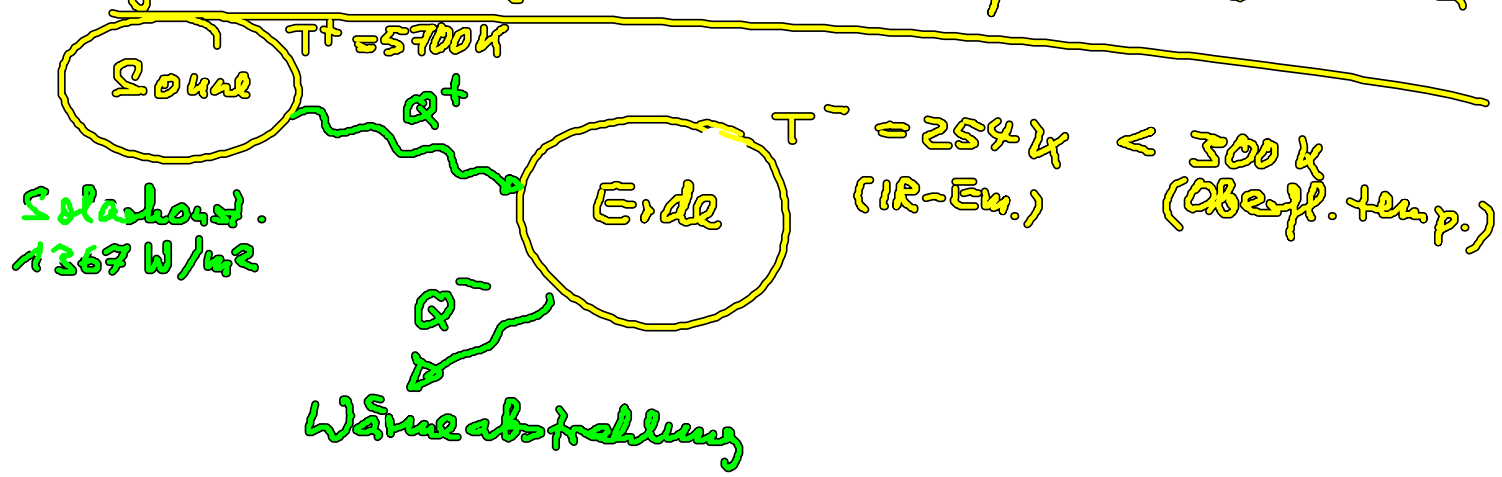
Verdunstungsentropie  $18 \frac{\text{Bit}}{\text{Molekül } H_2O}$

$\Rightarrow 2.2$  Mol  $H_2O$  pro Mol Glukose verdunstet!

(iv) Ökosystem Erde

Entsorgung der Entropie ist nur Wärmeabstrahl. in den Weltraum möglich:

globale Energie- und Entropiebilanz der Erde



Energiebilanz:  $Q^+ = Q^- = Q$

Entropiebilanz:  $\Delta S = \frac{Q^-}{T^-} - \frac{Q^+}{T^+} \approx \frac{Q}{T^-}$   
Entropieprod. abgeg. aufgen. Entropie

Entsorgungskapazität der Erde für dissipative Prozesse aller Art (Wetter, Leben, Wirtschaft)  
 $\approx 1.2 \frac{W}{m^2 K}$  (aus Solarhorizonte)

Physiolog. erzeugte Entropie pro Mensch  $0.5 \frac{W}{K}$   
(Stoffwechsel)

Ökonom. " " (Deutschl.)  $25 \frac{W}{K}$

$\approx 2.5\%$  der max. Entsorgungskap.

(New York: 400%)

(weltweit: 0.5%)

Entropische Effizienz:  $\epsilon = \frac{\Sigma_{\text{N}}}{\Sigma_{\text{tot}}} = \frac{\text{nützliche Entropieerz.}}{\text{gesamte Entropieerz.}}$

$\eta \sim 90\%$

$\epsilon \sim 7\%$