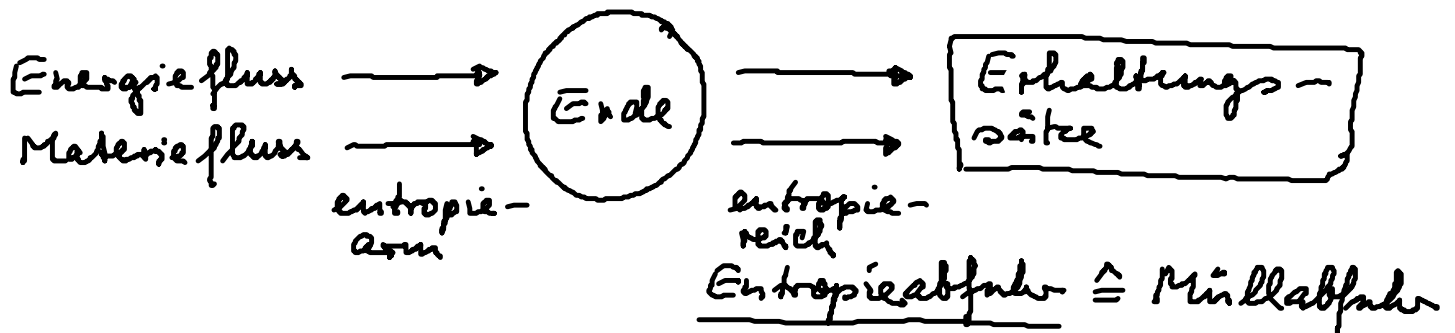


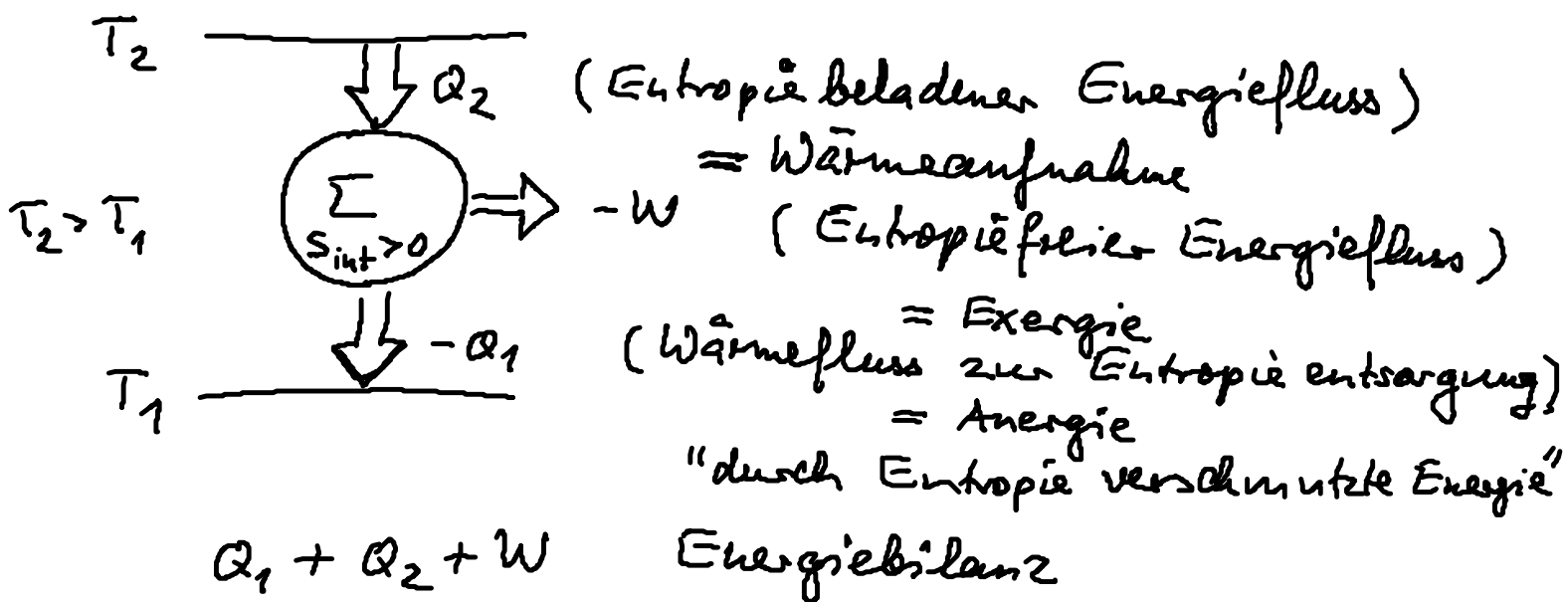
Offenes dissipative Systeme (Lebewesen, Ökonomie, System Erde)



Entropie bei irreversiblen Prozessen: keine Erhaltungsgröße

Beispiele

(i) Irreversible Wärmekraftmaschine



$$\Delta S = \frac{-Q_1}{T_1} = \frac{Q_2}{T_2} + \underbrace{S_{\text{int}}}_{>0} \quad \text{Entropieabgabe}$$

(inver. in der Maschine erzeugte Entropie)

irreversibler Wirkungsgrad

$$\eta_{\text{irr}} = \frac{-W}{Q_2} = 1 + \frac{Q_1}{Q_2}$$

$$\eta_{\text{irr}} = 1 - \frac{T_1}{T_2} - S_{\text{int}} \frac{T_1}{Q_2}$$

(ii) Müllentsorgung

Müll = entropiereiche Materie

Zerstreuung u. Vermischung von Materie

⇒ Erzeugung materieller Entropie

z.B. N_G Getränkedosen
 N_Z Zoghurtbecher
 N_M Milchtrichter
 N_Z Zahnpastatuben

} $N = N_G + N_Z + N_M + N_Z$
 Gegenstände in Mülltonne

vorher: Entropie von 1 Getränkedose her ausgegriffen aus N_G

$$S = -k \ln \frac{1}{N_G}$$

Entropie von N_G Getränkedosen: $S = -k N_G \ln \frac{1}{N_G}$

" von N_i Gegenstände ($i=1,2,3,4$), geordnet in 4 Behältern: $S_{\text{vor}} = -k \sum_{i=1}^4 N_i \ln \frac{1}{N_i}$

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

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

$$\begin{aligned}
 \text{Mischungsentropie} &= S_{\text{mix}} = S_{\text{nach}} - S_{\text{vor}} \\
 &= -k \sum_{i=1}^4 N_i \left(\ln \frac{1}{N} - \ln \frac{1}{N_i} \right) \\
 &= -k \sum_{i=1}^4 N_i \ln \frac{N_i}{N} > 0
 \end{aligned}$$

Interpretation:

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

$$\Rightarrow S_{\text{mix}} = -k \left(\sum_{i=1}^4 N_i \ln N_i - N \ln N \right) \approx k \ln \frac{N!}{N_1! N_2! N_3! N_4!}$$

Ω ist Zahl der Möglichkeiten der Anordnung der Elemente der Mülltonne (Permutationen mit Wiederholung)

- $\log_2 \Omega$ ist Biteahl (Information), um sämtliche mögl. Anordnungen durchzumeren.
- z.B. $N_i \sim 10 \dots 100$

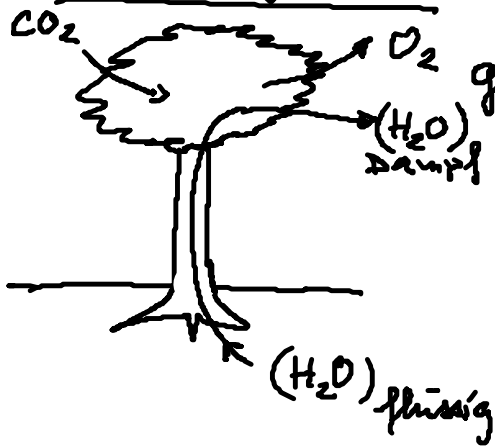
$$\Rightarrow S_{\text{mix}} \sim k \approx 10^{-23} \frac{\text{J}}{\text{K}} \text{ sehr klein!}$$

$\frac{\text{J}}{\text{K}}$ ist keine angepasste Entropieeinheit für Malvoobjekt

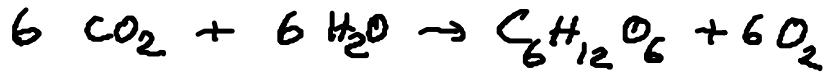
Sinnvoll wäre die Entropieeinheit "Bit"

$$S_{\text{mix}} = \log_2 \Omega \quad 10^{23} \text{ Bit} = 1 \frac{\text{J}}{\text{K}}$$

(iii) Photosynthese



Glukose synthese:



Entropiebilanz pro Mol:

$$S_{in} = 6 S_{(\text{CO}_2)_{\text{gas}}} + 6 S_{(\text{H}_2\text{O})_{\text{flüssig}}} + S_{\text{strahl}}$$

$$S_{out} = S_{(\text{Glukose})_{\text{fest}}} + 6 S_{\text{O}_2}$$

2. HS? $S_{out} \geq S_{in} \Rightarrow S_{out} < S_{in}$ ($\Delta S = -40 \text{ Bit}$)
 pro Glukosemolekül

Erniedrigung der Entropie durch Biosynth

Entsargung der Entropie = $(\text{H}_2\text{O})_{\text{flüssig}}$ ^{Verdunstung} $(\text{H}_2\text{O})_{\text{Dampf}}$
entropiarmer entropiereich

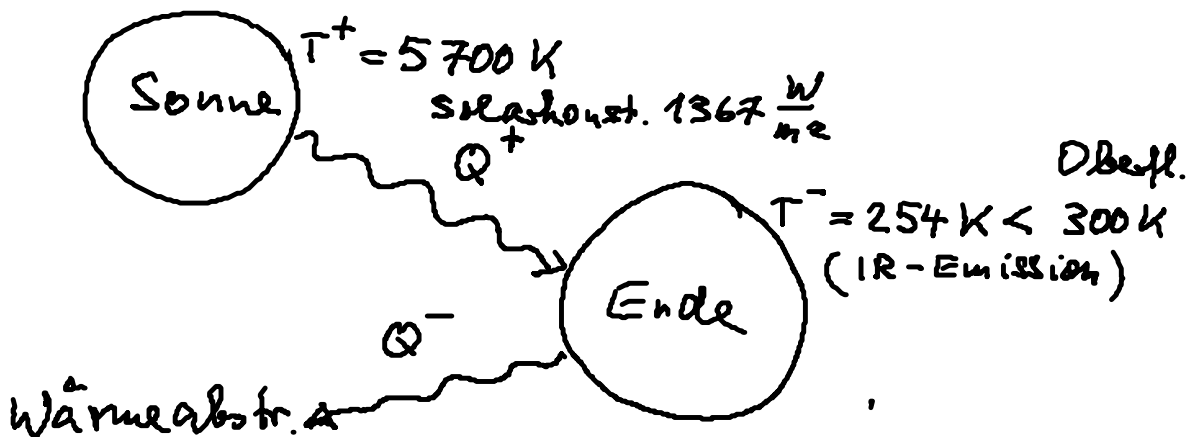
Verdunstungsentropie $18 \frac{\text{Bit}}{\text{Molekül}}$

$\Rightarrow 2.2 \text{ Mol H}_2\text{O}$ pro Mol Glukose
 muss verdunstet werden

(iv) Ökosystem Erde

Entsargung der Entropie nur durch Wärmestrahlung
 in den Weltraum möglich

globale Energie- und Entropiebilanz der Erde



Energiebilanz (stationär): $Q^+ = Q^- \equiv Q$

Entropiebilanz (") : $\Delta S = \frac{Q^-}{T^-} - \frac{Q^+}{T^+} \approx \frac{Q}{T^-}$
Entropie-
produktion abg. aufgen.
Entropie

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

Strahlung im therm. Gleichgewicht:

$$I_s = \frac{4}{3T} I_u$$

Entropie-
strom

Energie-
strom \rightarrow Solarkonst. $Q = 1367 \frac{W}{m^2}$

absorb. Querschnitt $F_{abs} = \pi R^2$

von der Erde absorb. Strahl.leist.

$$P = Q(1-A)\pi R^2$$

($A \approx 0,3$ Albedo = diffuses Reflexionsvermögen)

mittl. Energiestrom pro m^2 Erdoberfläche $F = 4\pi R^2$

$$I_u = \frac{P}{F} = Q(1-A)\frac{1}{4}$$

Entropiezufuss auf Erde

$$I_s^+ = \frac{4}{3T^+} I_u = Q(1-A)\frac{1}{3T^+}$$

Entropieabfluss von der Erde:

$$I_s^- = Q(1-A)\frac{1}{3T^-}$$

\rightarrow Entropieentwergungskapazität der Erde

$$\Delta S = I_s^- - I_s^+ = \frac{1}{3} Q(1-A) \left(\frac{1}{T^-} - \frac{1}{T^+} \right)$$

$$\approx 1.2 \frac{W}{m^2 K}$$

(CO_2 und Spurengase in der Atmosphäre vermindern die Wärmestrahlung, erhöhen dadurch T und vermindern somit die in den Weltraum abgegebene Entropie ΔS !)

Physiologisch erzeugte Entropie/Mensch (Stoffwechsel)
0.5 W/K

Ökonomisch erzeugte Entropie/Mensch (Deutschl.)

(75% durch Energieverbrauch, 25 W/K

20% durch Wasserschmutzung,

Rest Mischungsentropie von Feststoffmüll)

auf Fläche bezogen: BRD 2.5%

New York 400%

Weltweit 0.5%

der max. Entropiekapazität
1.2 W/m²K

Entropiebilanz der Erde

- | | | | | |
|-----|---|-----------------------|---------------|-------------|
| (1) | IR-Entsargkap. der Erde/m ² | 1.2 | $\frac{W}{K}$ | |
| (2) | Entropieabsenk. durch Photosynth./m ² | -1.5×10^{-3} | $\frac{W}{K}$ | |
| (3) | physiolog. Entropieprod. (Stoffwechsel) eines Erwachsenen | 0.5 | $\frac{W}{K}$ | |
| (4) | Ökonom. Zusatzentropie pro Einwohner | | | |
| | Weltdurchschnitt | 10 | $\frac{W}{K}$ | } pro Einw. |
| | USA | 35 | | |
| | Indien (~1992) | 2 | | |
| | Stadthab. New York/m ² | 4 | | |

(2) = (3) : Obergrenze der Bevölkerungsdichte: 2500/km²
NY : → Entropie export im Unland

Entropische Effizienz (2nd Law Efficiency)

$$\varepsilon = \frac{\Sigma_D}{\Sigma_{tot}} = \frac{\text{nützliche Entropieerzeugung}}{\text{gesamte Entropieerzeugung}}$$

z.B. Raumheizung $\eta \sim 90\%$!
Entropiewirk. grad $\varepsilon \sim 7\%$.

$$\Sigma_{tot} = \Sigma_D + \underbrace{\Sigma_v + \Sigma_k}_{\text{irrev.}} + \Sigma_{Abkühl}$$

Verbrenn. Abkühl
entropie

besser: Kraft-Wärme-Kopplung
Gas-Wärmepumpe