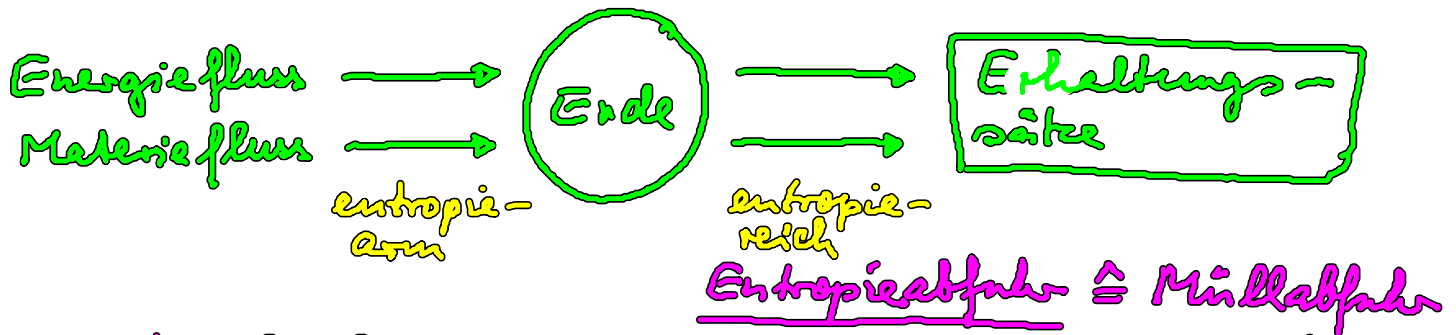


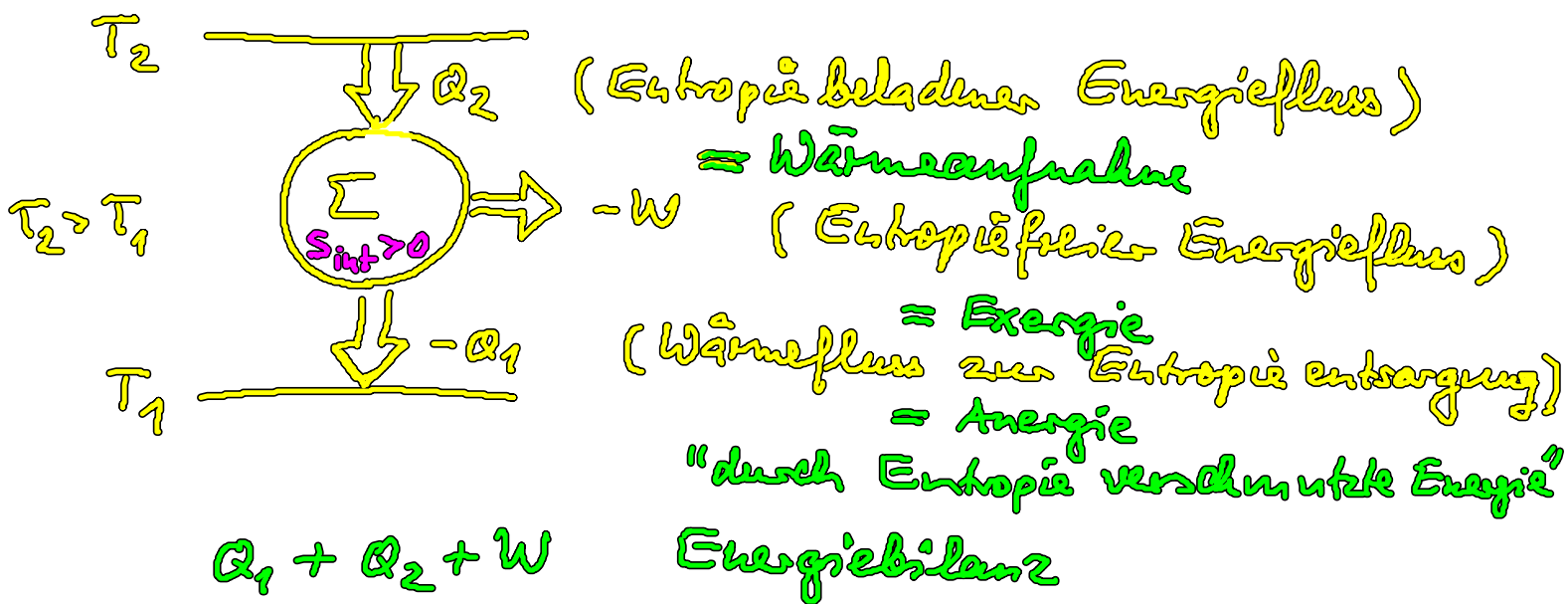
# Offenes dissipative Systeme (Lebewesen, Ökonomie, System Erde)



Entropie bei irreversiblen Prozessen: keine Erhaltungsgröße

## Beispiele

### (i) Irreversible Wärmekraftmaschine



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

(inves. 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

Zerstreuerung u. Vermischung von Materie

⇒ Erzeugung materieller Entropie

z.B.

$N_6$	Getränkedose	}	$N = N_6 + N_7 + N_8 + N_9$ Gegenstände in Mülltonne
$N_7$	Joghurtbecher		
$N_8$	Milchtüte		
$N_9$	Zahnpastatube		

vorher: Entropie von 1 Getränkedose her ausgegriffen aus  $N_6$

$$S = -k \ln \frac{1}{N_6}$$

Entropie von  $N_6$  Getränkedosen:  $S = -k N_6 \ln \frac{1}{N_6}$

" 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

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

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

Interpretation:

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

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

$\approx \ln N_i! \approx \ln N!$

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

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

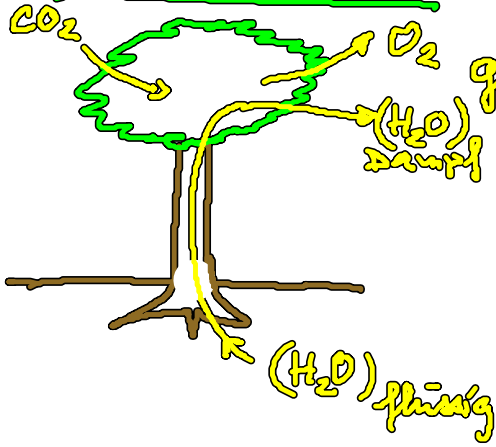
$$\Rightarrow S_{\text{mix}} \sim k \approx 10^{-23} \frac{\text{J}}{\text{K}} \text{ sehr klein!}$$

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

Sinnvoll wäre die Entropieeinheit "Bit"

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

### (iii) Photosynthese



Glucose synthese:



Entropiebilanz pro Mol:

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

$$S_{out} = S_{(\text{glucose})_{\text{pa}}} + 6 S_{\text{O}_2}$$

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

$\Rightarrow S_{out} < S_{in}$  ( $\Delta S = -40 \text{ Bit}$ )  
pro Glucosemolekül

Erniedrigung der Entropie durch Biosynth

Entsargung der Entropie:  $(\text{H}_2\text{O})_{\text{flüssig}}$   $\xrightarrow{\text{Verdunst.}}$   $(\text{H}_2\text{O})_{\text{Dampf}}$   
Entropiearm entropiereich

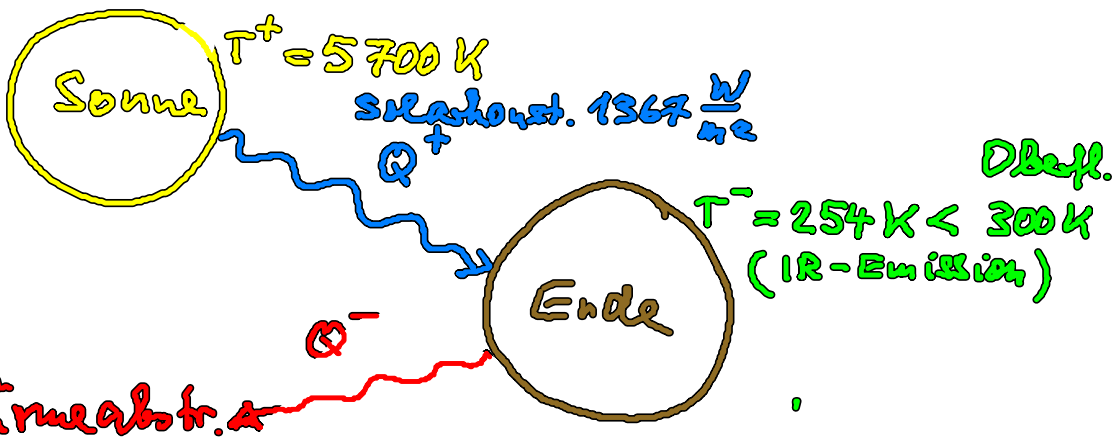
Verdunstungsentropie 18 Bit/Molekül

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

### (iv) Ökosystem Erde

Entsargung der Entropie nur durch Wärmeabstrahl. in den Weltraum möglich

globale Energie- und Entropiebilanz der Erde



Wärmeabstr.  $Q^-$

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

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

⇒ Entsorgungskapazität 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  $\rightarrow$  Solarconst.  $Q = 1367 \frac{W}{m^2}$

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 = diffuse Reflexionsvermögen)

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

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

Entropiezufluss auf Erde

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

Entropieabfluss von der Erde:

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

→ Entropieentsorgungskapazität der Erde

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

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

(  $\text{CO}_2$  und Spurengase in der Atmosphäre vermind. die Wärmestrahlung, erhöhen dadurch  $T^-$  und vermindern somit die in den Weltraum abgegebene Entropie  $\Delta S$  ! )

Physiologisch erzeugte Entropie/Mensch (Stoffwechsel)  $0.5 \text{ W/K}$

Ökonomisch erzeugte Entropie/Mensch (Deutschl.)  $25 \text{ W/K}$

(75% durch Energieverbrauch,  
20% durch Wasserschmutzung,  
Rest Mischungsentropie von Fätsstoffmüll)

auf Fläche bezogen: BRD 2.5%

New York 400%

Weltweit 0.5%

der max. Entropiekapazität  $1.2 \text{ W/m}^2\text{K}$

### Entropiebilanz der Erde

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

(2) = (3) : Obergrenze der Bevölkerungsdichte:  $2500/\text{km}^2$   
 NT :  $\rightarrow$  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  $\varepsilon \sim 7\%$

$$\Sigma_{tot} = \Sigma_D + \underbrace{\Sigma_v + \Sigma_{Le}}_{\text{Verbreit., Abkühl. Entropi.}} + \Sigma_{inv.}$$

besser: Kraft-Wärme-Kopplung  
Gas-Wärmepumpe