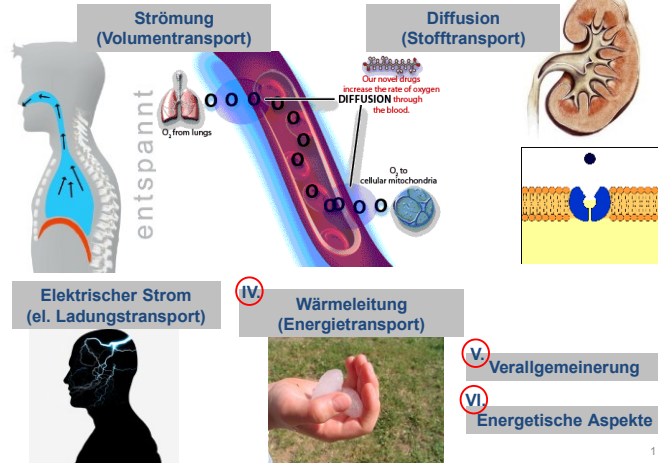
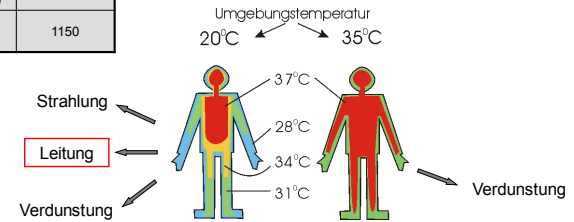
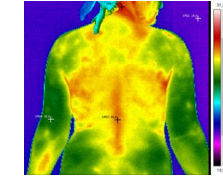


Transportprozesse



Wärmebildung und -abgabe

Aktivität	Wärmebildung (W)
In Ruhe	115
Langsames Spazieren	260
Radfahren (15 km/h)	420
Treppensteigen (2/s)	700
Laufen (15 km/h)	1150



IV. Energietransport (Wärmeleitung)

0. Mechanismus: Stöße zw. Atomen und Molekülen + freie Elektronen = **Konduktion**

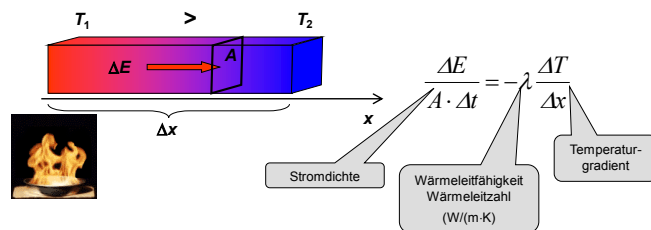
1. Grundbegriffe

- Energiestromstärke (I): $I = \frac{\Delta E}{\Delta t}$ ($\frac{J}{s} = W$)
- Energiestromdichte (J): $J = \frac{\Delta E}{A \cdot \Delta t}$ ($\frac{J}{m^2 \cdot s} = \frac{W}{m^2}$)



J. B. J. Fourier
1768-1830
Mathematiker
und Physiker

2. Transportgesetz = Fourier-Gesetz



- Wärmeleitfähigkeit: > stoffspezifisch

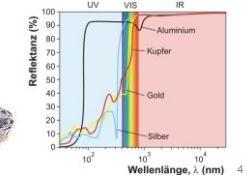
Stoff	λ (W/(m·K))
Silber	420
Glas	1
Wasser	0,6
Muskel	0,4
Fett	0,2
Luft	0,025


3. Anwendungen (für alle Mechanismen)

- Temperaturstrahlung $\Delta P = \sigma \cdot (T_{\text{Körper}}^4 - T_{\text{Umgebung}}^4) \cdot A$

$$T_{\text{Körper}} = 28^\circ\text{C} \quad T_{\text{Umgebung}} = 20^\circ\text{C} \quad \Rightarrow \quad \Delta P = 83 \text{ W}$$

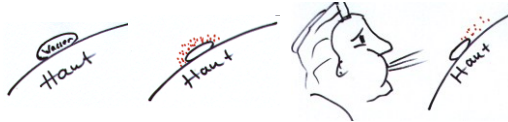
$$T_{\text{Umgebung}} = 0^\circ\text{C} \quad \Rightarrow \quad \Delta P = 290 \text{ W !}$$



- Wärmeleitung
 - Luft ↔ Wasser als Umgebung
 - Strömungen! (z. B. Wind)
- 
 (Konvektion oder Wärmeströmung!)



- Verdunstung
 - hohe spez. Verdampfungswärme von Wasser: $\approx 2400 \text{ kJ/kg}$ (bei 30°C) !!
 - Wasserverlust:
 - ständig $\approx 50 \text{ ml/h}$ $\Rightarrow \approx 35 \text{ W}$
 - bei Extrembedingungen $\approx 1600 \text{ ml/h}$ $\Rightarrow \approx 1000 \text{ W} !!$
 - Strömungen! (z. B. Wind)



5

V. Zusammenfassung

	Was strömt?	Stärke?	Warum?	Zusammenhang?
Ladungs-transport	q	$\frac{\Delta q}{A \cdot \Delta t}$	φ	$-\frac{\Delta \varphi}{\Delta l}$ $\frac{\Delta q}{A \cdot \Delta t} = -\sigma \frac{\Delta \varphi}{\Delta l}$
Volumen-transport	V	$\frac{\Delta V}{A \cdot \Delta t}$	p	$-\frac{\Delta p}{\Delta l}$ $\frac{\Delta V}{A \cdot \Delta t} = -\frac{r^2}{8\eta} \frac{\Delta p}{\Delta l}$
Stoff-transport	v	$\frac{\Delta v}{A \cdot \Delta t}$	c^*	$-\frac{\Delta c}{\Delta x}$ $\frac{\Delta v}{A \cdot \Delta t} = -D \frac{\Delta c}{\Delta x}$
Energie-transport	E	$\frac{\Delta E}{A \cdot \Delta t}$	T	$-\frac{\Delta T}{\Delta x}$ $\frac{\Delta E}{A \cdot \Delta t} = -\lambda \frac{\Delta T}{\Delta x}$
allgemein	x_{ext}	$J = \frac{\Delta x_{\text{ext}}}{A \cdot \Delta t}$	y_{int}	$X = -\frac{\Delta y_{\text{int}}}{\Delta x}$ $J = LX$
	extensive Gr.	Strom-dichte	intensive Gr.	thermo-dynamische Kraft onsagersche Beziehung

* Im allgemeinen Fall μ

6

Extensive Größe:

- additiv
- Im Gleichgewicht proportional zur Ausbreitung des Systems
- In Transportprozessen: die transportierte Größe

Intensive Größe:

- nicht-additiv
- Im Gleichgewicht überall gleich in dem System
- In Transportprozessen: die sich ausgleichende Größe


Gleichgewicht: es gibt keine Transportprozesse.

0. Hauptsatz der Thermodynamik: Gleichgewicht \Leftrightarrow homogene Verteilung der intensiven Größen

inhomogene Verteilung der intensiven Größen \Rightarrow **Transportprozesse**

Stärke und Richtung des Transportprozesses:

$J = LX$

Onsagersche Beziehung
 Richtung: homogene Verteilung

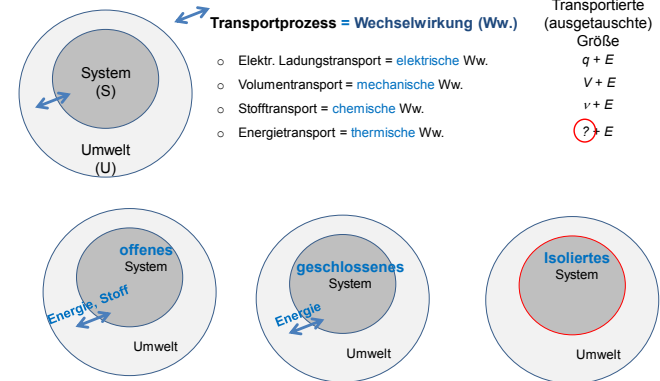
2. Hauptsatz der Thermodynamik

Irreversibilität

7

VI. Energetische Beziehungen (Thermodynamik)

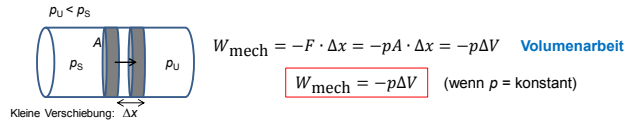
1. Nomenklatur



8

2. Energietausch (Arbeit) in den einzelnen Wechselwirkungen

- Volumentransport = **mechanische** Ww.



Bemerkungen:


- $-p_S \Delta V \neq -p_U \Delta V$!!!
 $W_{\text{mech}, S} \neq W_{\text{mech}, U}$!!!
 \Rightarrow Kein „Energieaustausch“, d. h. die durch das System abgegebene mechanische Energie erscheint in der Umgebung nicht 100%ig als mechanische Energie!
- $-p_S \Delta V = -p_U \Delta V$ nur, wenn $p_U = p_S$
 \Rightarrow Da gibt es aber keinen Prozess! System und Umgebung sind im Gleichgewicht.
- Kompromiss: ein Prozess, der im „quasi“ Gleichgewicht läuft:

$p_S \neq p_U$
 aber quasistationäre Prozessführung („reversible Prozesse“)!
 (in kleinen Schritten immer nah dem Gleichgewicht)
 $W_{\text{mech}, S} = W_{\text{mech}, U}$

9

- Elektr. Ladungstransport = **elektrische** Ww: $W_{\text{elektr}} = \varphi \Delta q$ (wenn $\varphi = \text{konstant}$)
- Allgemein: $W = y_{\text{int}} \cdot \Delta x_{\text{ext}}$
- Stofftransport = **chemische** Ww: $W_{\text{chem}} = \mu \Delta v$ (wenn $\mu = \text{konstant}$)

Wenn $\mu \neq \text{konstant}$: $W_{\text{chem}} = v \cdot R \cdot T \cdot \ln \frac{c_2}{c_1}$



Anwendung

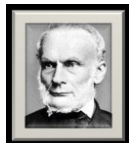
Konzentrationsarbeit (chemische Arbeit) der Niere bei der Glukoseresorption:

„In einem Tag wird etwa 0,8 mol Glukose gegen einem 100fachen Konzentrationsverhältnis resorbiert.“

$\Rightarrow W_{\text{chem}} = vRT \ln \frac{c_2}{c_1} = 0,8 \cdot 8,31 \cdot 310 \cdot \ln 100 \approx 9500 \text{ J}$

$P_{\text{chem}} = \frac{9500}{24 \cdot 3600} \approx 0,1 \text{ W}$

- Energietransport = **thermische** Ww: $Q = W_{\text{therm}} = T \Delta S$ (wenn $T = \text{konstant}$)



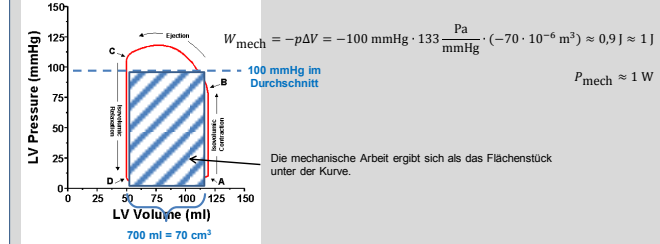
Rudolf Julius Emmanuel Clausius (1822-1888), Physiker

Entropie
 (entropien (gr) = umkehren)

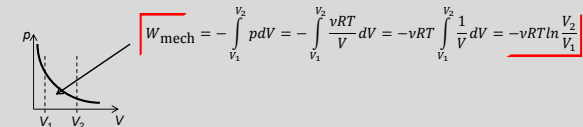
11

Anwendungen

Volumenarbeit des Herzens (des linken Ventrikels):



Volumenarbeit bei isothermer Ausdehnung eines Gases (wenn $p \neq \text{konstant}$):



10

2. Innere Energie (E): Summe aller kinetischen und potenziellen Energien innerhalb des Systems

3. Erster (1.) Hauptsatz der Thermodynamik

Energieerhaltung $\Rightarrow \Delta E = W_{\text{mech}} + W_{\text{elektr}} + W_{\text{chem}} + W_{\text{therm}}$

$\Delta E = W + Q$

$\Delta E = -p \Delta V + \varphi \Delta q + \mu \Delta v + T \Delta S = \sum y_{\text{int}} \cdot \Delta x_{\text{ext}}$

4. Entropie (S) – phenomenologische Definition:

$Q = W_{\text{therm}} = T \Delta S$

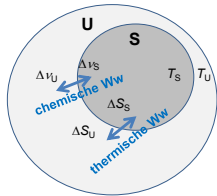
Definitionsformel der Entropie: $\Delta S = \frac{Q_{\text{rev}}}{T}$ ($\frac{1}{K}$) (wenn $T = \text{konstant}$)

(bei reversibler Prozessführung: $Q_{\text{rev, System}} = Q_{\text{rev, Umwelt}} !!$) / Wenn $T \neq \text{konstant}$: $\Delta S = c \cdot m \cdot \ln \frac{T_2}{T_1}$

12

5. Zweiter (2.) Hauptsatz der Thermodynamik: In einem isolierten System verlaufen spontane Prozesse nur in der Richtung des Ausgleichs.

Beispiel: Konzentrationsausgleich (Ausgleich des chemischen Potentials) zwischen System (S) und Umwelt (U)



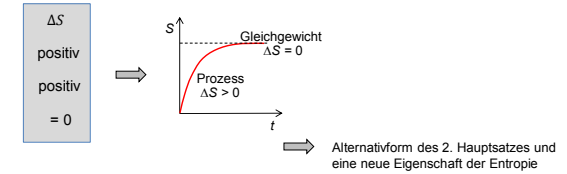
$$\begin{aligned} \Delta E_S &= -\Delta E_U \rightarrow \Delta E_S + \Delta E_U = 0 \\ \Delta v_S &= -\Delta v_U \\ \Delta E_S &= \mu_S \cdot \Delta v_S + T \cdot \Delta S_S \rightarrow \Delta S_S = \frac{\Delta E_S - \mu_S \cdot \Delta v_S}{T} \\ \Delta E_U &= \mu_U \cdot \Delta v_U + T \cdot \Delta S_U \rightarrow \Delta S_U = \frac{\Delta E_U - \mu_U \cdot \Delta v_U}{T} \\ \Delta S &= \Delta S_S + \Delta S_U = \frac{\Delta E_S - \mu_S \cdot \Delta v_S}{T} + \frac{\Delta E_U - \mu_U \cdot \Delta v_U}{T} \\ &= \frac{\Delta v_S}{T} \cdot (\mu_U - \mu_S) \end{aligned}$$

- Voraussetzungen:
- thermisches Gleichgewicht: $T_S = T_U = T$
 - stabile Wand \Rightarrow keine mechanische Ww
 - elektrische Ww wird vernachlässigt

Alle Möglichkeiten:

	$(\mu_U - \mu_S)$	$\frac{\Delta v_S}{T}$	ΔS
$\mu_U < \mu_S$	negativ	negativ	positiv
$\mu_U > \mu_S$	positiv	positiv	positiv
$\mu_U = \mu_S$	= 0	= 0	= 0

13



Zweiter (2.) Hauptsatz der Thermodynamik: In einem isolierten System verlaufen spontane Prozesse nur in der Richtung der Entropiezunahme.

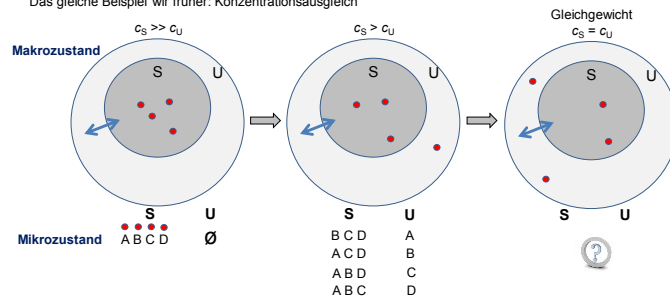
Entropie: Sie ist keine Erhaltungsgröße, sie wird in Ausgleichsprozessen produziert.

\Rightarrow „Wärmemet (Entropietod)“ des Universums

14

6. Entropie (S) – statistische Definition:

Das gleiche Beispiel wie früher: Konzentrationsausgleich



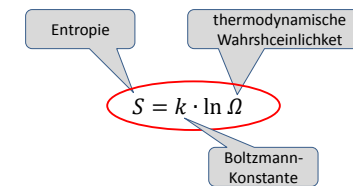
Thermodynamische Wahrscheinlichkeit (Ω): Anzahl der zu einem Makrozustand gehörenden Mikrozustände

$\Omega =$ 1 4 6

In dieser Richtung nehmen zu: $\checkmark \Omega$

- \checkmark Entropie
- \checkmark Unordnung
- \checkmark Unsicherheit und Informationsgehalt eines Experimentes

15



Die Entropie ist ein Maß für die Unordnung.



Ludwig Eduard Boltzmann
(1844-1906)
Physiker

16

Experiment: Lokalisation eines zufällig gewählten Moleküls (Z. B. Wo ist Molekül C?)

- 2 mögliche Ergebnisse (Ausgänge, Ereignisse):
- Im System (S)
 - In der Umwelt (U)

Informationsgehalt des Experimentes

Ereignis	S	U
p_i	1	0
$\frac{1}{p_i}$	1	∞
$\log_2\left(\frac{1}{p_i}\right)$	0 bit	∞ bit
$H = \sum p_i \cdot \log_2\left(\frac{1}{p_i}\right)$	0 bit	0,811 bit

17

Beispiel: Konzentrationsausgleich (Ausgleich des chemischen Potentials) zwischen System (S) und Umwelt (U)

Voraussetzungen:

- thermisches Gleichgewicht: $T_S = T_U = T$
- mechanisches Gleichgewicht: $p_S = p_U = p$
- elektrische Ww wird vernachlässigt

$\Delta v_S = -\Delta v_U$

$\Delta G_S = \mu_S \cdot \Delta v_S$

$\Delta G_U = \mu_U \cdot \Delta v_U$

$\Delta G = \Delta G_S + \Delta G_U = \Delta v_U \cdot (\mu_U - \mu_S)$

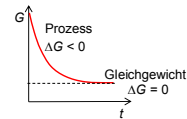
	$(\mu_U - \mu_S)$	Δv_U	ΔG
$\mu_U < \mu_S$	negativ	positiv	negativ
$\mu_U > \mu_S$	positiv	negativ	negativ
$\mu_U = \mu_S$	= 0	= 0	= 0

Alle Möglichkeiten:

➡ Alternativform des 2. Hauptsatzes

Zweiter (2.) Hauptsatz der Thermodynamik: In einem isolierten System verlaufen spontane Prozesse (bei $T = \text{konstant}$ und $p = \text{konstant}$) nur in der Richtung der minimalen freien Enthalpie.

19



7. Thermodynamische Potenzialfunktionen

Für die Beschreibung von Prozessen bei speziellen Bedingungen

○ Innere Energie (E)

○ Enthalpie (H): $H = E + pV$

Im Spezialfall:

- $p = \text{konstant}$
- chemische und elektrische Arbeit werden vernachlässigt

$$\Delta H = \Delta E + \Delta(pV) = \Delta E + \cancel{p \cdot \Delta V} + p \cdot \Delta V = -p \cdot \Delta V + T \Delta S + p \cdot \Delta V = T \Delta S = Q_p$$

○ Freie Energie (F): $F = E - TS$

Im Spezialfall:

- $T = \text{konstant}$
- $V = \text{konstant}$
- elektrische Arbeit wird vernachlässigt

$$\Delta F = \mu \Delta v = W_{\text{chem}} \quad \text{Bei spontanen Prozessen: } \Delta F < 0$$

○ Freie Enthalpie (G): $G = E + pV - TS = H - TS$

Im Spezialfall:

- $T = \text{konstant}$
- $p = \text{konstant}$
- elektrische Arbeit wird vernachlässigt

$$\Delta G = \mu \Delta v = W_{\text{chem}} \quad \text{Bei spontanen Prozessen: } \Delta G < 0$$

18

Rechenaufgaben: ■ Praktikumsbuch 63, 64, 66, 69 und 71

- Wie groß ist der Informationsgehalt eines Werfens beim Würfelspiel?
- Gegeben ist das Alphabet mit zwei Zeichen „a“ und „b“ und deren Wahrscheinlichkeiten $p(a) = 0,75$ und $p(b) = 0,25$.
a) Berechnen Sie den Informationsgehalt der Identifizierung eines zufälligen Buchstabens in der Sprache dieses Alphabets.
b) Wie groß wäre der letztere Informationsgehalt, wenn beide Wahrscheinlichkeiten 0,5 wären?
- Das deutsche Alphabet enthält 30 Buchstaben. Berechnen Sie den Informationsgehalt der Identifizierung eines zufälligen Buchstabens in der deutschen Sprache unter der Voraussetzung, dass alle Buchstaben die gleiche Auftretenswahrscheinlichkeit haben.
- a) Wie viele Möglichkeiten gibt es, aus 4 verschiedenen Nukleotiden eine Nukleotidkette herzustellen, welche der des MS2 Bakteriophagen (3600 Basen) entspricht? b) Berechnen Sie den Informationsgehalt dieser Nukleotidkette.
- Berechnen Sie den Informationsgehalt eines DNA-Moleküls, das aus 10^6 Nukleotiden besteht.
- a) Wie viele Möglichkeiten gibt es, aus 20 verschiedenen Aminosäuren eine aus 51 Aminosäuren bestehende Polypeptidkette herzustellen, welche dem Insulin in der Länge ähnlich ist? b) Berechnen Sie den Informationsgehalt dieser Polypeptidkette.

Lösungen:

- 2,58 bit
- a) 0,811 bit; b) 1 bit
- 4,91 bit
- a) $4^{3600} = 2,6 \cdot 10^{2167}$; b) 7200 bit
- $2 \cdot 10^6$ bit
- a) $20^{51} = 2,25 \cdot 10^{66}$; b) 220 bit

20