

Medizinische Biophysik 2018. 05. 02.

Transportprozesse

IV. Wärmeleitung (Energietransport)

0. Mechanismus

1. Grundbegriffe Energiestromstärke, -dichte
2. Transportgesetz = Fourier-Gesetz
3. Anwendungen

V. Verallgemeinerung der Transportgesetze

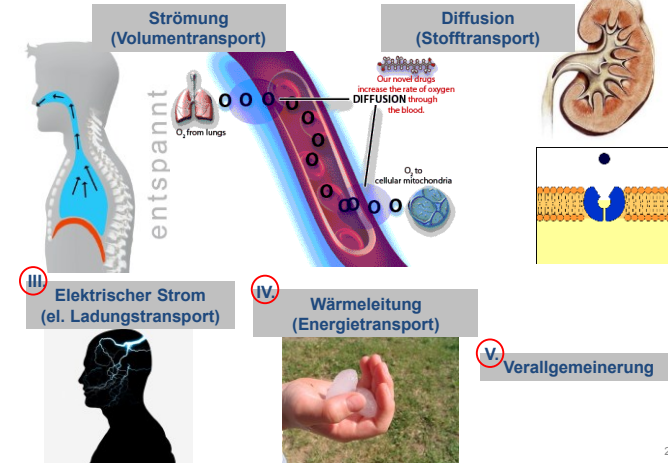
- Extensive und intensive Größen, 0. Hauptsatz der Thermodynamik, onsagersche Beziehung,
2. Hauptsatz der Thermodynamik

VI. Energetische Beziehungen (Thermodynamik)

1. Nomenklatur
2. Energietausch (Arbeit) in den einzelnen Wechselwirkungen
3. Innere Energie (E)
4. Erster (1.) Hauptsatz der Thermodynamik
5. Entropie (S) – phenomenologische Definition
6. Zweiter (2.) Hauptsatz der Thermodynamik
7. Entropie (S) – statistische Definition

1

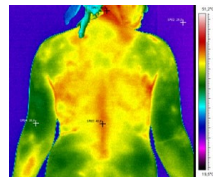
Transportprozesse



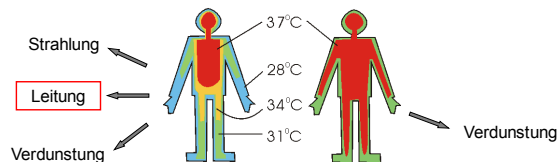
2

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



Umgebungstemperatur
20°C ← 35°C



Zur Erinnerung

3

IV. Wärmeleitung (Energietransport)

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

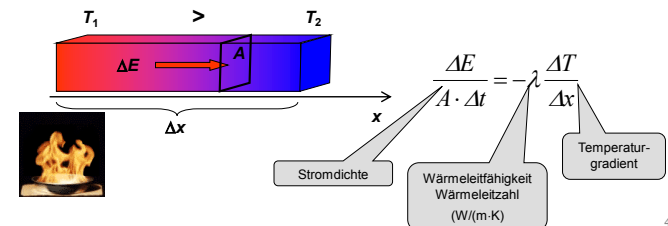
1. Grundbegriffe

- 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



4

- Wärmeleitfähigkeit: ➤ stoffspezifisch

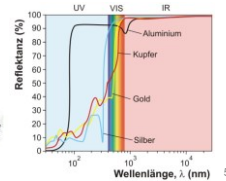
Stoff	λ (W/(m·K))
Silber	420
Glas	1
Wasser	0,6
Muskel	0,4
Fett	0,2
Luft	0,025

3. Anwendungen (Zusammenfassung der Wärmeabgabemechanismen)

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

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

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



$$P = -\lambda A \frac{\Delta T}{\Delta x}$$

$$T_{\text{Körper}} = 28^\circ\text{C} \quad T_{\text{Umgebung}} = 20^\circ\text{C} \Rightarrow P \approx 40 \text{ W}$$

- Luft ↔ Wasser als Umgebung
- Strömungen! (z. B. Wind)



Verdunstung

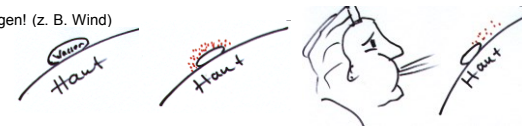
- hohe spez. Verdampfungswärme von Wasser: $\approx 2400 \text{ kJ/kg}$ (bei 30°C) !!

$$\text{ständig} \approx 50 \text{ ml/h} \Rightarrow \approx 35 \text{ W}$$

$$\text{bei Extrembedingungen} \approx 1600 \text{ ml/h} \Rightarrow \approx 1000 \text{ W !!}$$



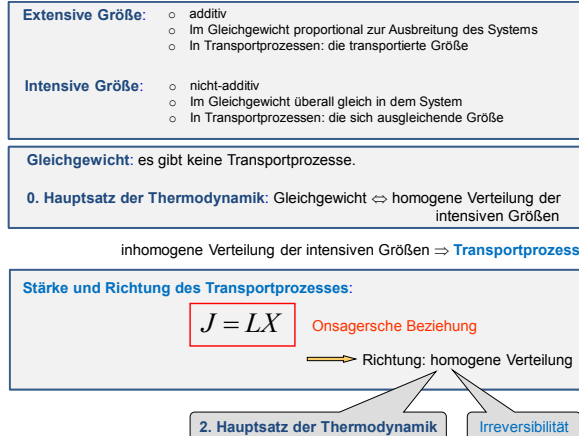
- Strömungen! (z. B. Wind)



V. Verallgemeinerung der Transportgesetze

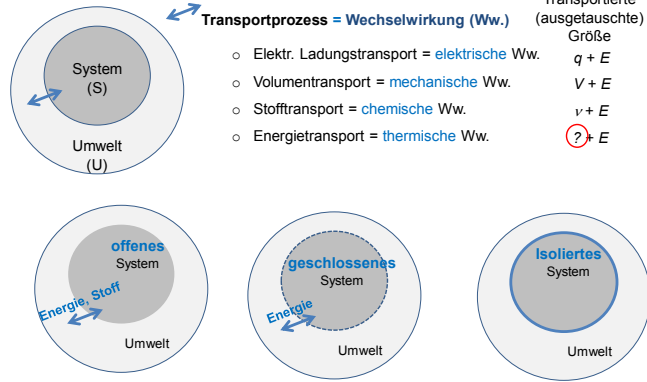
	Was strömt?	Stärke?	Was treibt die Strömung?	Zusammenhang?
Volumen-transport	V	$J_V = \frac{\Delta V}{A \cdot \Delta t}$	p	$J_V = -\frac{R^2}{8\eta} \frac{\Delta p}{\Delta l}$
Stoff-transport	v	$J_v = \frac{\Delta v}{A \cdot \Delta t}$	$c \cdot *$	$J_v = -D \frac{\Delta c}{\Delta x}$
Ladungs-transport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

* Im allgemeinen Fall μ



VI. Energetische Beziehungen (Thermodynamik)

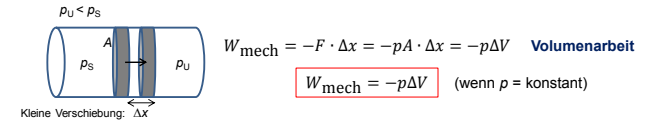
1. Nomenklatur



9

2. Energieaustausch (Arbeit) in den einzelnen Wechselwirkungen

a) Volumentransport = **mechanische** Ww.



Bemerkung: $p_S \neq p_U$

$|p_S \Delta V| \neq |p_U \Delta V|$

$|W_{\text{mech}, S}| \neq |W_{\text{mech}, U}|$!!!

Kein „Energieaustausch“, d. h. die durch das System abgegebene mechanische Energie erscheint in der Umgebung nicht 100%-ig als mechanische Energie!

Es wäre ein „Energieaustausch“, da gibt es aber keinen Prozess! System und Umgebung sind im Gleichgewicht.

Kompromiss – ein Prozess, der im „quasi“ Gleichgewicht läuft:

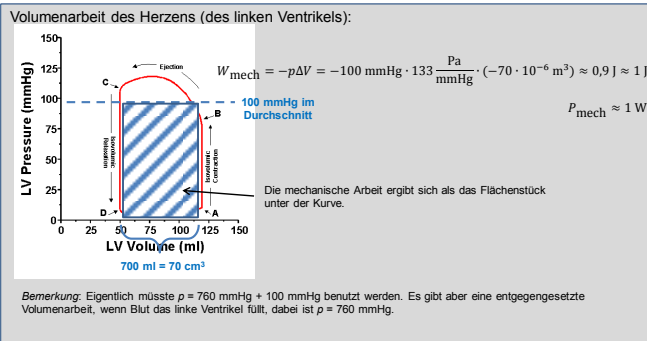
$p_S \approx p_U$

$|W_{\text{mech}, S}| \approx |W_{\text{mech}, U}|$

quasistationäre Prozessführung („reversibler Prozess“)!
(in kleinen Schritten immer nah dem Gleichgewicht)

10

Ein Anwendungsbeispiel:



11

b) Elektr. Ladungstransport = **elektrische** Ww: $W_{\text{elektr}} = \varphi \Delta q$ (wenn $\varphi = \text{konstant}$)

$$\left. \begin{array}{l} W_{\text{mech}} = -p\Delta V \\ W_{\text{elektr}} = \varphi \Delta q \end{array} \right\} \text{Verallgemeinerung: } W = y_{\text{int}} \cdot \Delta x_{\text{ext}}$$

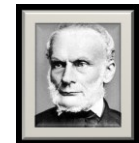
c) Stofftransport = **chemische** Ww: $W_{\text{chem}} = \mu \Delta \nu$ (wenn $\mu = \text{konstant}$)

Das chemische Potenzial zeigt also um wieviel Joule die Energie des Systems zunimmt, wenn die Stoffmenge im System um 1 mol erhöht wird.

d) Energietransport = **thermische** Ww:

$$Q = W_{\text{therm}} = T\Delta S = T\Delta S \quad (\text{wenn } T = \text{konstant})$$

Entropie (entropin (gr) = umkehren ☺)



Rudolf Julius Emmanuel Clausius (1822-1888) Physiker

12

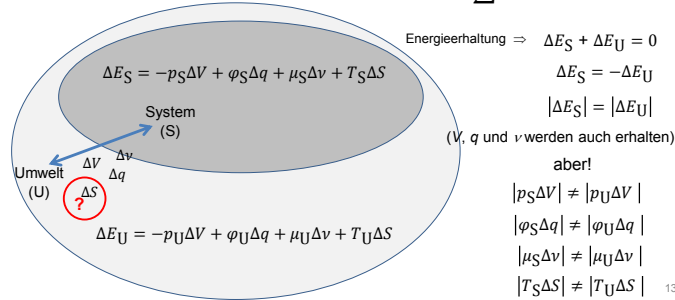
3. Innere Energie (E): Summe aller kinetischen und potenziellen Energien innerhalb des Systems

4. Erster (1.) Hauptsatz der Thermodynamik

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

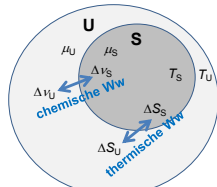
$$\Delta E = \underbrace{W}_{\text{W}} + Q$$

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



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

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



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

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

5. Entropie (S) – phenomenologische Definition:

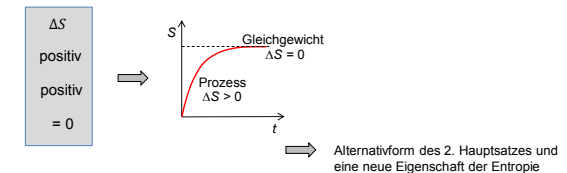
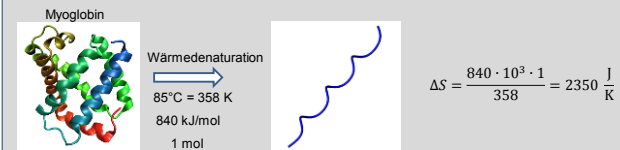
bei reversibler Prozessführung:

$$|Q_{\text{rev, System}}| = |Q_{\text{rev, Umwelt}}|$$

$$Q = W_{\text{therm}} = T\Delta S \Rightarrow \Delta S = \frac{Q_{\text{rev}}}{T} \left(\frac{1}{K} \right) \quad (\text{wenn } T = \text{konstant})$$

$$\Delta S = c \cdot m \cdot \ln \frac{T_2}{T_1} \quad (\text{wenn } T \neq \text{konstant})$$

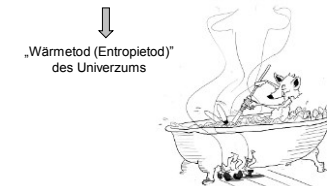
Ein Anwendungsbeispiel:



Jetzt wird das System neu definiert: das frühere System + Umwelt. Das ist schon isoliert.

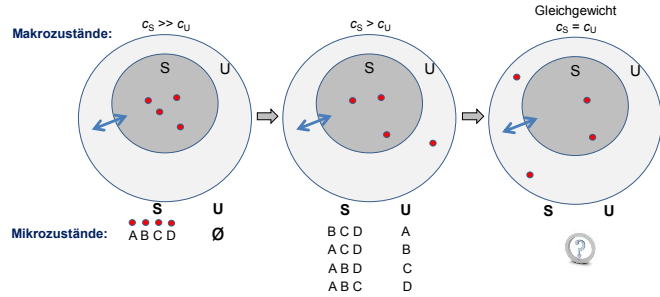
Zweiter (2.) Hauptsatz der Thermodynamik: In einem isolierten System verlaufen spontane Prozesse nur in die Richtung der Entropiezunahme.

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



7. Entropie (S) – statistische Definition:

Das gleiche Beispiel wie früher: Konzentrationsausgleich

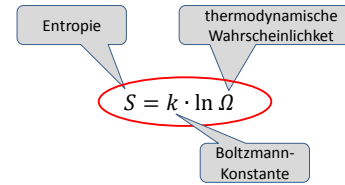


Thermodynamische Wahrscheinlichkeit (Ω): Anzahl der zu einem Makrozustand gehörenden Mikrozustände

$\Omega =$
1
4
6

- In dieser Richtung nehmen zu: ✓ Ω
- ✓ Entropie
 - ✓ „Unordnung“
 - ✓ Unsicherheit und Informationsgehalt eines Experimentes

17



Die Entropie ist ein Maß für die „Unordnung“.

entropy



Ludwig Eduard Boltzmann (1844-1906) Physiker

18