

Medizinische Biophysik 2015. 04. 22.

Transportprozesse

IV. Energietransport (Wärmeleitung)

0. Mechanismus

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

V. Zusammenfassung

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

VI. Energetische Beziehungen (Thermodynamik)

1. Nomenklatur
2. Energietausch (Arbeit) in den einzelnen Wechselwirkungen
3. Innere Energie (E)
4. Erster (1.) Hauptsatz der Thermodynamik

1

Transportprozesse

Strömung (Volumentransport)

entspannt
O₂ from lungs
Our novel drugs increase the rate of oxygen DIFFUSION through the blood.
O₂ to cellular mitochondria

Diffusion (Stofftransport)

Elektrischer Strom (el. Ladungstransport)

Wärmeleitung (Energietransport)

IV

V

VI

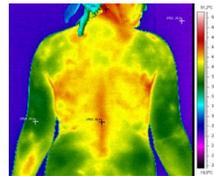
Verallgemeinerung

Energetische Aspekte

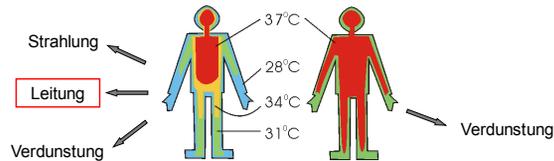
2

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. Energietransport (Wärmeleitung)

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

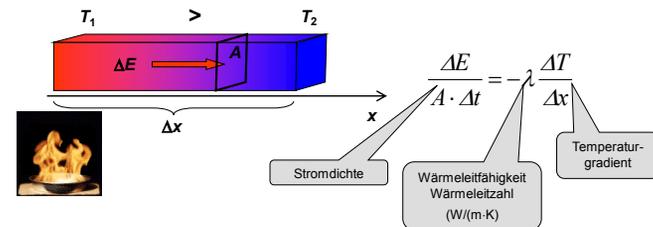
1. Grundbegriffe

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



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

2. Transportgesetz = Fourier-Gesetz



4

- Wärmeleitfähigkeit: > stoffspezifisch

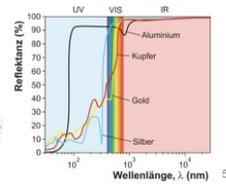
Stoff	λ (W/(m·K))
Silber	420
Glas	1
Wasser	0,6
Muskel	0,4
Fett	0,2
Luft	0,025

3. Anwendungen (Zusammenfassung der Wärmeabgabemechanismen)

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

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

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



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

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

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



- Verdunstung

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

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

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



- Strömungen! (z. B. Wind)



V. Zusammenfassung

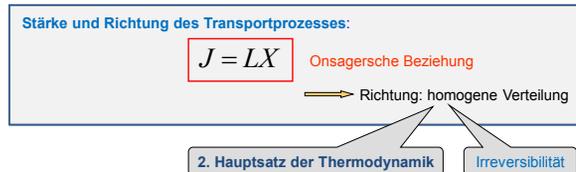
	Was strömt?	Stärke?	Warum?	Zusammenhang?
Ladungs-transport	q	$\frac{\Delta q}{A \cdot \Delta t}$	φ	$-\frac{\Delta \varphi}{\Delta l} = -\sigma \frac{\Delta \varphi}{\Delta l}$
Volumen-transport	V	$\frac{\Delta V}{A \cdot \Delta t}$	p	$-\frac{\Delta p}{\Delta l} = -\frac{\nu^2}{8\eta} \frac{\Delta p}{\Delta l}$
Stoff-transport	v	$\frac{\Delta v}{A \cdot \Delta t}$	c^*	$-\frac{\Delta c}{\Delta x} = -D \frac{\Delta c}{\Delta x}$
Energie-transport	E	$\frac{\Delta E}{A \cdot \Delta t}$	T	$-\frac{\Delta T}{\Delta x} = -\lambda \frac{\Delta T}{\Delta x}$
allgemein	$x_{\text{ext}} \quad J = \frac{\Delta x_{\text{ext}}}{A \cdot \Delta t}$	$y_{\text{int}} \quad X = -\frac{\Delta y_{\text{int}}}{\Delta x}$		$J = LX$

* Im allgemeinen Fall μ

Extensive Größe:	<ul style="list-style-type: none"> additiv Im Gleichgewicht proportional zur Ausbreitung des Systems In Transportprozessen: die transportierte Größe
Intensive Größe:	<ul style="list-style-type: none"> nicht-additiv Im Gleichgewicht überall gleich in dem System In Transportprozessen: die sich ausgleichende Größe

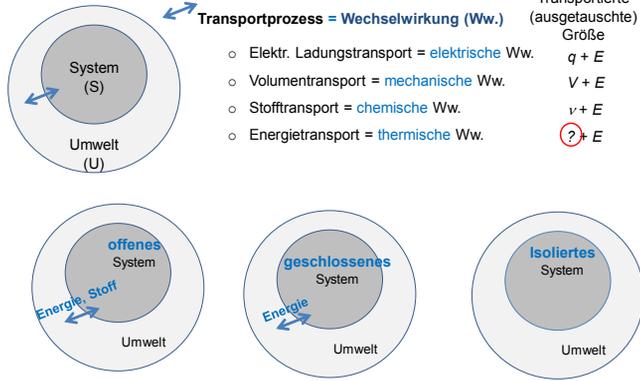
Gleichgewicht: es gibt keine Transportprozesse.
0. Hauptsatz der Thermodynamik: Gleichgewicht \leftrightarrow homogene Verteilung der intensiven Größen

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



VI. Energetische Beziehungen (Thermodynamik)

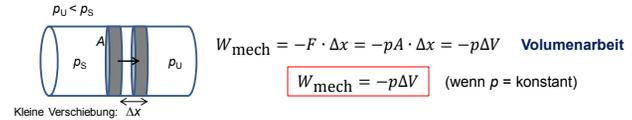
1. Nomenklatur



9

2. Energieaustausch (Arbeit) in den einzelnen Wechselwirkungen

a) Volumentransport = **mechanische** Ww.



Bemerkung: $p_S \neq p_U$

$|p_S \Delta V| \neq |p_U \Delta V|$
 $|W_{\text{mech, S}}| \neq |W_{\text{mech, U}}|$!!!

$|p_S \Delta V| = |p_U \Delta V|$
 nur, wenn $p_S = p_U$

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

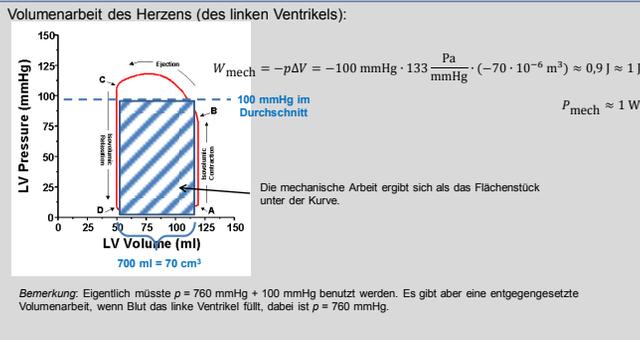
Es wäre ein „Energieaustausch“, da gibt es aber keinen Prozess! System und Umgebung sind im Gleichgewicht.

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

$p_S \cong p_U$ **quasistationäre Prozessführung („reversibler Prozess“)!**
 $|W_{\text{mech, S}}| \cong |W_{\text{mech, U}}|$ (in kleinen Schritten immer nah dem Gleichgewicht)

10

Ein Anwendungsbeispiel:



11

Volumenarbeit bei isothermer Ausdehnung/Kompression eines Gases, wenn $p \neq \text{konstant}$:

$W_{\text{mech}} = - \int_{V_1}^{V_2} p dV = - \int_{V_1}^{V_2} \frac{\nu R T}{V} dV = -\nu R T \int_{V_1}^{V_2} \frac{1}{V} dV = -\nu R T \ln \frac{V_2}{V_1}$

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

$W_{\text{mech}} = -p \Delta V$
 $W_{\text{elektr}} = \varphi \Delta q$

Verallgemeinerung: $W = y_{\text{int}} \cdot \Delta x_{\text{ext}}$

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

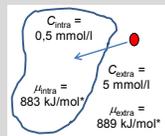
Das chemische Potenzial zeigt also um wieviel Joule die Energie des Systems zunimmt, wenn die Stoffmenge im System um 1 mol erhöht wird.

$W_{\text{chem}} = \nu \cdot R \cdot T \cdot \ln \frac{c_2}{c_1}$ (wenn $\mu \neq \text{konstant}$)

12

Anwendungsbeispiele:

- o Glukosediffusion aus dem extrazellulären Raum (Umgebung) in die Zelle (System):



Ein Glukosemolekül tritt ein: \Rightarrow

$$W_{\text{chem,S}} = \mu_S \Delta v_S = 883 \cdot 10^3 \cdot \frac{1}{6,02 \cdot 10^{23}} = 1,467 \text{ aJ}$$

$$W_{\text{chem,U}} = \mu_U \Delta v_U = 889 \cdot 10^3 \cdot \left(-\frac{1}{6,02 \cdot 10^{23}}\right) = -1,477 \text{ aJ}$$

$$|W_{\text{chem,S}}| < |W_{\text{chem,U}}| \quad !!! \quad \text{Die Differenz ist } 0,01 \text{ aJ.}$$

* mit einem willkürlichen Nullpunkt

Für ein Mol wäre das: $0,01 \cdot 10^{-18} \cdot 6,02 \cdot 10^{23} = 6 \text{ kJ}$

- o Konzentrationsarbeit (chemische Arbeit) der Niere bei der Glukoseresorption:



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

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

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

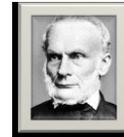
13

d) Energietransport = **thermische** Ww:

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

Entropie

(entrepein (gr) = umkehren ☺)



Rudolf Julius Emmanuel Clausius (1822-1888) Physiker

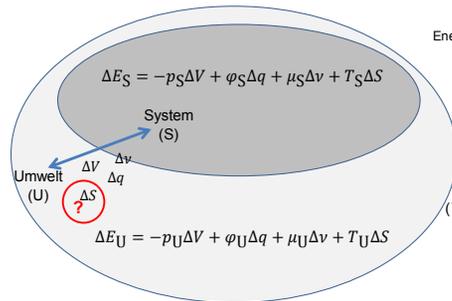
3. Innere Energie (E): Summe aller kinetischen und potenziellen Energien innerhalb des Systems

4. Erster (1.) Hauptsatz der Thermodynamik

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

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

14



Energieerhaltung \Rightarrow

$$\Delta E_S + \Delta E_U = 0$$

$$\Delta E_S = -\Delta E_U$$

$$|\Delta E_S| = |\Delta E_U|$$

(V, q und nu werden auch erhalten)

aber

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

$$|\varphi_S \Delta q| \neq |\varphi_U \Delta q|$$

$$|\mu_S \Delta v| \neq |\mu_U \Delta v|$$

$$|T_S \Delta S| \neq |T_U \Delta S|$$

15