

# Medizinische Biophysik 2015. 04. 22.

## Transportprozesse

### IV. Energietransport (Wärmeleitung)

#### 0. Mechanismus

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

### VI. Zusammenfassung

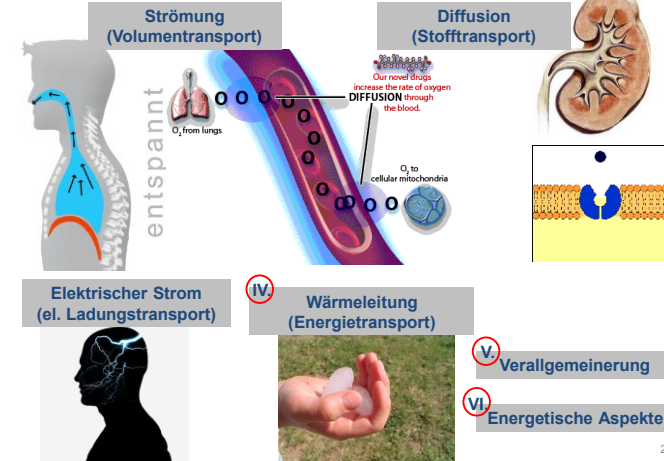
Extensive und intensive Größen, 0. Hauptsatz der Thermodynamik, onsagersche Beziehung

### VI. Energetische Beziehungen (Thermodynamik)

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

1

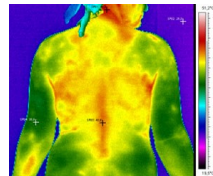
## Transportprozesse



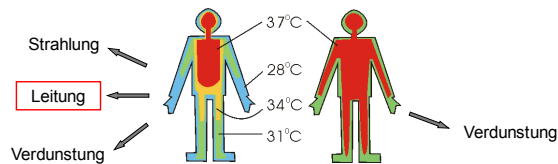
2

## 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**

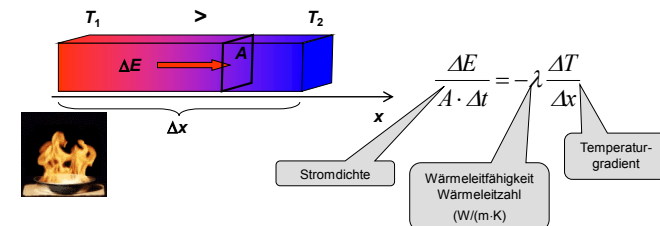
### 1. Grundbegriffe

- Energiestromstärke (I):  $I = \frac{\Delta E}{\Delta t}$  ( $\frac{J}{s} = W$ )
- 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

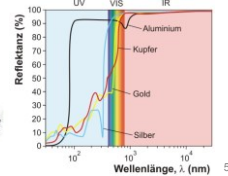
Stoff	$\lambda$ (W/(m·K))
Silber	420
Glas	1
Wasser	0,6
Muskel	0,4
Fett	0,2
Luft	0,025

### 3. Anwendungen (Zusammenfassung der Wärmeabgabemechanismen)

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

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

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



5

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

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

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



- Verdunstung

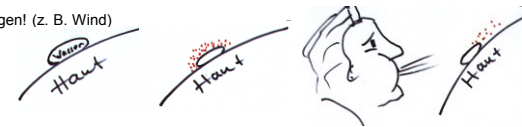
- hohe spez. Verdampfungswärme von Wasser:  $\approx 2400 \text{ kJ/kg}$  (bei  $30^\circ\text{C}$ ) !!

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

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



- Strömungen! (z. B. Wind)



6

## V. Zusammenfassung

	Was strömt?	Stärke?	Warum?	Zusammenhang?
Ladungs-transport	$q$	$\frac{\Delta q}{A \cdot \Delta t}$	$\varphi$	$-\frac{\Delta \varphi}{\Delta l}$
Volumen-transport	$V$	$\frac{\Delta V}{A \cdot \Delta t}$	$p$	$-\frac{\Delta p}{\Delta l}$
Stoff-transport	$v$	$\frac{\Delta v}{A \cdot \Delta t}$	$c^*$	$-\frac{\Delta c}{\Delta x}$
Energie-transport	$E$	$\frac{\Delta E}{A \cdot \Delta t}$	$T$	$-\frac{\Delta T}{\Delta x}$
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  $\mu$

7

**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

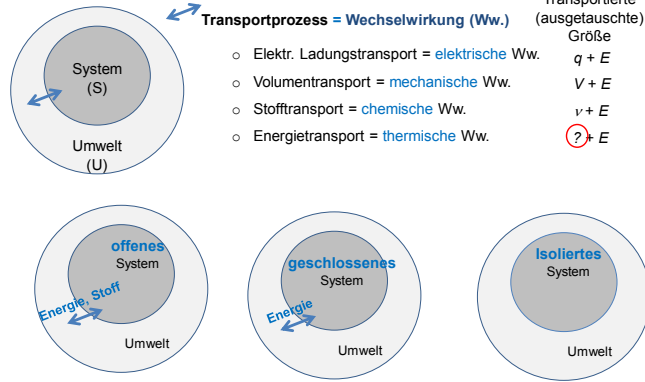
**2. Hauptsatz der Thermodynamik**

**Irreversibilität**

8

## VI. Energetische Beziehungen (Thermodynamik)

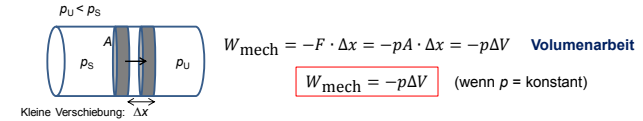
### 1. Nomenklatur



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:

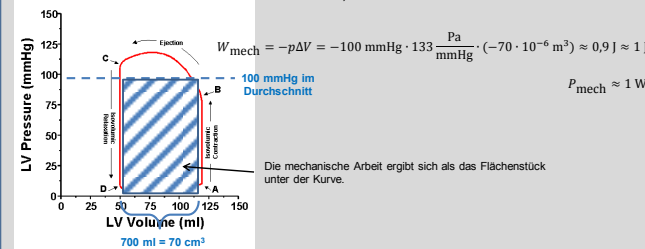
$p_S \approx p_U$  **quasistationäre Prozessführung („reversibler Prozess“)!**

$|W_{\text{mech}, S}| \approx |W_{\text{mech}, U}|$  (in kleinen Schritten immer nah dem Gleichgewicht)

10

### Ein Anwendungsbeispiel:

#### Volumenarbeit des Herzens (des linken Ventrikels):



**Bemerkung:** Eigentlich müsste  $p = 760 \text{ mmHg} + 100 \text{ mmHg}$  benutzt werden. Es gibt aber eine entgegengesetzte Volumenarbeit, wenn Blut das linke Ventrikel füllt, dabei ist  $p = 760 \text{ mmHg}$ .

11

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

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

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  $\mu = \text{konstant}$ )

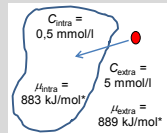
Das chemische Potenzial zeigt also um wieviel Joule die Energie des Systems zunimmt, wenn die Stoffmenge im System um 1 mol erhöht wird.

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

12

#### Anwendungsbeispiele:

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



\* mit einem willkürlichen Nullpunkt

Ein Glukosemolekül tritt ein:  $\Rightarrow$

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

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

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

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

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



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

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

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

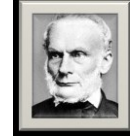
13

d) Energietransport = **thermische** Ww:

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

**Entropie**

(entrepain (gr) = umkehren ☹)



Rudolf Julius  
Emmanuel Clausius  
(1822-1888)  
Physiker

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

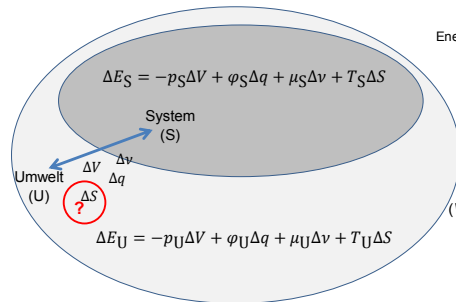
#### 4. Erster (1.) Hauptsatz der Thermodynamik

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

$$\Delta E = \quad \quad \quad + Q$$

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

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 v 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