

## Transportprozesse

### IV. Wärmeleitung (Energietransport)

#### 0. Mechanismus

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

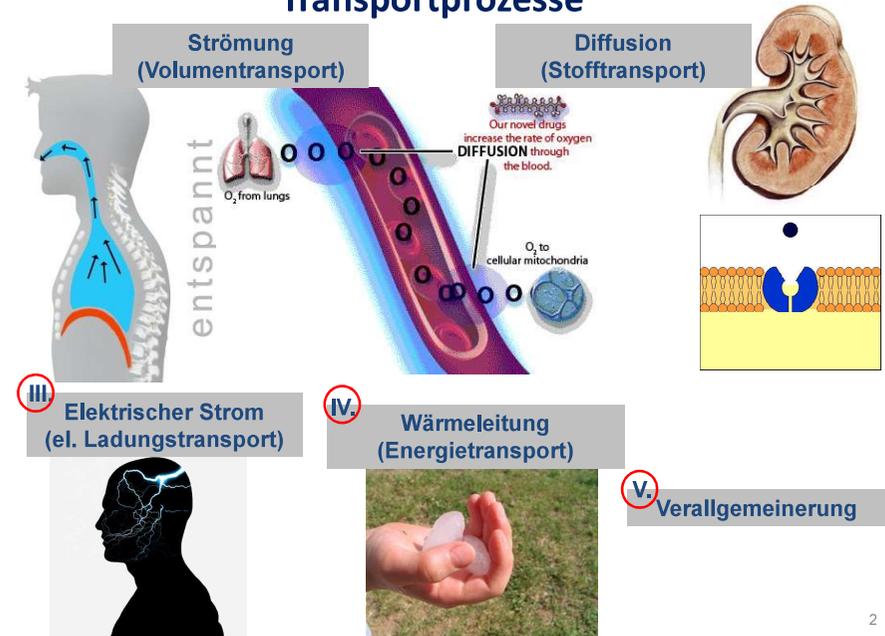
### V. Verallgemeinerung der Transportgesetze

- 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

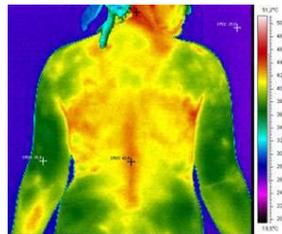
## Transportprozesse



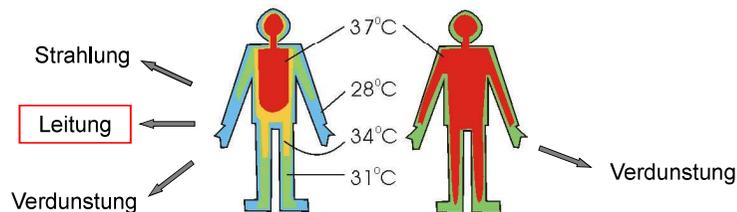
## Wärmebildung und -abgabe

Zur Erinnerung

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



## IV. Wärmeleitung (Energietransport)

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

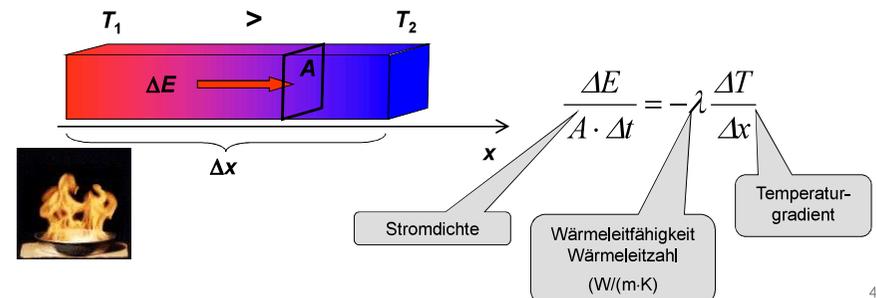
#### 1. Grundbegriffe

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



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

#### 2. Transportgesetz = Fourier-Gesetz



- Wärmeleitfähigkeit: > stoffspezifisch

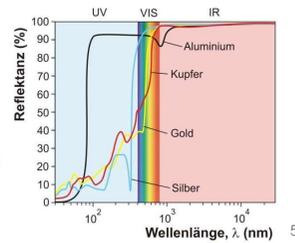
Stoff	$\lambda$ (W/(m·K))
Silber	420
Glas	1
Wasser	0,6
Muskel	0,4
Fett	0,2
Luft	0,025

### 3. Anwendungen (Zusammenfassung der Wärmeabgabemechanismen)

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

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

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



Wärmeleitung  $P = -\lambda A \frac{\Delta T}{\Delta x}$   
 $T_{\text{Körper}} = 28^\circ\text{C}$   $T_{\text{Umgebung}} = 20^\circ\text{C}$   $\Rightarrow P \approx 40 \text{ W}$

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



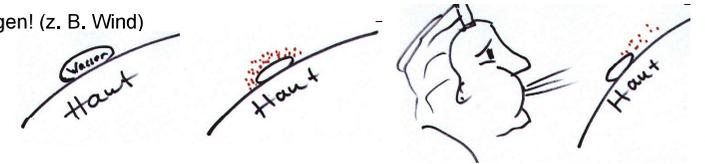
### Verdunstung

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

- 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)



## V. Verallgemeinerung der Transportgesetze

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

\* Im allgemeinen Fall  $\mu$

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

**Gleichgewicht:** es gibt keine Transportprozesse.

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

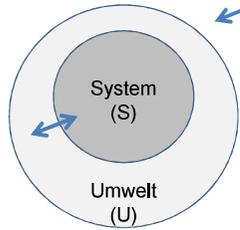
inhomogene Verteilung der intensiven Größen  $\Rightarrow$  **Transportprozesse**

**Stärke und Richtung des Transportprozesses:**



# VI. Energetische Beziehungen (Thermodynamik)

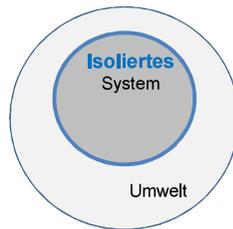
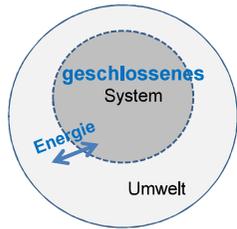
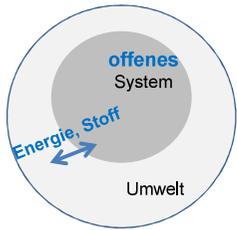
## 1. Nomenklatur



Transportprozess = Wechselwirkung (Ww.)

Transportierte (ausgetauschte) Größe

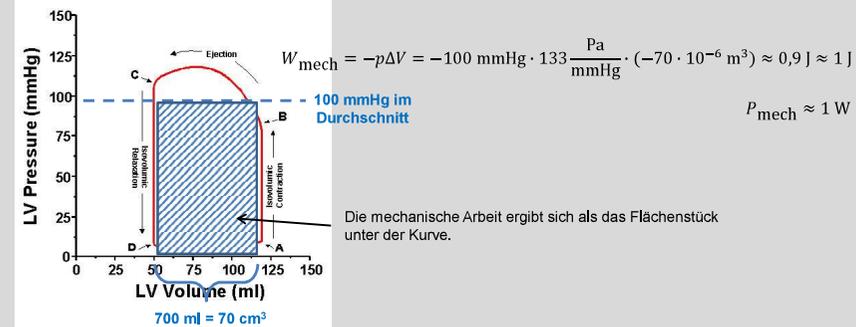
- o Elektr. Ladungstransport = elektrische Ww.  $q + E$
- o Volumentransport = mechanische Ww.  $V + E$
- o Stofftransport = chemische Ww.  $v + E$
- o Energietransport = thermische Ww.  $? + E$



9

### Ein Anwendungsbeispiel:

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

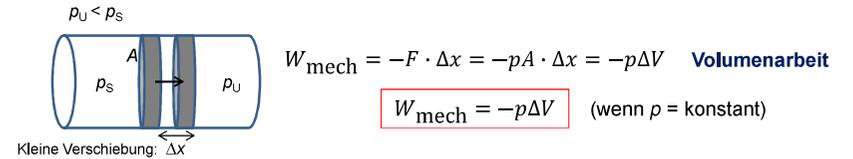


Bemerkung: Eigentlich müsste  $p = 760 \text{ mmHg} + 100 \text{ mmHg}$  benutzt werden. Es gibt aber eine entgegengesetzte Volumenarbeit, wenn Blut das linke Ventrikel füllt, dabei ist  $p = 760 \text{ mmHg}$ .

11

## 2. Energieaustausch (Arbeit) in den einzelnen Wechselwirkungen

a) Volumentransport = mechanische Ww.



Bemerkung:  $p_S \neq p_U$

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

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

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  $p_S = p_U$

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

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:  $W_{\text{chem}} = \mu \Delta v$  (wenn  $\mu = \text{konstant}$ )

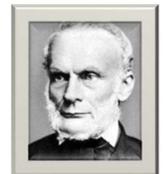
Das chemische Potenzial zeigt also um wieviel Joule die Energie des Systems zunimmt, wenn die Stoffmenge im System um 1 mol erhöht wird.

d) Energietransport = thermische Ww:

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

Entropie

(entropien ( $gr$ ) = umkehren ☺)



Rudolf Julius Emmanuel Clausius (1822-1888) Physiker

12

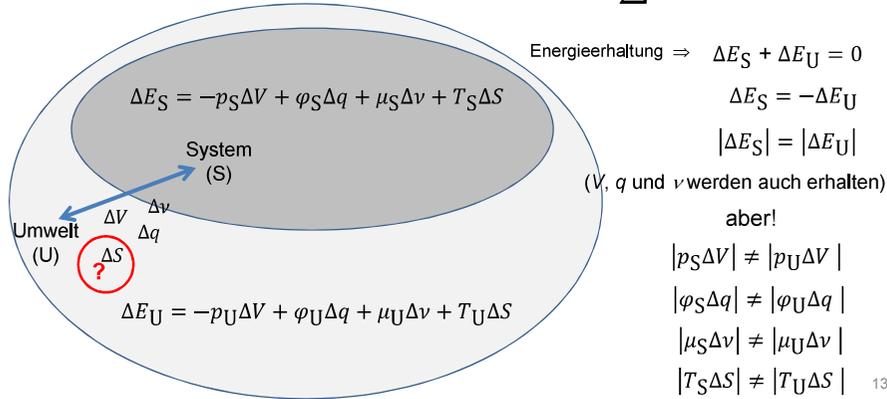
**3. Innere Energie (E):** Summe aller kinetischen und potenziellen Energien innerhalb des Systems

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

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

$$\Delta E = W + Q$$

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



**5. Entropie (S) – phenomenologische Definition:**

bei reversibler Prozessführung:

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

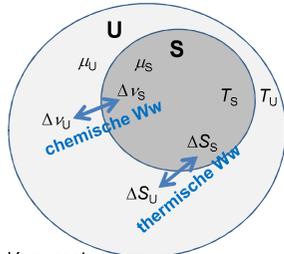
$$\Delta S = c \cdot m \cdot \ln \frac{T_2}{T_1} \quad (\text{wenn } T \neq \text{konstant})$$

Ein Anwendungsbeispiel:

$$\Delta S = \frac{840 \cdot 10^3 \cdot 1}{358} = 2350 \frac{\text{J}}{\text{K}}$$

**6. Zweiter (2.) Hauptsatz der Thermodynamik:** In einem isolierten System verlaufen spontane Prozesse nur in der 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:  $T_S = T_U = T$

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

$$\Delta v_S = -\Delta v_U$$

$$\Delta E_S = \mu_S \cdot \Delta v_S + T \cdot \Delta S_S \rightarrow \Delta S_S = \frac{\Delta E_S - \mu_S \cdot \Delta v_S}{T}$$

$$\Delta E_U = \mu_U \cdot \Delta v_U + T \cdot \Delta S_U \rightarrow \Delta S_U = \frac{\Delta E_U - \mu_U \cdot \Delta v_U}{T}$$

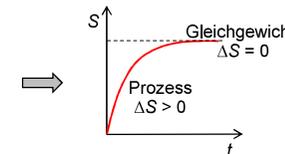
$$\Delta S = \Delta S_S + \Delta S_U = \frac{\Delta E_S - \mu_S \cdot \Delta v_S}{T} + \frac{\Delta E_U - \mu_U \cdot \Delta v_U}{T}$$

$$= \frac{\Delta v_S}{T} \cdot (\mu_U - \mu_S)$$

Alle Möglichkeiten:

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

$\Delta S$   
positiv  
positiv  
= 0



$\Rightarrow$  Alternativform des 2. Hauptsatzes und eine neue Eigenschaft der Entropie

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.



