

Thermodynamische Beziehungen und Verallgemeinerung der Transportprozesse.

Balázs Kiss

kissb3@gmail.com

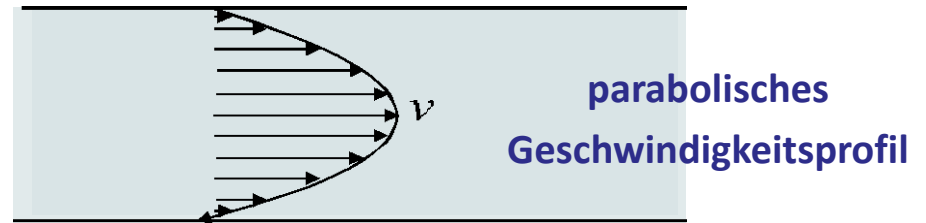


**KISSLAB - Myofilament-Mechanobiophysik Forschungsgruppe,
Semmelweis Universität,
Institut für Biophysik und Strahlenbiologie.**

25. April 2025.

Volumentransport: Hagen-Poiseuille Gesetz

$$I_V = -\frac{R^4 \cdot \pi}{8 \cdot \eta \cdot l} \cdot \Delta p$$



$$J_V = \frac{V}{tA} = -\frac{R^2}{8\eta} \frac{\Delta p}{\Delta x}$$

Volumenstromdichte

Druckgradient

Verantwortliche Strukturen:

- elastische Faser
- Kollagen
- glatte Muskulatur

Konsequenzen:

- elastische Energie
- Windkessel-Effekt
- $v = \text{konstant}$

Young-Laplace Gleichung

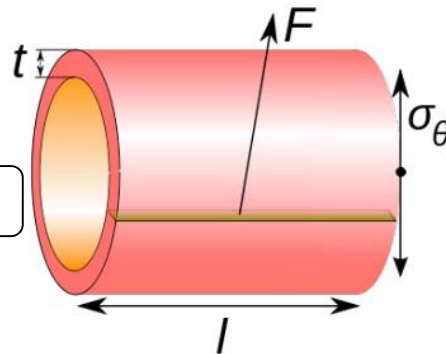
$$\sigma_\theta = \frac{P \cdot r}{t}$$

Wandspannung: Kraft/Umfang

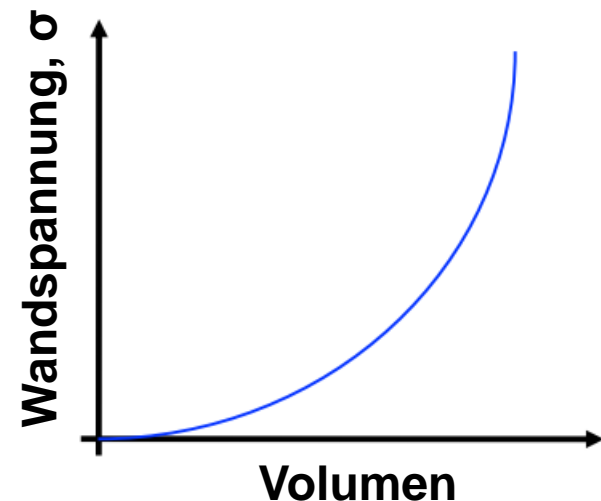
P: Blutdruck

r: Rohrradius

t: Gefäßwanddicke



**nichtlineare Elastizität
beim Gefäßwand**



Ladungstransport: Ohmsches Gesetz

- Elektrische Stromstärke (I): $I = \frac{\Delta q}{\Delta t} \quad (\text{A})$

- Elektrische Stromdichte (J): $J = \frac{\Delta q}{A \cdot \Delta t} \quad \left(\frac{\text{A}}{\text{m}^2} \right)$

- stationärer Strom: zeitlich konstant

G : Leitwert

$$G = \frac{1}{R} \quad \left(\frac{1}{\Omega} \right), (\text{Siemens}), (\text{S})$$

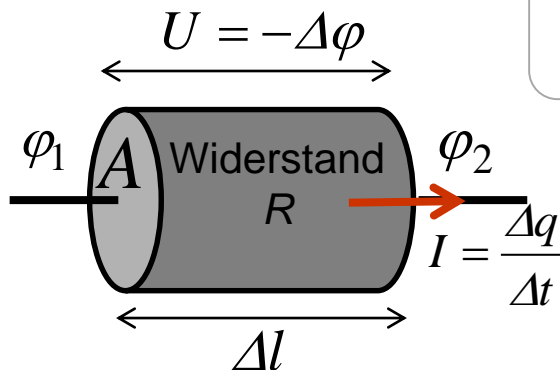
ρ :
spezifischer
Widerstand

σ :
spezifische
Leitfähigkeit

Transportgesetz = ohmsches Gesetz

$$R = \frac{U}{I}$$

Die bisher bekannte
Form des ohmschen
Gesetzes



$$I = \frac{U}{R} \quad R = \rho \frac{\Delta l}{A} \quad \sigma = \frac{1}{\rho}$$



$$I = -\sigma \cdot A \cdot \frac{\Delta\varphi}{\Delta l}$$

Die neue Form
des ohmschen
Gesetzes

Alternativform:

$$J = -\sigma \frac{\Delta\varphi}{\Delta l}$$

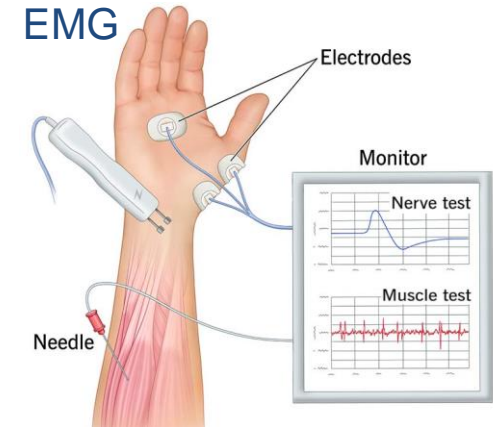
Stromdichte

Potenzialgradient

Elektrische Leitfähigkeit

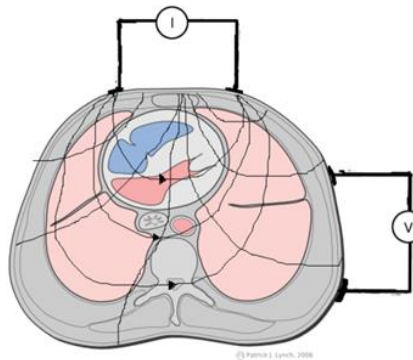
Ohmsches Gesetz: medizinische Anwendungen

- Messung von Biopotenzialen (EKG, EEG, ...) (siehe später!)

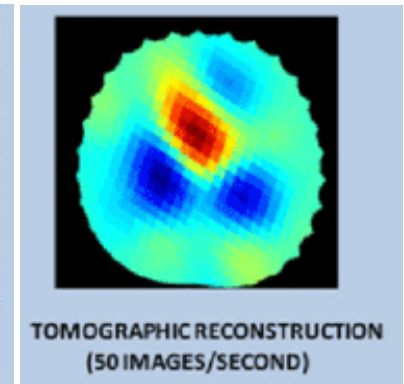
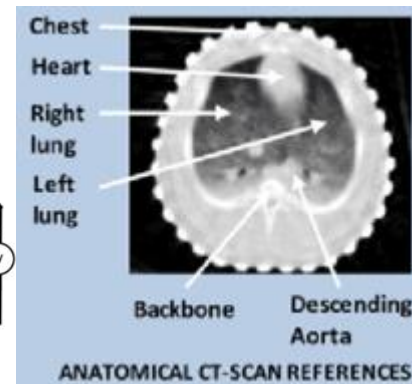


- Auf Widerstandsmessung (Impedanzmessung) basierende Techniken

Gewebe	σ (mS/m)	ρ (Ωm)
Blut	700	1,4
graue Hirnmasse	300	3,3
weiße Hirnmasse	150	6,7
Haut	100	10
Fett	40	25
Knochen	10	100

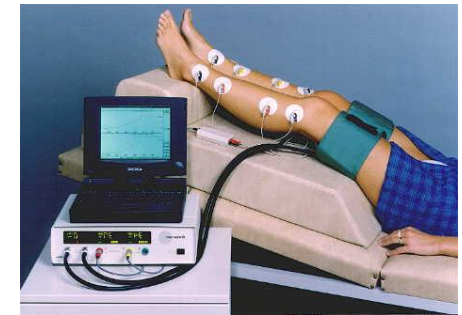
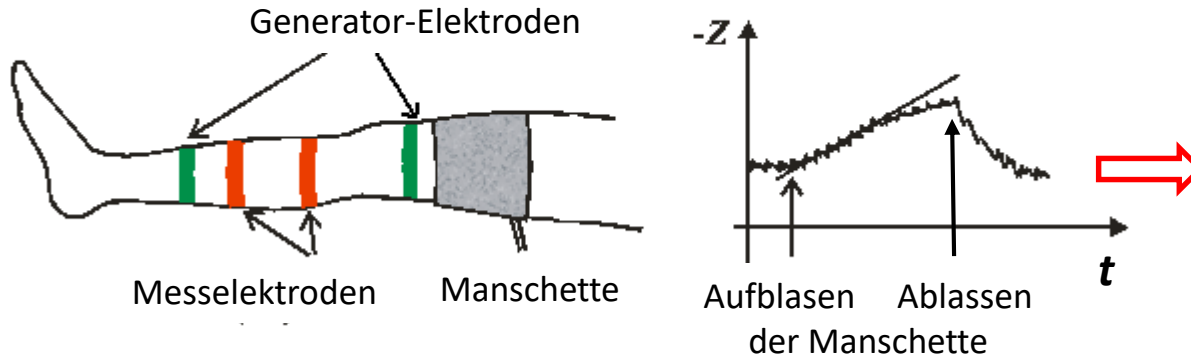


Elektrische Impedanztomographie (EIT)



Impedanzplethysmographie (IPG)

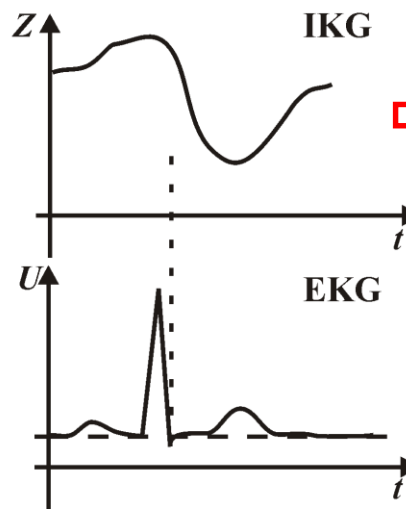
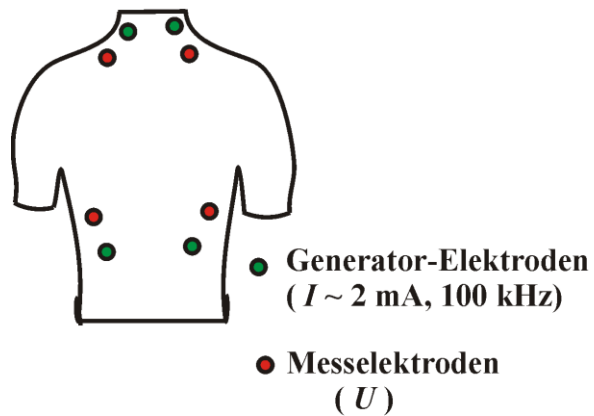
Untersuchung der Blutströmung in den Extremitäten



Impedanzkardiographie (IKG)

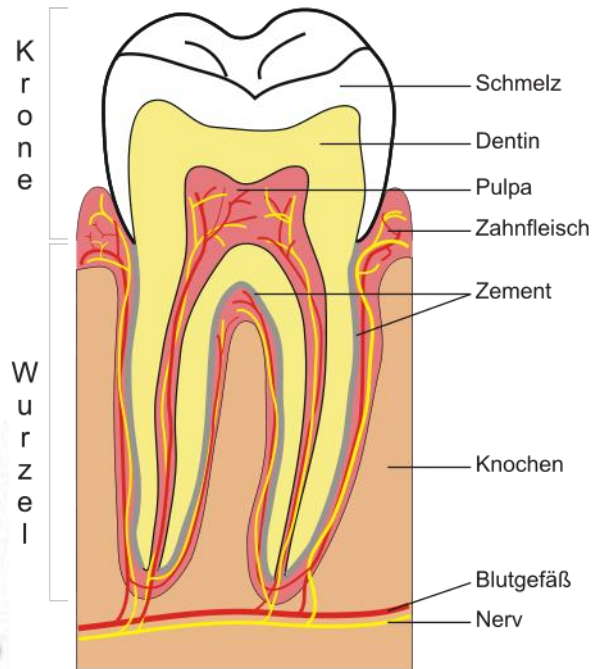
Untersuchung der Herzfunktion

Impedanzkardiographie (IKG)

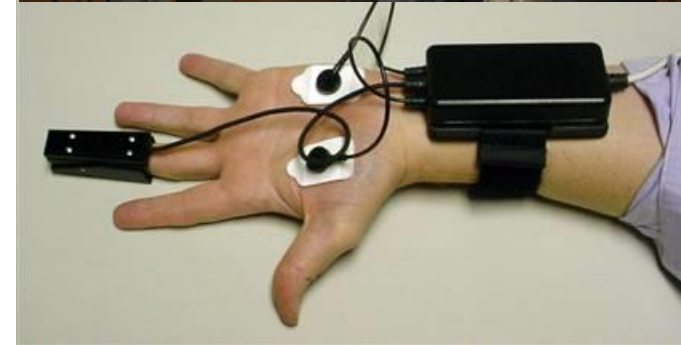


Pulsvolumen/Minutenvolumen
des Herzens

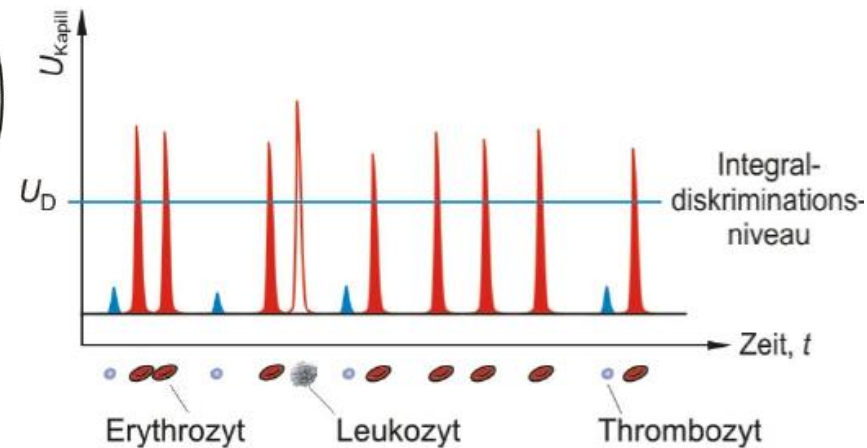
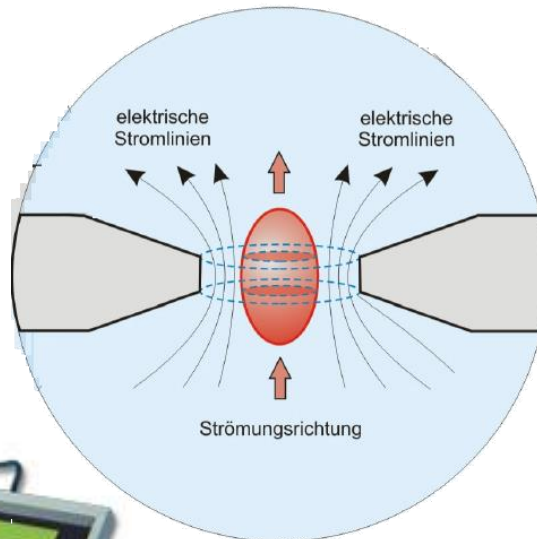
Apex-Locator



Lügendetektor



Coulter-Zähler



■ Therapie (siehe später!)

Galvanisation / Iontophorese



Wärmetherapie



Elektrochirurgie



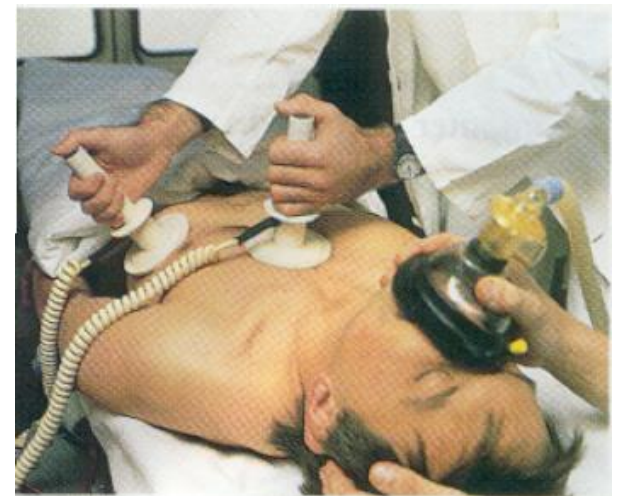
Elektroreizung in der Physiotherapie



Herzschrittmacher



Defibrillator



Wärmeleitung: Energietransport

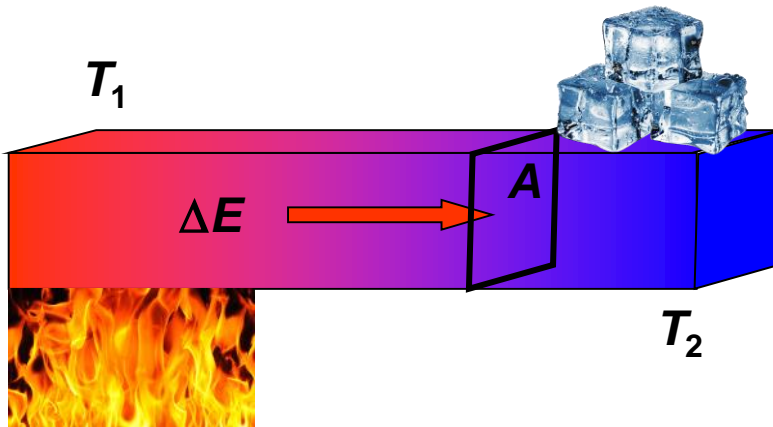
- **Mechanismus:** Stöße zw. Atomen und Molekülen + freie Elektronen = **Konduktion**

- **Grundbegriffe**

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

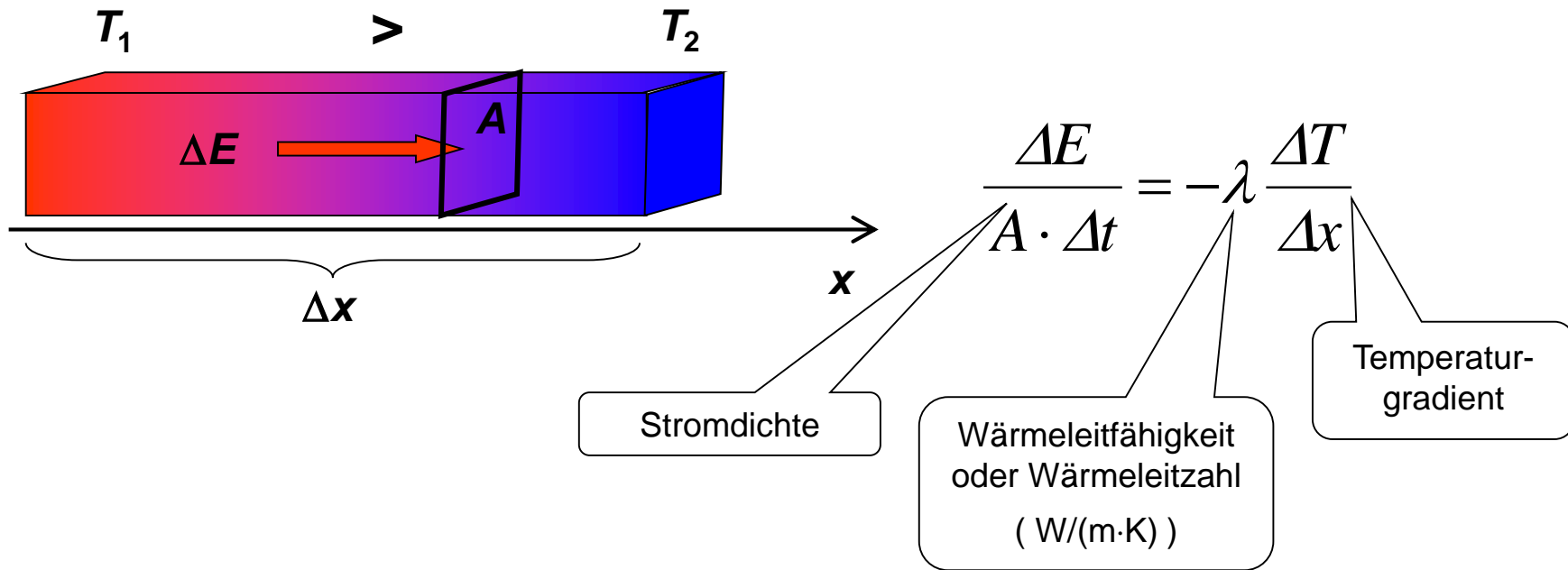


J. B. J. Fourier
1768-1830
Mathematiker
und Physiker

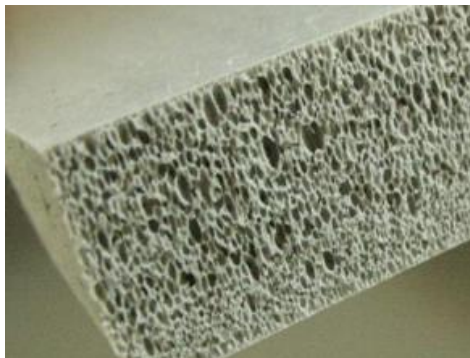


$$T_1 > T_2$$

Wärmeleitung: Fourier-Gesetz



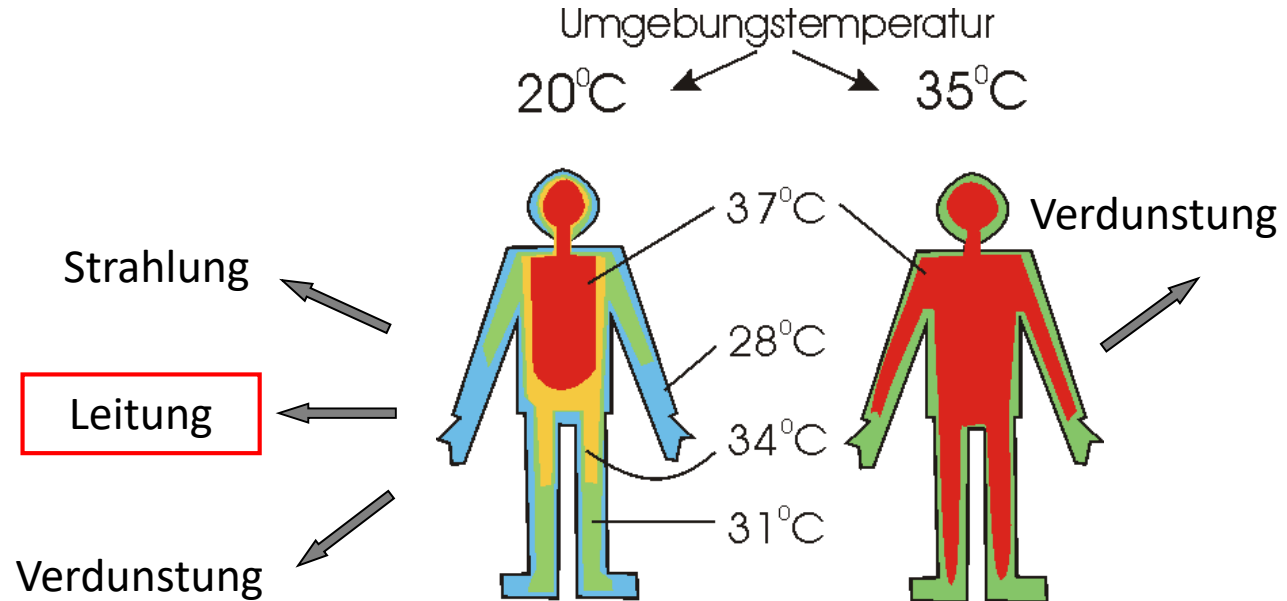
- Wärmeleitfähigkeit: ➤ stoffspezifisch



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

Wärmehaushalt des menschlichen Körpers

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



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



Verallgemeinerung der Transportgesetze

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

* Im allgemeinen Fall μ

Onsangersche Beziehung

Extensive Größe:

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

Intensive Größe:

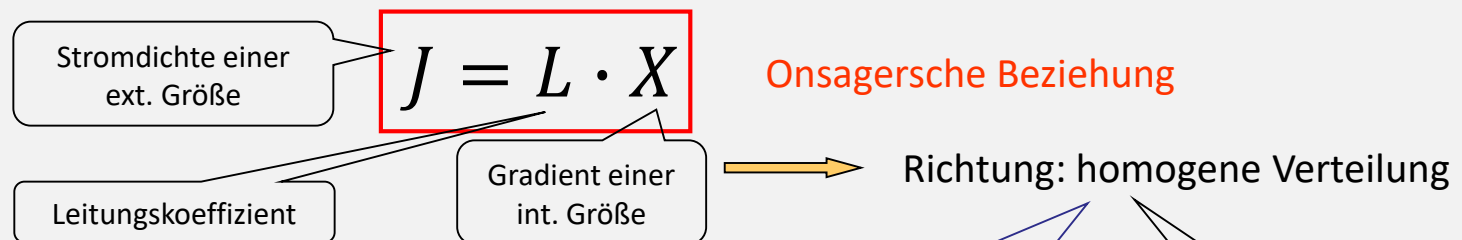
- nicht-additiv
- Im Gleichgewicht überall gleich in dem System
- In Transportprozessen: die sich ausgleichende Größe

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:



2. Hauptsatz der Thermodynamik

Irreversibilität

Hausaufgaben

Aufgabensammlung

jetzt: keine

Feedback