

**2016. 03. 29.**

## Transportprozesse

## I. Elektrischer Ladungstransport (el. Strom)

- |                                      |  |
|--------------------------------------|--|
| 1. Grundbegriffe                     | Elektrische Stromstärke, -dichte   |
| 2. Transportgesetz = ohmsches Gesetz |  |
| 3. Anwendungen                       | Messung der elektrischen Leitfähigkeit von Geweben (IPG, IKG, EIT, ....) |

## II. Energietransport (Wärmeleitung)

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

### III. Volumentransport (Strömungen)

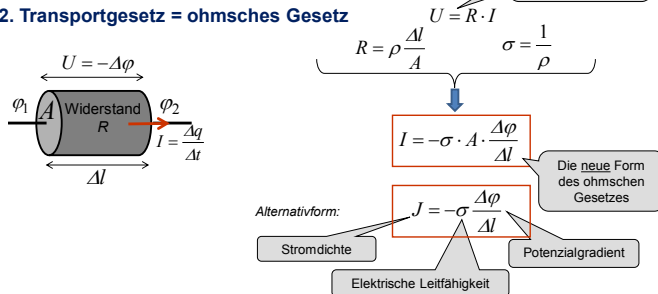
- |                                       |  |  |
|---------------------------------------|--|--|
| 1. Grundbegriffe                      | Strömungsarten: laminare, turbulente<br>Volumenstromstärke, -dichte<br>Flüssigkeit: ideale, reelle | ➡ Anwendung: <b>Blutströmung</b><br>(Volumenstromstärke,<br>Strömungsgeschwindigkeit,<br>Messmethoden) |
| 2. Kontinuitätsgleichung              | ➡ Anwendung: <b>Blutkreislauf</b>  |  |
| 3. Strömung von idealen Flüssigkeiten | ▪ Geschwindigkeitsprofil<br>▪ Bernoullische Gleichung  |  |

## I. Elektrischer Ladungstransport (el. Strom)

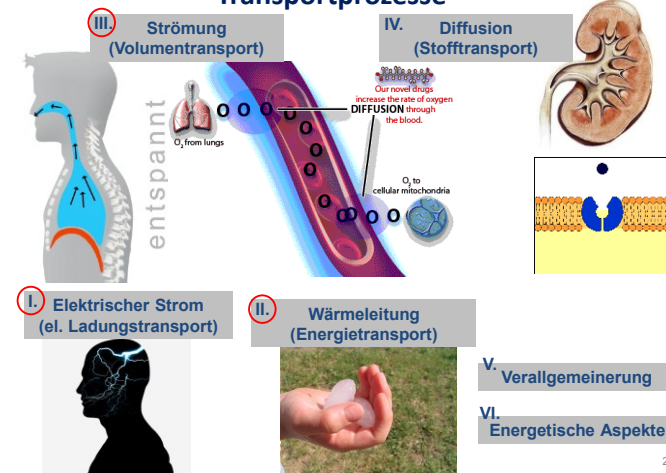
## 1. Grundbegriffe

- Elektrische Stromstärke ( $I$ ):  $I = \frac{\Delta q}{\Delta t}$  (A)
- Elektrische Stromdichte ( $J$ ):  $J = \frac{\Delta q}{A \cdot \Delta t}$   $\left( \frac{\text{A}}{\text{m}^2} \right)$
- stationärer Strom: zeitlich konstant

## 2. Transportgesetz = ohmsches Gesetz



## Transportprozesse

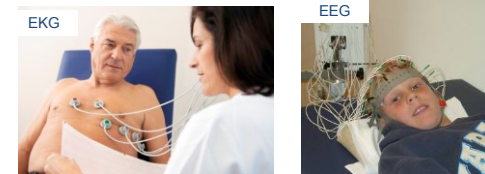


2

### 3. Anwendungen

- Diagnostik

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



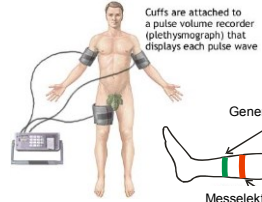
- Messung der elektrischen Leitfähigkeit von Geweben

Gewebe	$\sigma$ (mS/m)
Blut	700
graue Hirnmasse	300
weiße Hirnmasse	150
Haut	100
Fett	40
Knochen	10

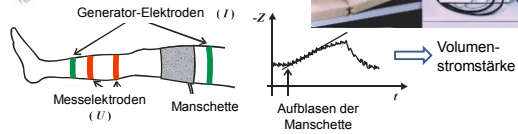
Ein bildgebendes Verfahren: die elektrische Impedanztomographie (EIT)



### Impedanzplethysmographie (IPG)



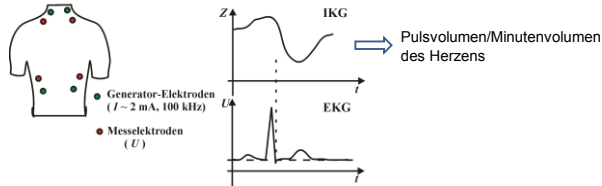
Untersuchung der Blutströmung in den Extremitäten



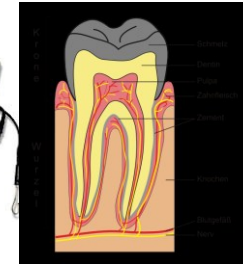
### Impedanzkardiographie (IKG)

Untersuchung der Herzfunktion

Impedanzkardiographie (IKG)



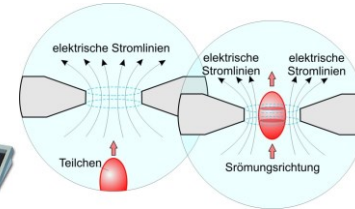
### Apex-Locator



### Lügendetektor



### Coulter-Zähler



### Therapie (ausführlicher siehe später!)

#### Galvanisation / Iontophorese



#### Wärmetherapie



#### Elektrochirurgie



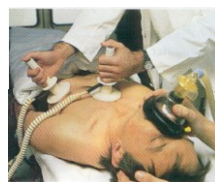
#### Elektrostimulation in der Physiotherapie



#### Herzschrittmacher



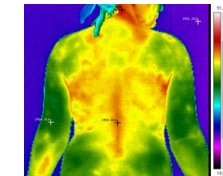
#### Defibrillator



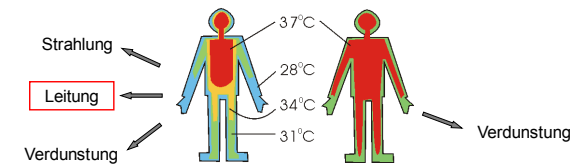
### Wärmebildung und -abgabe

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



## II. Energietransport (Wärmeleitung)

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

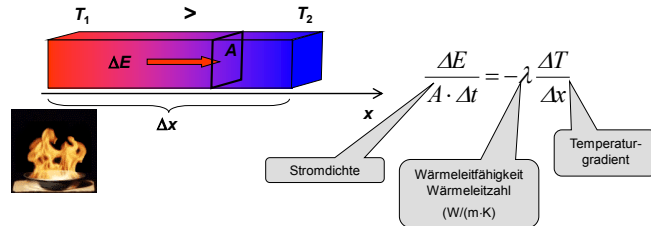
### 1. Grundbegriffe

- 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



9

- 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)



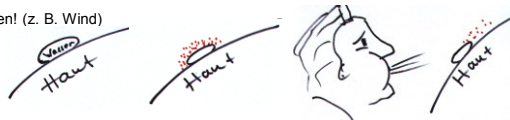
### Verdunstung

- 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)



11

- Wärmeleitfähigkeit:  $\rightarrow$  stoffspezifisch

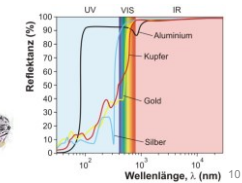
Stoff	$\lambda$ (W/(m·K))
Silber	420
Glas	1
Wasser	0,6
Muskel	0,4
Fett	0,2
Luft	0,025

### 3. Anwendungen (Zusammenfassung der Wärmeabgabemechanismen)

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

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

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



10

### Analogie

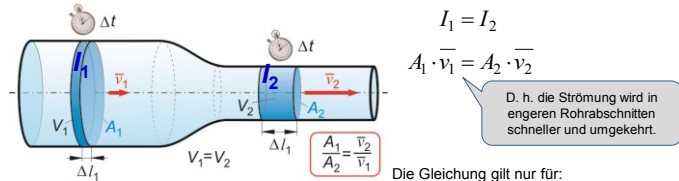
# Analogie

	Was strömt?	Stärke?	Warum?	Zusammenhang?
Ladungs-transport	$q$	$\frac{\Delta q}{A \cdot \Delta t}$	$\varphi$	$-\frac{\Delta \varphi}{\Delta l}$ $\frac{\Delta q}{A \cdot \Delta t} = -\sigma \frac{\Delta \varphi}{\Delta l}$
Energie-transport	$E$	$\frac{\Delta E}{A \cdot \Delta t}$	$T$	$-\frac{\Delta T}{\Delta x}$ $\frac{\Delta E}{A \cdot \Delta t} = -\lambda \frac{\Delta T}{\Delta x}$

12

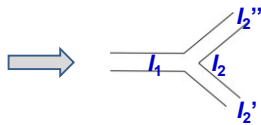


## 2. Kontinuitätsgleichung



Die Gleichung gilt nur für:

- starres Rohr *oder* stationäre Strömung\*  
 (\* stationäre Strömung: in der Zeit sich nicht ändernde Strömung)



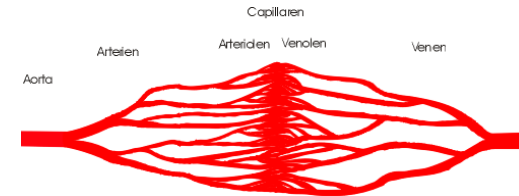
$$I_1 = I_2 = I_2' + I_2''$$

$$A_1 \cdot \bar{v}_1 = (A_2' + A_2'') \cdot \bar{v}_2$$

(Siehe Kirchhoffsche Knotenregel in der Elektrizitätslehre!)

17

## Kontinuitätsgleichung im Blutkreislauf



Gefäß	Aorta	Arterien	Arteriolen	Kapillaren	Venolen	Venen	Hohlvenen
A (cm²)	4,5	20	400	4500	4000	40	18
v (cm/s)	23	5	0,25	0,022	0,025	2,5	6

18

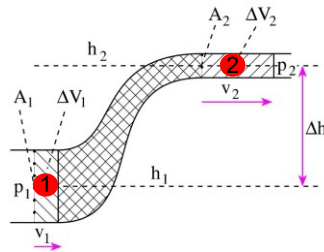
## 3. Strömung von idealen Flüssigkeiten

- Ideale Flüssigkeit: keine innere Reibung

- Geschwindigkeitsprofil:



- Bernoullische Gleichung:



Energieerhaltung  $\Rightarrow$

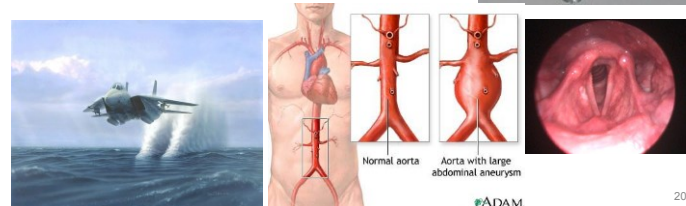
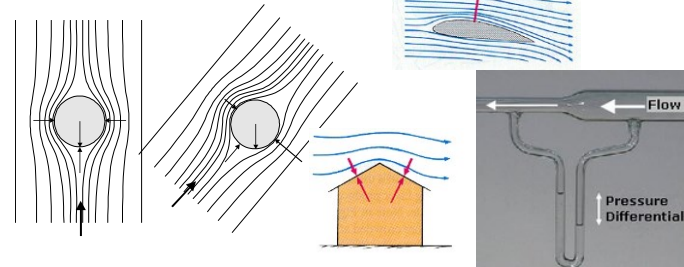
$$p + \frac{1}{2} \rho \cdot v^2 + \rho \cdot g \cdot h = \text{konstant}$$

Die Gleichung gilt nur für:

- starres Rohr *oder* stationäre Strömung
- ideale Flüssigkeit

19

## Anwendungen der Bernoullischen Gleichung



20