

Medizinische Biophysik 2015. 03. 01.

Transportprozesse

I. Elektrischer Ladungstransport (el. Strom)

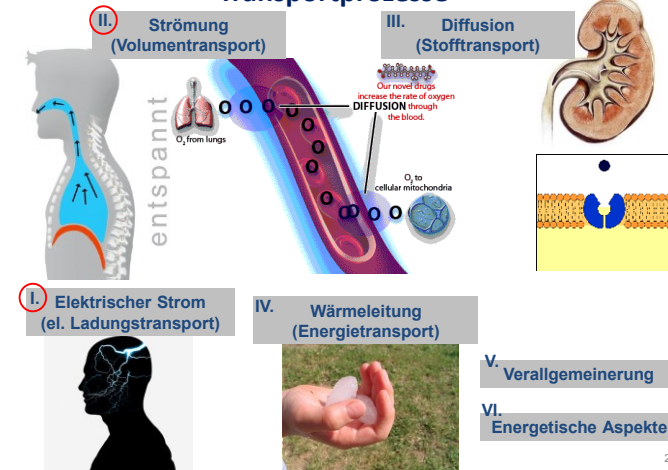
1. **Grundbegriffe** Elektrische Stromstärke, -dichte
2. **Transportgesetz = ohmsches Gesetz**
3. **Anwendungen** Messung von Biopotenzialen (EKG, ...)
 Messung der elektrischen Leitfähigkeit von Geweben (EIT, ...)

II. Volumentransport (Strömungen)

1. **Grundbegriffe** Strömungsarten: laminare, turbulente
 Volumenstromstärke, -dichte
 Flüssigkeit: ideale, reelle
 → Anwendung: **Blutströmung**
 Volumenstromstärke,
 Strömungsgeschwindigkeit,
 Messmethoden
2. **Kontinuitätsgleichung** → Anwendung: **Blutkreislauf**
3. **Strömung von idealen Flüssigkeiten**
 - Geschwindigkeitsprofil
 - Bernoullische Gleichung
4. **Strömung von reellen Flüssigkeiten**
 - Newtonsches Reibungsgesetz
 - Viskosität → Anwendung: **Viskosität des Blutes**

1

Transportprozesse



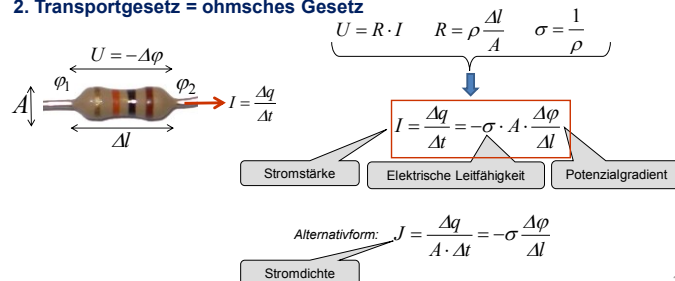
2

I. Elektrischer Ladungstransport (el. Strom)

1. Grundbegriffe

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

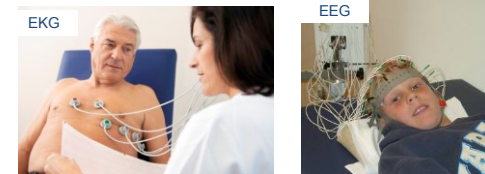
2. Transportgesetz = ohmsches Gesetz



3

3. Anwendungen

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



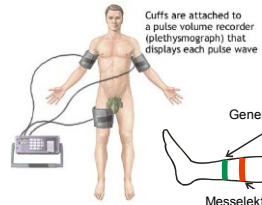
- Messung der elektrischen Leitfähigkeit von Geweben

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

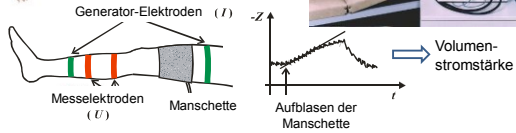
Ein bildgebendes Verfahren: die elektrische Impedanztomographie (EIT)



Impedanzplethysmographie (IPG)



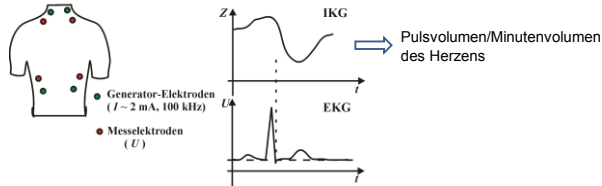
Untersuchung der Blutströmung in den Extremitäten



Impedanzkardiographie (IKG)

Untersuchung der Herzfunktion

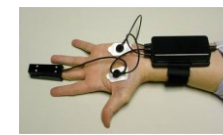
Impedanzkardiographie (IKG)



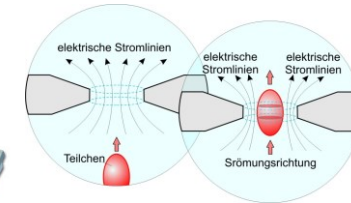
Apex-Locator



Lügendetektor



Coulter-Zähler



Therapie

Elektroreizung



Herzschrittmacher



Defibrillator

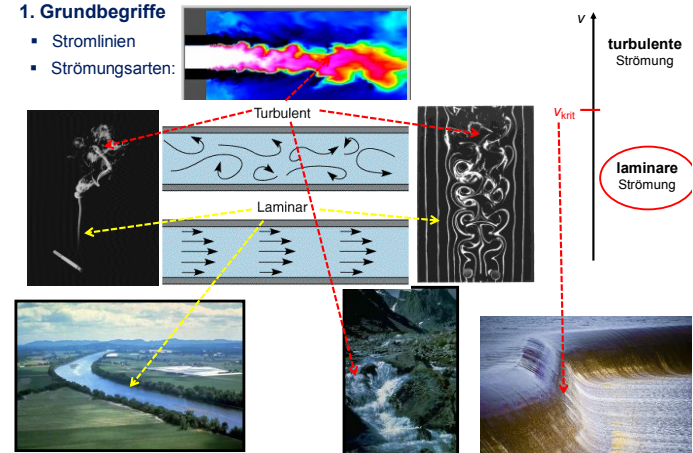


(ausführlicher siehe später!)

II. Volumentransport (Strömungen)

1. Grundbegriffe

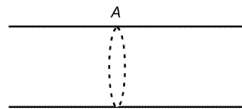
- Stromlinien
- Strömungsarten:



Allgemeingültige Voraussetzungen: • inkompressible Gas/Flüssigkeit
• laminare Strömung

Volumenstromstärke (I): $I = \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad \left(\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right)$

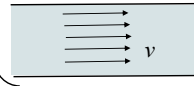
Volumenstromdichte (J): $J = \frac{\Delta V}{A \cdot \Delta t} \quad \left(\frac{\text{m}}{\text{s}} \right)$



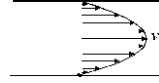
$I =$

$J =$

ideale Flüssigkeit
= ohne innere Reibung



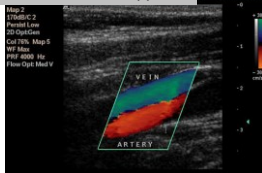
reelle Flüssigkeit
= mit innerer Reibung



9

Messmethoden der Volumenstromstärke:

Ultraschall-Doppler



Impedanz-Methoden

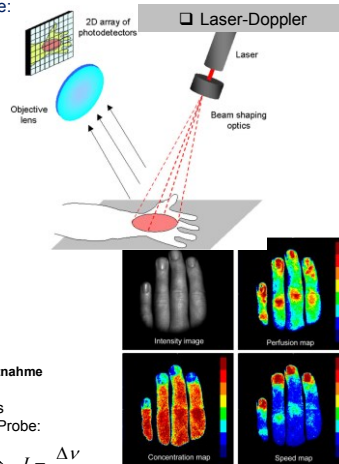
Dilutionsmethoden

Zugabe des Markierstoffes $\frac{\Delta V}{\Delta t}$ **Probenentnahme** $\frac{\Delta V}{\Delta t}$

Die Konzentration des Markierstoffes in der Probe:

$$c = \frac{\Delta V}{\Delta V} = \frac{\Delta V}{I \cdot \Delta t} \Rightarrow I = \frac{\Delta V}{c \cdot \Delta t}$$

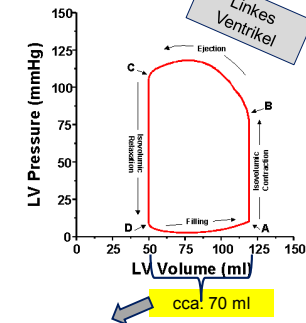
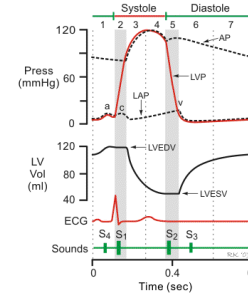
- Fluoreszenzfarbstoffe
- Radioisotope
- kalte phys. Salzlösung,
- ...



11

Anwendung: Blutströmung

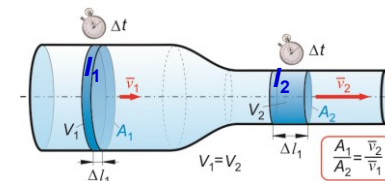
Volumenstromstärke und Strömungsgeschwindigkeit in der Aorta?



$I = \frac{\Delta V}{\Delta t} =$
 $\bar{v} =$

10

2. Kontinuitätsgleichung



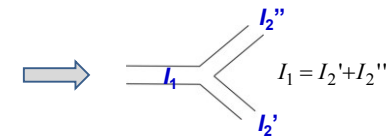
$I_1 = I_2$

$A_1 \cdot \bar{v}_1 = A_2 \cdot \bar{v}_2$

Weitere Voraussetzung:

- starres Rohr oder stationäre Strömung*

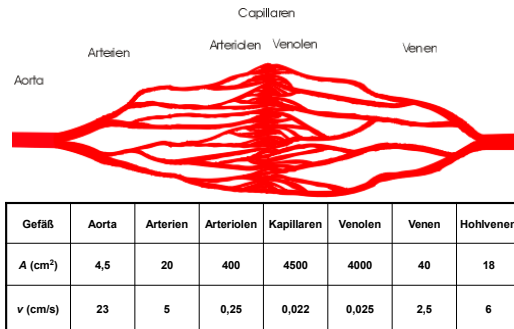
* stationäre Strömung: in der Zeit sich nicht ändernde Strömung



(siehe kirchhoffsche Knotenregel!)

12

Kontinuitätsgleichung im Blutkreislauf



13

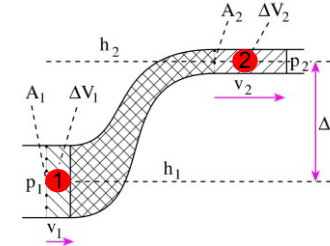
3. Strömung von idealen Flüssigkeiten

- Ideale Flüssigkeit: keine innere Reibung

- Geschwindigkeitsprofil:



- Bernoullische Gleichung:



Energieerhaltung \Rightarrow

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

Weitere Voraussetzungen:

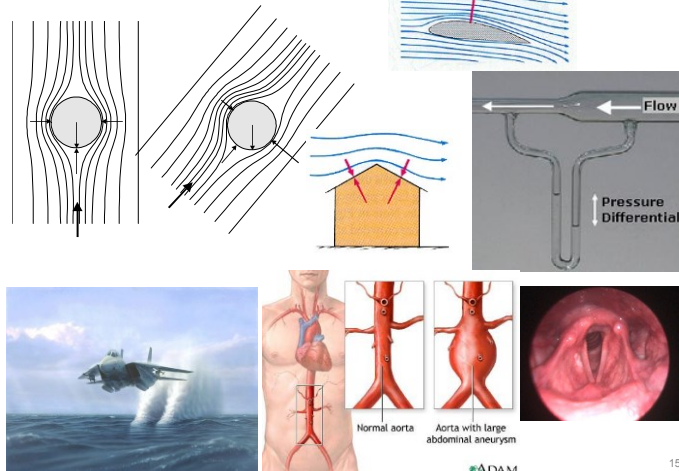
- starres Rohr *oder* stationäre Strömung
- ideale Flüssigkeit



Daniel Bernoulli
1700-1782
Mathematiker
Physiker
Anatom

14

Anwendungen der bernoullischen Gleichung



15

4. Strömung von realen Flüssigkeiten

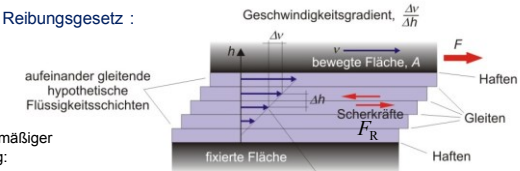
- Reelle Flüssigkeit: innere Reibung ist nicht vernachlässigbar

- Newtonsches Reibungsgesetz:

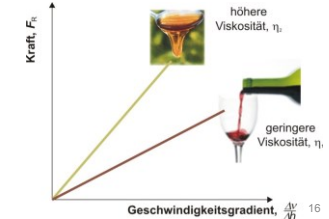
$$F = F_R = \eta \cdot A \cdot \frac{\Delta v}{\Delta h}$$

Viskosität (innerer Reibungskoeffizient)
[η] = Pa·s

Geschwindigkeitsgradient

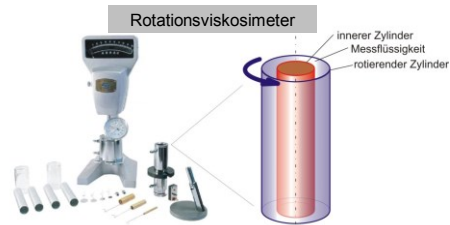


Geschwindigkeit der Flüssigkeitsschicht im Verhältnis zur stehenden Fläche



16

- Viskosität:
 - Messung



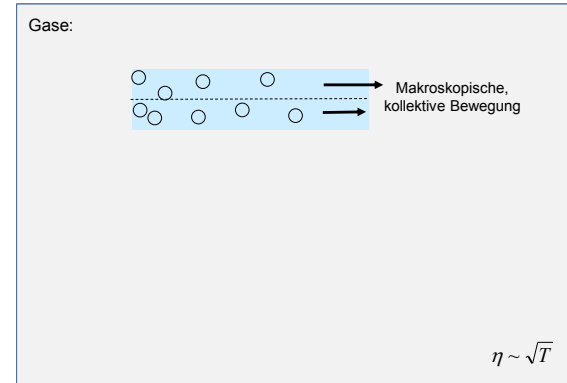
- stoffspezifisch

Stoff	η (mPa·s) 20 °C
Luft	(101 kPa) 0,019
Wasser	1
Äthanol	1,2
Blut (37 °C)	2–8
Glyzerin	1490
Honig	2000–14000

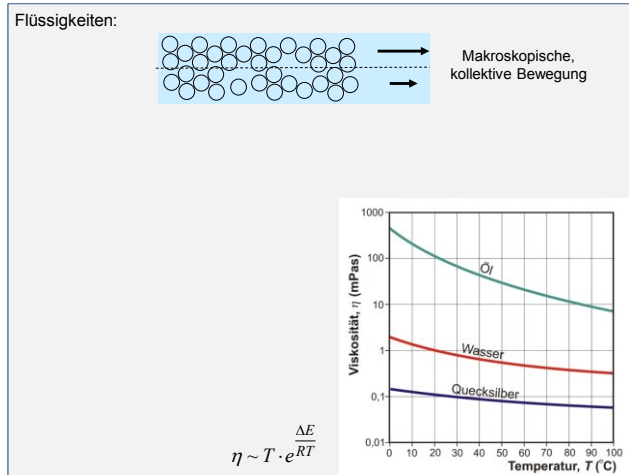
17

- Viskosität:

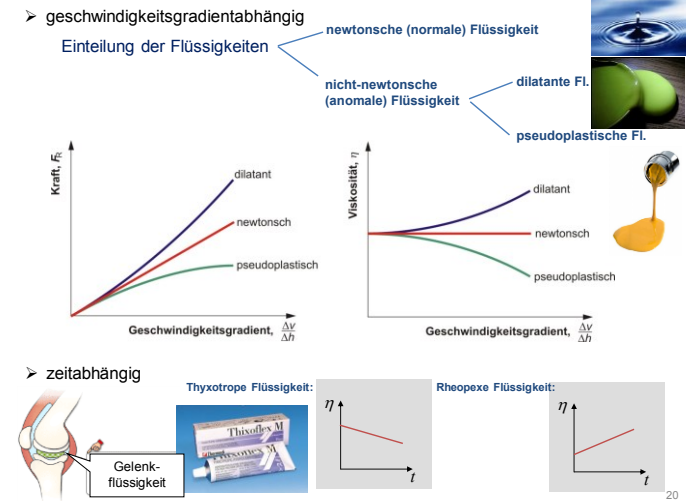
- temperaturabhängig
 - Mechanismus der inneren Reibung zwischen den Schichten



18



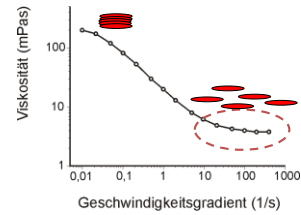
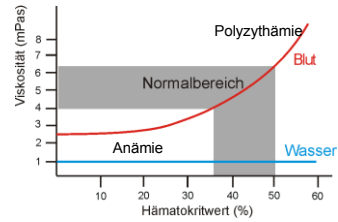
19



20

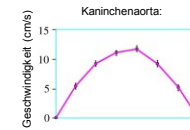
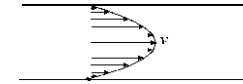
Viskosität des Blutes

- bei Körpertemperatur und bei physiologischen Strömungsverhältnissen: 2-10 mPa·s
- hängt von der Temperatur ab (wie bei jeder Flüssigkeit)
- hängt sehr stark von dem Hämatokritwert des Blutes ab
- hängt vom Geschwindigkeitsgradienten ab, und zwar pseudoplastisch
- hängt vom Blutgefäßdurchmesser ab, in kleineren Gefäßen (< 1 mm) ist die Viskosität kleiner (Fahraeus-Lindqvist-Effekt)



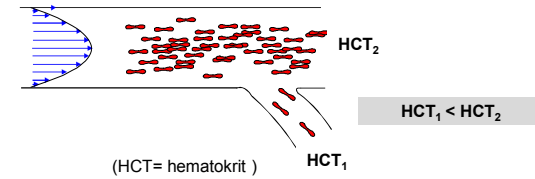
21

Geschwindigkeitsprofil:



Eine physiologische Folgerung: Plasma-Skimming

Parabolisches Geschwindigkeitsprofil + bernoullische Gleichung \Rightarrow



22