

Medizinische Biophysik 2015. 03. 01.

Transportprozesse

I. Elektrischer Ladungstransport (el. Strom)

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

II. Volumentransport (Strömungen)

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

1

Transportprozesse

II. Strömung (Volumentransport)

III. Diffusion (Stofftransport)

I. Elektrischer Strom (el. Ladungstransport)

IV. Wärmeleitung (Energietransport)

V. Verallgemeinerung

VI. Energetische Aspekte

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

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

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

Labels: Stromstärke, Elektrische Leitfähigkeit, Potenzialgradient

Alternativform: $J = \frac{\Delta q}{A \cdot \Delta t} = -\sigma \frac{\Delta \varphi}{\Delta l}$

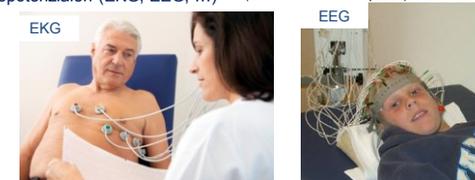
Label: Stromdichte

3

3. Anwendungen

- Diagnostik

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



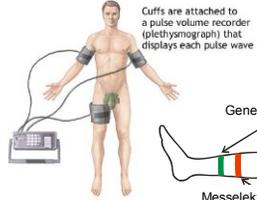
- Messung der elektrischen Leitfähigkeit von Geweben

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

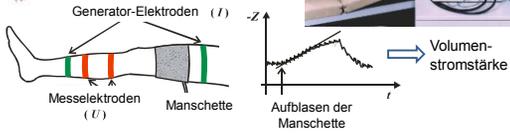
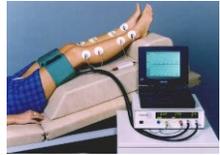
Ein bildgebendes Verfahren: die elektrische Impedanztomographie (EIT)



Impedanzplethysmographie (IPG)



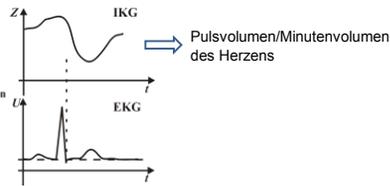
Untersuchung der Blutströmung in den Extremitäten



Impedanzkardiographie (IKG)

Impedanzkardiographie (IKG)

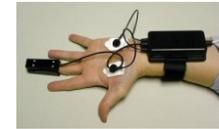
Untersuchung der Herzfunktion



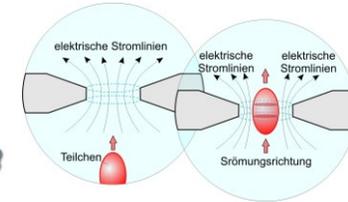
Apex-Locator



Lügendetektor



Coulter-Zähler



Therapie

Elektrostimulation



Herzschrittmacher



Defibrillator

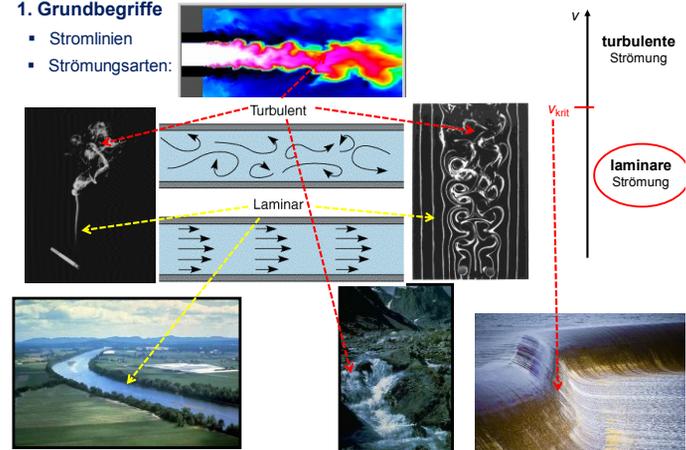


(ausführlicher siehe später!)

II. Volumentransport (Strömungen)

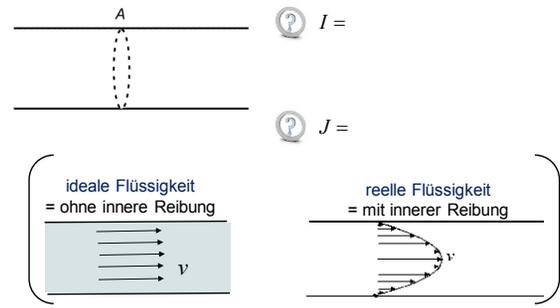
1. Grundbegriffe

- Stromlinien
- Strömungsarten:



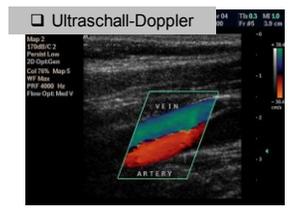
Allgemeingültige Voraussetzungen: • inkompressible Gas/Flüssigkeit
• laminare Strömung

- Volumenstromstärke (I): $I = \frac{\Delta V}{\Delta t}$ $\left(\frac{\text{m}^3}{\text{s}}\right)$
- Volumenstromdichte (J): $J = \frac{\Delta V}{A \cdot \Delta t}$ $\left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)$

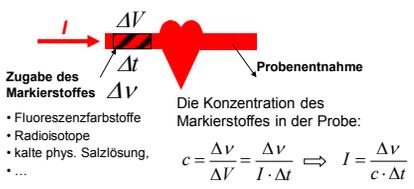
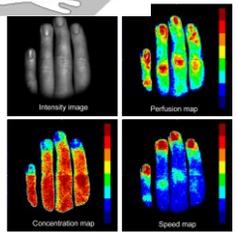
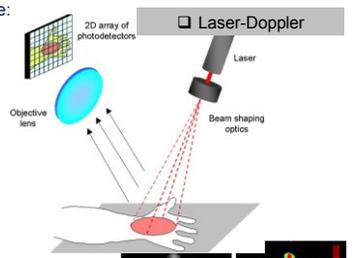


9

Messmethoden der Volumenstromstärke:



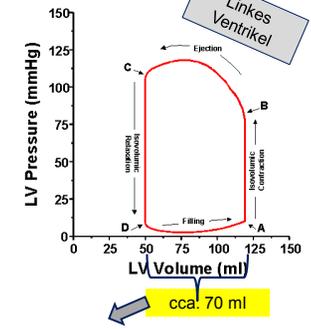
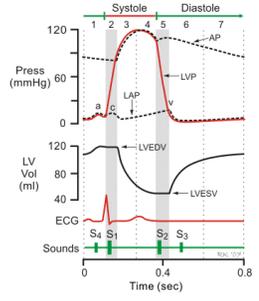
- Impedanz-Methoden
- Dilutionsmethoden



11

Anwendung: Blutströmung

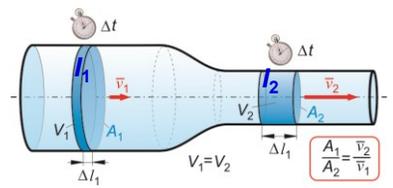
- Volumenstromstärke und Strömungsgeschwindigkeit in der Aorta?



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

10

2. Kontinuitätsgleichung

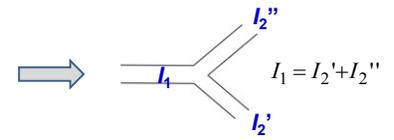


$$I_1 = I_2$$

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

Weitere Voraussetzung:
• starres Rohr oder stationäre Strömung*

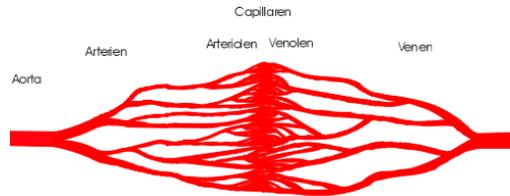
* stationäre Strömung: in der Zeit sich nicht ändernde Strömung



(siehe kirchhoffsche Knotenregel!)

12

Kontinuitätsgleichung im Blutkreislauf



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

13

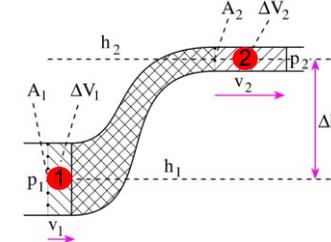
3. Strömung von idealen Flüssigkeiten

- 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:

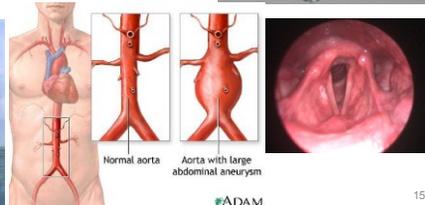
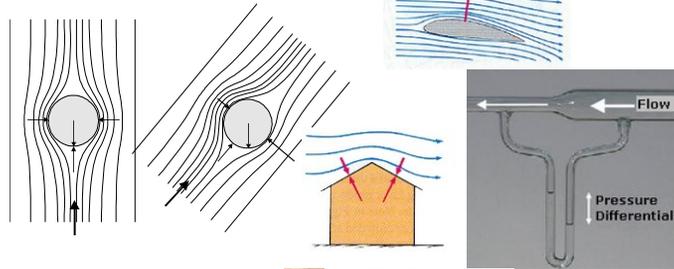
- starres Rohr *oder* stationäre Strömung
- ideale Flüssigkeit



Daniel Bernoulli
1700-1782
Mathematiker
Physiker
Anatom

14

Anwendungen der bernoullischen Gleichung

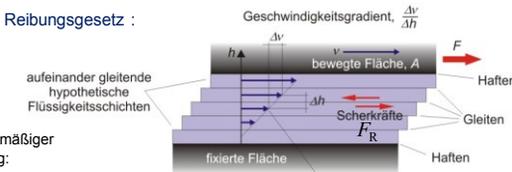


15

4. Strömung von realen Flüssigkeiten

- Reelle Flüssigkeit: innere Reibung ist nicht vernachlässigbar

- Newtonsches Reibungsgesetz:

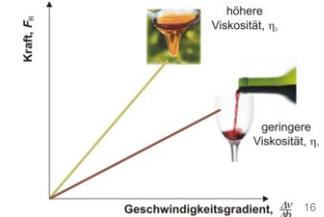


$$F = F_R = \eta \cdot A \cdot \frac{\Delta v}{\Delta h}$$

Viskosität (innerer Reibungskoeffizient) $[\eta] = \text{Pa} \cdot \text{s}$

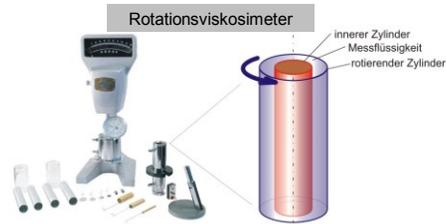
Geschwindigkeitsgradient

Geschwindigkeit der Flüssigkeitsschicht im Verhältnis zur stehenden Fläche



16

- Viskosität:
 - Messung

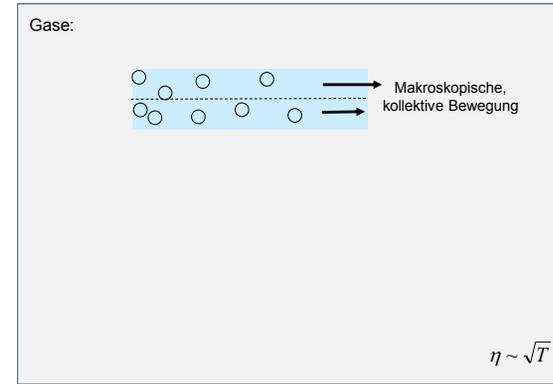


- stoffspezifisch

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

Flüssigkeiten:

$$\eta \sim T \cdot e^{\frac{\Delta E}{RT}}$$

19

geschwindigkeitsgradientabhängig

Einteilung der Flüssigkeiten

- newtonsche (normale) Flüssigkeit
- nicht-newtonsche (anomale) Flüssigkeit
 - dilatante FL.
 - pseudoplastische FL.

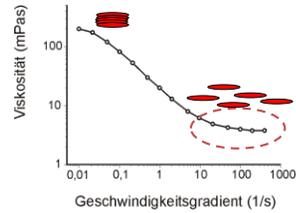
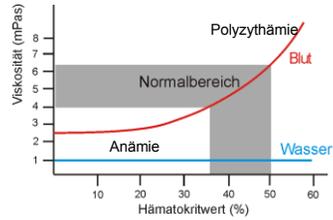
zeitabhängig

- Thixotrope Flüssigkeit:
- Rheopexe Flüssigkeit:

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)



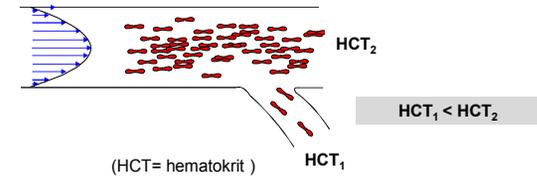
21

▪ Geschwindigkeitsprofil:



Eine physiologische Folgerung: Plasma-Skimming

Parabolisches Geschwindigkeitsprofil + bernoullische Gleichung →



22