

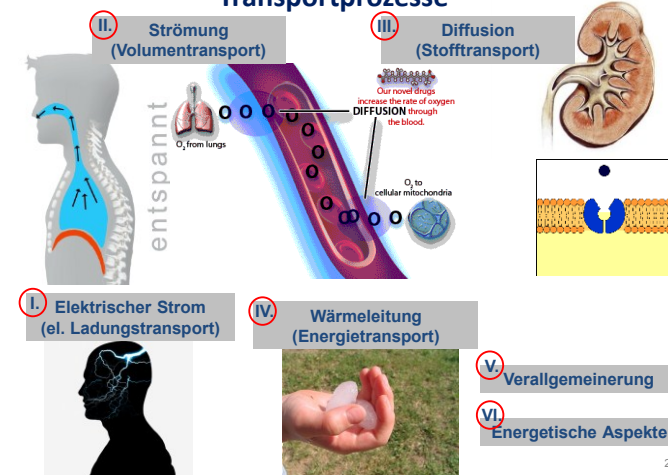
Transportprozesse

Elektrischer Strom
Strömungen



1

Transportprozesse



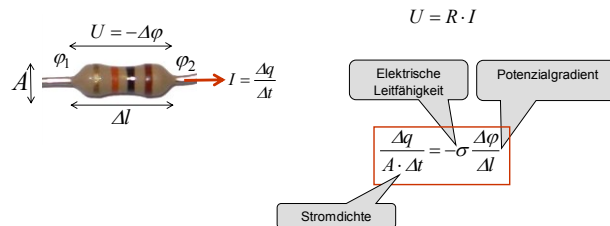
2

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

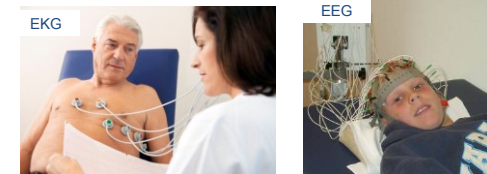
2. Transportgesetz (ohmsches Gesetz)



3

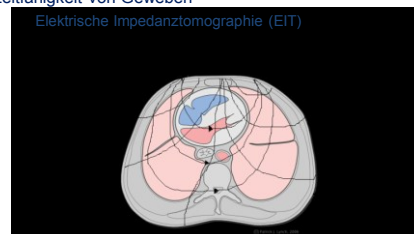
2. Anwendungen

- Diagnostik
- Messung von Biopotenzialen (EKG, EEG, ...)

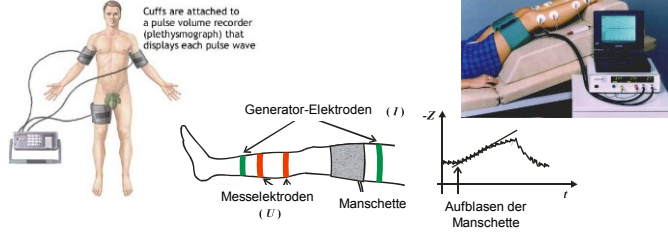


- Messung der elektrischen Leitfähigkeit von Geweben

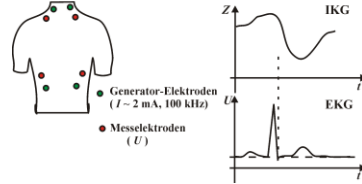
Gewebe	σ (mS/m)
Blut	700
graue Hirnmasse	300
weiße Hirnmasse	150
Haut	100
Fett	40
Knochen	10



Impedanzplethysmographie (IPG)



Impedanzkardiographie (IKG)



5

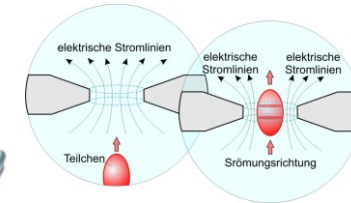
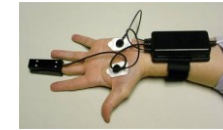
Apex-Locator



Coulter-Zähler



Lügendetektor



6

Therapie

Elektroreizung



Herzschrumpmacher



Defibrillator

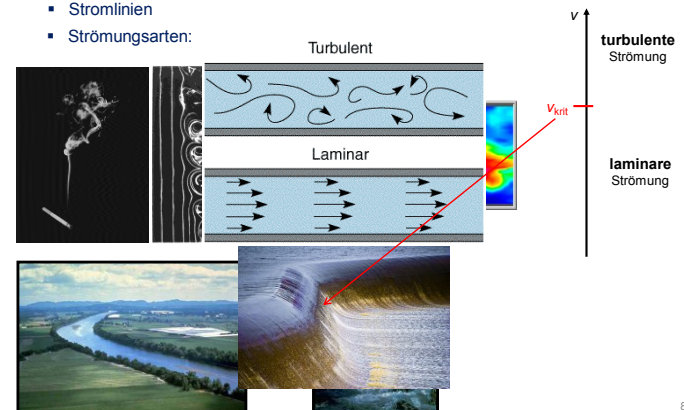


7

II. Volumentransport (Strömungen)

1. Grundbegriffe

- Stromlinien
- Strömungsarten:

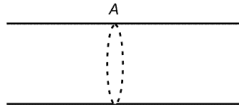


8

- stationärer Strom: zeitlich konstant

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

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



$$I = A \cdot \bar{v}$$

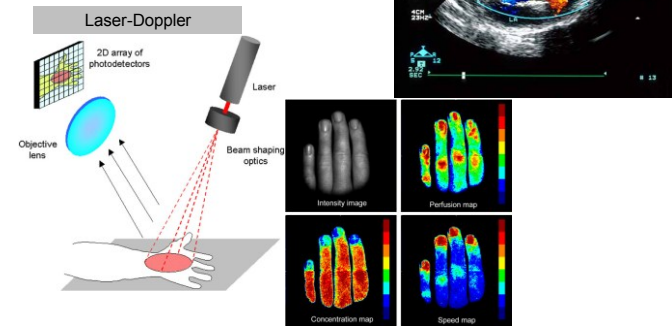
$$J = \bar{v}$$

9

Blutströmung

- Volumenstromstärke: $I = \text{ca. } 5\text{-}6 \text{ Liter/Minute}$

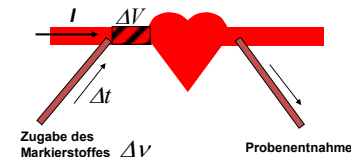
- Messmethoden der Volumenstromstärke:



10

Impedanz-Methoden

Verdünnungsmethoden



Zugabe des Markierstoffes ΔV

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

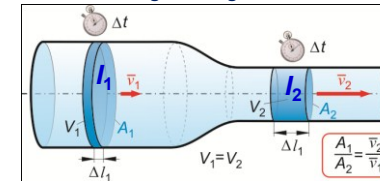
Probenentnahme

Die Konzentration des Markierstoffes in der Probe:

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

11

2. Kontinuitätsgleichung

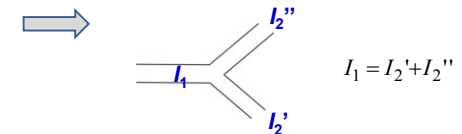


$$I_1 = I_2$$

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

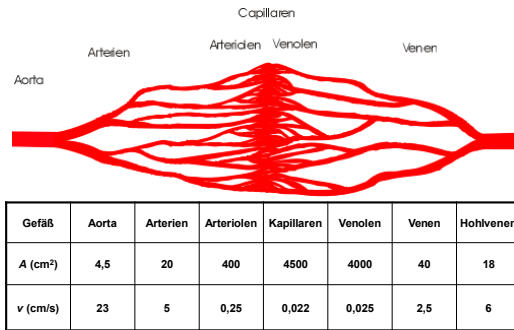
Bedingungen:

- laminare Str.
- inkompressible Fl.
- starres Rohr oder stationäre Str.



12

Kontinuitätsgleichung im Blutkreislauf

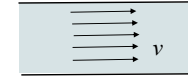


13

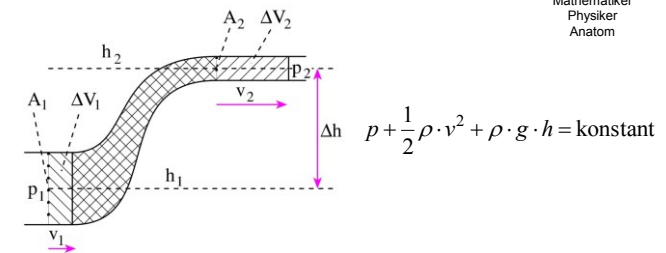
3. Strömung von idealen Flüssigkeiten

- Ideale Flüssigkeit: ohne innere Reibung

- Geschwindigkeitsprofil:



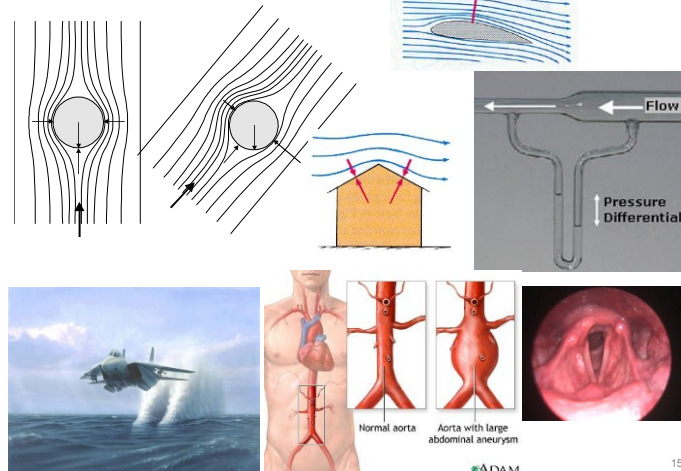
- Bernoullische Gleichung:



Daniel Bernoulli
1700-1782
Mathematiker
Physiker
Anatom

14

Anwendungen der bernoullischen Gleichung

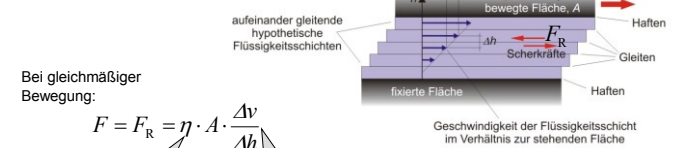


15

4. Strömung von realen Flüssigkeiten

- Reelle Flüssigkeit: mit innerer Reibung

- Newtonsches Reibungsgesetz :

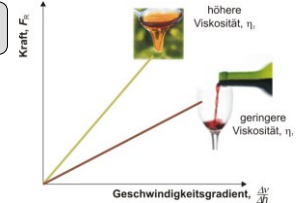


Bei gleichmäßiger Bewegung:

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

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

Geschwindigkeitsgradient



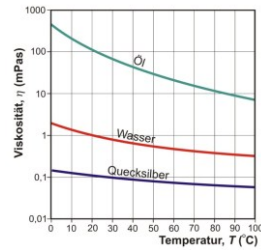
16

▪ Viskosität:

- stoffspezifisch
- temperaturabhängig



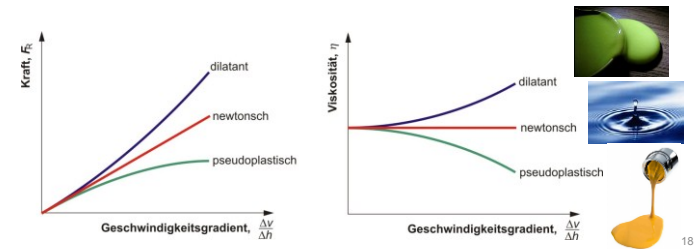
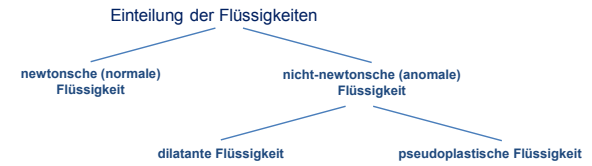
Stoff	η (mPa·s) 20 °C
Luft	(101 kPa) 0,019
Wasser	1
Äthanol	1,2
Blut (37 °C)	2–8
Glyzerin	1490
Honig	2000–14000



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

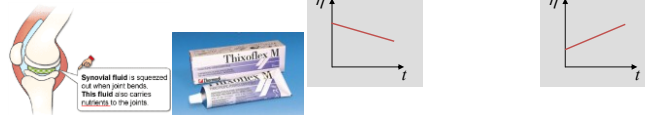
17

➢ geschwindigkeitsgradientabhängig

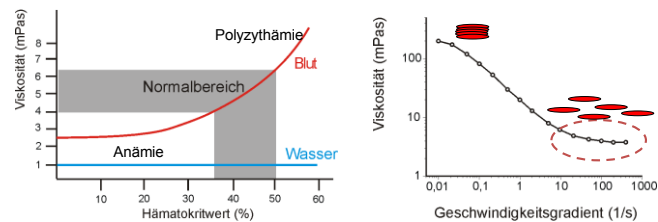


18

➢ zeitabhängig

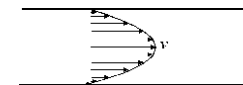


Viskosität des Blutes

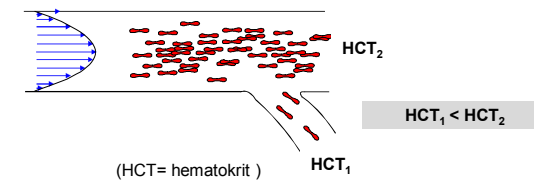


19

▪ Geschwindigkeitsprofil:

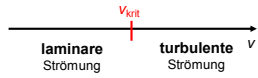


Eine physiologische Folgerung: Plasma-Skimming



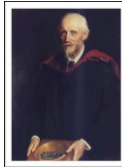
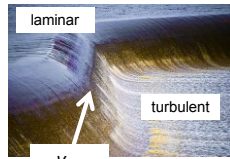
20

- Kritische Geschwindigkeit (v_{krit}):



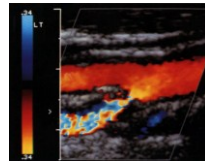
$$v_{krit} = Re \cdot \frac{\eta}{\rho \cdot r}$$

Reynolds-Zahl
(für glatte Wand: $Re = 1160$)



Osborne Reynolds
1842-1912
Wasseringenieur

Ist die Blutströmung laminar oder turbulent?

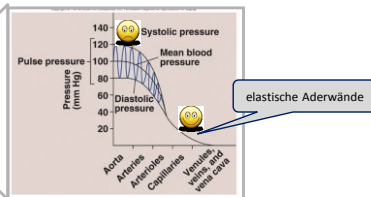


21

Ist das H-P-Gesetz anwendbar für die Blutströmung?

Gültigkeitsbedingungen?

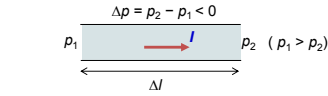
- inkompressible Fl.?
- laminare Strömung?
- stationäre Strömung?
- newtonsche Fl.?



Folgerung: H-P nur qualitativ anwendbar!

23

- Transportgesetz (Hagen-Poiseuille-Gesetz):



$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = -\frac{\pi}{8} \frac{1}{\eta} R^4 \frac{\Delta p}{\Delta l}$$

Volumenstromstärke

Radius des Rohres

Viskosität

Druckgradient

Bedingungen:

- inkompressible Fl.
- laminare Str.
- stationäre Str.
- newtonsche Fl.



G. H. L. Hagen
1797-1884
Wasseringenieur

J. L. M. Poiseuille
1799-1866
Physiologe

Alternativform:

$$\frac{\Delta V}{A \cdot \Delta t} = \frac{R^2}{8\eta} \frac{\Delta p}{\Delta l}$$

Volumenstromdichte

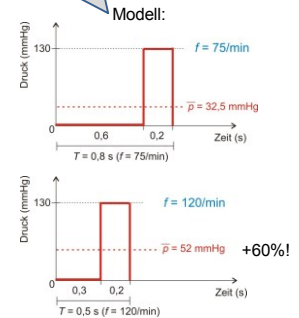
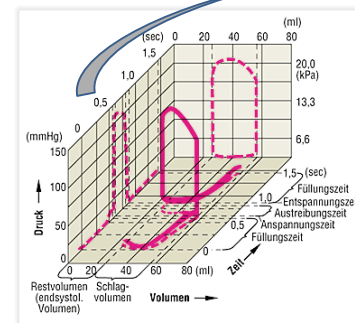
„Strömungsleitfähigkeit“

22

Blutströmung

- Regulation der Volumenstromstärke laut Hagen-Poiseuille-Gesetzes:

➤ Druck



24

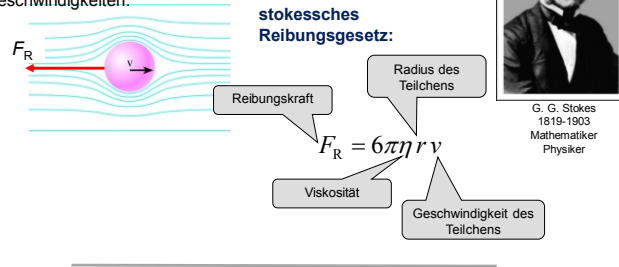


27

28

4. Bewegung von Teilchen in reellen Flüssigkeiten

Bei kleineren
Geschwindigkeiten:



Bei gleichmäßigen Bewegung: $F_{\text{Bewegung}} = F_R$

Beweglichkeit (u) eines Teilchens: $u = \frac{v}{F_{\text{Bewegung}}} \Rightarrow u = \frac{1}{6\pi\eta r} \Rightarrow$ s. Diffusion