

Biophysik für Pharmazeuten

11. 4. 2016.

Transportprozesse

Elektrischer Strom
Strömungen



1

Transportprozesse



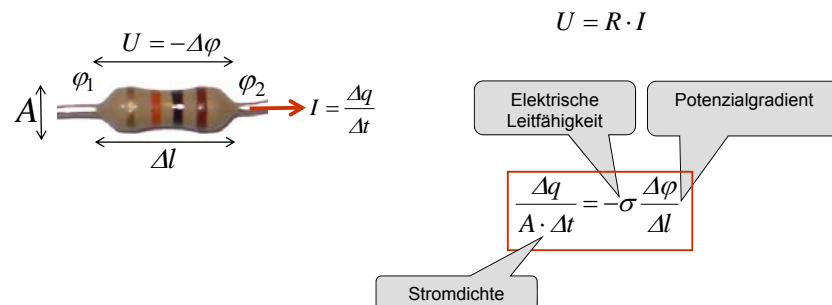
2

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)

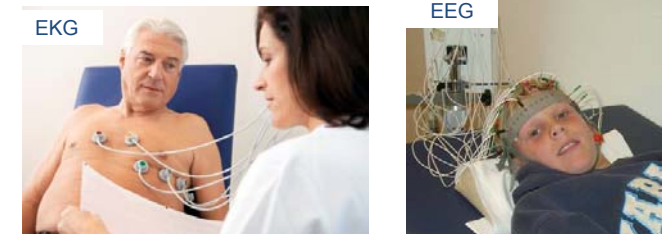


3

2. Anwendungen

▪ Diagnostik

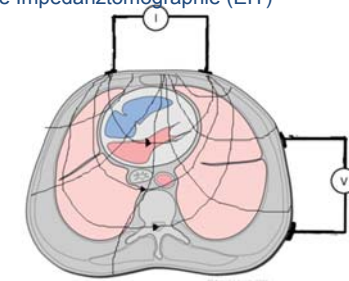
➤ Messung von Biopotenzialen (EKG, EEG, ...)



➤ Messung der elektrischen Leitfähigkeit von Geweben

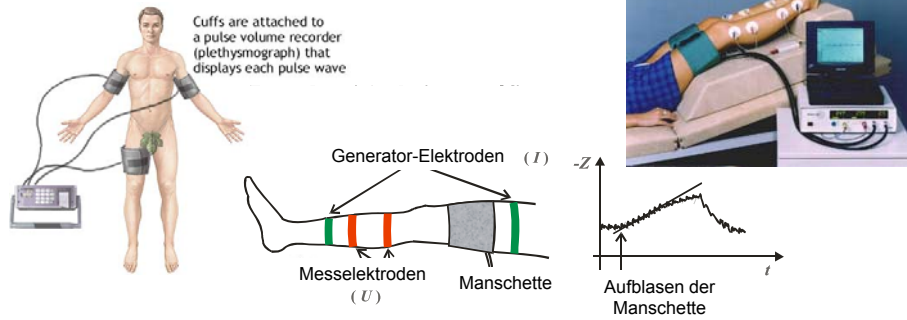
Elektrische Impedanztomographie (EIT)

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

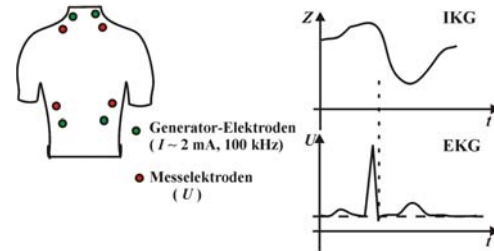


4

Impedanzplethysmographie (IPG)



Impedanzkardiographie (IKG)



5

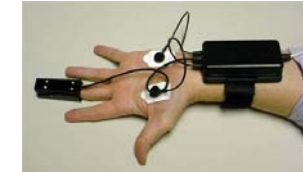
Apex-Locator



Coulter-Zähler



Lügendetektor



6

Therapie

Elektroreizung



Herzschrittmacher



Defibrillator

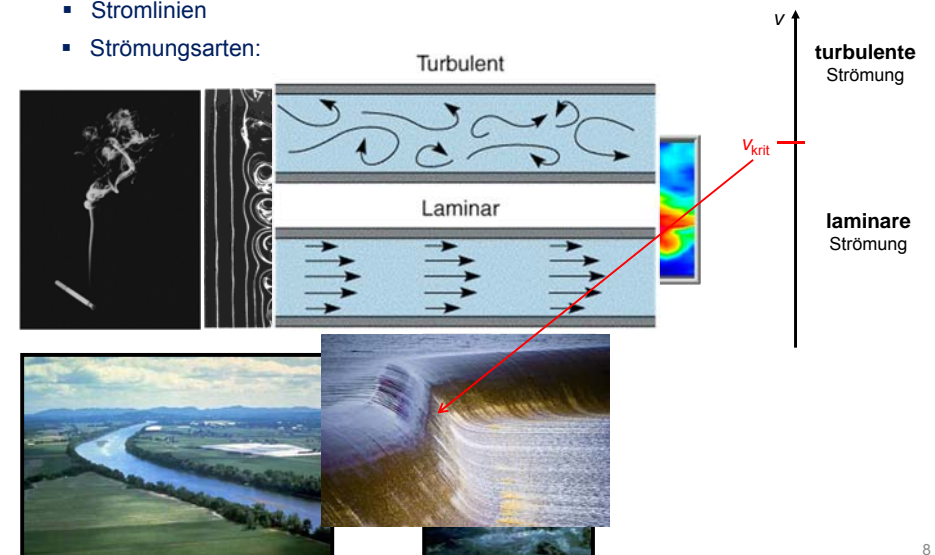


7

II. Volumentransport (Strömungen)

1. Grundbegriffe

- Stromlinien
- Strömungsarten:

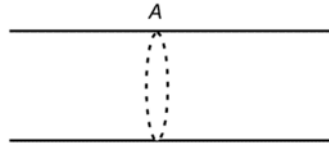


8

- stationärer Strom: zeitlich konstant

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

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



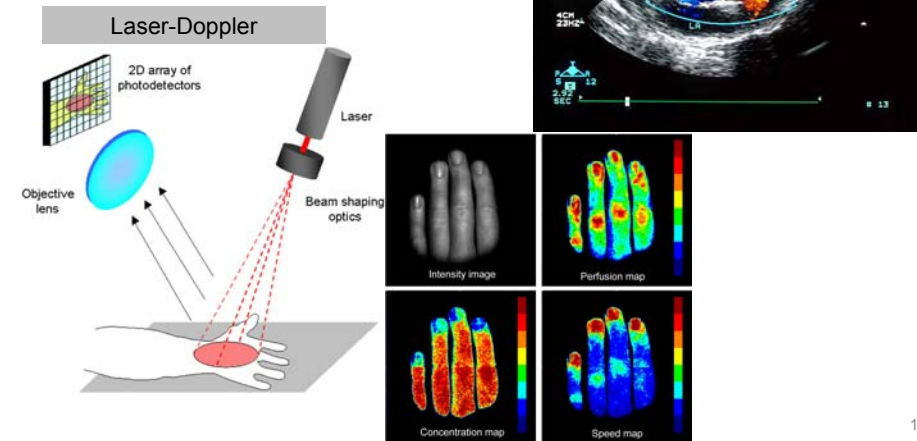
$$I = A \cdot \bar{v}$$

$$J = \bar{v}$$

9

Blutströmung

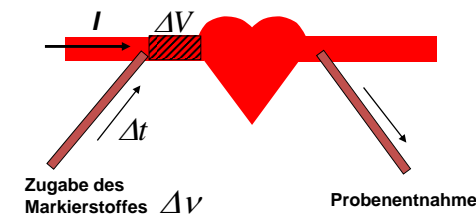
- Volumenstromstärke: $I = \text{ca. } 5\text{-}6 \text{ Liter/Minute}$
- Messmethoden der Volumenstromstärke:



10

Impedanz-Methoden

Verdünnungsmethoden



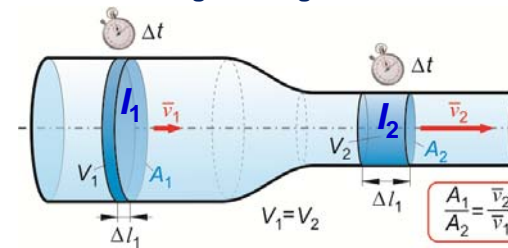
- Fluoreszenzfarbstoffe
- Radioisotope
- kalte phys. Salzlösung,
- ...

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

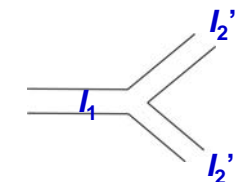


$$I_1 = I_2$$

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

Bedingungen:

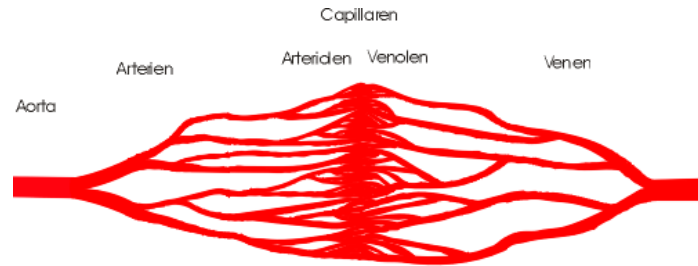
- laminare Str.
- inkompressible Fl.
- starres Rohr oder stationäre Str.



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

12

Kontinuitätsgleichung im Blutkreislauf



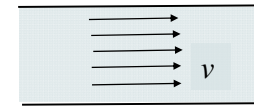
Gefäß	Aorta	Arterien	Arteriolen	Kapillaren	Venolen	Venen	Hohlvenen
A (cm²)	4,5	20	400	4500	4000	40	18
v (cm/s)	23	5	0,25	0,022	0,025	2,5	6

13

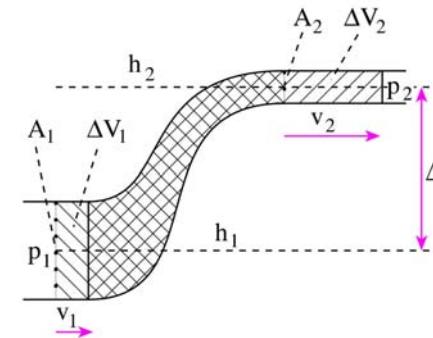
3. Strömung von idealen Flüssigkeiten

- Ideale Flüssigkeit: ohne innere Reibung

- Geschwindigkeitsprofil:



- Bernoullische Gleichung:



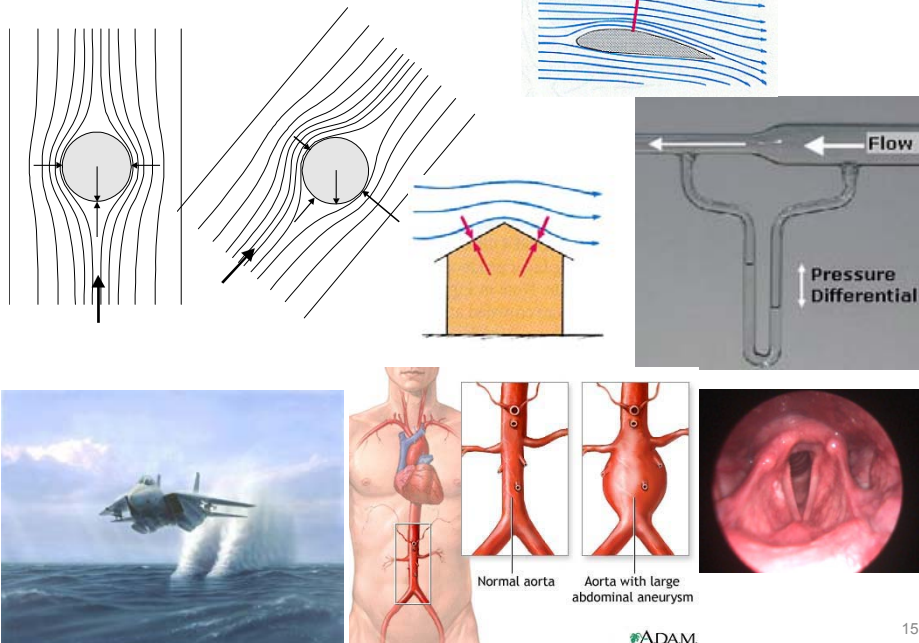
$$p + \frac{1}{2} \rho \cdot v^2 + \rho \cdot g \cdot h = \text{konstant}$$



Daniel Bernoulli
1700-1782
Mathematiker
Physiker
Anatom

14

Anwendungen der bernoullischen Gleichung



15

4. Strömung von reellen Flüssigkeiten

- Reelle Flüssigkeit: mit innerer Reibung

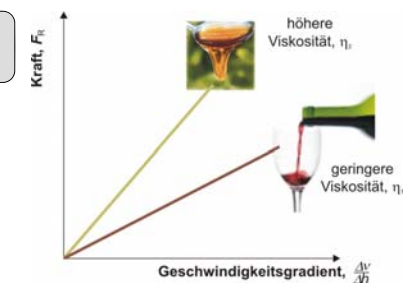
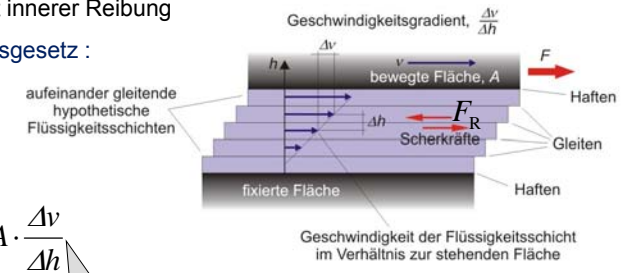
- Newtonsches Reibungsgesetz :

Bei gleichmäßiger Bewegung:

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

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

Geschwindigkeitsgradient



16

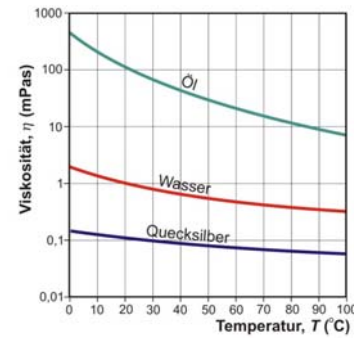
■ Viskosität:

- stoffspezifisch
- temperaturabhängig

Rotationsviskosimeter



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



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

17

➤ geschwindigkeitsgradientabhängig

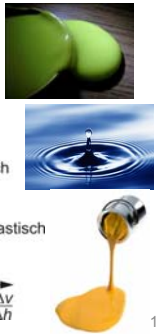
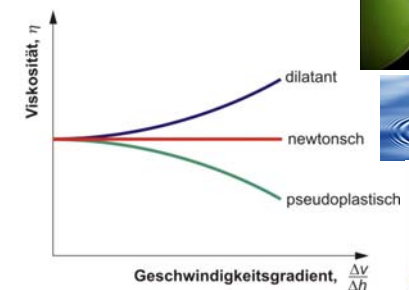
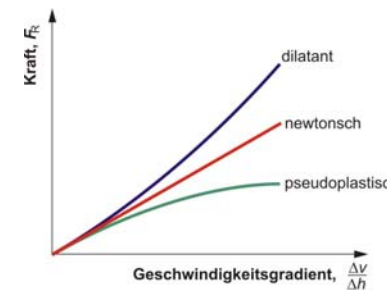
Einteilung der Flüssigkeiten

newtonsche (normale) Flüssigkeit

nicht-newtonsche (anomale) Flüssigkeit

dilatante Flüssigkeit

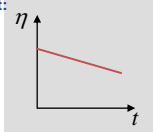
pseudoplastische Flüssigkeit



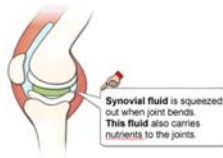
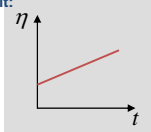
18

➤ zeitabhängig

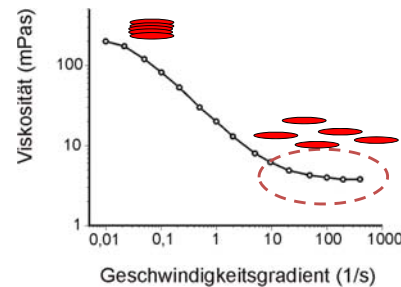
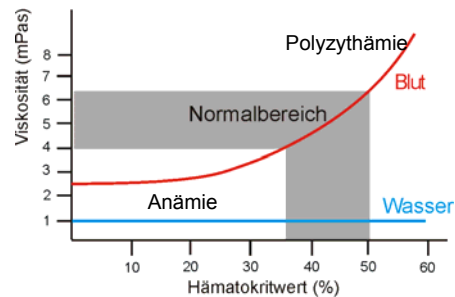
Thixotrope Flüssigkeit:



Rheopexe Flüssigkeit:

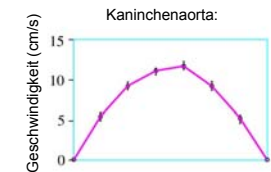
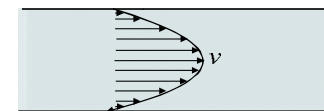


Viskosität des Blutes

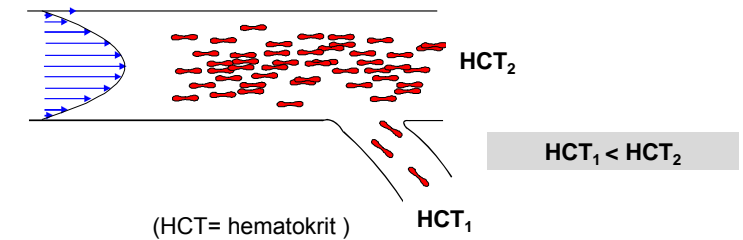


19

■ Geschwindigkeitsprofil:

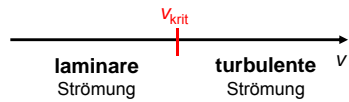


Eine physiologische Folgerung: Plasma-Skimming



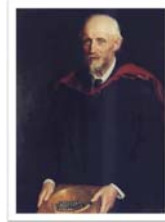
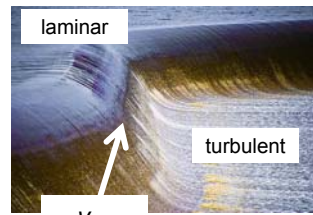
20

▪ Kritische Geschwindigkeit (v_{krit}):



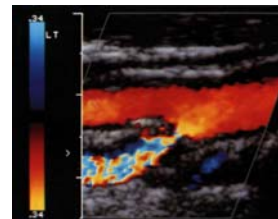
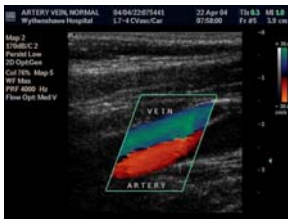
$$v_{krit} = Re \cdot \frac{\eta}{\rho \cdot r}$$

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



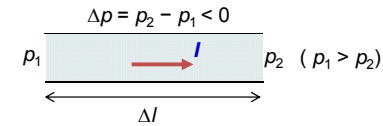
Osborne Reynolds
1842-1912
Wasseringenieur

Ist die Blutströmung laminar oder turbulent?



21

▪ Transportgesetz (Hagen-Poiseuille-Gesetz):



Volumenstromstärke

Radius des Rohres

Bedingungen:

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

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

Viskosität

Druckgradient



G. H. L. Hagen
1797-1884
Wasseringenieur



J. L. M. Poiseuille
1799-1869
Physiologe

Alternativform:

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

Volumenstromdichte

„Strömungsleitfähigkeit“

22

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

Gültigkeitsbedingungen?

• inkompressible Fl.?



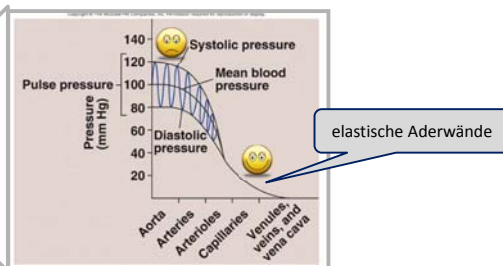
• laminare Strömung?



• stationäre Strömung?



• newtonsche Fl.?



Folgerung: H-P nur qualitativ anwendbar!

23