

Medizinische Biophysik

2013. 04. 15.

Transportprozesse

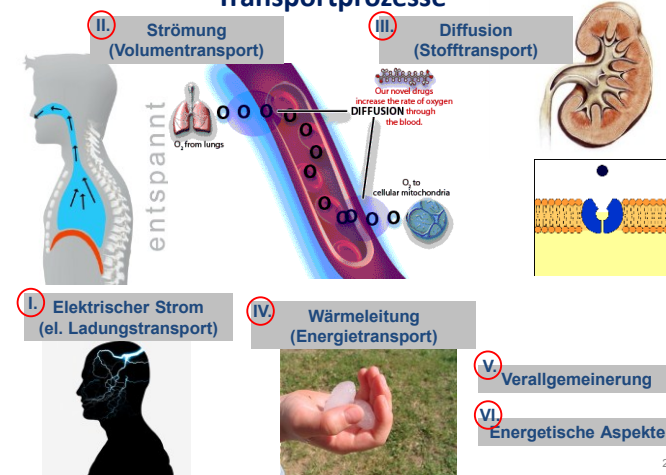
I. Elektrischer Strom

II. Strömungen von Flüssigkeiten und Gasen in Röhren



1

Transportprozesse



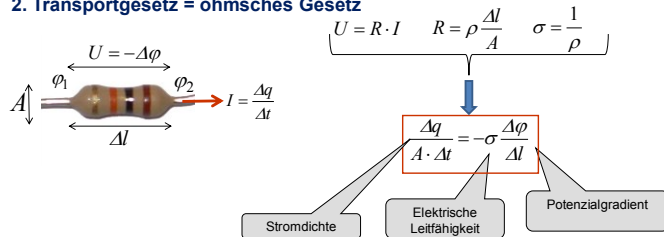
2

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

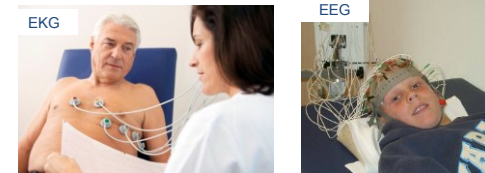
2. Transportgesetz = ohmsches Gesetz



3

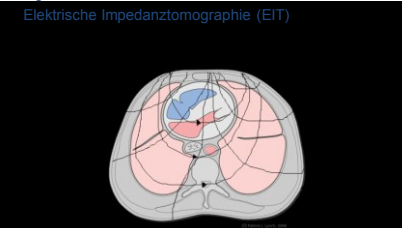
2. Anwendungen

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

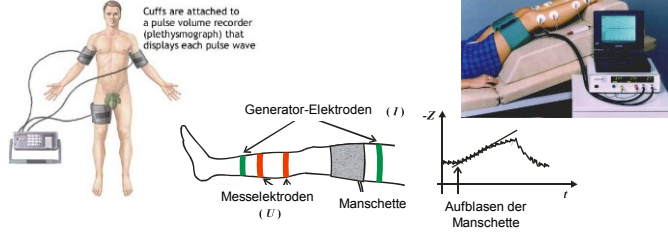


- Messung der elektrischen Leitfähigkeit von Geweben

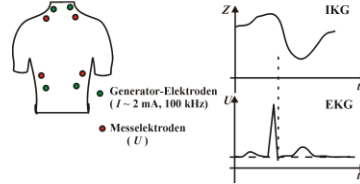
Gewebe	σ (mS/m)
Blut	700
graue Hirnmasse	300
weiße Hirnmasse	150
Haut	100
Fett	40
Knochen	10



Impedanzplethysmographie (IPG)



Impedanzkardiographie (IKG)



5

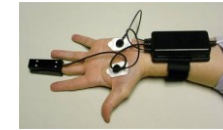
Apex-Locator



Coulter-Zähler



Lügendetektor



6

Therapie

Elektroreizung



Herzschrittmacher



Defibrillator

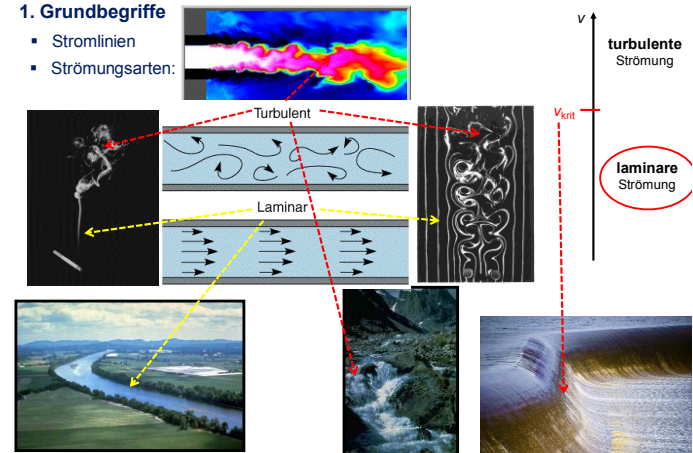


7

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



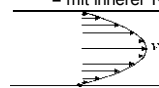
 $I =$



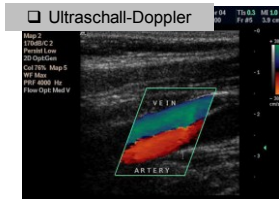
 $J =$

ideale Flüssigkeit
= ohne innere Reibung

reelle Flüssigkeit
= mit innerer Reibung



- Messmethoden der Volumenstromstärke:



- Impedanz-Methoden

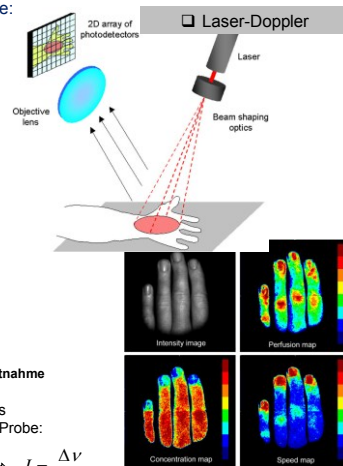
☐ Dilutionsmethoden

Zugabe des Markierstoffes $\frac{1}{\Delta V}$

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

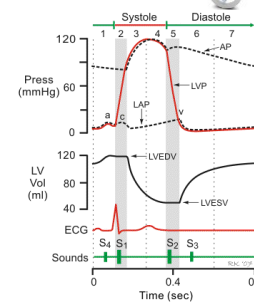
Die Konzentration des Markierstoffes in der Probe:

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



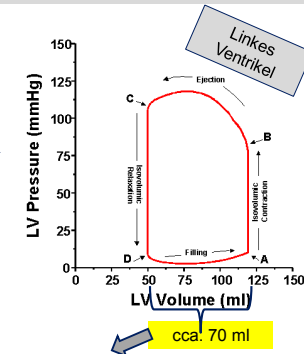
Anwendung: Blutströmung

- Volumenstromstärke: 

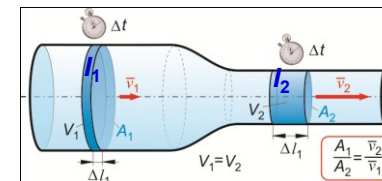


$$I_V = \frac{\Delta V}{\Delta t} =$$

$$\bar{v} =$$



2. Kontinuitätsgleichung



$$I_1 = I_2$$

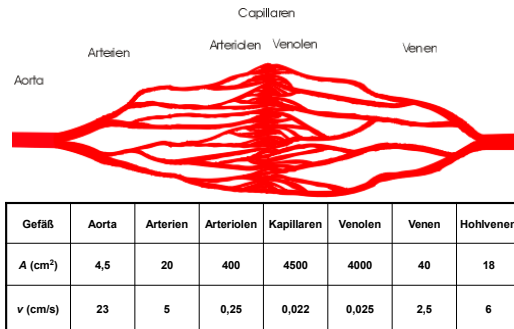
$$A_1 \cdot \overline{v_1} = A_2 \cdot \overline{v_2}$$

Weitere Voraussetzung:

- starres Rohr *oder* stationäre Strömung*

* **stationäre Strömung:** in der Zeit sich nicht ändernde Strömung

Kontinuitätsgleichung im Blutkreislauf



13

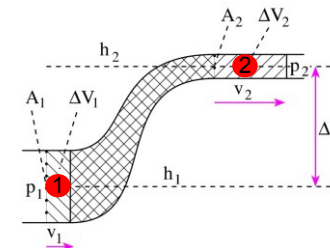
3. Strömung von idealen Flüssigkeiten

- 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:

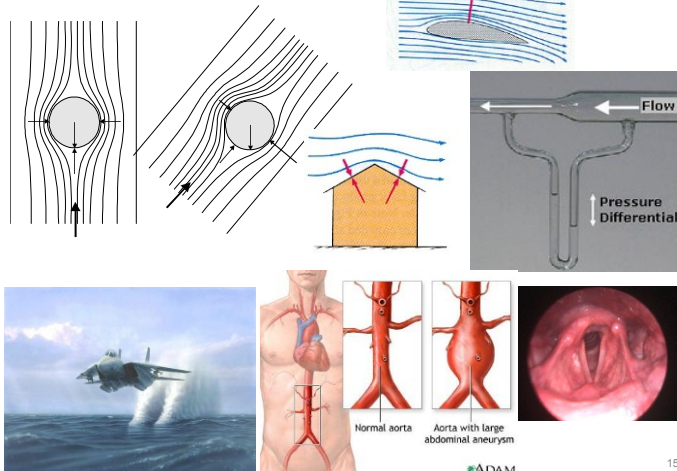
- starres Rohr *oder* stationäre Strömung
- ideale Flüssigkeit



Daniel Bernoulli
1700-1782
Mathematiker
Physiker
Anatom

14

Anwendungen der bernoullischen Gleichung



15

4. Strömung von realen Flüssigkeiten

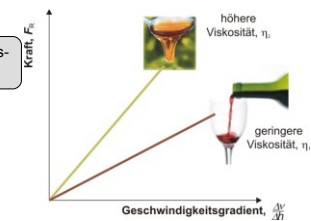
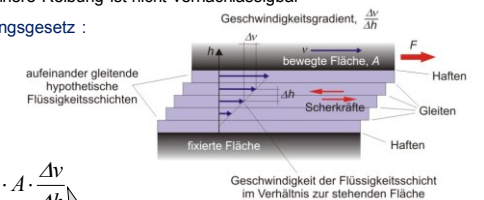
- Reelle Flüssigkeit: innere Reibung ist nicht vernachlässigbar
- Newton'sches Reibungsgesetz :

Bei gleichmäßiger Bewegung:

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

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

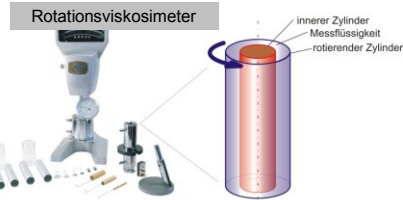
Geschwindigkeitsgradient



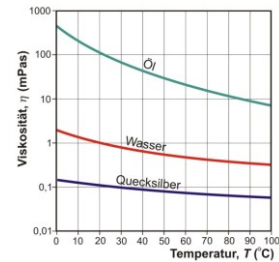
16

Viskosität:

- stoffspezifisch
- temperaturabhängig



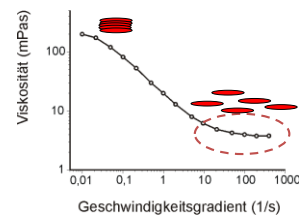
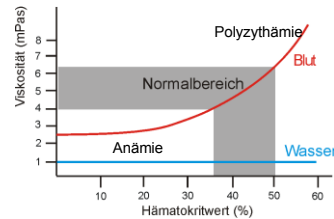
Stoff	η (mPa·s) 20 °C
Luft	(101 kPa) 0,019
Wasser	1
Äthanol	1,2
Blut (37 °C)	2–8
Glyzerin	1490
Honig	2000–14000



17

Viskosität des Blutes

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



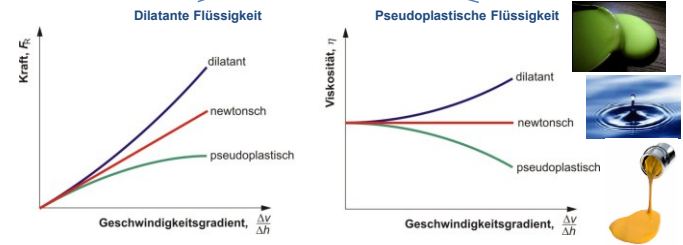
19

geschwindigkeitsgradientabhängig

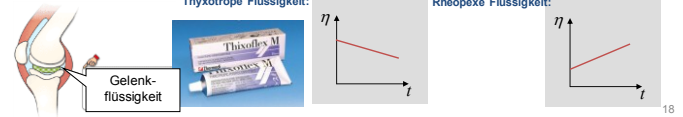
Einteilung der Flüssigkeiten

Nicht-newtonsche (anomale) Flüssigkeit

Newtonsche (normale) Flüssigkeit

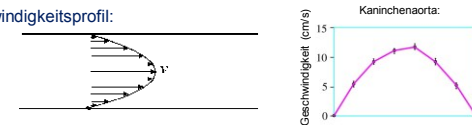


zeitabhängig



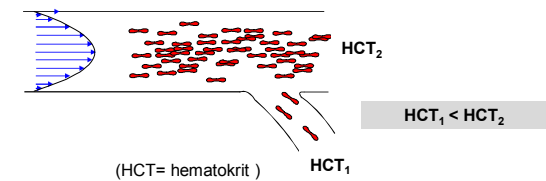
18

Geschwindigkeitsprofil:



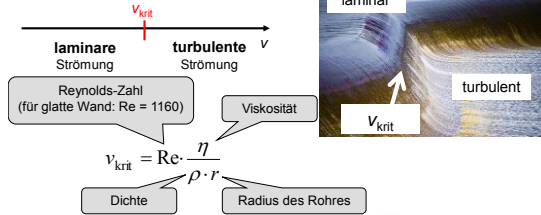
Eine physiologische Folgerung: Plasma-Skimming

Parabolische Geschwindigkeitsprofil + bernoullische Gleichung ➡

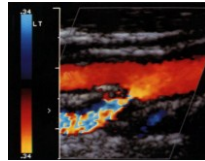


20

▪ Kritische Geschwindigkeit (v_{krit}):

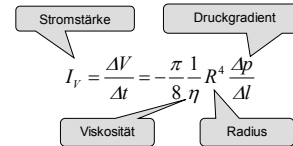
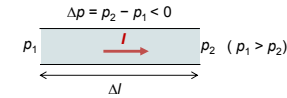


Ist die Blutströmung laminar oder turbulent?



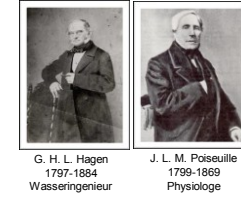
21

▪ Transportgesetz (Hagen-Poiseuille-Gesetz):



Weitere Voraussetzungen:

- stationäre Strömung
- newtonsche Flüssigkeit



„Strömungs-leitfähigkeit“

Stromdichte

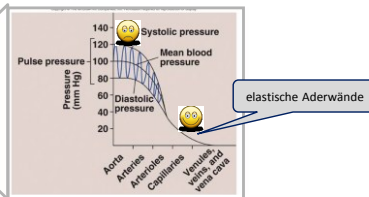
$$\frac{\Delta V}{A \cdot \Delta t} = \frac{R^4 \Delta p}{8 \eta \cdot \Delta l}$$

22

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

Gültigkeitsbedingungen:

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



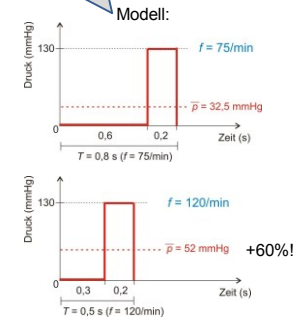
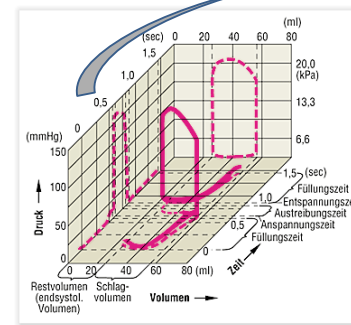
Folgerung: H-P nur qualitativ anwendbar!

23

Blutströmung

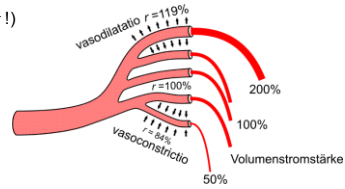
▪ Regulation der Volumenstromstärke laut Hagen-Poiseuille-Gesetzes:

➤ Druck



24

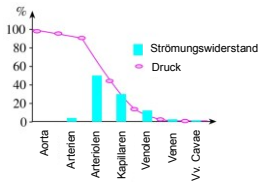
➤ Radius (R^4 !)



▪ Druck und Strömungswiderstand im Kreislauf:

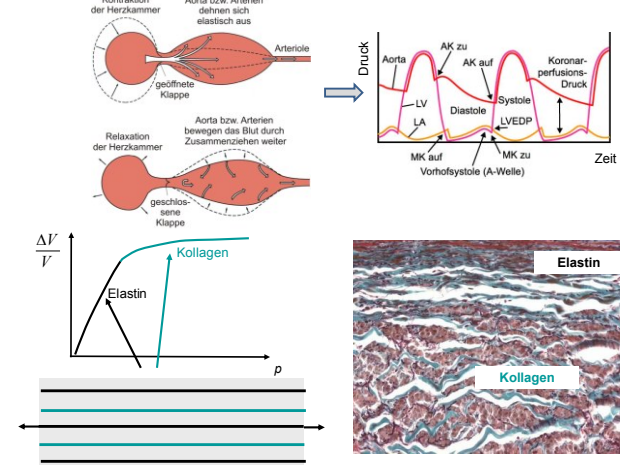
$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = -\frac{\pi}{8} \frac{1}{\eta} R^4 \frac{\Delta p}{\Delta l} \Rightarrow -\Delta p = \frac{8\eta}{\pi} \frac{\Delta l}{R^4} \frac{\Delta V}{\Delta t}$$

$U = R \cdot I$



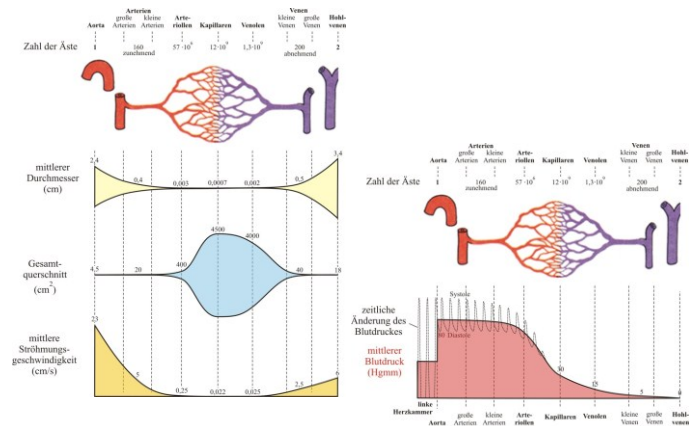
25

▪ Rolle der Elastizität von Aorta und Arterien (Windkesselfunktion):



26

Zusammenfassend:



27

Analogie

	Was strömt?	Stärke?	Was treibt die Strömung?	Zusammenhang?
Ladungs-transport	q	$J_q = \frac{\Delta q}{A \cdot \Delta t}$	φ	$J_q = -\sigma \frac{\Delta \varphi}{\Delta l}$
Volumen-transport	V	$J_V = \frac{\Delta V}{A \cdot \Delta t}$	p	$J_V = -\frac{R^2}{8\eta} \frac{\Delta p}{\Delta l}$

28