

Medizinische Biophysik

2013. 04. 15.

Transportprozesse

I. Elektrischer Strom

II. Strömungen von Flüssigkeiten und Gasen in Röhren



1

Transportprozesse

II. Strömung (Volumentransport)

entspannt
O₂ from lungs
DIFFUSION through the blood
Our novel drugs increase the rate of oxygen
O₂ to cellular mitochondria

III. Diffusion (Stofftransport)

I. Elektrischer Strom (el. Ladungstransport)

IV. Wärmeleitung (Energietransport)

V. Verallgemeinerung

VI. Energetische Aspekte

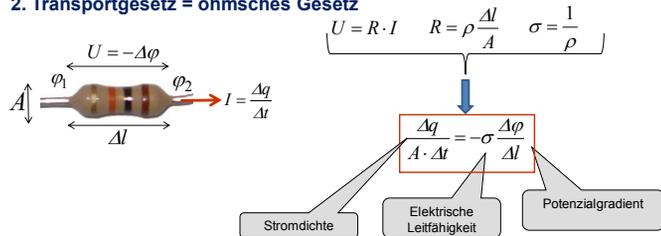
2

I. Elektrischer Ladungstransport (el. Strom)

1. Grundbegriffe

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

2. Transportgesetz = ohmsches Gesetz



3

2. Anwendungen

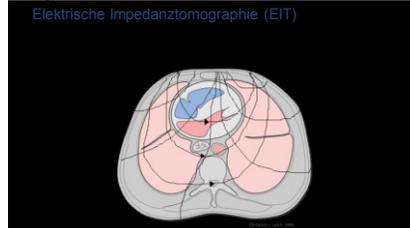
- Diagnostik

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

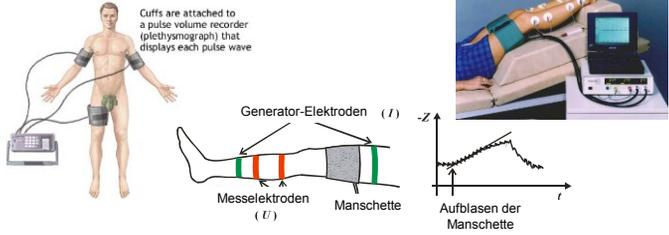


- Messung der elektrischen Leitfähigkeit von Geweben

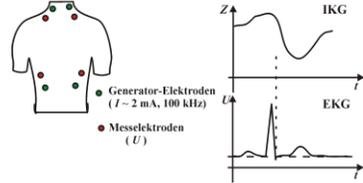
Gewebe	σ (mS/m)
Blut	700
graue Hirnmasse	300
weiße Hirnmasse	150
Haut	100
Fett	40
Knochen	10



Impedanzplethysmographie (IPG)



Impedanzkardiographie (IKG)



Therapie

Elektrostimulation



Herzschrittmacher



Defibrillator



5

7

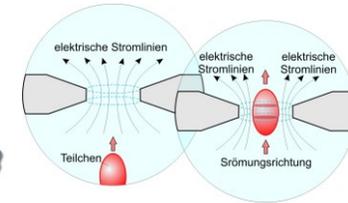
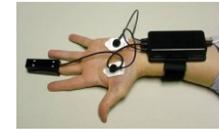
Apex-Locator



Coulter-Zähler



Lügendetektor

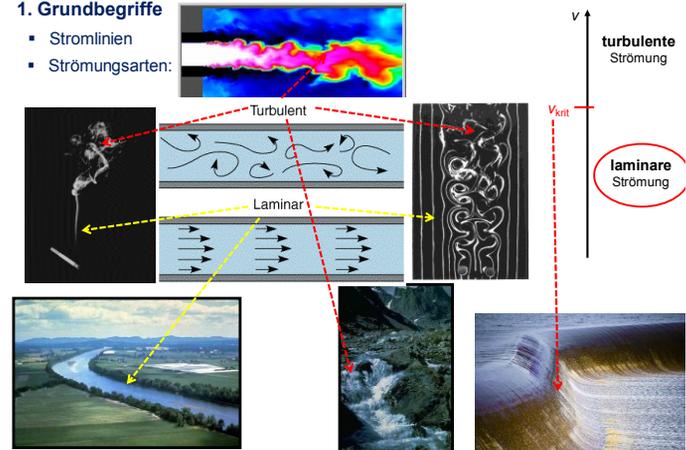


6

II. Volumentransport (Strömungen)

1. Grundbegriffe

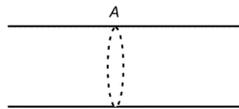
- Stromlinien
- Strömungsarten:



Allgemeingültige Voraussetzungen: • inkompressible Gas/Flüssigkeit
• laminare Strömung

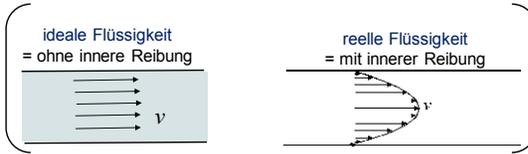
Volumenstromstärke (I): $I = \frac{\Delta V}{\Delta t}$ $\left(\frac{\text{m}^3}{\text{s}}\right)$

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



$I =$

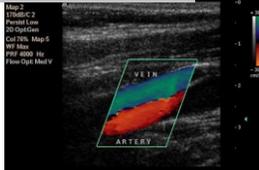
$J =$



9

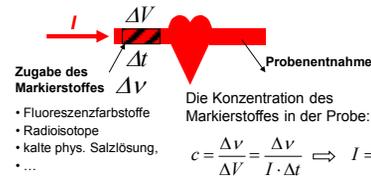
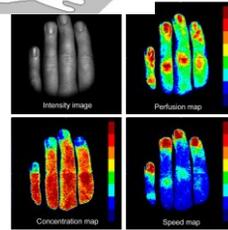
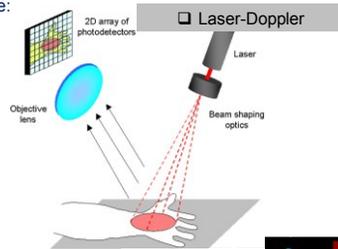
Messmethoden der Volumenstromstärke:

Ultraschall-Doppler



Impedanz-Methoden

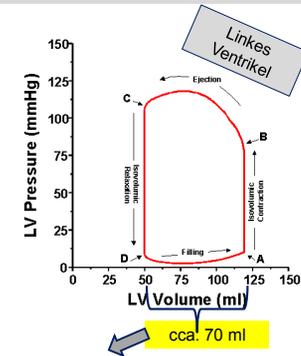
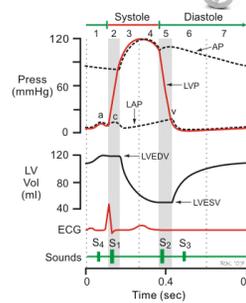
Dilutionsmethoden



11

Anwendung: Blutströmung

Volumenstromstärke:

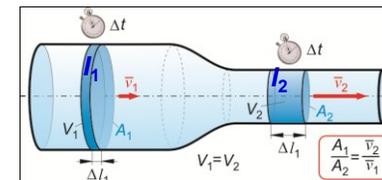


$I_V = \frac{\Delta V}{\Delta t} =$

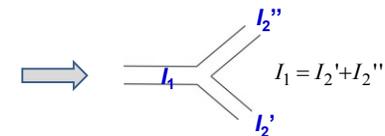
$\bar{v} =$

10

2. Kontinuitätsgleichung

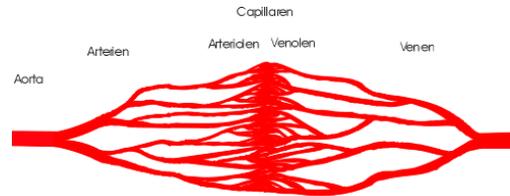


* stationäre Strömung: in der Zeit sich nicht ändernde Strömung



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

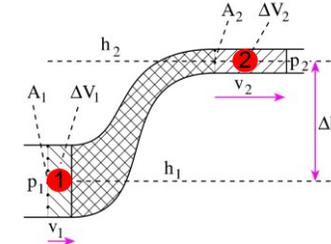
3. Strömung von idealen Flüssigkeiten

- 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:

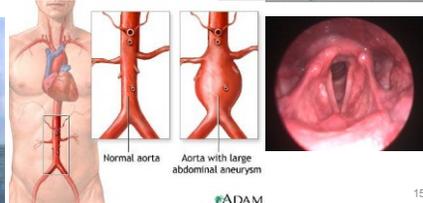
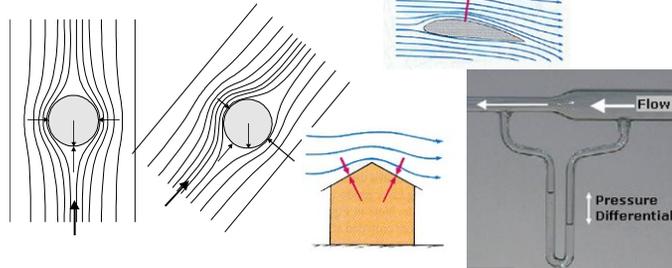
- starres Rohr *oder* stationäre Strömung
- ideale Flüssigkeit



Daniel Bernoulli
1700-1782
Mathematiker
Physiker
Anatom

14

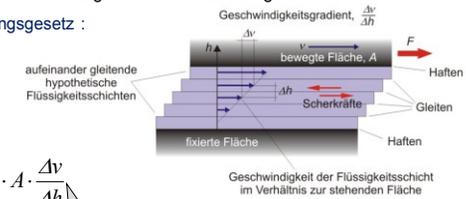
Anwendungen der bernoullischen Gleichung



15

4. Strömung von realen Flüssigkeiten

- Reelle Flüssigkeit: innere Reibung ist nicht vernachlässigbar
- Newtonsches Reibungsgesetz :

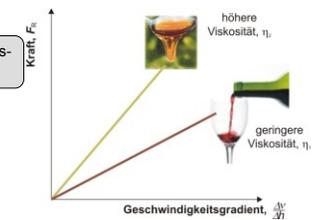


Bei gleichmäßiger Bewegung:

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

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

Geschwindigkeitsgradient

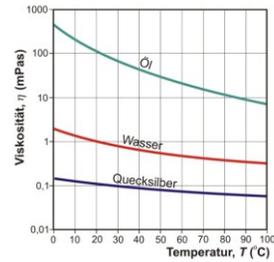


16

- Viskosität:
 - stoffspezifisch
 - temperaturabhängig

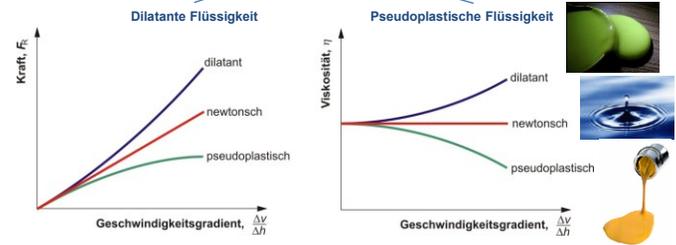


Stoff	η (mPa·s) 20 °C
Luft	(101 kPa) 0,019
Wasser	1
Äthanol	1,2
Blut (37 °C)	2–8
Glyzerin	1490
Honig	2000–14000

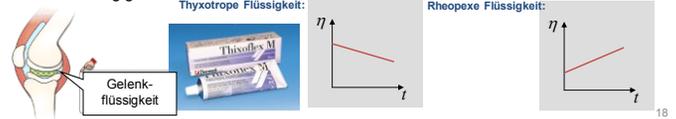


17

- geschwindigkeitsgradientabhängig
 - Einteilung der Flüssigkeiten
 - Nicht-newtonsche (anomale) Flüssigkeit
 - Dilatante Flüssigkeit
 - Newtonsche (normale) Flüssigkeit



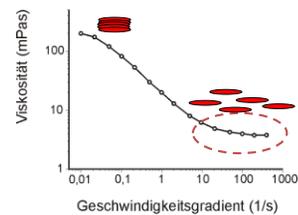
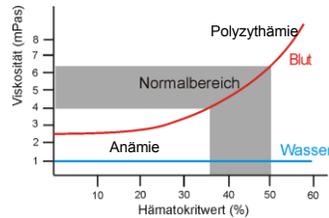
- zeitabhängig



18

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)



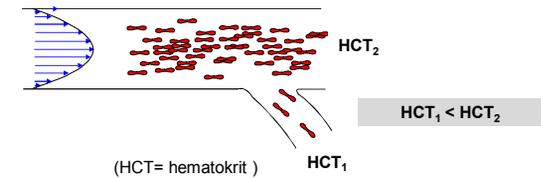
19

- Geschwindigkeitsprofil:



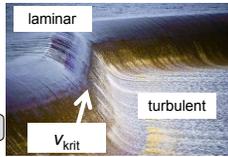
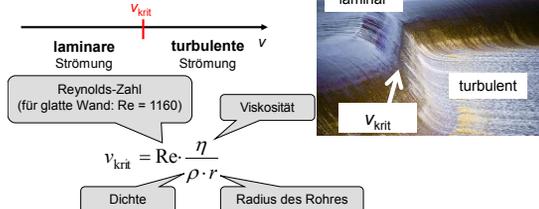
Eine physiologische Folgerung: Plasma-Skimming

Parabolische Geschwindigkeitsprofil + Bernoullische Gleichung →



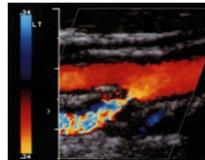
20

- Kritische Geschwindigkeit (v_{krit}):

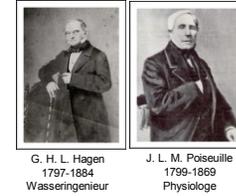
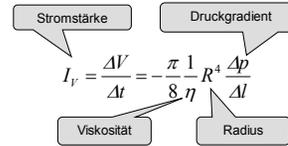
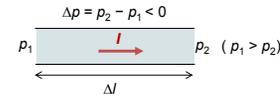


Osborne Reynolds
1842-1912
Physiker und
Wasseringenieur

Ist die Blutströmung laminar oder turbulent? ?



- Transportgesetz (Hagen-Poiseuille-Gesetz):



Weitere Voraussetzungen:

- stationäre Strömung
- newtonsche Flüssigkeit

„Strömungsleitfähigkeit“

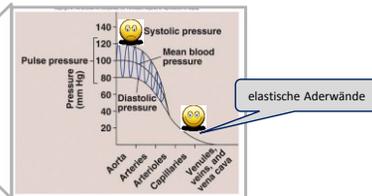
Stromdichte

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

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

Gültigkeitsbedingungen?

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

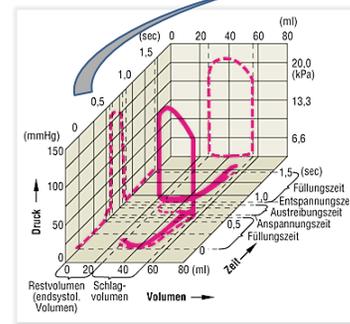


Folgerung: H-P nur qualitativ anwendbar!

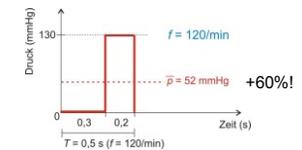
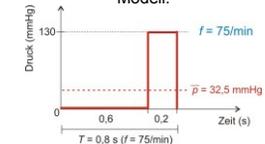
Blutströmung

- Regulation der Volumenstromstärke laut Hagen-Poiseuille-Gesetzes:

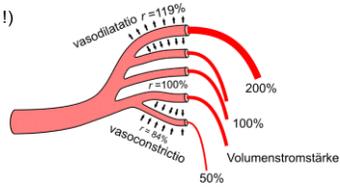
➤ Druck



Modell:



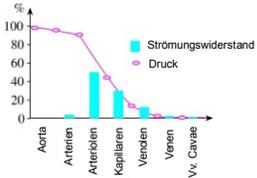
➤ Radius (R^4 !)



▪ Druck und Strömungswiderstand im Kreislauf:

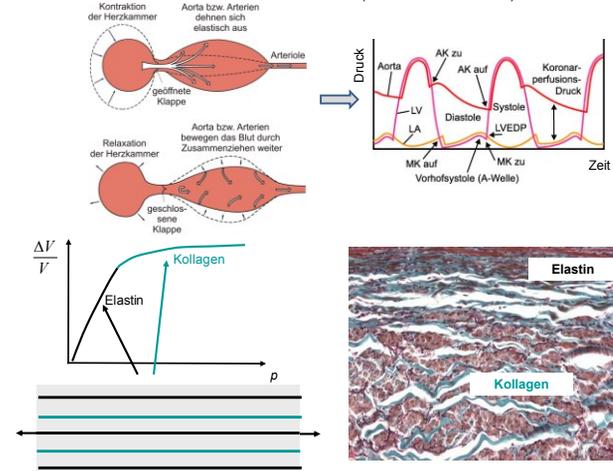
$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = -\frac{\pi}{8} \frac{1}{\eta} R^4 \frac{\Delta p}{\Delta l} \Rightarrow -\Delta p = \frac{8\eta}{\pi} \frac{\Delta l}{R^4} \frac{\Delta V}{\Delta t}$$

\downarrow \downarrow \downarrow
 $U = R \cdot I$



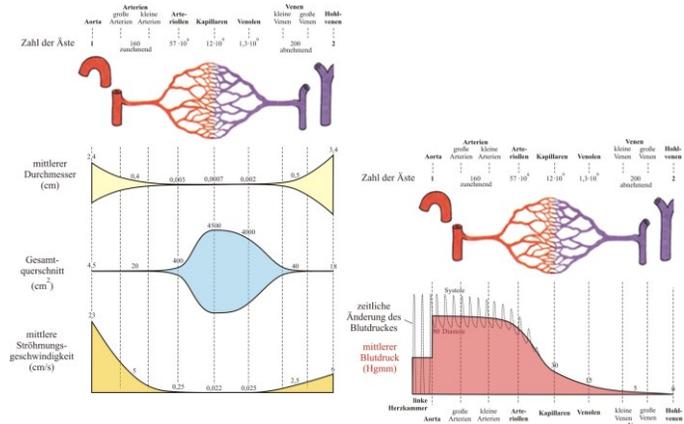
25

▪ 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	$-\frac{\Delta \varphi}{\Delta l}$	$J_q = -\sigma \frac{\Delta \varphi}{\Delta l}$
Volumen-transport	V	$J_V = \frac{\Delta V}{A \cdot \Delta t}$	p	$-\frac{\Delta p}{\Delta l}$	$J_V = -\frac{R^2}{8\eta} \frac{\Delta p}{\Delta l}$

28