

Biophysik für Pharmazeuten II.

08. 04. 2020.

Transportprozesse 2. Strömungen, Wärmeleitung



1

Transportprozesse

II. Strömung (Volumentransport)

III. Diffusion (Stofftransport)

Our novel drugs increase the rate of oxygen DIFFUSION through the blood.

O₂ from lungs

O₂ to cellular mitochondria

I. Elektrischer Strom (el. Ladungstransport)

IV. Wärmeleitung (Energietransport)

V. Verallgemeinerung

VI. Energetische Aspekte

2

Turbulent

Laminar

Zur Erinnerung

Volumenstromstärke (I): $I = \frac{\Delta V}{\Delta t}$ (m³/s)

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

Kontinuitätsgleichung

$V_1 = V_2$

$\frac{A_1}{A_2} = \frac{v_2}{v_1}$

Ideale Flüssigkeit (ohne innere Reibung)

Bernoullische Gleichung

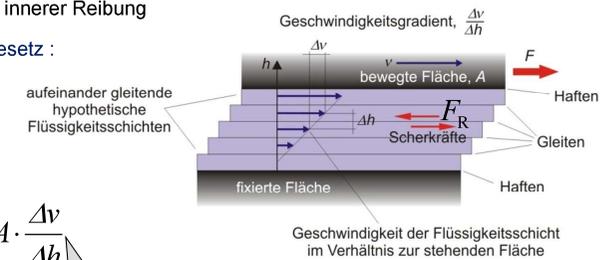
$$p + \frac{1}{2} \rho \cdot v^2 + \rho \cdot g \cdot h = \text{konstant}$$

- Wie kann die innere Reibung bei der Strömung einer reellen Flüssigkeit beschrieben werden?
- Ist eine gewisse Strömung laminar oder turbulent?
- Was treibt die Strömung?
- Wovon hängt die Stromstärke der Strömung ab?

3

4. Strömung von reellen Flüssigkeiten

- Reelle Flüssigkeit: mit innerer Reibung
- Newtonsches Reibungsgesetz :

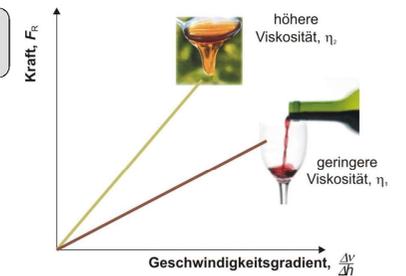


Bei gleichmäßiger Bewegung:

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

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

Geschwindigkeitsgradient



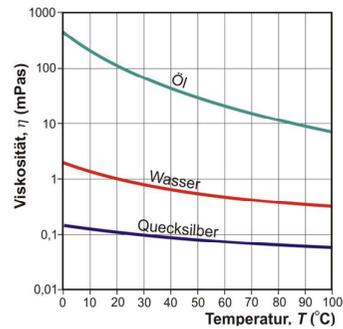
4

■ 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



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

5

Ausführlicher über den Mechanismus der inneren Reibung :

Gase:

Bewegung der Schichten

$T \uparrow \eta \uparrow$

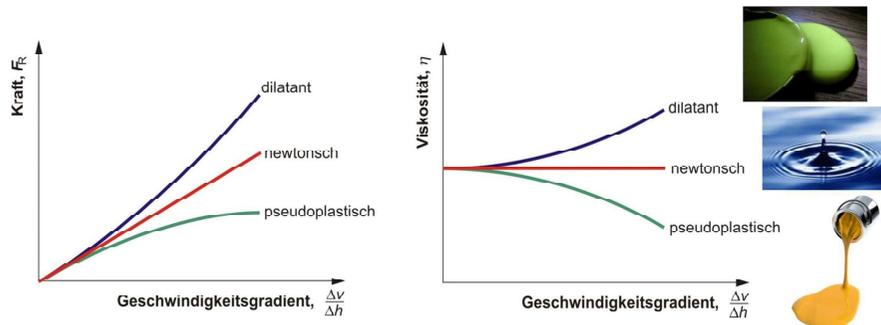
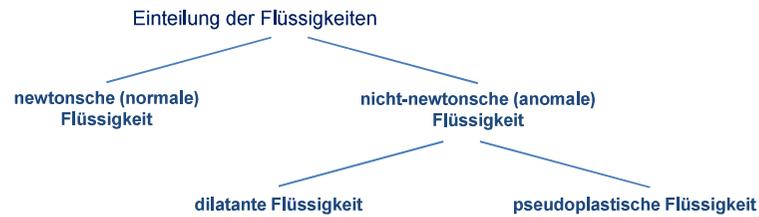
Flüssigkeiten:

Bewegung der Schichten

$T \uparrow \eta \downarrow$

6

- geschwindigkeitsgradientabhängig



7

Viskosität der Körperflüssigkeiten

Liquor (Gehirn-Rückenmarks-Flüssigkeit, Cerebrospinalflüssigkeit)

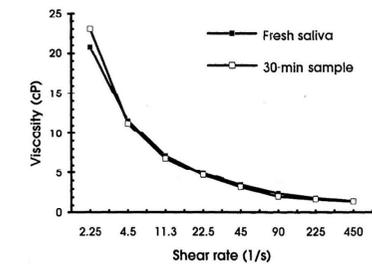


1. Großhirn
2. Kleinhirn
3. Hirnstamm
4. Rückenmark

Speichel

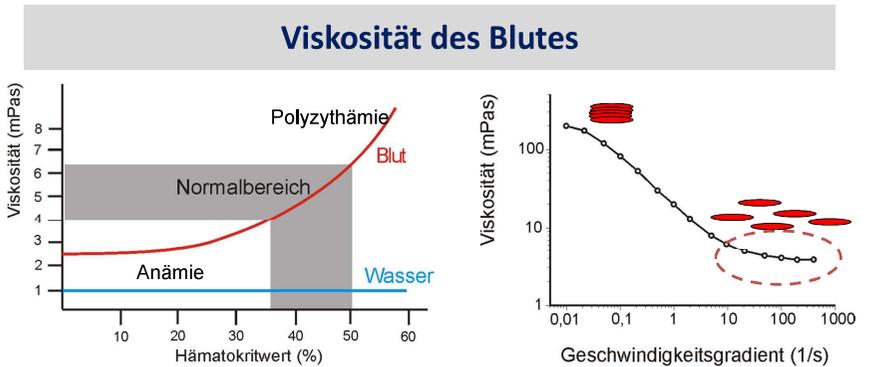
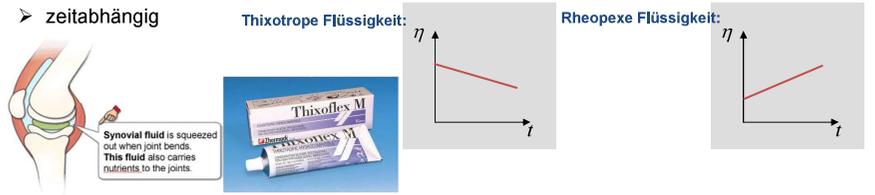
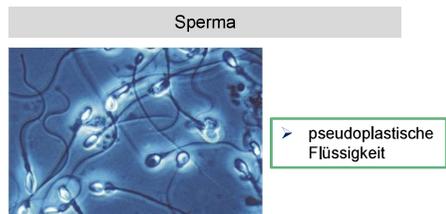
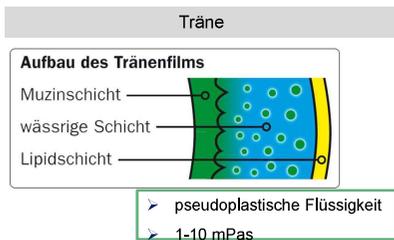
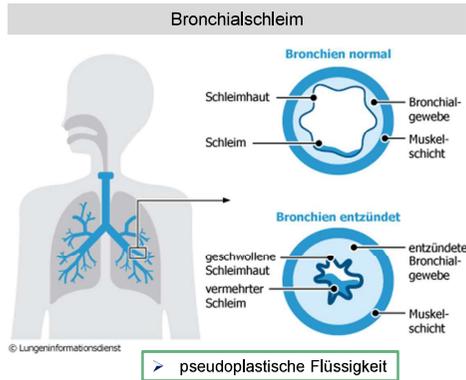


- Mucin
- pseudoplastische Flüssigkeit

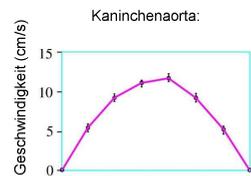
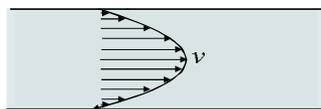


Nach Pama J. P., Rantanen & Jukka H. Heiskanen (1998) Viscosity of whole saliva, Acta Otolaryngologica Scandinavica, 50:4, 210-214

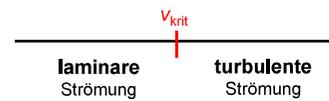
8



■ Geschwindigkeitsprofil:

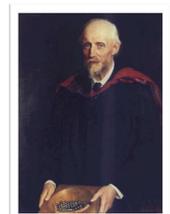
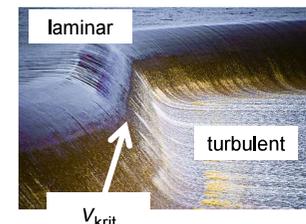


■ Kritische Geschwindigkeit (v_{krit}):



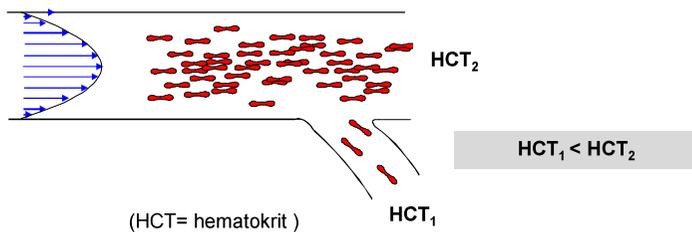
$$v_{krit} = Re \cdot \frac{\eta}{\rho \cdot r}$$

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

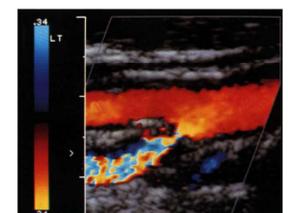
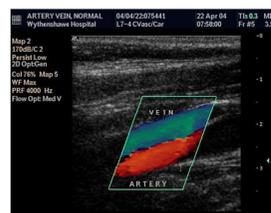


Osborne Reynolds
1842-1912
Wasseringenieur

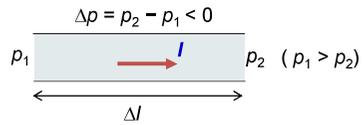
Eine physiologische Folgerung: Plasma-Skimming



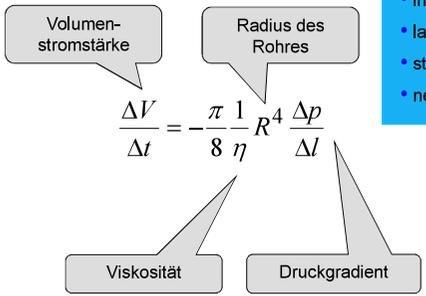
Ist die Blutströmung laminar oder turbulent?



Transportgesetz (Hagen-Poiseuille-Gesetz):



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



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

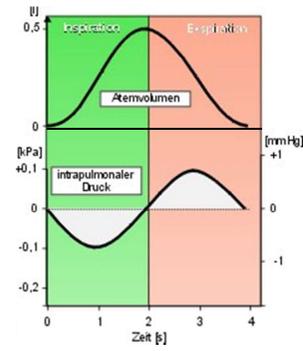
Alternativform:

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

„Strömungsleitfähigkeit“

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

- inkompressible Luft?
- laminare Strömung?
- stationäre Strömung?
- newtonsches Gas?



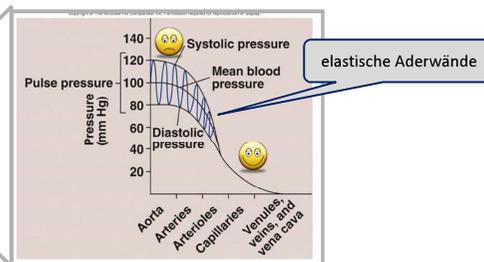
Das H-P-Gesetz ist mit guter Annäherung anwendbar!

- Regulation der Volumenstromstärke laut Hagen-Poiseuille-Gesetzes:
 - Druck (Δp)
 - Intrapulmonaler Druck (Δp) kann in einem Atemzyklus stark geändert werden: 0,1 kPa – 0,5 kPa
 - Der Durchschnittswert des intrapulmonalen Druckes (Δp) für die Einatmung kann durch die Atemfrequenz geändert werden: 12 1/min – 40 1/min
 - Radius (R⁴)

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

Gültigkeitsbedingungen?

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

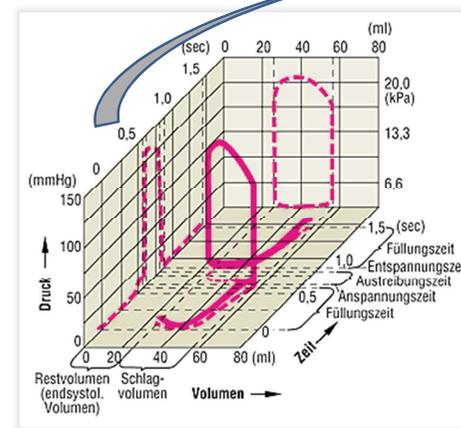


Folgerung: H-P nur qualitativ anwendbar!

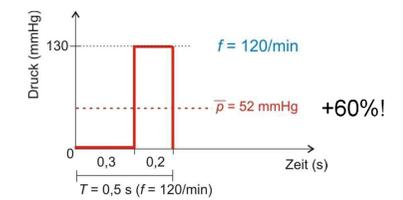
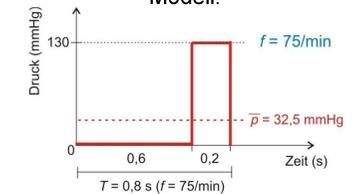
Blutströmung

Regulation der Volumenstromstärke laut Hagen-Poiseuille-Gesetzes:

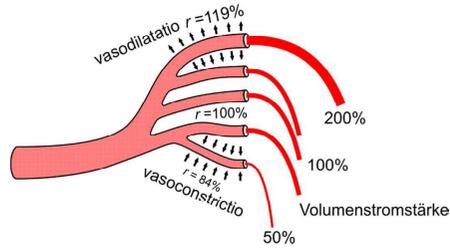
➤ Druck



Modell:

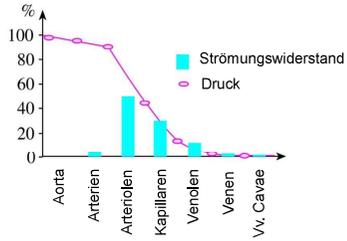


➤ Radius (r^4 !)

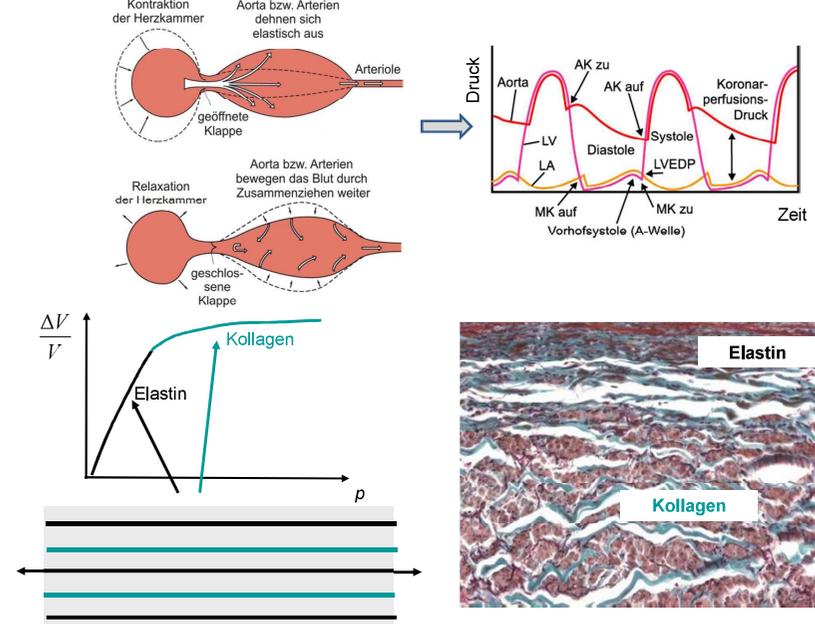


➔ Elastizität!

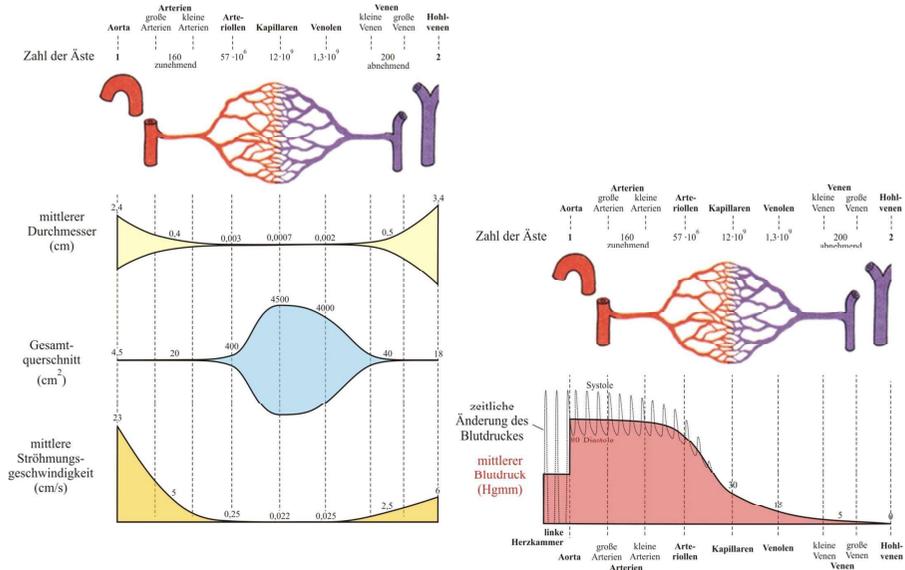
▪ Druck und Strömungswiderstand im Kreislauf:



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



Zusammenfassend:

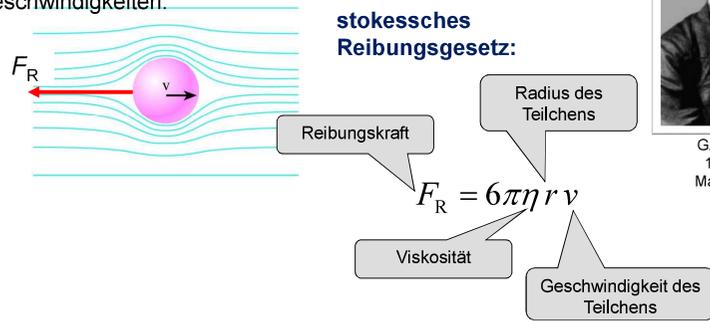


Analogie

	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	$-\frac{\Delta p}{\Delta l}$	$J_V = -\frac{R^2}{8\eta} \frac{\Delta p}{\Delta l}$

4. Bewegung von Teilchen in realen Flüssigkeiten

Bei kleineren
Geschwindigkeiten:



G. G. Stokes
1819-1903
Mathematiker
Physiker

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

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