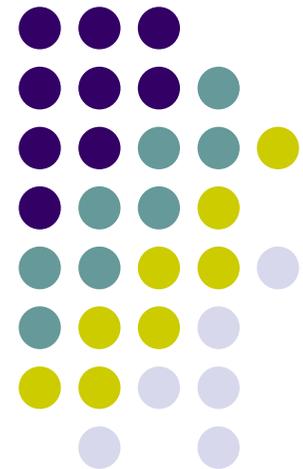


Biophysik für Pharmazeuten II.

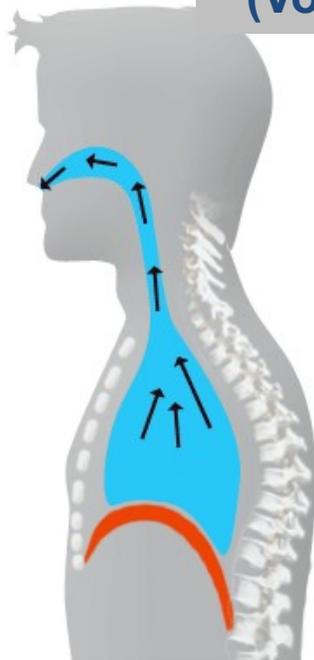
29. 03. 2022.

Transportprozesse 2.
Strömungen,
Wärmeleitung

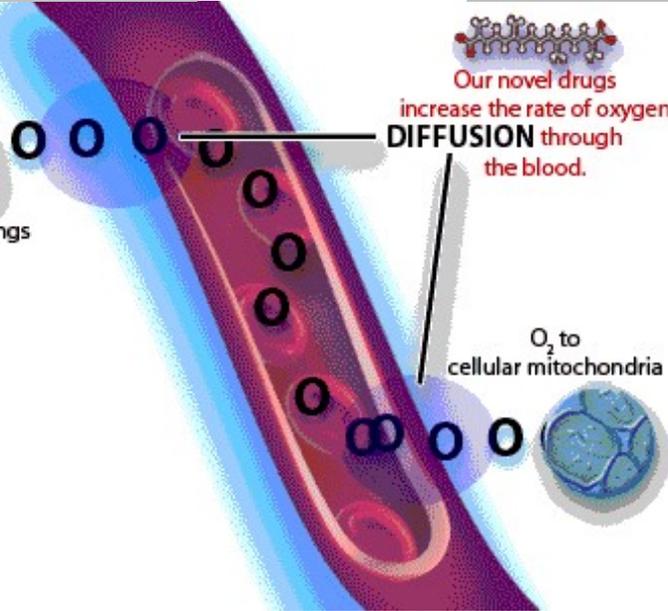


Transportprozesse

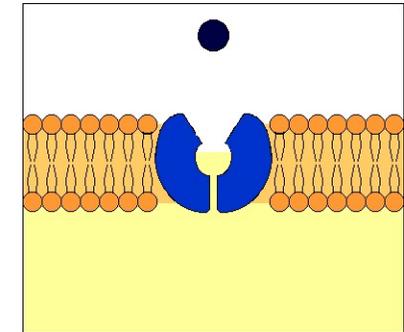
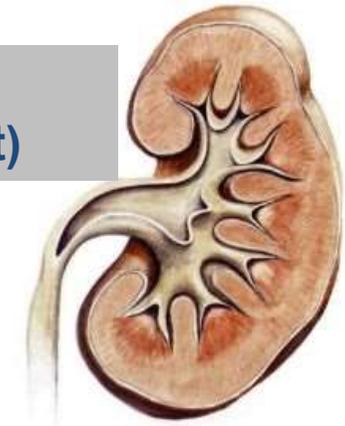
II. Strömung
(Volumentransport)



entspannt



III. Diffusion
(Stofftransport)



I. Elektrischer Strom
(el. Ladungstransport)

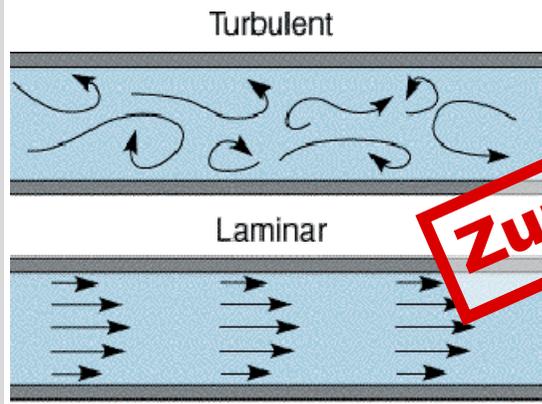


IV. Wärmeleitung
(Energietransport)



V. Verallgemeinerung

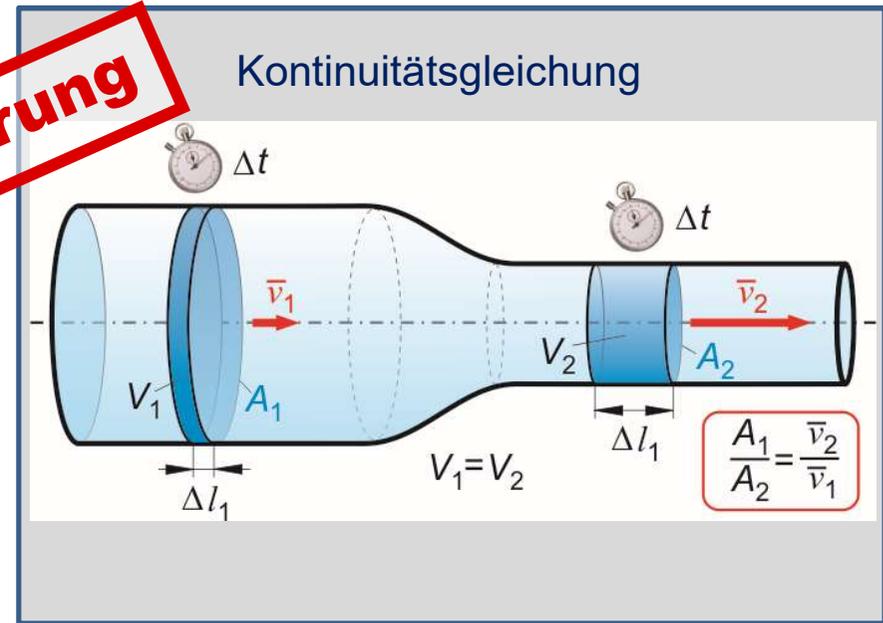
VI. Energetische Aspekte



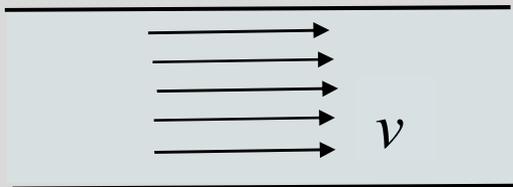
Zur Erinnerung

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

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



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?

4. Strömung von reellen Flüssigkeiten

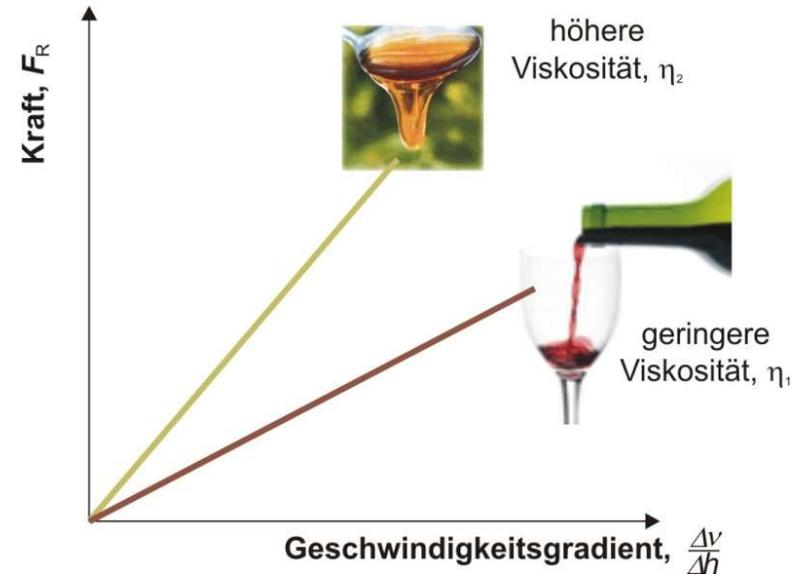
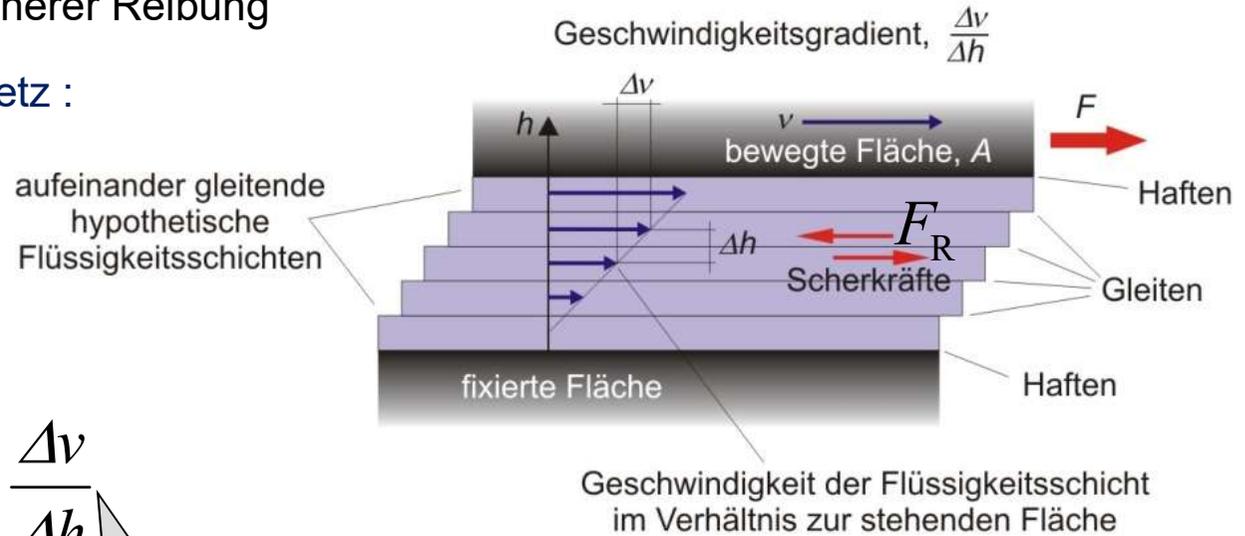
- Reelle Flüssigkeit: mit innerer Reibung
- Newtonsches Reibungsgesetz :

Bei gleichmäßiger Bewegung:

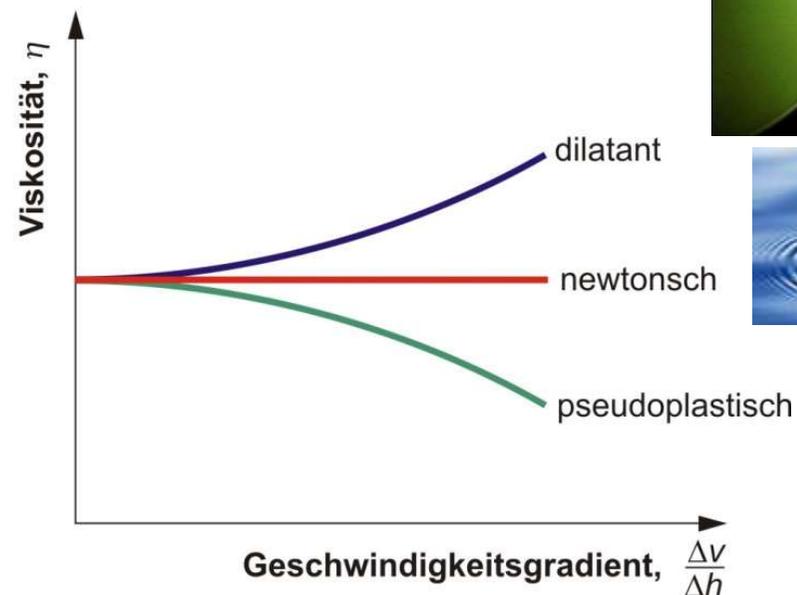
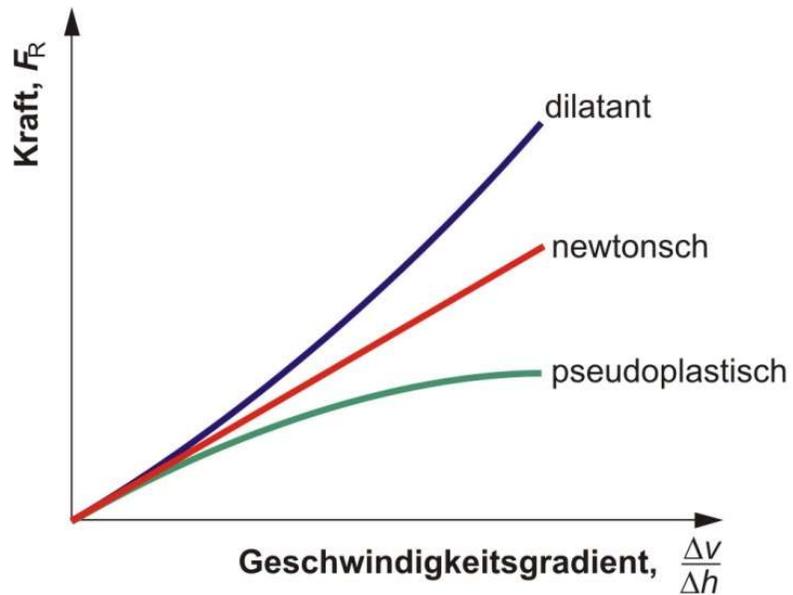
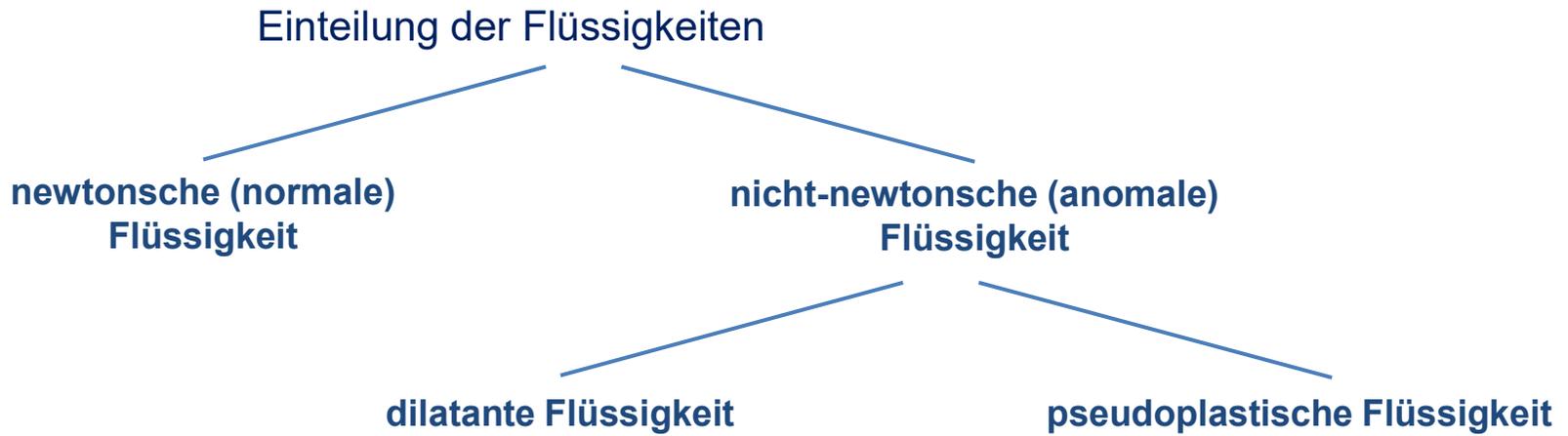
$$F = F_R = \eta \cdot A \cdot \frac{\Delta v}{\Delta h}$$

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

Geschwindigkeitsgradient

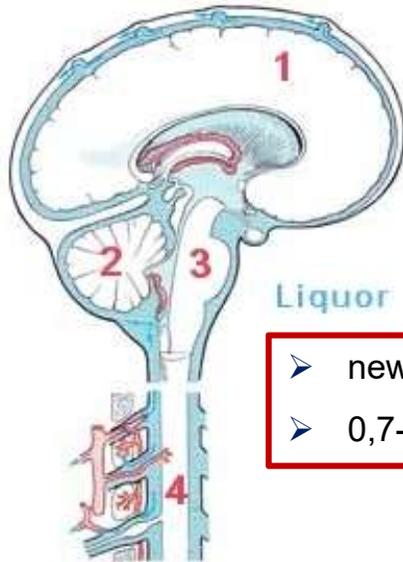


- geschwindigkeitsgradientabhängig



Viskosität der Körperflüssigkeiten

Liquor (Gehirn-Rückenmarks-Flüssigkeit, Cerebrospinalflüssigkeit)



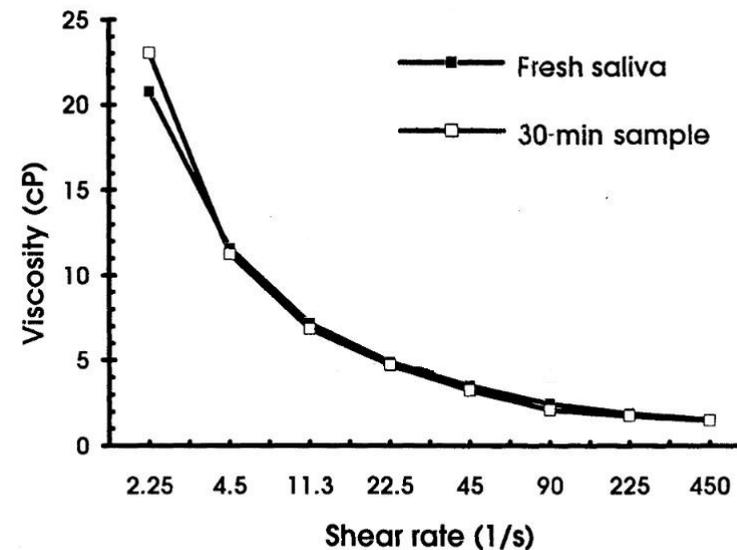
- newtonsche Flüssigkeit
- 0,7-1 mPas (37°C)

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

Speichel

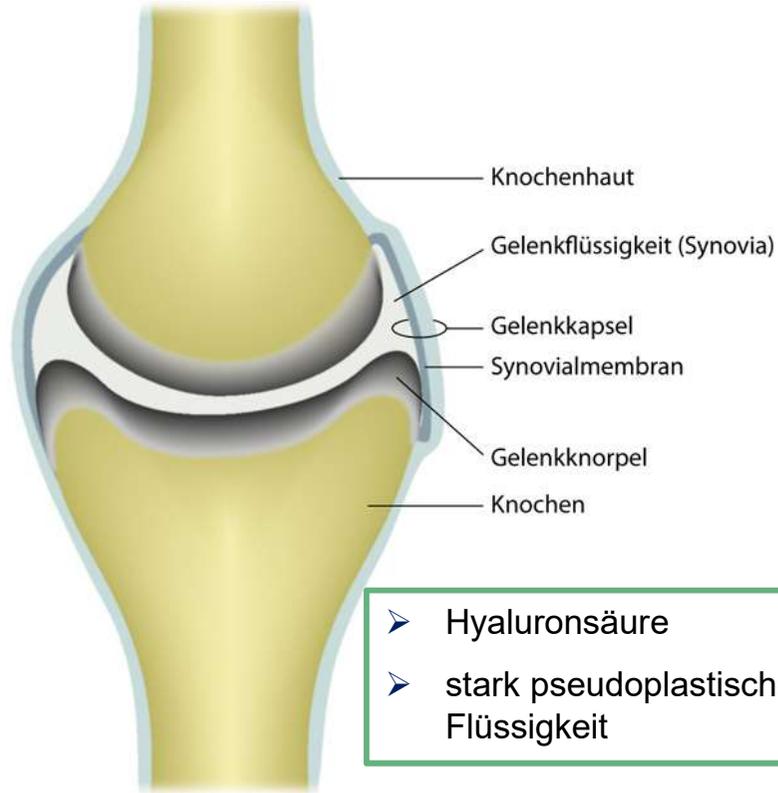


- Mucin
- pseudoplastische Flüssigkeit



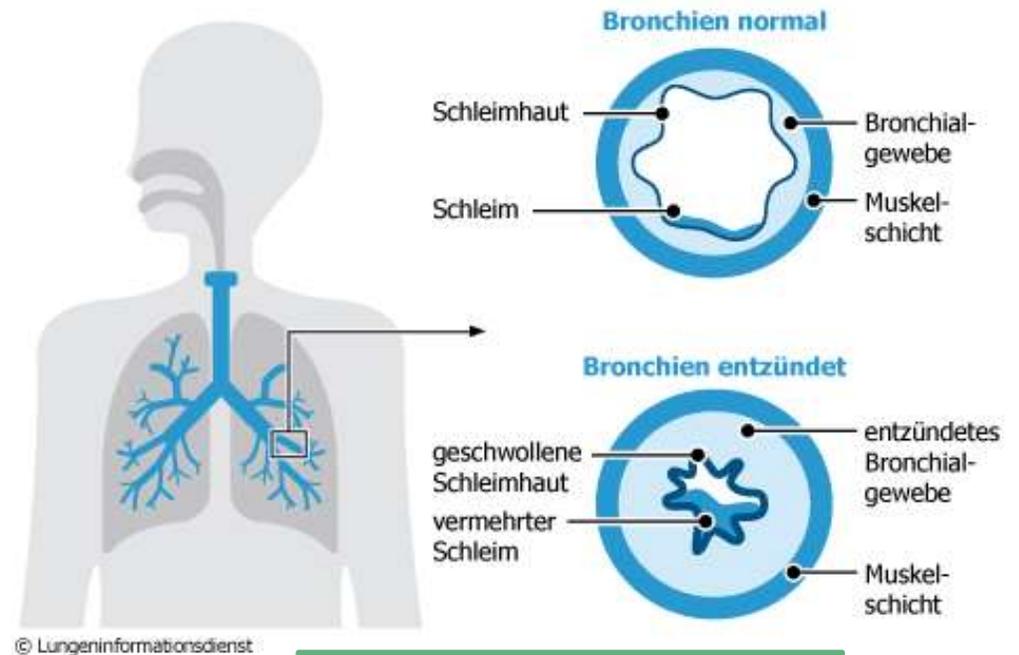
Nach Panu J. F. Rantonen & Jukka H. Meurman (1998) Viscosity of whole saliva, Acta Odontologica Scandinavica, 56:4, 210-214

Gelenkflüssigkeit



- Hyaluronsäure
- stark pseudoplastische Flüssigkeit

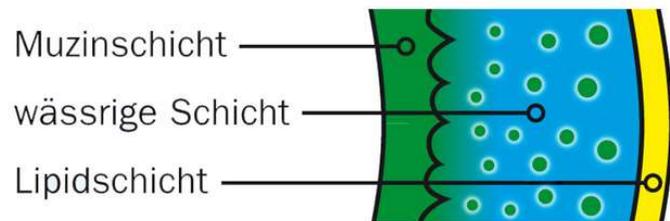
Bronchialschleim



- pseudoplastische Flüssigkeit

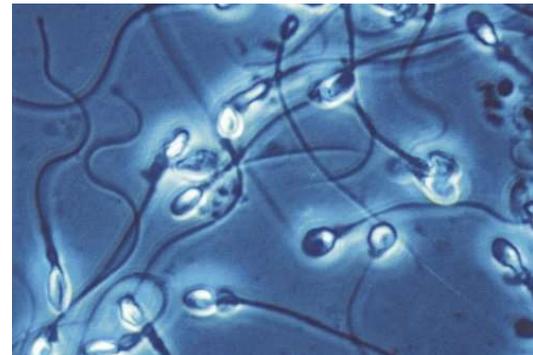
Träne

Aufbau des Tränenfilms



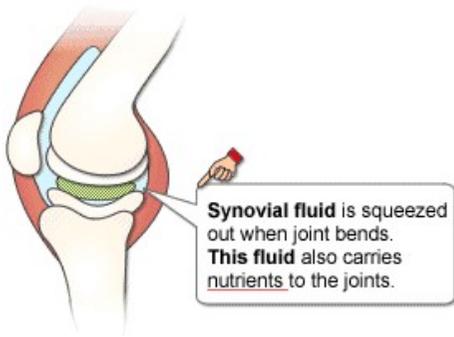
- pseudoplastische Flüssigkeit
- 1-10 mPas

Sperma

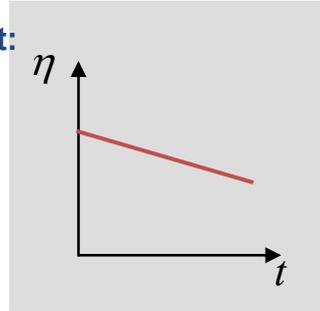


- pseudoplastische Flüssigkeit

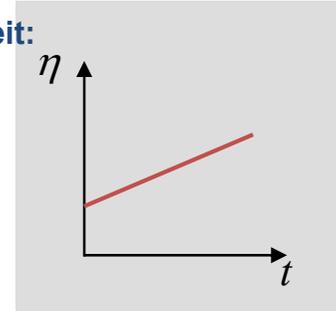
➤ zeitabhängig



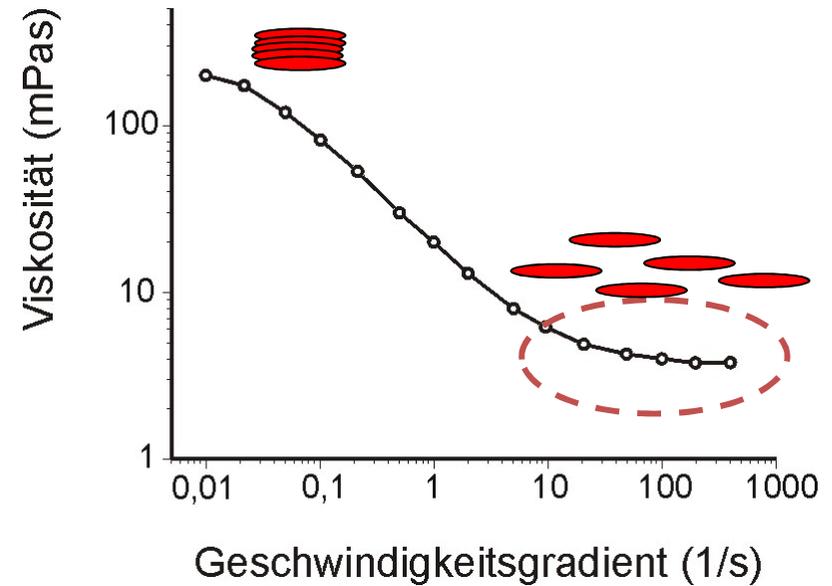
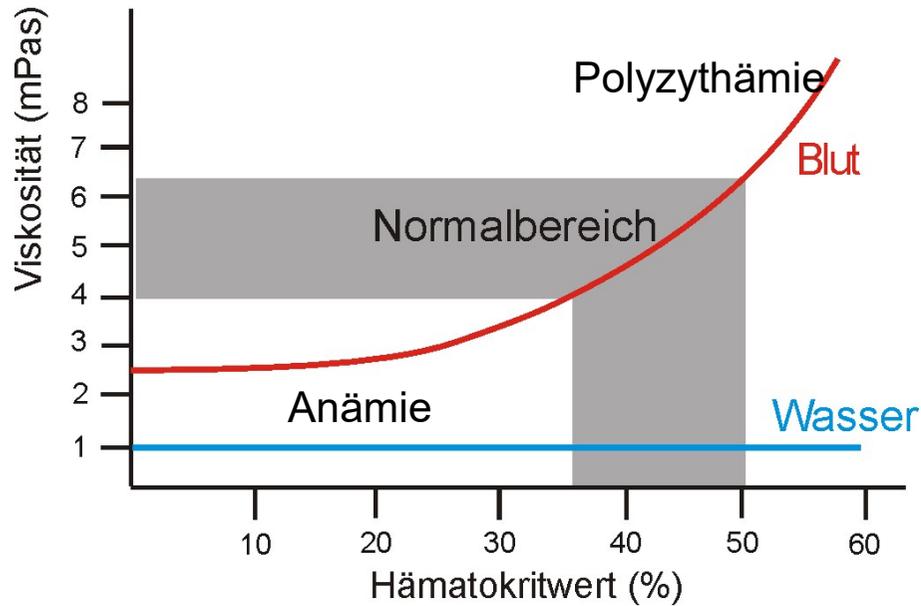
Thixotrope Flüssigkeit:



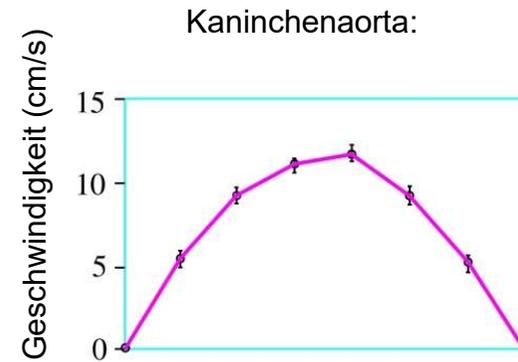
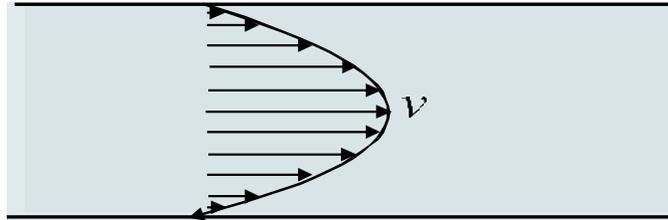
Rheopexe Flüssigkeit:



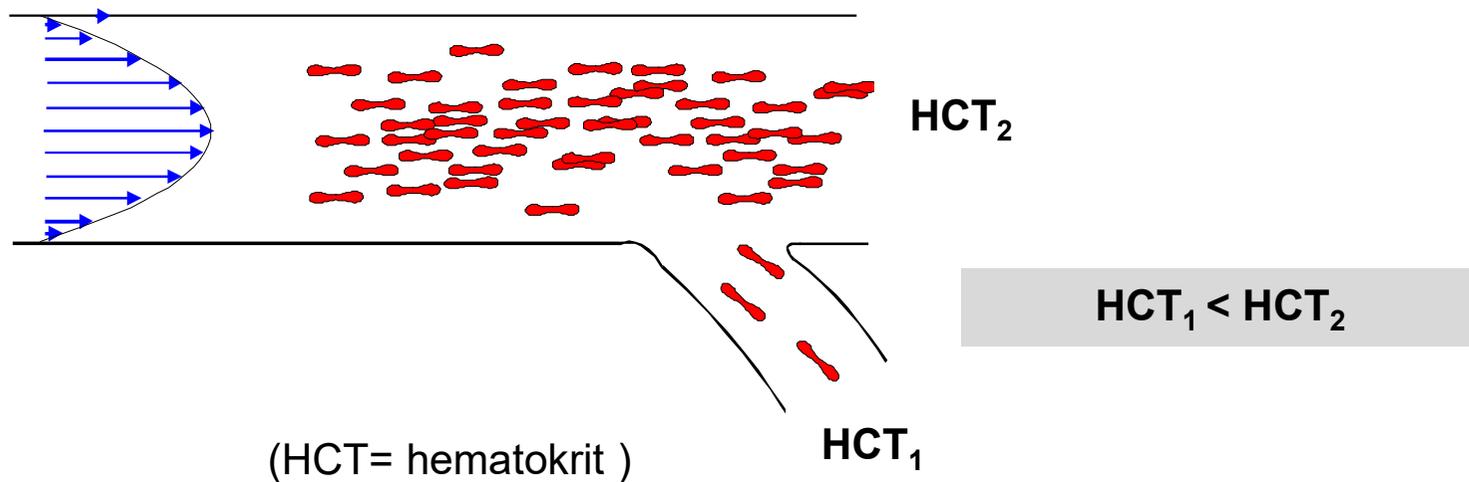
Viskosität des Blutes



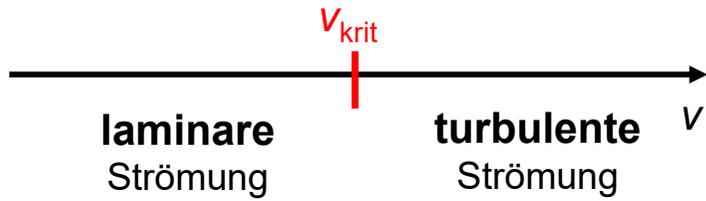
- Geschwindigkeitsprofil:



Eine physiologische Folgerung: Plasma-Skimming
(Bernouillische Gleichung)

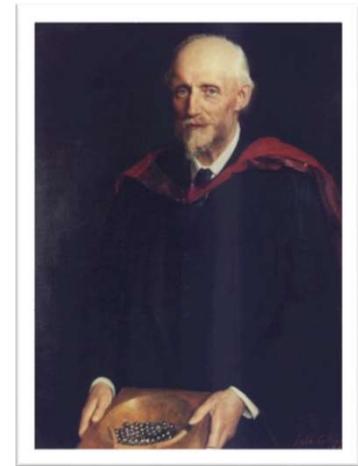
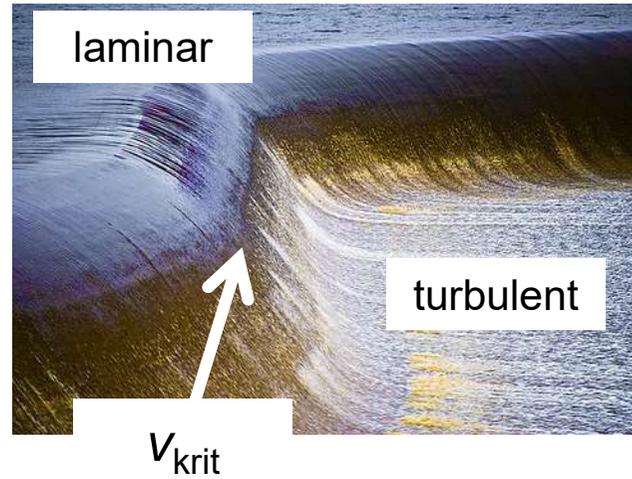


- Kritische Geschwindigkeit (v_{krit}):



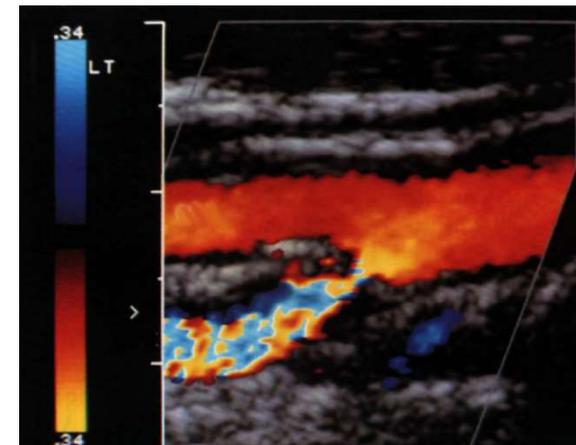
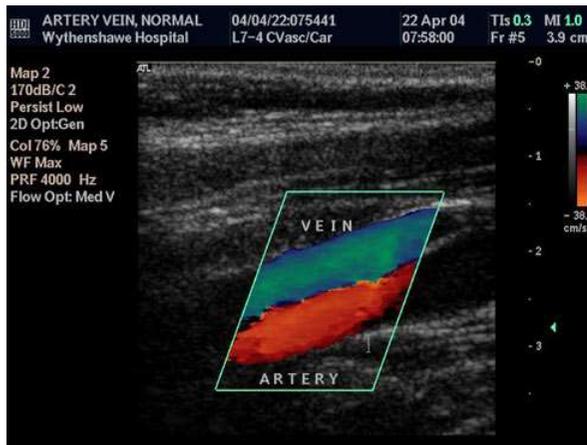
$$v_{krit} = Re \cdot \frac{\eta}{\rho \cdot r}$$

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

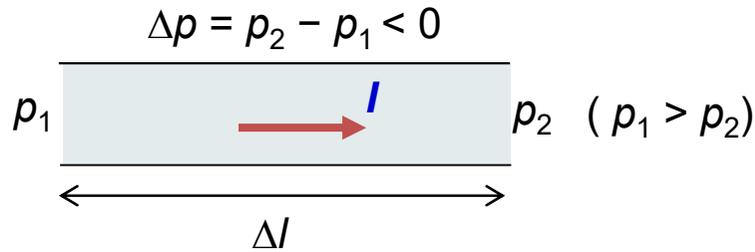


Osborne Reynolds
1842-1912
Wasseringenieur

Ist die Blutströmung laminar oder turbulent?



▪ **Transportgesetz (Hagen-Poiseuille-Gesetz):**



G. H. L. Hagen
1797-1884
Wasseringenieur



J. L. M. Poiseuille
1799-1869
Physiologe

Bedingungen:

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

Volumen-
stromstärke

Radius des
Rohres

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

Viskosität

Druckgradient

Volumen-
stromdichte

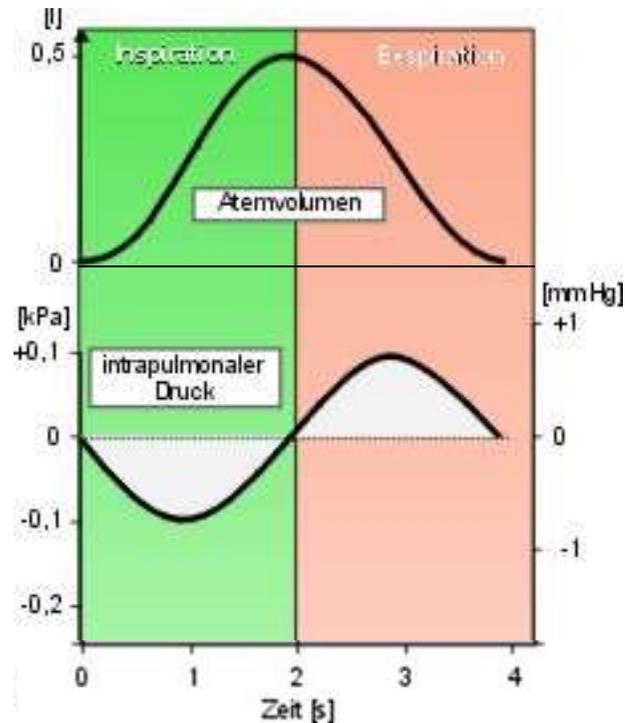
Alternativform:

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

„Strömungs-
leitfähigkeit“

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:

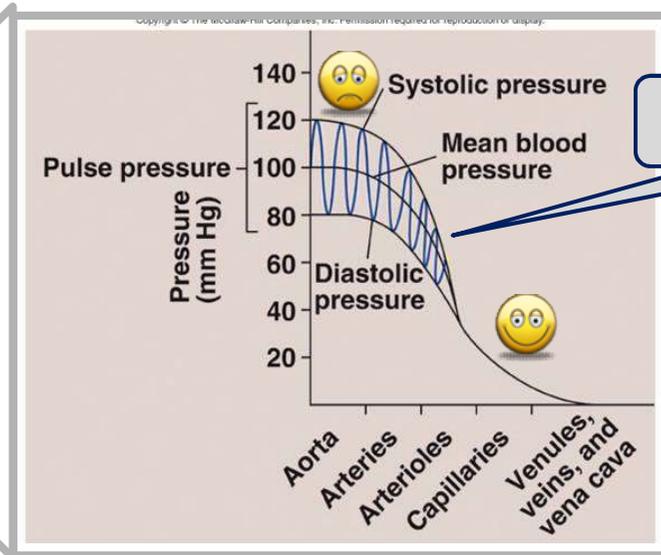
- Druck (Δp)
 - Intrapulmonaler **Druck** (Δp) kann in einem Atemzyklus stark geändert werden:
0,1 kPa – 0,5 kPa
 - Der Durchschnittswert des intrapulmonalen Druckes ($\overline{\Delta p}$) für die Einatmung kann durch die **Atemfrequenz** geändert werden:
12 1/min – 40 1/min

- ~~Radius (R^4)~~

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

Gültigkeitsbedingungen?

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

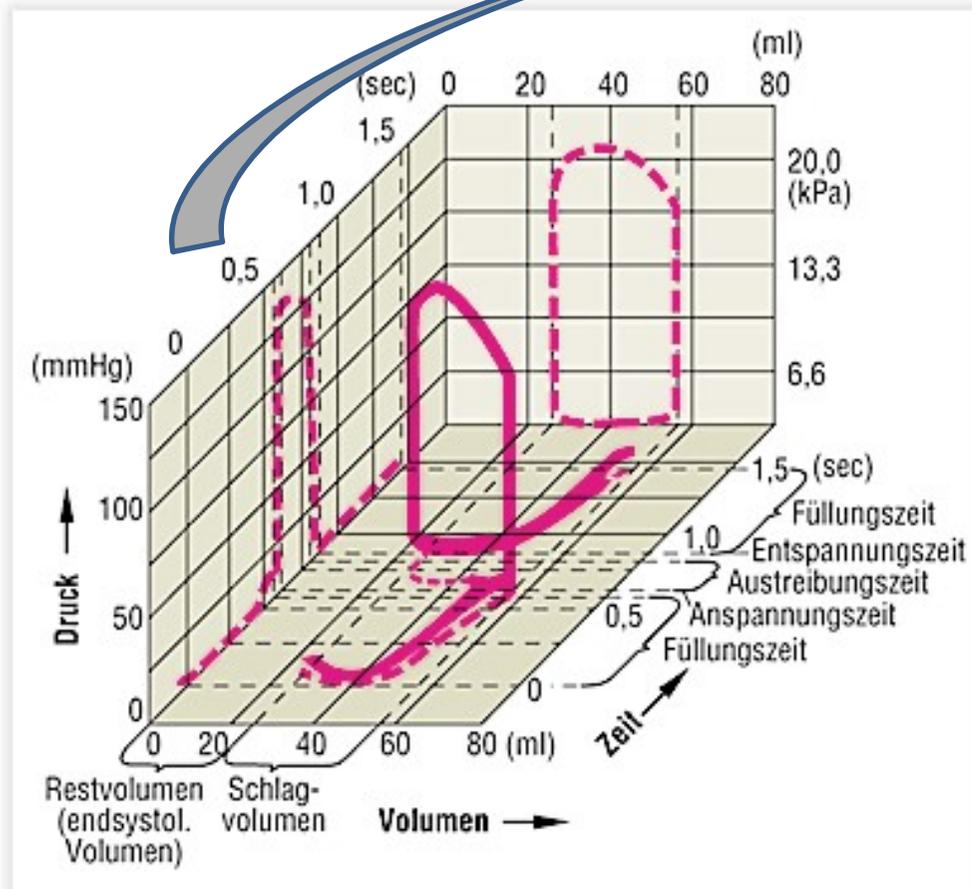


Folgerung: H-P nur qualitativ anwendbar!

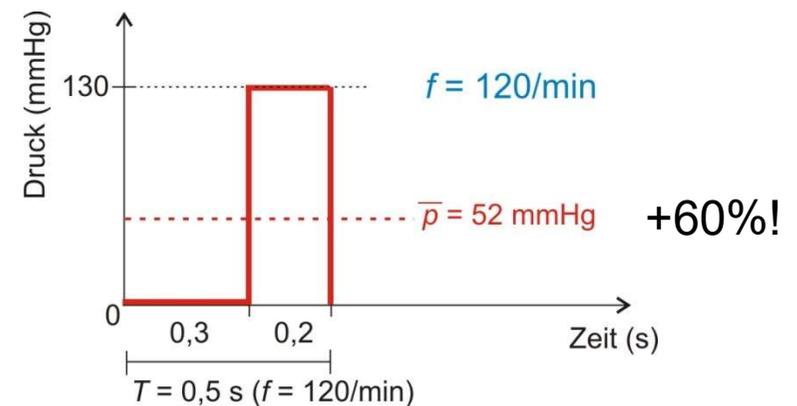
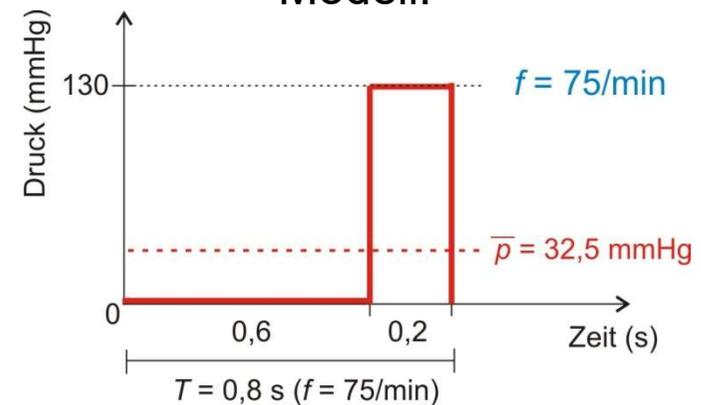
Blutströmung

- Regulation der Volumenstromstärke laut Hagen-Poiseuille-Gesetzes:

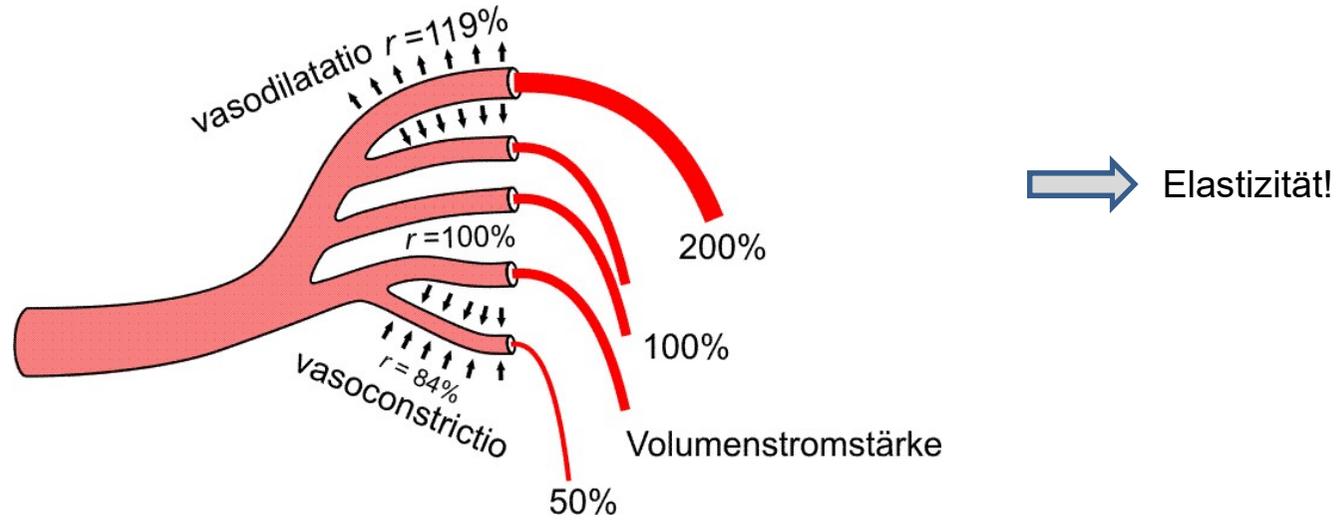
➤ Druck



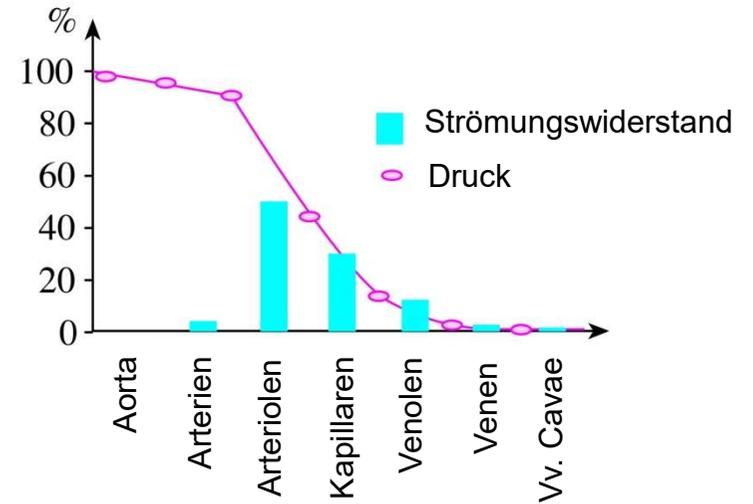
Modell:



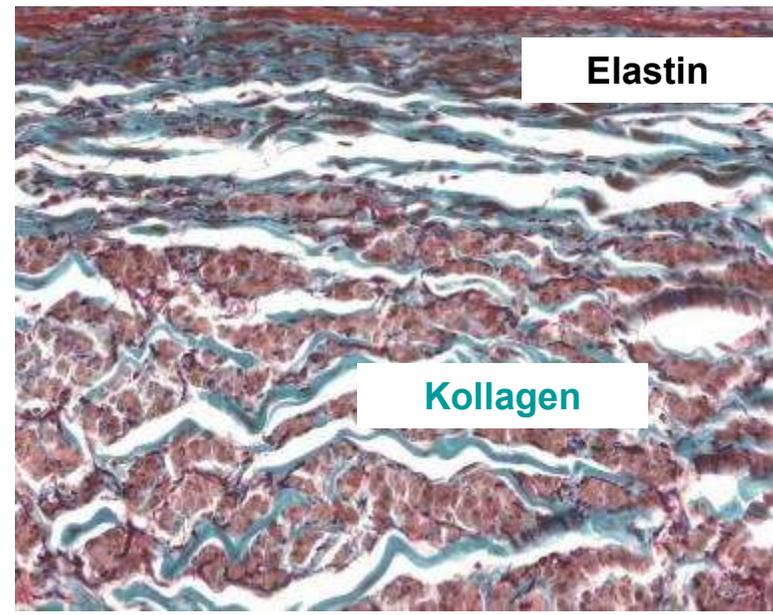
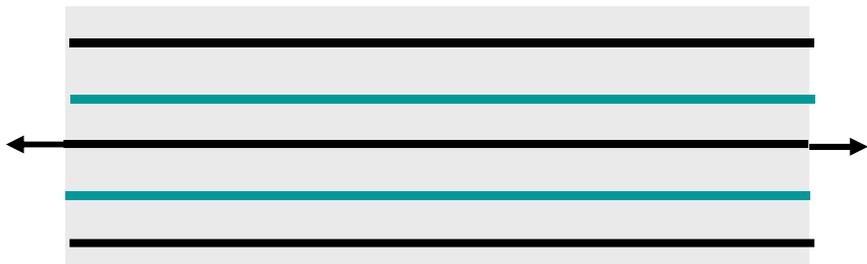
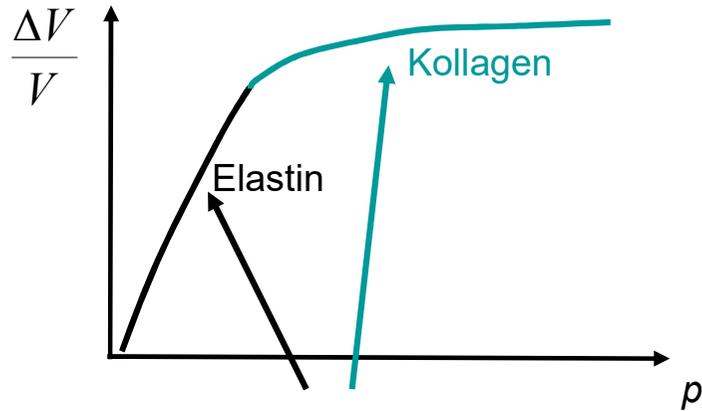
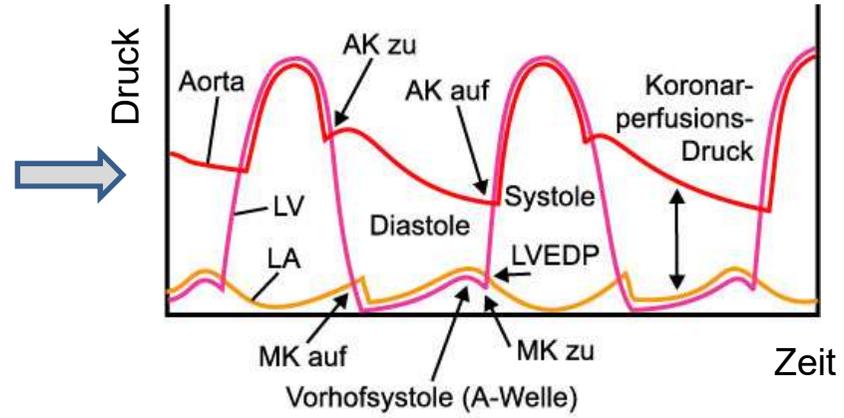
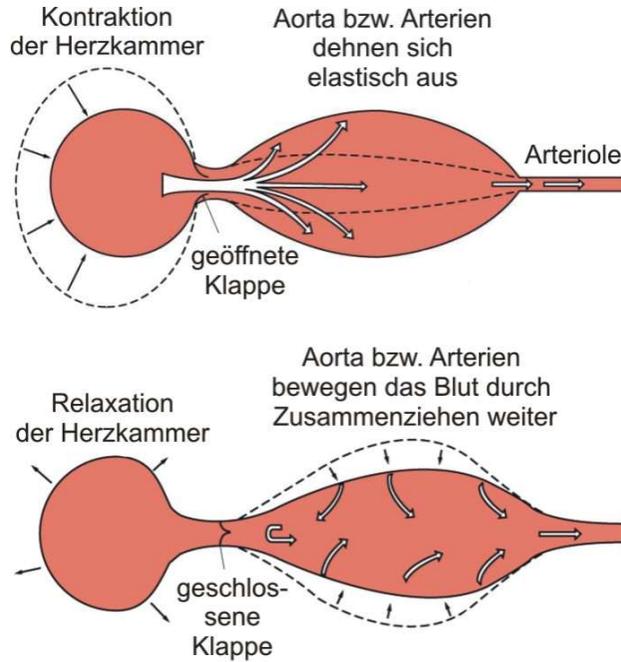
➤ Radius (r^4 !)



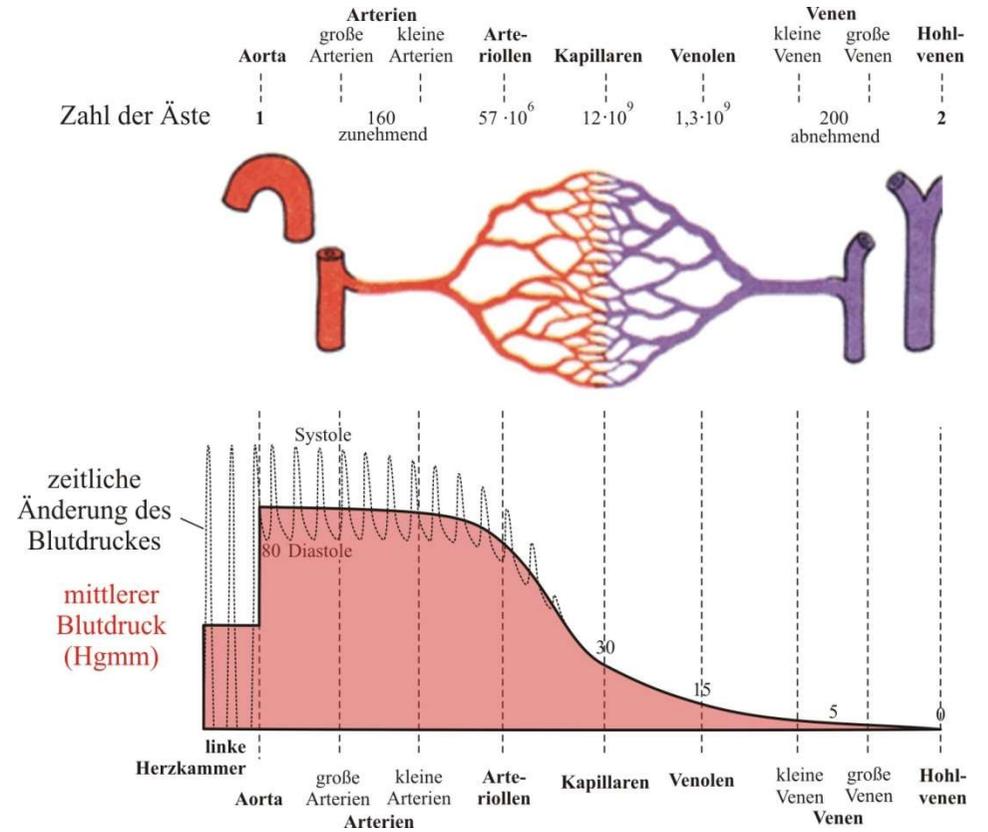
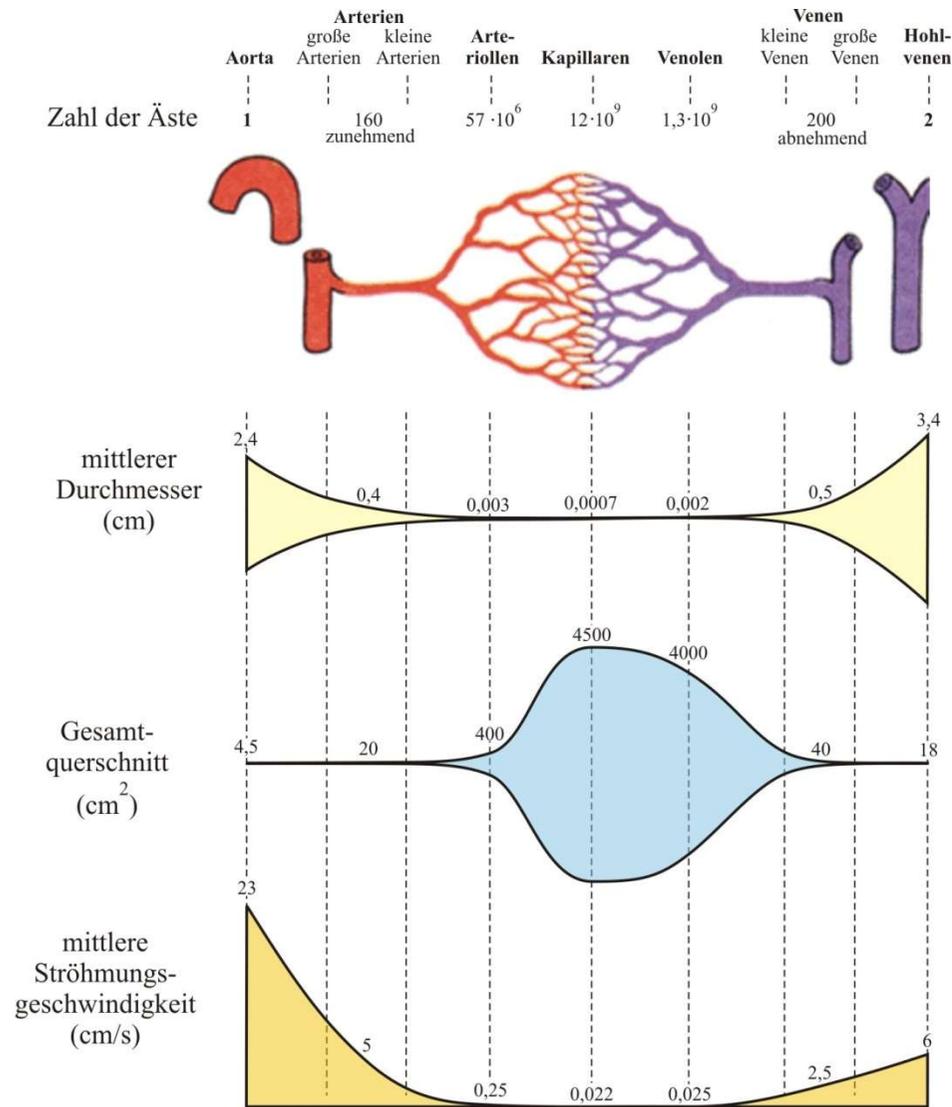
■ Druck und Strömungswiderstand im Kreislauf:



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



Zusammenfassend:

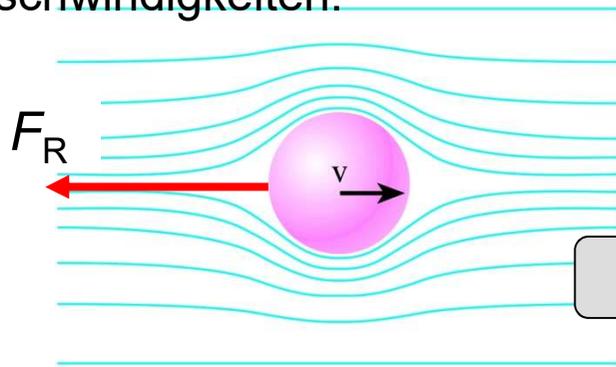


Analogie

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

4. Bewegung von Teilchen in realen Flüssigkeiten

Bei kleineren
Geschwindigkeiten:



stokessches
Reibungsgesetz:

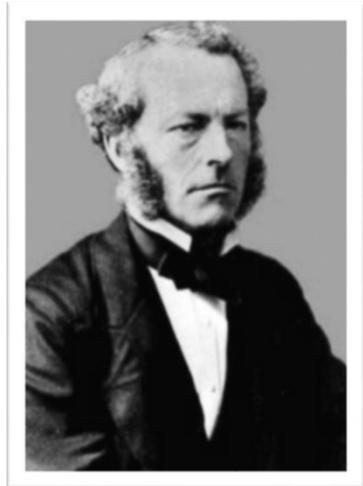
Reibungskraft

Radius des
Teilchens

$$F_R = 6\pi\eta r v$$

Viskosität

Geschwindigkeit des
Teilchens



G. G. Stokes
1819-1903
Mathematiker
Physiker

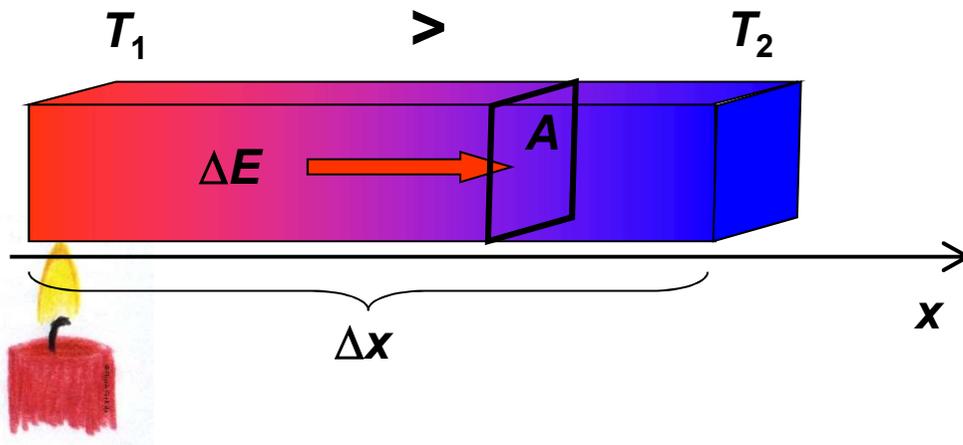
Bei gleichmäßigen Bewegung: $F_{\text{Bewegung}} = F_R$

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

IV. Wärmeleitung (Energietransport)



J. B. J. Fourier
1768-1830
Mathematiker
Physiker

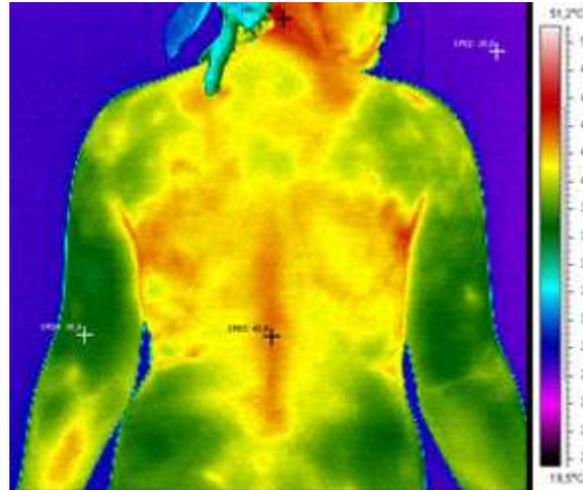


$$\frac{\Delta E}{A \cdot \Delta t} = -\lambda \frac{\Delta T}{\Delta x}$$

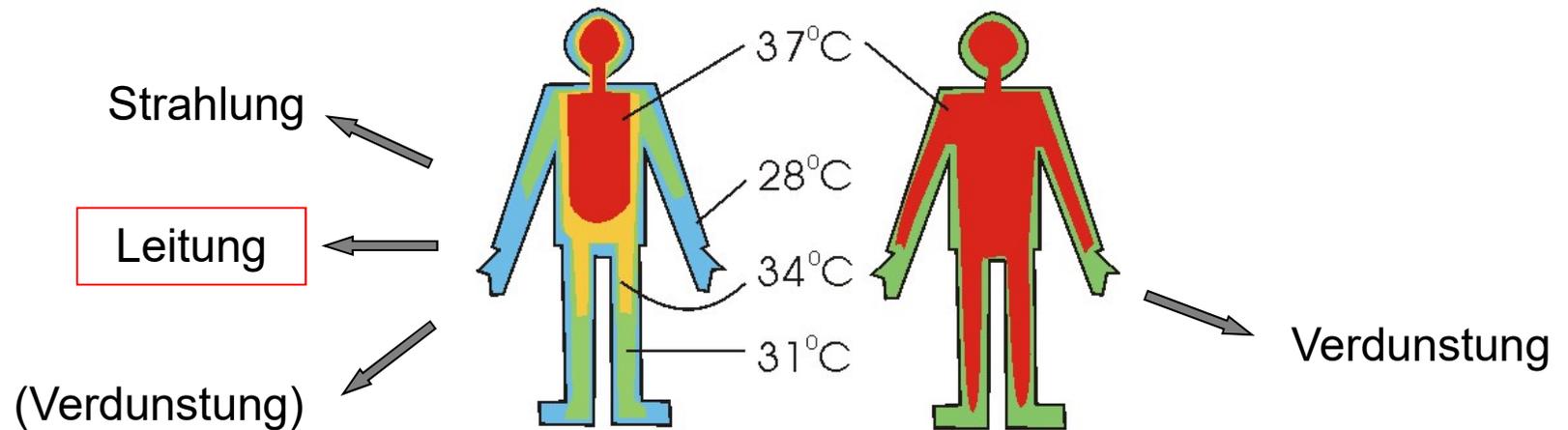
Stoff	λ (W/(m·K))
Silber	420
Glas	1
Wasser	0,6
Muskel	0,4
Fett	0,2
Luft	0,025

Anwendung: Wärmebildung und -abgabe

Aktivität	Wärmebildung (W)
In Ruhe	115
Langsames Spazieren	260
Radfahren (15 km/h)	420
Treppensteigen (2/s)	700
Laufen (15 km/h)	1150



Umgebungstemperatur
 20°C 35°C



V. Zusammenfassung

	Was strömt?	Stärke?	Warum?	Zusammenhang?
Ladungs-transport	q	$\frac{\Delta q}{A \cdot \Delta t}$	φ $-\frac{\Delta \varphi}{\Delta l}$	$\frac{\Delta q}{A \cdot \Delta t} = -\sigma \frac{\Delta \varphi}{\Delta l}$
Volumen-transport	V	$\frac{\Delta V}{A \cdot \Delta t}$	p $-\frac{\Delta p}{\Delta l}$	$\frac{\Delta V}{A \cdot \Delta t} = -\frac{r^2}{8\eta} \frac{\Delta p}{\Delta l}$
Stoff-transport				
Energie-transport	E	$\frac{\Delta E}{A \cdot \Delta t}$	T $-\frac{\Delta T}{\Delta x}$	$\frac{\Delta E}{A \cdot \Delta t} = -\lambda \frac{\Delta T}{\Delta x}$