

Transportprozesse 2.

Strömungen 2.

Wärmeleitung

Dr. László Smeller

Intitut für Biophysik und Strahlenbiologie

Semmelweis Universität



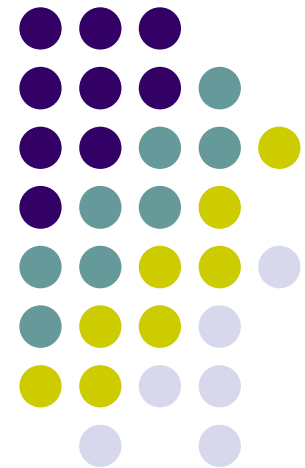
Biophysik für Pharmazeuten II.

28. 03. 2025.

Transportprozesse 2.

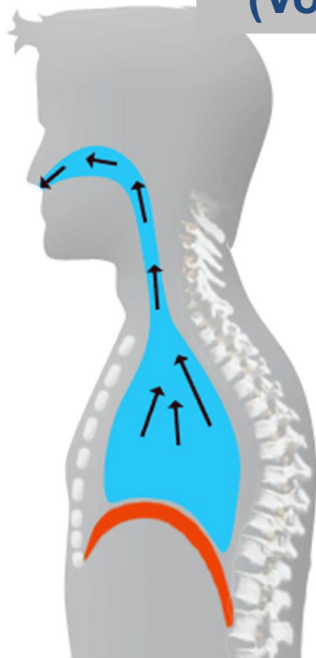
II. Strömungen 2

III. Wärmeleitung

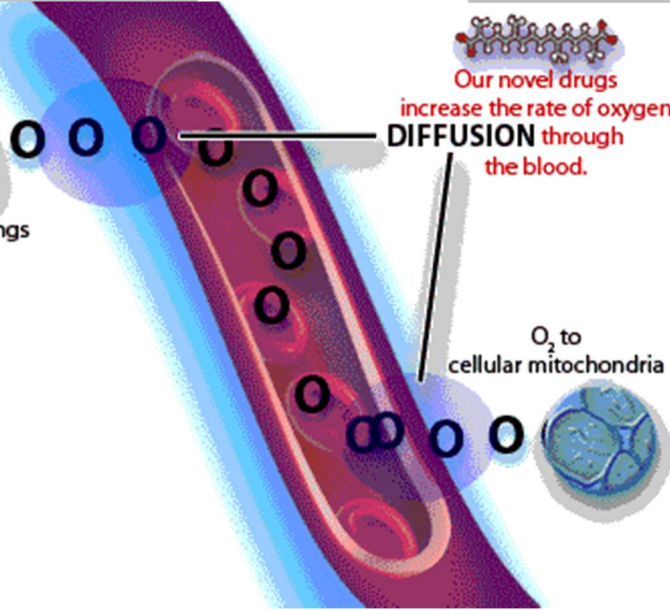


Transportprozesse

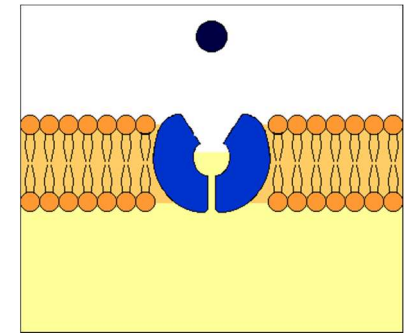
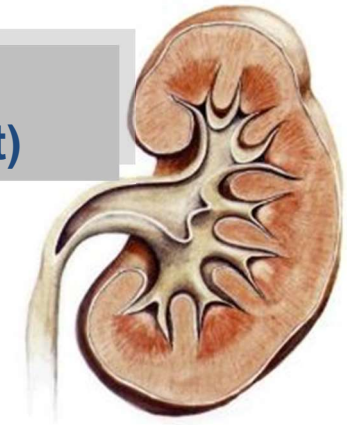
II. Strömung
(Volumentransport)



entspannt



III. Diffusion
(Stofftransport)



I. Elektrischer Strom
(el. Ladungstransport)

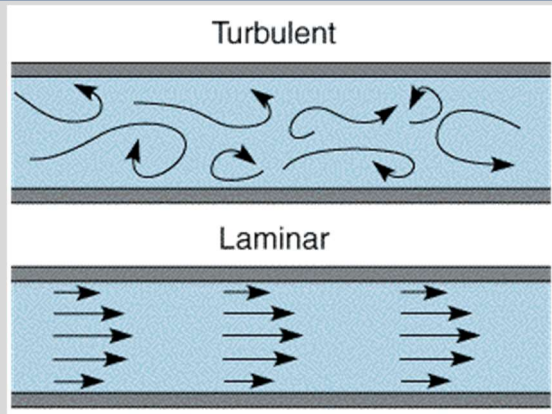


IV. Wärmeleitung
(Energietransport)



V. Verallgemeinerung

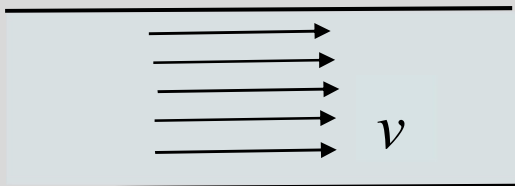
VI. Energetische Aspekte



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

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

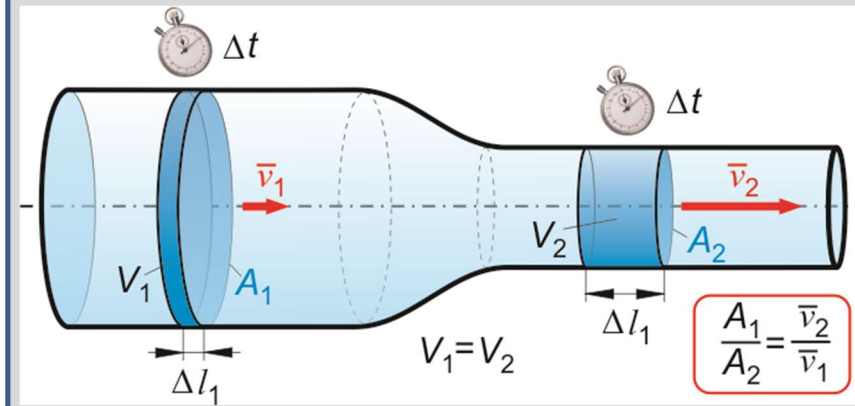
Ideale Flüssigkeit (ohne innere Reibung)



Bernoullische Gleichung

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

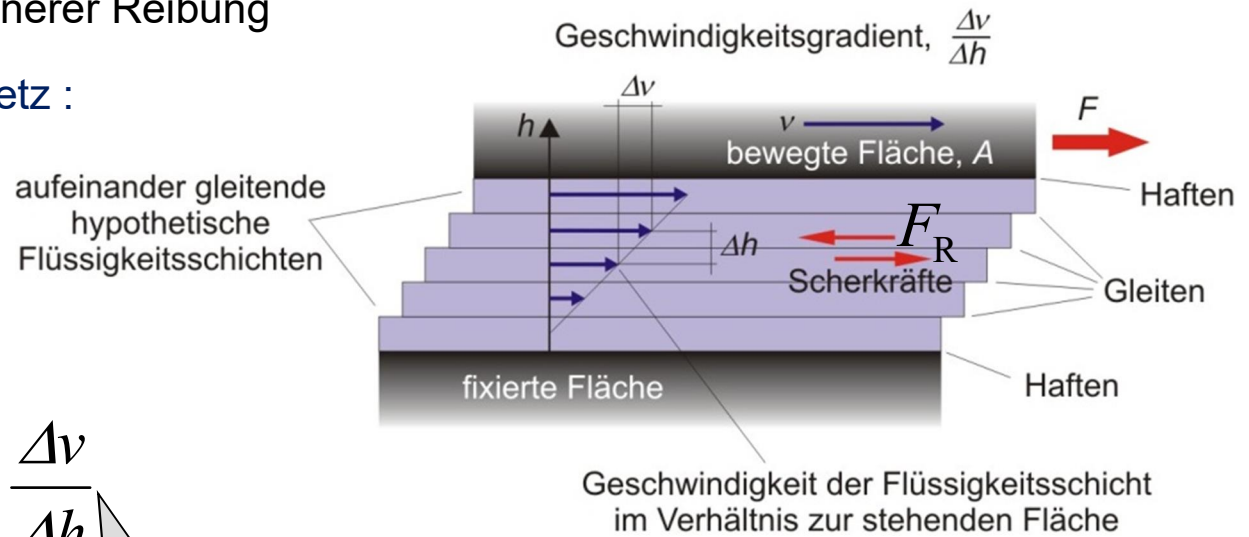
Kontinuitätsgleichung



- 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 realen Flüssigkeiten

- Reelle Flüssigkeit: mit innerer Reibung
- Newtonsches Reibungsgesetz :



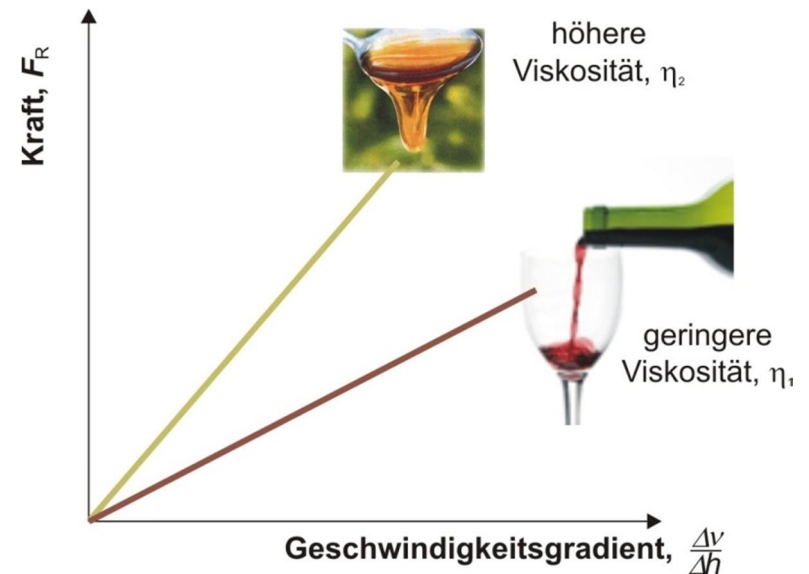
Bei gleichmäßiger Bewegung:

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

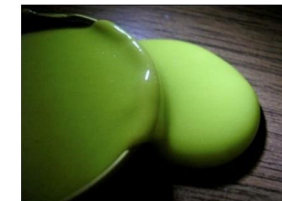
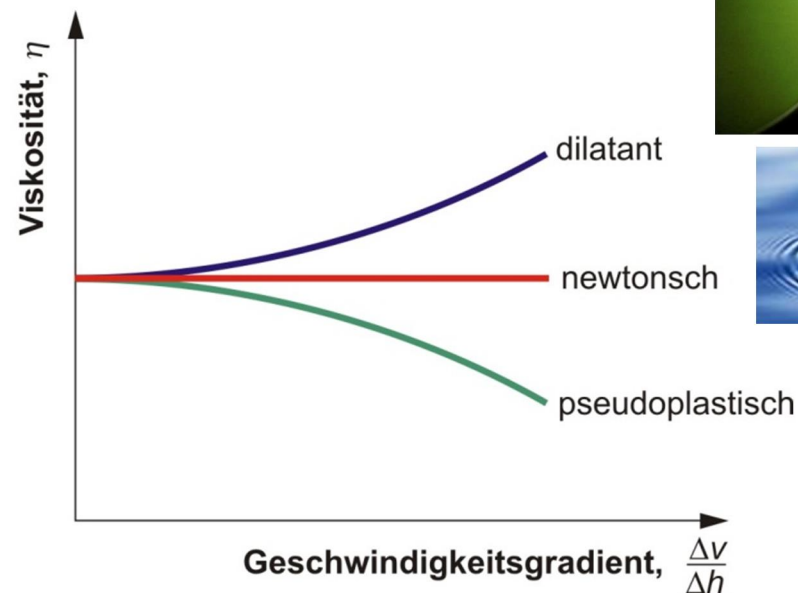
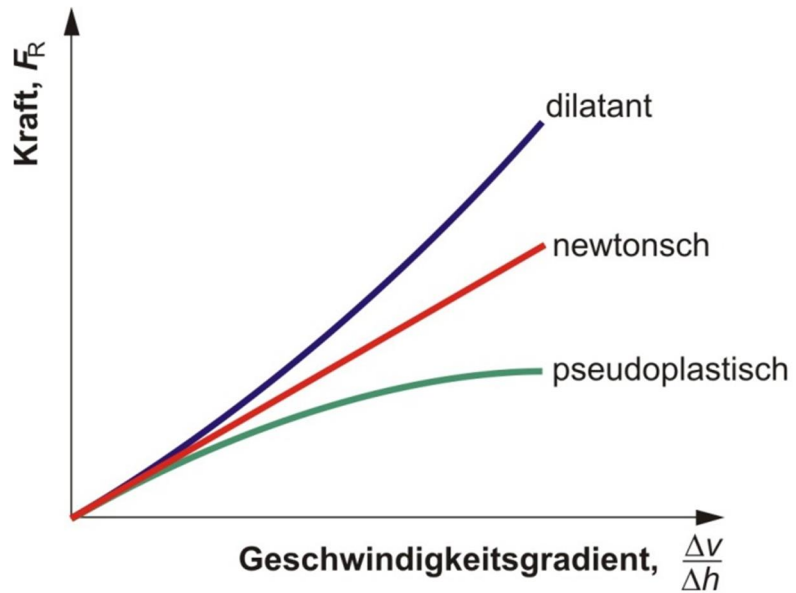
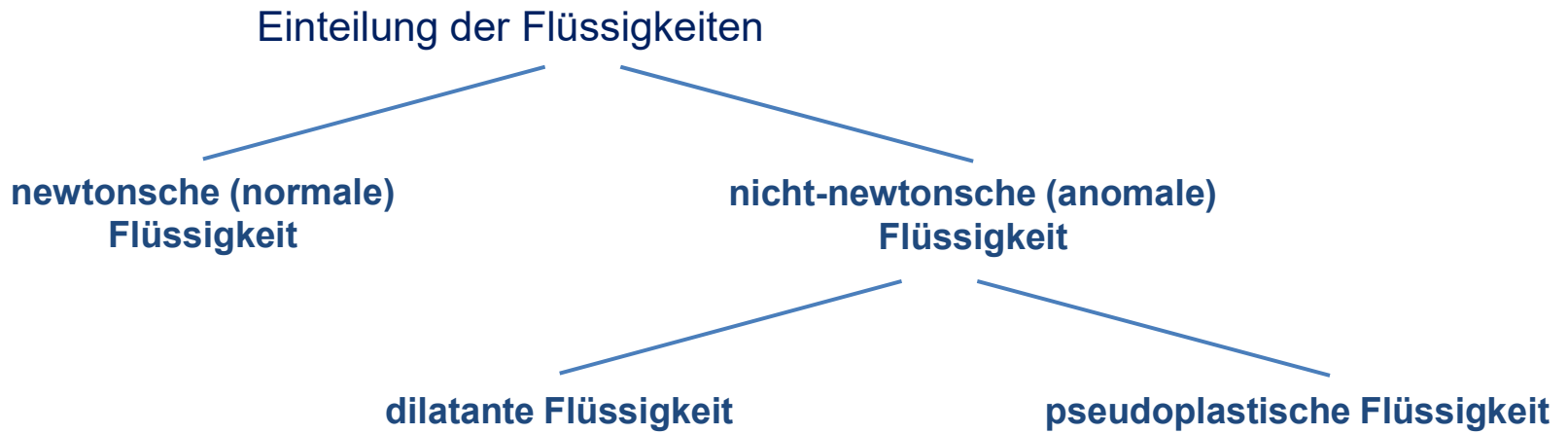
Viskosität (innerer Reibungskoeffizient)

$$[\eta] = \text{Pa} \cdot \text{s}$$

Geschwindigkeitsgradient

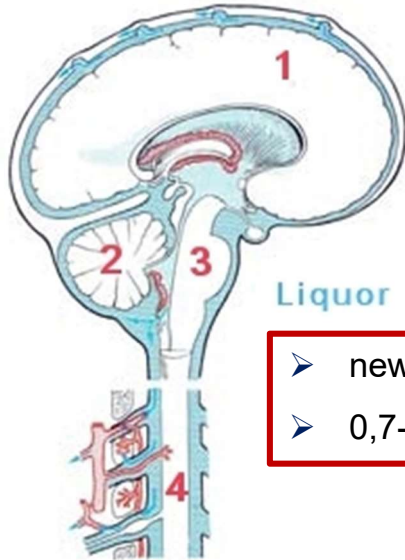


- geschwindigkeitsgradientabhängig



Viskosität der Körperflüssigkeiten

Liquor (Gehirn-Rückenmarks-Flüssigkeit, Cerebrospinalflüssigkeit)



Liquor

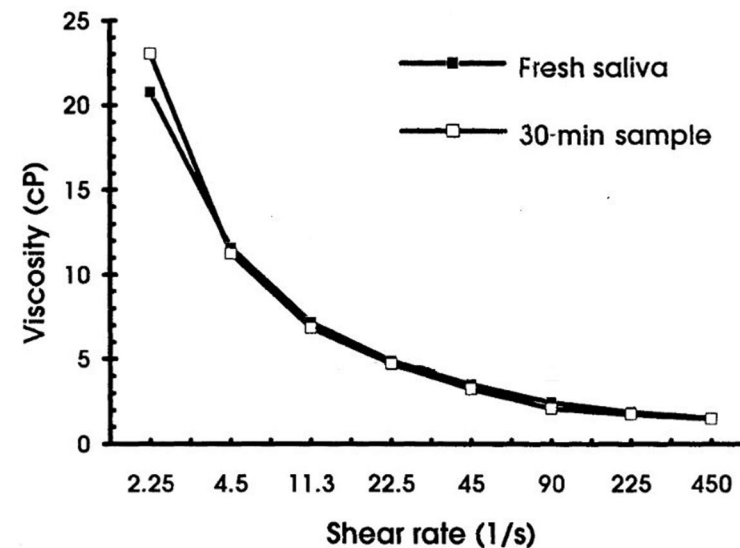
- newtonsche Flüssigkeit
- 0,7-1 mPas (37°C)

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

Speichel

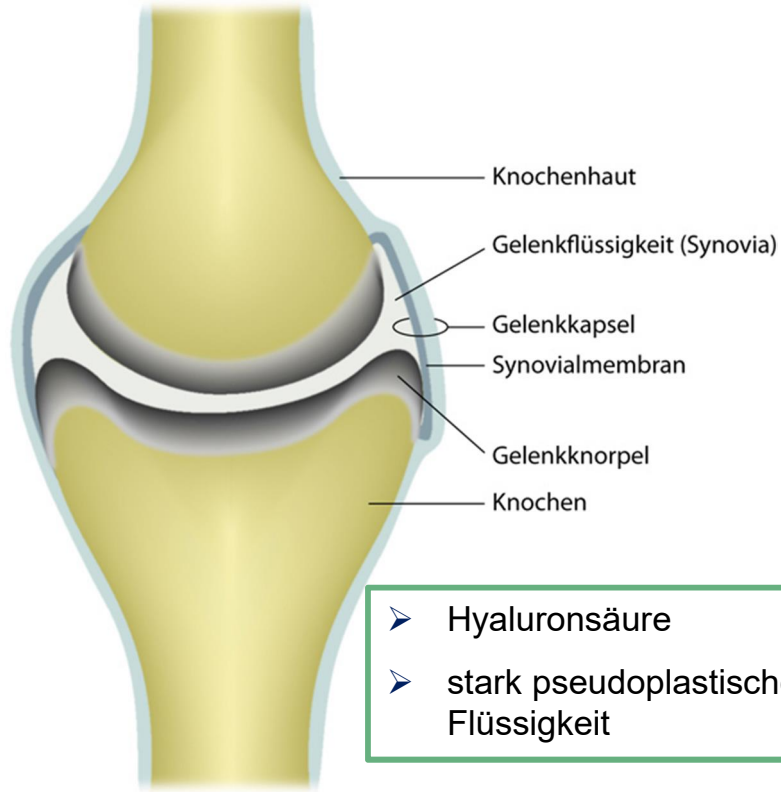


- Mucin
- pseudoplastische Flüssigkeit



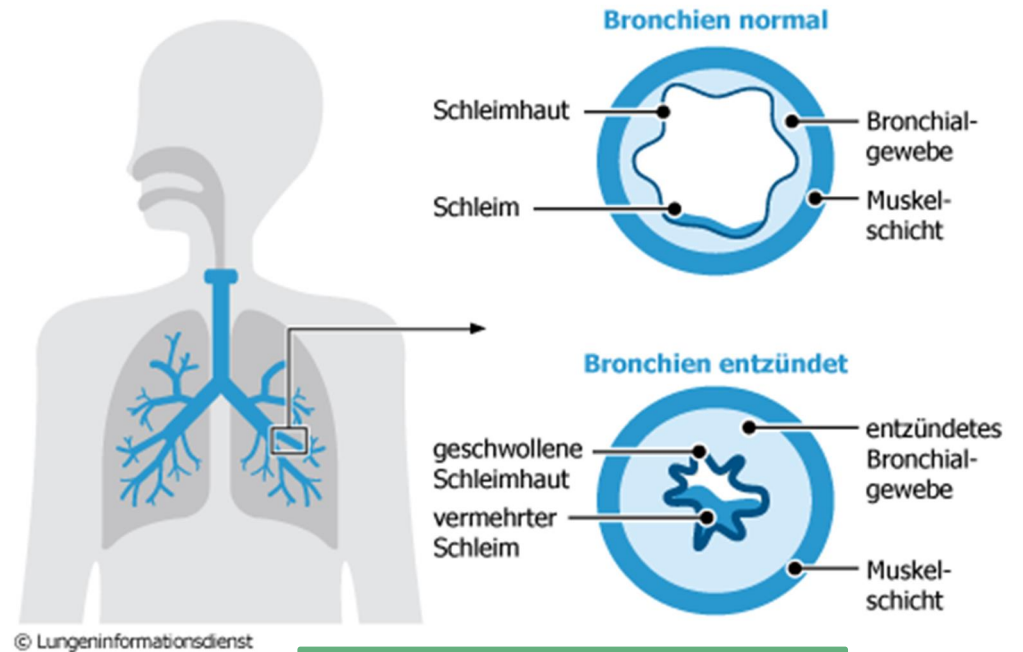
Nach Panu J. F. Rantonen & Jukka H. Meurman (1998) Viscosity of whole saliva, Acta Odontologica Scandinavica, 56:4, 210-214

Gelenkflüssigkeit



- Hyaluronsäure
- stark pseudoplastische Flüssigkeit

Bronchialschleim



- pseudoplastische Flüssigkeit

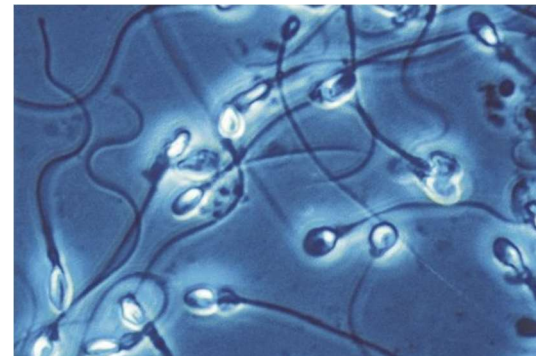
Träne

Aufbau des Tränenfilms



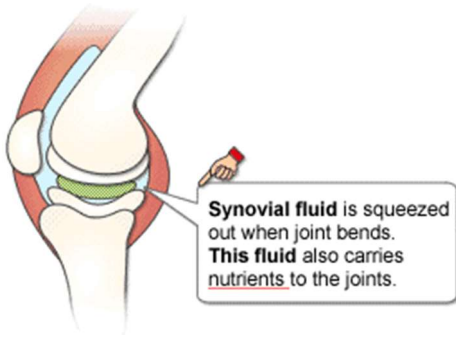
- pseudoplastische Flüssigkeit
- 1-10 mPas

Sperma

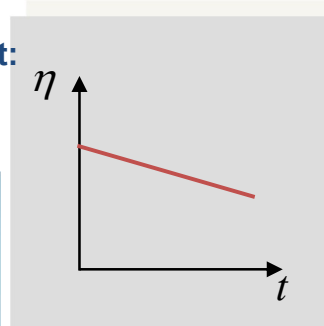


- pseudoplastische Flüssigkeit

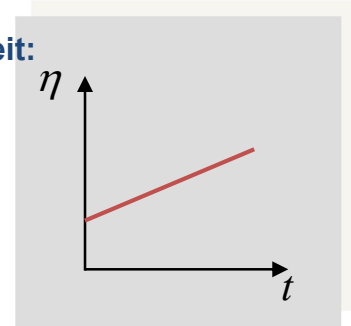
➤ zeitabhängig



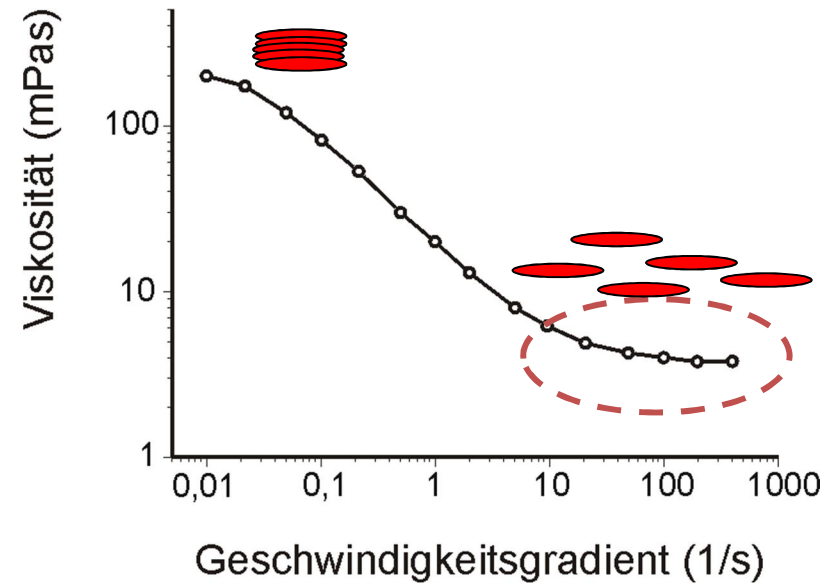
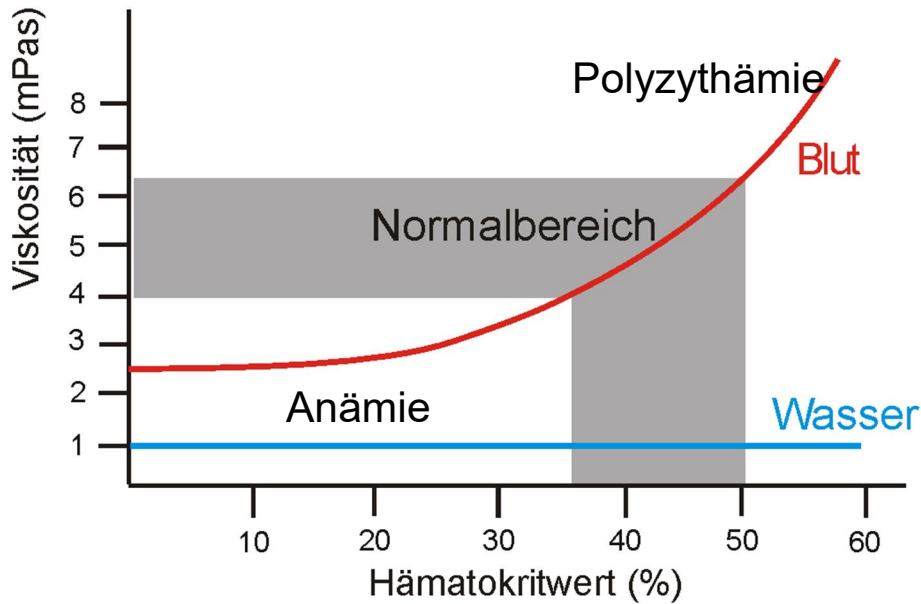
Thixotrope Flüssigkeit:



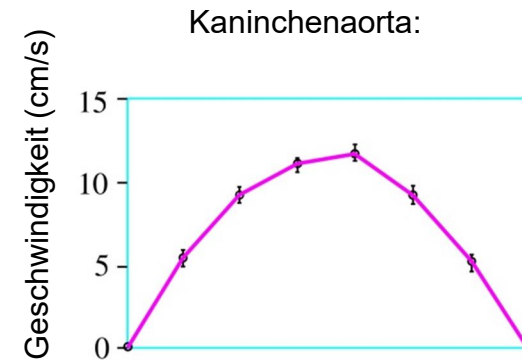
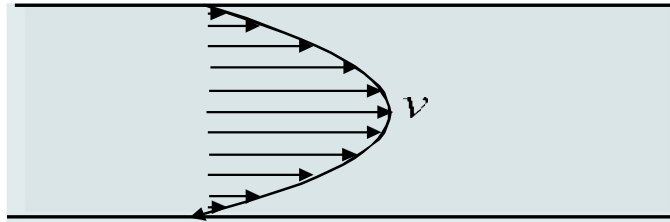
Rheopexe Flüssigkeit:



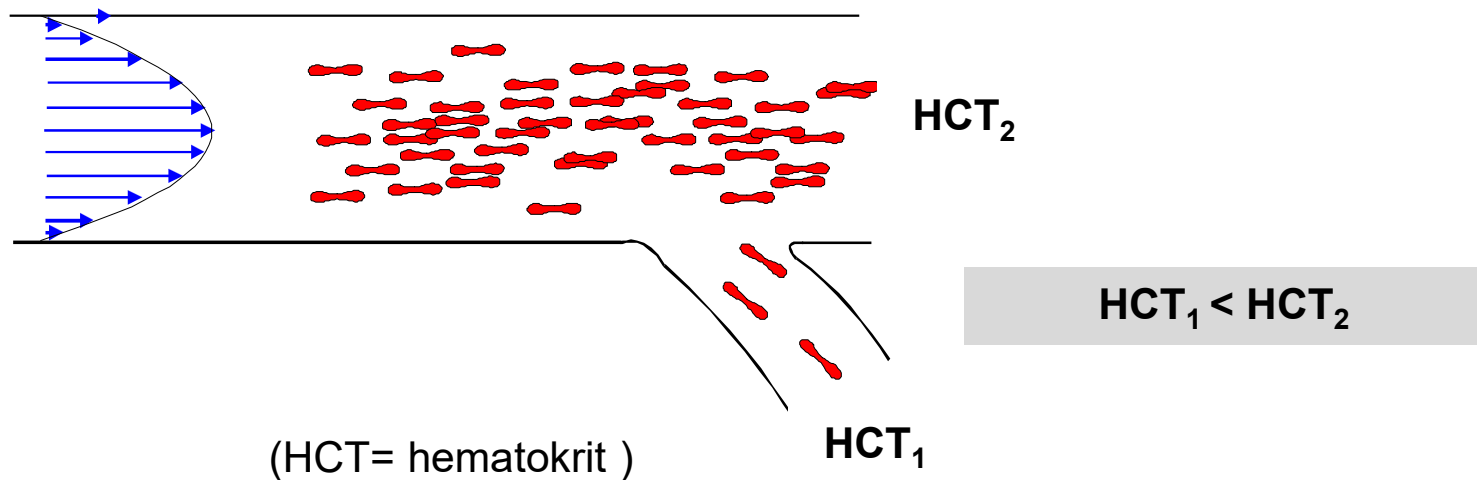
Viskosität des Blutes



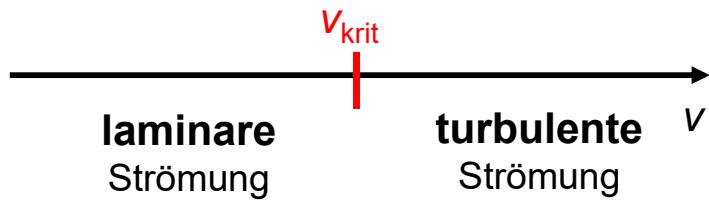
- Geschwindigkeitsprofil:



Eine physiologische Folgerung: Plasma-Skimming
(Bernouillische Gleichung)

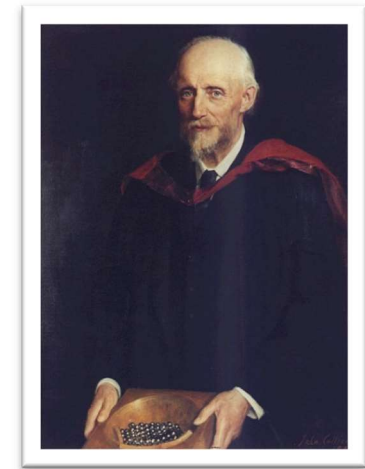
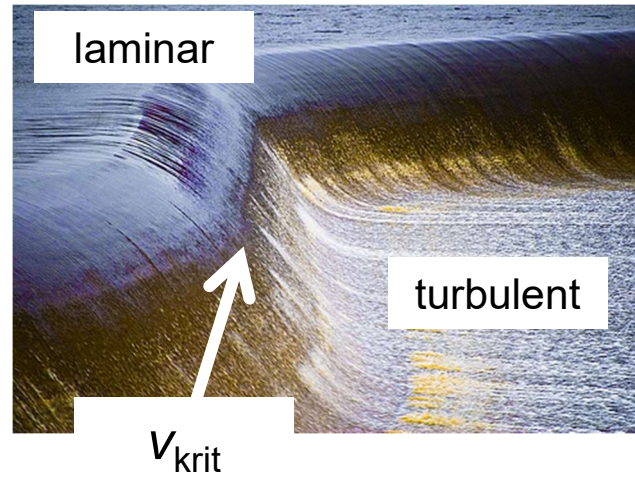


- Kritische Geschwindigkeit (v_{krit}):



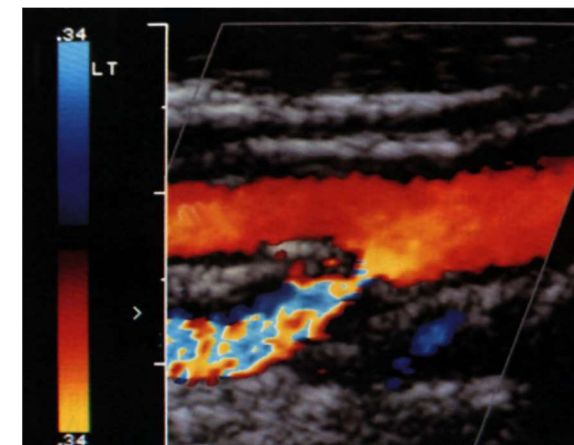
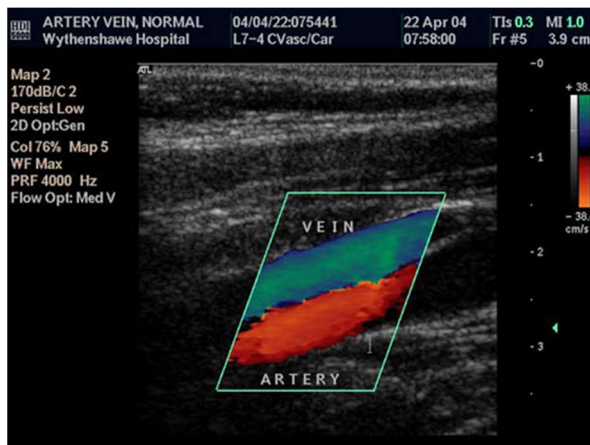
$$v_{krit} = Re \cdot \frac{\eta}{\rho \cdot r}$$

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

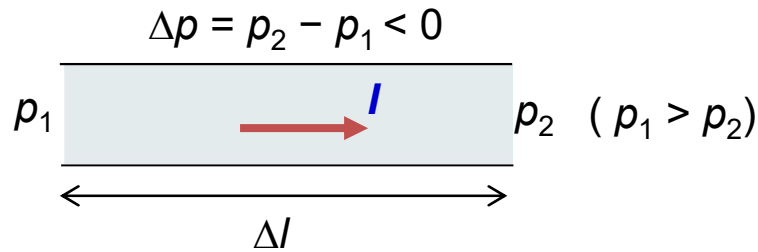


Osborne Reynolds
1842-1912
Wasseringenieur

Ist die Blutströmung laminar oder turbulent?



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



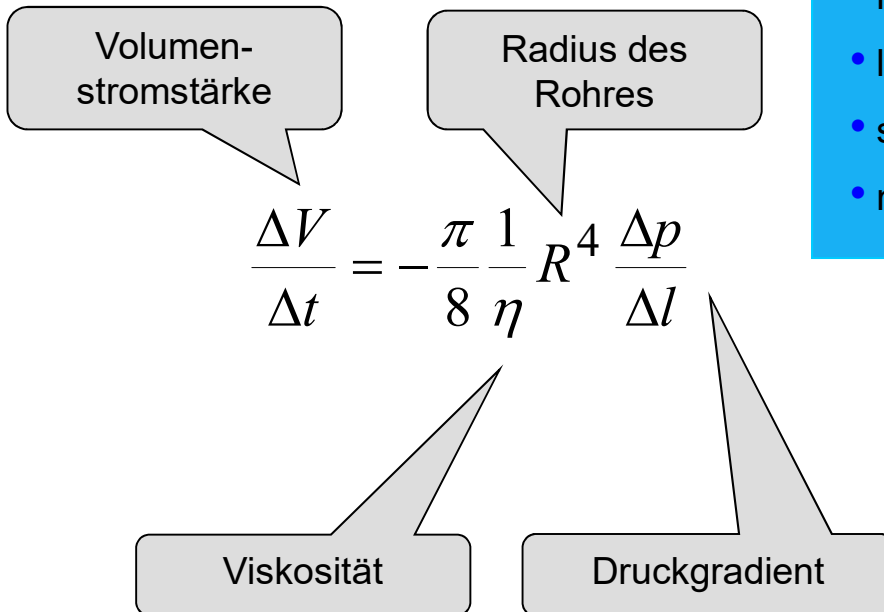
G. H. L. Hagen
1797-1884
Wasseringenieur



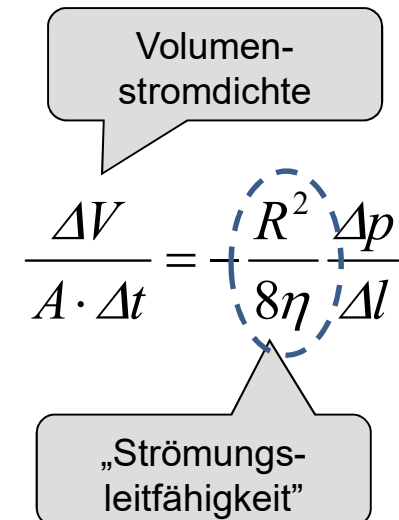
J. L. M. Poiseuille
1799-1869
Physiologe

Bedingungen:

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

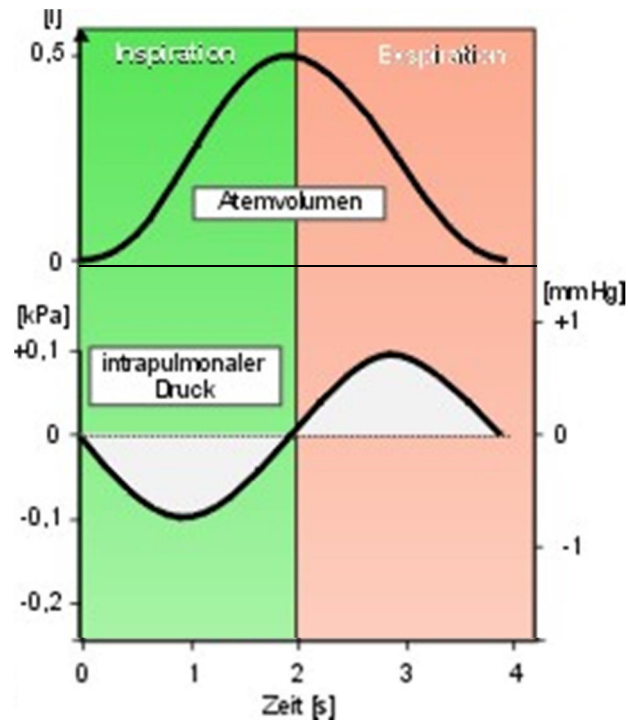


Alternativform:



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?

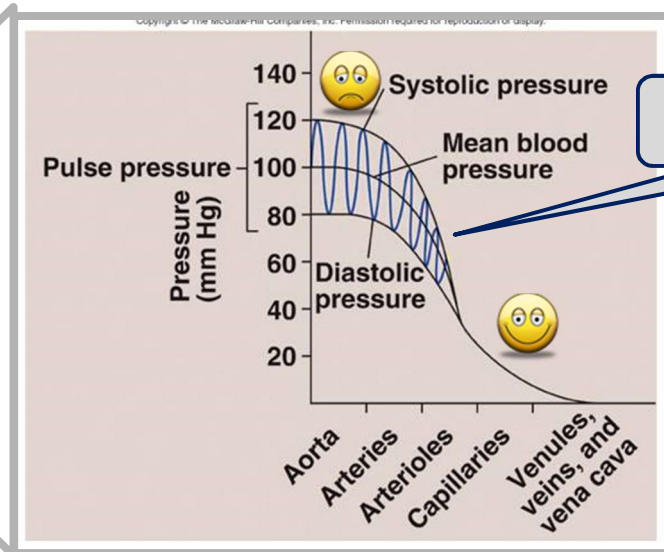
Gültigkeitsbedingungen?

• inkompressible Fl.? 😊

• laminare Strömung? 😊

• stationäre Strömung? 😞

• newtonsche Fl.? 😞

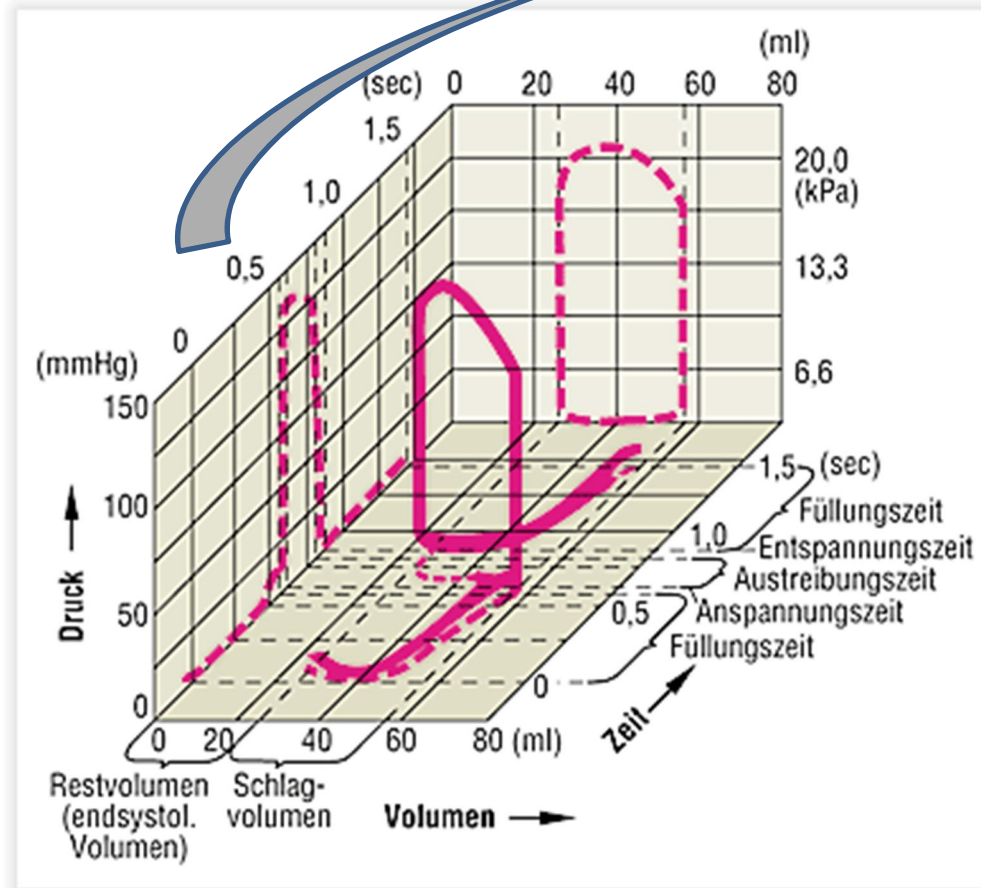


Folgerung: H-P nur qualitativ anwendbar!

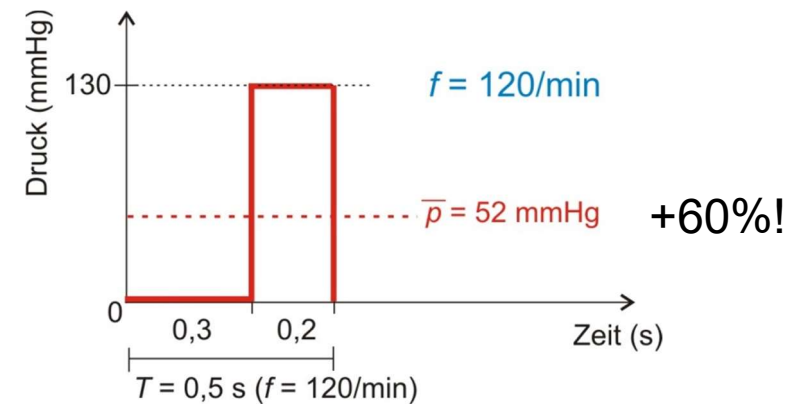
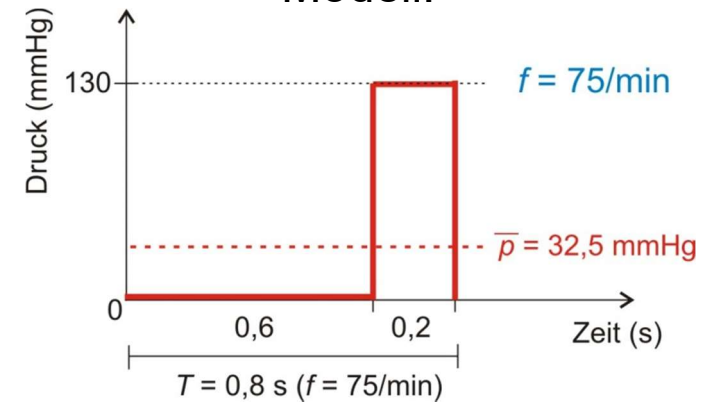
Blutströmung

- Regulation der Volumenstromstärke laut Hagen-Poiseuille-Gesetzes:

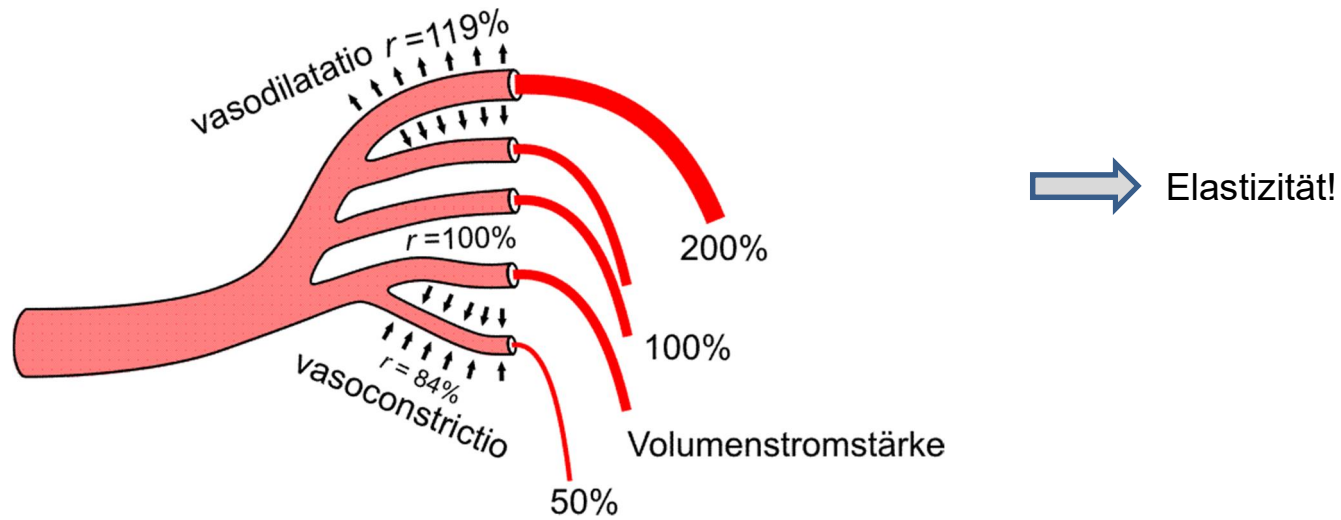
➤ Druck



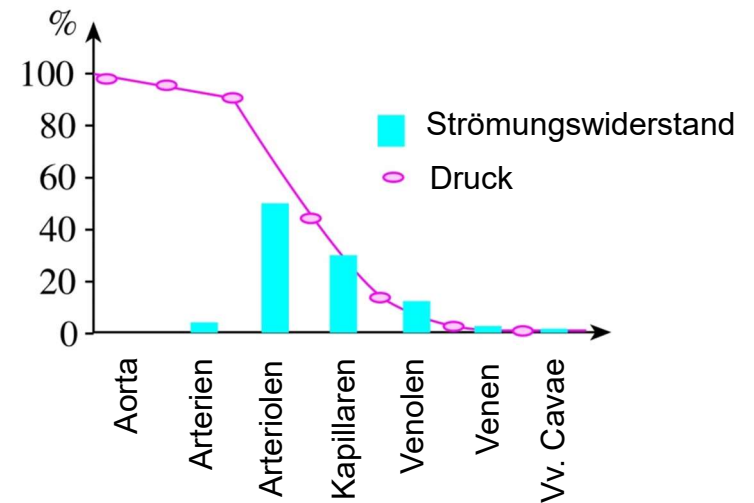
Modell:



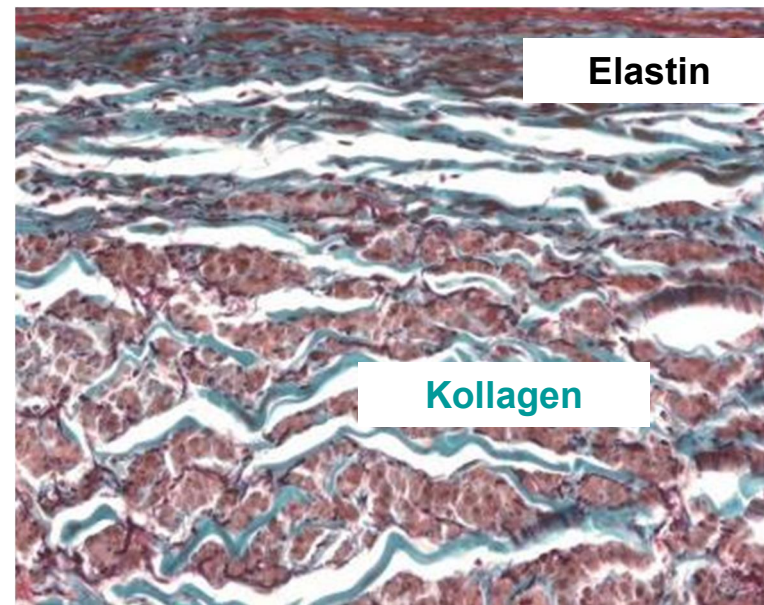
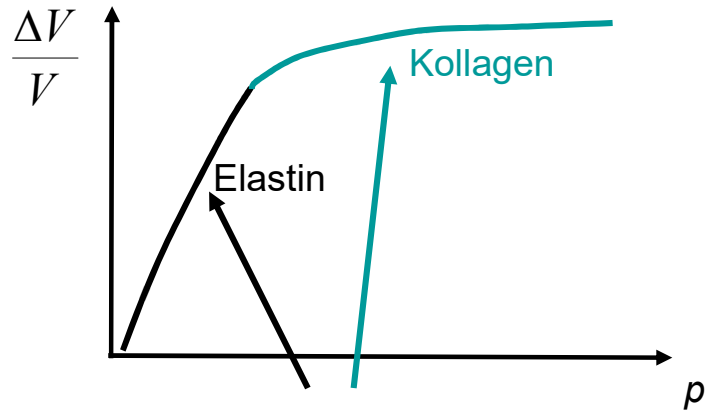
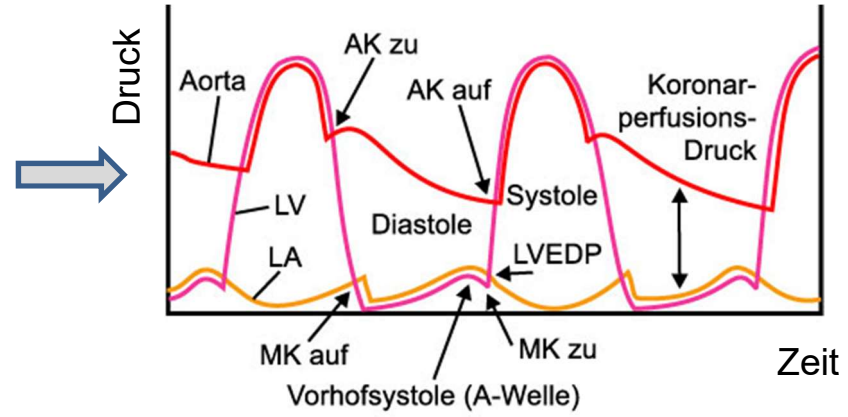
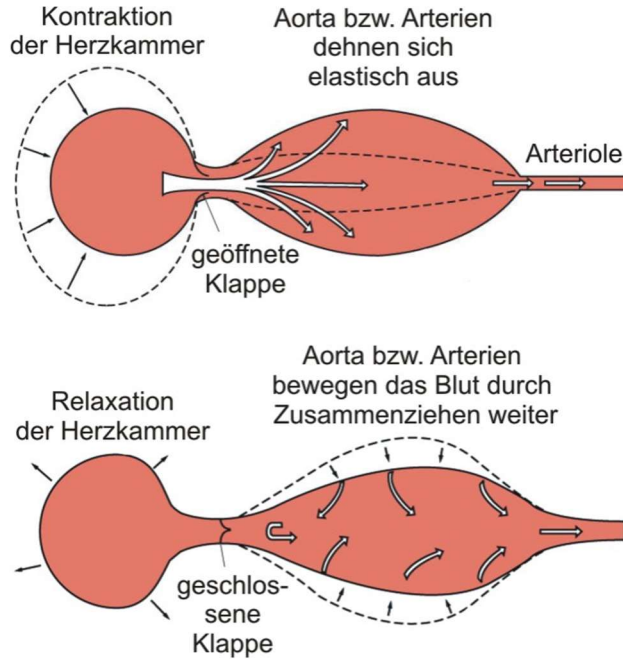
➤ Radius (r^4 !)



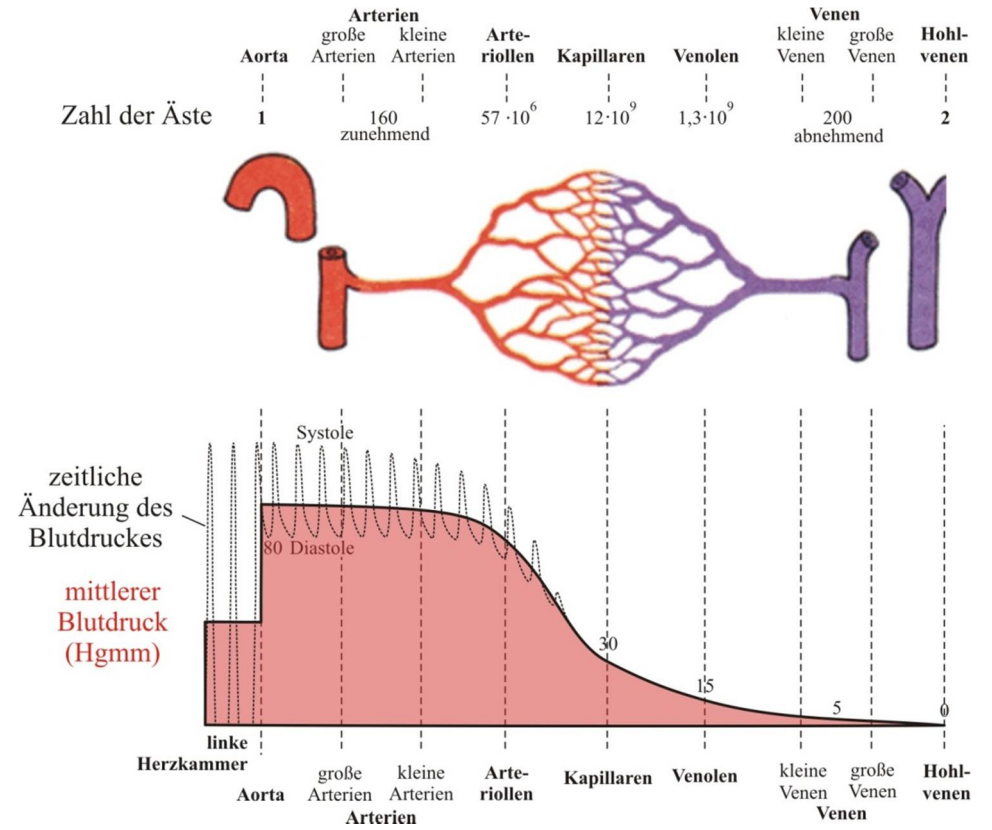
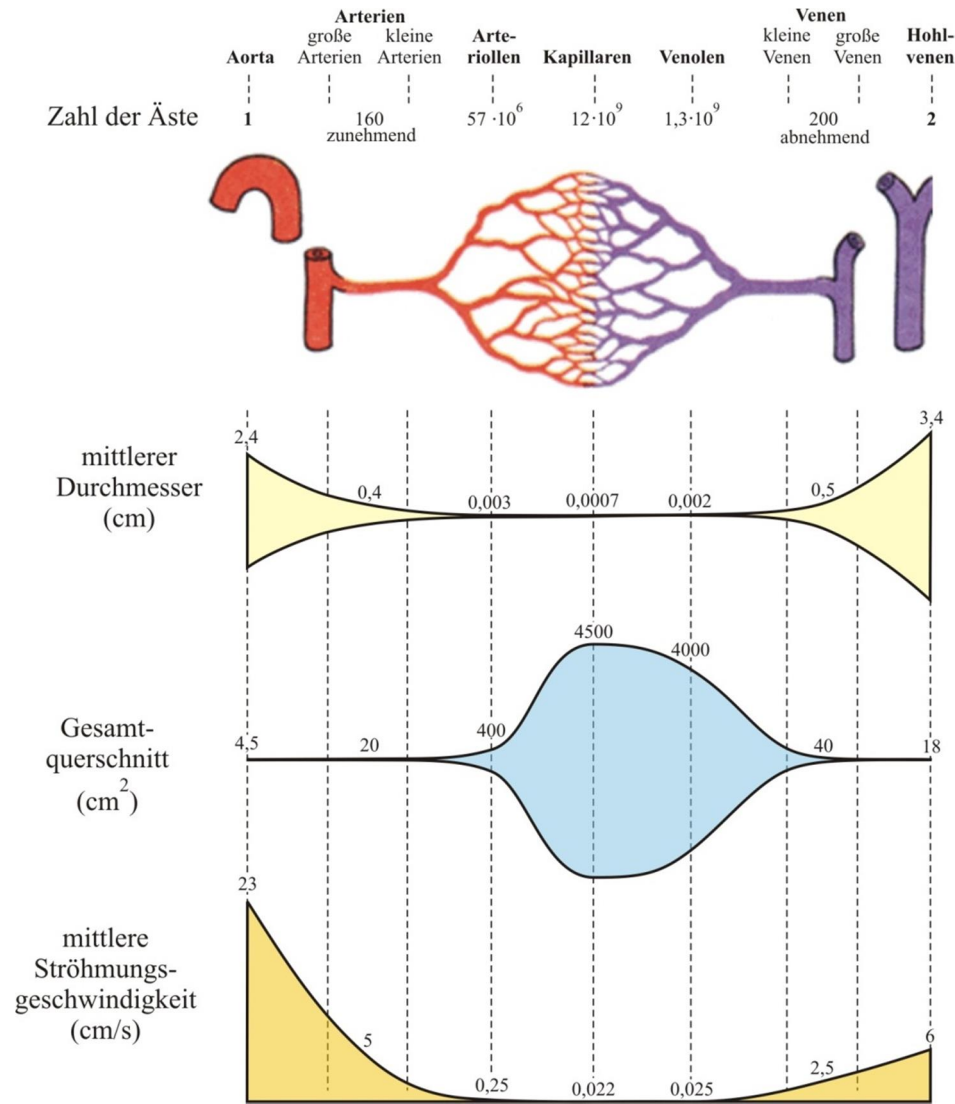
■ Druck und Strömungswiderstand im Kreislauf:



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



Zusammenfassend:

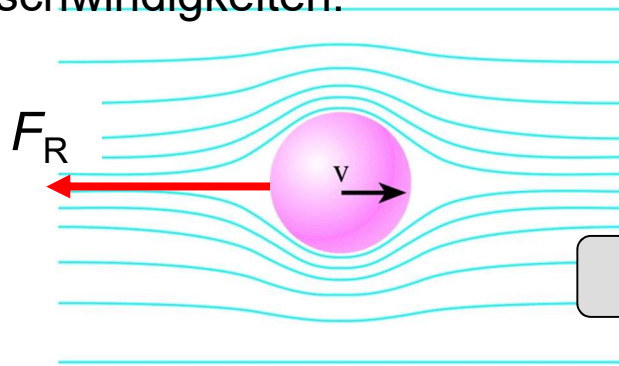


Analogie

	Was strömt?	Stärke?	Was treibt die Strömung?	Zusammenhang?
Ladungs-transport	q	$J_q = \frac{\Delta q}{A \cdot \Delta t}$	φ $-\frac{\Delta \varphi}{\Delta l}$	$J_q = -\sigma \frac{\Delta \varphi}{\Delta l}$
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:



stokessches
Reibungsgesetz:

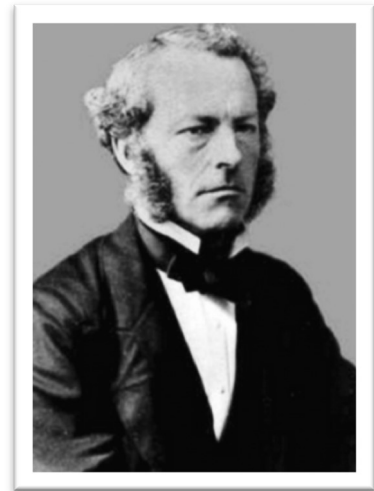
Reibungskraft

Radius des
Teilchens

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

Viskosität

Geschwindigkeit des
Teilchens



G. G. Stokes
1819-1903
Mathematiker
Physiker

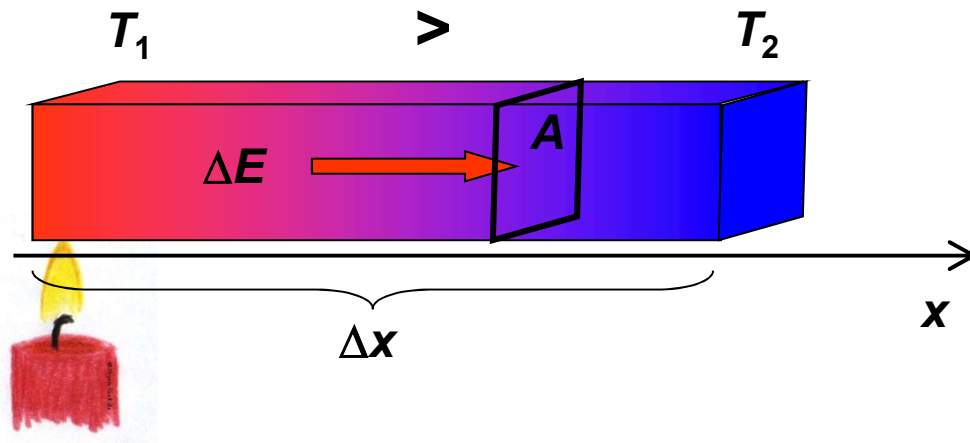
Bei gleichmäßigen Bewegung: $F_{\text{Bewegung}} = F_R$

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

III. Wärmeleitung (Energietransport)



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

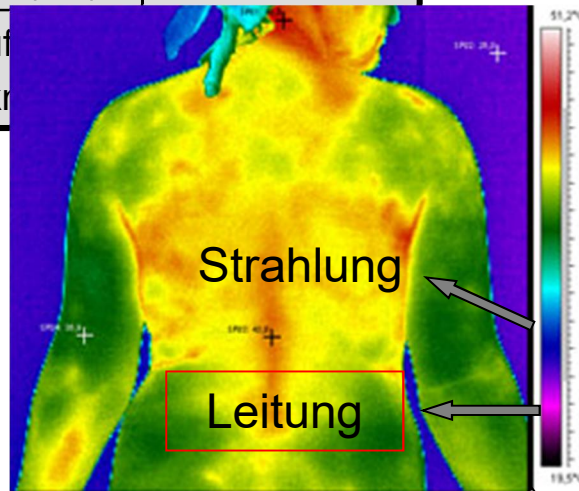


$$\frac{\Delta E}{A \cdot \Delta t} = -\lambda \frac{\Delta T}{\Delta x}$$

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

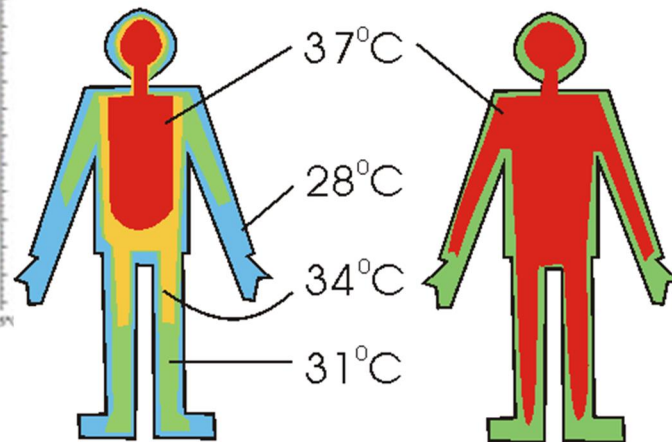
Anwendung: Wärmebildung und -abgabe

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



(Verdunstung)

Umgebungstemperatur
 20°C 35°C



Verdunstung

Analogie

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