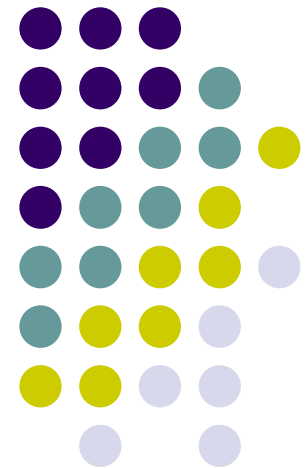


# Biophysik für Pharmazeuten II.

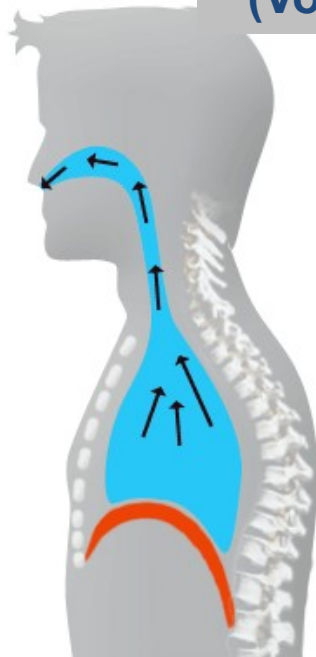
29. 03. 2022.

## Transportprozesse 2. Strömungen, Wärmeleitung

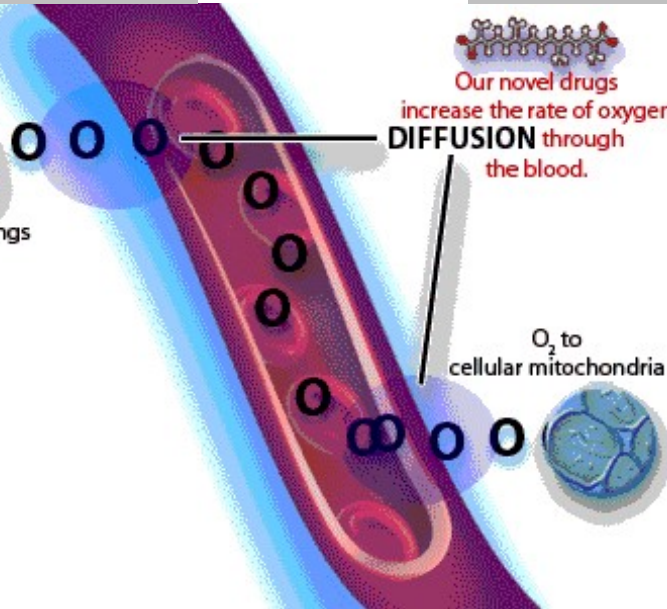


# Transportprozesse

## II. Strömung (Volumentransport)



entspannt

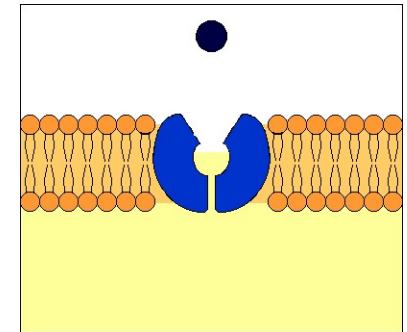
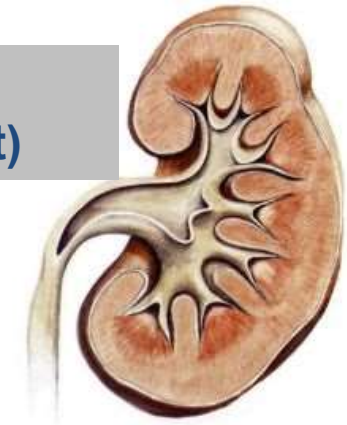


## III. Diffusion (Stofftransport)



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

O<sub>2</sub> to  
cellular mitochondria



## I. Elektrischer Strom (el. Ladungstransport)

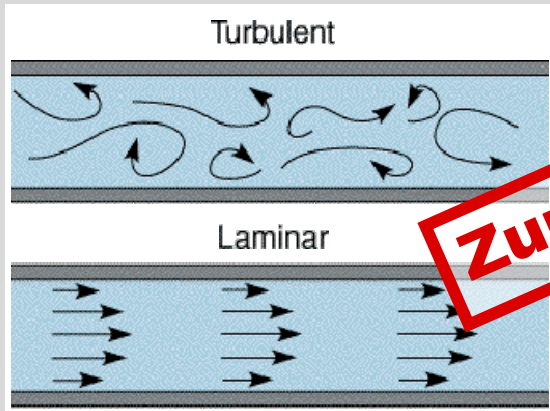


## IV. Wärmeleitung (Energietransport)



## V. Verallgemeinerung

## VI. Energetische Aspekte

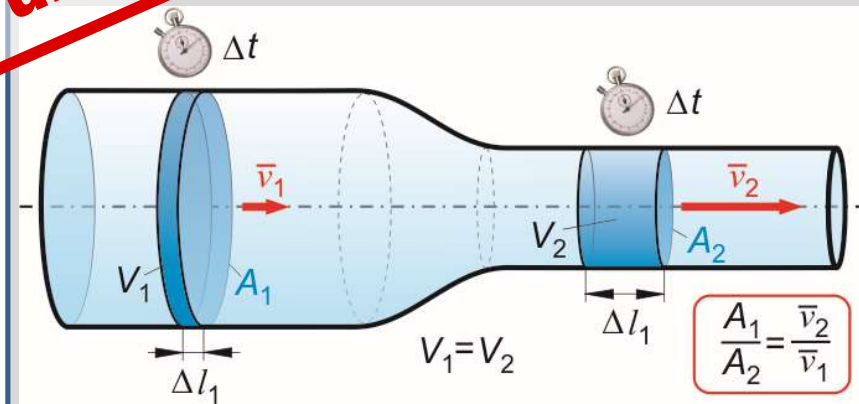


**Zur Erinnerung**

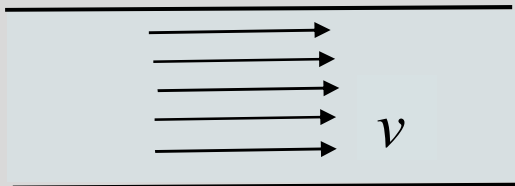
Volumenstromstärke ( $I$ ):  $I = \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad \left( \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right)$

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

## Kontinuitätsgleichung



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 :

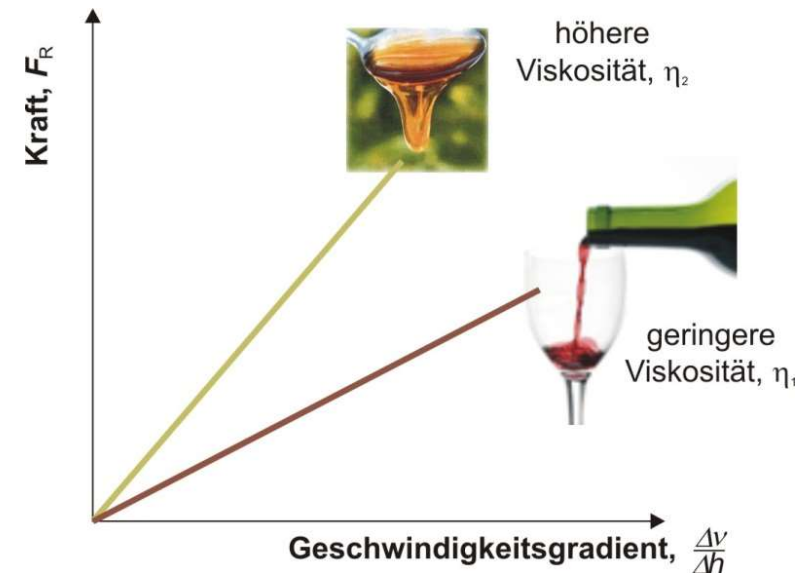
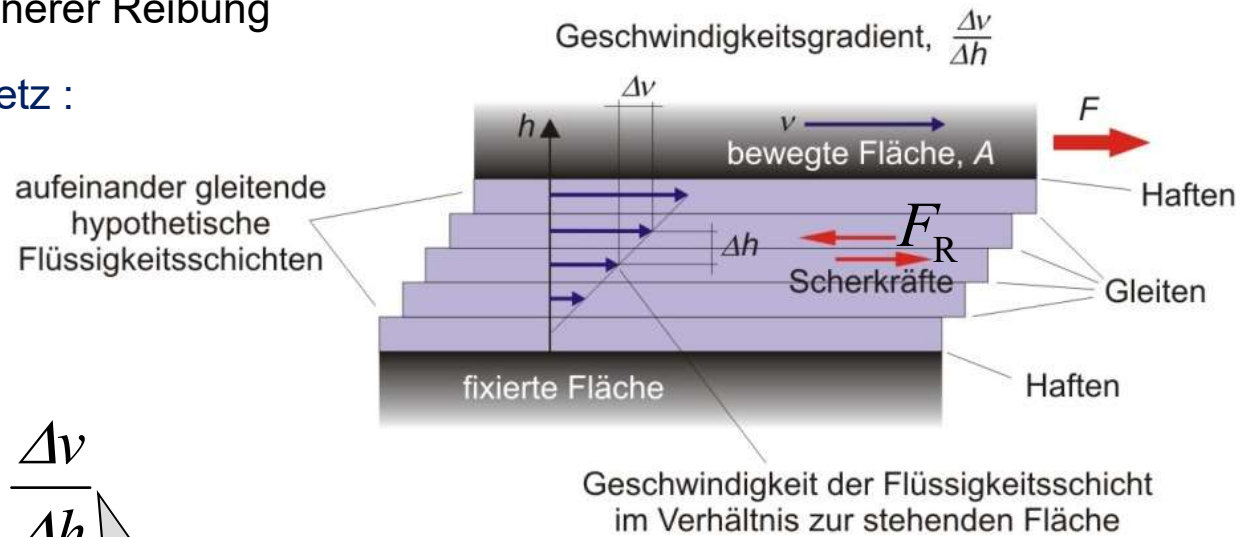
Bei gleichmäßiger Bewegung:

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

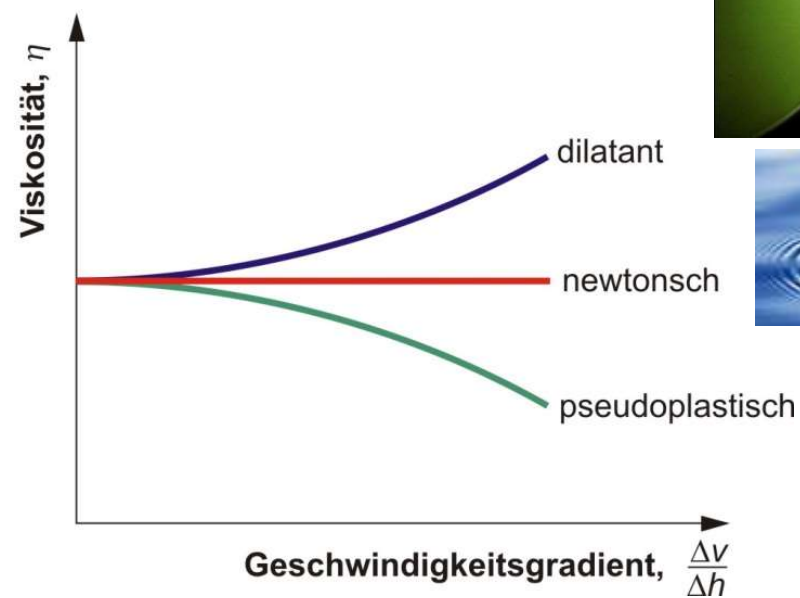
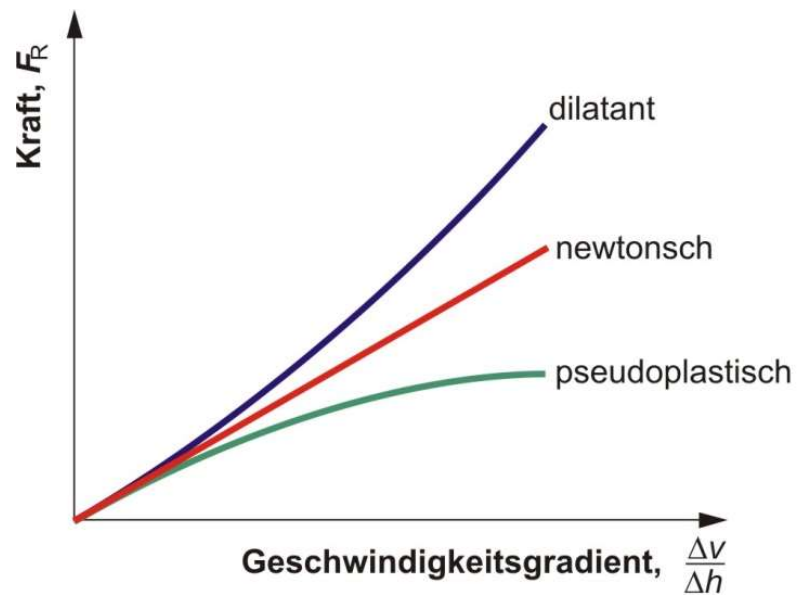
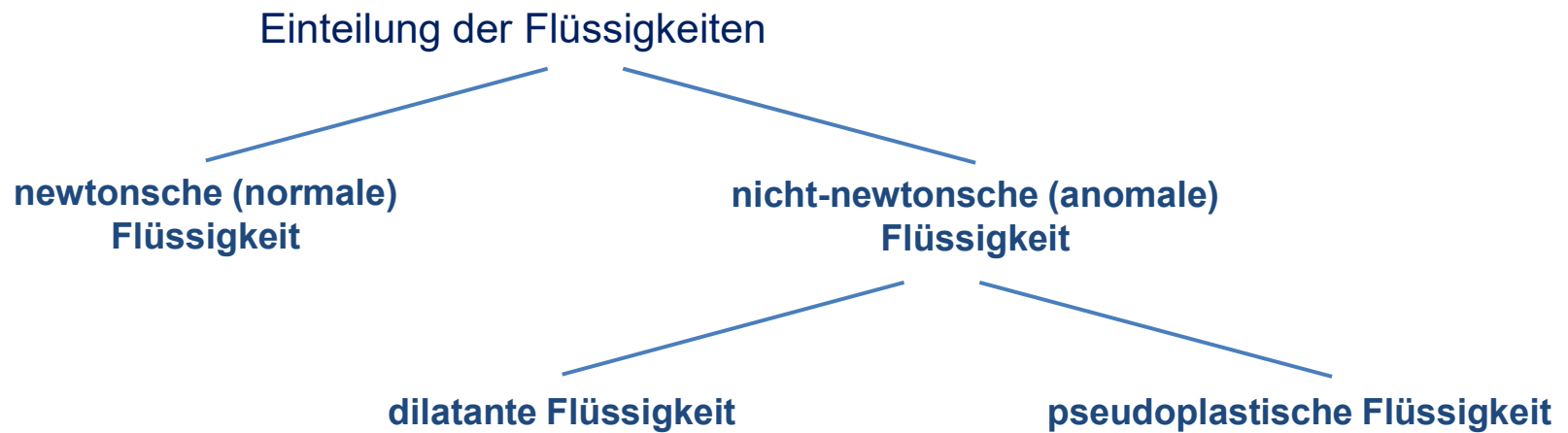
Viskosität (innerer Reibungskoeffizient)

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

Geschwindigkeitsgradient



- geschwindigkeitsgradientabhängig



# Viskosität der Körperflüssigkeiten

Liquor (Gehirn-Rückenmarks-Flüssigkeit, Cerebrospinalflüssigkeit)



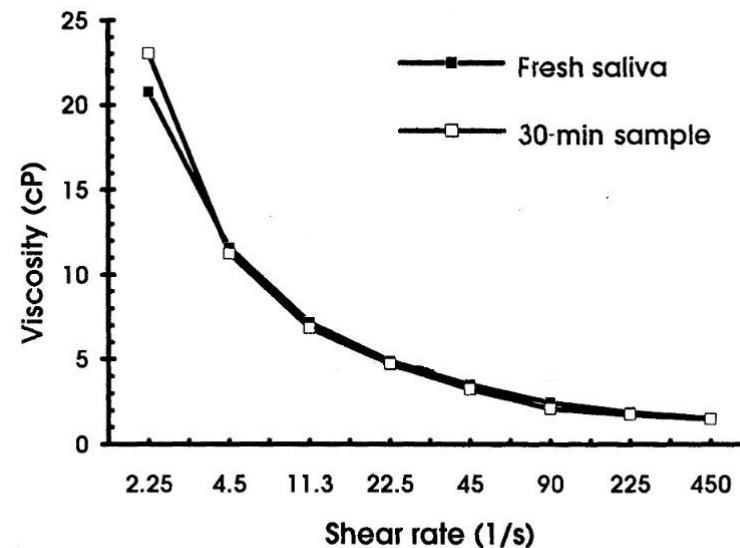
1. Großhirn
2. Kleinhirn
3. Hirnstamm
4. Rückenmark

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

Speichel



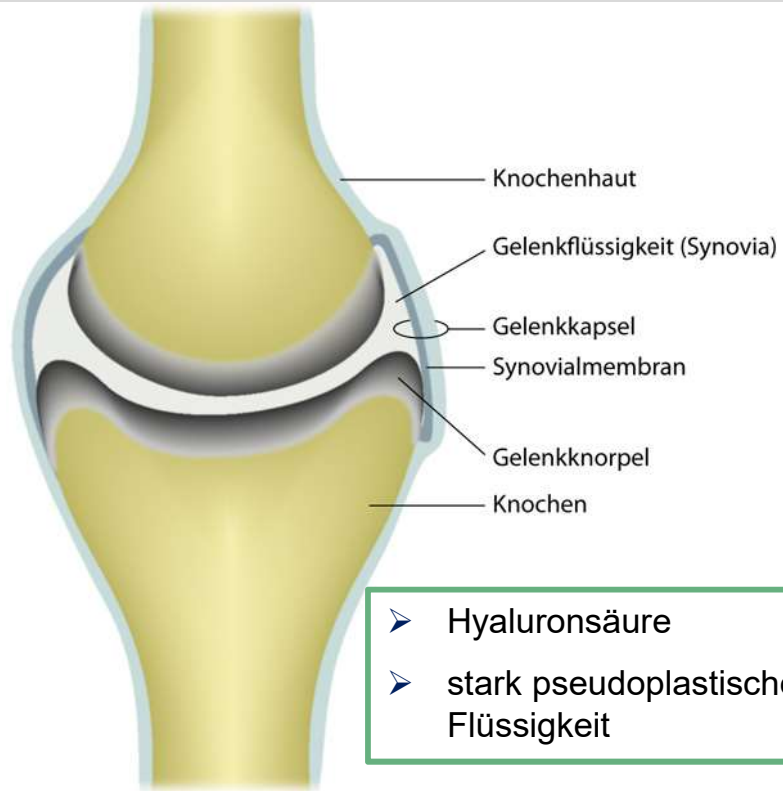
- Mucin
- pseudoplastische Flüssigkeit



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

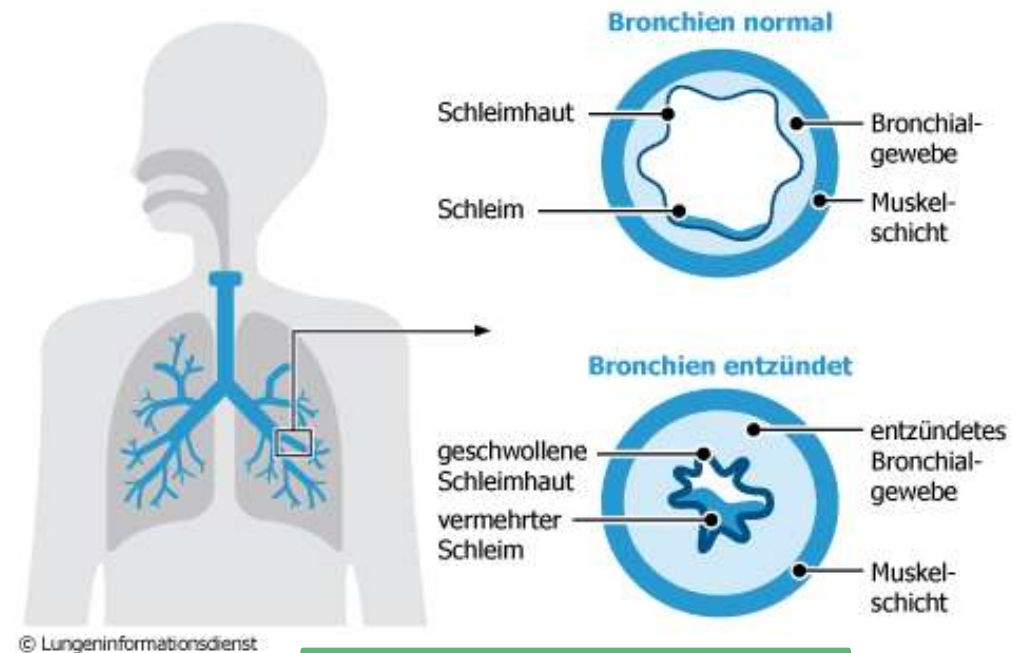


## Gelenkflüssigkeit



- Hyaluronsäure
- stark pseudoplastische Flüssigkeit

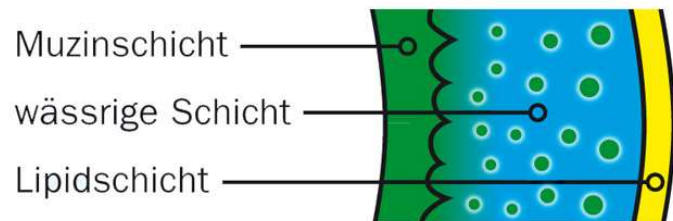
## Bronchialschleim



- pseudoplastische Flüssigkeit

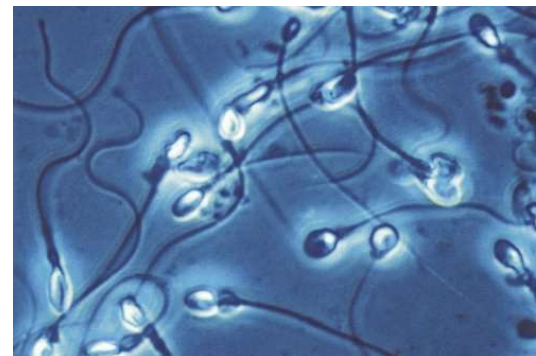
## Träne

### Aufbau des Tränenfilms



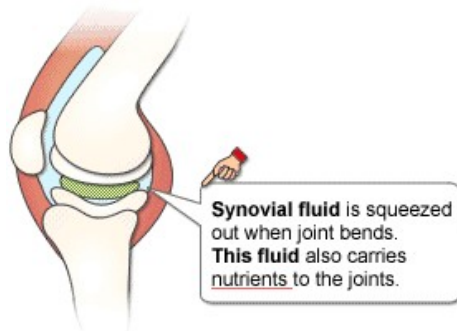
- pseudoplastische Flüssigkeit
- 1-10 mPas

## Sperma

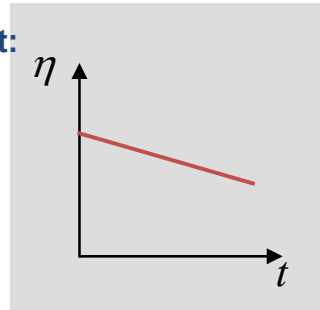


- pseudoplastische Flüssigkeit

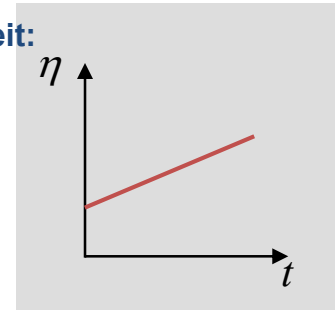
➤ zeitabhängig



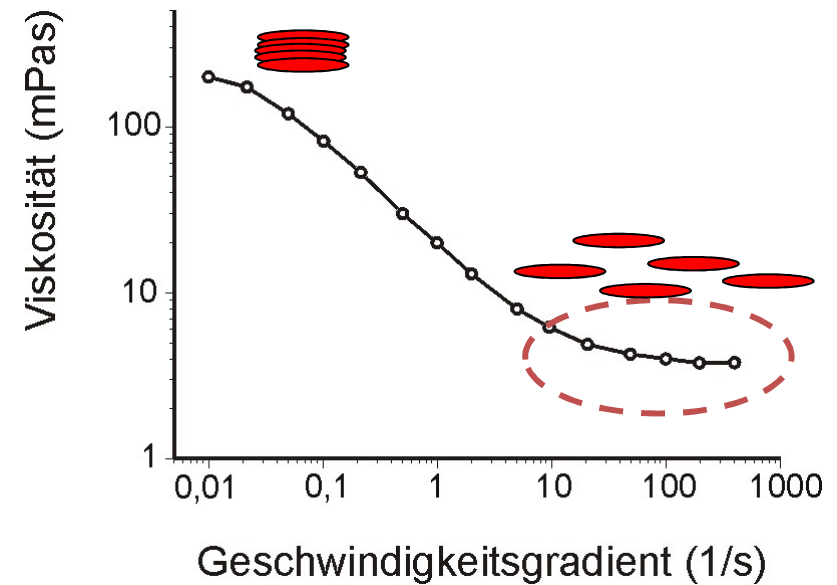
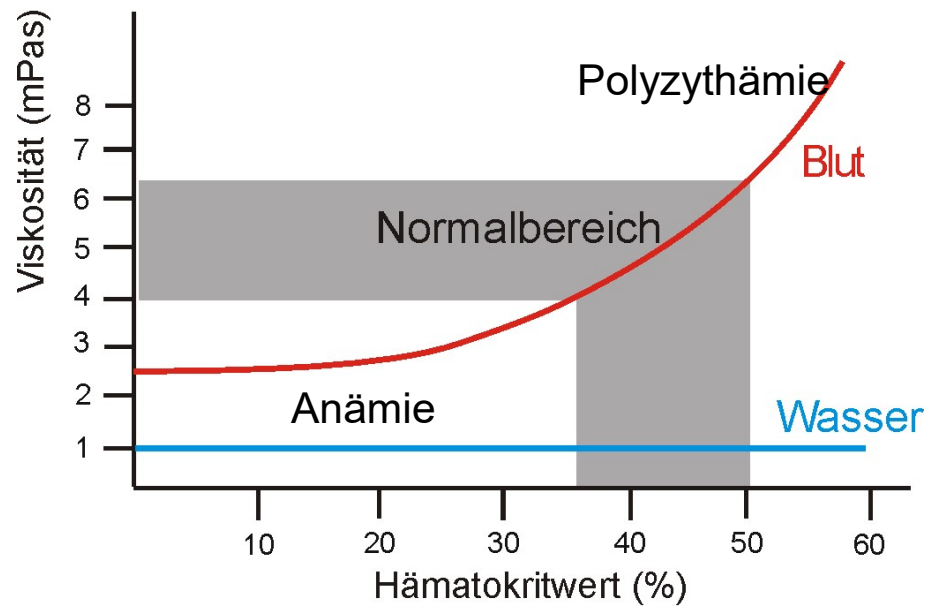
Thixotrope Flüssigkeit:



Rheopexe Flüssigkeit:

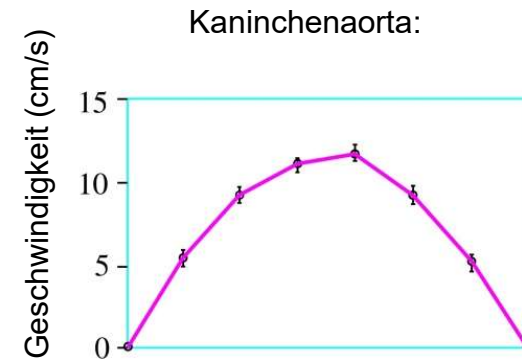
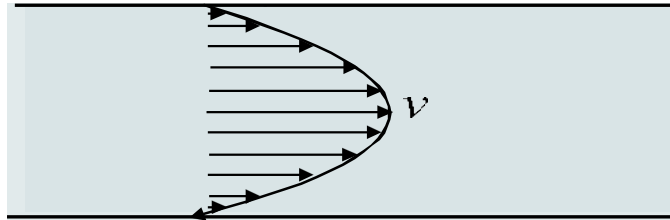


## Viskosität des Blutes

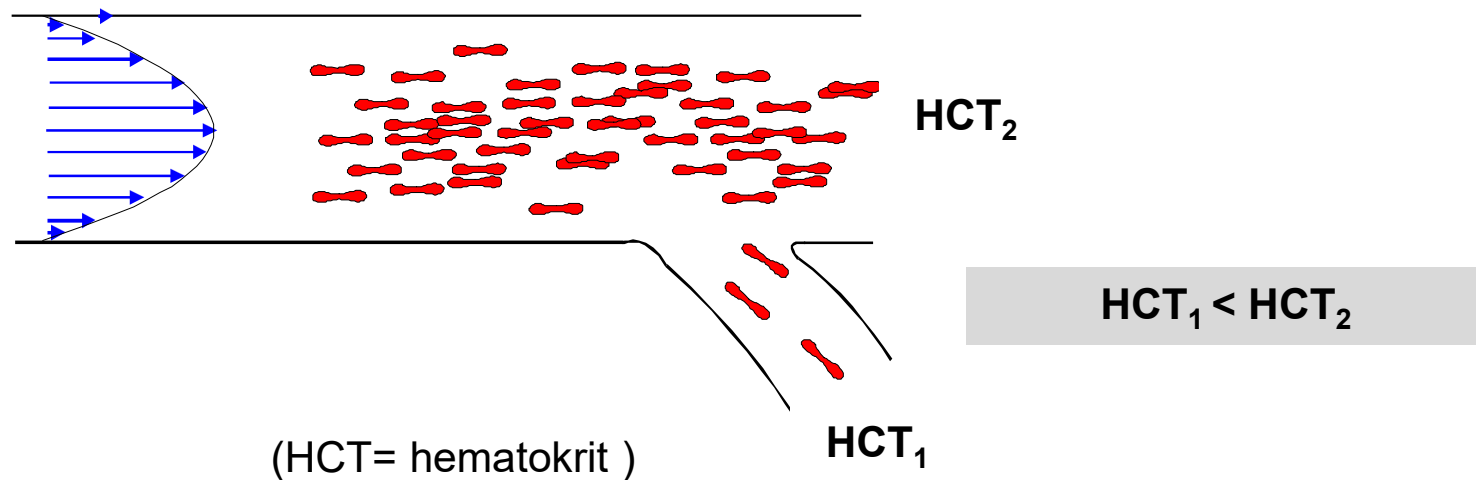




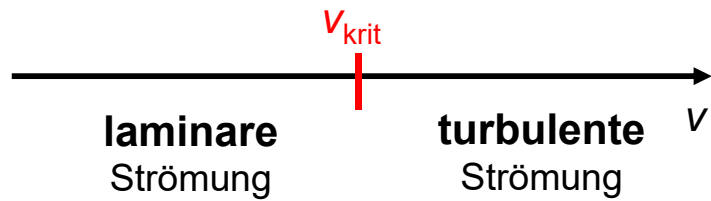
- Geschwindigkeitsprofil:



Eine physiologische Folgerung: Plasma-Skimming  
(Bernouillische Gleichung)

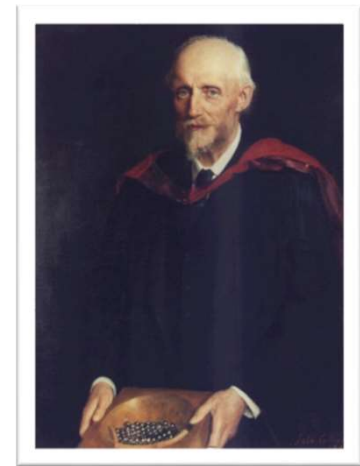
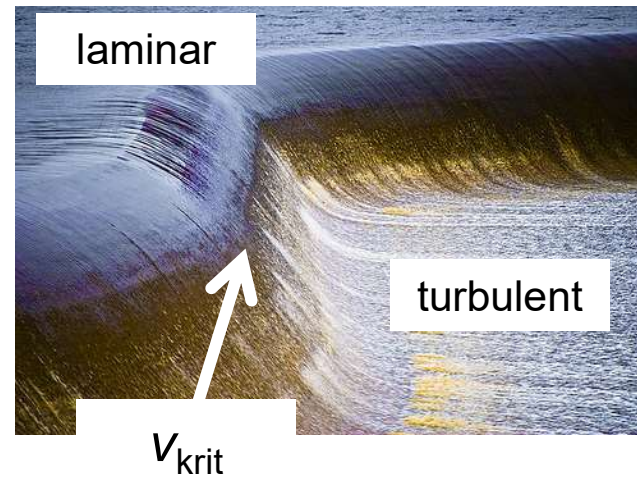


- Kritische Geschwindigkeit ( $v_{krit}$ ):



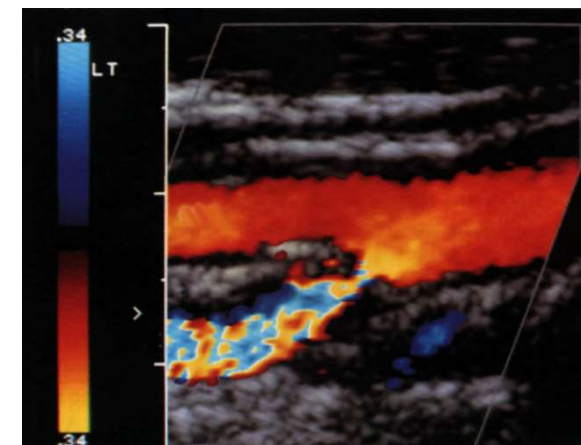
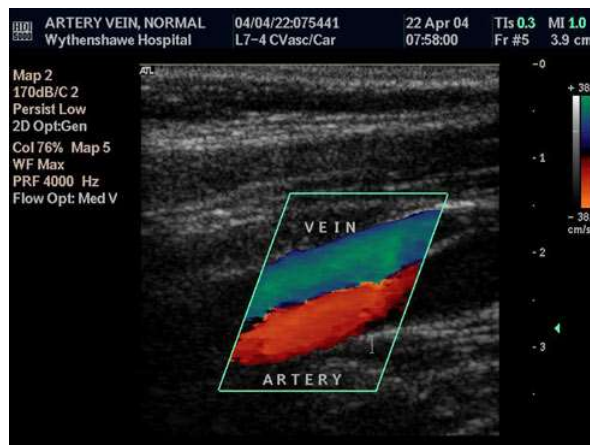
$$v_{krit} = Re \cdot \frac{\eta}{\rho \cdot r}$$

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

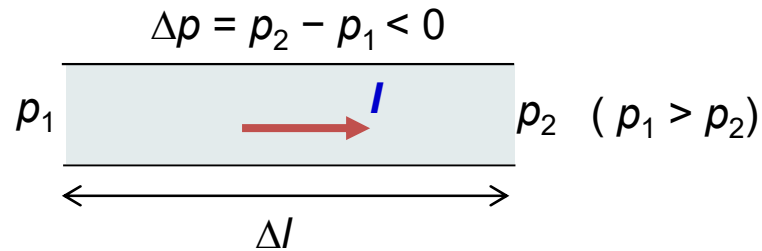


Osborne Reynolds  
1842-1912  
Wasseringenieur

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

Alternativform:

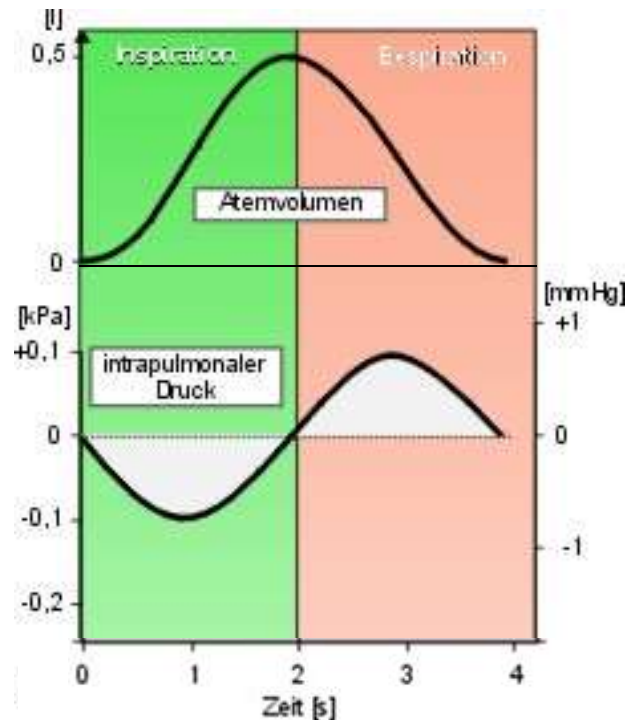
Volumen-  
stromdichte

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

„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 ( $\Delta p$ )
  - Intrapulmonaler **Druck** ( $\Delta p$ ) 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?

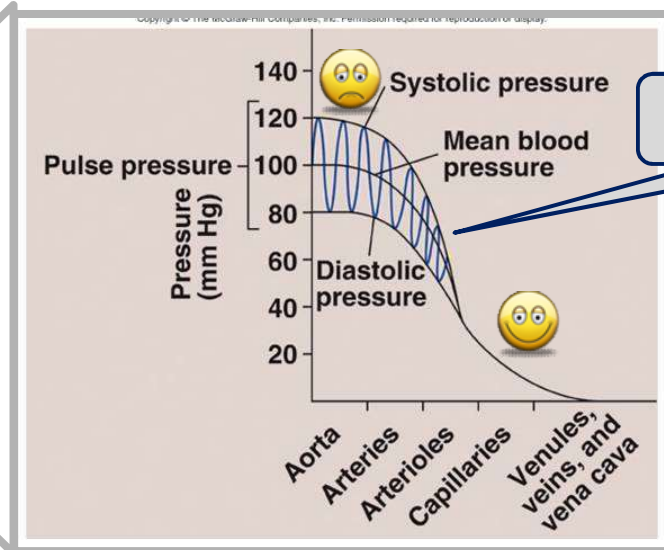
Gültigkeitsbedingungen?

- inkompressible Fl.? 😊

- laminare Strömung? 😊

- stationäre Strömung? 😞

- newtonsche Fl.? 😞



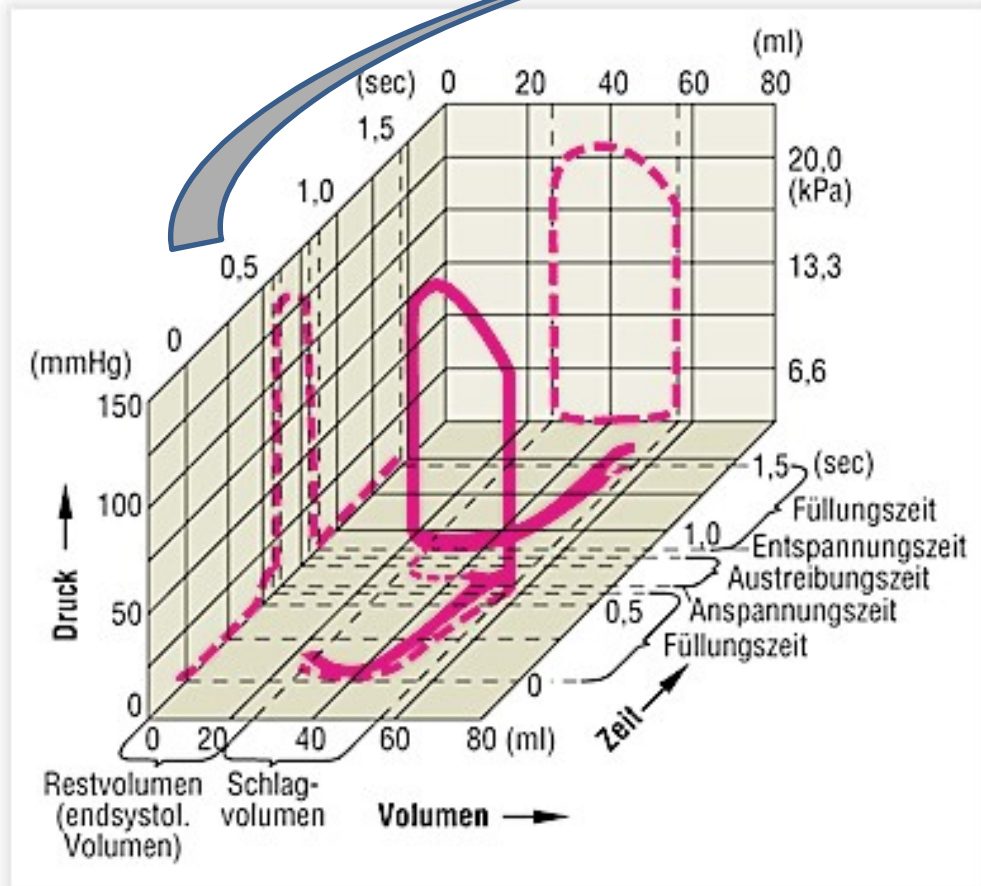
Folgerung: H-P nur qualitativ anwendbar!



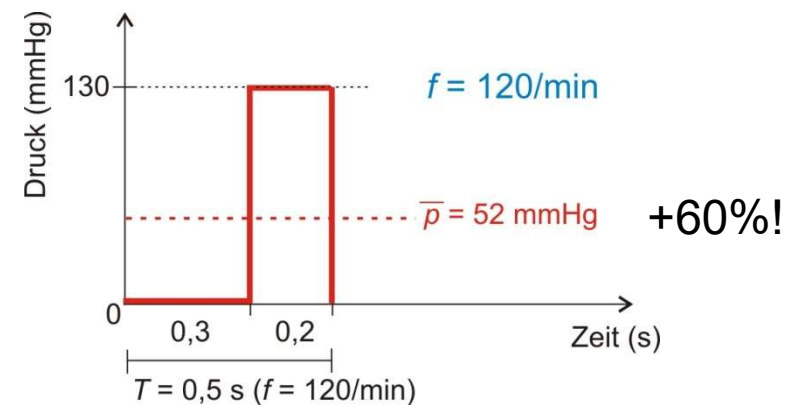
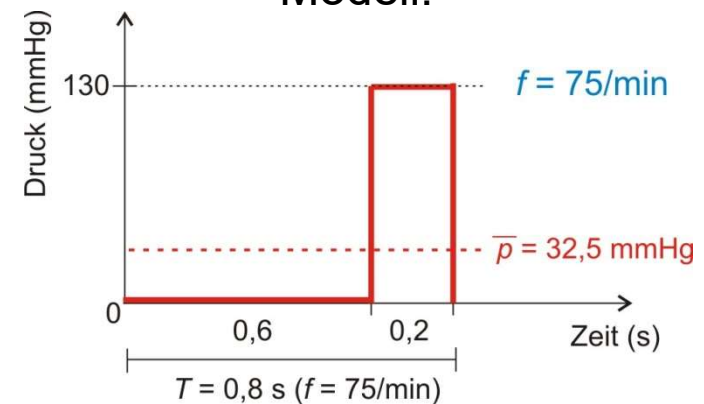
# Blutströmung

- Regulation der Volumenstromstärke laut Hagen-Poiseuille-Gesetzes:

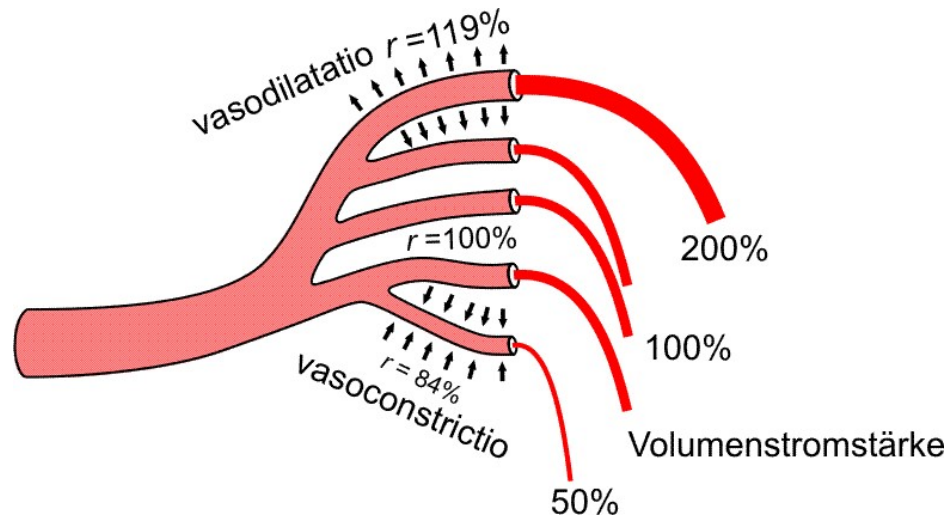
## ➤ Druck



Modell:

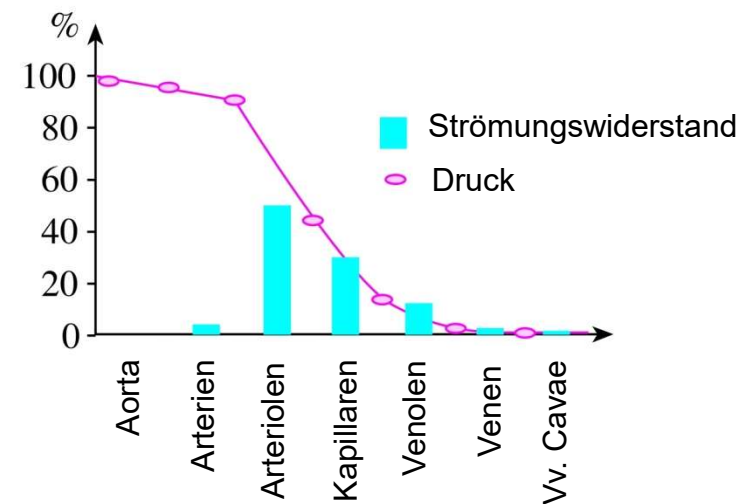


## ➤ Radius ( $r^4$ !)

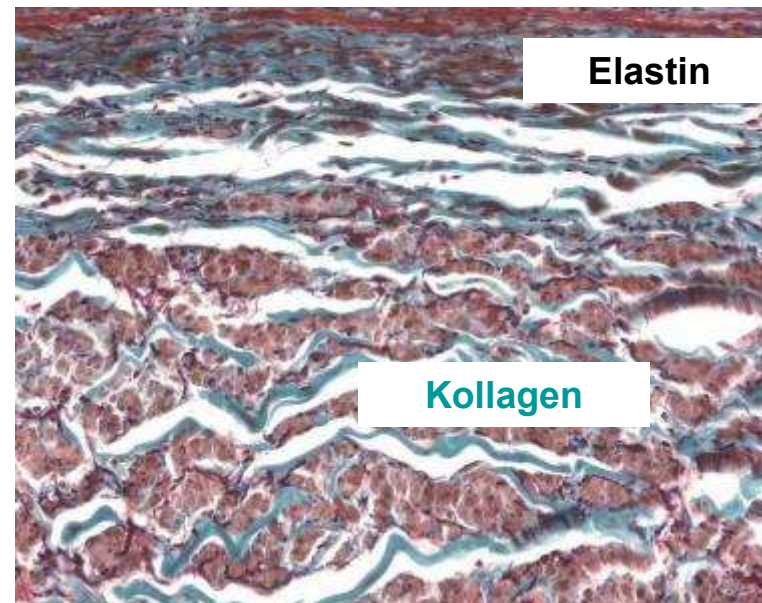
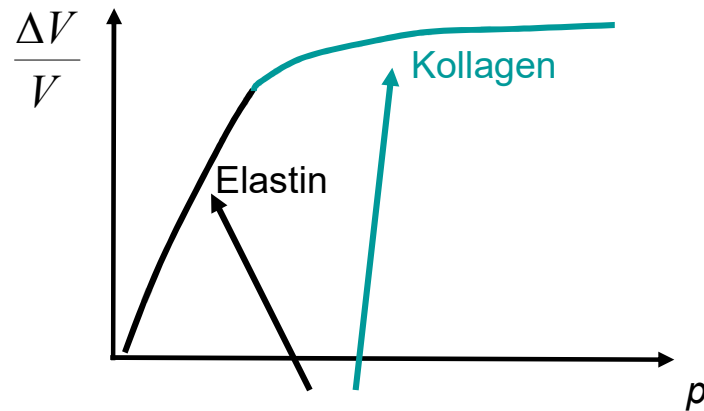
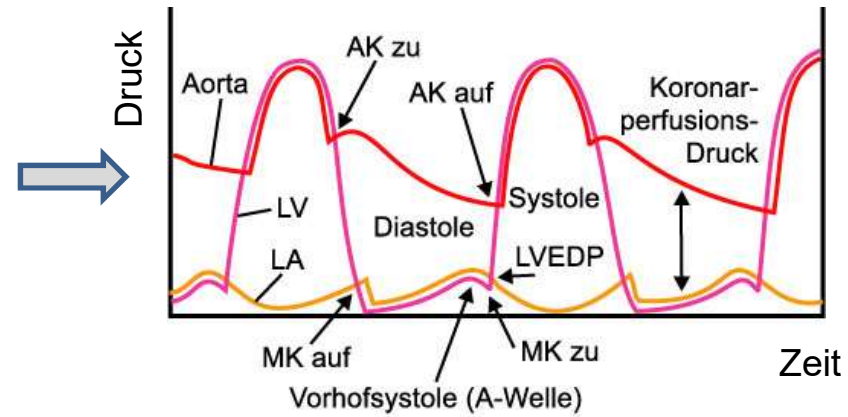
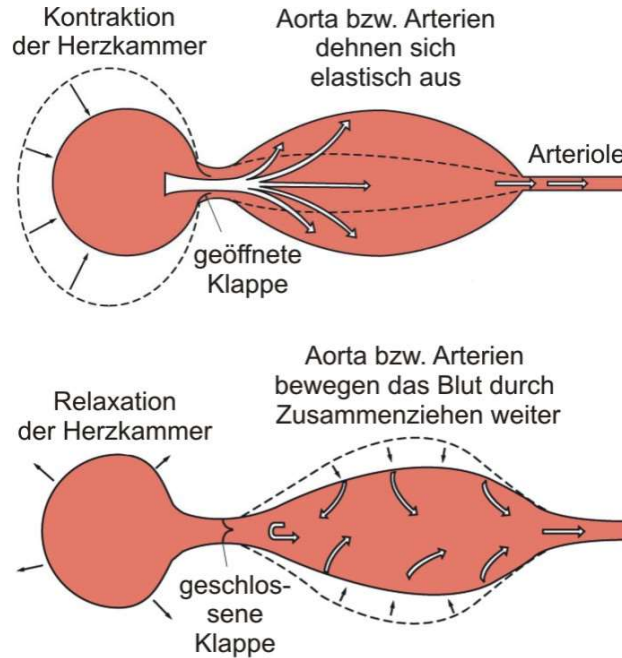


➡ Elastizität!

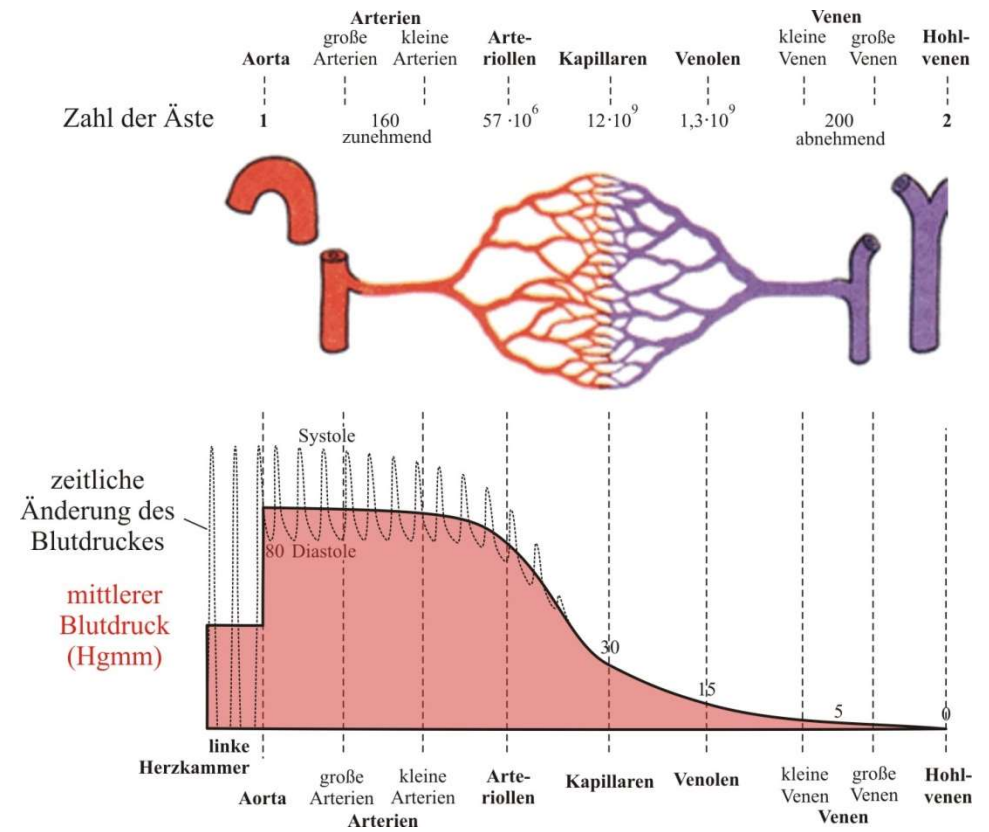
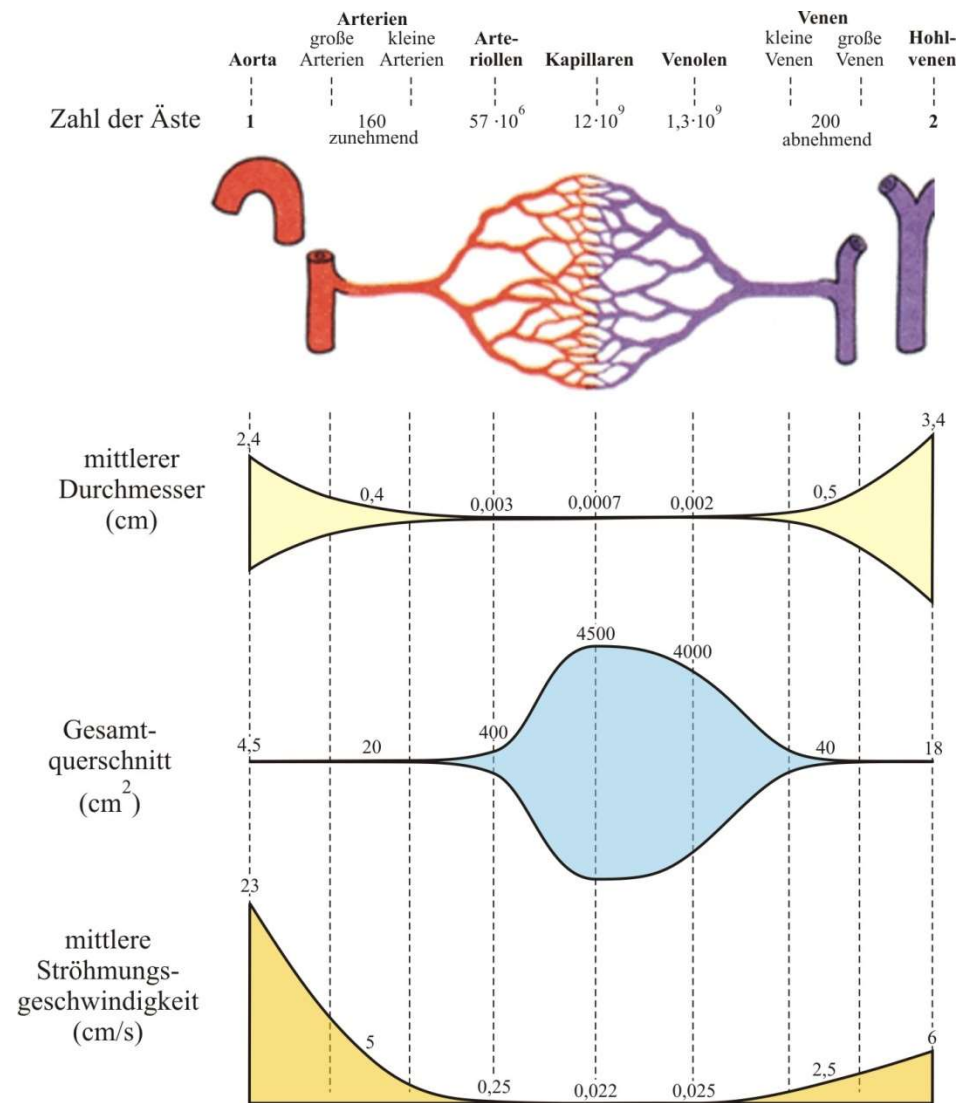
## ■ Druck und Strömungswiderstand im Kreislauf:



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



## Zusammenfassend:



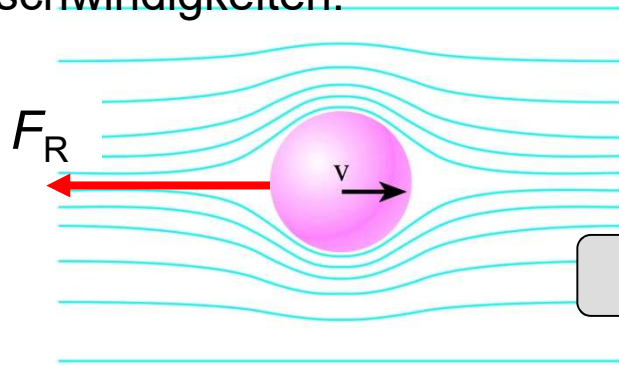
# Analogie

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



## 4. Bewegung von Teilchen in reellen 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

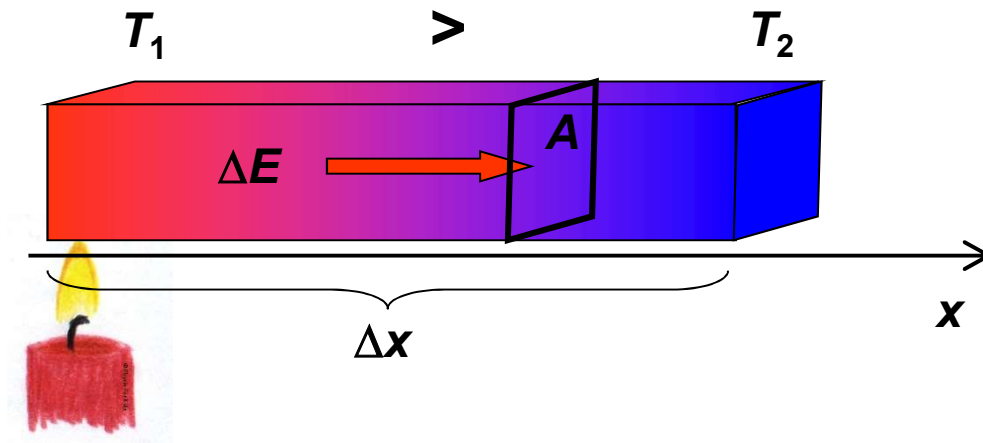
Bei gleichmäßigen Bewegung:  $F_{\text{Bewegung}} = F_R$

**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

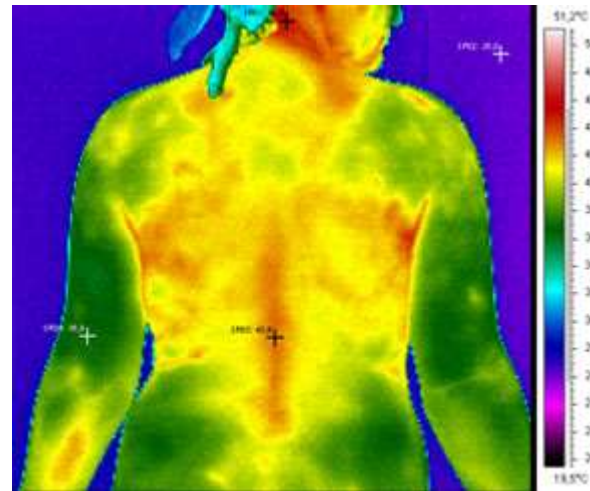


$$\frac{\Delta E}{A \cdot \Delta t} = -\lambda \frac{\Delta T}{\Delta x}$$

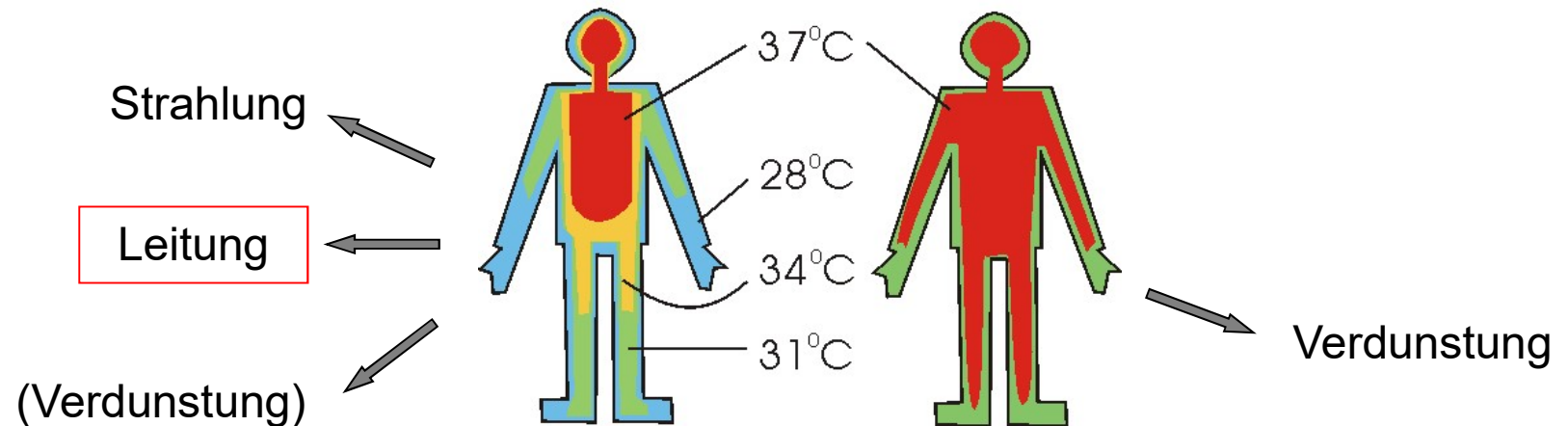
Stoff	$\lambda$ (W/(m·K))
Silber	420
Glas	1
Wasser	0,6
Muskel	0,4
Fett	0,2
Luft	0,025

# Anwendung: Wärmebildung und -abgabe

Aktivität	Wärme- bildung (W)
In Ruhe	115
Langsames Spazieren	260
Radfahren (15 km/h)	420
Treppen- steigen (2/s)	700
Laufen (15 km/h)	1150



Umgebungstemperatur  
 $20^{\circ}\text{C}$        $35^{\circ}\text{C}$



## V. Zusammenfassung

	Was strömt?	Stärke?	Warum?	Zusammenhang?
Ladungs-transport	$q$	$\frac{\Delta q}{A \cdot \Delta t}$	$\varphi$ $-\frac{\Delta \varphi}{\Delta l}$	$\frac{\Delta q}{A \cdot \Delta t} = -\sigma \frac{\Delta \varphi}{\Delta l}$
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	$E$	$\frac{\Delta E}{A \cdot \Delta t}$	$T$ $-\frac{\Delta T}{\Delta x}$	$\frac{\Delta E}{A \cdot \Delta t} = -\lambda \frac{\Delta T}{\Delta x}$