

Medizinische Biophysik

Transportprozesse

0. Überblick der Transportprozesse mit medizinischen Beispiele

I. Strömungen in Röhren (Volumentransport)

1. Grundbegriffe

Strömungsarten: laminare, turbulente

Volumenstromstärke, -dichte



Anwendung:

Atmung (I und v)

Blutströmung (I und v , Messmethoden)


Flüssigkeit: ideale, reelle

2. Kontinuitätsgleichung Anwendung: **Blutkreislauf**

3. Strömung von idealen Flüssigkeiten

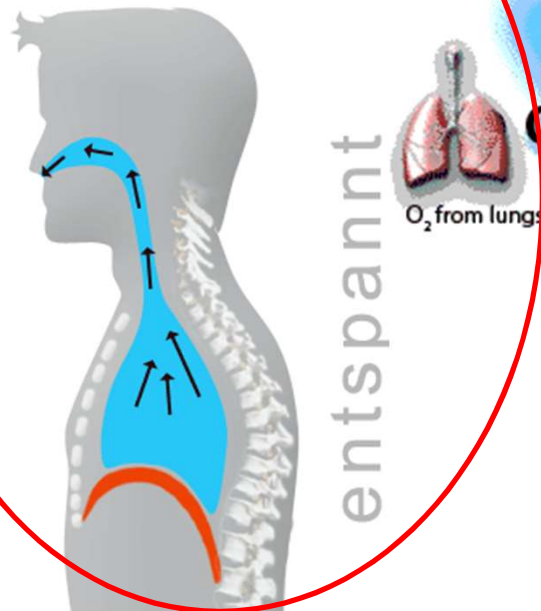
- Geschwindigkeitsprofil
- Bernoullische Gleichung

4. Strömung von reellen Flüssigkeiten

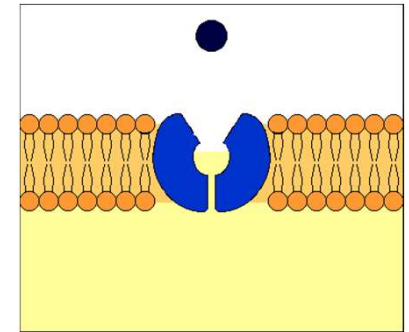
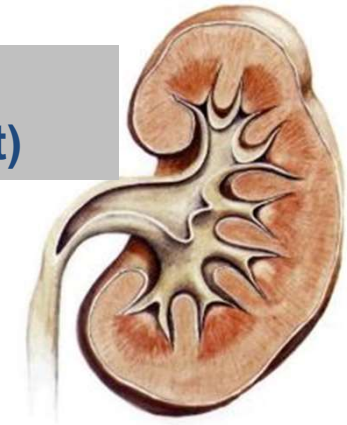
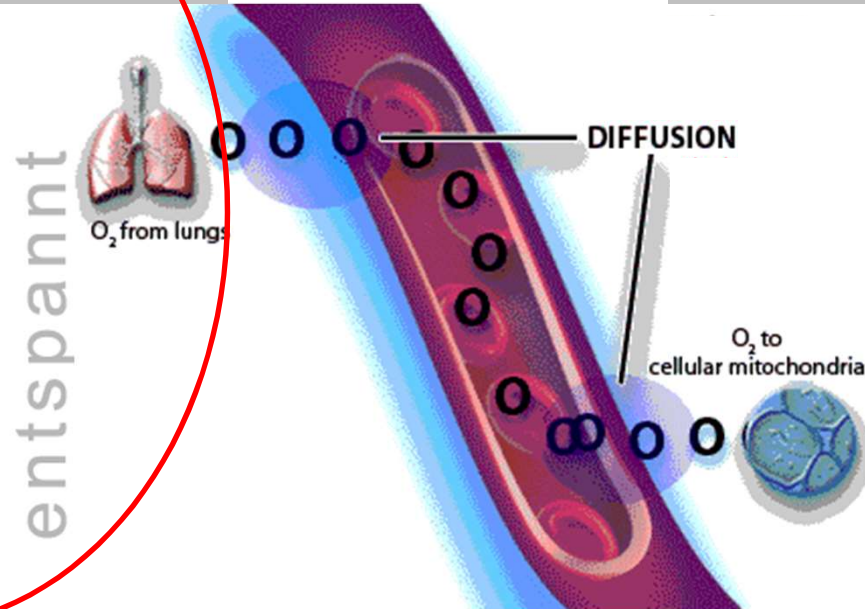
- Newtonsches Reibungsgesetz
- Viskosität  Anwendung: Viskosität von Körperflüssigkeiten

Transportprozesse

Strömung (Volumentransport)



Diffusion (Stofftransport)



Elektrischer Strom (el. Ladungstransport)



Wärmeleitung (Energietransport)

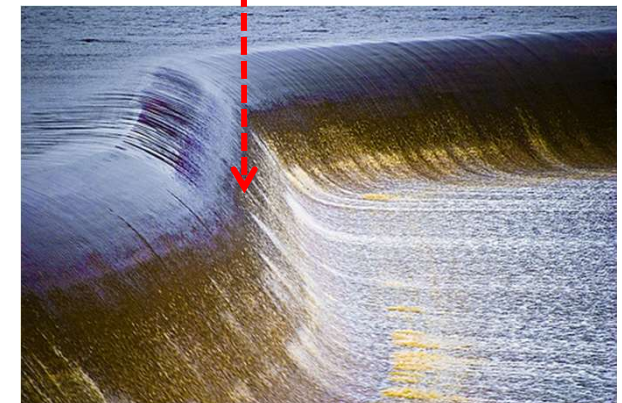
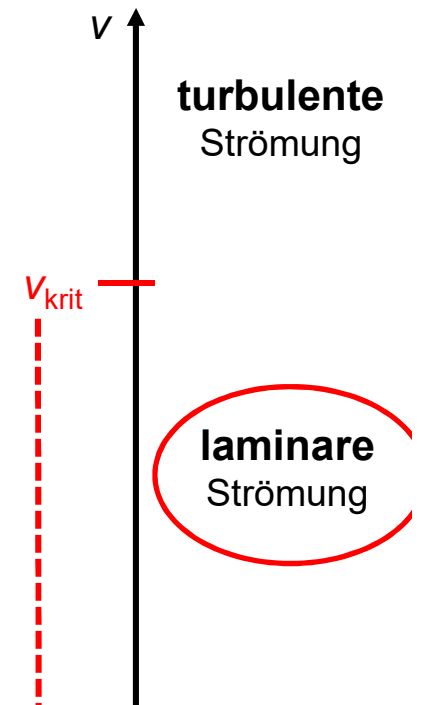
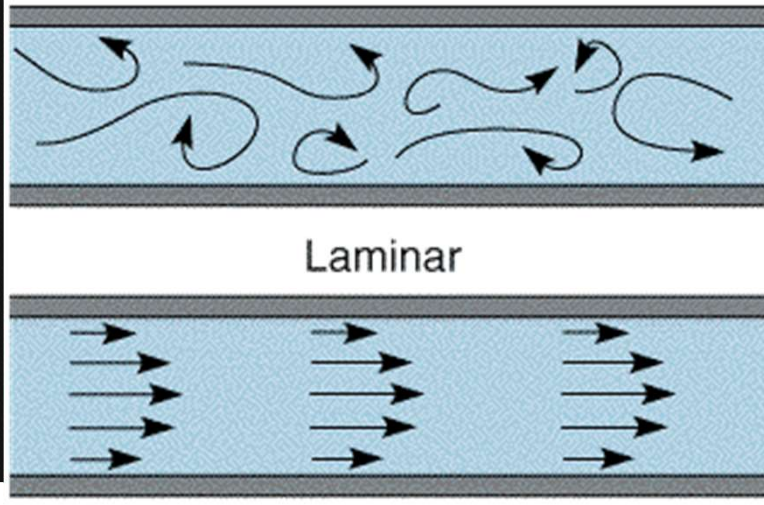
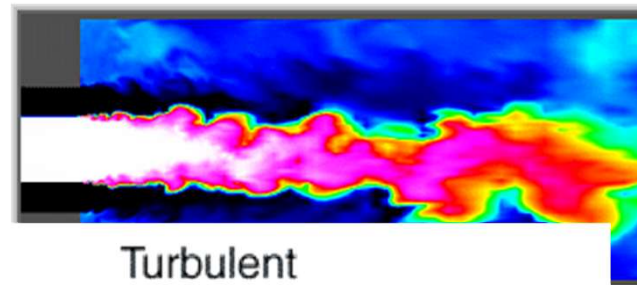


Verallgemeinerung

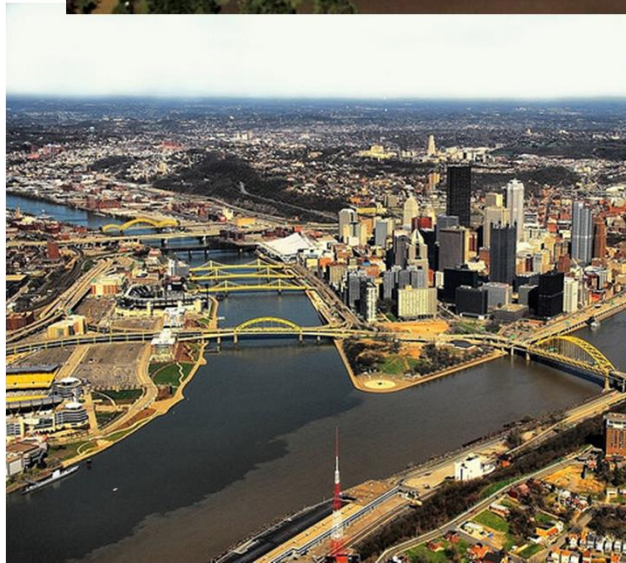
I. Strömung von Gasen und Flüssigkeiten in Röhren (Volumentransport)

1. Grundbegriffe

- Stromlinien
- Strömungsarten:



Beispiele für laminare Strömung



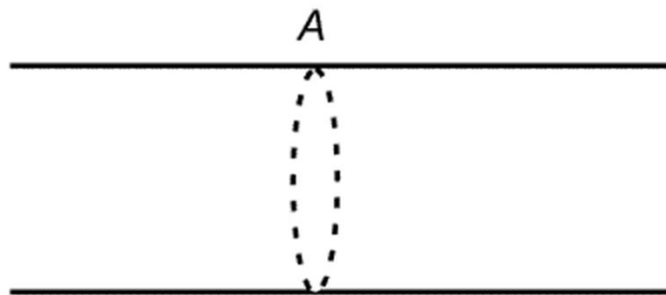
Allgemeine Gültigkeitsvoraussetzungen:

- inkompressible Gas/Flüssigkeit
- laminare Strömung

Im Weiteren werden Flüssigkeiten behandelt, die Begriffe und Gesetze gelten aber auch für Gase.

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

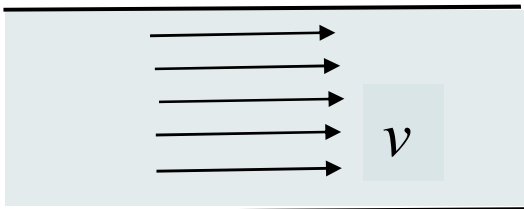
■ Volumenstromdichte (J): $J = \frac{\Delta V}{A \cdot \Delta t} \quad \left(\frac{\text{m}}{\text{s}} \right)$



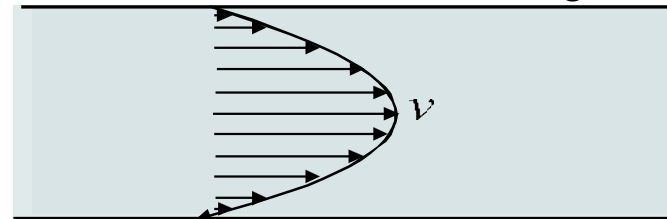
? $I =$

? $J =$

ideale Flüssigkeit
= ohne innere Reibung

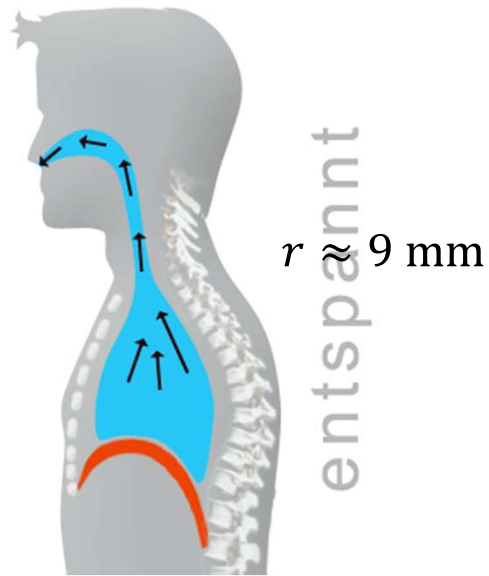


reelle Flüssigkeit
= mit innerer Reibung



Anwendung: Atmung

- Volumenstromstärke und Strömungsgeschwindigkeit in der Luftröhre in Ruhe?

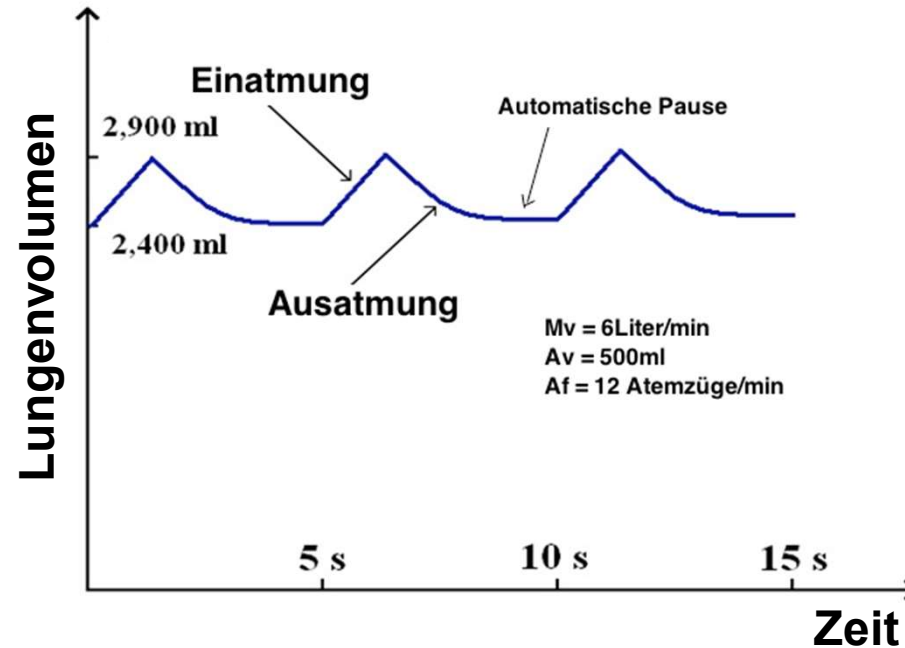


Im Durchschnitt:

$$\bar{I} = \frac{\Delta V}{\Delta t} \approx 6 \frac{\text{Liter}}{\text{min}}$$

Maximal:

$$I_{\max} =$$

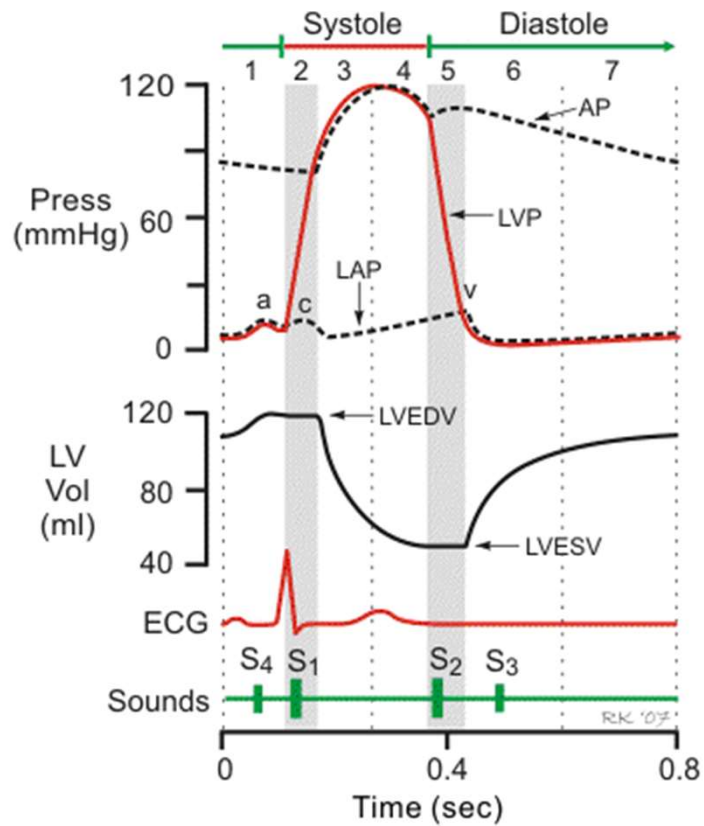


Atemminutenvolumen (AMV)

$$v_{\max} =$$

Anwendung: Blutströmung

- Volumenstromstärke und Strömungsgeschwindigkeit in der Aorta?



Im Durchschnitt:

$$\bar{I} = \frac{\Delta V}{\Delta t} =$$

$$\bar{v} =$$

Maximal:

$$I_{\max} =$$

$$v_{\max} =$$

$$r \approx 12 \text{ mm}$$

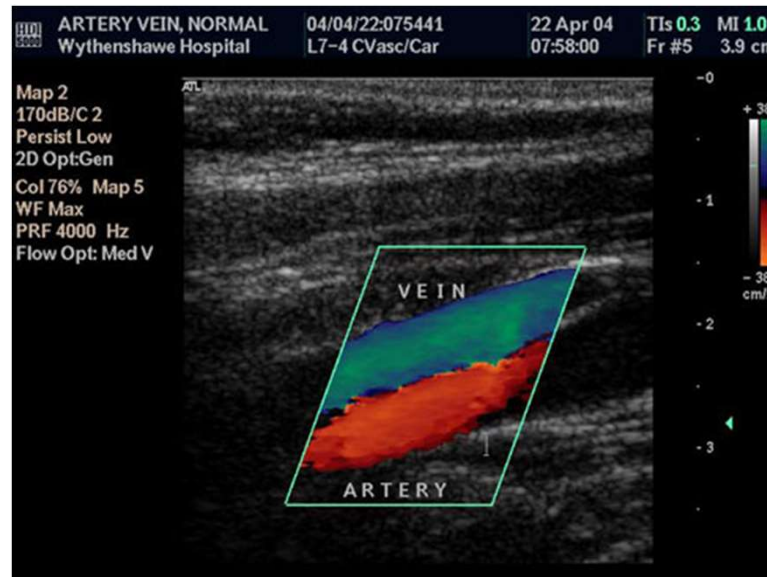
Anwendung: Blutströmung

- Messmethoden der Volumenstromstärke:

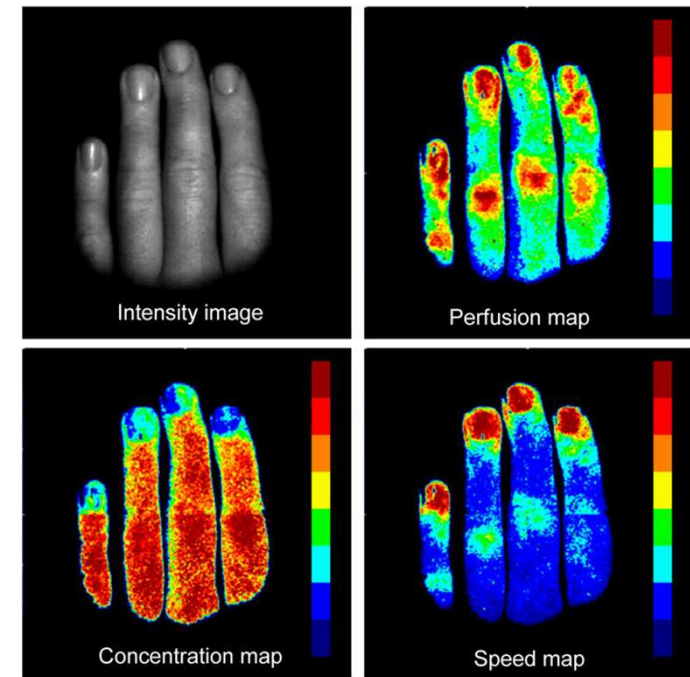
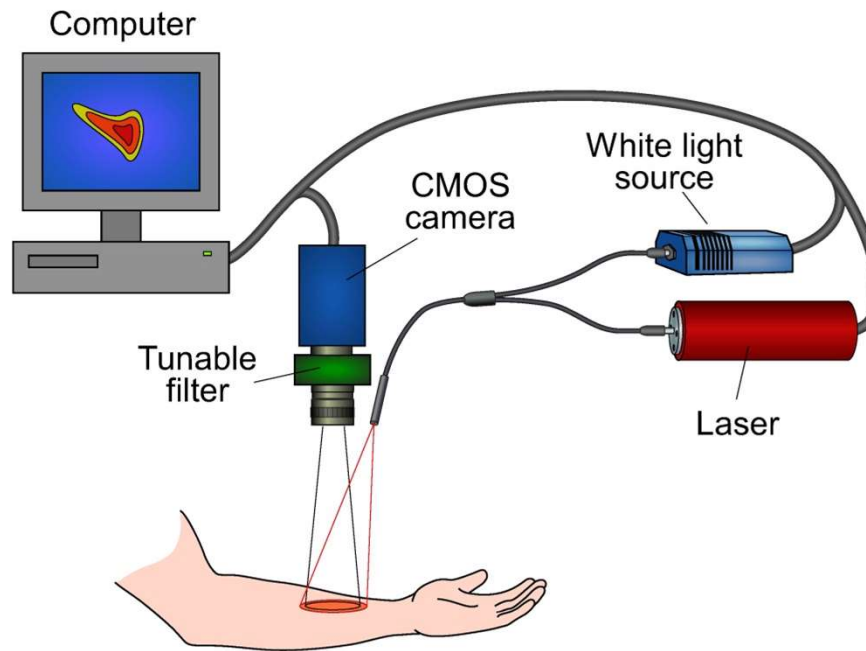
□ Impedanz-Methoden

(siehe im später bei elektrischen Vorgänge.)

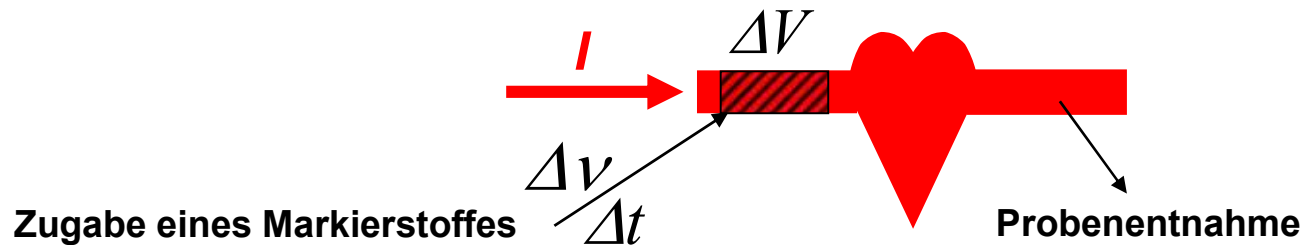
□ Ultraschall-Doppler



❑ Laser-Doppler



❑ Dilutionsmethoden

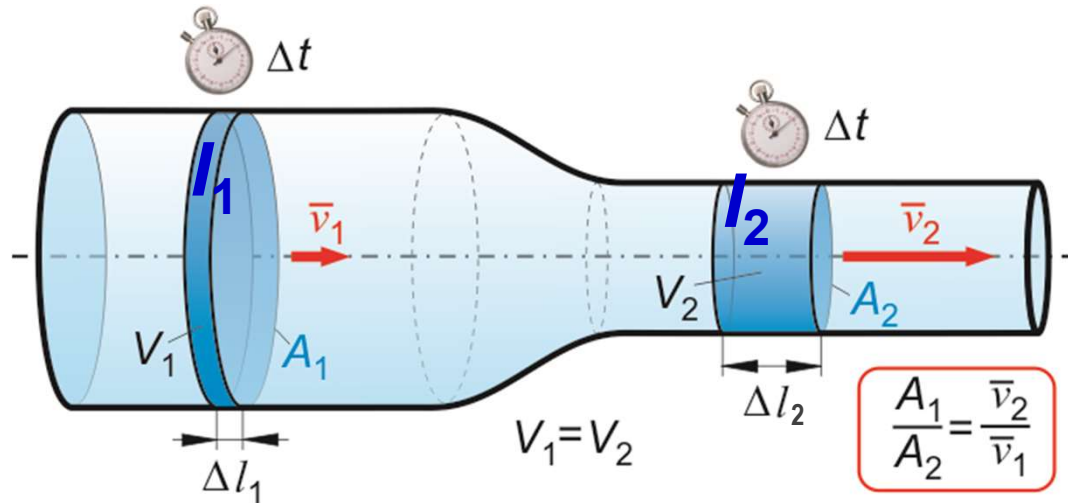


- Fluoreszenzfarbstoffe
- Radioisotope
- kalte phys. Salzlösung,
- ...

Die Konzentration des Markierstoffes in der Probe:

$$c = \frac{\Delta v}{\Delta V} = \frac{\Delta v}{I \cdot \Delta t} \Rightarrow I = \frac{\Delta v}{c \cdot \Delta t}$$

2. Kontinuitätsgleichung



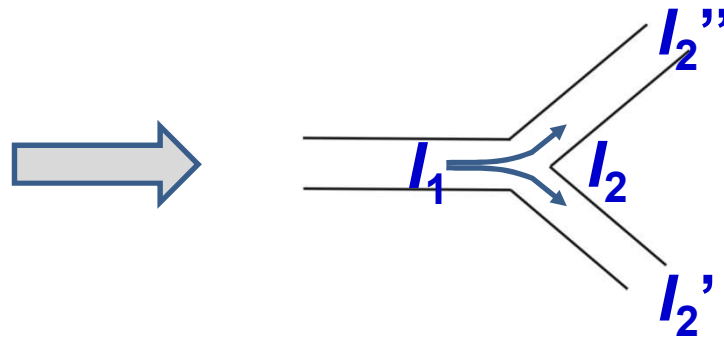
$$I_1 = I_2$$

$$A_1 \cdot \bar{v}_1 = A_2 \cdot \bar{v}_2$$

D. h. die Strömung wird in engeren Rohrabschnitten schneller und umgekehrt.

Die Gleichung gilt nur für:

- starres Rohr *oder* stationäre Strömung*
(* stationäre Strömung:
in der Zeit sich nicht ändernde Strömung)



$$I_1 = I_2 = I_2' + I_2''$$

$$A_1 \cdot \bar{v}_1 = A_2' \cdot \bar{v}_2' + A_2'' \cdot \bar{v}_2''$$

(Siehe kirchhoffsche Knotenregel in der Elektrizitätslehre!)

Kontinuitätsgleichung im Blutkreislauf

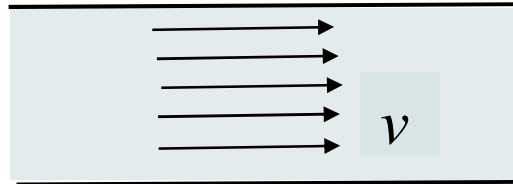


| Gefäß | Aorta | Arterien | Arteriolen | Kapillaren | Venolen | Venen | Hohlvenen |
|--------|-------|----------|------------|------------|---------|-------|-----------|
| R (cm) | 1,2 | 0,2 | 0,0015 | 0,00035 | 0,001 | 0,25 | 1,7 |

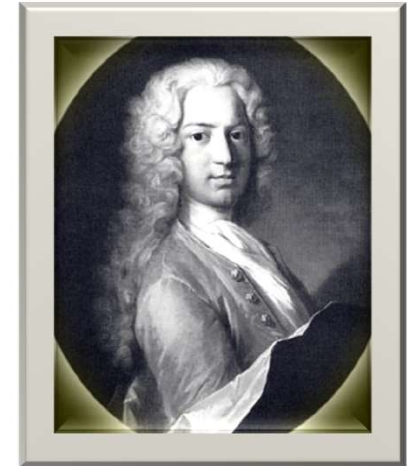
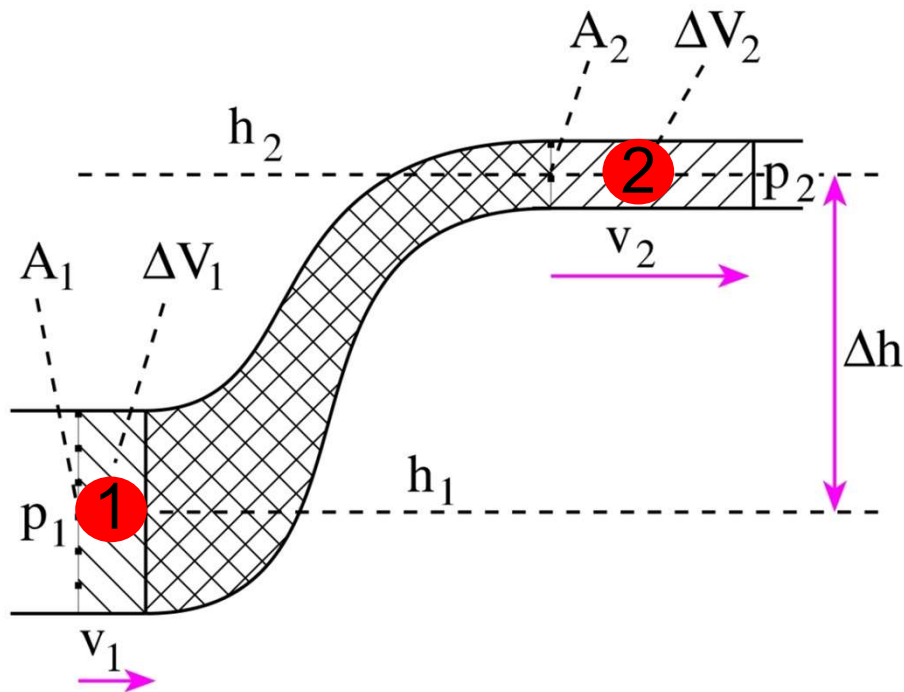
3. Strömung von idealen Flüssigkeiten

- Ideale Flüssigkeit: keine innere Reibung

- Geschwindigkeitsprofil:



- Bernoullische Gleichung:



Daniel Bernoulli
1700-1782
Mathematiker
Physiker
Anatom

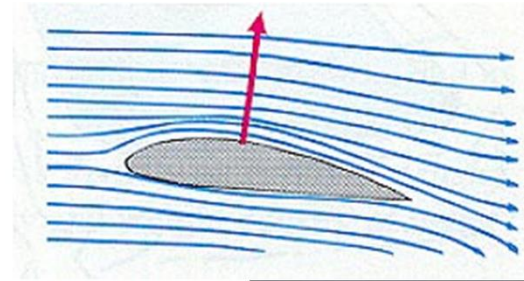
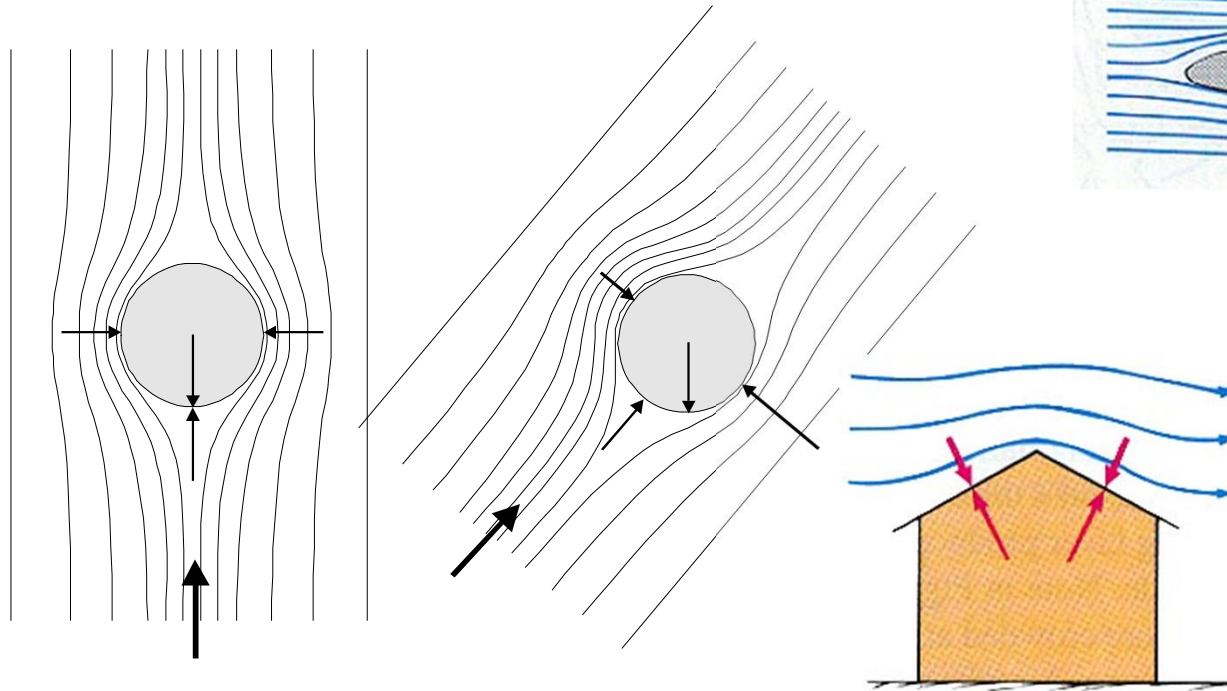
Energieerhaltung \Rightarrow

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

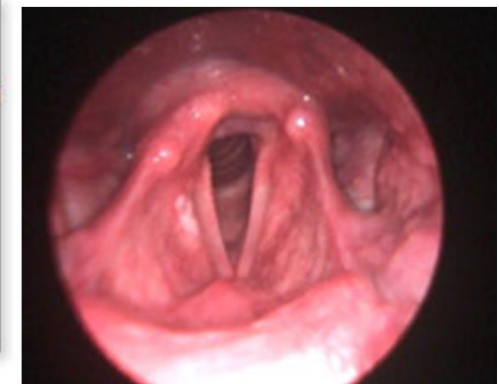
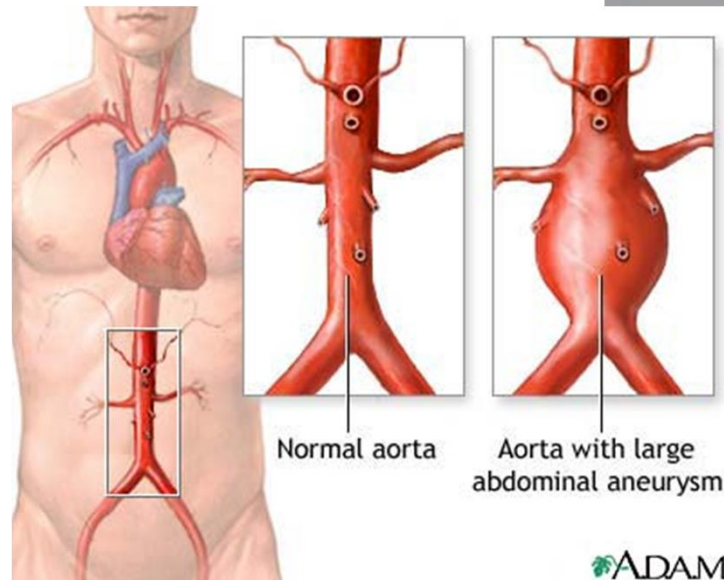
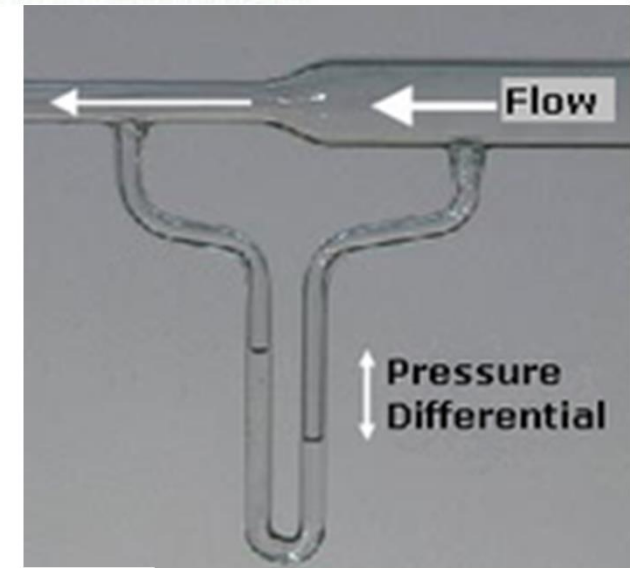
Die Gleichung gilt nur für:

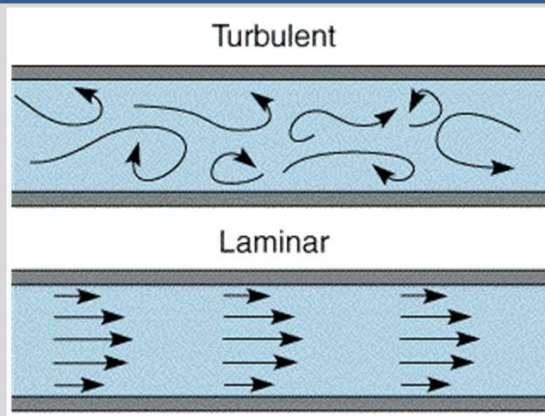
- starres Rohr *oder* stationäre Strömung
- ideale Flüssigkeit

Anwendungen der bernoullischen Gleichung



Experiment

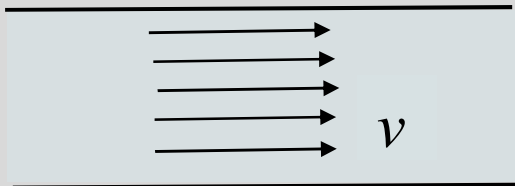




Volumenstromstärke (I): $I = \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad \left(\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right)$

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

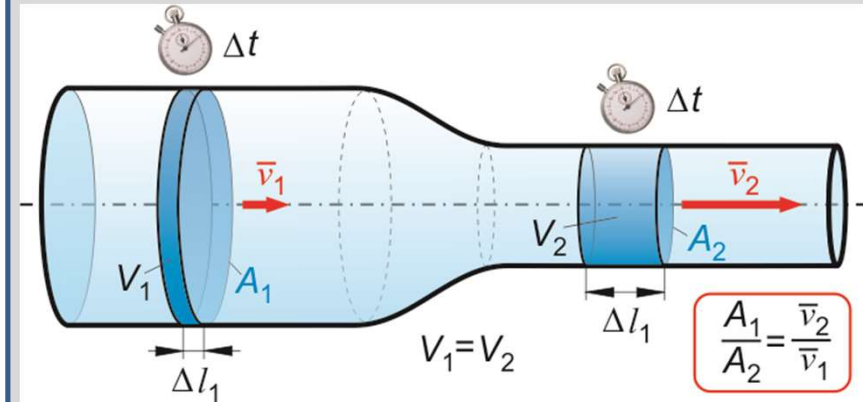
Ideale Flüssigkeit (ohne innere Reibung)



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 reellen Flüssigkeiten

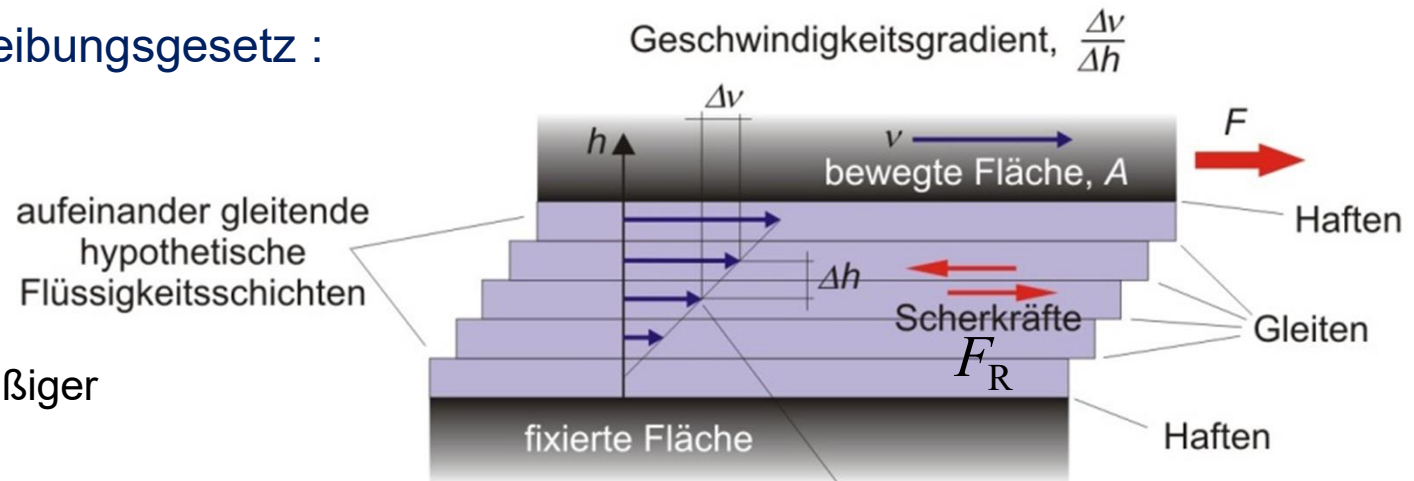
- Reelle Flüssigkeit: innere Reibung ist nicht vernachlässigbar
- Newtonsches Reibungsgesetz :

Bei gleichmäßiger Bewegung:

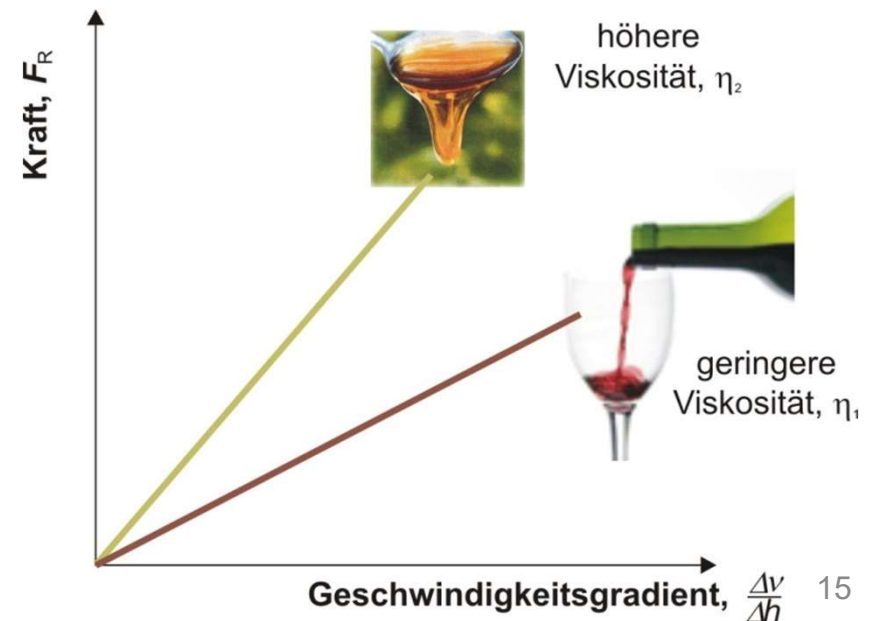
$$F = F_R = \eta \cdot A \cdot \frac{\Delta v}{\Delta h}$$

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

Geschwindigkeitsgradient

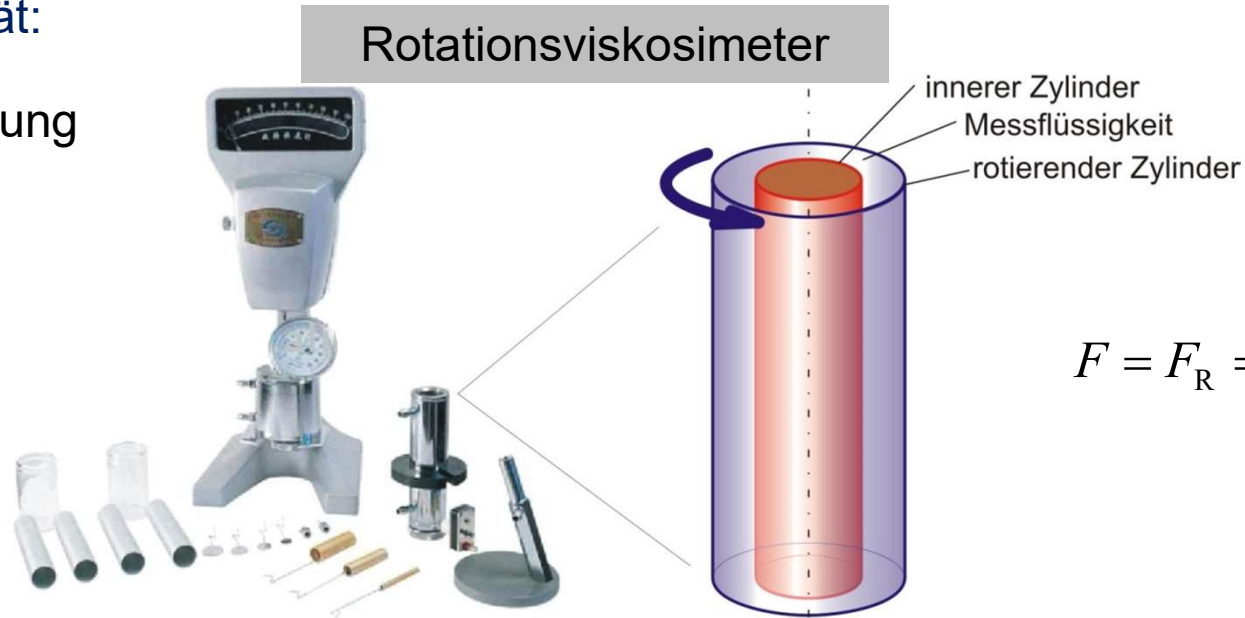


Geschwindigkeit der Flüssigkeitsschicht im Verhältnis zur stehenden Fläche



- Viskosität:

- Messung

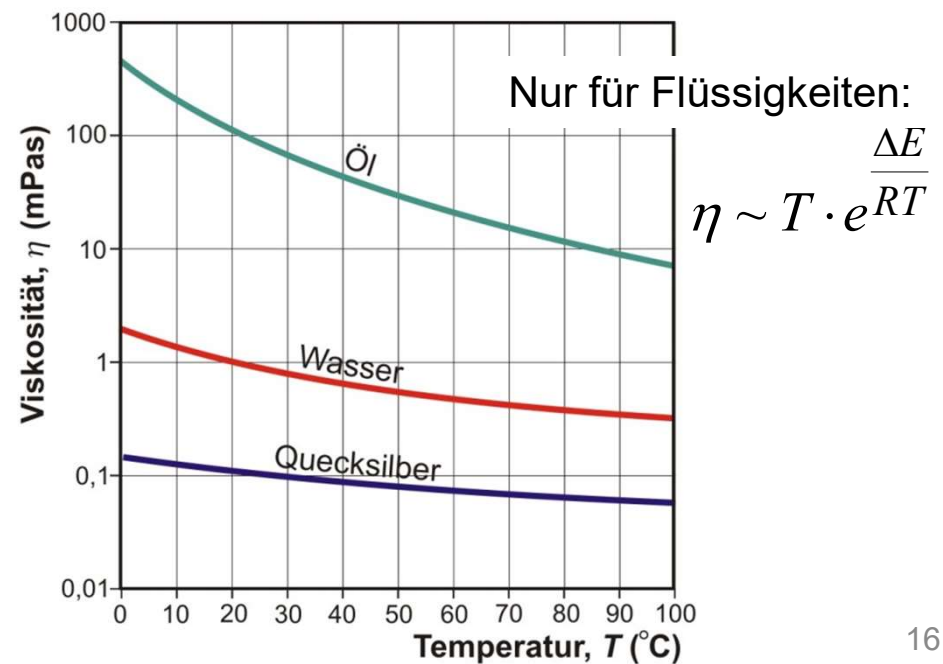


$$F = F_R = \eta \cdot A \cdot \frac{\Delta v}{\Delta h}$$

- stoffspezifisch

| 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 |

- temperaturabhängig



- Viskosität: ➤ geschwindigkeitsgradientabhängig

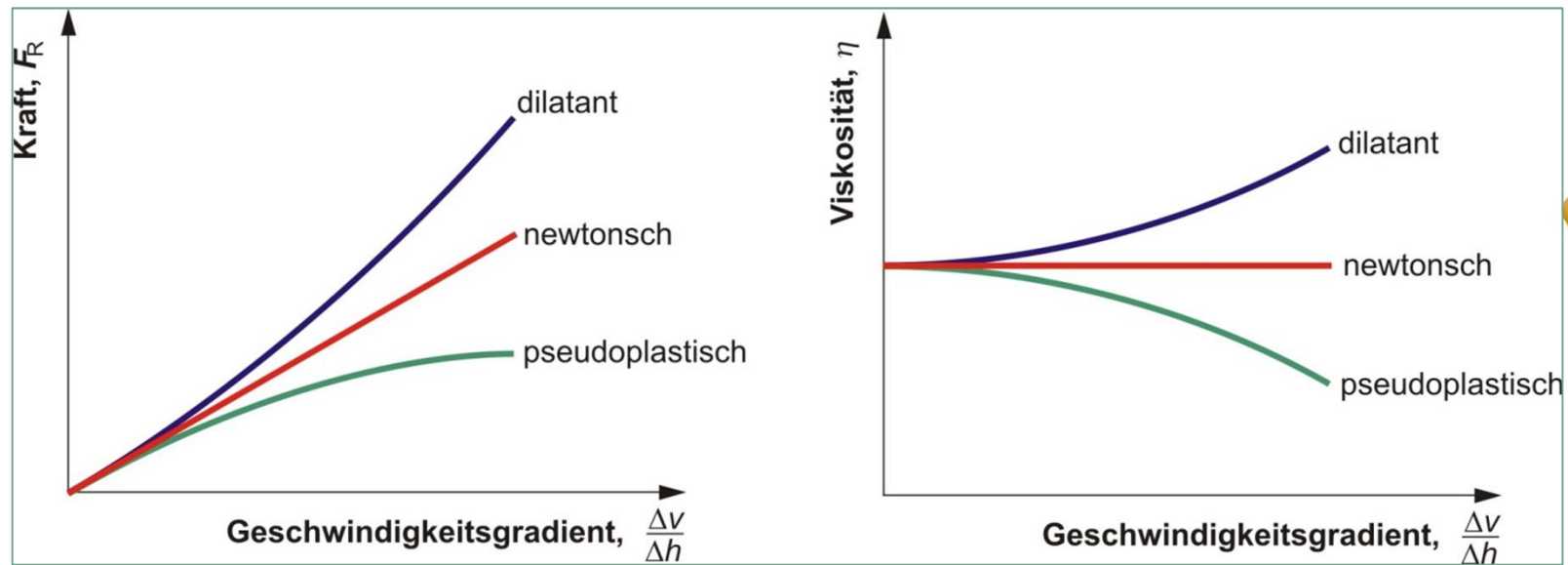
Einteilung der Flüssigkeiten

newtonsche (normale) Flüssigkeit

nicht-newtonsche
(anomale) Flüssigkeit

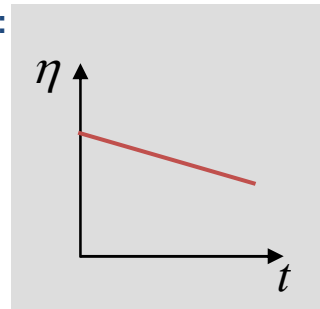
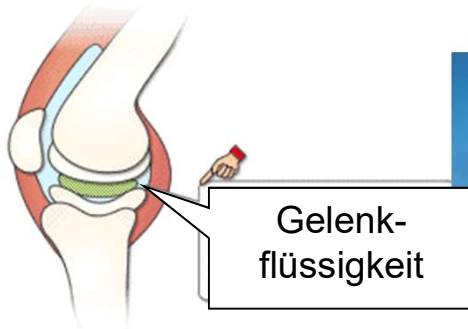
dilatante Fl.

pseudoplastische Fl.

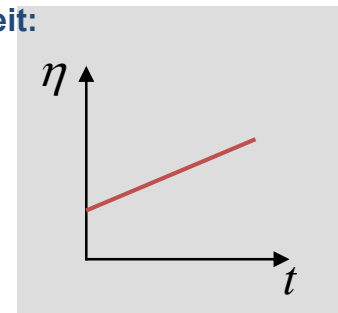


- zeitabhängig

Thixotrope Flüssigkeit:



Rheopexe Flüssigkeit:



Bernoullische Gleichung

Bernoulli's Principle Demo: Levitated Balls

<https://www.youtube.com/watch?v=Ye3QPgDdJNg>

Bernoulli's Principle Demo: Paper on Table

<https://www.youtube.com/watch?v=BWvGE238DdE>

Über nicht-newtonsche Flüssigkeiten

Fun with Non-Newtonian Fluid

<https://www.youtube.com/watch?v=RIUEZ3AhrVE>

A pool filled with non-newtonian fluid

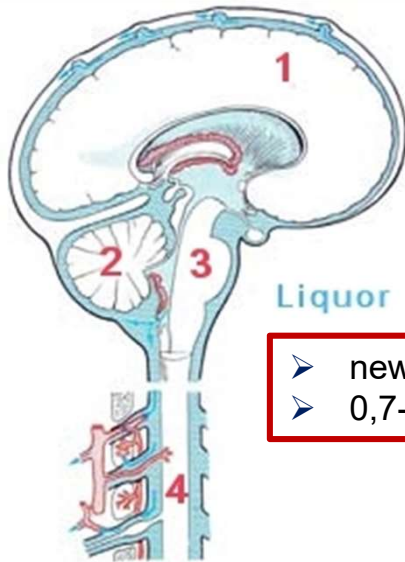
<https://www.youtube.com/watch?v=f2XQ97XHjVw> (von 1:30 an)

What Kind of Liquid Lets You Run Across Its Surface?

<https://www.youtube.com/watch?v=JJfppydyGHw>

Viskosität der Körperflüssigkeiten

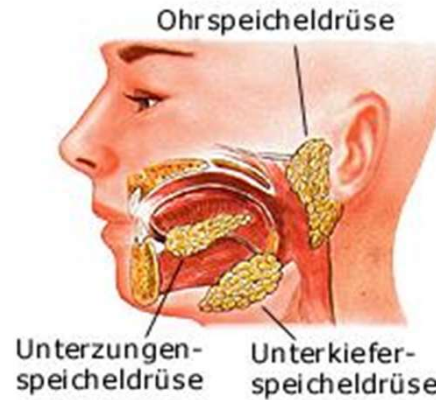
Liquor (Gehirn-Rückenmarks-Flüssigkeit, Cerebrospinalflüssigkeit)



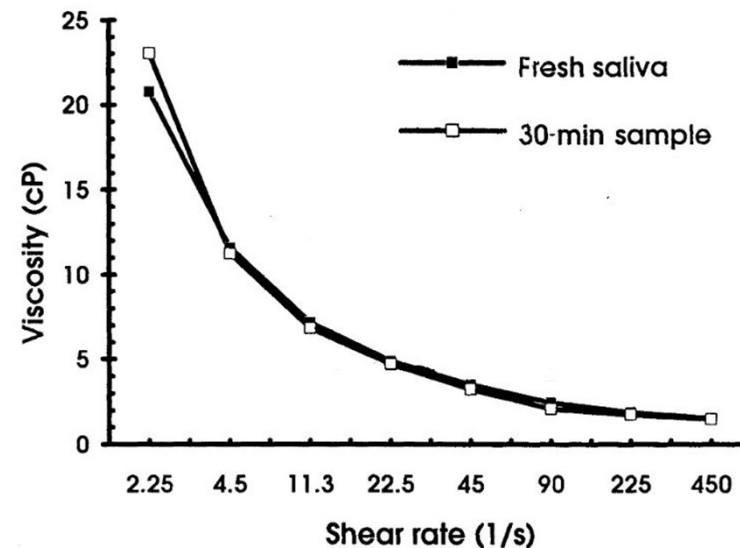
1. Großhirn
2. Kleinhirn
3. Hirnstamm
4. Rückenmark

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

Speichel

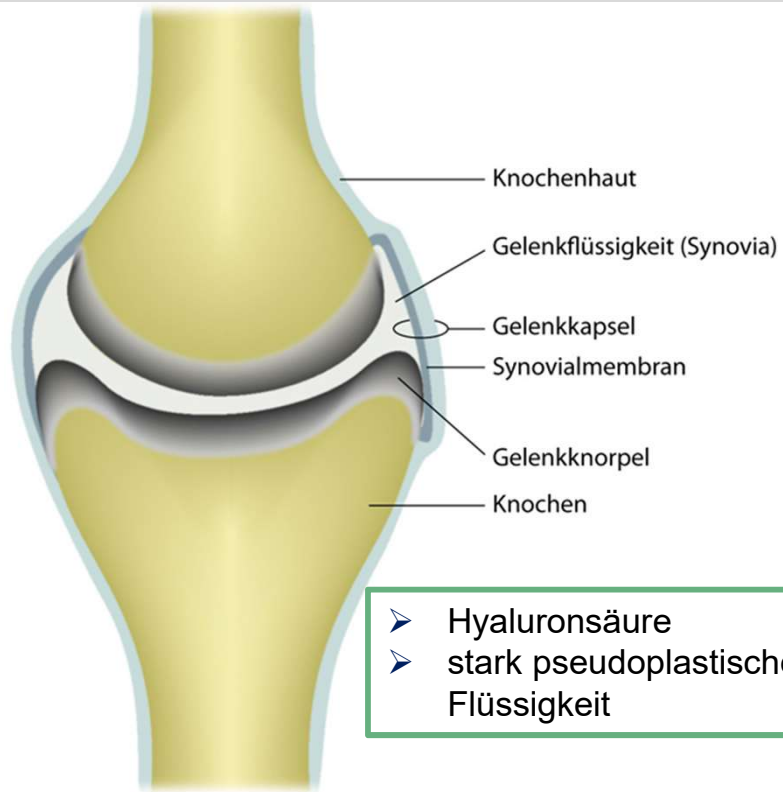


- Mucin
- pseudoplastische Flüssigkeit



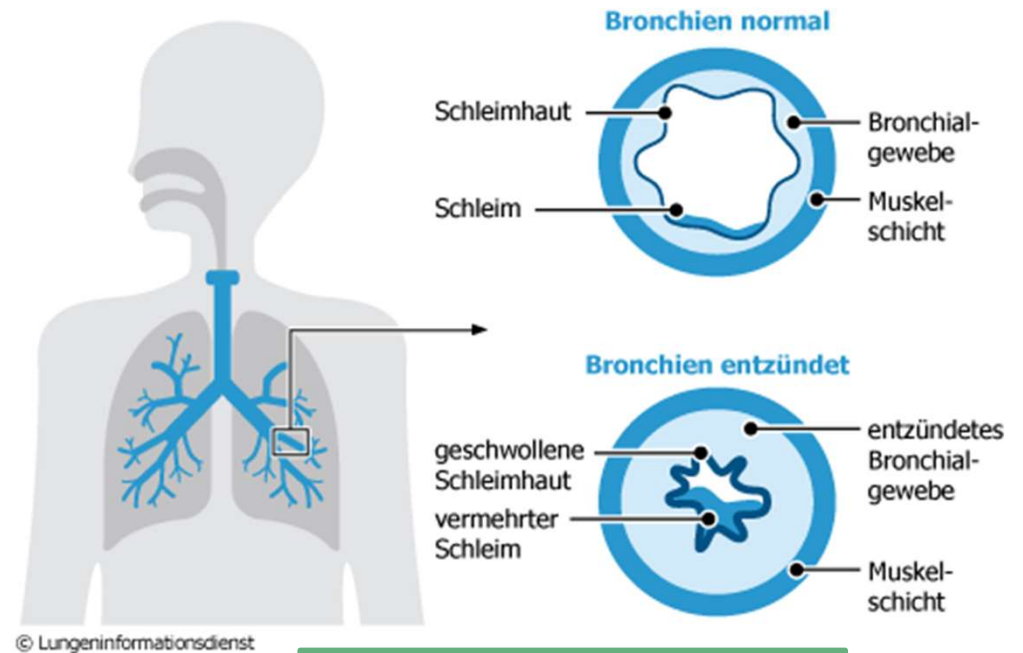
Nach Panu J. F. Rantonen & Jukka H. Meurman (1998) Viscosity of whole saliva, Acta Odontologica Scandinavica, 56:4, 210-214

Gelenkflüssigkeit



- Hyaluronsäure
- stark pseudoplastische Flüssigkeit

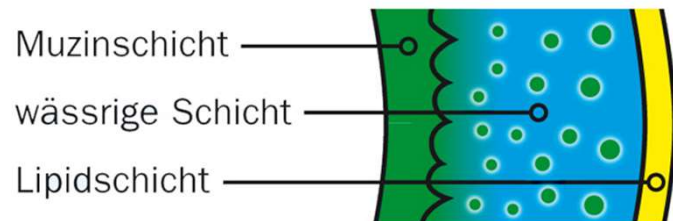
Bronchialschleim



- pseudoplastische Flüssigkeit

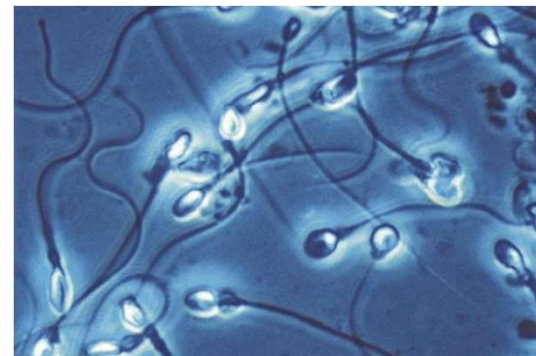
Träne

Aufbau des Tränenfilms



- pseudoplastische Flüssigkeit
- 1-10 mPas

Sperma



- pseudoplastische Flüssigkeit

Viskosität des Blutes

- bei Körpertemperatur und bei physiologischen Strömungsverhältnissen: 2-10 mPa·s
- hängt von der **Temperatur** ab (wie bei jeder Flüssigkeit)
- hängt sehr stark von dem **Hämatokritwert** des Blutes ab
- hängt vom **Geschwindigkeitsgradienten** ab, und zwar **pseudoplastisch**
- hängt vom **Blutgefäßdurchmesser** ab, in kleineren Gefäßen (< 1 mm) ist die Viskosität kleiner (Fahraeus-Lindqvist-Effekt)

