

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

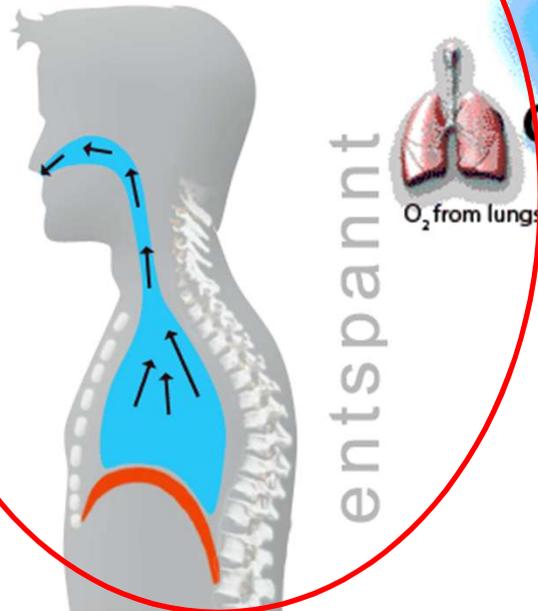
- Geschwindigkeitsprofil
- Bernoullische Gleichung

4. Strömung von reellen Flüssigkeiten

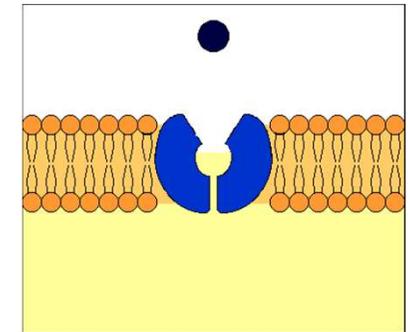
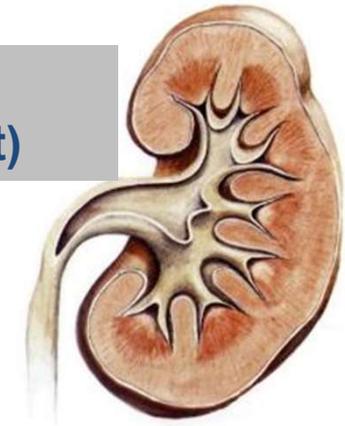
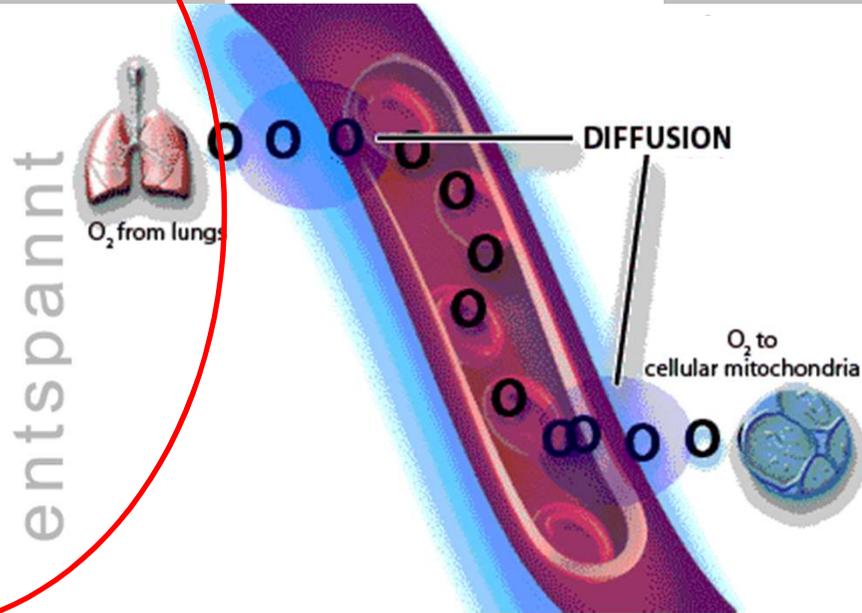
- Newtonsches Reibungsgesetz
- Viskosität  Anwendung: Viskosität von Körperflüssigkeiten

Transportprozesse

**Strömung
(Volumentransport)**



**Diffusion
(Stofftransport)**



**Elektrischer Strom
(el. Ladungstransport)**



**Wärmeleitung
(Energietransport)**

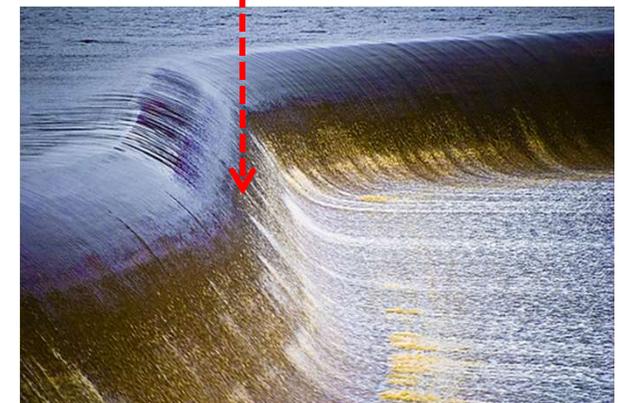
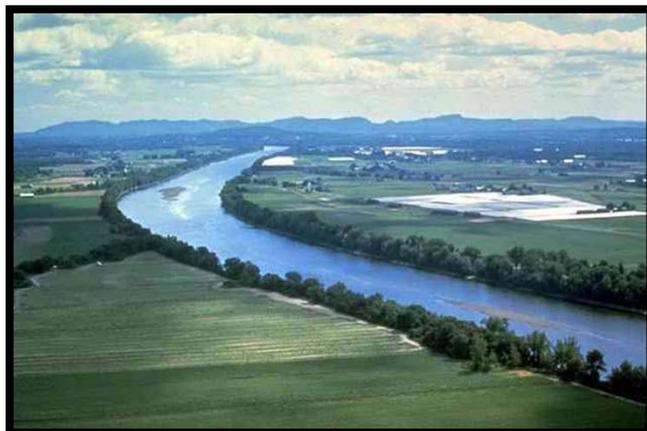
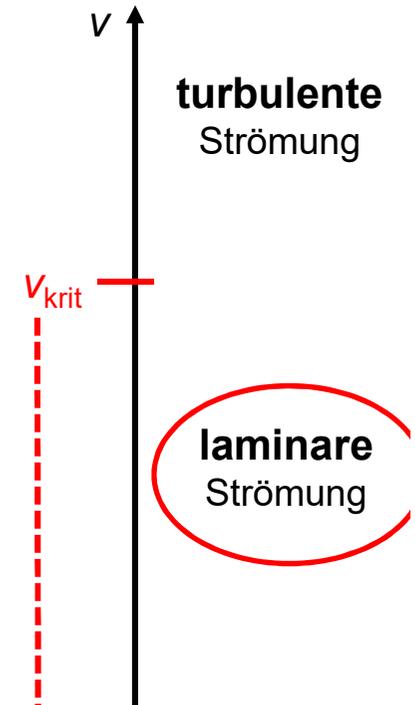
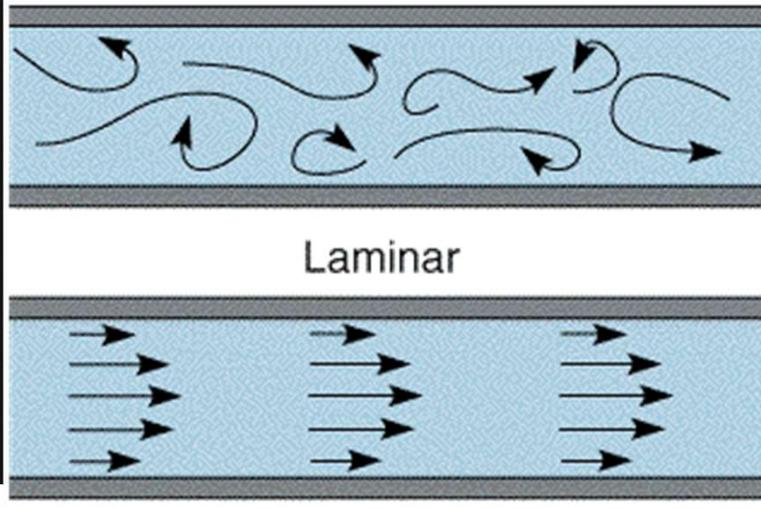
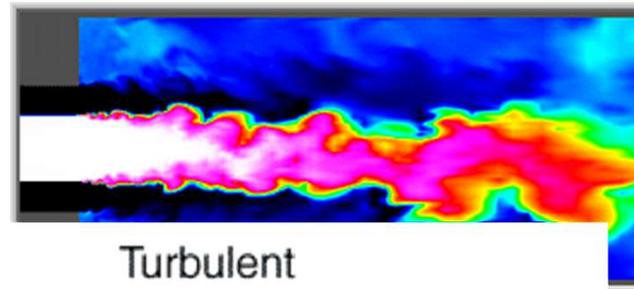


Verallgemeinerung

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

1. Grundbegriffe

- Stromlinien
- Strömungsarten:



Beispiele für laminare Strömung

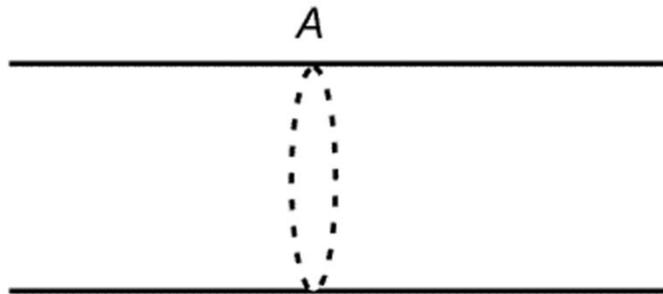


Allgemeine Gültigkeitsvoraussetzungen: • inkompressible Gas/Flüssigkeit
• laminare Strömung

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

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

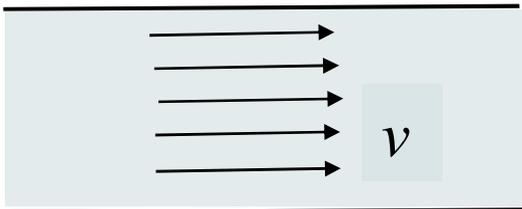
▪ Volumenstromdichte (J): $J = \frac{\Delta V}{A \cdot \Delta t}$ $\left(\frac{\text{m}}{\text{s}} \right)$



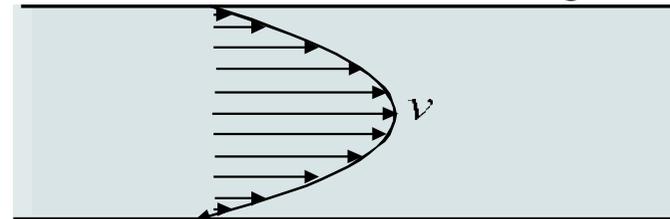
⊕ $I =$

⊕ $J =$

ideale Flüssigkeit
= ohne innere Reibung

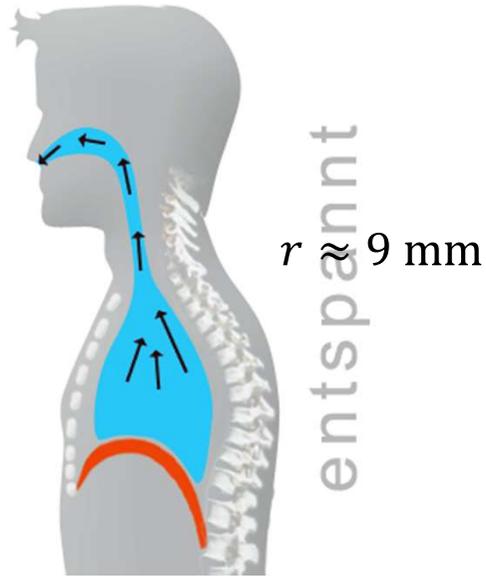


reelle Flüssigkeit
= mit innerer Reibung



Anwendung: Atmung

- Volumenstromstärke und Strömungsgeschwindigkeit in der Luftröhre in Ruhe?



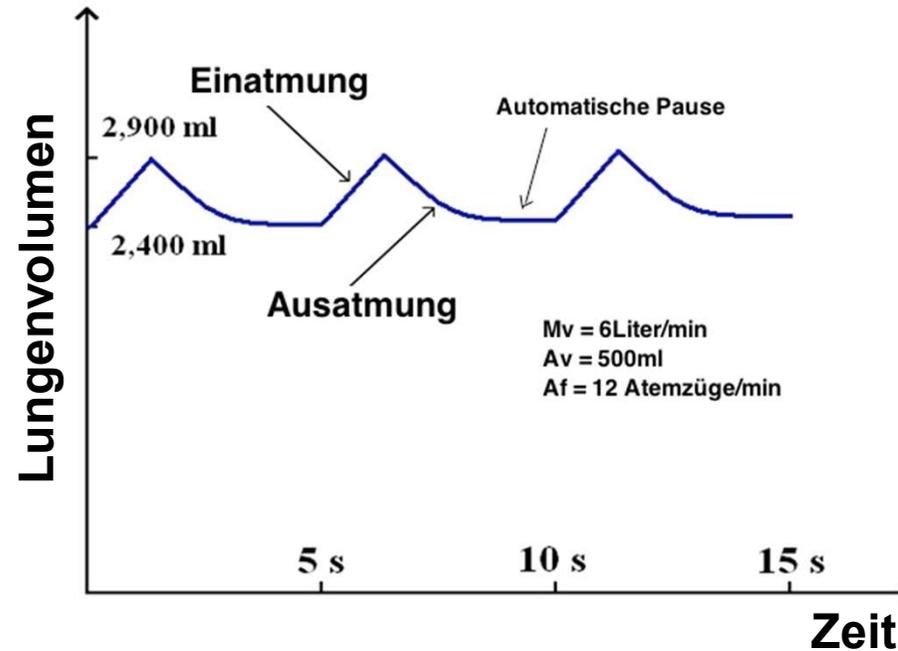
Im Durchschnitt:

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

Maximal:

$$I_{\max} =$$

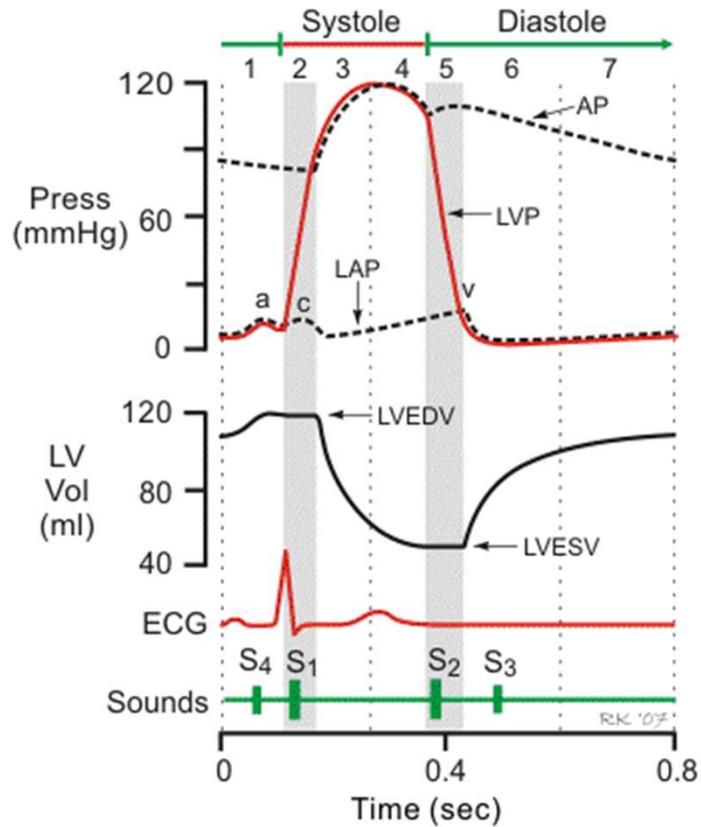
$$v_{\max} =$$



Atemminutenvolumen (AMV)

Anwendung: Blutströmung

- Volumenstromstärke und Strömungsgeschwindigkeit in der Aorta?



Im Durchschnitt:

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

$$\bar{v} =$$

Maximal:

$$I_{\max} =$$

$$v_{\max} =$$

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

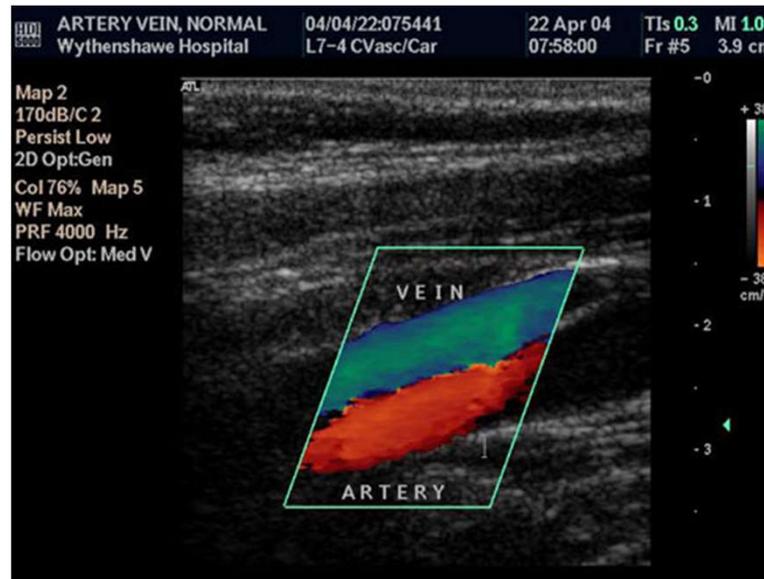
Anwendung: Blutströmung

- Messmethoden der Volumenstromstärke:

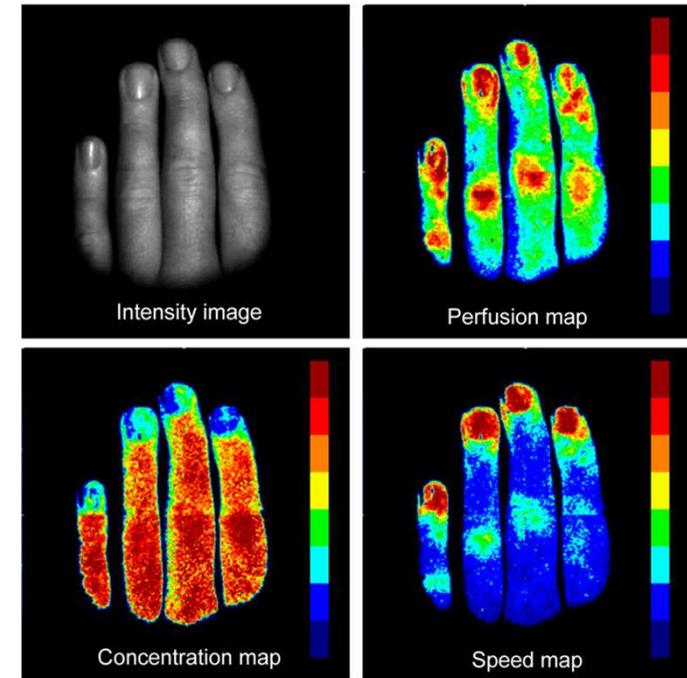
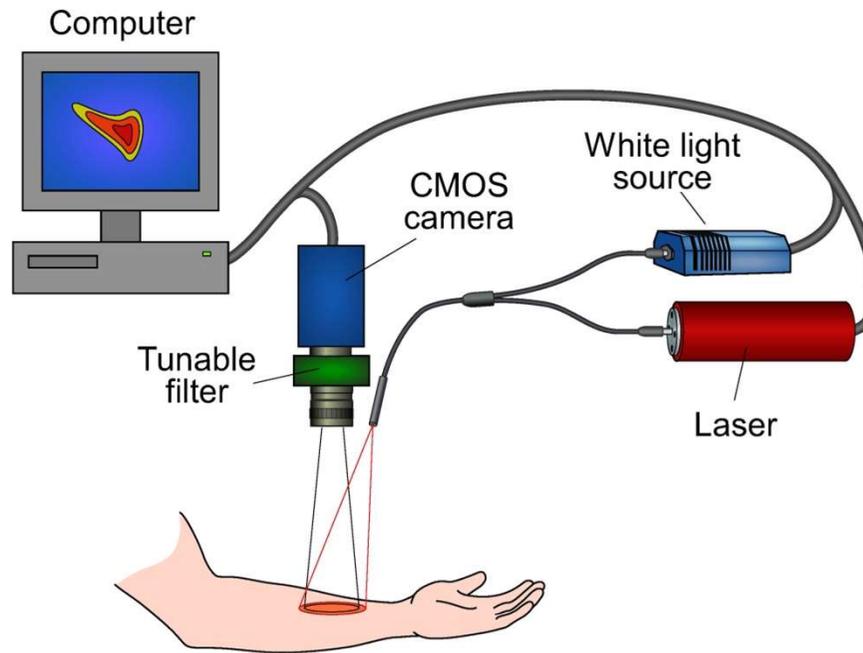
□ Impedanz-Methoden

(siehe im später bei elektrischen Vorgänge.)

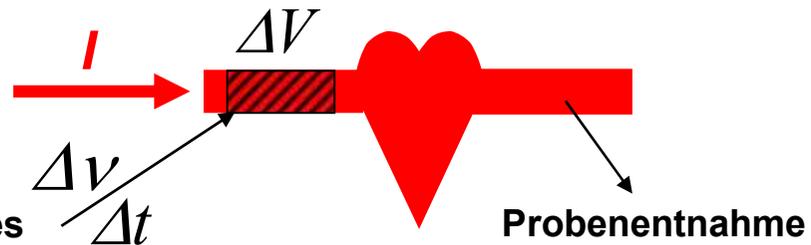
□ Ultraschall-Doppler



☐ Laser-Doppler



☐ Dilutionsmethoden



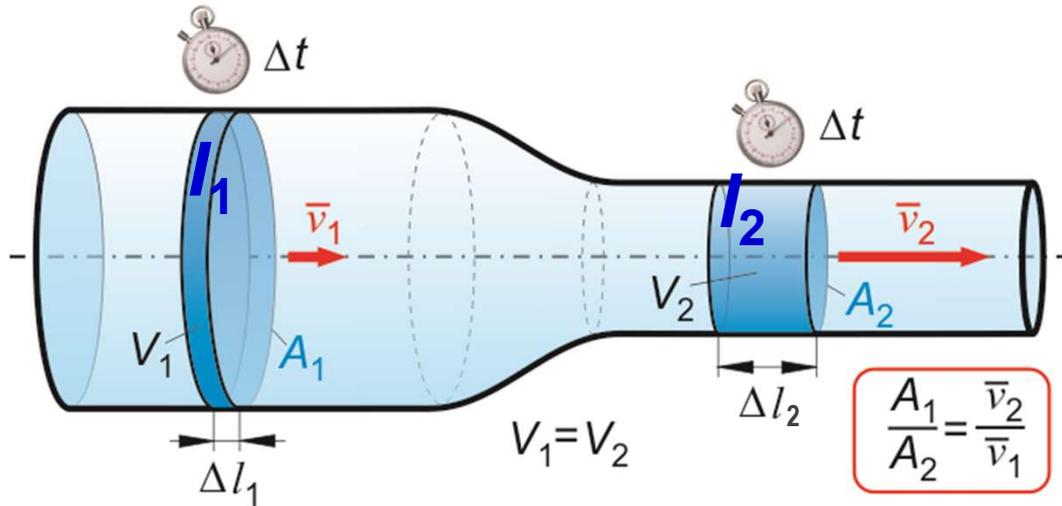
Zugabe eines Markierstoffes

- 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



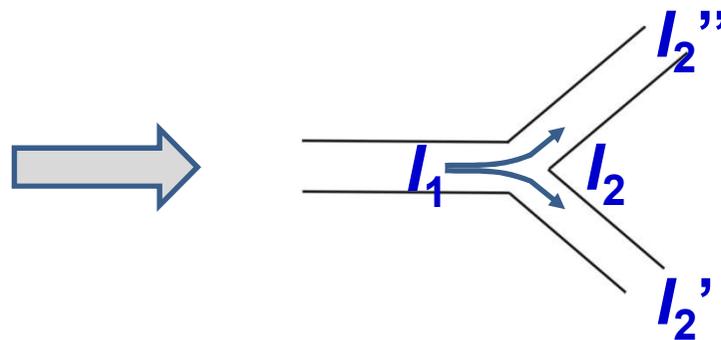
$$I_1 = I_2$$

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

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

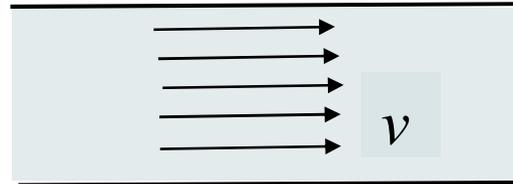


Gefäß	Aorta	Arterien	Arteriolen	Kapillaren	Venolen	Venen	Hohlvenen
R (cm)	1,2	0,2	0,0015	0,00035	0,001	0,25	1,7

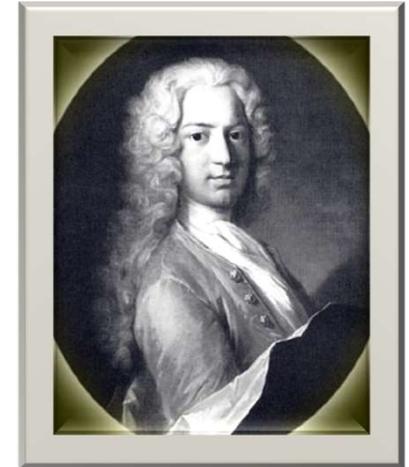
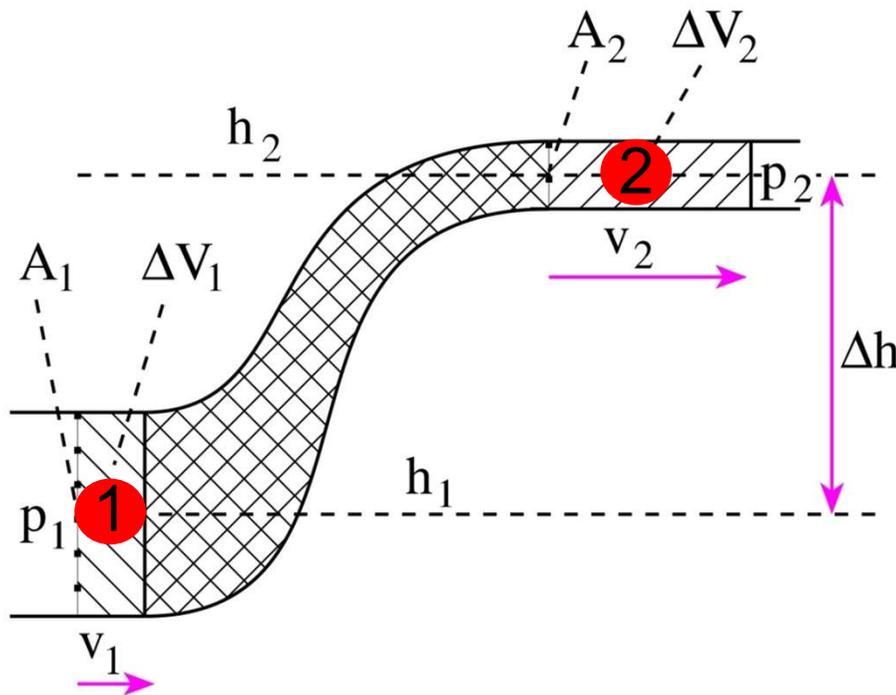
3. Strömung von idealen Flüssigkeiten

- Ideale Flüssigkeit: keine innere Reibung

- Geschwindigkeitsprofil:



- Bernoullische Gleichung:



Daniel Bernoulli
1700-1782
Mathematiker
Physiker
Anatom

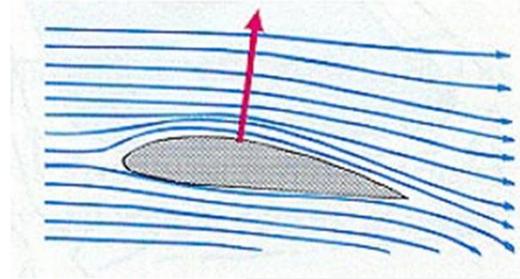
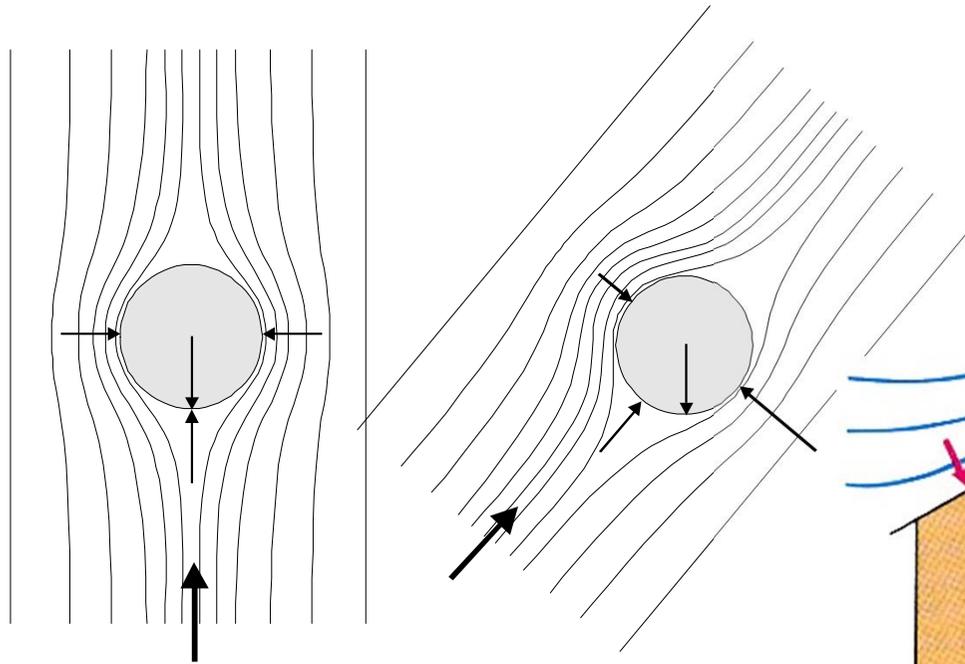
Energieerhaltung \Rightarrow

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

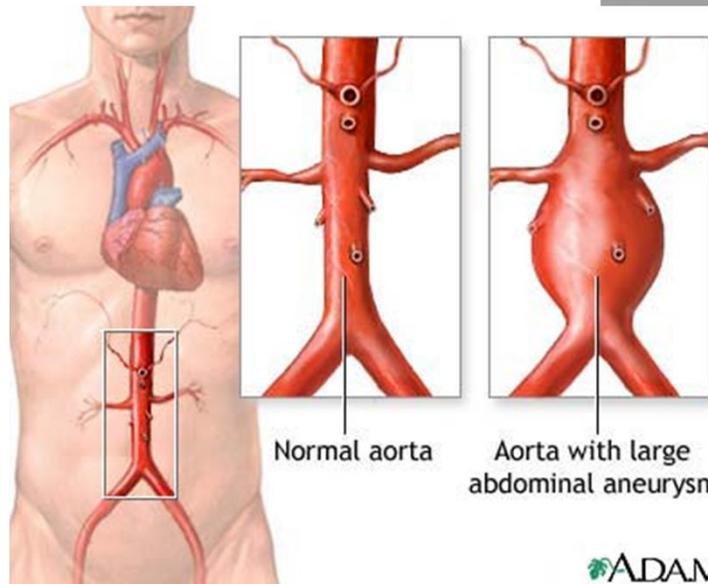
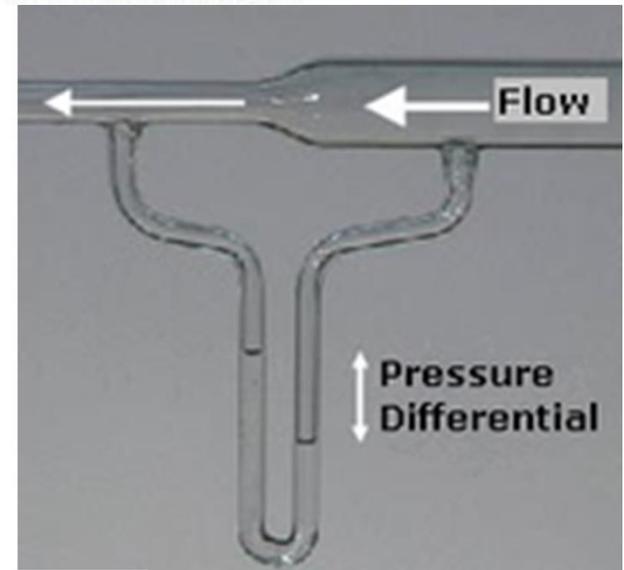
Die Gleichung gilt nur für:

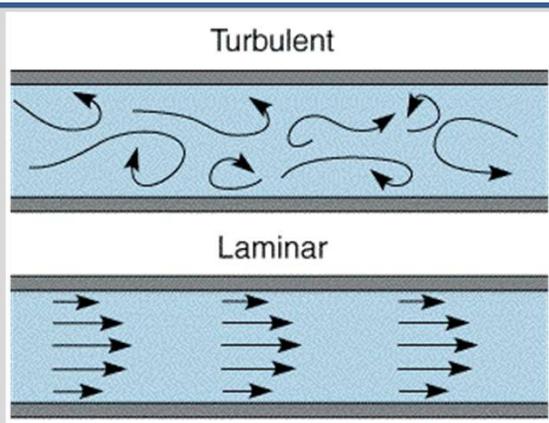
- starres Rohr *oder* stationäre Strömung
- ideale Flüssigkeit

Anwendungen der bernoullischen Gleichung



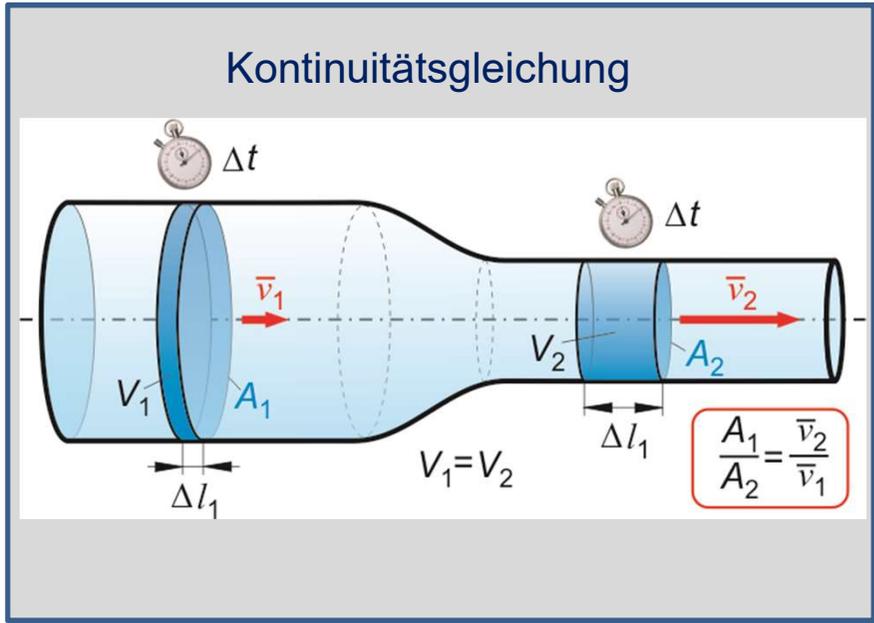
Experiment



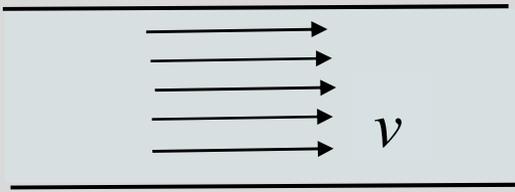


Volumenstromstärke (I): $I = \frac{\Delta V}{\Delta t} \left(\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right)$

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



Ideale Flüssigkeit (ohne innere Reibung)



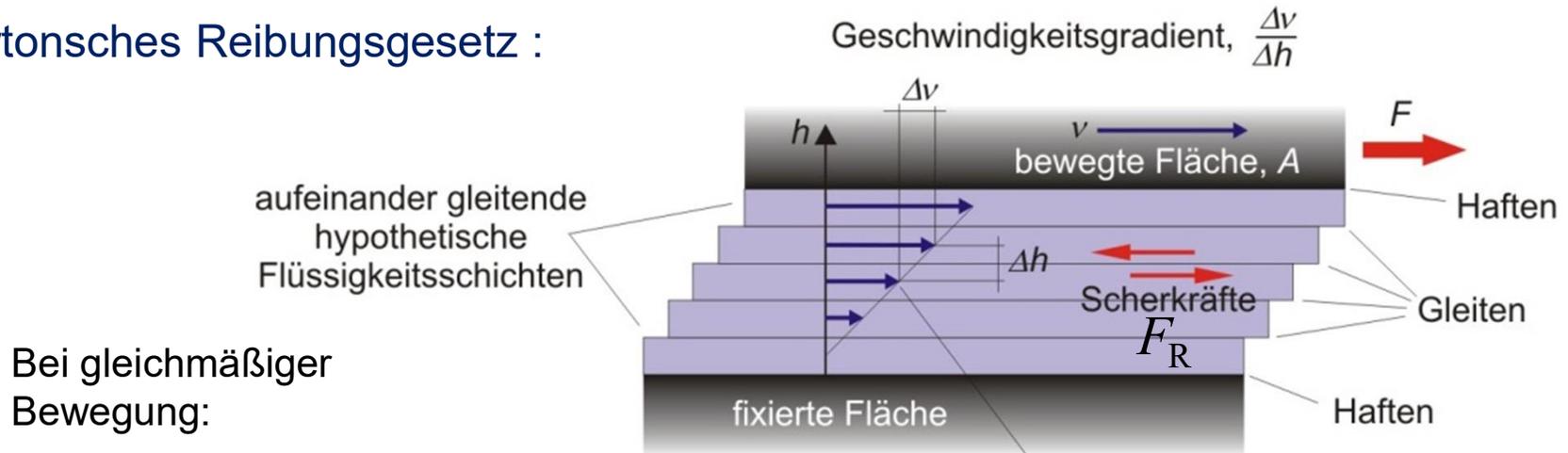
Bernoullische Gleichung

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

- 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: innere Reibung ist nicht vernachlässigbar
- Newtonsches Reibungsgesetz :

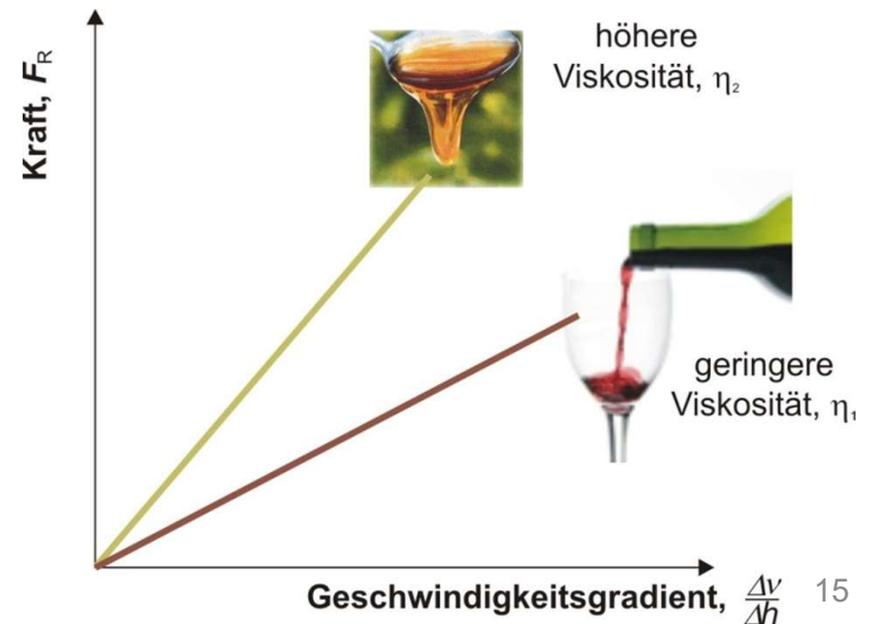


$$F = F_R = \eta \cdot A \cdot \frac{\Delta v}{\Delta h}$$

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

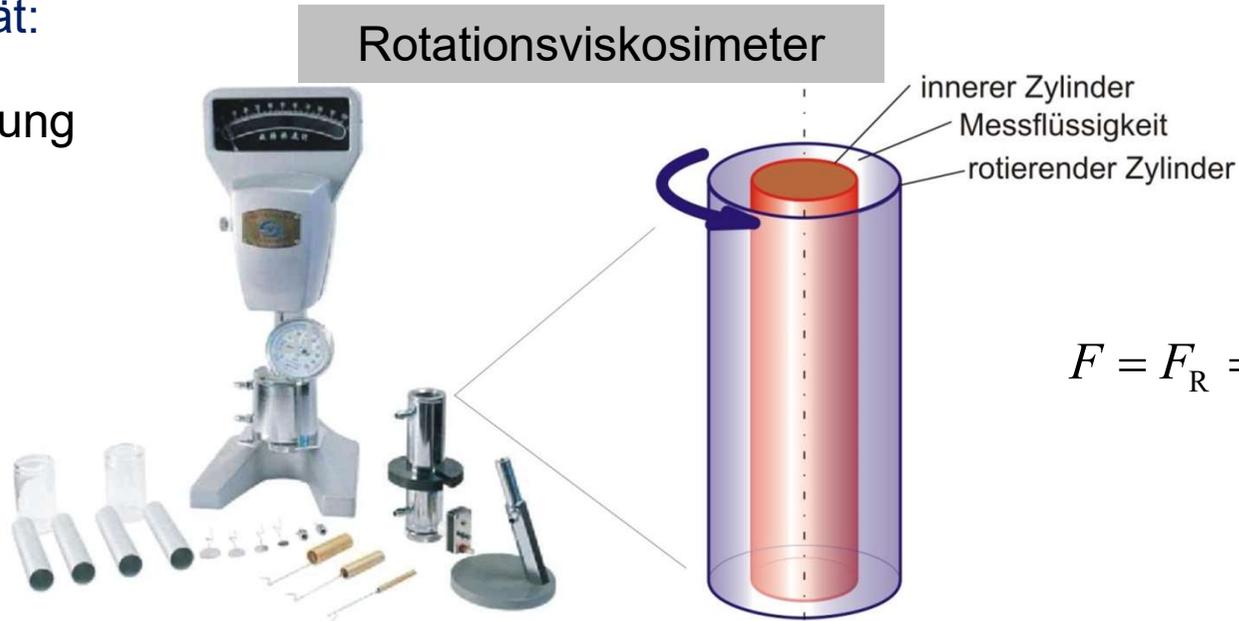
Geschwindigkeitsgradient

Geschwindigkeit der Flüssigkeitsschicht im Verhältnis zur stehenden Fläche



■ Viskosität:

➤ Messung

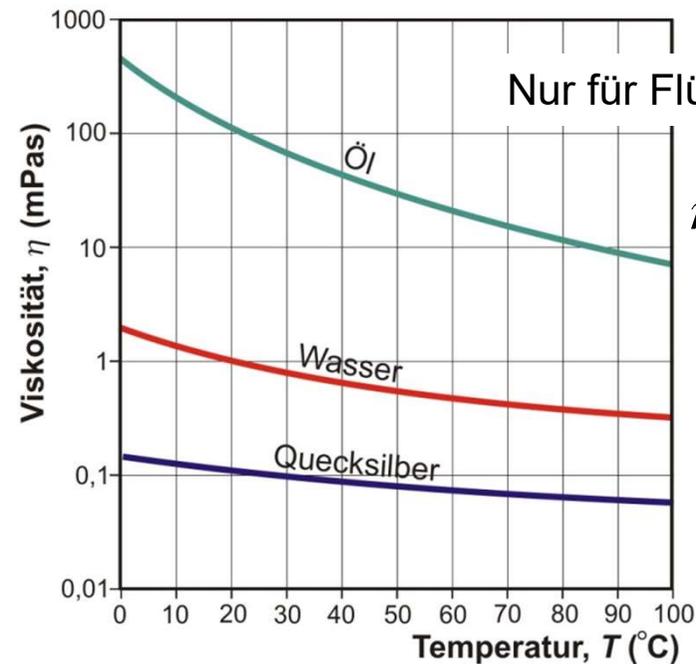


$$F = F_R = \eta \cdot A \cdot \frac{\Delta v}{\Delta h}$$

➤ 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

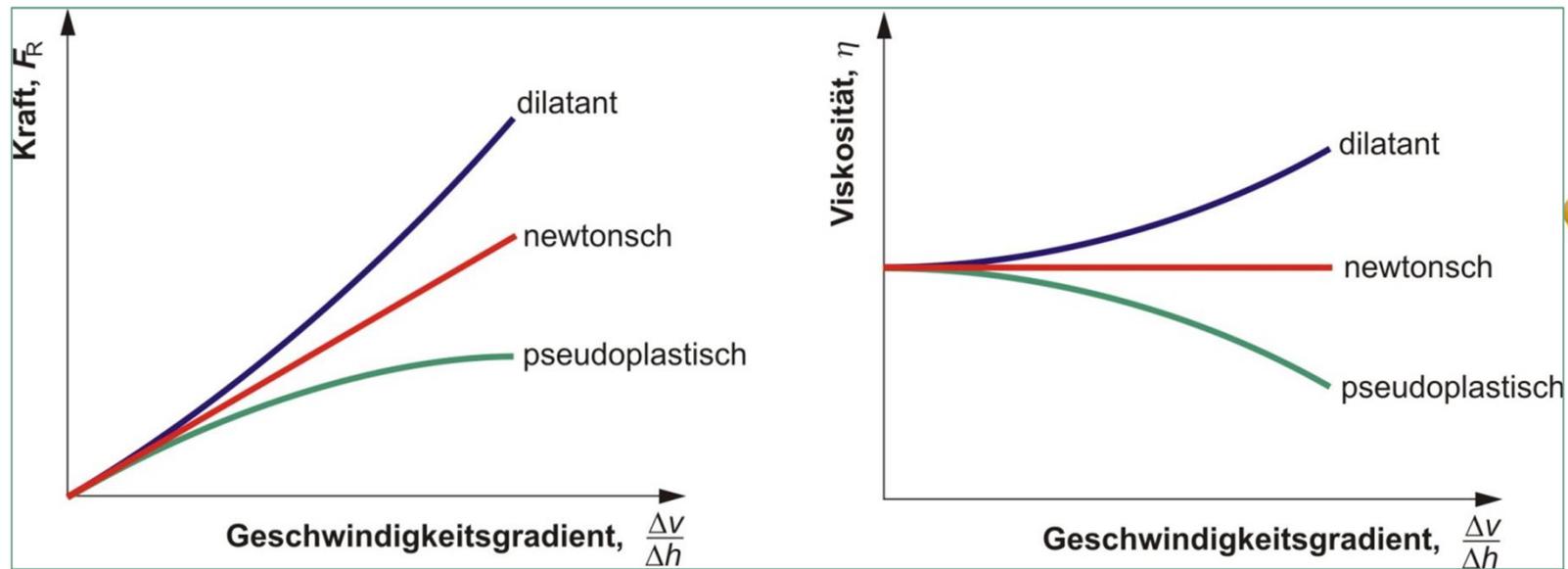
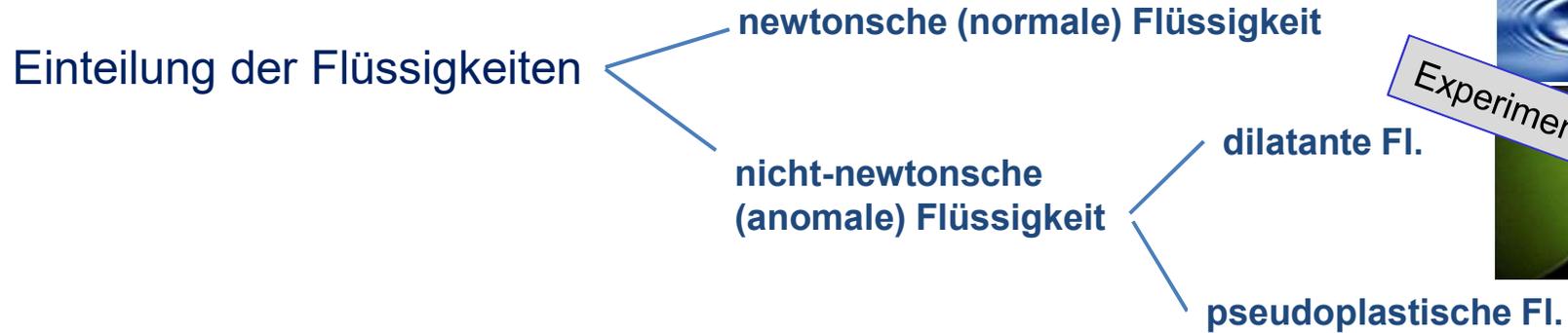
➤ temperaturabhängig



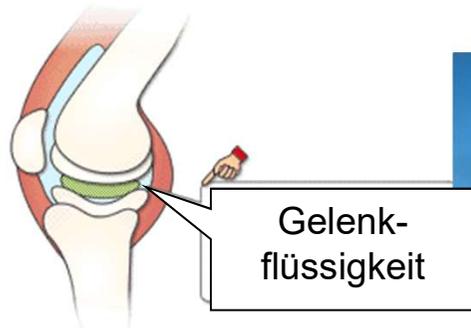
Nur für Flüssigkeiten:

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

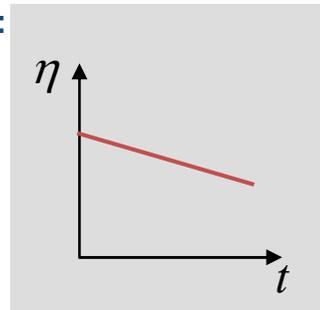
- Viskosität: ➤ geschwindigkeitsgradientabhängig



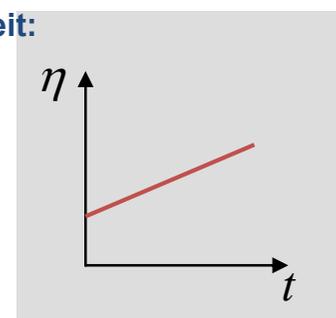
- zeitabhängig



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)



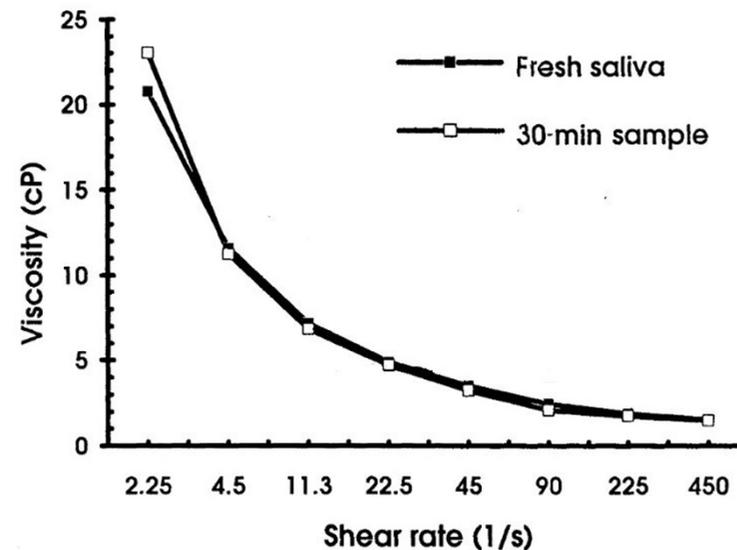
- newtonsche Flüssigkeit
- 0,7-1 mPas (37°C)

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

Speichel

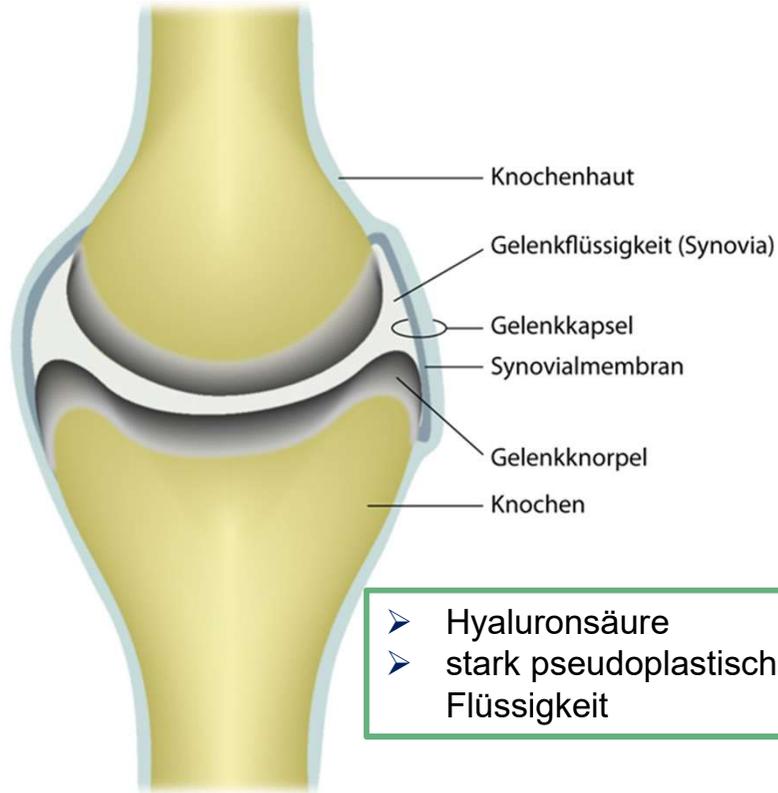


- Mucin
- pseudoplastische Flüssigkeit



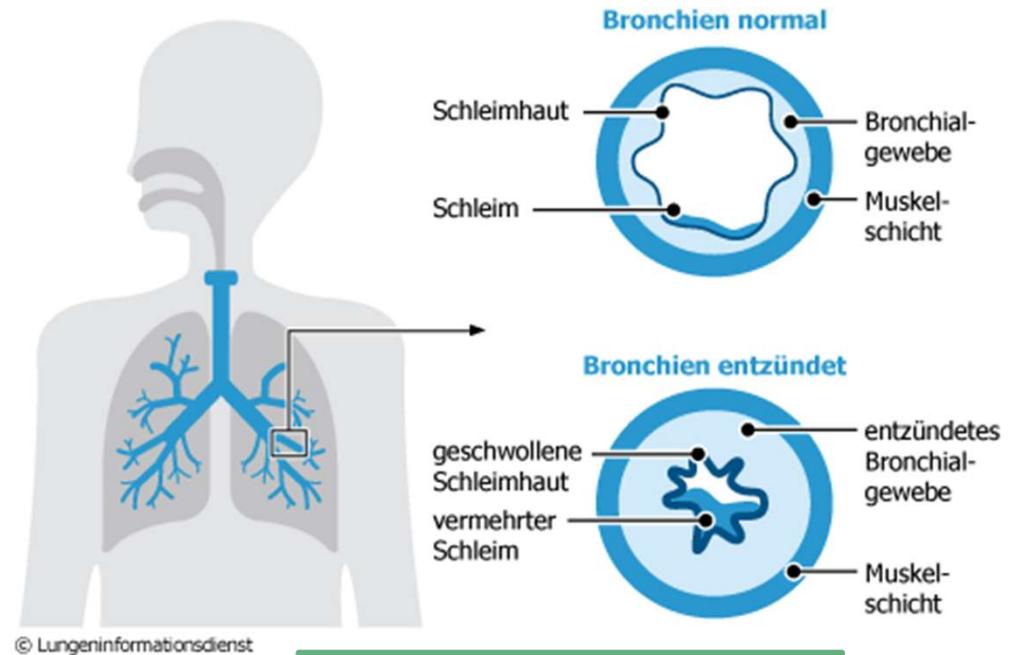
Nach Panu J. F. Rantonen & Jukka H. Meurman (1998) Viscosity of whole saliva, Acta Odontologica Scandinavica, 56:4, 210-214

Gelenkflüssigkeit



- Hyaluronsäure
- stark pseudoplastische Flüssigkeit

Bronchialschleim



- pseudoplastische Flüssigkeit

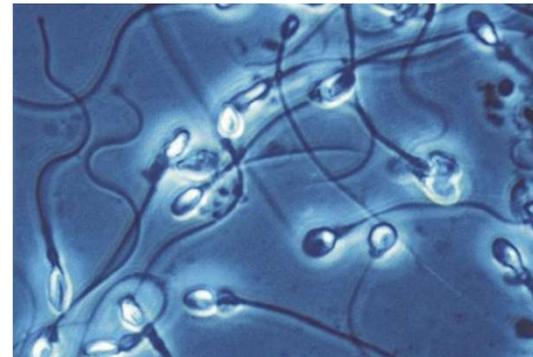
Träne

Aufbau des Tränenfilms



- pseudoplastische Flüssigkeit
- 1-10 mPas

Sperma



- pseudoplastische Flüssigkeit

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)

