

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

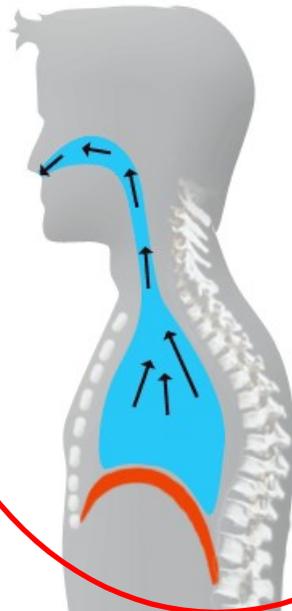
- Geschwindigkeitsprofil
- Bernoullische Gleichung

4. Strömung von reellen Flüssigkeiten

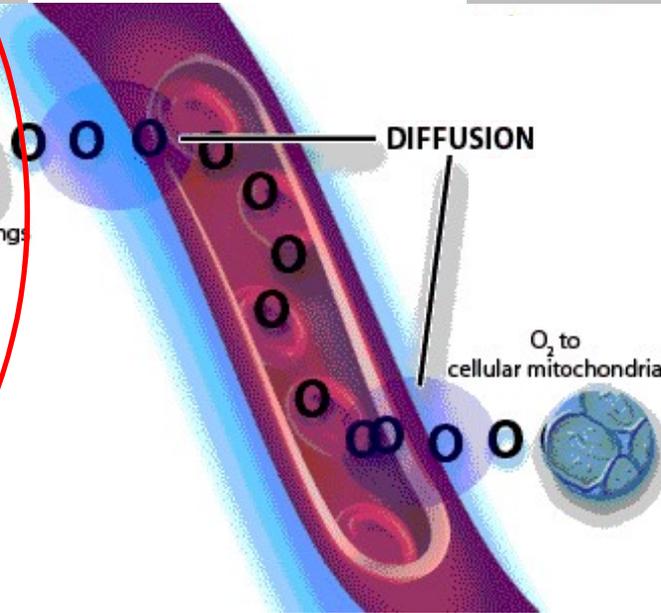
- Newtonsches Reibungsgesetz
- Viskosität  Anwendung: Viskosität von Körperflüssigkeiten

Transportprozesse

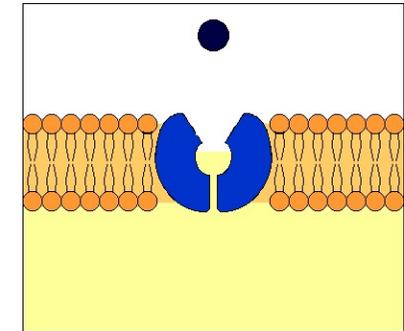
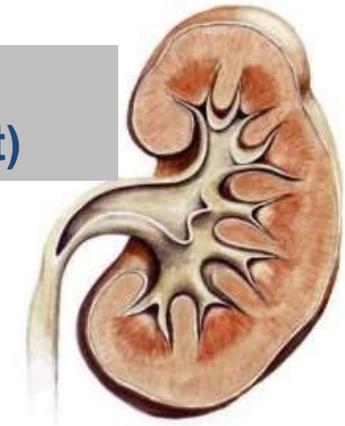
**Strömung
(Volumentransport)**



entspannt



**Diffusion
(Stofftransport)**



**Elektrischer Strom
(el. Ladungstransport)**



**Wärmeleitung
(Energietransport)**

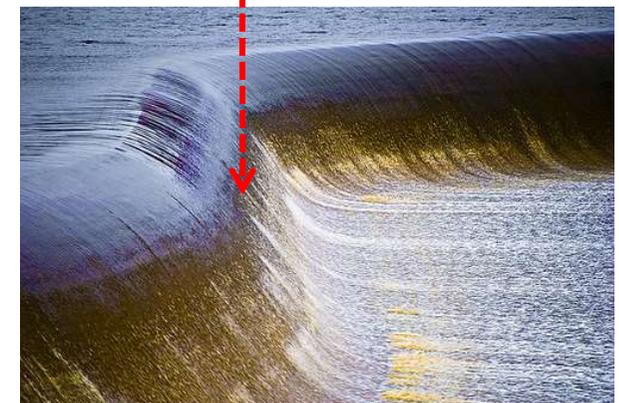
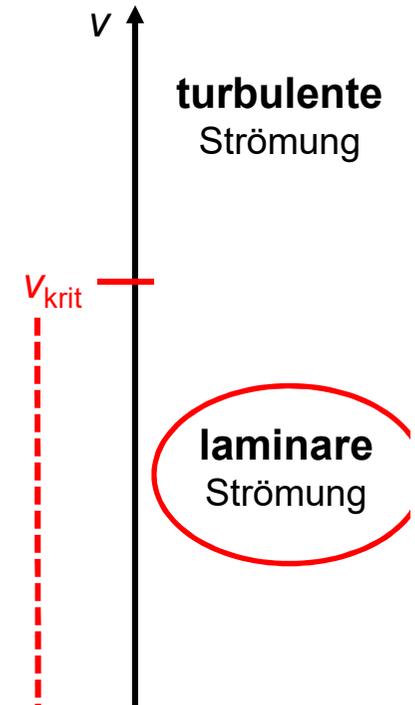
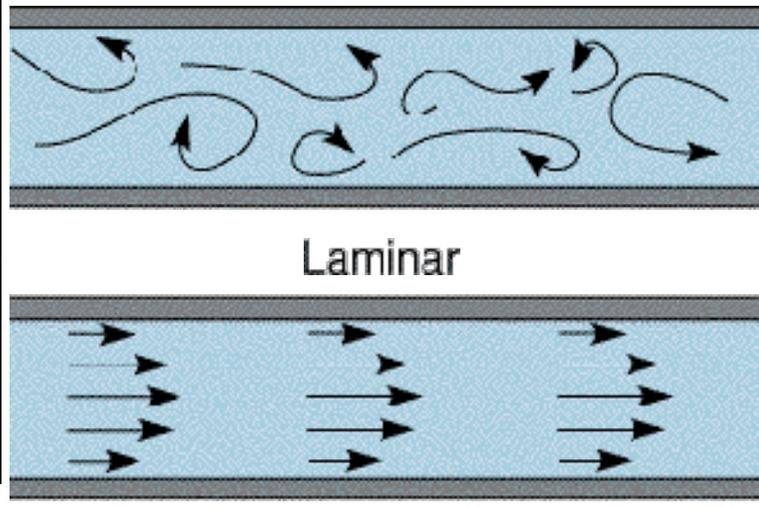
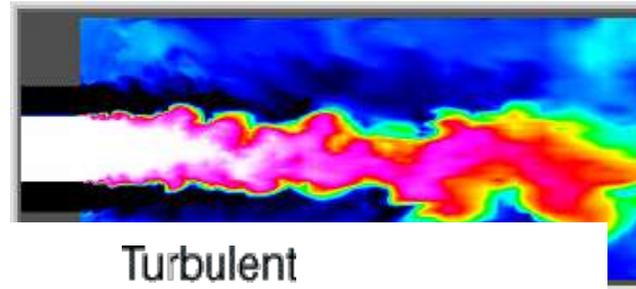


Verallgemeinerung

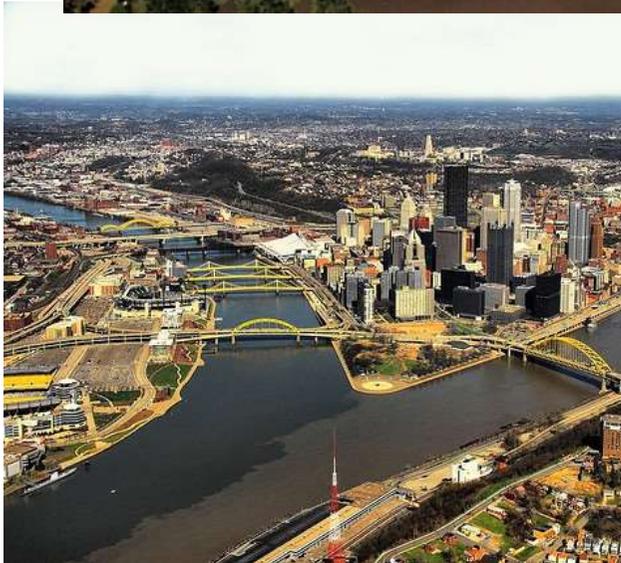
I. Strömung von Gasen und Flüssigkeiten in Röhren (Volumentransport)

1. Grundbegriffe

- Stromlinien
- Strömungsarten:



Beispiele für laminare Strömung

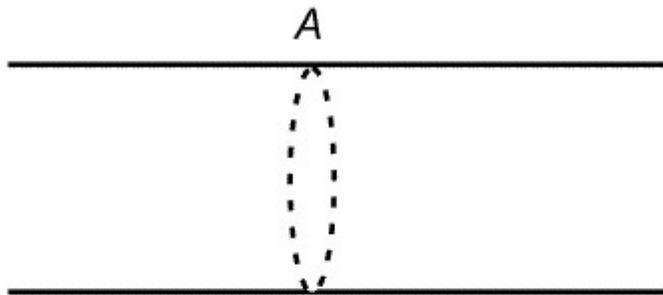


Allgemeine Gültigkeitsvoraussetzungen: • inkompressible Gas/Flüssigkeit
• laminare Strömung

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

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

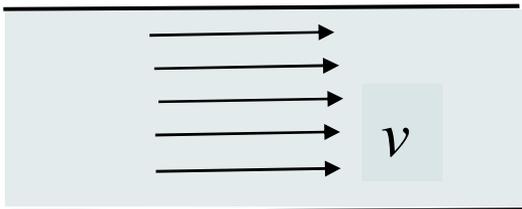
▪ Volumenstromdichte (J): $J = \frac{\Delta V}{A \cdot \Delta t}$ $\left(\frac{\text{m}}{\text{s}} \right)$



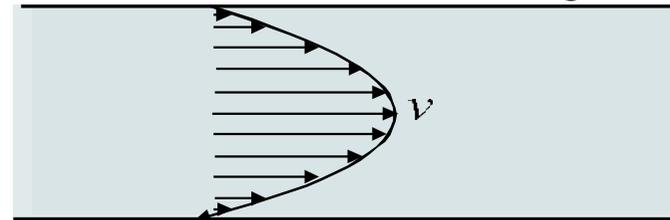
⊙ $I =$

⊙ $J =$

ideale Flüssigkeit
= ohne innere Reibung

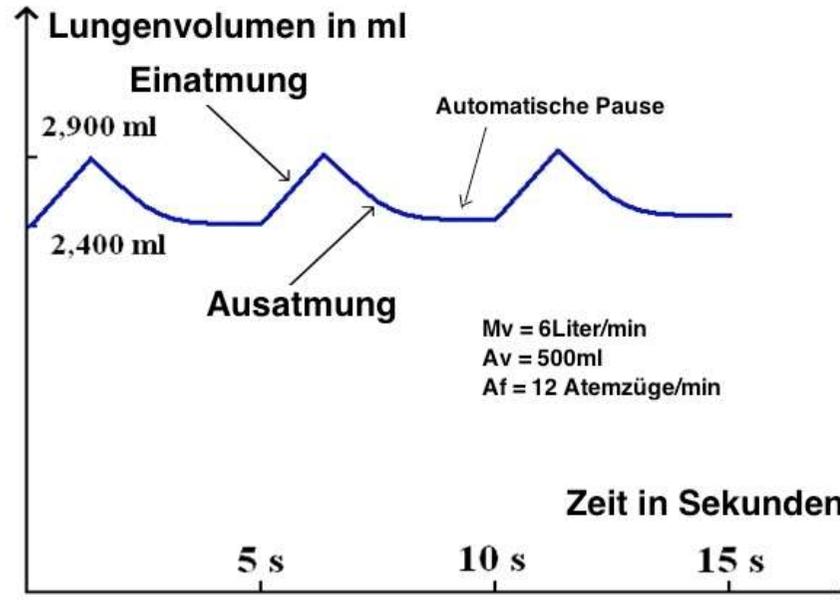
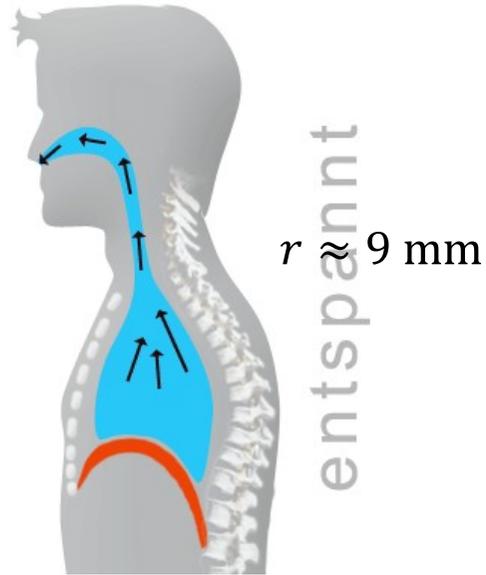


reelle Flüssigkeit
= mit innerer Reibung



Anwendung: Atmung

- Volumenstromstärke und Strömungsgeschwindigkeit in der Luftröhre in Ruhe?



Im Durchschnitt:

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

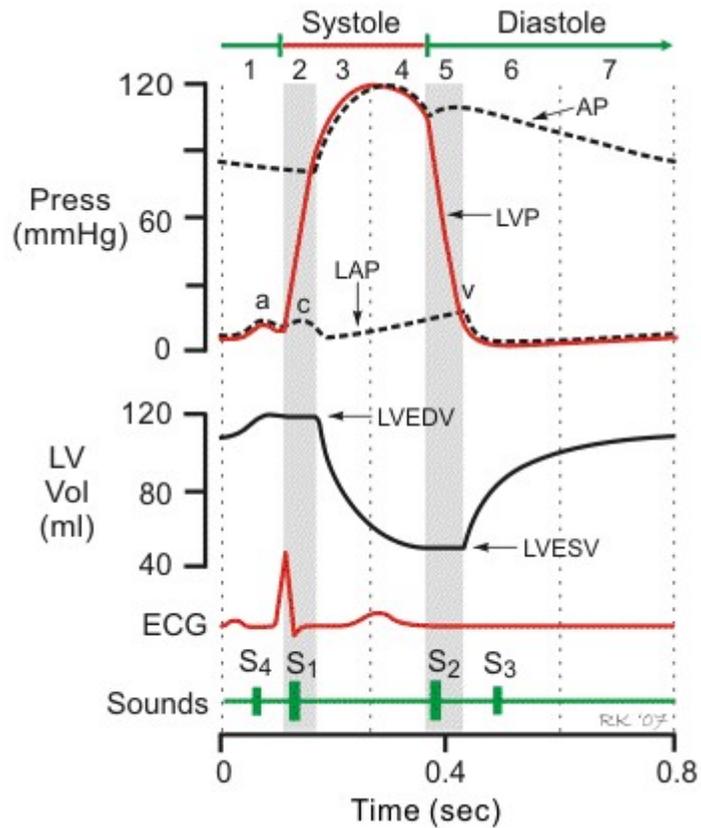
Maximal:

$$I_{\max} =$$

$$v_{\max} =$$

Anwendung: Blutströmung

- Volumenstromstärke und Strömungsgeschwindigkeit in der Aorta?



Im Durchschnitt:

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

$$\bar{v} =$$

Maximal:

$$I_{\max} =$$

$$v_{\max} =$$

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

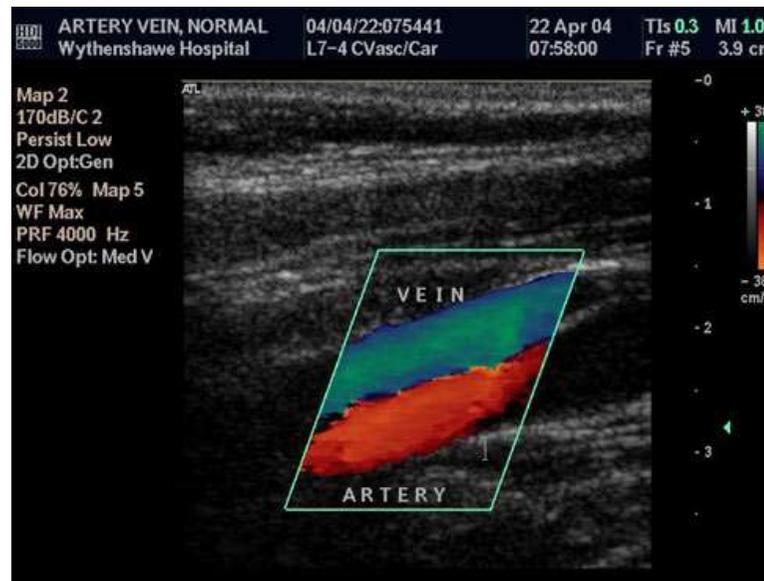
Anwendung: Blutströmung

- Messmethoden der Volumenstromstärke:

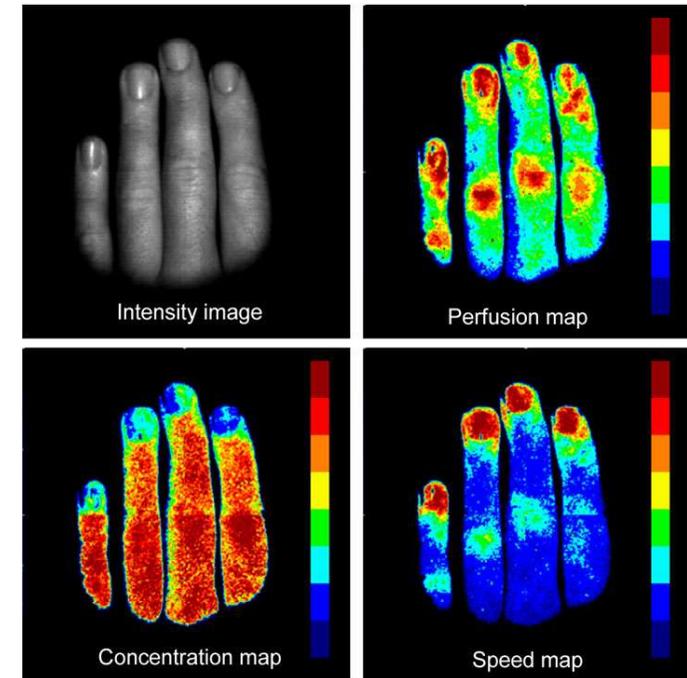
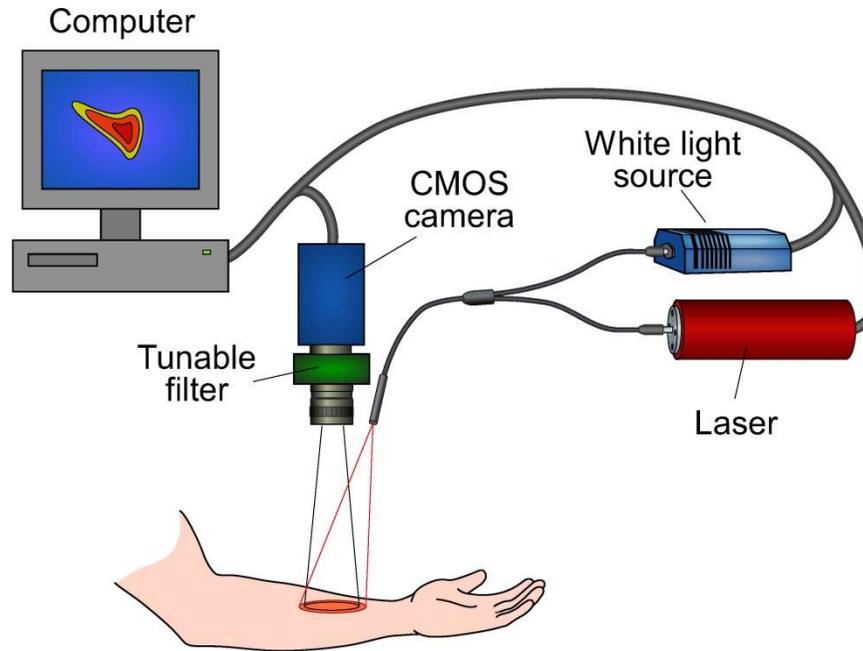
□ Impedanz-Methoden

(siehe im später bei elektrischen Vorgänge.)

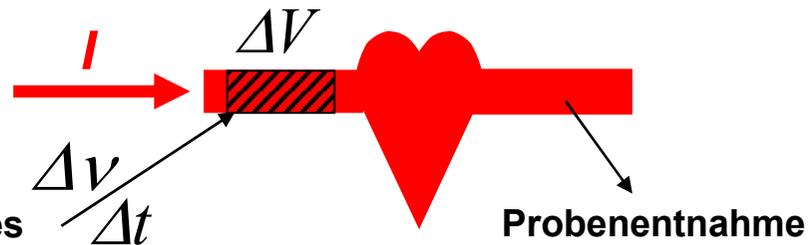
□ Ultraschall-Doppler



☐ Laser-Doppler



☐ Dilutionsmethoden



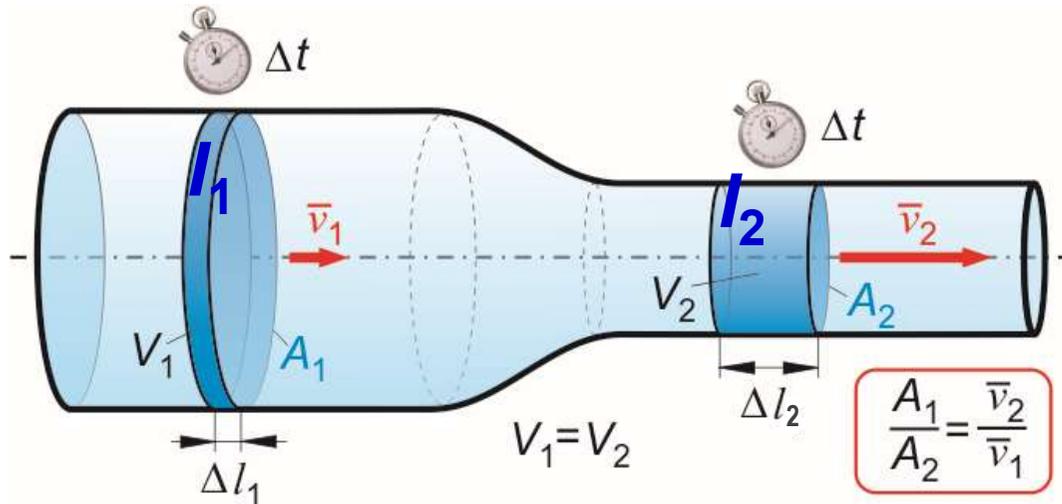
Zugabe eines Markierstoffes

- 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



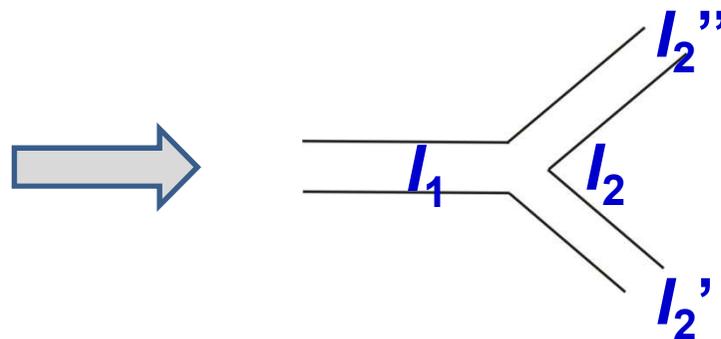
$$I_1 = I_2$$

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

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)

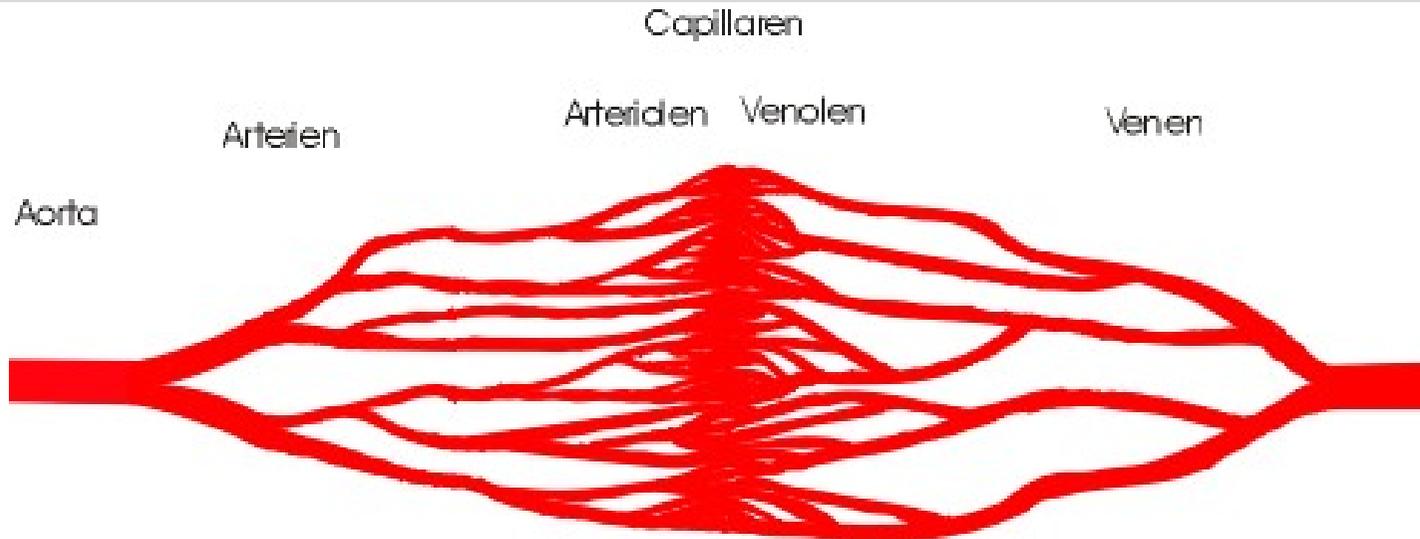


$$I_1 = I_2 = I_2' + I_2''$$

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

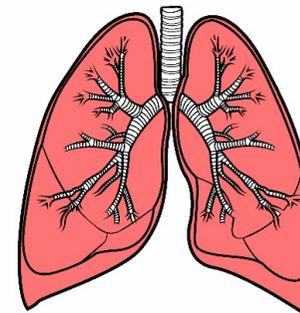
(Siehe kirchhoffsche Knotenregel in der Elektrizitätslehre!)

Kontinuitätsgleichung im Blutkreislauf



Gefäß	Aorta	Arterien	Arteriolen	Kapillaren	Venolen	Venen	Hohlvenen
$A \text{ (cm}^2\text{)}$	4,5	20	400	4500	4000	40	18
$v \text{ (cm/s)}$	23	5	0,25	0,022	0,025	2,5	6

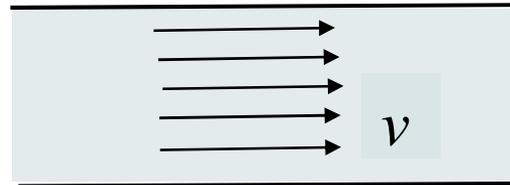
Kontinuitätsgleichung bei der Atmung



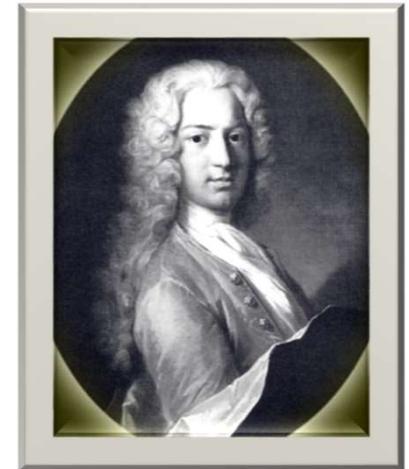
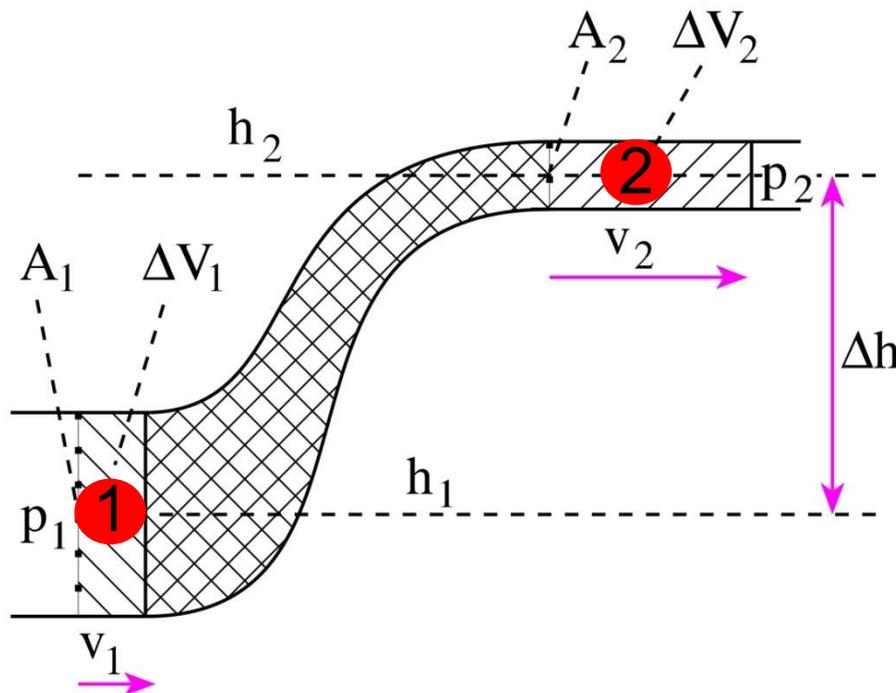
3. Strömung von idealen Flüssigkeiten

- Ideale Flüssigkeit: keine innere Reibung

- Geschwindigkeitsprofil:



- Bernoullische Gleichung:



Daniel Bernoulli
1700-1782
Mathematiker
Physiker
Anatom

Energieerhaltung \Rightarrow

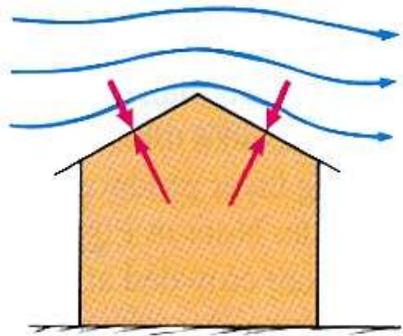
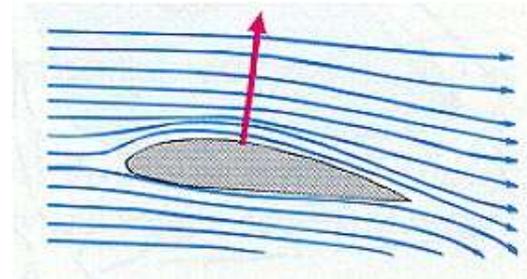
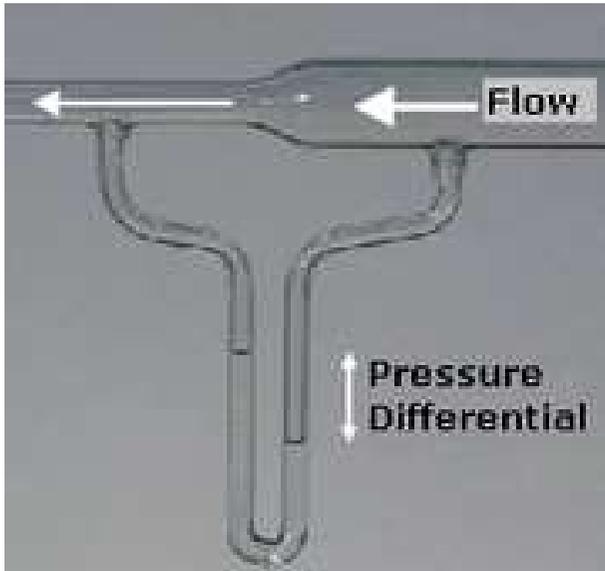
$$p + \frac{1}{2} \rho \cdot v^2 + \rho \cdot g \cdot h = \text{konstant}$$

Die Gleichung gilt nur für:

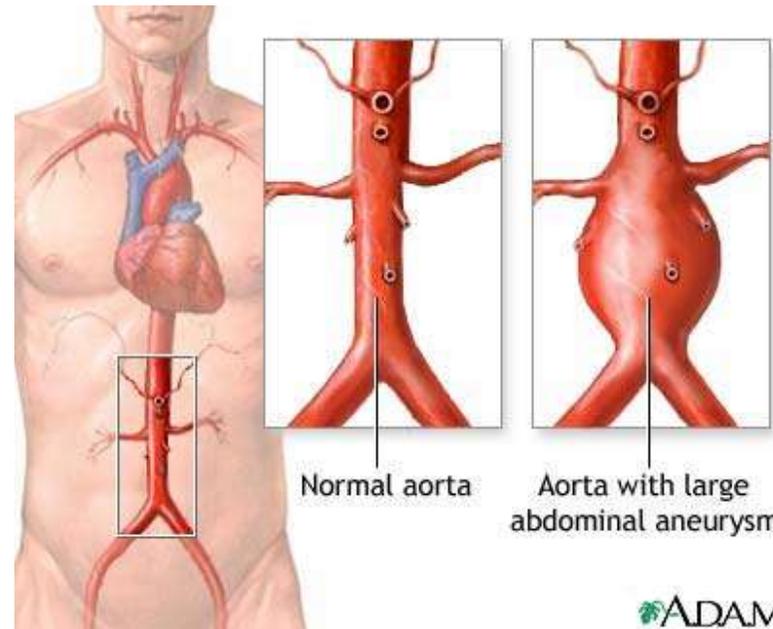
- starres Rohr *oder* stationäre Strömung
- ideale Flüssigkeit

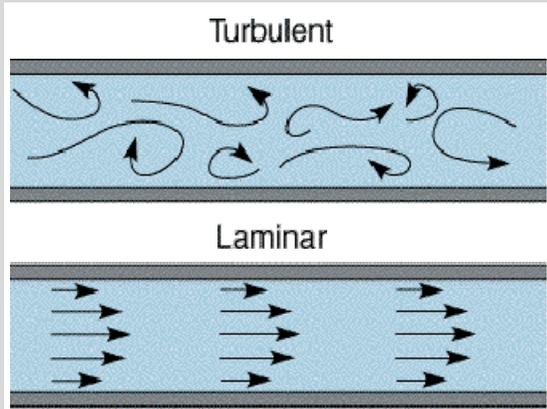
Anwendungen der bernoullischen Gleichung

Experiment



Siehe: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/58/Venturi_Tube_en.webm

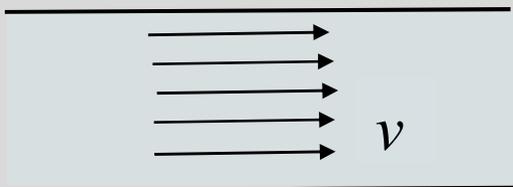




Volumenstromstärke (I): $I = \frac{\Delta V}{\Delta t} \left(\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right)$

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

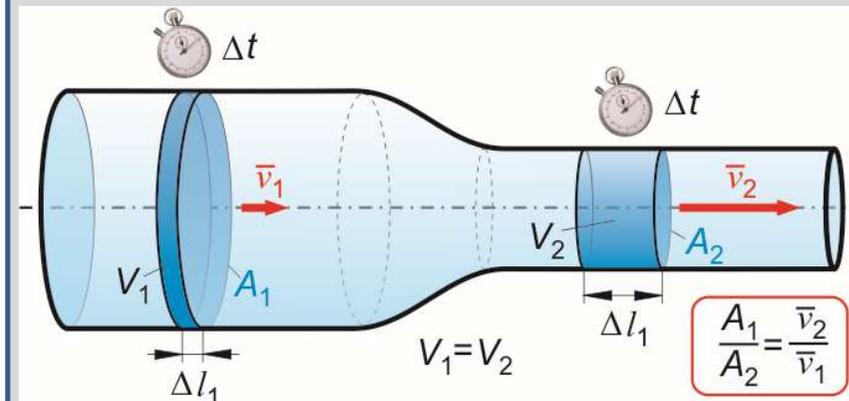
Ideale Flüssigkeit (ohne innere Reibung)



Bernoullische Gleichung

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

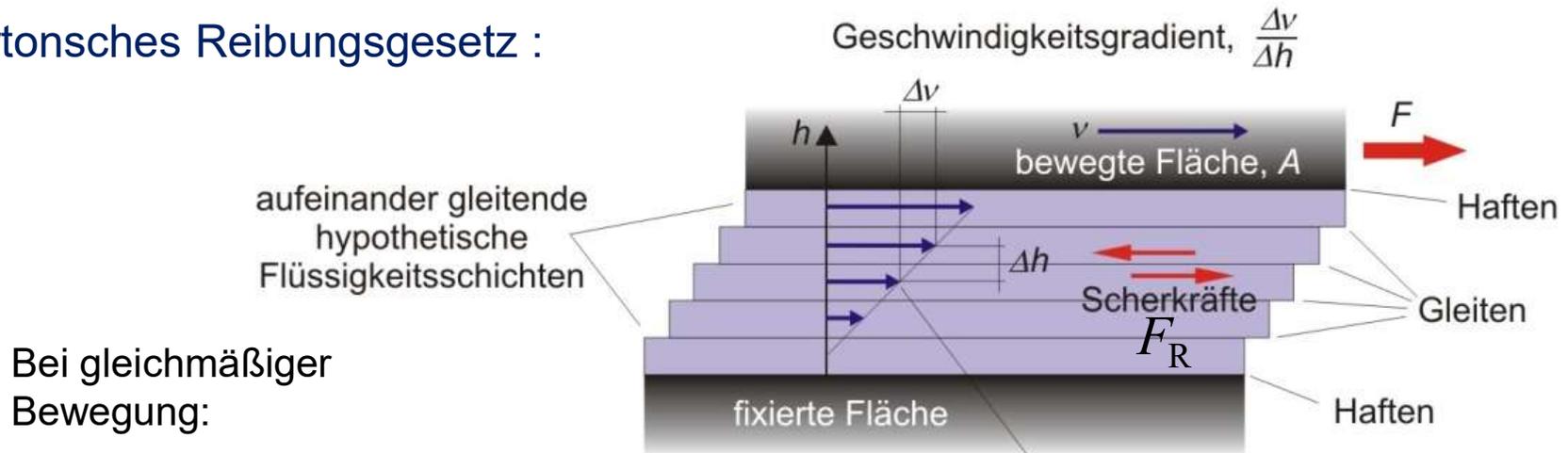
Kontinuitätsgleichung



- 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 reellen Flüssigkeiten

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

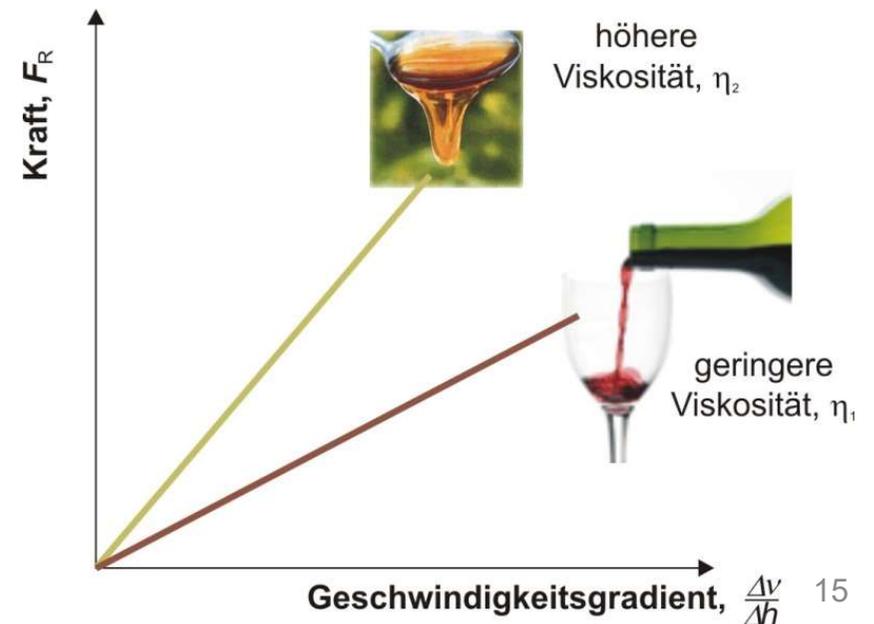


$$F = F_R = \eta \cdot A \cdot \frac{\Delta v}{\Delta h}$$

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

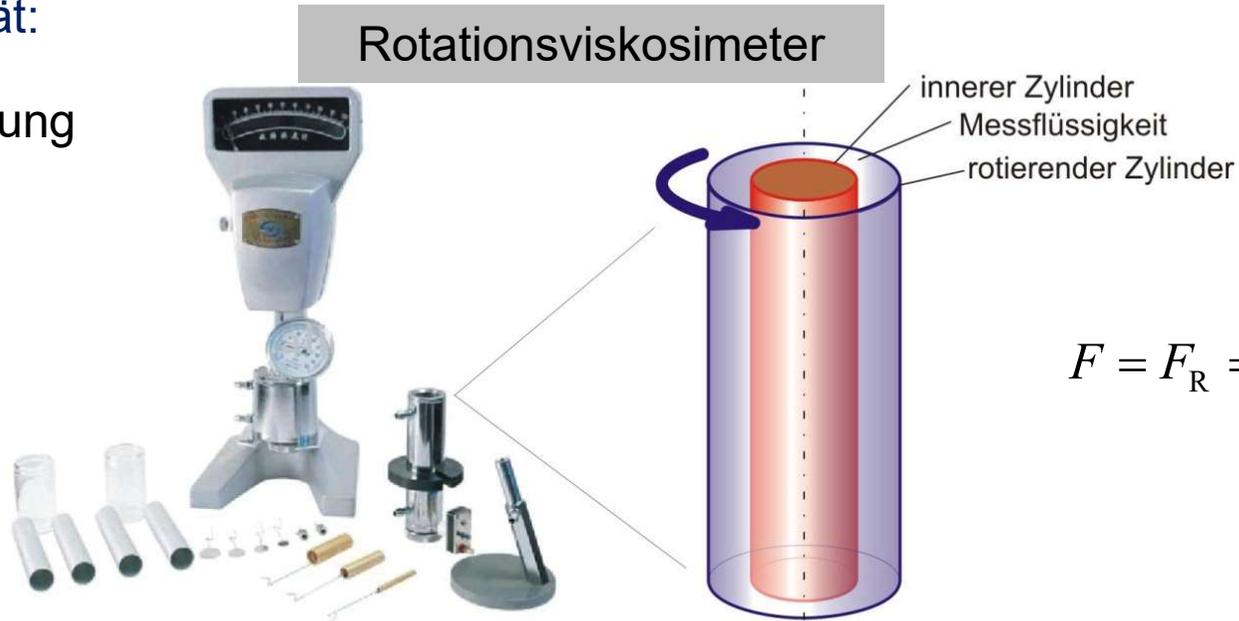
Geschwindigkeitsgradient

Geschwindigkeit der Flüssigkeitsschicht im Verhältnis zur stehenden Fläche



■ Viskosität:

➤ Messung

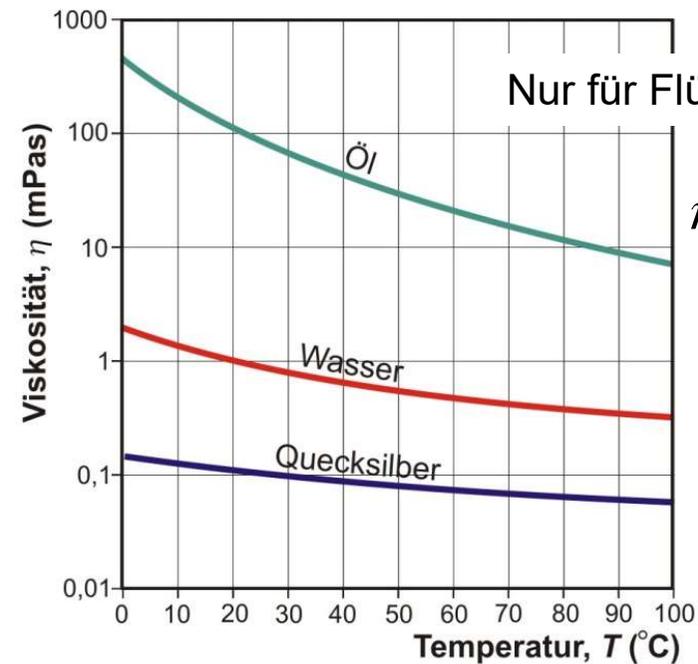


$$F = F_R = \eta \cdot A \cdot \frac{\Delta v}{\Delta h}$$

➤ 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

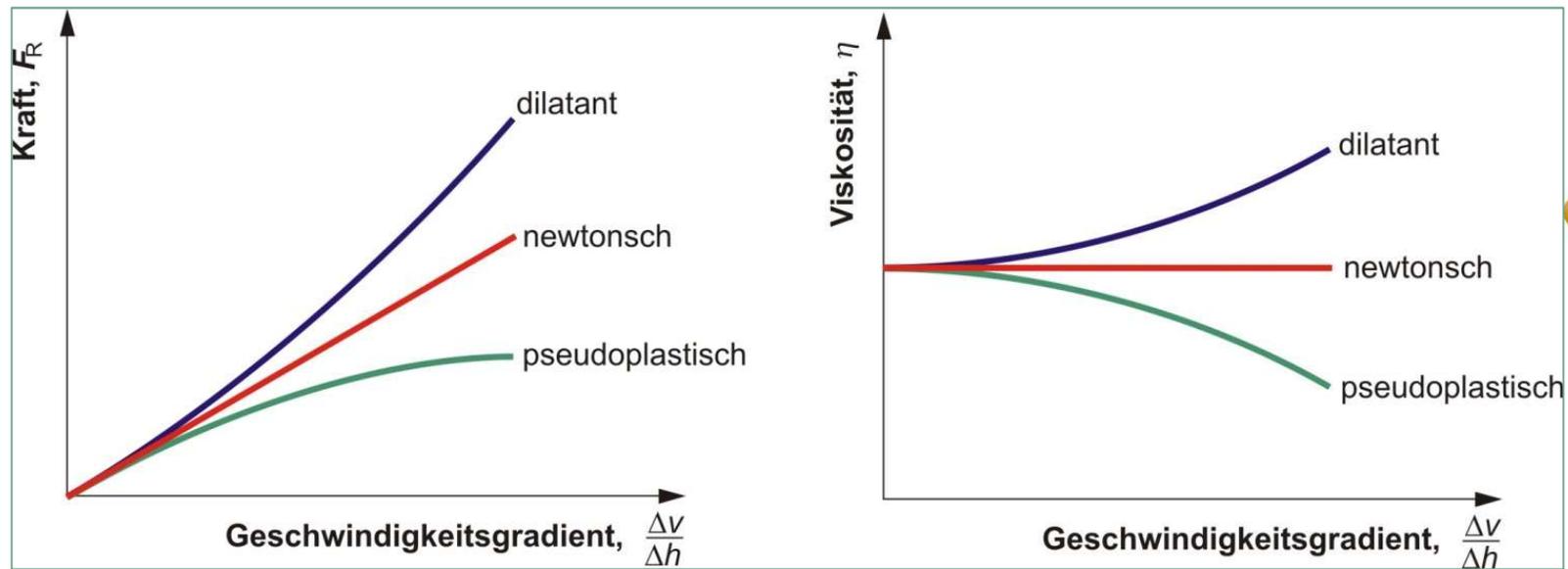
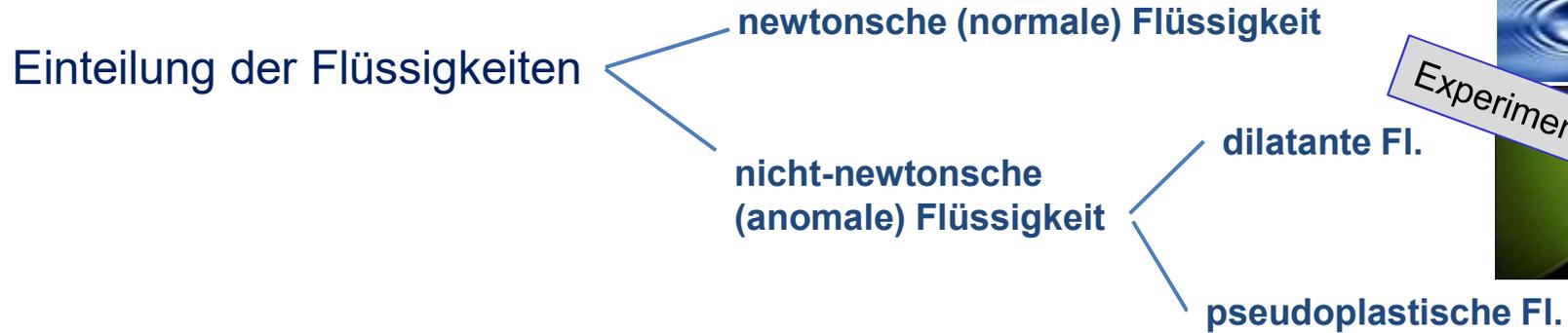
➤ temperaturabhängig



Nur für Flüssigkeiten:

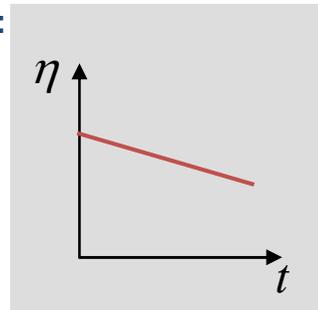
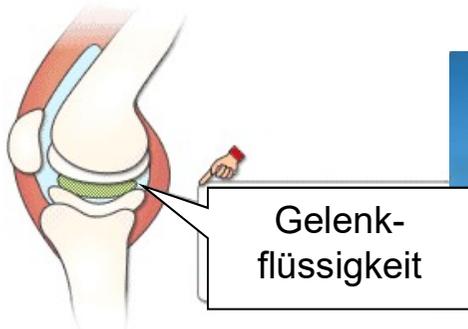
$$\eta \sim T \cdot e^{\frac{\Delta E}{RT}}$$

- Viskosität: ➤ geschwindigkeitsgradientabhängig

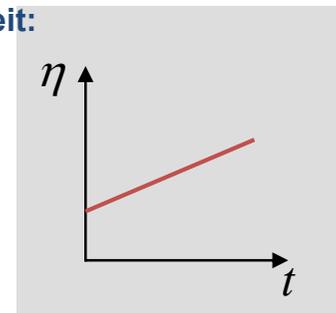


- zeitabhängig

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>