

# Medizinische Biophysik

## Transportprozesse

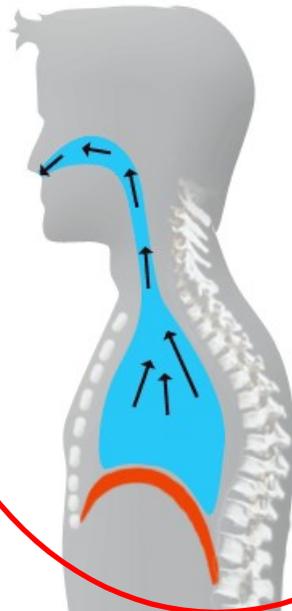
### 0. Überblick der Transportprozesse mit medizinischen Beispiele

#### I. Strömungen in Röhren (Volumentransport )

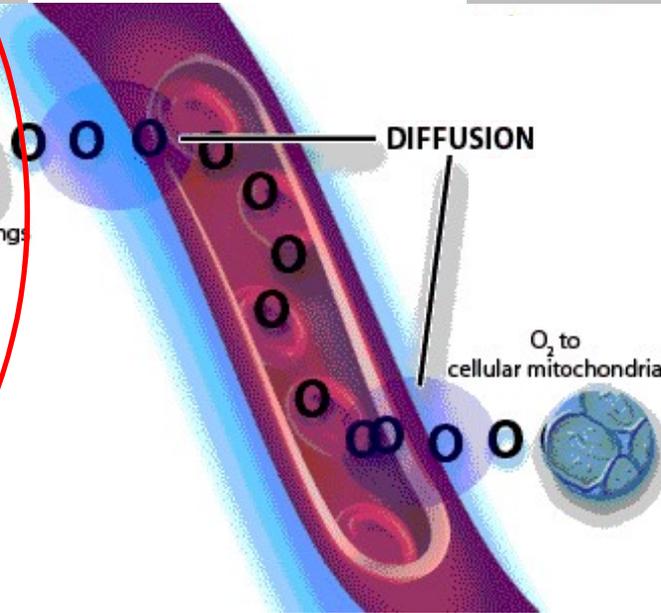
1. **Grundbegriffe**
  - Strömungsarten: laminare, turbulente
  - Volumenstromstärke, -dichte  $\longrightarrow$  Anwendung: **Atmung** ( $I$  und  $v$ )
  - Flüssigkeit: ideale, reelle  $\longrightarrow$  **Blutströmung** ( $I$  und  $v$ , Messmethoden)
2. **Kontinuitätsgleichung**  $\longrightarrow$  Anwendung: **Blutkreislauf**
3. **Strömung von idealen Flüssigkeiten**
  - Geschwindigkeitsprofil
  - Bernoullische Gleichung
4. **Strömung von reellen Flüssigkeiten**
  - Newtonsches Reibungsgesetz
  - Viskosität  $\longrightarrow$  Anwendung: Viskosität von Körperflüssigkeiten

# Transportprozesse

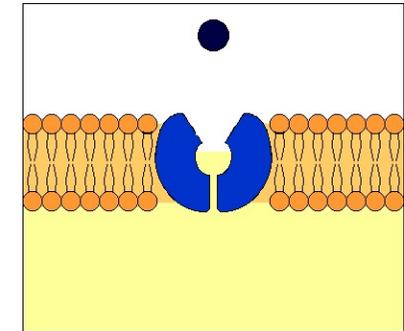
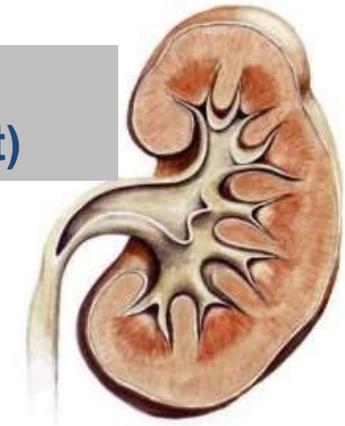
**Strömung  
(Volumentransport)**



entspannt



**Diffusion  
(Stofftransport)**



**Elektrischer Strom  
(el. Ladungstransport)**



**Wärmeleitung  
(Energietransport)**

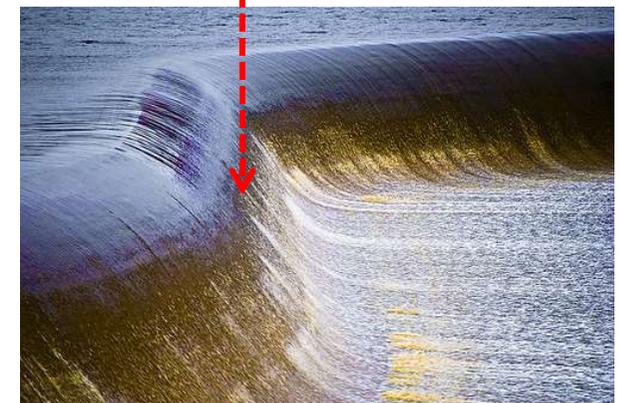
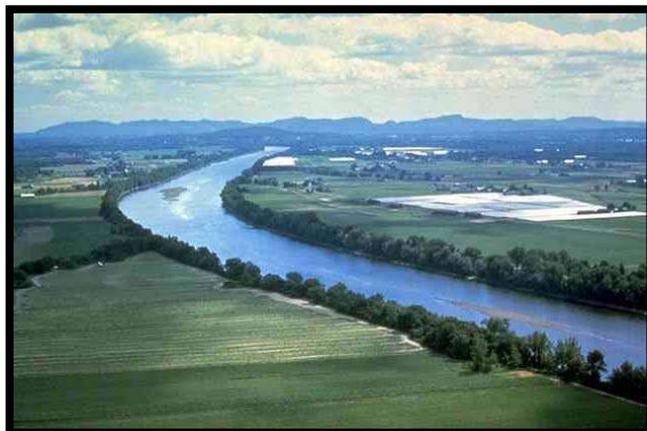
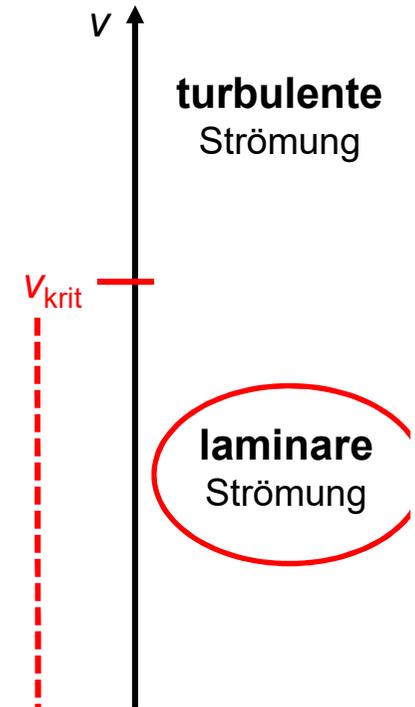
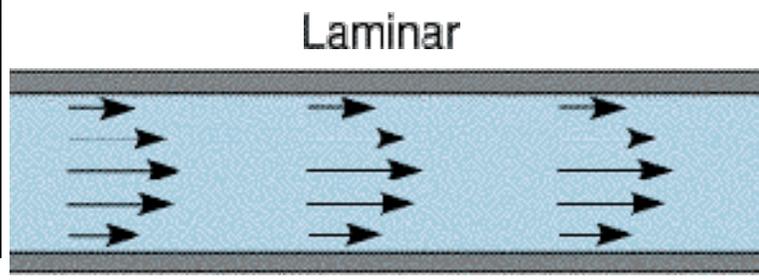
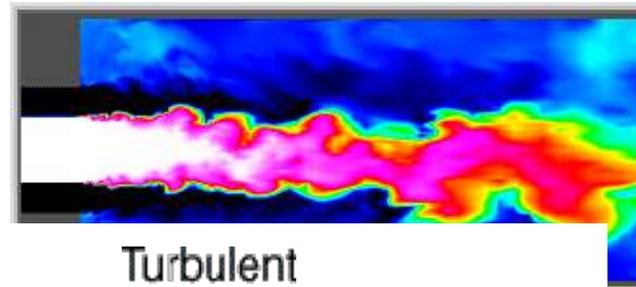


**Verallgemeinerung**

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

## 1. Grundbegriffe

- Stromlinien
- Strömungsarten:

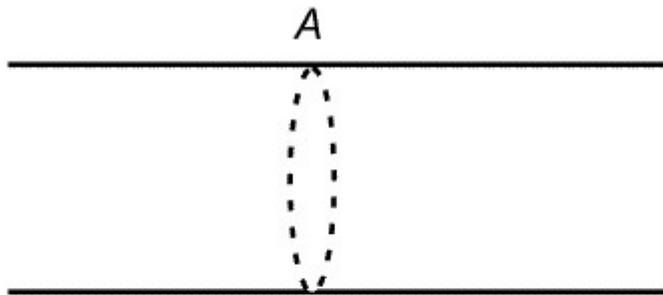


Allgemeine Gültigkeitsvoraussetzungen: • inkompressible Gas/Flüssigkeit  
• laminare Strömung

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

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

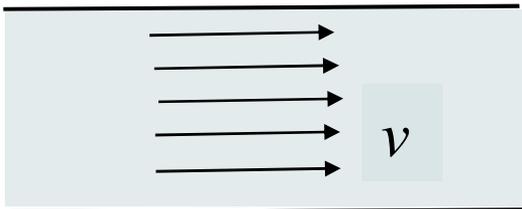
▪ Volumenstromdichte ( $J$ ):  $J = \frac{\Delta V}{A \cdot \Delta t}$   $\left( \frac{\text{m}}{\text{s}} \right)$



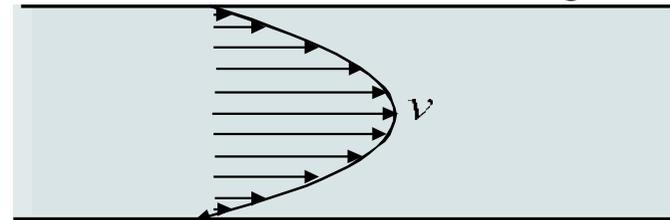
⊙  $I =$

⊙  $J =$

ideale Flüssigkeit  
= ohne innere Reibung

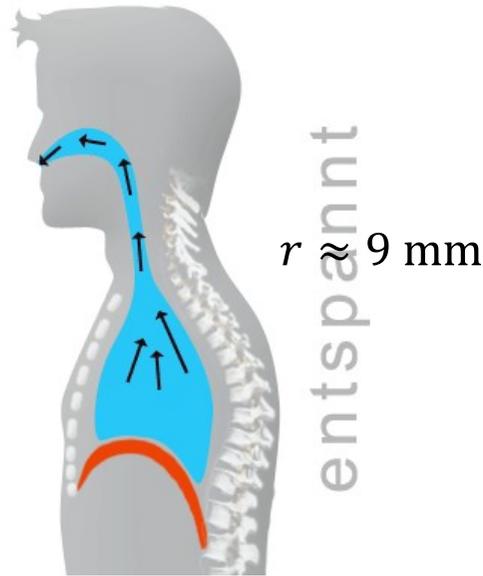


reelle Flüssigkeit  
= mit innerer Reibung



# Anwendung: Atmung

- Volumenstromstärke und Strömungsgeschwindigkeit in der Luftröhre in Ruhe?



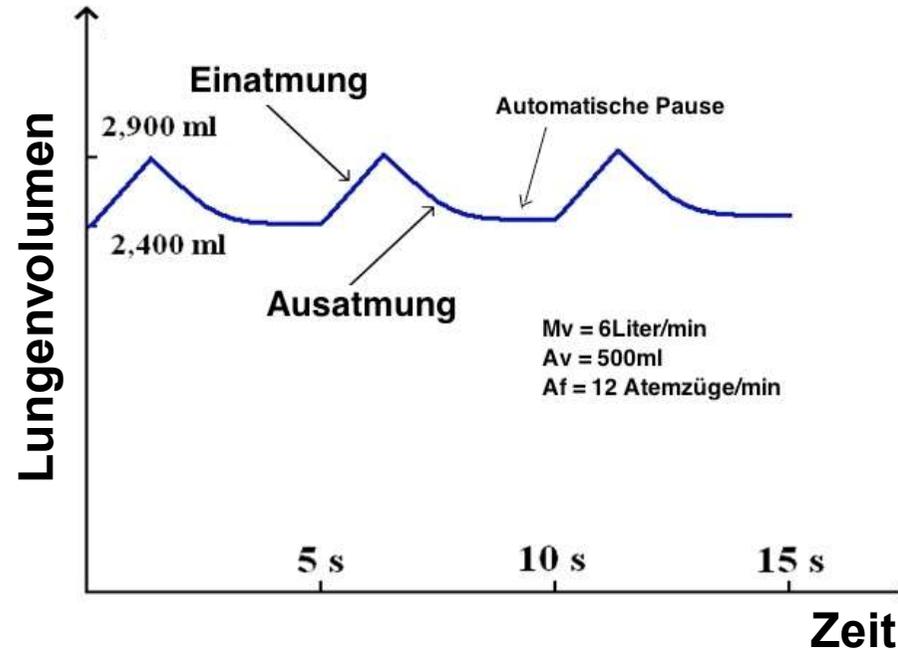
Im Durchschnitt:

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

Maximal:

$$I_{\max} =$$

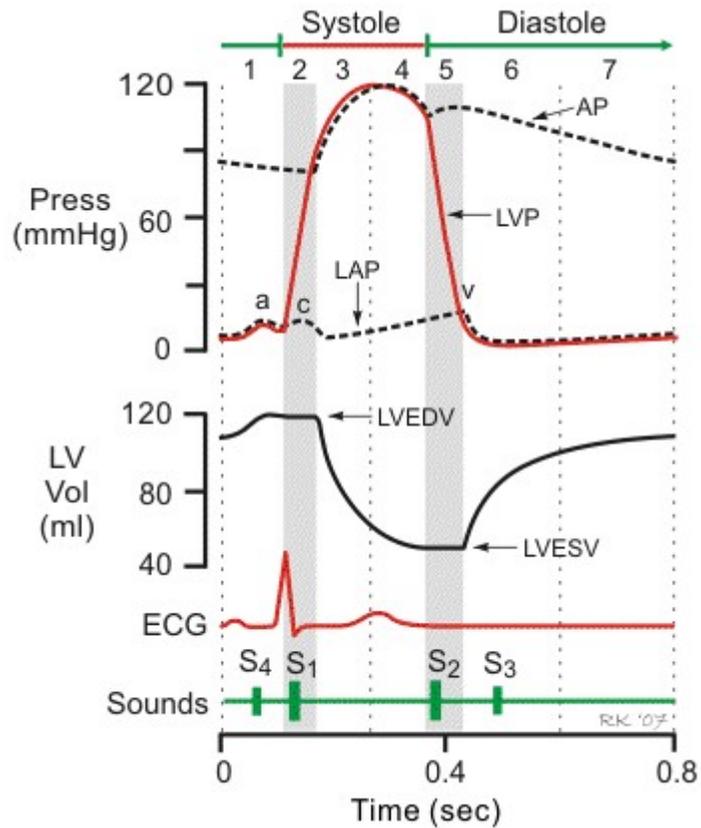
$$v_{\max} =$$



Atemminutenvolumen (AMV)

# Anwendung: Blutströmung

- Volumenstromstärke und Strömungsgeschwindigkeit in der Aorta?



Im Durchschnitt:

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

$$\bar{v} =$$

Maximal:

$$I_{\max} =$$

$$v_{\max} =$$

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

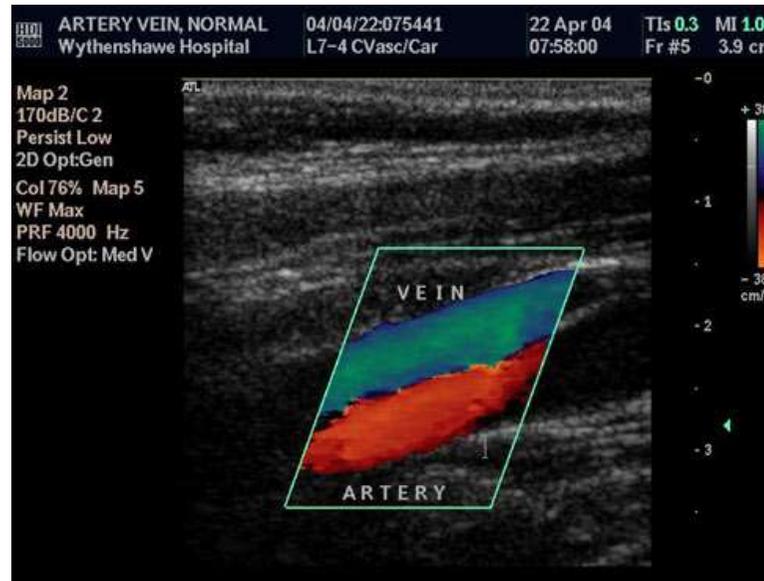
# Anwendung: Blutströmung

- Messmethoden der Volumenstromstärke:

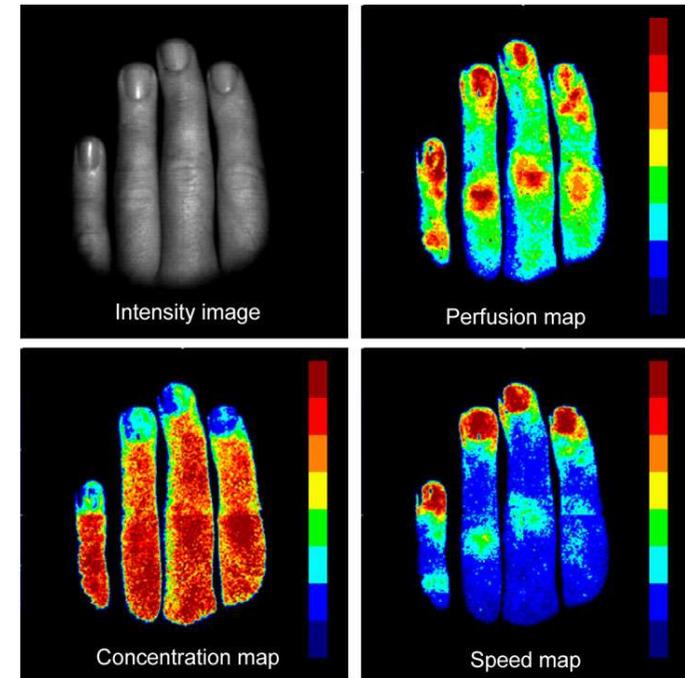
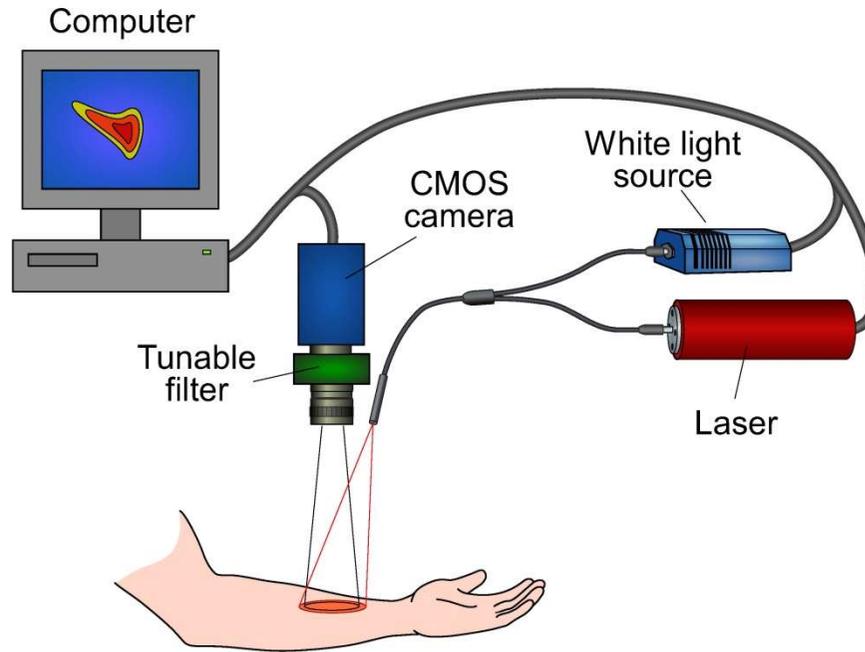
□ Impedanz-Methoden

(siehe im später bei elektrischen Vorgänge.)

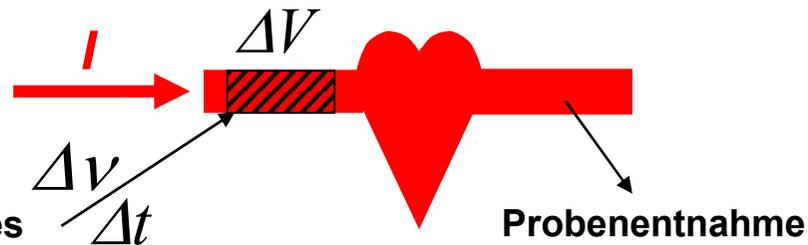
□ Ultraschall-Doppler



## ☐ Laser-Doppler



## ☐ Dilutionsmethoden



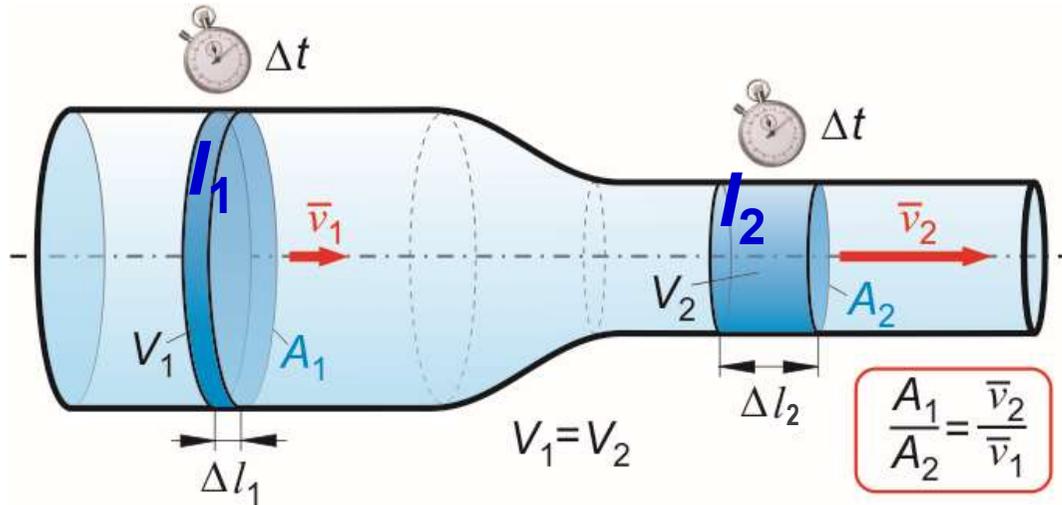
### Zugabe eines Markierstoffes

- 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



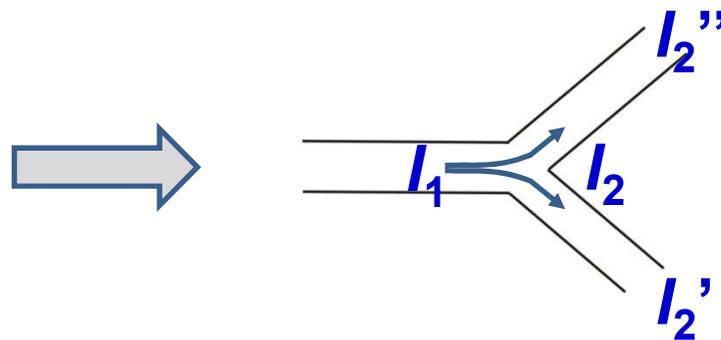
$$I_1 = I_2$$

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

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

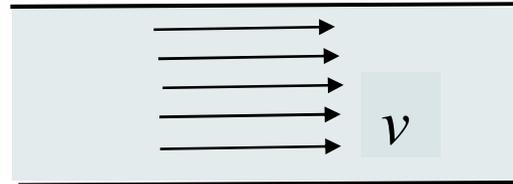


| Gefäß                | Aorta | Arterien | Arteriolen      | Kapillaren      | Venolen          | Venen | Hohlvenen |
|----------------------|-------|----------|-----------------|-----------------|------------------|-------|-----------|
| R (cm)               | 1,2   | 0,2      | 0,0015          | 0,00035         | 0,001            | 0,25  | 1,7       |
| Anzahl d. Äste       | 1     | 160      | $57 \cdot 10^6$ | $12 \cdot 10^9$ | $1,3 \cdot 10^9$ | 200   | 2         |
| A (cm <sup>2</sup> ) | 4,5   | 20       | 400             | 4500            | 4000             | 40    | 18        |
| v (cm/s)             | 23    | 5        | 0,25            | 0,022           | 0,025            | 2,5   | 6         |

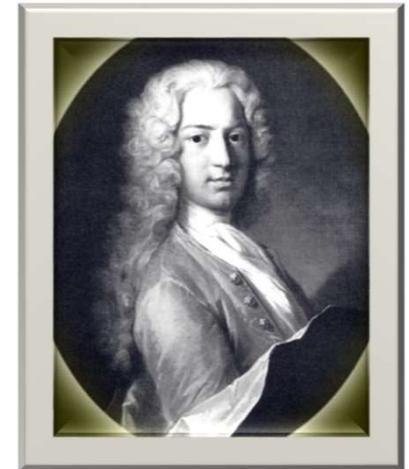
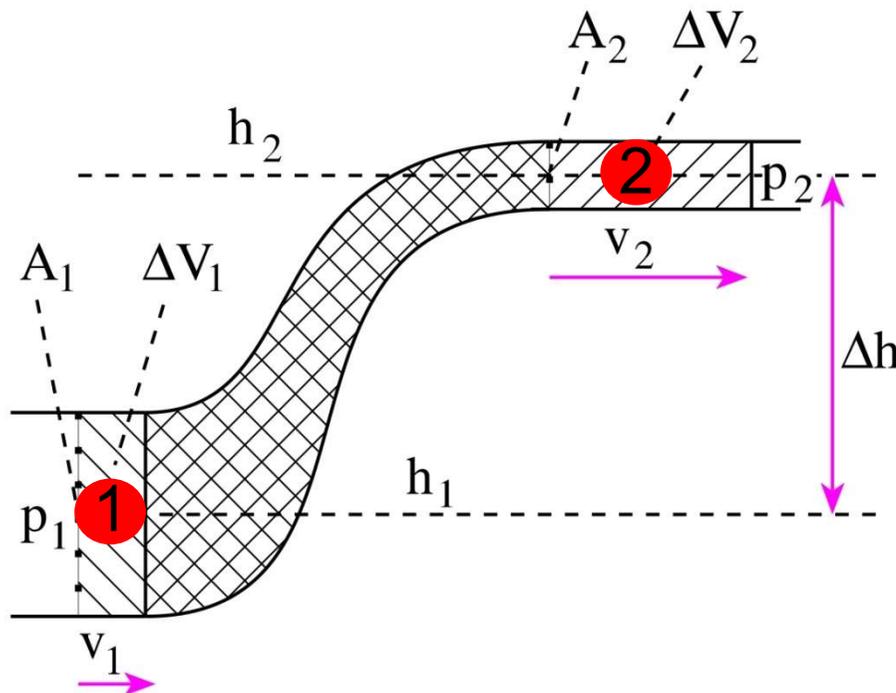
### 3. Strömung von idealen Flüssigkeiten

- Ideale Flüssigkeit: keine innere Reibung

- Geschwindigkeitsprofil:



- Bernoullische Gleichung:



Daniel Bernoulli  
1700-1782  
Mathematiker  
Physiker  
Anatom

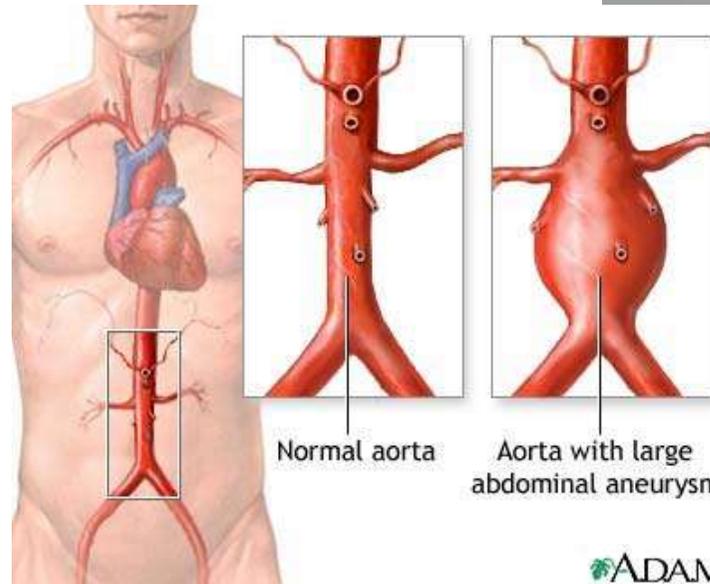
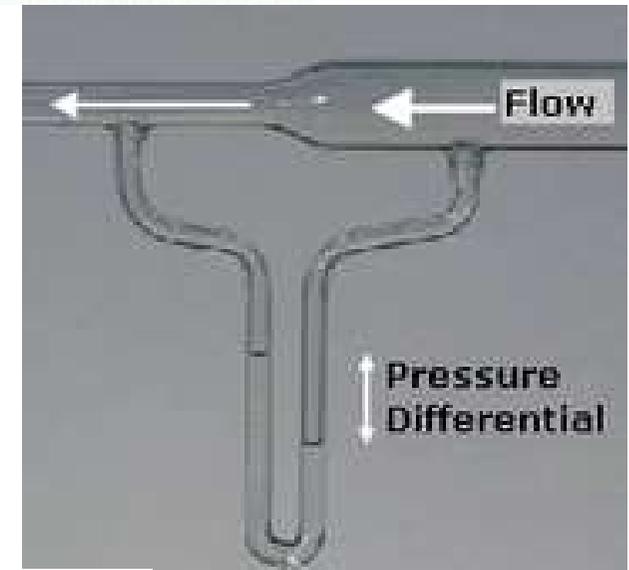
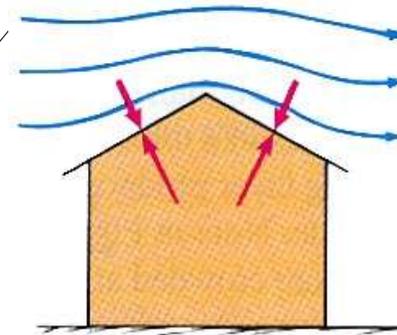
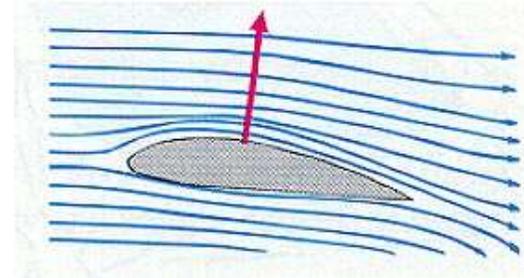
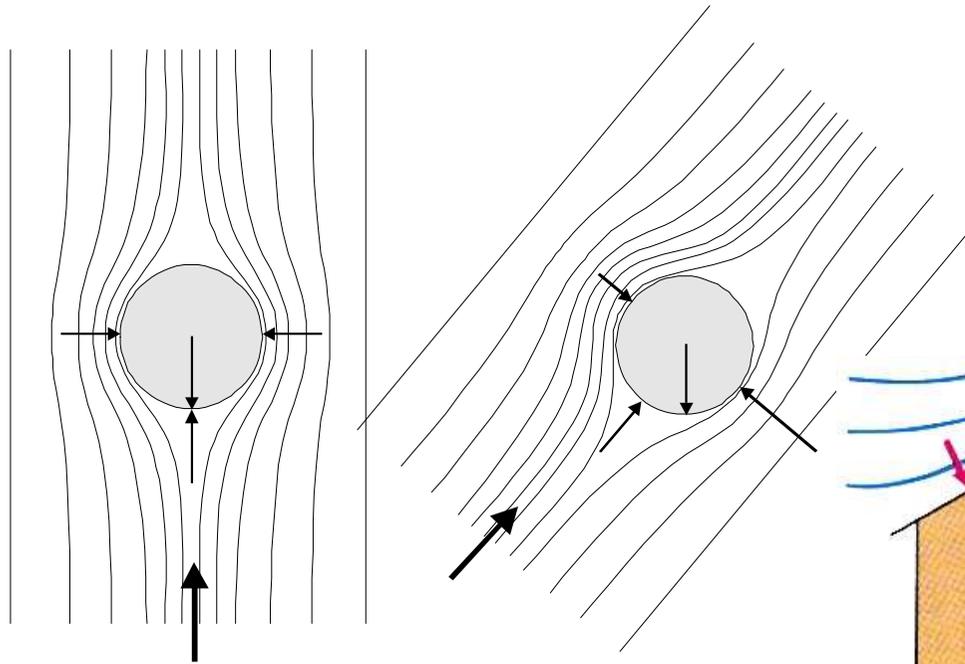
Energieerhaltung  $\Rightarrow$

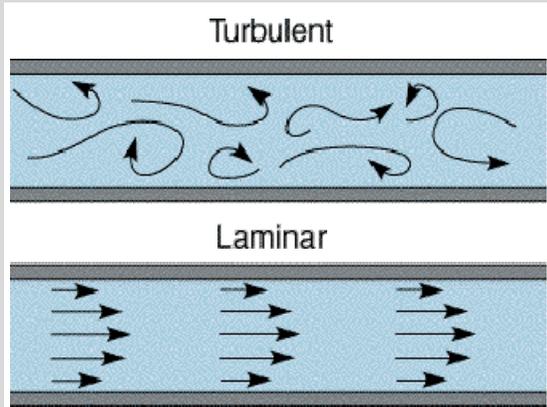
$$p + \frac{1}{2} \rho \cdot v^2 + \rho \cdot g \cdot h = \text{konstant}$$

Die Gleichung gilt nur für:

- starres Rohr *oder* stationäre Strömung
- ideale Flüssigkeit

# Anwendungen der bernoullischen Gleichung

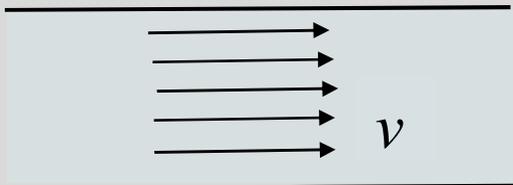




Volumenstromstärke ( $I$ ):  $I = \frac{\Delta V}{\Delta t} \left( \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right)$

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

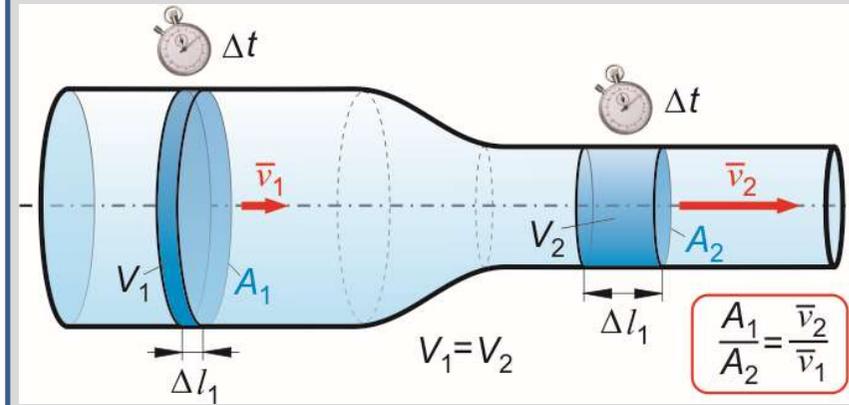
Ideale Flüssigkeit (ohne innere Reibung)



Bernoullische Gleichung

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

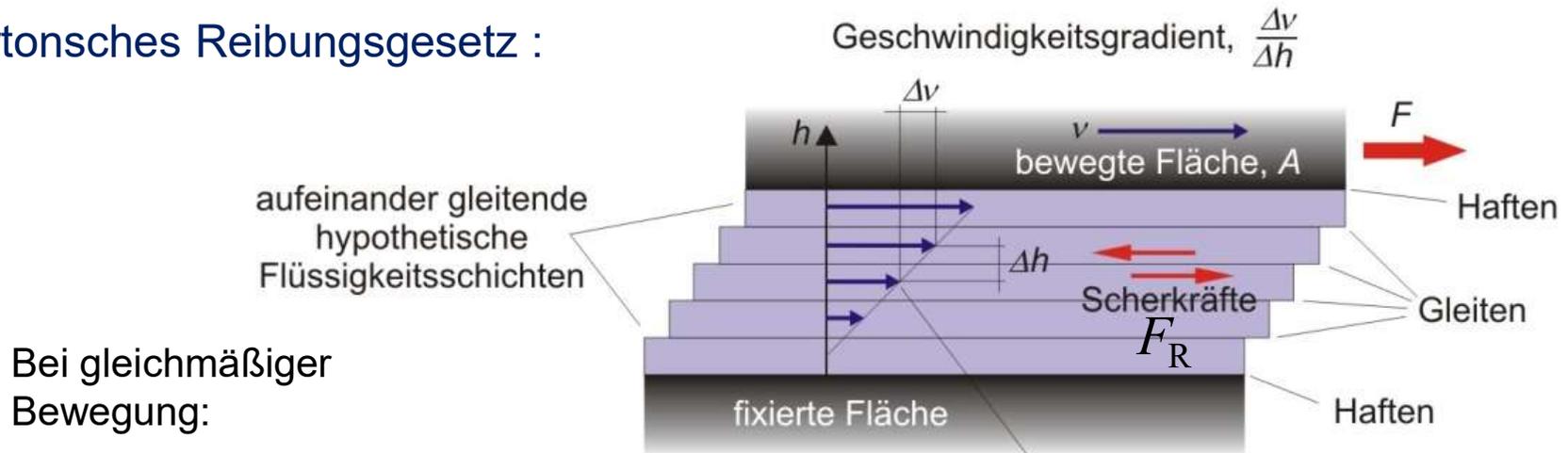
Kontinuitätsgleichung



- 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 :

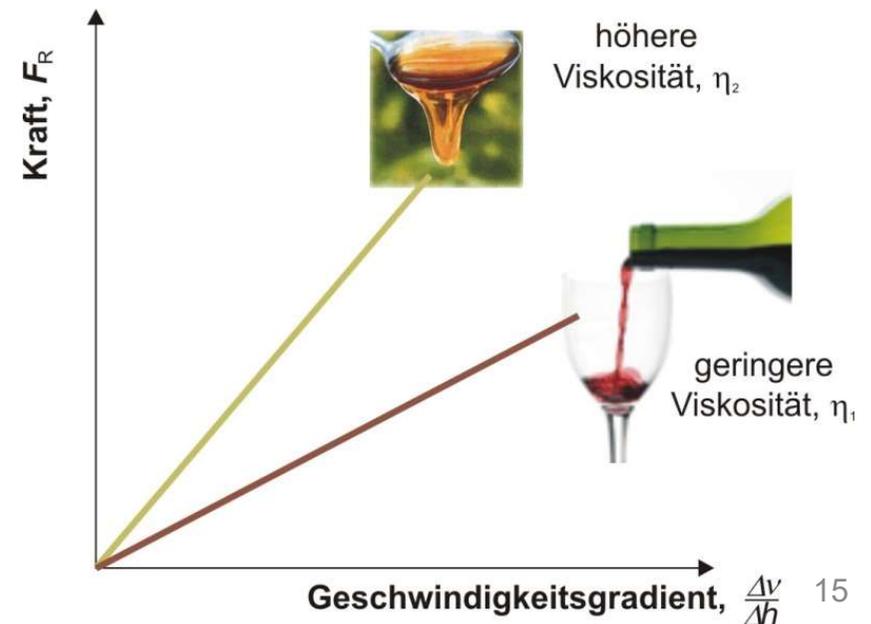


$$F = F_R = \eta \cdot A \cdot \frac{\Delta v}{\Delta h}$$

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

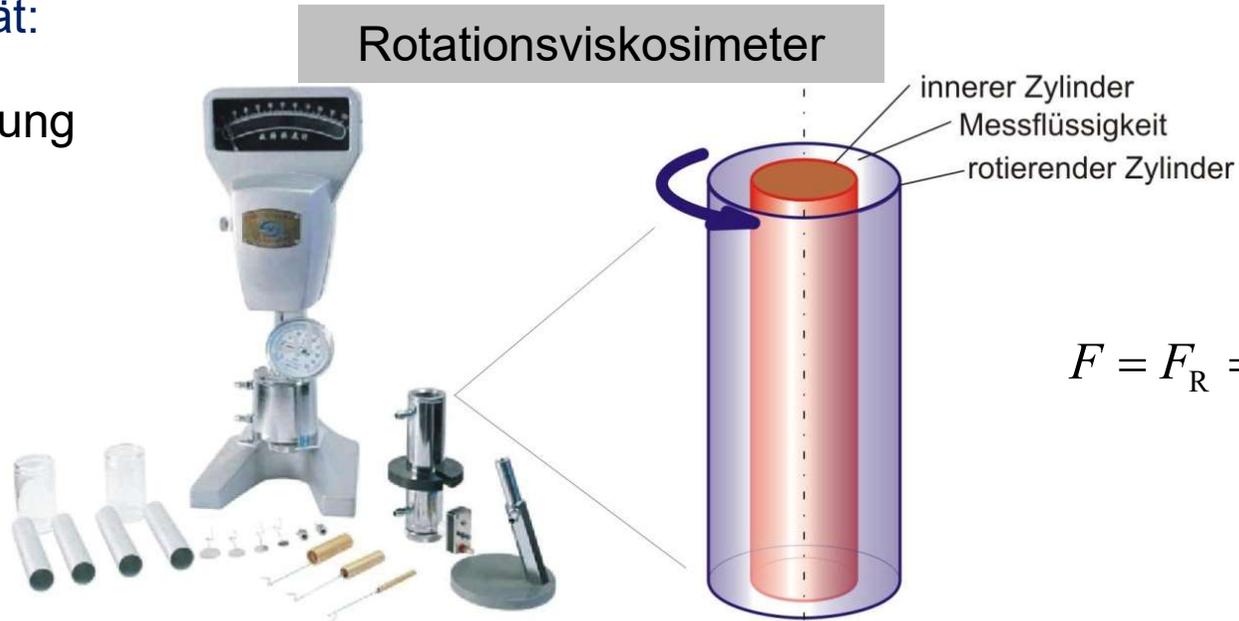
Geschwindigkeitsgradient

Geschwindigkeit der Flüssigkeitsschicht im Verhältnis zur stehenden Fläche



■ Viskosität:

➤ Messung

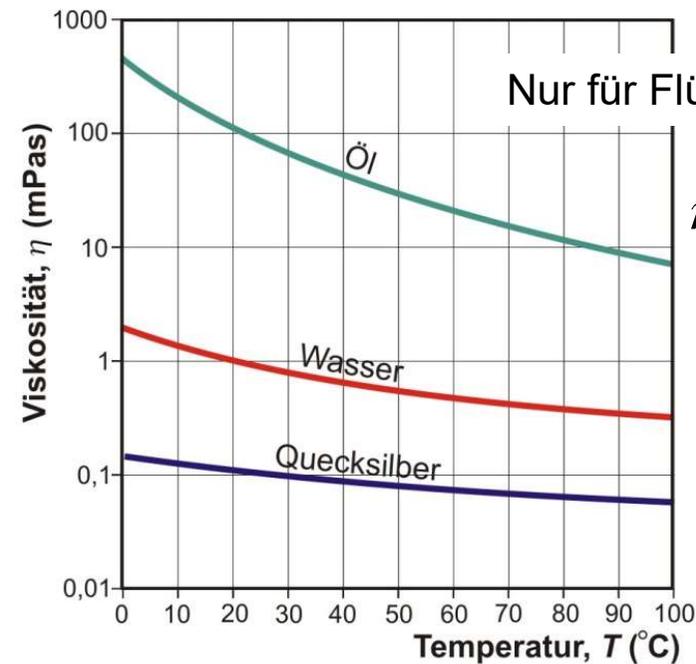


$$F = F_R = \eta \cdot A \cdot \frac{\Delta v}{\Delta h}$$

➤ stoffspezifisch

| Stoff         | $\eta$ (mPa·s) 20 °C |
|---------------|----------------------|
| Luft          | (101 kPa) 0,019      |
| <b>Wasser</b> | <b>1</b>             |
| Äthanol       | 1,2                  |
| Blut (37 °C)  | 2–8                  |
| Glyzerin      | 1490                 |
| Honig         | 2000–14000           |

➤ temperaturabhängig



Nur für Flüssigkeiten:

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