

# Medizinische Biophysik 2017. 03. 13.

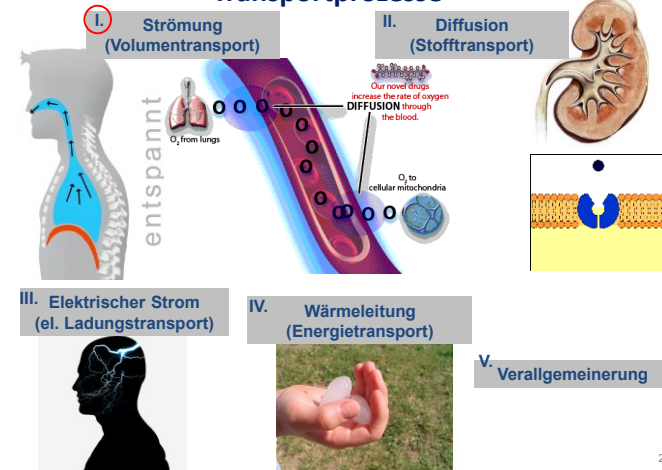
## Transportprozesse

### I. Strömungen (Volumentransport)

- Grundbegriffe**
  - Strömungsarten: laminare, turbulente
  - Volumenstromstärke, -dichte
  - Flüssigkeit: ideale, reelle
  - Anwendung: **Blutströmung** (Volumenstromstärke, Strömungsgeschwindigkeit, Messmethoden)
- Kontinuitätsgleichung** → Anwendung: **Blutkreislauf**
- Strömung von idealen Flüssigkeiten**
  - Geschwindigkeitsprofil
  - Bernoullische Gleichung
- Strömung von realen Flüssigkeiten**
  - Newton'sches Reibungsgesetz
  - Viskosität → Anwendung: Viskosität des Blutes

1

### Transportprozesse

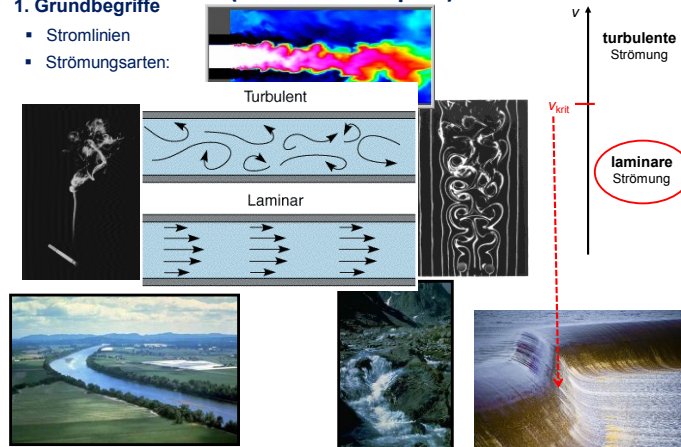


2

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

#### 1. Grundbegriffe

- Stromlinien
- Strömungsarten:

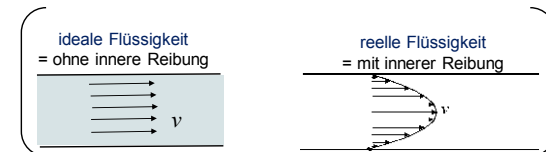
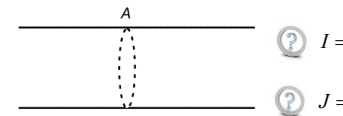


Allgemeine Gültigkeitsvoraussetzungen: • inkompressible Gas/Flüssigkeit  
• laminare Strömung

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

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

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



4

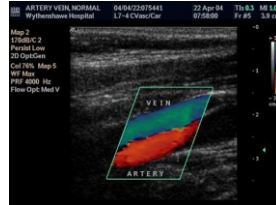
## Anwendung: Blutströmung

- Volumenstromstärke und Strömungsgeschwindigkeit in der Aorta?

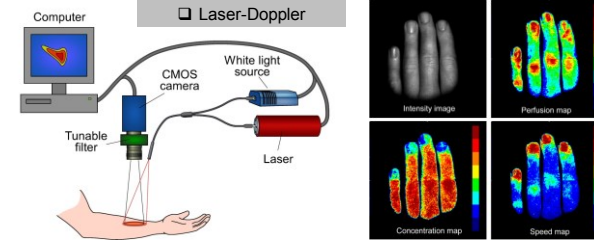
$$I = \frac{\Delta V}{\Delta t} \approx 6 \frac{\text{Liter}}{\text{min}} \quad ? \quad \bar{v} =$$

- Messmethoden der Volumenstromstärke:

□ Ultraschall-Doppler



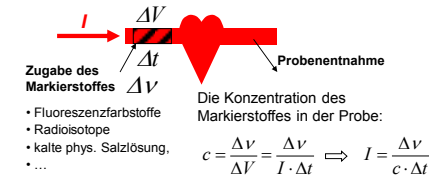
□ Laser-Doppler



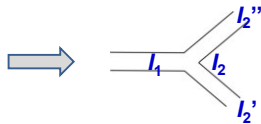
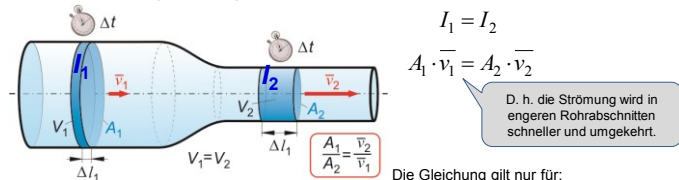
□ Impedanz-Methoden

(siehe später!)

□ Dilutionsmethoden

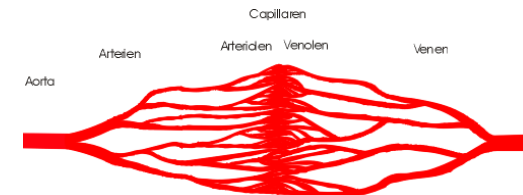


## 2. Kontinuitätsgleichung



(Siehe Kirchhoffsche Knotenregel in der Elektrizitätslehre!)

## Kontinuitätsgleichung im Blutkreislauf

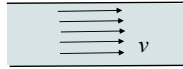


Gefäß	Aorta	Arterien	Arteriolen	Kapillaren	Venolen	Venen	Hohlvenen
A (cm <sup>2</sup> )	4,5	20	400	4500	4000	40	18
v (cm/s)	23	5	0,25	0,022	0,025	2,5	6

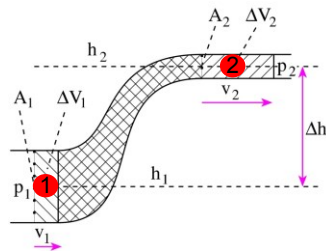
### 3. Strömung von idealen Flüssigkeiten

- Ideale Flüssigkeit: keine innere Reibung

- Geschwindigkeitsprofil:



- Bernoullische Gleichung:

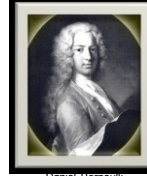


Energieerhaltung  $\Rightarrow$

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

Die Gleichung gilt nur für:

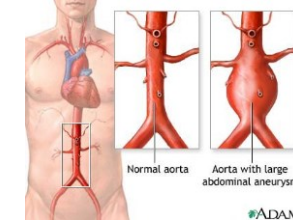
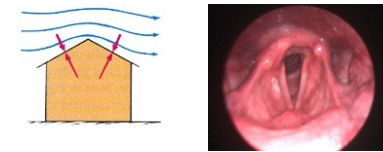
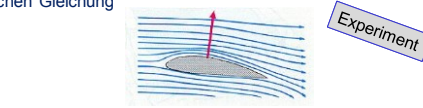
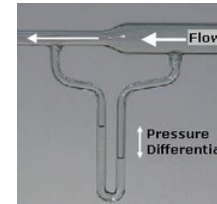
- starres Rohr *oder* stationäre Strömung
- ideale Flüssigkeit



Daniel Bernoulli  
1700-1782  
Mathematiker  
Physiker  
Anatom

9

### Anwendungen der bernoullischen Gleichung



ADAM

10

### 4. Strömung von reellen Flüssigkeiten

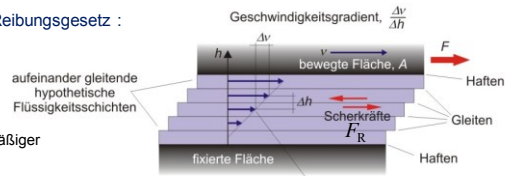
- Reelle Flüssigkeit: innere Reibung ist nicht vernachlässigbar

- Newtonsches Reibungsgesetz:

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

Viskosität (innerer Reibungskoeffizient)  
[ $\eta$ ] = Pa·s

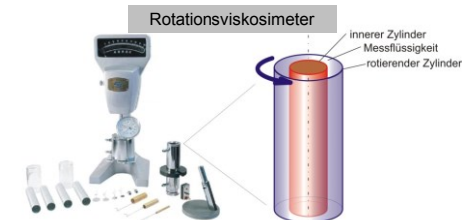
Geschwindigkeitsgradient



11

- Viskosität:

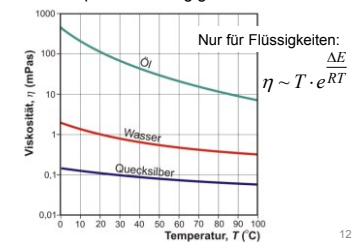
- Messung



- 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



12

- Viskosität: ➤ geschwindigkeitsgradientabhängig

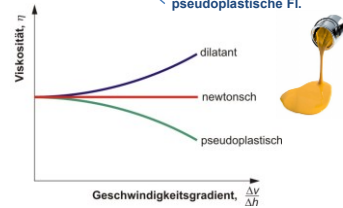
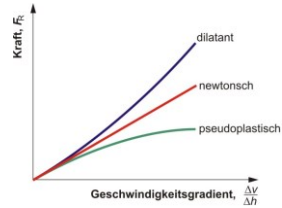
Einteilung der Flüssigkeiten

newtonsche (normale) Flüssigkeit

nicht-newtonsche (anomale) Flüssigkeit

dilatante Fl.

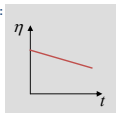
pseudoplastische Fl.



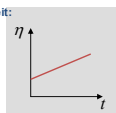
- zeitabhängig



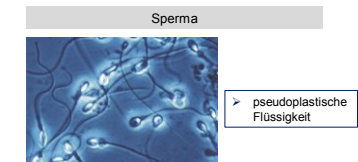
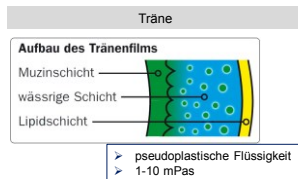
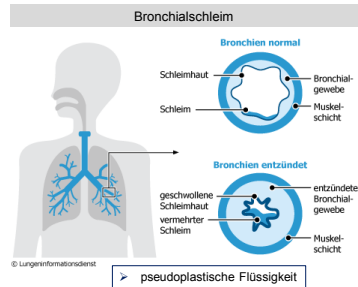
Thixotrope Flüssigkeit:



Rheopexie Flüssigkeit:



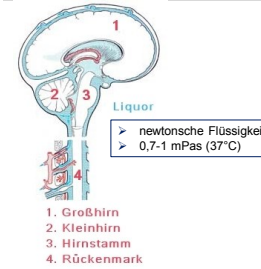
13



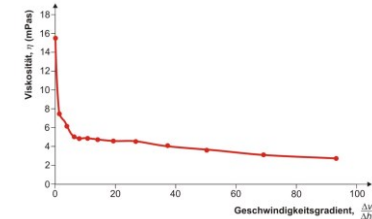
15

## Viskosität der Körperflüssigkeiten

Liquor (Gehirn-Rückenmarks-Flüssigkeit, Cerebrospinalflüssigkeit)



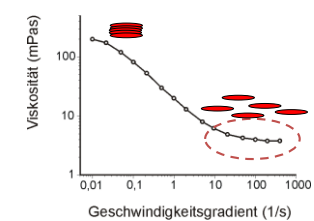
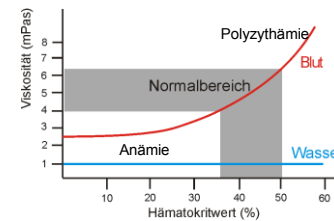
Speichel



14

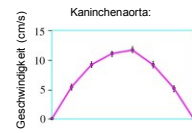
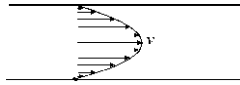
## Viskosität des Blutes

- 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)



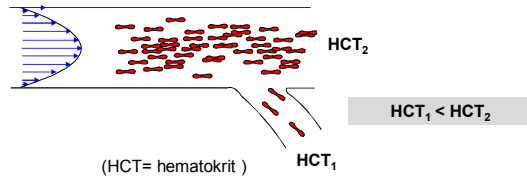
16

- Geschwindigkeitsprofil von reellen Flüssigkeiten:



#### Eine physiologische Folgerung: Plasma-Skimming

Parabolisches Geschwindigkeitsprofil + bernoullische Gleichung  $\Rightarrow$



17