

# Medizinische Biophysik 2016. 03. 20.

## Transportprozesse

### I. Strömungen (Volumentransport) Fortsetzung

4. Strömung von reellen Flüssigkeiten
- Kritische Geschwindigkeit → Anwendung: Blutströmung
  - Transportgesetz (Hagen-Poiseuille-Gesetz)
- Anwendung: Blutströmung

### II. Diffusion (Stofftransport)

1. Grundbegriffe Stoffstromstärke, -dichte
2. Transportgesetz = 1. Ficksches Gesetz
- Diffusionskoeffizient, Einstein-Stokes-Gleichung
  - chemisches Potenzial für Lösungen:

**Turbulenz**

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

$I = A \cdot v$

**Ideale Flüssigkeit (ohne innere Reibung)**

**Bernoullische Gleichung**

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

**Kontinuitätsgleichung**

$V_1 = V_2$

$\frac{A_1}{A_2} = \frac{v_2}{v_1}$

**Reelle Flüssigkeit (innere Reibung)**

**Newtonsches Reibungsgesetz**

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

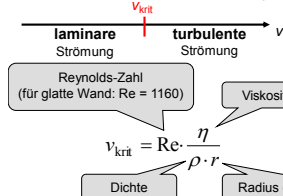
Viskosität (innerer Reibungskoeffizient)

- stoffspezifisch
- temperaturabhängig
- geschwindigkeitsgradientenabhängig
- zeitabhängig

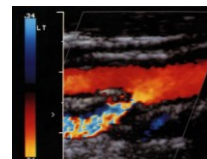
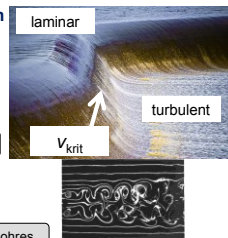
- Ist eine gewisse Strömung laminar oder turbulent?
- Was treibt die Strömung?
- Wovon hängt die Stromstärke der Strömung ab?

### 4. Strömung von reellen Flüssigkeiten

- Kritische Geschwindigkeit ( $v_{krit}$ ):

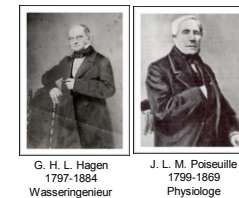
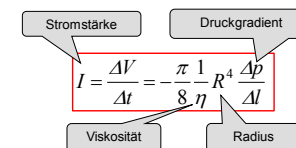
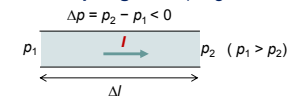


Ist die Blutströmung laminar oder turbulent? ?



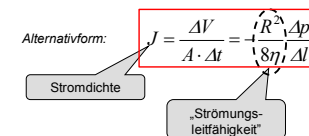
- Was treibt die Strömung?
- Wovon hängt die Volumenstromstärke der Strömung ab?

### Transportgesetz (Hagen-Poiseuille-Gesetz):



Weitere Gültigkeitsvoraussetzungen:

- stationäre Strömung
- newtonsche Flüssigkeit



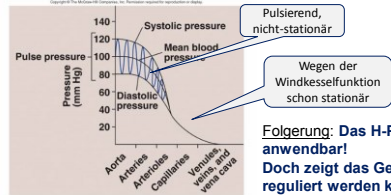
Strömungswiderstand ( $R_{\text{Strömung}}$ ):

$$R_{\text{Strömung}} = \frac{8\eta \Delta l}{R^2 A} = \frac{8\eta \Delta l}{R^2 \pi R^2}$$

(siehe elektrischen Widerstand!)

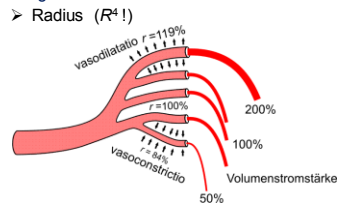
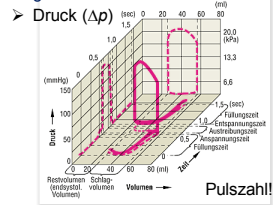
## Anwendung: Blutkreislauf

- Ist das H-P-Gesetz anwendbar für die Blutströmung?



**Folgerung: Das H-P-Gesetz ist nur annähernd anwendbar!**  
Doch zeigt das Gesetz richtig, wie die Blutströmung reguliert werden kann.

- Regulation der Volumenstromstärke laut Hagen-Poiseuille-Gesetzes:



5

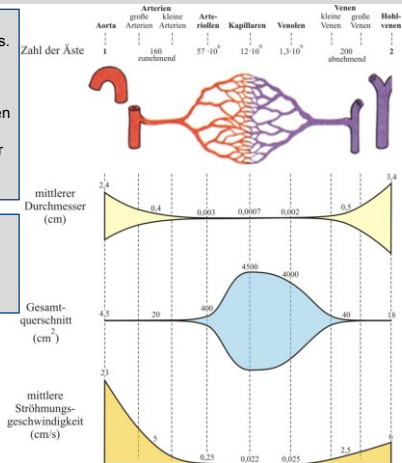
## Zusammenfassend über Blut und Blutströmung

Das Blut ist eine reelle Flüssigkeit mit einer Viskosität von 2-10 mPa·s. Die Viskosität hängt

- von der Temperatur,
- vom Hämatokritwert,
- vom Geschwindigkeitsgradienten (pseudoplastische Flüssigkeit),
- und vom Blutgefäßdurchmesser ab.

Die Blutströmung ist

- laminar ( $v < v_{krit}$ ),
- in dem ersten Abschnitt des Blutkreislaufs nicht-stationär, später schon stationär.



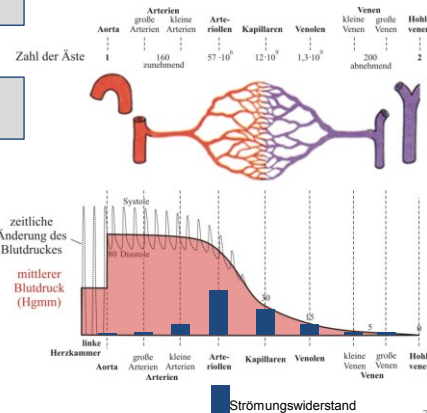
6

Die Blutströmung wird aufgrund des Hagen-Poiseuille-Gesetzes durch

- $\Delta p$ ,
- und  $r$

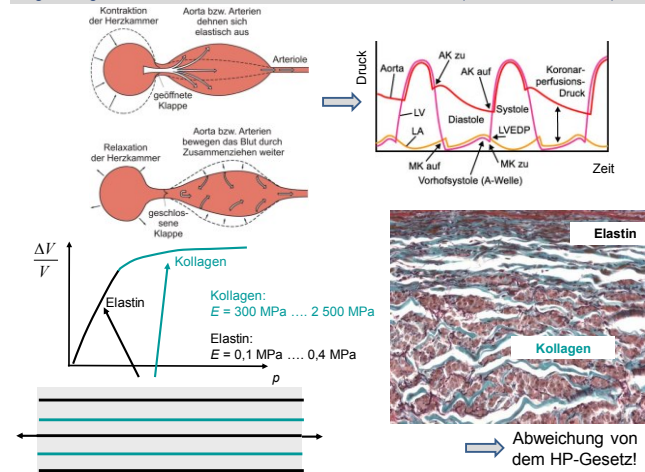
reguliert.

Der Strömungswiderstand ist im Bereich der Arteriolen und Kapillaren am größten.

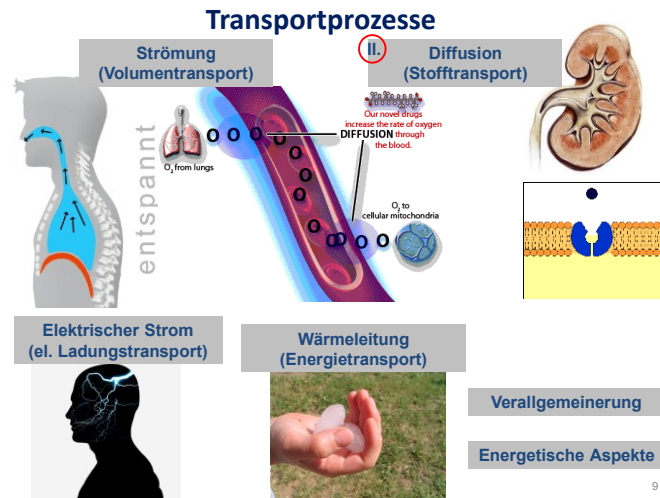


7

## Ergänzung: Rolle der Elastizität der Aorta und der Arterien (Windkesselfunktion)



8



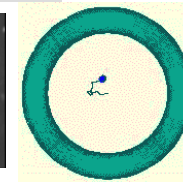
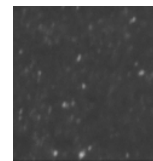
## II. Diffusion (Stofftransport)



Diffusion: Tendenz zur gleichmäßigen Verteilung von Molekülen durch die thermische Bewegung

0. Grundvoraussetzung: thermische Molekularbewegung

brownsche Bewegung

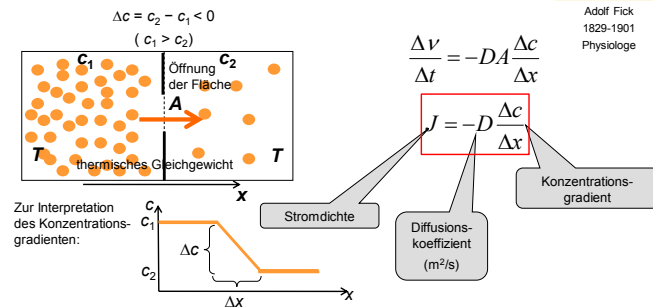


10

### 1. Grundbegriffe

- Stoffstromstärke ( $I$ ): (Diffusionsstromstärke)  $I = \frac{\Delta v}{\Delta t} \left( \frac{\text{mol}}{\text{s}} \right)$
- Stoffstromdichte ( $J$ ): (Diffusionsstromdichte)  $J = \frac{\Delta v}{A \cdot \Delta t} \left( \frac{\text{mol}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}} \right)$
- stationäre Diffusion: zeitlich konstant

### 2. Transportgesetz = 1. Ficksches Gesetz



11

### Analogie

	Was strömt?	Stärke?	Was treibt die Strömung?	Zusammenhang?
Volumen-transport	$V$	$J_V = \frac{\Delta V}{A \cdot \Delta t}$	$p$	$J_V = -\frac{R^2}{8\eta} \frac{\Delta p}{\Delta l}$
Stoff-transport	$v$	$J_v = \frac{\Delta v}{A \cdot \Delta t}$	$c$	$J_v = -D \frac{\Delta c}{\Delta x}$

12

▪ Diffusionskoeffizient:

- ☐ stoffspezifisch
  - diffundierendes Molekül – Größe
  - Medium ( $\eta$ ) – Form
- ☐ temperaturabhängig

➤ **Einstein-Stokes-Gleichung**

(Diffusionskoeffizient von kugelförmigen Teilchen):

$$D = \frac{kT}{6\pi\eta r}$$

Temperatur

Viskosität des Mediums

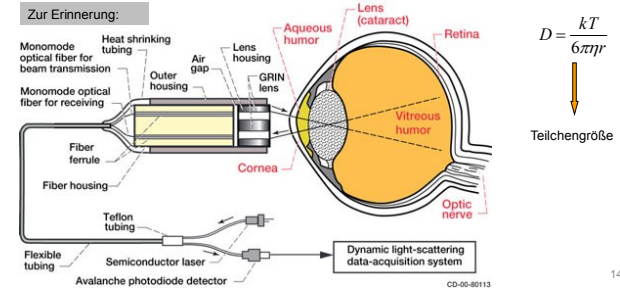
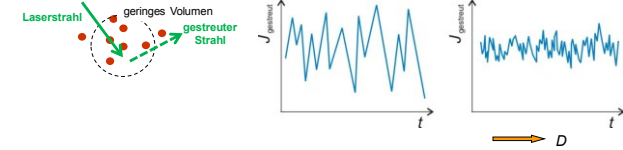
Radius des Teilchens

(Kontrollfrage: Wie hängt  $D$  von der Temperatur ab?)

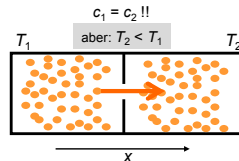
Diffundierendes Teilchen (Molmasse)	Medium	$D$ (m <sup>2</sup> /s)
H <sub>2</sub> (2)	Luft	6,4·10 <sup>-5</sup>
O <sub>2</sub> (32)	Luft	2·10 <sup>-5</sup>
CO <sub>2</sub> (44)	Luft	1,8·10 <sup>-5</sup>
H <sub>2</sub> O (18)	Wasser	2,2·10 <sup>-9</sup>
O <sub>2</sub> (32)	Wasser	1,9·10 <sup>-9</sup>
Glyzin (75)	Wasser	0,9·10 <sup>-9</sup>
Serum Albumin (69 000)	Wasser	6·10 <sup>-11</sup>
Tropomyosin (93 000)	Wasser	2,2·10 <sup>-11</sup>
Tabakmosaik-virus (40 000 000)	Wasser	4,6·10 <sup>-12</sup>

➤ Messung des Diffusionskoeffizienten:

eine Möglichkeit – dynamische Lichtstreuungsmessung



▪ Ohne thermisches Gleichgewicht:



Temperaturinhomogenitäten können zur Diffusion führen. Man braucht also zur allgemeineren Beschreibung der Diffusion statt der Konzentration eine Größe, die einerseits die Konzentration, andererseits aber auch die Temperatur enthält.

Konzentration ( $c$ )  $\Rightarrow$  chemisches Potenzial ( $\mu$ )

**chemisches Potenzial für Lösungen:**

Referenzlösung

$c_0$   
Normalpotenzial als Bezugswert  $\mu_0$

$c$   
 $\mu$  ?

$$\mu = \mu_0 + RT \ln \frac{c}{c_0} \quad [\mu] = \frac{\text{J}}{\text{mol}}$$

(Falls  $c_0 = 1 \text{ mol/l}$ , dann  $\mu = \mu_0 + RT \ln c$ )

Die Triebkraft der Diffusion im Allgemeinen:  $-\frac{\Delta\mu}{\Delta x}$