

# Biophysik für Pharmazeuten II.

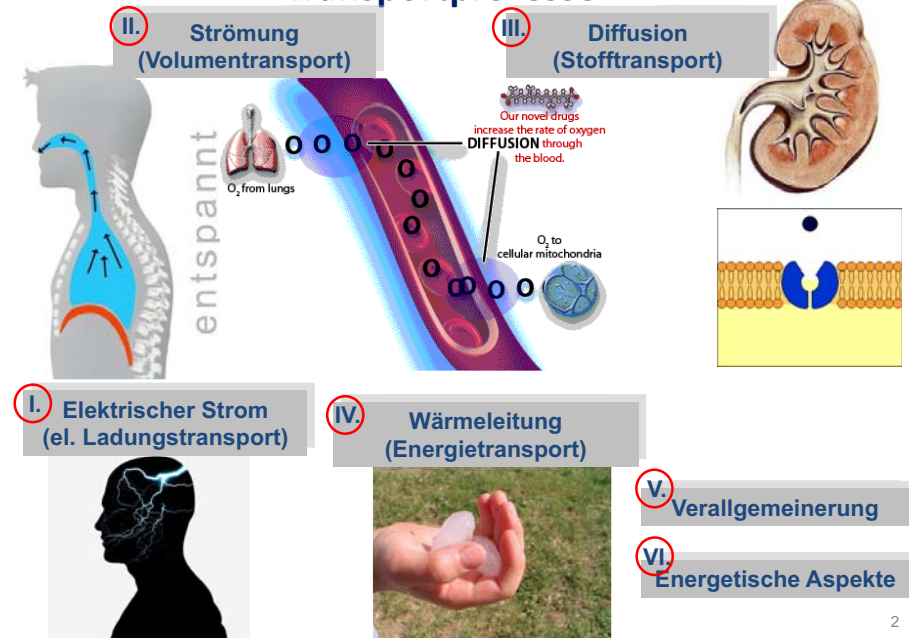
27. 03. 2017.

## Transportprozesse 2. Strömungen, Diffusion, Wärmeleitung



1

## Transportprozesse



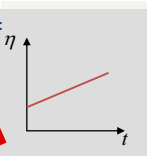
2

➤ zeitabhängig

Thixotrope Flüssigkeit:

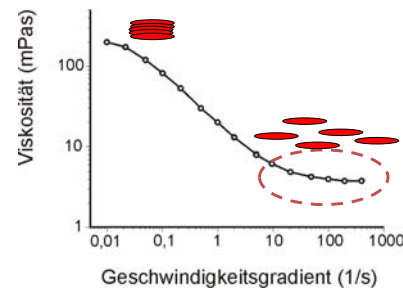
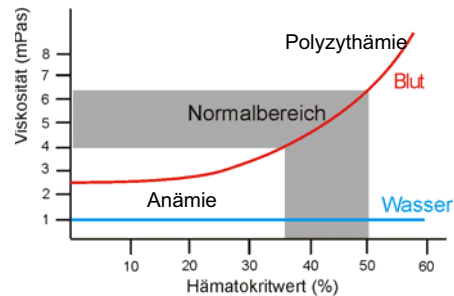


Rheopexie Flüssigkeit:



**Zur Erinnerung**

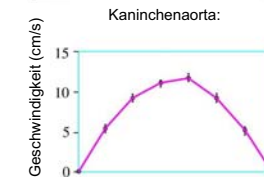
## Viskosität des Blutes



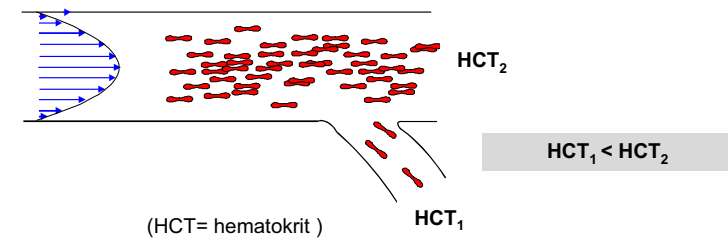
3

## II. Strömungen (Fortsetzung)

▪ Geschwindigkeitsprofil:

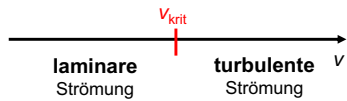


Eine physiologische Folgerung: Plasma-Skimming



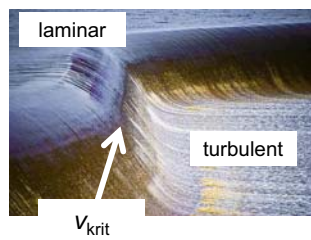
4

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



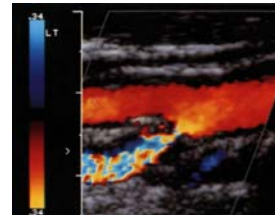
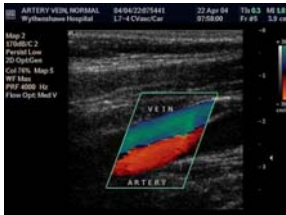
$$v_{krit} = Re \cdot \frac{\eta}{\rho \cdot r}$$

Reynolds-Zahl  
(für glatte Wand:  $Re = 1160$ )



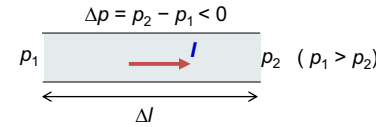
Osborne Reynolds  
1842-1912  
Wasseringenieur

Ist die Blutströmung laminar oder turbulent?



5

▪ Transportgesetz (Hagen-Poiseuille-Gesetz):



Bedingungen:

- inkompressible Fl.
- laminare Str.
- stationäre Str.
- newtonsche Fl.

Volumenstromstärke

Radius des Rohres

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = - \frac{\pi}{8} \frac{1}{\eta} R^4 \frac{\Delta p}{\Delta l}$$

Viskosität

Druckgradient



G. H. L. Hagen  
1797-1884  
Wasseringenieur



J. L. M. Poiseuille  
1799-1869  
Physiologe

Volumenstromdichte

Alternativform:  $\frac{\Delta V}{A \cdot \Delta t} = - \frac{R^2}{8\eta} \frac{\Delta p}{\Delta l}$

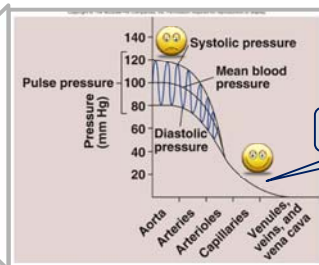
„Strömungsleitfähigkeit“

6

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

Gültigkeitsbedingungen?

- inkompressible Fl.?
- laminare Strömung?
- stationäre Strömung?
- newtonsche Fl.?



elastische Aderwände

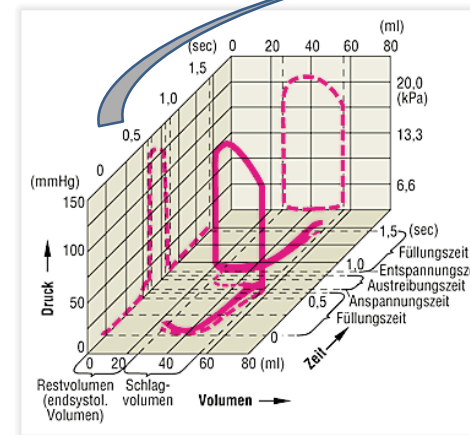
Folgerung: H-P nur qualitativ anwendbar!

7

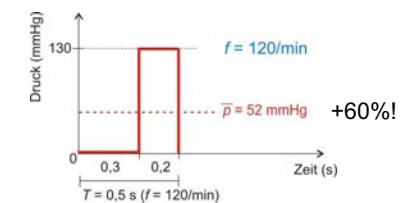
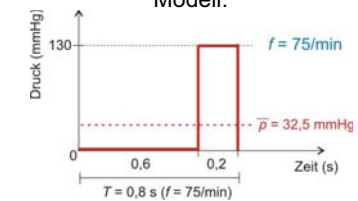
## Blutströmung

▪ Regulation der Volumenstromstärke laut Hagen-Poiseuille-Gesetzes:

➤ Druck

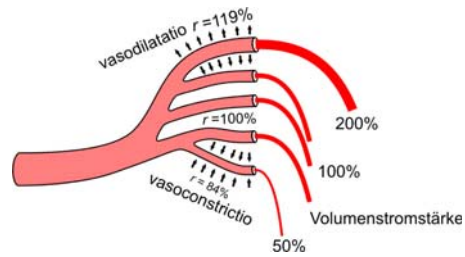


Modell:



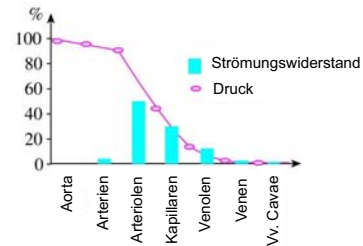
8

## ➤ Radius ( $r^4$ )



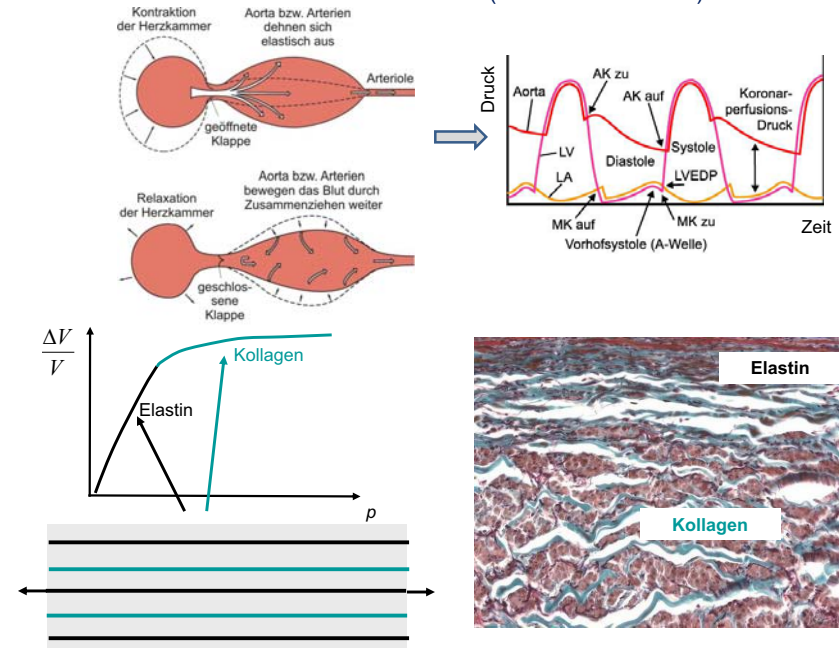
➡ Elastizität!

## ■ Druck und Strömungswiderstand im Kreislauf:



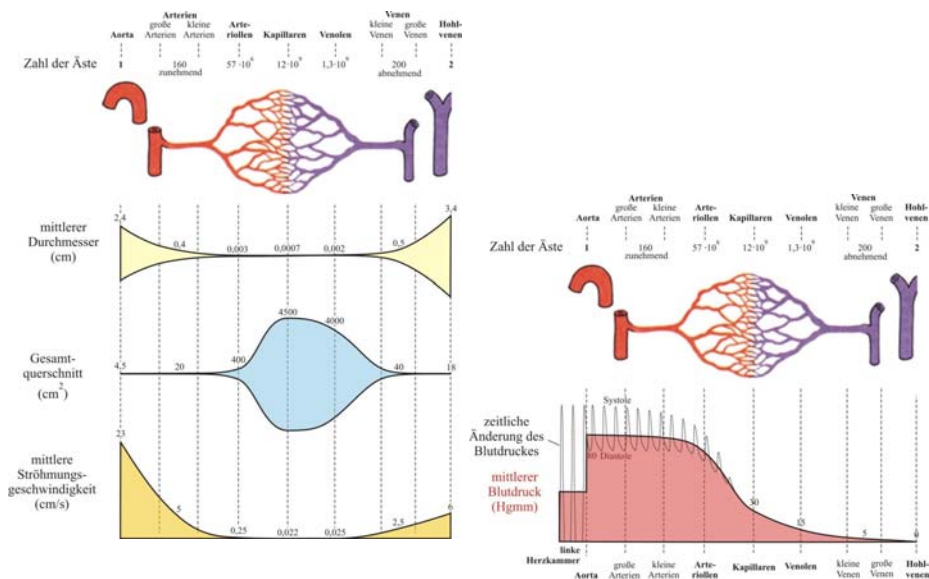
9

## ■ Rolle der Elastizität von Aorta und Arterien (Windkesselfunktion):



10

## Zusammenfassend:



11

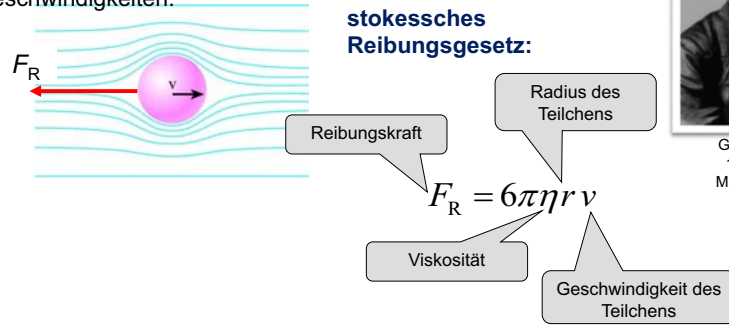
## Analogie

	Was strömt?	Stärke?	Was treibt die Strömung?	Zusammenhang?
Ladungs-transport	$q$	$J_q = \frac{\Delta q}{A \cdot \Delta t}$	$\varphi$	$J_q = -\sigma \frac{\Delta \varphi}{\Delta l}$
Volumen-transport	$V$	$J_V = \frac{\Delta V}{A \cdot \Delta t}$	$p$	$J_V = -\frac{R^2}{8\eta} \frac{\Delta p}{\Delta l}$

12

#### 4. Bewegung von Teilchen in reellen Flüssigkeiten

Bei kleineren Geschwindigkeiten:



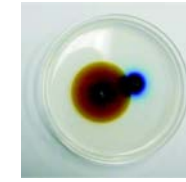
G. G. Stokes  
1819-1903  
Mathematiker  
Physiker

Bei gleichmäßigen Bewegung:  $F_{\text{Bewegung}} = F_R$

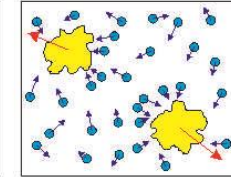
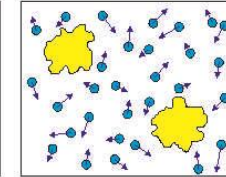
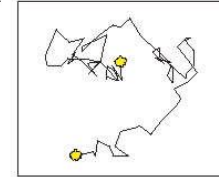
**Beweglichkeit** ( $u$ ) eines Teilchens:  $u = \frac{v}{F_{\text{Bewegung}}} \Rightarrow u = \frac{1}{6\pi\eta r} \Rightarrow$  s. Diffusion

13

### III. Stofftransport (Diffusion)



a



#### 1. Grundbegriffe

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

14

Stoffstromstärke ( $I$ ):  $I = \frac{\Delta v}{\Delta t} \left( \frac{\text{mol}}{\text{s}} \right)$

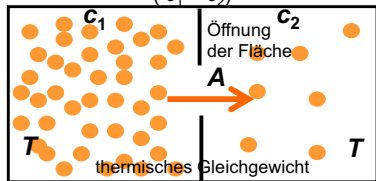
Stoffstromdichte ( $J$ ):  $J = \frac{\Delta v}{A \cdot \Delta t} \left( \frac{\text{mol}}{\text{s} \cdot \text{m}^2} \right)$

- stationäre Diffusion: zeitlich konstant

#### 2. Transportgesetz – 1. Ficksches Gesetz

$$\Delta c = c_2 - c_1 < 0$$

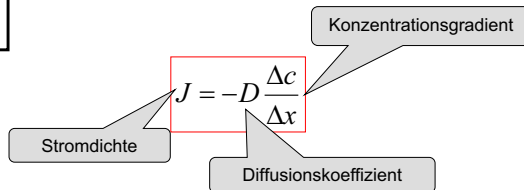
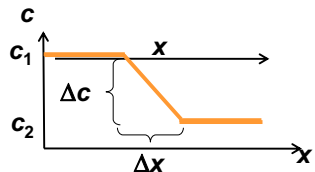
( $c_1 > c_2$ )



$$\frac{\Delta v}{\Delta t} = -DA \frac{\Delta c}{\Delta x}$$



Adolf Fick  
1829-1901  
Physiologe



15

#### Diffusionskoeffizient:

- stoffspezifisch
  - diffundierende Moleküle – Größe ( $r$ )
  - Form
- Medium ( $\eta$ )

temperaturabhängig  $D \sim e^{-\frac{\Delta E}{RT}}$

$D = ukT$

Beweglichkeit des Teilchens

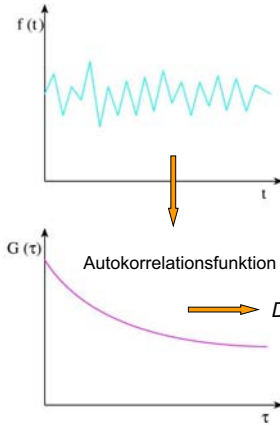
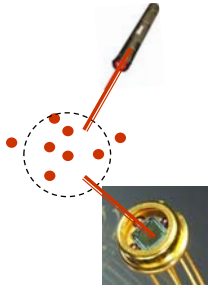
**Einstein-Stokes-Gleichung** (für kugelförmige Teilchen)

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

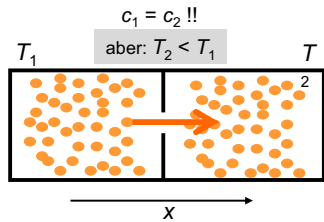
Diffundierendes Teilchen (Molmasse)	Medium	$D$ ( $\text{m}^2/\text{s}$ )
H <sub>2</sub> (2)	Luft	$6,4 \cdot 10^{-5}$
O <sub>2</sub> (32)	Luft	$2 \cdot 10^{-5}$
CO <sub>2</sub> (44)	Luft	$1,8 \cdot 10^{-5}$
H <sub>2</sub> O (18)	Wasser	$2,2 \cdot 10^{-9}$
O <sub>2</sub> (32)	Wasser	$1,9 \cdot 10^{-9}$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

16

- **Messung:**  
eine Möglichkeit – dynamische Lichtstreuungsmessung



- Im thermischen Nichtgleichgewicht:



$$\mu = \mu_0 + RT \ln \frac{c}{c_0}$$

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

17

### 3. Das 2. Ficksche Gesetz:

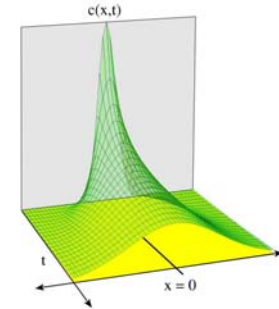
$$D \frac{\Delta \left( \frac{\Delta c}{\Delta x} \right)}{\Delta x} = \frac{\Delta c}{\Delta t} \quad D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} = \frac{\partial c}{\partial t}$$

Lösungen:

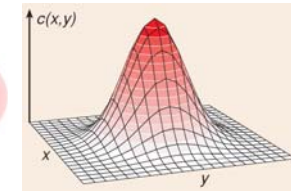
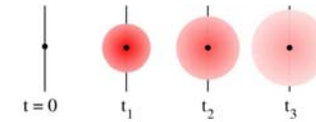
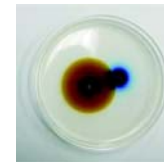
- Für eindimensionale Diffusion:

$$c(x) = \frac{c_0 \Delta x}{\sqrt{2\pi\sigma_x^2}} e^{-\frac{x^2}{2\sigma_x^2}}$$

$$\sigma_x = \sqrt{2Dt}$$



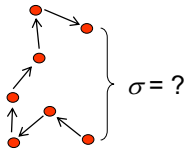
- Für zweidimensionale Diffusion:



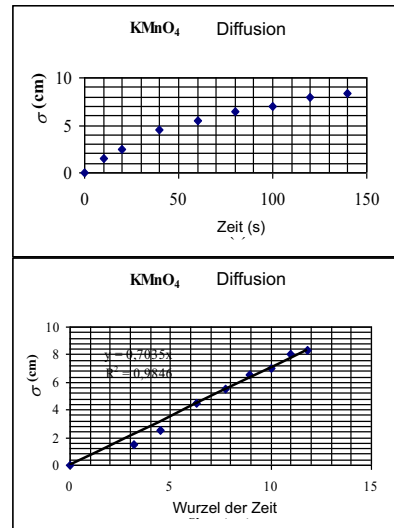
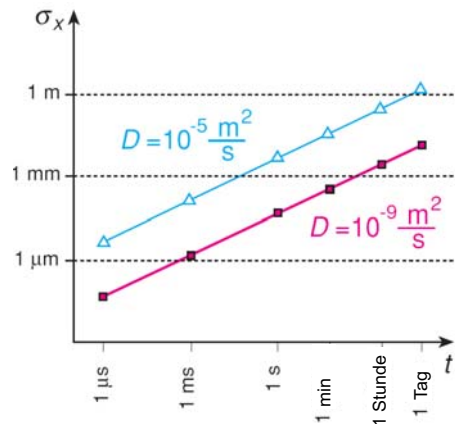
Siehe auch Praktikum!

18

### 4. Diffusion als Random Walk



$$\sigma \approx \sqrt{2D \cdot t}$$



19