

# Biophysik für Pharmazeuten II.

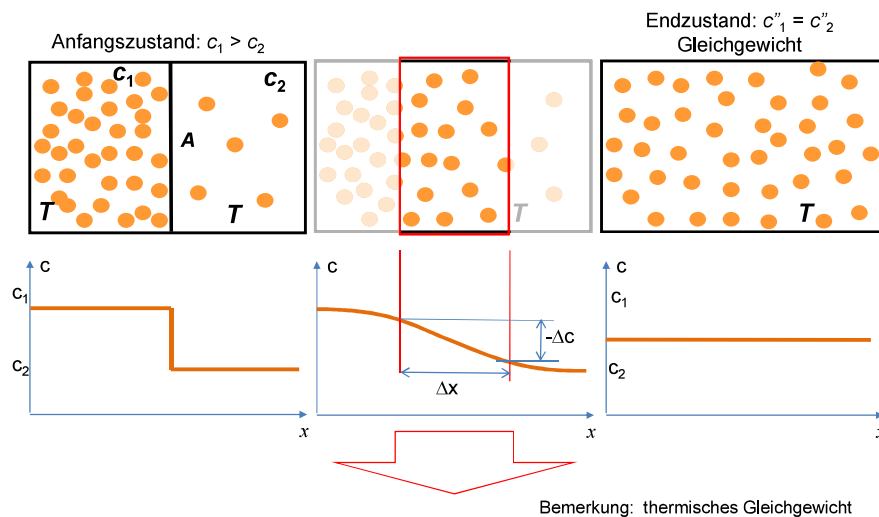
15. 04. 2020.

## Transportprozesse 3. Diffusion,



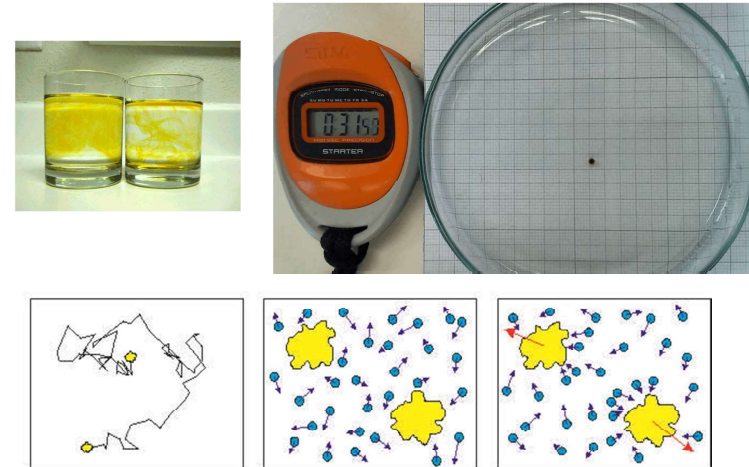
1

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



4

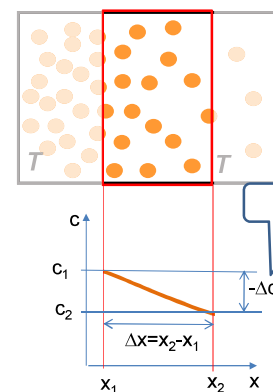
## III. Stofftransport (Diffusion)



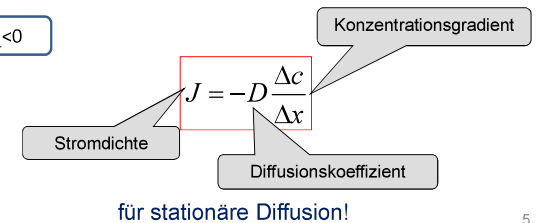
3

- 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



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



5

## Diffusionskoeffizient:

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

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

- $D = ukT$  Beweglichkeit des Teilchens

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

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

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>
Tabakmosaikvirus (40 000 000)	Wasser	4,6·10 <sup>-12</sup>

6

## 4. Bewegung von Teilchen in reellen Flüssigkeiten

**Zur Erinnerung**

**stokessches Reibungsgesetz:**

Bei kleineren Geschwindigkeiten:

Reibungskraft  $F_R = 6\pi\eta r v$

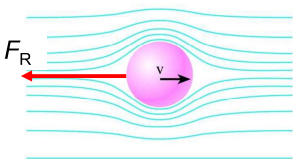

Radius des Teilchens

Viskosität

Geschwindigkeit des Teilchens

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

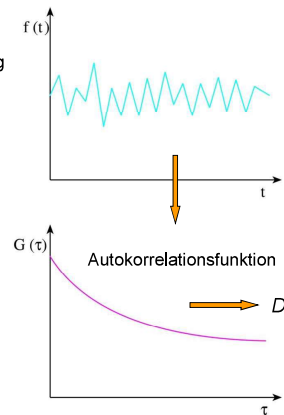
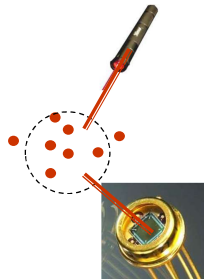
**Beweglichkeit ( $u$ ) eines Teilchens:**  $u = \frac{v}{F_{\text{Bewegung}}} \Rightarrow u = \frac{1}{6\pi\eta r} \Rightarrow$  s. Diffusion

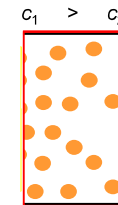
G. G. Stokes  
1819-1903  
Mathematiker  
Physiker

7

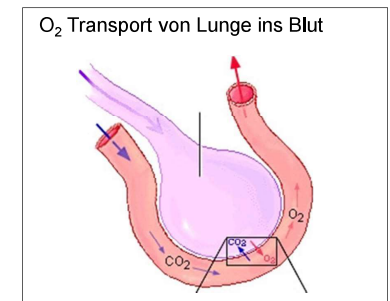
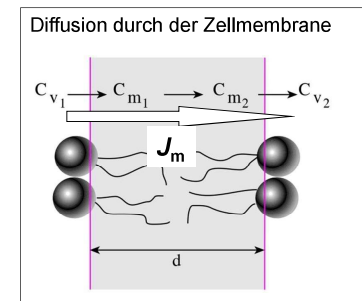
- **Messung:**  
eine Möglichkeit – dynamische Lichtstreuungsmessung



Stationäre Diffusion ???

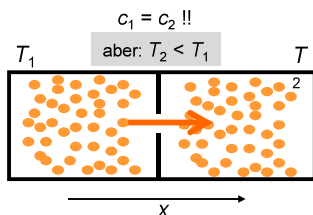


Zwei Beispiele, wo die Diffusion ist zu gute Annäherung stationär:



9

## Im thermischen Nichtgleichgewicht:



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

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

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

8

Partialdruck von O<sub>2</sub>: 100 mmHg

Partialdruck von O<sub>2</sub>: 100 mmHg

Partialdruck von O<sub>2</sub>: 40 mmHg

Partialdruck von CO<sub>2</sub>: 40 mmHg

Partialdruck von CO<sub>2</sub>: 100 mmHg

Während  $\Delta t$  Zeit Durchdiffundierte O<sub>2</sub>-Stoffmenge

Konzentrationsdifferenz

Zeitspanne (= Länge/Strömungsgeschwindigkeit)

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

Diffusionskoeffizient von O<sub>2</sub>-Molekülen in der Alveolarwand

Kontaktfläche zwischen dem Alveolarraum und der Kapillare

Dicke der Alveolarwand

Probleme bei der Anwendung:

- Gas - Flüssigkeit ➡ 1. Partialdruck  $p$  !
- 2. Henry-Gesetz

- Gas - Flüssigkeit ➡ 1. Partialdruck  $p$  !  
2. Henry-Gesetz

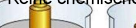
→ Excel

[illegible]

Bei  $v = 0,02 \text{ cm/s} !!!$



Keine chemische Reaktion



Gas	$k_H \left( \frac{\text{mol}}{\text{l} \cdot \text{kPa}} \right)$
O <sub>2</sub>	$1,26 \cdot 10^{-5}$
N <sub>2</sub>	$0,64 \cdot 10^{-5}$
CO <sub>2</sub>	$33,2 \cdot 10^{-5}$

ml Gas in 1 l Wasser

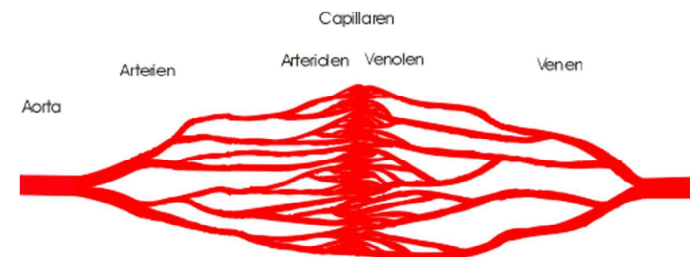
Temperatur (°C)	Sauerstoff (ml)	Wasserstoff (ml)	Stickstoff (ml)
0	48	25	23
20	30	18	15
40	23	15	12
60	19	13	10
80	18	12	9
100	17	11	8

Legend:  
 Sauerstoff (dark green line)  
 Wasserstoff (pink line)  
 Stickstoff (orange line)

Gas	Percentage
Stickstoff (Nitrogen)	78%
Sauerstoff (Oxygen)	21%
Edelgase (Noble gases)	1%
Kohlendioxid (Carbon dioxide)	0.03%

Gesamtdruck:  $p = 101 \text{ kPa} = 760 \text{ mmHg}$ , daraus  
der Partialdruck von  $\text{O}_2$ :  $p_{\text{O}_2} = 21,2 \text{ kPa} = 160 \text{ mmHg}$

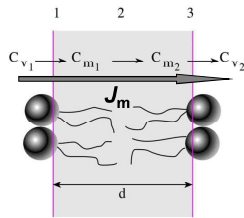
Zur Erinnerung



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

### ■ Diffusion durch eine Membran (passiver Transport)

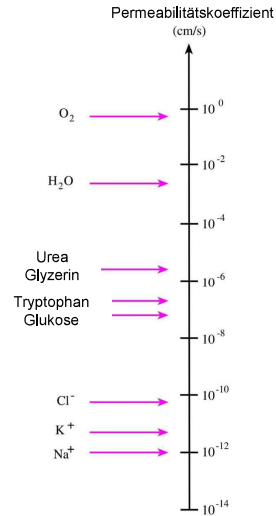
Für neutrale Teilchen:



$$J_m = -D \cdot \frac{\Delta c}{\Delta x} = -D \cdot \frac{c_{m2} - c_{m1}}{d} = -p(c_{v2} - c_{v1})$$

$$J_m = -p(c_{v2} - c_{v1})$$

Permeabilitätskoeffizient (m/s)



14

### 3. Das 2. Ficksche Gesetz:

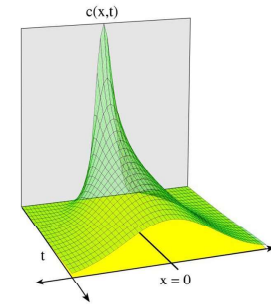
$$D \frac{\Delta \left( \frac{\Delta c}{\Delta x} \right)}{\Delta x} = \frac{\Delta c}{\Delta t} \quad D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} = \frac{\partial c}{\partial t}$$

Lösungen:

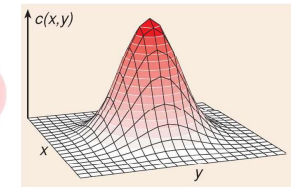
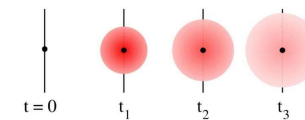
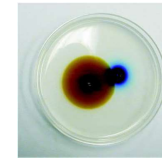
➤ Für eindimensionale Diffusion:

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

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



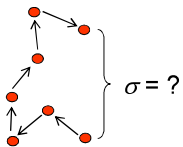
➤ Für zweidimensionale Diffusion:



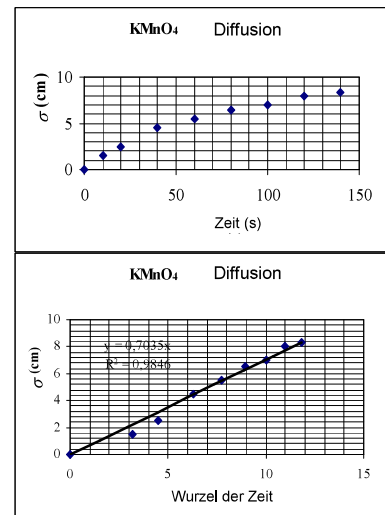
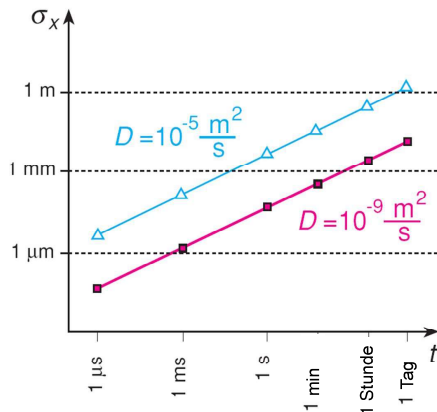
Siehe auch Praktikum!

15

### 4. Diffusion als Random Walk



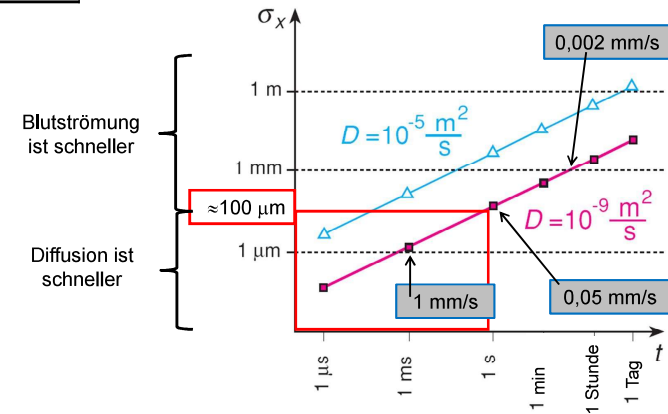
$$\sigma \approx \sqrt{2D \cdot t}$$



16

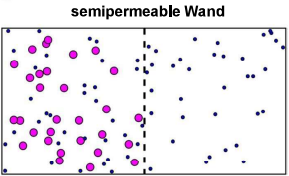
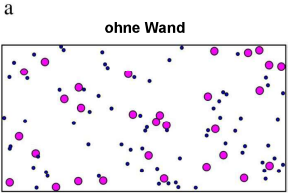
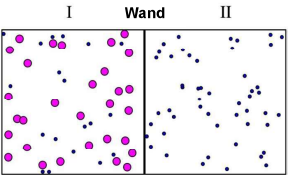
■ Welche ist „schneller“ für O<sub>2</sub>-Transport im Gewebe? Diffusion ↔ Blutströmung

Gefäß	Kapillaren
A (cm <sup>2</sup> )	4500
v (cm/s)	0,022 (= 0,22 mm/s)



17

■ Osmose



c

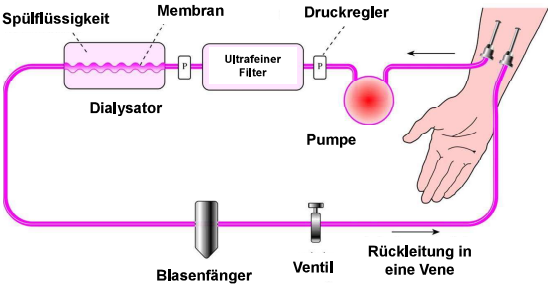


Van't Hoff-Gesetz:

$$p_{\text{Osmose}} = cRT$$



J. H. van't Hoff  
1852-1911  
Chemiker



Analogie

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