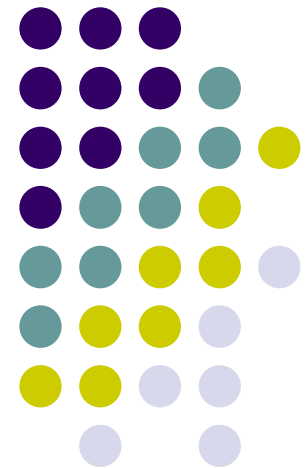


# Biophysik für Pharmazeuten II.

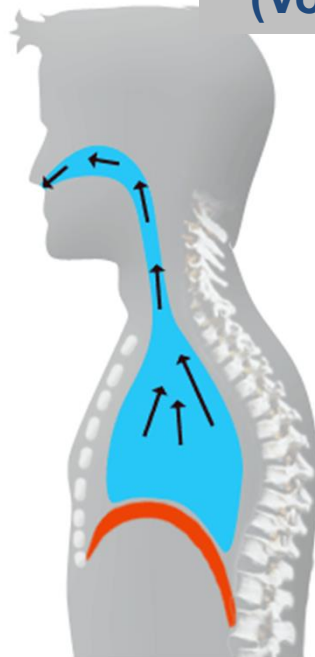
04. 04. 2025.

## Transportprozesse 3. Diffusion

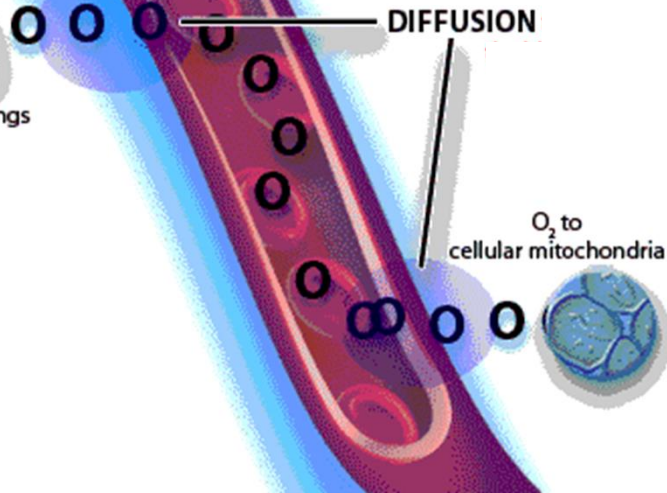


# Transportprozesse

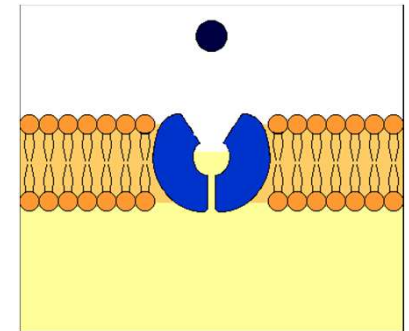
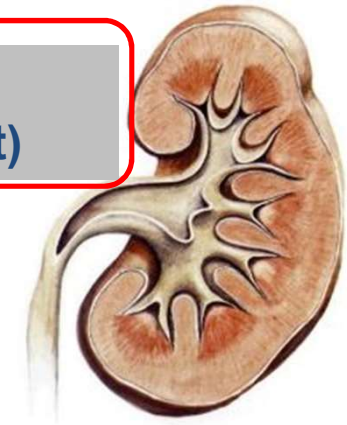
## II. Strömung (Volumentransport)



entspannt



## III. Diffusion (Stofftransport)



## I. Elektrischer Strom (el. Ladungstransport)



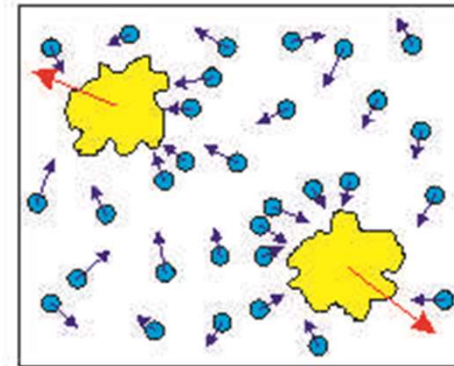
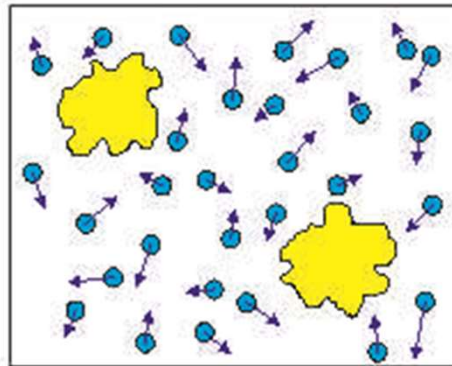
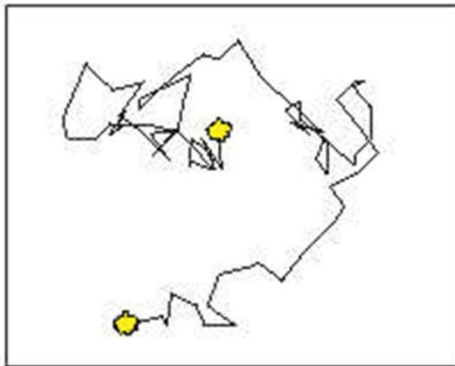
## IV. Wärmeleitung (Energietransport)



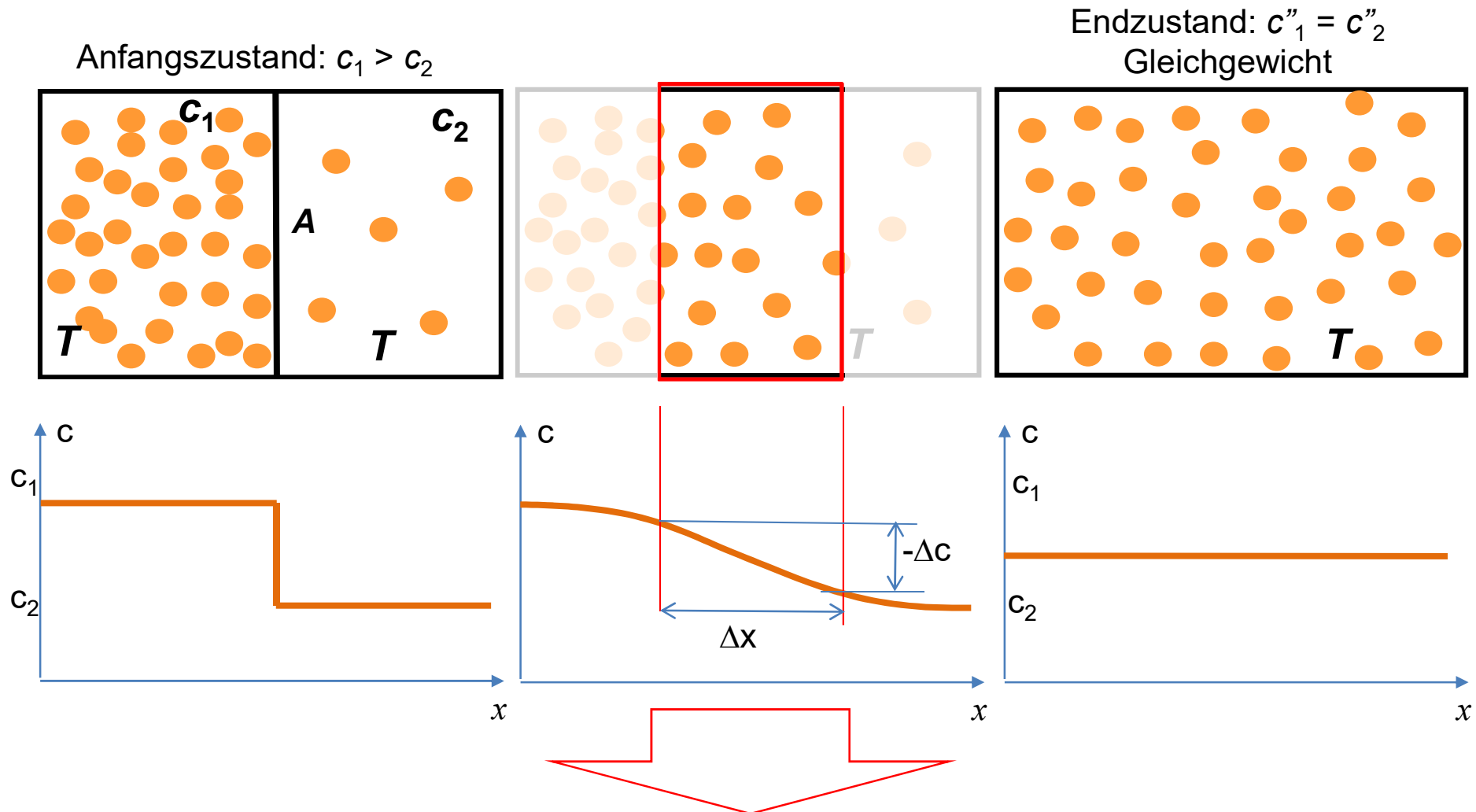
## V. Verallgemeinerung

## VI. Energetische Aspekte

### III. Stofftransport (Diffusion)



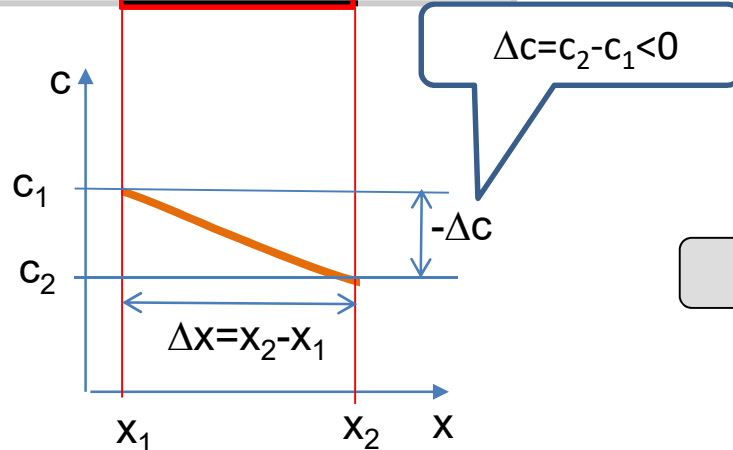
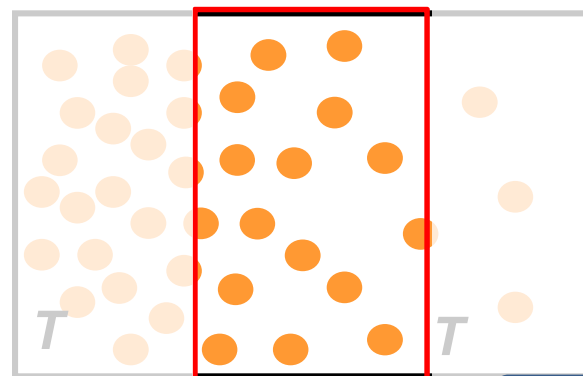
- Diffusion: Tendenz zur gleichmäßigen Verteilung von Molekülen durch die thermische Bewegung



Bemerkung: thermisches Gleichgewicht

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

## 2. Transportgesetz – 1. Ficksches Gesetz



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

$$J = -D \frac{\Delta c}{\Delta x}$$

Stromdichte

Diffusionskoeffizient

Konzentrationsgradient

für stationäre Diffusion!



Adolf Fick  
1829-1901  
Physiologe

## ▪ 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	$D$ (m <sup>2</sup> /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	$6 \cdot 10^{-11}$
Tropomiozin (93 000)	Wasser	$2,2 \cdot 10^{-11}$
Tabakmosaik-virus (40 000 000)	Wasser	$4,6 \cdot 10^{-12}$

## 4. Bewegung von Teilchen in reellen Flüssigkeiten

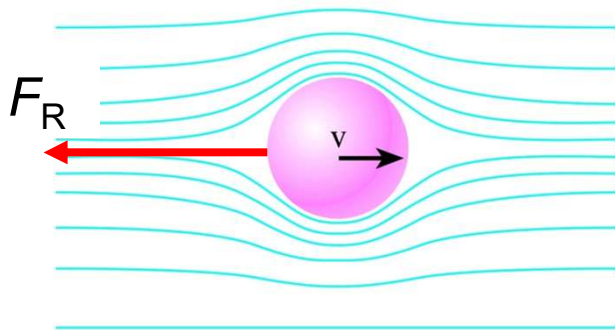
Zur Erinnerung

stokessches  
Reibungsgesetz:



G. G. Stokes  
1819-1903  
Mathematiker  
Physiker

Bei kleineren  
Geschwindigkeiten:



Reibungskraft

Radius des  
Teilchens

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

Viskosität

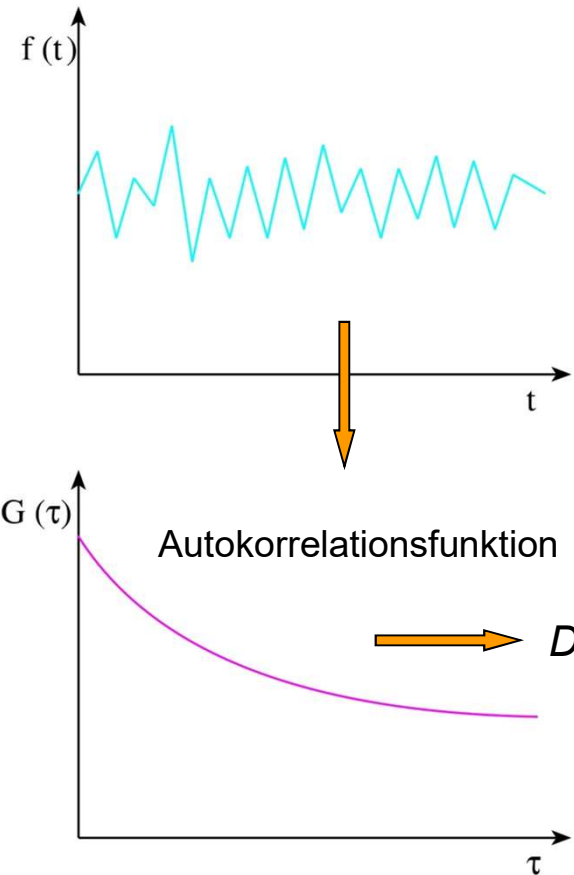
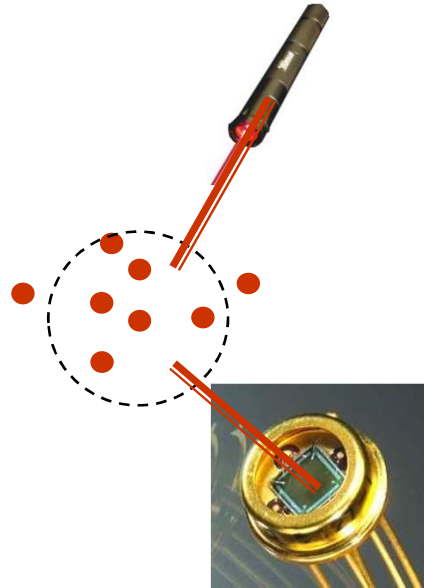
Geschwindigkeit des  
Teilchens

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

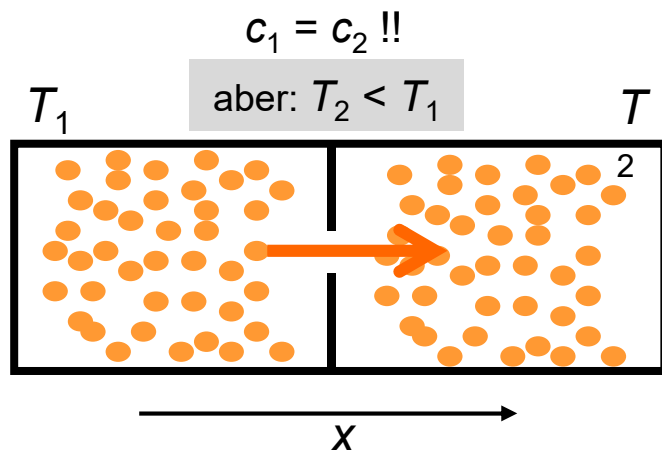
**Beweglichkeit** ( $u$ ) eines Teilchens:  $u = \frac{v}{F_{\text{Bewegung}}} \Rightarrow u = \frac{1}{6\pi\eta r} \Rightarrow$  s. Diffusion



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



- Im thermischen Nichtgleichgewicht:



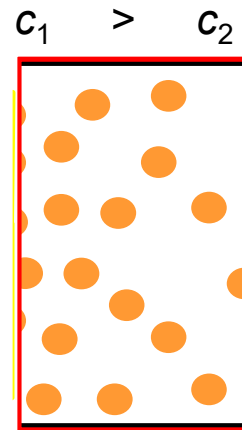
Konzentration ( $c$ )  $\Rightarrow$  chemisches Potenzial ( $\mu$ )

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

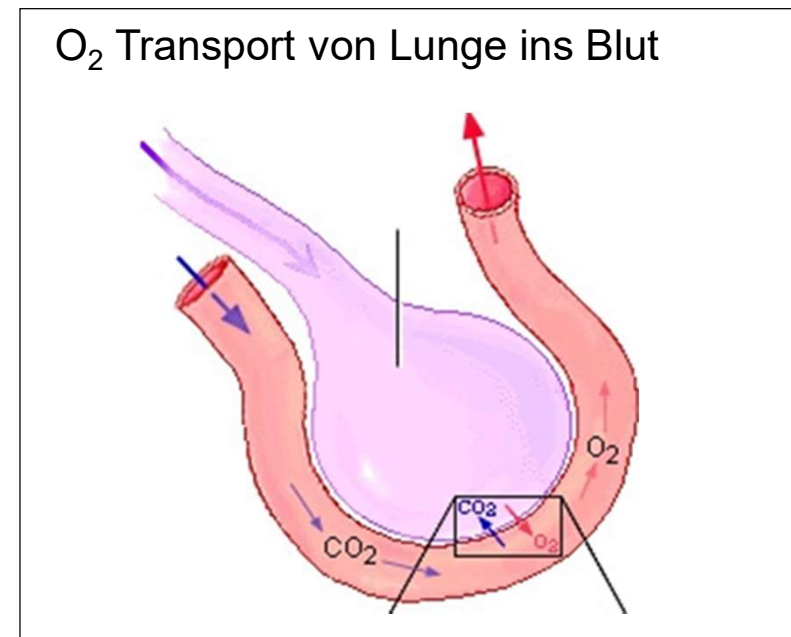
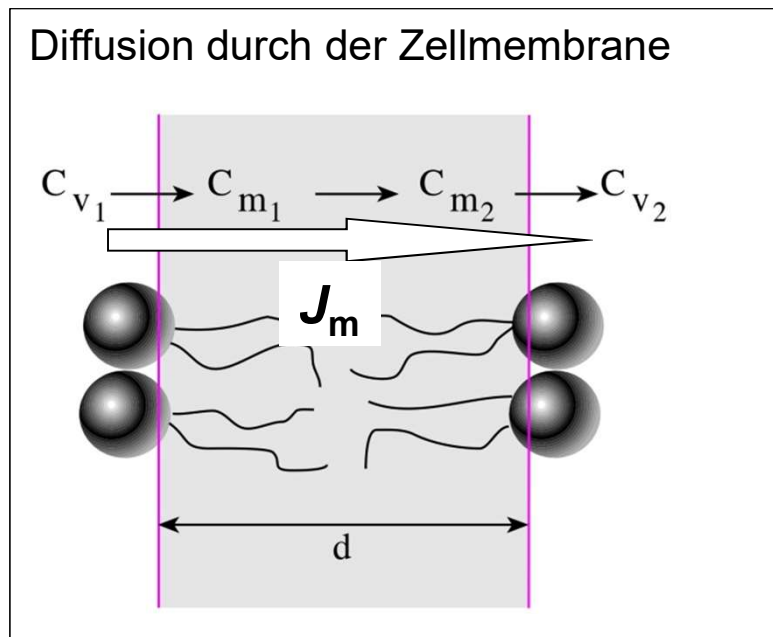
Die Triebkraft der Diffusion ist:  $-\frac{\Delta\mu}{\Delta x}$



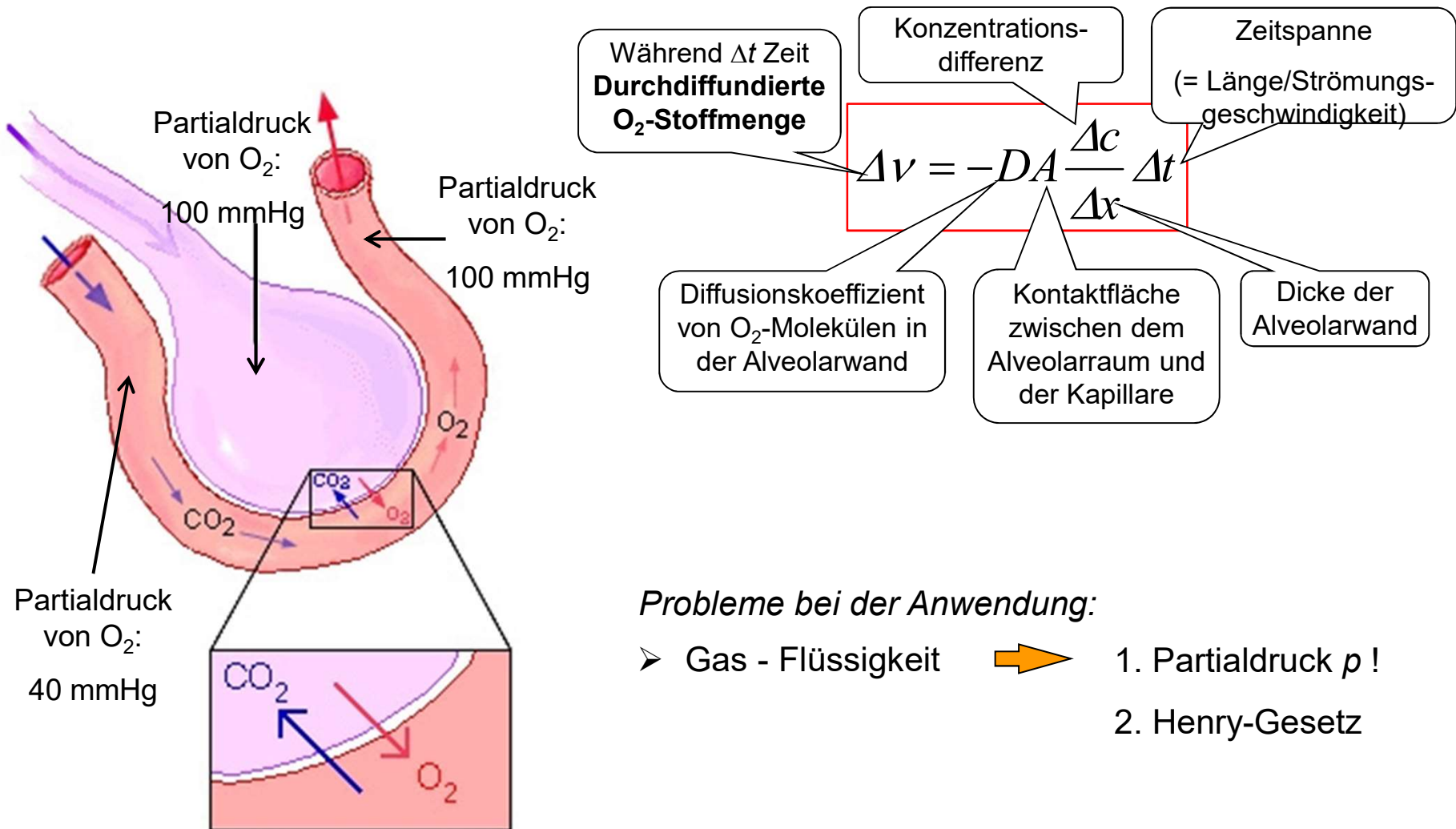
## Stationäre Diffusion ???



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



# Anwendung des 1. Fickschen Gesetzes für O<sub>2</sub>-Diffusion von Lunge ins Blut



*Probleme bei der Anwendung:*

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

# Löslichkeit von Gasen in Flüssigkeiten

## Henry-Gesetz:

$$c = k_H \cdot p$$

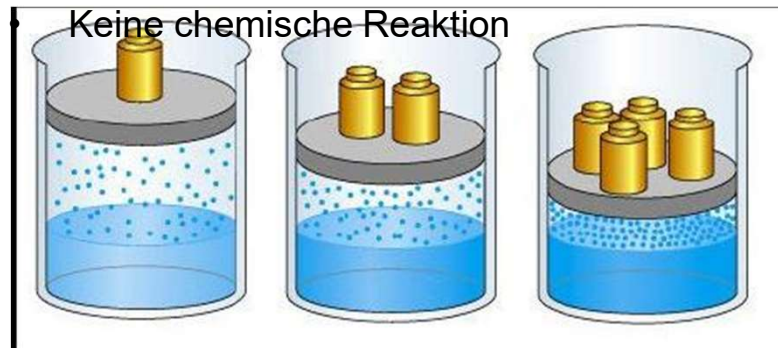
Konzentration in der Lösung

Partialdruck im Gas

Löslichkeitskoeffizient oder Henry-Konstante

Voraussetzungen:

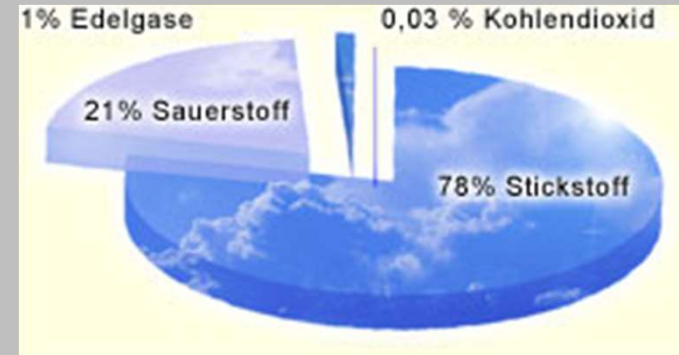
- Gleichgewicht
- Dünne Lösung



z. B. bei 25°C:

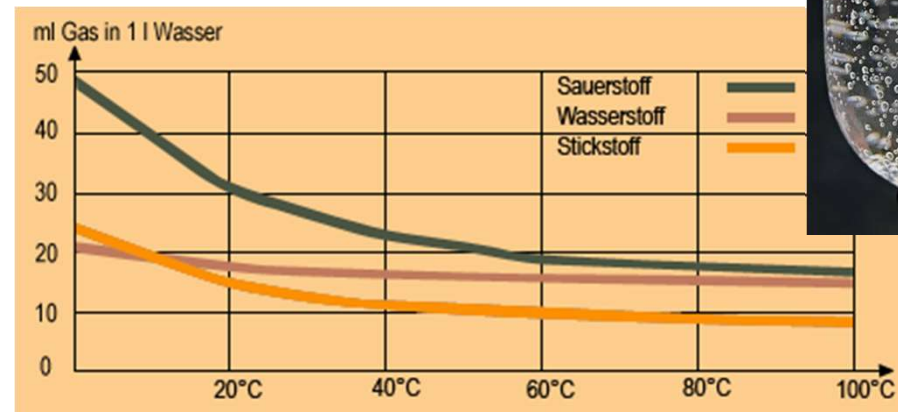
Gas	$k_H \left( \frac{\text{mol}}{\text{l} \cdot \text{kPa}} \right)$
O <sub>2</sub>	$1,26 \cdot 10^{-5}$
N <sub>2</sub>	$0,64 \cdot 10^{-5}$
CO <sub>2</sub>	$33,2 \cdot 10^{-5}$

Der Partialdruck entspricht dem Druck, den eine einzelne Gaskomponente eines Gasgemisches bei alleinigem Vorhandensein im betreffenden Volumen ausüben würde.



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

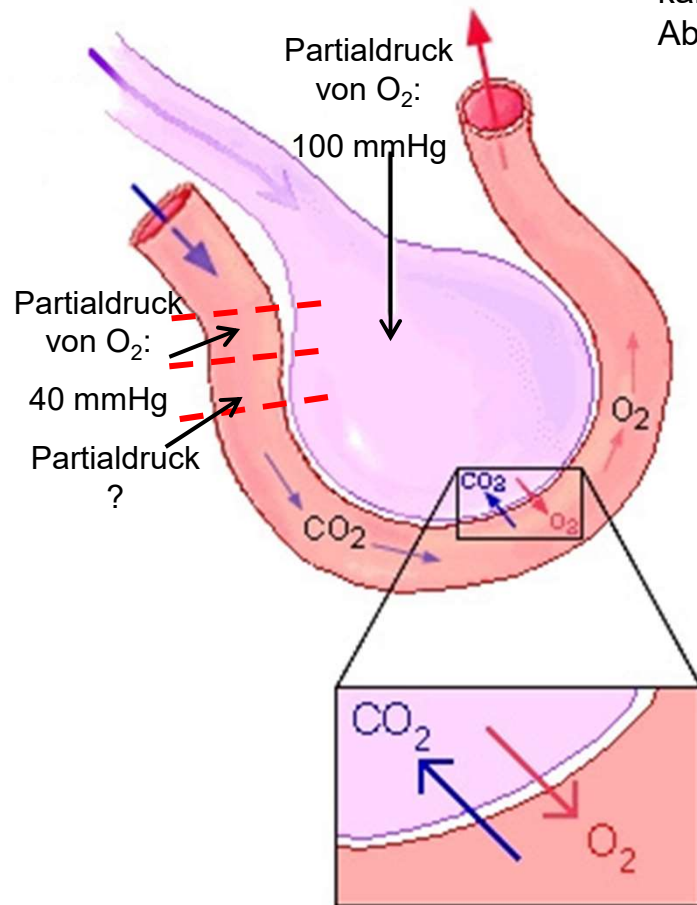
Temperaturabhängigkeit:



➤ Partialdruck im Blut wo?

Die Kapillare wird auf so kleine Abschnitte aufgeteilt, dass innerhalb eines Abschnittes der Partialdruck schon als konstant betrachtet werden kann. Das 1. Ficksche Gesetz wird dann für diese Abschnitte nacheinander verwendet.

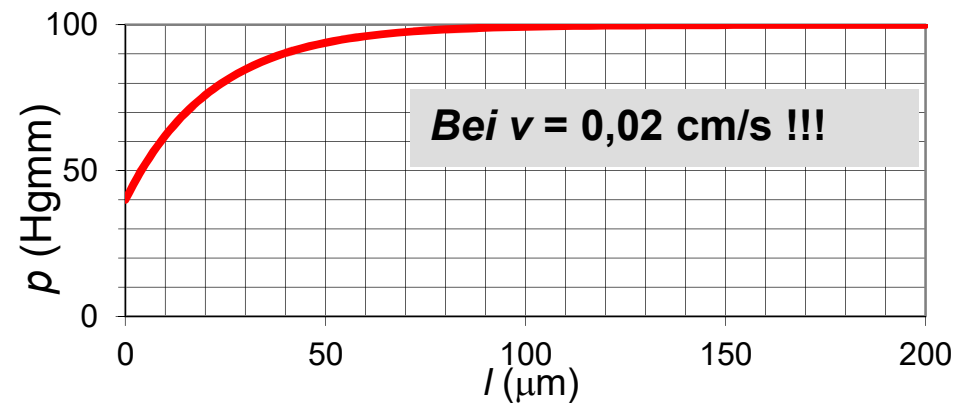
→ Excel



Bei welcher Blutgeschwindigkeit wird das Blut mit  $O_2$  gesättigt?



$O_2$ -Aufnahme in den Alveolarkapillaren



➤ Membran  $\approx$  Wasser

# Kontinuitätsgleichung im Blutkreislauf

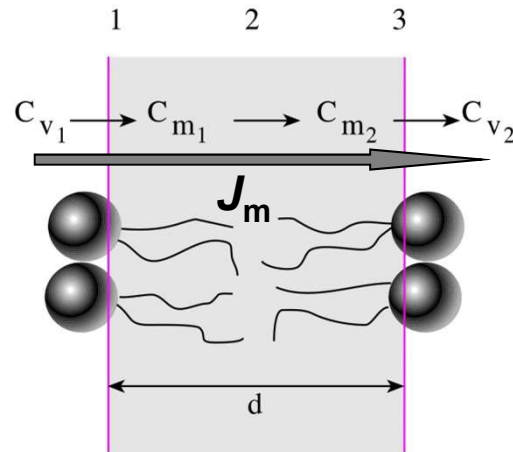
Zur Erinnerung



Gefäß	Aorta	Arterien	Arteriolen	Kapillaren	Venolen	Venen	Hohlvenen
$A \text{ (cm}^2\text{)}$	4,5	20	400	4500	4000	40	18
$v \text{ (cm/s)}$	23	5	0,25	0,022	0,025	2,5	6

- Diffusion durch eine Membran (passiver Transport)

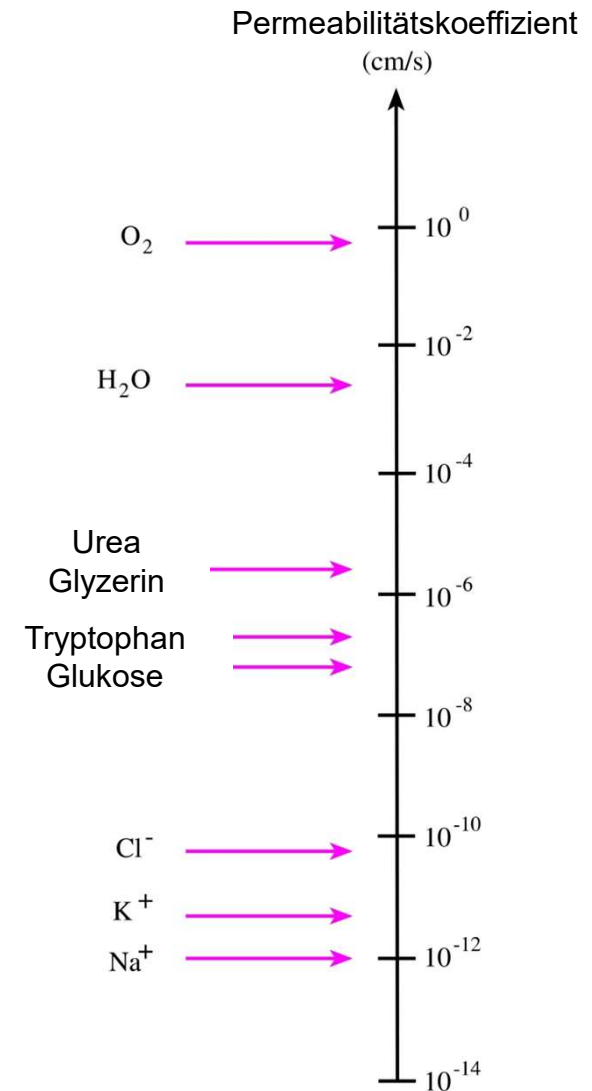
Für neutrale Teilchen:



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

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

Permeabilitätskoeffizient (m/s)



### 3. Das 2. Ficksche Gesetz:

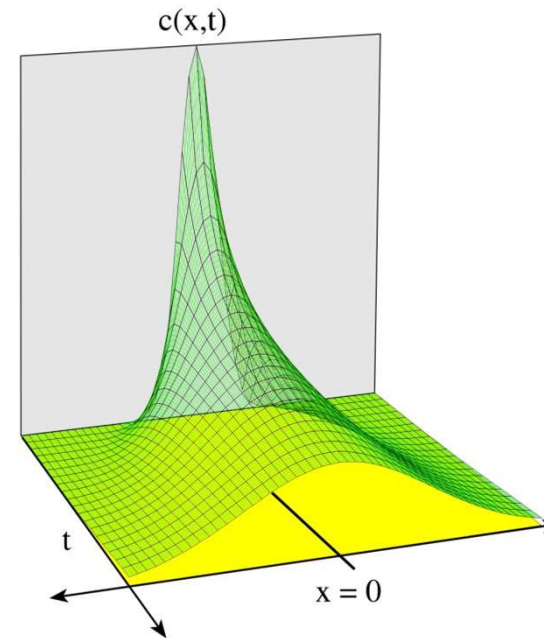
$$D \frac{\Delta \left( \frac{\Delta c}{\Delta x} \right)}{\Delta x} = \frac{\Delta c}{\Delta t} \quad D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} = \frac{\partial c}{\partial t}$$

Lösungen:

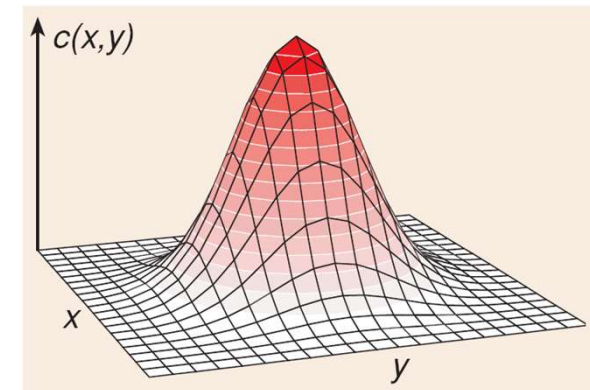
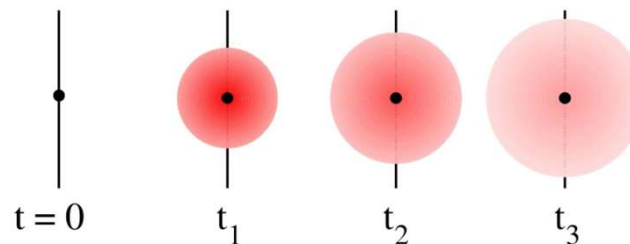
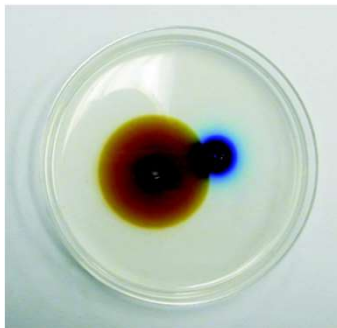
➤ Für eindimensionale Diffusion:

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

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



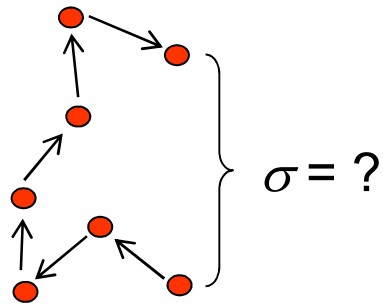
➤ Für zweidimensionale Diffusion:



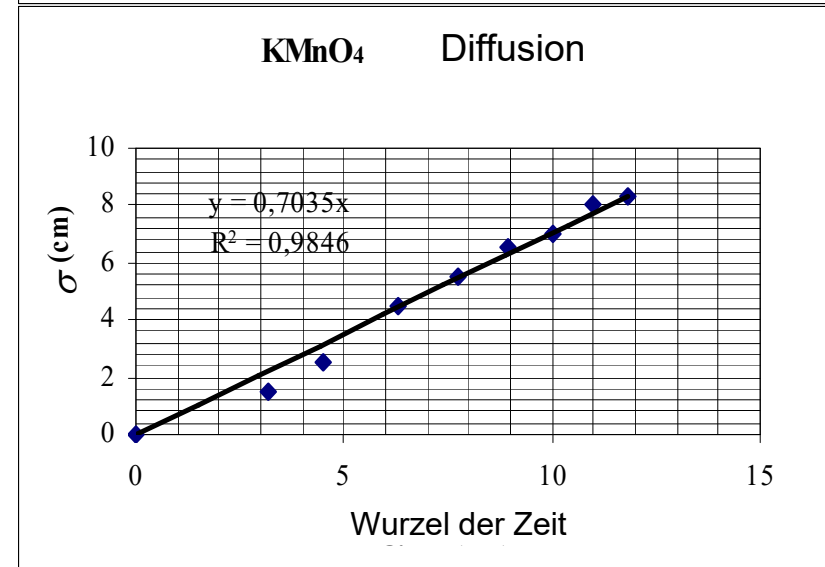
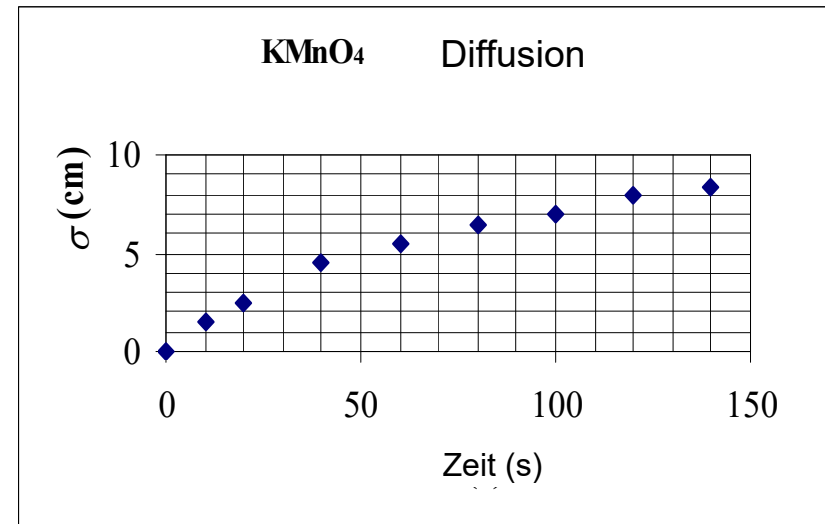
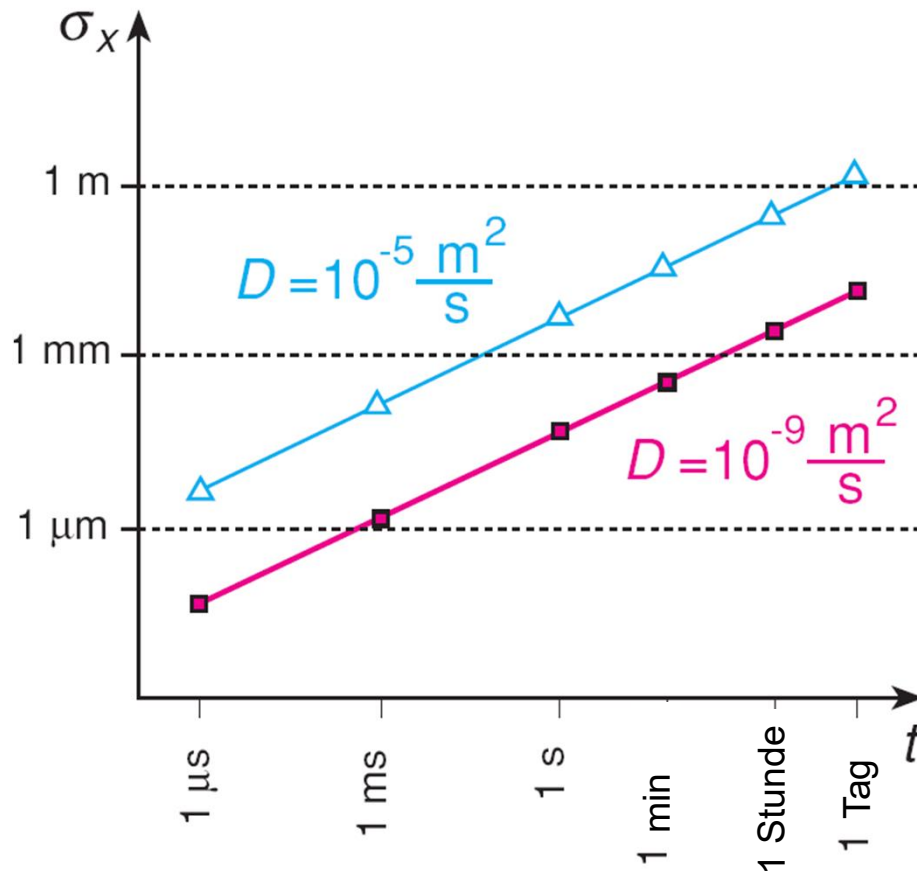
Siehe auch Praktikum!



## 4. Diffusion als Random Walk

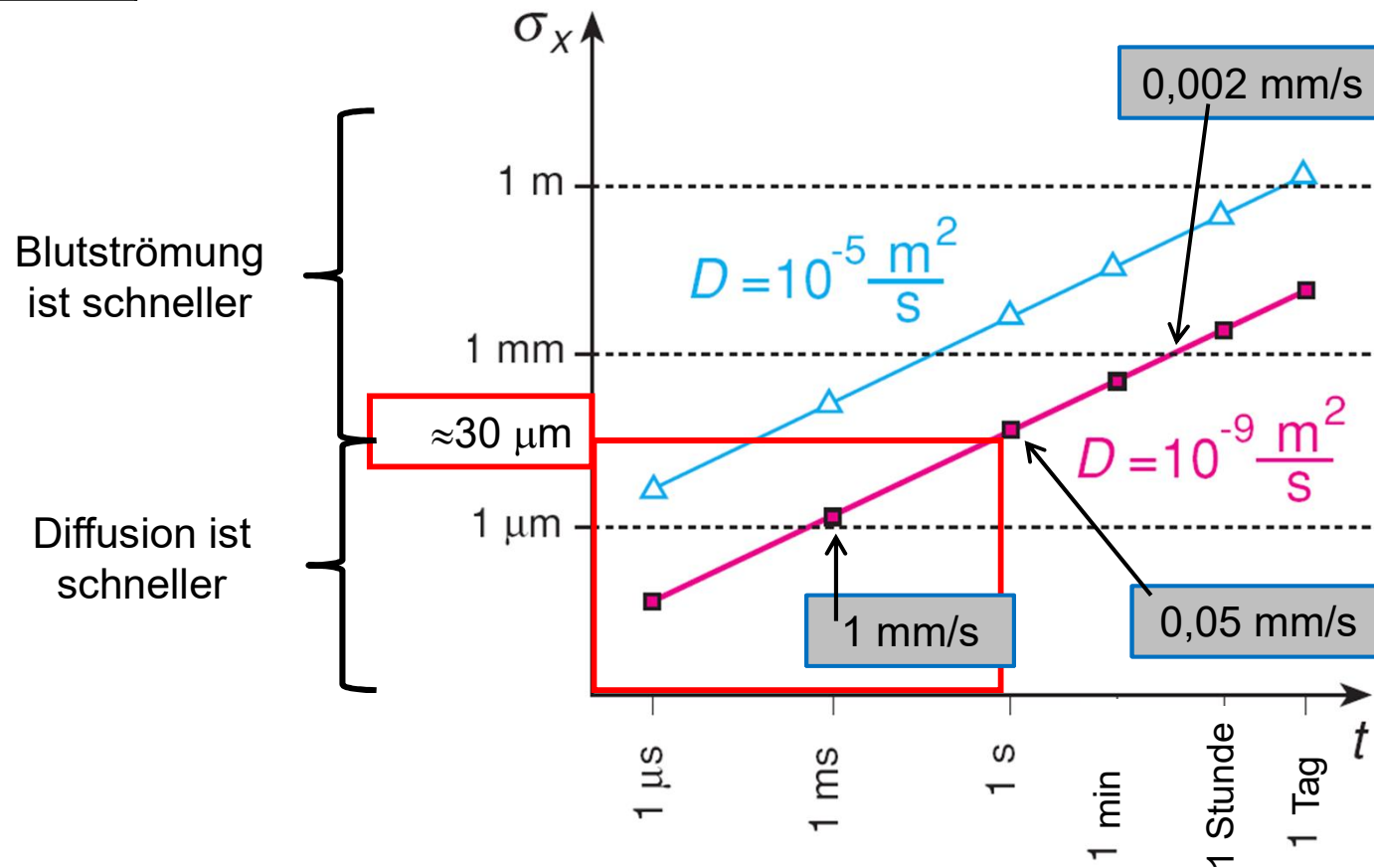


$$\sigma \approx \sqrt{2D \cdot t}$$



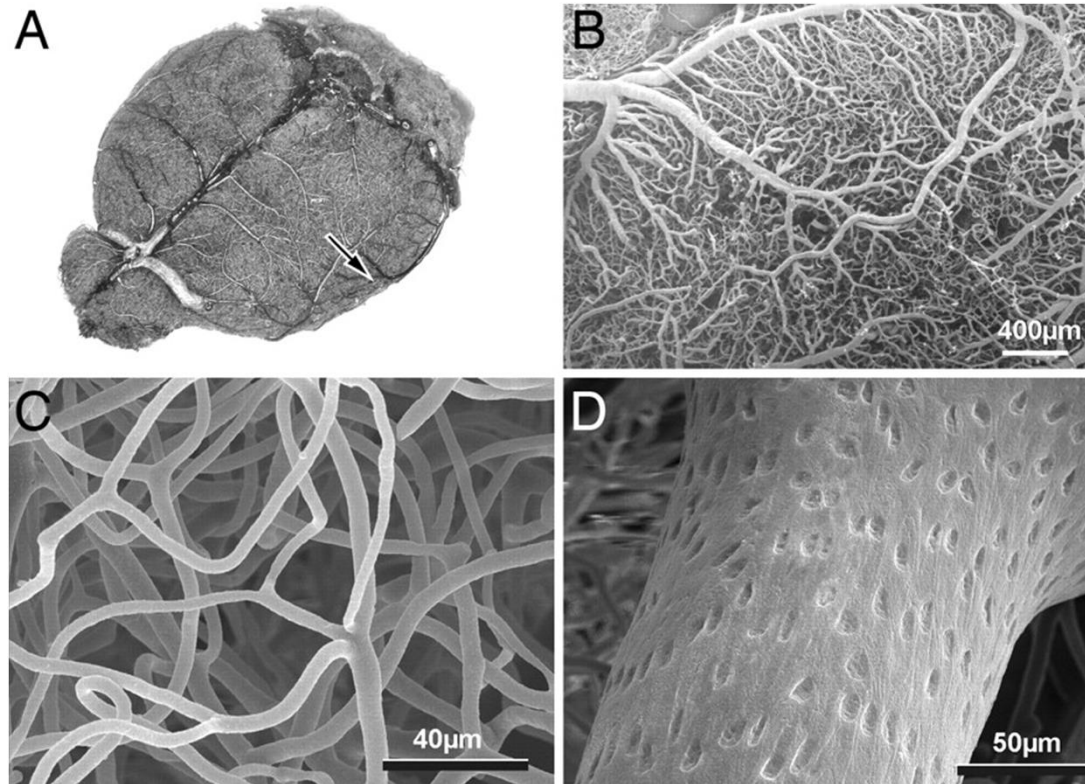
- Welche ist „schneller“ für O<sub>2</sub>-Transport im Gewebe? Diffusion ↔ Blutströmung

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



# Welcher Transportprozess ist „schneller“ für O<sub>2</sub>-Transport?

- bis 30  $\mu\text{m}$  : Diffusion
- über 30  $\mu\text{m}$  : Blutströmung



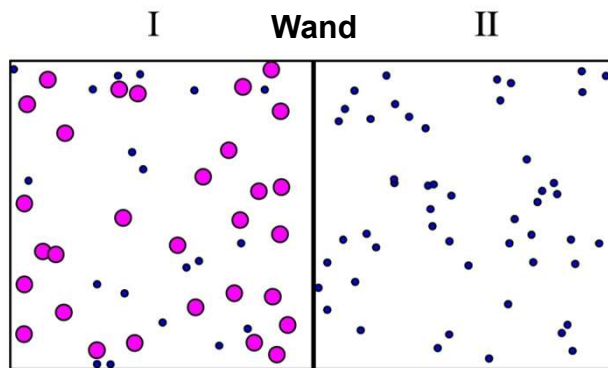
(C) SEM image of cortical capillaries. Capillary diameters range from 4 to 6  $\mu\text{m}$  and intercapillary distances are  $\approx 30 \mu\text{m}$ .

**Altered morphology and 3D architecture of brain vasculature in a mouse model for Alzheimer's disease**

Eric P. Meyer, Alexandra Ulmann-Schuler, Matthias Staufenbiel, and Thomas Krucker

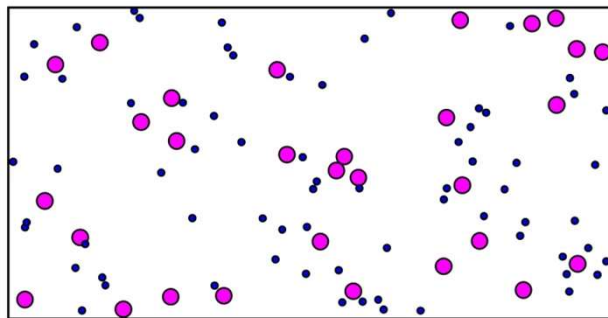
PNAS March 4, 2008, 105 (9): 3587-3592 · <https://doi.org/10.1073/pnas.0709788105>

## ■ Osmose



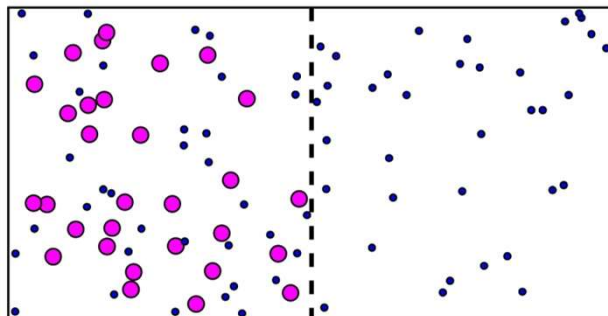
a

ohne Wand



b

semipermeable Wand



c

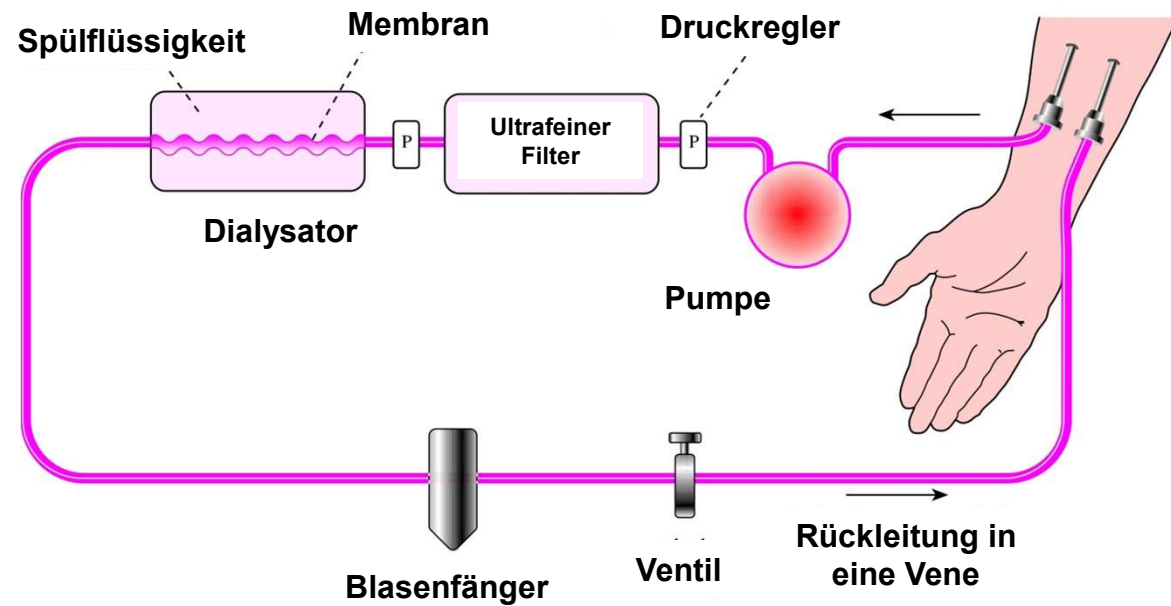


**Van't Hoff-Gesetz:**

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



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



## V. Zusammenfassung

	Was strömt?	Stärke?	Warum?	Zusammenhang?
Ladungs-transport	$q$	$\frac{\Delta q}{A \cdot \Delta t}$	$\varphi$ $-\frac{\Delta \varphi}{\Delta l}$	$\frac{\Delta q}{A \cdot \Delta t} = -\sigma \frac{\Delta \varphi}{\Delta l}$
Volumen-transport	$V$	$\frac{\Delta V}{A \cdot \Delta t}$	$p$ $-\frac{\Delta p}{\Delta l}$	$\frac{\Delta V}{A \cdot \Delta t} = -\frac{r^2}{8\eta} \frac{\Delta p}{\Delta l}$
Stoff-transport	$v$	$\frac{\Delta v}{A \cdot \Delta t}$	$c^*$ $-\frac{\Delta c}{\Delta x}$	$\frac{\Delta v}{A \cdot \Delta t} = -D \frac{\Delta c}{\Delta x}$
Energie-transport	$E$	$\frac{\Delta E}{A \cdot \Delta t}$	$T$ $-\frac{\Delta T}{\Delta x}$	$\frac{\Delta E}{A \cdot \Delta t} = -\lambda \frac{\Delta T}{\Delta x}$
<b>allgemein</b>	$x_{\text{ext}}$	$J = \frac{\Delta x_{\text{ext}}}{A \cdot \Delta t}$	$y_{\text{int}}$ $X = -\frac{\Delta y_{\text{int}}}{\Delta x}$	$J = LX$
	<b>extensive Gr.</b>	<b>Strom-dichte</b>	<b>intensive Gr.</b> <b>thermo-dynamische Kraft</b>	<b>onsagersche Beziehung</b>

\* Im allgemeinen Fall  $\mu$