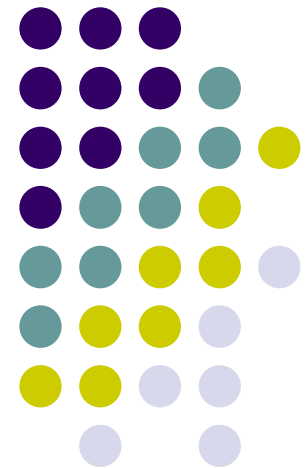


Biophysik für Pharmazeuten II.

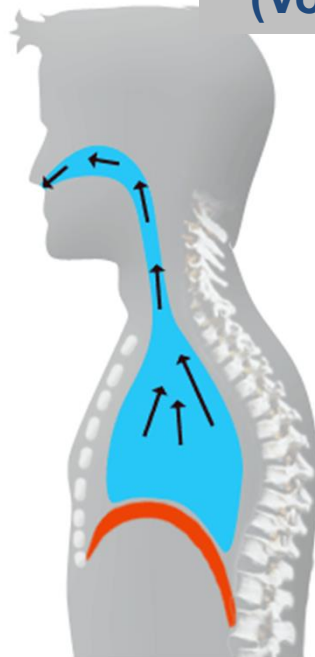
05. 04. 2022.

Transportprozesse 3. Diffusion

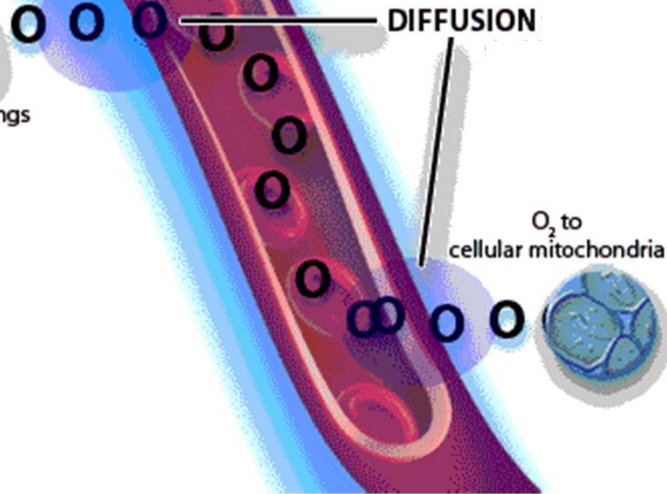


Transportprozesse

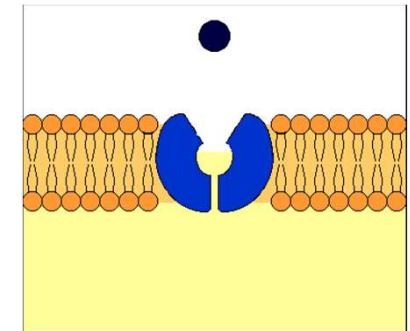
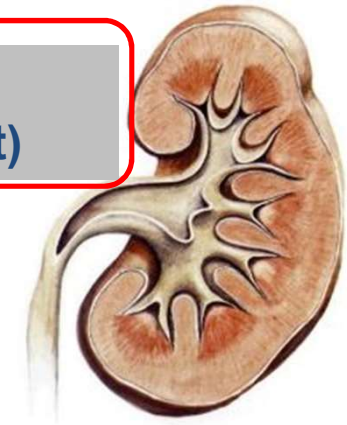
II. Strömung (Volumentransport)



entspannt



III. Diffusion (Stofftransport)



I. Elektrischer Strom (el. Ladungstransport)



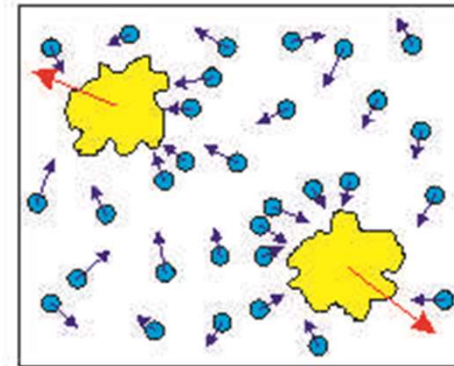
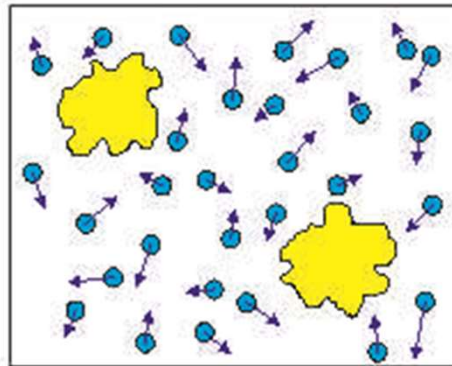
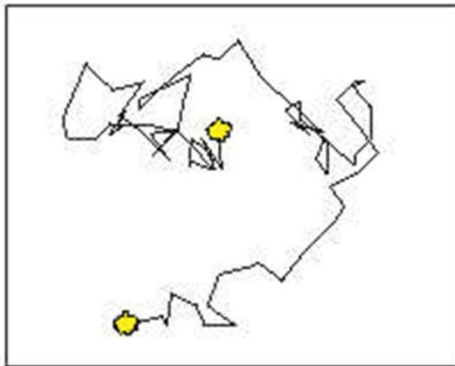
IV. Wärmeleitung (Energietransport)



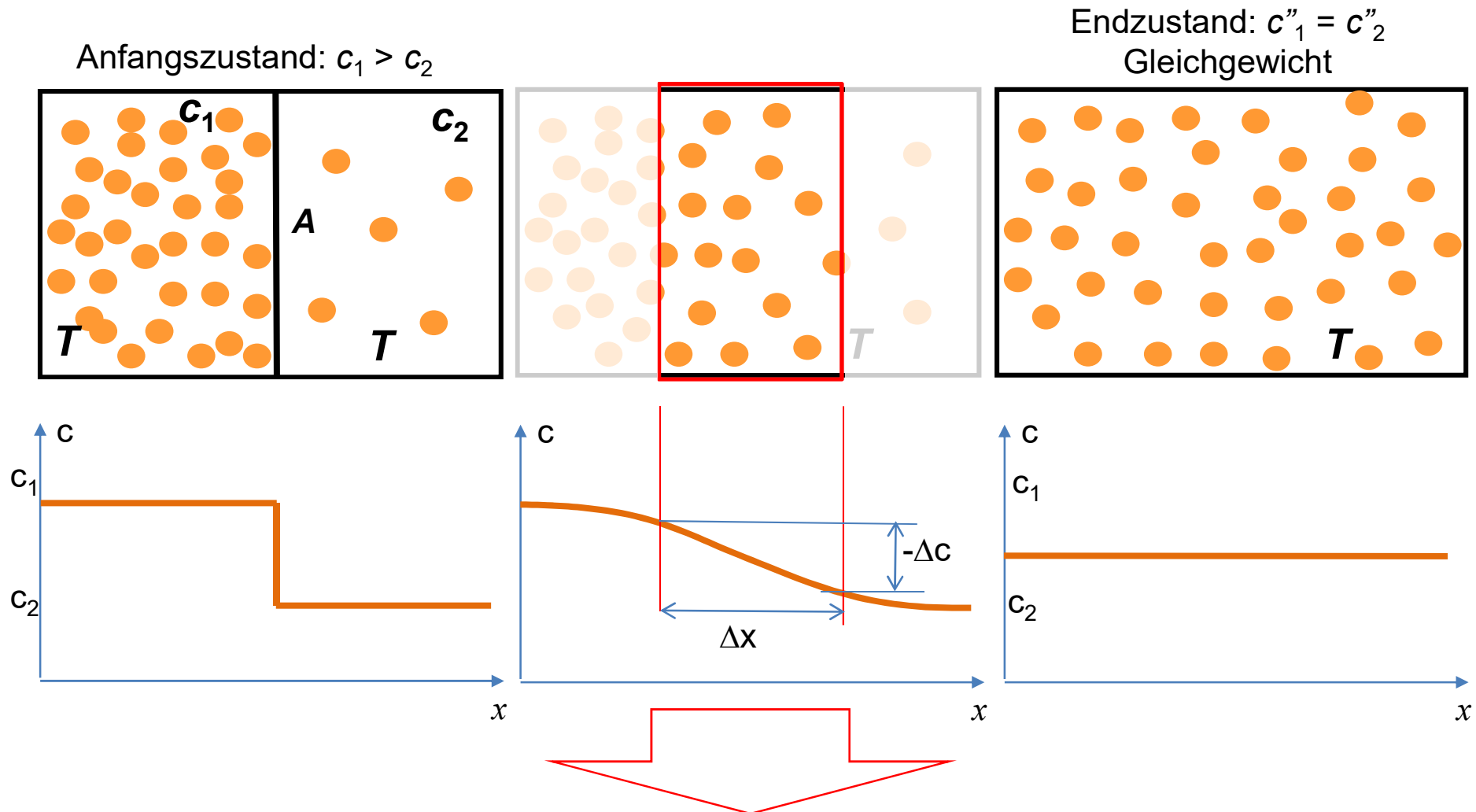
V. Verallgemeinerung

VI. Energetische Aspekte

III. Stofftransport (Diffusion)



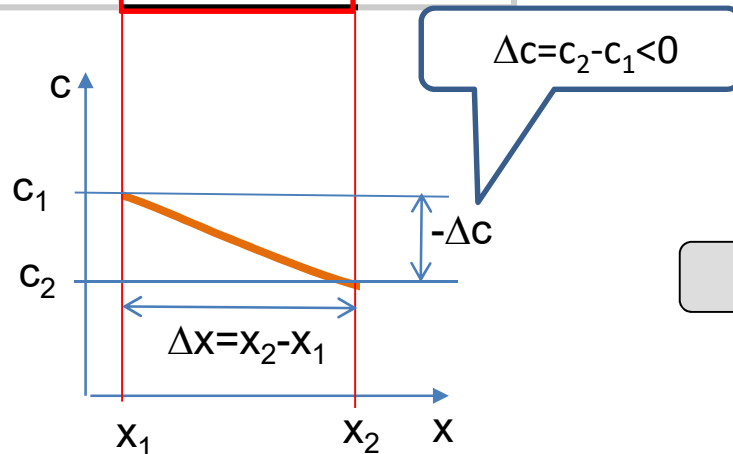
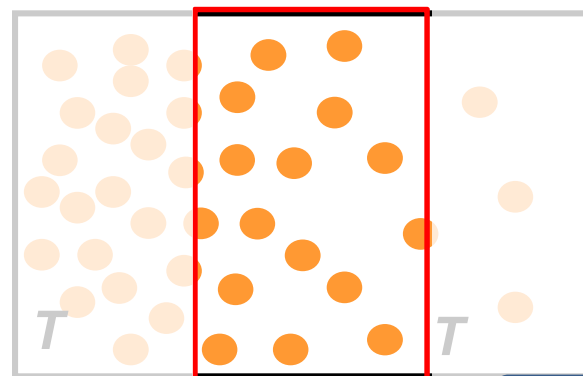
- Diffusion: Tendenz zur gleichmäßigen Verteilung von Molekülen durch die thermische Bewegung



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

Konzentrationsgradient

Diffusionskoeffizient

für stationäre Diffusion!



Adolf Fick
1829-1901
Physiologe

▪ Diffusionskoeffizient:

➤ stoffspezifisch

- diffundierende Moleküle — Größe (r)
- Form
- Medium (η)

➤ 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 ² /s)
H ₂ (2)	Luft	$6,4 \cdot 10^{-5}$
O ₂ (32)	Luft	$2 \cdot 10^{-5}$
CO ₂ (44)	Luft	$1,8 \cdot 10^{-5}$
H ₂ O (18)	Wasser	$2,2 \cdot 10^{-9}$
O ₂ (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

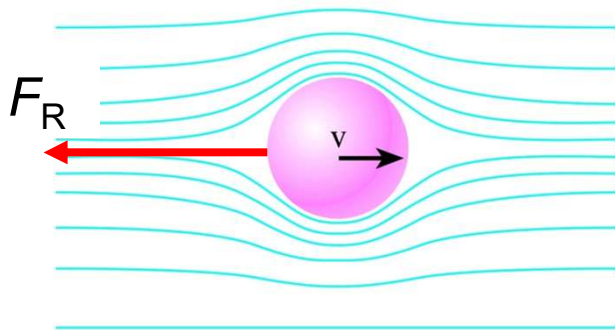
Zur Erinnerung

stokessches
Reibungsgesetz:



G. G. Stokes
1819-1903
Mathematiker
Physiker

Bei kleineren
Geschwindigkeiten:



Reibungskraft

Radius des
Teilchens

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

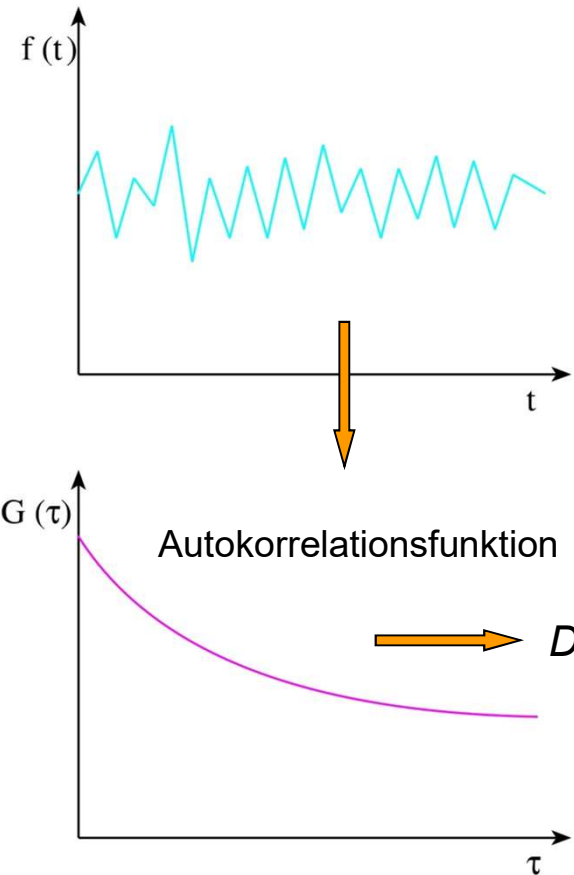
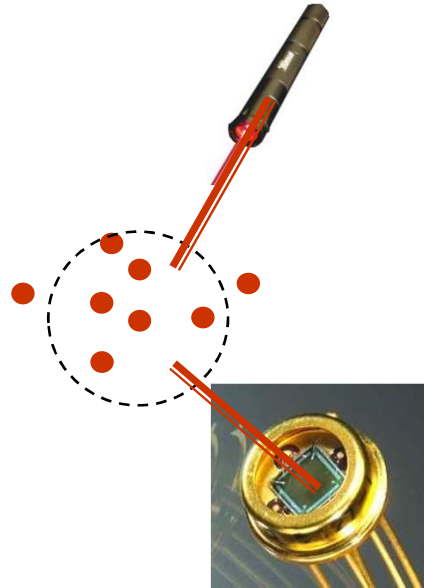
Viskosität

Geschwindigkeit des
Teilchens

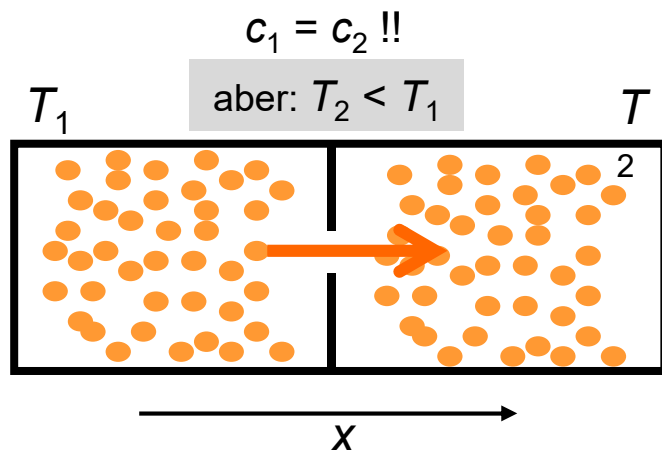
Bei gleichmäßigen Bewegung: $F_{\text{Bewegung}} = F_R$

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:

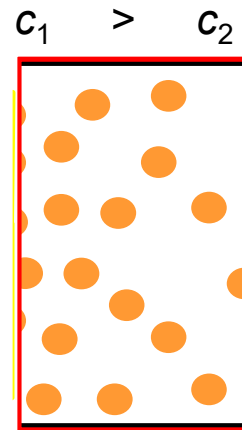


Konzentration (c) \Rightarrow chemisches Potenzial (μ)

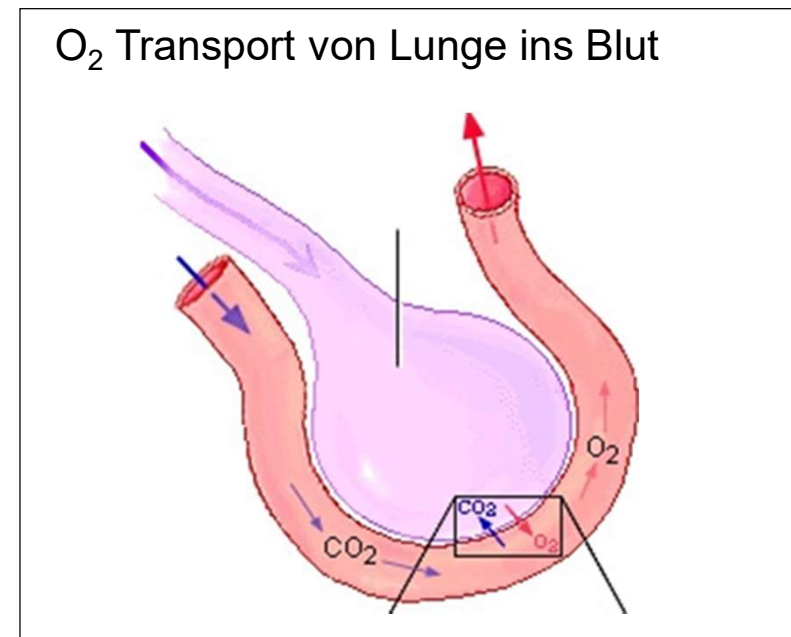
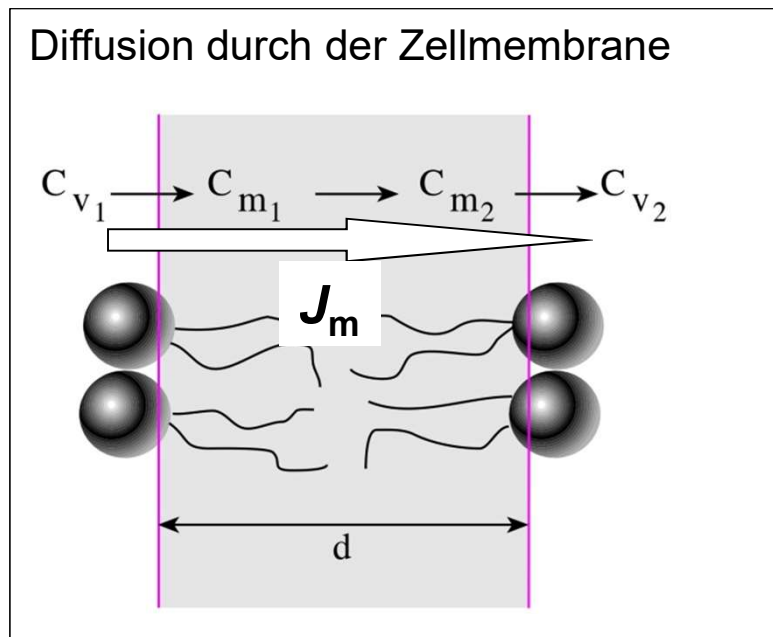
$$\mu = \mu_0 + RT \ln \frac{c}{c_0}$$

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

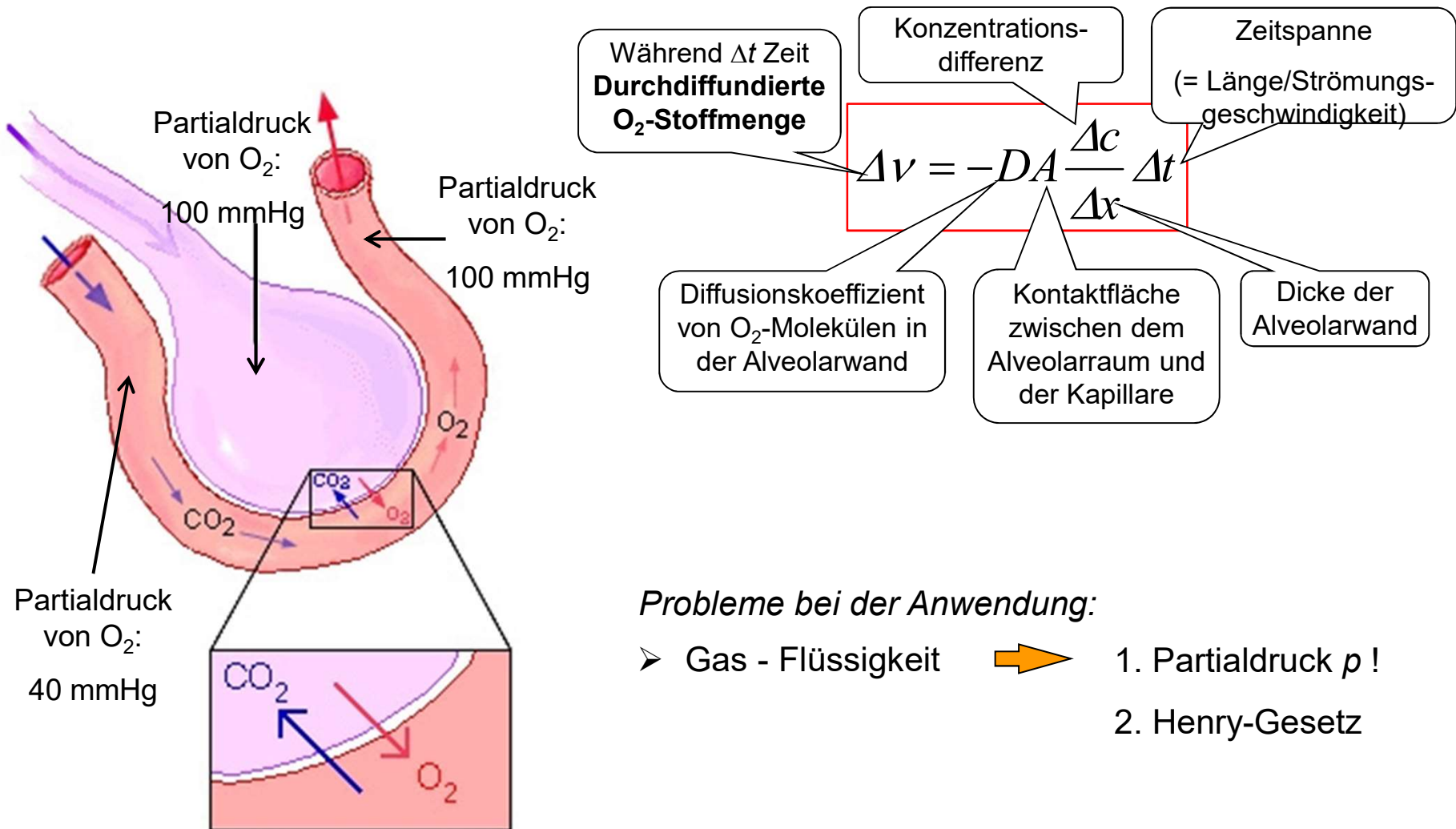
Stationäre Diffusion ???



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



Anwendung des 1. Fickschen Gesetzes für O₂-Diffusion von Lunge ins Blut



Probleme bei der Anwendung:

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

Löslichkeit von Gasen in Flüssigkeiten

Henry-Gesetz:

$$c = k_H \cdot p$$

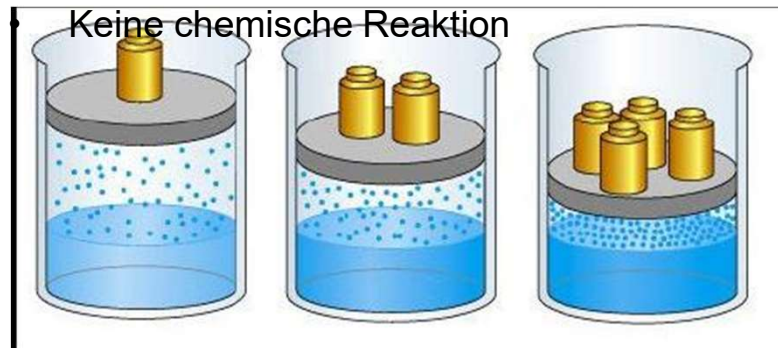
Konzentration in der Lösung

Partialdruck im Gas

Löslichkeitskoeffizient oder Henry-Konstante

Voraussetzungen:

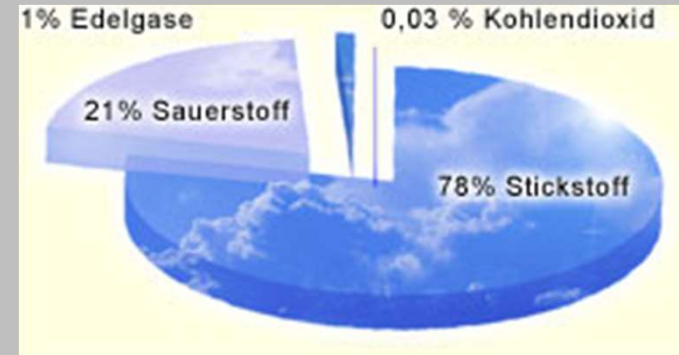
- Gleichgewicht
- Dünne Lösung



z. B. bei 25°C:

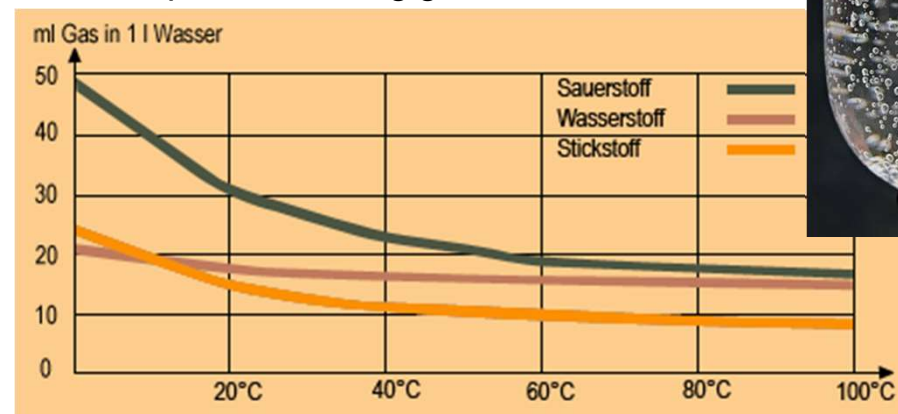
Gas	$k_H \left(\frac{\text{mol}}{\text{l} \cdot \text{kPa}} \right)$
O ₂	$1,26 \cdot 10^{-5}$
N ₂	$0,64 \cdot 10^{-5}$
CO ₂	$33,2 \cdot 10^{-5}$

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 O₂: $p_{\text{O}_2} = 21,2 \text{ kPa} = 160 \text{ mmHg}$

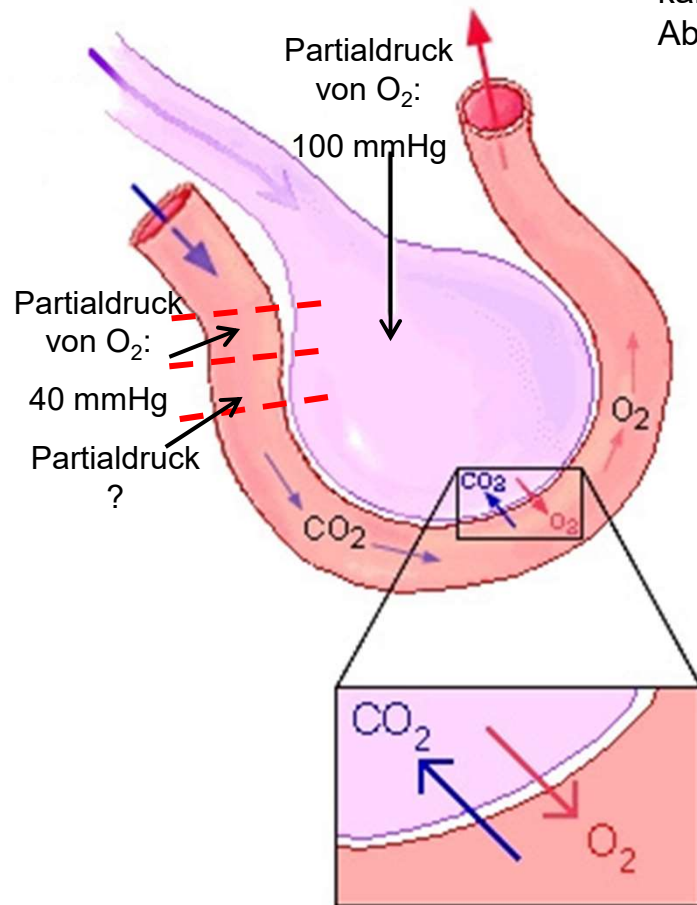
Temperaturabhängigkeit:



➤ 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.

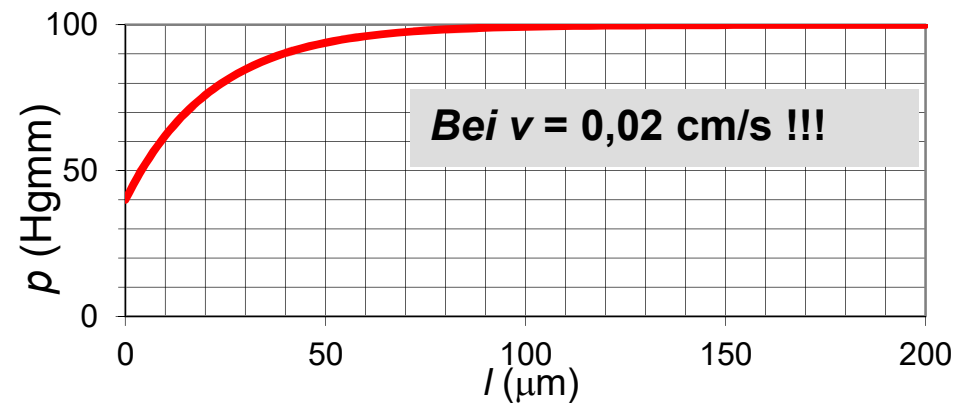
→ Excel



Bei welcher Blutgeschwindigkeit wird das Blut mit O_2 gesättigt?



O_2 -Aufnahme in den Alveolarkapillaren

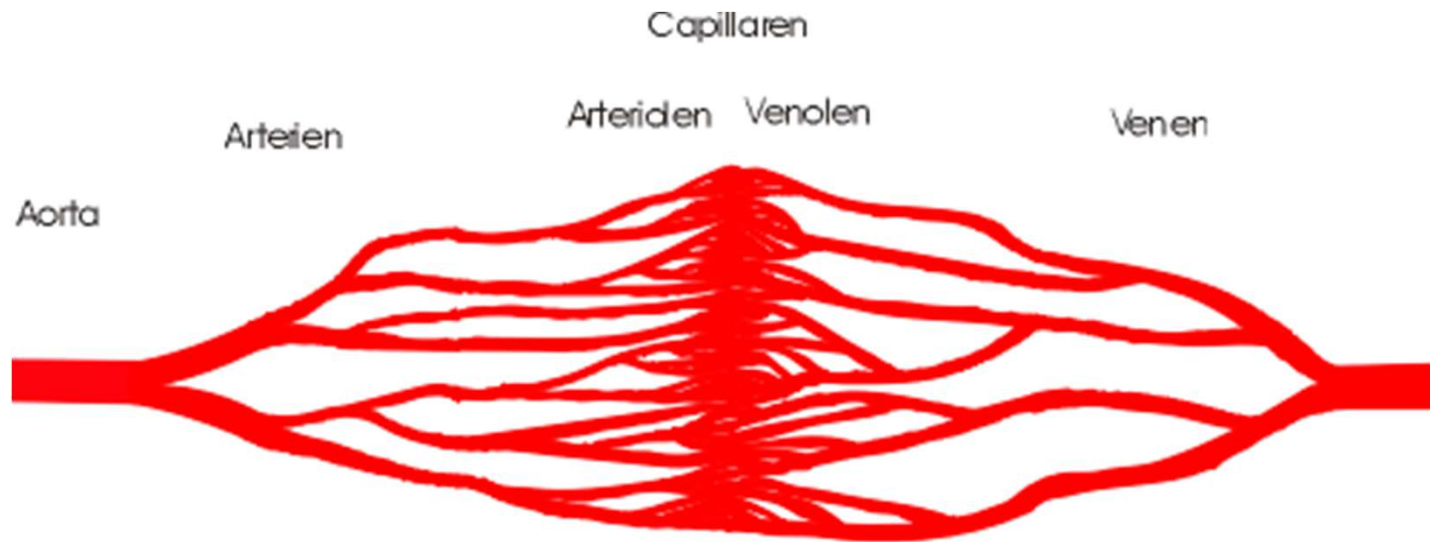


➤ Membran \approx Wasser



Kontinuitätsgleichung im Blutkreislauf

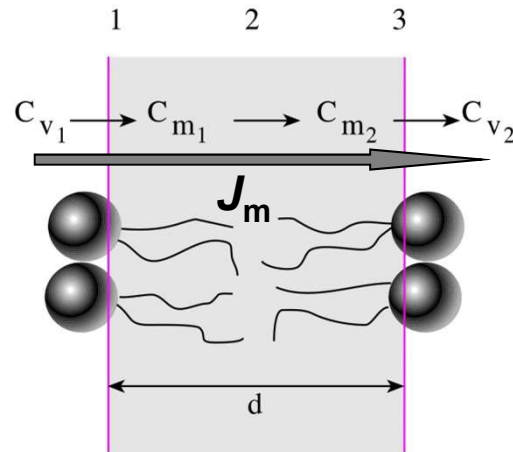
Zur Erinnerung



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)

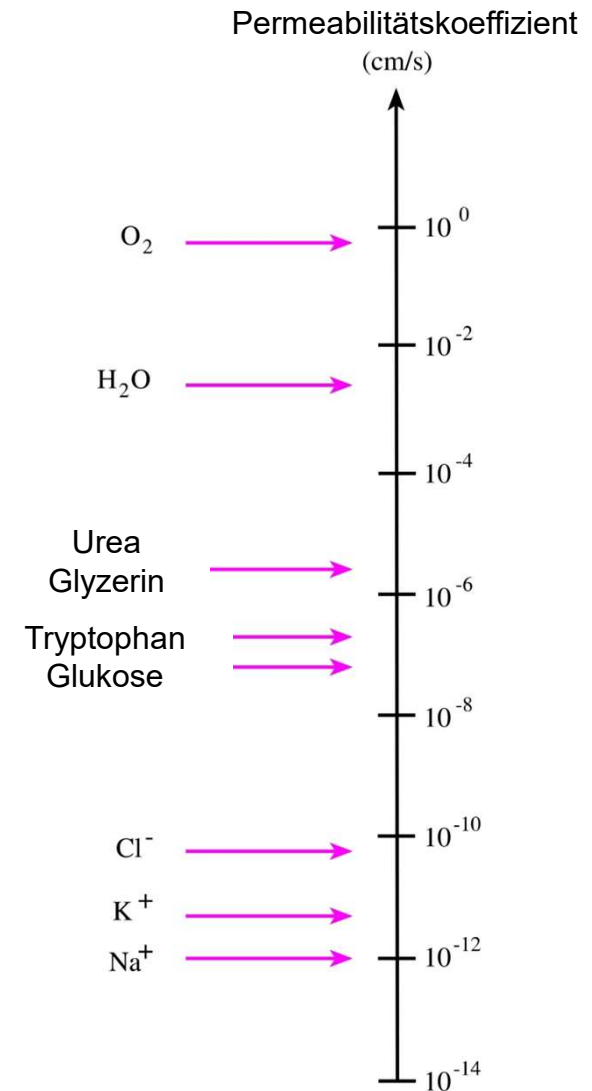
Für neutrale Teilchen:



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

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

Permeabilitätskoeffizient (m/s)



3. Das 2. Ficksche Gesetz:

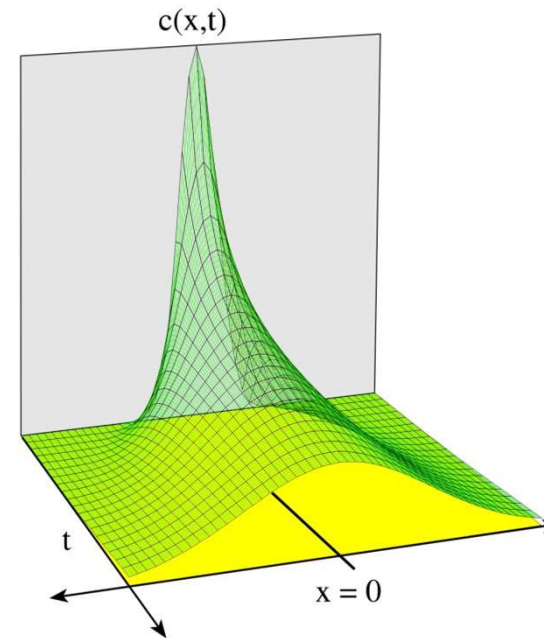
$$D \frac{\Delta \left(\frac{\Delta c}{\Delta x} \right)}{\Delta x} = \frac{\Delta c}{\Delta t} \quad D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} = \frac{\partial c}{\partial t}$$

Lösungen:

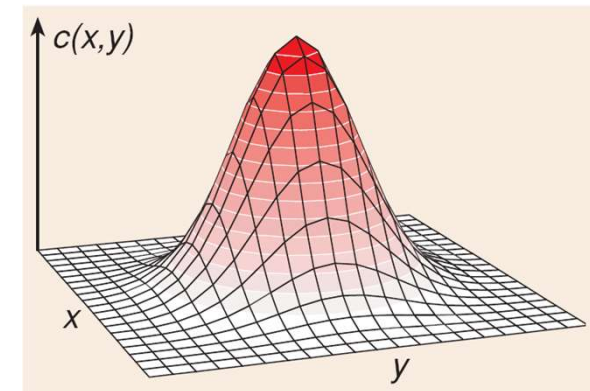
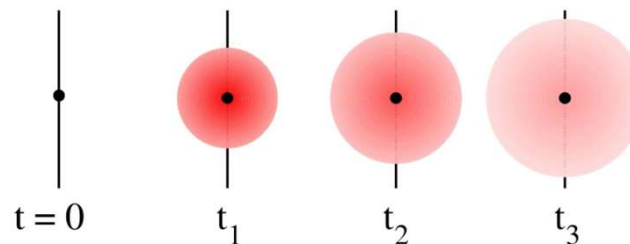
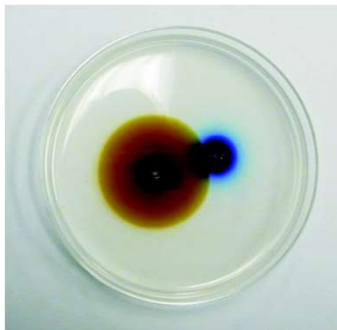
➤ Für eindimensionale Diffusion:

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

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

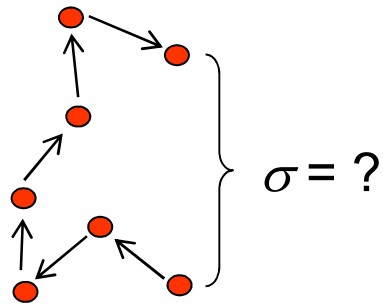


➤ Für zweidimensionale Diffusion:

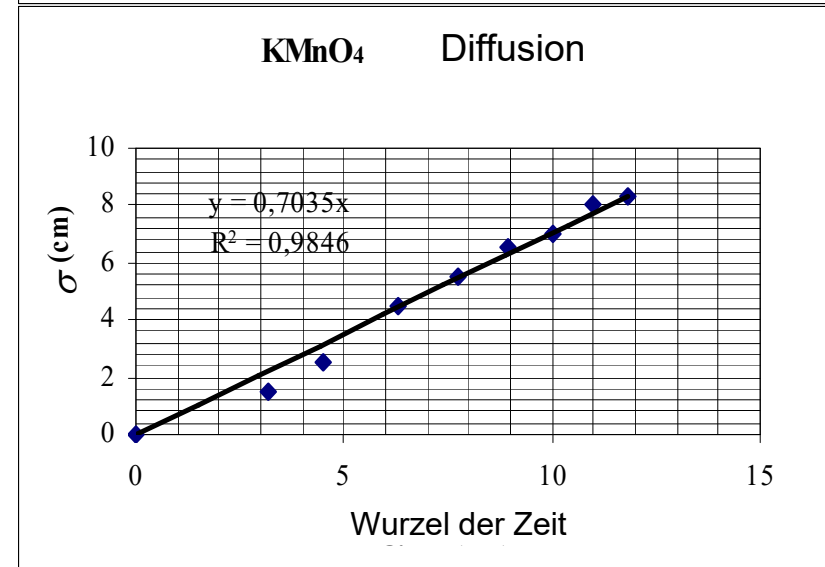
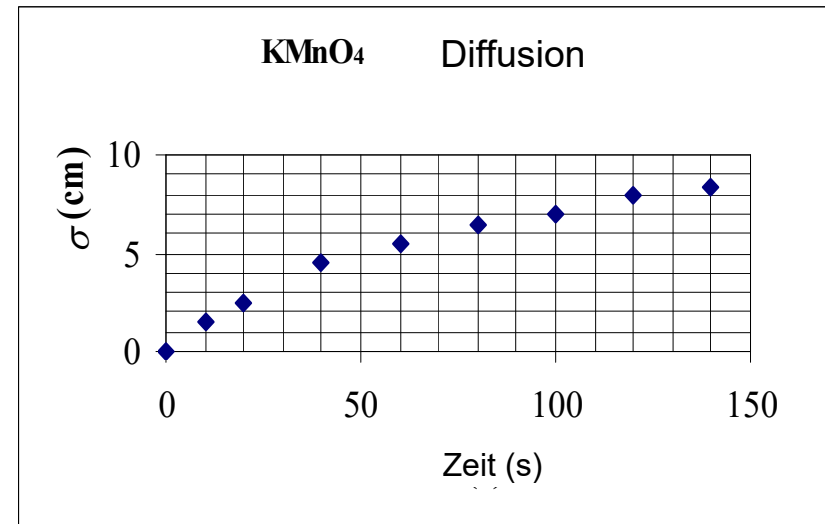
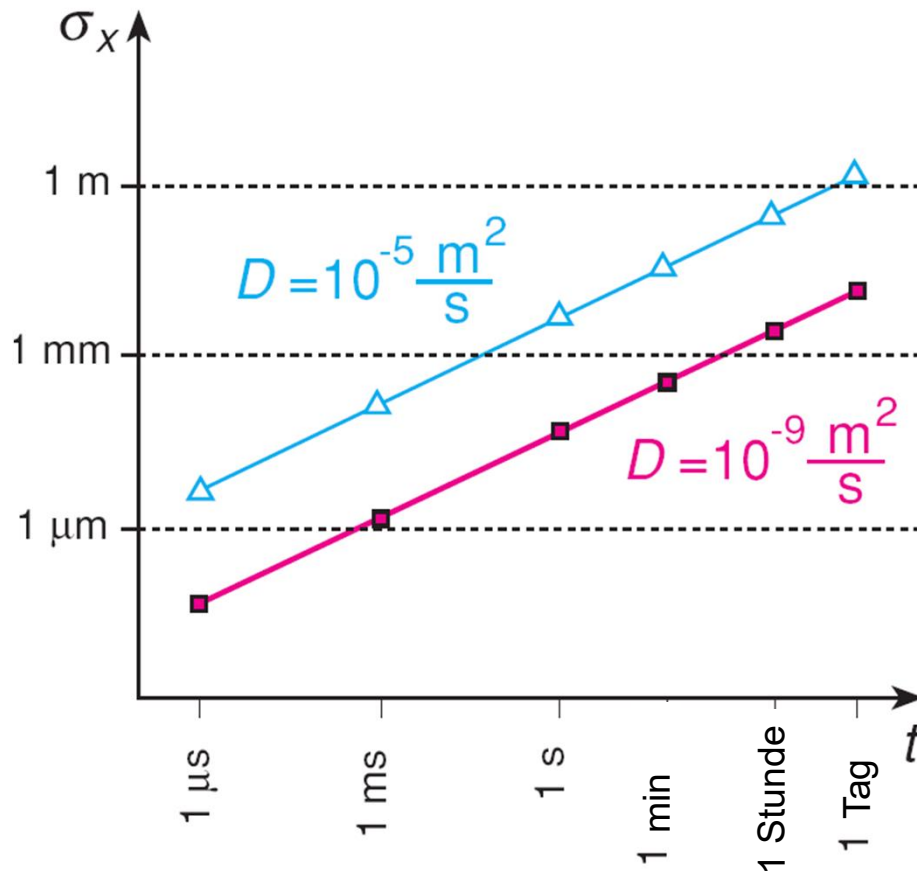


Siehe auch Praktikum!

4. Diffusion als Random Walk

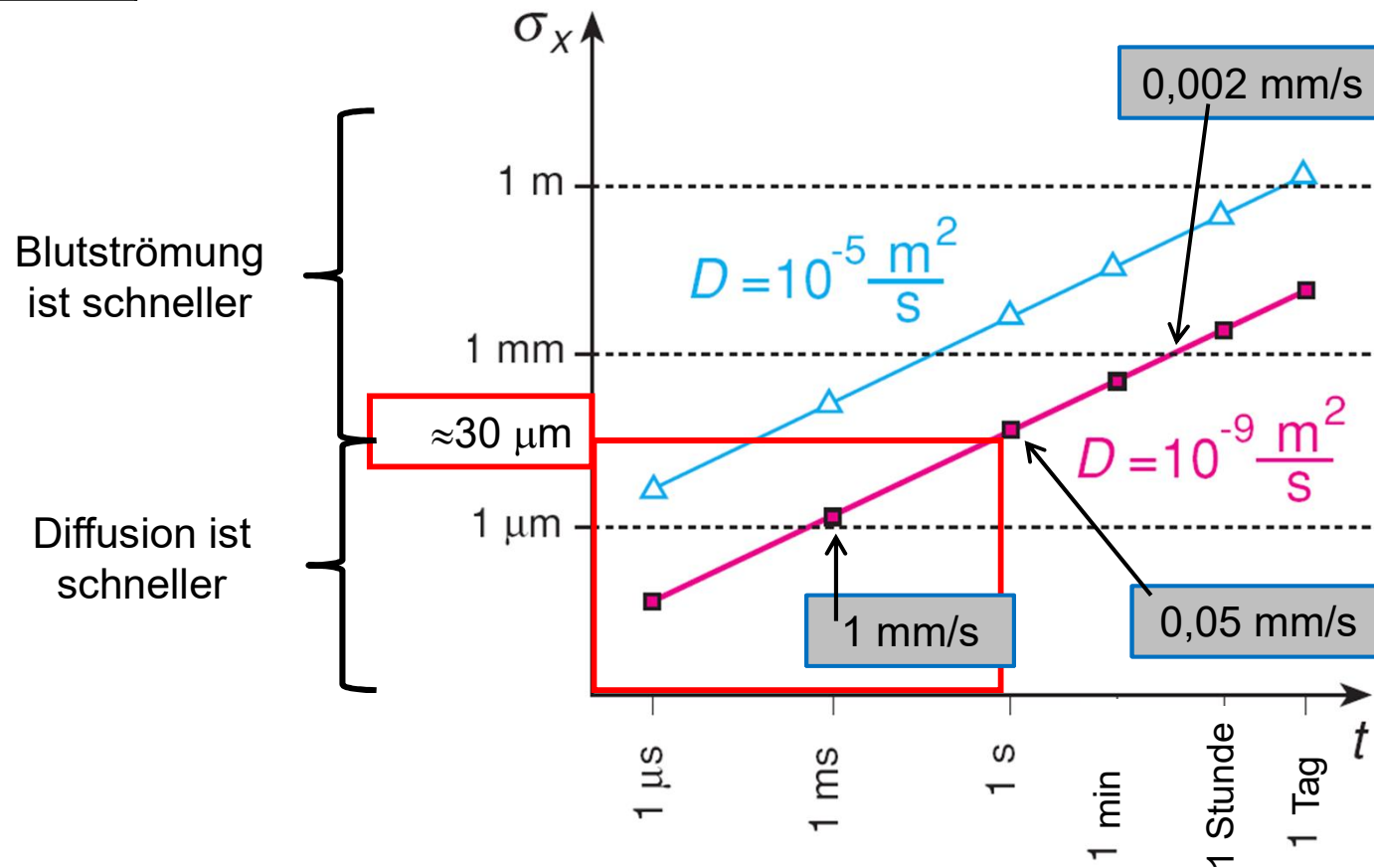


$$\sigma \approx \sqrt{2D \cdot t}$$



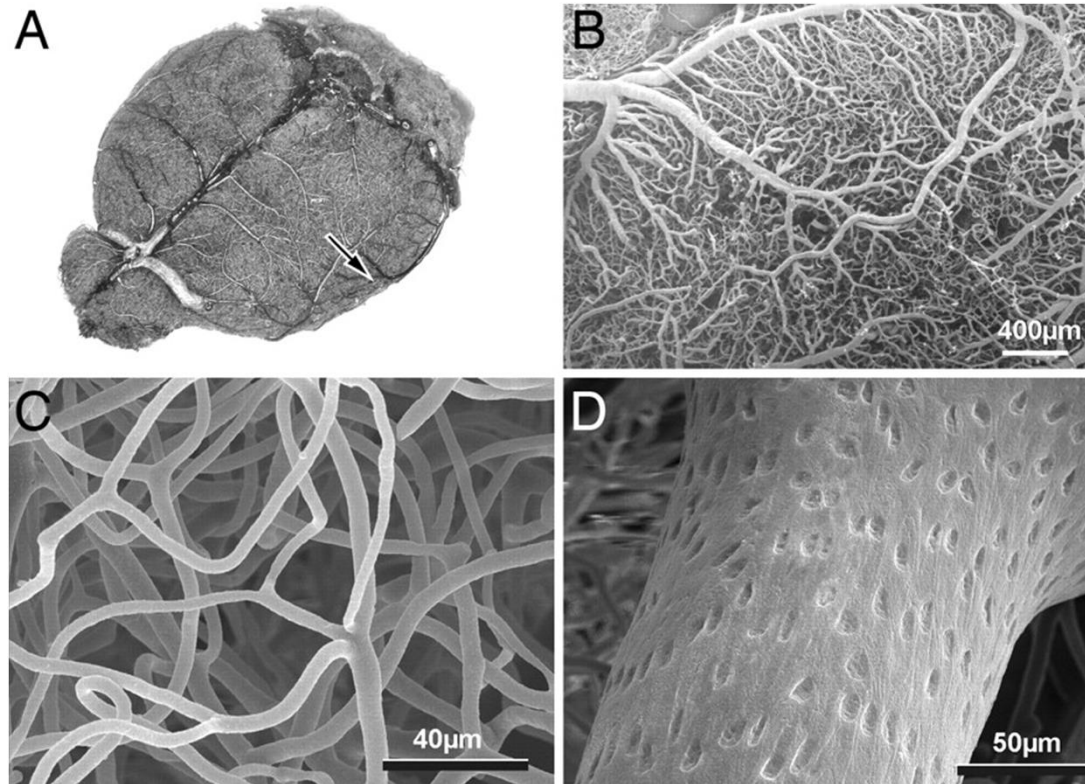
- Welche ist „schneller“ für O₂-Transport im Gewebe? Diffusion ↔ Blutströmung

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



Welcher Transportprozess ist „schneller“ für O₂-Transport?

- bis 30 μm : Diffusion
- über 30 μm : Blutströmung



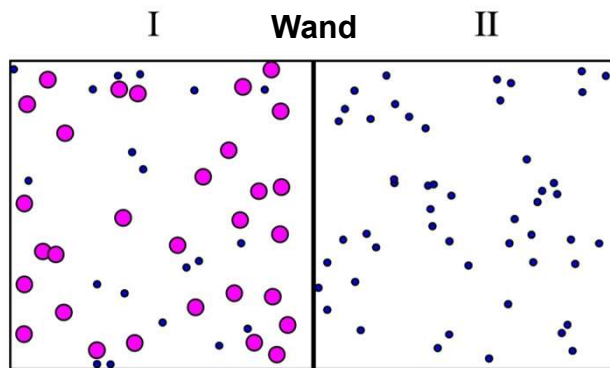
(C) SEM image of cortical capillaries. Capillary diameters range from 4 to 6 μm and intercapillary distances are $\approx 30 \mu\text{m}$.

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

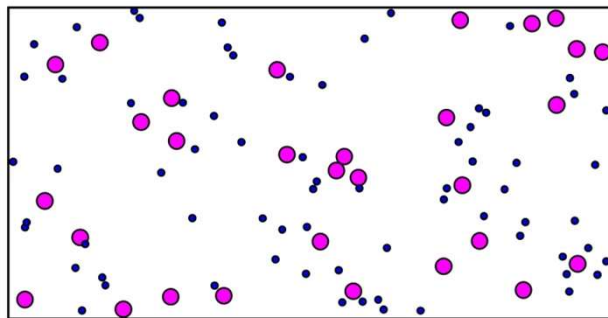
PNAS March 4, 2008, 105 (9): 3587-3592 · <https://doi.org/10.1073/pnas.0709788105>

■ Osmose



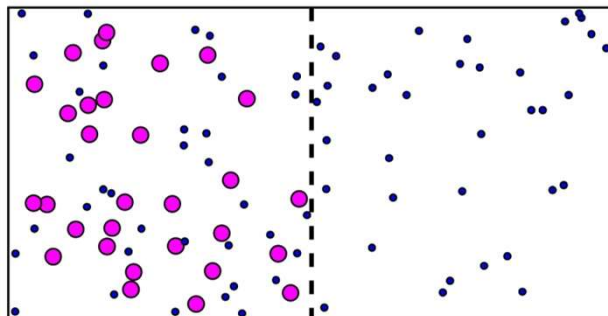
a

ohne Wand



b

semipermeable Wand



c

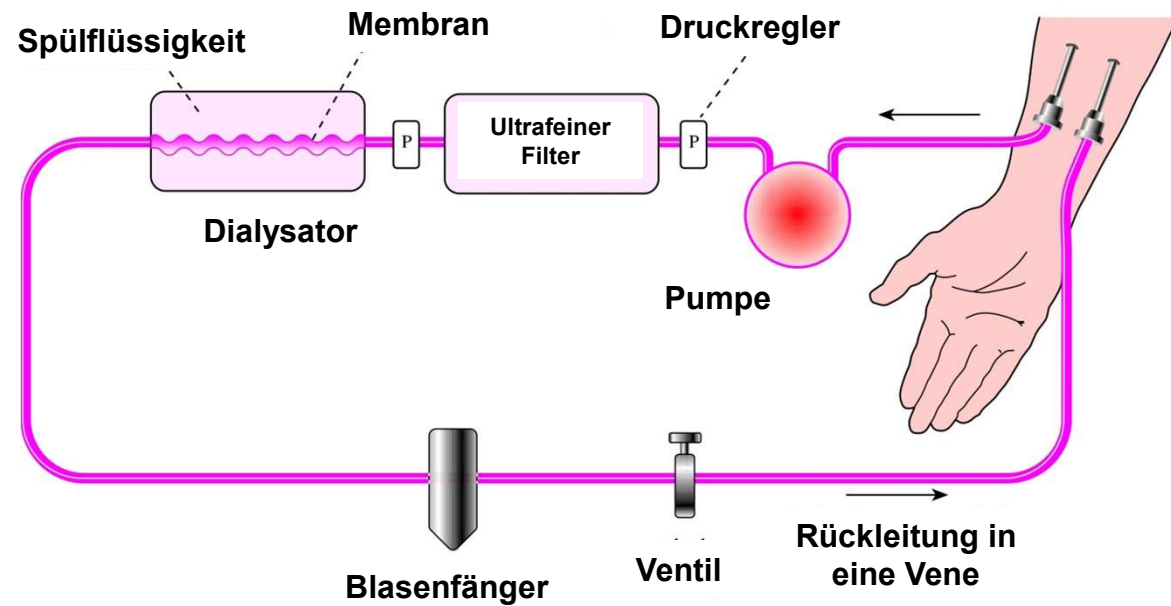


Van't Hoff-Gesetz:

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



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



V. Zusammenfassung

	Was strömt?	Stärke?	Warum?	Zusammenhang?
Ladungs-transport	q	$\frac{\Delta q}{A \cdot \Delta t}$	φ $-\frac{\Delta \varphi}{\Delta l}$	$\frac{\Delta q}{A \cdot \Delta t} = -\sigma \frac{\Delta \varphi}{\Delta l}$
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 $-\frac{\Delta T}{\Delta x}$	$\frac{\Delta E}{A \cdot \Delta t} = -\lambda \frac{\Delta T}{\Delta x}$
allgemein	x_{ext}	$J = \frac{\Delta x_{\text{ext}}}{A \cdot \Delta t}$	y_{int} $X = -\frac{\Delta y_{\text{int}}}{\Delta x}$	$J = LX$
	extensive Gr.	Strom-dichte	intensive Gr. thermo-dynamische Kraft	onsagersche Beziehung

* Im allgemeinen Fall μ