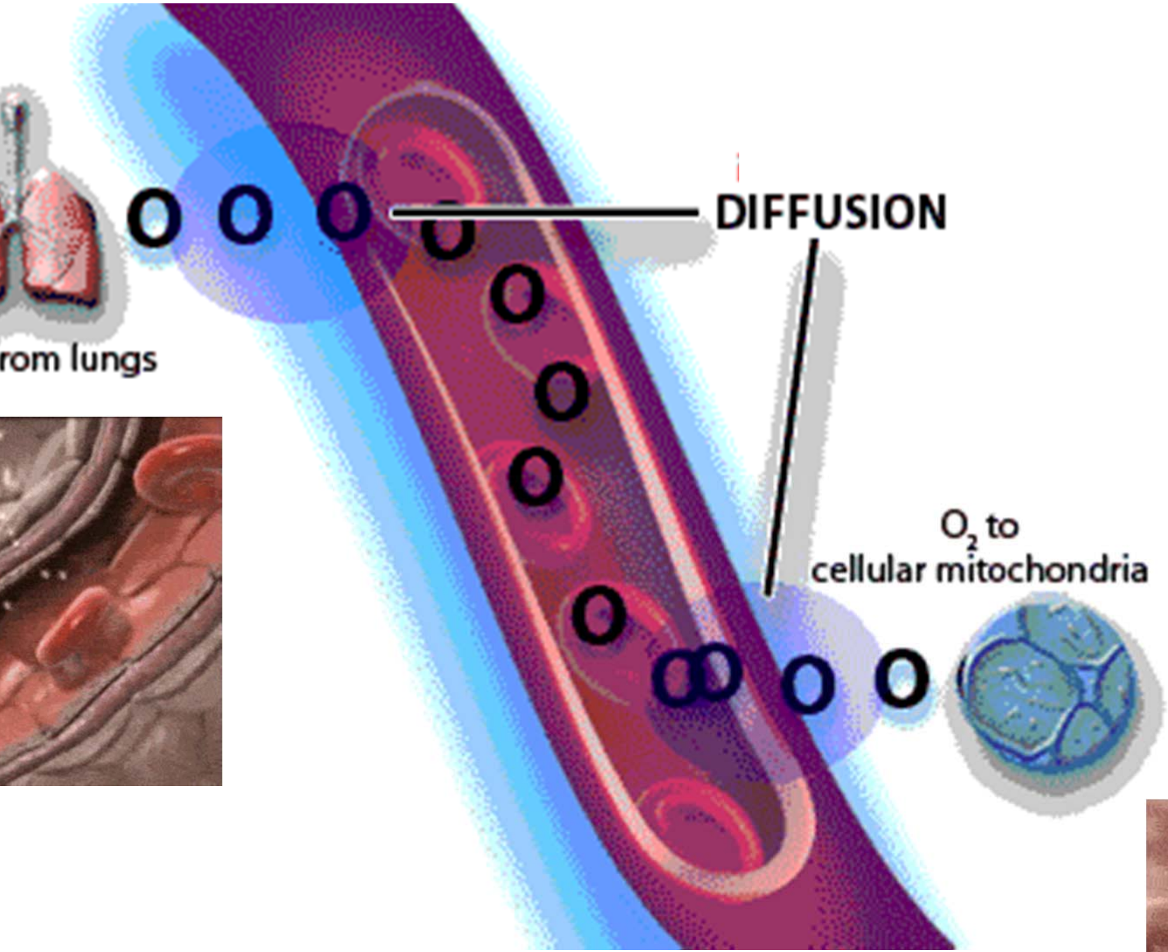
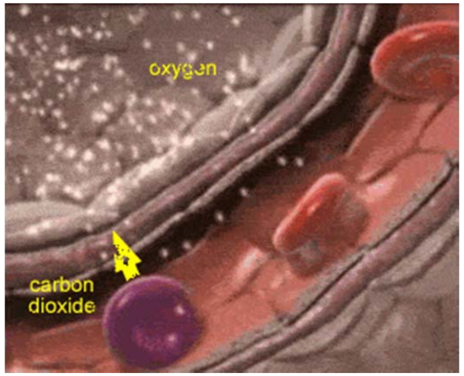
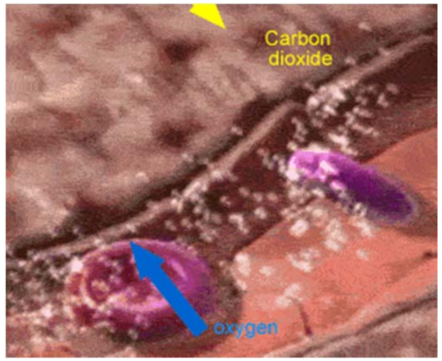
Transportprozesse 2. Diffusion (Stofftransport)





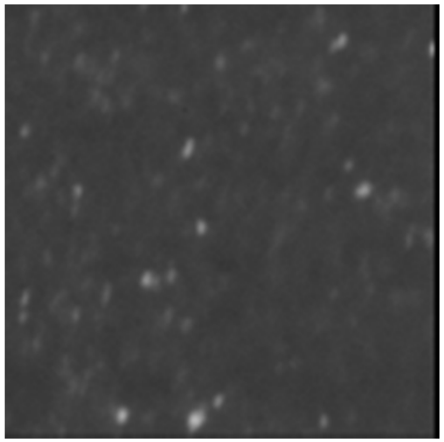


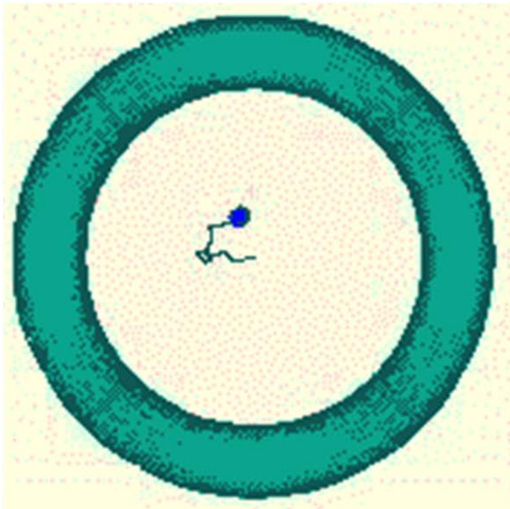
Diffusion:
Tendenz zur gleichmäßigen Verteilung von Molekülen durch die thermische Bewegung

Grundvoraussetzung: thermische Molekularbewegung

brownsche Bewegung

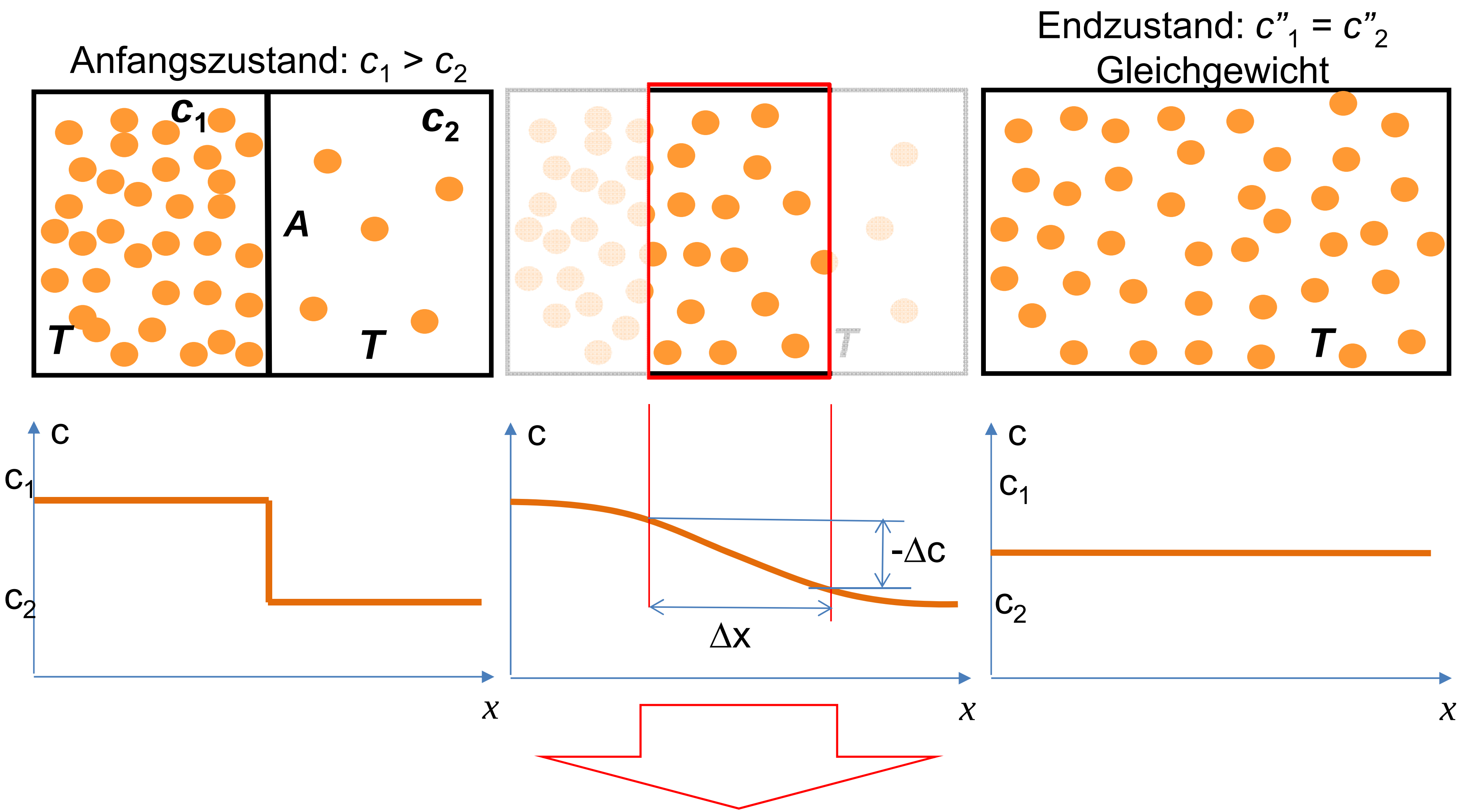
Molekularbewegung





Diffusion:

Tendenz zur gleichmäßigen Verteilung von Molekülen durch die thermische Bewegung



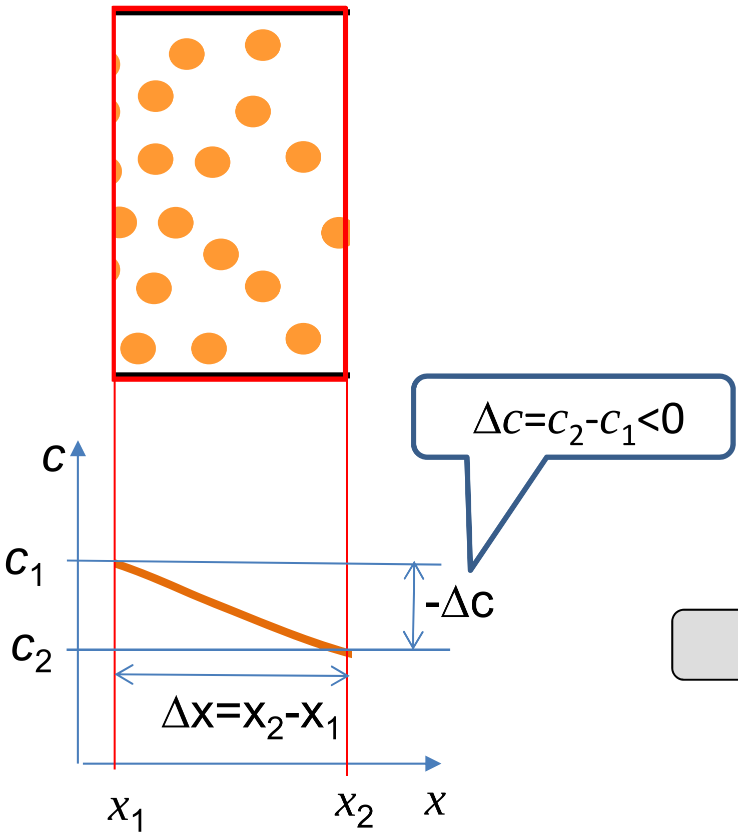
Bemerkung: thermisches Gleichgewicht

Grundbegriffe

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

Adolf Fick
1829-1901
Physiologe

Transportgesetz — 1. ficksches Gesetz



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

Konzentrationsgradient

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

Stromdichte

Diffusionskoeffizient

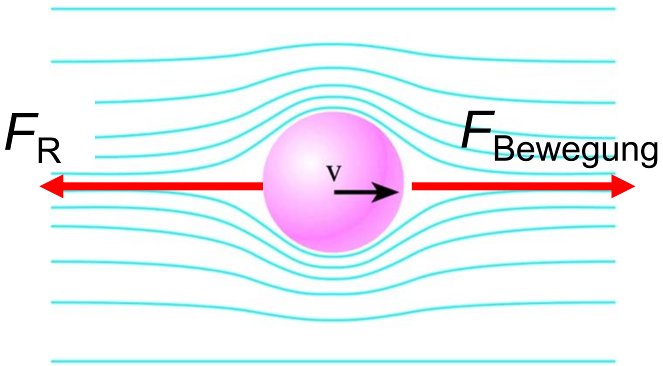
für stationäre Diffusion!

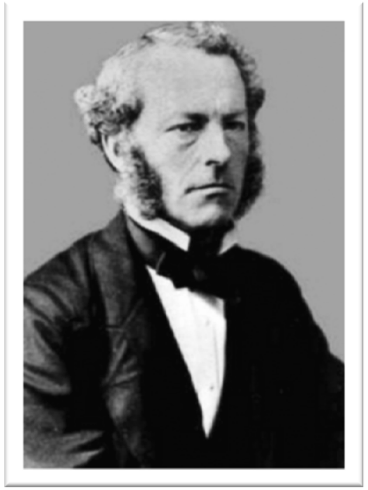
Analogie

	Was wurde transportiert?	Stärke?	Was treibt den Transport?		Zusammenhang?
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	ν	$J_\nu = \frac{\Delta \nu}{A \cdot \Delta t}$	c	$-\frac{\Delta c}{\Delta x}$	$J_\nu = -D\frac{\Delta c}{\Delta x}$

Bewegung von Teilchen in reellen Flüssigkeiten

bei kleineren Geschwindigkeiten:





G. G. Stokes
1819-1903
Mathematiker
Physiker

Reibungskraft

Radius des kugelförmigen Teilchens

stokessches Reibungsgesetz: $F_R = 6\pi\,\eta r\,v$

Viskosität

Geschwindigkeit des Teilchens

bei gleichförmiger Bewegung: $F_{\text{Bewegung}} = F_R$

Beweglichkeit (u) eines Teilchens: $u = \dfrac{v}{F_{\text{Bewegung}}} \quad \Rightarrow \quad u = \dfrac{1}{6\pi\,\eta\,r}$

Diffusionskoeffizient:

Beweglichkeit des Teilchens

Temperatur

$$D = ukT$$

- stoffspezifisch
  - diffundierendes Molekül
    - Größe
    - Form
  - Medium (η)
- temperaturabhängig

Stokes-Gleichung $F = 6\pi\eta r v$ $\quad u = \frac{1}{6\pi\eta r}$

Einstein-Stokes-Gleichung

Temperatur

Diffusionskoeffizient von kugelförmigen Teilchen

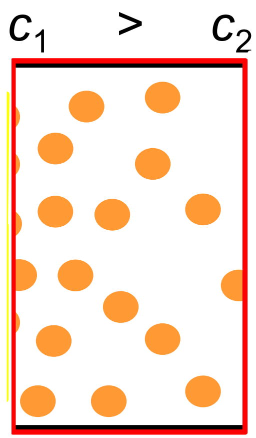
$$\boxed{D = \frac{kT}{6\pi\eta r}}$$

Viskosität des Mediums

Radius des Teilchens

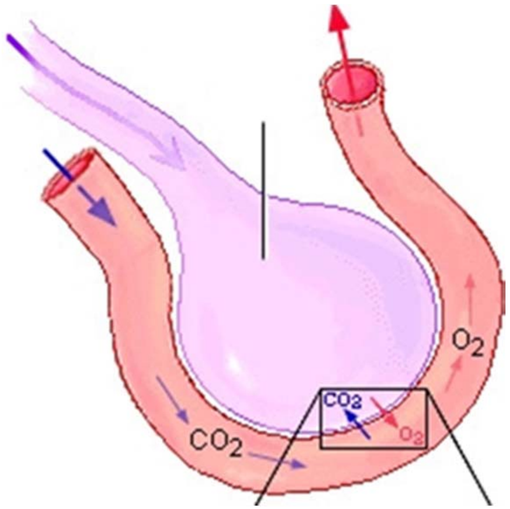
Diffundierendes Teilchen (Molmasse)	**Medium**	***D*** **(m^2/s)**
H_2 (2)	Luft	$6{,}4\cdot10^{-5}$
O_2 (32)	Luft	$2\cdot10^{-5}$
CO_2 (44)	Luft	$1{,}8\cdot10^{-5}$
H_2O (18)	Wasser	$2{,}2\cdot10^{-9}$
O_2 (32)	Wasser	$1{,}9\cdot10^{-9}$
Glyzin (75)	Wasser	$0{,}9\cdot10^{-9}$
Serum Albumin (69 000)	Wasser	$6\cdot10^{-11}$
Tropomiozin (93 000)	Wasser	$2{,}2\cdot10^{-11}$
Tabakmosaik-virus (40 000 000)	Wasser	$4{,}6\cdot10^{-12}$

Stationäre Diffusion?

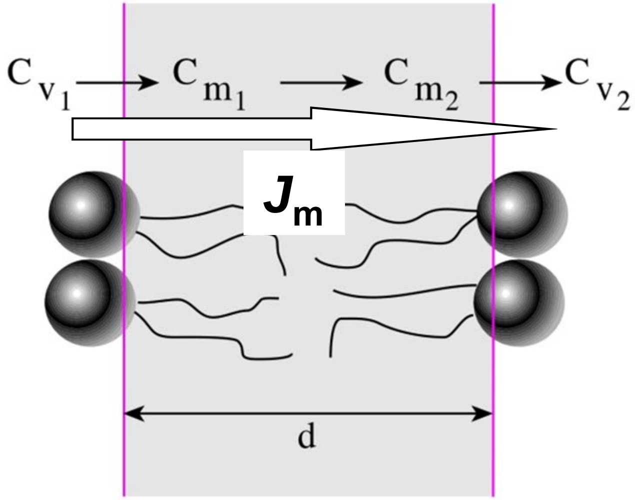


Beispiele, wo die Diffusion ist mit einer guten Annäherung stationär:

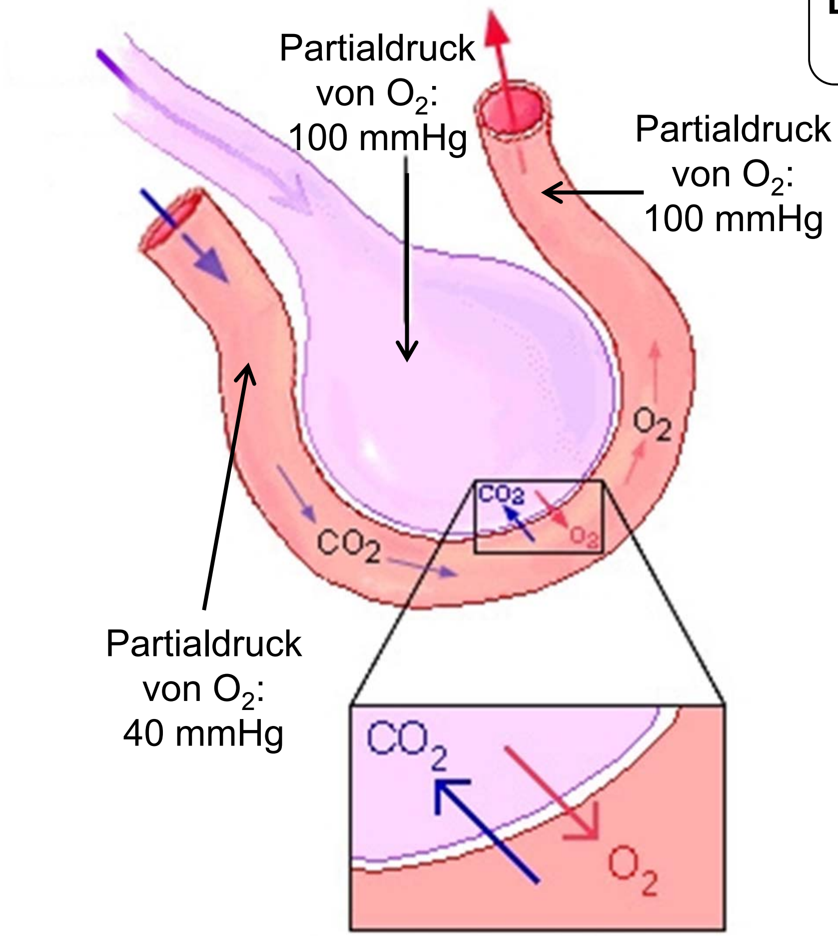
O_2 Transport von Lunge ins Blut



Diffusion durch die Zellmembran



O_2-Diffusion von Lunge ins Blut (Anwendung des 1. Fickschen Gesetzes)



Während Δt Zeit **Durchdiffundierte O_2-Stoffmenge**

Konzentrations-differenz

Zeitspanne (= Länge/Strömungs-geschwindigkeit)

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

Diffusionskoeffizient von O_2-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

Anwendung des 1. Fickschen Gesetzes für

Löslichkeit von Gasen in Flüssigkeiten

Henry-Gesetz:

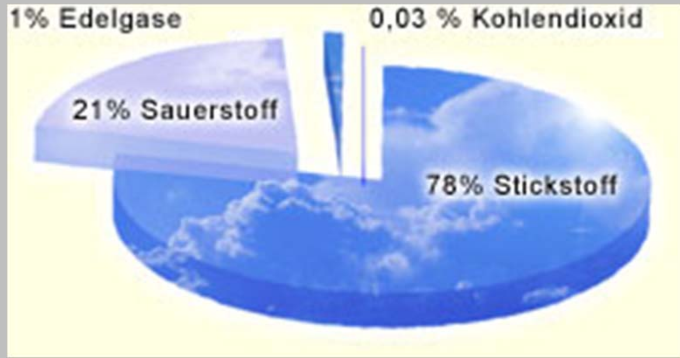
$$c = k_H \cdot p$$

Konzentration in der Lösung

Partialdruck im Gas

Löslichkeitskoeffizient oder Henry-Konstante

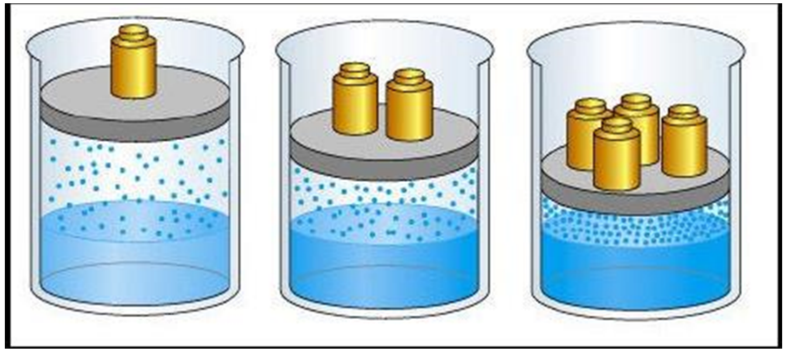
Der Partialdruck entspricht dem Druck, den eine einzelne Gaskomponente eines Gasgemisches bei alleinigem Vorhandensein im betreffenden Volumen ausüben würde.



Gesamtdruck: p = 101 kPa = 760 mmHg, daraus der Partialdruck von O_2: p_{O2} = 21,2 kPa = 160 mmHg

Voraussetzungen:

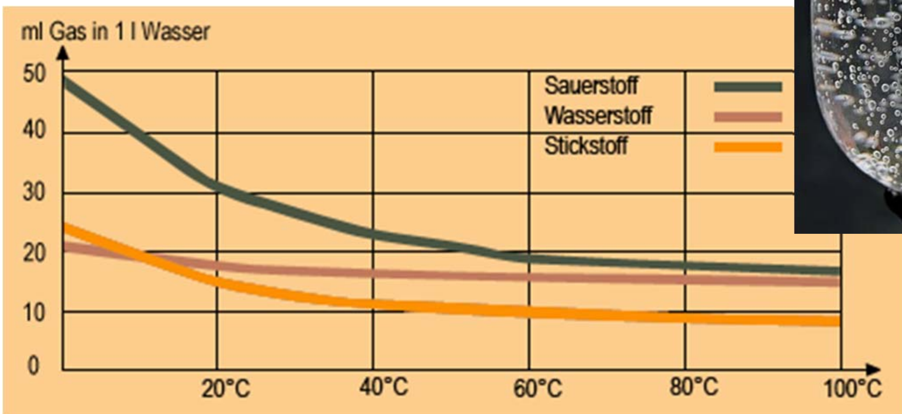
- Gleichgewicht
- dünne Lösung
- keine chemische Reaktion



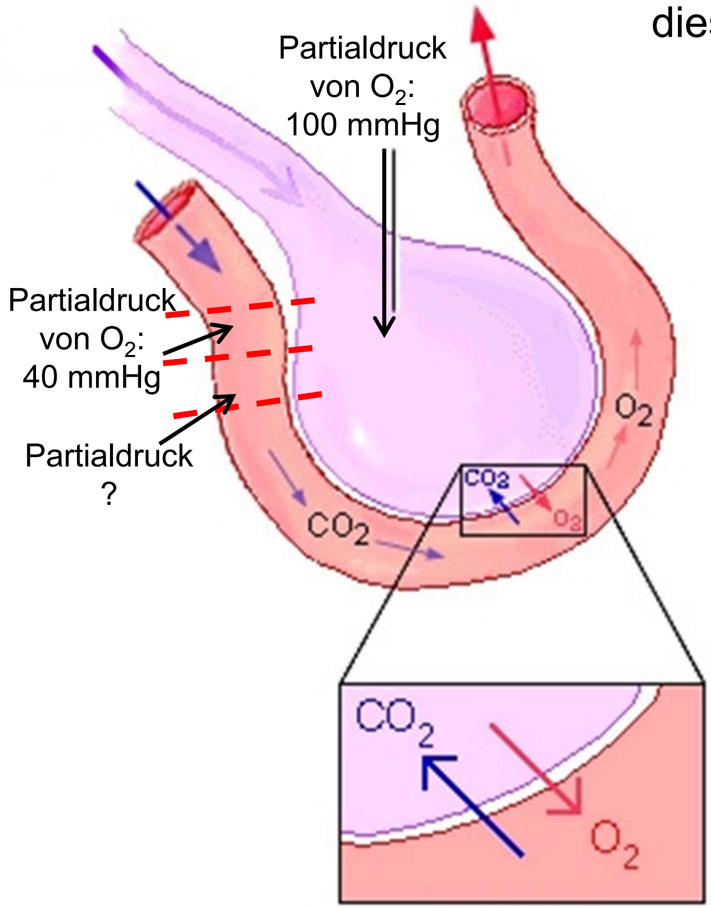
z. B. bei 25°C:

Gas	$k_H \left(\frac{\mathrm{mol}}{\mathrm{l \cdot kPa}}\right)$
O_2	$1{,}26 \cdot 10^{-5}$
N_2	$0{,}64 \cdot 10^{-5}$
CO_2	$33{,}2 \cdot 10^{-5}$

Temperaturabhängigkeit:



Partialdruck im Blut

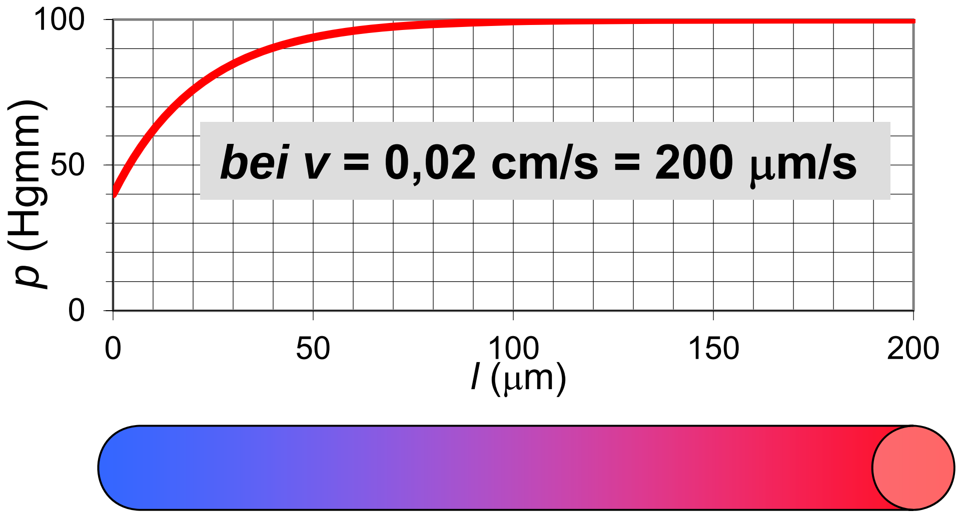


Membran ≈ Wasser

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.

Bei welcher Blutgeschwindigkeit wird das Blut mit O_2 gesättigt?

O_2-Aufnahme in den Alveolarkapillaren

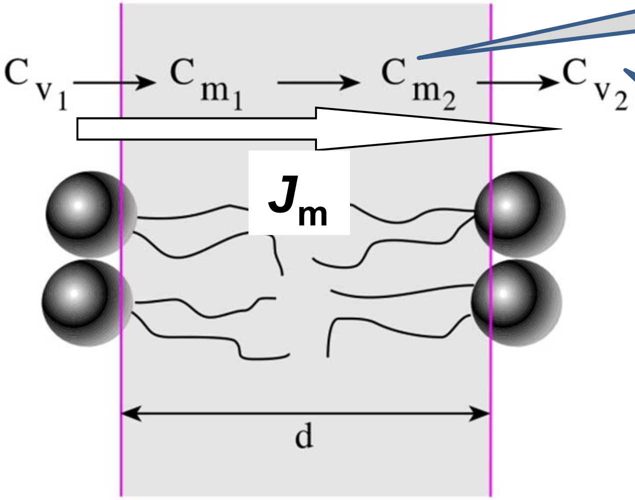


bei v = 0,02 cm/s = 200 µm/s

Kontinuitätsgleichung im Blutkreislauf

Gefäß	Aorta	Arterien	Arteriolen	Kapillaren	Venolen	Venen	Hohlvenen
A (cm²)	4,5	20	400	4500	4000	40	18
v (cm/s)	23	5	0,25	0,022	0,025	2,5	6

Diffusion durch die Zellmembran (passiver Transport)



Konzentration in der Membran

Konzentration in der wäßrigen Lösung

$$c_{\mathrm{m}} = k \cdot c_{\mathrm{v}}$$

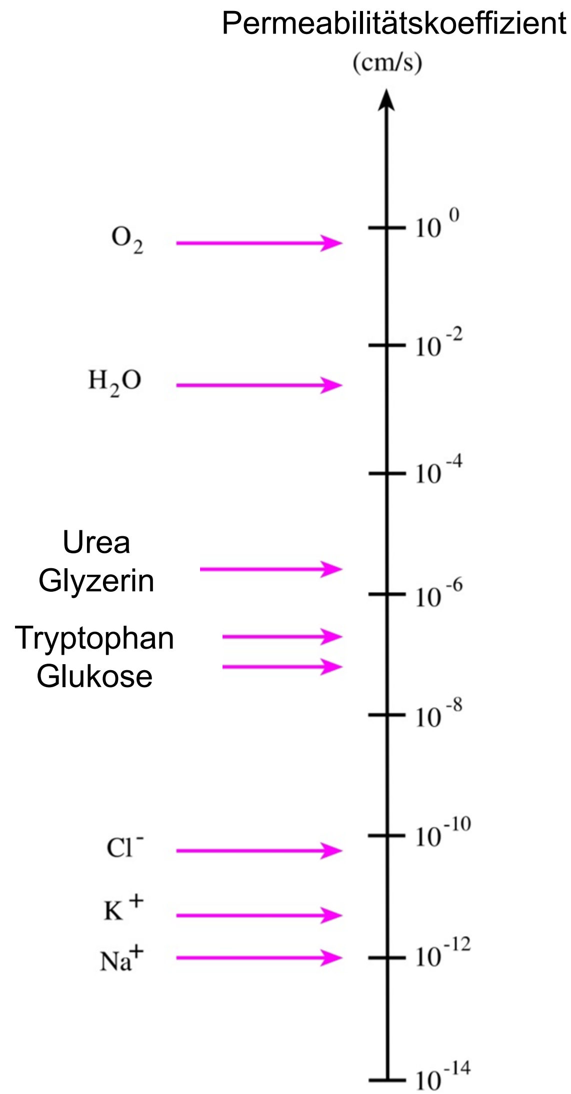
- 1. ficksches Gesetz:

$$J_{\mathrm{m}} = -D \cdot \frac{\Delta c}{\Delta x} = -D \cdot \frac{c_{\mathrm{m2}} - c_{\mathrm{m1}}}{d} =$$

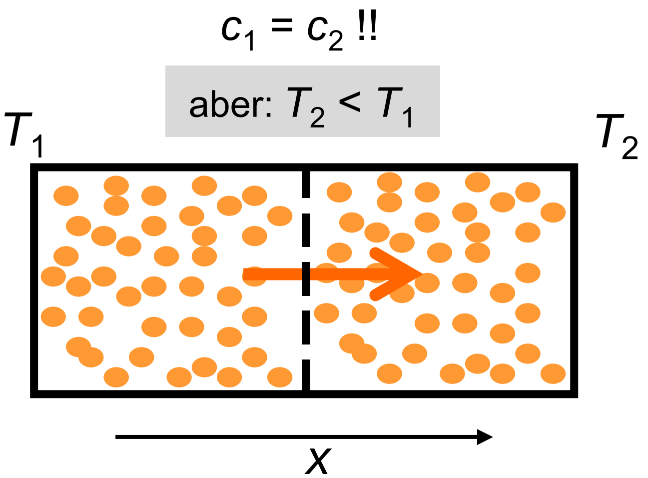
$$= -D \cdot k \cdot \frac{c_{\mathrm{v2}} - c_{\mathrm{v1}}}{d} = -p\left(c_{\mathrm{v2}} - c_{\mathrm{v1}}\right)$$

$$J_{\mathrm{m}} = -p\left(c_{\mathrm{v2}} - c_{\mathrm{v1}}\right)$$

Permeabilitätskoeffizient (m/s)



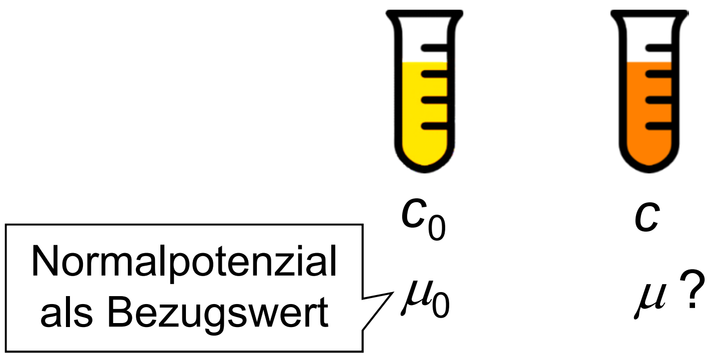
Diffusion in Falle des thermisches Nichtgleichgewichtes:



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 (μ)

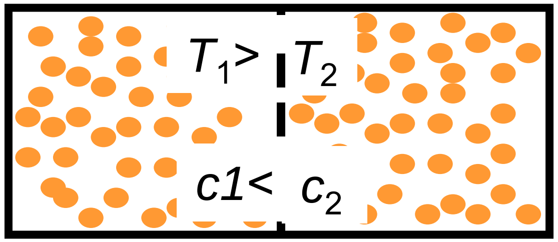
chemisches Potenzial für Lösungen:



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

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

Endzustand der Diffusion (kein Stoffstrom) beim thermischen Nichtgleichgewicht:



Analogie

	Was wurde transportiert?	Stärke?	Was treibt den Transport?		Zusammenhang?
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	ν	$J_\nu = \frac{\Delta \nu}{A \cdot \Delta t}$	(c) μ	$\left(-\frac{\Delta c}{\Delta x}\right)$ $-\frac{\Delta \mu}{\Delta x}$	$J_\nu = -D\frac{\Delta c}{\Delta x}$

Das 2. ficksche Gesetz

Allgemeine Beschreibung der Diffusion $c(x,t)$

anschaulichere Form

$$D\frac{\Delta\left(\frac{\Delta c}{\Delta x}\right)}{\Delta x}=\frac{\Delta c}{\Delta t}$$

exakte mathematische Form

$$D\frac{\partial^2 c}{\partial x^2}=\frac{\partial c}{\partial t}$$

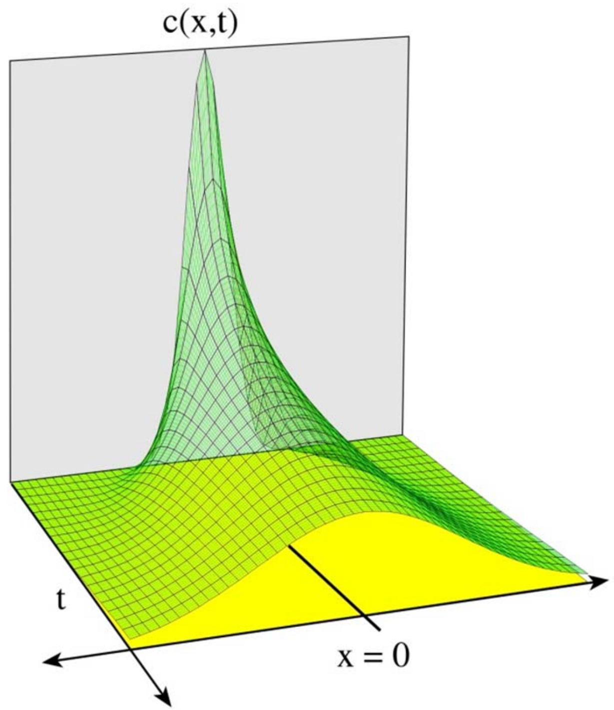
- Partielle Differenzialgleichung zweiter Ordnung
- Lösung: die Funktion $c(x, t)$

Beispiele für Lösungen:

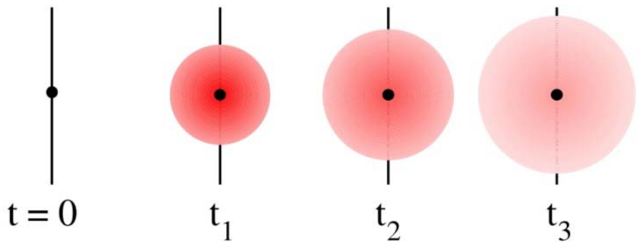
Für eindimensionale Diffusion:

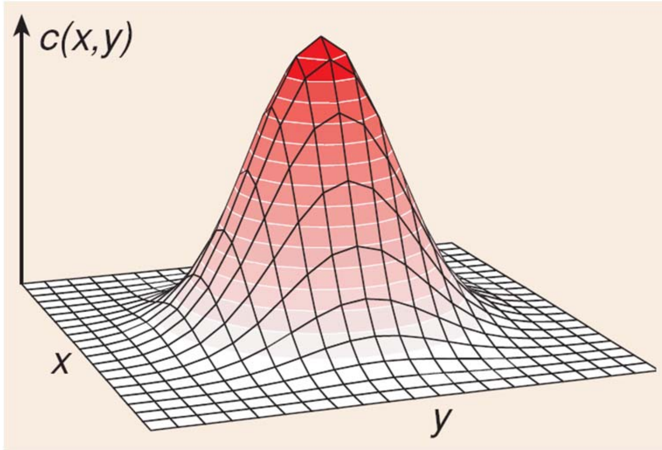
$$c(x)=\frac{c_0\Delta x}{\sqrt{2\pi\sigma_x^{\ 2}}}e^{-\frac{x^2}{2\sigma_x^{\ 2}}}$$

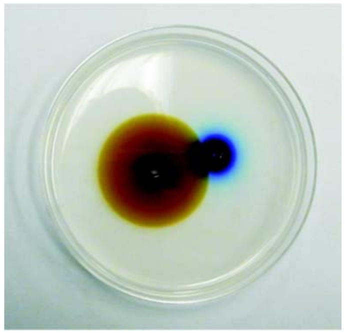
$$\sigma_x=\sqrt{2Dt}$$



Für zweidimensionale Diffusion:

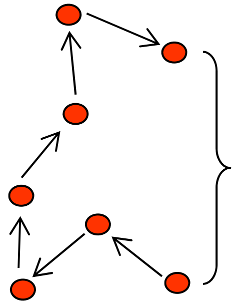




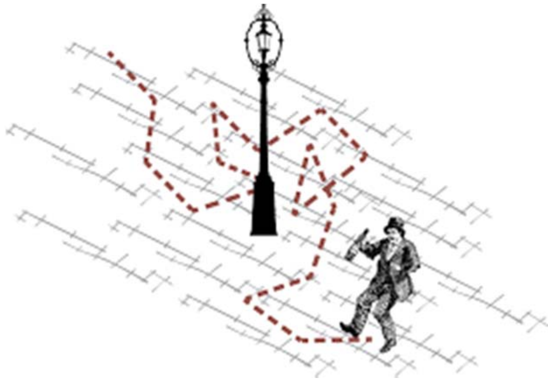


Siehe noch Praktikum!

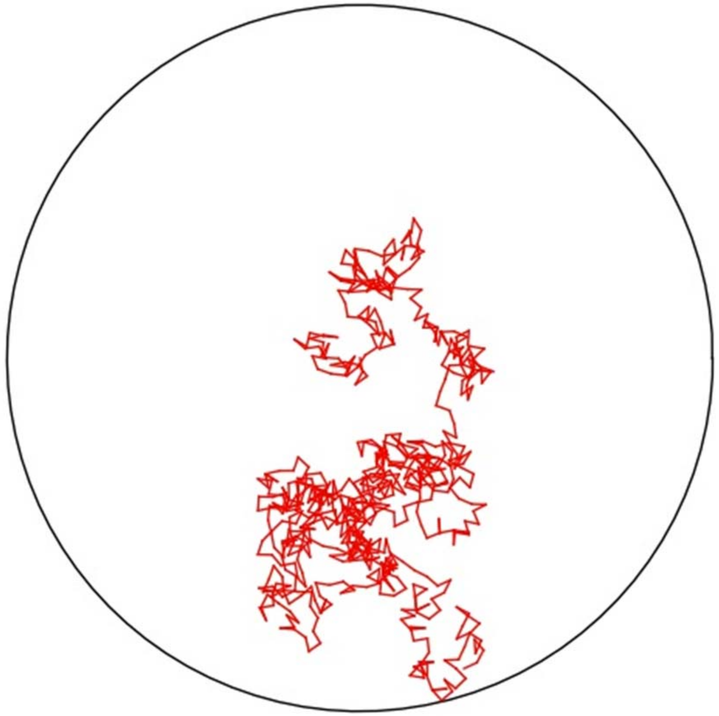
Diffusion als *Random Walk*



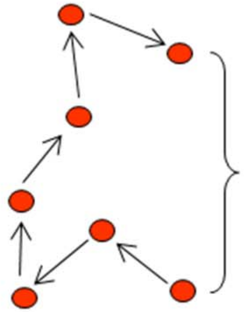
$\overline{R} =$ 



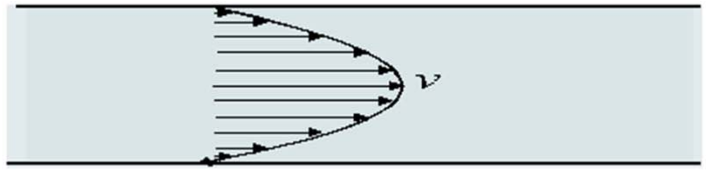
$$\boxed{\overline{R} = \sqrt{3D \cdot t}}$$



Welcher Transportprozess ist „schneller” für O_2-Transport?



$$\overline{R} = \sqrt{3D \cdot t}$$



Geschwindigkeit der Blutströmung:

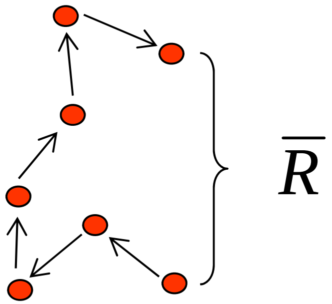
Gefäß	Kapillaren
A (cm^2)	4500
v (cm/s)	0,022

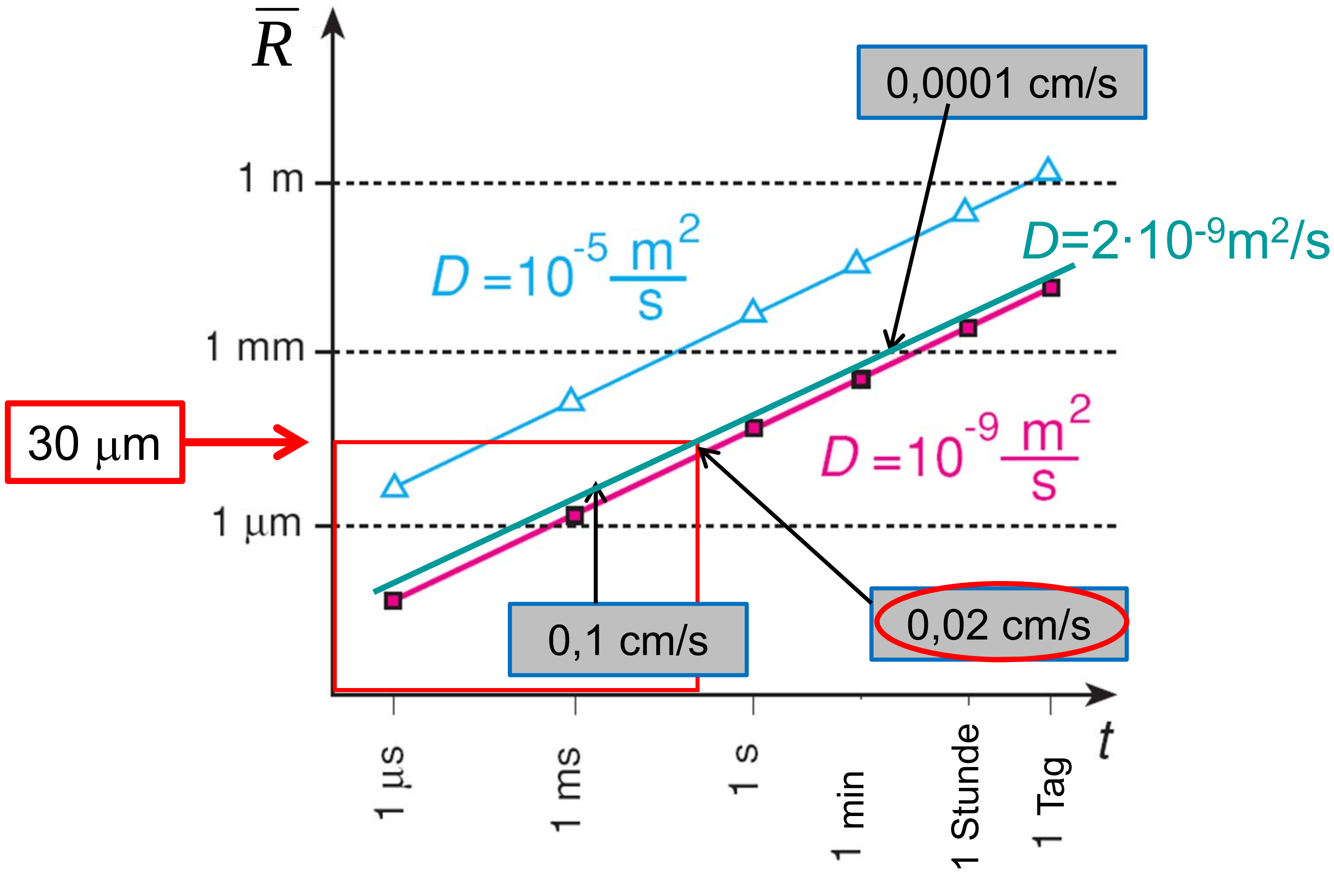
$$\overline{R} = \sqrt{3D \cdot t} \qquad D = 2 \cdot 10^{-9}\,\frac{\mathrm{m}^2}{\mathrm{s}}$$

σ_x	t	**Durchschnittliche Geschwindigkeit der Diffusion**
1 µm		
30 µm	0,15 s	0,2 mm/s
1 cm	4,6 h	0,0006 mm/s
1 m	5,3 J	≈ 0

Zusammenfassend über die „Schnelligkeit” der Diffusion

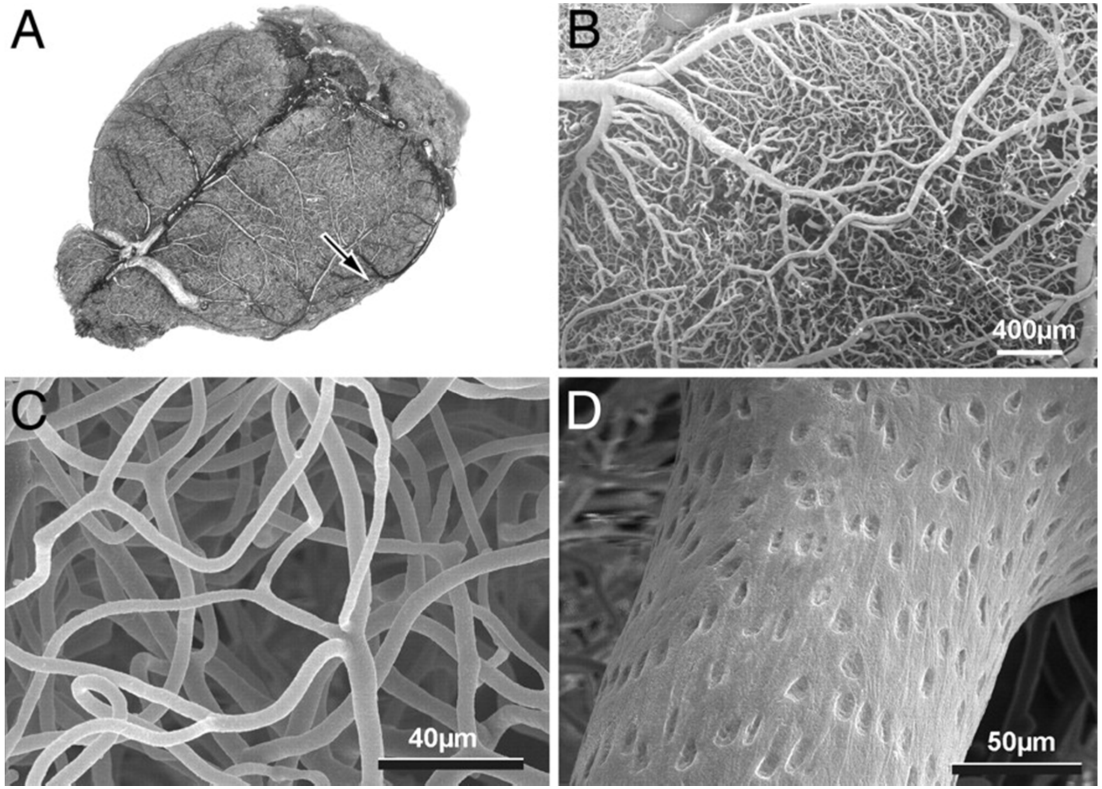
Gefäß	Kapillaren
A (cm²)	4500
v (cm/s)	0,022





Welcher Transportprozess ist „schneller” für O2-Transport?

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

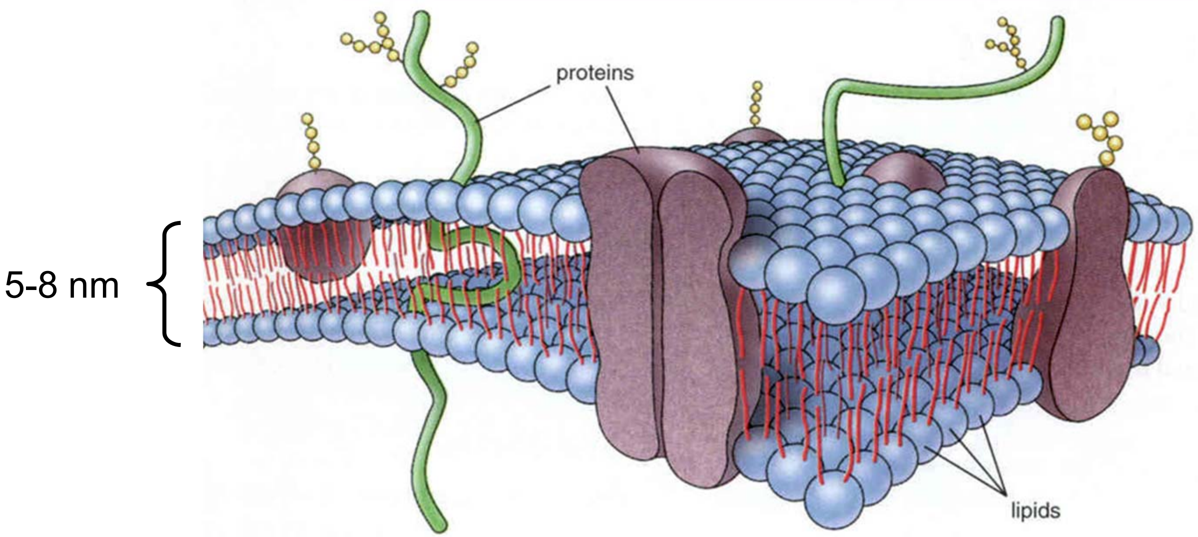


(*C*) SEM image of cortical capillaries. Capillary diameters range from 4 to 6 µm and intercapillary distances are ≈30 µm.

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

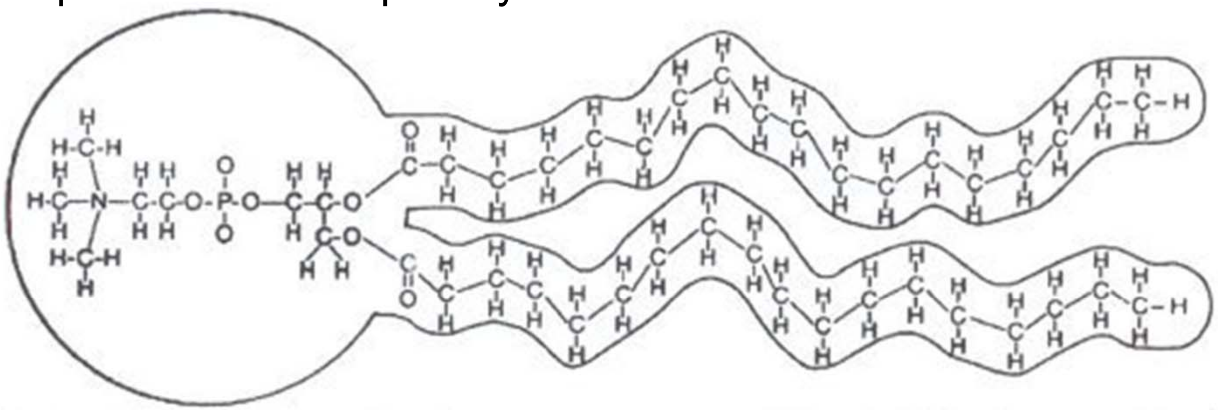
Anwendungen:

Diffusion in Membranen



Beispiel

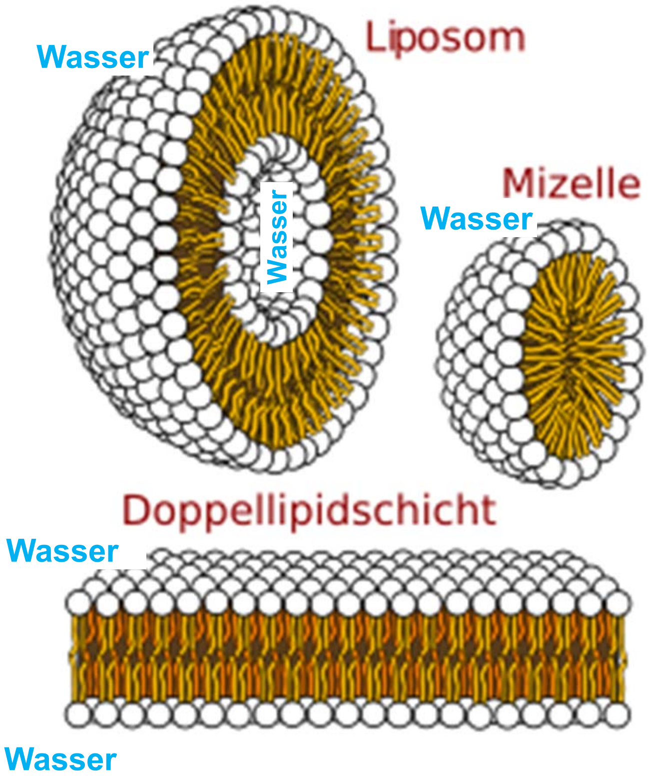
Ein Phospholipidmolekül: Phosphatidylcholin

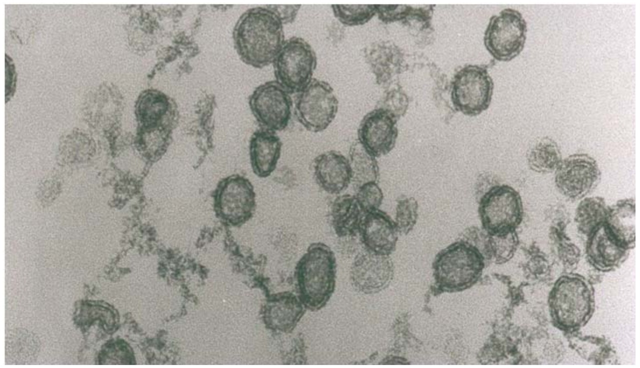


Polarer, hydrophiler Kopf

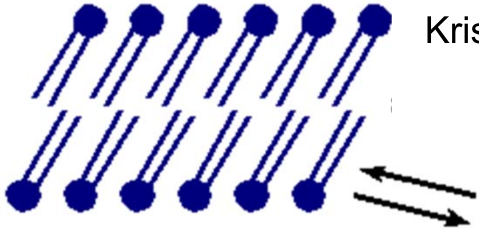
Apolare, hydrophobe Schwänze

Zur Erinnerung: Lyotrope Flüssigkristalle



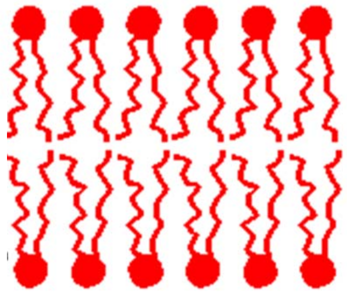


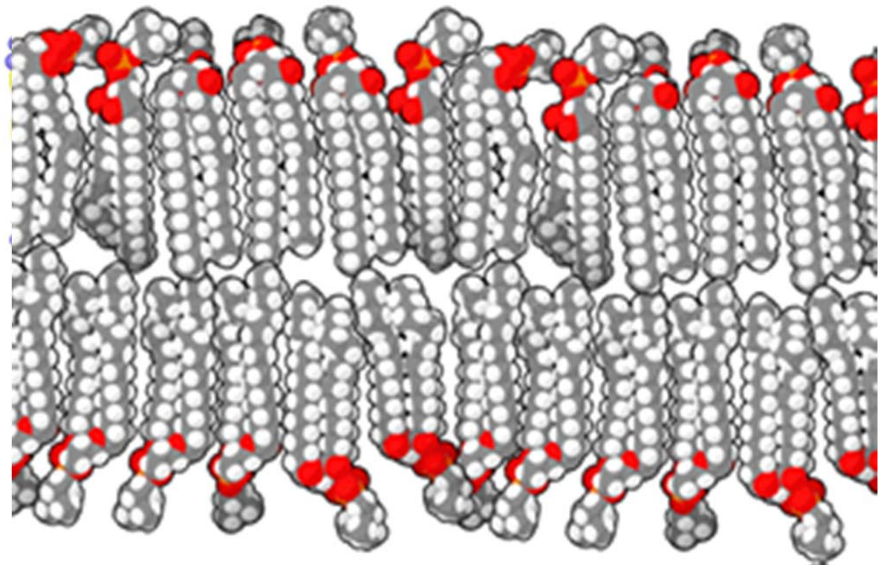
Phasenübergang in der Lipiddoppelschicht



Kristalliner Zustand mit geordneten Fettsäureketten

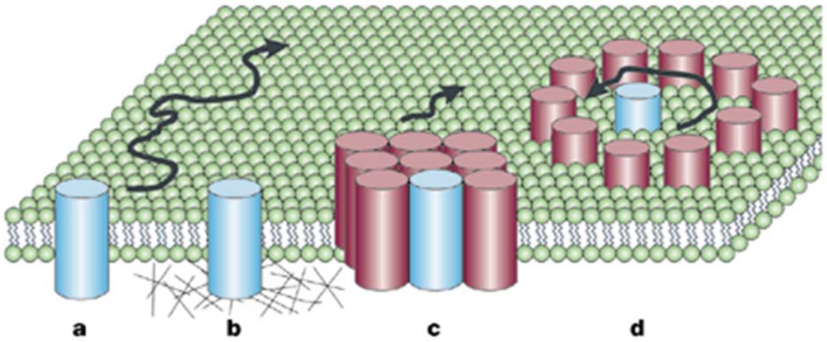
flüssigkristalliner Zustand mit ungeordneten Fettsäureketten



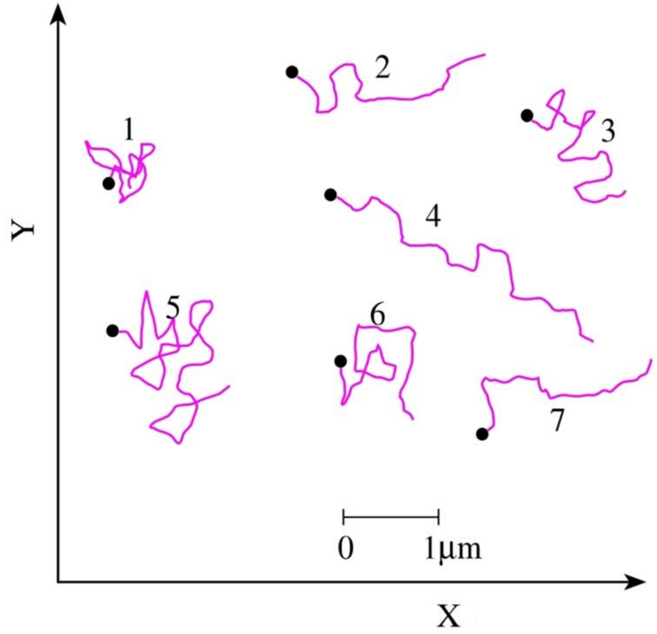


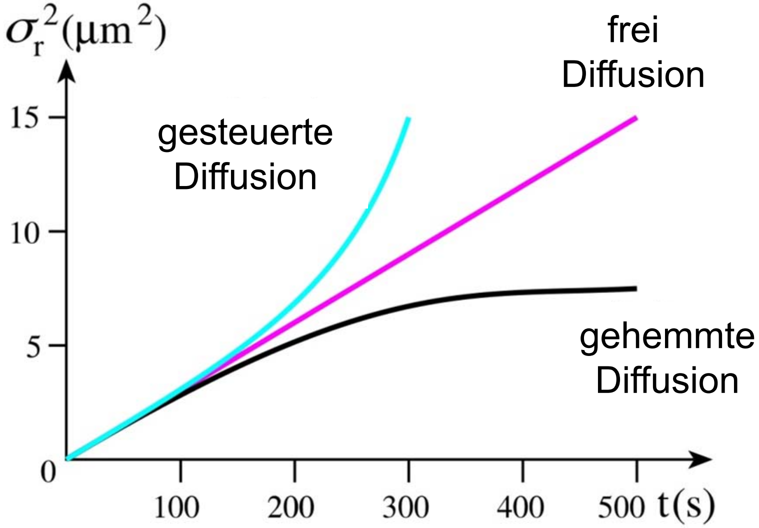
$$\eta_{Gel} > \eta_{Fluid} >> \eta_{Wasser}$$

- Laterale Diffusion in Membranen



Messung z. B. durch SPT (single particle tracking)





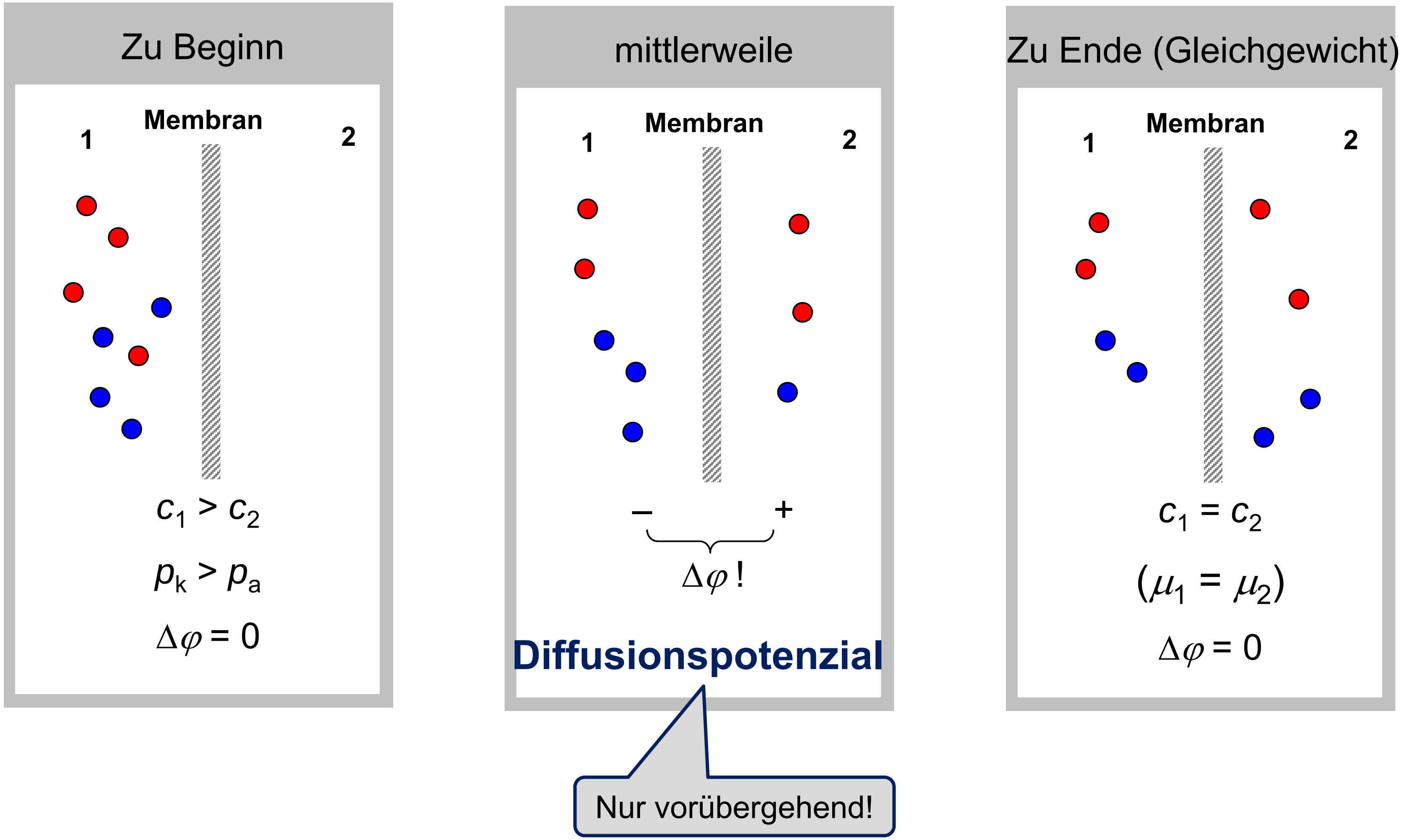
Lipide (mobiler Anteil >90%):
$D_{lateral} \approx 10^{-12}$ m^2/s

Proteine (mobiler Anteil 10-90%):
$D_{lateral} \approx 10^{-13}$ - 10^{-17} m^2/s

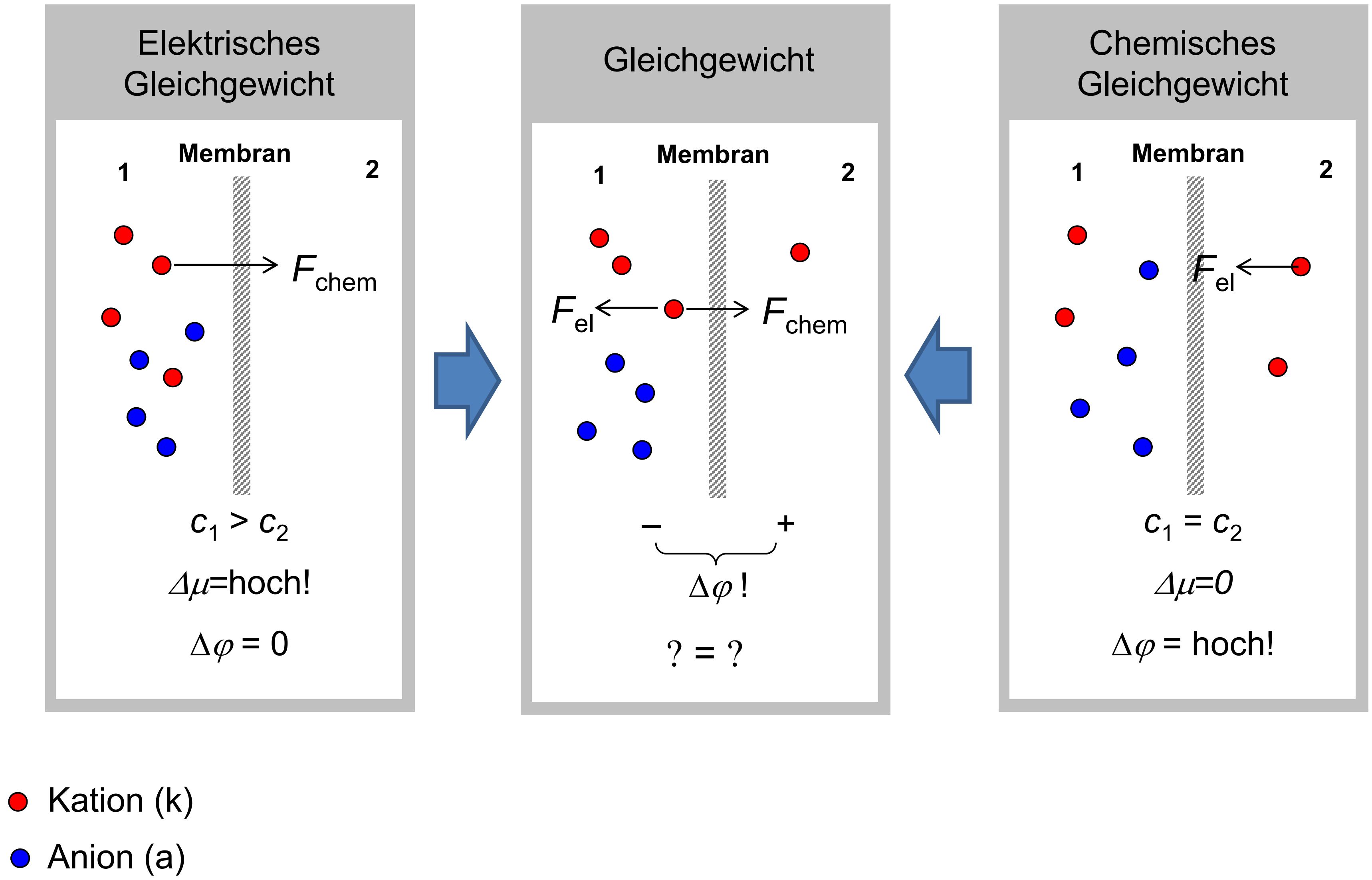
Diffusion von Ionen durch eine Membran (zwei Spezialfälle)

einwertige Ionen: ● Kation (k) ● Anion (a)

1. Die Permeabilitätswerte sind unterschiedlich, z. B. $\boxed{p_k > p_a}$

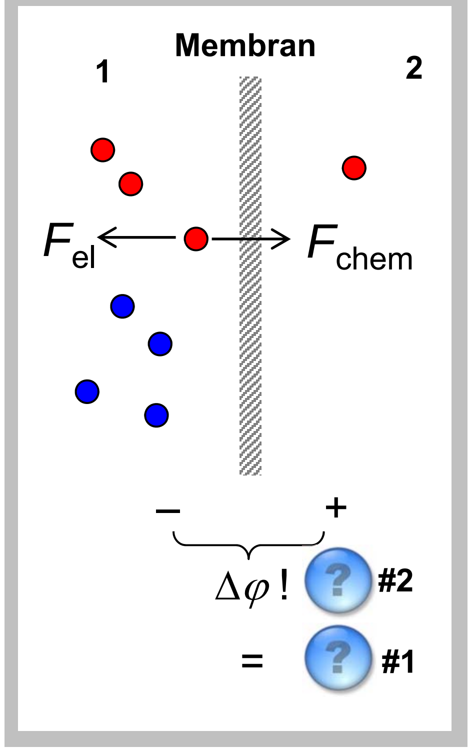


2. Die Permeabilität eines Ions ist Null, z. B. $\boxed{p_a = 0}$



2. Die Permeabilität für das eine Ion ist Null, z. B. $\boxed{p_a = 0}$

zu Ende (Gleichgewicht)



Kation (k)

Anion (a)

#1

elektrochemisches Potenzial (J/mol):

$$\mu_e = \mu + F \cdot \varphi$$

im Gleichgewicht:

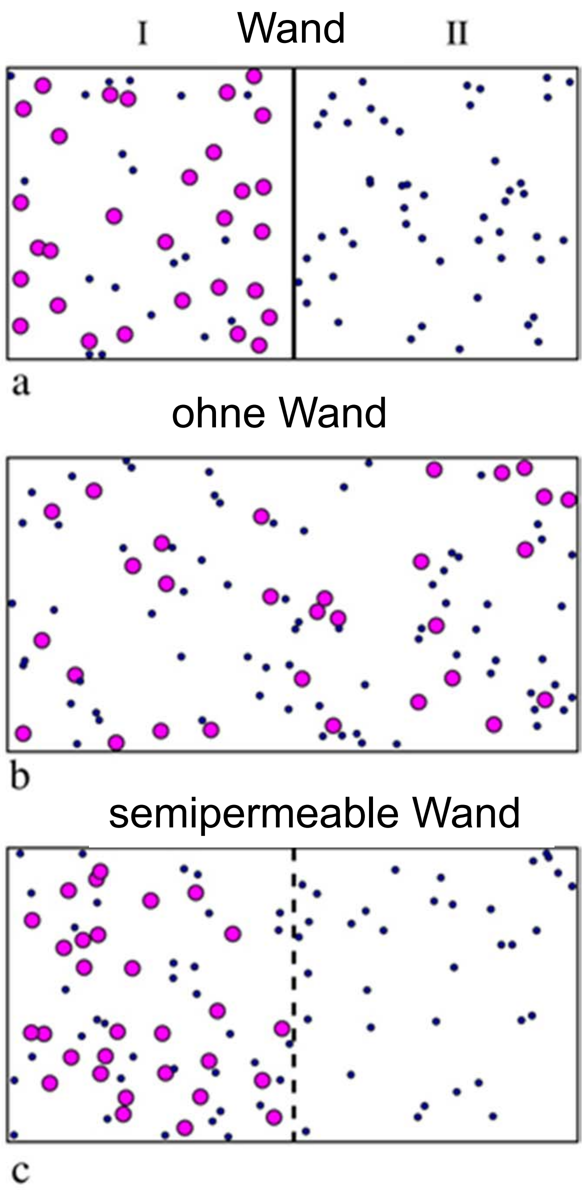
$$\mu_{e1} = \mu_{e2}$$

#2

Nernst-Gleichung:

$$\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 = -\frac{RT}{F}\ln\frac{c_2}{c_1}$$

Eine weitere Anwendung: Osmose



Lehrbuch III./2.2.1

Bohnen trocken und im Wasser

J. H. van’t Hoff
1852-1911
Chemiker

Van’t Hoff-Gesetz
für verdünnte Lösungen und für Gase

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

osmotischer Druck

Konzentration der Moleküle für welche die Wand undurchlässig ist

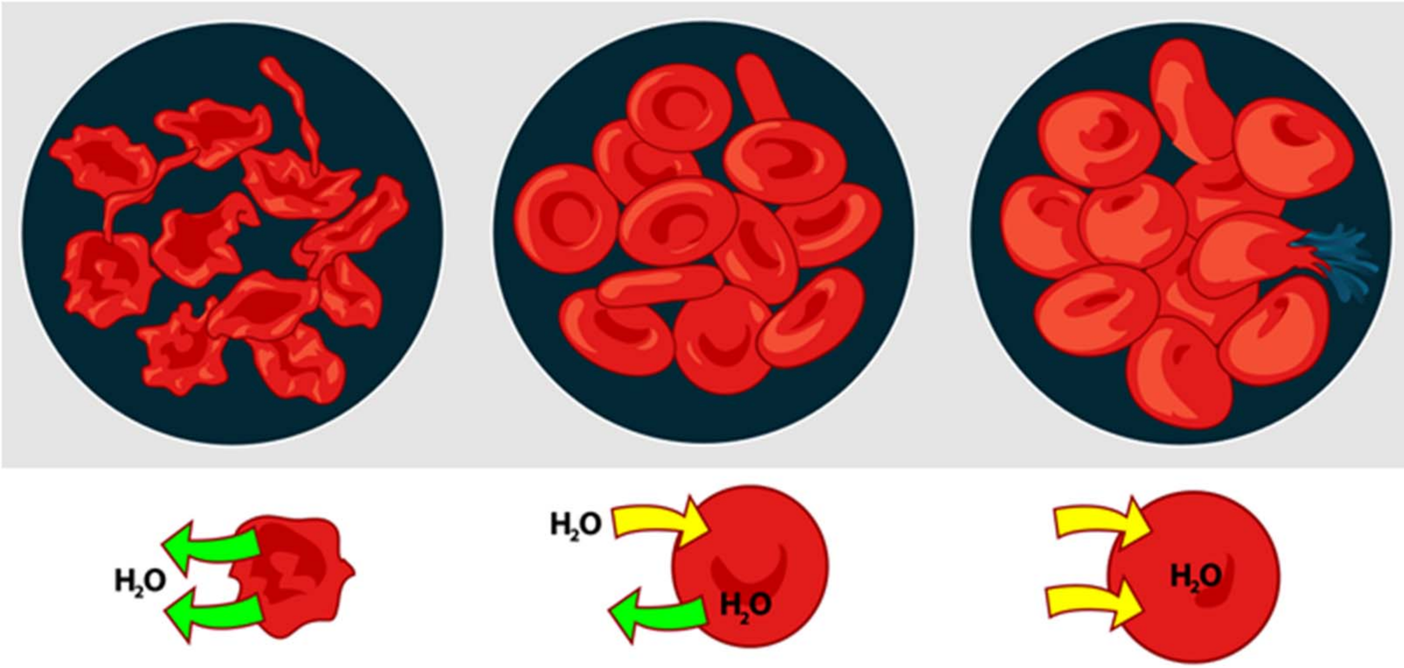
Temperatur

isotonisch sind zwei Lösungen, wenn ihre osmotische Druckwerte gleich groß sind

hypertonische Lösung

isotonische Lösung

hypotonische Lösung



Wasser fließt aus der Zelle hinaus

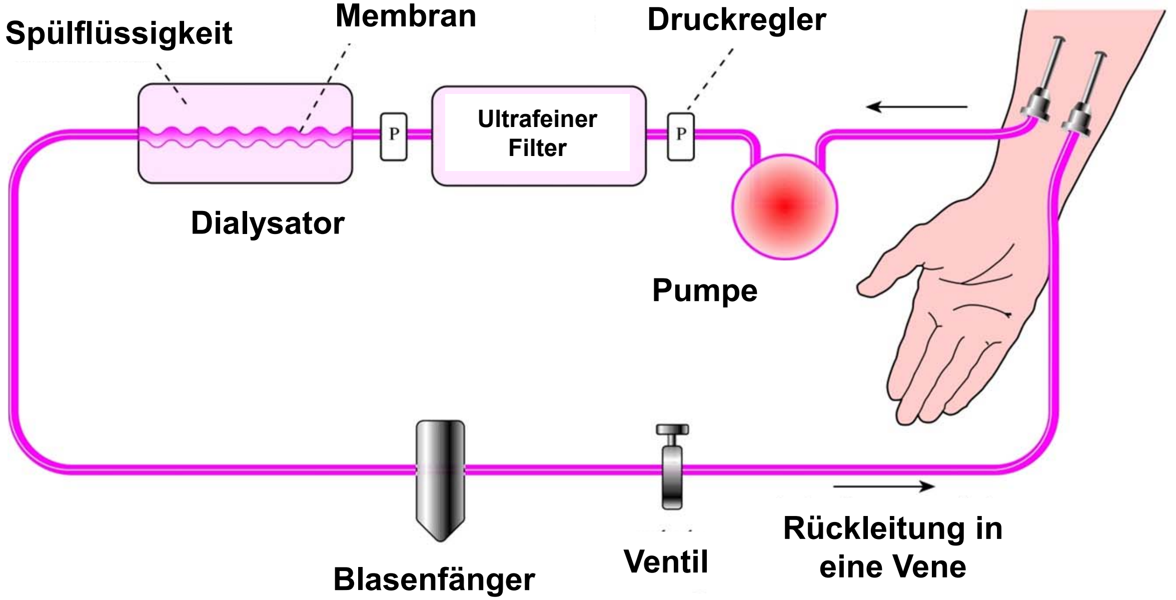
kein resultierende Wassertransport

Wasser fließt die Zelle hinein

Auf Osmose basierende Behandlungsmethode

Hämodialyse (Blutreinigung)

die Entfernung von Flüssigkeit und gelösten Molekülen aus dem extrakorporal zirkulierenden Blut über Filtersysteme, die eine semipermeable Membran enthalten



Lehrbuch III./2.2.2