

Transportprozesse 4

III. Diffusion (Stofftransport)

6. Anwendungen:

- Laterale Diffusion in Membranen
- Diffusion durch Membranen (passiver Transport)
- Diffusion von Ionen durch eine Membran, Diffusionspotenzial, Nernst-Gleichung

7. Ein Spezialfall: wenn Stoff produziert und verwendet wird

IV. Elektrischer Strom (el. Ladungstransport)

1. Grundbegriffe Elektrische Stromstärke, -dichte

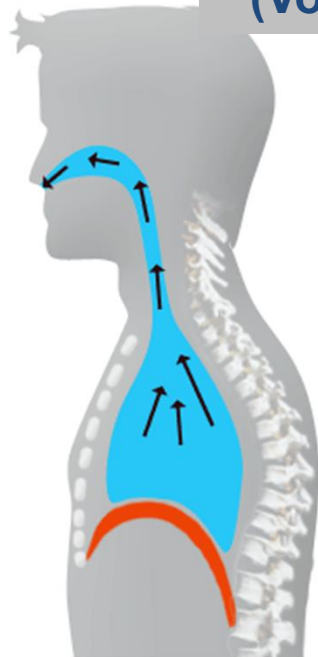
2. Transportgesetz = **ohmsches Gesetz**

3. Anwendungen Auf Widerstandsmessung basierende Techniken (IPG, IKG, EIT,)

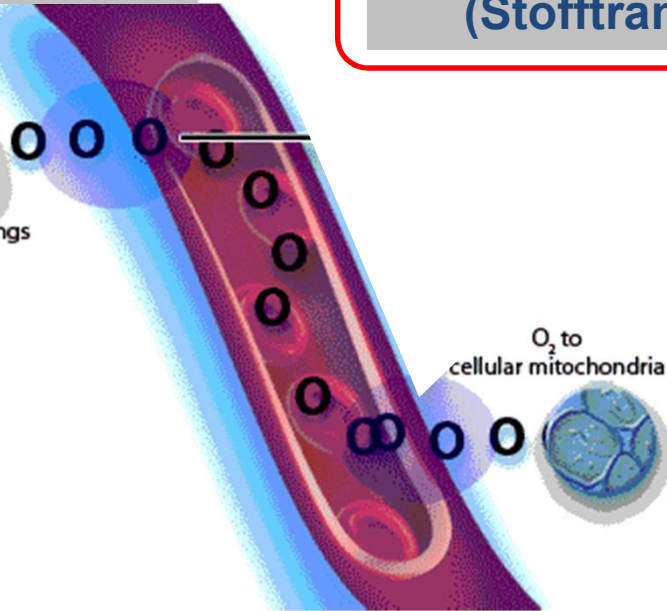
V. Verallgemeinerung der Transportgesetze

Transportprozesse

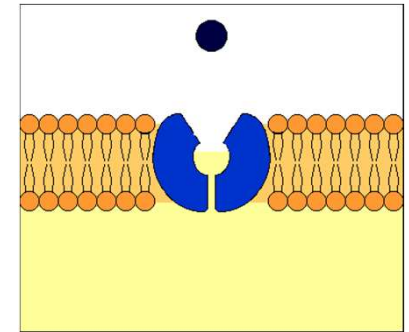
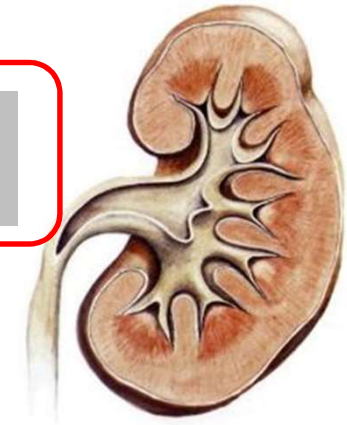
I. Strömung (Volumentransport)



entspannt



III. Diffusion (Stofftransport)



IV. Elektrischer Strom (el. Ladungstransport)



II. Wärmeleitung (Energietransport)



V. Verallgemeinerung

Zur Erinnerung

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

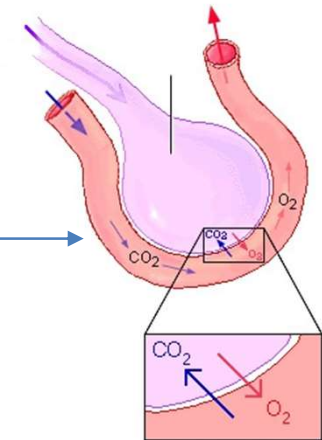
Das 1. Ficksche Gesetz:

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

Bedingung: stationäre Diffusion!

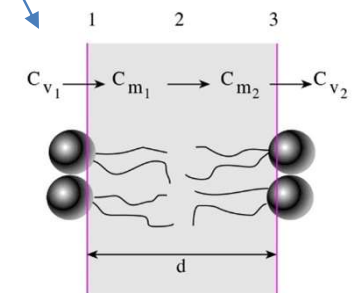
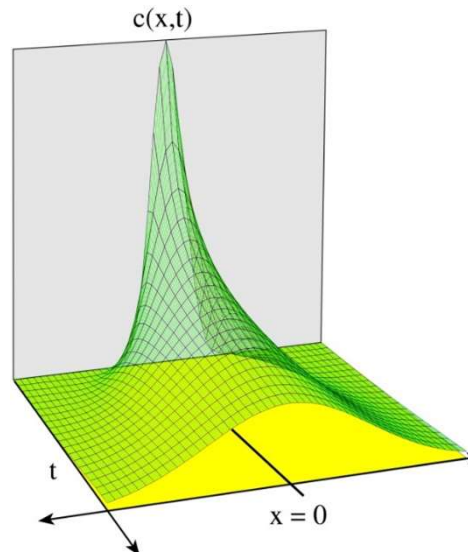
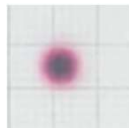
Anwendbar für

- O₂-Diffusion von Lunge ins Blut
- Diffusion durch Membranen



Das 2. Ficksche Gesetz:

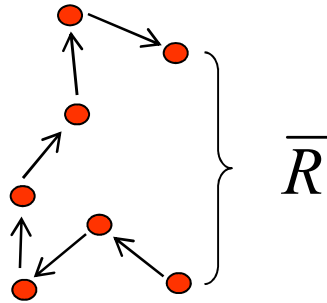
$$D \frac{\Delta \left(\frac{\Delta c}{\Delta x} \right)}{\Delta x} = \frac{\Delta c}{\Delta t}$$



Zusammenfassend über die „Schnelligkeit“ der Diffusion

Zur Erinnerung

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

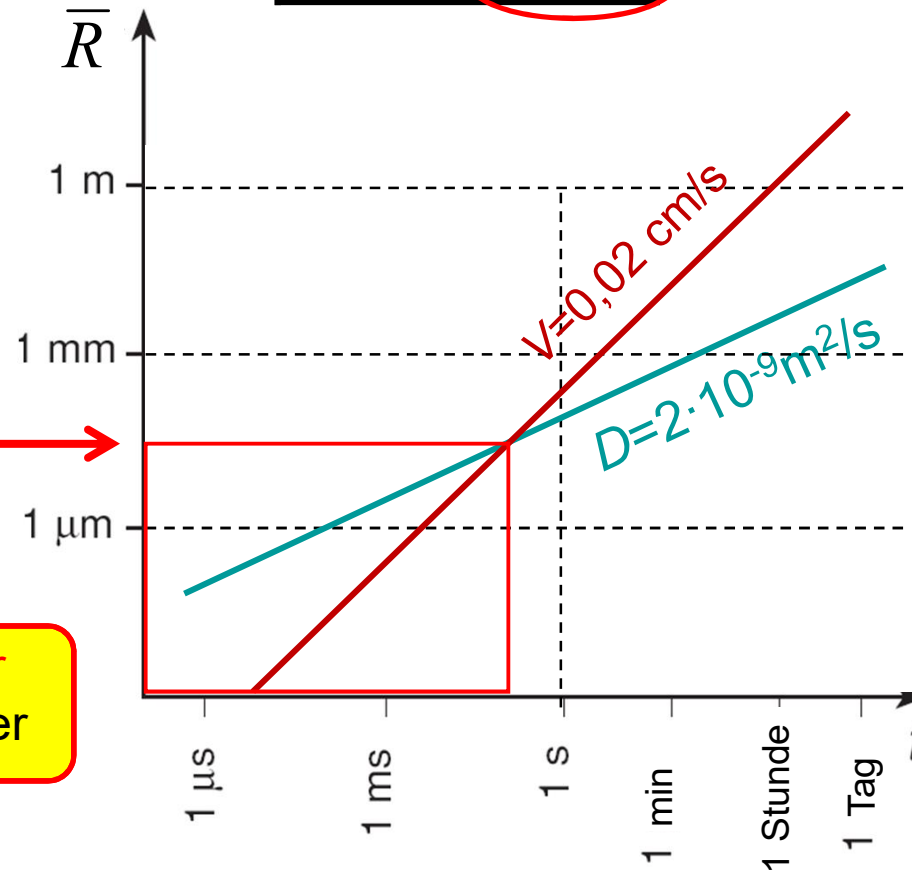


Diff: $\bar{R} \sim \sqrt{t}$

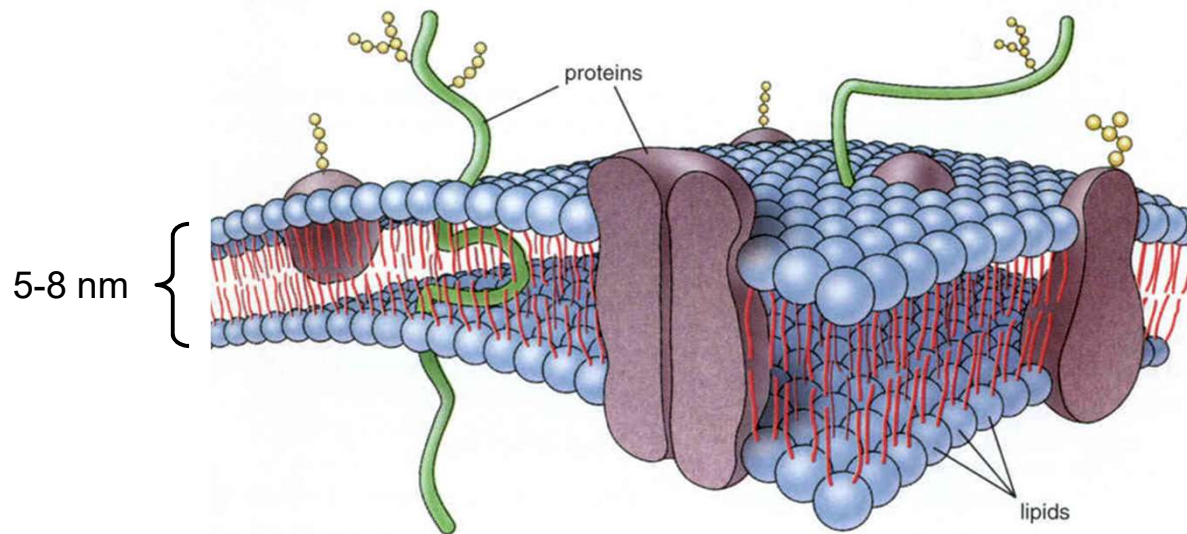
Strömung: $s = v \cdot t$

30 μm

<30 μm : Diffusion ist schneller
>30 μm : Strömung ist schneller

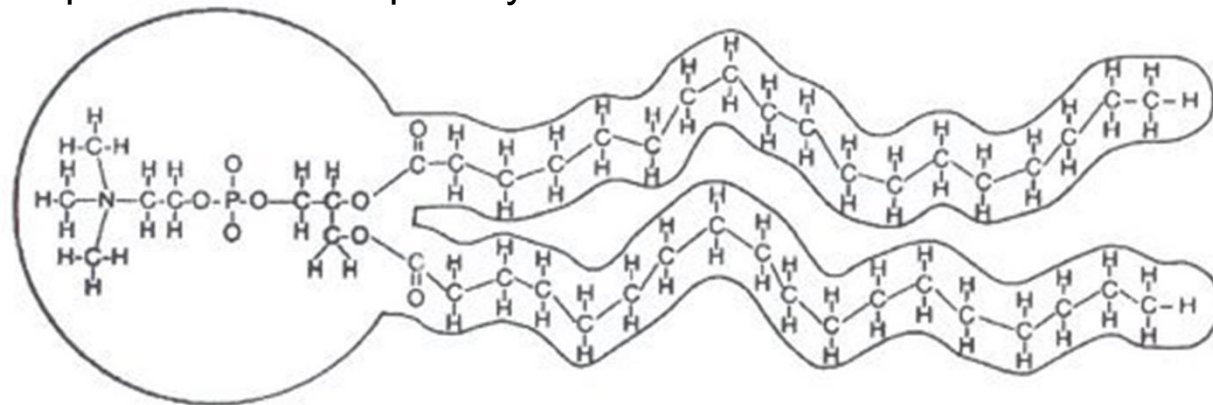


6. Anwendungen: Diffusion in Membranen



Beispiel

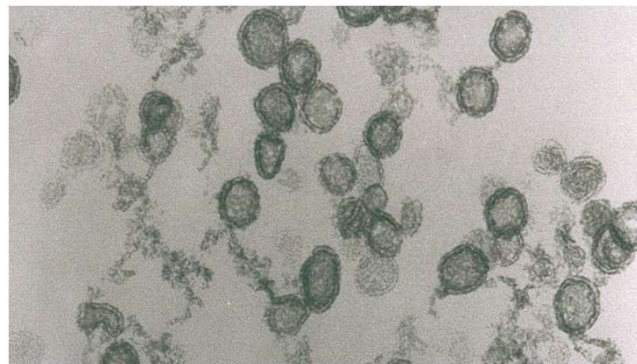
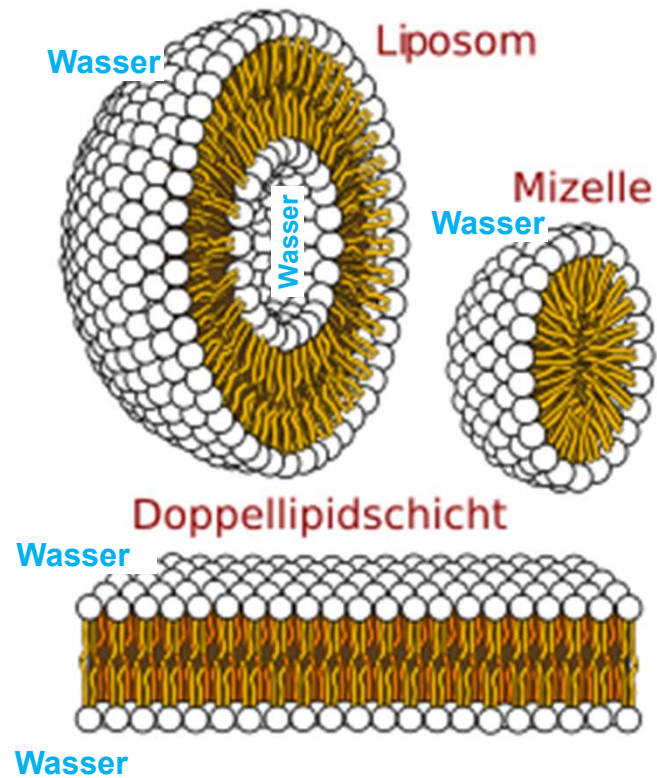
Ein Phospholipidmolekül: Phosphatidylcholin



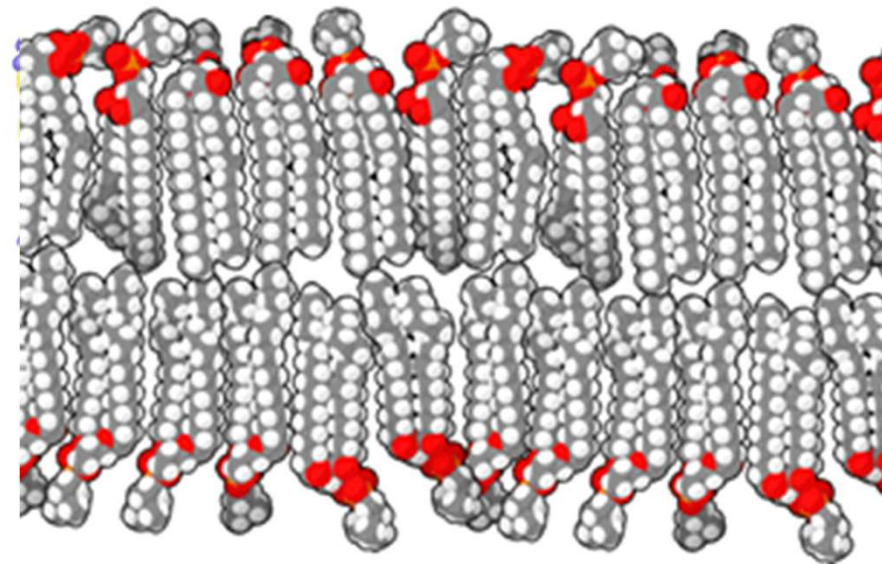
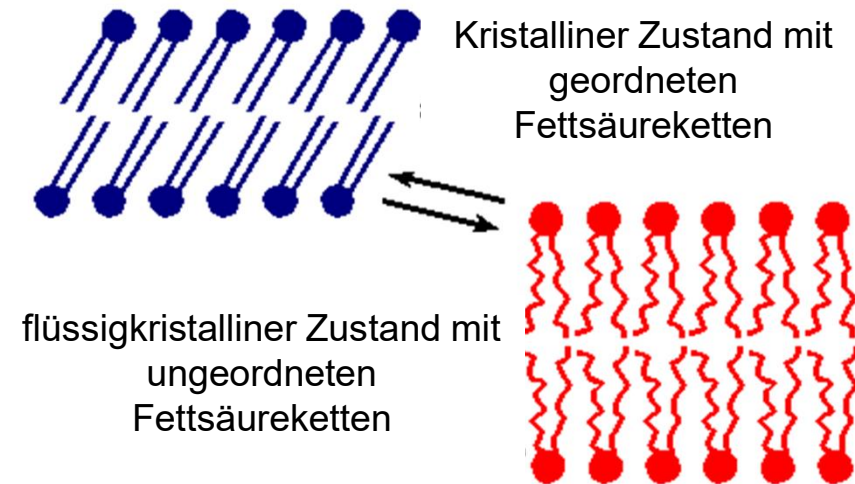
Polarer, hydrophiler Kopf

Apolare, hydrophobe Schwänze

Zur Erinnerung: Lyotrope Flüssigkristalle

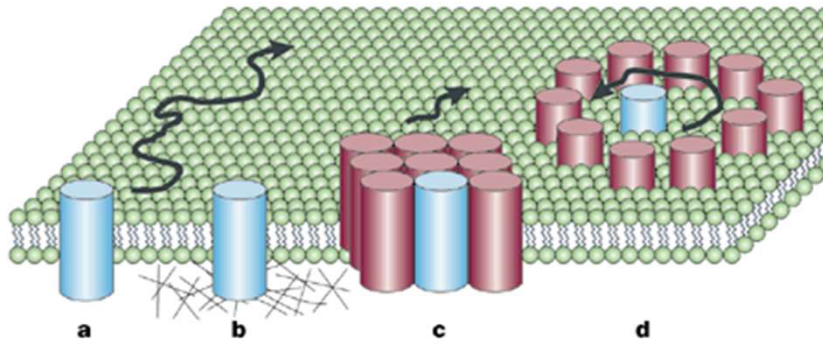


Phasenübergang in der Lipiddoppelschicht

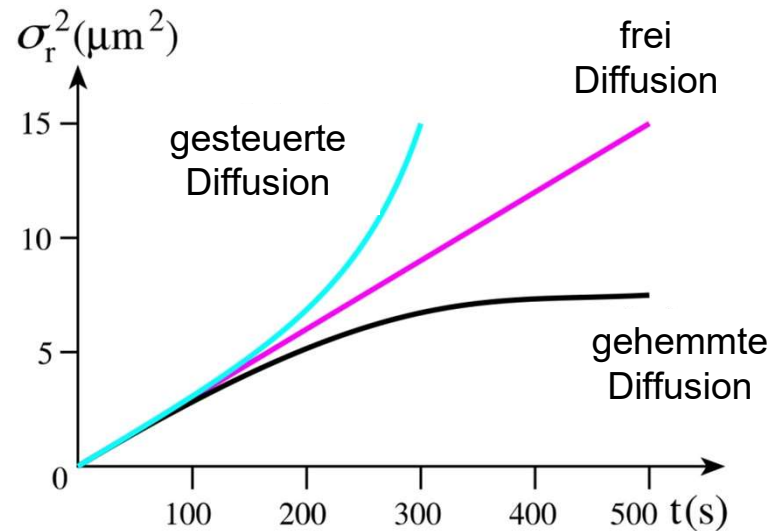
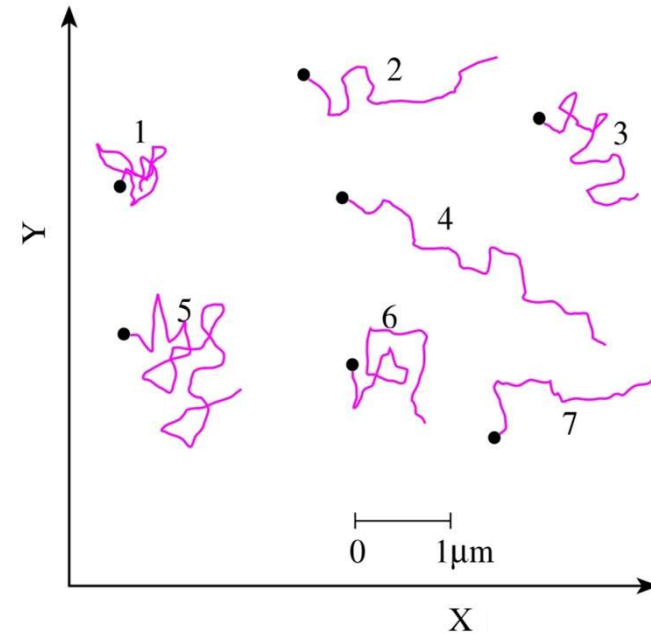


$$\eta_{\text{Gel}} > \eta_{\text{Fluid}} \gg \eta_{\text{Wasser}}$$

■ Laterale Diffusion in Membranen



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



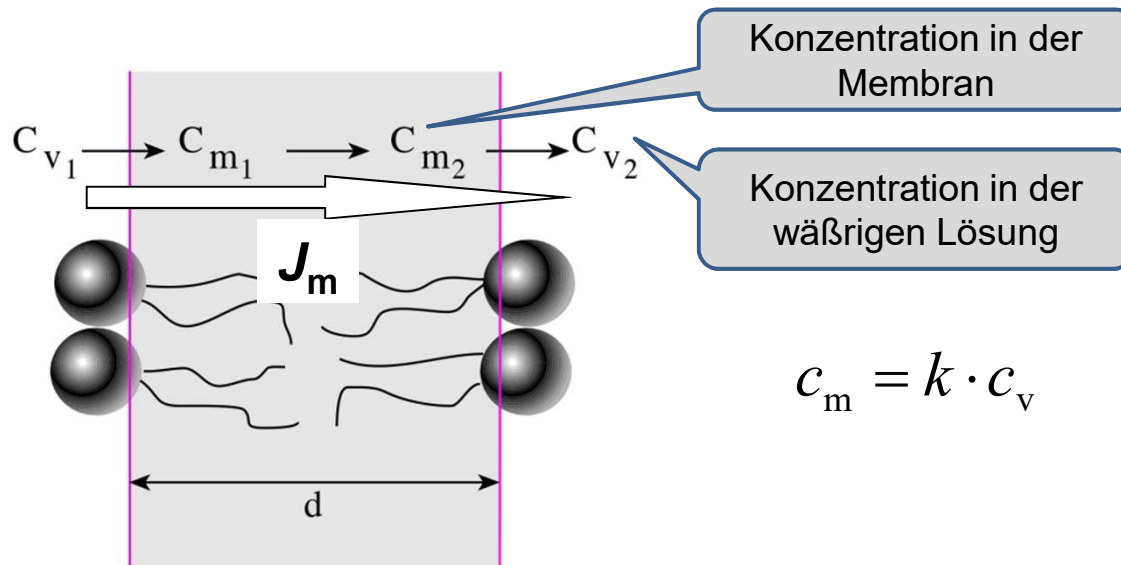
Lipide (mobiler Anteil >90%):

$$D_{\text{lateral}} \approx 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$$

Proteine (mobiler Anteil 10-90%):

$$D_{\text{lateral}} \approx 10^{-13} - 10^{-17} \text{ m}^2/\text{s}$$

■ Diffusion durch Membranen (passiver Transport)



$$c_m = k \cdot c_v$$

➤ 1. Ficksches Gesetz:

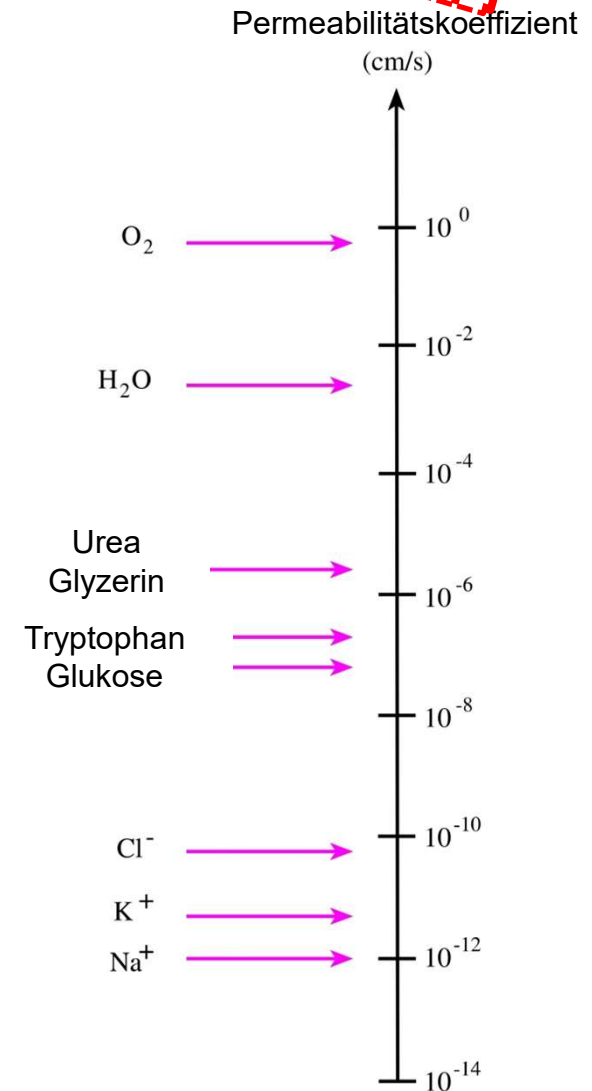
$$J_m = -D \cdot \frac{\Delta c}{\Delta x} = -D \cdot \frac{c_{m2} - c_{m1}}{d} =$$

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

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

Permeabilitätskoeffizient (m/s)

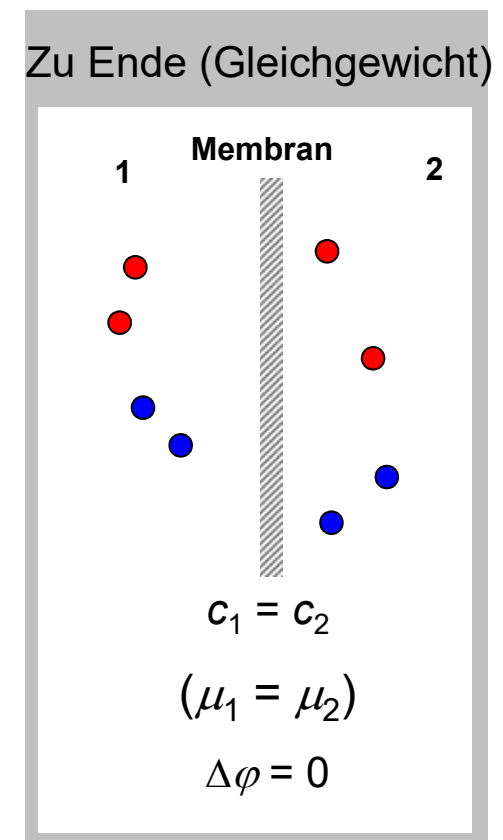
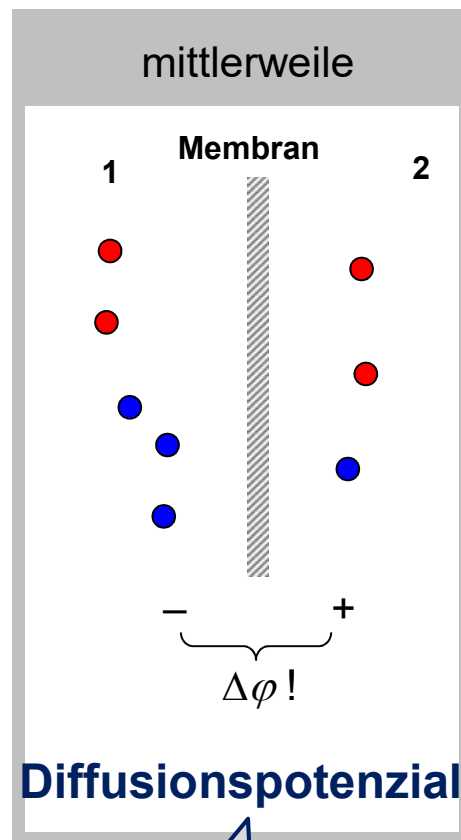
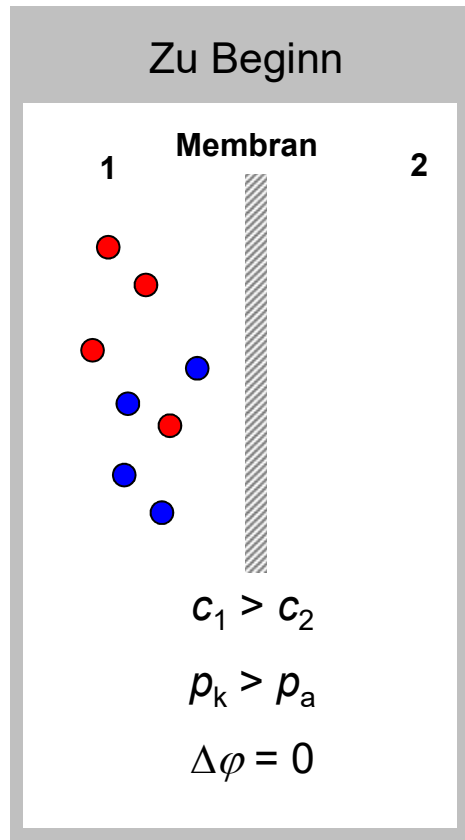
Zur Erinnerung



- Diffusion von Ionen durch eine Membran (zwei Spezialfälle)

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

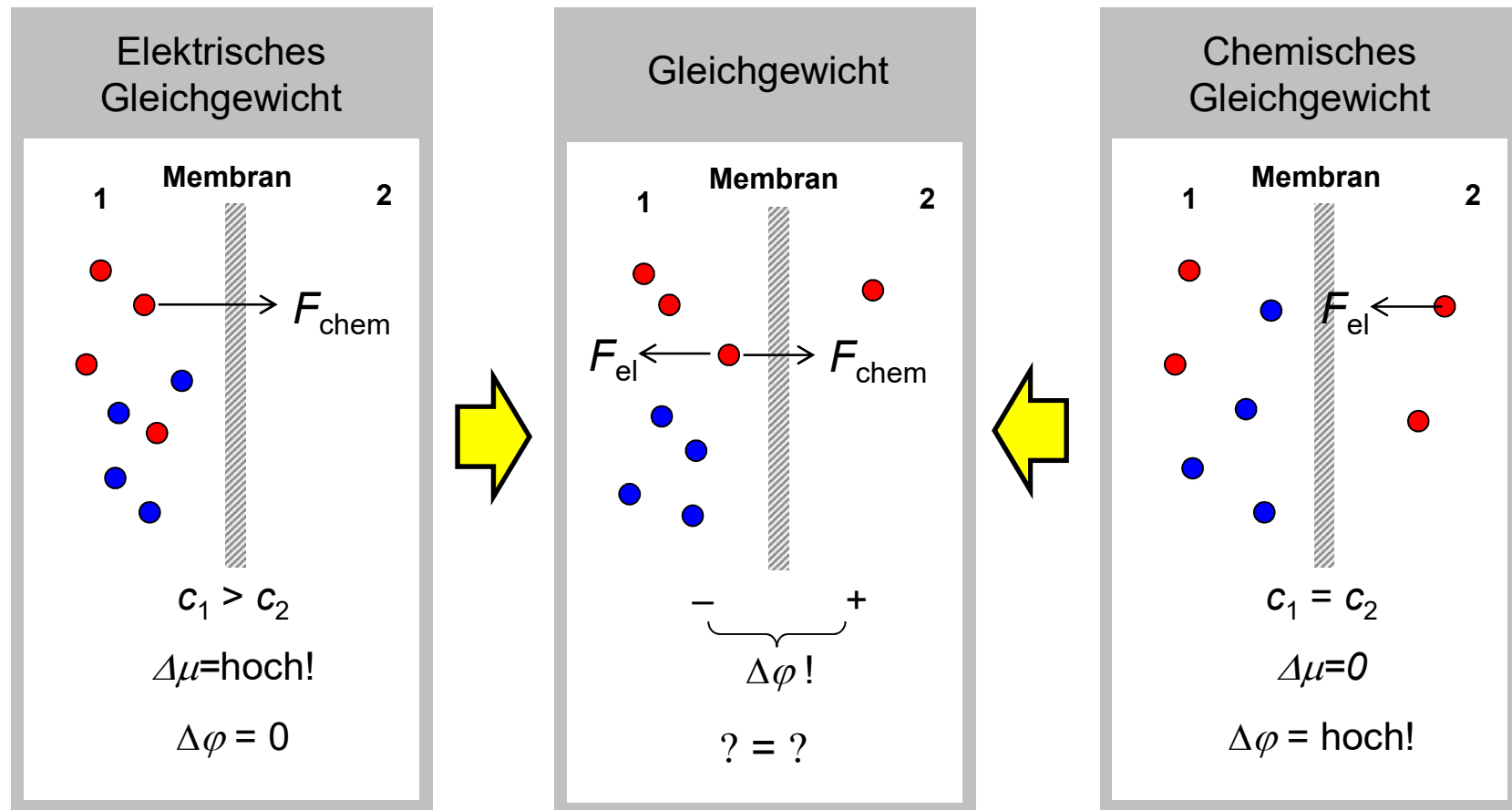
1. Die Permeabilitätswerte sind unterschiedlich, z. B. $p_k > p_a$



2.

Die Permeabilität für das eine Ion ist Null, z. B.

$$p_a = 0$$



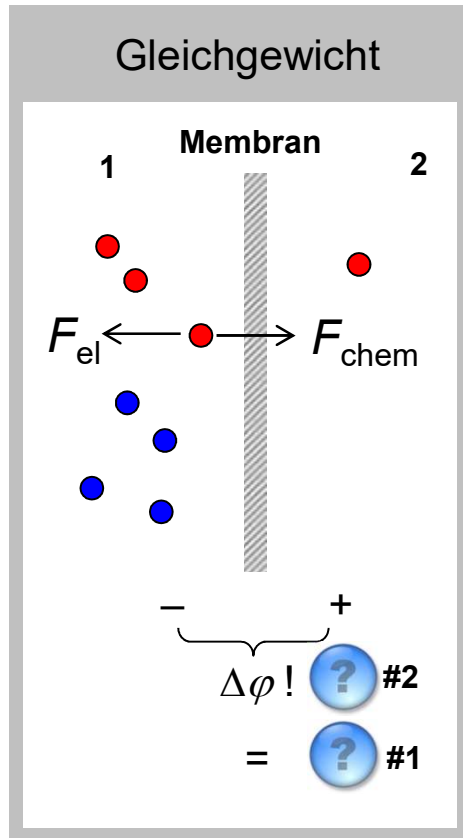
● Kation (k)

● Anion (a)

2.

Die Permeabilität für das eine Ion ist Null, z. B.

$$p_a = 0$$



● Kation (k)

● Anion (a)

? #1

**Elektrochemisches
Potenzial (J/mol):**

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

Im Gleichgewicht:

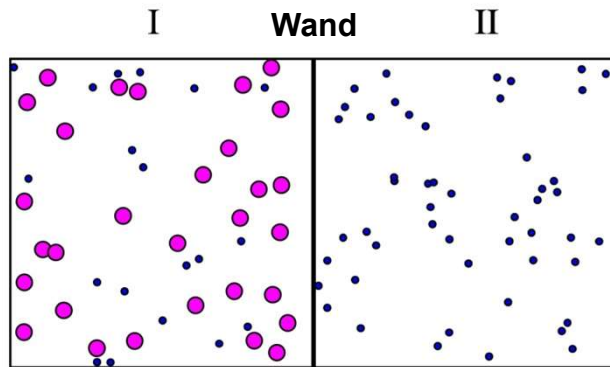
$$\mu_{e1} = \mu_{e2}$$

? #2

Nernst-Gleichung:

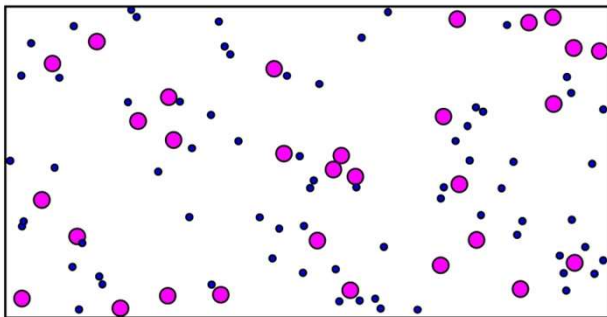
$$\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 = -\frac{RT}{F} \ln \frac{c_2}{c_1}$$

Eine weitere Anwendung: Osmose



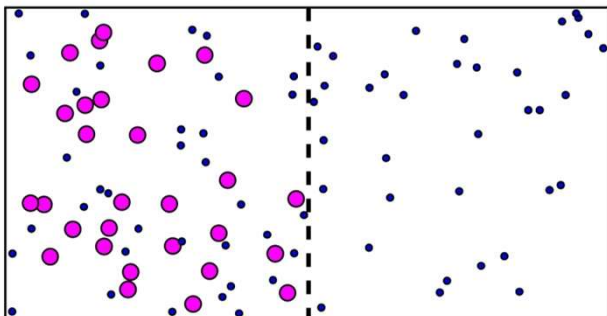
a

ohne Wand



b

semipermeable Wand



c



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

Van't Hoff-Gesetz:

(für Gase und auch für
dünne Lösungen)

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

Osmotischer
Druck

Temperatur

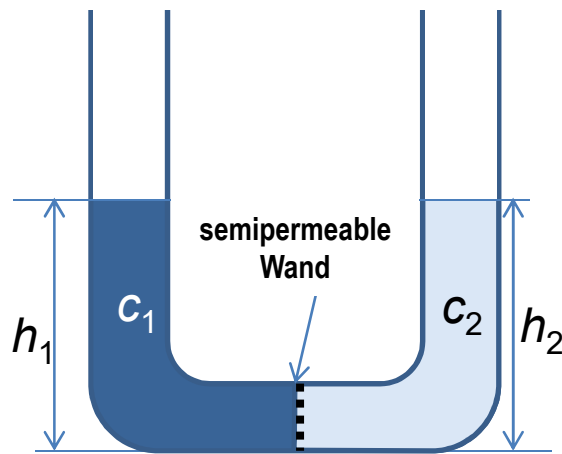
Konzentration der
Moleküle für welche
die Wand
undurchlässig ist

Osmose

Van't Hoff-Gesetz:
(für Gase und auch für
dünne Lösungen)

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

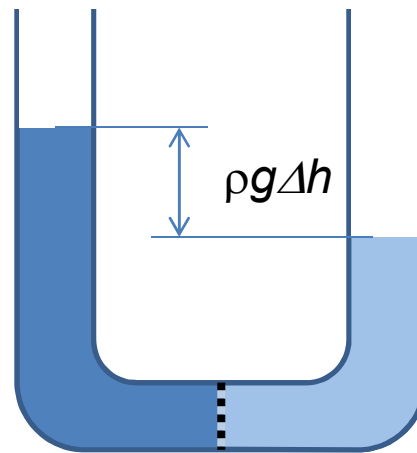
Hydrostatisches
Gleichgewicht



$$h_1 = h_2$$

$$c_1 \gg c_2$$

Gleichgewicht

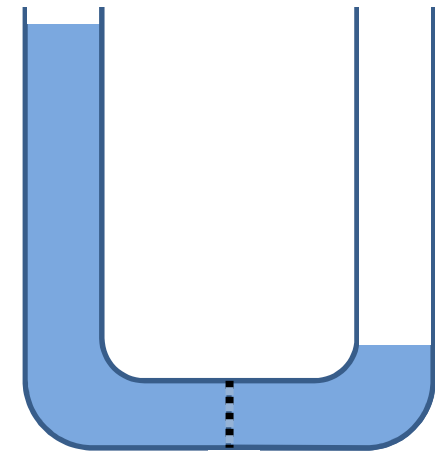


$$h_1 > h_2$$

$$c_1 > c_2$$

$$\Delta p_{\text{hydr}} = \Delta p_{\text{osm}}$$

Chemisches
Gleichgewicht

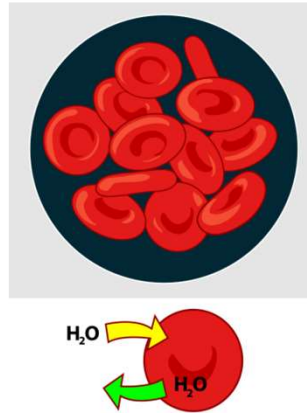


$$h_1 = h_2$$

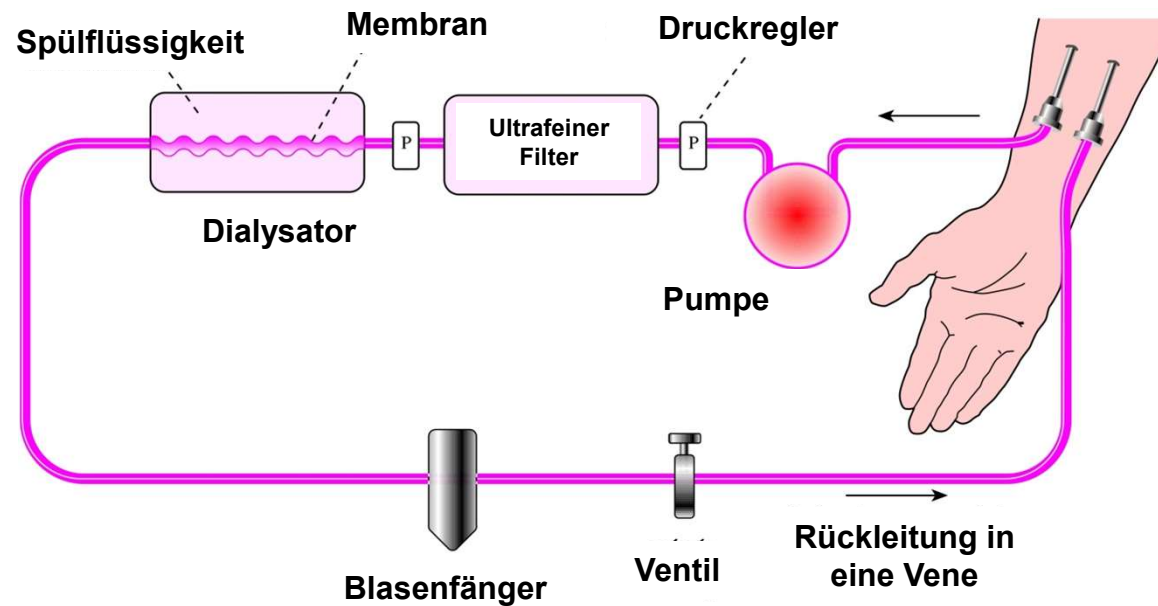
$$c_1 = c_2$$

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

Isotonisch



Hämodialyse



7. Ein Spezialfall: wenn Stoff produziert und verwendet wird

Endzustand \neq Gleichmäßige Verteilung der Konzentration

Stationäre Diffusion von Quelle nach Verbraucher

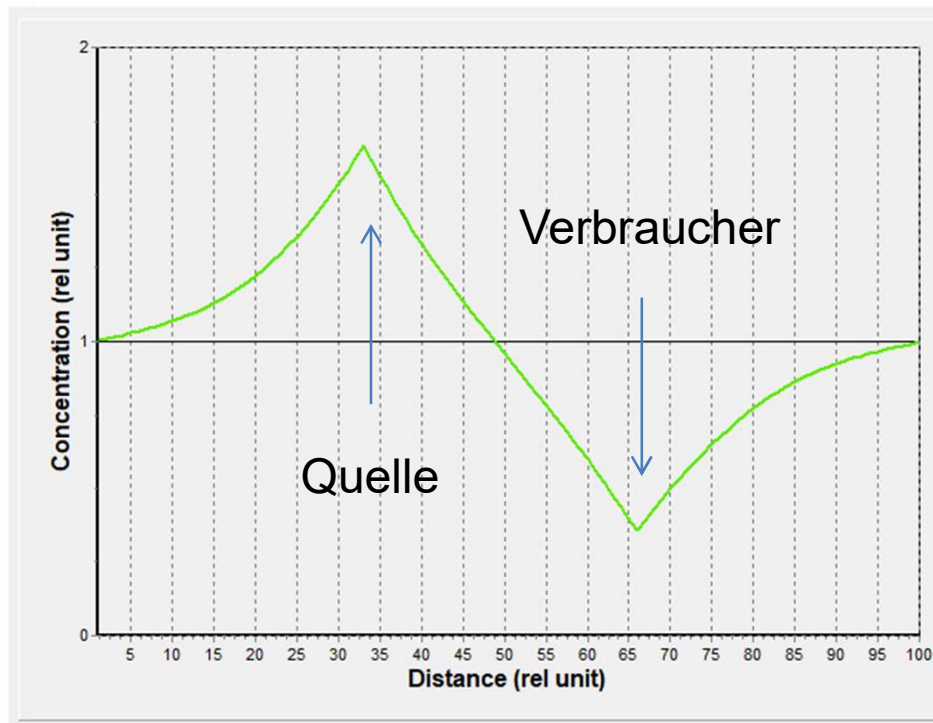
Quelle:

Wo der betrachtete Stoff produziert wird.
Z.B. durch chemische Prozesse.

Verbraucher:

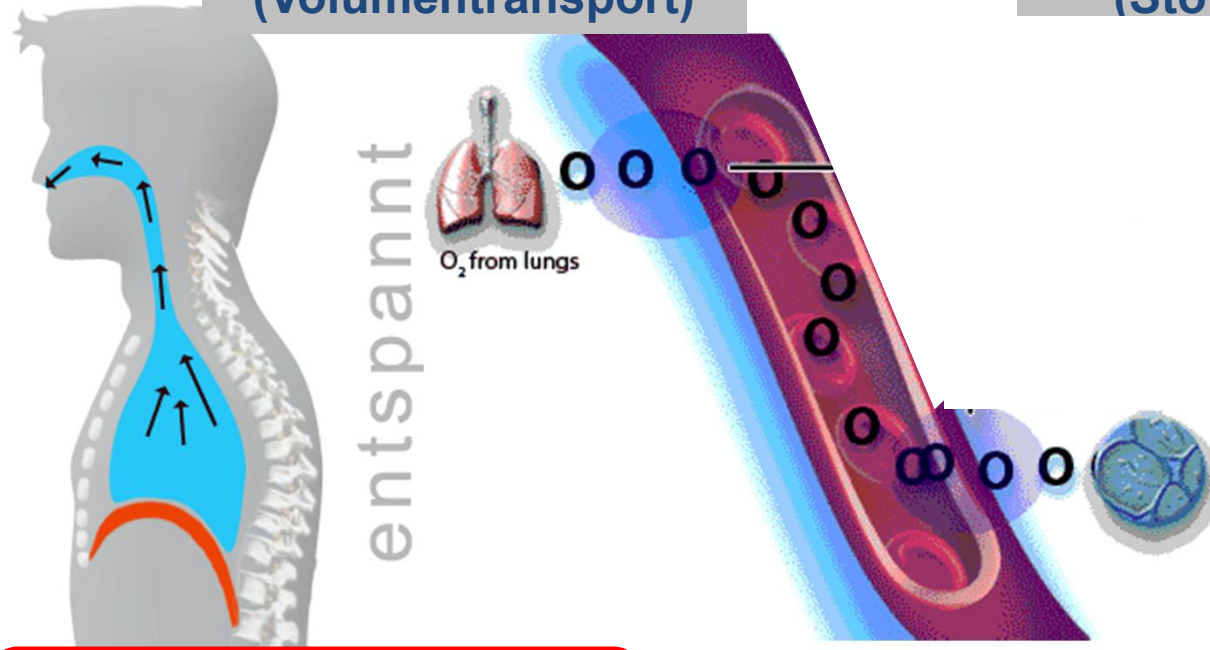
Wo der Stoff verwendet wird zB. durch chemische Prozessen in einem anderen Stoff umgewandelt wird.

 Diffusion simulation by SL

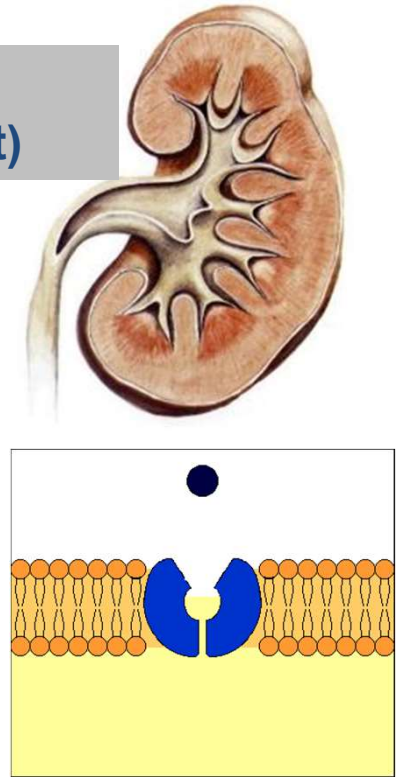


Transportprozesse

I. Strömung (Volumentransport)



III. Diffusion (Stofftransport)



IV. Elektrischer Strom (el. Ladungstransport)



II. Wärmeleitung (Energietransport)



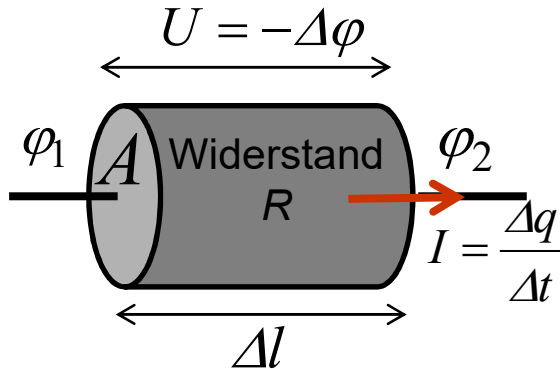
V. Verallgemeinerung

IV. Elektrischer Strom (el. Ladungstransport)

1. Grundbegriffe

- Elektrische Stromstärke (I): $I = \frac{\Delta q}{\Delta t}$ (A)
- Elektrische Stromdichte (J): $J = \frac{\Delta q}{A \cdot \Delta t}$ $\left(\frac{\text{A}}{\text{m}^2} \right)$
- stationärer Strom: zeitlich konstant

2. Transportgesetz = ohmsches Gesetz



$$U = R \cdot I$$

Die bisher bekannte Form des ohmschen Gesetzes

$$R = \rho \frac{\Delta l}{A} \quad \sigma = \frac{1}{\rho}$$

$$I = -\sigma \cdot A \cdot \frac{\Delta\varphi}{\Delta l}$$

Die neue Form des ohmschen Gesetzes

$$J = -\sigma \frac{\Delta\varphi}{\Delta l}$$

Alternativform:

Stromdichte

Elektrische Leitfähigkeit

Potenzialgradient

3. Anwendungen

- Diagnostik

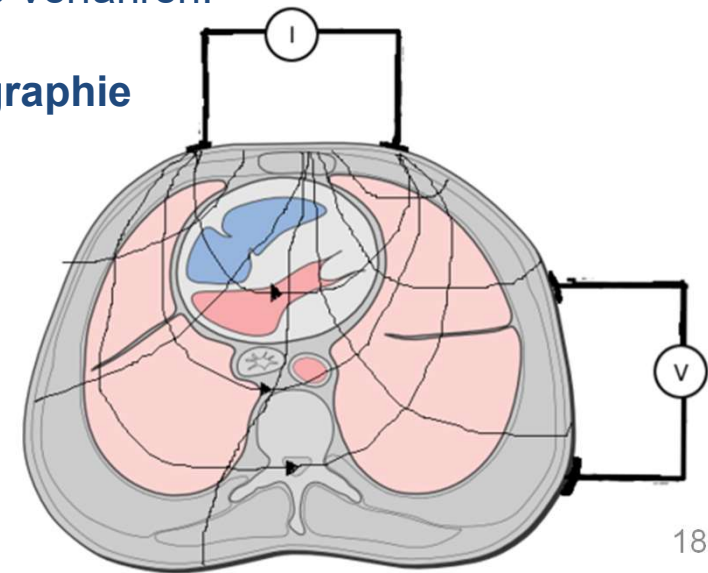
- Messung von Biopotenzialen (EKG, EEG, ...) (siehe später!)



- Auf Widerstandsmessung (Impedanzmessung) basierende Techniken

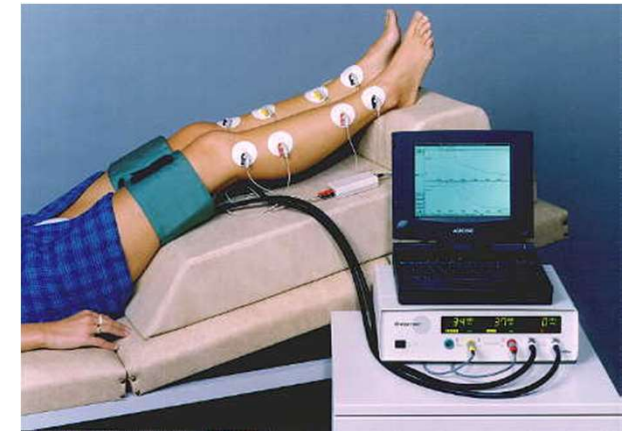
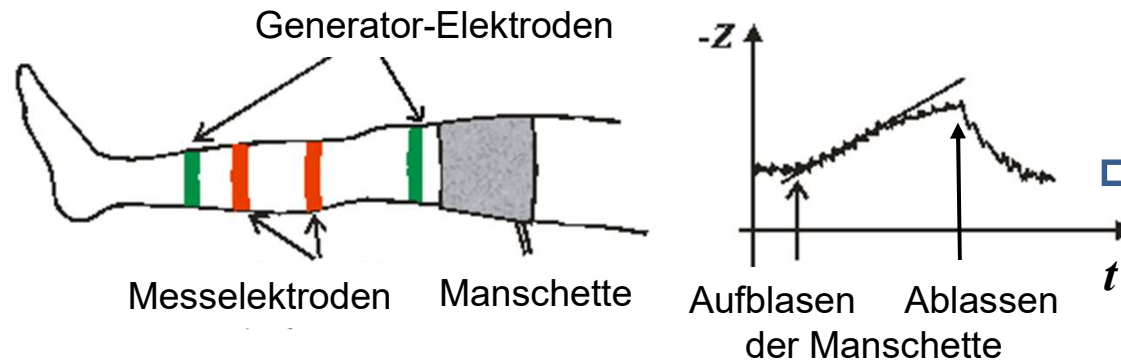
Gewebe	σ (mS/m)	ρ (Ω m)
Blut	700	1,4
graue Hirnmasse	300	3,3
weiße Hirnmasse	150	6,7
Haut	100	10
Fett	40	25
Knochen	10	100

Ein bildgebendes Verfahren:
**elektrische
Impedanztomographie
(EIT)**



Impedanzplethysmographie (IPG)

Untersuchung der Blutströmung in den Extremitäten

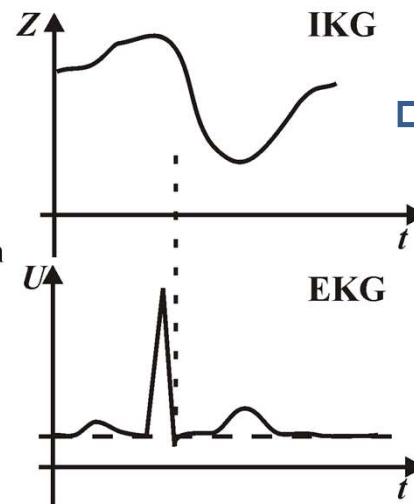
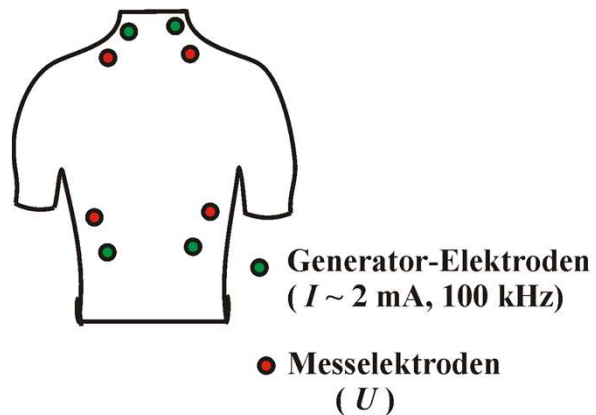


Volumenstromstärke

Impedanzkardiographie (IKG)

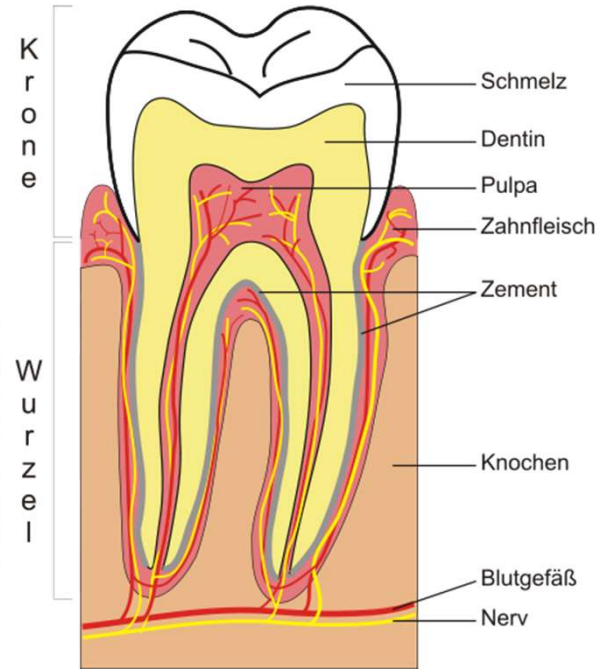
Untersuchung der Herzfunktion

Impedanzkardiographie (IKG)

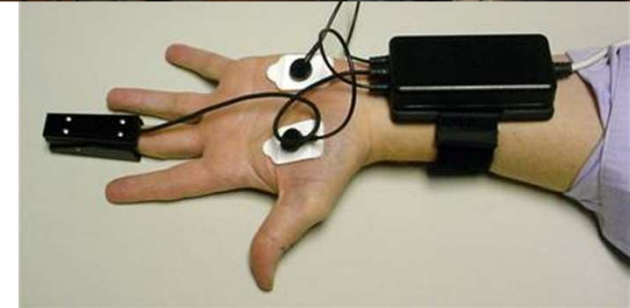


Pulsvolumen/Minutenvolumen des Herzens

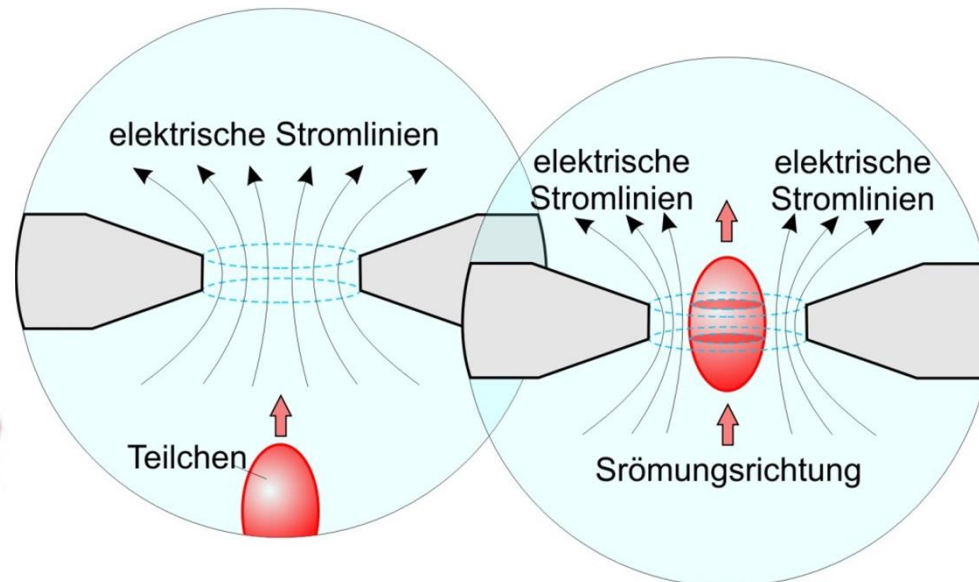
Apex-Locator



Lügendetektor



Coulter-Zähler



- Therapie (siehe später!)

Galvanisation / Iontophorese



Wärmetherapie



Elektrochirurgie



Elektroreizung in der Physiotherapie



Herzschrittmacher



Defibrillator



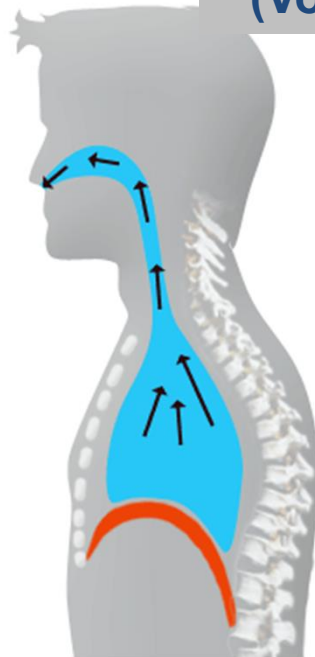
Analogie

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

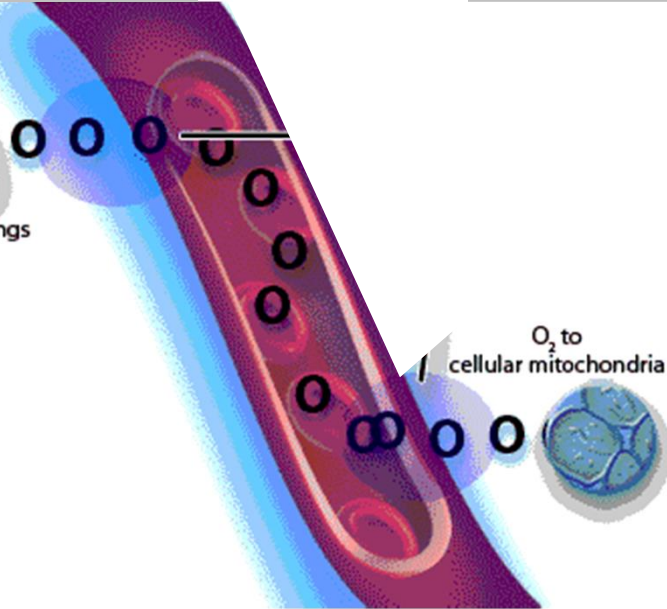
* Im allgemeinen Fall μ

Transportprozesse

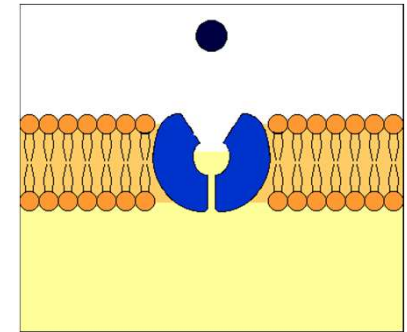
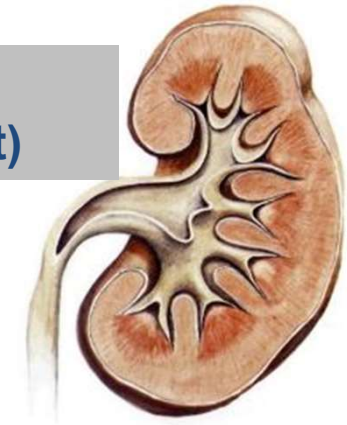
I. Strömung (Volumentransport)



entspannt



II. Diffusion (Stofftransport)



III. Elektrischer Strom (el. Ladungstransport)



IV. Wärmeleitung (Energietransport)



V. Verallgemeinerung

V. Verallgemeinerung der Transportgesetze

	Was „strömt“?	Stärke?	Was treibt die „Strömung“?	Zusammenhang?
Volumen-transport	V	$J_V = \frac{\Delta V}{A \cdot \Delta t}$	p	$J_V = -\frac{R^2}{8\eta} \frac{\Delta p}{\Delta l}$
Energie-transport	E	$J_E = \frac{\Delta E}{A \cdot \Delta t}$	T	$J_E = -\lambda \frac{\Delta T}{\Delta x}$
Stoff-transport	ν	$J_\nu = \frac{\Delta \nu}{A \cdot \Delta t}$	c^*	$J_\nu = -D \frac{\Delta c}{\Delta x}$
Ladungs-transport	q	$J_q = \frac{\Delta q}{A \cdot \Delta t}$	φ	$J_q = -\sigma \frac{\Delta \varphi}{\Delta l}$
allgemein	x_{ext} extensive Gr.	$J = \frac{\Delta x_{\text{ext}}}{A \cdot \Delta t}$ Strom-dichte	y_{int} intensive Gr.	$X = -\frac{\Delta y_{\text{int}}}{\Delta x}$ thermo-dynamische Kraft
				$J = LX$ onsagersche Beziehung

* Im allgemeinen Fall μ

Extensive Größe:

- additiv
- Im Gleichgewicht proportional zur Ausbreitung des Systems
- In Transportprozessen: die transportierte Größe

Intensive Größe:

- nicht-additiv
- Im Gleichgewicht überall gleich in dem System
- In Transportprozessen: die sich ausgleichende Größe

Gleichgewicht: es gibt keine Transportprozesse.

0. Hauptsatz der Thermodynamik: Gleichgewicht \Leftrightarrow homogene Verteilung der intensiven Größen

inhomogene Verteilung der intensiven Größen \Rightarrow **Transportprozesse**

Stärke und Richtung des Transportprozesses:

$$J = LX$$

Onsagersche Beziehung

\longrightarrow Richtung: homogene Verteilung

2. Hauptsatz der Thermodynamik

Irreversibilität

Danke für Ihre Aufmerksamkeit!

