

Transportprozesse 4

II. Diffusion (Stofftransport)

4. Diffusion als *Random Walk*

5. Vergleich der „Schnelligkeiten“ der Diffusion und Strömung

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

III. Elektrischer Strom (el. Ladungstransport)

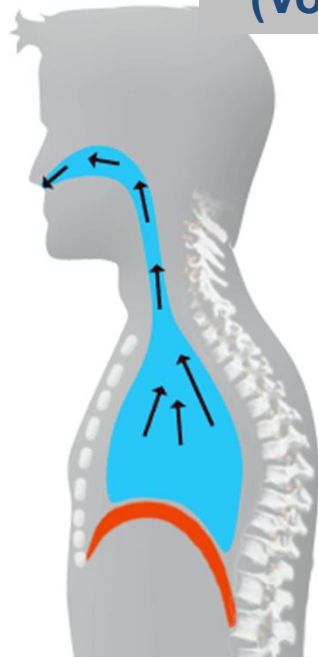
1. Grundbegriffe Elektrische Stromstärke, -dichte

2. Transportgesetz = **ohmsches Gesetz**

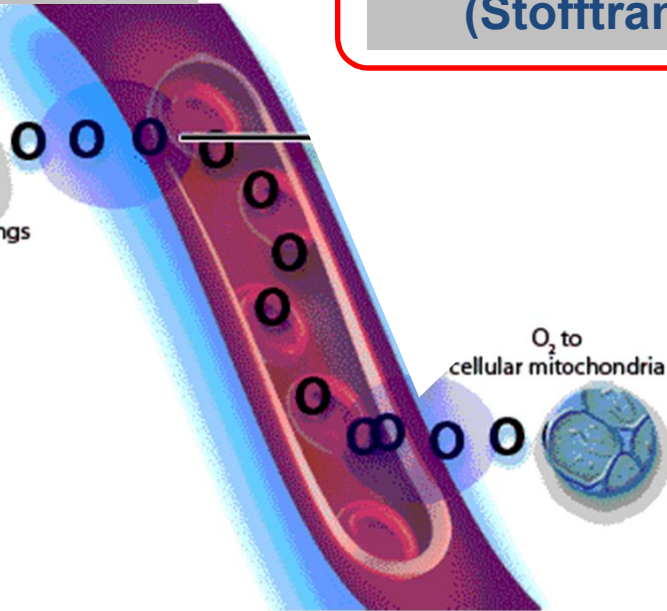
3. Anwendungen Auf Widerstandsmessung basierende Techniken (IPG, IKG, EIT,)

Transportprozesse

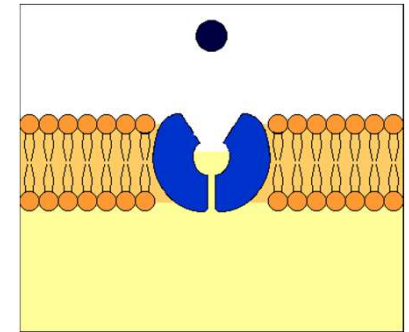
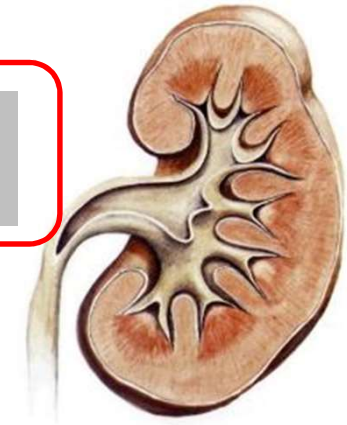
I. Strömung (Volumentransport)



entspannt



II. Diffusion (Stofftransport)



III. Elektrischer Strom (el. Ladungstransport)



IV. Wärmeleitung (Energietransport)



V. Verallgemeinerung

Zur Erinnerung

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

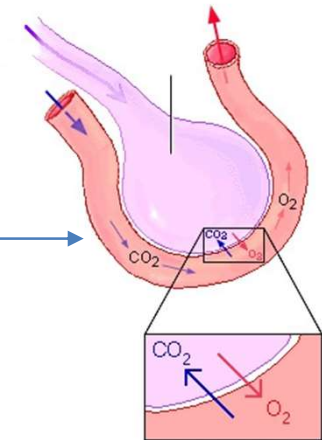
Das 1. Ficksche Gesetz:

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

Bedingung: stationäre Diffusion!

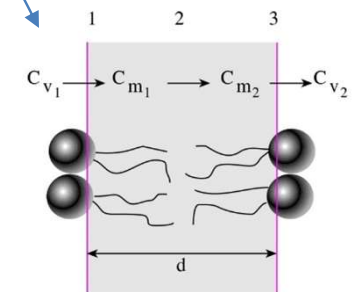
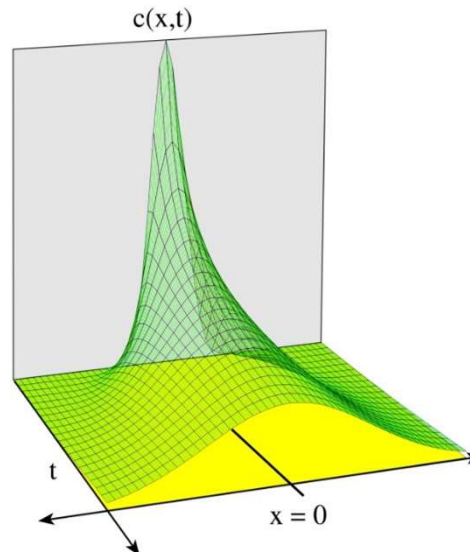
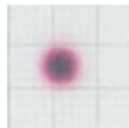
Anwendbar für

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

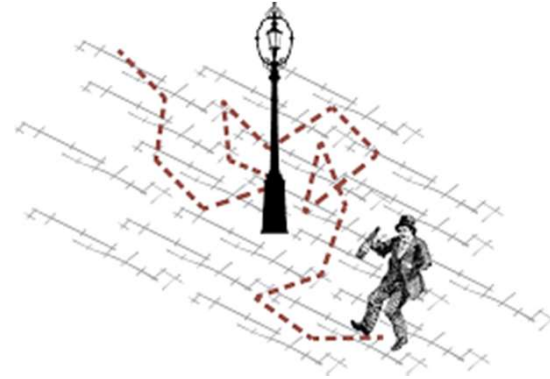
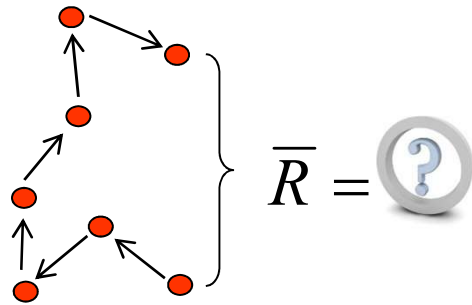


Das 2. Ficksche Gesetz:

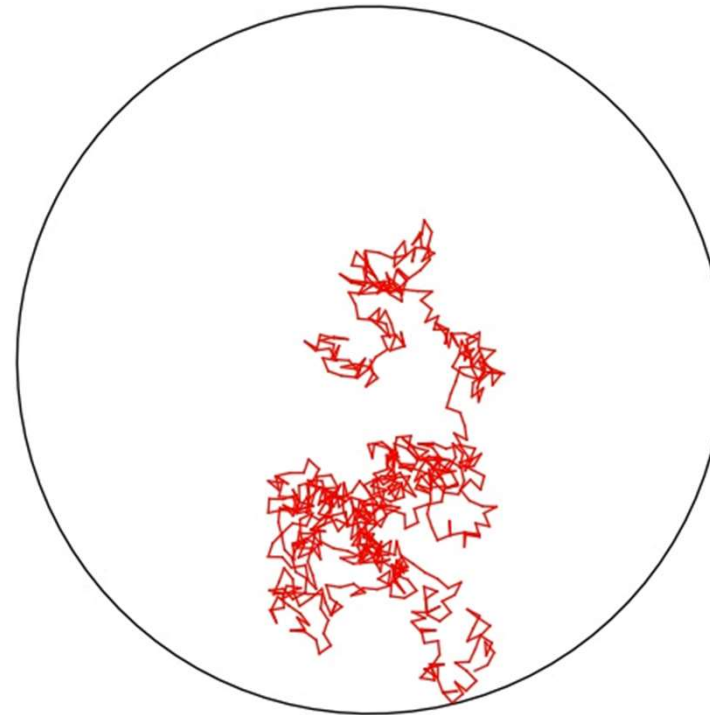
$$D \frac{\Delta \left(\frac{\Delta c}{\Delta x} \right)}{\Delta x} = \frac{\Delta c}{\Delta t}$$



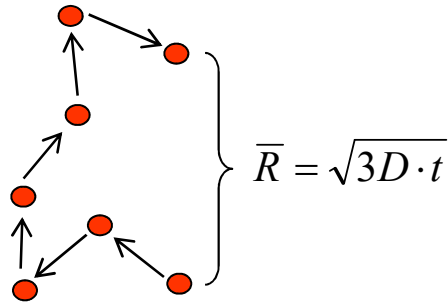
4. Diffusion als *Random Walk*



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

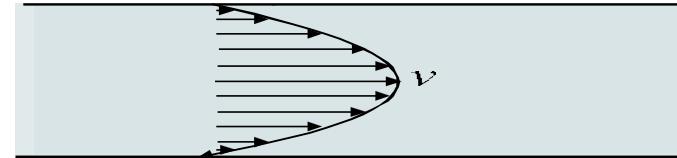


5. Welcher Transportprozess ist „schneller“ für O₂-Transport?



$$\bar{R} = \sqrt{3D \cdot t} \quad D = 2 \cdot 10^{-9} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

\bar{R}	t	Durchschnittliche Geschwindigkeit der Diffusion
1 μm		
30 μm		
1 cm		
1 m		

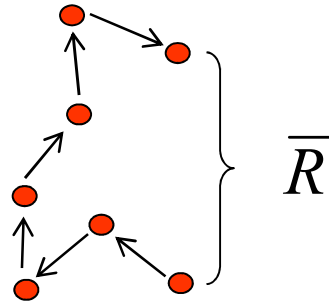


Geschwindigkeit der Blutströmung:

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

Zusammenfassend über die „Schnelligkeit“ der Diffusion

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

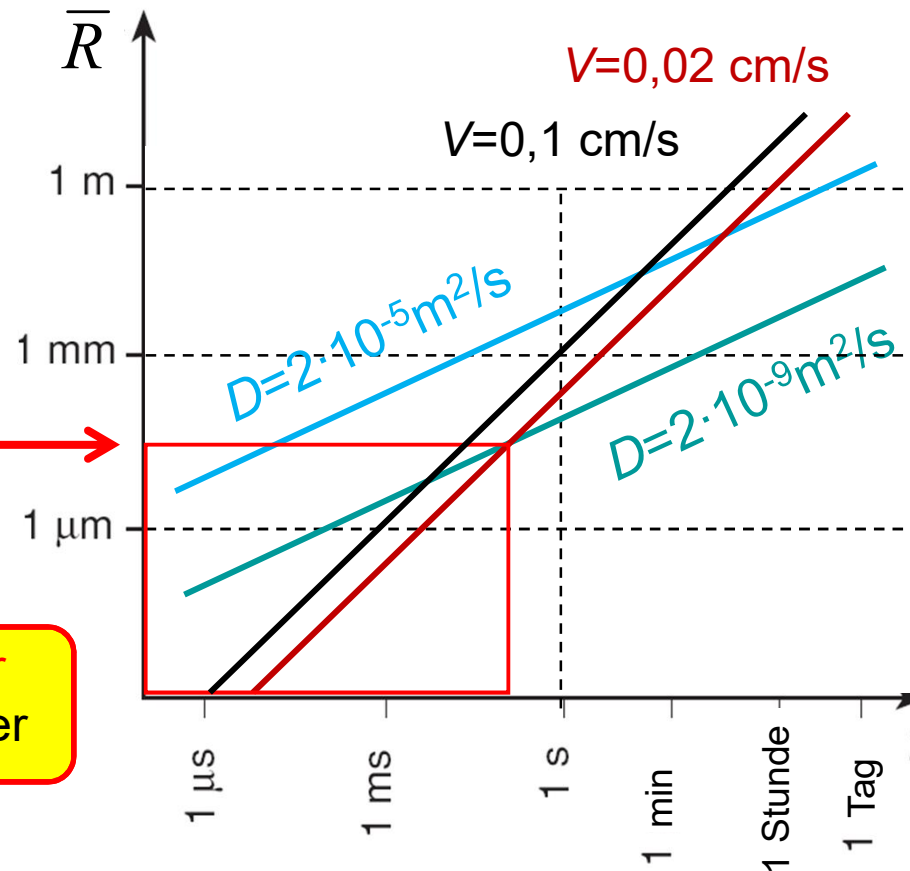


Diff: $\bar{R} \sim \sqrt{t}$

Strömung: $s = v \cdot t$

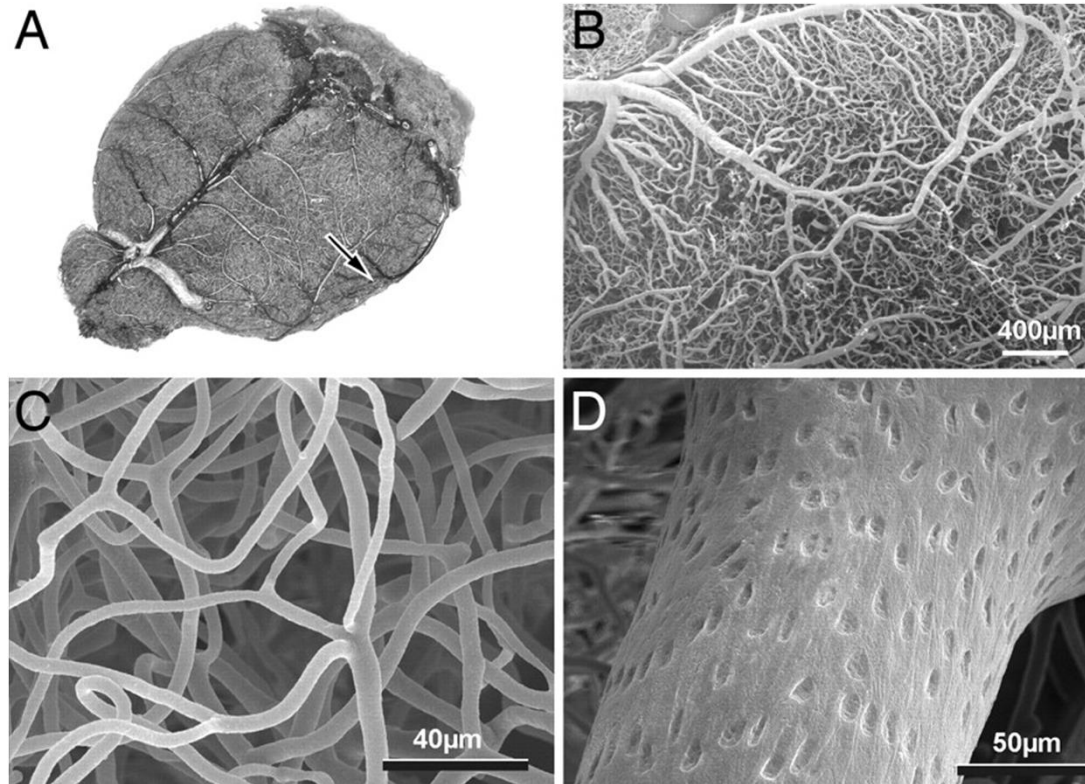
30 μm

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



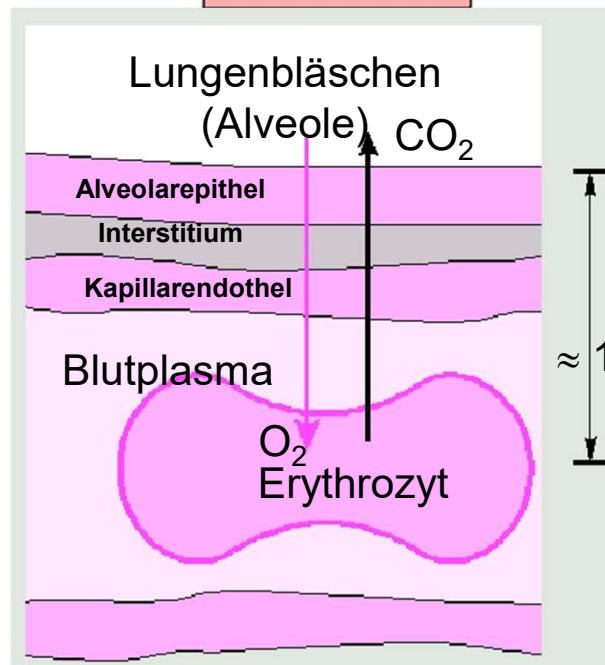
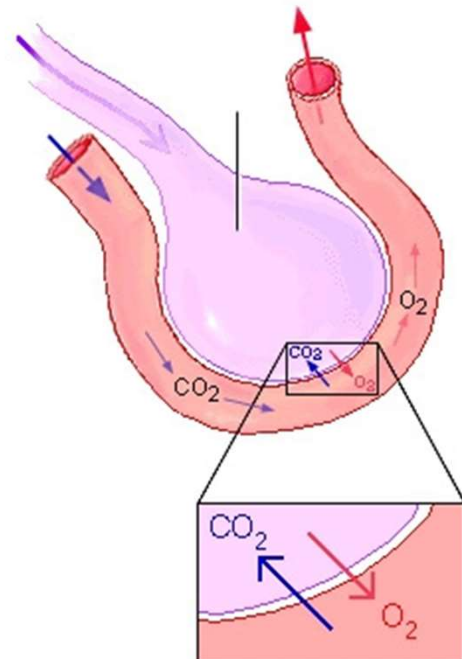
Welcher Transportprozess ist „schneller“ für O₂-Transport?

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

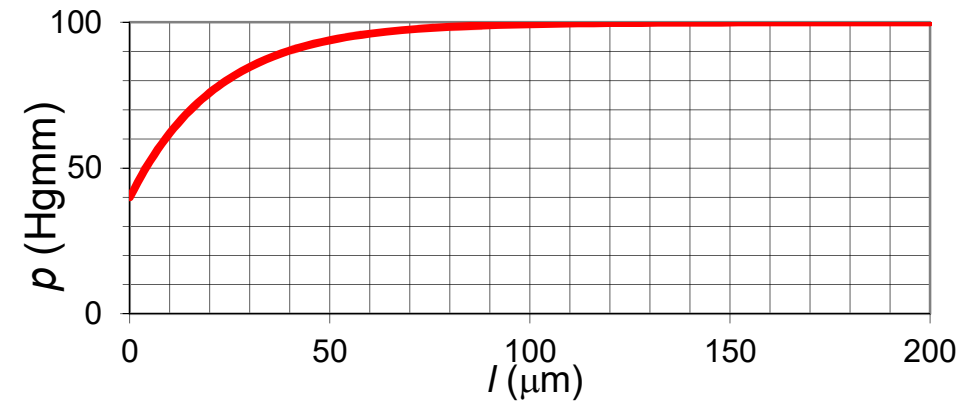


(C) SEM image of cortical capillaries. Capillary diameters range from 4 to 6 μm and intercapillary distances are $\approx 30 \mu\text{m}$.

- O₂-Diffusion Lunge-Blut als *Random Walk*



O₂ Aufnahme in den Alveolarkapillaren



➤ Random Walk:

Wie viel Zeit brauchen die O₂-Moleküle dazu im Durchschnitt?

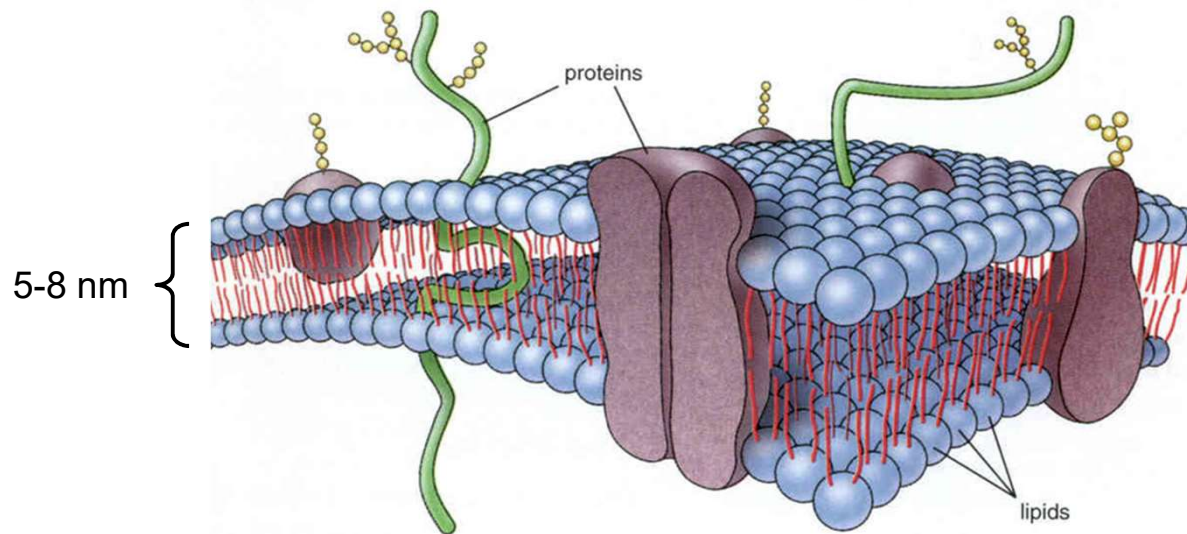


$$\bar{R} = \sqrt{3D \cdot t}$$

D für O₂ im Wasser:

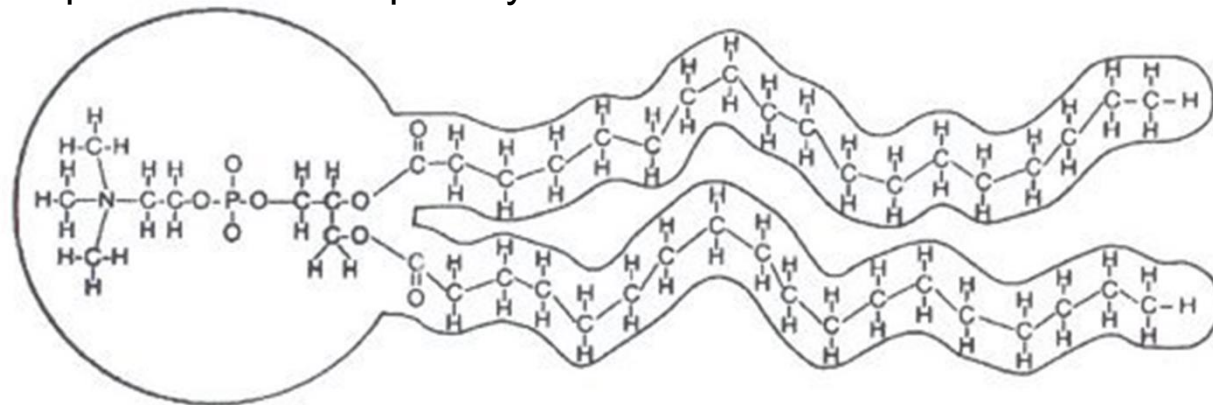
$$1,9 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s} \approx 2 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$$

6. Anwendungen: Diffusion in Membranen



Beispiel

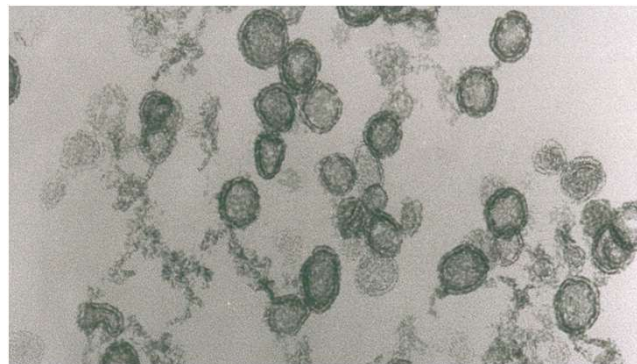
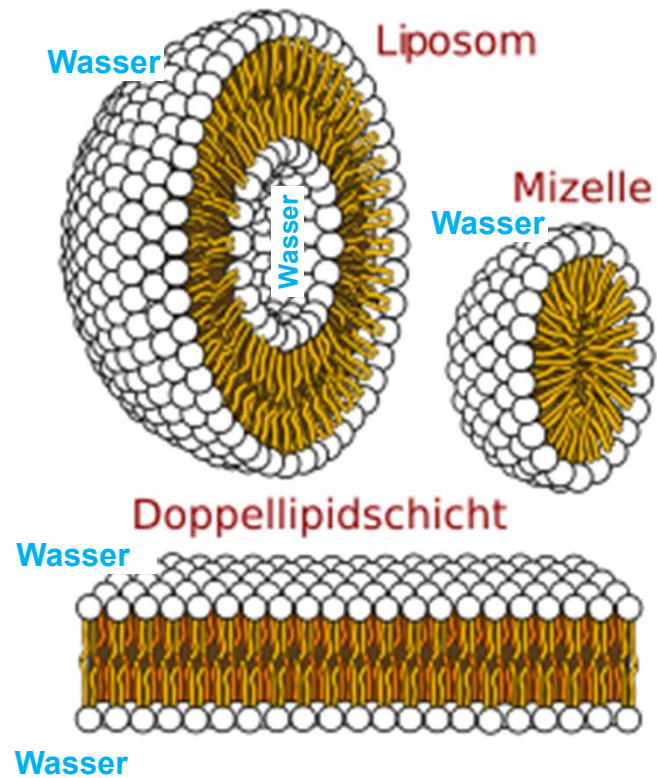
Ein Phospholipidmolekül: Phosphatidylcholin



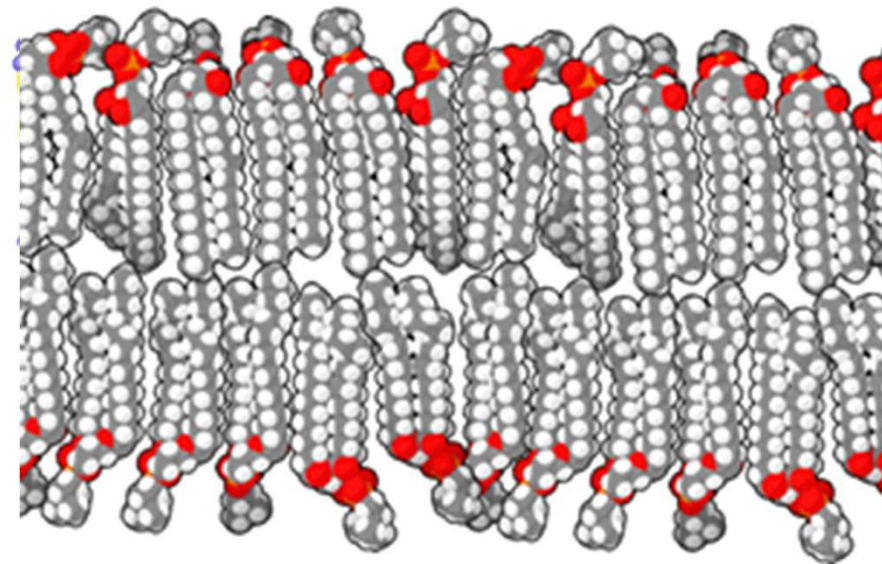
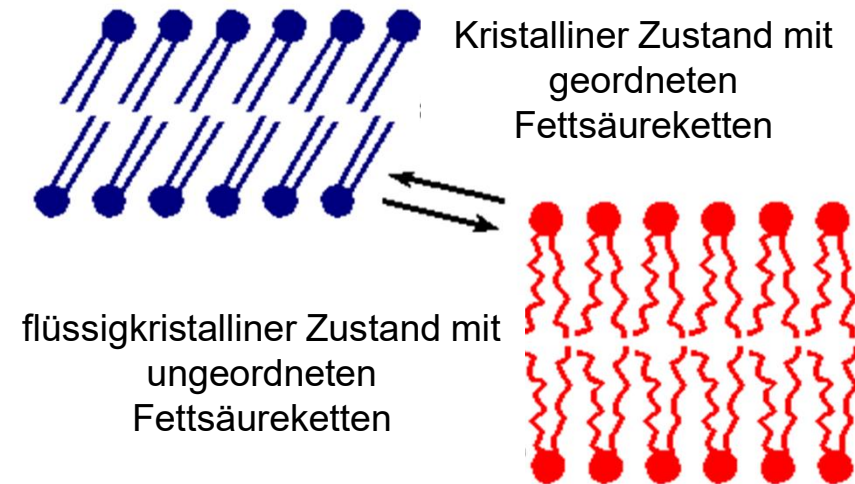
Polarer, hydrophiler Kopf

Apolare, hydrophobe Schwänze

Zur Erinnerung: Lyotrope Flüssigkristalle

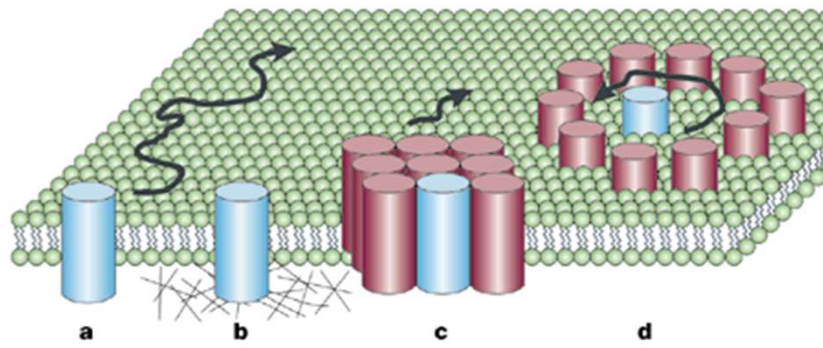


Phasenübergang in der Lipiddoppelschicht

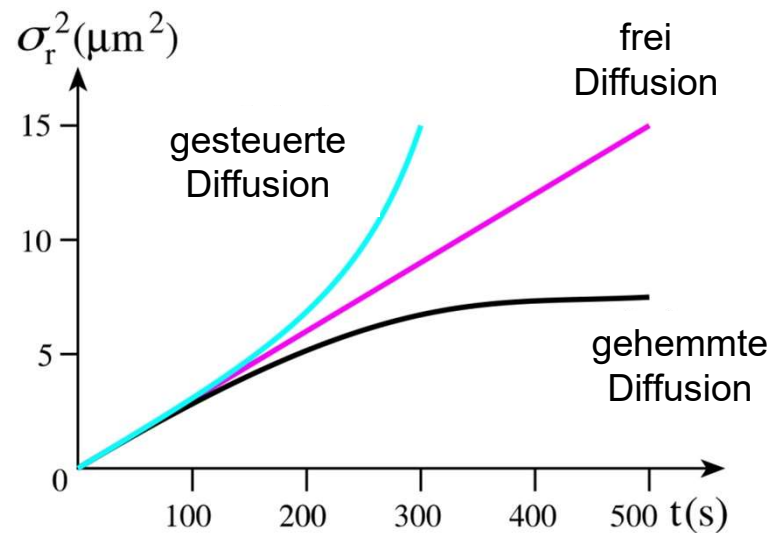
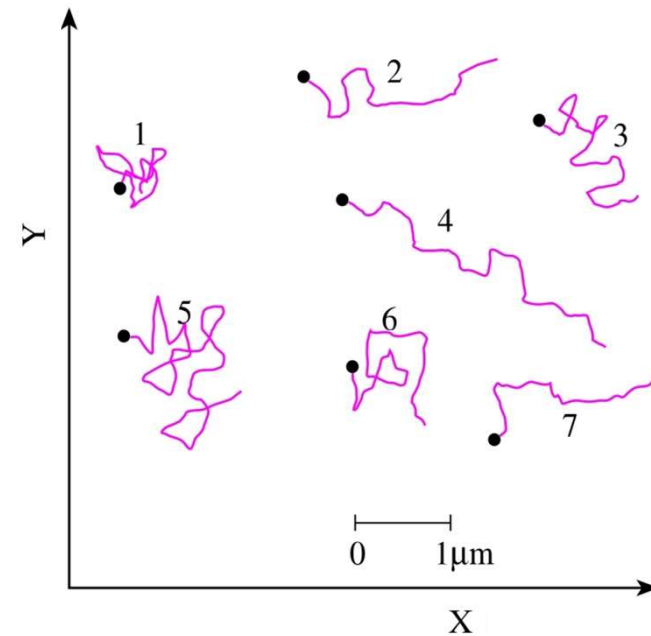


$$\eta_{\text{Gel}} > \eta_{\text{Fluid}} \gg \eta_{\text{Wasser}}$$

■ Laterale Diffusion in Membranen



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



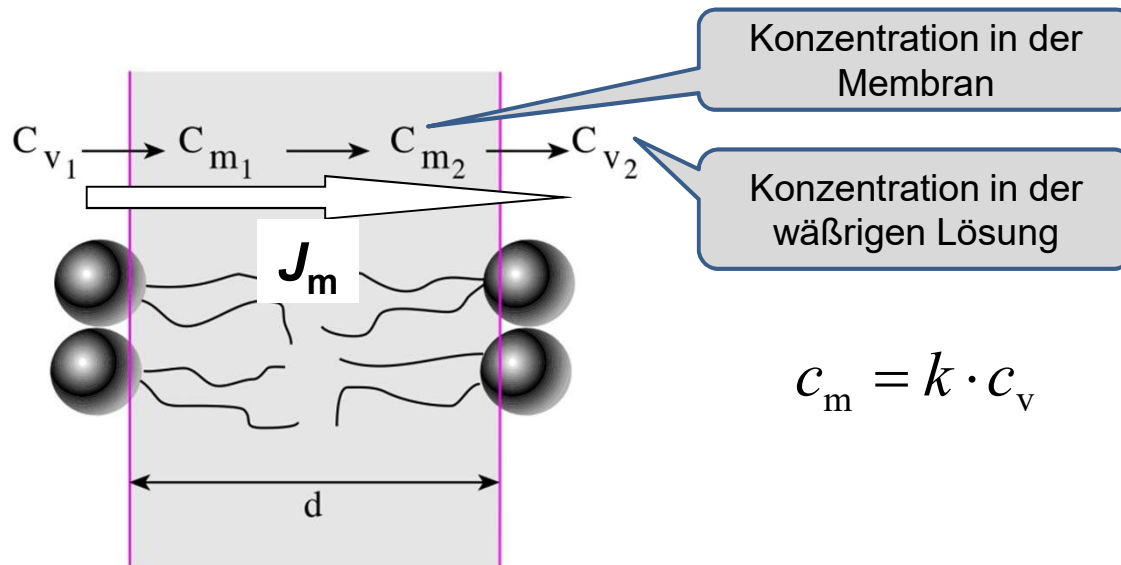
Lipide (mobiler Anteil >90%):

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

Proteine (mobiler Anteil 10-90%):

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

■ Diffusion durch Membranen (passiver Transport)



Zur Erinnerung

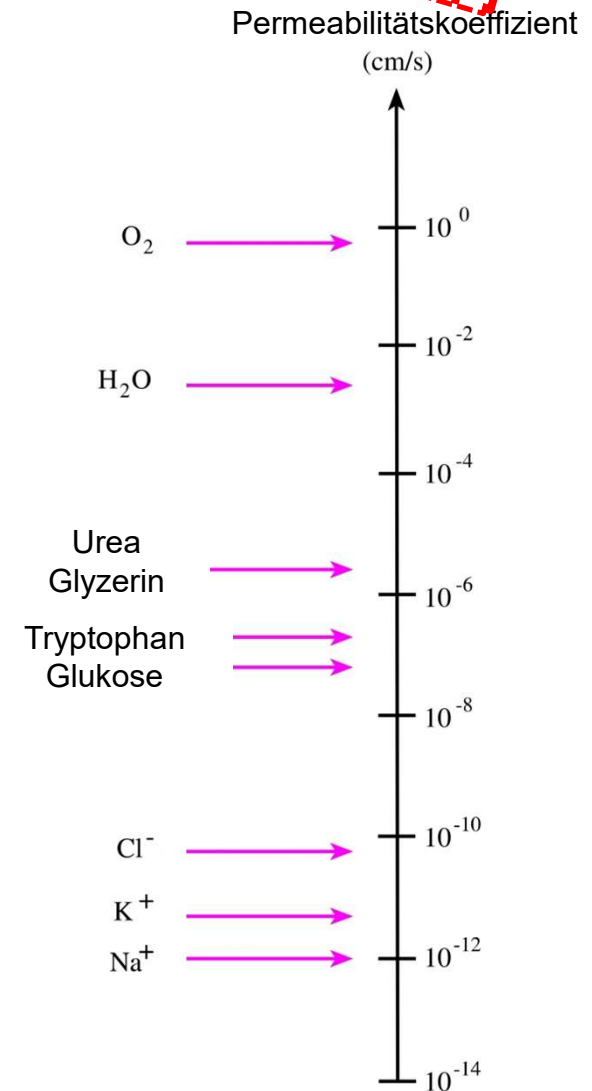
➤ 1. Ficksches Gesetz:

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

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

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

Permeabilitätskoeffizient (m/s)

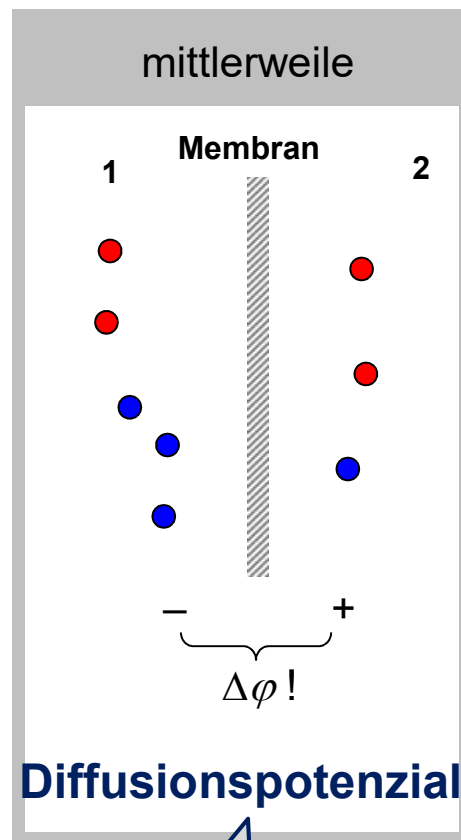
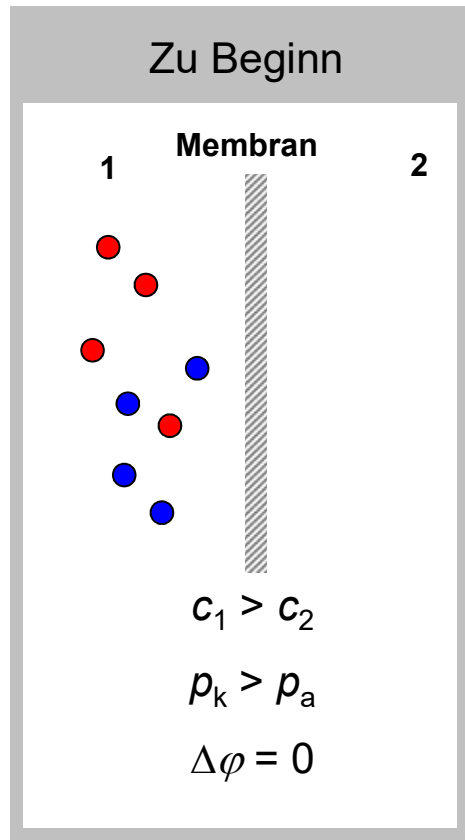


- Diffusion von Ionen durch eine Membran (zwei Spezialfälle)

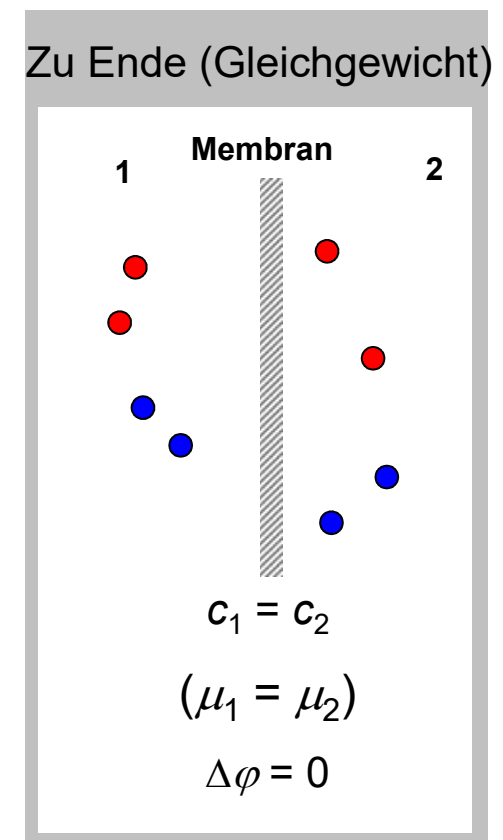
einwertige Ionen: ● Kation (k) ● Anion (a)

1.

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



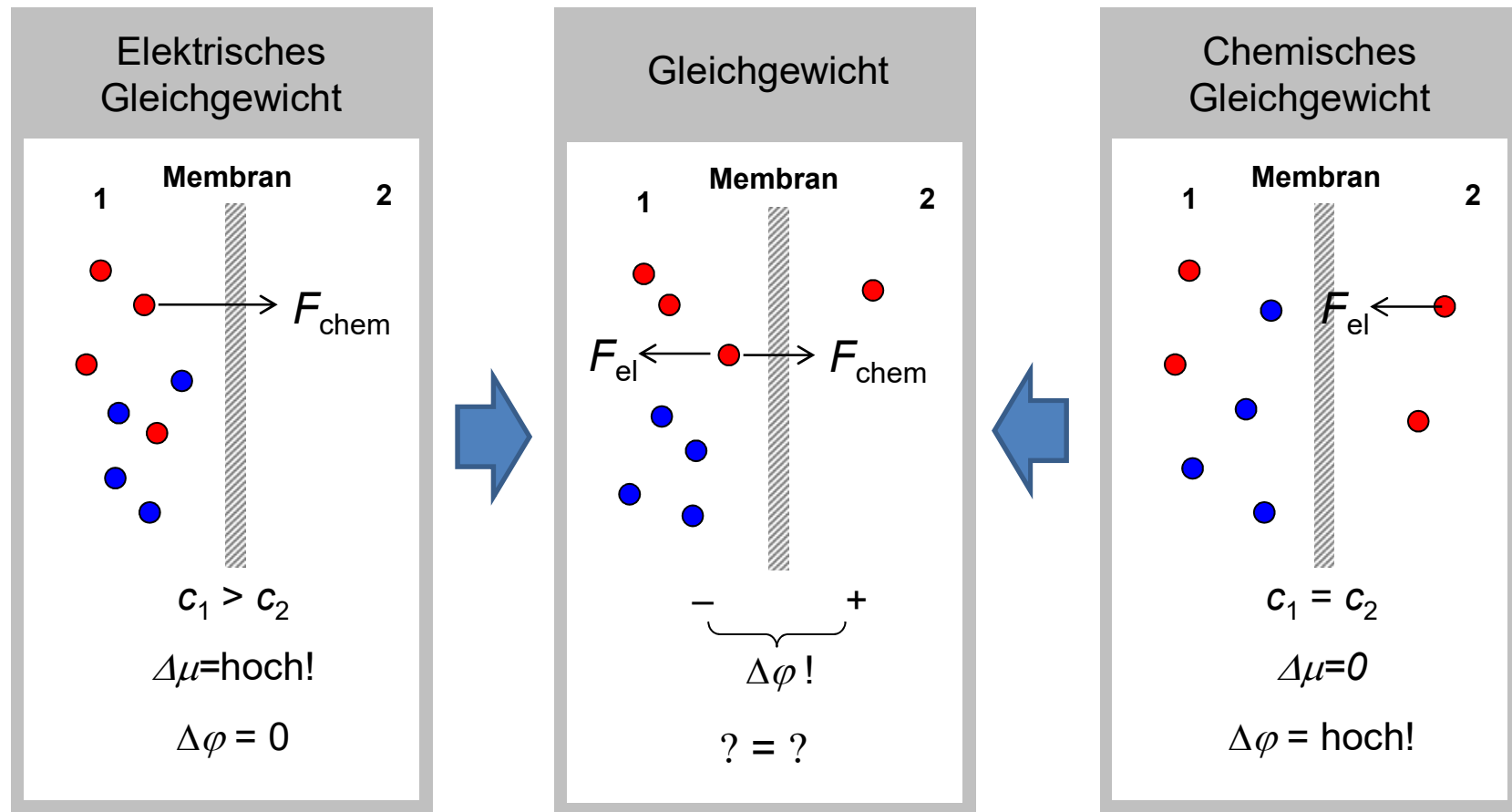
Nur vorübergehend!



2.

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

$$p_a = 0$$



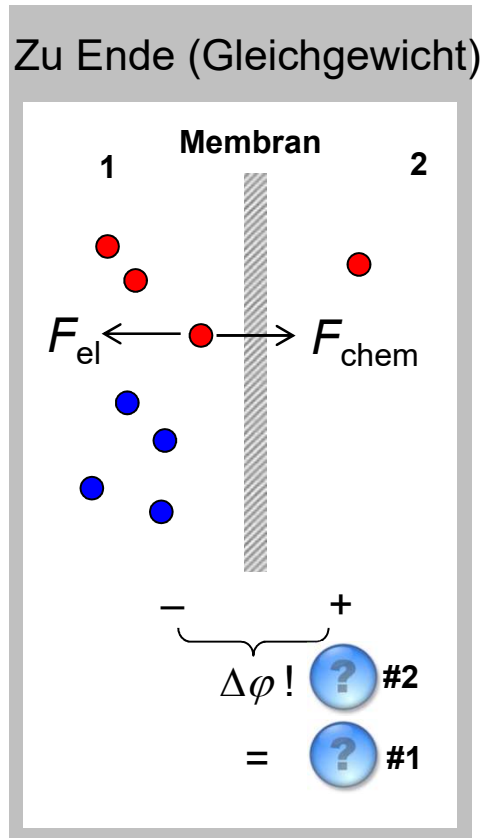
● Kation (k)

● Anion (a)

2.

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

$$p_a = 0$$



? #1

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

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

Im Gleichgewicht:

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

? #2

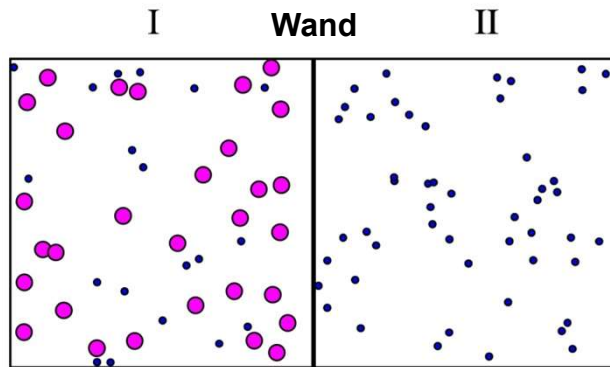
Nernst-Gleichung:

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

● Kation (k)

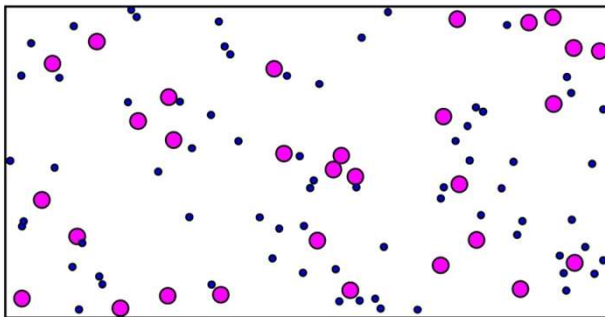
● Anion (a)

Eine weitere Anwendung: Osmose



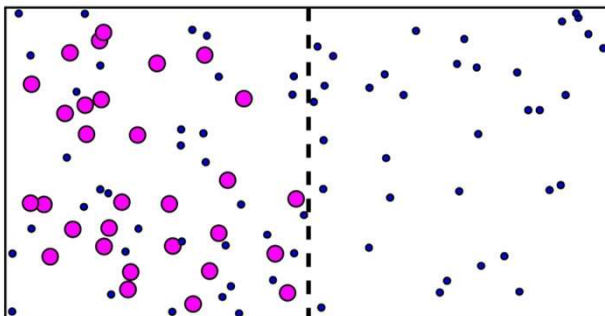
a

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)

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

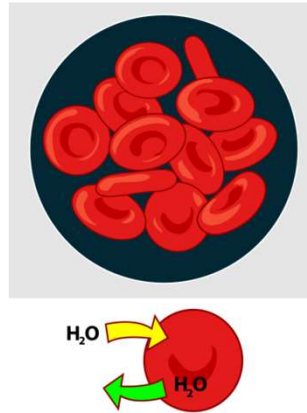
Osmotischer
Druck

Temperatur

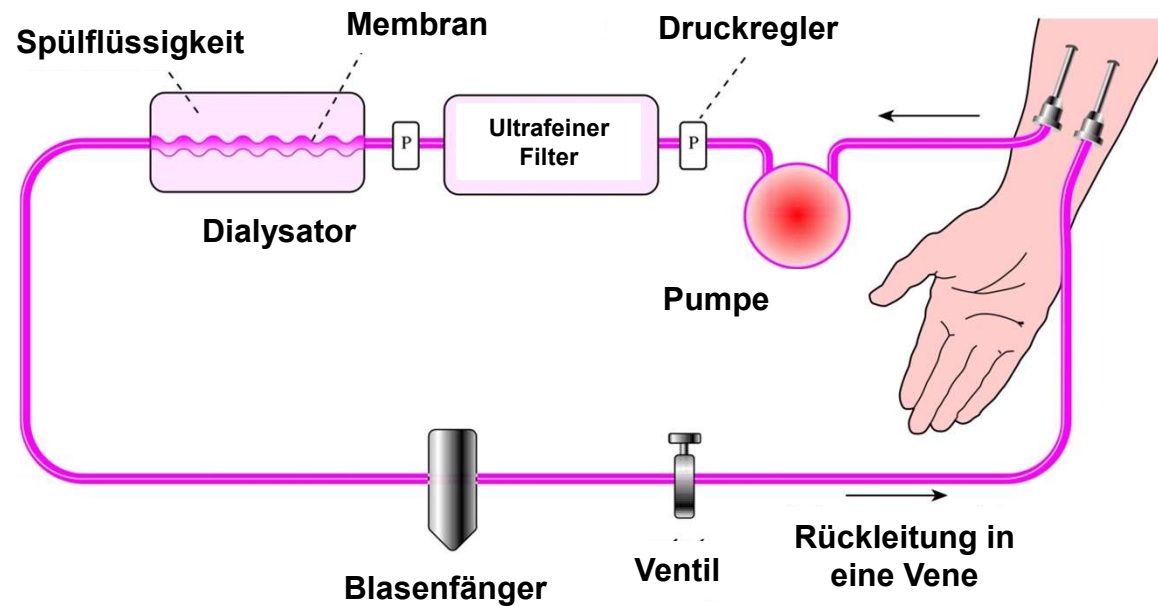
Konzentration der
Moleküle für welche
die Wand
undurchlässig ist

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

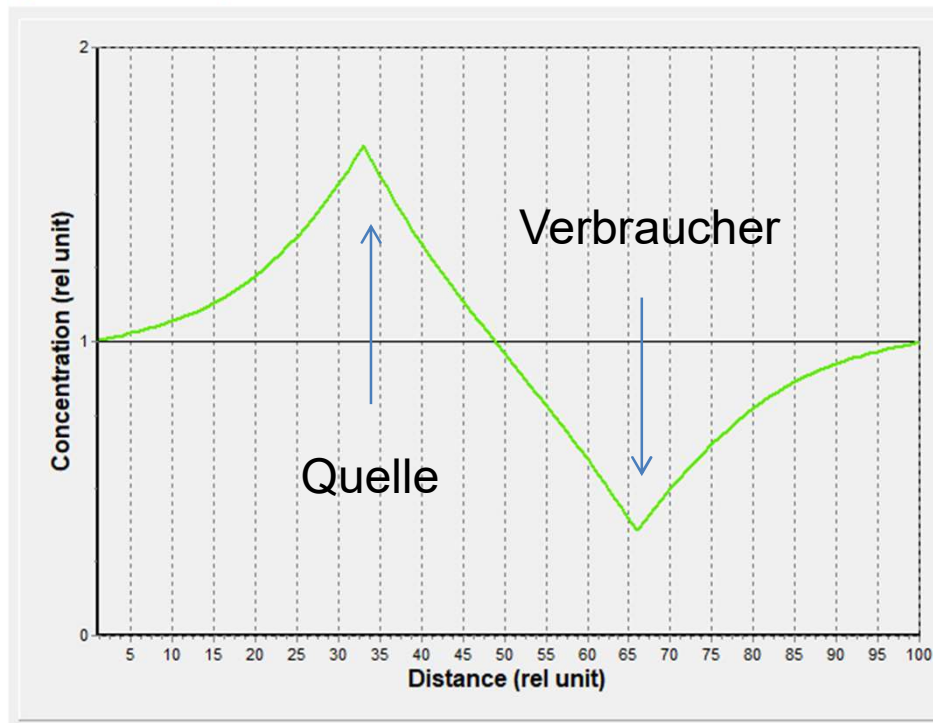
Quelle:

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

Verbraucher:

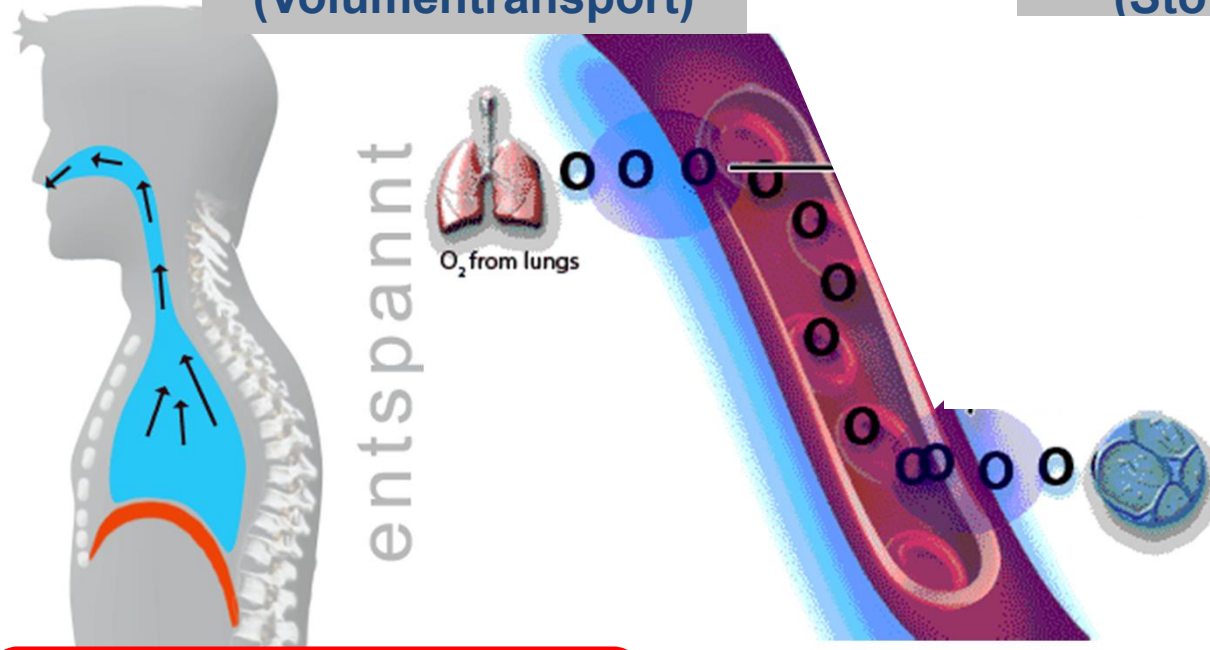
Wo der Stoff verwendet wird zB. durch chemische Prozessen in einem anderen Stoff umgewandelt wird.

 Diffusion simulation by SL

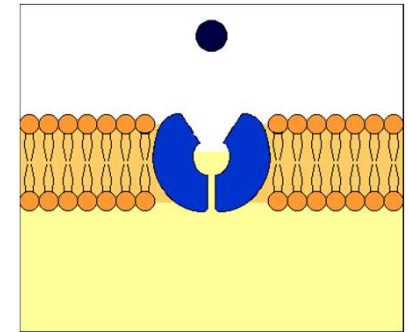
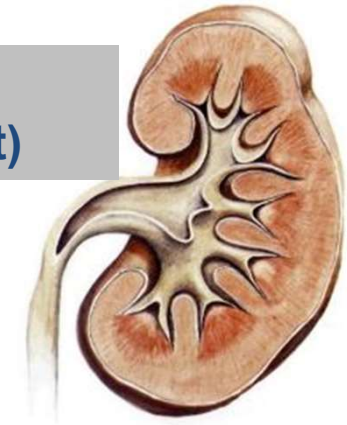


Transportprozesse

I. Strömung (Volumentransport)



II. Diffusion (Stofftransport)



III. Elektrischer Strom (el. Ladungstransport)



IV. Wärmeleitung (Energietransport)



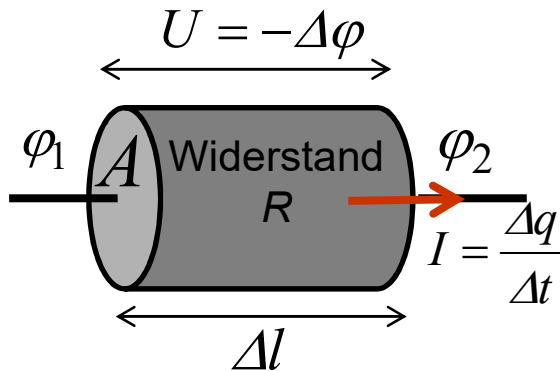
V. Verallgemeinerung

III. 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

Alternativform:

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

Stromdichte

Elektrische Leitfähigkeit

Potenzialgradient

3. Anwendungen

- Diagnostik

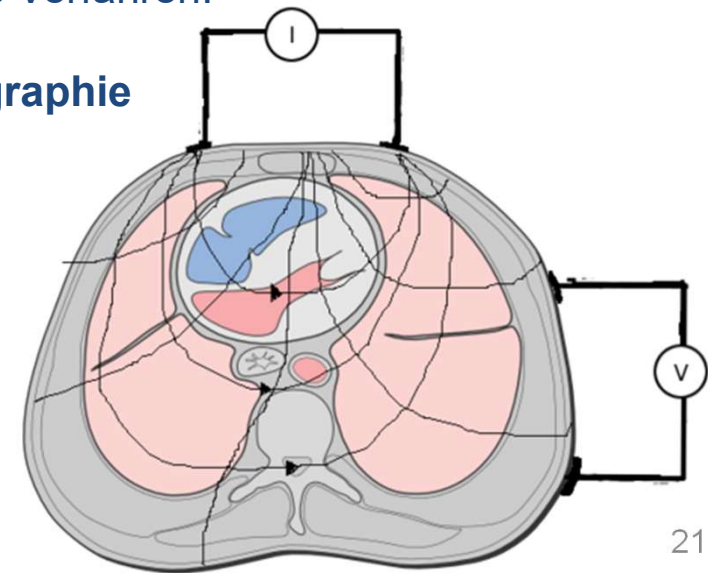
- Messung von Biopotenzialen (EKG, EEG, ...) (siehe später!)



- Auf Widerstandsmessung (Impedanzmessung) basierende Techniken

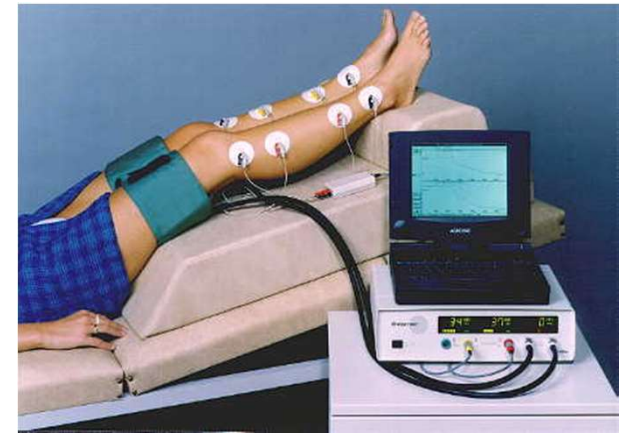
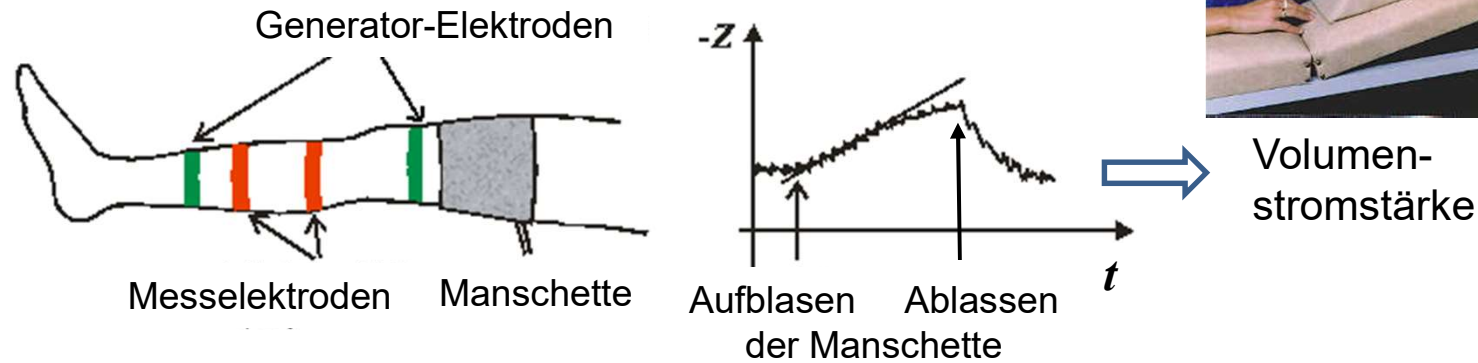
Gewebe	σ (mS/m)	ρ (Ω m)
Blut	700	1,4
graue Hirnmasse	300	3,3
weiße Hirnmasse	150	6,7
Haut	100	10
Fett	40	25
Knochen	10	100

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



Impedanzplethysmographie (IPG)

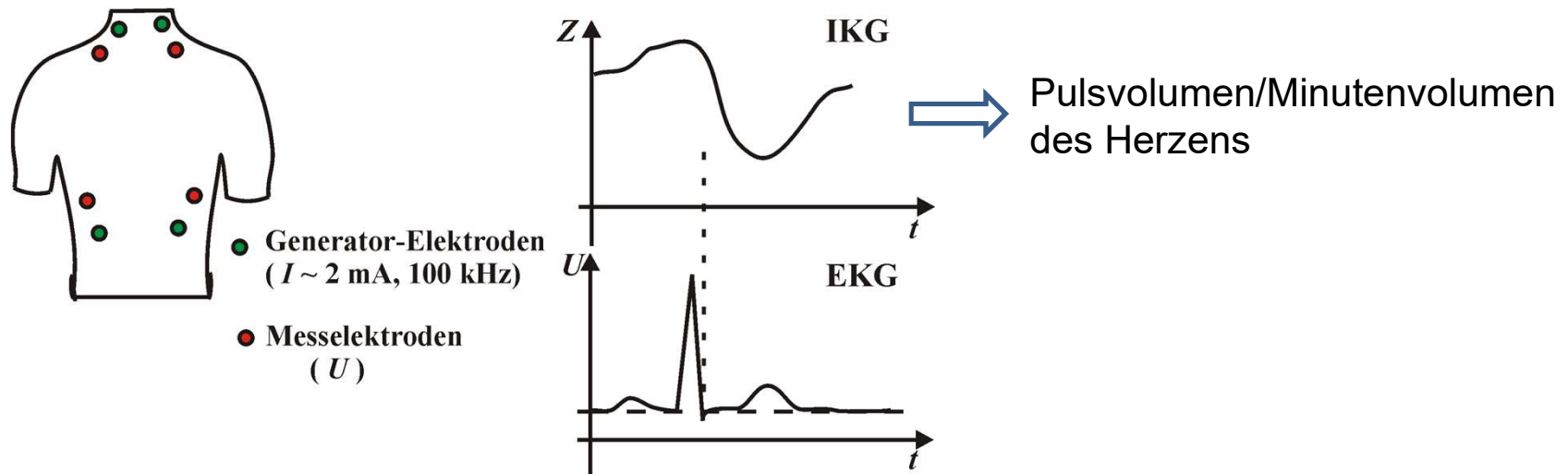
Untersuchung der Blutströmung in den Extremitäten



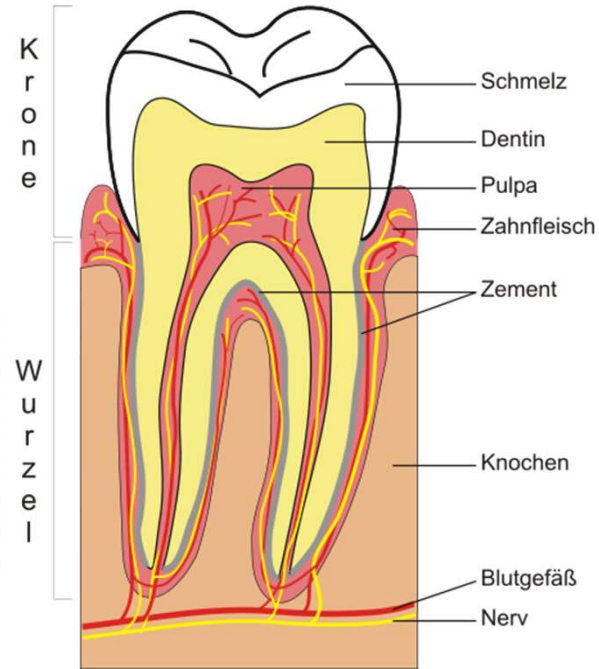
Impedanzkardiographie (IKG)

Untersuchung der Herzfunktion

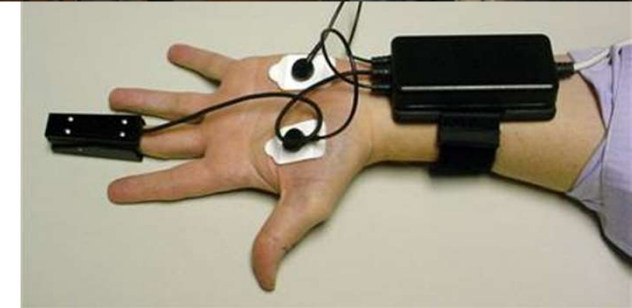
Impedanzkardiographie (IKG)



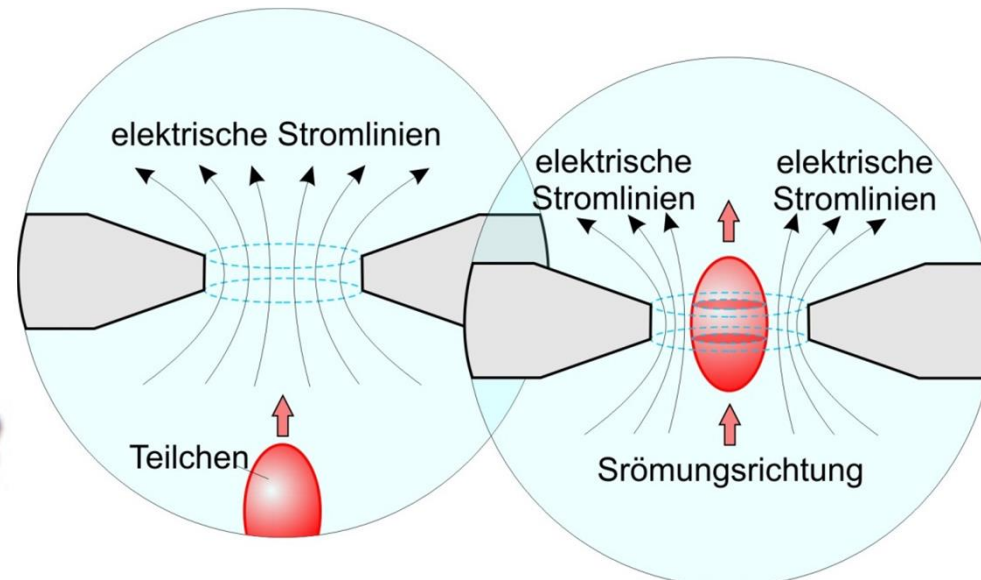
Apex-Locator



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	$J_V = -\frac{R^2}{8\eta} \frac{\Delta p}{\Delta l}$
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