

Transportprozesse 4

II. 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

III. Elektrischer Strom (el. Ladungstransport)

1. Grundbegriffe Elektrische Stromstärke, -dichte
2. Transportgesetz = ohmsches Gesetz
3. Anwendungen Auf Widerstandsmessung basierende Techniken (IPG, IKG, EIT,)

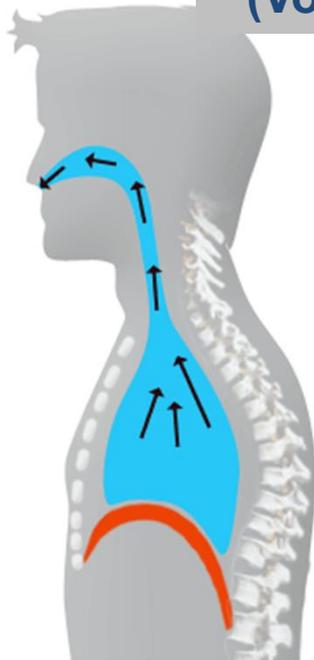
IV. Wärmeleitung (Energietransport)

0. Mechanismus
1. Grundbegriffe
2. Transportgesetz = Fourier-Gesetz
3. Anwendung: Wärmehaushalt

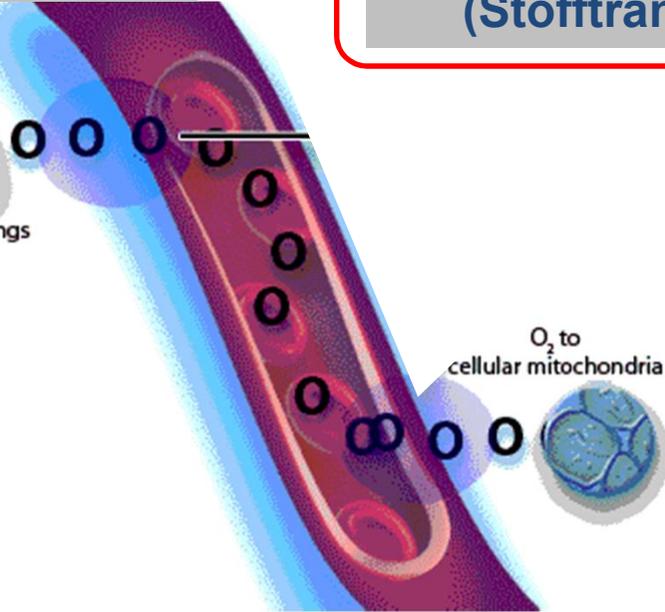
V. Verallgemeinerung der Transportgesetze

Transportprozesse

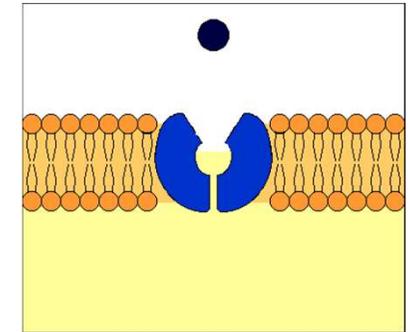
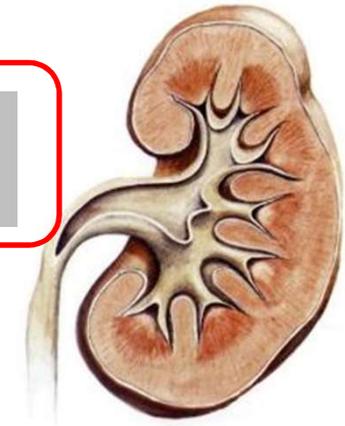
I. Strömung (Volumentransport)



entspannt



II. Diffusion (Stofftransport)



III. Elektrischer Strom (el. Ladungstransport)



IV. Wärmeleitung (Energietransport)



V. Verallgemeinerung

Zur Erinnerung

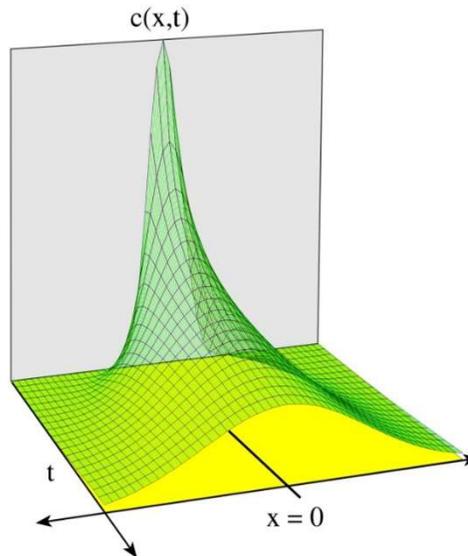
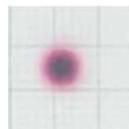
Diffusion: Tendenz zur gleichmäßigen Verteilung von Molekülen durch die thermische Bewegung

Das 1. Ficksche Gesetz:

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

Das 2. Ficksche Gesetz:

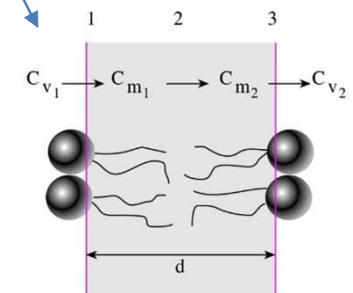
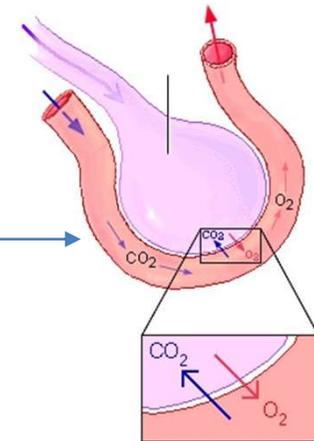
$$D \frac{\Delta \left(\frac{\Delta c}{\Delta x} \right)}{\Delta x} = \frac{\Delta c}{\Delta t}$$



Bedingung: stationäre Diffusion!

Anwendbar für

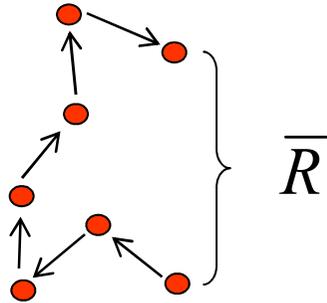
- O₂-Diffusion von Lunge ins Blut
- Diffusion durch Membranen



Zusammenfassend über die „Schnelligkeit“ der Diffusion

Zur Erinnerung

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

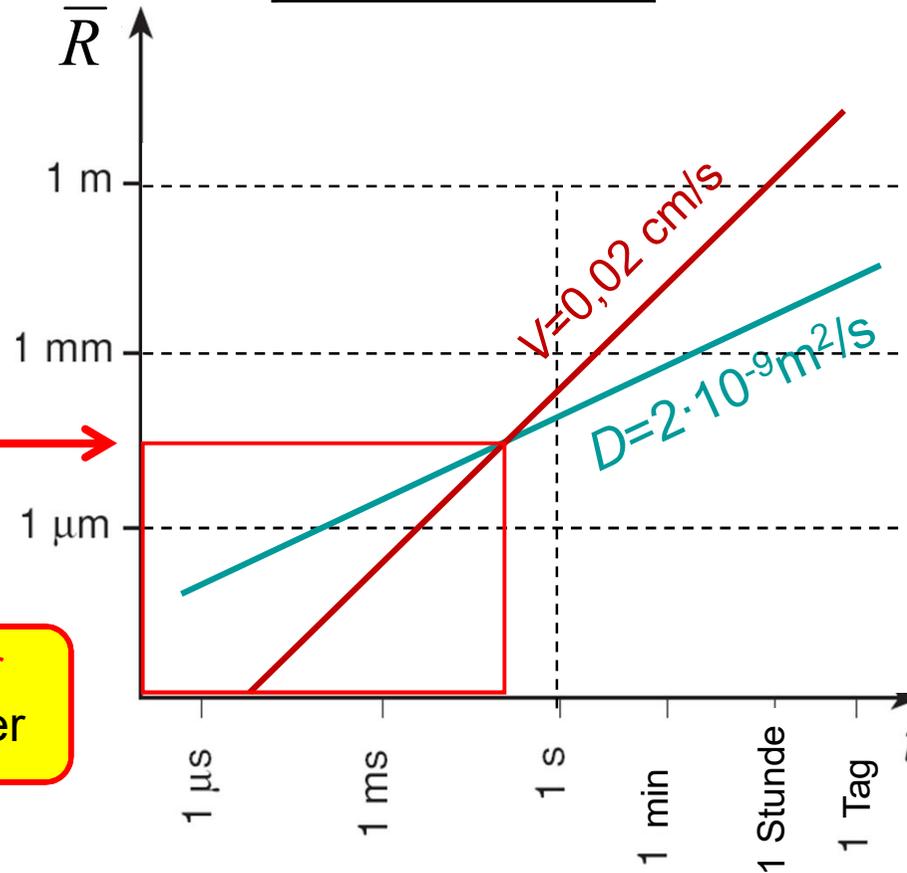


Diff: $\bar{R} \sim \sqrt{t}$

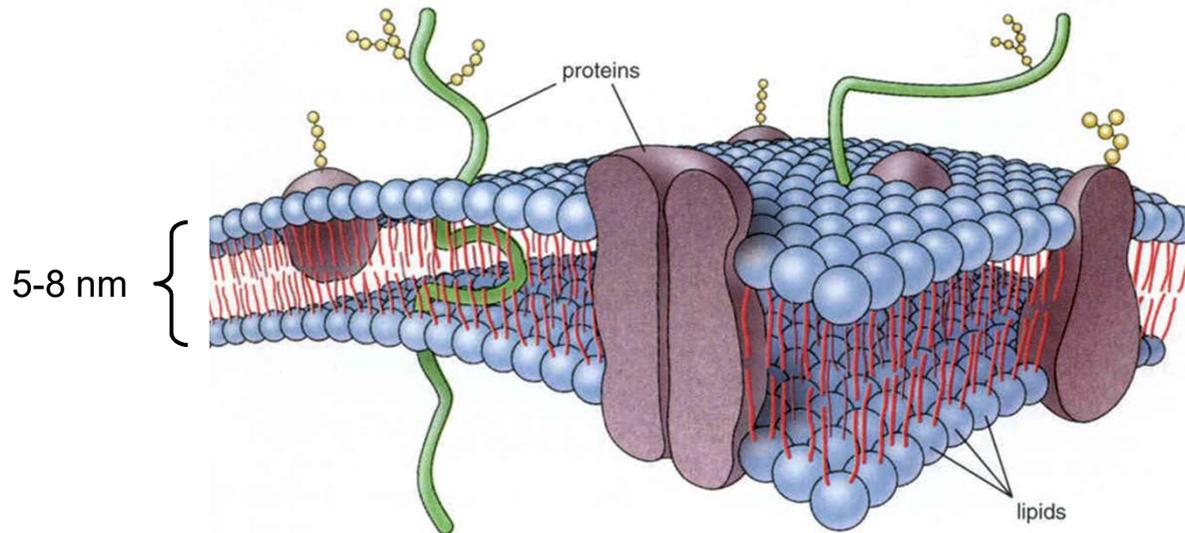
Strömung: $s = v \cdot t$

30 μm

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

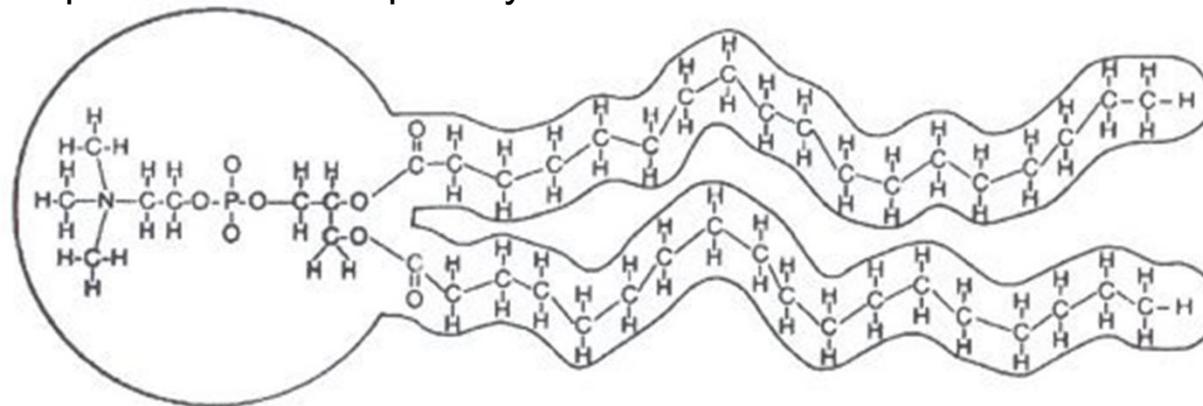


6. Anwendungen: Diffusion in Membranen



Beispiel

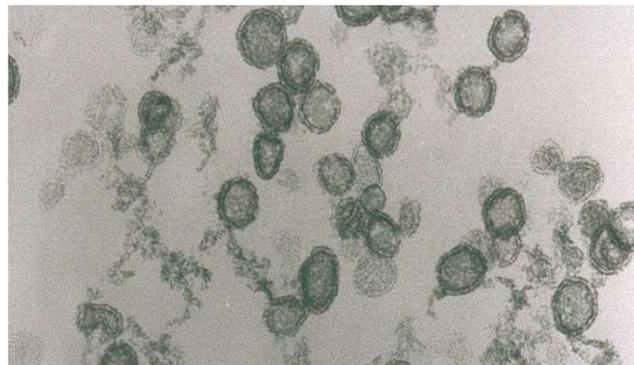
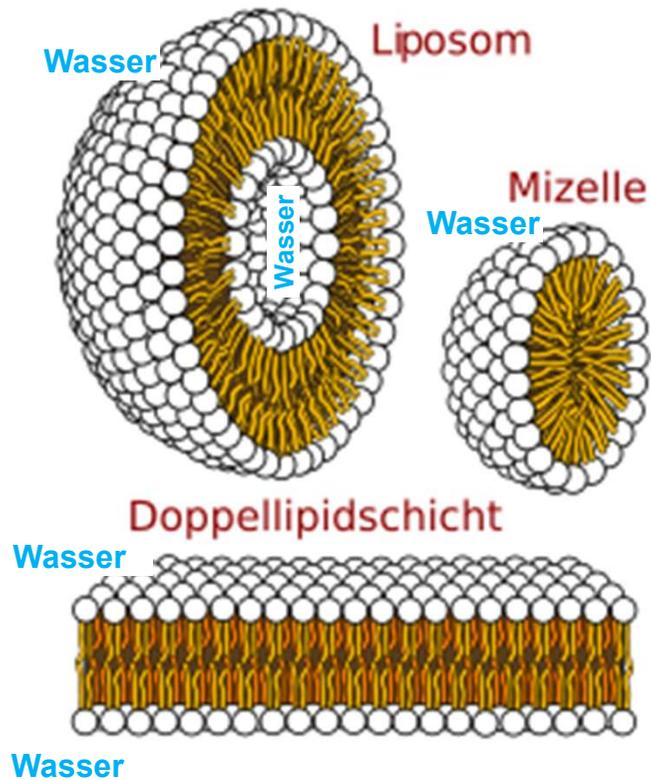
Ein Phospholipidmolekül: Phosphatidylcholin



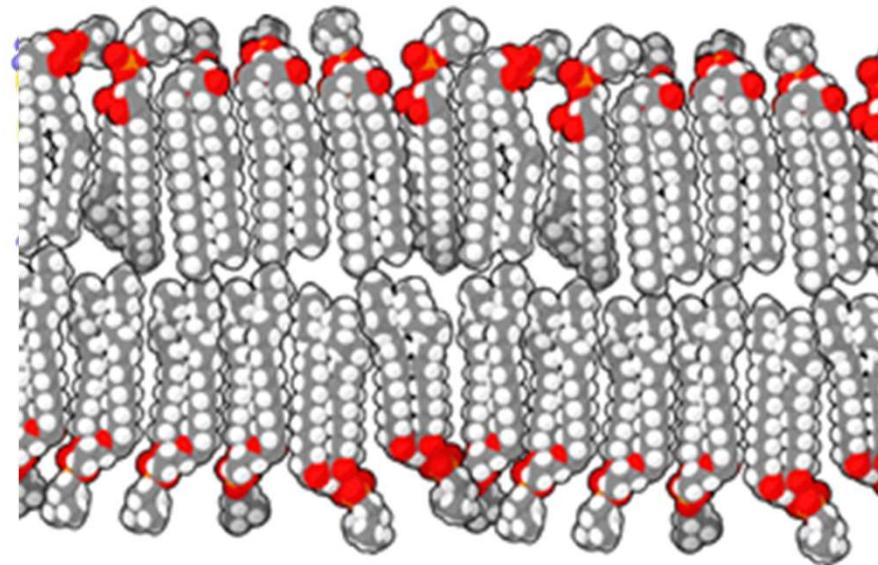
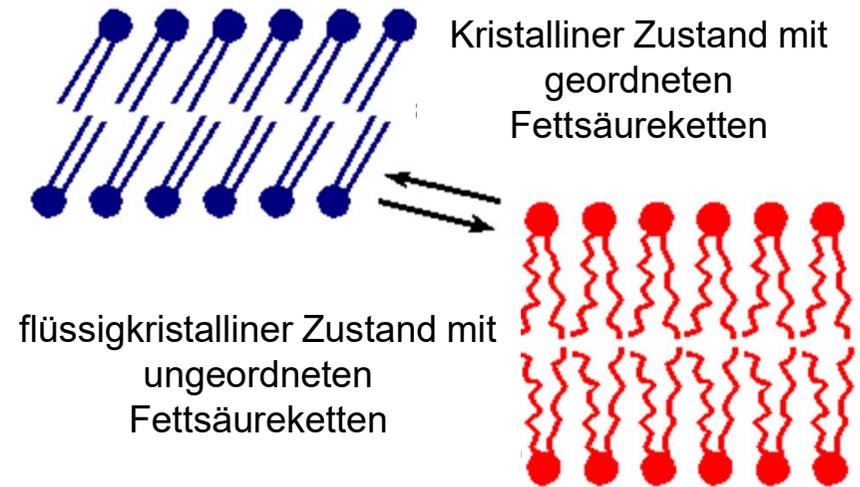
Polarer, hydrophiler Kopf

Apolare, hydrophobe Schwänze

Zur Erinnerung: Lyotrope Flüssigkristalle

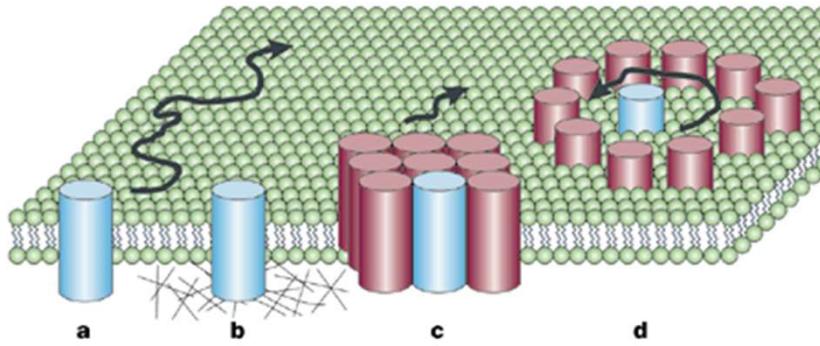


Phasenübergang in der Lipiddoppelschicht

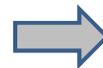
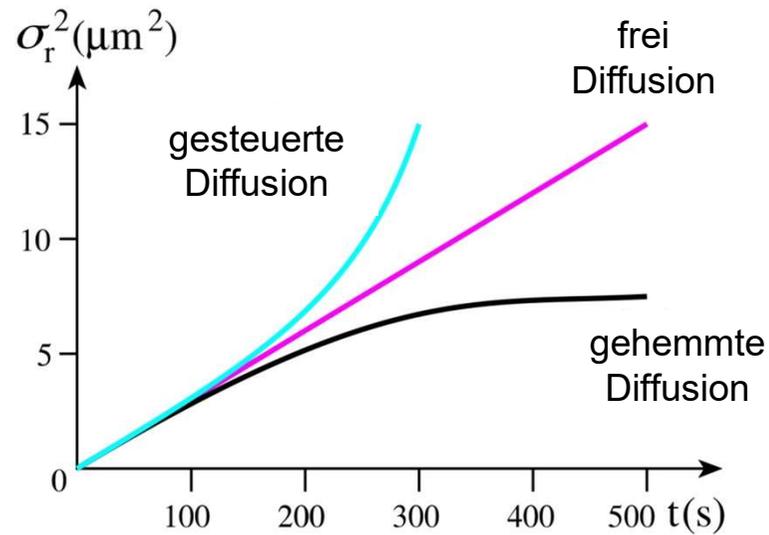
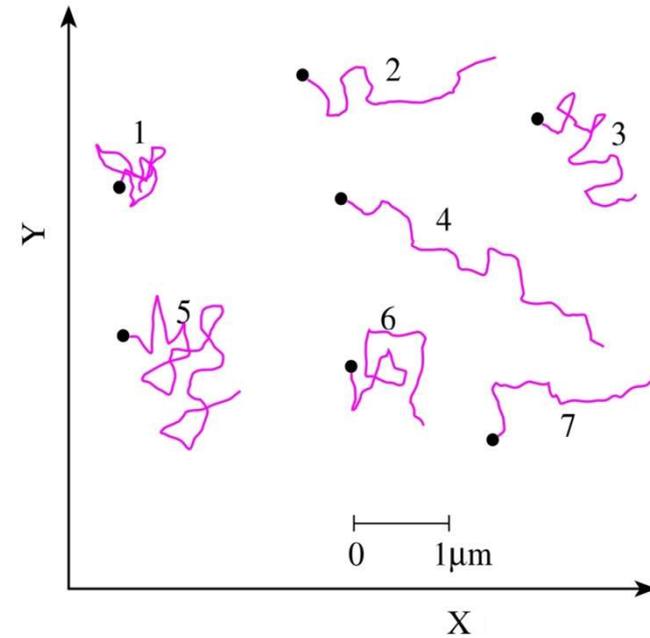


$$\eta_{\text{Gel}} > \eta_{\text{Fluid}} \gg \eta_{\text{Wasser}}$$

■ Laterale Diffusion in Membranen



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



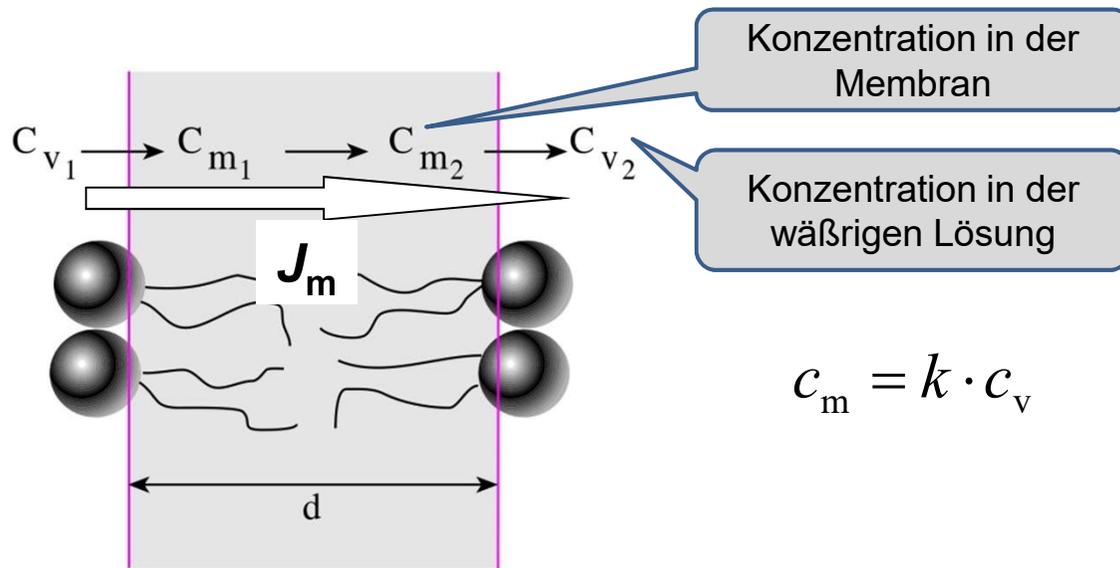
Lipide (mobiler Anteil >90%):

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

Proteine (mobiler Anteil 10-90%):

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

▪ Diffusion durch Membranen (passiver Transport)



$$c_m = k \cdot c_v$$

Zur Erinnerung

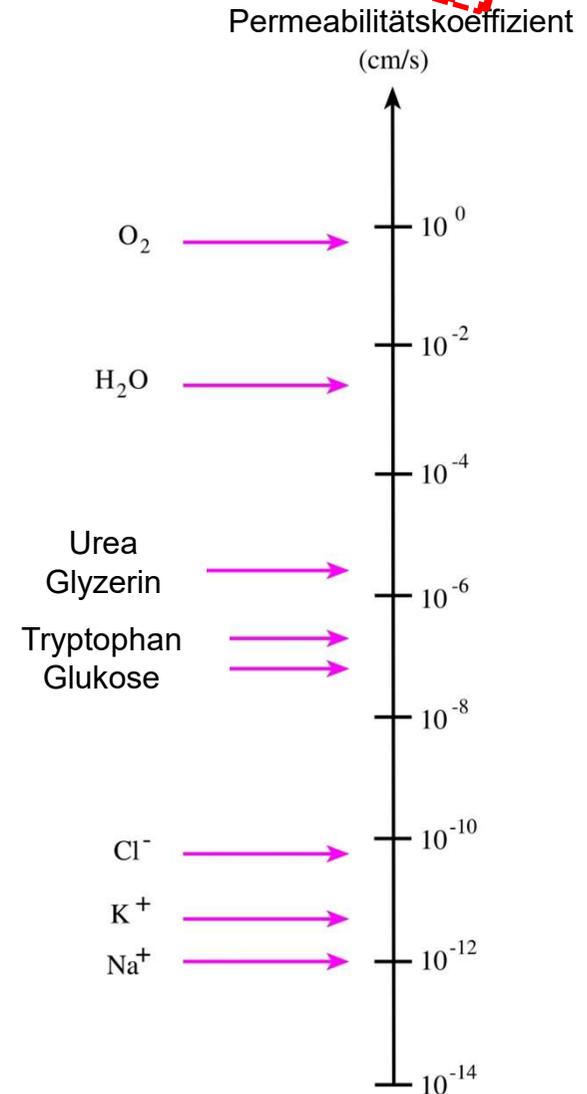
➤ 1. Ficksches Gesetz:

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

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

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

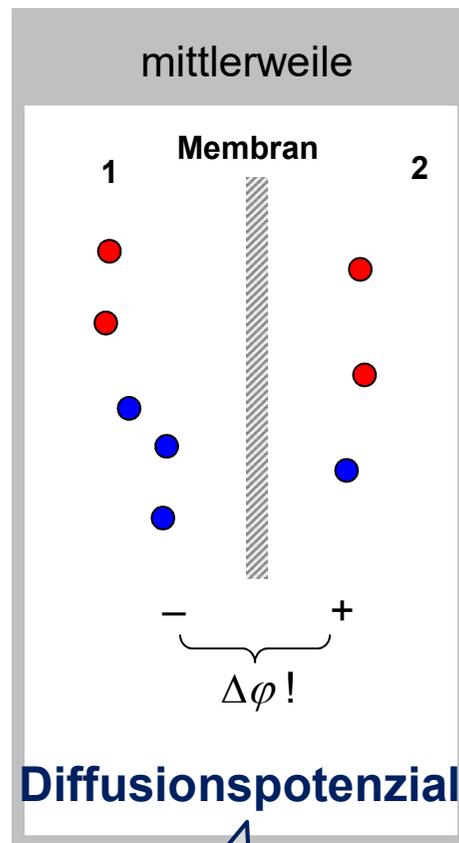
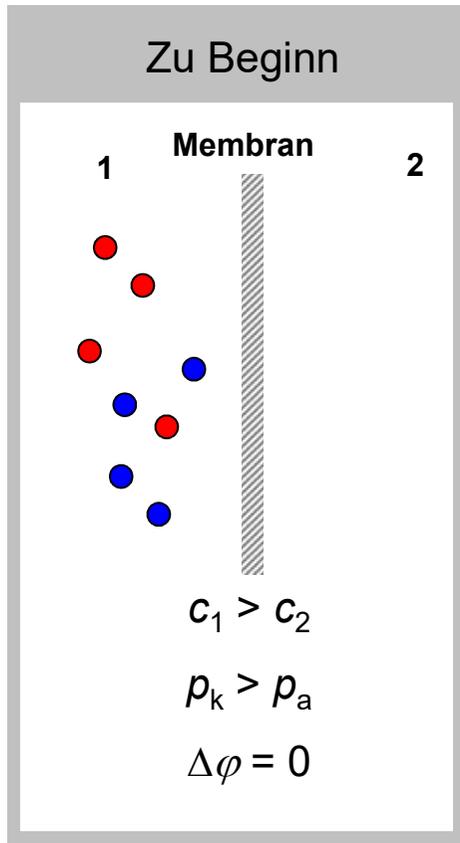
Permeabilitätskoeffizient (m/s)



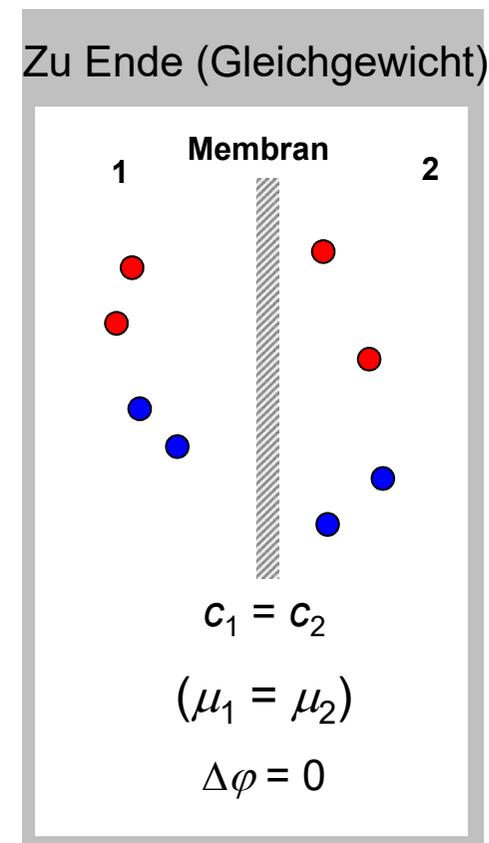
- Diffusion von Ionen durch eine Membran (zwei Spezialfälle)

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

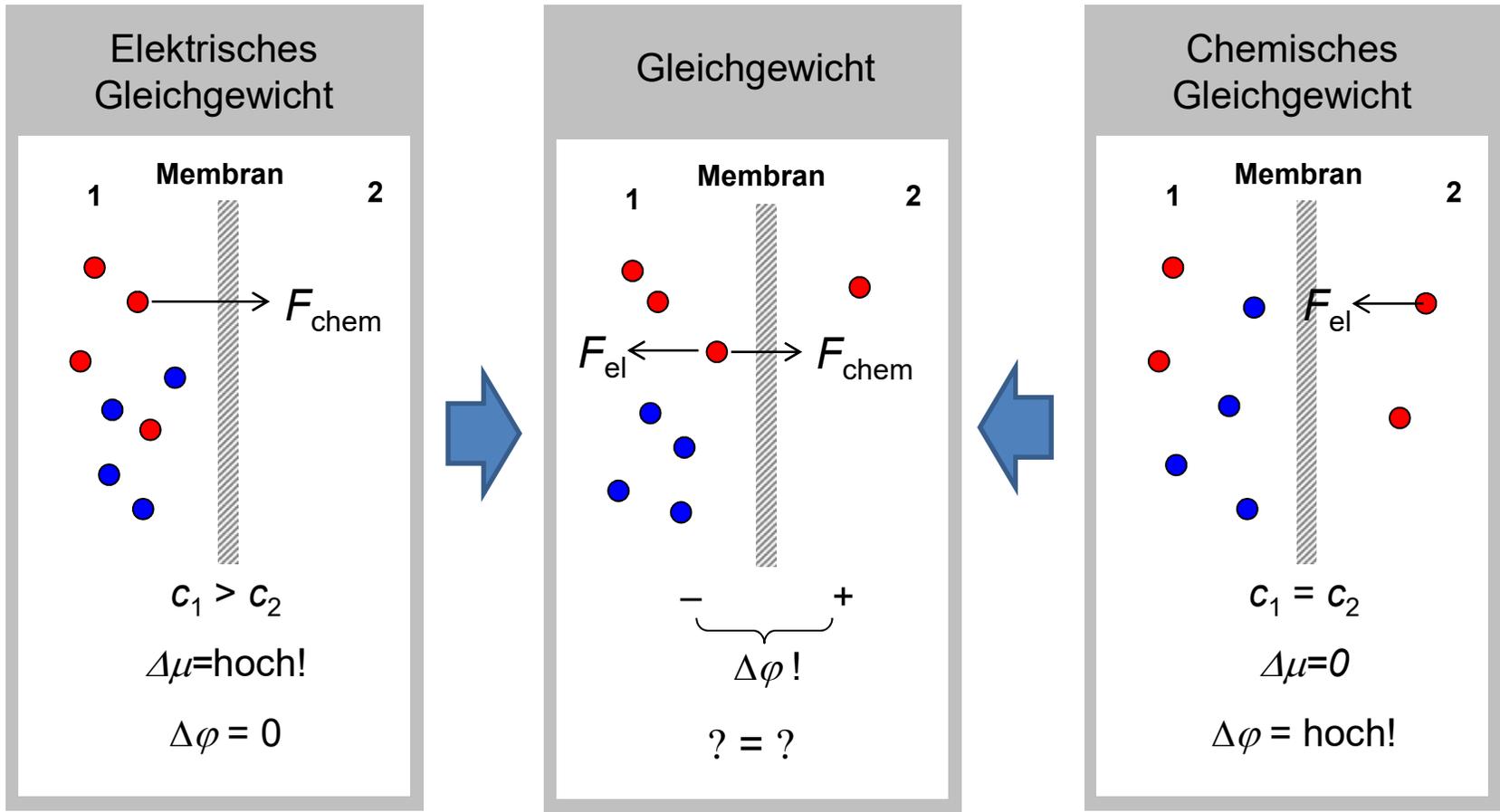
1. Die Permeabilitätswerte sind unterschiedlich, z. B. $p_k > p_a$



Nur vorübergehend!

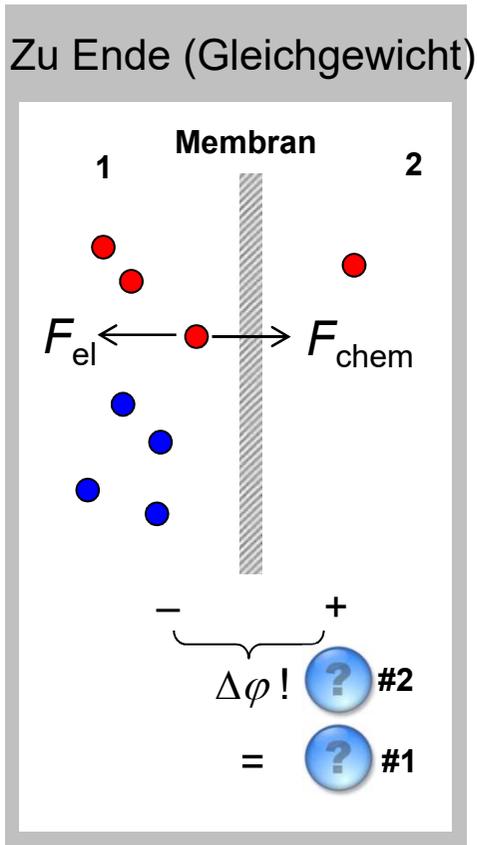


2. Die Permeabilität für das eine Ion ist Null, z. B. $p_a = 0$



- Kation (k)
- Anion (a)

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



- Kation (k)
- Anion (a)

? #1

Elektrochemisches Potenzial (J/mol):

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

Im Gleichgewicht:

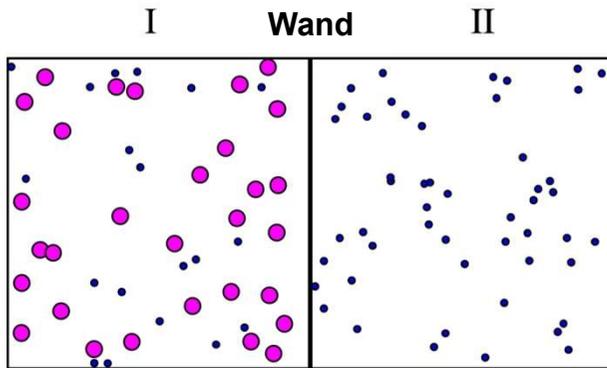
$$\mu_{e1} = \mu_{e2}$$

? #2

Nernst-Gleichung:

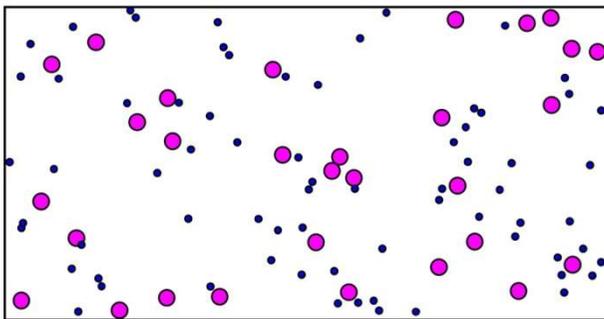
$$\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 = -\frac{RT}{F} \ln \frac{c_2}{c_1}$$

Eine weitere Anwendung: Osmose



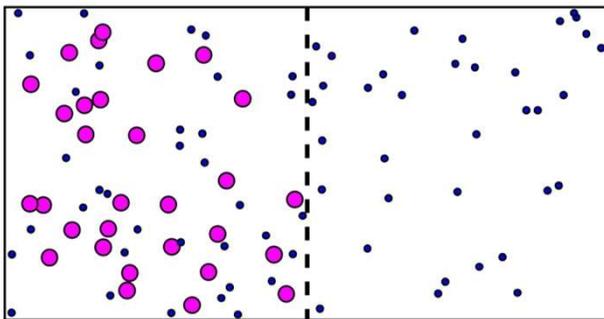
a

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)

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

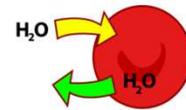
Osmotischer Druck

Temperatur

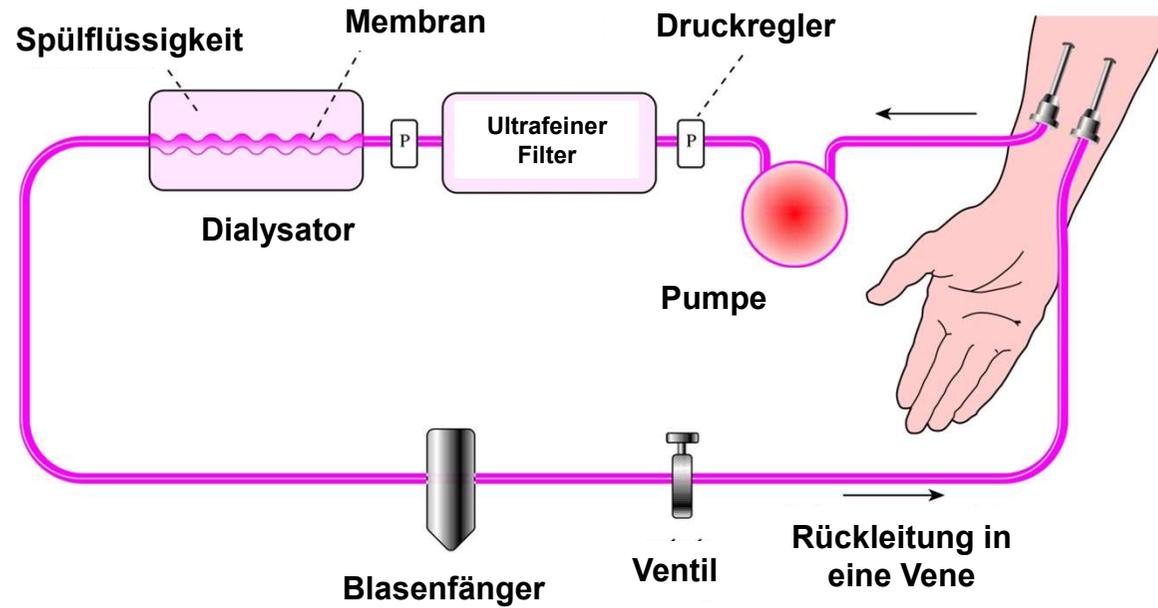
Konzentration der Moleküle für welche die Wand undurchlässig ist

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

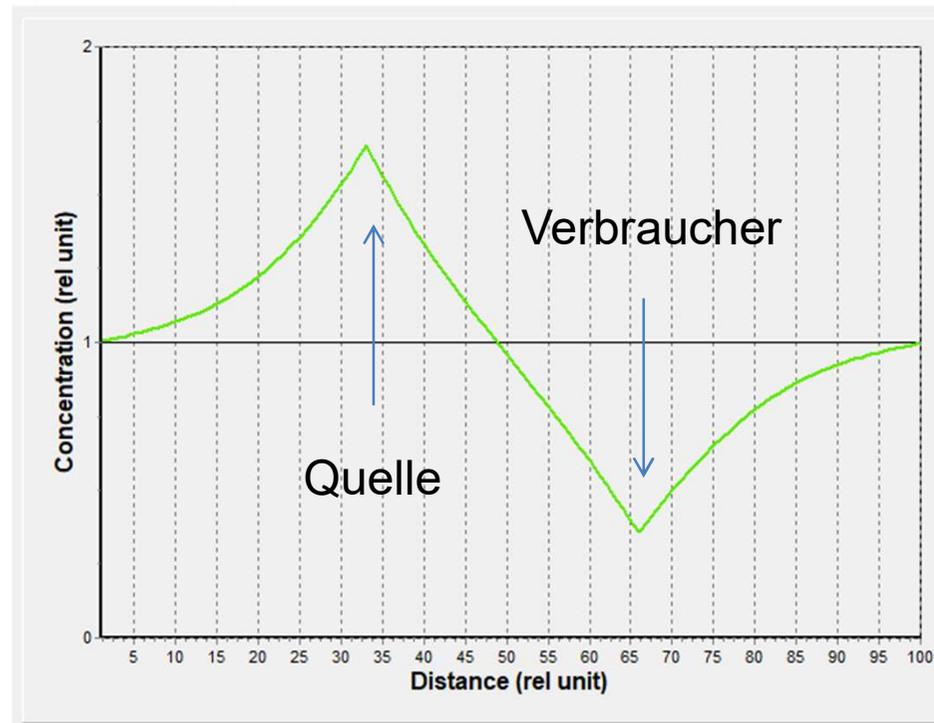
Quelle:

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

Verbraucher:

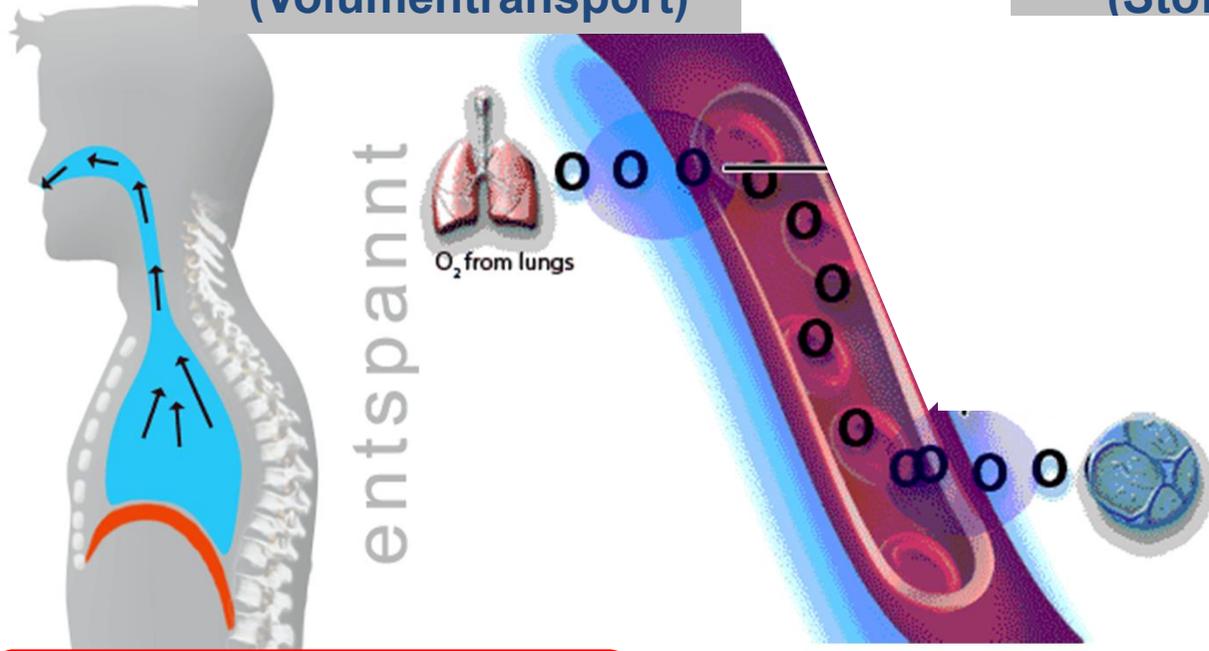
Wo der Stoff verwendet wird zB. durch chemische Prozessen in einem anderen Stoff umgewandelt wird.

 Diffusion simulation by SL

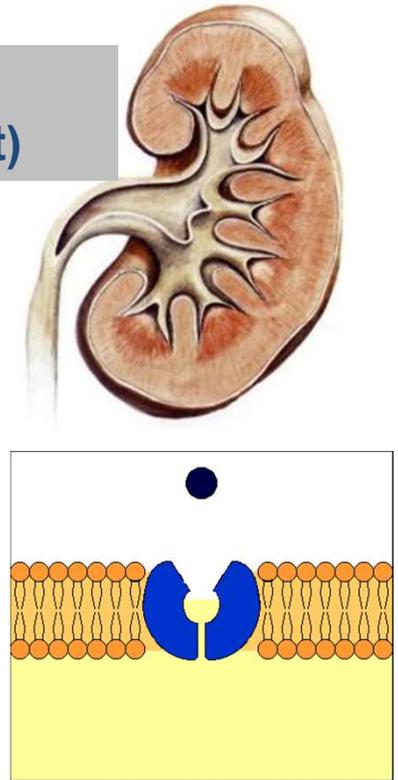


Transportprozesse

I. Strömung (Volumentransport)



II. Diffusion (Stofftransport)



III. Elektrischer Strom (el. Ladungstransport)



IV. Wärmeleitung (Energietransport)



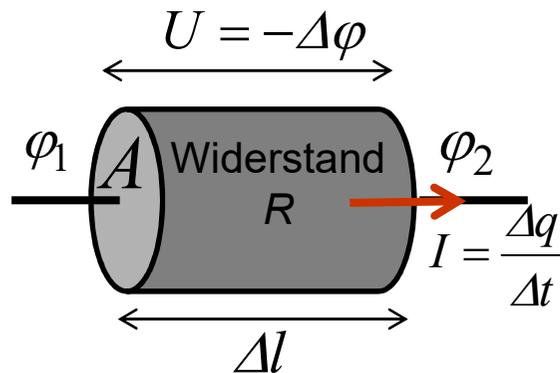
V. Verallgemeinerung

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



$$U = R \cdot I$$

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

Die bisher bekannte Form des ohmschen Gesetzes

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

Die neue Form des ohmschen Gesetzes

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

Alternativform:

Stromdichte

Potenzialgradient

Elektrische Leitfähigkeit

3. Anwendungen

- Diagnostik

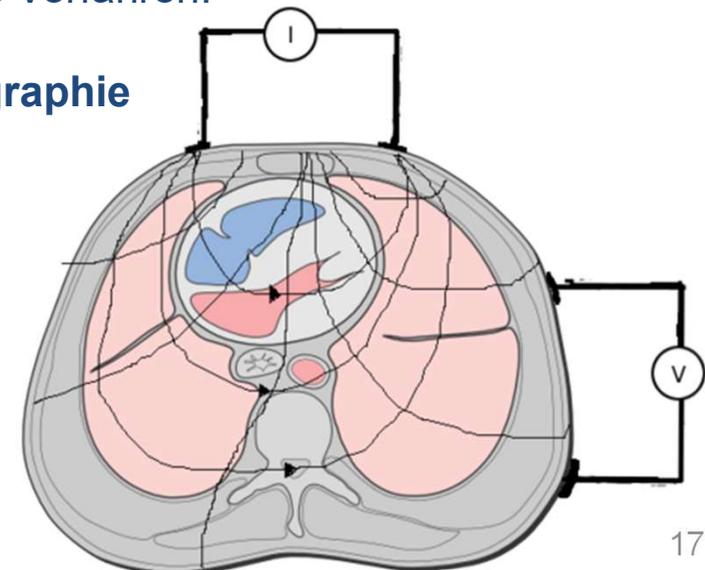
- Messung von Biopotenzialen (EKG, EEG, ...) (siehe später!)



- Auf Widerstandsmessung (Impedanzmessung) basierende Techniken

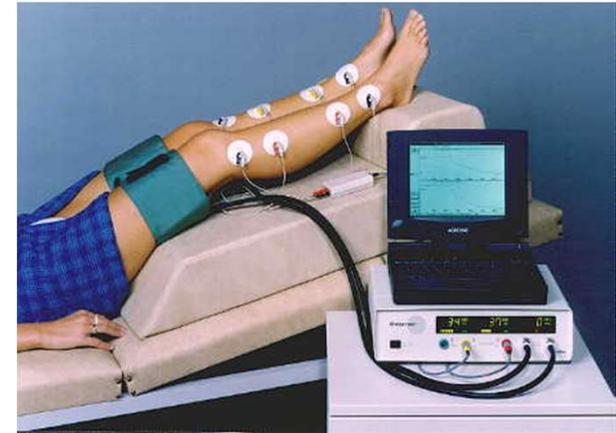
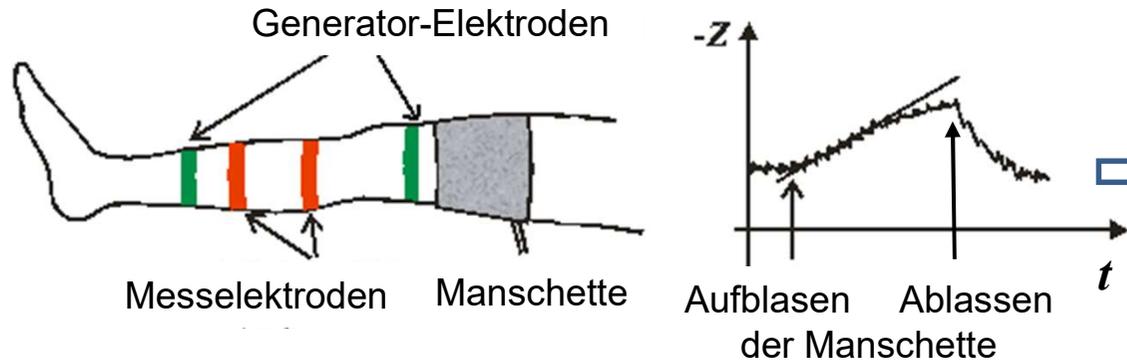
Gewebe	σ (mS/m)	ρ (Ω m)
Blut	700	1,4
graue Hirnmasse	300	3,3
weiße Hirnmasse	150	6,7
Haut	100	10
Fett	40	25
Knochen	10	100

Ein bildgebendes Verfahren:
elektrische Impedanztomographie (EIT)



Impedanzplethysmographie (IPG)

Untersuchung der Blutströmung in den Extremitäten

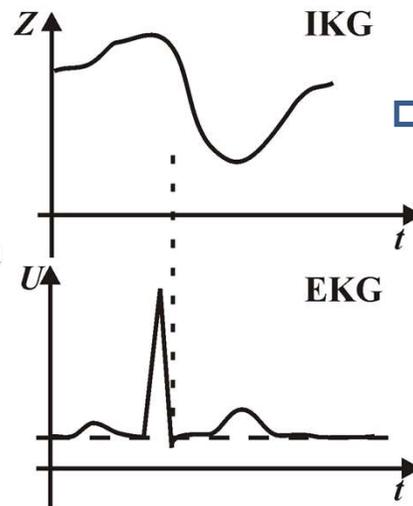
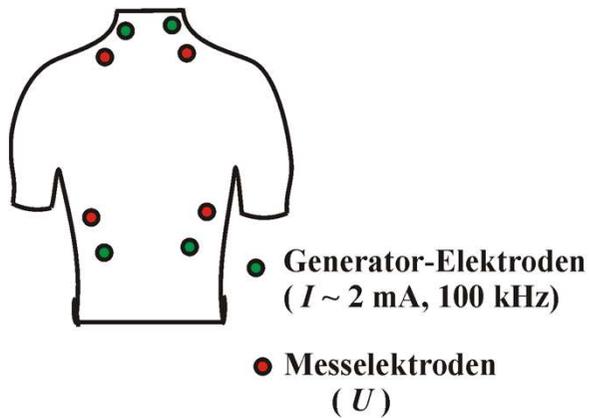


Volumenstromstärke

Impedanzkardiographie (IKG)

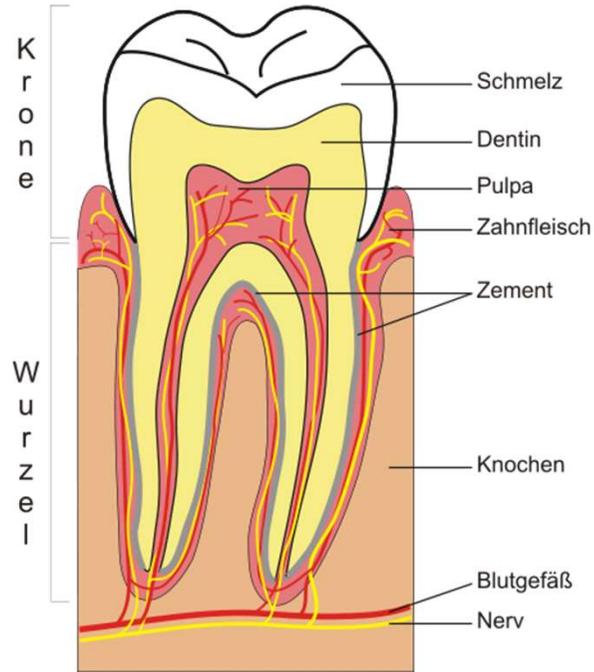
Untersuchung der Herzfunktion

Impedanzkardiographie (IKG)

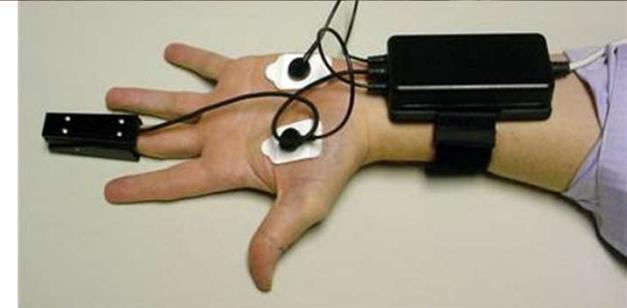


Pulsvolumen/Minutenvolumen des Herzens

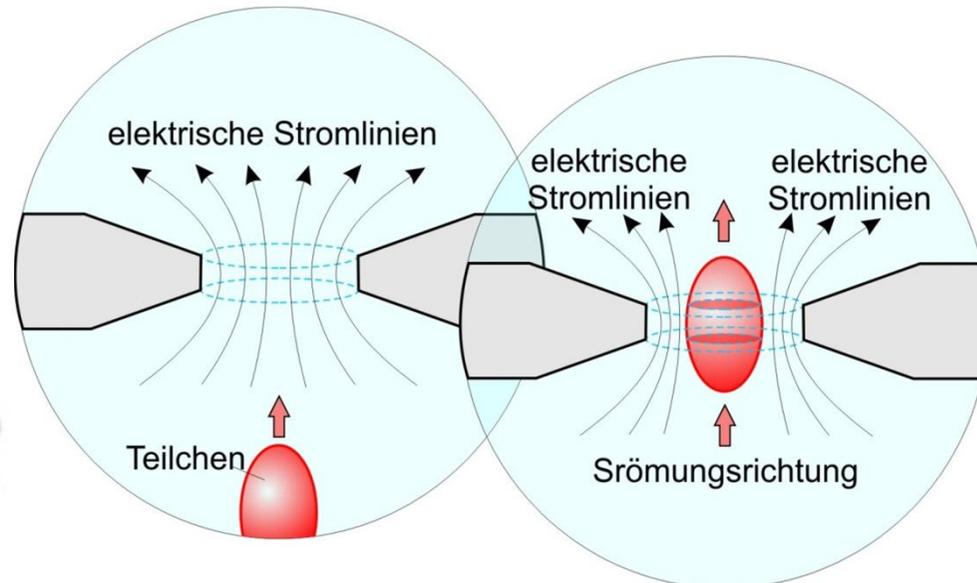
Apex-Locator



Lügendetektor



Coulter-Zähler



- Therapie (siehe später!)

Galvanisation / Iontophorese



Wärmetherapie



Elektrochirurgie



Elektroreizung in der Physiotherapie



Herzschrittmacher



Defibrillator



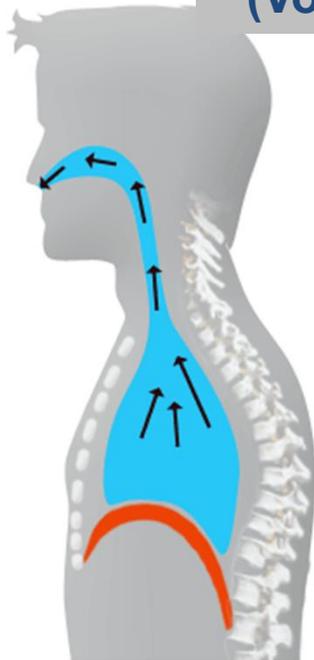
Analogie

	Was „strömt“?	Stärke?	Was treibt die „Strömung“?	Zusammenhang
Volumen-transport	V	$J_V = \frac{\Delta V}{A \cdot \Delta t}$	p	$J_V = -\frac{R^2}{8\eta} \frac{\Delta p}{\Delta l}$
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

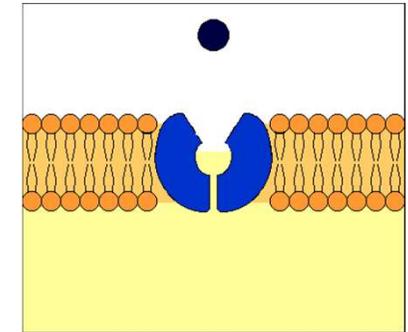
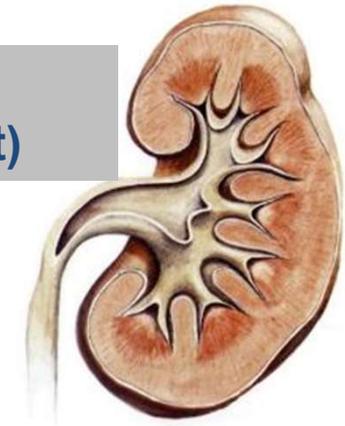
Strömung
(Volumentransport)



entspannt



Diffusion
(Stofftransport)



III. Elektrischer Strom
(el. Ladungstransport)



IV. Wärmeleitung
(Energietransport)



V. Verallgemeinerung

IV. Wärmeleitung (Energietransport)



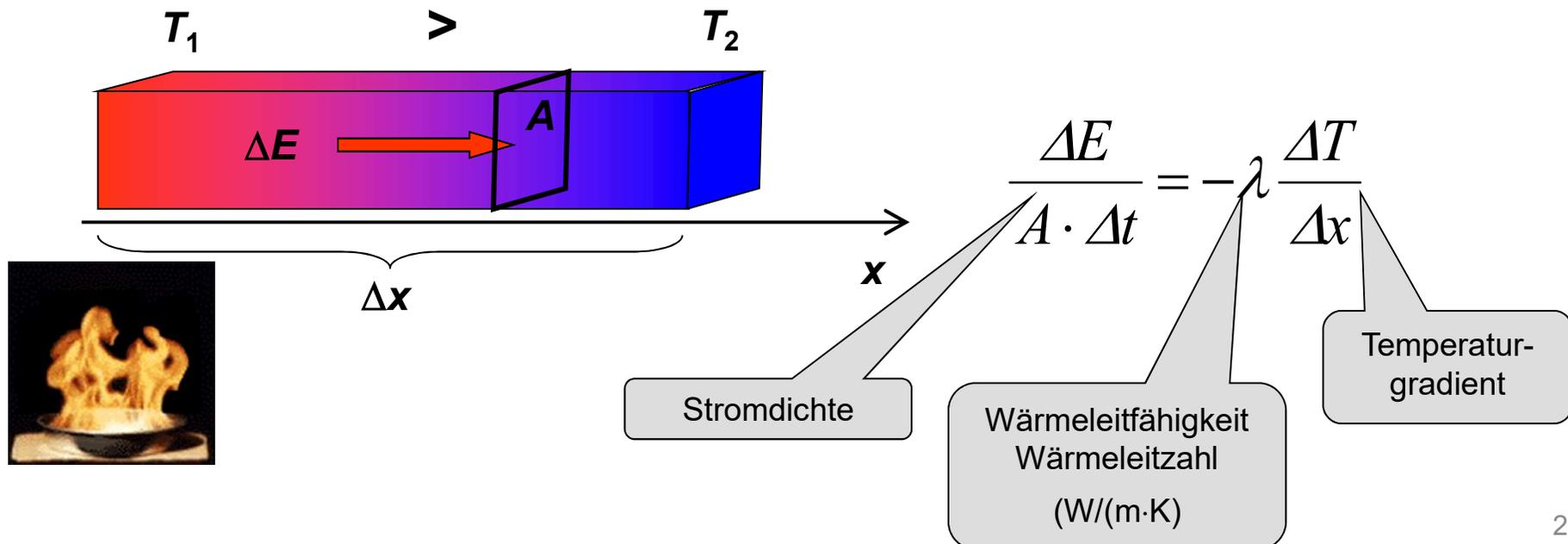
J. B. J. Fourier
1768-1830
Mathematiker
und Physiker

0. Mechanismus: Stöße zw. Atomen und Molekülen + freie Elektronen = **Konduktion**

1. Grundbegriffe

- Energiestromstärke (I):
(Wärmestromstärke) $I = \frac{\Delta E}{\Delta t} \quad \left(\frac{\text{J}}{\text{s}} = \text{W} \right)$
- Energiestromdichte (J):
(Wärmestromdichte) $J = \frac{\Delta E}{A \cdot \Delta t} \quad \left(\frac{\text{J}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}} = \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right)$

2. Transportgesetz = Fourier-Gesetz

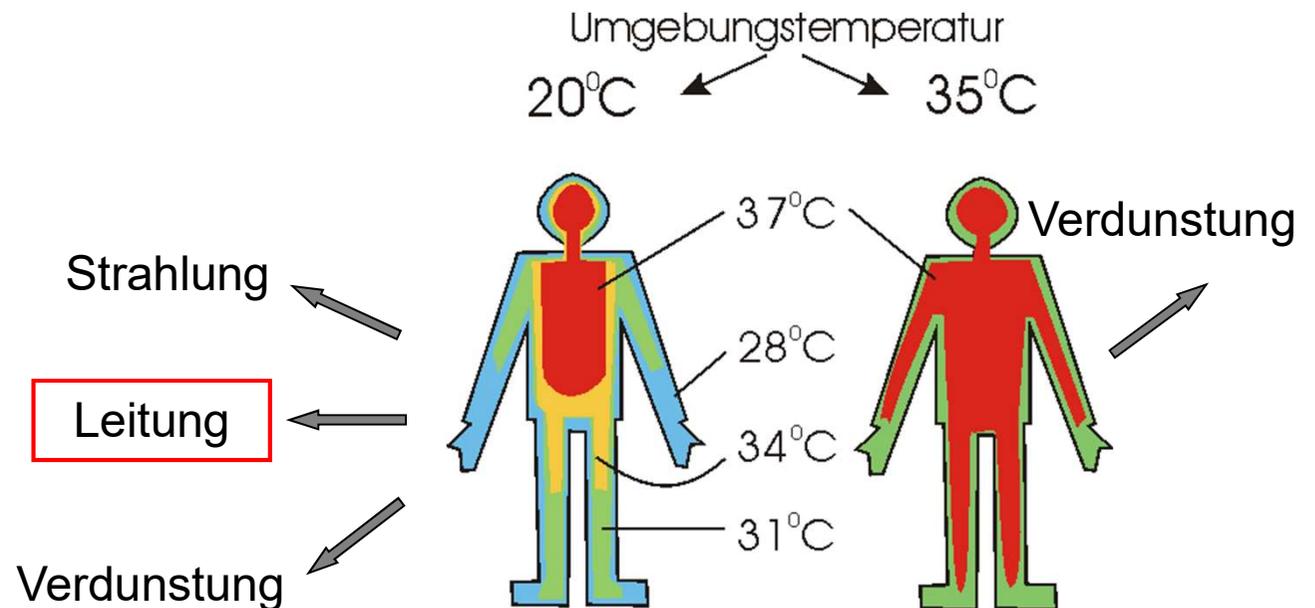


- Wärmeleitfähigkeit: ➤ stoffspezifisch

Stoff	λ (W/(m·K))
Silber	420
Glas	1
Wasser	0,6
Muskel	0,4
Fett	0,2
Luft	0,025

3. Anwendung: **Wärmebildung und -abgabe**

Aktivität	Wärmebildung (W)
In Ruhe	115
Langsames Spazieren	260
Radfahren (15 km/h)	420
Treppensteigen (2/s)	700
Laufen (15 km/h)	1150



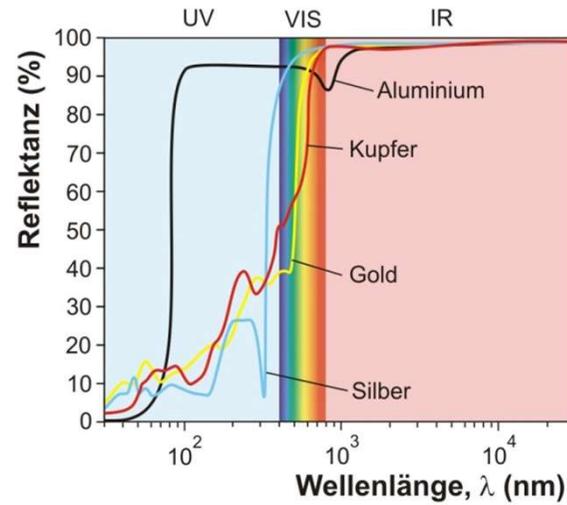
Zusammenfassung der Wärmeabgabemechanismen

- Temperaturstrahlung

$$\Delta P = \sigma \cdot (T_{\text{Körper}}^4 - T_{\text{Umgebung}}^4) \cdot A$$

$T_{\text{Körper}} = 28^\circ\text{C}$ $T_{\text{Umgebung}} = 20^\circ\text{C}$ \Rightarrow $\Delta P = 83 \text{ W}$

$T_{\text{Umgebung}} = 0^\circ\text{C}$ \Rightarrow $\Delta P = 290 \text{ W !}$



- Wärmeleitung $P = -\lambda A \frac{\Delta T}{\Delta x}$
 $T_{\text{Körper}} = 28^\circ\text{C}$
 $T_{\text{Umgebung}} = 20^\circ\text{C}$ $\Rightarrow P \approx 40 \text{ W}$



- Luft ↔ Wasser als Umgebung
- Strömungen! (z. B. Wind)

- Verdunstung

- hohe spez. Verdampfungswärme von Wasser: $\approx 2400 \text{ kJ/kg}$ (bei 30°C) !!

- Wasserverlust:
 - ständig $\approx 50 \text{ ml/h}$ $\Rightarrow \approx 35 \text{ W}$
 - bei Extrembedingungen $\approx 1600 \text{ ml/h}$ $\Rightarrow \approx 1000 \text{ W !!}$

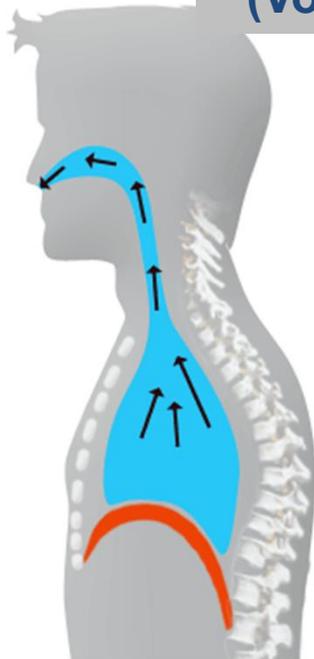


- Strömungen! (z. B. Wind)



Transportprozesse

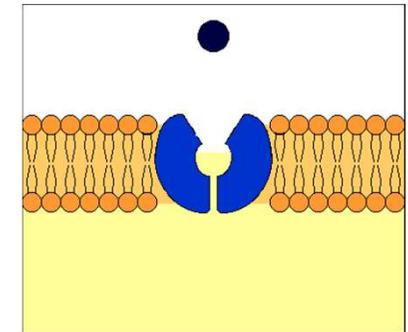
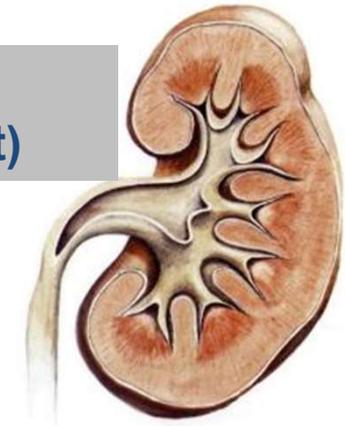
I. Strömung (Volumentransport)



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	$J_V = -\frac{R^2}{8\eta} \frac{\Delta p}{\Delta l}$
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	$J_q = -\sigma \frac{\Delta \varphi}{\Delta l}$
Energie-transport	E	$J_E = \frac{\Delta E}{A \cdot \Delta t}$	T	$J_E = -\lambda \frac{\Delta T}{\Delta x}$
allgemein	x_{ext}	$J = \frac{\Delta x_{\text{ext}}}{A \cdot \Delta t}$	y_{int}	$X = -\frac{\Delta y_{\text{int}}}{\Delta x}$
	extensive Gr.	Strom-dichte	intensive Gr.	thermo-dynamische Kraft
				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!

