

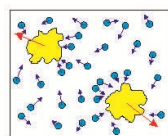
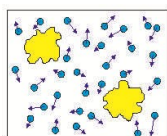
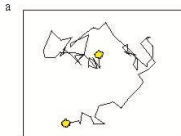
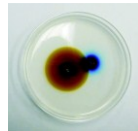
Transportprozesse

Diffusion



1

III. Stofftransport (Diffusion)



1. Grundbegriffe

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

3

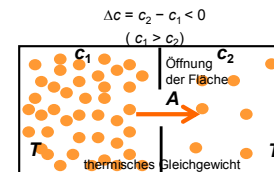
Transportprozesse



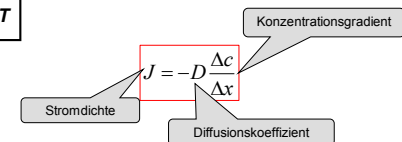
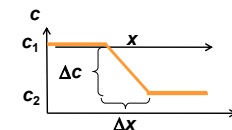
2

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

2. Transportgesetz – 1. Ficksches Gesetz



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



Adolf Fick
1829-1901
Physiologe

4

Diffusionskoeffizient:

- stoffspezifisch
 - diffundierende Moleküle – Größe (r)
 - Form
 - Medium (η)

➤ temperaturabhängig $D \sim e^{-\frac{AE}{RT}}$

➤ $D = ukT$ Beweglichkeit des Teilchens

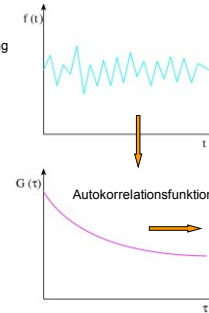
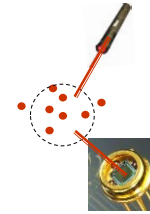
➤ **Einstein-Stokes-Gleichung** (für kugelförmige Teilchen)

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

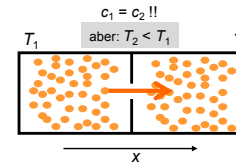
Diffundierendes Teilchen (Molmasse)	Medium	D (m ² /s)
H ₂ (2)	Luft	6,4·10 ⁻⁵
O ₂ (32)	Luft	2·10 ⁻⁵
CO ₂ (44)	Luft	1,8·10 ⁻⁵
H ₂ O (18)	Wasser	2,2·10 ⁻⁹
O ₂ (32)	Wasser	1,9·10 ⁻⁹
Glyzin (75)	Wasser	0,9·10 ⁻⁹
Serum Albumin (69 000)	Wasser	6·10 ⁻¹¹
Tropomiosin (93 000)	Wasser	2,2·10 ⁻¹¹
Tabakmosaik-virus (40 000 000)	Wasser	4,6·10 ⁻¹²

5

➤ 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: $-\frac{\Delta\mu}{\Delta x}$

6

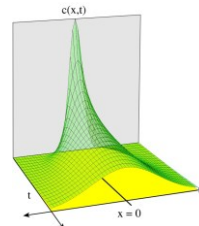
3. Das 2. Ficksche Gesetz:

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

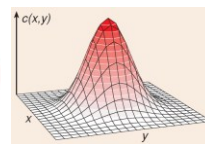
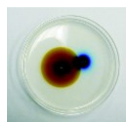
Lösungen:

➤ Für eindimensionale Diffusion:

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



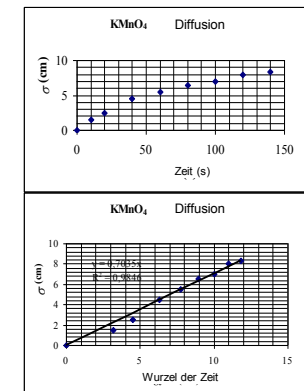
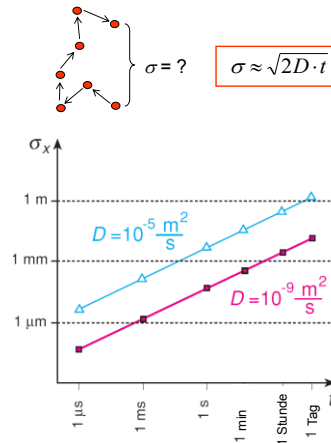
➤ Für zweidimensionale Diffusion:



Siehe auch Praktikum!

7

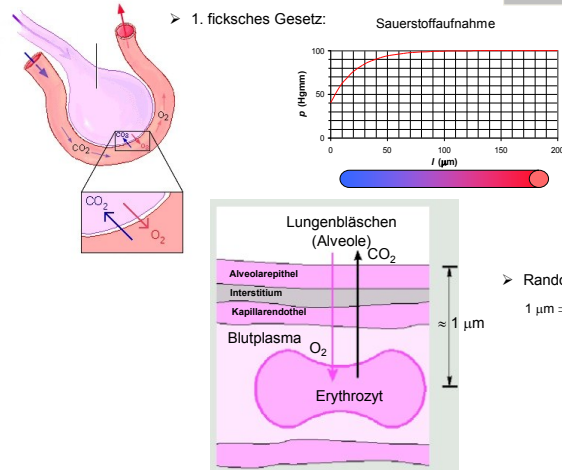
4. Diffusion als Random Walk



8

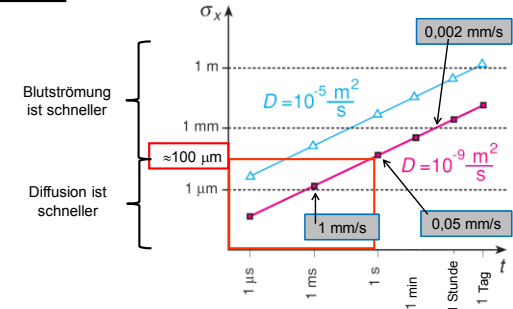
5. Anwendungen ▪ O₂/CO₂-Diffusion Lunge-Blut

Excel



▪ 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)



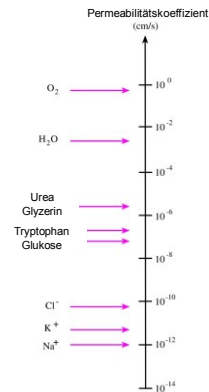
▪ Diffusion durch eine Membran (passiver Transport)

Für neutrale Teilchen:

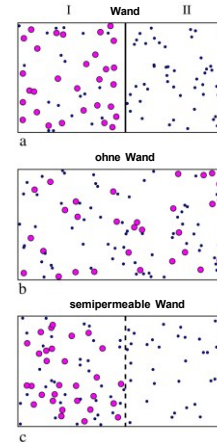
$$J_m = -D \cdot \frac{\Delta c}{\Delta x} = -D \cdot \frac{c_{m2} - c_{m1}}{d} = -p(c_{v2} - c_{v1})$$

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

Permeabilitätskoeffizient (m/s)

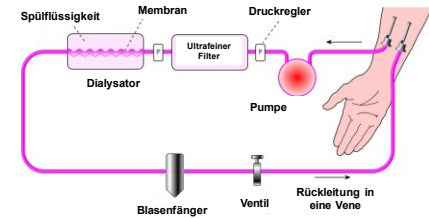


▪ Osmose



Van't Hoff-Gesetz:

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



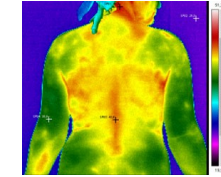
Analogie

	Was strömt?	Stärke?	Was treibt die Strömung?	Zusammenhang?
Ladungs-transport	q	$J_q = \frac{\Delta q}{A \cdot \Delta t}$	φ	$J_q = -\sigma \frac{\Delta \varphi}{\Delta l}$
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	$J_v = -D \frac{\Delta c}{\Delta x}$

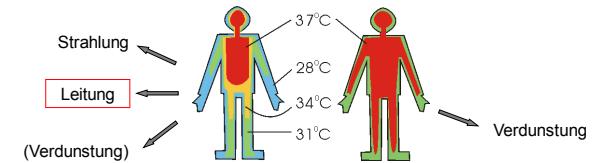
13

Wärmebildung und -abgabe

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

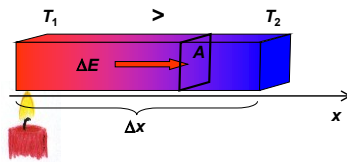


Umgebungstemperatur
20°C ↔ 35°C



14

IV. Wärmeleitung (Energietransport)



$$\frac{\Delta E}{A \cdot \Delta t} = -\lambda \frac{\Delta T}{\Delta x}$$



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

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

15

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

termo-dynamische Kraft
intensive Gr.

onsagersche Beziehung

* Im allgemeinen Fall μ

16