

# 11.1 Elektroosmotischer Effekt

$$\frac{c_{1,Na^+}}{c_{2,Na^+}} = \frac{c_{1,K^+}}{c_{2,K^+}} = \frac{c_{2,Cl^-}}{c_{1,Cl^-}}$$

... Gibbs-Donnan-Relation im Donnan-GG

# 11.2 Ionen-Pumpen

• Probleme: (i) Osmotischer Druck:

$$c_{2,tot} - c_{1,tot} \approx 25 \text{ mM} \xrightarrow{\times k_B T} - 6 \cdot 10^4 \text{ Pa} \rightarrow \text{Eukaryotische Zellen bursten}$$

dagegen: E. coli-Bakterien, Pflanzen, Algen, Pilze



→ Spannung → Festigkeit

(ii)  $Na^+$ -Anomalie → kein Donnan-GG

→ Ionenpumpen ≡ aktiver Transport nötig für stationäres Nicht-GG

• Hypothese der Ohmschen-Leitung:

(i) unterscheidet:  $V_i^N = -\frac{k_B T}{ze} \ln \frac{c_{2,i}}{c_{1,i}}$  [vgl. Gl. (11.1)]

Nernst-Potential

$\Delta V$  ... wirklicher Potentialabfall

→ Stromdichte:

$$j_{q,i} = ze j_i = g_i (\Delta V - V_i^N) \quad (11.5)$$

... Ohmsche Hypothese

$g_i$  ... Leitfähigkeit/Fläche Bsp:  $g_i = 5 \frac{1}{\Omega m^2}$

(ii) gültig nur nahe Donnan-GG:  $\Delta V \approx V_i^N$ ,  $g_i(c_{1,i}^{GG})$

(iii) sonst:  $j_{q,i} \sim (\Delta V - V_i^N)^n$  ... nichtlineare Terme

$$g_i(c_{1,i}, \Delta V)$$

(iv)  $g \leftrightarrow$  Permeabilität:  $P_s$   $j_i = P_s \Delta c$  ! (M.6)

(M.5) &  $\Delta V = 0$  & (M.1)  $= V_i^N$   
 (M.6) Übungen  $\rightarrow$   $g = \frac{P_s (ze)^2 c}{k_B T}$  (M.7)  $\Delta c \propto 0$

$g \propto c \rightarrow$  keine intrinsische Membrangröße

(v) Levi et al. (1948): radioaktive  $Na^+$ -Ionen z.B. für  $c_2 \rightarrow$  Strom beobachtbar  
 Hodgkin & Katz: Muskelzellen, fast Ohmsch  
 Tink fisd Axon:  $g_{K^+} \approx 25 g_{Na^+} \approx 2 g_{Cl^-}$  im GG (M.8)

Hinweis auf Ionen-Pumpen

Ussing & Zehman (1951): lebende Fröschlhaut:  $j_{Na^+} \neq 0$  für  $\Delta c = \Delta V = 0$

$\Rightarrow j_{Na^+} = \frac{g_{Na^+}}{e} (\Delta V - V_{Na^+}^N) + j_{Na^+}^P$  (M.9)

$\underbrace{j_{Na^+}^P}_{>0}$   
 Pumpstrom, von 2  $\rightarrow$  1  
 gespeist durch Stoffwechsel

Hodgkin & Katz:  $j_{K^+}^P < 0$

Exp.  $\rightarrow$  Pumpen-Hypothese:

(i) Energiequelle ATP (ii) $j_{Na^+}^P > 0, j_{K^+}^P < 0$ (iii) genauer: $3 Na^+ : 2 \rightarrow 1$ $2 K^+ : 1 \rightarrow 2$	Maschine mit enger Kopplung ... gekoppelt elektrogenische Pumpe	(M.10)
---	---	--------

Identifikation:

Skou (1957): Neuman von Krebs beiben

Pumpe = Enzym: ATPase

ATP-Hydrolyse  $\leftrightarrow Na^+, K^+$

Energiebilanz pro Zyklus:

$$\Delta F = 3 \times \left[ \underbrace{e (\Delta V - V_{Na^+}^N)}_{\substack{2 \rightarrow 1 \\ -60mV \quad 59mV}} \right] + 2 \times \left[ \underbrace{e (\Delta V - V_{K^+}^N)}_{\substack{1 \rightarrow 2 \\ -60mV \quad -75mV}} \right]$$

$115 meV$ 
 $15 meV$

$\Delta F = 375 meV = 14 k_B T$

ATP-Hydrolyse:  $\frac{20 \text{ kJ}}{6 \text{ kJ}} \rightarrow \text{W\u00e4rme}$

• Osmotische GG:  $c_{2, \text{Na}^+} < c_{1, \text{Na}^+}$

• Absch\u00e4tzung f\u00fcr  $\Delta V$ :

station\u00e4res Nicht-GG & Ladungsneutralit\u00e4t }  $j_{\text{K}^+}^{\text{P}} = -j_{\text{K}^+}^{\text{Ohm}} = -\frac{2}{3} j_{\text{Na}^+}^{\text{P}} = +\frac{2}{3} j_{\text{Na}^+}^{\text{Ohm}}$  (11.11)

(11.5) \u2192 \u00dcbung  $\Delta V = \frac{2g_{\text{Na}^+} V_{\text{Na}^+}^{\text{N}} + 3g_{\text{K}^+} V_{\text{K}^+}^{\text{N}}}{2g_{\text{Na}^+} + 3g_{\text{K}^+}}$  Tabella (11.1)  $-72 \text{ mV}$  (11.12)  
(11.8)  $g_{\text{K}^+} \approx 25g_{\text{Na}^+}$

(i)  $\Delta V(\text{real}) = -60 \text{ mV}$  Grund: Nichtlinearit\u00e4ten f\u00fcr  $\text{Na}^+$

(ii)  $g_{\text{K}^+} \gg g_{\text{Na}^+} \rightarrow \Delta V \approx V_{\text{K}^+}^{\text{N}} = -75 \text{ mV}$

(iii)  $j_{\text{Cl}^-}^{\text{P}} = 0, j_{\text{Cl}^-}^{\text{Ohm}} \approx 0$ , wegen  $\Delta V(\text{real}) \approx V_{\text{Cl}^-}^{\text{N}} = -59 \text{ mV}$

### 11.3. Mitochondrien als ATP-Fabriken

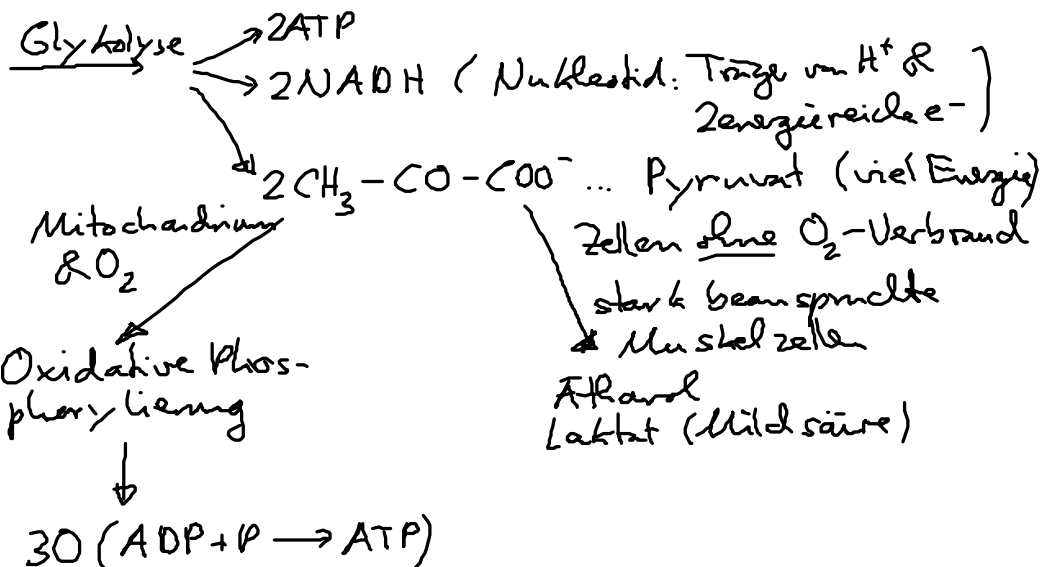
• Energieverbrauch:  $2 \cdot 10^{26}$  ATP-Molek\u00fcle/Tag  $\approx 160 \text{ kg} \rightarrow$  hohe Recycling rate  $\gg \frac{1}{5}$

• „moderner“ industrieller Proze\u00df

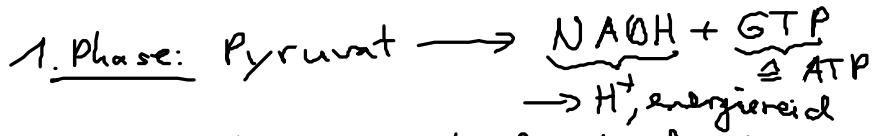
• hier: Nahrung  $\xrightarrow[\text{Erzeugung}]{\text{Energie}}$  Protonengradient  $\xrightarrow[\text{Synthase}]{\text{ATP-}}$  ATP  $\approx$  chemiosmotische Kopplung

#### 11.3.1 Chemische Prozesse & chemiosmotischer Mechanismus

• Nahrung: Fett & Zucker  $\rightarrow$  Glukose ( $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ )



- Mitochondrium:
- Oxidative Phosphorylierung:  
in der Matrix des Mitochondriums



2. Phase: chemiosmotischer Mechanismus: Mitchell (1961)

(i) Energieerzeugung:  
chem. Energie (NADH)  $\xrightarrow[\text{H}^+]{\text{Pumpe}}$  Protonengradient  
über innere Membran  
 $\Delta\mu_{\text{H}^+} = -8.8 \text{ kJ}_r$

(ii) Übertragung:  $\Delta\mu_{\text{H}^+} < 0$  entlang innere Membran  
= elektr. Isolator

(iii) Arbeit: ATP-Synthase  $\rightarrow$  ATP

(iv) Bilanz: Glukose  $\rightarrow$  32 ATP, GTP

- ATP-Synthase
- chemiosmotische Kopplung

## 12 Nerven-Impulse

- Neuronen: Weiterleitung von Information  $\rightarrow$  Spannungs-Impulse wandern entlang Axon
- Problem: ohmsche Verluste
- Lösung: Nichtlinearitäten (vgl. Solitone auf Wasseroberfläche)

### 12.1 Phänomenologie: Elektrophysiologie des Axons

- Aufgaben eines Neurons:
- Spannungs-Impuls entlang Axon:
  - (i) schwache Anregung:  $\rightarrow$  Dämpfung innerhalb einiger mm
  - (ii) starke Anregung: jenseits Schwelle  
 $\rightarrow$  starkes Aktions-Potential (unabhängig von Stimuli)  
 $\cong$  Nerven-Impuls  
 $\rightarrow$  keine Dämpfung