

11.1 Elektroosmotischer Effekt

$$\Delta V = V_2 - V_1 = - \frac{k_B T}{ze} \ln \frac{c_2}{c_1} \quad (11.1)$$

Nernst-Relation

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

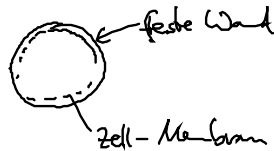
... Gibbs-Donnan-Relation
im Donnan-GG

11.2 Ionen-Pumpen

• Probleme: (i) Osmotischer Druck:

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

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



→ Spange → Festigkeit

(ii) Na^+ -Anomalie → kein Donnan-GG

⇒ Ionen-Pumpen = aktiver Transport nötig für stationäres Nicht-GG

• Hypothese der Ohm'schen Leitg.: → aktive Kraft

(i) Unterscheide: $V_i^N = - \frac{k_B T}{ze} \ln \frac{c_{2i}}{c_{1i}}$ (vgl. Gl. (11.1))
... Nernst Potential

ΔV ... wirklicher Potentialabfall

→ Stromdichte: $j_{q,i} = z_i e j_i = g_i (\Delta V - V_i^N)$ (11.5)

... Ohm'sche Hypothese

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

(ii) gültig nur wale Donnan-GG: $\Delta U \approx V_i^N$, $g_i (c_{i,j}^{GG})$

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

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

$$\longrightarrow g = \frac{P_s (ze^2)c}{k_B T} \quad (M.7) \quad \text{für } \Delta c \approx 0$$

$g \propto c \rightarrow$ keine intrinsische Membrangröße

(v) Messung von g_i

Levi et al. (1948): radioaktive Na^+ -Ionen z.B. für c_2

Hodgkin & Katz: Muskelzellen
fest Ohmsch \rightarrow Strom beobachtet
für angelegtes ΔU

Tinkauf: Axon: $g_{K^+} \approx 25 g_{Na^+} \approx 2 g_{Cl^-}$ im GG (M.8)

• Hinweis auf Ionen-Pumpen:

Ussing & Zolm (1951): lebende Frostdaube: $j_{Na^+} \neq 0$ für $\Delta c = \Delta U = 0$

$$\Rightarrow j_{Na^+} = \underbrace{\frac{g_{Na^+}}{e} (\Delta U - V_{Na^+}^N)}_{> 0} + j_{Na^+}^P \quad (M.9)$$

Pumpstrom, von 2 \rightarrow 1
gespeist durch Stoffwechsel

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

Exp. \rightarrow Pumpenhypothese

(i) Energiequelle ATP

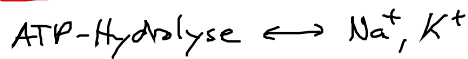
(ii) $j_{Na^+}^P > 0$, $j_{K^+}^P < 0$... gekoppelt } Maschine mit
angew. Koppelfg

(iii) genauer: $3 Na^+$: $2 \rightarrow 1$
 $2 K^+$: $1 \rightarrow 2$

(M.10)

- Identifikation:
Stern (1957): Neuronen von Krebsläusen

Pumpe \equiv Enzym: ATPase



- Energiebilanz/pro Zyklus:

$$\Delta F = 3 \times \left[\underbrace{e (\Delta U - V_{\text{Na}^+}^N)}_{\substack{\text{2} \rightarrow \text{1} \\ \text{15 meV}}} \right] + 2 \times \left[\underbrace{e (\Delta U - V_{\text{K}^+}^N)}_{\substack{\text{1} \rightarrow \text{2} \\ \text{15 meV}}} \right]$$

$$\Delta F = 375 \text{ meV} = 14 k_B T_r$$

$$\text{ATP-Hydrolyse: } 20 k_B T_r$$

$$\frac{6 k_B T_r \rightarrow \text{W\u00e4rme}}$$

- Osmotisches GG: $c_{2, \text{Na}^+} < c_{1, \text{Na}^+}$ [2 gel\u00f6ste Stoffe in Zelle]

- Absch\u00e4tzung ΔU : (Membranpotential)

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

$$\longrightarrow \Delta U = \frac{2g_{\text{Na}^+} V_{\text{Na}^+}^N + 3g_{\text{K}^+} V_{\text{K}^+}^N}{2g_{\text{Na}^+} + 3g_{\text{K}^+}} \stackrel{\substack{\text{Tabelle} \\ (11.1)}}{=} \stackrel{(11.8)}{=} -72 \text{ mV} \quad (11.12)$$

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

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

(iii) $j_{\text{Cl}^-}^P = 0, j_{\text{Cl}^-}^{\text{ohm}} \approx 0$, wegen $\Delta U \approx V_{\text{Cl}^-}^N = -53 \text{ mV}$

11.3 Mitochondrien als ATP-Fabriken

12 Nerven-Impulse

- Nerven: Weiterleitung von Informationen \longrightarrow Spang-Impulse
wunder entlang Axon
Problem: ohmsche Verluste
L\u00f6sung: Nichtlinearit\u00e4ten (vgl. Solitonen auf Wasseroberfl\u00e4che)

12.1 Phänomenologie

- Aufgaben eines Neurons:
- Spang-Impulserregung Axon:
 - (i) schwache Anregung: \rightarrow Dämpfung innerhalb einiger mm
 - (ii) starke Anregung: jenseits Schwelle
 - \rightarrow starkes Axon-Potential (unabhängig von Stimuli)
 - $\hat{=}$ Nerven-Impuls
 - \rightarrow keine Dämpfung

12.2 Zell-Membran als elektr. Netzwerk: Telegraphen-Gl.

- passive/ohmsche Membran
 - Membranstück: Fläche A
 - (i) eine Ionenspezies: \rightarrow Widerstand $R_i = \frac{1}{g_i A}$

Strom: $I_i = j g_i A$

Nenn-Spann: V_i^N

}

Ersatzschaltbild
 - (ii) mehrere Ionenspezies: Ersatzschaltbild
- vernachlässige Ionenpumpen: $V^0 \dots$ Membran-Potential kurz nach Abschalten der Ionenpumpen
- Rel.zeit (Nernst-GG) \Rightarrow Ausbreitungszeit (Nerven-Impuls)

$$V^0? \quad \sum_i j_i = 0 \quad \rightarrow \quad \sum_i g_i (V^0 - V_i^N) = 0$$

$$\rightarrow \quad \boxed{V^0 = \frac{\sum_i g_i V_i^N}{g_{\text{tot}}}, \quad g_{\text{tot}} = \sum_i g_i} \quad (12.1)$$

Werte \rightarrow $V^0 \approx -67 \text{ mV}$ $(\approx -72 \text{ mV})$
 (s. 11.12)
 $g_{\text{tot}} = 5 \frac{1}{\Omega \text{m}^2}$

(iii) Kapazität: $C = A C_0$, $C_0 \approx 10^{-2} \frac{\text{F}}{\text{m}^2} \approx \frac{1 \mu\text{F}}{\text{cm}^2} \dots$ Membranparameter

$$Q = CV \rightarrow I = C \frac{dV}{dt} \quad (12.2)$$