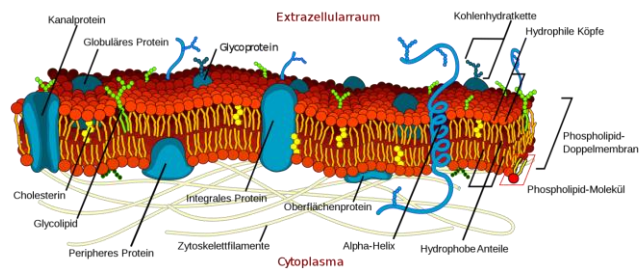


Grundlagen der Erregungsprozesse

— Ruhepotential, Aktionspotential
— psychophysikalische Gesetze

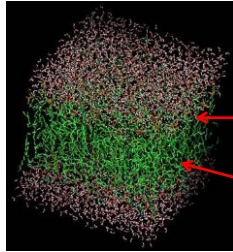
Aufbau der biologischen Membranen



<http://de.wikipedia.org/wiki/Biomembran>

- ✓ Lipid Doppel-Schicht (hauptsächlich Phosphoglyceride, Sphingolipide und Cholesterin — Kopfgruppe, Kohlenwasserstoffkette)
- ✓ Proteine (integrale-, oberflächen-, glyco-)
- ✓ Kohlenhydrate
- ✓ weitere Moleküle (neutrale und geladene)
- ✓ Ionen (gebundene, diffusile)

Lipid-doppelschicht:



amphiphile Moleküle

- ✓ Kopfgruppen (hydrophile):
 - geladene (pos., neg.)
 - neutrale (u.a. zwitterionische)
- ✓ Kohlenwasserstoffkette (hydrophobe)
 - gesättigt
 - ungesättigt

Idealität:

- ✓ homogene Verteilung der Lipidmoleküle an beiden Seiten
- ✓ Konsequenz: kein elektrisches Potential zwischen den zwei Seiten

Realität:

- ✓ inhomogene Verteilung der Lipidmoleküle an beiden Seiten;
- ✓ neutrale/geladene Lipidmolekülen tragen asymmetrisch zum Aufbau der Doppelschicht bei;
- ✓ Konsequenz: elektrische Potentialdifferenz wegen Lipidasymmetrie zwischen den zwei Seiten

Eigenschaften der Lipid-doppelschicht/Membranen:

- ✓ Semipermeabilität
 - weist gegen unterschiedlichen Molekülen unterschiedliche Durchlässigkeit auf;
- ✓ binden unterschiedliche Ionen mit unterschiedlichen Stärken an, hängt von Art der Lipide ab (Differenz an gebundenen Ionen zwischen innerer und äußerer Seiten);
- ✓ binden/inkorporieren unterschiedliche Proteine
- ✓ Raft-Struktur (Anreicherung, besonders, von Proteinen in speziellen Domänen abhängig von Lipidzusammensetzung)
- ✓ Fluid-, Gel-Zustand in Domänen
- ✓ **Anwesenheit von Proteinen mit spezieller Transporteigenschaften (für neutralen und geladenen Moleküle)**
- ✓ **Proteine sind Polyelektrolyte — der Dissoziationsgrad hängt von pH und Konzentration der anderen Ionen (d.h. Ionenstärke) ab.**

Konsequenz:

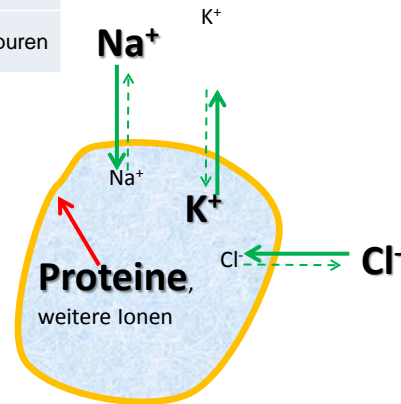
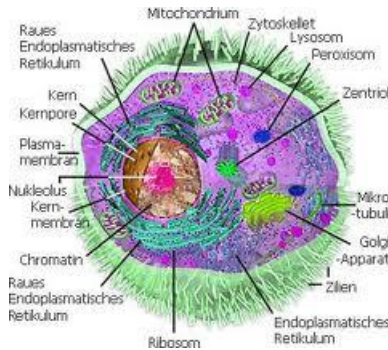
asymmetrische Ionenverteilung zw. innerer und äußerer Seite

Konsequenz:

asymmetrische Ionenverteilung zw. innerer und äußerer Seite; z.B:

Konzentration (mmol/l)	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	Proteine
intrazelluläre	7 — 11	120 — 155	4 — 7	150
extrazelluläre	144	4 — 5	120	in Spuren

*Was ist die Quelle eines Potentialunterschiedes?
Elektroneutralität MUSS im Aussen und Inneren herrschen!*



Messung des Ruhepotential (im Allgemeinen Zellenpotential)

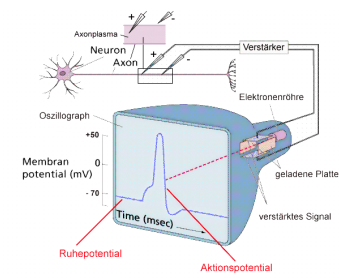
Messelektroden:

- differente — das Elektrodenpotential **hängt** von seiner Umgebung **ab**;
- indifferente — das Elektrodenpotential ist **unabhängig** von seiner Umgebung

häufigste Messanordnung:

- ✓ indifferente Elektrode Außen
- ✓ differente Elektrode im Inneren

z.B.: monophasisches Aktionspotential (Aktionspotential als Ausschlag in nur eine Richtung)



<http://www.egbeck.de/skripten/12/bs1-2-28.htm#ik>

Einfache Beschreibung des Ruhepotential:

Elektrochemisches Gleichgewicht zwischen den zwei Seiten:
beschrieben durch Differenz der freien (Gibbs) Enthalpie:

$$\Delta G = 0 = \sum_j (\mu_{intra,j} - \mu_{extra,j})$$

Summe für Differenzen von unterschiedlichen (j) Ionen, Molekülen

$$\mu_{intra,j} = \mu_j^0 + RT \ln(c_{intra,j}) + z_j F \varphi_{intra}$$

z: Wertigkeit mit Vorzeichen der Ladung;
 φ : elektrisches Potential;

Bemerkung:

- es gibt mehreren Ionen, Moleküle (der laufende Index ist j)
- φ kann für den intrazellulären -, oder extrazellulären Raum (φ_i oder φ_e) je einen Wert aufweisen.

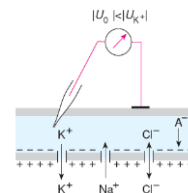
Vereinfachung → Nernst-Gleichung
für ein Ion:

$$\Delta \varphi = \varphi_{intra} - \varphi_{extra} = -\frac{RT}{zF} \ln \left(\frac{c_{intra}}{c_{extra}} \right)$$

$$\Delta \varphi = -\frac{RT}{zF} \ln \left(\frac{c_{intra}}{c_{extra}} \right) \quad \text{oder} \quad \Delta \varphi = -\frac{61.54 \text{ [mV]}}{z_e} \lg \left(\frac{c_{intra}}{c_{extra}} \right)$$

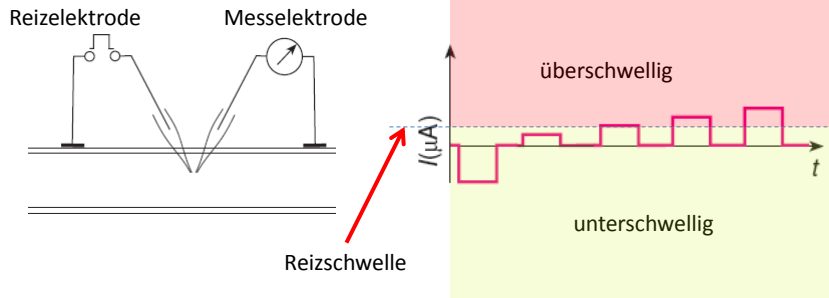
Konzentration (mmol/l)	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	Proteine
intrazelluläre	7 – 11 (9)	120 – 155 (138)	4 – 7 (5.5)	150
extrazelluläre	144	4 – 5 (4.5)	120	in Spuren (5)
$\Delta \varphi$ (mV)	74	-91	-82	9

Auf Grund Messungen eine bessere Übereinstimmung ergibt sich, wenn die unterschiedlichen Permeabilitäten der Membran gegen unterschiedlichen Ionen auch berücksichtigt wird: Goldman-Hodgkin-Katz-Gleichung

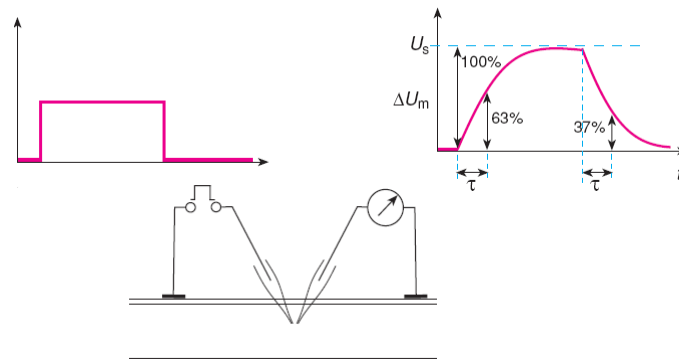


Erregung einer Zelle — lokale Änderungen, Aktionspotentiale

Messanordnung



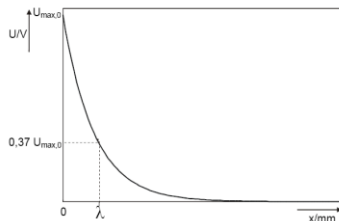
lokale Antwort — unterschwellige Reize



- $U=U(x,t)$ → $U=U(x|t_{fix})$ — Messung zu der selben Zeit, bei unterschiedlichen Punkten einer Zelle (Ortabhängigkeit)
- $U=U(t|x_{fix})$ — Messung an dem selben Ort zu unterschiedlichen Zeitpunkten (Zeitabhängigkeit)

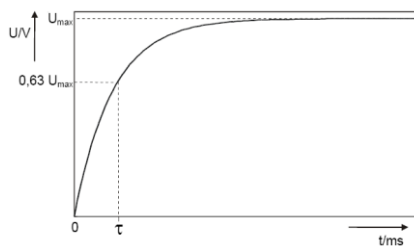
(lokale) Antwort — charakterisierung

Spannungsabfall längs einer Zelle



$$U(x|t) = U_{max,o} \cdot e^{-\frac{x}{\lambda}}$$

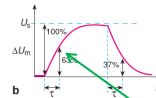
λ : Längskonstante



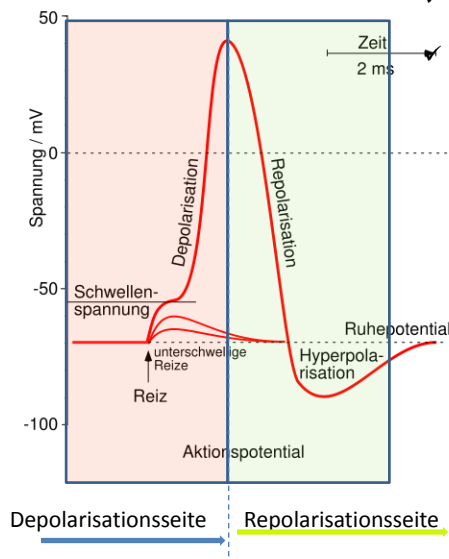
Spannungsverlauf beim Anfang der Erregung

$$U(t|x) = U_{max,o} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right)$$

τ : Zeitkonstante



Aktionspotential

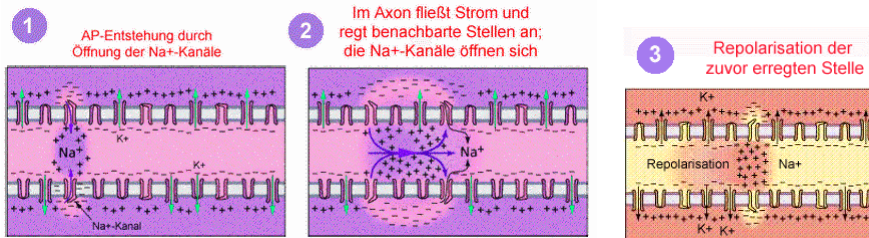


Refraktärzeit:

- ✓ absolut — dauert kurz nach der AP-Spitze, die Zelle ist überhaupt nicht erregbar
- ✓ relativ — mit ausreichender! Reizstärke ist die Zelle erregbar (größer als die aktuelle Spannung)

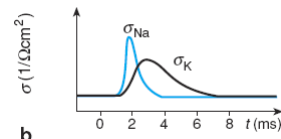
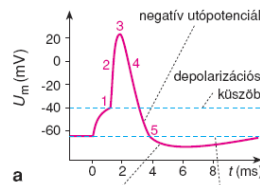
<http://de.wikipedia.org/wiki/Aktionspotential>

Ablauf, Ausbreitung eines Aktionspotentials



Prozesse während des APs.

- 1) Öffnung der schnellen Na⁺-Kanäle,
- 2) Öffnung der langsamen spannungsgesteuerten K⁺-Kanäle,
- 3) Inaktivierung eines Anteils der Na⁺-Kanäle,
- 4) weitere K⁺-Ausströmung, vollständige Inaktivierung der Na⁺-Kanäle,
- 5) Schließen der K⁺-Kanäle.



Aktionspotential — Charakterisierung

Form hängt von

- ✓ Art der Lebewesen (Tiere, Pflanzen,...)
- ✓ Zellenart
- ✓ Tierart
- ✓ Gewebeart,
- ✓ physiologischer Zustand,
- ✓

Charakterisierung der Fortpflanzung:

λ — Längskonstante

τ — Zeitkonstante

Zusammenhang mit Reizstärke

- die Form, d.h. Amplitude und Dauer ist **unabhängig** von Reizstärke
- die **Frequenz** des APs hängt von der Reizstärke ab: je größer die Reizstärke ist, umso größer ist die Frequenz (bedeutet aber keine lineare Proportionalität immer)

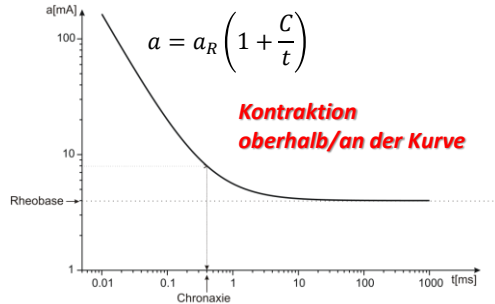
Re-Aktion eines Muskel-Nerven Preparates auf Erregung

Im Falle eines Muskel-Nerven Präparates kann eine Erregung durch einen einzelnen Reiz zu einer Kontraktion als Antwort der Muskelzelle auf den elektrischen Reiz führen. Die Möglichkeit der Erzeugung einer Kontraktion hängt von Reizstärke und der Reizdauer ab.

Die Darstellung des Zusammenhanges von Reizstärke und Reizdauer ergibt die Reizstärke-Reizzeit-Kurve (auch I-t-Kurve oder Schwellenstrom-Nutzzeit-Charakteristik genannt).

Reizstärke-Reizzeit-Kurve

!Die dargestellte Kurve ist gültig für Rechteckimpulse!



Psychophysische Gesetze

Zusammenhang zwischen Reizstärke (Φ) und der entsprechenden psychischen Größe (Ψ) einer Sinnesmodalität

- Sinnesmodalität — die Empfindungskomplexe wie Sehen, Hören, Riechen, Schmecken und Fühlen
- Ψ : beschreibt die wahrgenommene Amplitude/Größe nach einer Reizeinwirkung

Was kann untersucht werden?

- ✓ **Wahrnehmungsschwelle** (Absolutschwelle) — wie stark die Reizung eines gegebenen Sinnesorgans sein muss, damit eine Reaktion (Wahrnehmung) erfolgt;
- ✓ **Reizunterscheidung** — wie verschieden müssen zwei Reize sein, damit sie in einem gegebenen Kontext als unterschiedlich empfunden werden;
- ✓ **Skalierung** — in der untersucht wird
 - ob eine Person einen Reiz erkannt hat
 - ob sie schätzen kann, wie stark der Reiz ist

Welche Eigenschaften eines physikalischen Reizes kann wahrgenommen werden?

z.B: Licht: Intensität, Farbe; Ton: Intensität, Frequenz

Physikalische und psychische Charakterisierung der Reize

Wahrnehmungsschwelle:

Hören — $I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$ (bei 1000 Hz)

Sehen — $I_0 = 10^{-9} \text{ lux (=W/m}^2)$ (bei gelbgrünen 555 nm Licht)

Reizunterscheidung — Webersches Gesetz:

ein Sinnesorgan ab einem bestimmten Intensitätsbetrag eine Veränderung registriert (differentielle Wahrnehmbarkeitsschwelle)

$$\frac{\Delta\Phi}{\Phi} = k \quad \text{Webersches Gesetz}$$



k — Koeffizient; hängt von Modalität ab

- z.B.: für Helligkeitswahrnehmung $k=0,079$
- für Tonwahrnehmung $k=0,048$
- Wahrnehmung von elektrischem Stromschlag $k= 0,013$

Zusammenhang zw. Reizstärke und Empfindungsstärke — Fechnersches Gesetz:

$$\Delta\Psi \approx \frac{\Delta\Phi}{\Phi} \quad \text{Differential-Form: — Bedeutung}$$



$$\Psi = k \cdot \lg \frac{\Phi}{\Phi_0} \quad \text{Integral-Form: — Bedeutung}$$

Zusammenhang zw. Reizstärke und Empfindungsstärke — Stevens-Gesetz:

$$\frac{\Delta\Psi}{\Psi} \approx \frac{\Delta\Phi}{\Phi} \quad \text{Differential-Form: — Bedeutung}$$

$$\Psi = k \cdot \left(\frac{\Phi}{\Phi_0} \right)^m \quad \text{Integral-Form: — Bedeutung}$$



Charakterisierung der Tonwahrnehmung — Skalierung

