

Grundlagen der Erregungsprozesse

Ruhepotential
Aktionspotential
~~psychophysikalische Gesetze~~

Bioelektrische Erscheinungen: Einführung

- Bioelektrische Erscheinungen:
 - Ruhepotential (Potential des intrazellulären Raumes in Bezug auf den extrazellulären Raum)
 - Aktionspotential (Änderung des Ruhepotentials während des Reizes)

Messung des Aktionspotentials an der Körperoberfläche:

- EKG
- EEG
- EMG

Zusammenhang zwischen der Reiz und Eigenschaften des Aktionspotential => Wahrnehmung:

Psychophysikalische Gesetze:

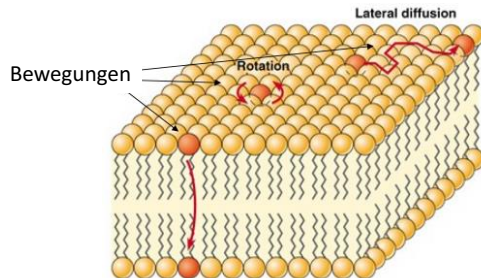
- Weber-Fechner Gesetz
- Stevens Gesetz

Bioelektrische Erscheinungen: Membrane

Membrane spielen eine große Rolle bei bioelektrischen Erscheinungen

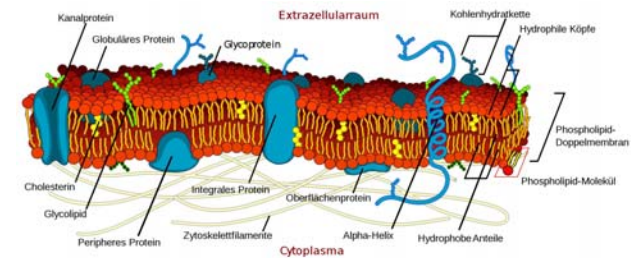
Aufbau der Membrane:

Lipid Doppelschicht



+ Proteine =

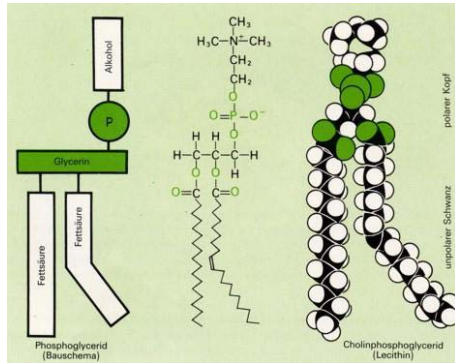
Aufbau der biologischen Membranen



<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)

Lipide



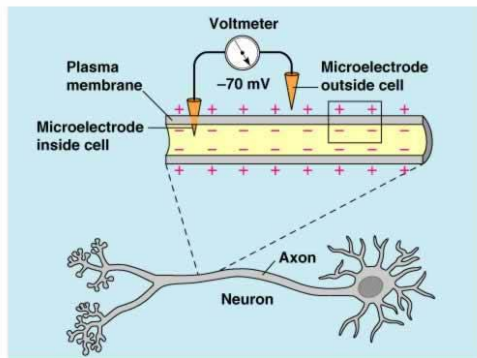
amphiphile Moleküle

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

Eigenschaften der 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.**

Messung des Ruhepotentials (Zellenpotential)



©Addison Wesley Longman, Inc.

Elektroden:
Kapillaren die mit
KCL Lösung gefüllt sind.

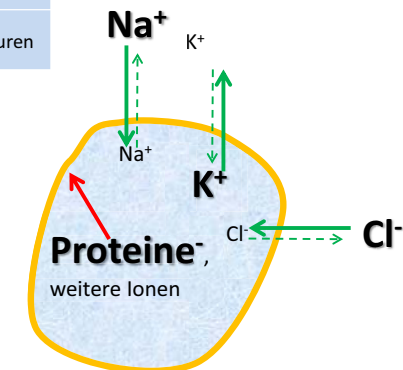
Asymmetrische Ionenverteilung zw. innerer und äußerer Seite

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

Triebkräfte:

1. Thermodynamischer Effekt:
Ausgleich der Konzentrationen
2. Elektrische Kraft auf Ionen

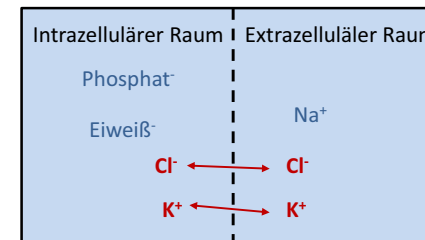
Diese wirken gegeneinander!



Was ist die Ursache des Membranpotentials;

- Asymmetrische Verteilung der Ionen an beiden Seiten der Membrane:
 - Hohe K^+ und niedrige Na^+ Konzentration in dem Inneren der Zelle
- Die Na/K Pumpe transportiert die Na^+ Ionen nach Außen, die K^+ Ionen nach Innen.
- Selektive Membranpermeabilität:
 - Permeabilität von K^+ Ionen ist viel höher als für Na^+ Ionen
- Anwesenheit der negativ geladene Proteine und Nukleinsäure in der Intrazellulären Raum

Einfache Beschreibung des Ruhepotentials : Donnan Modell



Immobilis und
diffundierbare
Ionen

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

Mathematische/Physikalische Ableitung des Ruhepotentials beim Donnan Gleichgewicht:

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:

Vereinfachung → Nernst-Gleichung
für ein Ion:

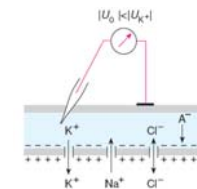
$$\Delta\varphi = \varphi_{intra} - \varphi_{extra} = -\frac{RT}{zF} \ln \left(\frac{c_{intra}}{c_{extra}} \right)$$

- 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.

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

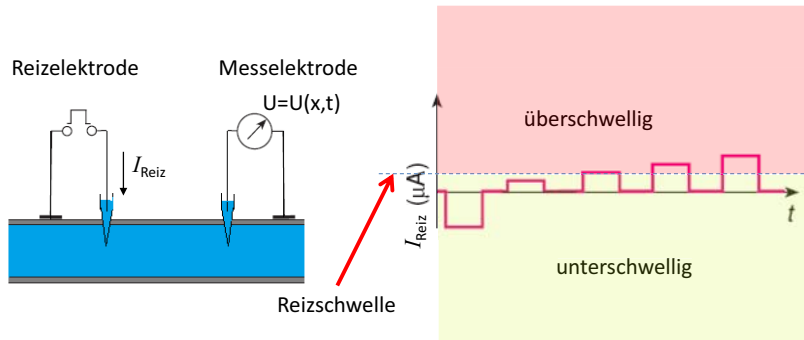
Konzentration (mmol/l)	Na^+	K^+	Cl^-	Proteine
intrazelluläre	7 – 11 (9)	120 – 155 (138)	4 – 7 (5.5)	150
extrazelluläre	144	4 – 5 (4.5)	120	in Spuren (5)
$\Delta\varphi (mV)$	74	-91	-82	9

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



Siehe in 2. Semester beim Thermodynamik!

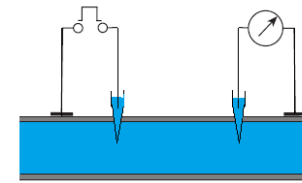
Erregung einer Zelle: lokale Änderungen und Aktionspotentiale



$U=U(x,t)$

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

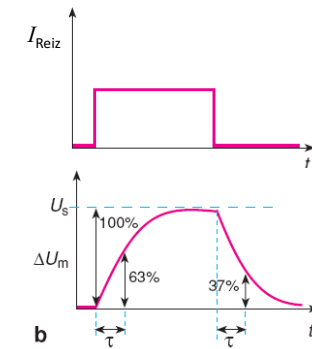
Unterschwellige Reize, Lokale Antwort 1. zeitlicher Ablauf



Spannungsverlauf beim Anfang der Erregung

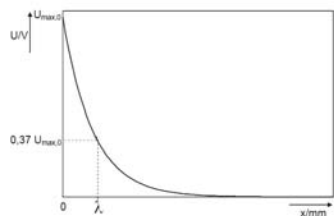
$$U(t|x) = U_{\text{max},o} \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$$

τ : Zeitkonstante



siehe RC Kreis !

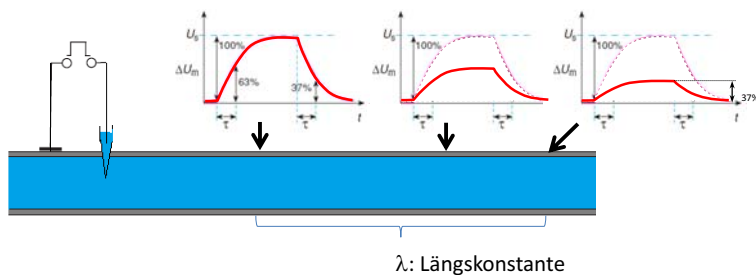
Unterschwellige Reize, Lokale Antwort 2. räumlicher Ablauf



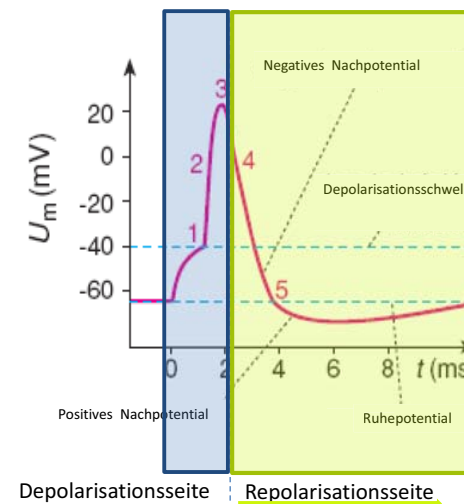
Spannungsabfall längs einer Zelle

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

λ : Längskonstante



Überschwellige Reize, Aktionspotential

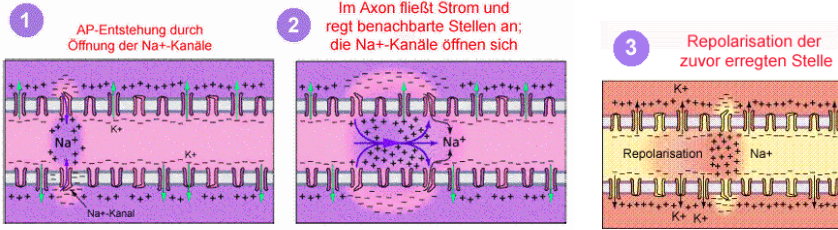


Refraktärzeit:

- ✓ 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)

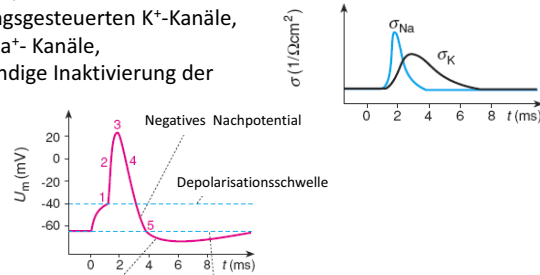
<http://de.wikipedia.org/wiki/Aktionspotential>

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.



Form hängt von

- ✓ Zellenart
- ✓ Tierart
- ✓ Gewebeart,
- ✓ physiologischer Zustand,
- ✓

Charakterisierung der Fortpflanzung:

λ — Längskonstante

τ — Zeitkonstante

Zusammenhang mit Reizstärke

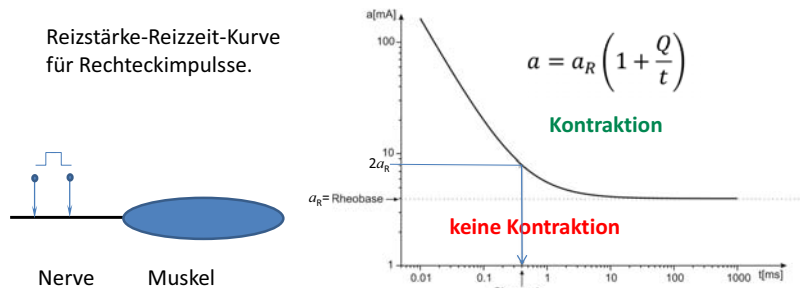
- die Form, d.h. Amplitude und Dauer ist **unabhängig** von Reizstärke
- die **Frequenz** des APs hängt von der Reizstärke ab: je größer die Reizstärke ist, umso größer ist die Frequenz (bedeutet aber keine lineare Proportionalität immer)

Re-Aktion eines Muskel-Nerven Präparates 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 für Rechteckimpulse.



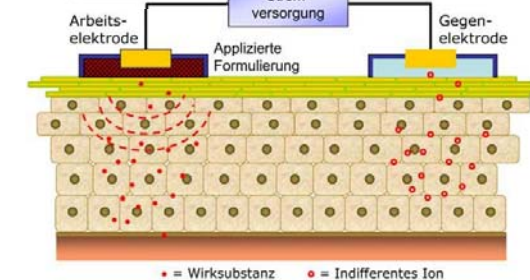
Elektrische Methoden in der Therapie

Galvanisation

verbesserte Durchblutung
Gleichstrom



Iontophorese



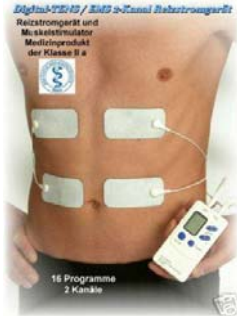
Defibrillator

Impulsbetrieb



Reizstromtherapie

unterschiedliche Reizformen



Elektrochirurgie

Stromdichte unterscheidet sich wesentlich unter Schneide- und Hilfselektroden.

