

Grundlagen der Erregungsprozesse.

Ruhepotenzial.

Balázs Kiss

kissb3@gmail.com

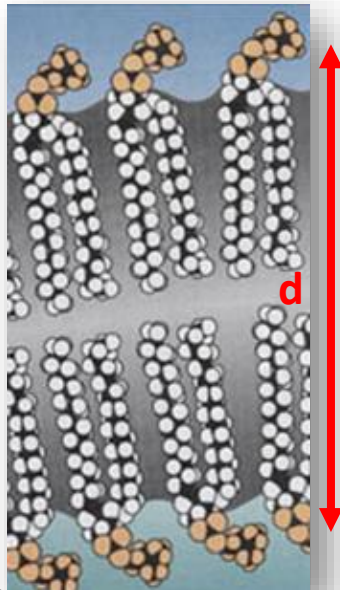
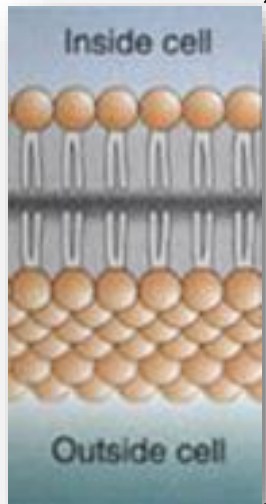
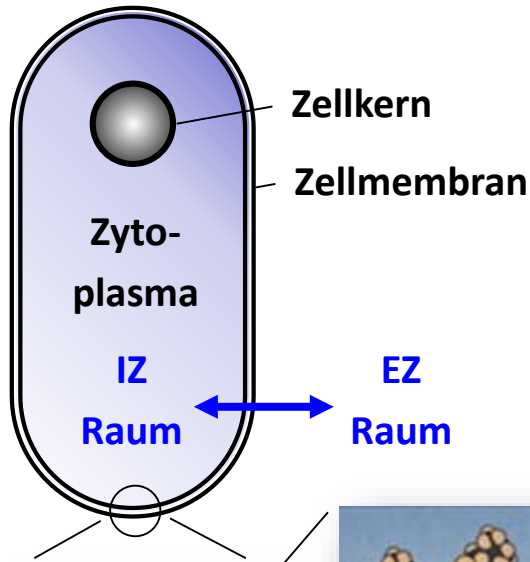


**KISSLAB - Myofilament-Mechanobiophysik Forschungsgruppe,
Semmelweis Universität,
Institut für Biophysik und Strahlenbiologie.**

09. Mai 2025

Physikalische Eigenschaften der Membran

lebende Zelle



- **nichtkovalente, kooperative Struktur:** Phospholipid-Doppelschicht
- **dünn, geschichtet:** $d \sim 5 \text{ nm}$
- **asymmetrisch:** die zwei Seiten der Membran sind unterschiedlich.
- **Permeabilität (p):** nicht durchlässig für Ionen, durchlässig für Wasser.

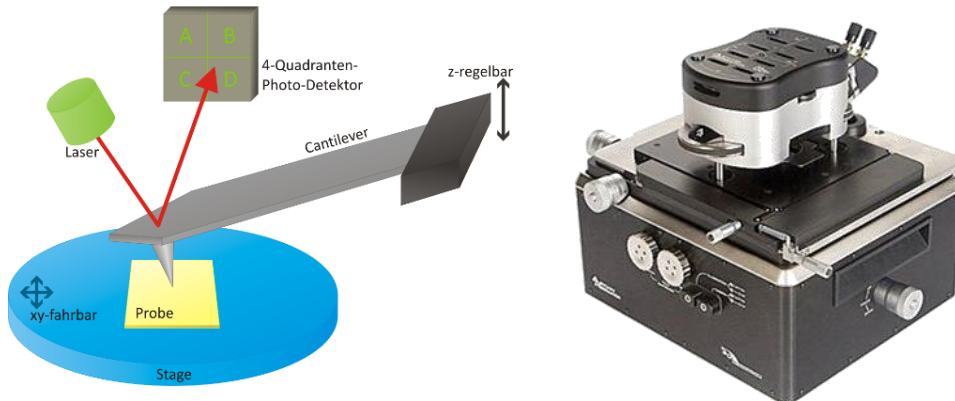
$$J_m = -p_m \cdot K(c_{w2} - c_{w1}) = -p(c_{w2} - c_{w1})$$

- **Fluidität:** Schmelztemperatur (T_m).
- **Laterale Diffusion:** Laterale Bewegung von Lipid- und Eiweißmolekülen.
- **Flip-flop:** Ortswechsel von Phospholipiden von einer Seite der Lipiddoppelschicht zur anderen. (unwahrscheinlich)

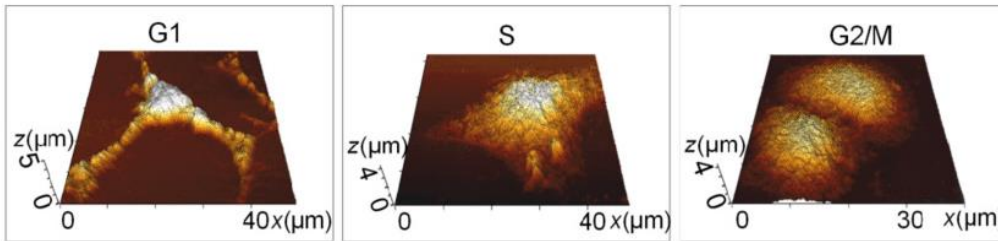
Untersuchungsmethoden der Zellmembran 1.

Morphologie

AFM (Rasterkraftmikroskopie)



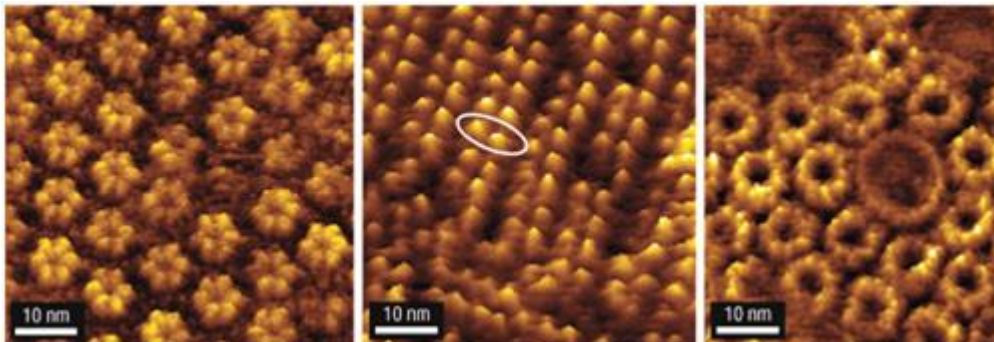
Zellzyklusabhängige Morphologie / Membraneigenschaften



Gap Junctions

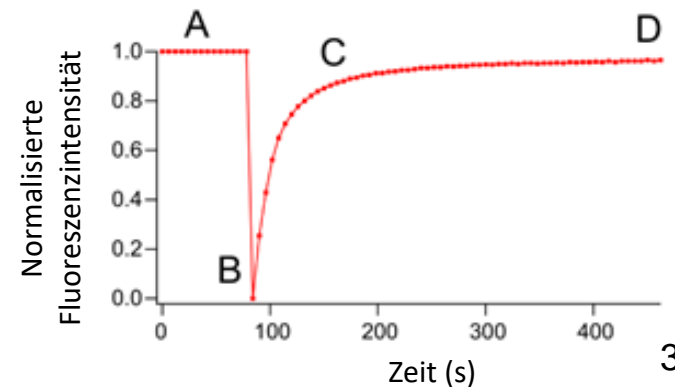
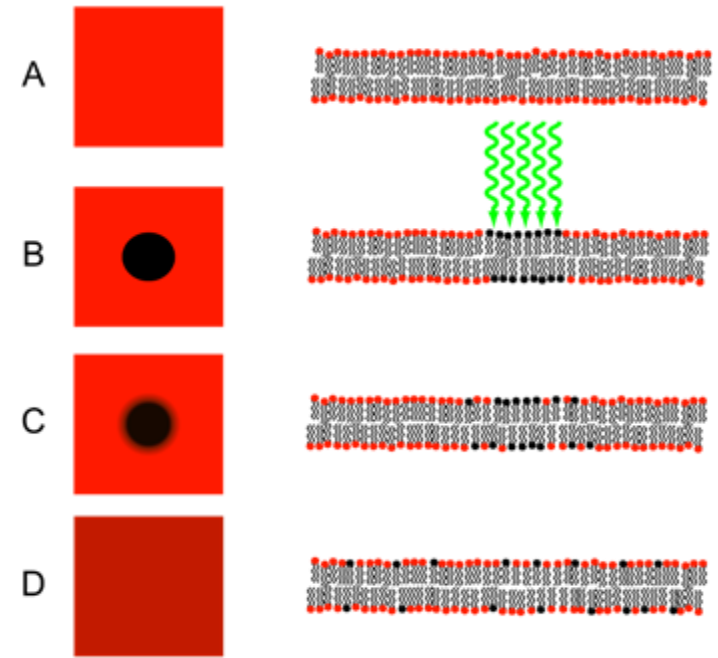
Rhodopsin

Lichtsammelkomplex



Dynamik

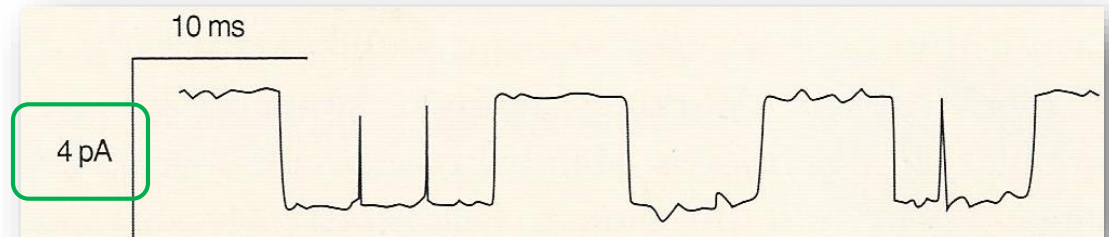
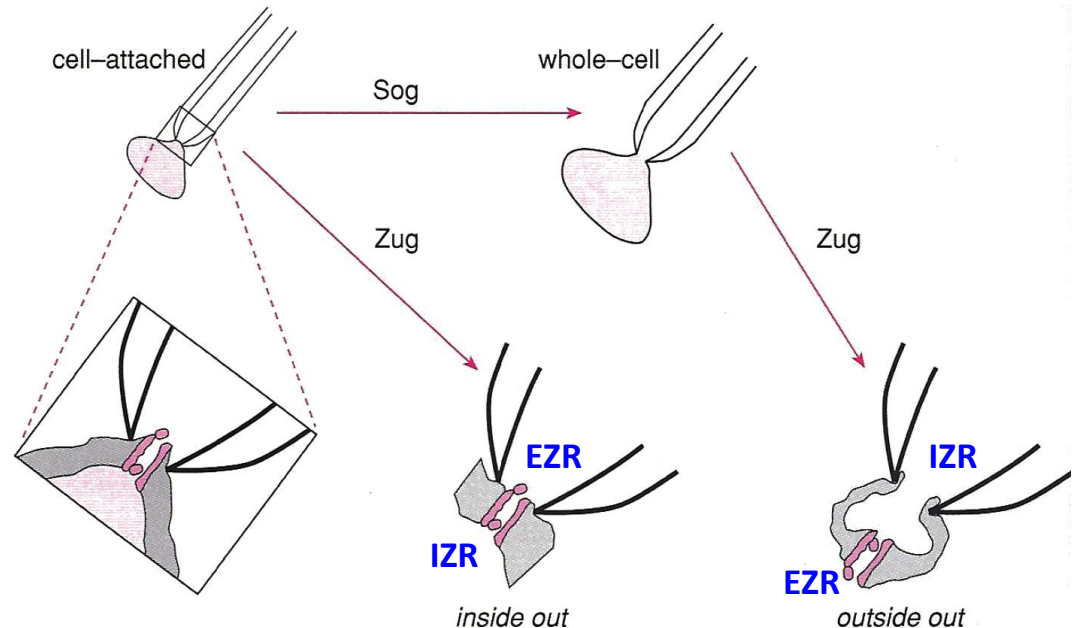
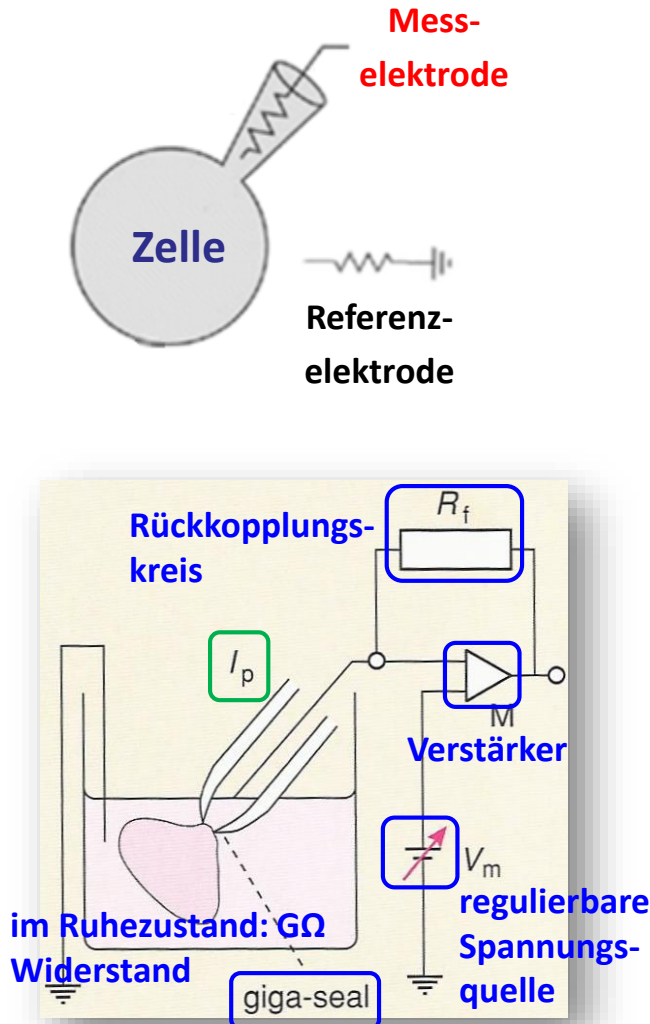
FRAP (Fluorescence Recovery After Photobleaching)



Untersuchungsmethoden der Zellmembran 2.

Biophysik

Patch Clamp, Voltage Clamp

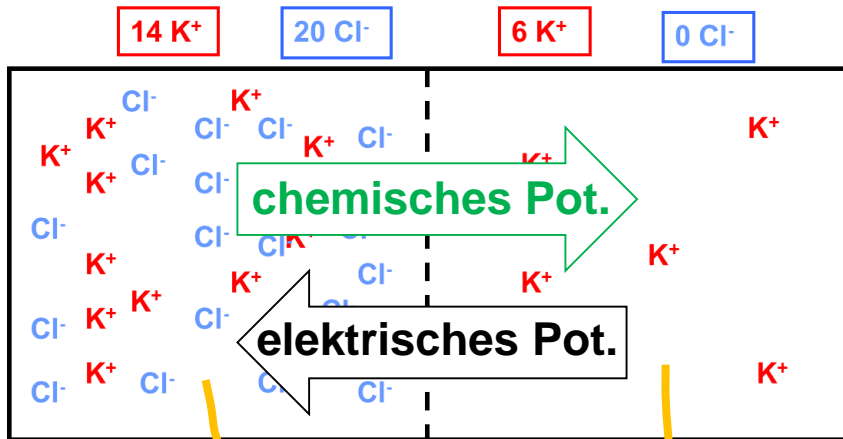
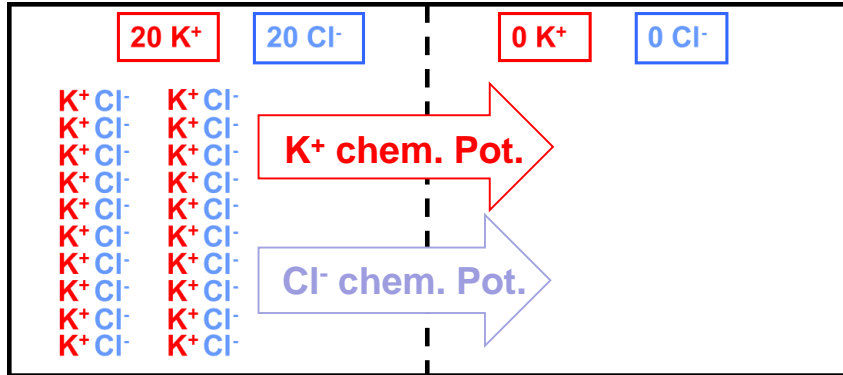


K⁺-Strom in einer humanen peripheren Lymphozyt

Passive Diffusion von Ionen durch die Membran

Sei die Membran nur für die K^+ Ionen durchlässig ($p_{Cl^-} = 0$).

a.k.a molare freie Enthalpie



Chemisches Potenzial: μ

$$\mu = \mu_0 + RT \cdot \ln(c)$$

μ_0 : standard chemisches Potenzial

Beim Gleichgewicht:

- Konzentrationsunterschied
- elektrische Spannung zwischen der zwei Raumteile.
- das chemische und das elektrische Potenzial sind gleich groß aber entgegengerichtet.

Elektrochemisches Potenzial: μ_e , [J/mol]

$$\mu_e = \underbrace{\mu}_{\text{chemisches}} + \underbrace{zF\varphi}_{\text{elektrisches}}$$

z : Ionenladung

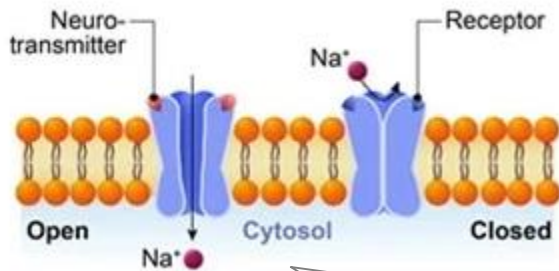
F : Faraday-Konstante

φ : elektrisches Potenzial

$$J = -D \left(\frac{\Delta c}{\Delta x} + c \frac{z F}{RT} \frac{\Delta \varphi}{\Delta x} \right)$$

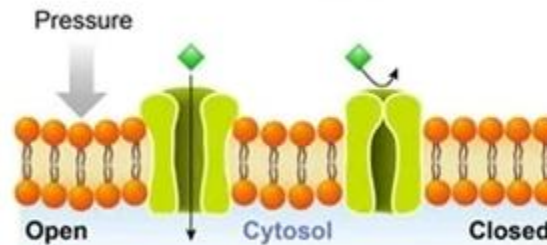
Transport der Ionen durch die Membran

ligandgesteuert



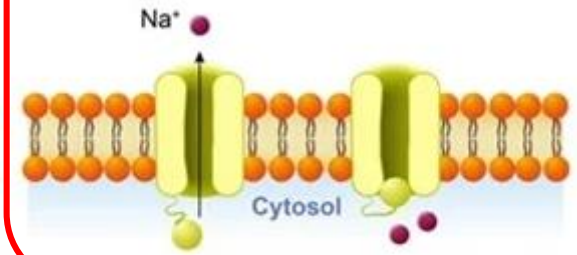
z.B. bei der Neurotransmission

mechanosensitiv

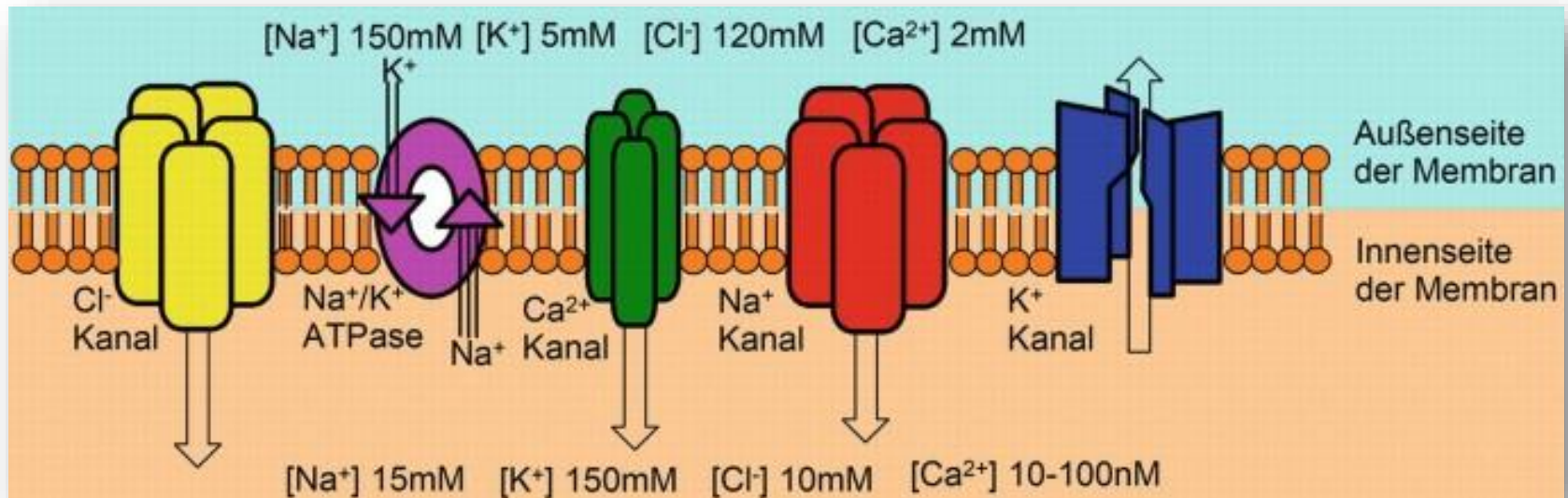


z.B. bei der Rezeptoren

spannungsgesteuert



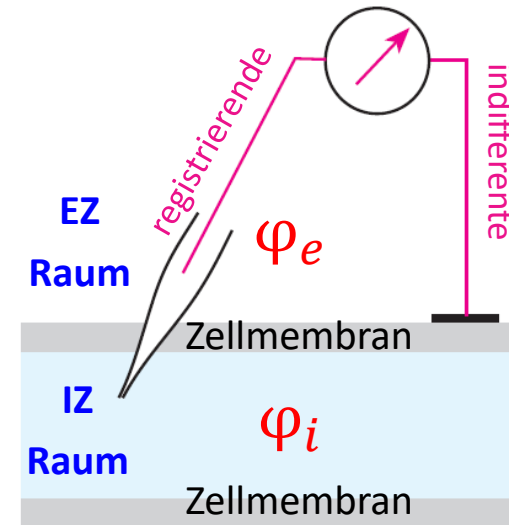
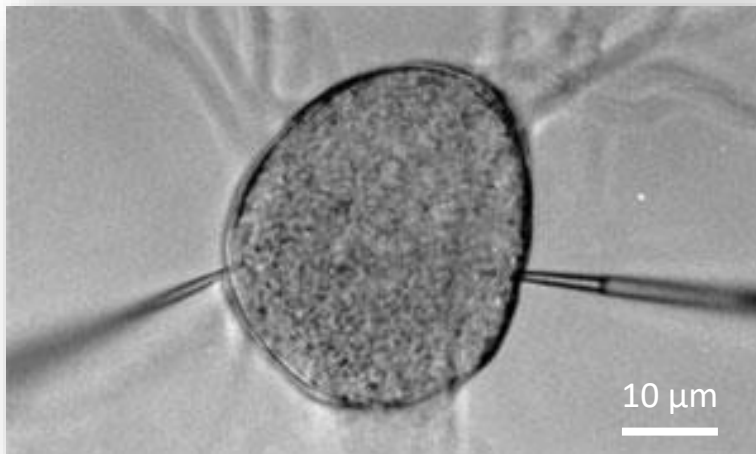
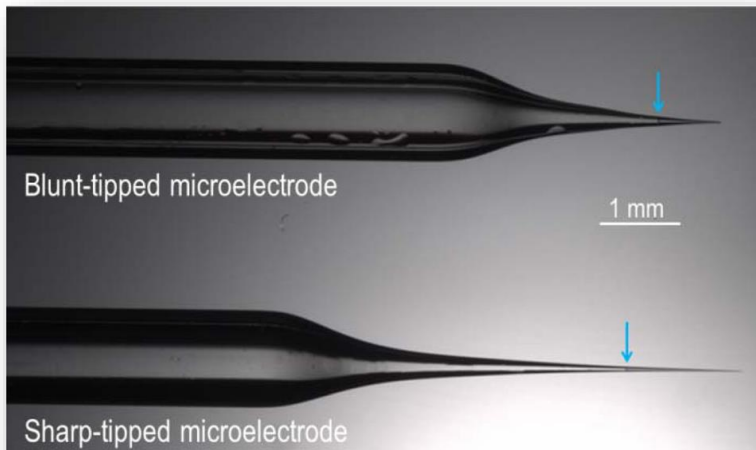
Die wichtigsten Ionenströme bei den Erregungsprozessen:



Messung des Membranpotenzials

Messmethode: mit Mikroelektroden

- registrierende („aktive“)
- indifferente („Referenz“)



Spannung = Potenzialunterschied = „Potenzial“

Beobachtung: $\Delta\varphi = \varphi_i - \varphi_e < 0$

Zelle	$\Delta\varphi$ (mV)
Tintenfisch Riesenaxon	-62
Froschmuskel	-92
Rattenmuskel	-92

Der intrazellulären Raum ist negativer.

Das Membranpotenzial: Messergebnisse

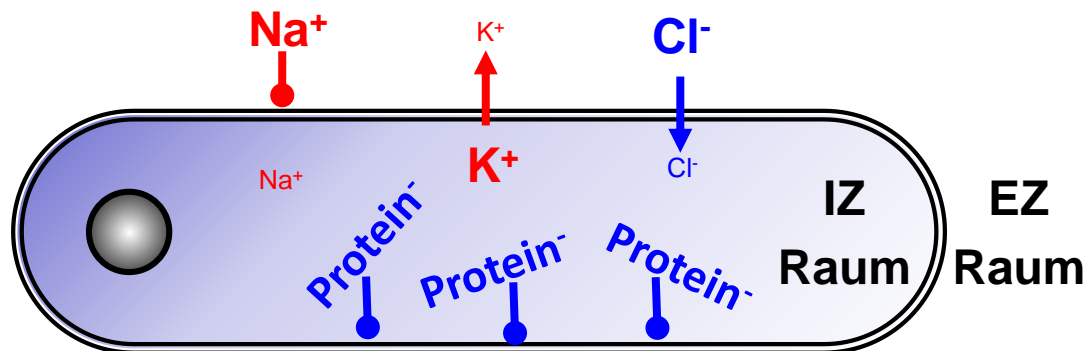
Weitere Beobachtung: unterschiedliche Ionenkonzentrationen auf beiden Seiten

Zelle	intrazelluläre Konzentration (mmol/l)			extrazelluläre Konzentration (mmol/l)		
	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻
Riesenaxon des Tintenfisches	72	345	61	455	10	540
Froschmuskel	20	139	3,8	120	2,5	120
Rattenmuskel	12	180	3,8	150	4,5	110

Welches physikalische Modell kann die beobachtete Ionenverteilung erklären?

1. Modell: Donnan-Modell:

Gleichgewicht-Ionenverteilung, bzw. intrazelluläre Protein-Anionen



- Zellmembran ist nicht durchlässig für bestimmte Ionen ($p_{\text{Protein}^-} = 0$).
- Elektrochemisches Gleichgewicht wird angenommen.

Das Ruhepotenzial

dann müssen wir die Nernst-Gleichung benutzen...

Gleichgewichtspotenzial: kann für das Donnan-Modell errechnet werden

Nernst-Gleichung:
$$\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 = -\frac{RT}{F} \ln \frac{c_2}{c_1}$$

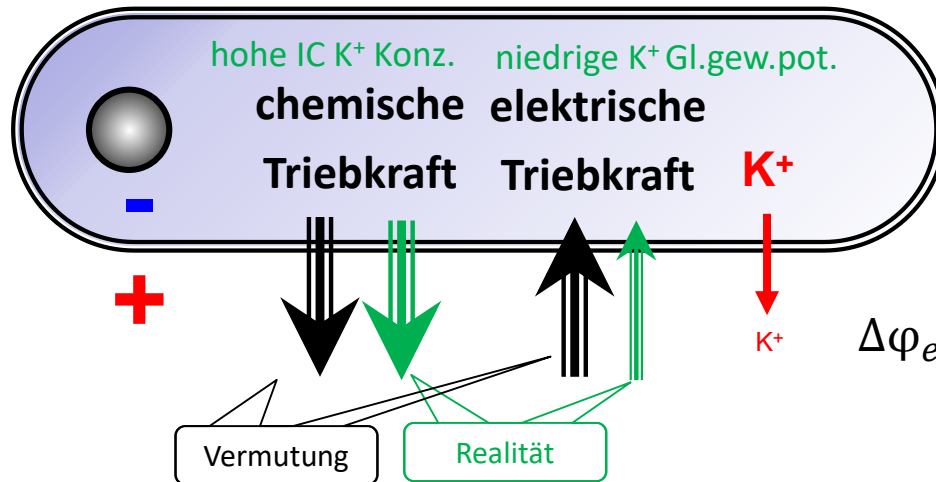
wird z.B. für das K⁺ Ion gelöst...

Zelle	intrazelluläre Konzentration (mmol/l)			extrazelluläre Konzentration (mmol/l)		
	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻
Riesenaxon des Tintenfisches	72	345	61	455	10	540

Nernst-Gleichung für das K⁺ Ion...

$$\Delta\varphi_{eq} = -\frac{RT}{F} \ln \frac{c_i}{c_e}$$

$$\Delta\varphi_{eq} = -\frac{8,31 \cdot 293}{96500} \ln \frac{345}{10} = -0,089 \text{ V} = \boxed{-89 \text{ mV}}$$



Gemessenes Membranpotenzial: -62 mV

bei -62 mV soll K⁺ Ausstrom auftreten

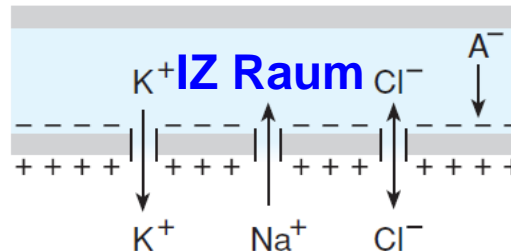
Das Gleichgewichtsmodell ist falsch!

Die Goldman-Hodgkin-Katz (GHK) Gleichung

Zelle	$\Delta\varphi_{eq}$ (mV) aus der Nernst-Gleichung			$\Delta\varphi_m$ (mV) (gemessen)
	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	
Tintenfisch Riesenaxon	+46	-89	-55	-62
Froschmuskel	+45	-101	-87	-92
Rattenmuskel	+64	-93	-85	-92

Kein Ionengleichgewicht im Ruhezustand, sondern ständig verlaufend:

- K⁺ Ausstrom
- Na⁺ Einstrom
- mäßiger Cl⁻ Ausstrom



- **Aktiver Transport: benötigt ATP**

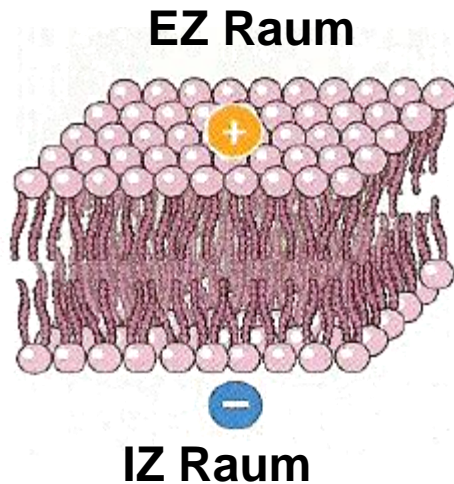
2. Modell: Transportmodell: **kontinuierliche Diffusion von unterschiedlichen Ionen mit unterschiedlicher Permeabilität**

$$\Delta\varphi = \varphi_i - \varphi_e = -\frac{RT}{F} \ln \frac{p_{Na}c_{Na}^i + p_Kc_K^i + p_{Cl}c_{Cl}^e}{p_{Na}c_{Na}^e + p_Kc_K^e + p_{Cl}c_{Cl}^i} = -91 \text{ mV} \quad (\text{Froschmuskel})$$

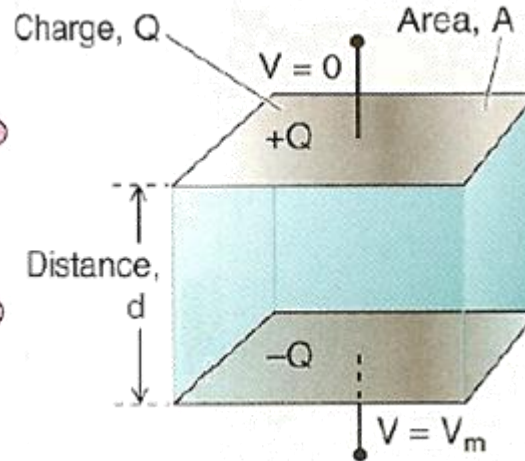
Die aus der GHK-Gleichung errechnete Werte stimmen mit den Messergebnissen überein.

Das elektrische Modell der Zellmembran

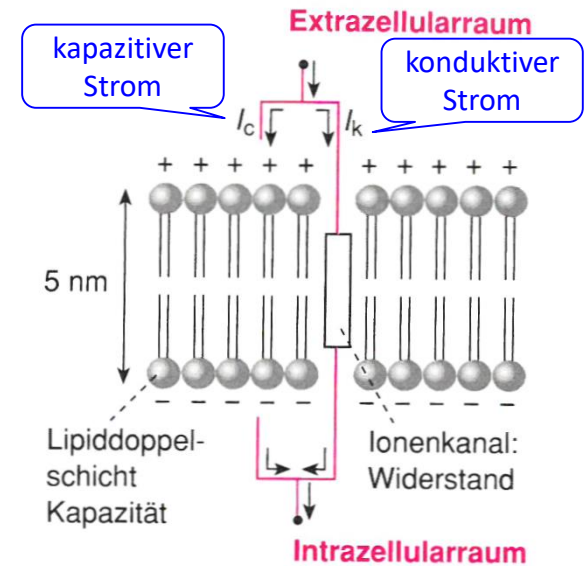
Zellmembran



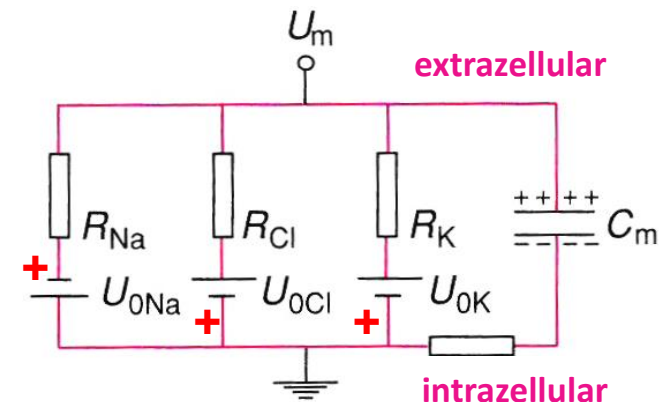
Kondensator



elektrisches Modell



- **Widerstand, R:** unterschiedlich für jedes Ionenkanal
- **elektrischer Leitwert (Konduktivität): G [Siemens]** $G = \frac{1}{R}$
proportional zur **Permeabilität (p)**
- **spezifische Leitfähigkeit: Sigma, [1/(Ω·m²)]** $\sigma = \frac{1}{R \cdot A}$

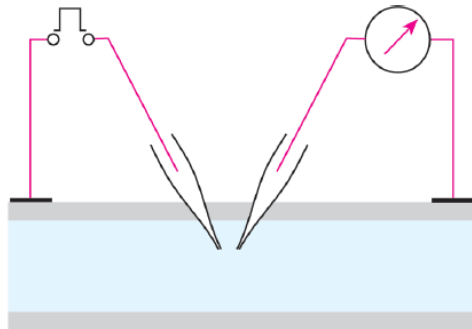


Modell: RC-Kreis

Lokale, zeitliche Änderung des Membranpotenzials

stimulierende
Elektroden

registrierende
Elektroden

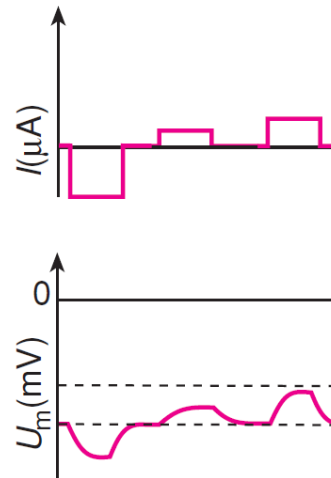


Stimulation

I_{Reiz}

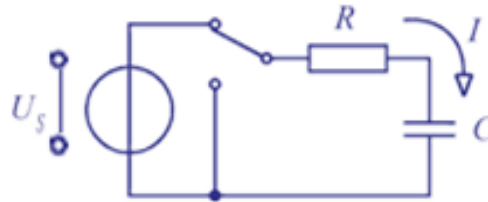
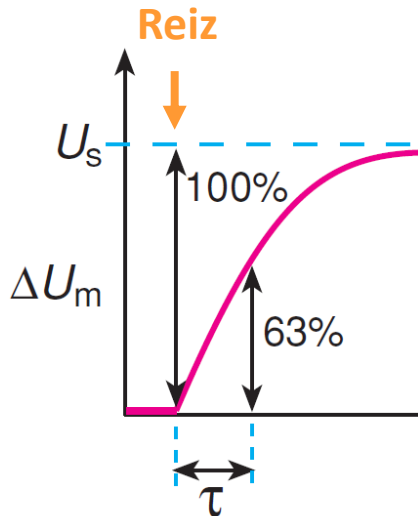
Antwort

$\Delta\phi_m$



Die Amplitude der Antwort ist proportional zur Reizstärke, aber die Antwort ist zeitlich verzögert.

RC: „Aufladung“



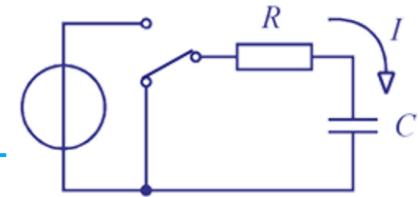
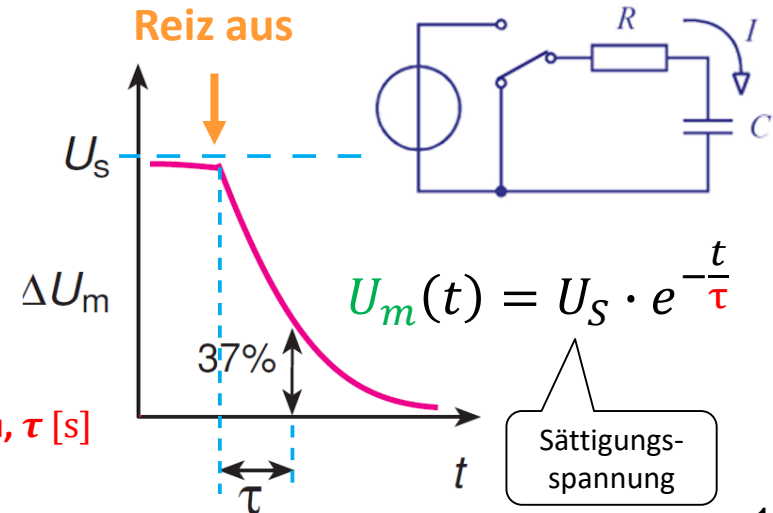
$$U_m(t) = U_s \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$$

Sättigungs-
spannung

Zeitkonstante: Tau, τ [s]

$$\tau = R_m \cdot C_m$$

RC: „Entladung“

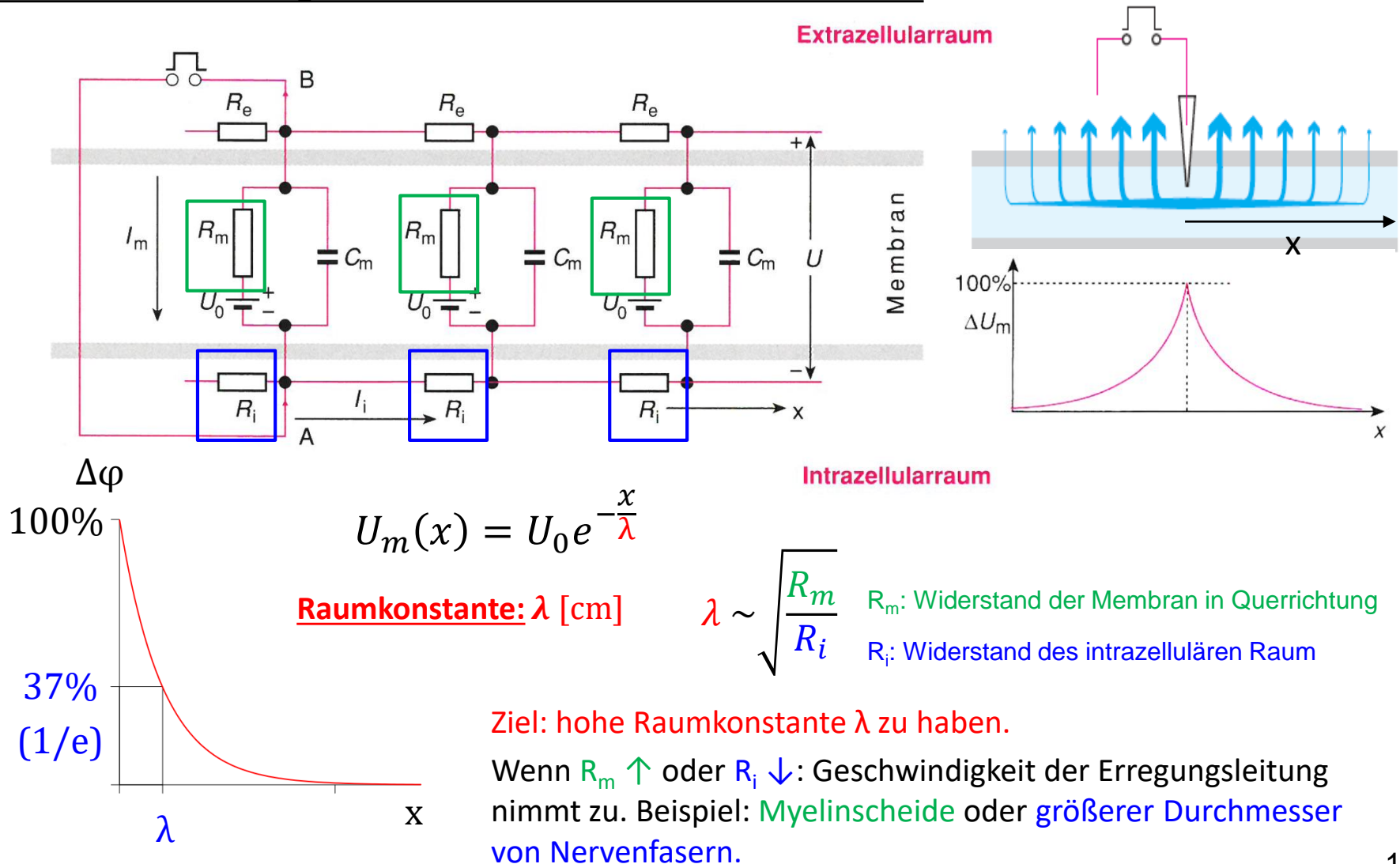


$$U_m(t) = U_s \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$

Sättigungs-
spannung

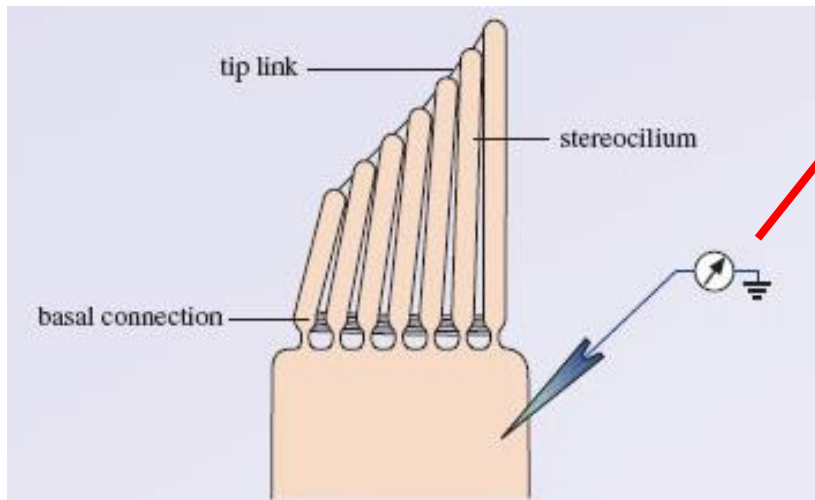
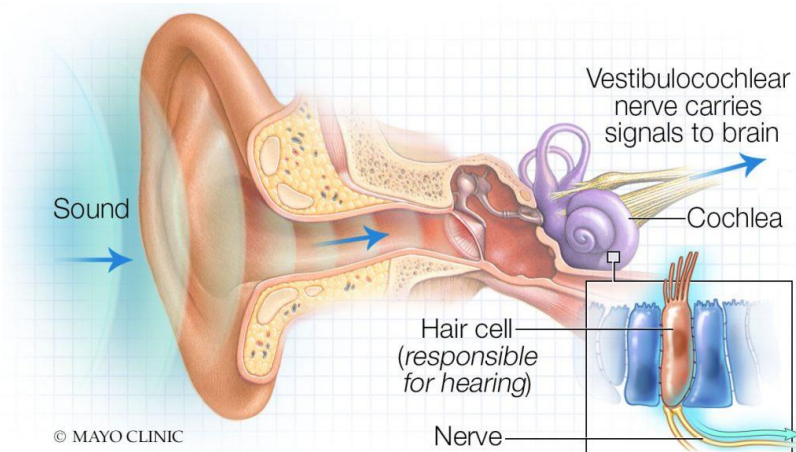
Die räumliche Änderung des Membranpotenzials

Die Weiterentwicklung des elektrischen Modells der Zellmembran:

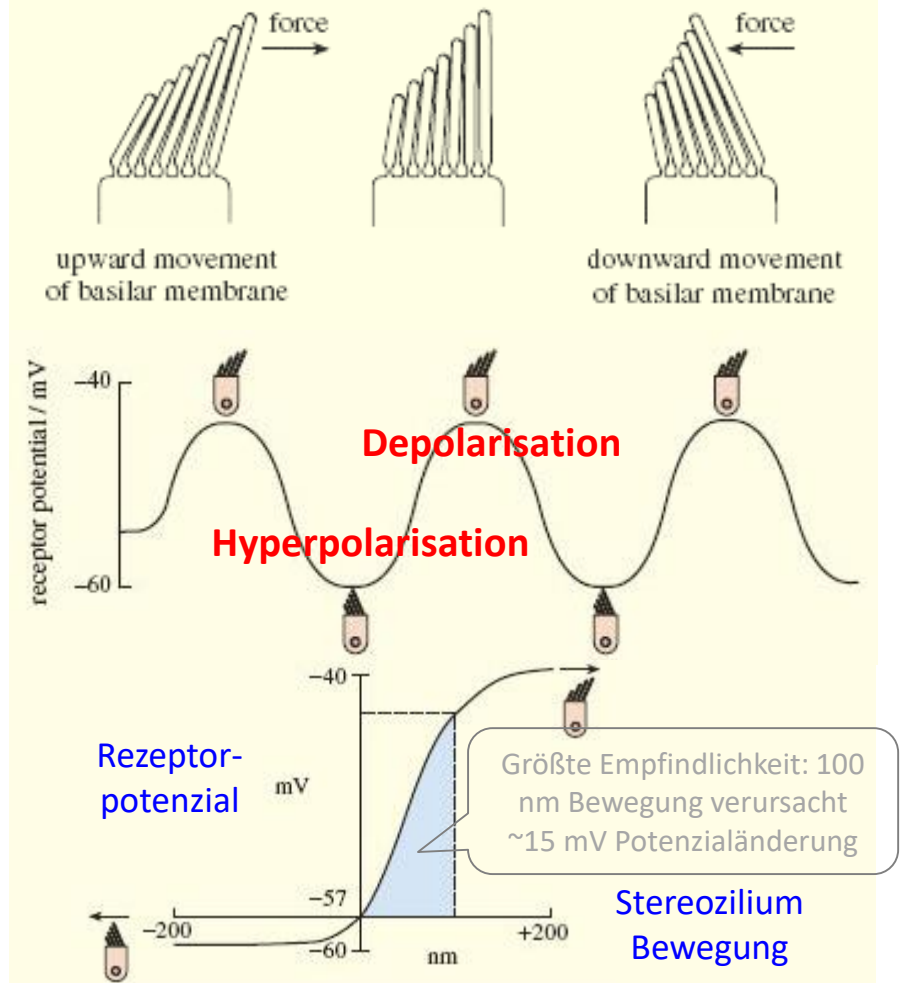


Beispiel #1: Rezeptorpotenzial

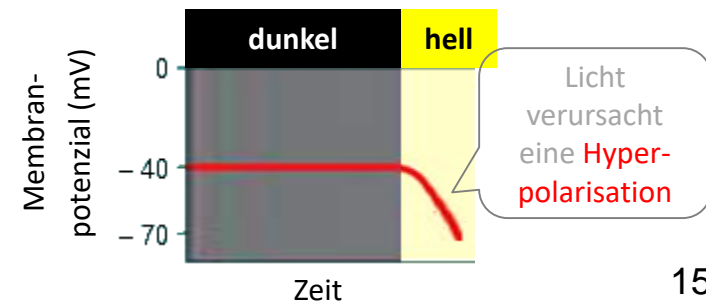
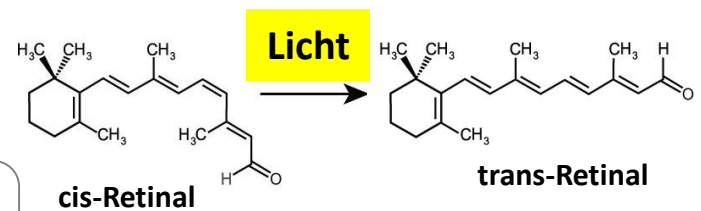
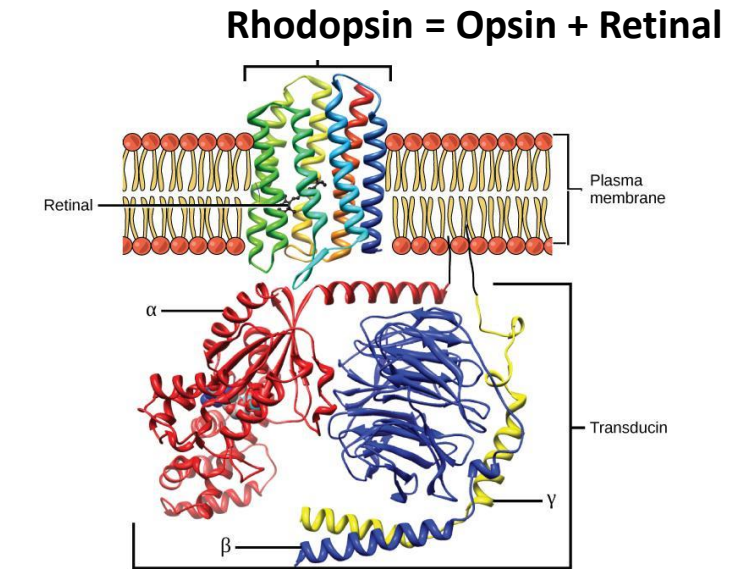
Lokale Änderung des Membranpotenzials: Haarzellen als Mechanorezeptoren



mechanosensitive K^+ -Kanal: K^+ Einstrom



Lokale Änderung des Membranpotenzials: Stäbchen als Photorezeptoren



Hausaufgaben

Aufgabensammlung

3.34 - 3.36

Feedback