

I. Membranpotenzial

1. **Ruhepotenzial**
 - Gleichgewichtspotenzial (Nullstrompotenzial)
 - Transportmodell, Goldman-Hodgkin-Katz-Gleichung
2. **Lokale (elektrotonische) Änderungen des Membranpotenzials**
 - Zeitlicher Ablauf
 - Raumlicher Ablauf
3. **Aktionspotenzial**
4. **Anwendungen**
 - Diagnostik: Messung der Biopotenzialen (EKG, EEG, ...)
 - Elektrostimulation, Reizdauer-Stromstärke-Diagramm (Reizcharakteristik)

II. Anwendungen des elektrischen Stromes in der Therapie

- Galvanisation
- Iontophorese
- Defibrillator
- Herzschrittmacher
- Reizstromtherapie
- HF-Wärmetherapie,
- HF-Chirurgie

Ergänzung zu den Transportprozessen

+ Informationstransport

Körper ↔ Umwelt



Fühlen



Schmecken



Sehen



Hören



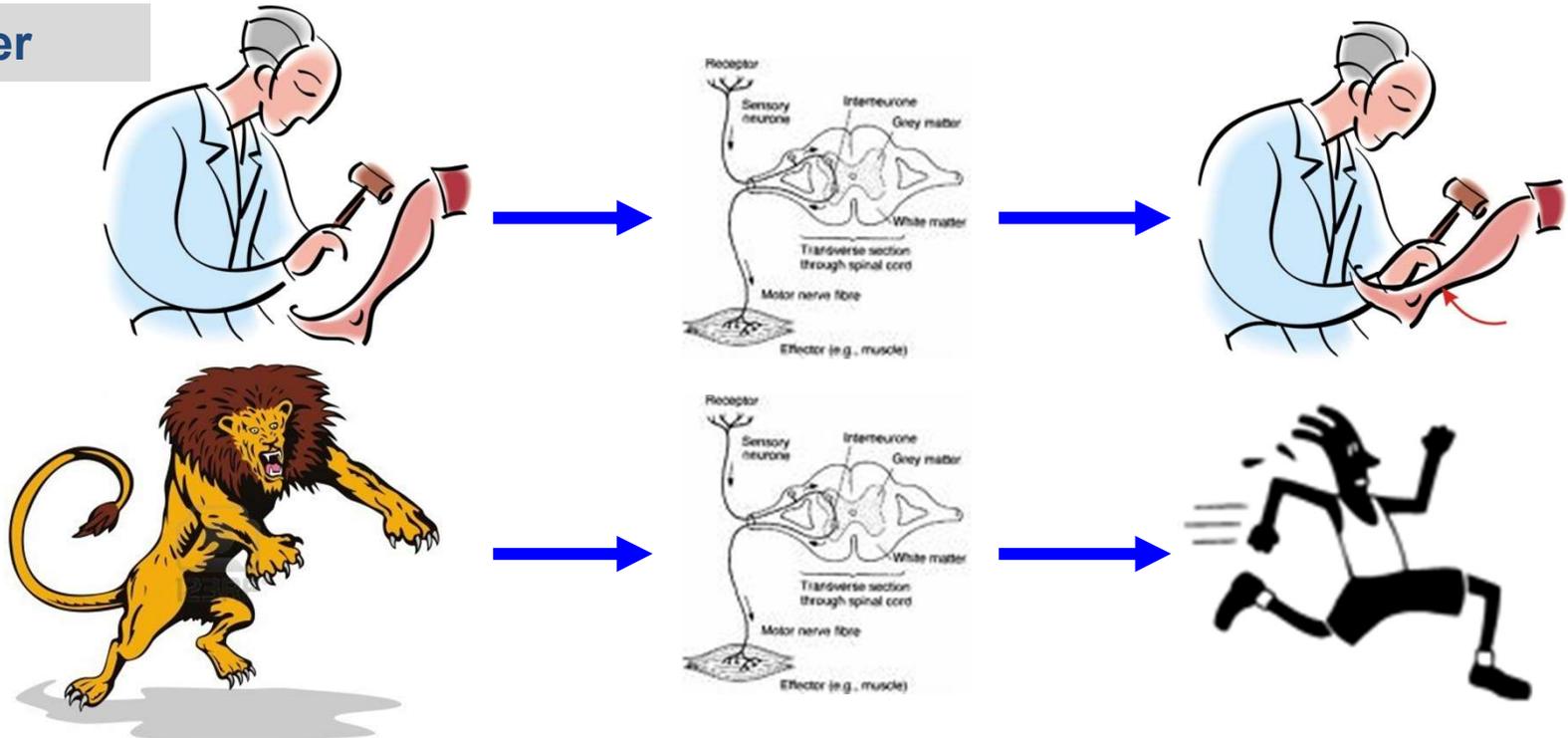
Riechen



Temperatur-empfindung



Im Körper



Schnelle Antwort ist nötig!

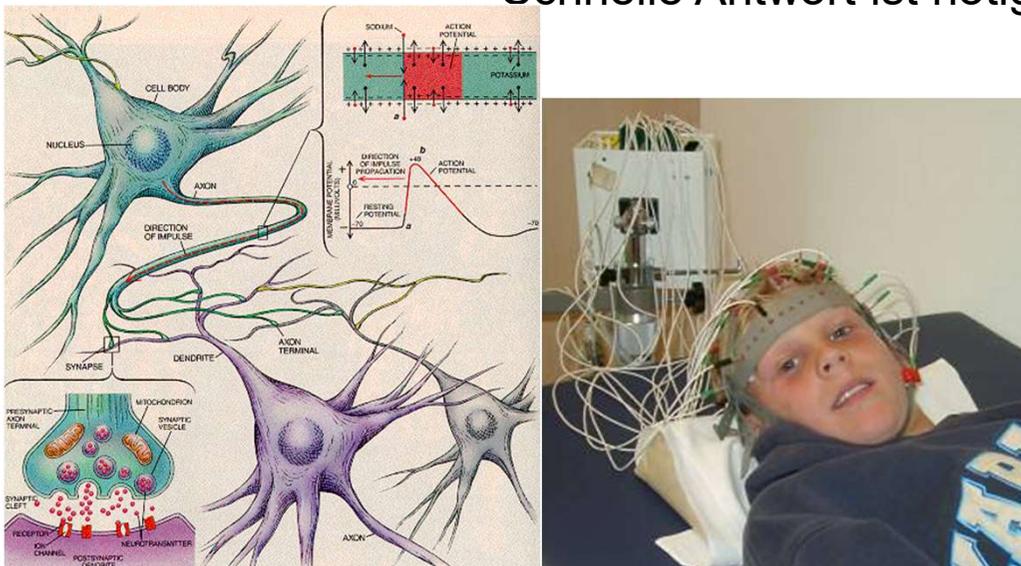


Diffusion?

Wärmeleitung?

Strömung?

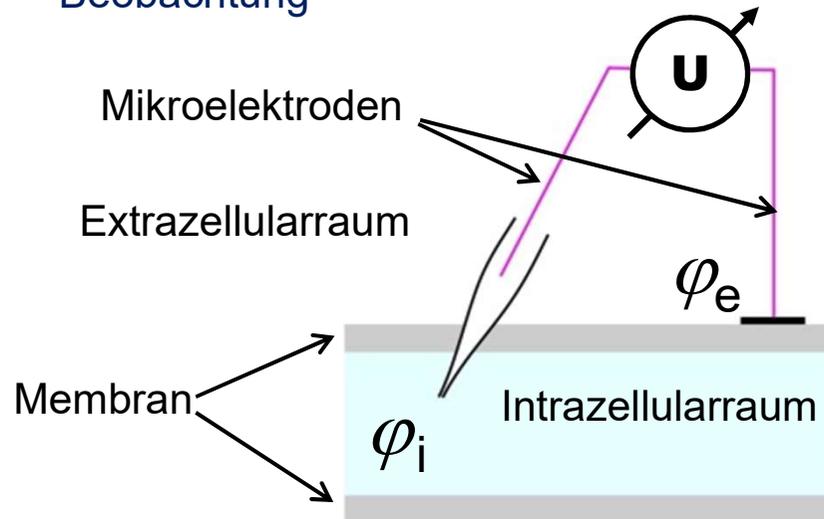
Elektrischer Strom?



I. Membranpotenzial

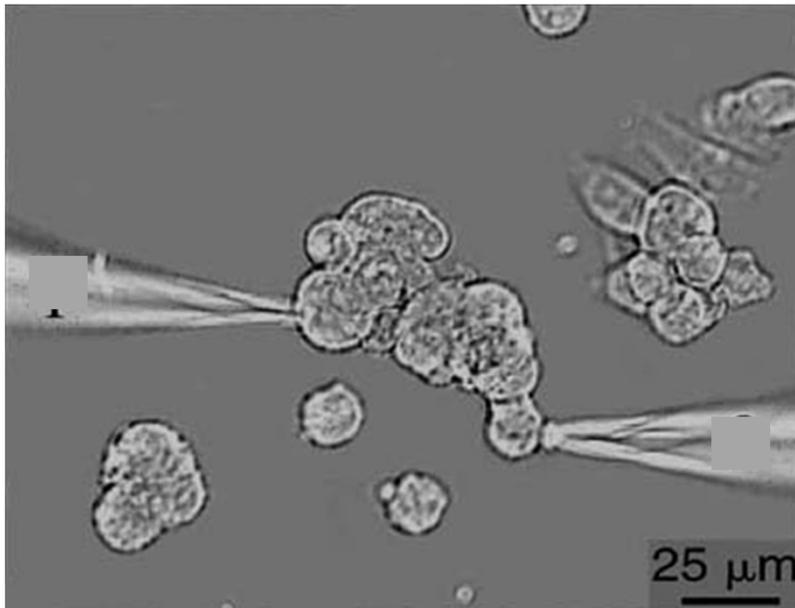
1. Ruhepotenzial

- Beobachtung



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

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



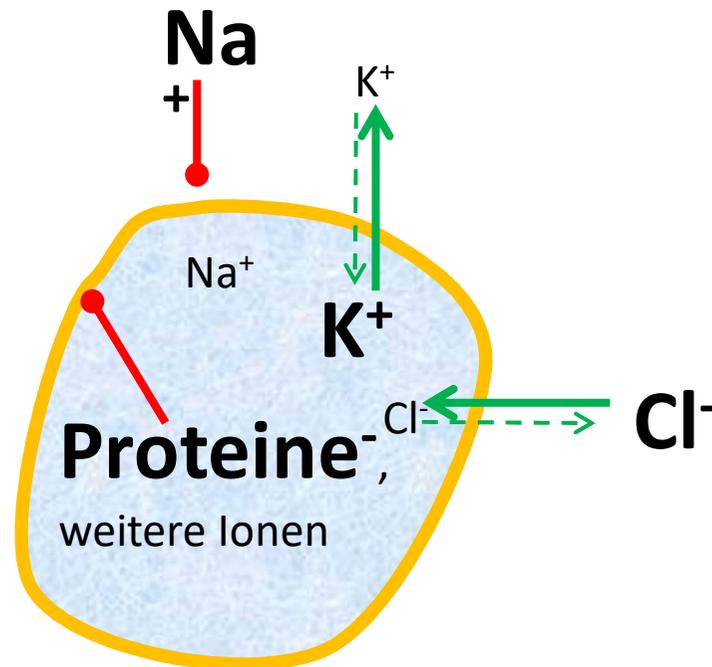
Bezeichnungen: $\Delta\varphi$, $\Delta\varphi_m$, φ , U , U_m , E , ...

- Erklärung

Eine andere Beobachtung ist die inhomogene Ionenverteilung:

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

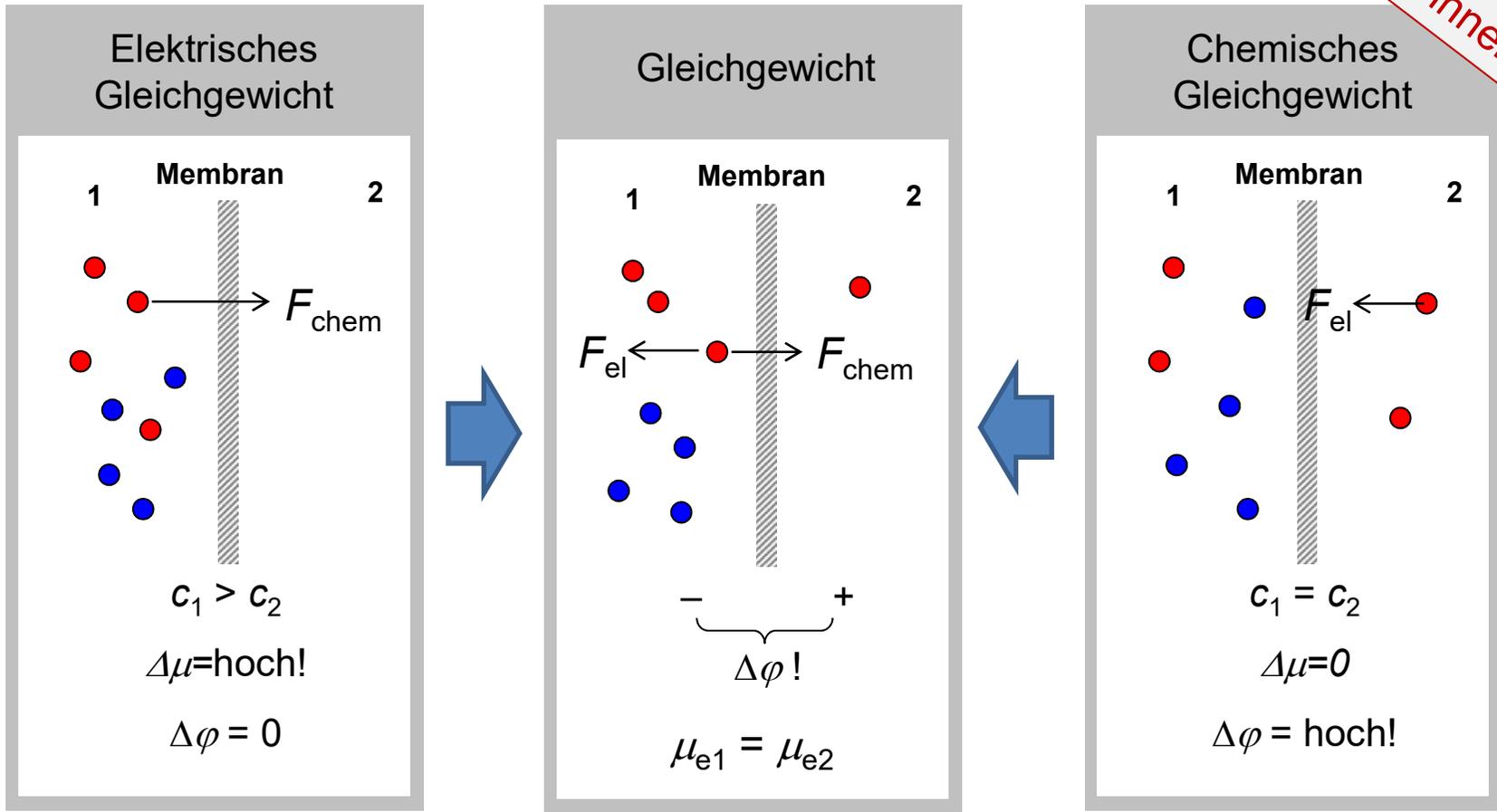
- Donnan Modell (Gleichgewichtsmodell)



Die Permeabilität für das eine Ion ist Null, z. B.

$$p_k > p_a = 0$$

Zur Erinnerung



- Kation (k)
- Anion (a)

Elektrochemisches Potenzial (J/mol):

$$\mu_e = \mu + F \cdot \phi$$

Nernst-Gleichung:

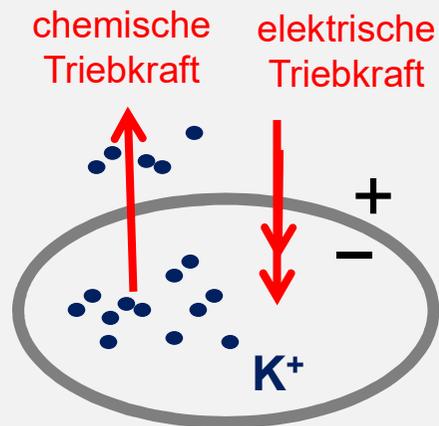
$$\Delta\phi = \phi_2 - \phi_1 = -\frac{RT}{F} \ln \frac{c_2}{c_1}$$

Erklärung

Inhomogene Ionenverteilung \Rightarrow Membranpotenzial

	Intrazelluläre Konzentration (mmol/l)			Extrazelluläre Konzentration (mmol/l)			$\Delta\varphi_m$ (mV)
	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	
Zelle							
Tintenfisch-Riesenaxon	72	345	61	455	10	540	-62
Froschmuskel	20	139	3,8	120	2,5	120	-92
Rattenmuskel	12	180	3,8	150	4,5	110	-92

„Gleichgewichtsmodell“:



Wenn Gleichgewicht herrscht, dann müsste das Ruhepotenzial der Nernst-Gleichung entsprechen (Z. B. für K⁺-Ionen und Tintenfisch-Riesenaxon):

Gleichgewichtspotenzial (Nullstrompotenzial) für K⁺:

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

Das gemessene Membranpotenzial: $\Delta\varphi_m = -62 \text{ mV}$

\Rightarrow Das Modell stimmt nicht, es gibt kein Gleichgewicht! Ständiger K⁺-Ausstrom!

Zelle	Aus der Nernst-Gleichung: $\Delta\varphi_{eq}$ (mV)			Gemessene Werte $\Delta\varphi_m$ (mV)
	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	
Tintenfisch-Riesenaxon		-89	-55	←→ -62
Froschmuskel		-101	-87	←→ -92
Rattenmuskel		-93	-85	←→ -92



Es gibt kein Gleichgewicht!

Ständiger K⁺-Ausstrom, Na⁺-Einstrom, und ein wenig Cl⁻-Ausstrom!



Die Ausströme müssen kompensiert werden
um einen „*steady-state*“* Zustand zu erreichen



Aktive Prozesse (aktiver Transport)
Energieverbrauch!

* „*steady state*“

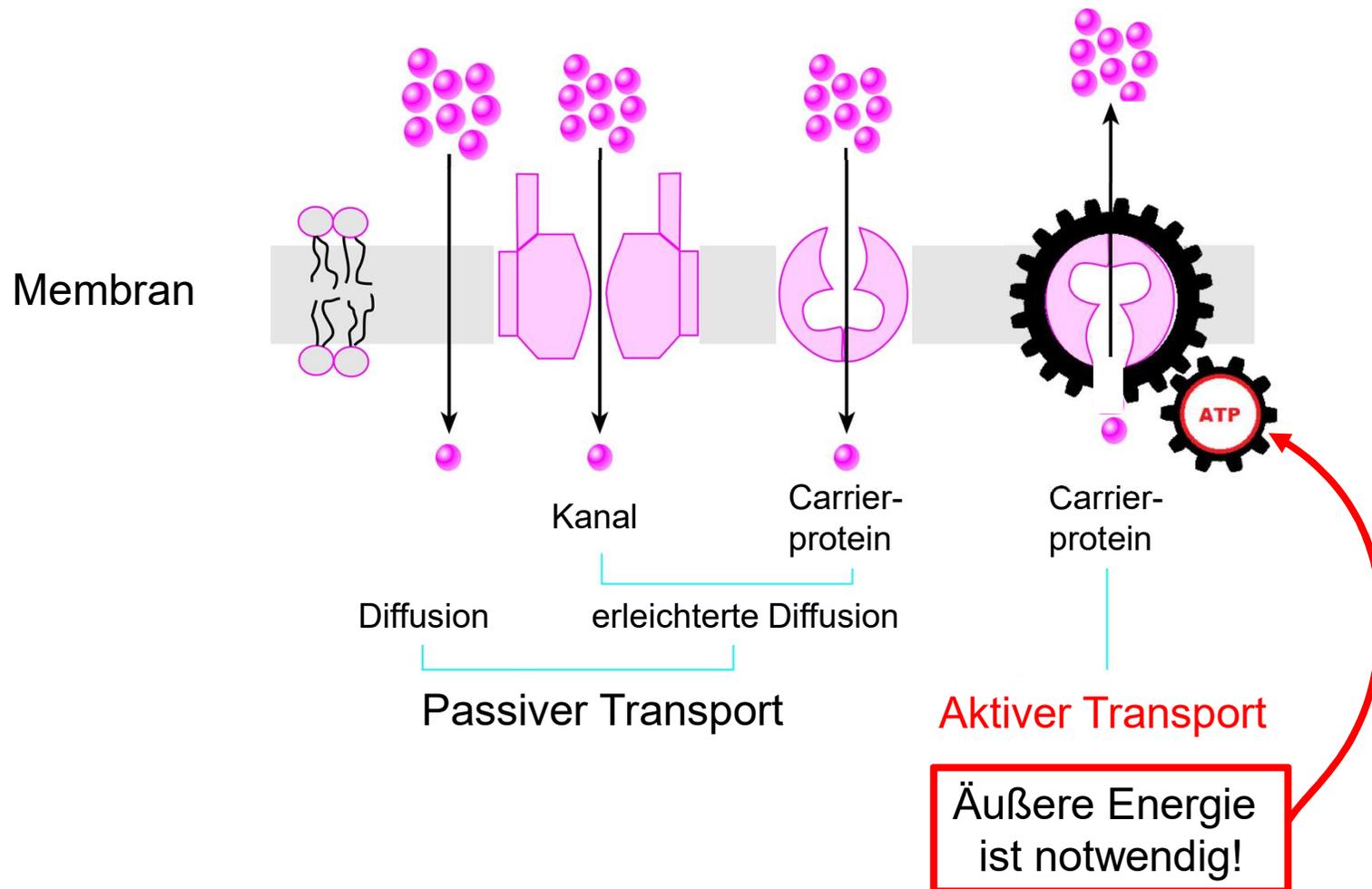
ist eine Situation, in welchem alle Parameter des Systems konstant sind, obwohl die gängige Prozesse nach Veränderung diese Parameter streben.

■ Transportmodell

Ständige Diffusion von Ionen mit unterschiedlichen Permeabilitäten

⇒ Diffusionspotenzial

⇒ Rücktransport (aktiv)



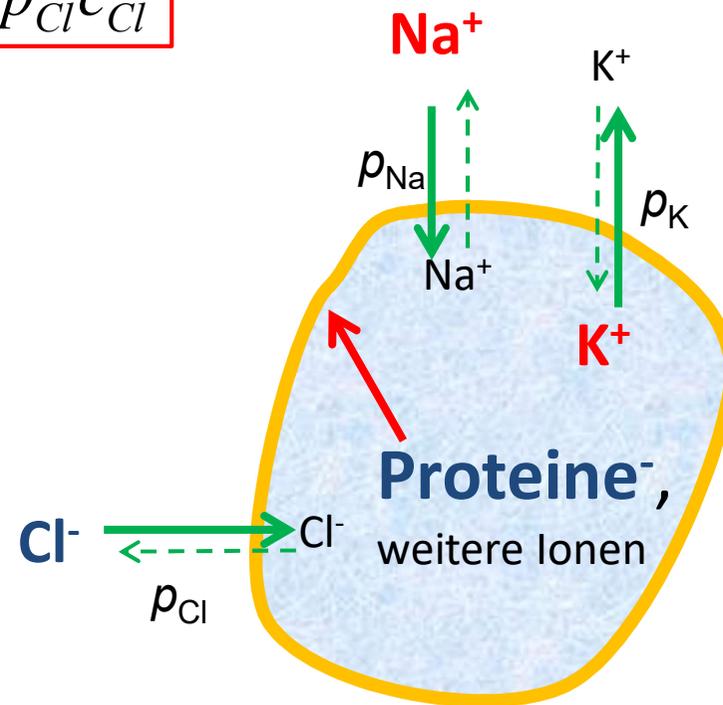
- Transportmodell** Ständige Diffusion von Ionen mit unterschiedlichen Permeabilitäten

⇒ Diffusionspotenzial

⇒ Rücktransport (aktiv)

Goldman-Hodgkin-Katz-Gleichung:

$$\Delta\varphi = -\frac{RT}{F} \ln \frac{p_{Na}c_{Na}^i + p_Kc_K^i + p_{Cl}c_{Cl}^e}{p_{Na}c_{Na}^e + p_Kc_K^e + p_{Cl}c_{Cl}^i}$$



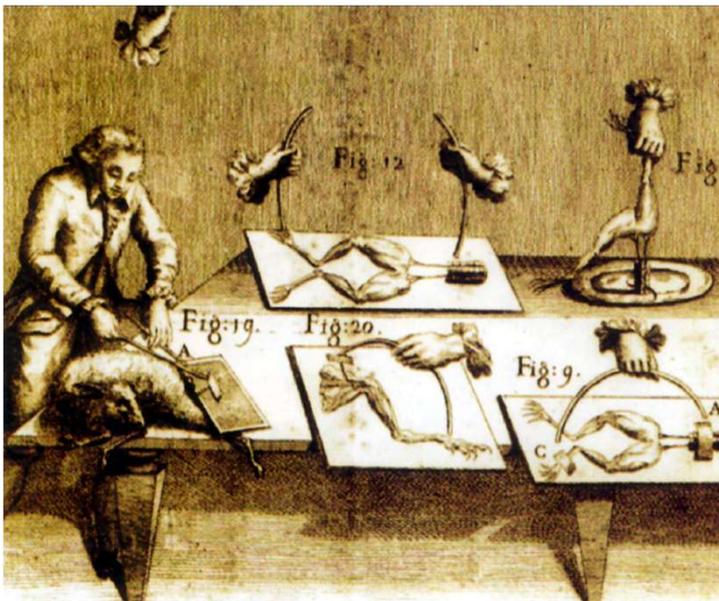
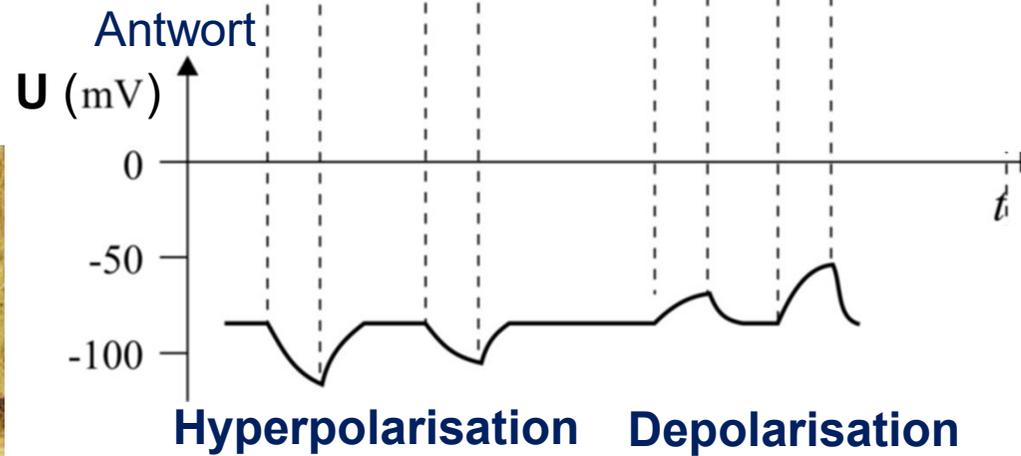
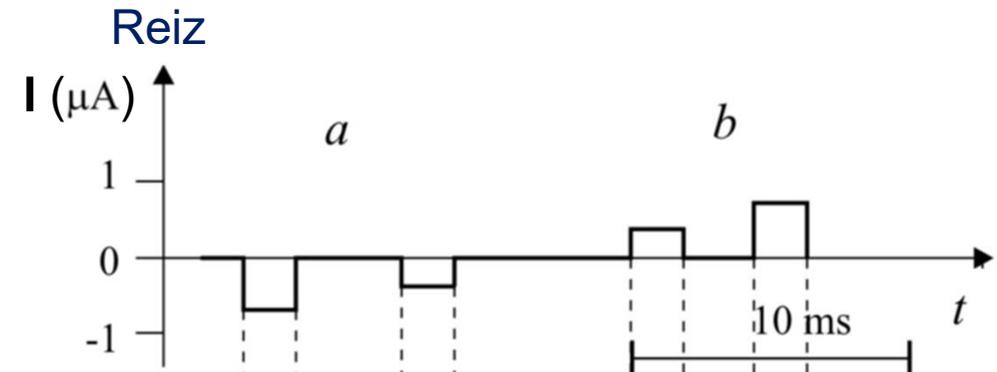
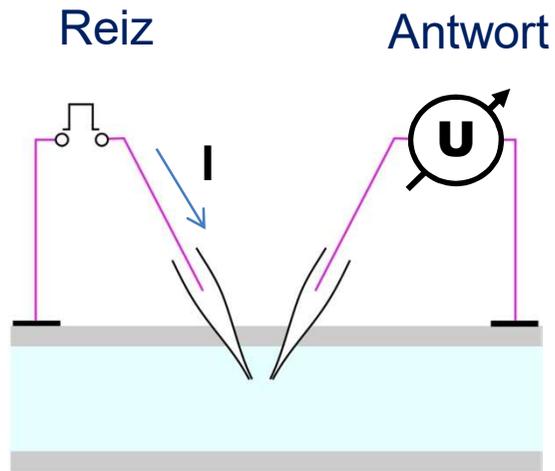
Zelle	Aus der Nernst-Gleichung: $\Delta\varphi_{eq}$ (mV)			Gemessene Werte $\Delta\varphi_m$ (mV)
	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	
Tintenfisch-Riesenaxon	+46	-89	-55	←→ -62
Froschmuskel	+45	-101	-87	←→ -92



	φ (gerechnet) (mV)	φ (gemessen) (mV)
Tintenfisch-Riesenaxon	-63	-62
Froschmuskel	-91	-92

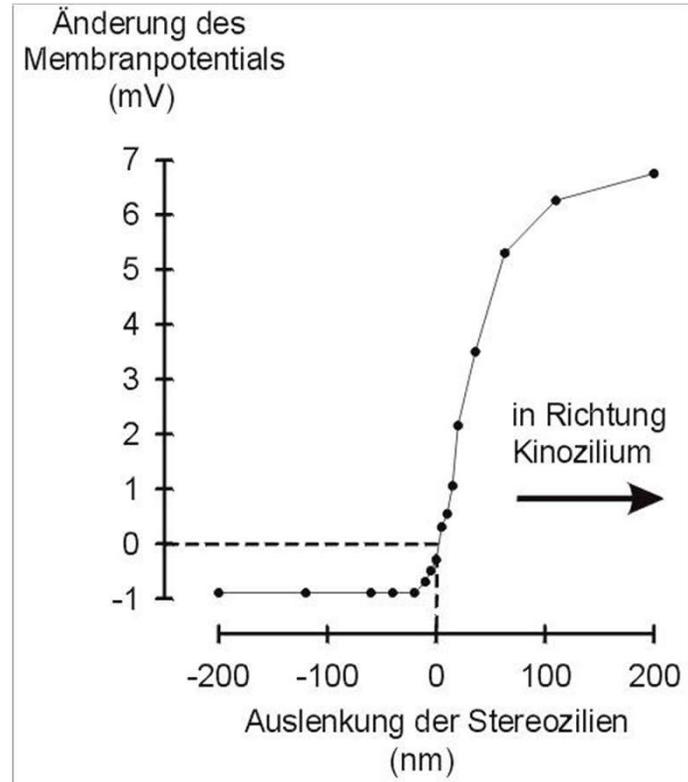
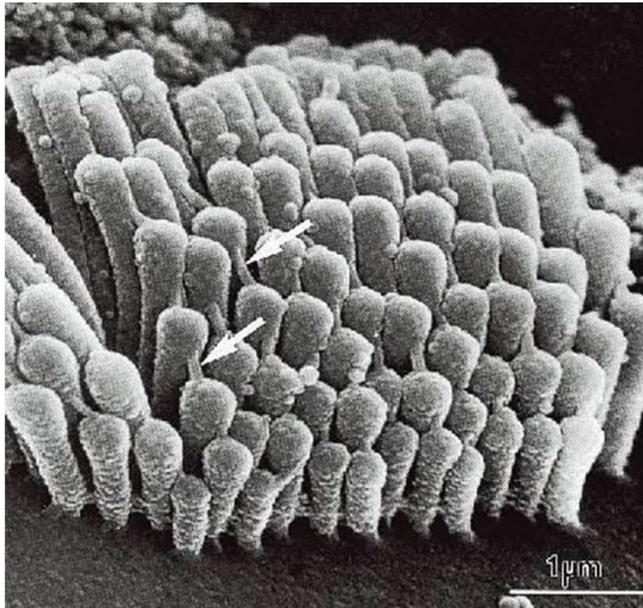
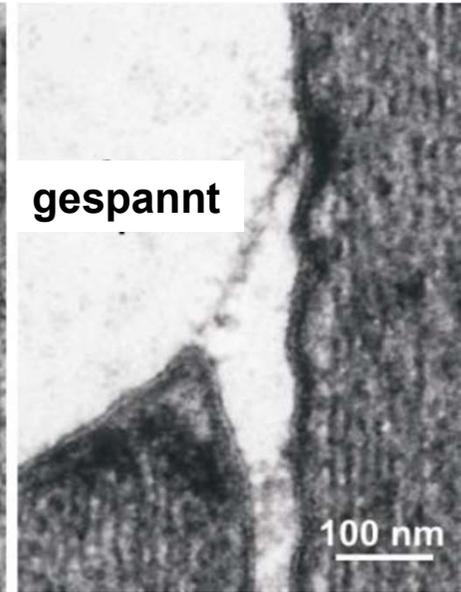
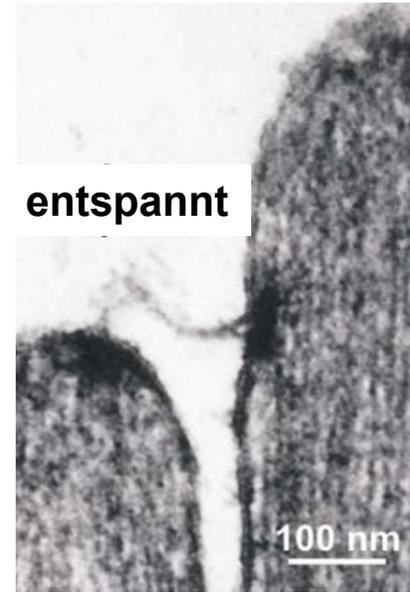
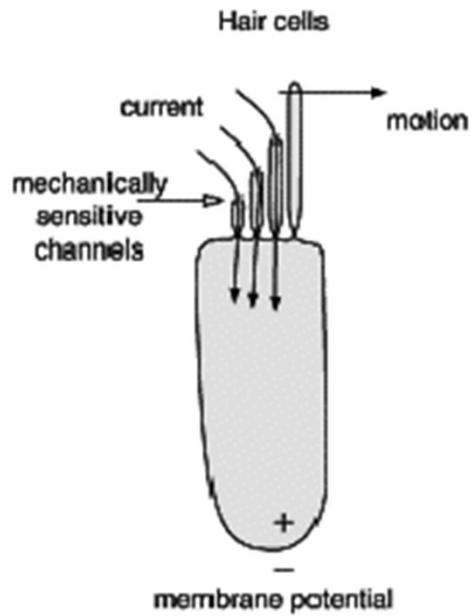
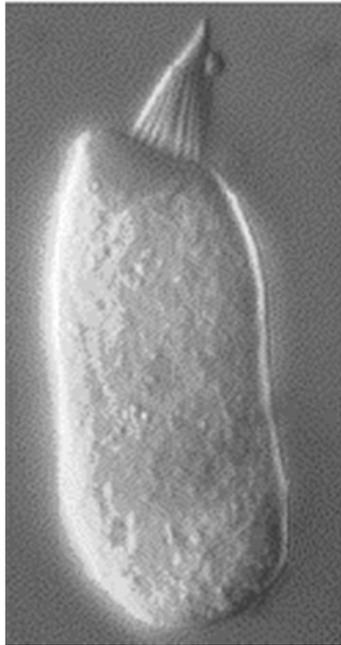


2. Lokale (elektrotonische) Änderungen des Membranpotenzials

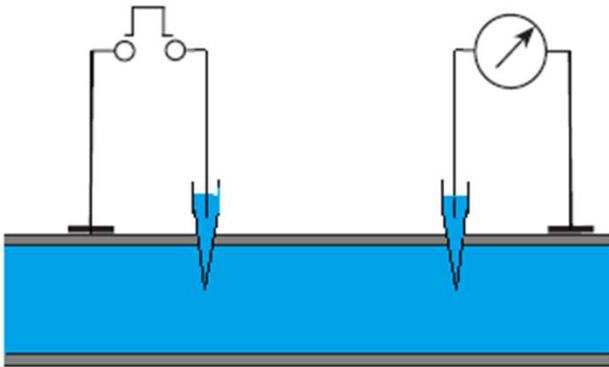


Beispiele:

Haarzelle



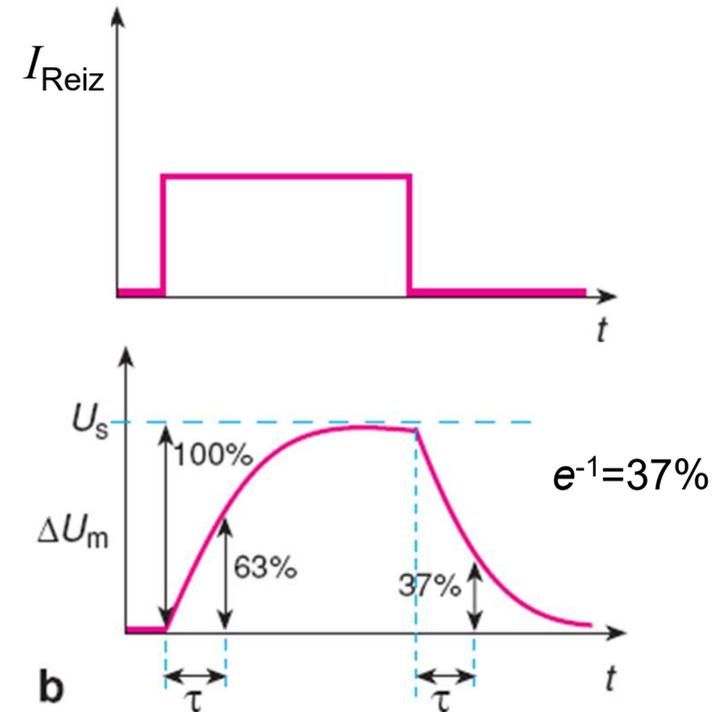
- Lokale Änderung des Ruhepotenzials: Zeitlicher Ablauf



Spannungsverlauf beim Anfang
der Erregung

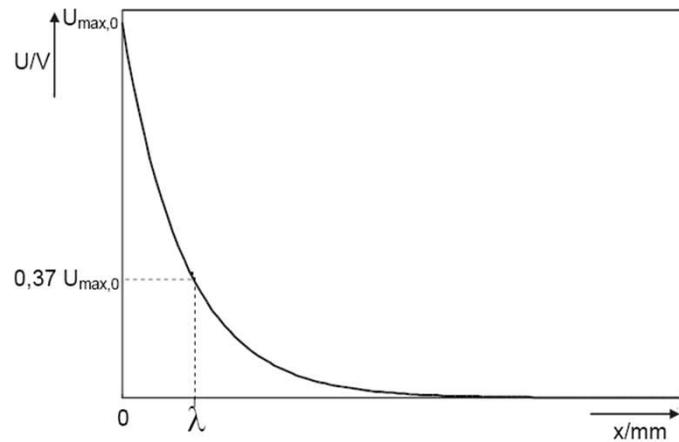
$$U(t|x) = U_{max,o} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right)$$

τ : Zeitkonstante



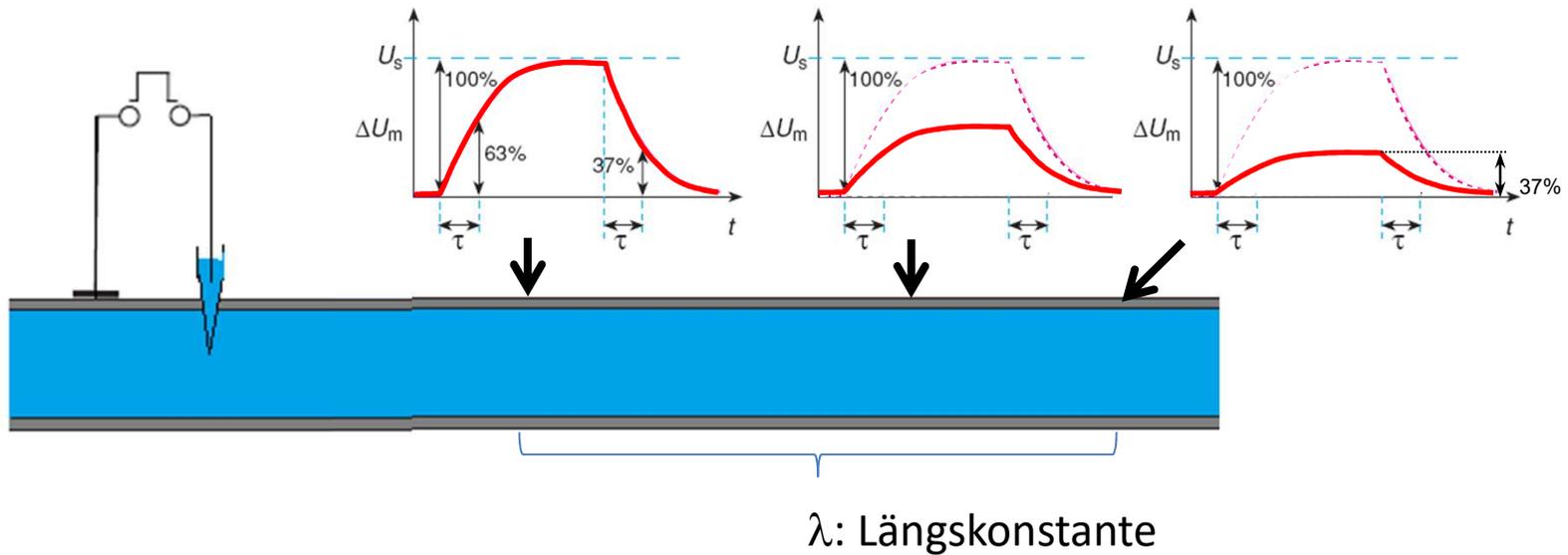
siehe RC Kreis !

- Lokale Änderung des Ruhepotenzials: Raumlicher Ablauf

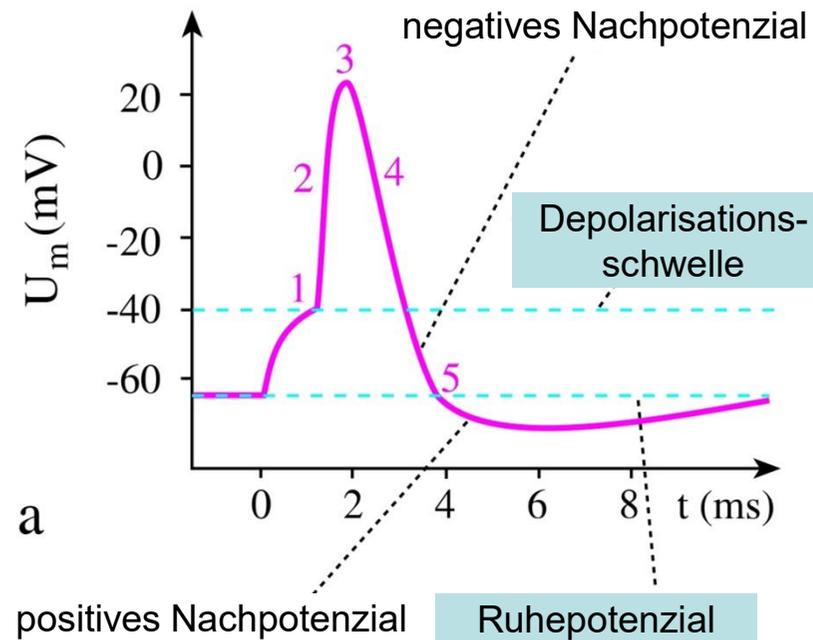
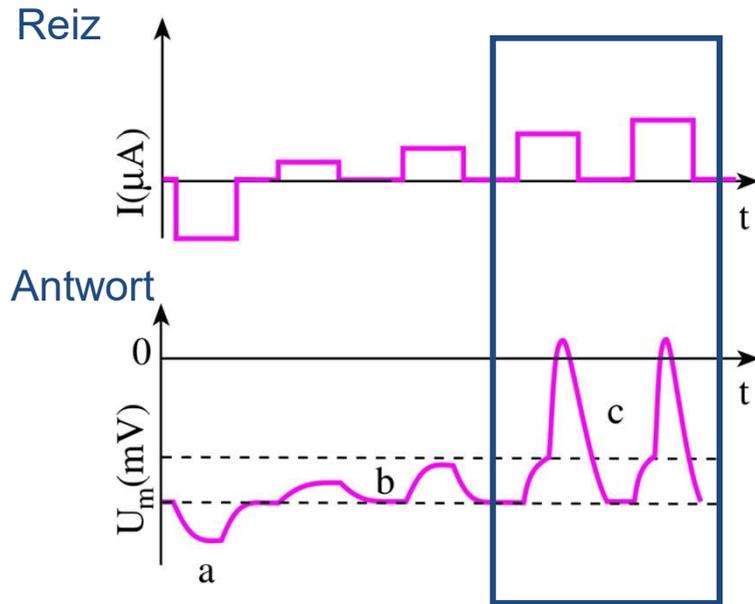


Spannungsabfall längs einer Zelle

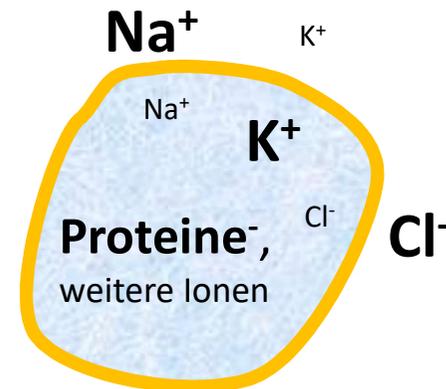
λ : Längskonstante



3. Aktionspotenzial

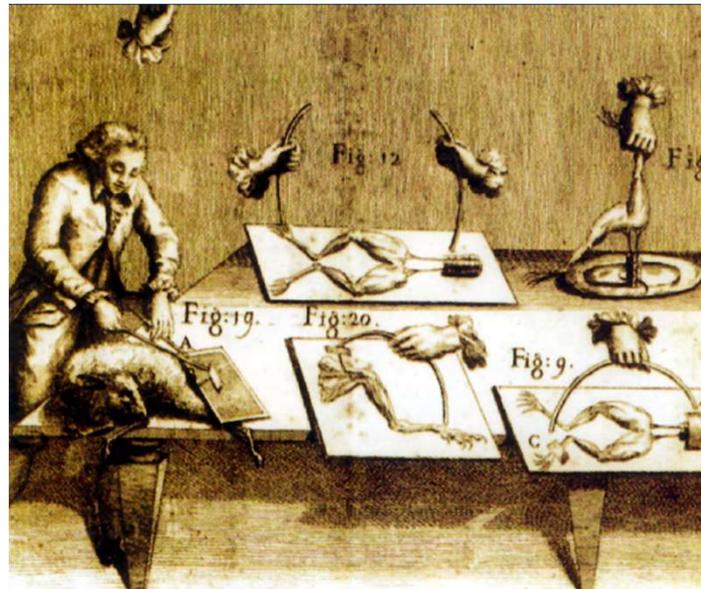


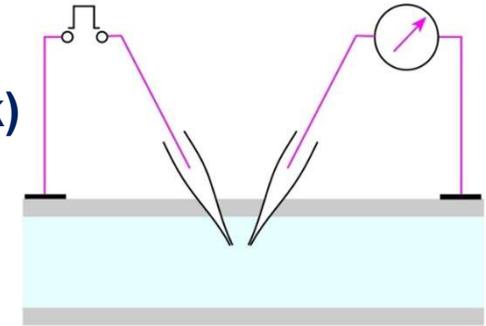
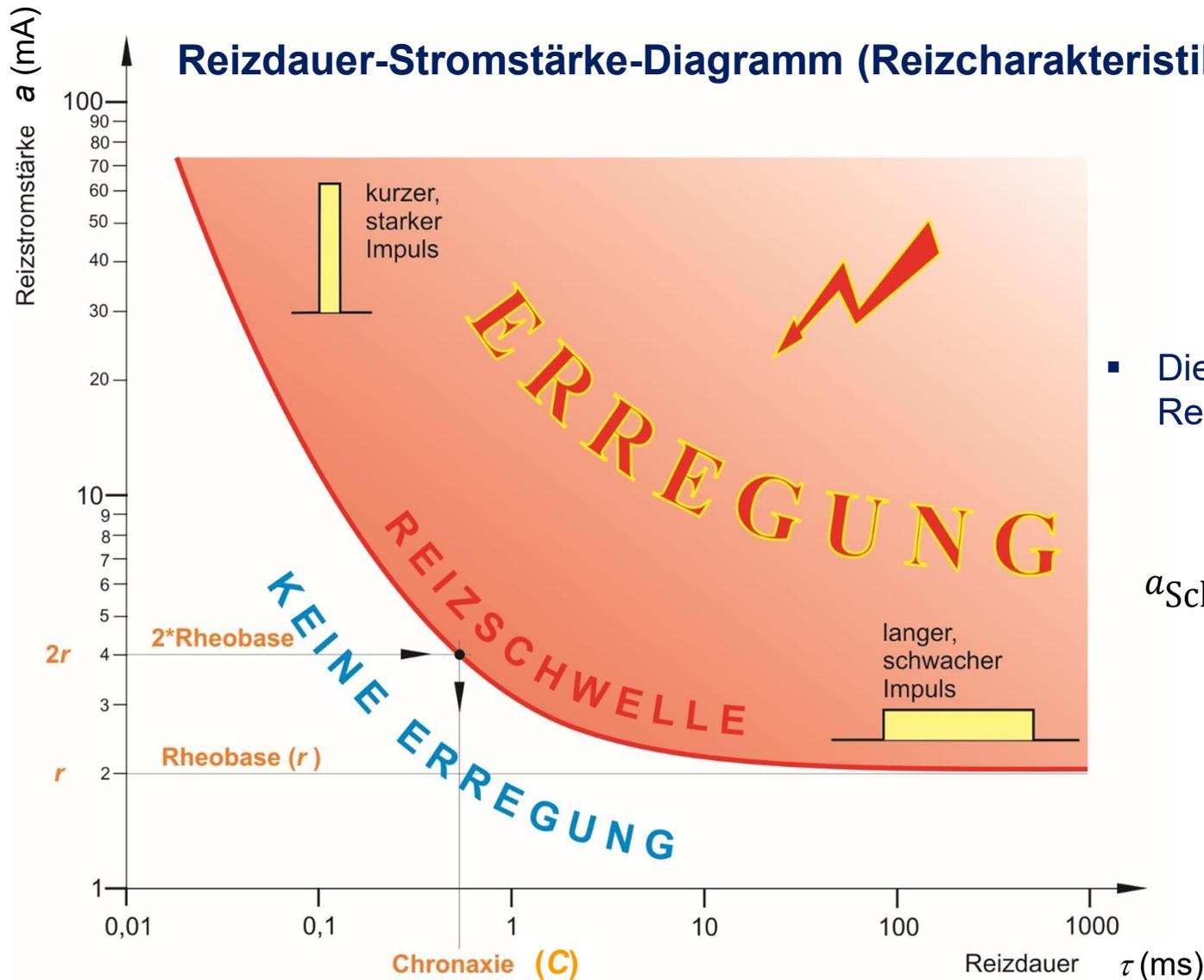
1. Öffnung der Na^+ -Kanäle
2. Öffnung der K^+ -Kanäle
3. Inaktivierung eines Teils der Na^+ -Kanäle
4. Weiteres Ausströmen von K^+
5. Schluss der K^+ -Kanäle



4. Anwendungen

- Diagnostik: Messung der Biopotenzialen (EKG, EEG, ...)
- Elektrostimulation

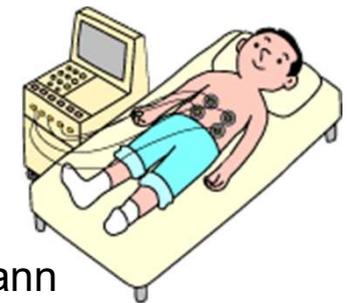




- Die Funktion der Reizschwellenkurve:

$$q = rC$$

$$a_{\text{Schwelle}} = \frac{q}{\tau} + r$$



- Rheobase (r):** die kleinste Reizstromstärke, die noch Erregung auslösen kann
- Chronaxie (C):** die zur doppelten Rheobase gehörende Reizdauer

Klinisches Beispiel



Clinical Neurophysiology 117 (2006) 2069–2072



www.elsevier.com/locate/clinph

Stromstärke **Reizdauer**

Effects of sex and age on strength–duration properties

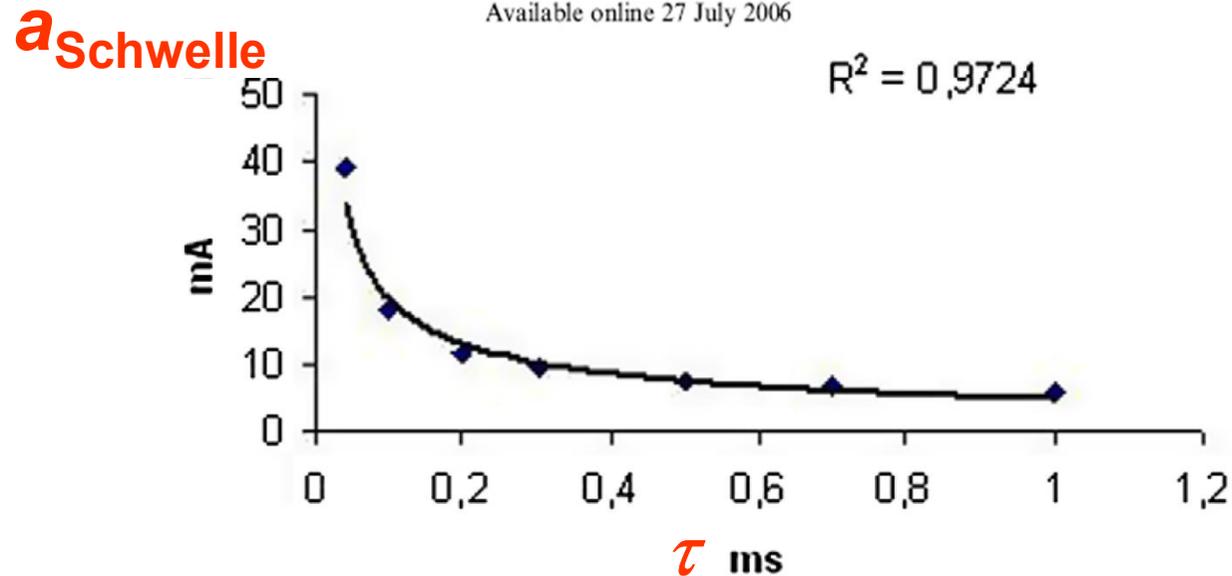
Deniz Yerdelen ^{a,*}, Hilmi Uysal ^b, Filiz Koc ^a, Yakup Sarica ^a

^a Department of Neurology, Cukurova University Medical School, Adana, Turkey

^b Ankara Physical Medicine and Rehabilitation Education and Research Hospital of Ministry of Health, Turkey

Accepted 21 May 2006

Available online 27 July 2006



II. Anwendungen des elektrisches Stromes in der Therapie

▪ Galvanisation

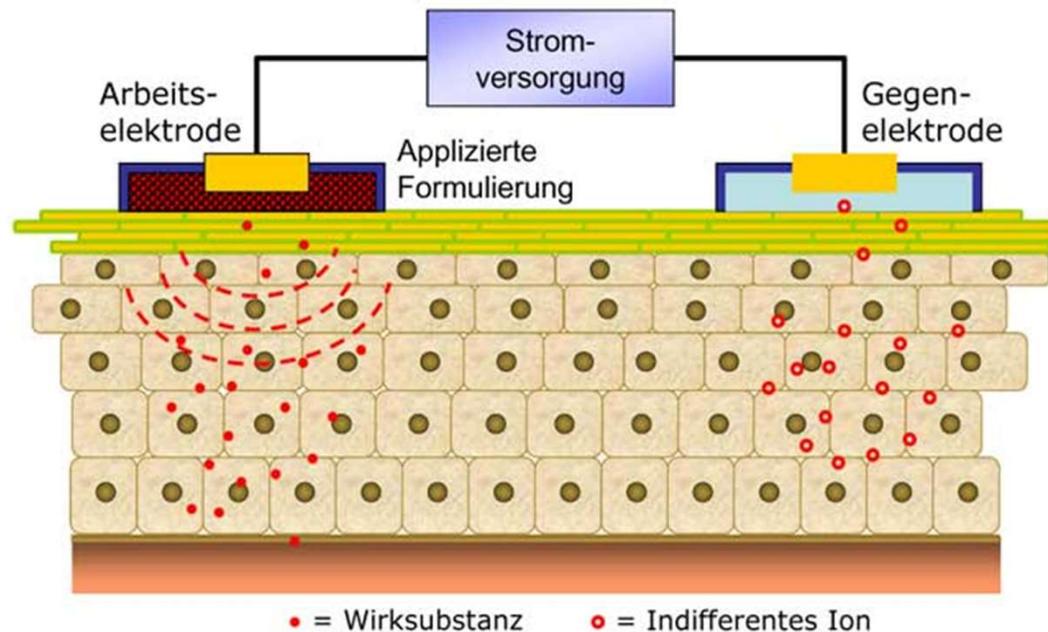


Gleichstrom, \approx mA, \approx 10 min



- Schmerzlinderung
- Durchblutungsförderung

▪ Iontophorese



Gleichstrom, \approx mA, \approx 10 min



Schnelle Anreicherung des Wirkstoffes gezielt am Krankheitsort unter Umgehung des Magen-Darm-Traktes

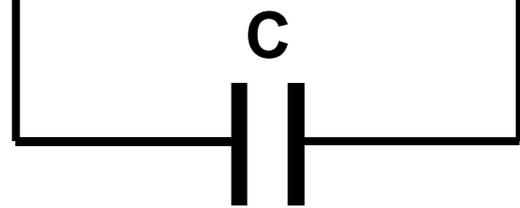
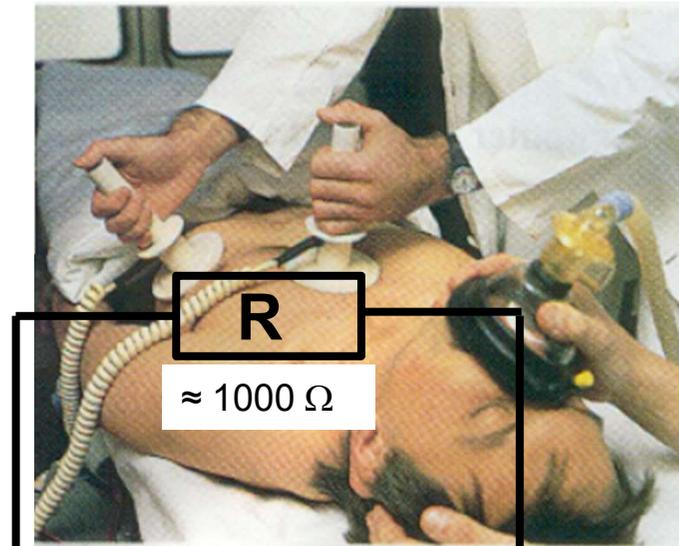
▪ Defibrillator

Zur Erinnerung:

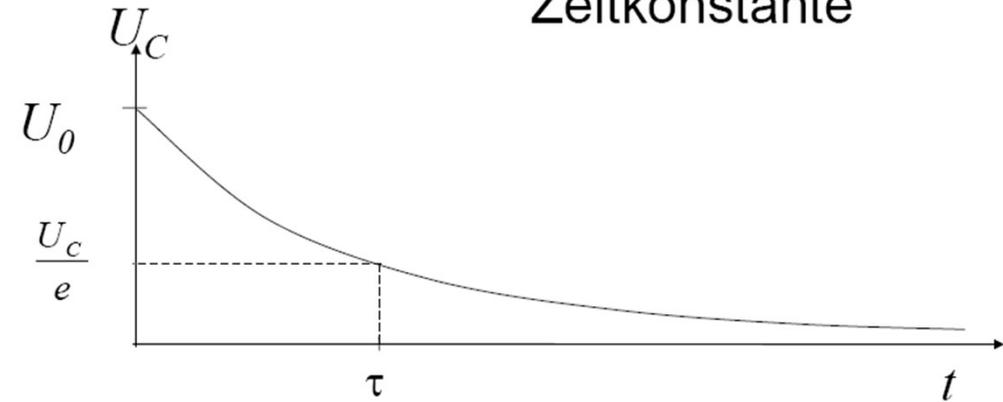
$$U_C = U_0 e^{-\frac{t}{\tau}}$$

$$\tau = RC$$

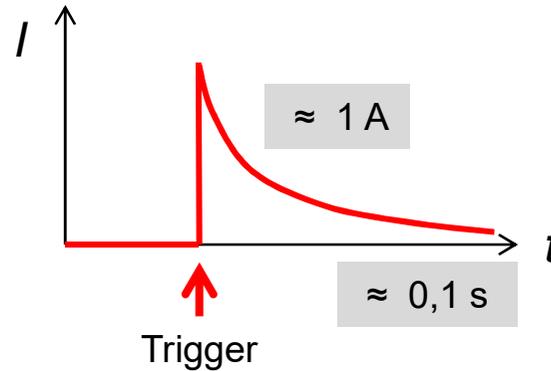
Zeitkonstante



≈ 20 μF, ≈ 5000 V, ≈ 1000 Ω

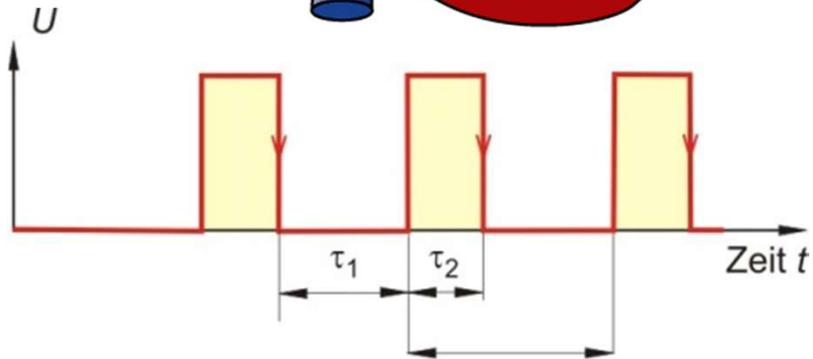
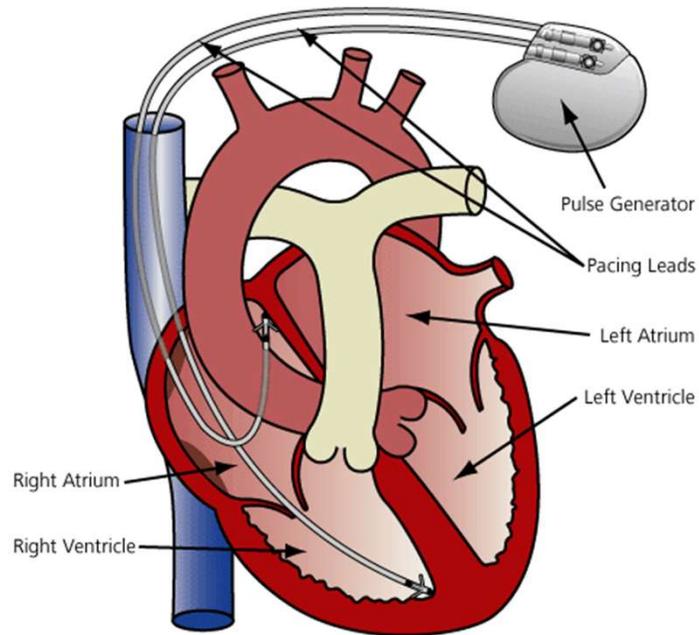


$$I = I_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \quad I_0 = \quad \tau =$$



$$W = \frac{1}{2} C U^2 = 250 \text{ J}$$

Herzschrittmacher



Periodendauer: $T = \tau_1 + \tau_2$

Tastverhältnis: $\frac{\tau_2}{\tau_1 + \tau_2} \cdot 100\%$

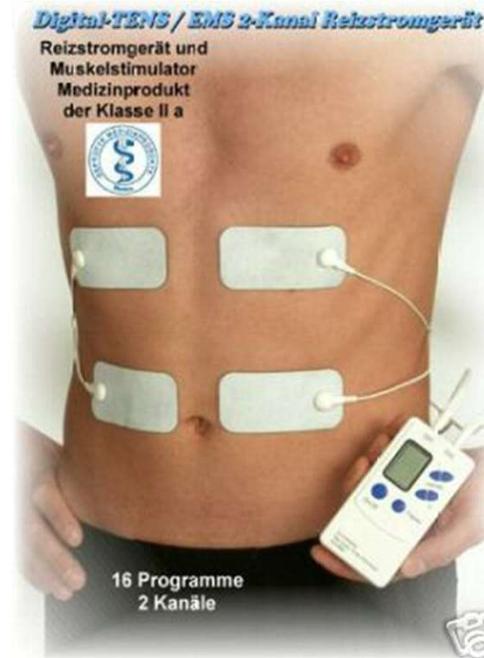
Rechteckimpulse, \approx ms, \approx s, \approx 1 V, \approx 200 Ω



Astabiler Multivibrator
(siehe Praktikumsstoff!)

$$I = \frac{U}{R} = 5 \text{ mA} > a_{\text{Schwelle}}$$

■ Reizstromtherapie



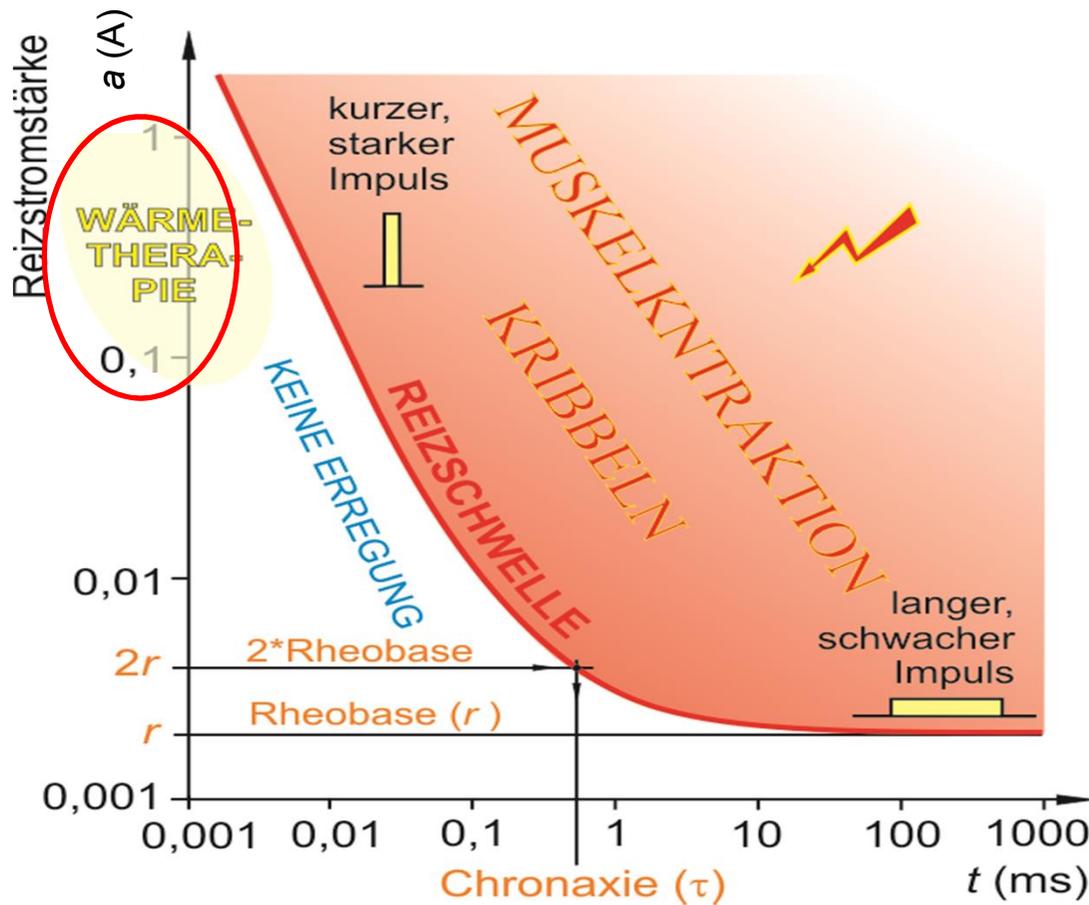
Rechteckimpulse (Einzelimpulse, Serienimpulse)

Astabiler oder monostabiler Multivibrator (siehe Praktikumsstoff!)

▪ **HF-Wärmetherapie** Wärmewirkung ohne Reizwirkung!

zur genügenden Wärme: $\approx 0,1 \text{ A}$

$$a_{\text{Schwelle}} = \frac{rC}{\tau} + r \quad \Rightarrow \quad \tau = \frac{rC}{a_{\text{Schwelle}} - r} =$$



(C)

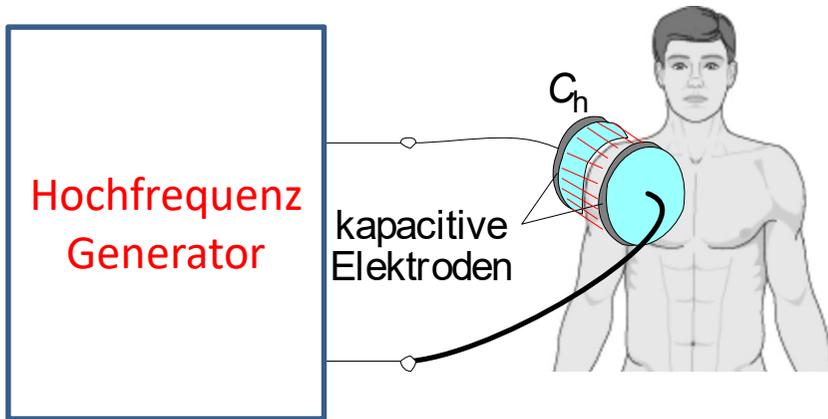
$$f \geq 10^5 \text{ Hz}$$



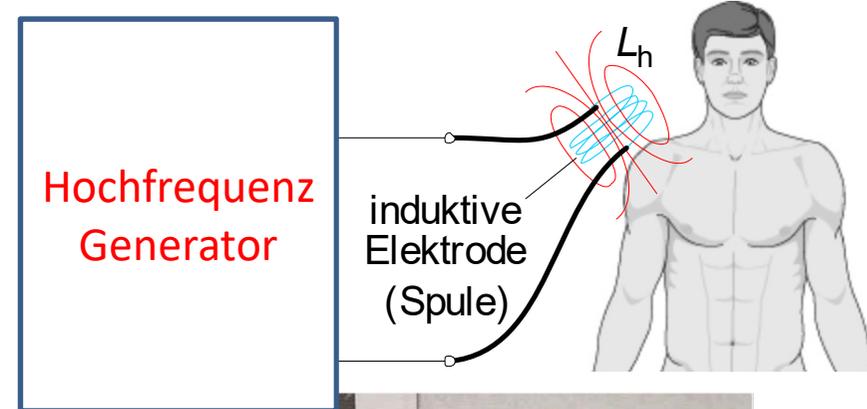
Hochfrequenter
(HF)
Wechselstrom

- Kurzwellentherapie (27 MHz)

Kondensatorfeldmethode



Spulenfeldmethode



▪ HF-Elektrochirurgie

