

## 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



Riechen



Sehen



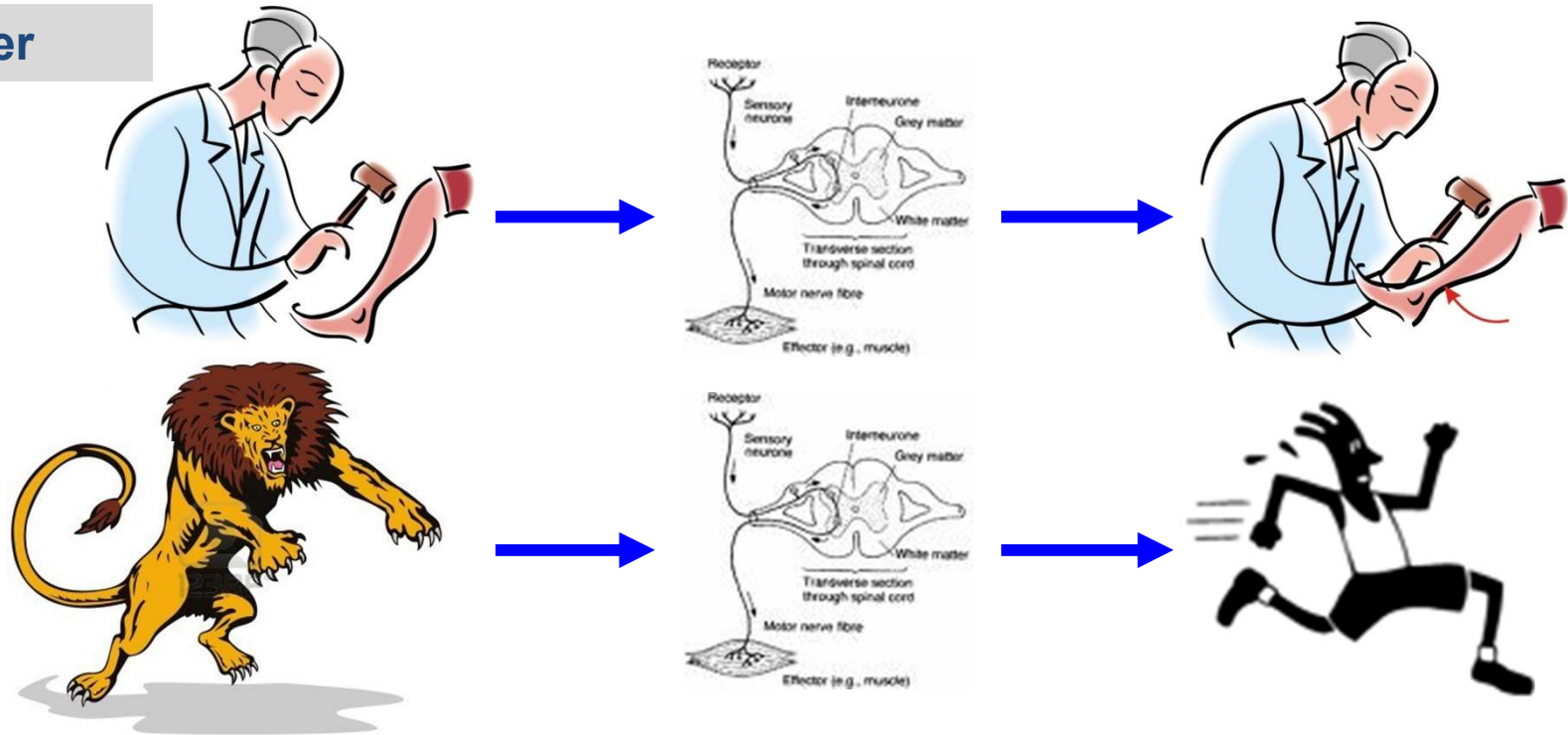
Hören



Temperatur-  
empfindung



## Im Körper



Schnelle Antwort ist nötig!

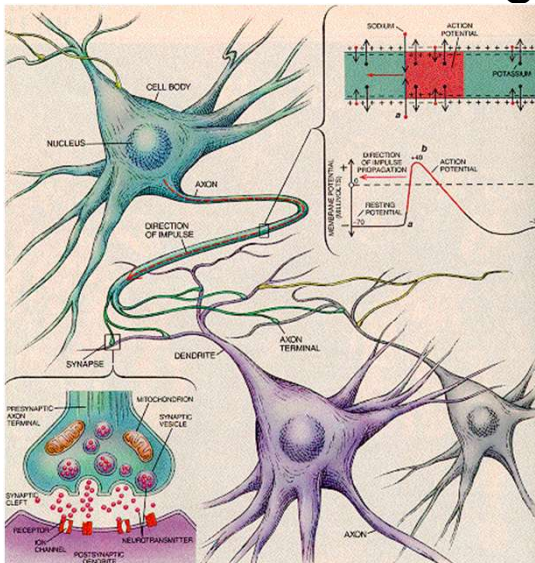


Diffusion?

Wärmeleitung?

Strömung?

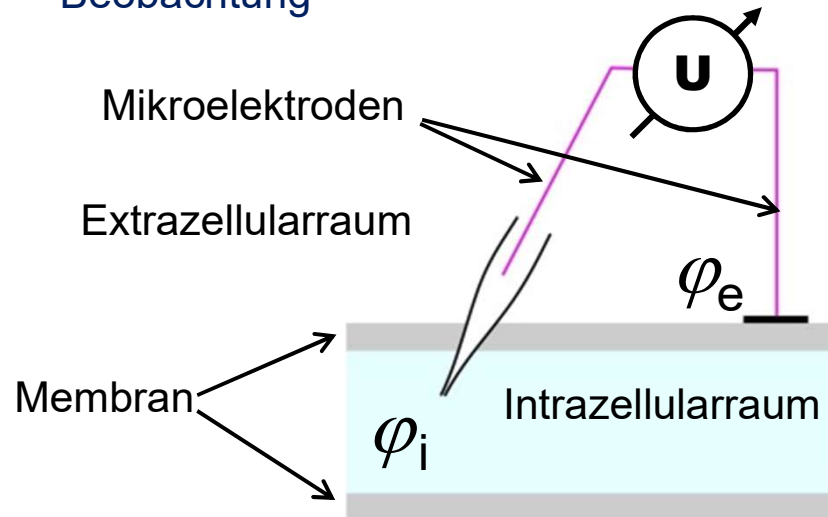
Elektrischer Strom?



# I. Membranpotenzial

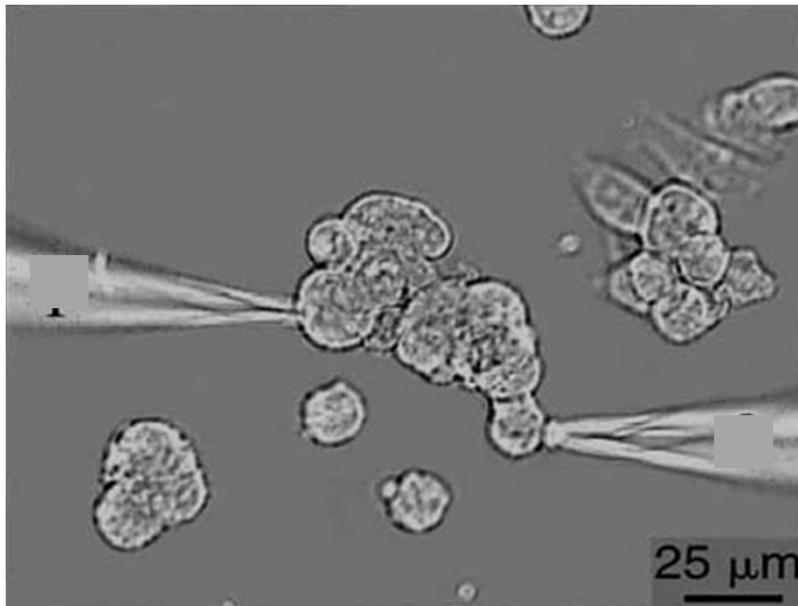
## 1. Ruhepotenzial

### ■ Beobachtung



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

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



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

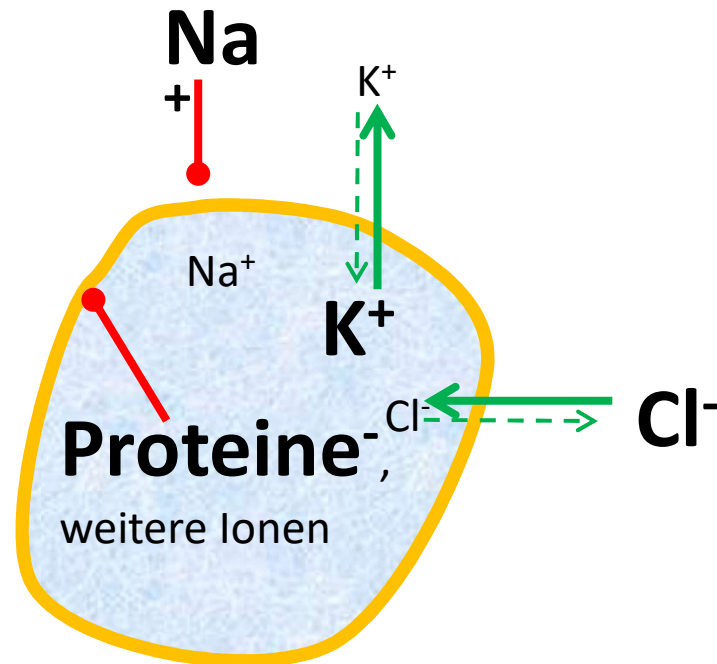


## ■ Erklärung

Eine andere Beobachtung ist die inhomogene Ionenverteilung:

	Intrazelluläre Konzentration (mmol/l)			Extrazelluläre Konzentration (mmol/l)		
	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Cl <sup>-</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Cl <sup>-</sup>
Zelle						
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

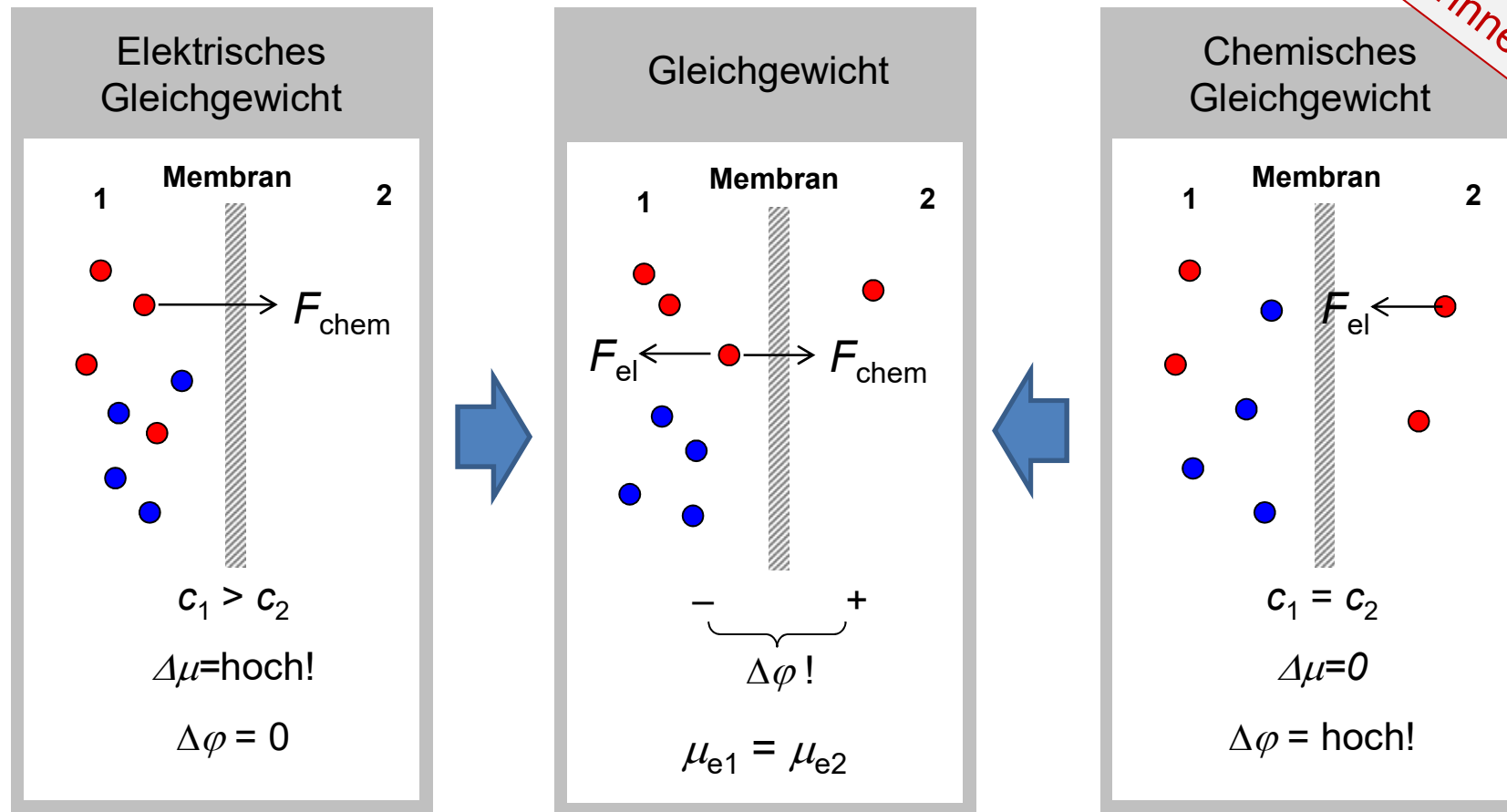
## ■ Donnan Modell (Gleichgewichtsmodell)



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:**

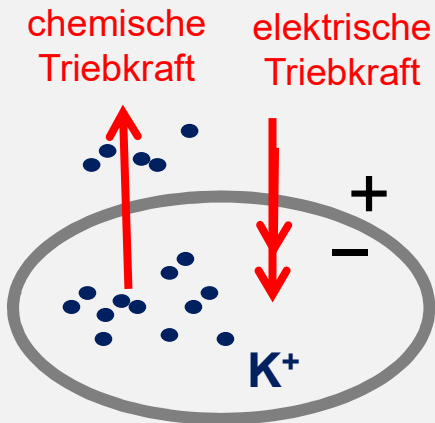
$$\Delta\phi = \phi_2 - \phi_1 = -\frac{RT}{F} \ln \frac{c_2}{c_1}$$

## ■ Erklärung

Inhomogene Ionenverteilung  $\Rightarrow$  Membranpotenzial

	Intrazelluläre Konzentration (mmol/l)			Extrazelluläre Konzentration (mmol/l)			$\Delta\varphi_m$ (mV)
Zelle	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Cl <sup>-</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Cl <sup>-</sup>	
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<sup>+</sup>-Ionen und Tintenfisch-Riesenaxon):

**Gleichgewichtspotenzial (Nullstrompotenzial) für K<sup>+</sup>:**

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

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

$\Rightarrow$  **Das Modell stimmt nicht, es gibt kein Gleichgewicht! Ständiger K<sup>+</sup>-Ausstrom!**

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



Es gibt kein Gleichgewicht!  
Ständiger K<sup>+</sup>-Ausstrom, Na<sup>+</sup>-Einstrom, und ein wenig Cl<sup>-</sup>-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.

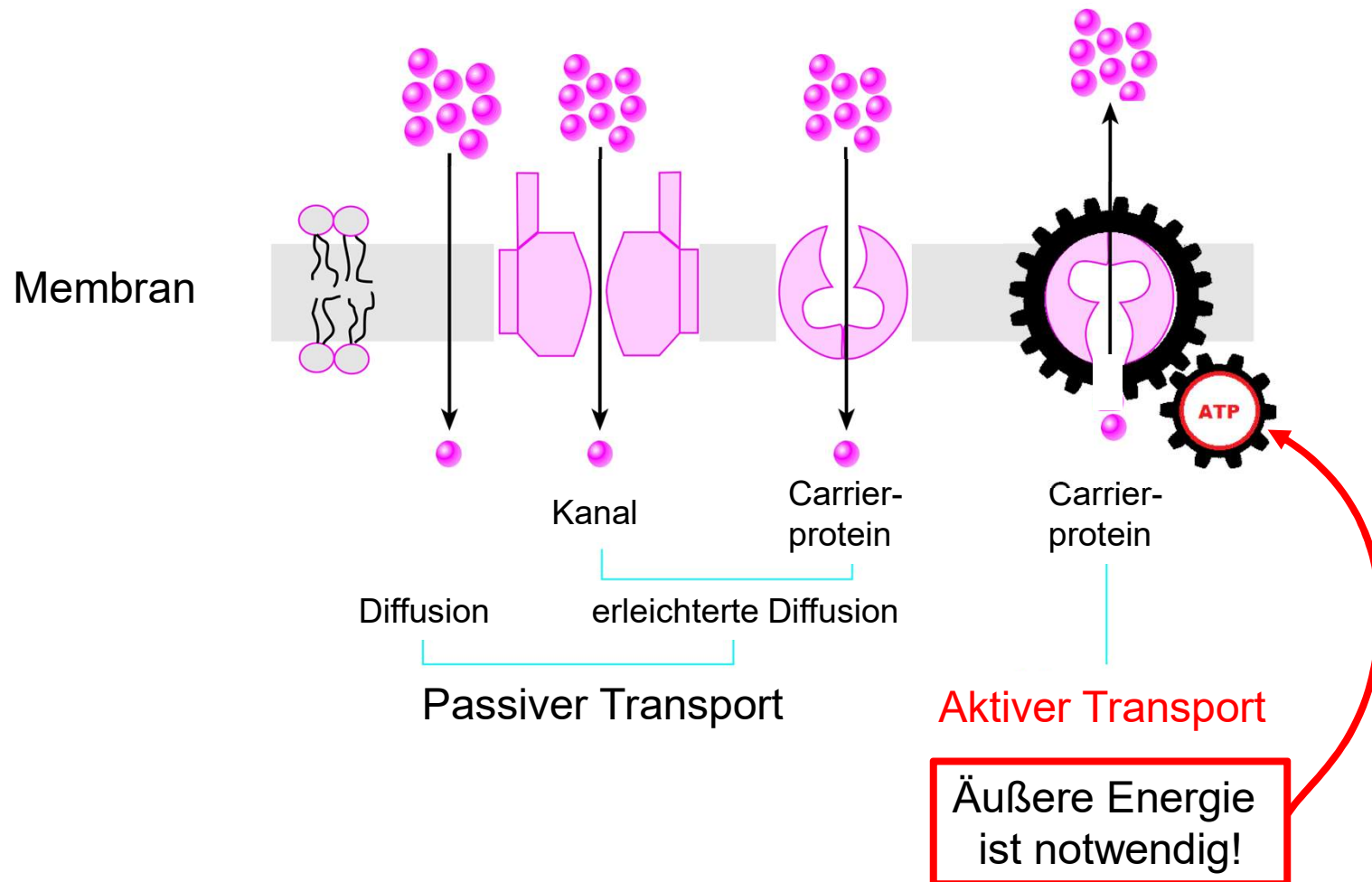


## ■ Transportmodell

Ständige Diffusion von Ionen mit unterschiedlichen Permeabilitäten

⇒ Diffusionspotenzial

⇒ Rücktransport (aktiv)



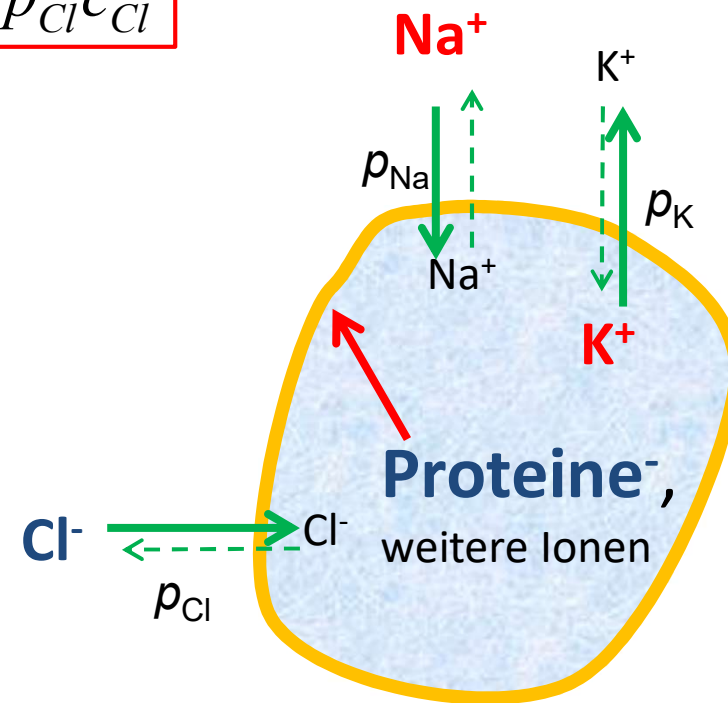
- **Transportmodell** Ständige Diffusion von Ionen mit unterschiedlichen Permeabilitäten

⇒ Diffusionspotenzial

⇒ Rücktransport (aktiv)

**Goldman-Hodgkin-Katz-Gleichung:**

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



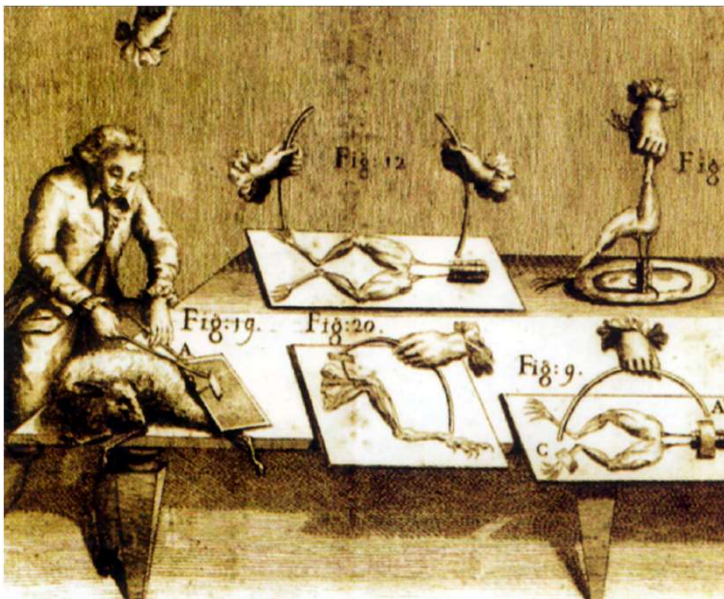
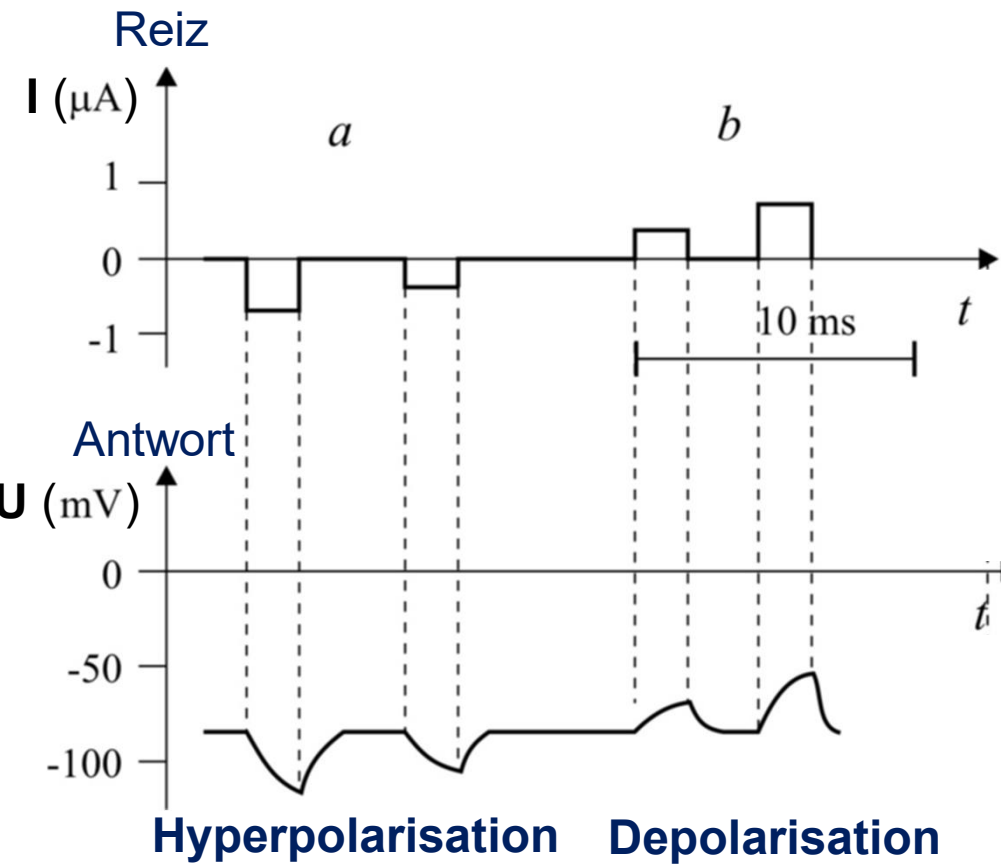
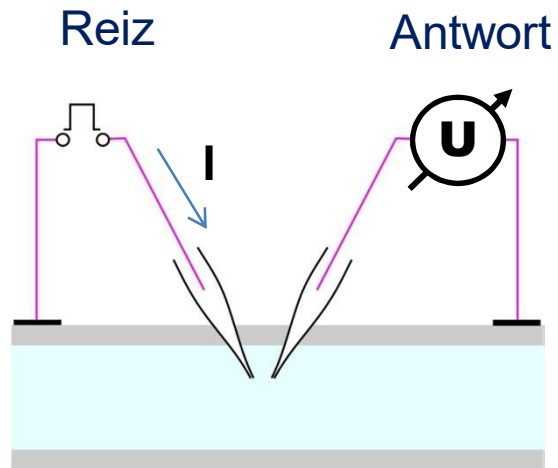
Zelle	Aus der Nernst-Gleichung: $\Delta\varphi_{\text{eq}}$ (mV)			Gemessene Werte $\Delta\varphi_{\text{m}}$ (mV)
	$\text{Na}^+$	$\text{K}^+$	$\text{Cl}^-$	
Tintenfisch-Riesenaxon	+46	-89	-55	↔ -62
Froschmuskel	+45	-101	-87	↔ -92



	$\varphi(\text{gerechnet})$ (mV)	$\varphi(\text{gemessen})$ (mV)
Tintenfisch-Riesenaxon	<b>-63</b>	<b>-62</b>
Froschmuskel	<b>-91</b>	<b>-92</b>

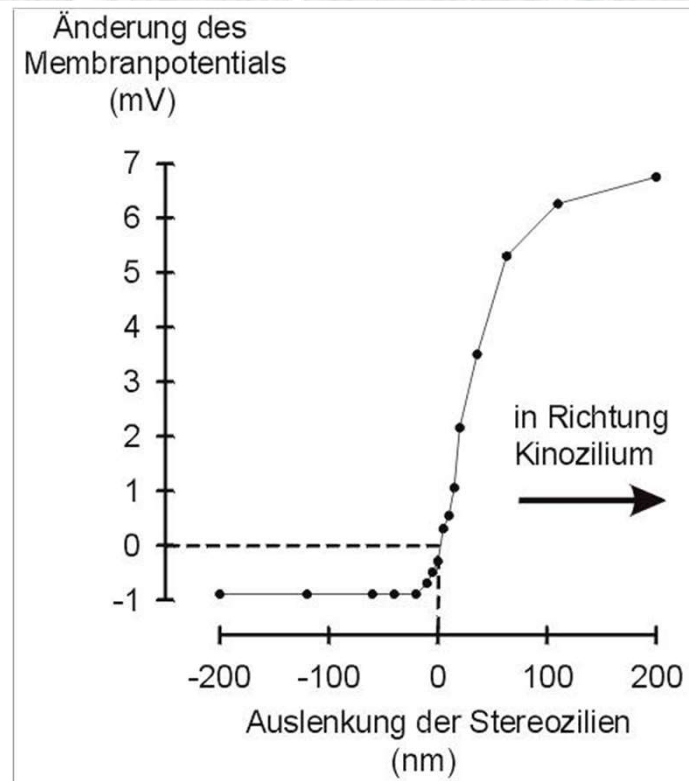
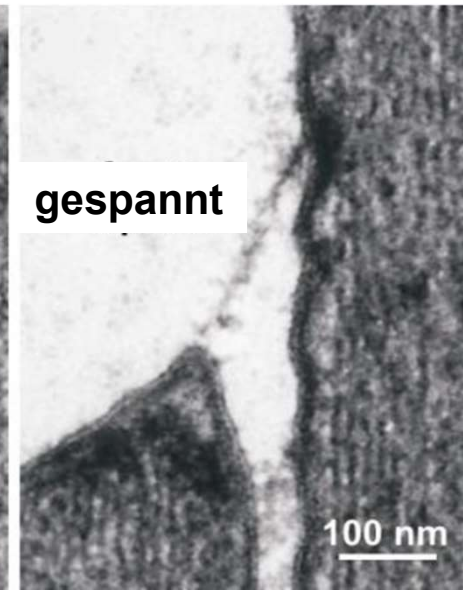
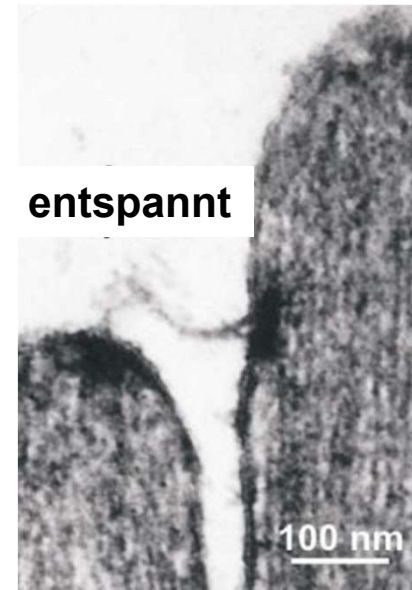
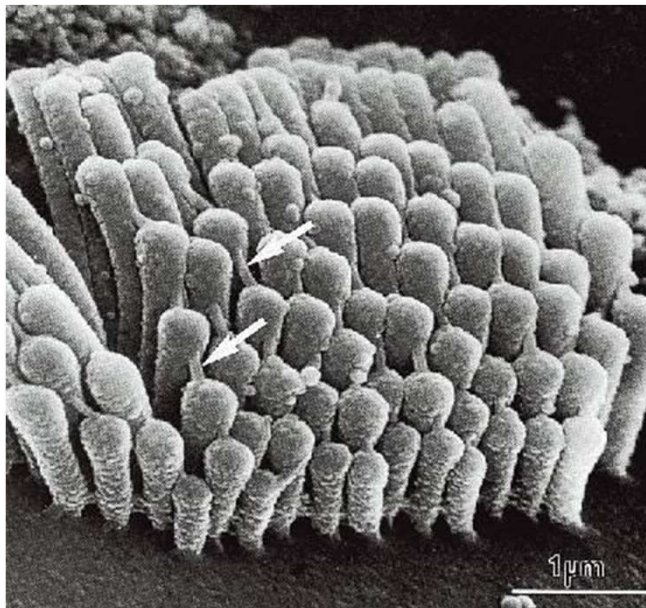
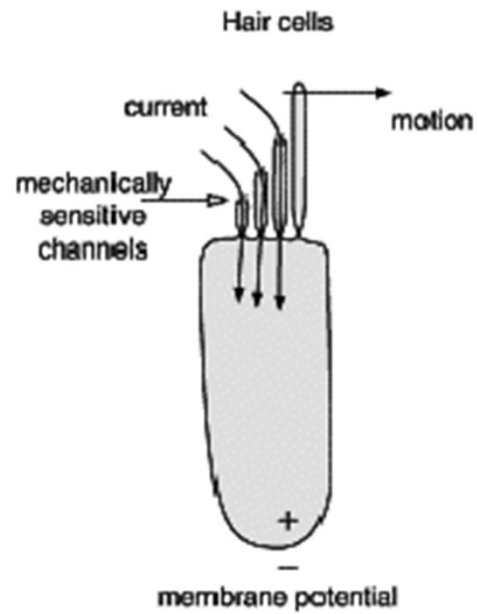
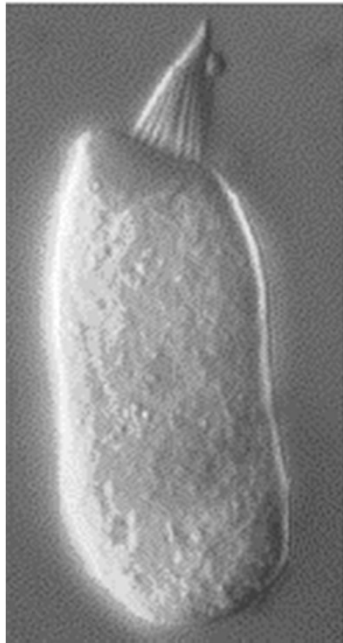


## 2. Lokale (elektrotonische) Änderungen des Membranpotenzials

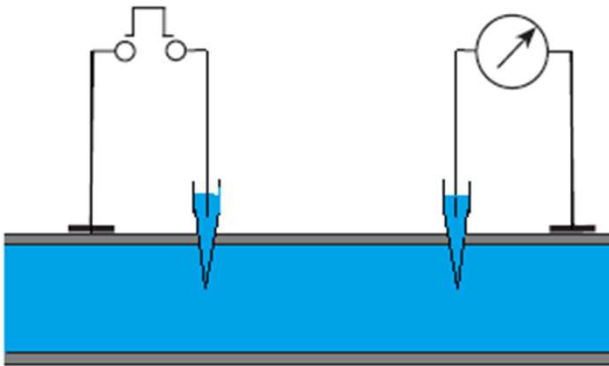


## Beispiele:

### Haarzelle



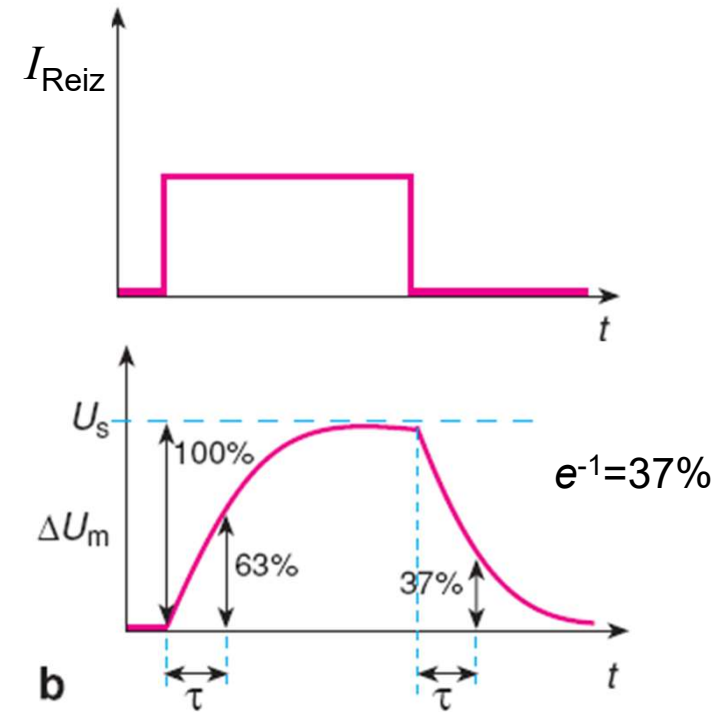
- Lokale Änderung des Ruhepotenzials: Zeitlicher Ablauf



Spannungsverlauf beim Anfang  
der Erregung

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

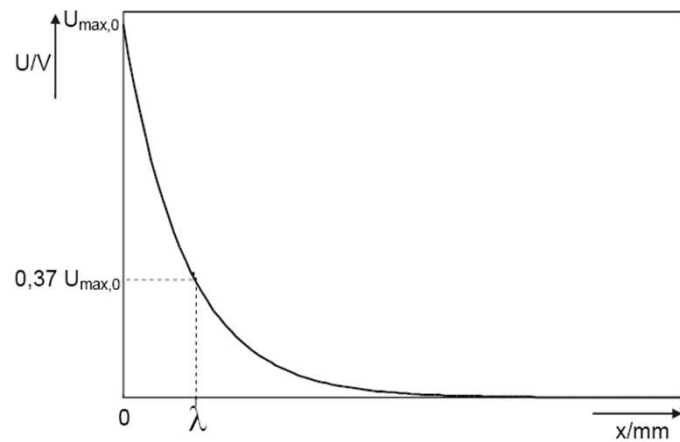
$\tau$ : Zeitkonstante



siehe RC Kreis !

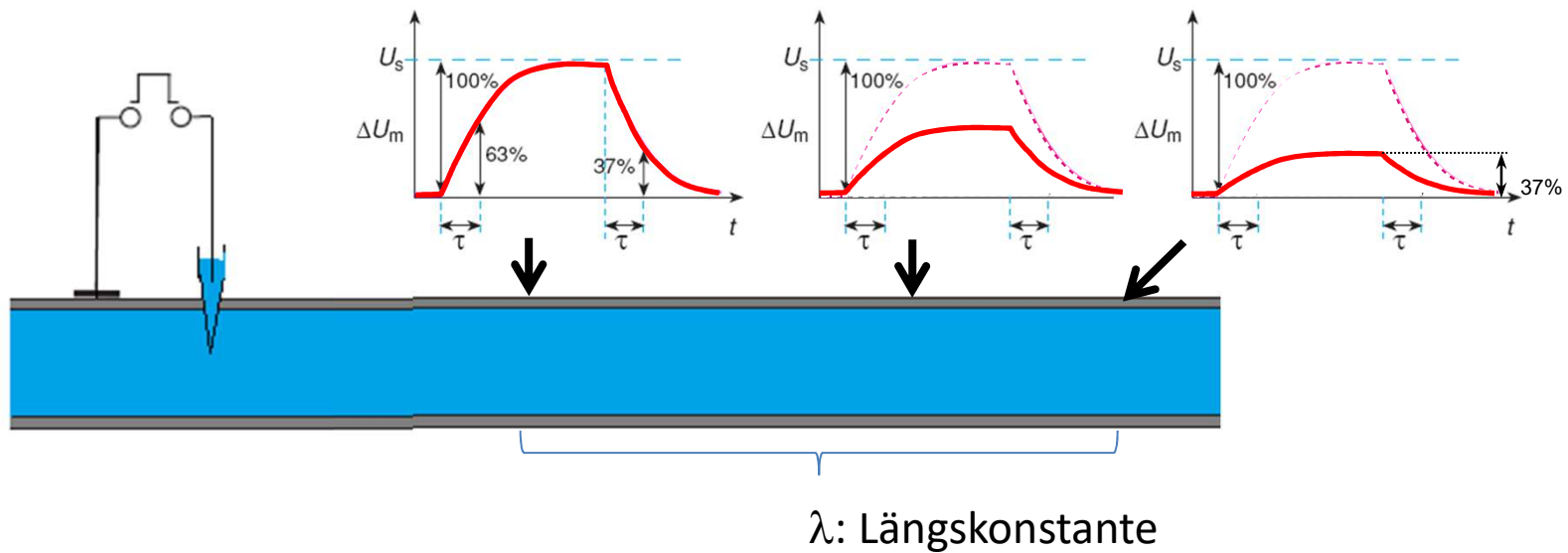


- Lokale Änderung des Ruhepotenzials: Raumlicher Ablauf

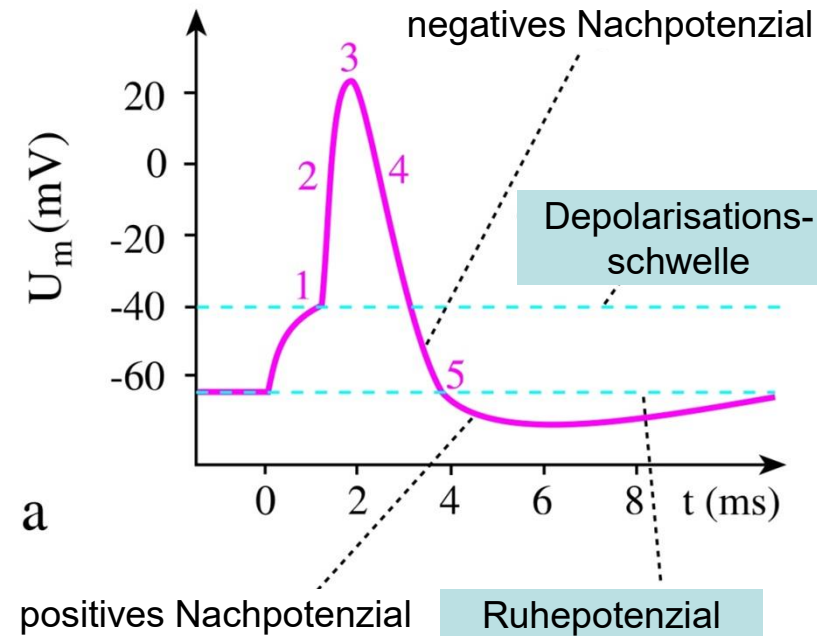
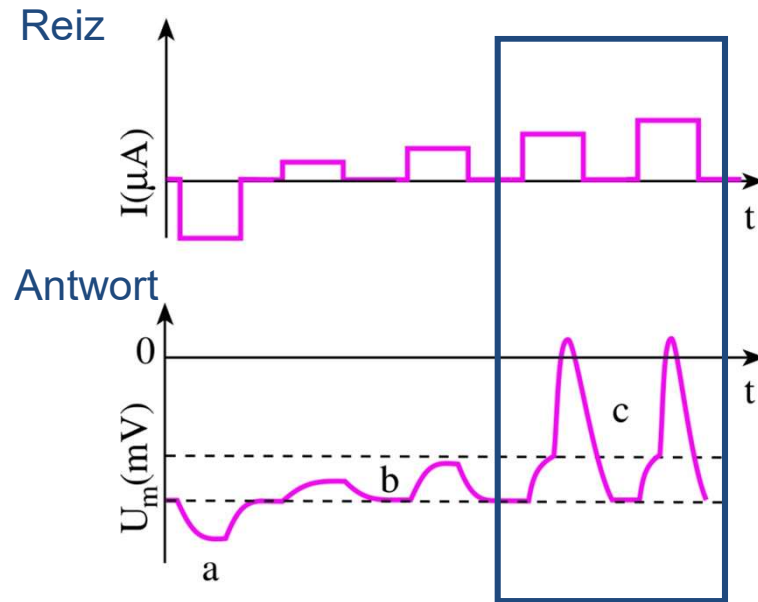


Spannungsabfall längs einer Zelle

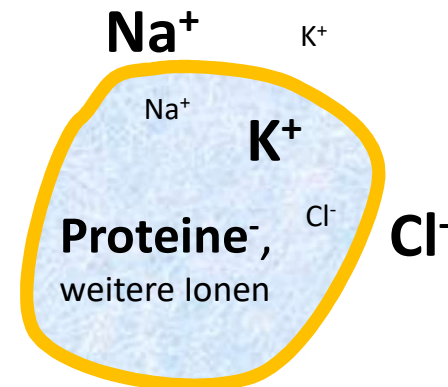
$\lambda$ : Längskonstante



### 3. Aktionspotenzial

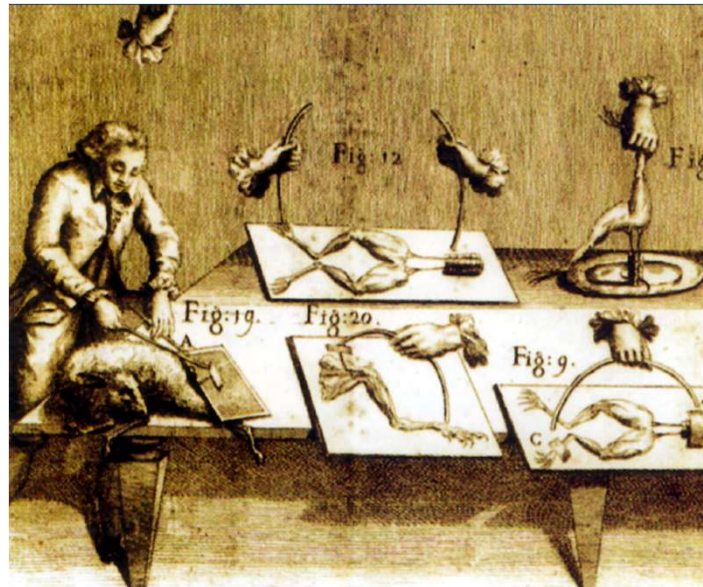


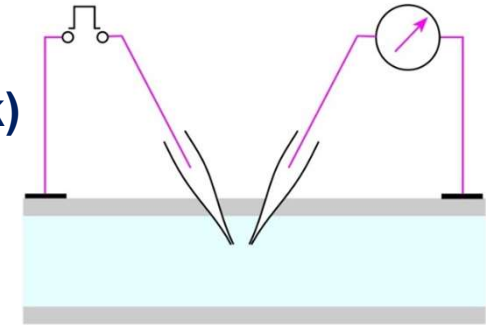
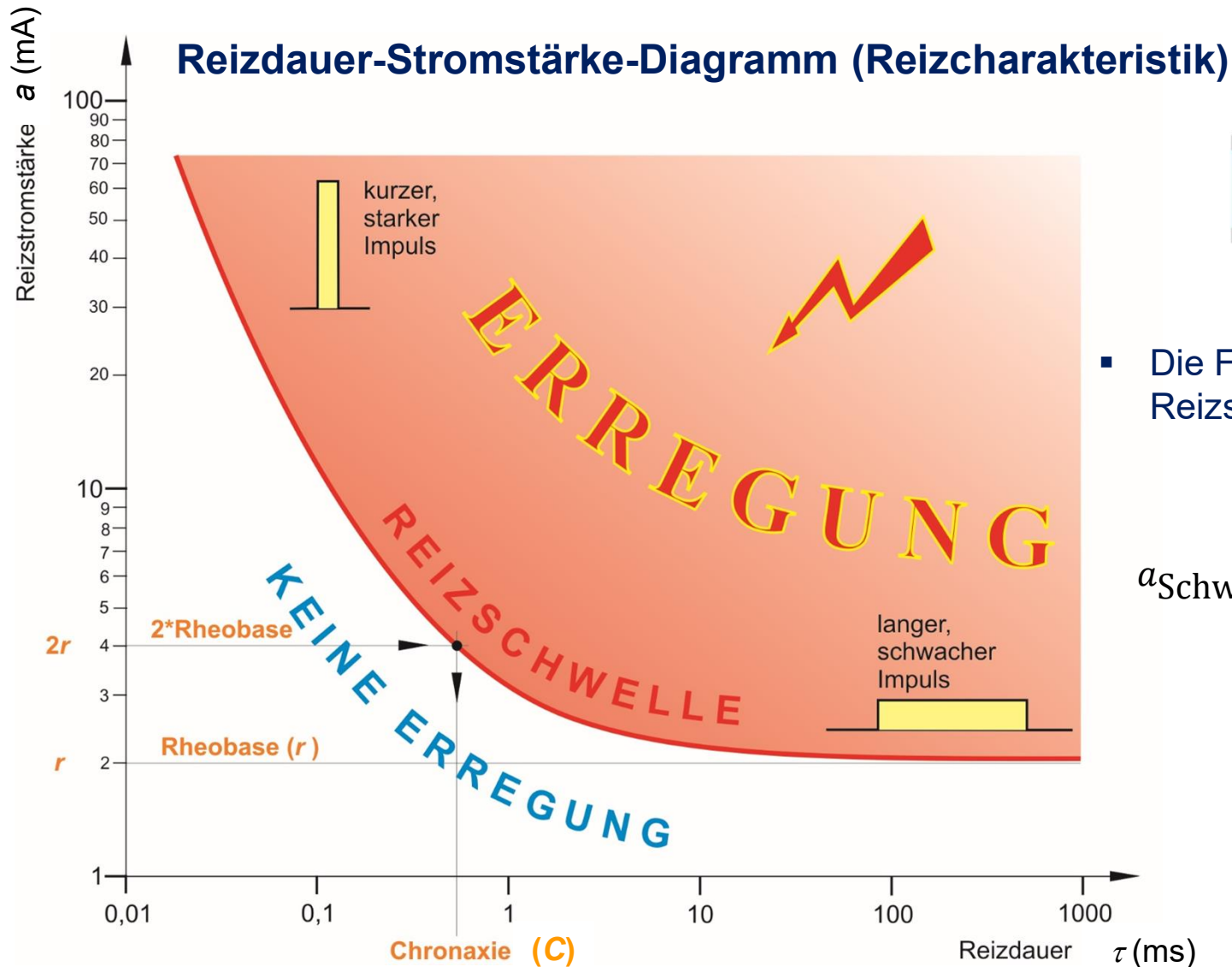
1. Öffnung der  $Na^+$ -Kanäle
2. Öffnung der  $K^+$ -Kanäle
3. Inaktivierung eines Teils der  $Na^+$ -Kanäle
4. Weiteres Ausströmen von  $K^+$
5. Schluss der  $K^+$ -Kanäle



## 4. Anwendungen

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

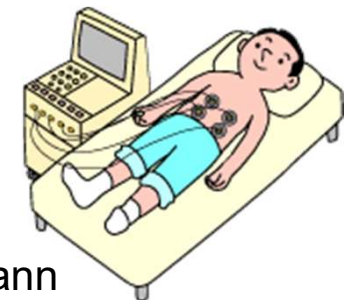




- Die Funktion der Reizschwellenkurve:

$$q = rC$$

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



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



Stromstärke

Reizdauer

### Effects of sex and age on strength–duration properties

Deniz Yerdelen <sup>a,\*</sup>, Hilmi Uysal <sup>b</sup>, Filiz Koc <sup>a</sup>, Yakup Sarica <sup>a</sup>

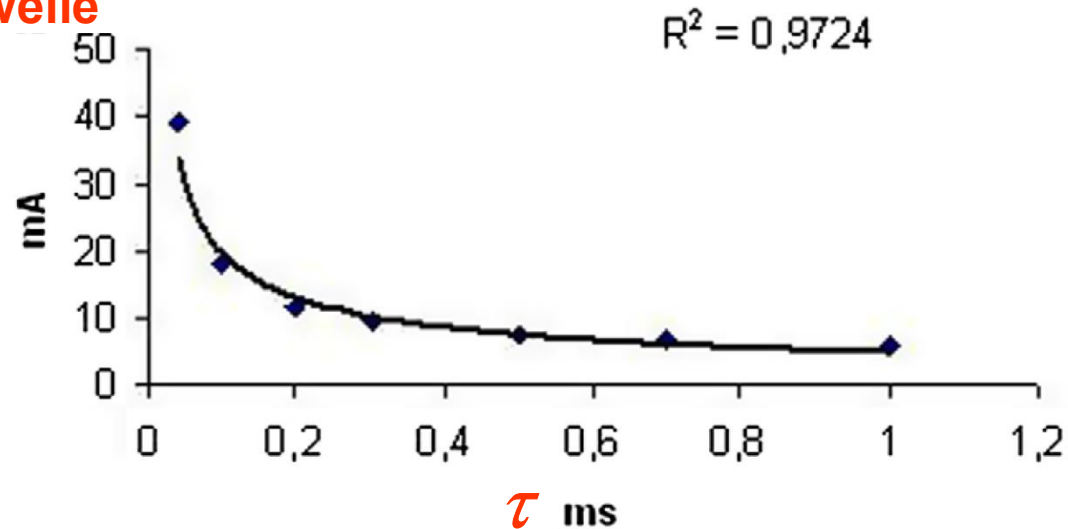
<sup>a</sup> Department of Neurology, Cukurova University Medical School, Adana, Turkey

<sup>b</sup> Ankara Physical Medicine and Rehabilitation Education and Research Hospital of Ministry of Health, Turkey

Accepted 21 May 2006

Available online 27 July 2006

<sup>a</sup>Schwelle





## II. Anwendungen des elektrischen Stromes in der Therapie

### ▪ Galvanisation

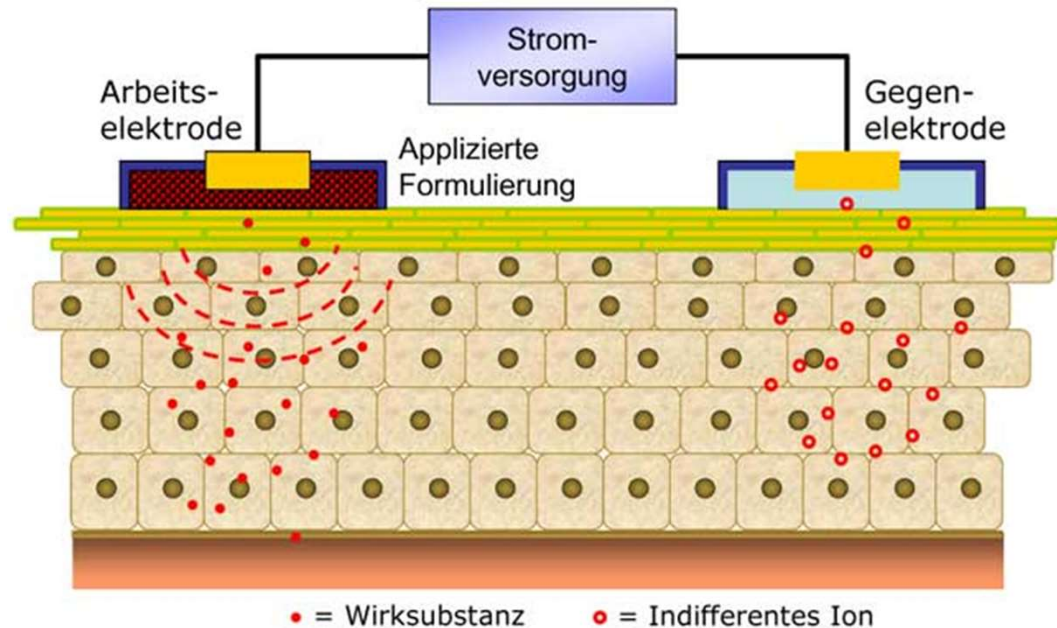


Gleichstrom,  $\approx$  mA,  $\approx$  10 min



- Schmerzlinderung
- Durchblutungsförderung

### ▪ Iontophorese



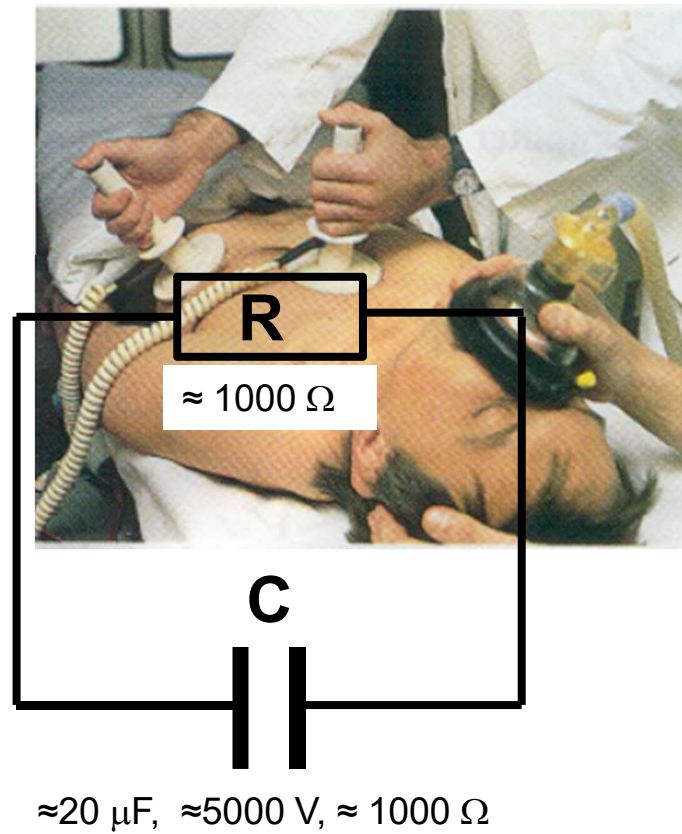
Gleichstrom,  $\approx$  mA,  $\approx$  10 min



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



## ▪ Defibrillator

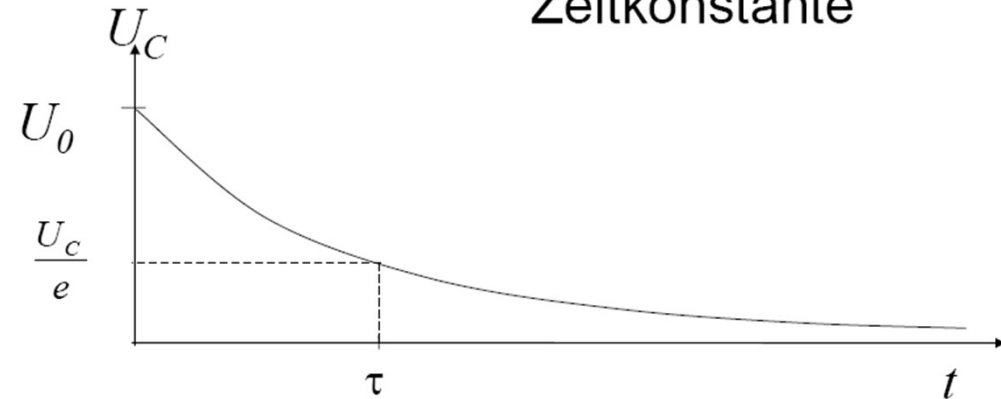


Zur Erinnerung:

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

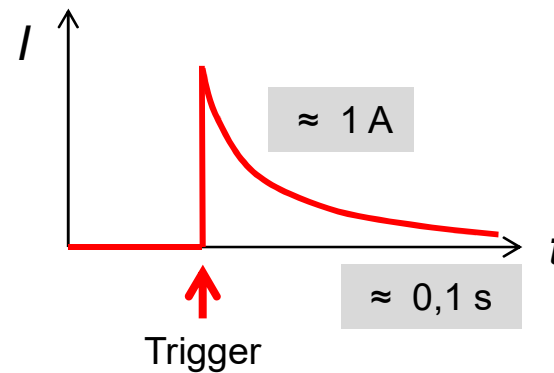
$$\tau = RC$$

Zeitkonstante



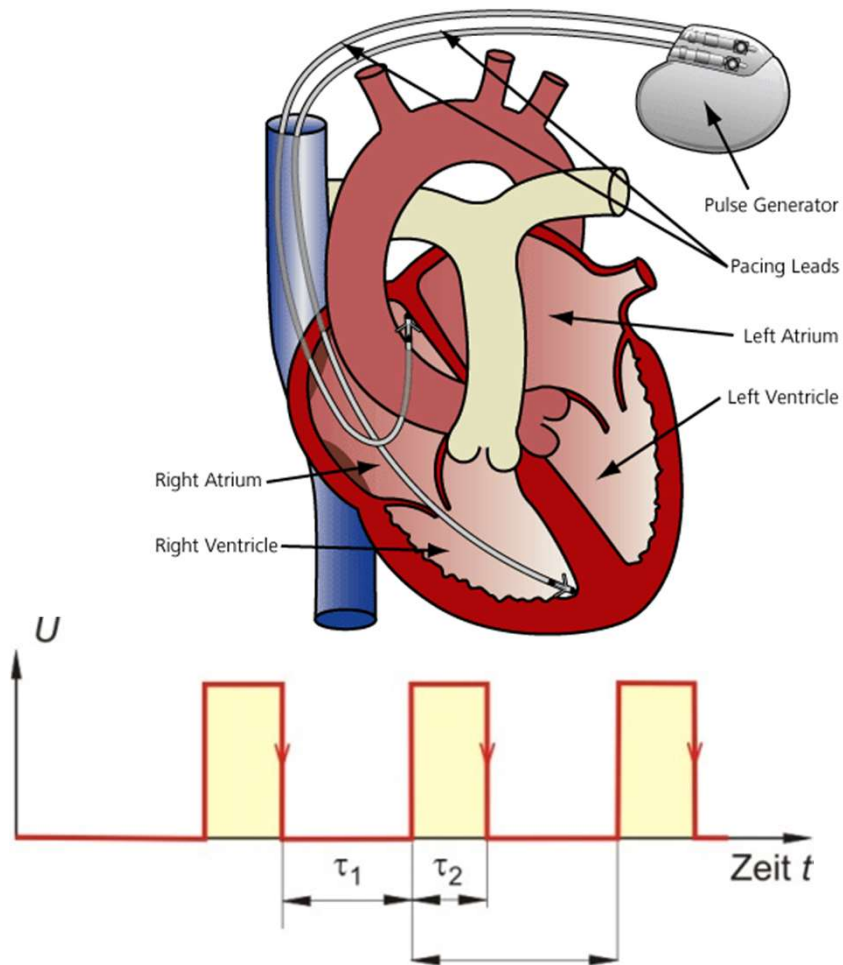
$$I = I_0 e^{-\frac{t}{\tau}}$$

$I_0 =$   
 $\tau =$



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

## ■ 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,  $\approx 200 \Omega$



Astabiler Multivibrator  
(siehe Praktikumsstoff!)

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

## ■ Reizstromtherapie



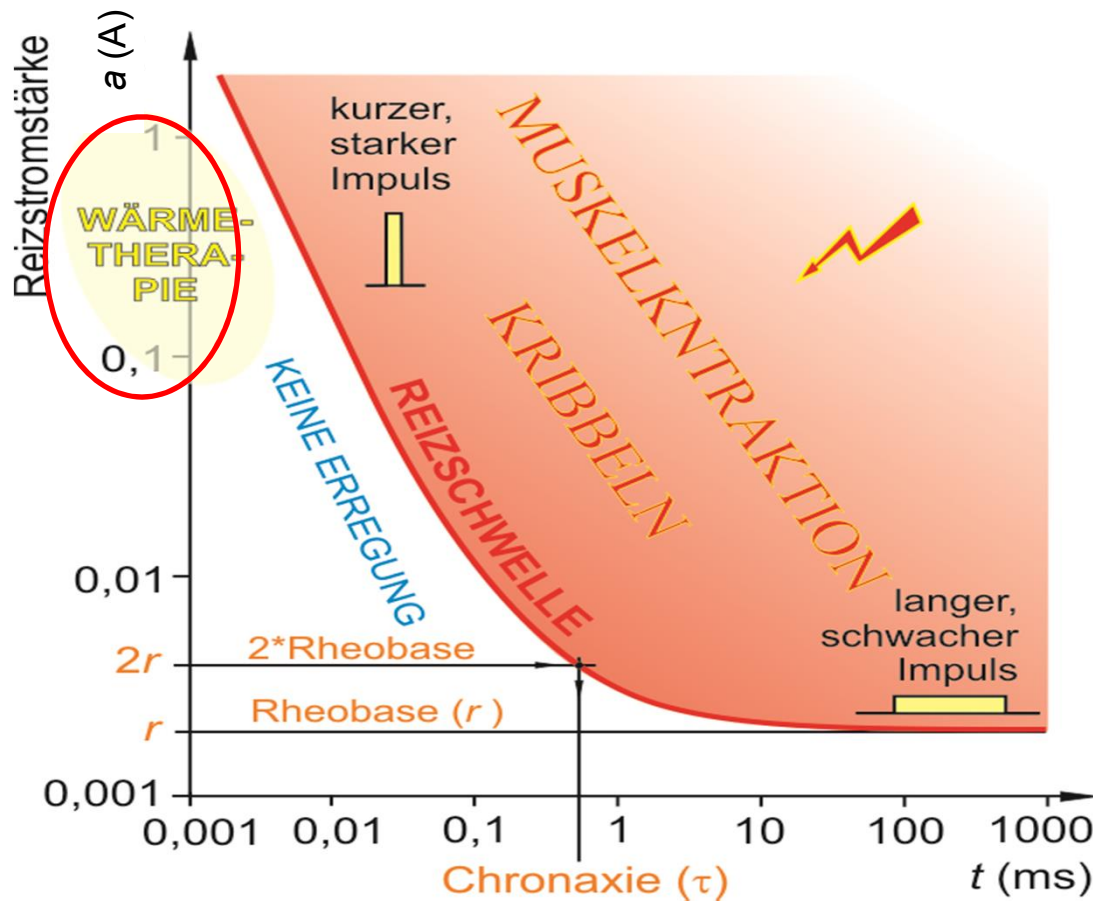
Rechteckimpulse (Einzelimpulse, Serienimpulse)

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)

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

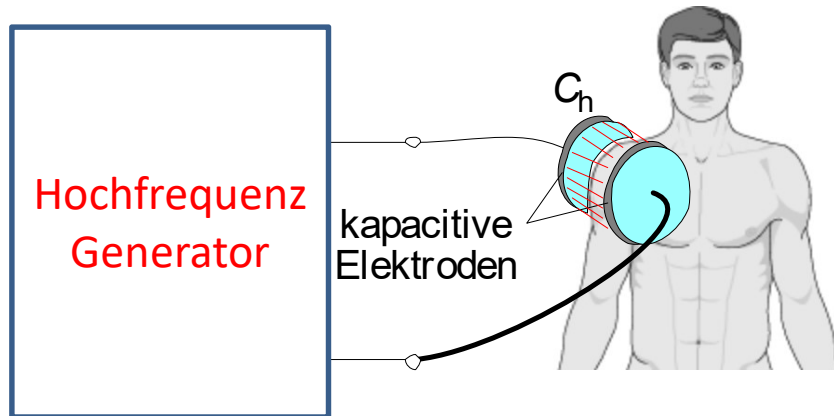


Hochfrequenter  
(HF)  
Wechselstrom

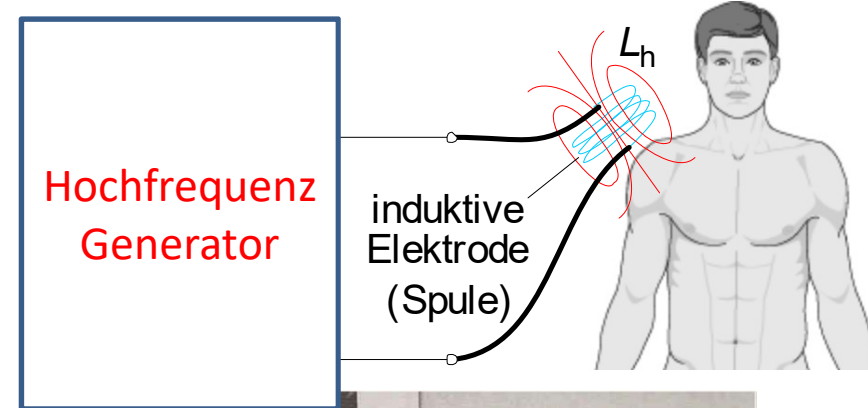


- Kurzwellentherapie (27 MHz)

### Kondensatorfeldmethode



### Spulenfeldmethode



## ■ HF-Elektrochirurgie

