

## I. Membranpotenzial

1. Ruhepotenzial
  - Gleichgewichtspotenzial (Nullstrompotenzial)
  - Transportmodell, Goldman-Hodgkin-Katz-Gleichung
2. Lokale (elektrotonische) Änderungen des Membranpotenzials
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, Sinusoszillator
- HF-Chirurgie

1

## Ergänzung zu den Transportprozessen

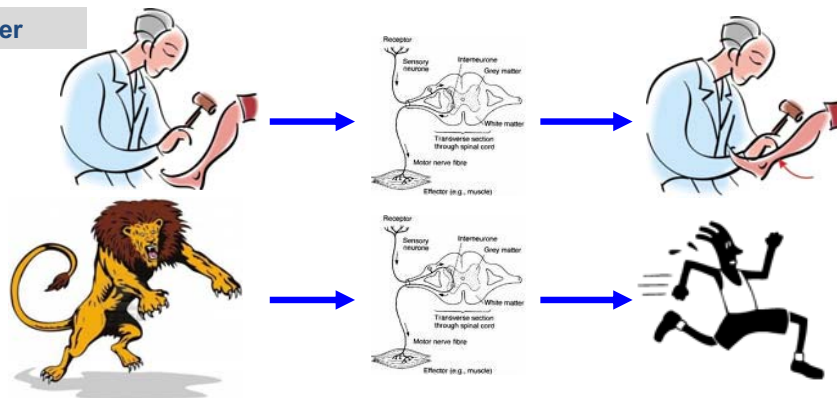
### + Informationstransport

### Körper ↔ Umwelt



2

### Im Körper



Schnelle Antwort ist nötig!

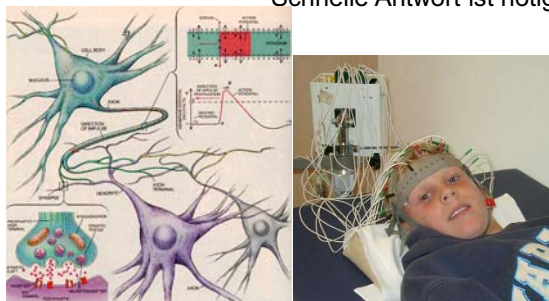


Diffusion?

Wärmeleitung?

Strömung?

Elektrischer Strom?

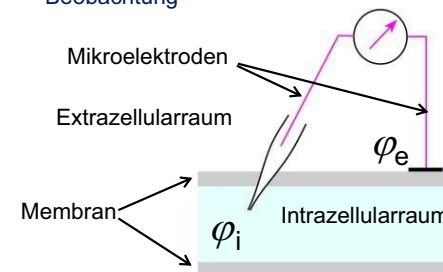


3

## I. Membranpotenzial

### 1. Ruhepotenzial

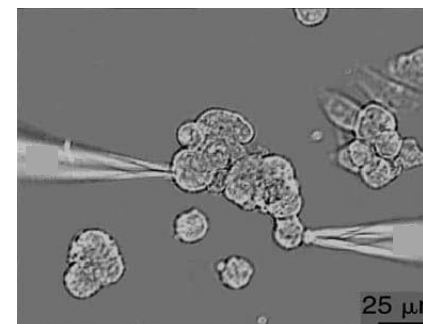
- Beobachtung



$$\Delta\phi = \phi_i - \phi_e < 0$$

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

Bezeichnungen:  $\Delta\phi$ ,  $\Delta\phi_m$ ,  $\phi$ ,  $U$ ,  $U_m$ ,  $E$ , ...



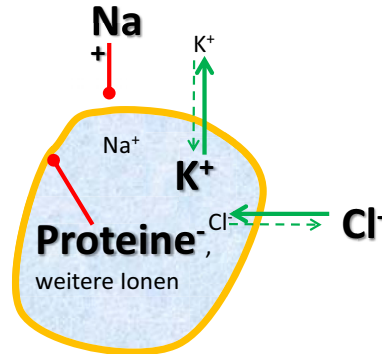
4

## Erklärung

Eine andere Beobachtung ist die inhomogene Ionenverteilung:

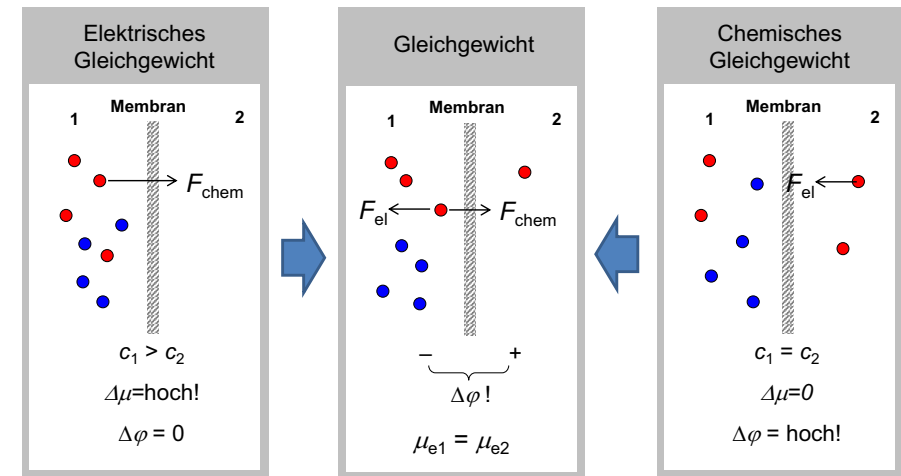
	Intrazelluläre Konzentration (mmol/l)			Extrazelluläre Konzentration (mmol/l)		
Zelle	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Cl <sup>-</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Cl <sup>-</sup>
Tintenfisch-Riesenaxon	72	345	61	455	10	540
Froschmuskel	20	139	3,8	120	2,5	120
Rattenmuskel	12	180	3,8	150	4,5	110

## Donnan Modell (Gleichgewichtsmodell)



5

Die Permeabilität für das eine Ion ist Null, z. B.  $p_k > p_a = 0$



- Kation (k)
- Anion (a)

**Elektrochemisches Potenzial (J/mol):**

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

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

## Erklärung

Eine andere Beobachtung ist die inhomogene Ionenverteilung:

	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 Ruhepotential 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:  $\Delta\varphi_m = -62 \text{ mV}$

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

Zelle	Aus der Nernst-Gleichung: $\Delta\varphi_{eq}$ (mV)			$\Delta\varphi_m$ (mV)
	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Cl <sup>-</sup>	
Tintenfisch-Riesenaxon	+46	-89	-55	-62
Froschmuskel	+45	-101	-87	-92
Rattenmuskel	+64	-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!

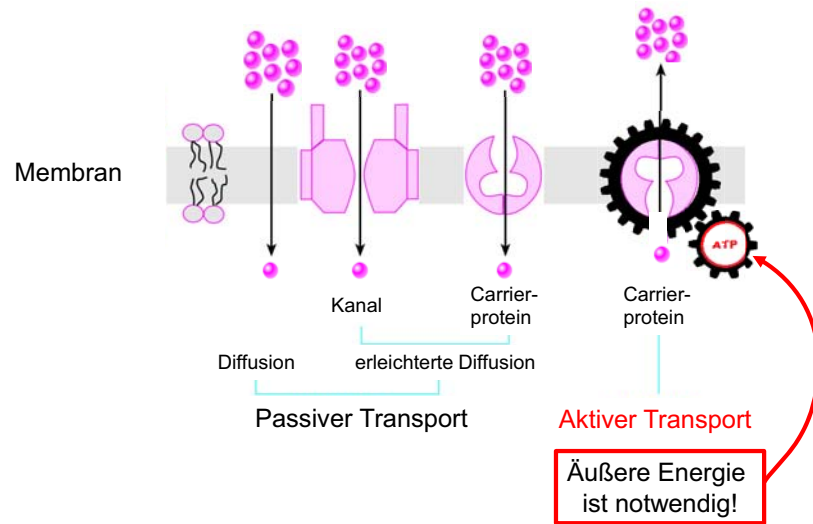
\*„steady state“  
ist eine Situation, in welchem  
sind alle Parameter des Systems  
konstant, obwohl die gängige  
Prozesse nach Veränderung  
diese Parameter streben.

8

## Transportmodell

Ständige Diffusion von Ionen mit unterschiedlichen Permeabilitäten

⇒ Diffusionspotenzial  
⇒ Rücktransport (aktiv)



9

## V. Zusammenfassung

Zur Erinnerung

	Was strömt?	Stärke?	Warum?	Zusammenhang	
Ladungs-transport	$q$	$\frac{\Delta q}{A \cdot \Delta t}$	$\varphi$	$-\frac{\Delta \varphi}{\Delta l}$	$\frac{\Delta q}{A \cdot \Delta t} = -\sigma \frac{\Delta \varphi}{\Delta l}$
Volumen-transport	$V$	$\frac{\Delta V}{A \cdot \Delta t}$	$p$	$-\frac{\Delta p}{\Delta l}$	$\frac{\Delta V}{A \cdot \Delta t} = -\frac{r^2}{8\eta} \frac{\Delta p}{\Delta l}$
Stoff-transport	$v$	$\frac{\Delta v}{A \cdot \Delta t}$	$c^*$	$-\frac{\Delta c}{\Delta x}$	$\frac{\Delta v}{A \cdot \Delta t} = -D \frac{\Delta c}{\Delta x}$
Energie-transport	$E$	$\frac{\Delta E}{A \cdot \Delta t}$	$T$	$-\frac{\Delta T}{\Delta x}$	$\frac{\Delta E}{A \cdot \Delta t} = -\lambda \frac{\Delta T}{\Delta x}$
allgemein	$x_{\text{ext}}$	$J = \frac{\Delta x_{\text{ext}}}{A \cdot \Delta t}$	$y_{\text{int}}$	$X = -\frac{\Delta y_{\text{int}}}{\Delta x}$	$J = LX$
	extensive Gr.	Strom-dichte	intensive Gr.	thermo-dynamische Kraft	onsagersche Beziehung

10

## Transportmodell

Ständige Diffusion von Ionen mit unterschiedlichen Permeabilitäten

⇒ Diffusionspotenzial  
⇒ Rücktransport (aktiv)

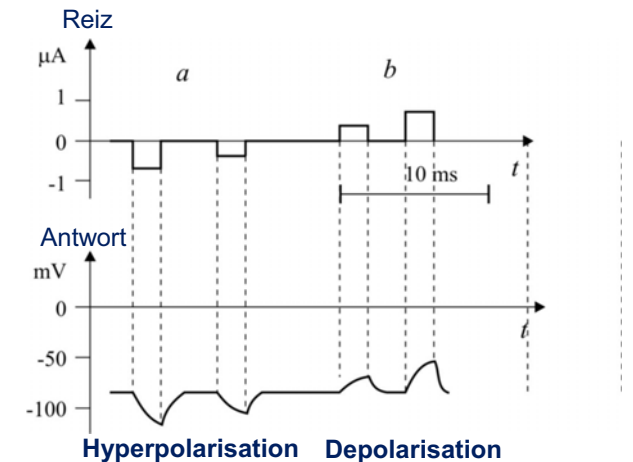
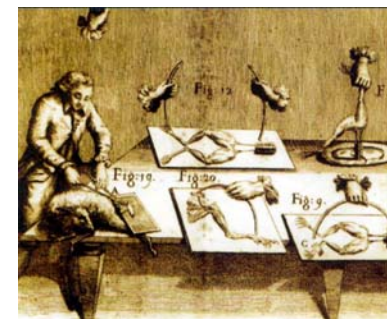
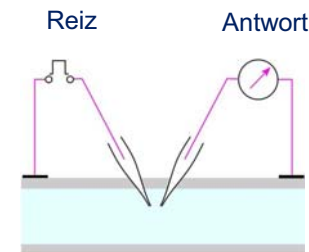
### Goldman-Hodgkin-Katz-Gleichung:

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

	$\varphi(\text{gerechnet})$ (mV)	$\varphi(\text{gemessen})$ (mV)
Tintenfisch-Riesenaxon	-63	≈ -62
Froschmuskel	-91	≈ -92

12

## 2. Lokale (elektrotonische) Änderungen des Membranpotenzials

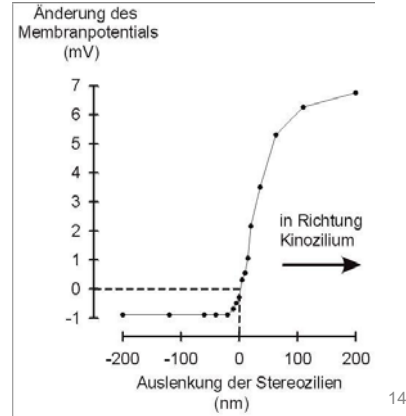
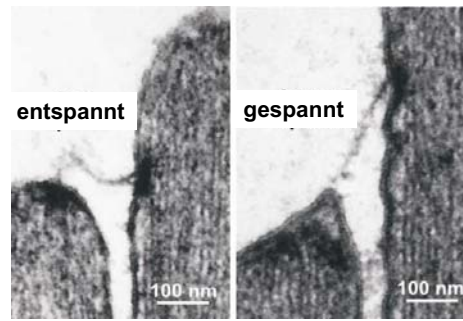
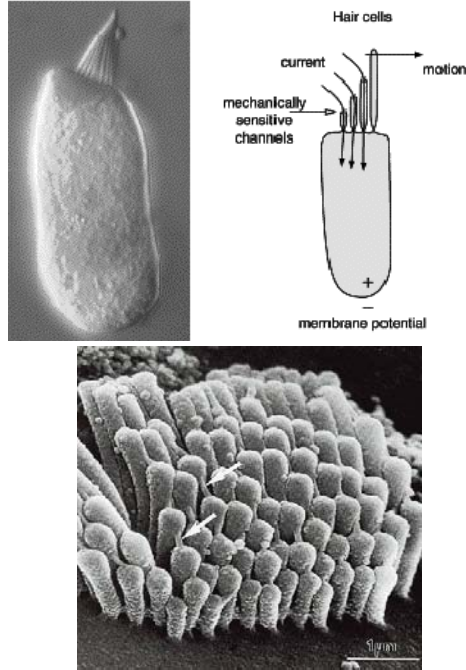


13



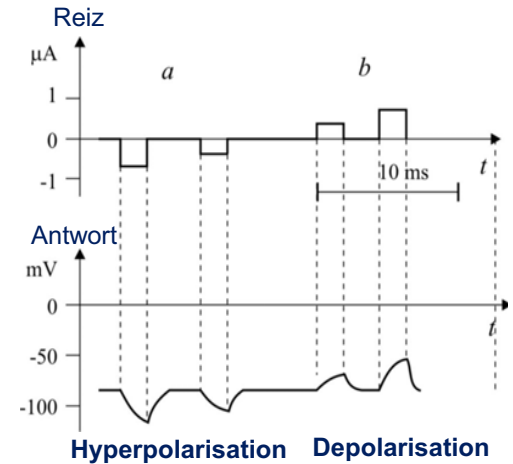
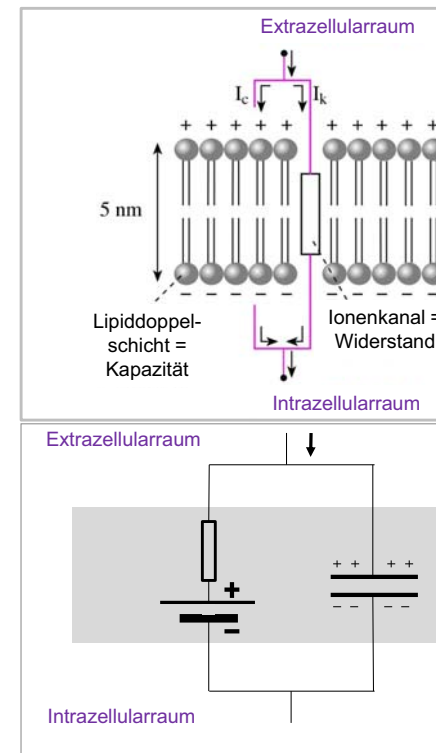
## Beispiele:

### Haarzelle



14

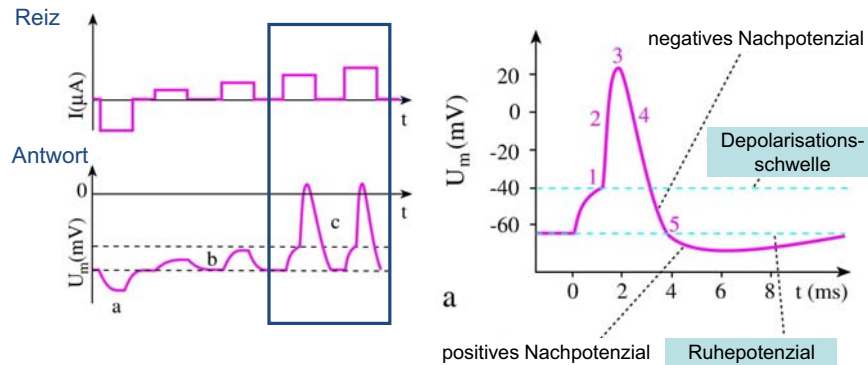
## Elektrisches Modell der elektronischen Änderung des Membranpotentials



Siehe: Aufladung und Entladung des RC Kreises

15

## 3. Aktionspotenzial

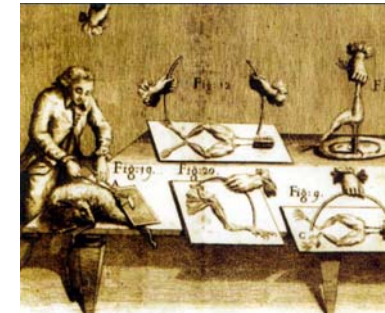


a

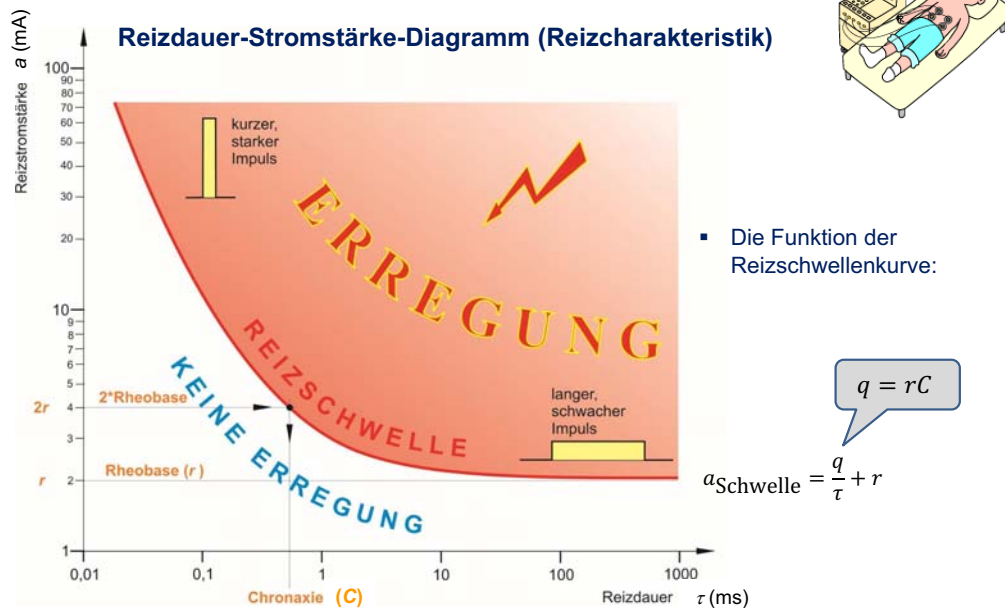
16

## 4. Anwendungen

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



17



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

18

## Klinisches Beispiel



Clinical Neurophysiology 117 (2006) 2069–2072



Stromstärke Reizdauer

www.elsevier.com/locate/clinph

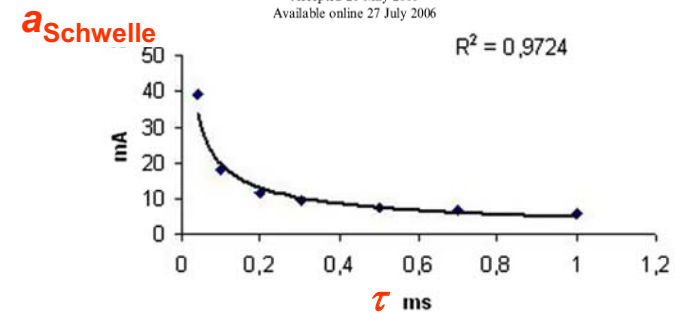
## Effects of sex and age on strength–duration properties

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



19

## II. Anwendungen des elektrischen Stromes in der Therapie

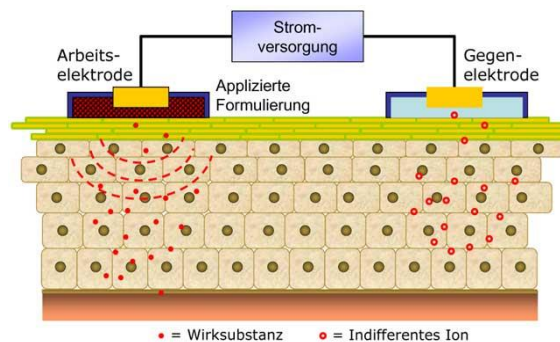
### Galvanisation



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

- Schmerzlinderung
- Durchblutungsförderung

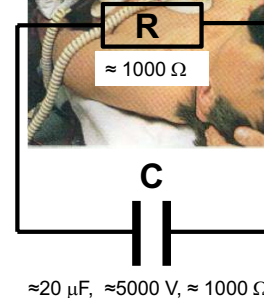
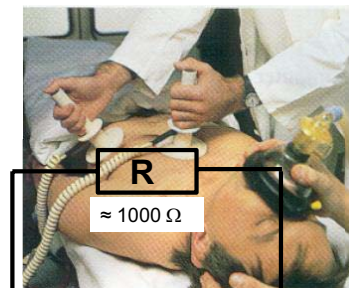
### Iontophorese



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

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

### Defibrillator



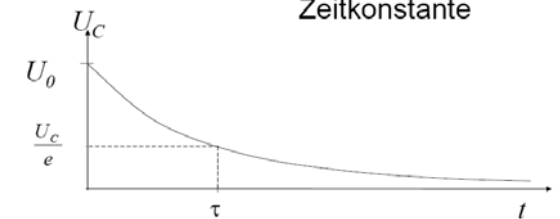
$\approx 20 \mu F, \approx 5000 V, \approx 1000 \Omega$

Zur Erinnerung:

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

$\tau = RC$

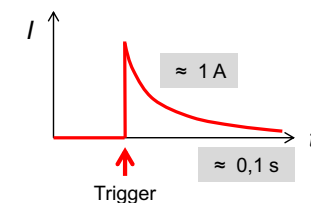
Zeitkonstante



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

$$I_0 =$$

$$\tau =$$

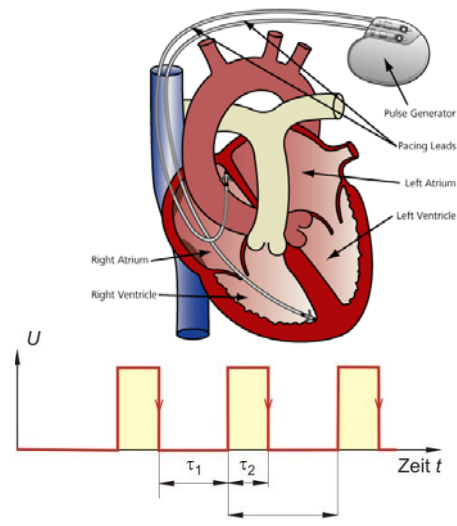


$$W = \frac{1}{2} C U^2 = 250 J$$

20

21

## Herzschrirtmacher



Periodendauer:  $T = \tau_1 + \tau_2$

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

Rechteckimpulse,  $\approx \text{ms}$ ,  $\approx \text{s}$ ,  $\approx 1 \text{ V}$ ,  $\approx 200 \Omega$

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



Astabiler Multivibrator  
(siehe Praktikumsstoff!)

22

## Reizstromtherapie



Rechteckimpulse (Einzelimpulse, Serienimpulse)

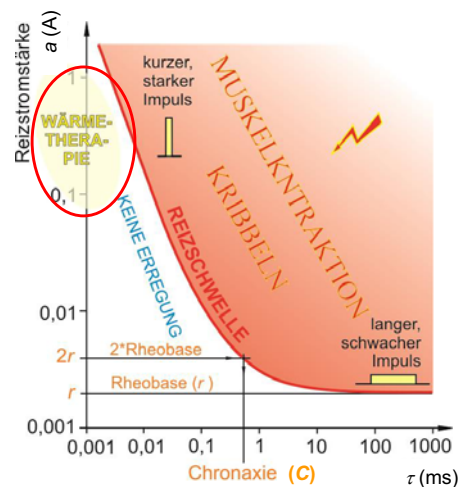
Astabiler oder monostabiler Multivibrator (siehe Praktikumsstoff!)

23

## HF-Wärmetherapie Wärmewirkung ohne Reizwirkung!

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

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



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

Hochfrequenter (HF) Wechselstrom

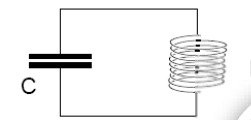
Siehe Praktikum „Sinusoszillator“!

24

## Erzeugung von hochfrequenten elektromagnetischen Schwingungen:

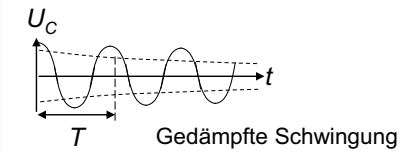
Wiederholung

Schwingkreis:  
Erzeugung der elektromagnetischen Schwingungen

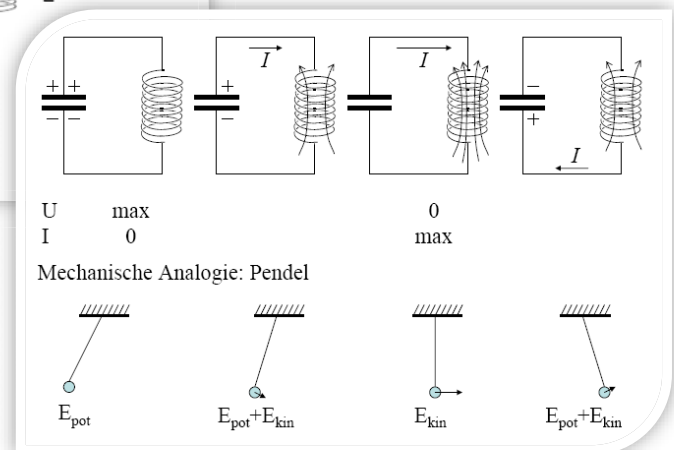


Eigenfrequenz:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$



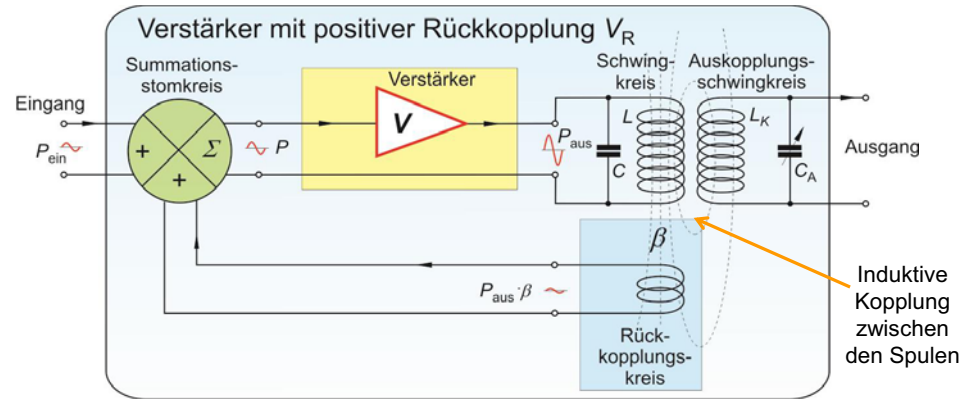
Gedämpfte Schwingung



25



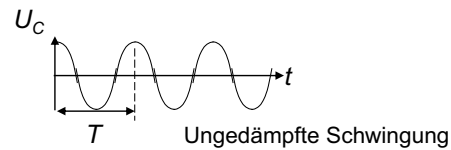
## Sinusoszillator



$$V_R = \frac{V_U}{1 - \beta \cdot V_U}$$

Siehe Praktikum „Sinusoszillator“!

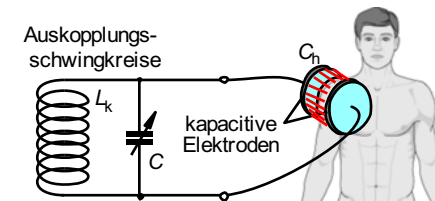
Sinusoszillator, wenn  $V_U \cdot \beta = 1$ , auch ohne Eingangssignal



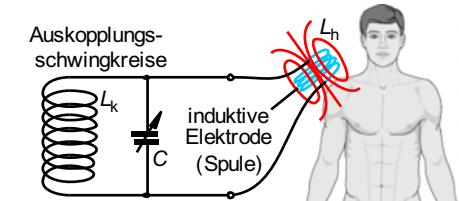
26

## Kurzwellentherapie (27 MHz)

### Kondensatorfeldmethode



### Spulenfeldmethode

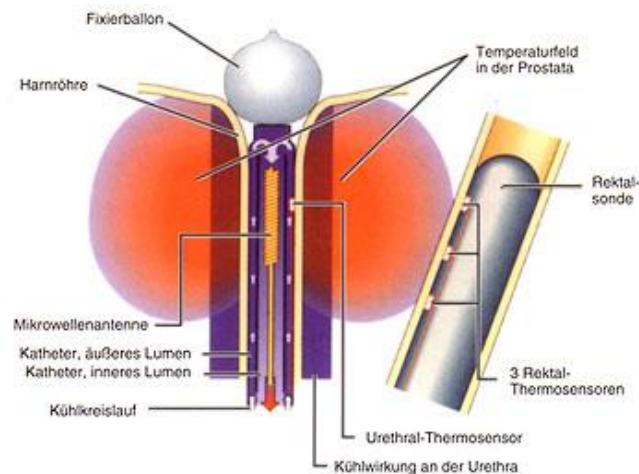


27

## Dezimeterwellentherapie (433 MHz)

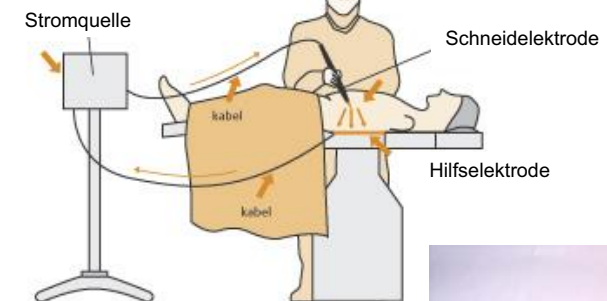
## Mikrowellentherapie (2400 MHz)

### Strahlenfeldmethode



28

## HF-Elektrochirurgie



29