

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

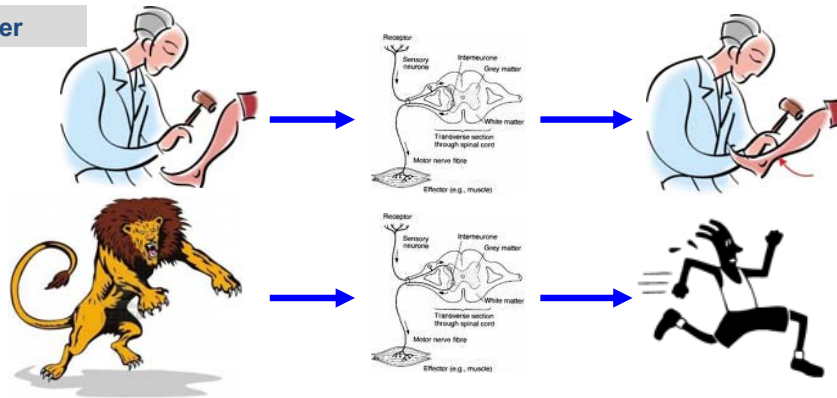
+ Informationstransport

Körper ↔ Umwelt



2

Im Körper



Schnelle Antwort ist nötig!

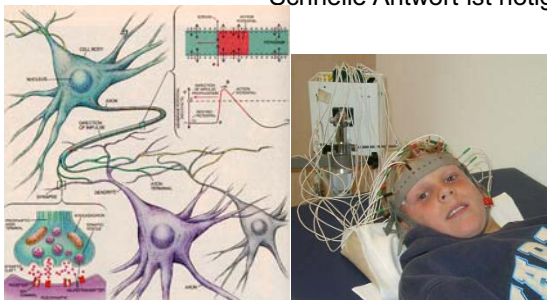


Diffusion?

Wärmeleitung?

Strömung?

Elektrischer Strom?

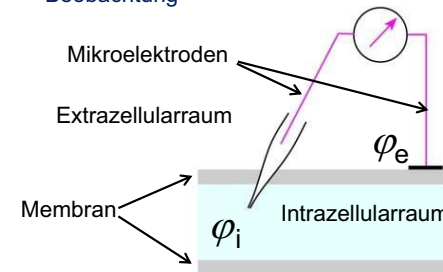


3

I. Membranpotenzial

1. Ruhepotenzial

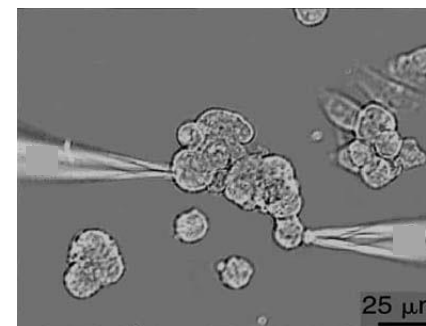
- Beobachtung



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

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

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



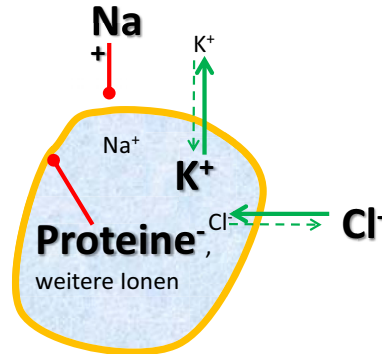
4

Erklärung

Eine andere Beobachtung ist die inhomogene Ionenverteilung:

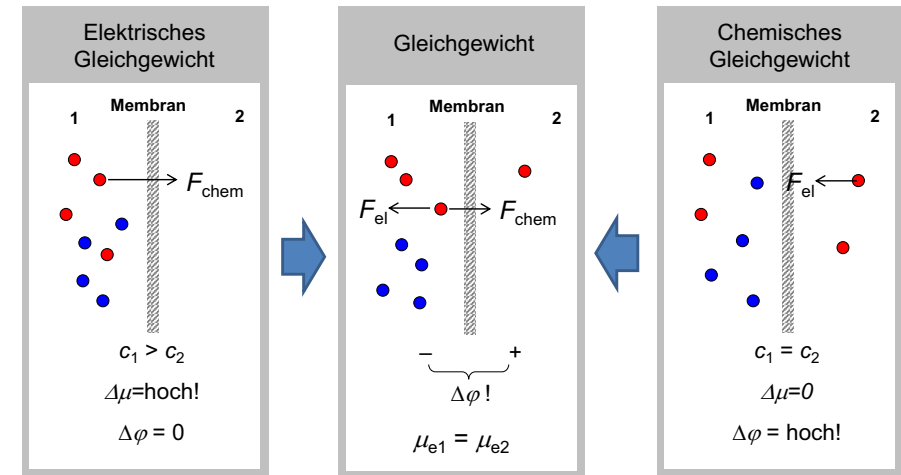
	Intrazelluläre Konzentration (mmol/l)			Extrazelluläre Konzentration (mmol/l)		
Zelle	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻
Tintenfisch-Riesenaxon	72	345	61	455	10	540
Froschmuskel	20	139	3,8	120	2,5	120
Rattenmuskel	12	180	3,8	150	4,5	110

Donnan Modell (Gleichgewichtsmodell)



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 ⁺	K ⁺	Cl ⁻	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	
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: $\Delta\varphi_m = -62 \text{ mV}$

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

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

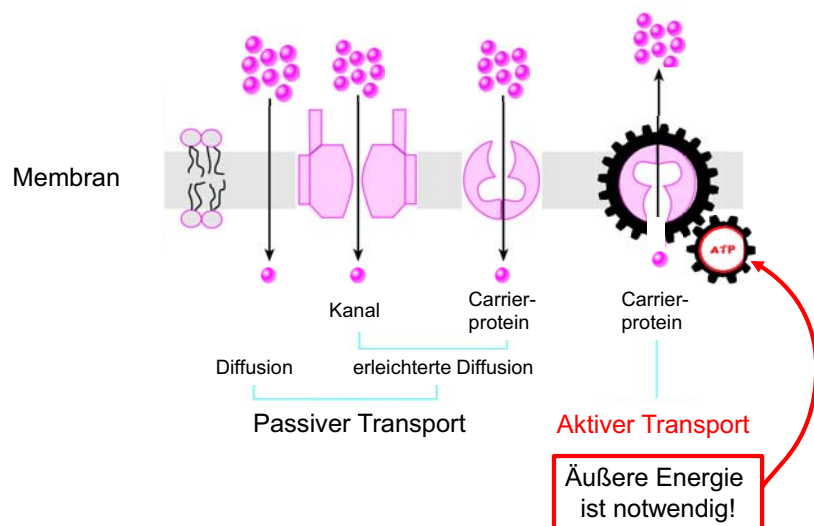
*„steady state“
ist eine Situation, in welchem
sind alle Parameter des Systems
konstant, obwohl die gängige
Prozesse nach Veränderung
diese Parameter streben.

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	$\frac{\Delta q}{A \cdot \Delta t}$	φ	$-\frac{\Delta \varphi}{\Delta l}$ $\frac{\Delta q}{A \cdot \Delta t} = -\sigma \frac{\Delta \varphi}{\Delta l}$
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_{ext}	$J = \frac{\Delta x_{\text{ext}}}{A \cdot \Delta t}$	y_{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)

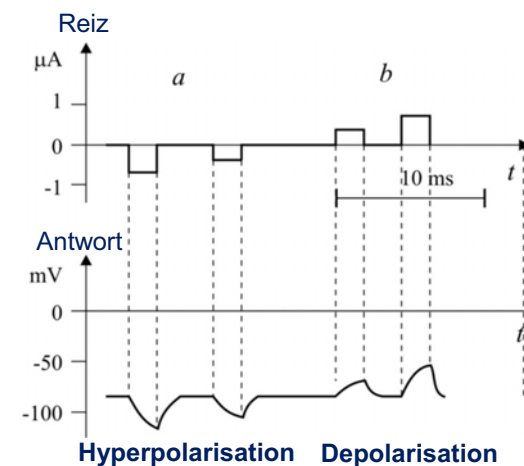
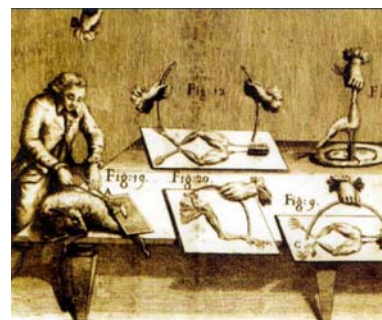
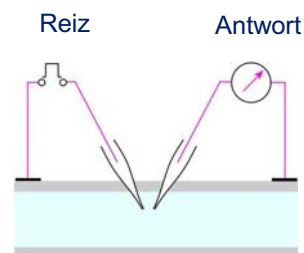
Goldman-Hodgkin-Katz-Gleichung:

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

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

12

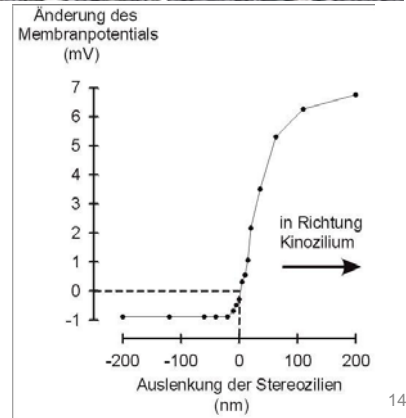
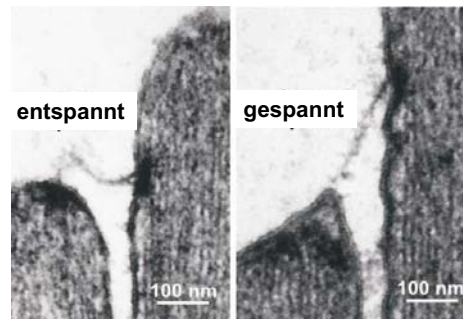
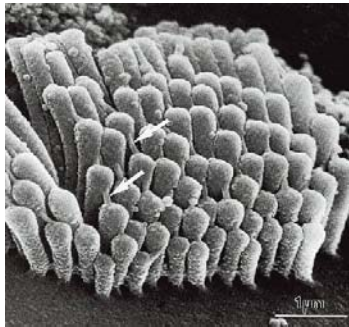
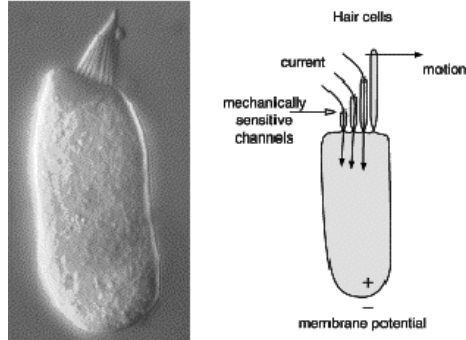
2. Lokale (elektrotonische) Änderungen des Membranpotenzials



13

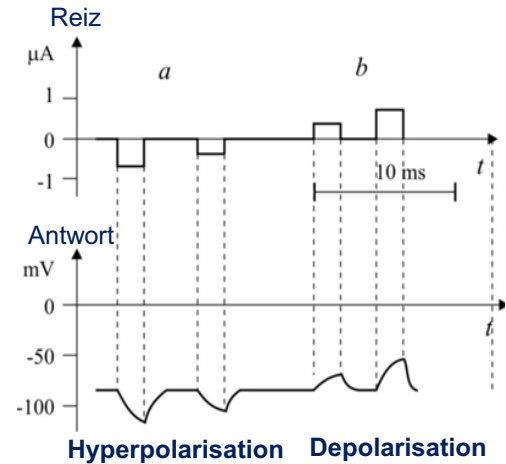
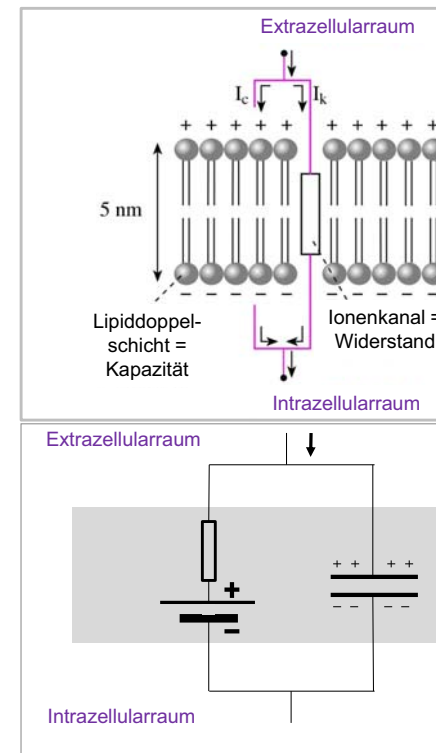
Beispiele:

Haarzelle



14

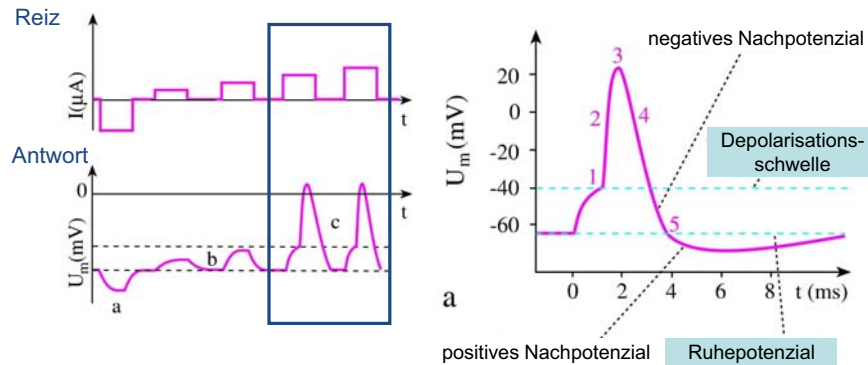
Elektrisches Modell der elektronischen Änderung des Membranpotentials



Siehe: Aufladung und Entladung des RC Kreises

15

3. Aktionspotenzial



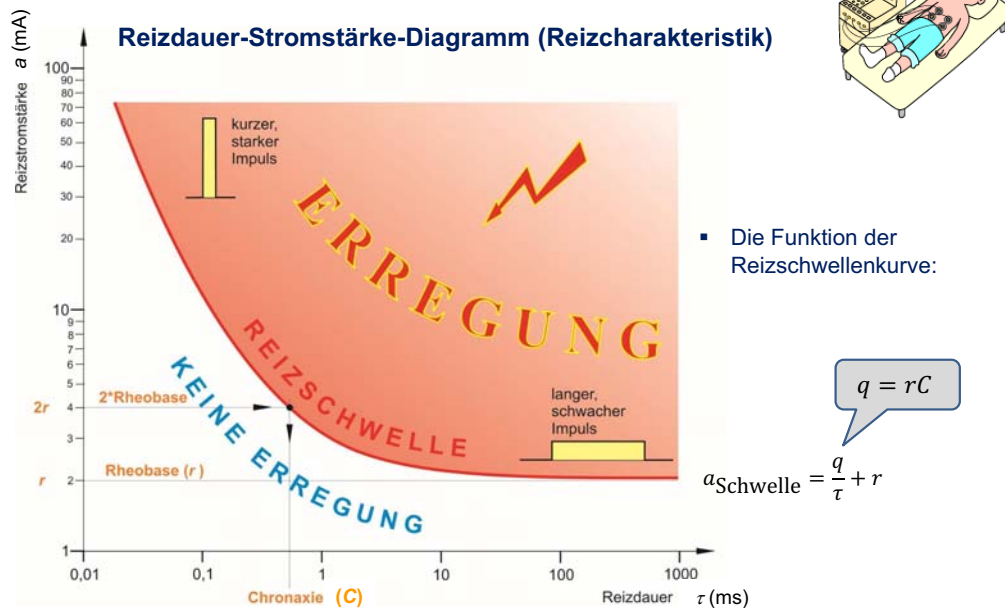
16

4. Anwendungen

- Diagnostik: Messung der Biopotenziale (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

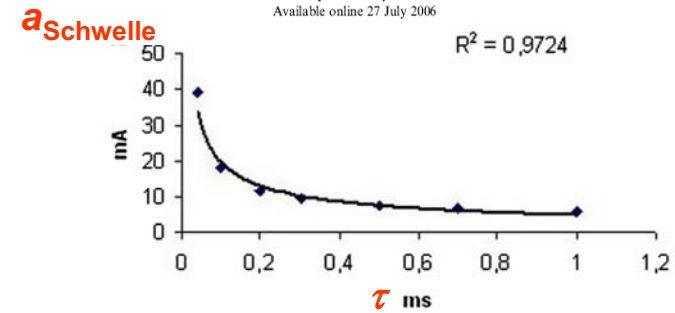
Effects of sex and age on strength–duration properties

Deniz Yerdelen ^{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



19

II. Anwendungen des elektrischen Stromes in der Therapie

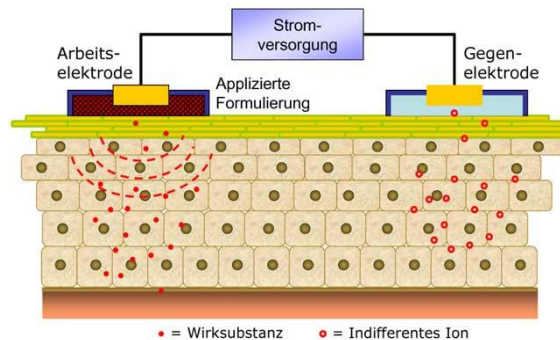
Galvanisation



Gleichstrom, \approx mA, \approx 10 min

- Schmerzlinderung
- Durchblutungsförderung

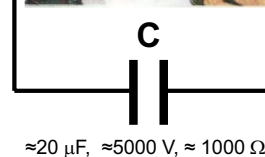
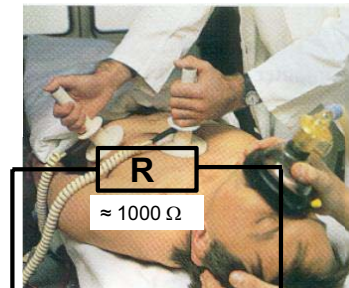
Iontophorese



Gleichstrom, \approx mA, \approx 10 min

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

Defibrillator

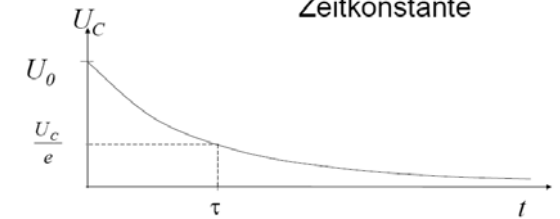


Zur Erinnerung:

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

$\tau = RC$

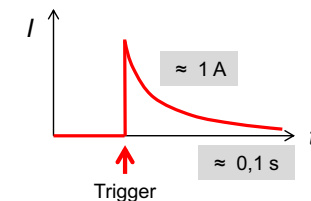
Zeitkonstante



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

$I_0 =$

$\tau =$

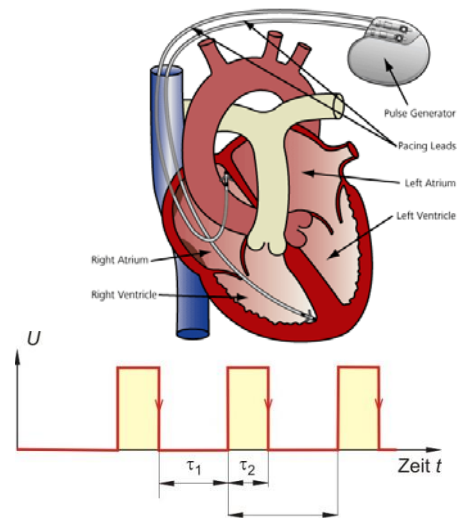


$$W = \frac{1}{2} C U^2 = 250 \text{ J}$$

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)

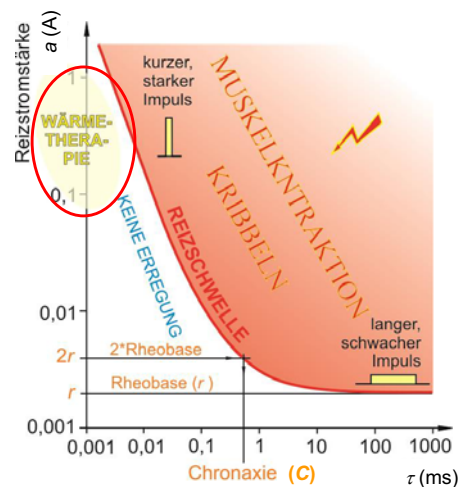
Astabiler oder
monostabiler
Multivibrator (siehe
Praktikumsstoff!)

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

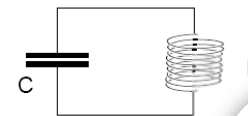
Siehe Praktikum
„Sinusoszillator“!

24

Erzeugung von hochfrequenten elektromagnetischen Schwingungen:

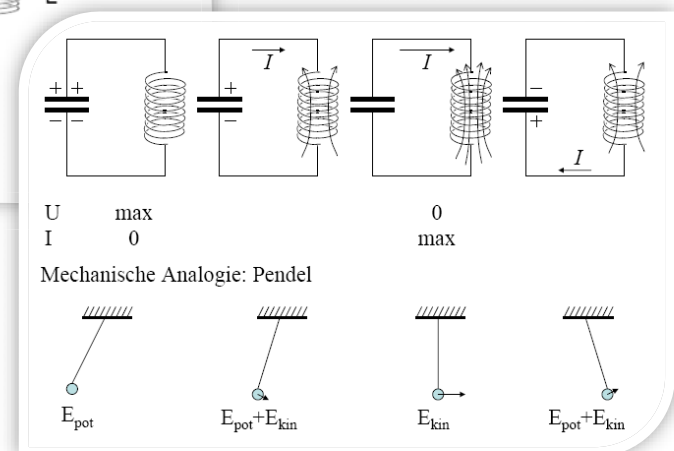
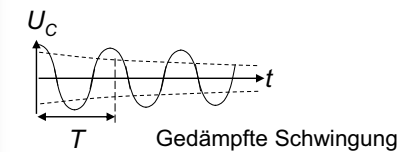
Wiederholung

Schwingkreis:
Erzeugung der elektromagnetischen Schwingungen



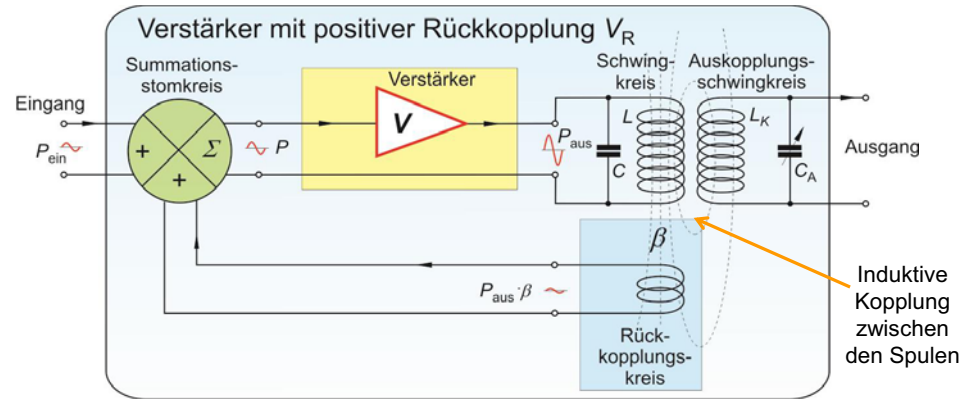
Eigenfrequenz:

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



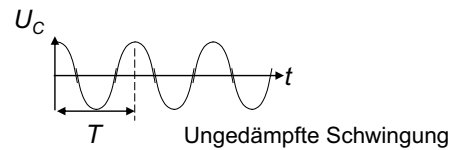
25

Sinusoszillator



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

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

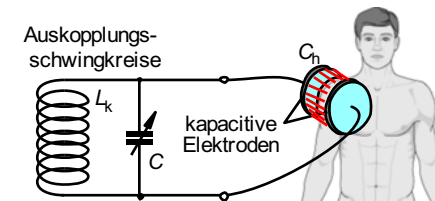


Siehe Praktikum „Sinusoszillator“!

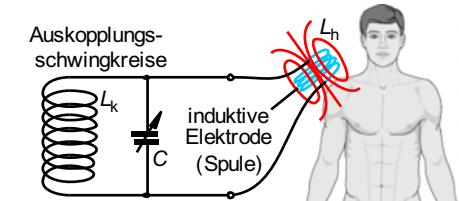
26

Kurzwellentherapie (27 MHz)

Kondensatorfeldmethode



Spulenfeldmethode

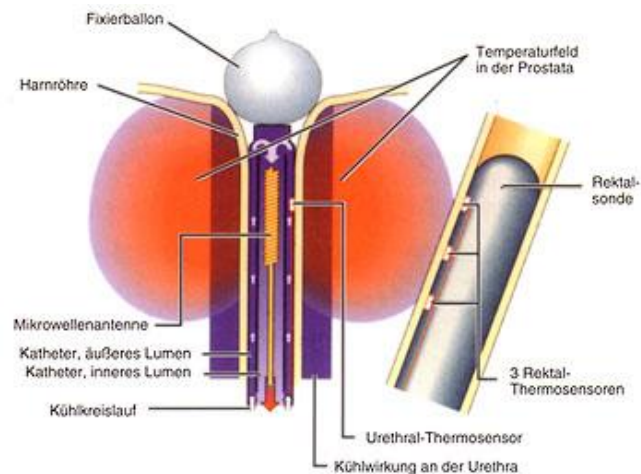


27

Dezimeterwellentherapie (433 MHz)

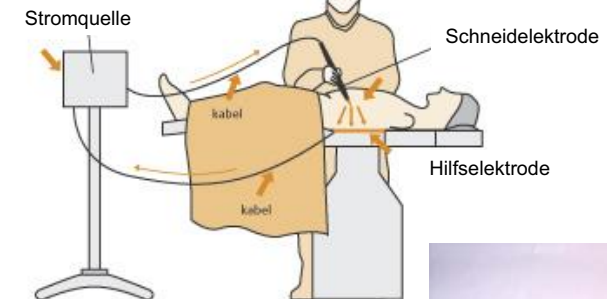
Mikrowellentherapie (2400 MHz)

Strahlenfeldmethode



28

HF-Elektrochirurgie



29