

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

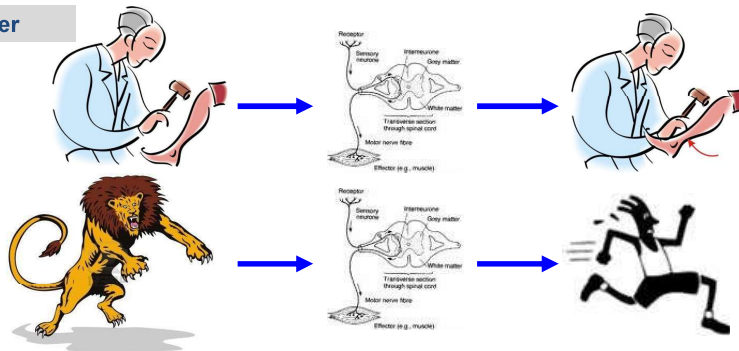
+ Informationstransport

Körper ↔ Umwelt



2

Im Körper



Schnelle Antwort ist nötig!

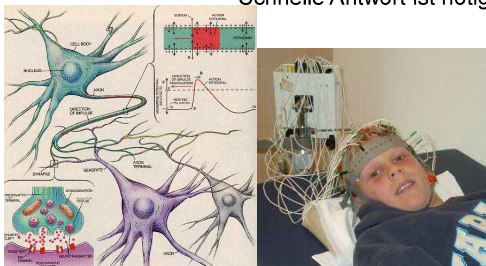


Diffusion?

Wärmeleitung?

Strömung?

Elektrischer Strom?

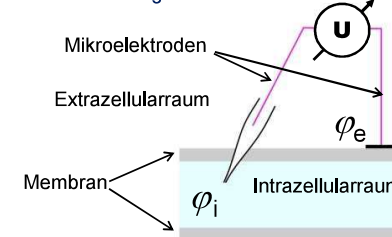


3

I. Membranpotenzial

1. Ruhepotenzial

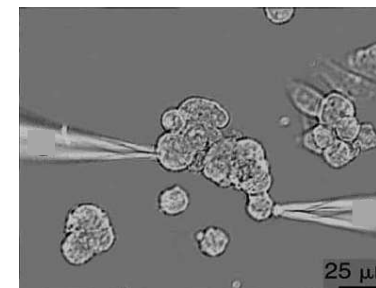
- Beobachtung



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

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

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



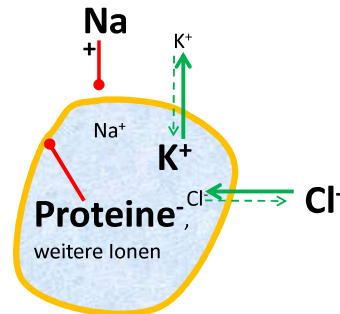
4

Erklärung

Eine andere Beobachtung ist die inhomogene Ionenverteilung:

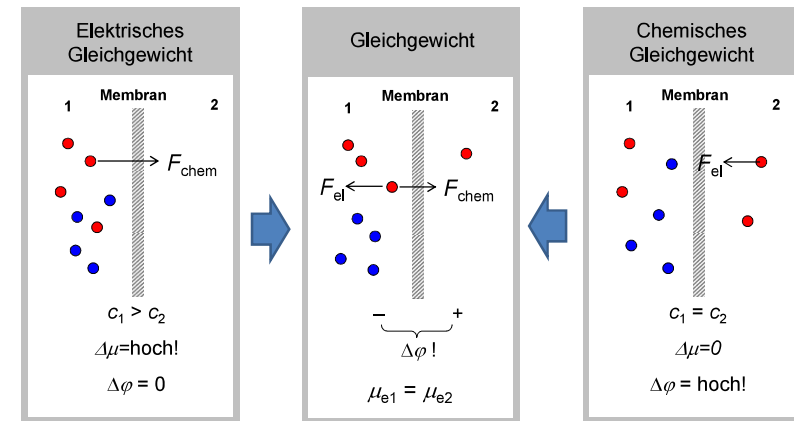
	Intrazelluläre Konzentration (mmol/l)			Extrazelluläre Konzentration (mmol/l)		
Zelle	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻
Tintenfisch-Riesenaxon	72	345	61	455	10	540
Froschmuskel	20	139	3,8	120	2,5	120
Rattenmuskel	12	180	3,8	150	4,5	110

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

6

Erklärung

Inhomogene Ionenverteilung \Rightarrow Membranpotenzial

	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“:

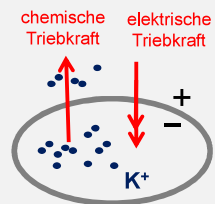
Wenn Gleichgewicht herrscht, dann müsste das Ruhepotenzial der Nernst-Gleichung entsprechen (z. B. für K⁺-Ionen und Tintenfisch-Riesenaxon):

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

\Rightarrow 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!

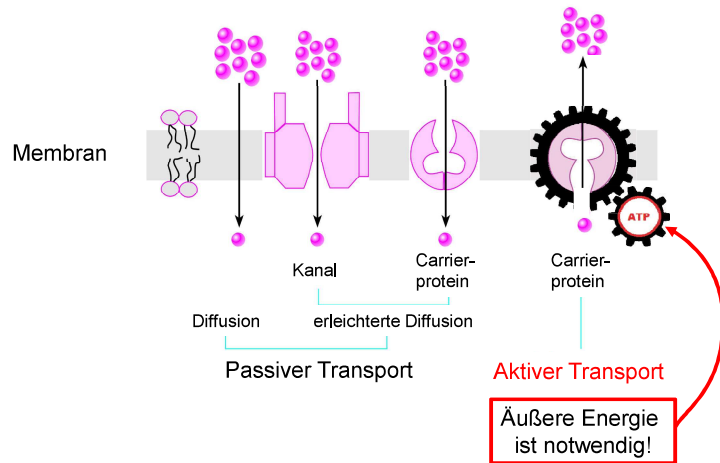
*„steady state“
ist eine Situation, in welchem alle Parameter des Systems konstant sind, obwohl die gängige Prozesse nach Veränderung diese Parameter streben.

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}	$J = \frac{\Delta x_{\text{ext}}}{A \cdot \Delta t}$ extensive Gr.	y_{int}	$X = -\frac{\Delta y_{\text{int}}}{\Delta x}$ intensive Gr. thermo-dynamische Kraft $J = LX$ onsagersche Beziehung

10

Onsagersche Beziehung

$$J = LX$$

Materialstromdichte

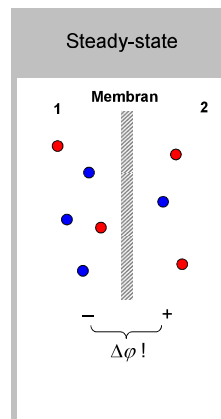
$$J = \frac{\Delta v}{A \cdot \Delta t}$$

Triebkraft

$$X = -\frac{\Delta \mu_e}{\Delta x}$$

Permeabilität:

$$J_m = -p(c_{v2} - c_{v1})$$



11

Transportmodell

Ständige Diffusion von Ionen mit unterschiedlichen Permeabilitäten

⇒ Diffusionspotenzial
⇒ Rücktransport (aktiv)

Goldman-Hodgkin-Katz-Gleichung:

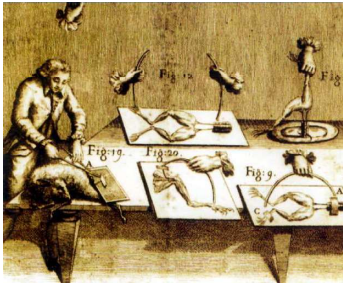
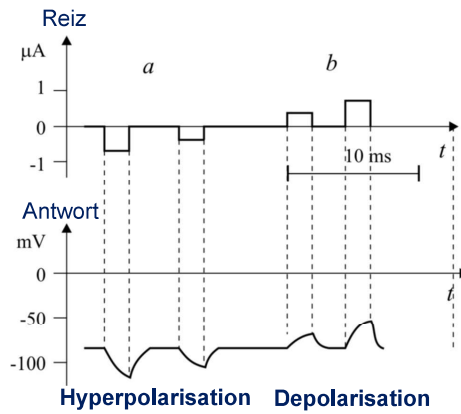
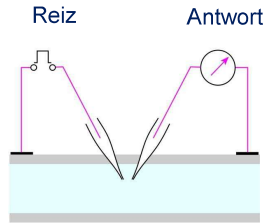
$$\Delta \varphi = -\frac{RT}{F} \ln \frac{p_{Na} c_{Na}^i + p_K c_K^i + p_{Cl} c_{Cl}^e}{p_{Na} c_{Na}^e + p_K c_K^e + p_{Cl} c_{Cl}^i}$$

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



12

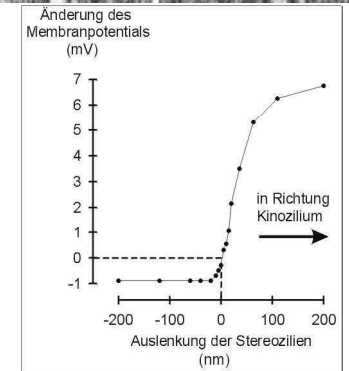
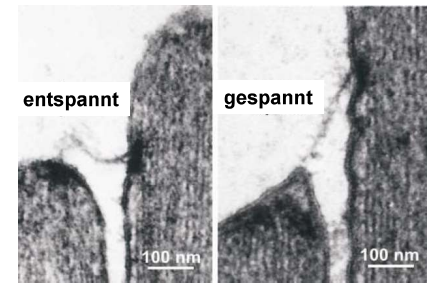
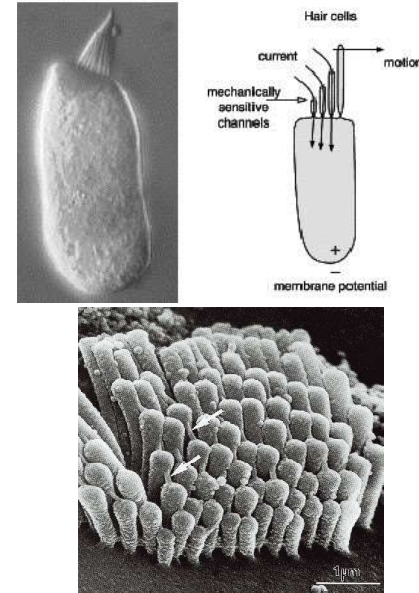
2. Lokale (elektrotonische) Änderungen des Membranpotenzials



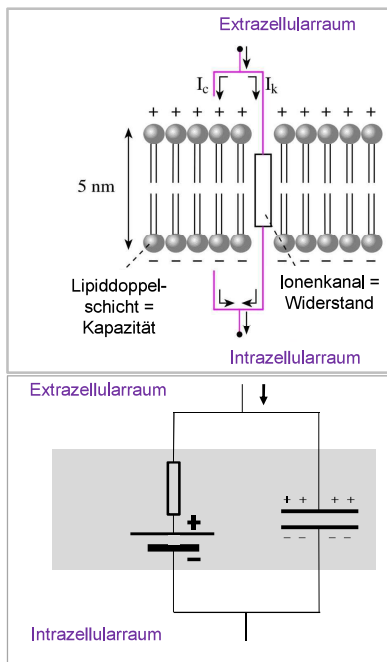
13

Beispiele:

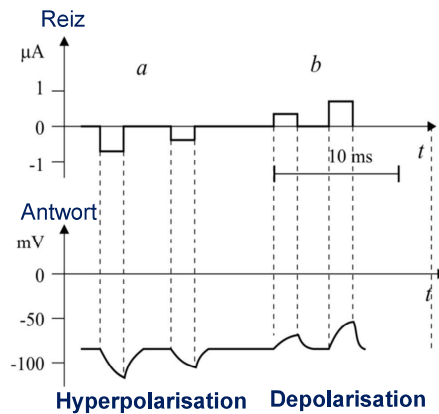
Haarzelle



14



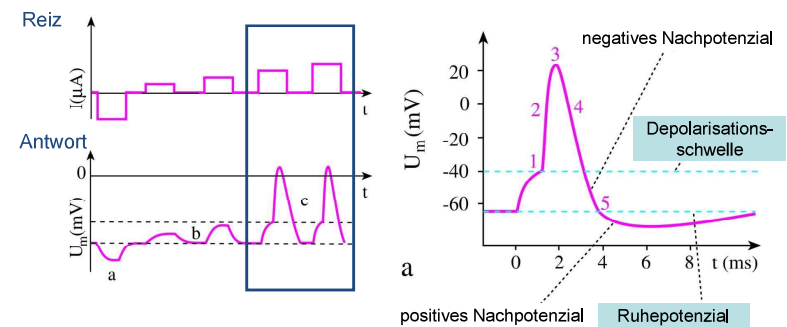
Elektrisches Modell der elektronischen Änderung des Membranpotenzials



Siehe: Aufladung und Entladung des RC Kreises

15

3. Aktionspotenzial

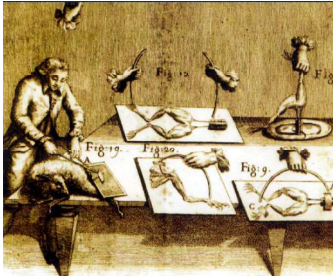


16

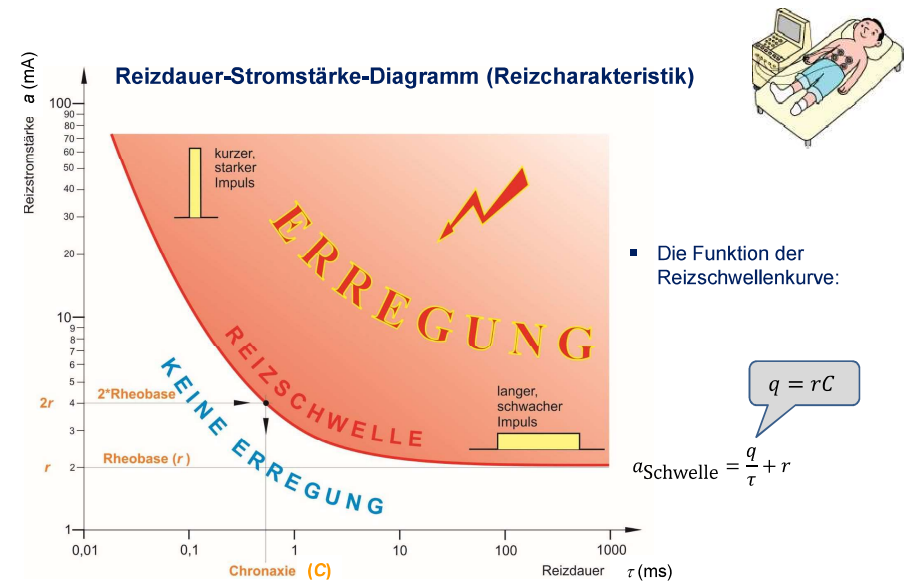
4. Anwendungen

- 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

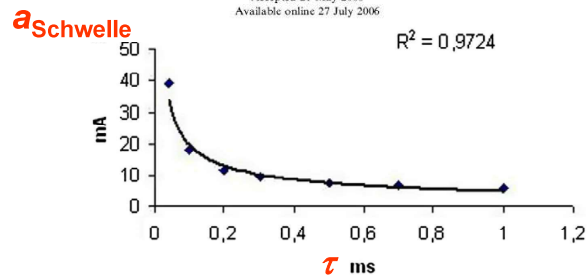
Stromstärke Reizdauer www.elsevier.com/locate/clinph

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

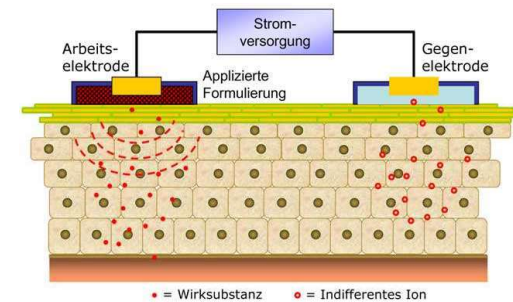
■ Galvanisation



Gleichstrom, \approx mA, \approx 10 min

- Schmerzlinderung
- Durchblutungsförderung

■ Iontophorese

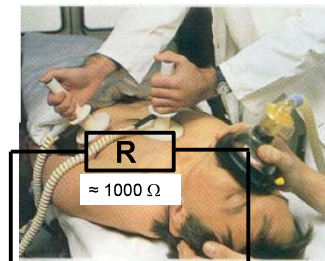


Gleichstrom, \approx mA, \approx 10 min

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

20

Defibrillator

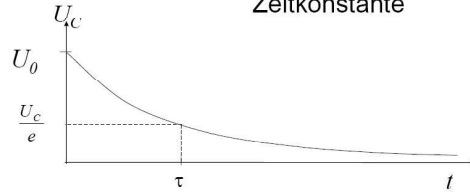


$\approx 20 \mu\text{F}$, $\approx 5000 \text{ V}$, $\approx 1000 \Omega$

Zur Erinnerung:

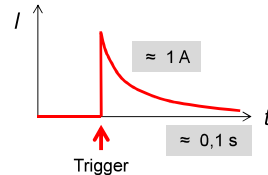
$$U_C = U_0 e^{-\frac{t}{\tau}}$$

$\tau = RC$
Zeitkonstante



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

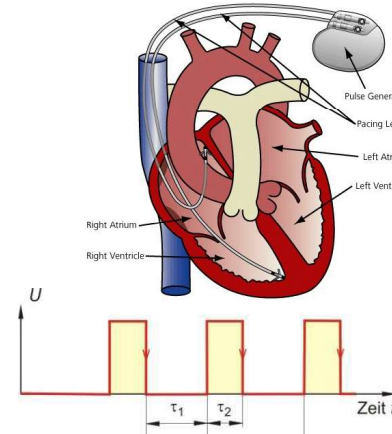
$$\tau =$$



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

21

Herzschrumpmacher



$$\text{Periodendauer: } T = \tau_1 + \tau_2$$

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

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

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



Astabiler Multivibrator
(siehe Praktikumsstoff!)

22

Reizstromtherapie



Rechteckimpulse (Einzelimpulse, Serienimpulse)

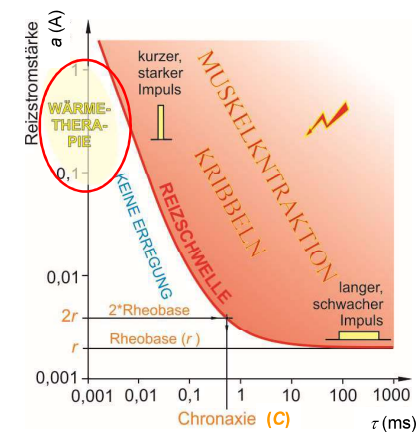
Astabiler oder
monostabiler
Multivibrator (siehe
Praktikumsstoff!)

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“!

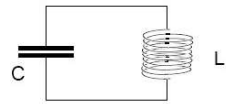
24

Erzeugung von hochfrequenten elektromagnetischen Schwingungen:

Wiederholung

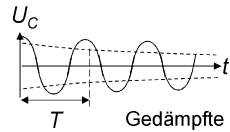
Schwingkreis:

Erzeugung der elektromagnetischen Schwingungen

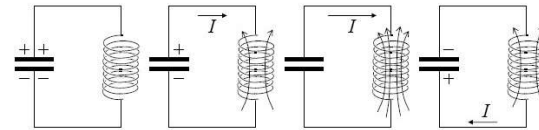


Eigenfrequenz:

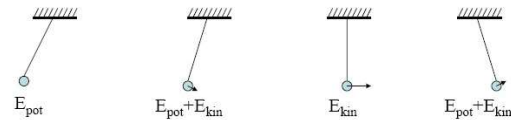
$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$



Gedämpfte Schwingung

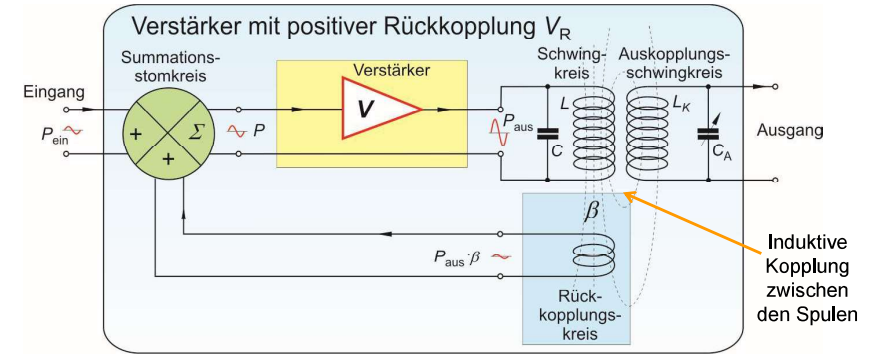


Mechanische Analogie: Pendel



25

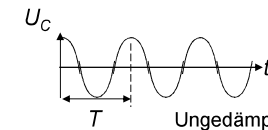
Sinusoszillator



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

Siehe Praktikum „Sinusoszillator“!

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

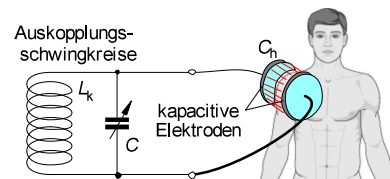


Ungedämpfte Schwingung

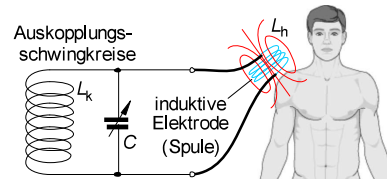
26

Kurzwellentherapie (27 MHz)

Kondensatorfeldmethode



Spulenfeldmethode

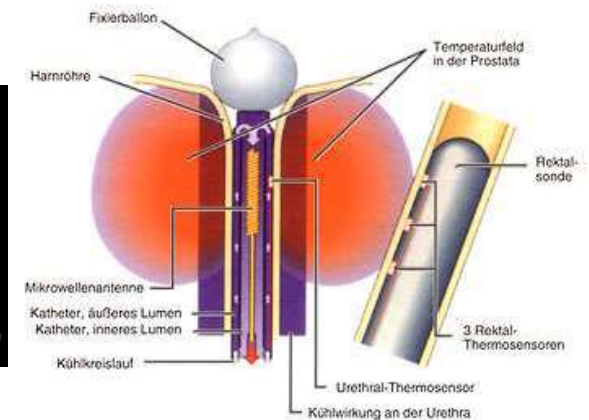


27

Dezimeterwellentherapie (433 MHz)

Mikrowellentherapie (2400 MHz)

Strahlenfeldmethode



28

■ HF-Elektrochirurgie

