

Grundlagen der Erregungsprozesse

Dr. László Smeller

Institut für Biophysik und Strahlenbiologie

Semmelweis Universität



Biophysik für Pharmazeuten

Grundlagen der Erregungsprozesse

24.04.2026

Ruhepotential
Aktionspotential
psychophysikalische Gesetze

Bioelektrische Erscheinungen: Einführung

- Bioelektrische Erscheinungen:
 - Ruhepotential (Potential des intrazellulären Raumes in Bezug auf den extrazellulären Raum)
 - Aktionspotential (Änderung des Ruhepotentials während des Reizes)

Messung des Aktionspotentials an der Körperoberfläche:

- EKG
- EEG
- EMG

Zusammenhang zwischen der Reiz und Eigenschaften des Aktionspotential => Wahrnehmung:

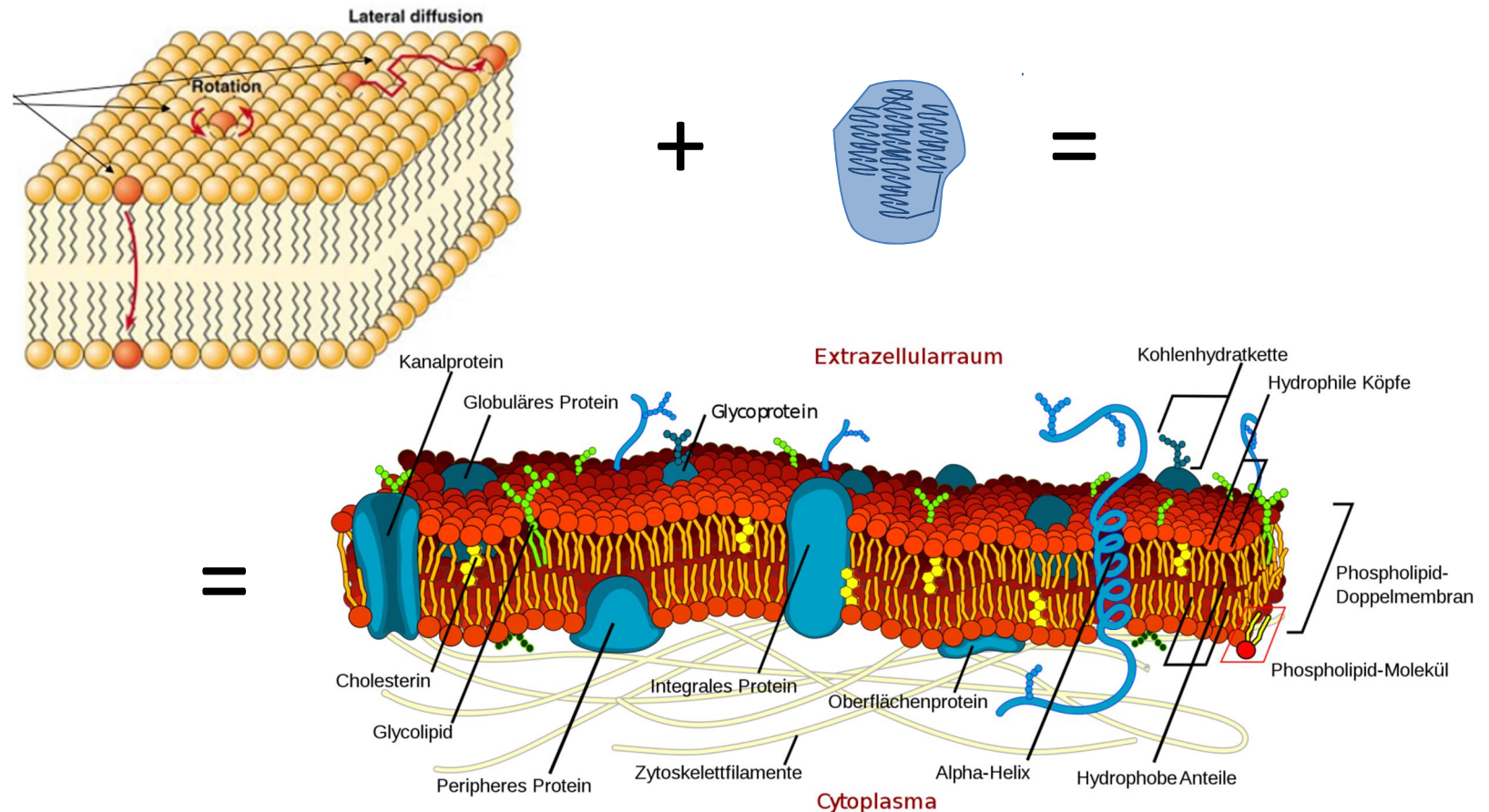
Psychophysikalische Gesetze:

- Weber-Fechner Gesetz
- Stevens Gesetz

Bioelektrische Erscheinungen: Membrane

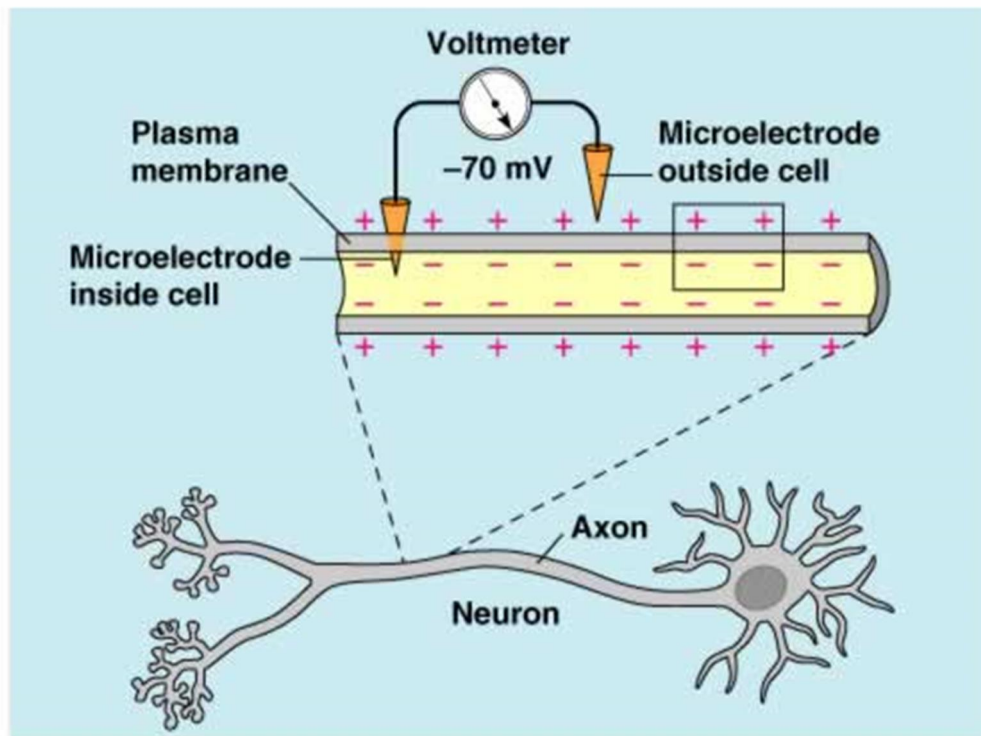
Membrane spielen eine große Rolle bei bioelektrischen Erscheinungen

Aufbau der Membrane: Lipid Doppelschicht + Proteine



Bioelektrische Grunderscheinung: Ruhepotential

Messung des Ruhepotentials (Zellenpotential)



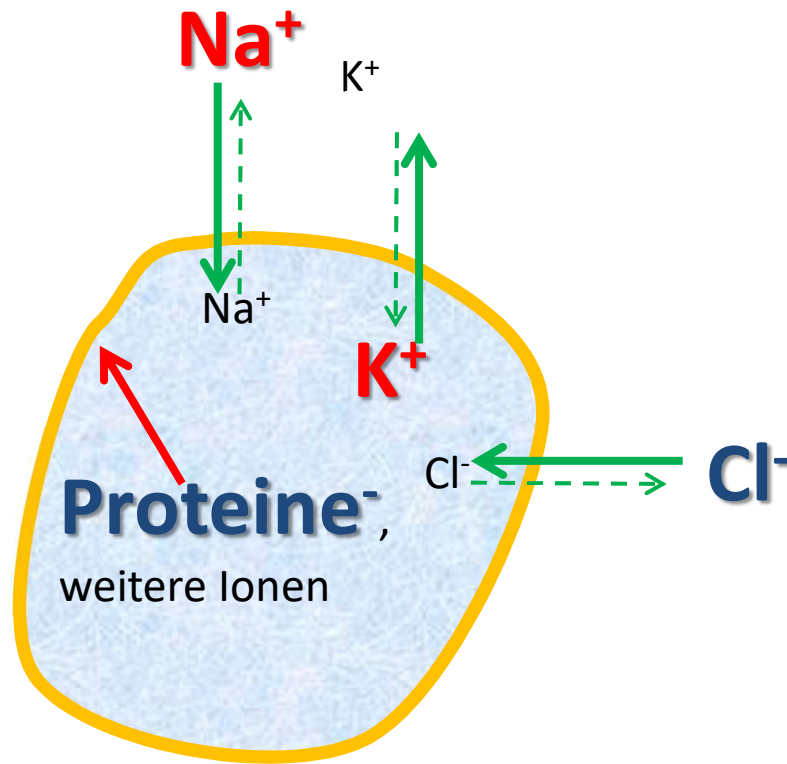
©Addison Wesley Longman, Inc.

Elektroden:
Kapillaren die mit
KCL Lösung gefüllt sind.

Beobachtung: Asymmetrische Ionenverteilung

Konzentration (mmol/l)	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	Proteine
intrazelluläre	7 — 11	120 — 155	4 — 7	150
extrazelluläre	144	4 — 5	120	in Spuren

Einfache Beschreibung des Ruhepotentials : Donnan Modell



Immobilie und
diffundierbare
Ionen

Triebkräfte:

1. Thermodynamischer Effekt:
Ausgleich der Konzentrationen
2. Elektrische Kraft auf Ionen

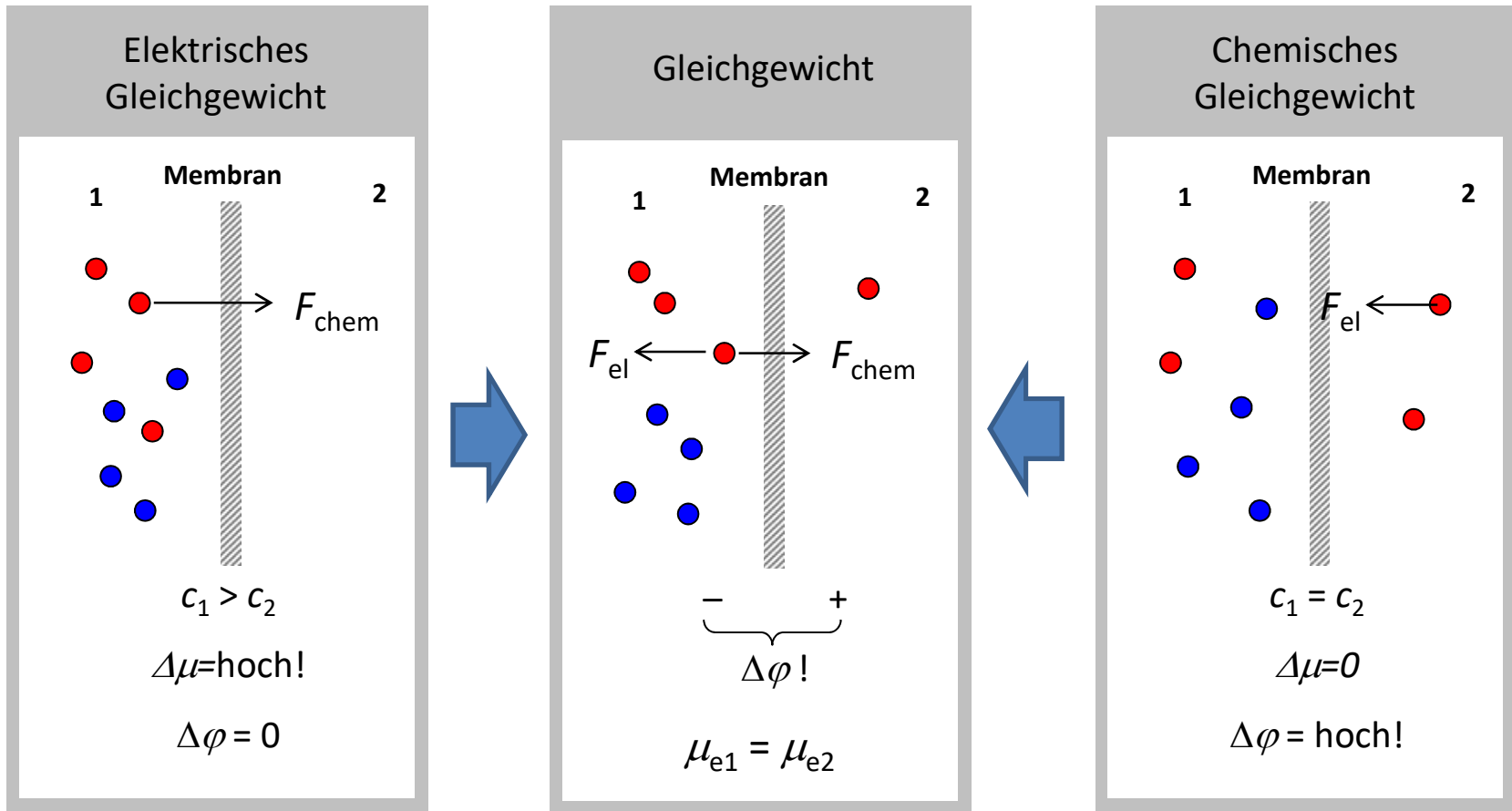
Diese wirken gegeneinander!



Elektrochemisches Potential!

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

$$p_k > p_a = 0$$



- Kation (k)
- Anion (a)

Elektrochemisches Potenzial (J/mol): $\mu_e = \mu + F \cdot \phi$

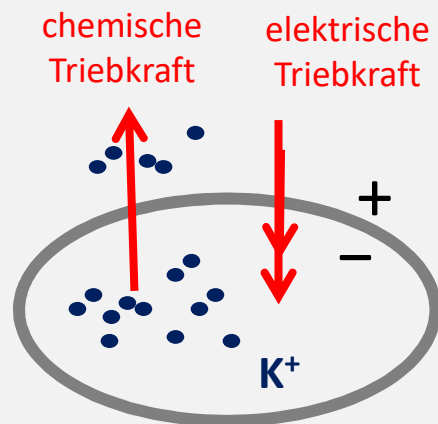
Nernst-Gleichung:
$$\Delta\phi = \phi_2 - \phi_1 = -\frac{RT}{F} \ln \frac{c_2}{c_1}$$

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⁺:

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

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	+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!

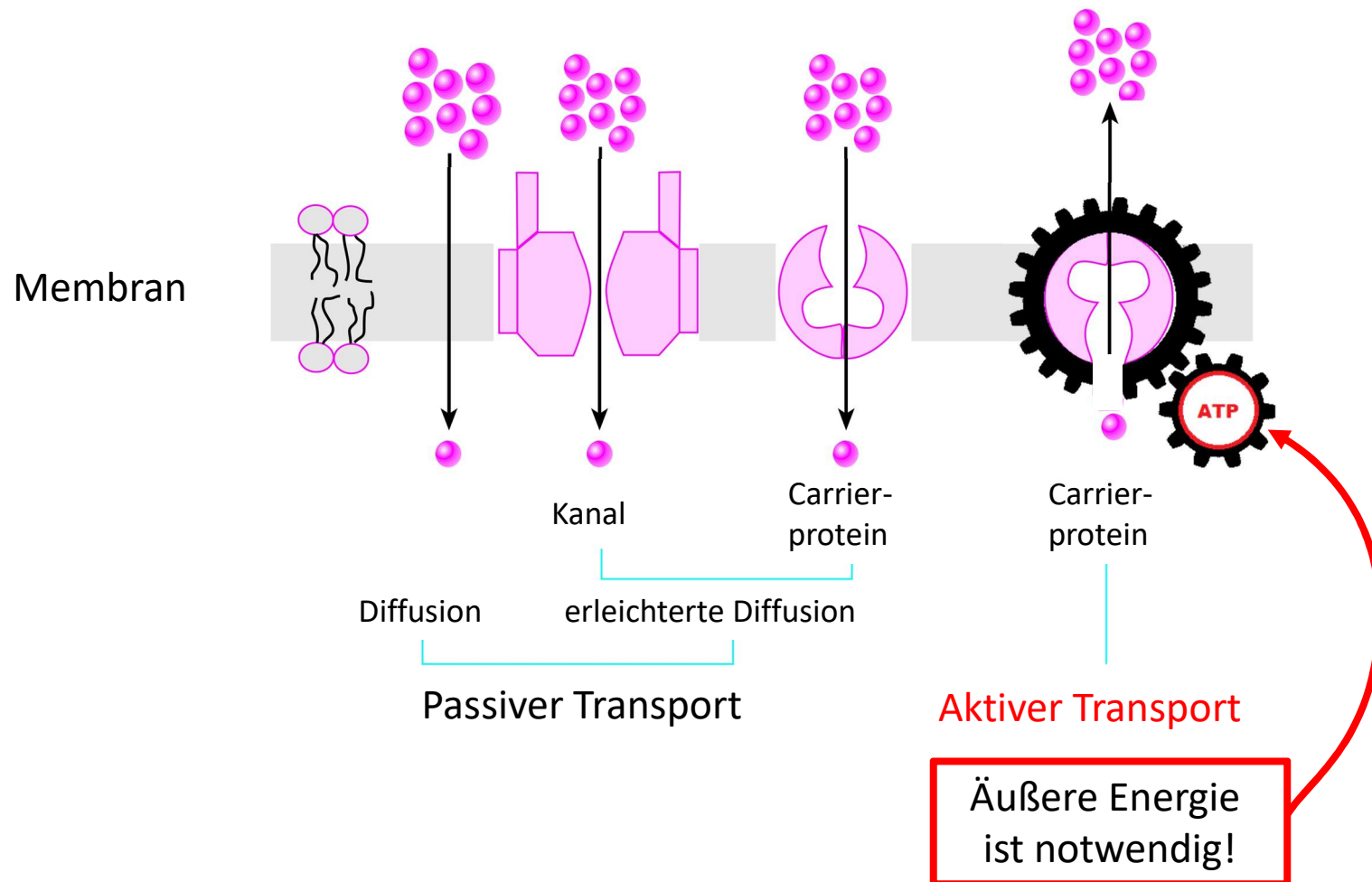
* „*steady state*“
ist eine Situation, in welchem alle Parameter des Systems konstant sind, obwohl die gängige Prozesse nach Veränderung diese Parameter streben.

■ Transportmodell

Ständige Diffusion von Ionen mit unterschiedlichen Permeabilitäten

⇒ Diffusionspotenzial

⇒ Rücktransport (aktiv)



■ Transportmodell

Ständige Diffusion von Ionen mit unterschiedlichen Permeabilitäten

⇒ Diffusionspotenzial

⇒ Rücktransport (aktiv)

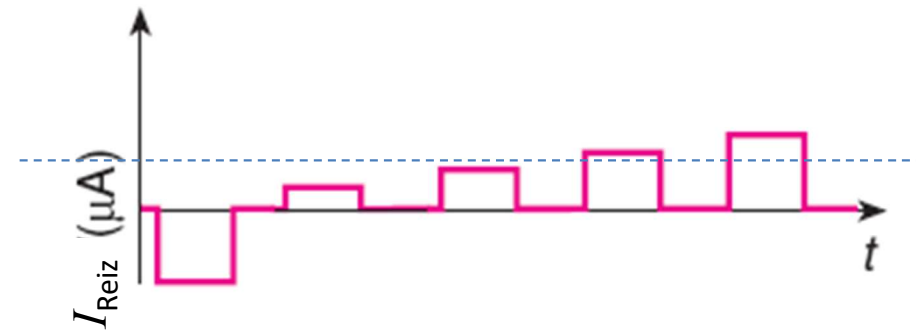
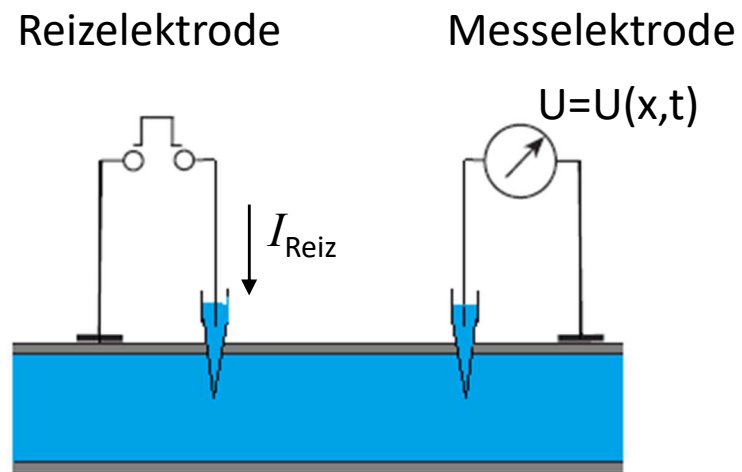
Goldman-Hodgkin-Katz-Gleichung:

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

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

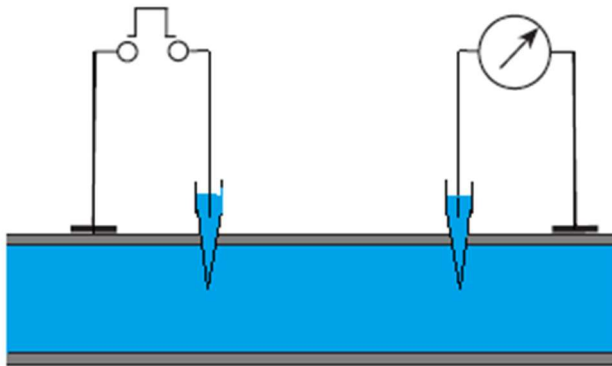


Erregung einer Zelle: lokale Änderungen und Aktionspotentiale



Unterschwellige Reize, Lokale Antwort

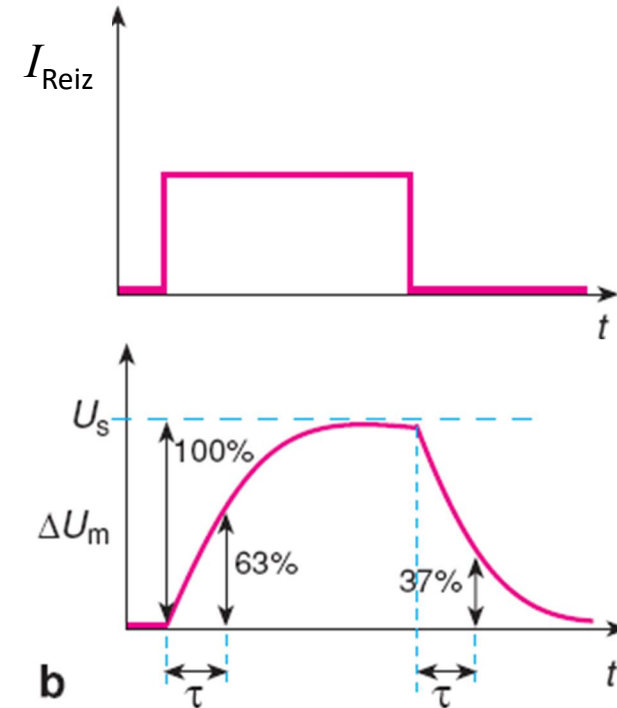
1. zeitlicher Ablauf



Spannungsverlauf beim Anfang
der Erregung

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

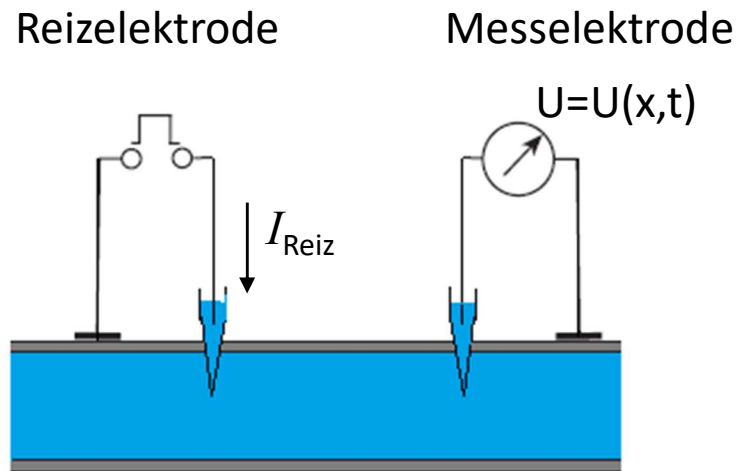
τ : Zeitkonstante



siehe RC Kreis !

Unterschwellige Reize, Lokale Antwort

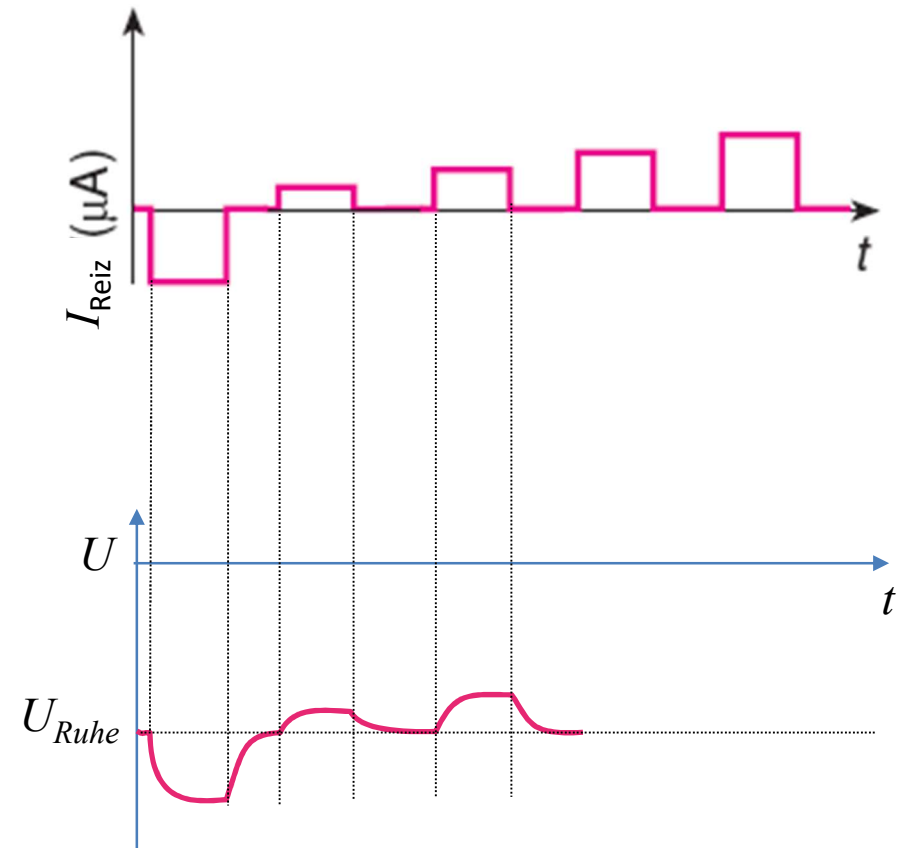
1. zeitlicher Ablauf



Spannungsverlauf beim Anfang der Erregung

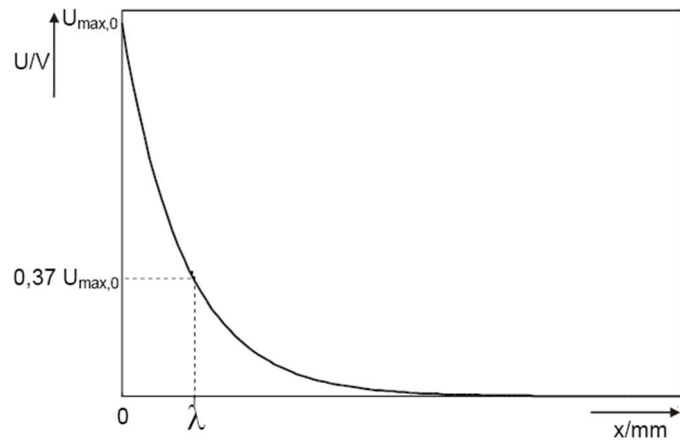
$$U(t|x) = U_{\text{max},0} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right)$$

τ : Zeitkonstante



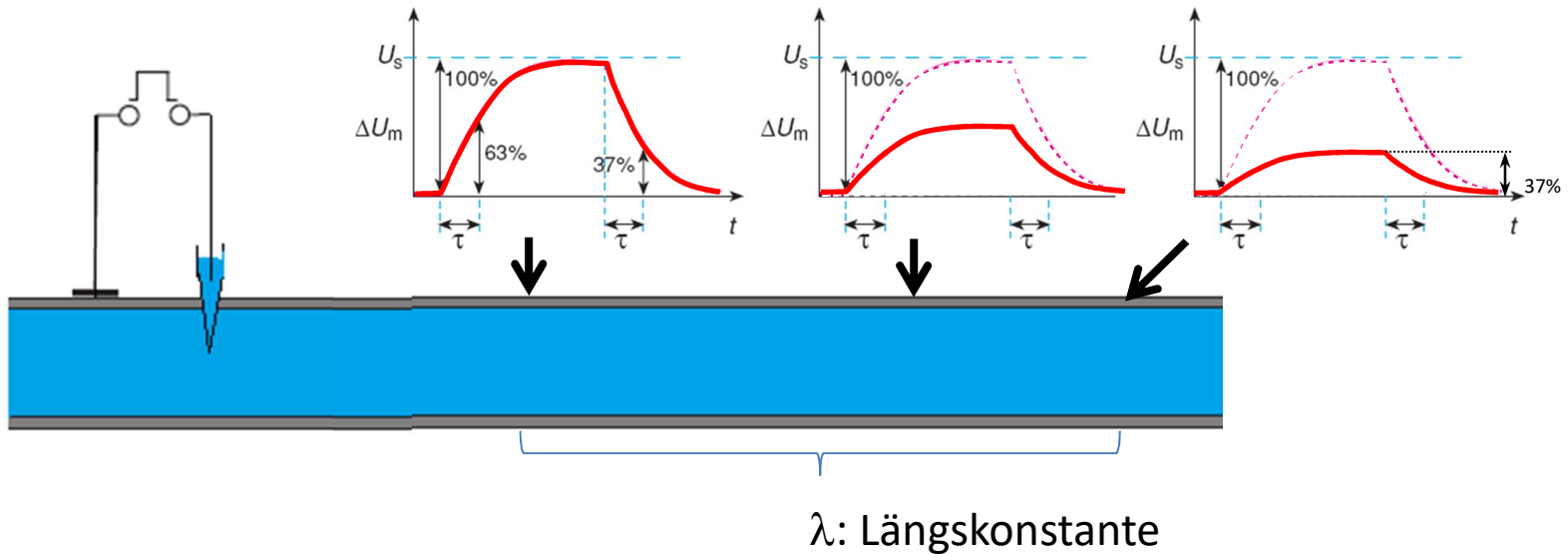
Unterschwellige Reize, Lokale Antwort

2. räumlicher Ablauf

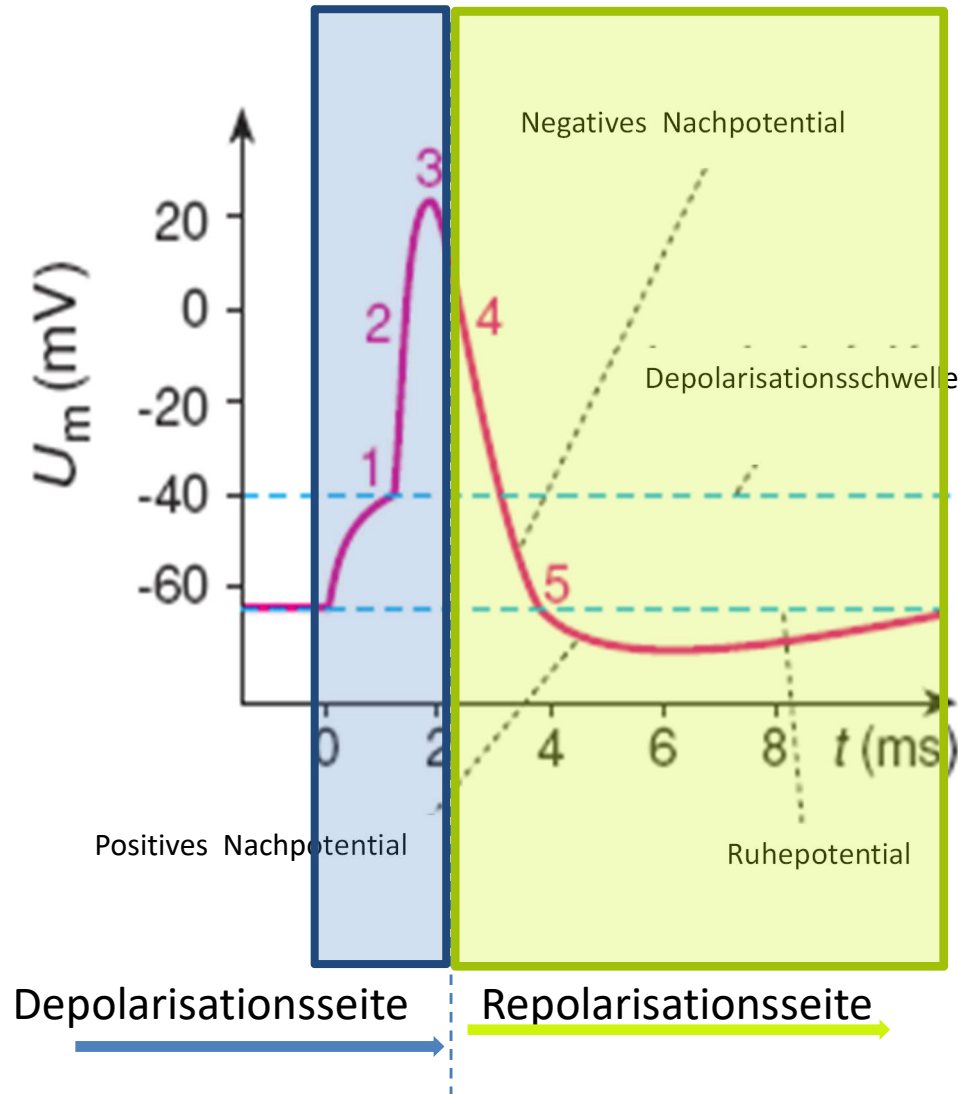


Spannungsabfall längs einer Zelle

λ : Längskonstante



Überschwellige Reize, Aktionspotential

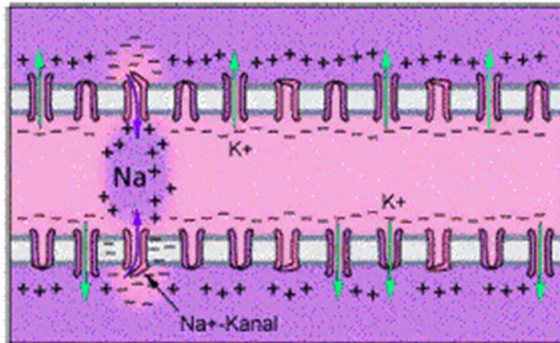


Refraktärzeit:

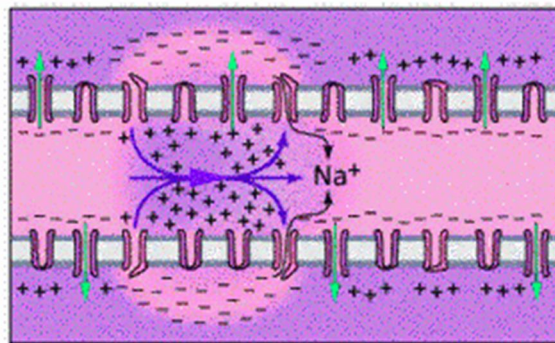
- ✓ absolut — dauert kurz nach der AP-Spitze, die Zelle ist überhaupt nicht erregbar
- ✓ relativ — mit ausreichender! Reizstärke ist die Zelle erregbar (größer als die aktuelle Spannung)

Ablauf, Ausbreitung eines Aktionspotentials

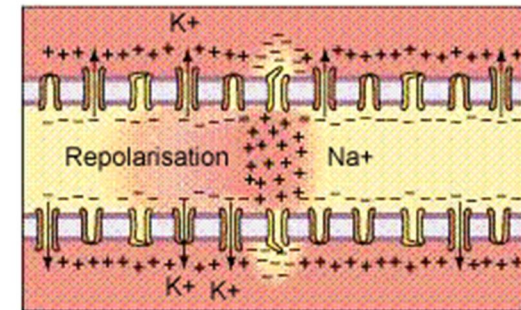
1 AP-Entstehung durch Öffnung der Na⁺-Kanäle



2 Im Axon fließt Strom und regt benachbarte Stellen an; die Na⁺-Kanäle öffnen sich

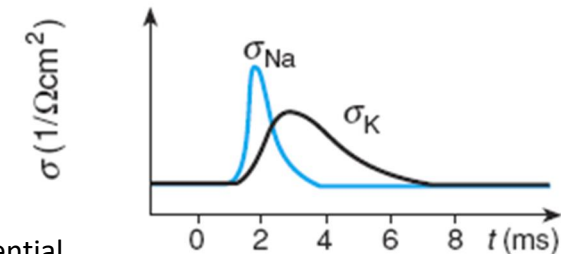
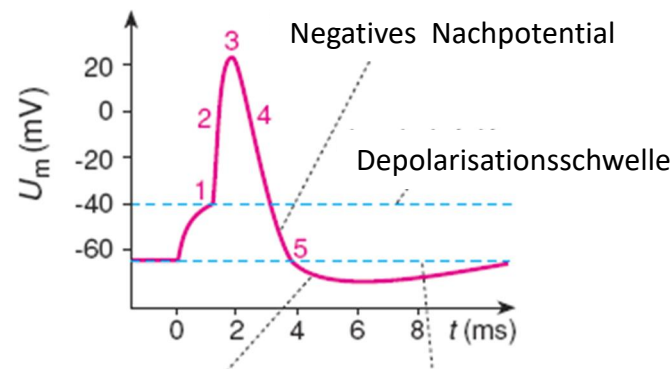


3 Repolarisation der zuvor erregten Stelle



Prozesse während des APs.

- 1) Öffnung der schnellen Na⁺-Kanäle,
- 2) Öffnung der langsamen spannungsgesteuerten K⁺-Kanäle,
- 3) Inaktivierung eines Anteils der Na⁺- Kanäle,
- 4) weitere K⁺-Ausströmung, vollständige Inaktivierung der Na⁺- Kanäle,
- 5) Schließen der K⁺-Kanäle.



Form hängt von

- ✓ Zellenart
- ✓ Tierart
- ✓ Gewebeart,
- ✓ physiologischer Zustand,
- ✓

Charakterisierung der Fortpflanzung:

λ — Längskonstante

τ — Zeitkonstante

Zusammenhang mit Reizstärke

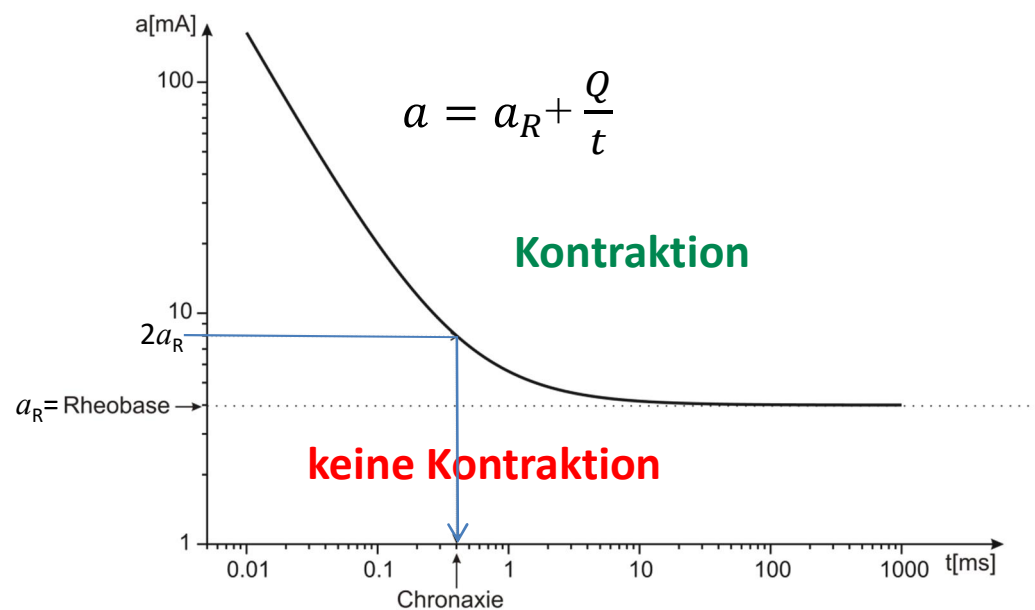
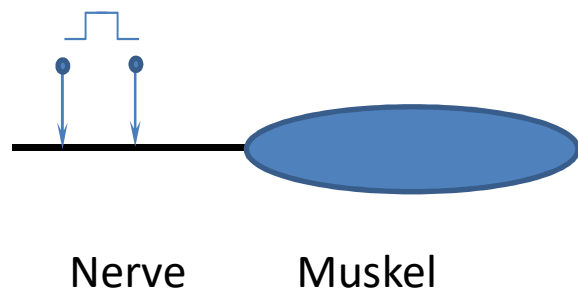
- die Form, d.h. Amplitude und Dauer ist **unabhängig** von Reizstärke
- die **Frequenz** des APs hängt von der Reizstärke ab: je größer die Reizstärke ist, umso größer ist die Frequenz (bedeutet aber keine lineare Proportionalität immer)

Re-Aktion eines Muskel-Nerven Präparates auf Erregung

Im Falle eines Muskel-Nerven Präparates kann eine Erregung durch einen einzelnen Reiz zu einer Kontraktion als Antwort der Muskelzelle auf den elektrischen Reiz führen. Die Möglichkeit der Erzeugung einer Kontraktion hängt von Reizstärke und der Reizdauer ab.

Die Darstellung des Zusammenhanges von Reizstärke und Reizdauer ergibt die Reizstärke-Reizzeit-Kurve (auch I-t-Kurve oder Schwellenstrom-Nutzzeit-Charakteristik genannt).

Reizstärke-Reizzeit-Kurve
für Rechteckimpulse.



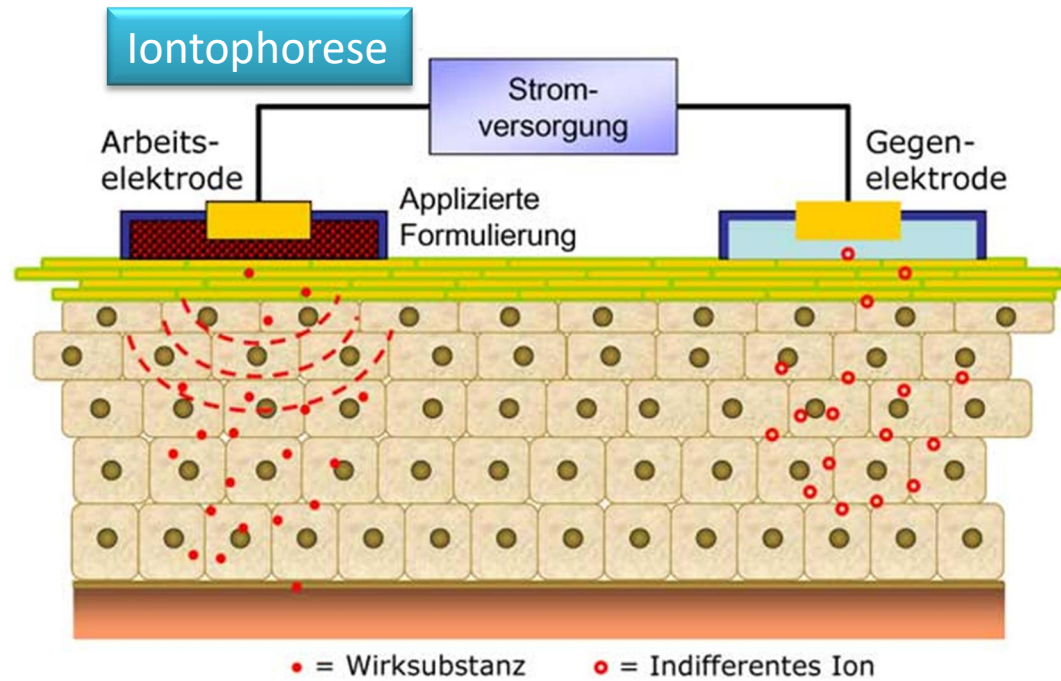
Elektrische Methoden in der Therapie

Galvanisation

verbesserte Durchblutung
Gleichstrom



Iontophorese



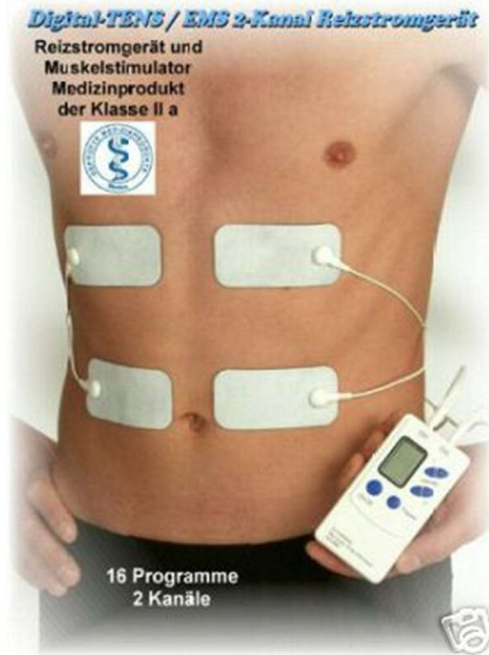
Defibrillator

Impulsbetrieb



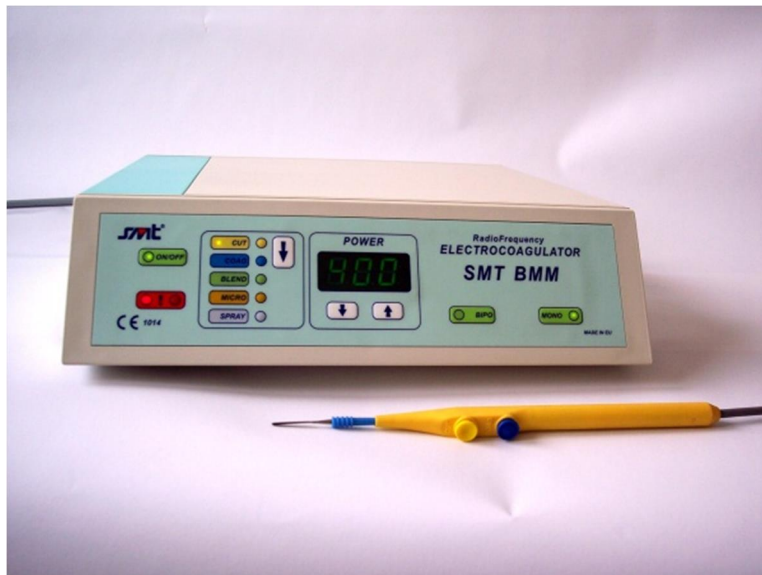
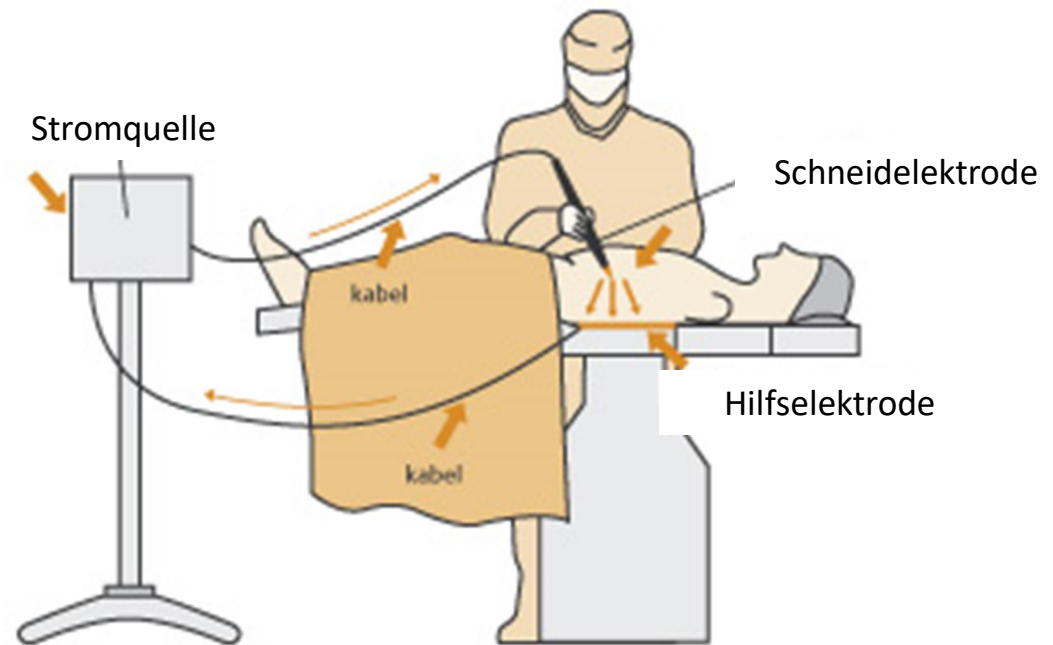
Reizstromtherapie

unterschiedliche Reizformen



Elektrochirurgie

Stromdichte unterscheidet sich wesentlich unter Schneide- und Hilfselektroden.



Psychophysikalische Gesetze

Zusammenhang zwischen Reizstärke (Φ) und der entsprechenden psychischen Größe (Ψ) einer Sinnesmodalität

- Sinnesmodalität — die Empfindungskomplexe wie Sehen, Hören, Riechen, Schmecken und Fühlen
- Ψ : beschreibt die wahrgenommene Amplitude/Größe nach einer Reizeinwirkung

Was kann untersucht werden?

- ✓ ***Wahrnehmungsschwelle*** (Absolutschwelle) — wie stark die Reizung eines gegebenen Sinnesorgans sein muss, damit eine Reaktion (Wahrnehmung) erfolgt;
- ✓ ***Reizunterscheidung*** — wie verschieden müssen zwei Reize sein, damit sie in einem gegebenen Kontext als unterschiedlich empfunden werden;
- ✓ ***Skalierung*** — in der untersucht wird
 - ob eine Person einen Reiz erkannt hat
 - ob sie schätzen kann, wie stark der Reiz ist

Psychophysikalische Zusammenhänge

Physikalische Größen

Subjektive Größen

Licht:

➤ Intensität,



Lichtstärke

➤ Wellenlänge



Farbe

Schall:

➤ Intensität,



Lautstärke

➤ Frequenz



Tonhöhe

➤ ...

Zusammenhang zw. Reizstärke und Empfindungsstärke — Fechnersches Gesetz:

Differential-Form: $\Delta\Psi \approx \frac{\Delta\Phi}{\Phi}$



Integral-Form: $\Psi = k \cdot \lg \frac{\Phi}{\Phi_0}$

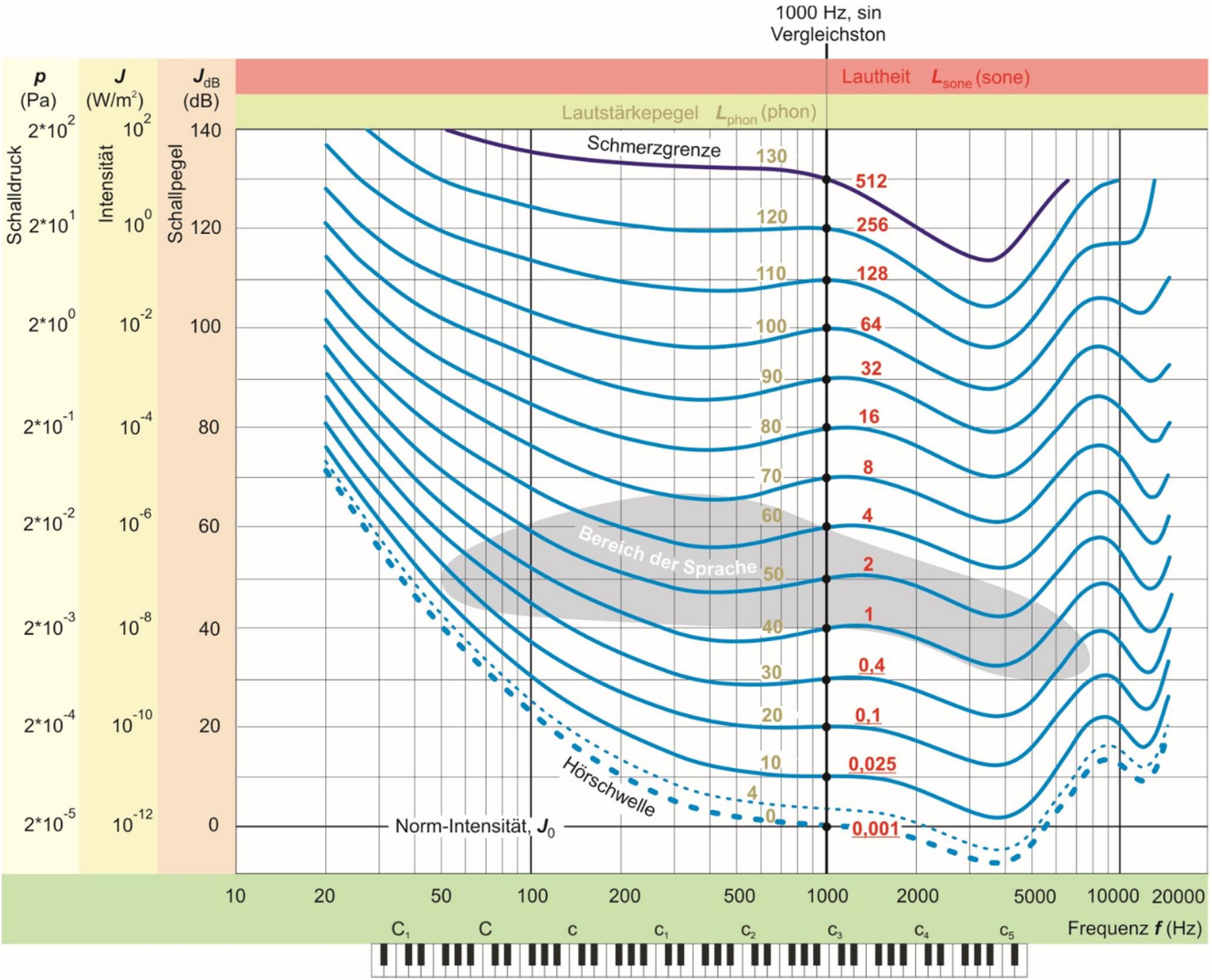
Zusammenhang zw. Reizstärke und Empfindungsstärke — Stevens-Gesetz:

Differential-Form: $\frac{\Delta\Psi}{\Psi} \approx \frac{\Delta\Phi}{\Phi}$

Integral-Form: $\Psi = k \cdot \left(\frac{\Phi}{\Phi_0} \right)^m$



Charakterisierung der Tonwahrnehmung — Skalierung



db-Skala
phon-Skala
sone-Skala

Begriffe:
Tonstärke
Lautpegel
Lautheit

Flüstern
20-40 phon

Gespräch
50-75 phon

Verkehrslärm
70-90 phon

Pressluftbohrer
120 phon