

# Biophysik für Pharmazeuten II

**Grundlagen der Erregungsprozesse**

26.04.2024

---

**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:

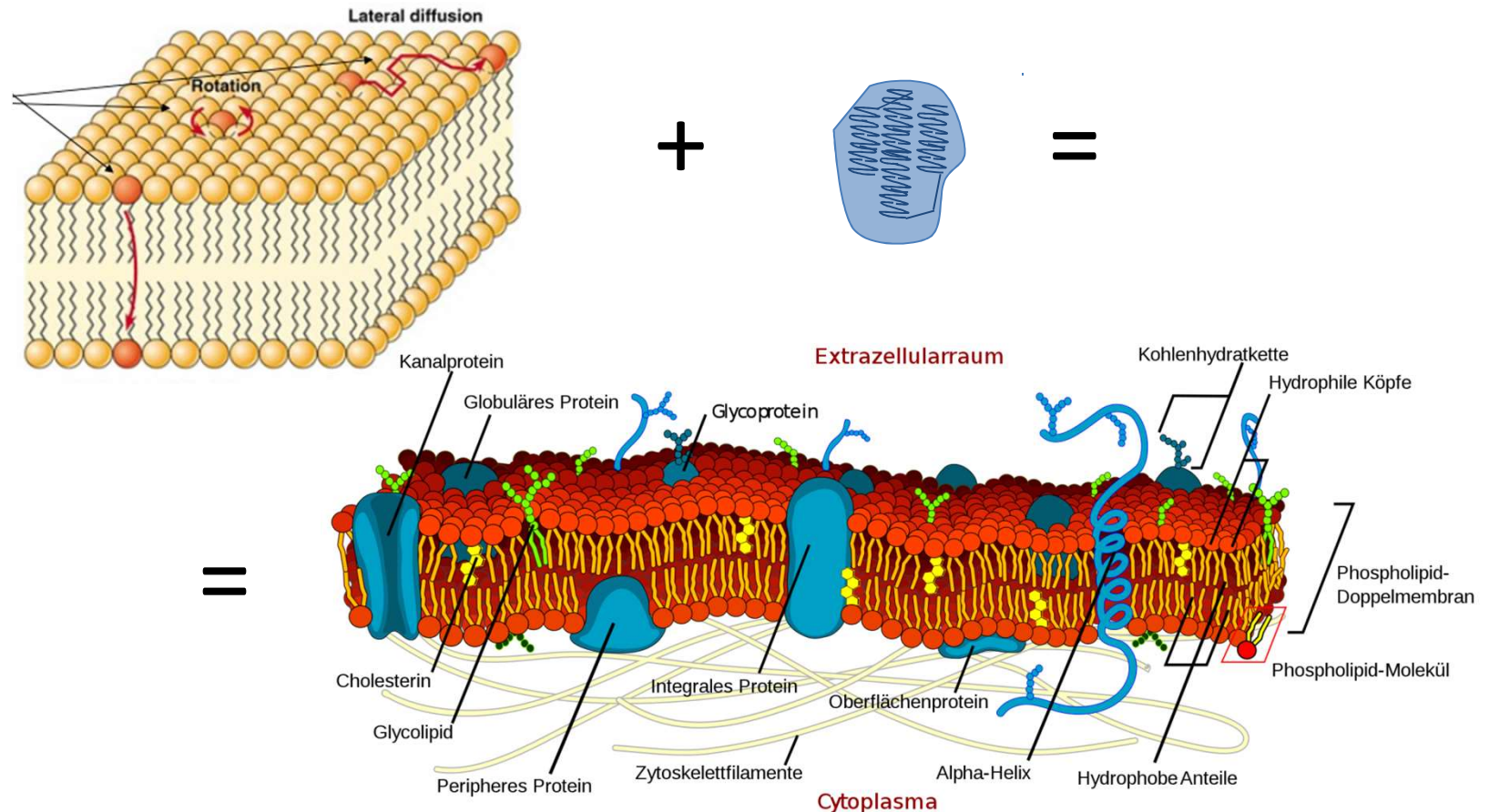
Psychophysikalische Gesetze:

- Weber-Fechner Gesetz
- Stevens Gesetz

# Bioelektrische Erscheinungen: Membrane

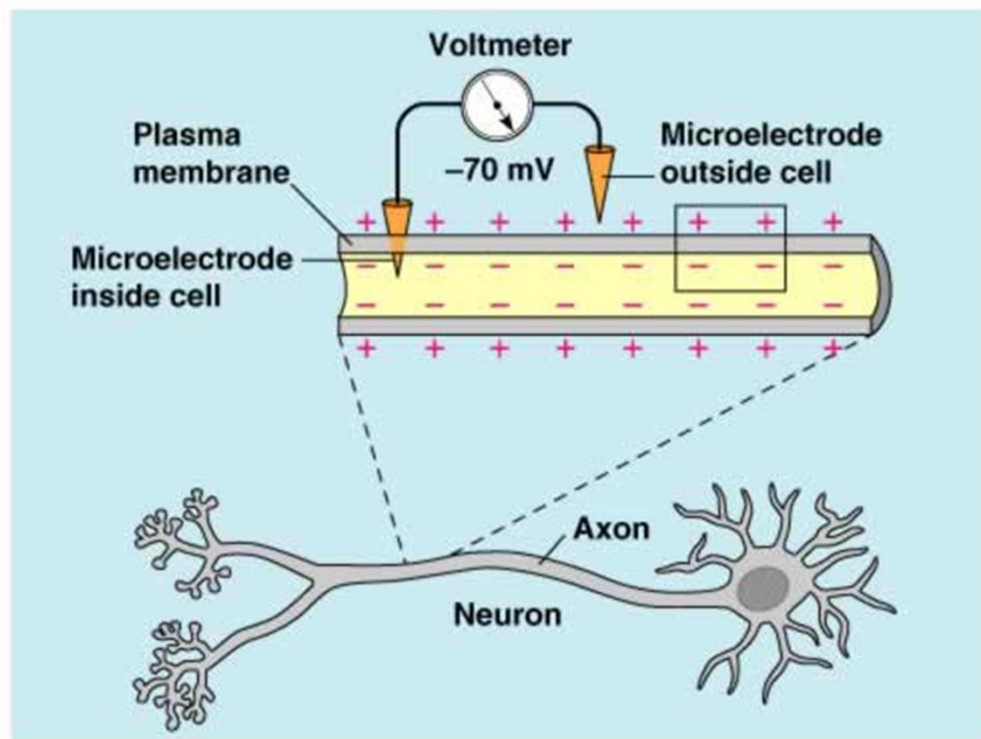
Membrane spielen eine große Rolle bei bioelektrischen Erscheinungen

Aufbau der Membrane: Lipid Doppelschicht + Proteine



# ***Bioelektrische Grunderscheinung: Ruhepotential***

## ***Messung des Ruhepotentials (Zellenpotential)***



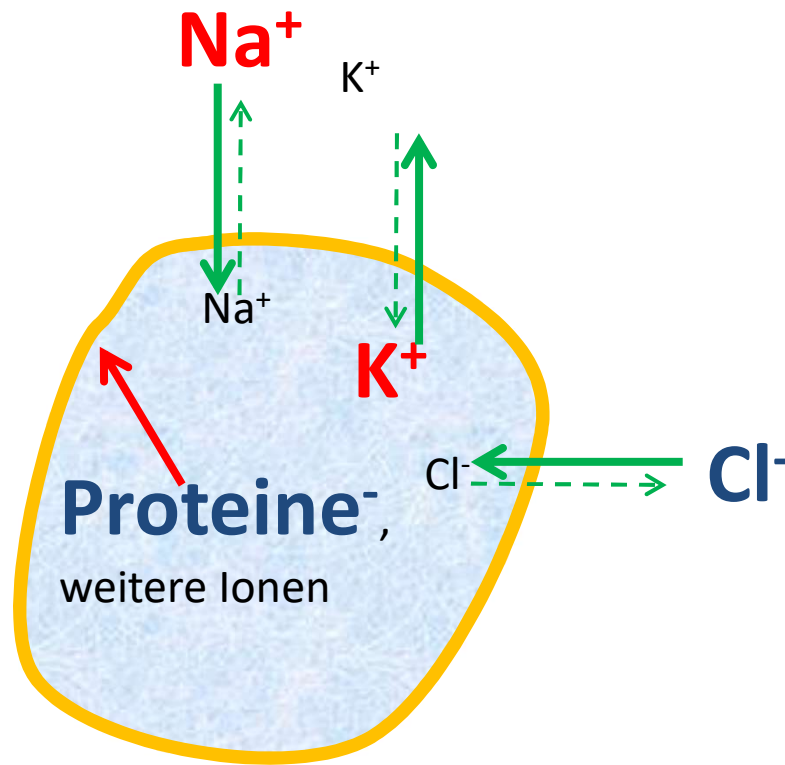
©Addison Wesley Longman, Inc.

Elektroden:  
Kapillaren die mit  
KCL Lösung gefüllt sind.

## ***Beobachtung: Asymmetrische Ionenverteilung***

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

# Einfache Beschreibung des Ruhepotentials : Donnan Modell



Immobil und  
diffundierbare  
Ionen

Triebkräfte:

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

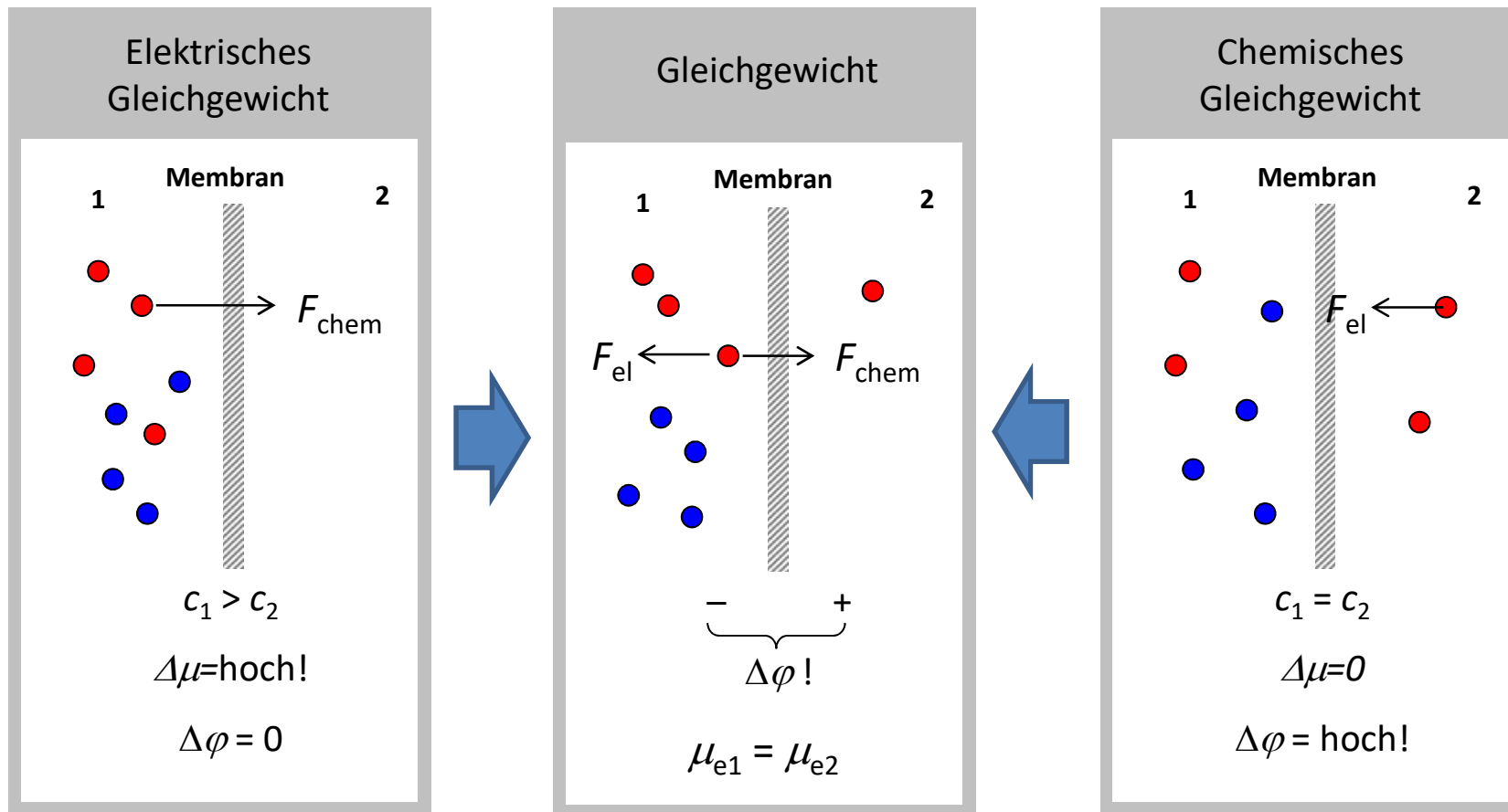
Diese wirken gegeneinander!



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):**  $\mu_e = \mu + F \cdot \varphi$

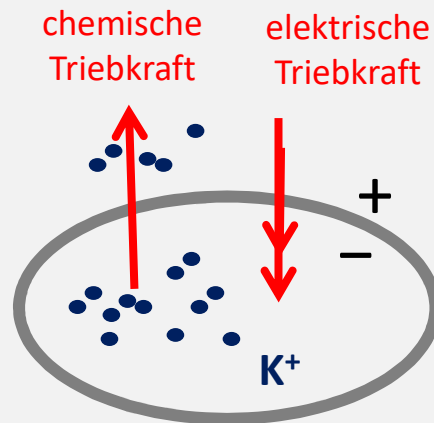
**Nernst-Gleichung:** 
$$\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 = -\frac{RT}{F} \ln \frac{c_2}{c_1}$$

## ■ 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	+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*“

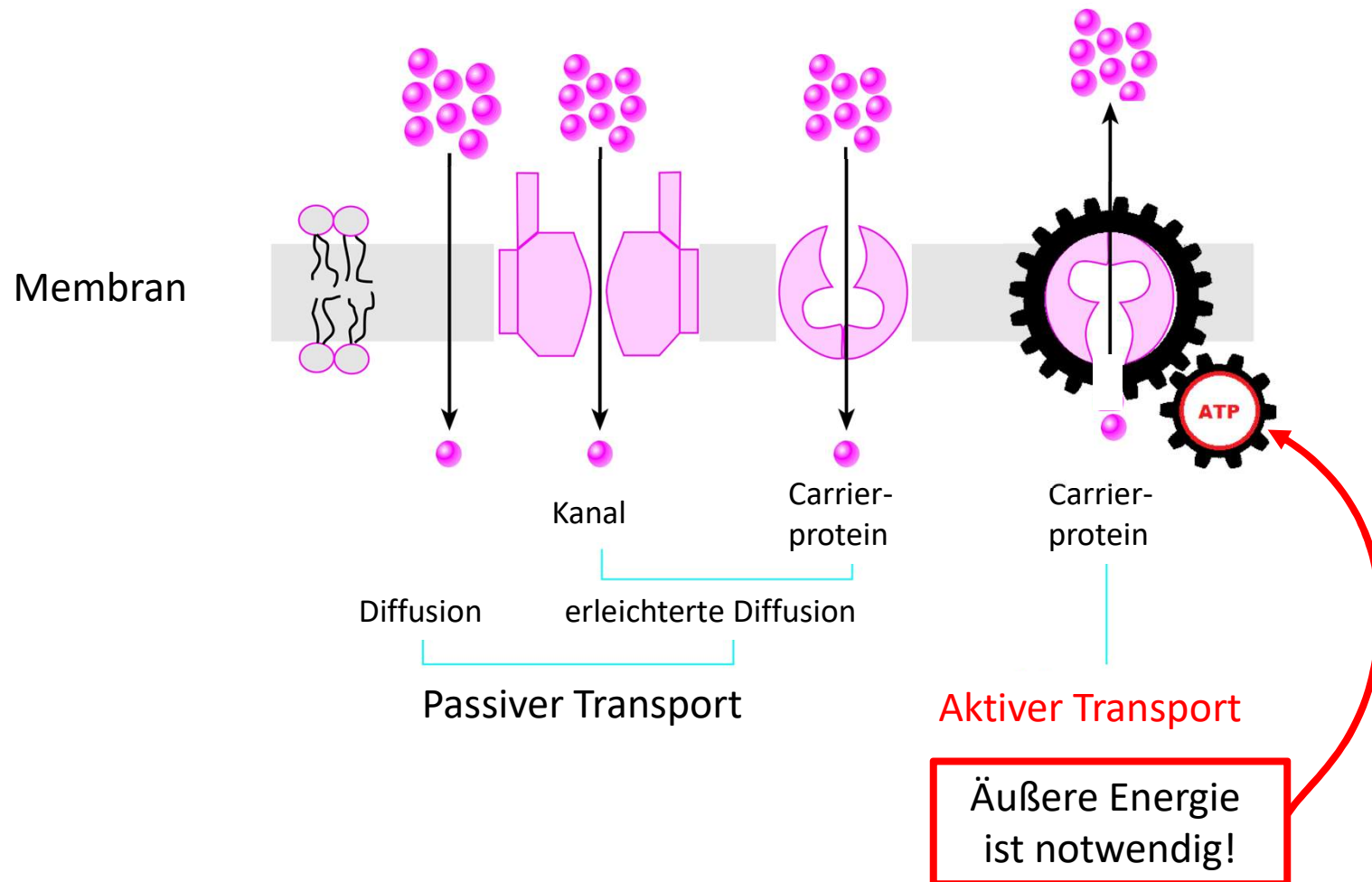
ist eine Situation, in welchem alle Parameter des Systems konstant sind, obwohl die gängigen Prozesse nach Veränderung dieser Parameter streben.

## ■ Transportmodell

Ständige Diffusion von Ionen mit unterschiedlichen Permeabilitäten

⇒ Diffusionspotenzial

⇒ Rücktransport (aktiv)



## ■ Transportmodell

Ständige Diffusion von Ionen mit unterschiedlichen Permeabilitäten

⇒ Diffusionspotenzial

⇒ Rücktransport (aktiv)

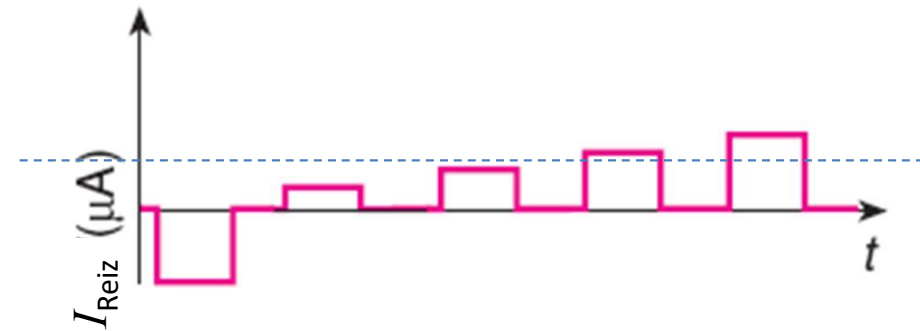
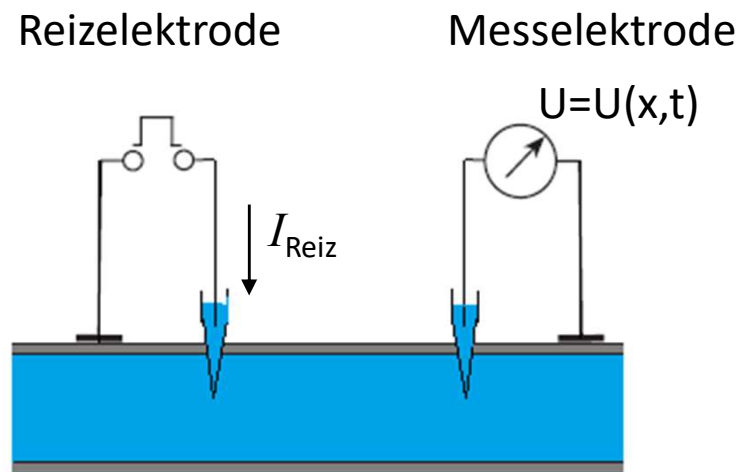
### Goldman-Hodgkin-Katz-Gleichung:

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

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

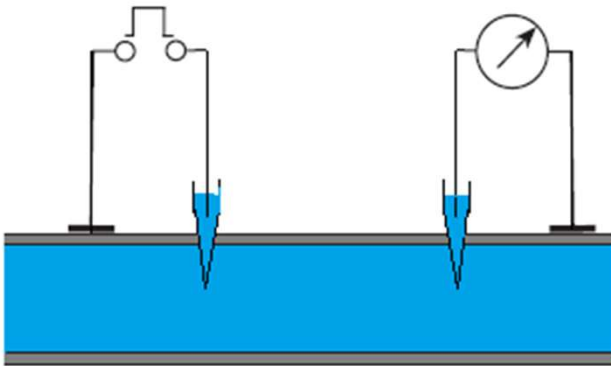


# ***Erregung einer Zelle: lokale Änderungen und Aktionspotentialle***



# Unterschwellige Reize, Lokale Antwort

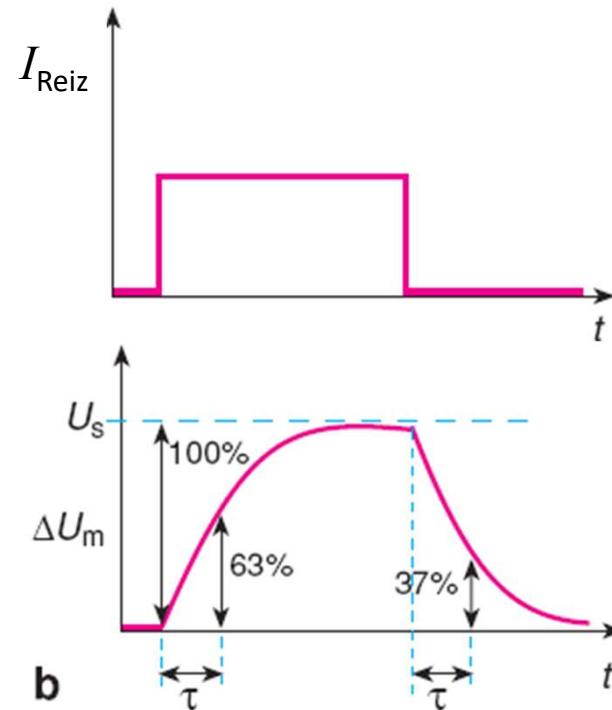
## 1. zeitlicher Ablauf



Spannungsverlauf beim Anfang der Erregung

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

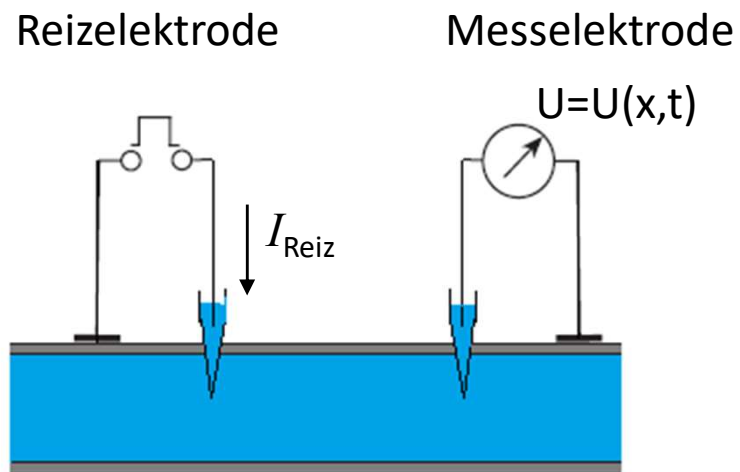
$\tau$ : Zeitkonstante



siehe RC Kreis !

# Unterschwellige Reize, Lokale Antwort

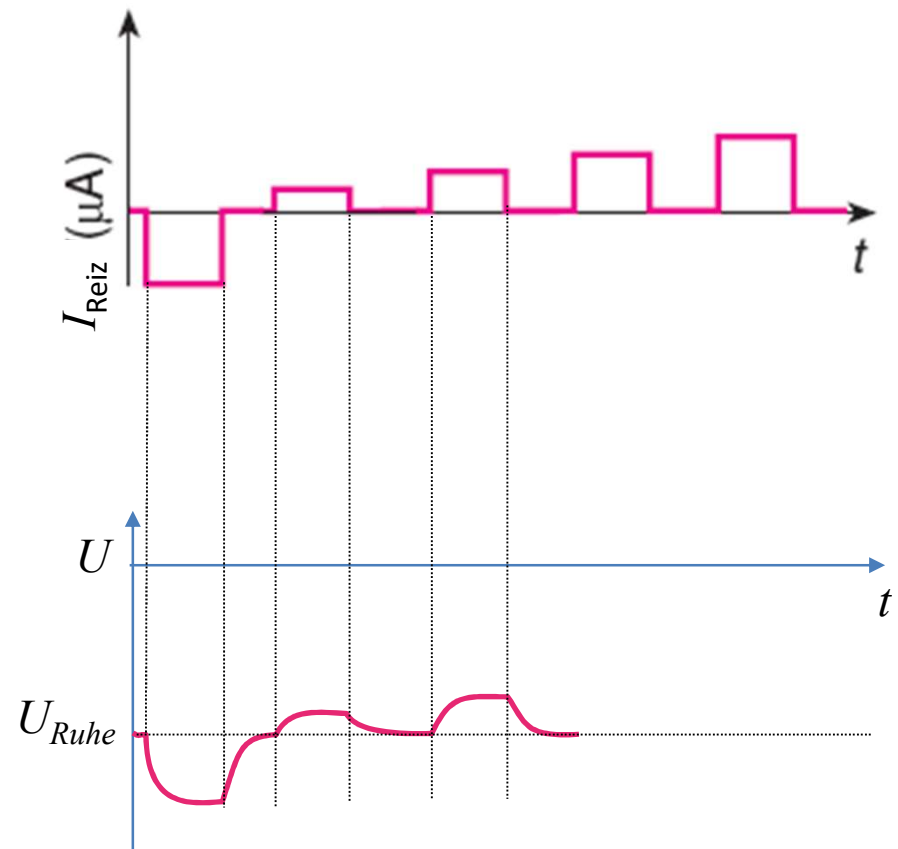
## 1. zeitlicher Ablauf



Spannungsverlauf beim Anfang der Erregung

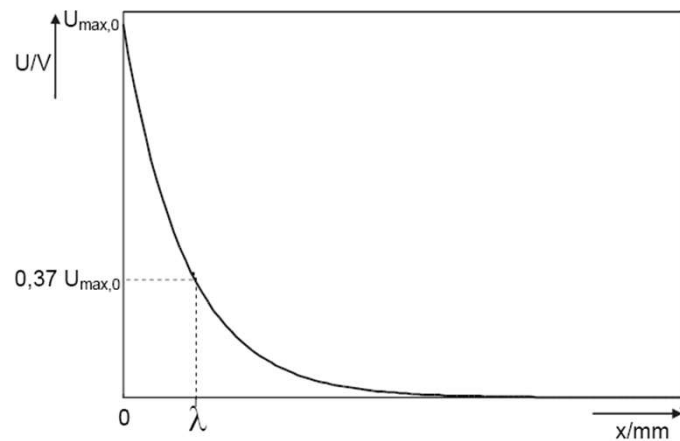
$$U(t|x) = U_{\text{max},0} \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$$

$\tau$ : Zeitkonstante



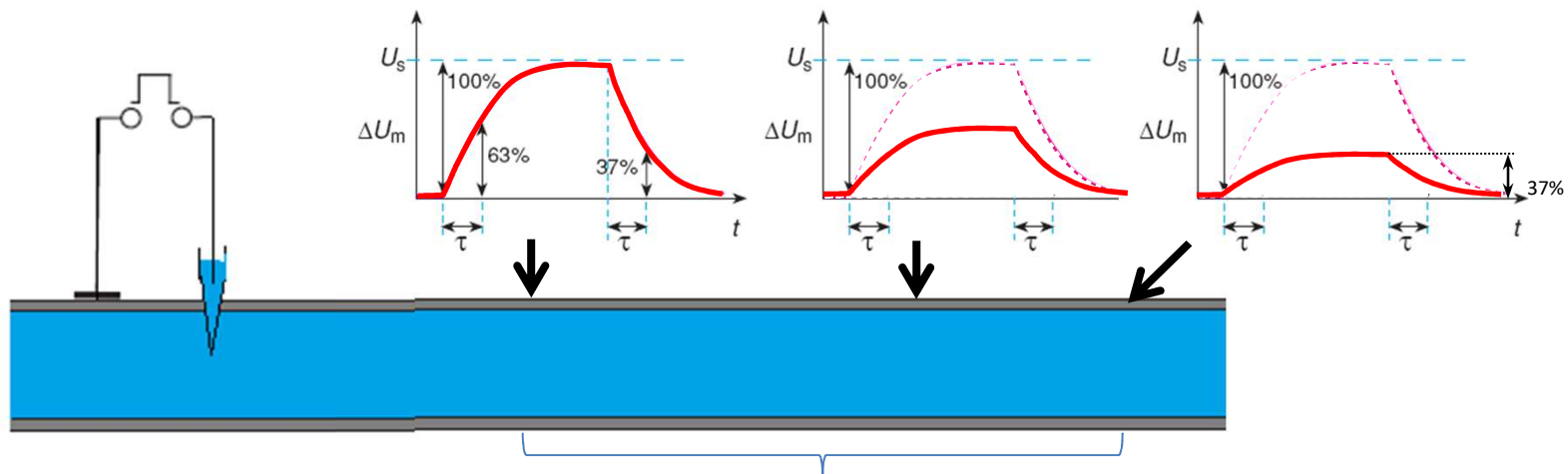
# Unterschwellige Reize, Lokale Antwort

## 2. räumlicher Ablauf



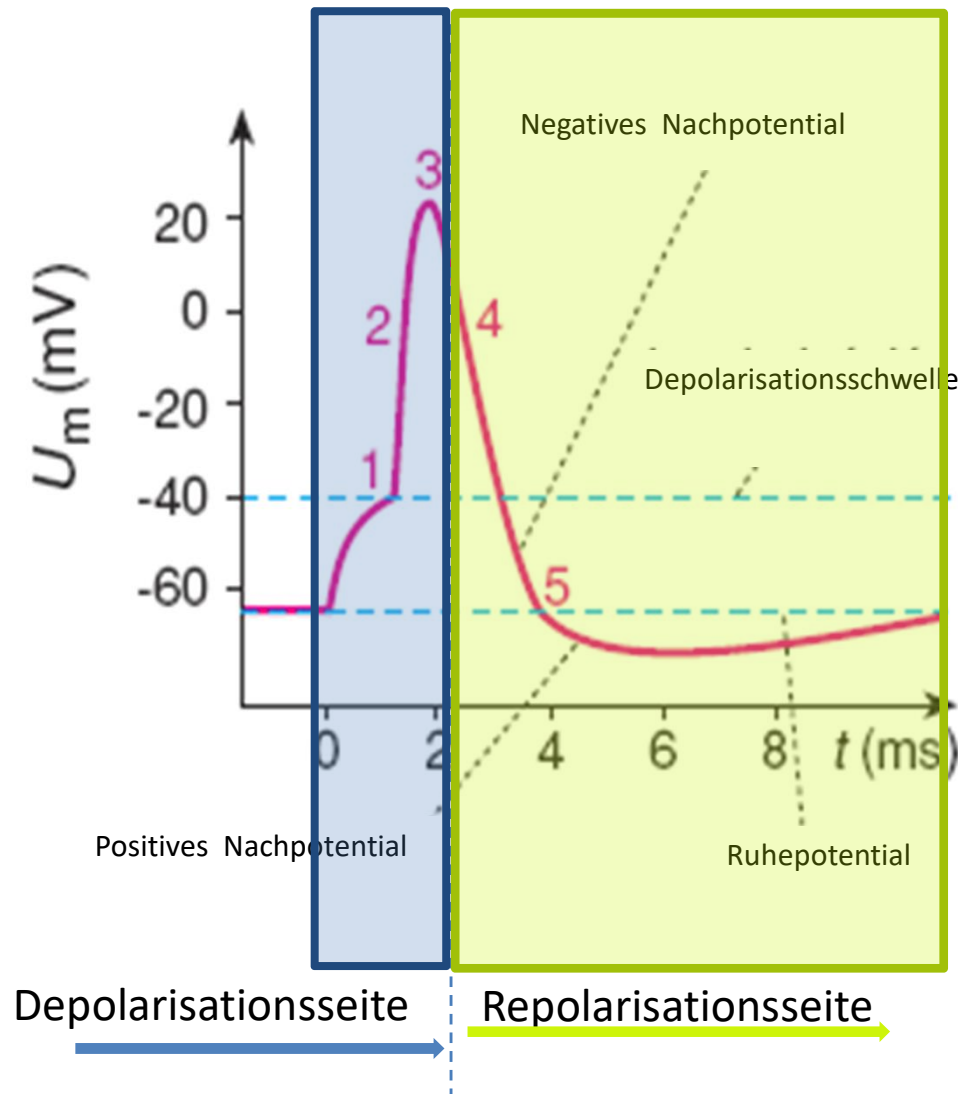
Spannungsabfall längs einer Zelle

$\lambda$ : Längskonstante



$\lambda$ : Längskonstante

# Überschwellige Reize, Aktionspotential



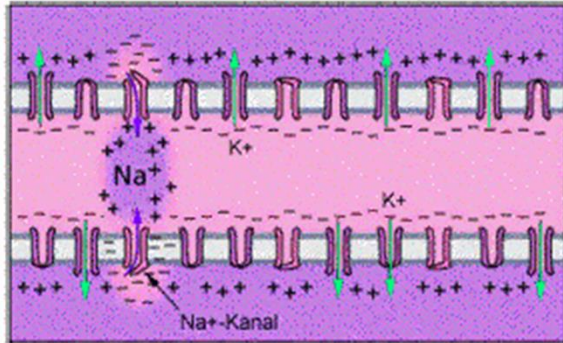
Refraktärzeit:

- ✓ 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)

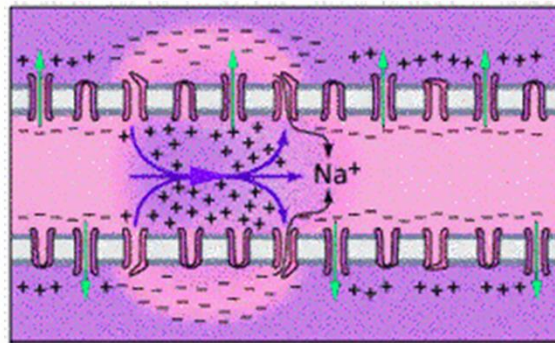


# Ablauf, Ausbreitung eines Aktionspotentials

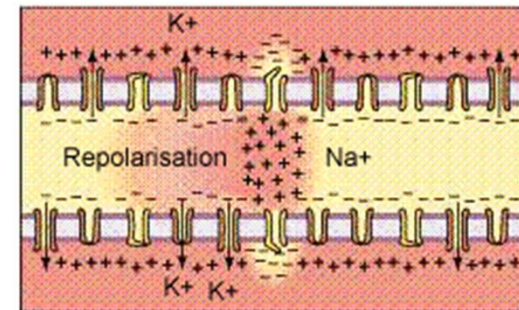
1 AP-Entstehung durch Öffnung der Na<sup>+</sup>-Kanäle



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

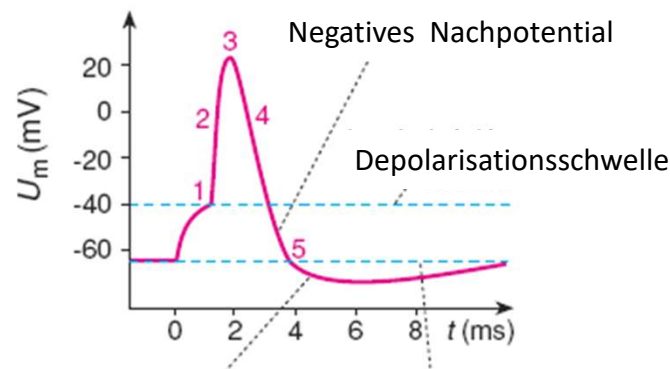
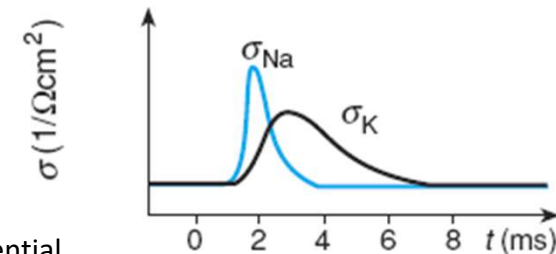


3 Repolarisation der zuvor erregten Stelle



Prozesse während des APs.

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



Form hängt von

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

Charakterisierung der Fortpflanzung:

$\lambda$  — Längskonstante

$\tau$  — Zeitkonstante

Zusammenhang mit Reizstärke

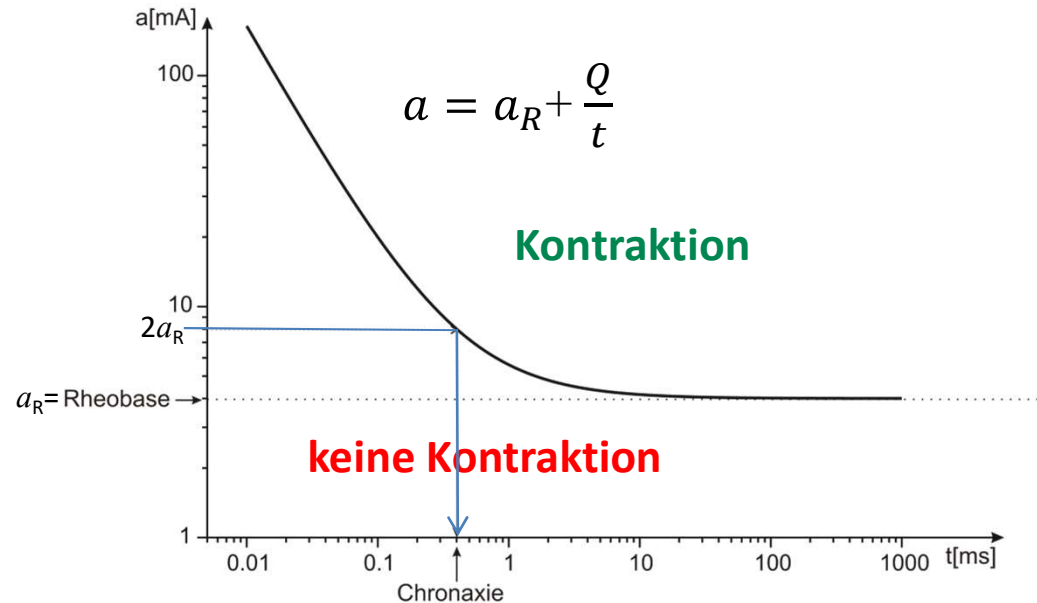
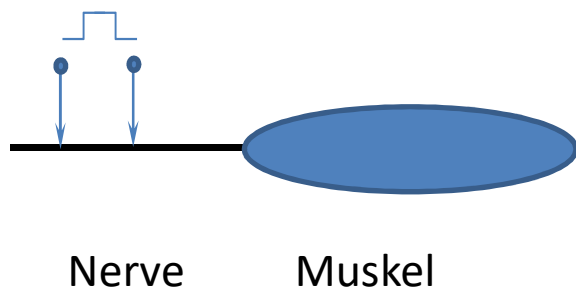
- die Form, d.h. Amplitude und Dauer ist **unabhängig** von Reizstärke
- die **Frequenz** des APs hängt von der Reizstärke ab: je größer die Reizstärke ist, umso größer ist die Frequenz (bedeutet aber keine lineare Proportionalität immer)

# 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

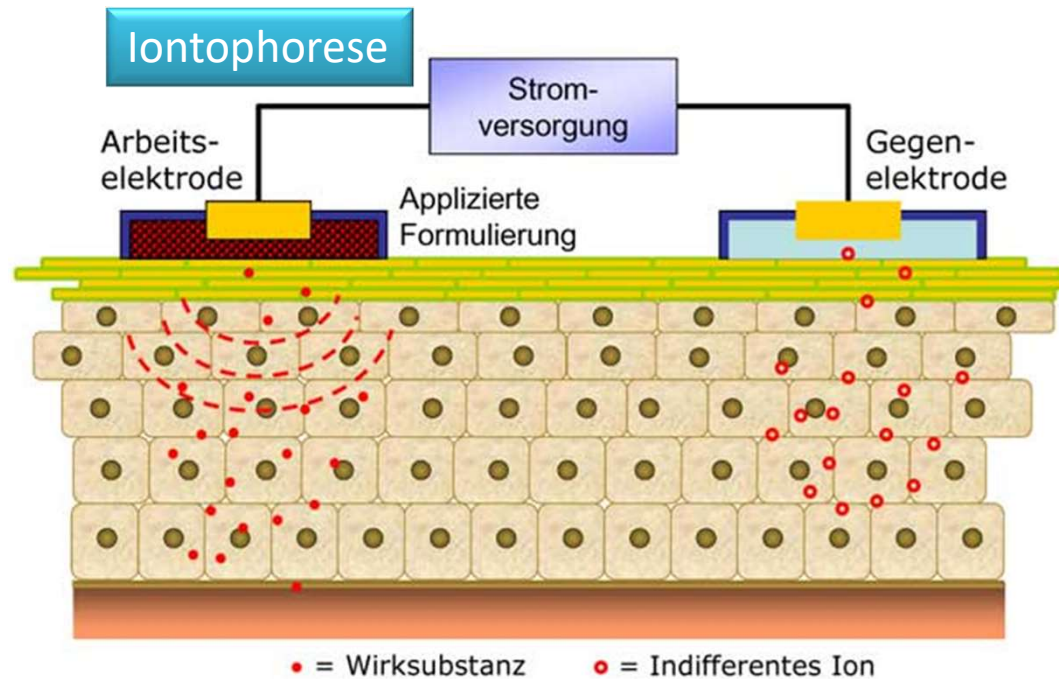
## Galvanisation

verbesserte Durchblutung  
Gleichstrom



## Defibrillator

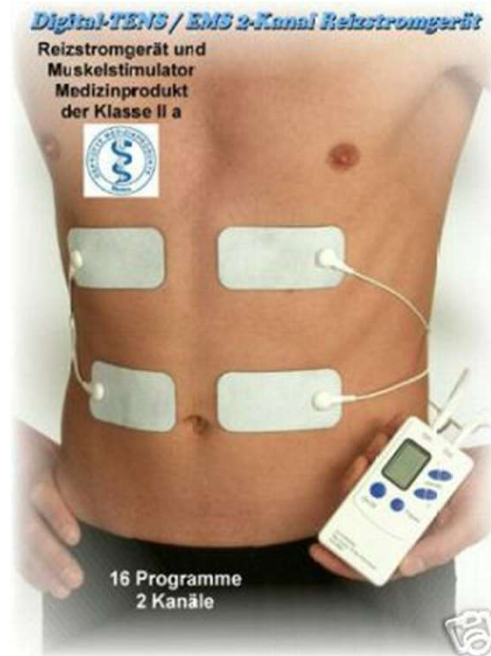
Impulsbetrieb





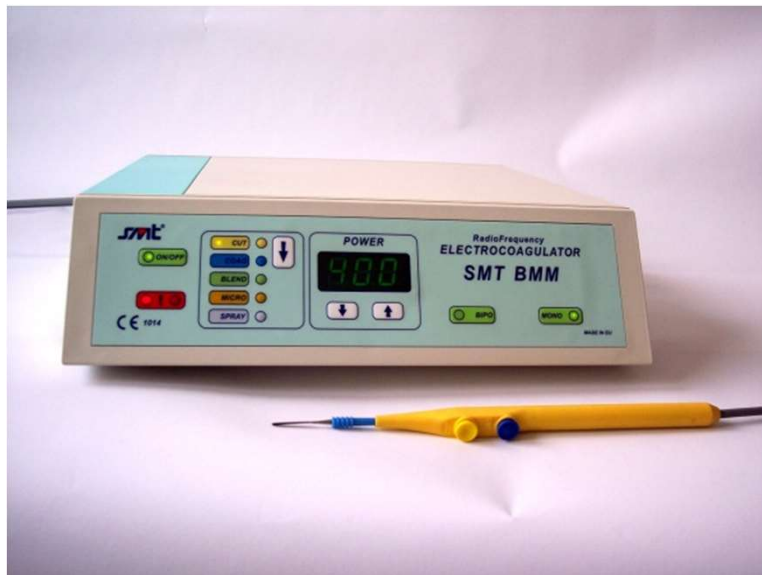
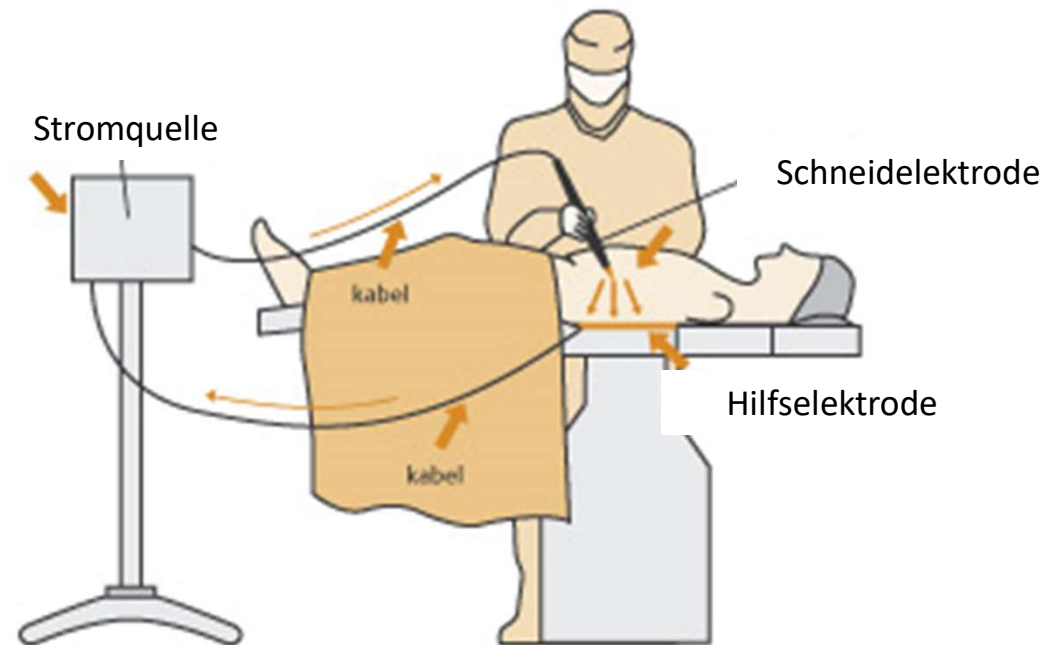
## Reizstromtherapie

unterschiedliche Reizformen



## Elektrochirurgie

Stromdichte unterscheidet sich wesentlich unter Schneide- und Hilfselektroden.



# ***Psychophysikalische Gesetze***

Zusammenhang zwischen Reizstärke ( $\Phi$ ) und der entsprechenden psychischen GröÙe ( $\Psi$ ) einer Sinnesmodalität

- Sinnesmodalität — die Empfindungskomplexe wie Sehen, Hören, Riechen, Schmecken und Fühlen
- $\Psi$ : beschreibt die wahrgenommene Amplitude/GröÙe 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:  $\Psi = k \cdot \lg \frac{\Phi}{\Phi_o}$



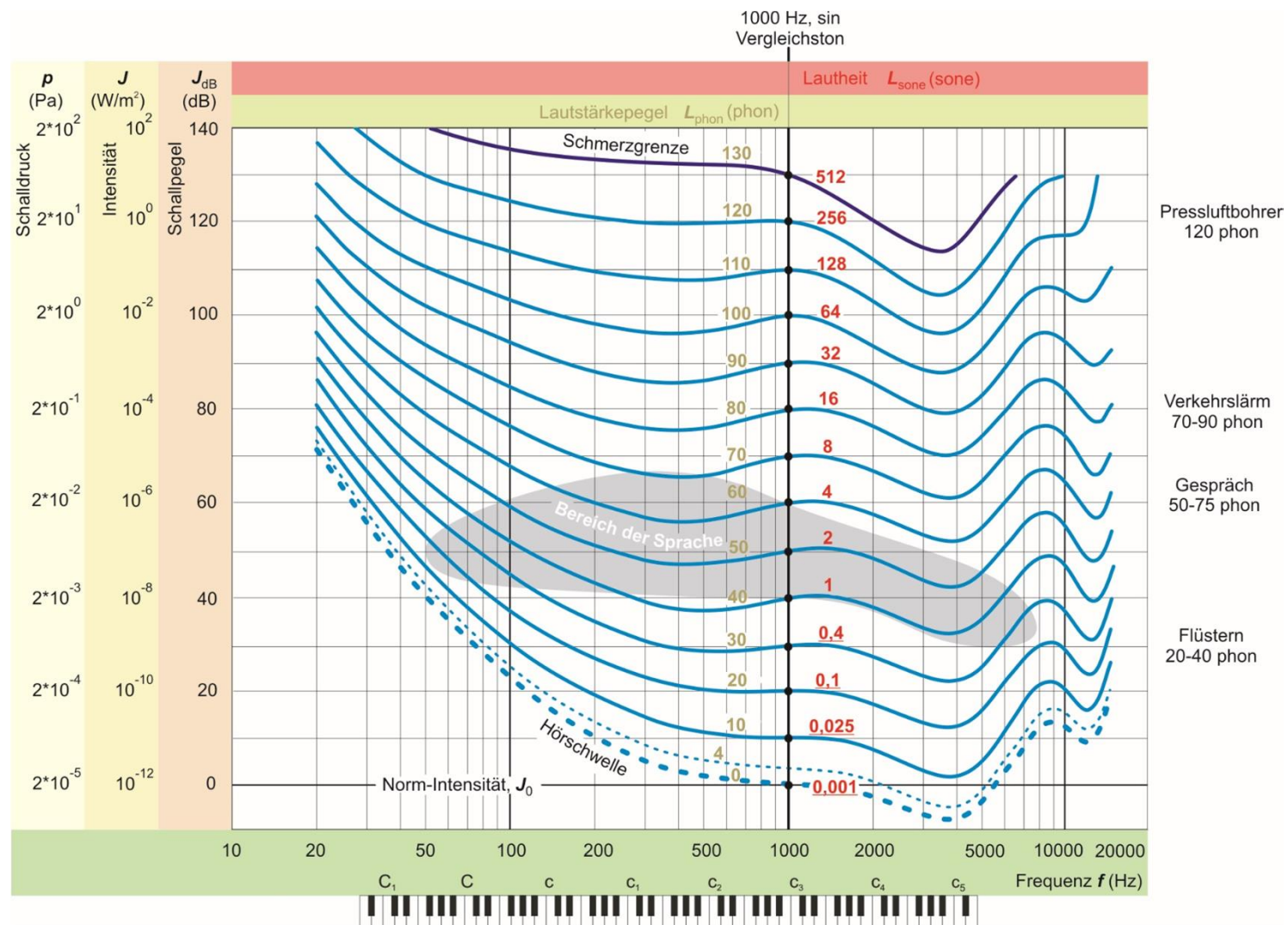
*Zusammenhang zw. Reizstärke und Empfindungsstärke — Stevens-Gesetz:*

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

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



# Charakterisierung der Tonwahrnehmung — Skalierung



db-Skala  
phon-Skala  
sone-Skala

Begriffe:  
Tonstärke  
Lautpegel  
Lautheit