

Aktionspotenzial.

Elektrische Methoden in der Medizin.

Balázs Kiss

kissb3@gmail.com



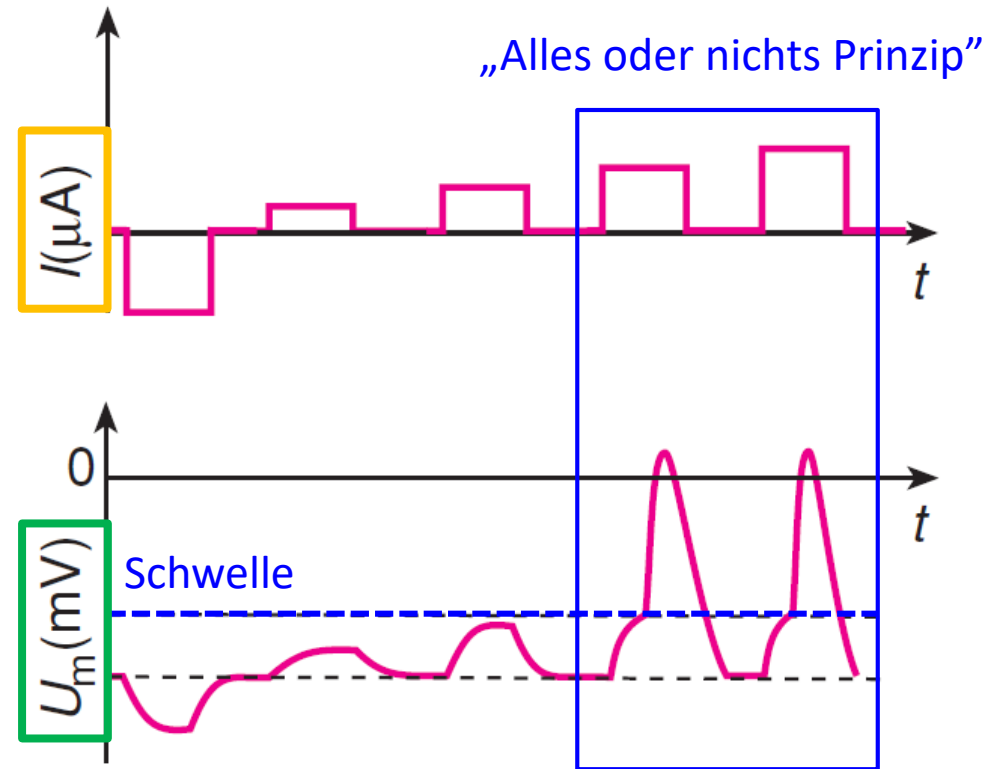
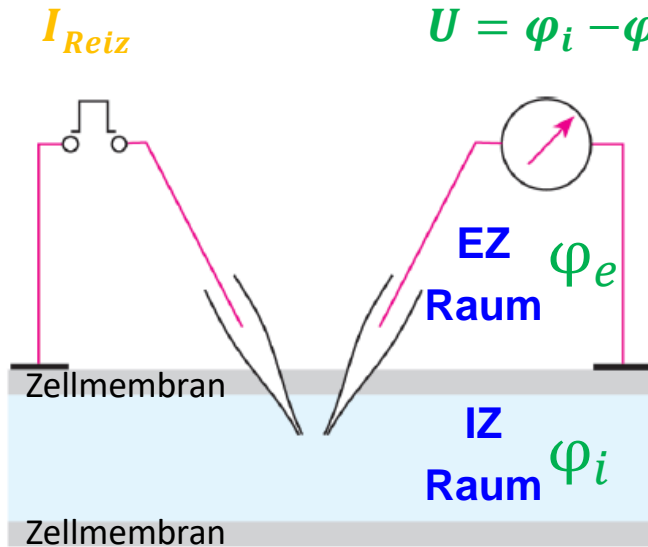
**KISSLAB - Myofilament-Mechanobiophysik Forschungsgruppe,
Semmelweis Universität,
Institut für Biophysik und Strahlenbiologie.**

16. Mai 2025

Aktionspotenzial #1

stimulierende
Elektroden

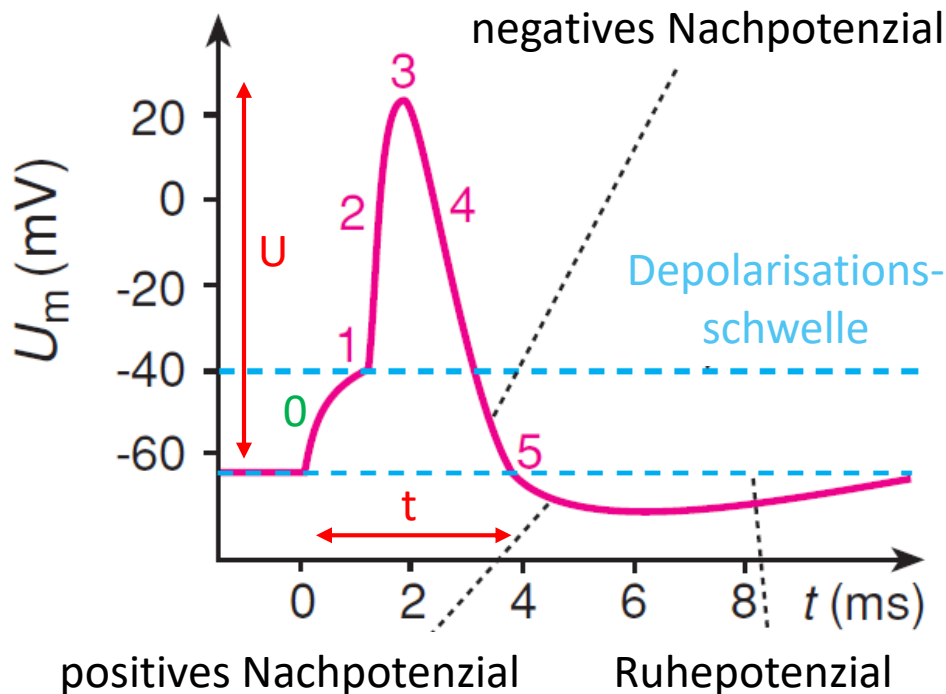
registrierende
Elektroden



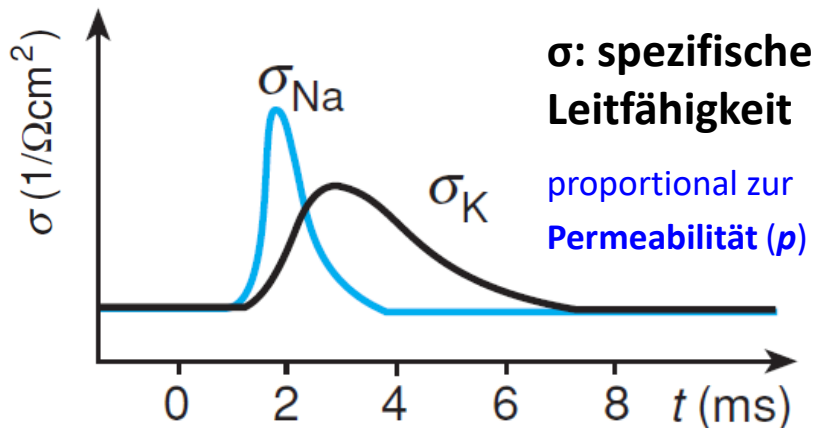
unter einem Schwellenwert: Größe der Antwortsignale ist proportional zur Stromstärke

über dem Schwellenwert: Größe der Antwortsignale ist unabhängig von der Stromstärke

Aktionspotenzial #2



- 0: lokale Änderung des Membranpotenzials
- 1: **Öffnung** der spannungsgesteuerten Na^+ Kanäle (Na^+ : **ein**)
- 2: **Öffnung** der spannungsgesteuerten K^+ Kanäle (K^+ : **aus**)
- 3: **Inaktivierung** der Na^+ Kanäle (eines Teils)
- 4: Totalschluss der Na^+ Kanäle
- 5: **Schluss** der K^+ Kanäle (verspätet)

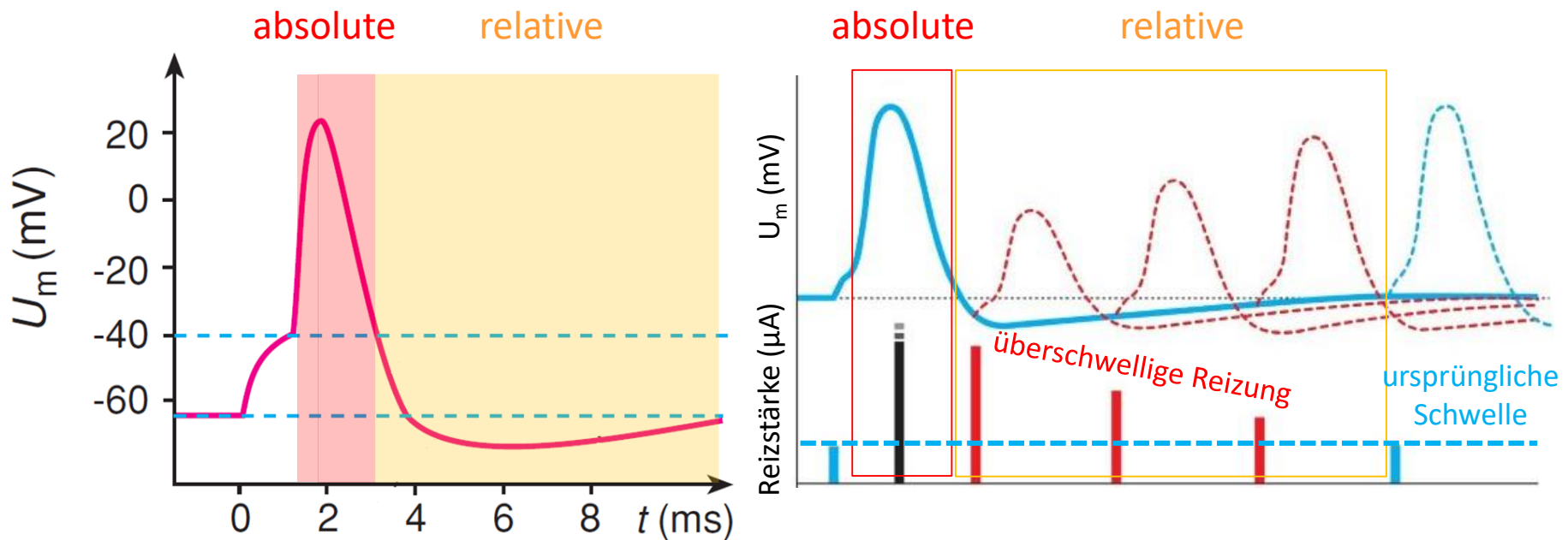


- **$U \sim 100 \text{ mV}$**
- **$t \sim 1-5 \text{ ms}$**
- (Skelettmuskel und Neuron)**

Eigenschaften des Aktionspotenzials #1

Ionenkonzentration bleibt unverändert: Die transportierten Ionen diffundieren weit weg von der Zellmembran. Nur die Permeabilität ändert sich während des Aktionspotenzials.

Refraktärphase: die Zelle ist nicht erregbar (Depolarisationsschwelle ist nicht „konstant“)



- **absolute:** Inaktivierung der spannungsgesteuerten Na^+ -Kanäle

Die Reizschwelle ist praktisch unendlich groß.

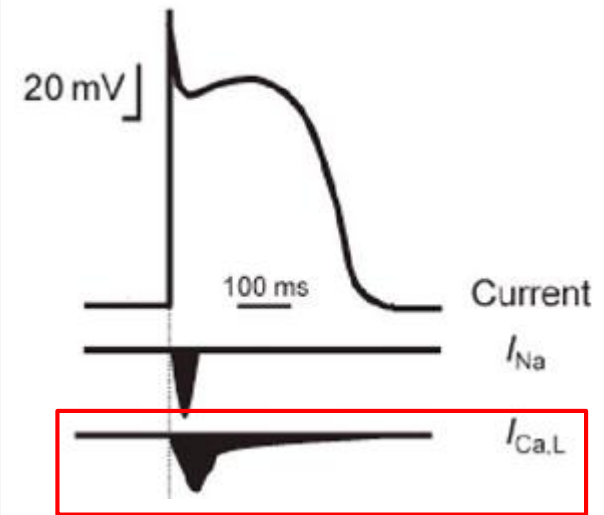
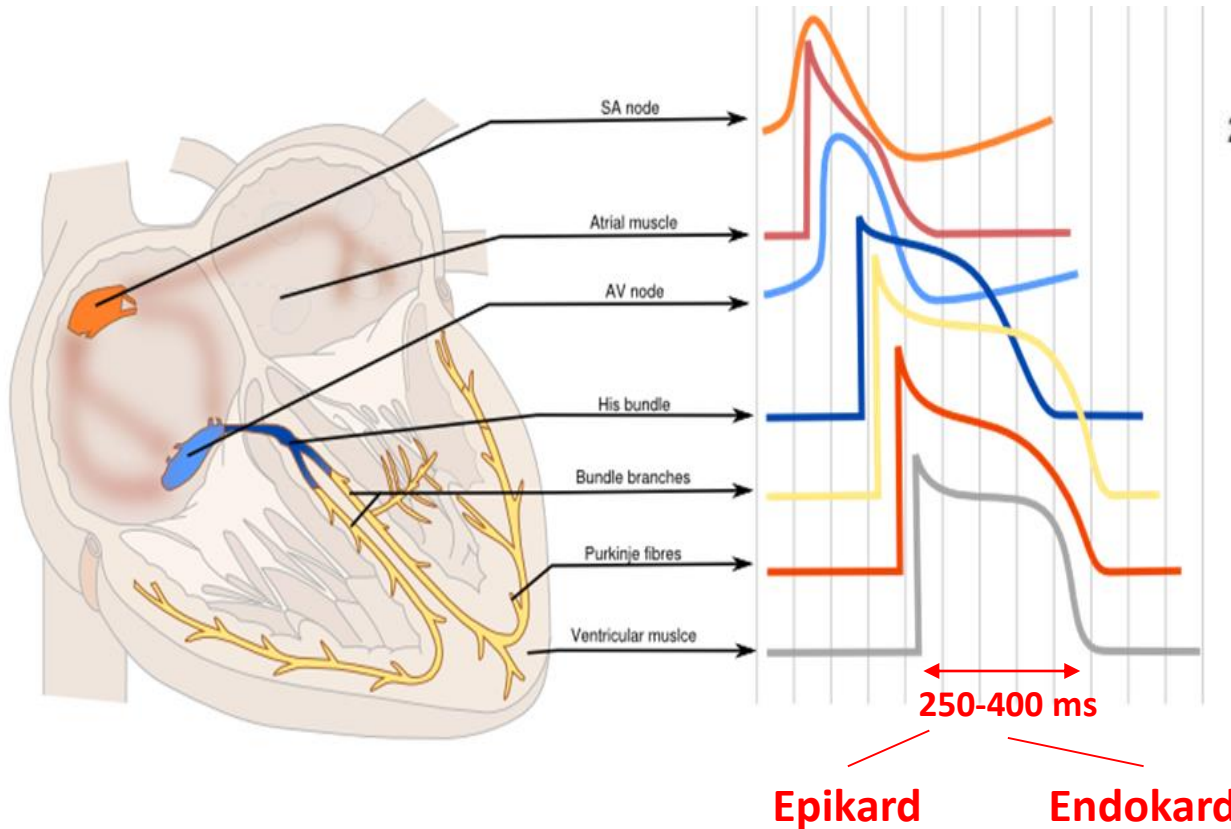
- **relative:** AP geht nur mit überschwelliger Reiz

Wiederöffnung der geschlossenen spannungsgesteuerten Na^+ -Kanäle.

**verhindert
die rückwärtige
Ausbreitung
des Aktionspotenzials**

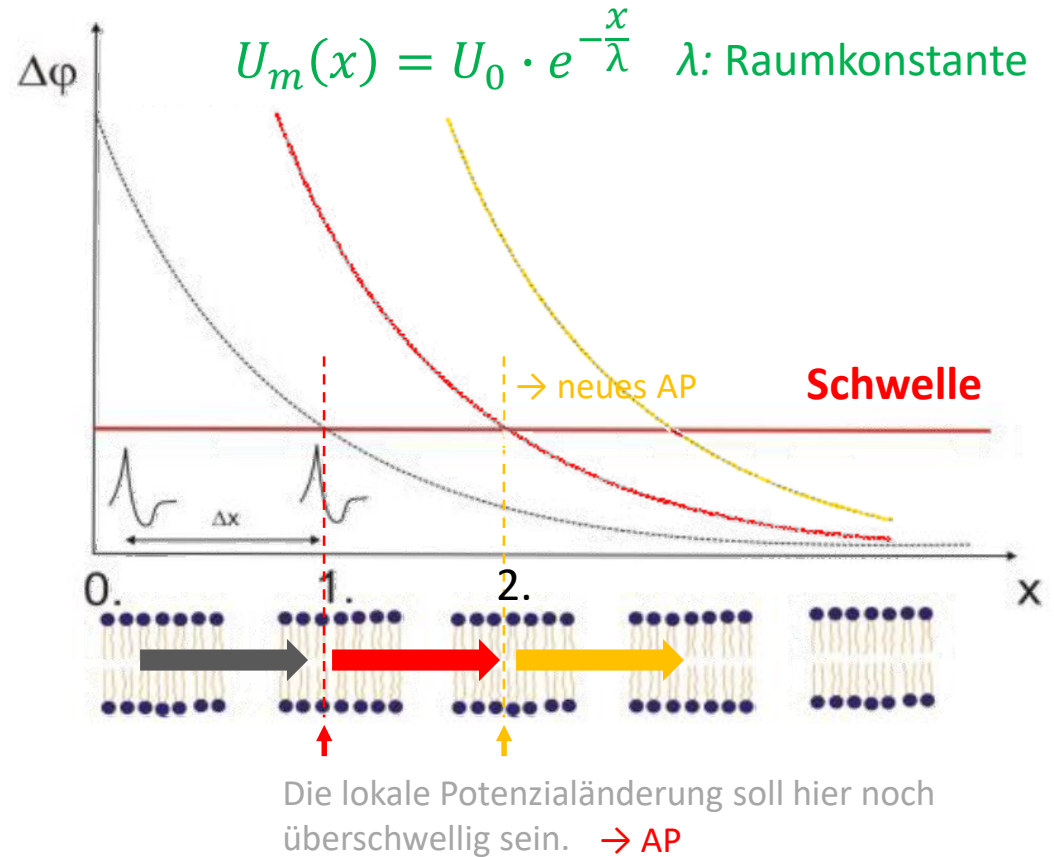
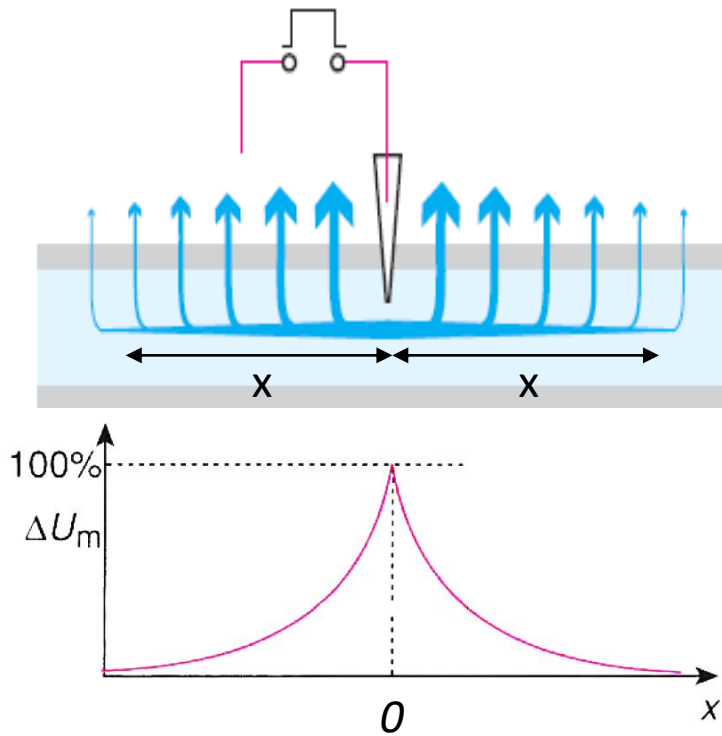
Eigenschaften des Aktionspotenzials #2

Spezielles Aktionspotenzial: Herzkammer-Muskelzellen



**spannungsgesteuerte
 Ca^{2+} -Kanäle
(Ca^{2+} : Einstrom)**

Ausbreitung des Aktionspotenzials #1

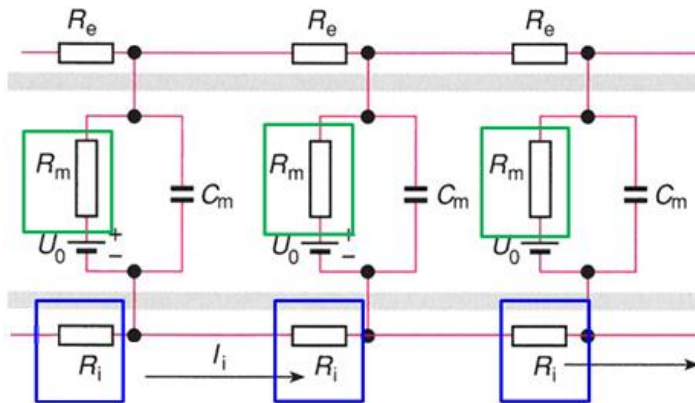


Eigenschaften:

- Spannungsverlauf des Aktionspotenzials ist unabhängig von der Reiz(stärke)
- breitet sich ohne (signifikante) Dämpfung in langen Abständen aus
- viel schneller als hormonelle Regelung / Wirkung

Ausbreitung des Aktionspotenzials #2

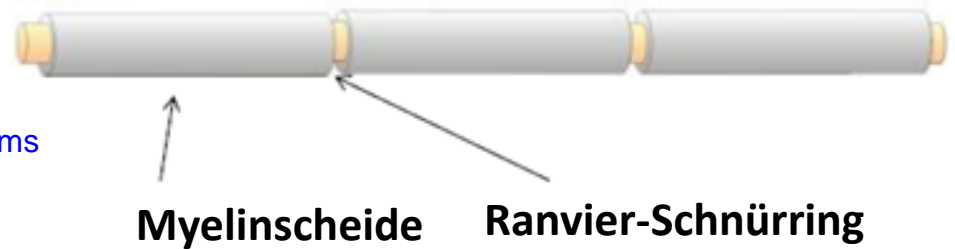
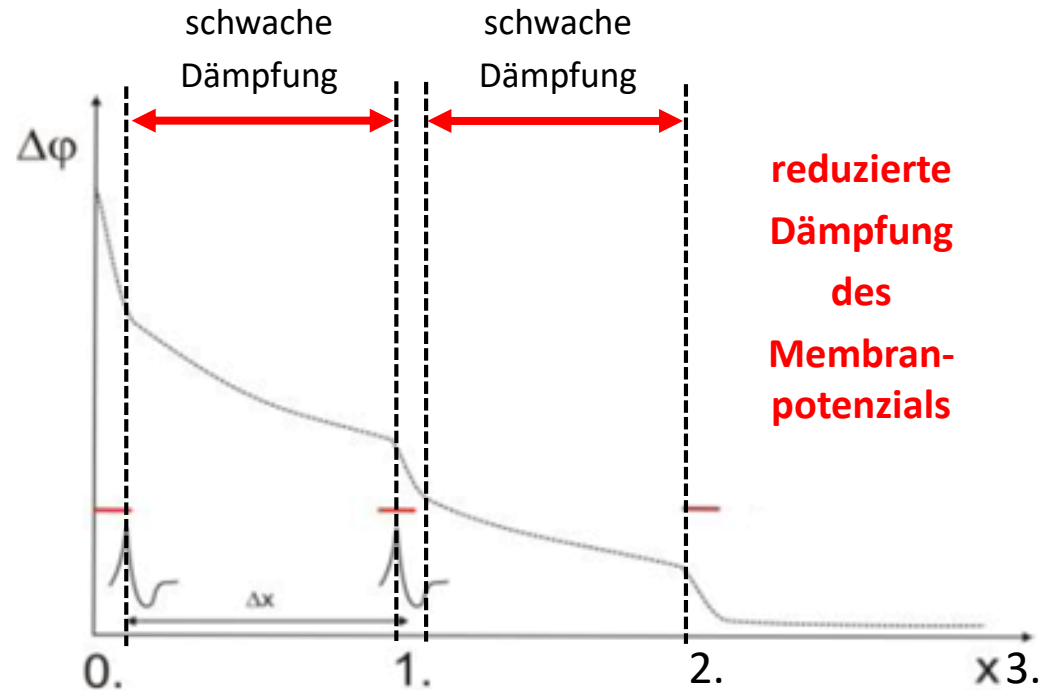
elektrisches Modell der Membran



$$\lambda \sim \sqrt{\frac{R_m}{R_i}}$$

R_m : Widerstand der Membran
in Querrichtung

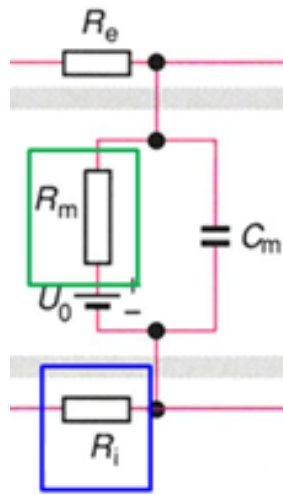
R_i : Widerstand des intrazellulären Raums



R_m ist groß: hohe Raumkonstante λ : Myelinscheide

R_i ist klein: hohe Raumkonstante λ : große Querschnittsfläche der schnell leitenden Nerven

Ausbreitung des Aktionspotenzials #3



$$\lambda \sim \sqrt{\frac{R_m}{R_i}}$$

$$R_i = \rho \frac{l}{A}$$

ρ : spezifischer Widerstand

l : Länge des Leiters

A : Querschnittsfläche des Nerves

Axonevon der Haut ...von Muskeln	C IV	A delta III	A beta II	A alpha I
Durchmesser	0,2-1,5 μm	1-5 μm	6-12 μm	13-20 μm
Leitungs- geschwindig- keit	0,5-2 m/s	5-30 m/s	35-75 m/s	80-120 m/s
Rezeptoren	Schmerz Temperatur		Haut- Mechanos.	Propriozeption Skelettmuskel

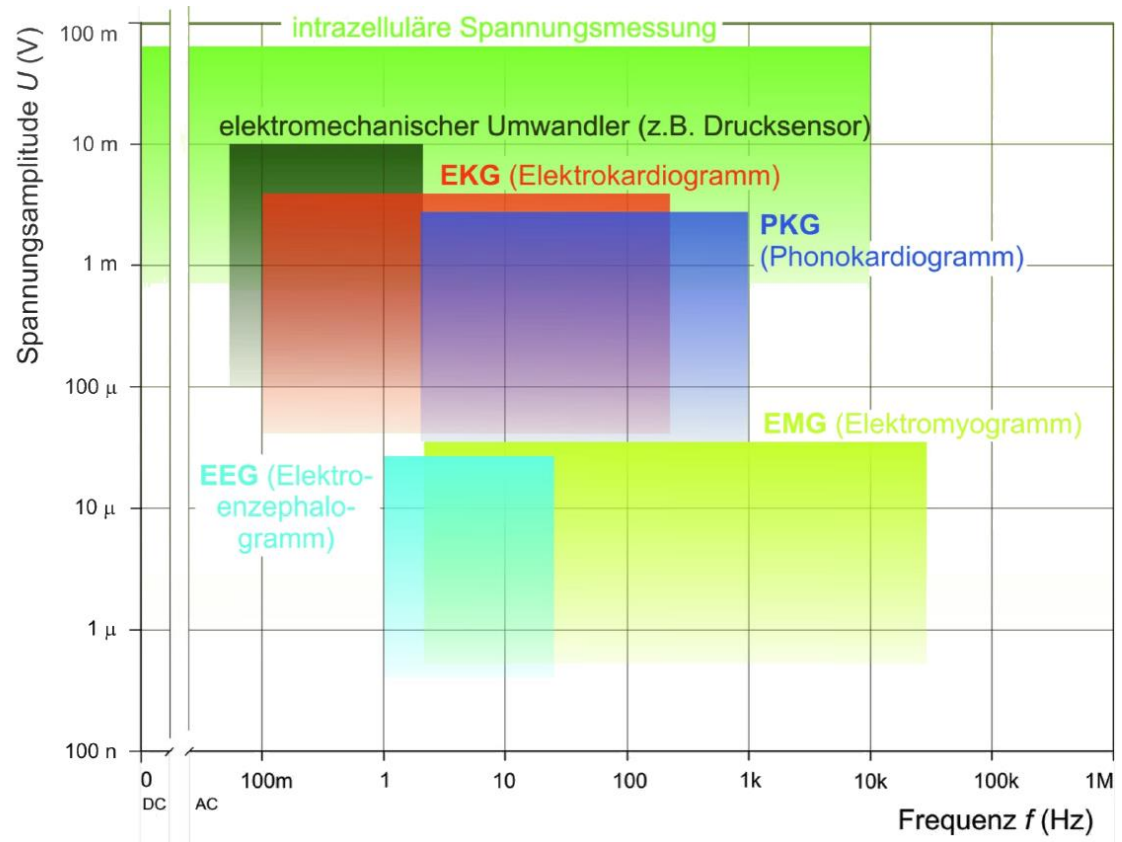
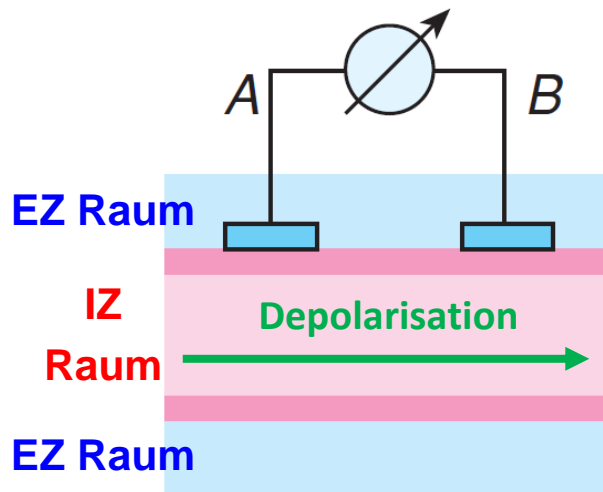
große Querschnitt: schnelle Leitung

Medizinische Anwendungen

Elektrische Signale auf der Körperoberfläche (Diagnostik)

- Elektrokardiographie (EKG)
- Elektroenzephalografie (EEG)
- Elektromyographie (EMG)
- Elektrokulographie (EOG)
- Elektroretinographie (ERG)

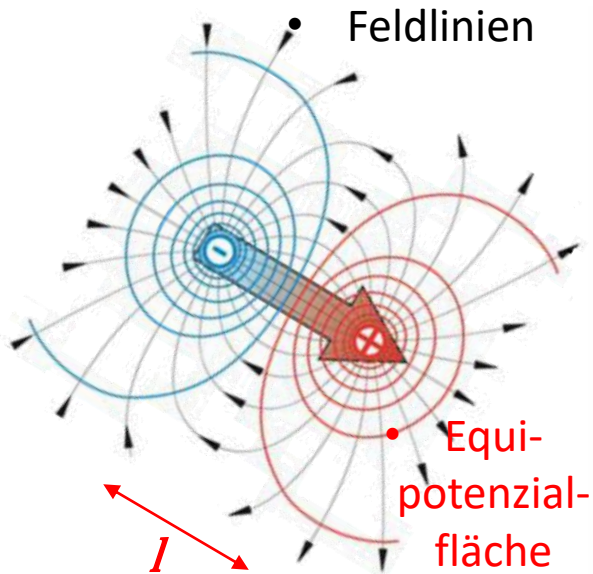
Messmethode:
Spannungsmessung mit
Oberflächenelektroden.



- die Oberflächenelektroden messen das Potenzial des EZ Raums

EKG #1

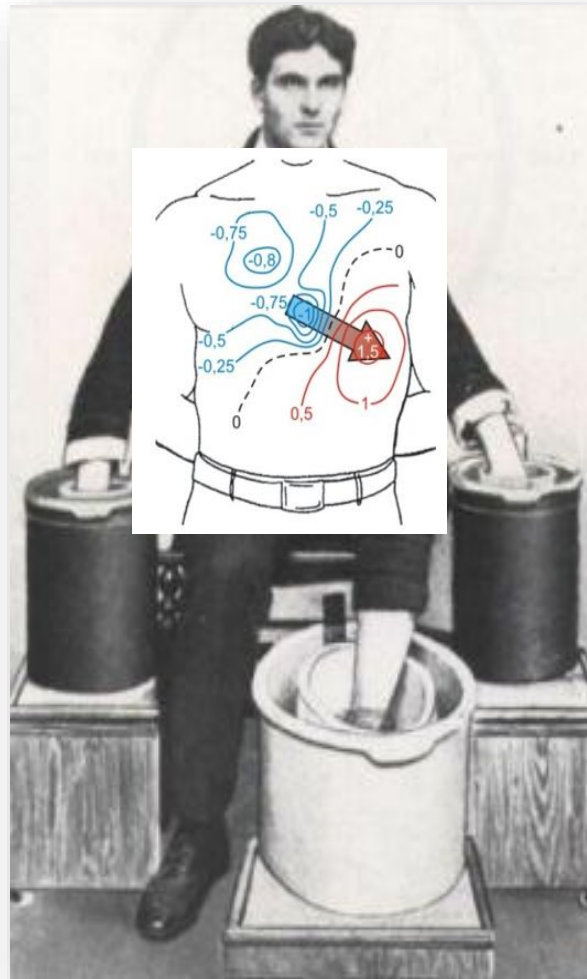
Das Ladungsfeld des Herzens: **Dipolfeld**



Dipolmoment: d

$$d = Q \cdot l$$

Der Herzdipol ändert seine Richtung und Größe nach dem Erregungszustand des Herzens (quasi-) periodisch.



Elektroden:

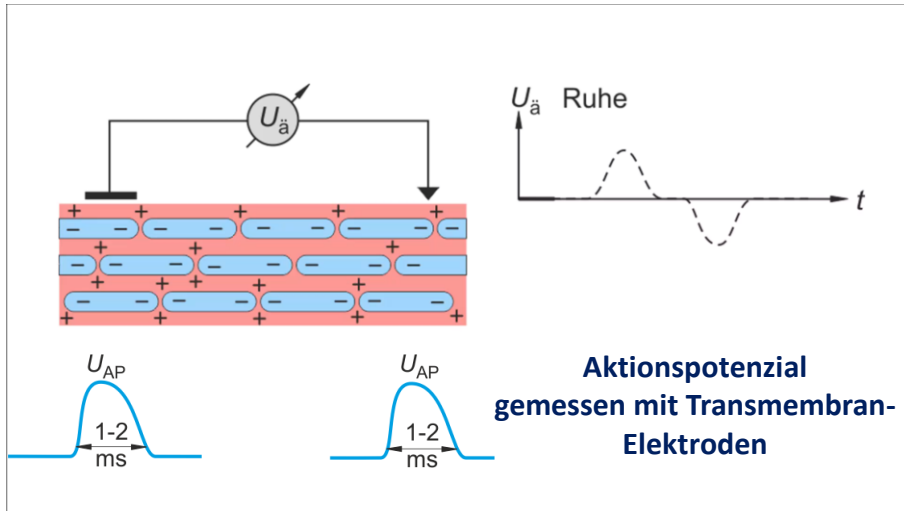
- **differente:** Potenzial ändert sich mit dem Herzzyklus.
- **indifferente:** Elektrode mit einem konstanten Potenzial.

Ableitungen:

- **bipolare:** Spannung zwischen zwei differenten Elektroden.
 - Einthoven: I, II, III
- **unipolare:** Spannung zwischen einer differenten und einer indifferenten Elektrode.
 - Wilson: V1, V2, V3, V4, V5, V6
 - (Goldberger: aVR, aVL, aVF)

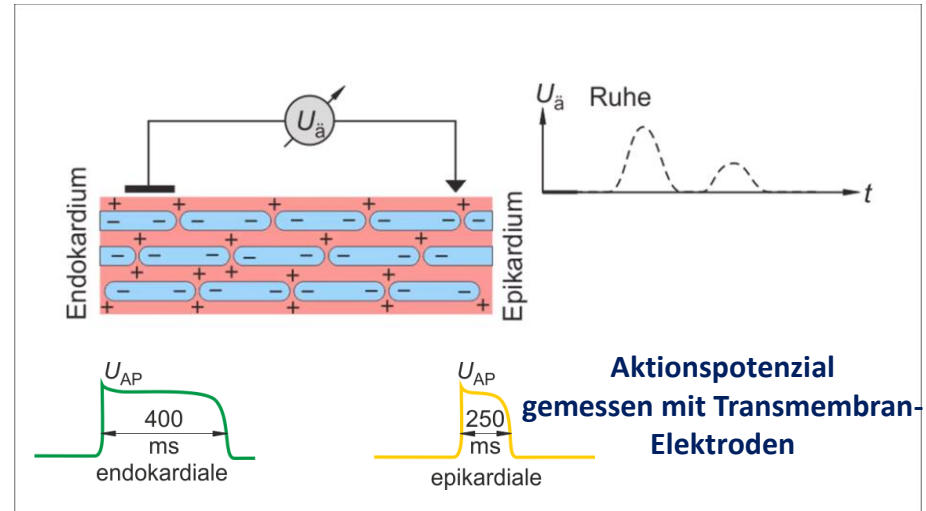
EKG #2

SKELETTMUSKEL (Videoanimation)



- **Skelettmuskelzellen:** kurze, aber gleich lange Aktionspotenziale (1-2 ms): positiven Depolarisationsfront und negative Repolarisationsfront.
- **dipolare Potenzialänderung gemessen mit Oberflächen Elektroden**

HERZKAMMERMUSKEL (Videoanimation)

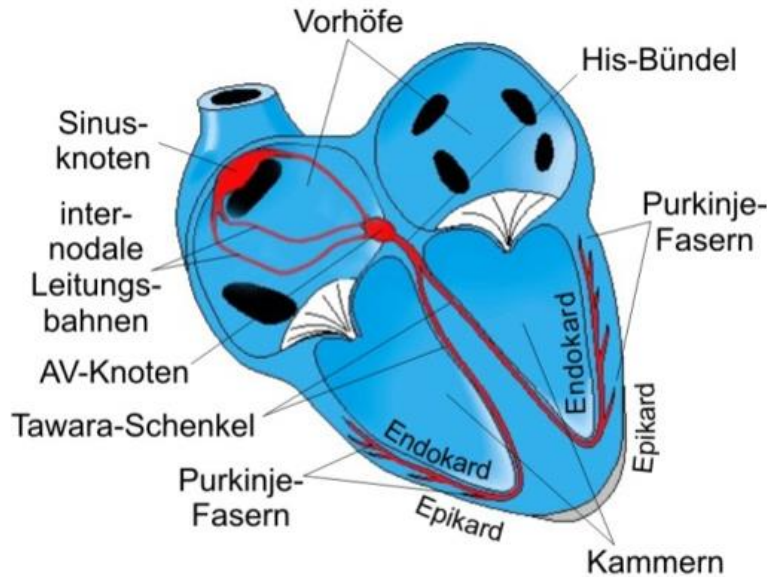


- **Herzkammernuskelzellen:** ein vom Endokard zum Perikard hin immer kürzer werdendes Aktionspotenzial (400-250 ms). Vom Endokard zum Epikard hin: positiver Depolarisationsfront und positive Repolarisationsfront.
- **monopolare Potenzialänderung gemessen mit Oberflächen Elektroden**

EKG #3

Erregungsbildung und Erregungsleitung

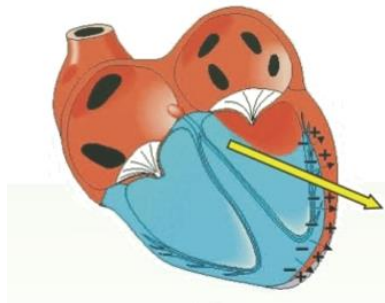
Die Standardableitungen nach Einthoven (I, II, III)



Ruhe

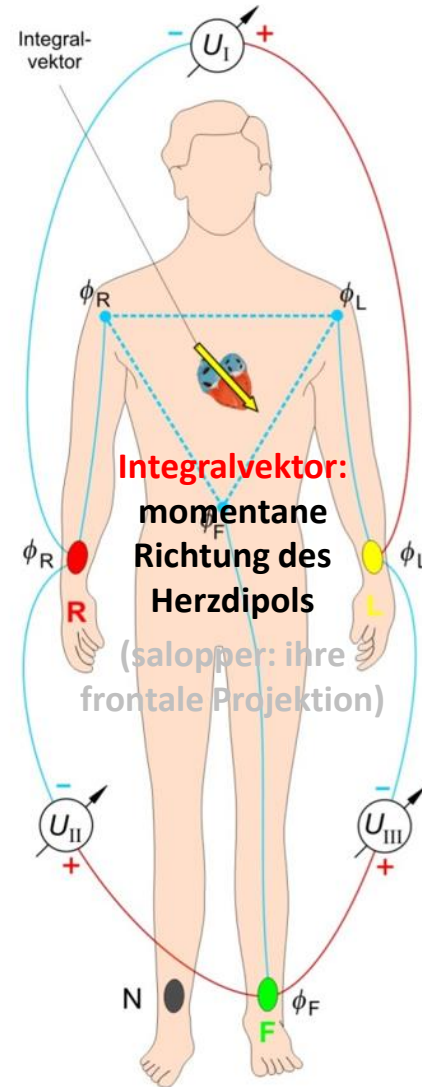


linke Kammer
Depolarisation



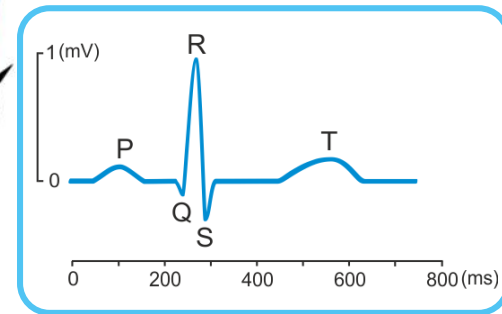
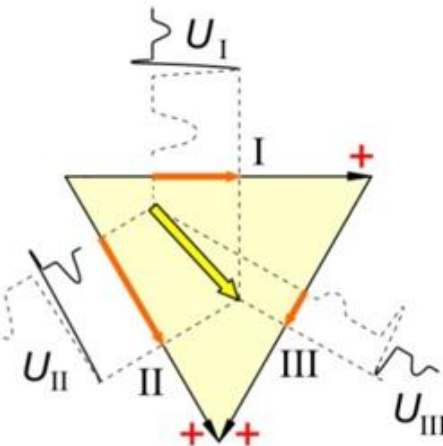
Die Farben repräsentieren das Potenzial (die Ladung) des EC-Raums.

rot: EC positiv (IC negativ), blau: EC negativ (IC positiv)



- bipolar
- frontal

Einthoven-Dreieck



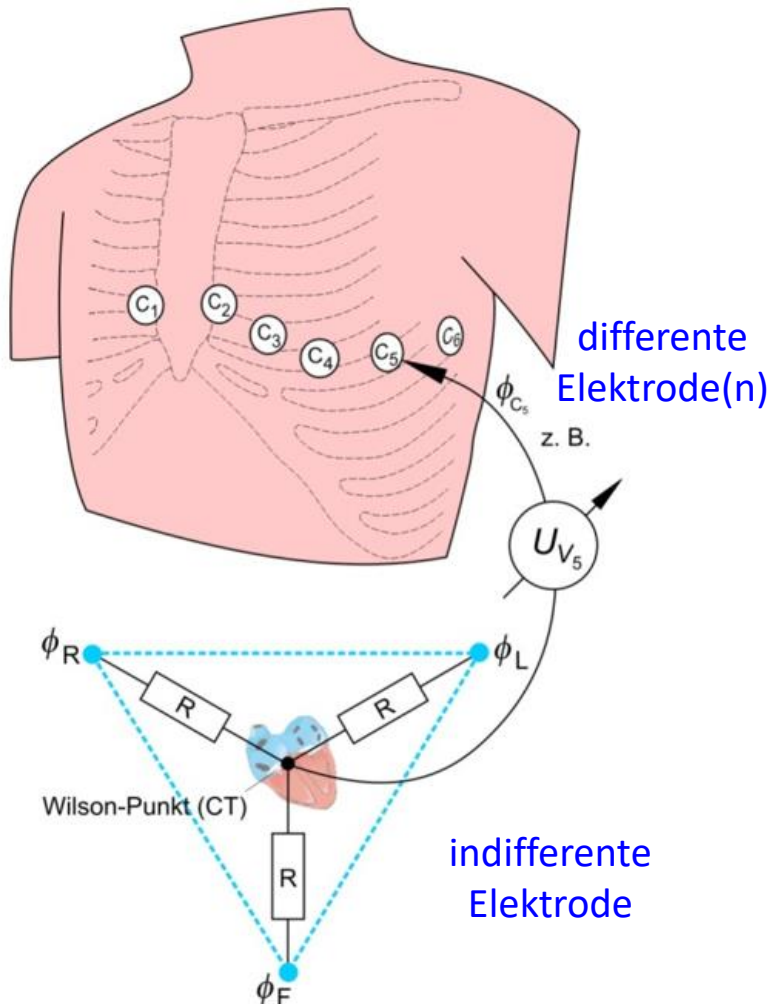
typische EKG-Kurve

Farbkodierung: **RA, LA, LF, RF**

EKG #4

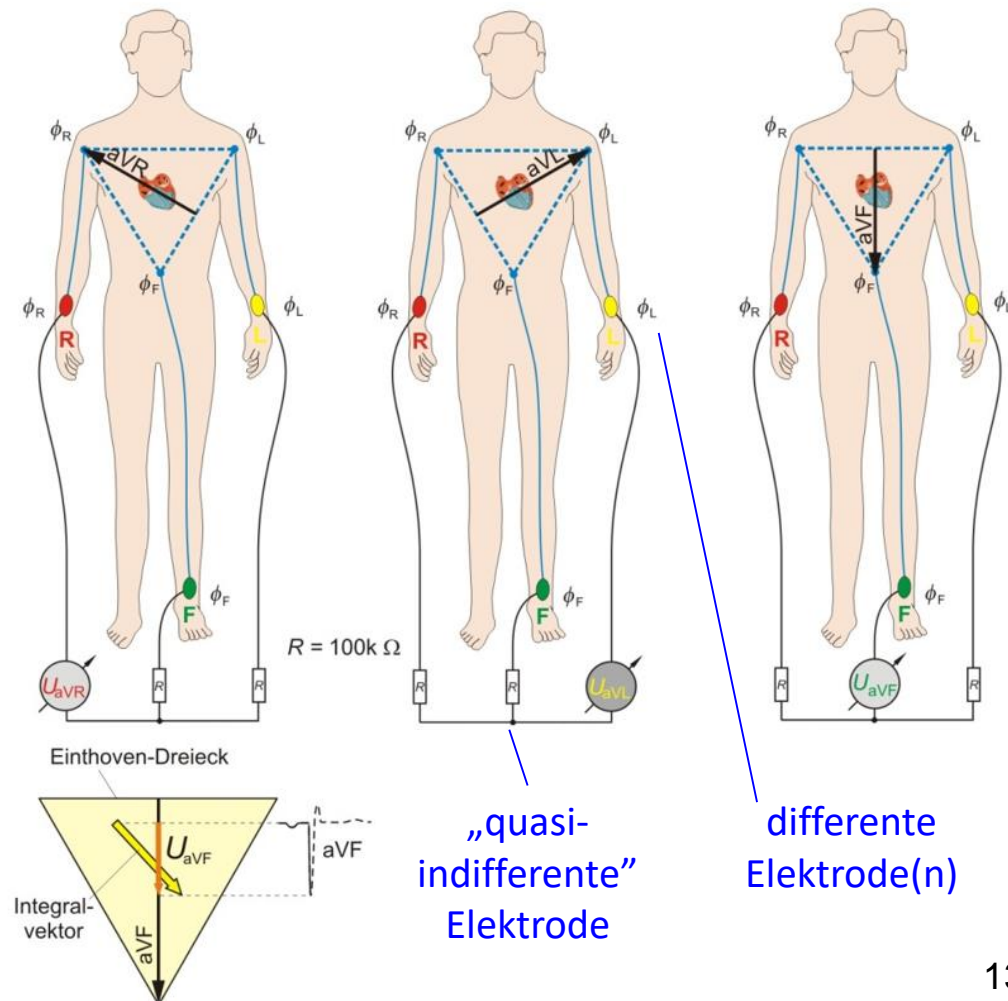
Ableitungen nach Wilson (V1-6)

- unipolar
- horizontal



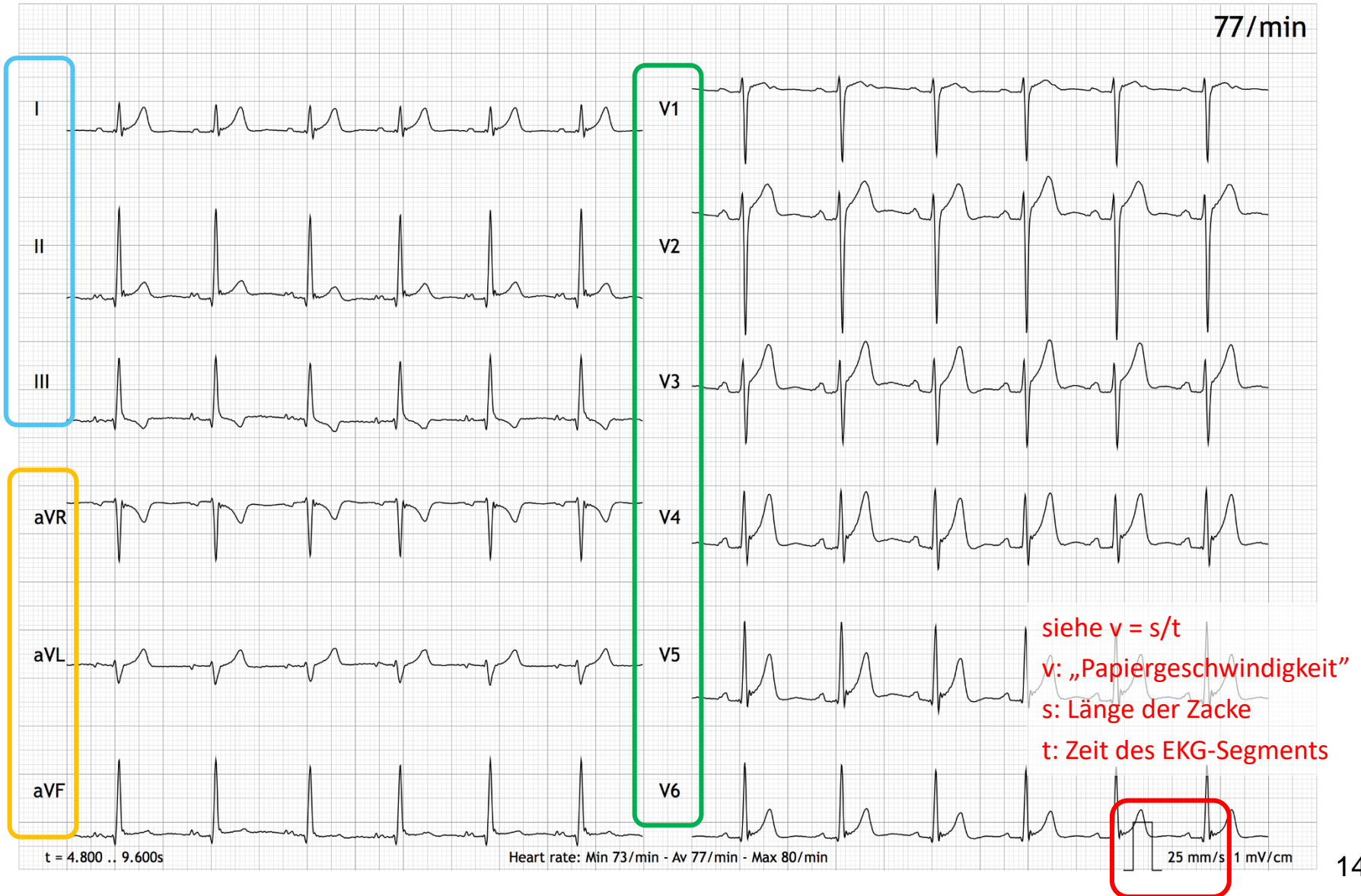
Ableitungen nach Goldberger (aVR, aVL, aVF)

- „quasi-unipolar“
- frontal (30° gedreht vgl. Einthoven)



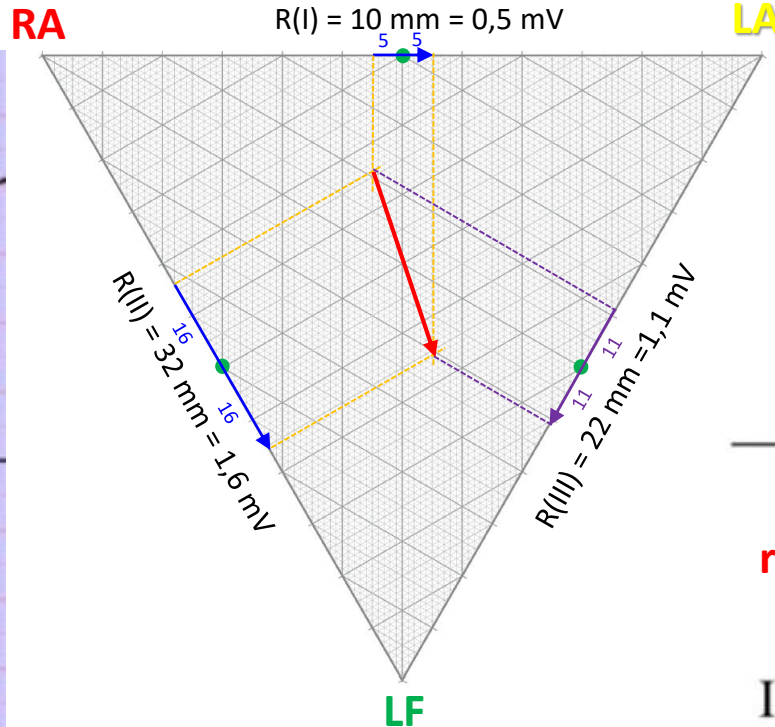
EKG #5

Standard 12-Kanal EKG-Aufnahme

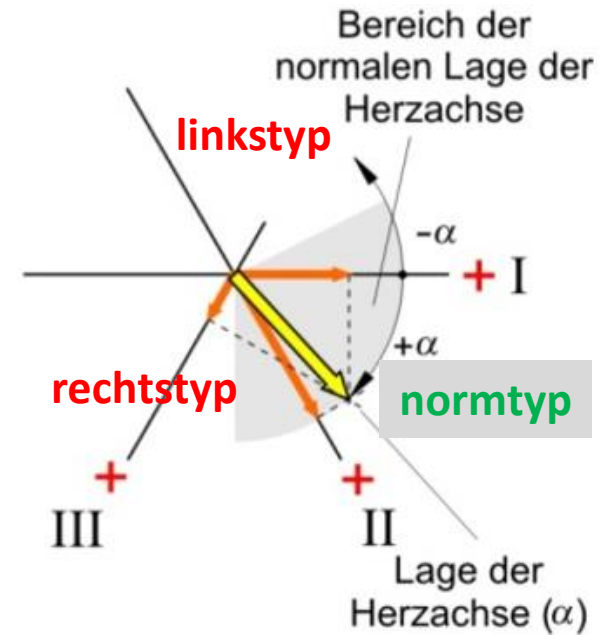


EKG #6

Bestimmung und Beurteilung der Herzachse



Verschiebung der Seiten des Einthoven-Dreiecks



Einthovensche
Summeregeln:

$$U_{II} = U_I + U_{III}$$

$R_{II} > R_I > R_{III}$: normtyp

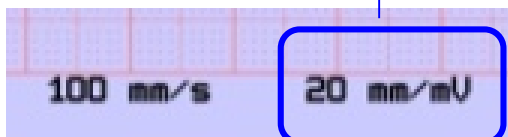
$R_{II} > R_{III} > R_I$: normtyp („steiltyp“)

$R_{III} > R_{II} > R_I$: rechtstyp

$R_I > R_{II} > R_{III}$: linkstyp

- Kalibrationszeichen (1 mV)

- Spannung = vertikaler Abstand * vertikale Empfindlichkeit



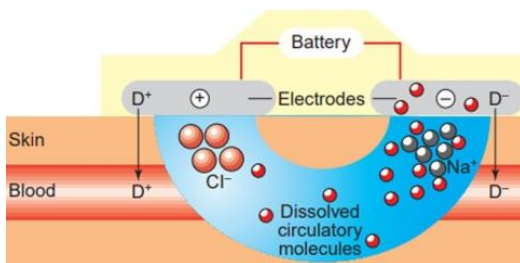
Elektrische Reizung (Therapie)

Galvanische Therapie



- $I \sim \text{mA}$, $t \sim 10 \text{ Min}$
- Verbesserung der Kreislauf und Stoffwechsel

Iontophorese



- $I \sim \text{mA}$, $t \sim 10 \text{ Min}$
- geladene Substanz durch die Dermis ins Blut
- die Polarität der Elektrode sollte mit der Ladung der Substanz übereinstimmen

Reizstromtherapie

Amplitude

(a)
(mA)
LOG

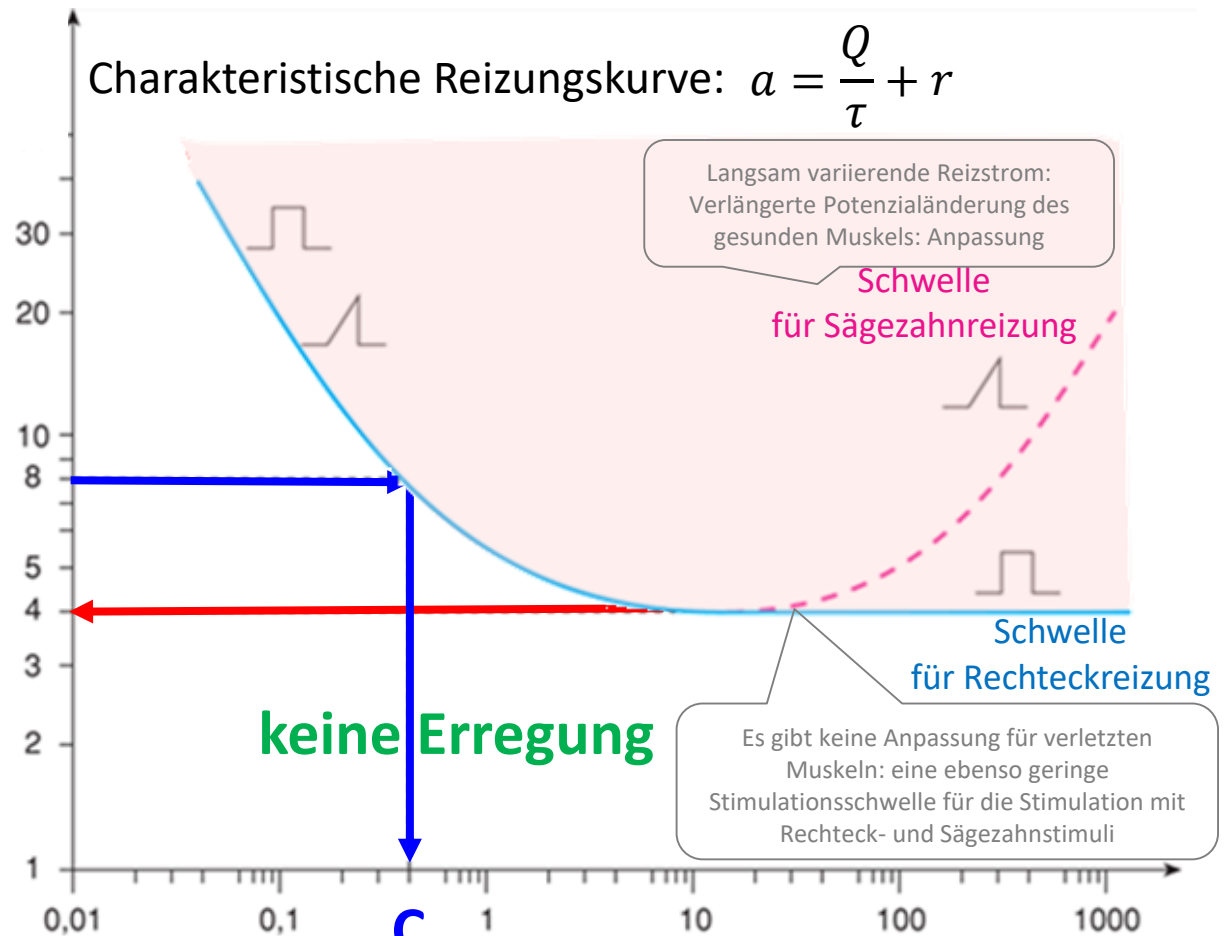
Charakteristische Reizungskurve: $a = \frac{Q}{\tau} + r$

$2r$

r

keine Erregung

C



$t \text{ (ms) LOG}$

- **Rheobase (r):** minimaler elektrischer Strom, der Muskelkontraktion hervorruft
- **Chronaxie (C):** Zeit notwendig zur doppelten Rheobase

Hausaufgaben

Aufgabensammlung

11.67 - 11.70

Feedback