

Erregungsprozesse. Aktionspotenzial.

Elektrische Methoden in der Medizin.

- Geknüpfte Praktika: EKG
- Geknüpfte Buchkapitel: III/4. *LB: S. 285-290.* VII/2. *LB: S. 465-472.*

Balázs Kiss

kissb3@gmail.com



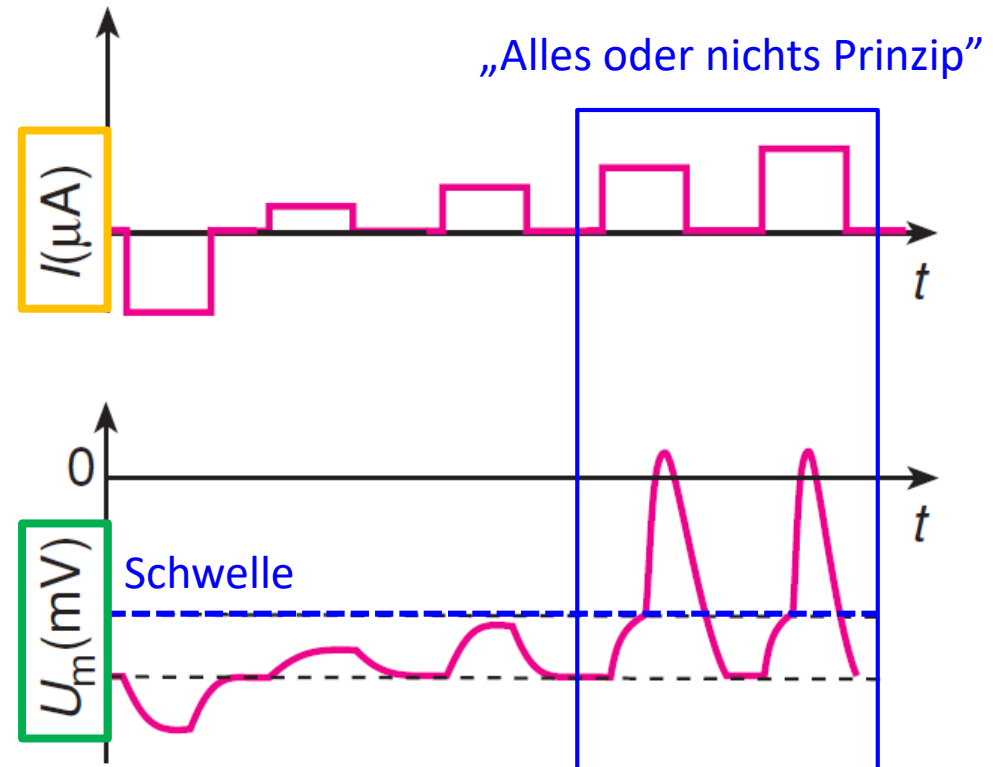
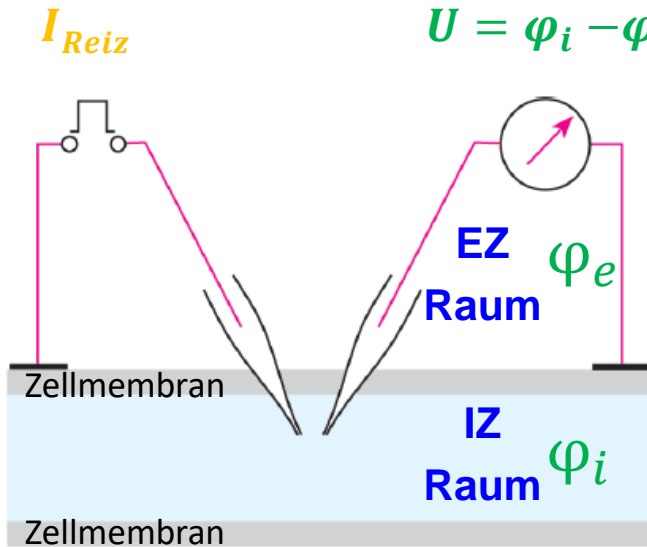
**Nanobiotechnologie und Einzelmolekül-Forschungsgruppe und
Myofilament-Mechanobiophysik Forschungsgruppe,
Semmelweis Universität,
Institut für Biophysik und Strahlenbiologie.**

21. März 2023

Aktionspotenzial #1

stimulierende
Elektroden

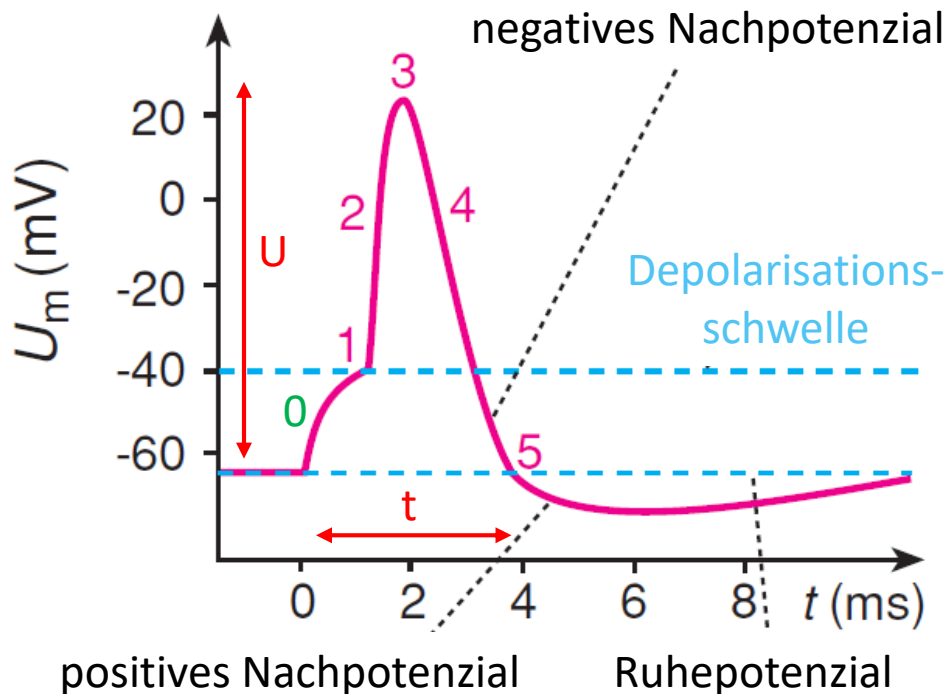
registrierende
Elektroden



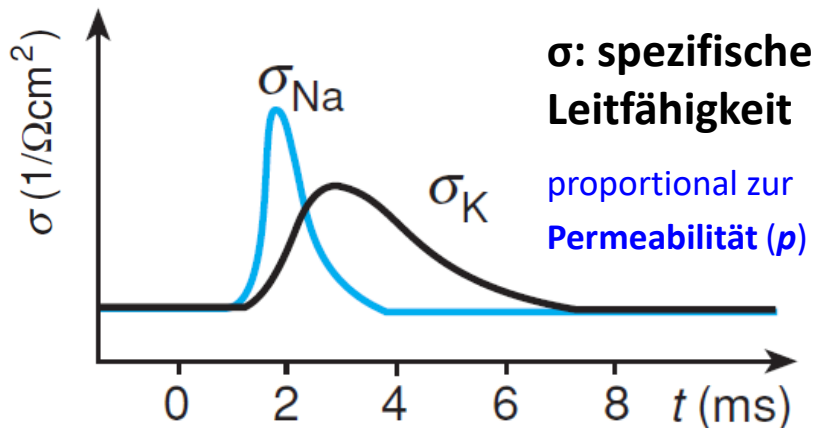
unter einem Schwellenwert: Größe der Antwortsignale ist proportional zur Stromstärke

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)

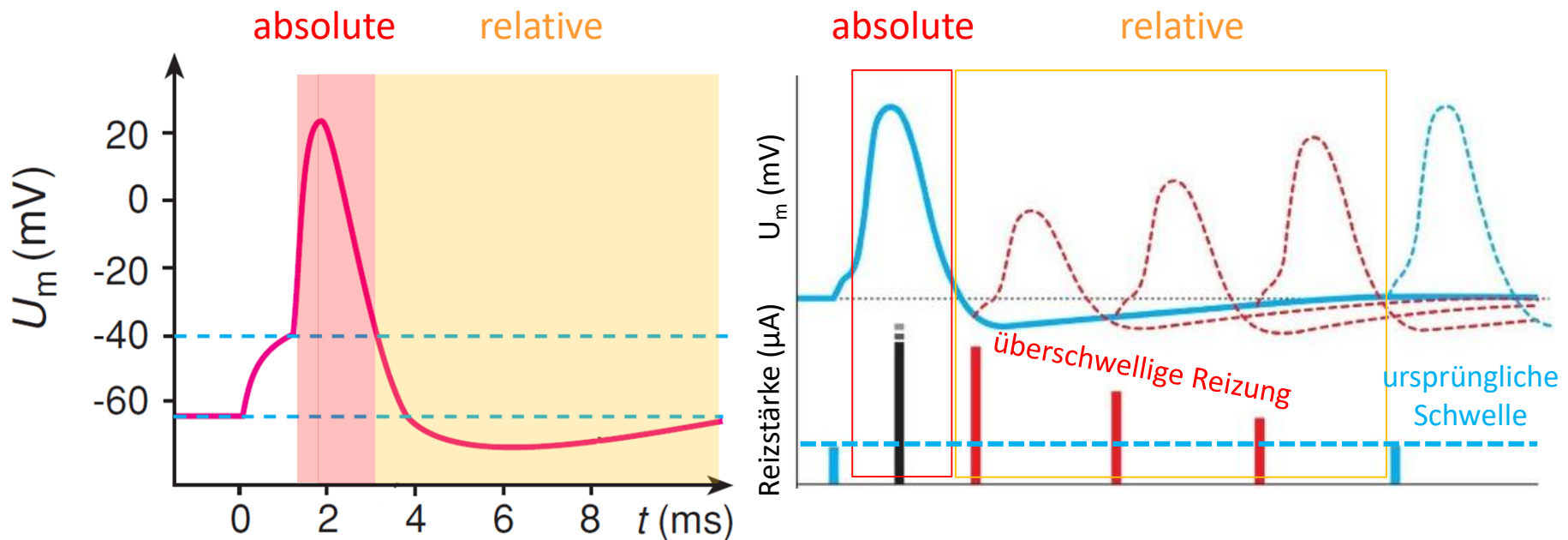


- **$U \sim 100 \text{ mV}$**
- **$t \sim 1-5 \text{ ms}$**
- (Skelettmuskel und Neuron)**

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.

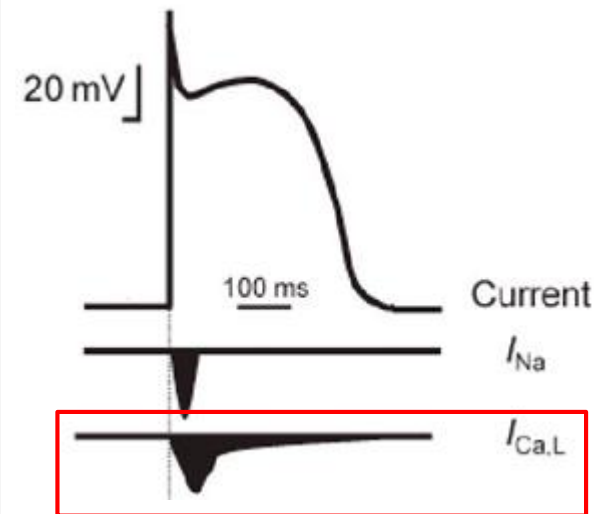
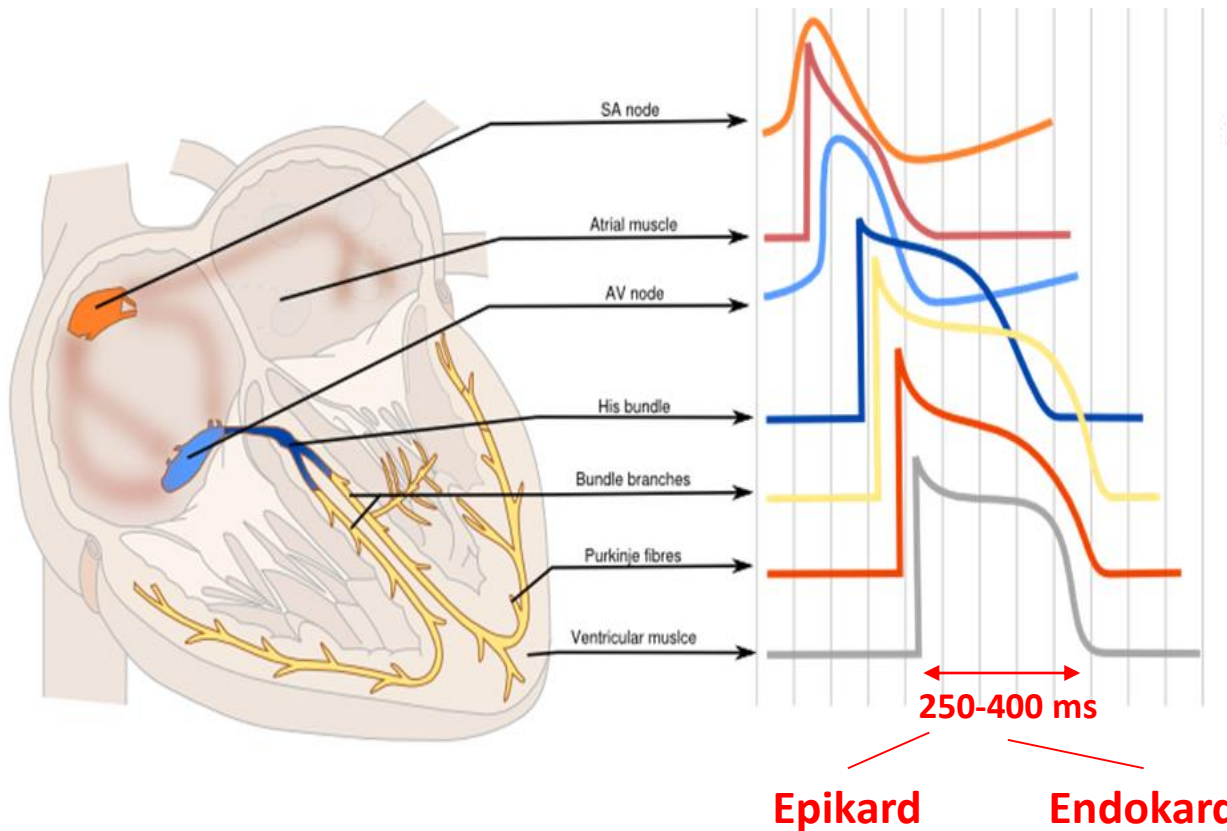
- **relative:** AP geht nur mit überschwelliger Reiz

Wiederöffnung der geschlossenen spannungsgesteuerten Na^+ -Kanäle.

**verhindert
die rückwärtige
Ausbreitung
des Aktionspotenzials**

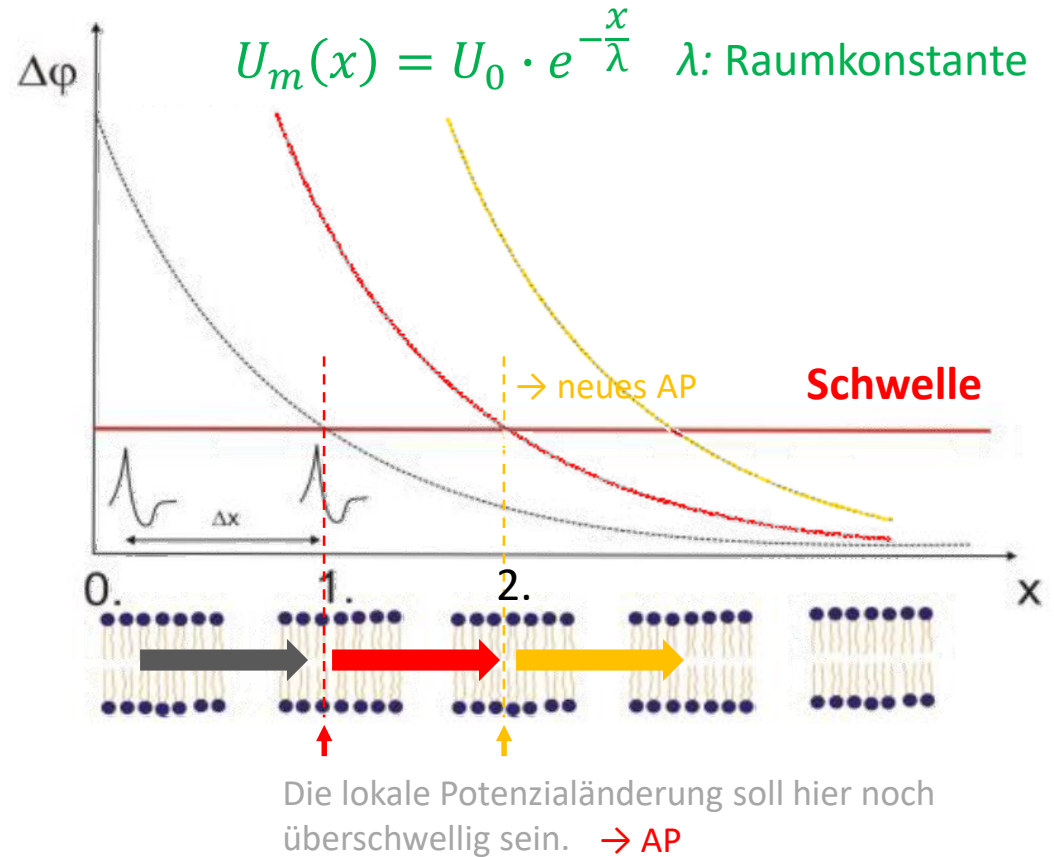
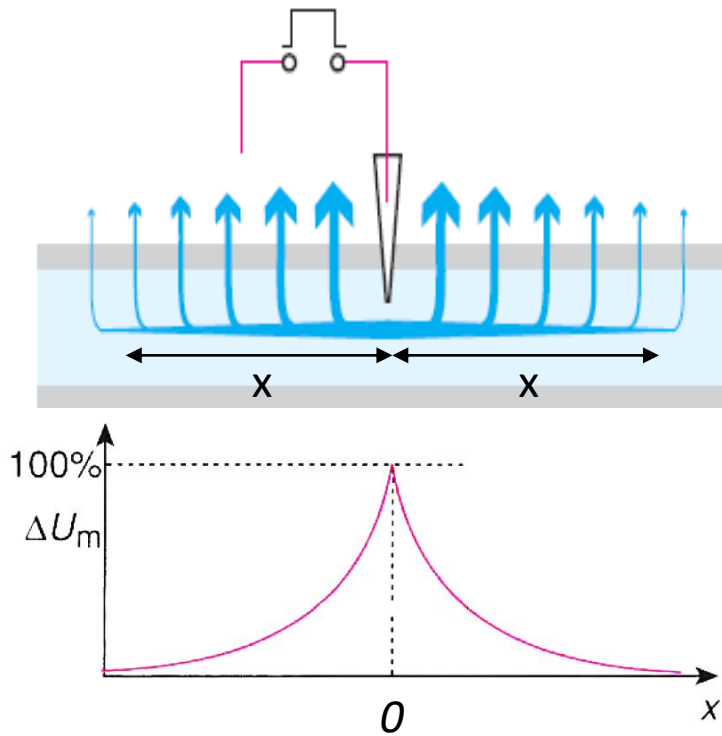
Eigenschaften des Aktionspotenzials #2

Spezielles Aktionspotenzial: Herzkammer-Muskelzellen



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

Ausbreitung des Aktionspotenzials #1

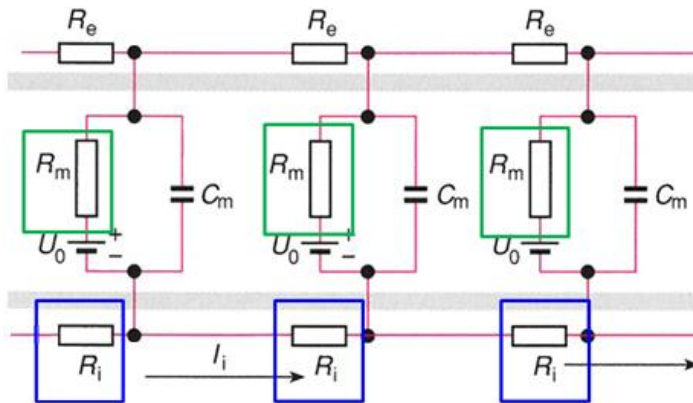


Eigenschaften:

- 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

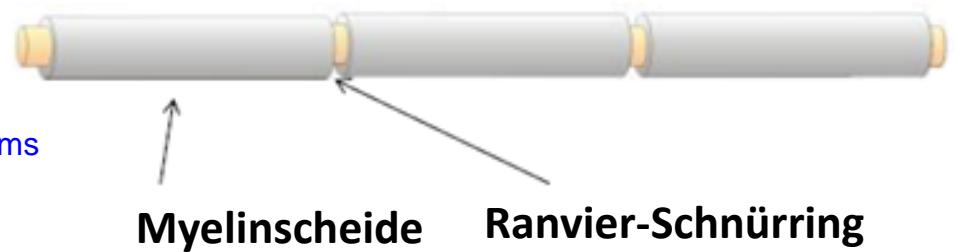
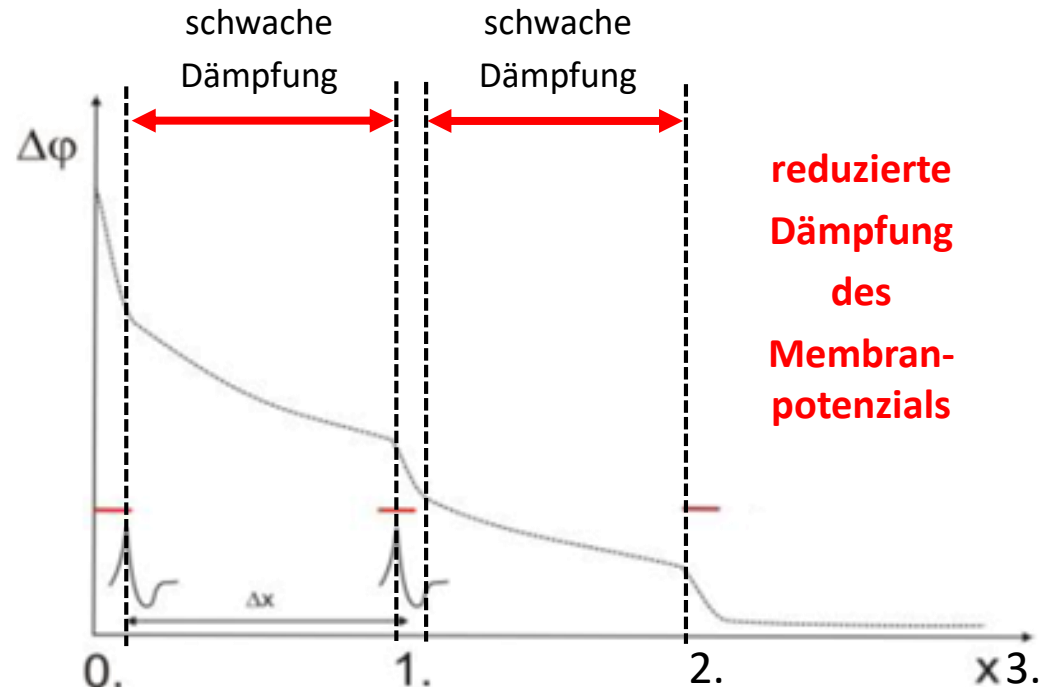
elektrisches Modell der Membran



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

R_m : Widerstand der Membran
in Querrichtung

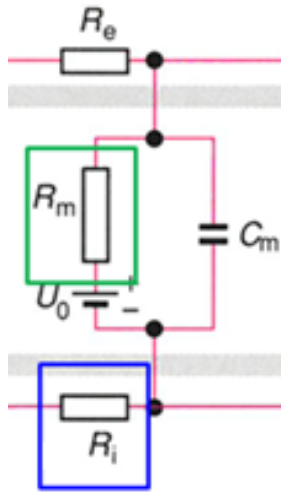
R_i : Widerstand des intrazellulären Raums



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






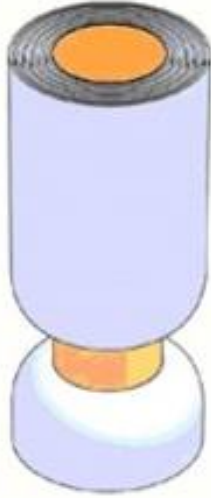
$$\lambda \sim \sqrt{\frac{R_m}{R_i}}$$

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

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

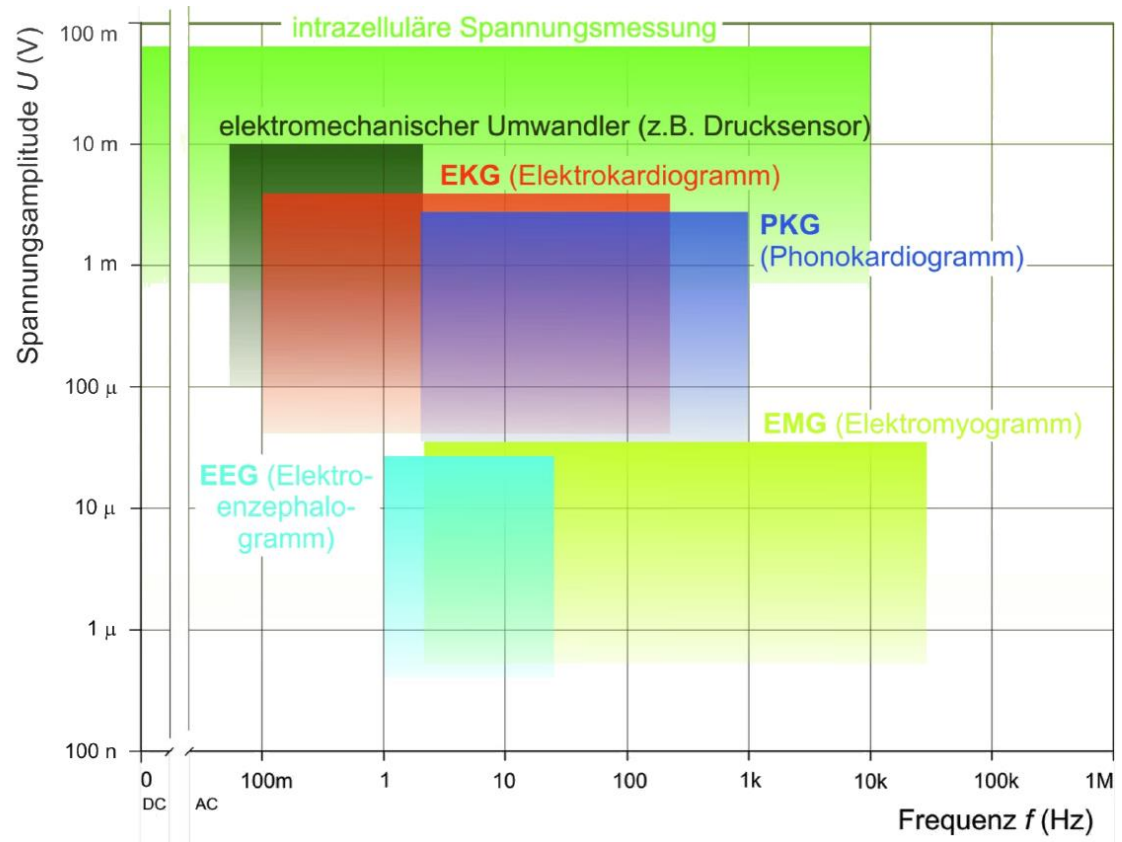
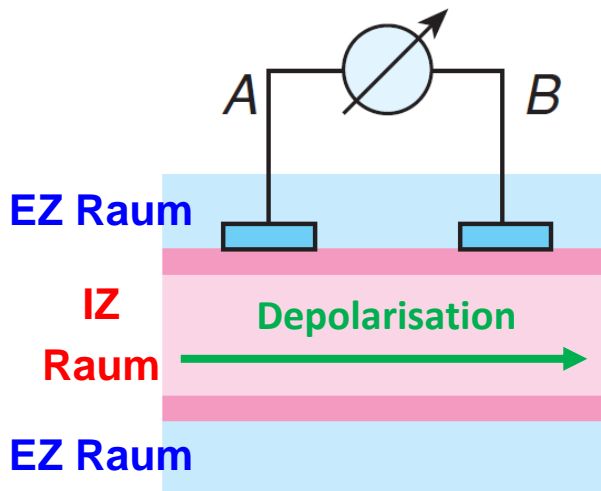
große Querschnitt: schnellere Leitung

Medizinische Anwendungen

Elektrische Signale auf der Körperoberfläche (Diagnostik)

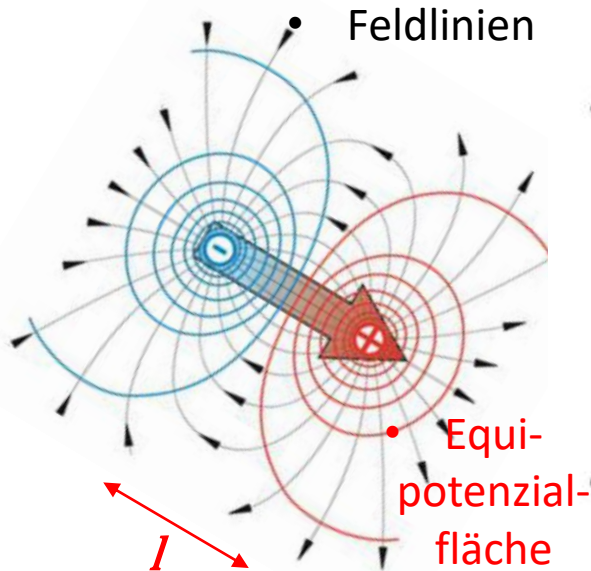
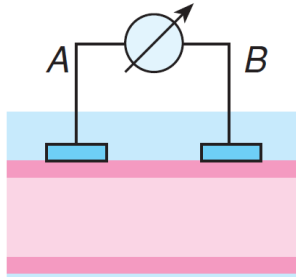
- Elektrokardiographie (EKG)
- Elektroenzephalografie (EEG)
- Elektromyographie (EMG)
- Elektrokulographie (EOG)
- Elektroretinographie (ERG)

Messmethode:
Spannungsmessung mit
Oberflächenelektroden.



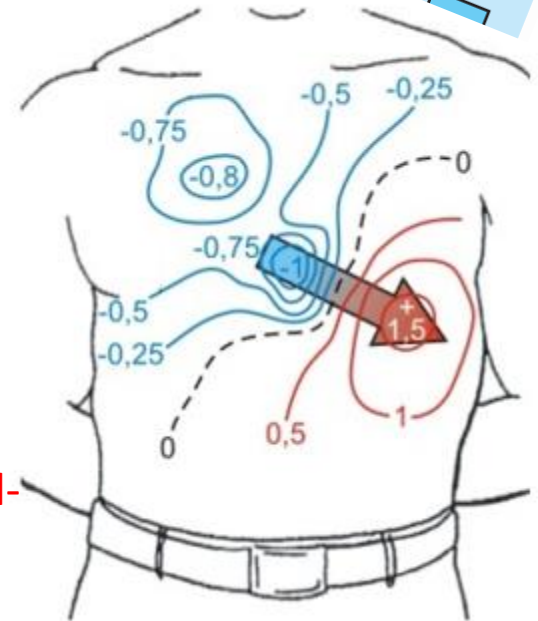
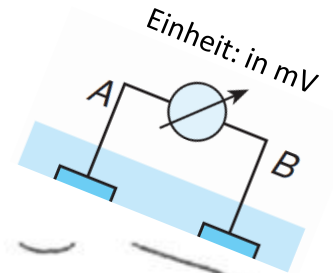
EKG #1

Das Ladungsfeld des Herzens: **Dipolfeld**



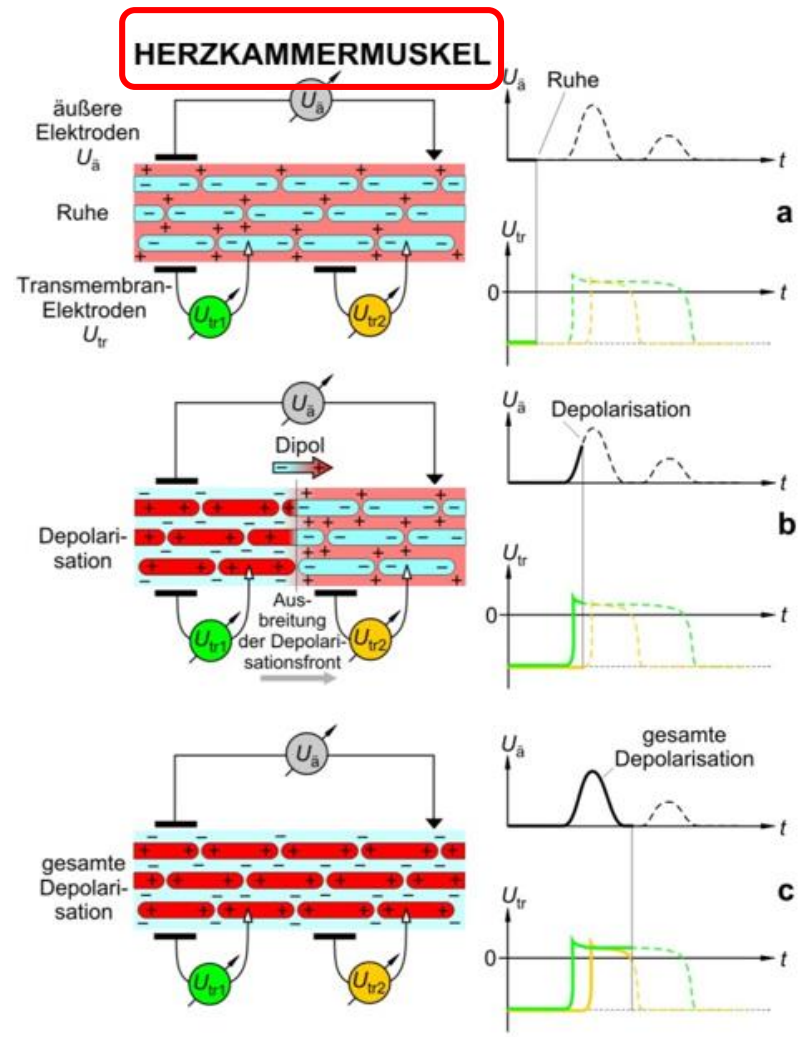
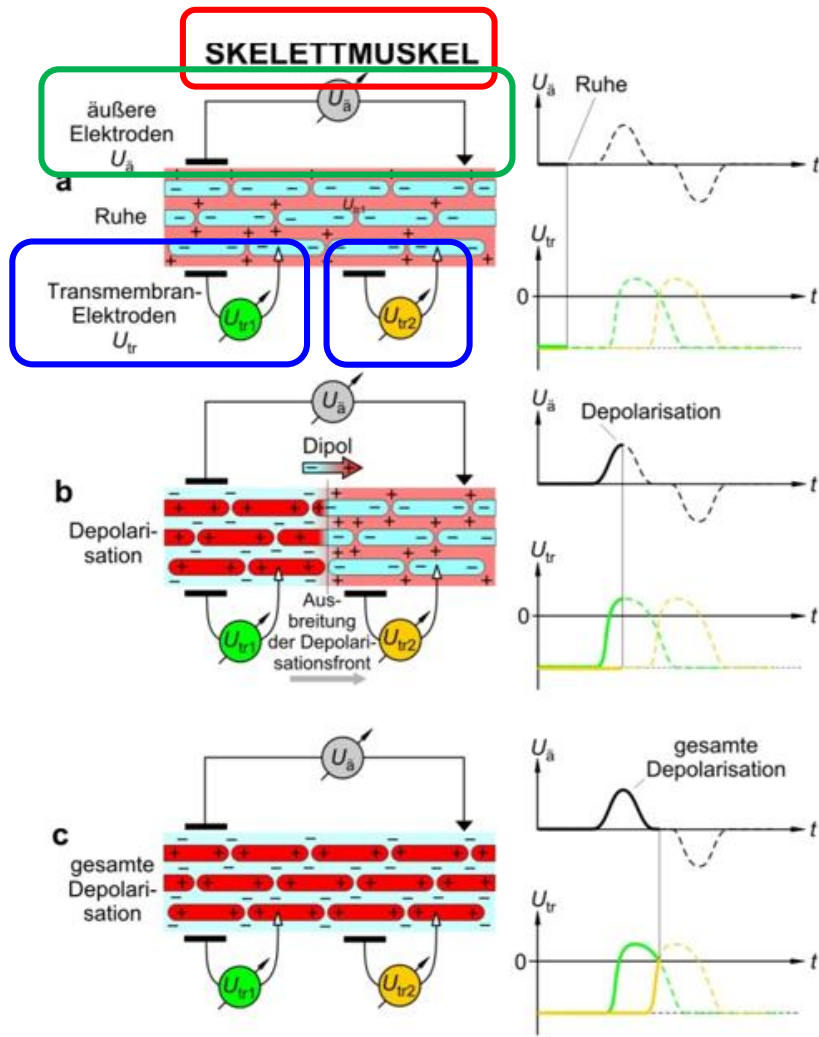
Dipolmoment: d

$$d = Q \cdot l$$



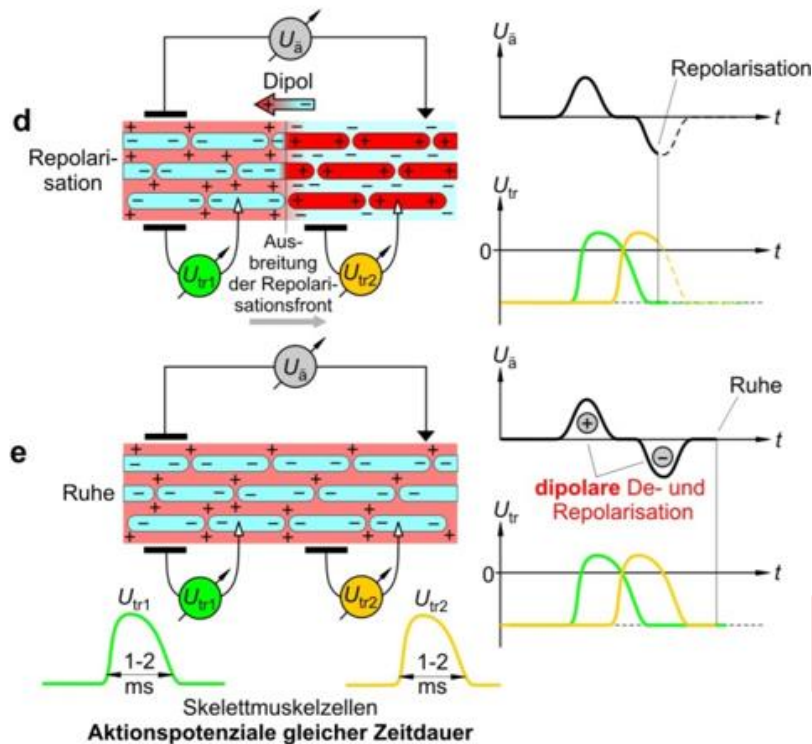
Der Herzdipol ändert seine Richtung und Größe nach dem Erregungszustand des Herzens (quasi-) periodisch.

EKG #2

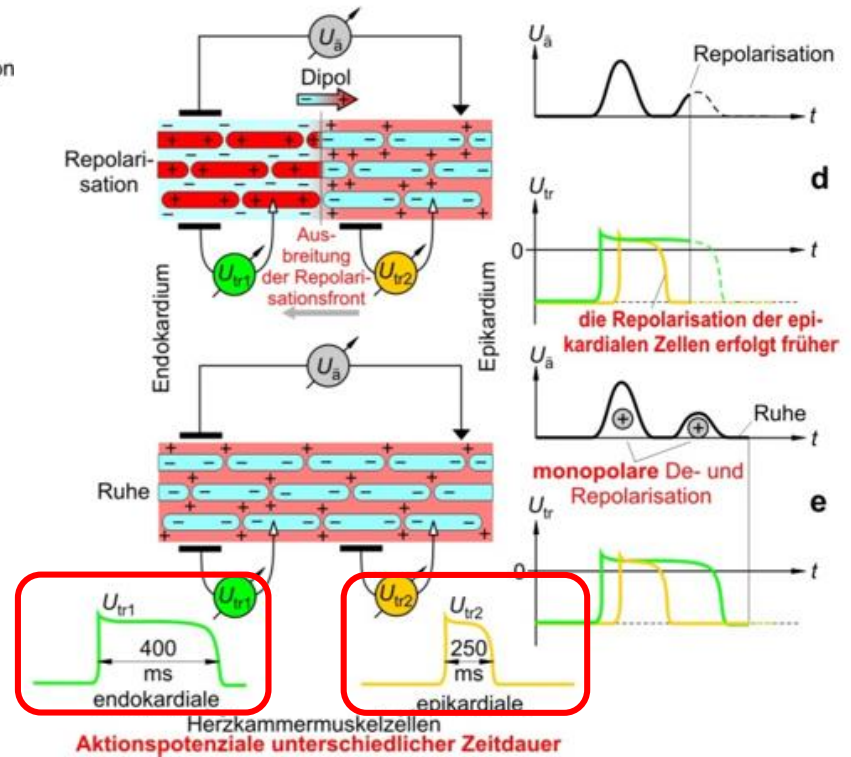


EKG #3

SKELETTMUSKEL



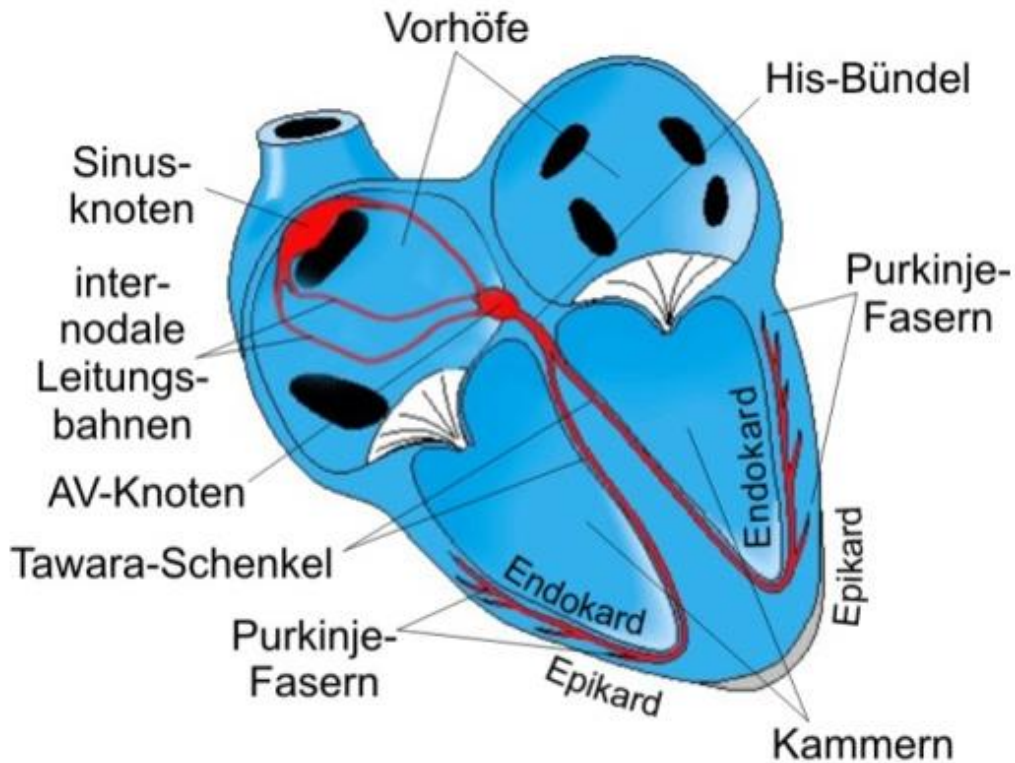
HERZKAMMERMUSKEL



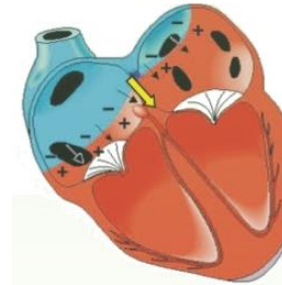
- **Skelettmuskelzellen:** kurze, aber gleich lange Aktionspotenziale (1-2 ms): positiven Depolarisationsfront und negative Repolarisationsfront (**dipolare Potenzialänderung gemessen mit Oberflächen Elektroden**).
- **Herzkammermuskelzellen:** ein vom Endokard zum Perikard hin immer kürzer werdendes Aktionspotenzial (400-250 ms). Vom Endokard zum Epikard hin: positiver Depolarisationsfront und positive Repolarisationsfront (**monopolare Potenzialänderung gemessen mit Oberflächen Elektroden**).

EKG #4

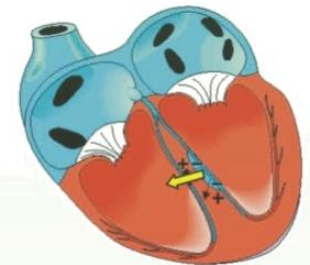
Erregungsbildung und Erregungsleitung im Herzen



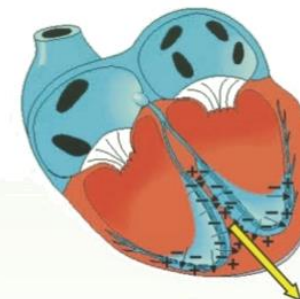
VORHOF-
DEPOLARISATION
80 ms



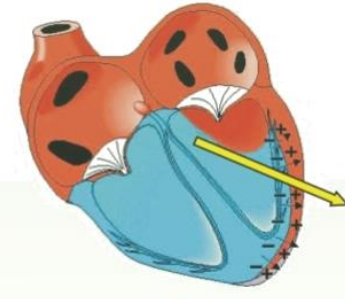
DEPOLARISATION
DES SEPTUMS
220 ms



APIKALE
DEPOLARISATION
230 ms



LINKE KAMMER
DEPOLARISATION
240 ms



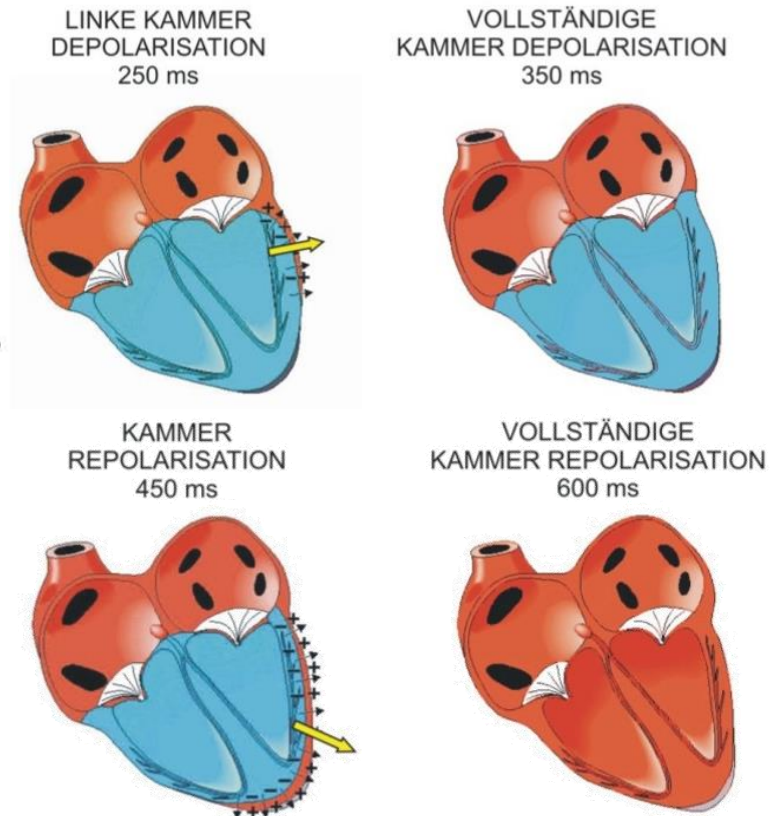
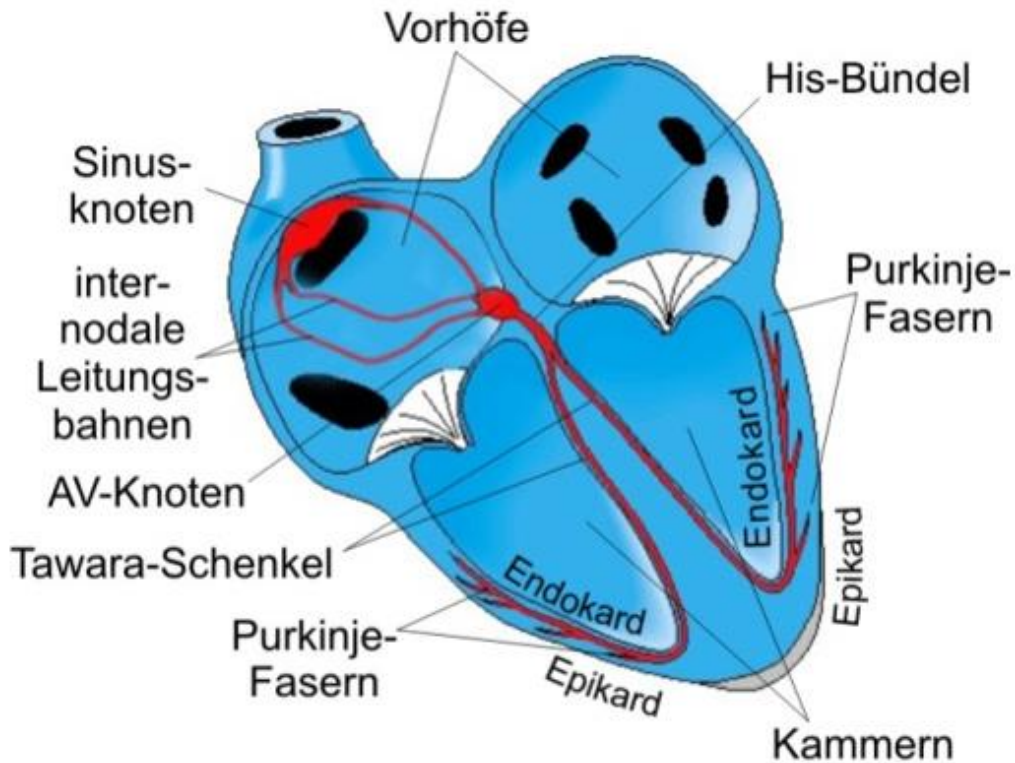
Die Farben repräsentieren das Potenzial (die Ladung) des EC-Raums.

rot: EC positiv (IC negativ)

blau: EC negativ (IC positiv)

EKG #5

Erregungsbildung und Erregungsleitung im Herzen



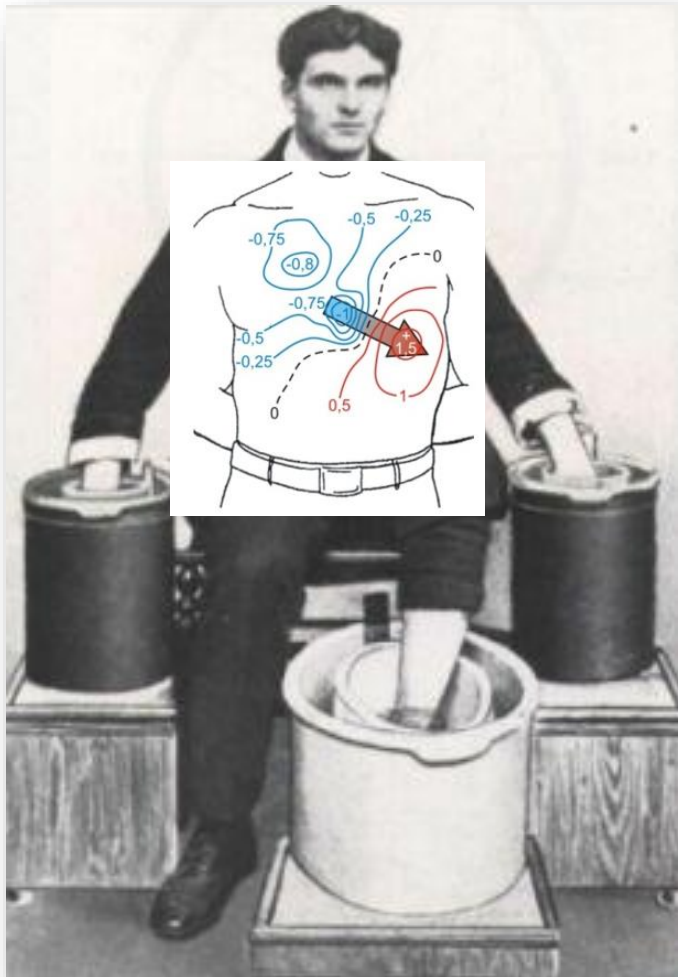
Die Farben repräsentieren das Potenzial (die Ladung) des EC-Raums.

rot: EC positiv (IC negativ)

blau: EC negativ (IC positiv)

EKG #6

Elektroden, Ableitungen



Elektroden:

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

Ableitungen:

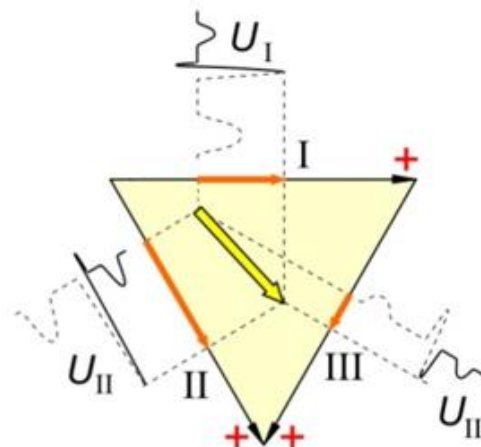
- **bipolare:** Spannung zwischen zwei differenten Elektroden.
 - Einthoven: I, II, III
- **unipolare:** Spannung zwischen einer differenten und einer indifferenten Elektrode.
 - Wilson: V1, V2, V3, V4, V5, V6
 - (Goldberger: aVR, aVL, aVF)

EKG #7

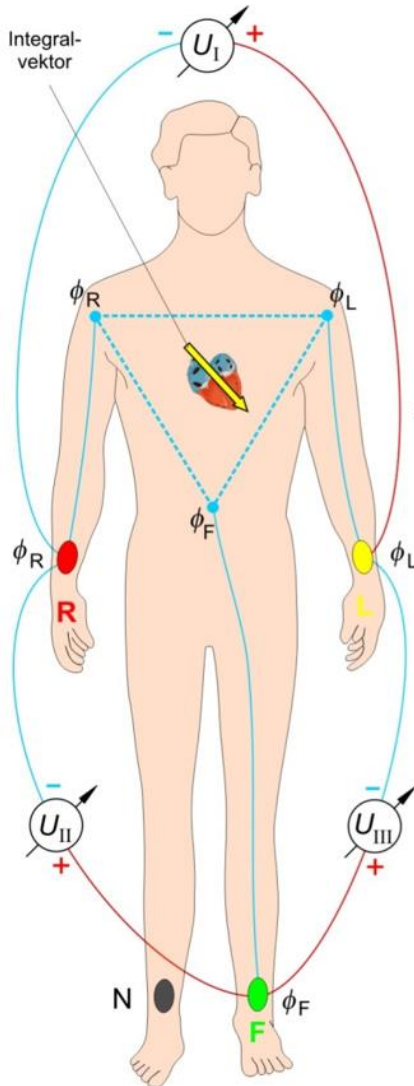
Die Standardableitungen nach Einthoven

- bipolar
- frontal

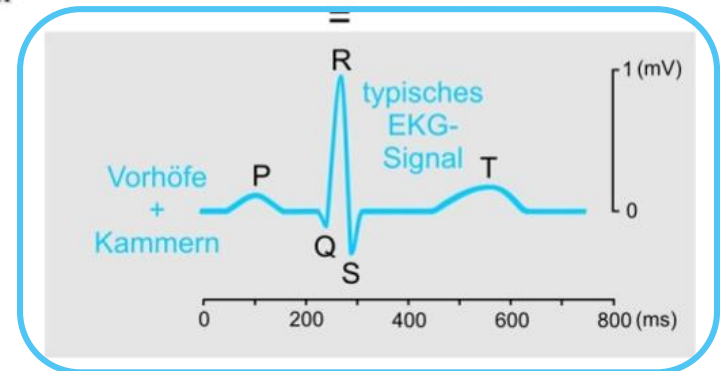
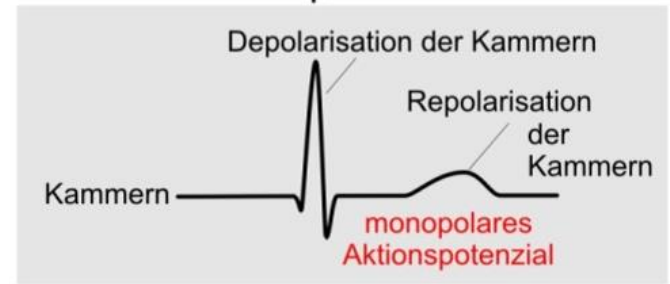
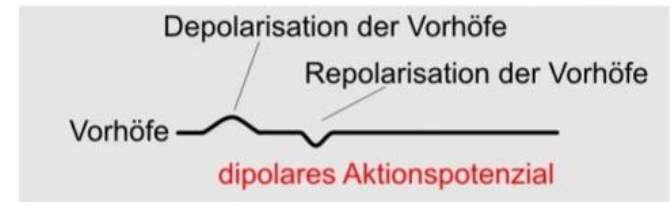
Einthoven-Dreieck



Integralvektor:
momentane Richtung
des Herzdipols
(salopper: ihre
frontale Projektion)



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

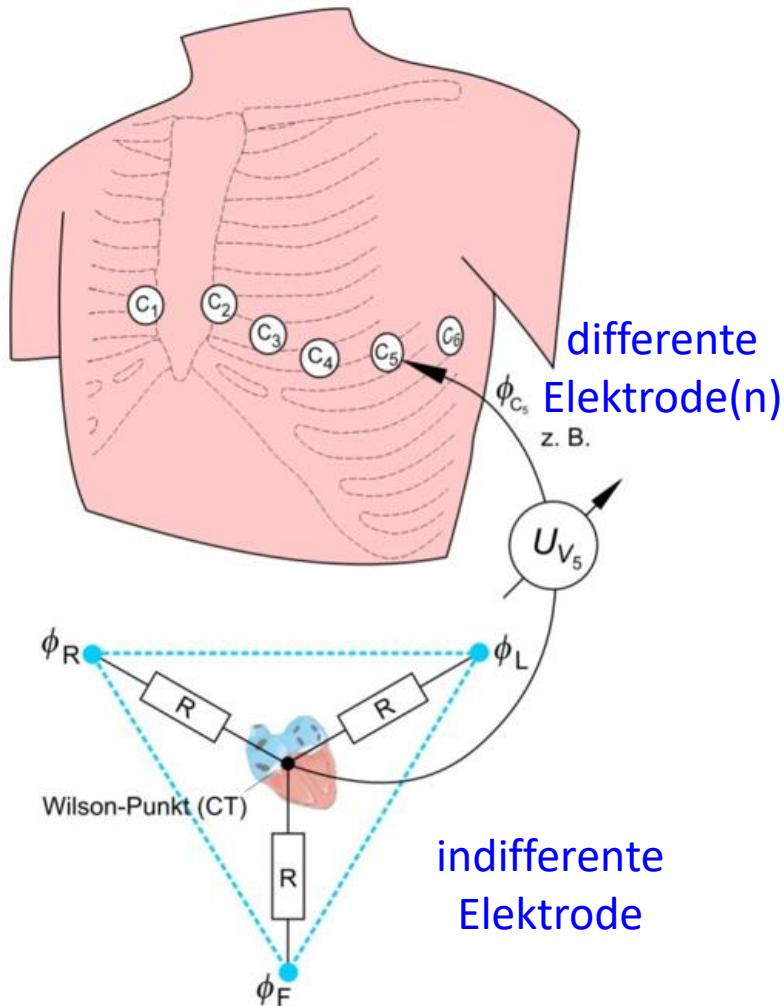


typische EKG-Kurve

EKG #8

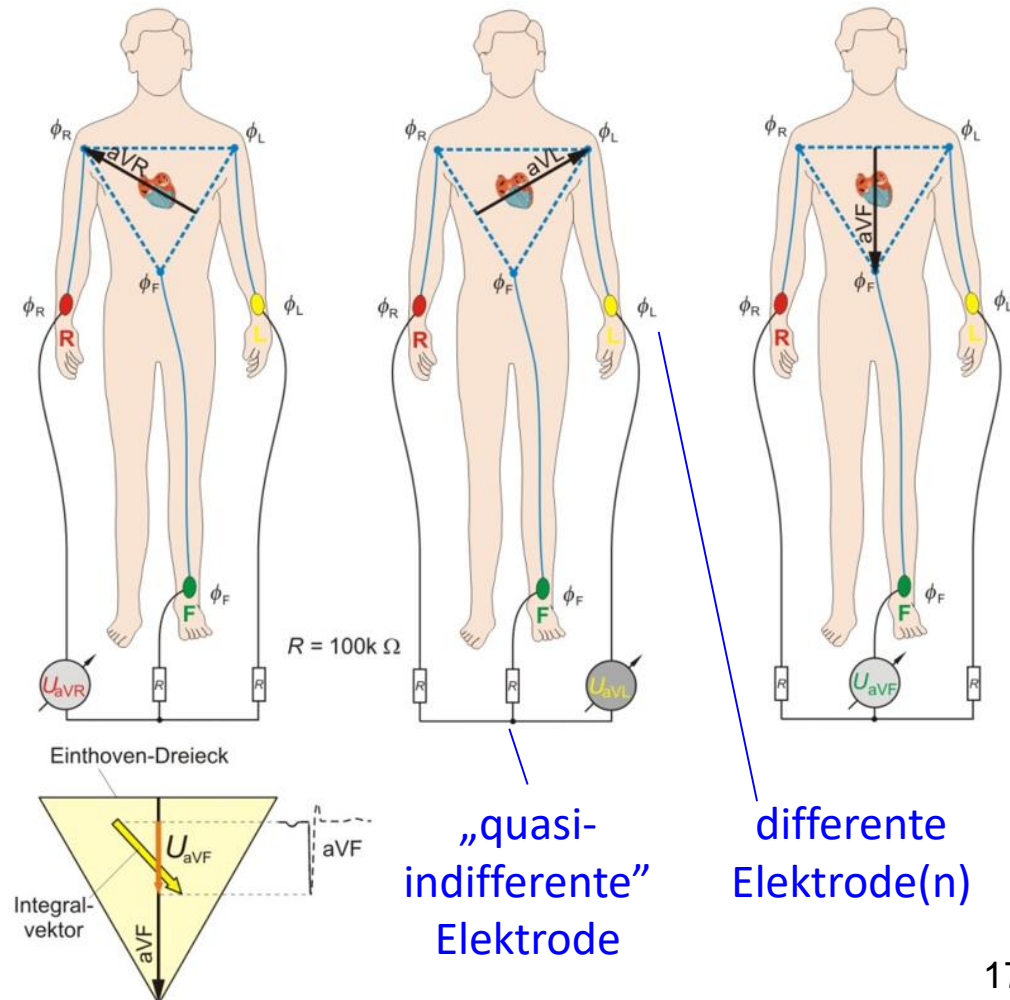
Ableitungen nach Wilson

- unipolar
- horizontal



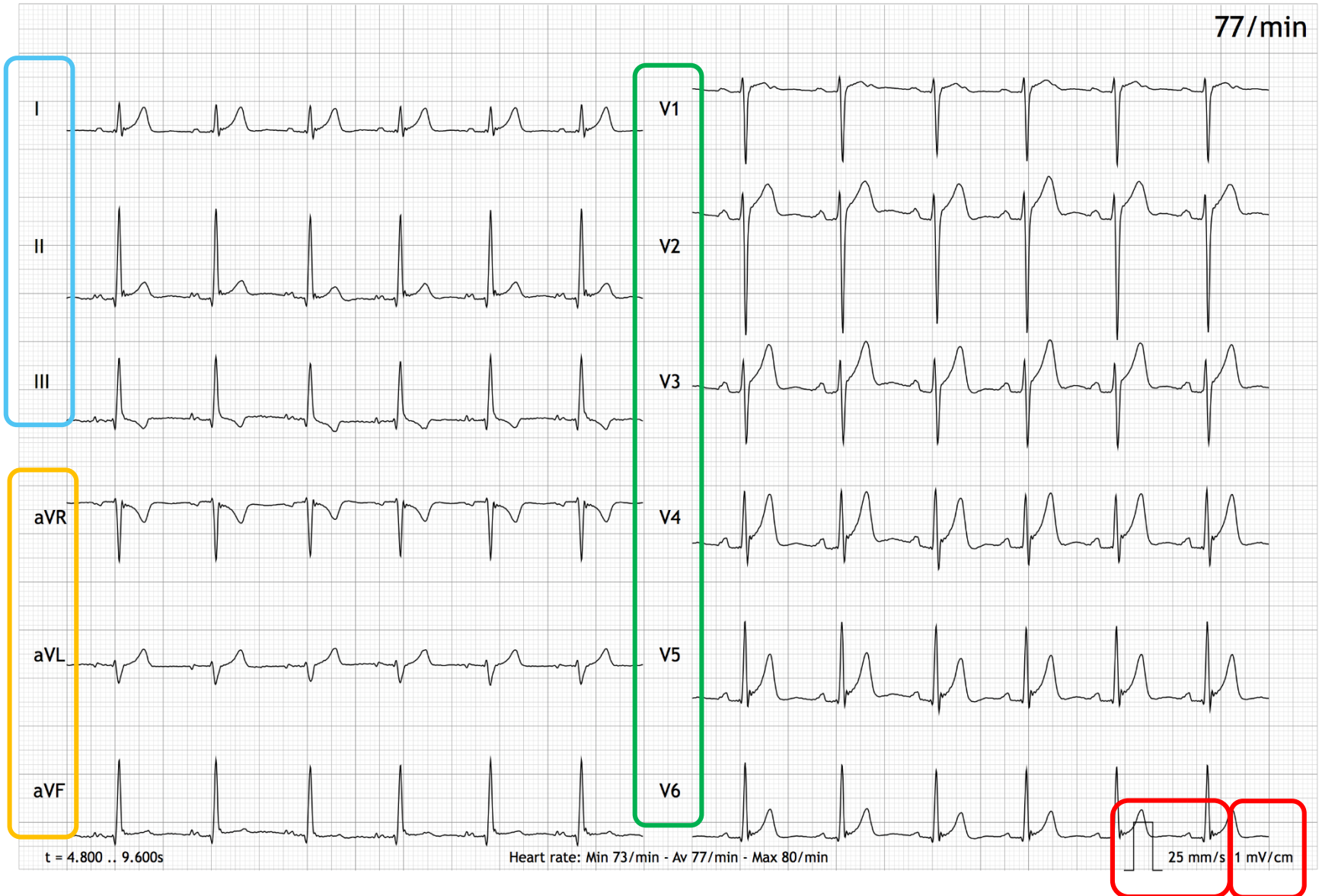
Ableitungen nach Goldberger

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



EKG #9

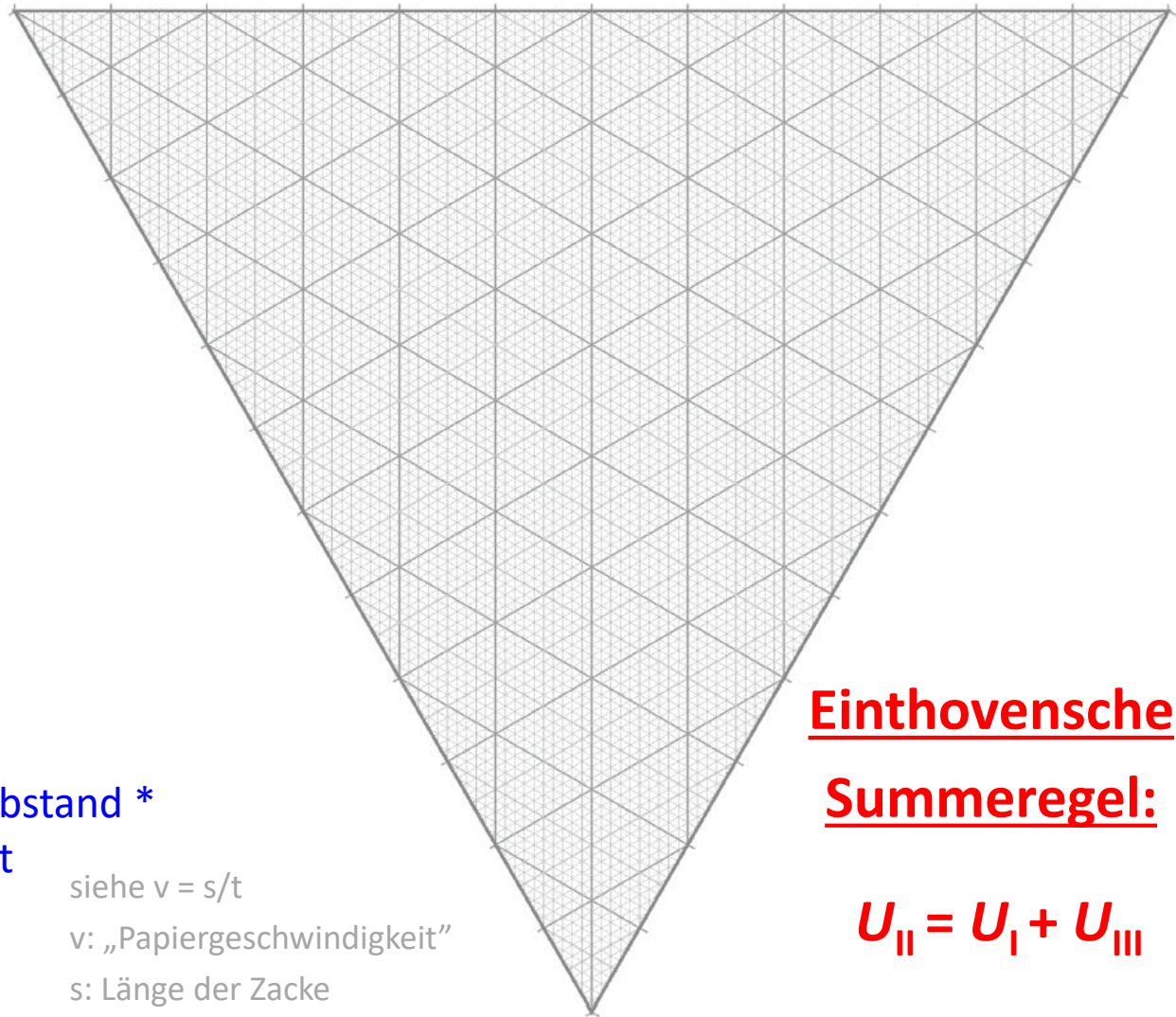
Standard 12-Kanal EKG-Aufnahme



EKG #10

- Kalibrationszeichen (1 mV)

Die Bestimmung der Herzachse

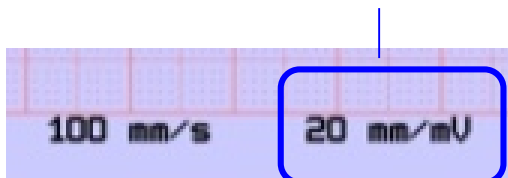


Einthovensche
Summeregeln:

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



- Spannung = vertikaler Abstand *
vertikale Empfindlichkeit



siehe $v = s/t$

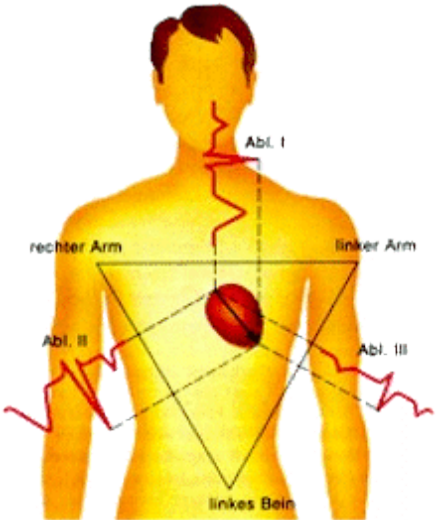
v: „Papiergeschwindigkeit“

s: Länge der Zacke

t: Zeit des EKG-Segments

EKG #11

Die Beurteilung der Herzachse



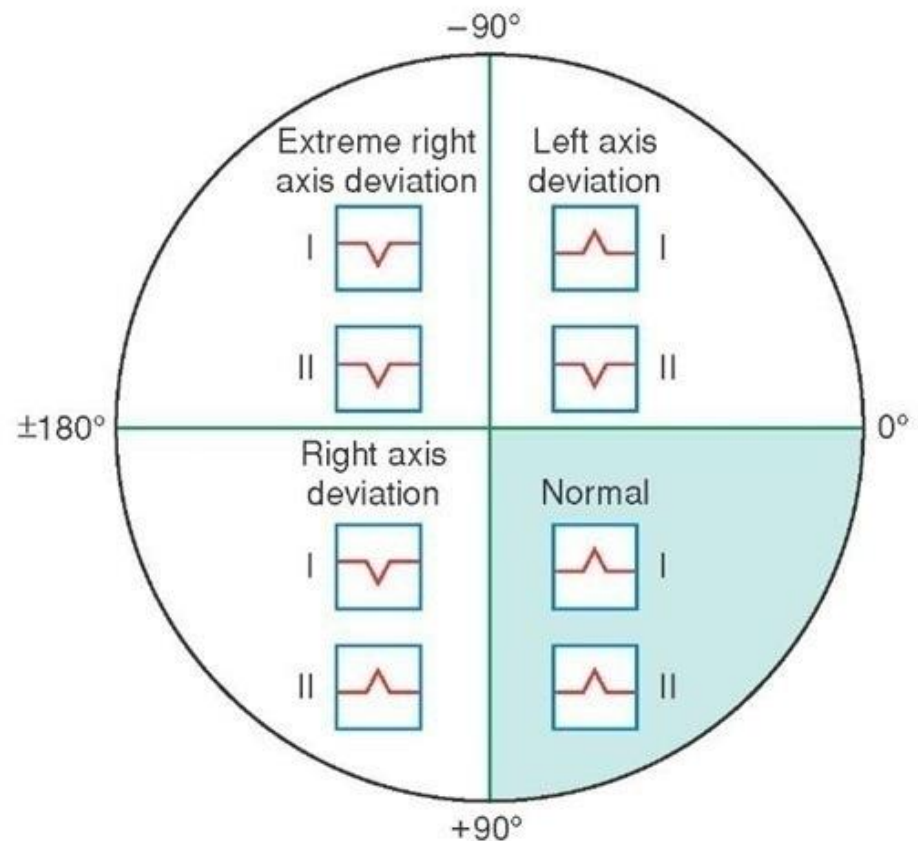
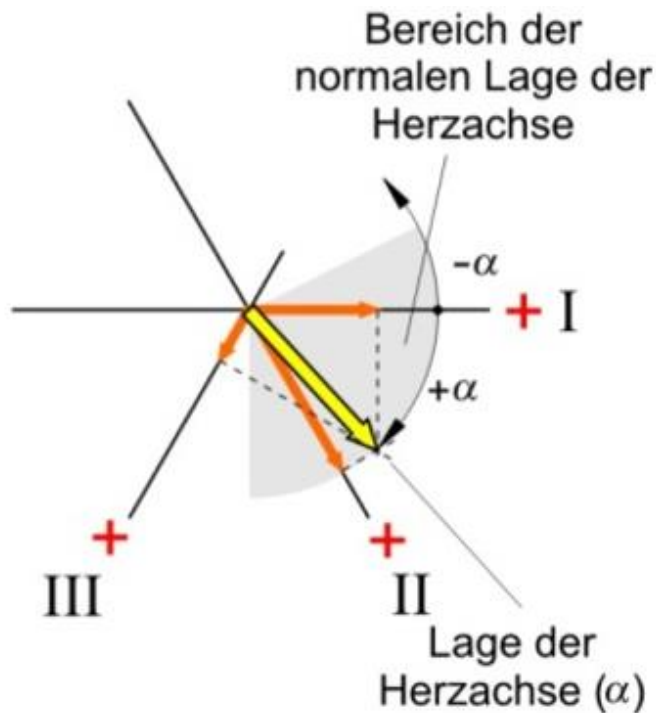
$R_{II} > R_I > R_{III}$: normtyp

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

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

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

Verschiebung der Seiten des Einthoven-Dreiecks



Feedback

