

Erregungsprozesse. Aktionspotential.

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



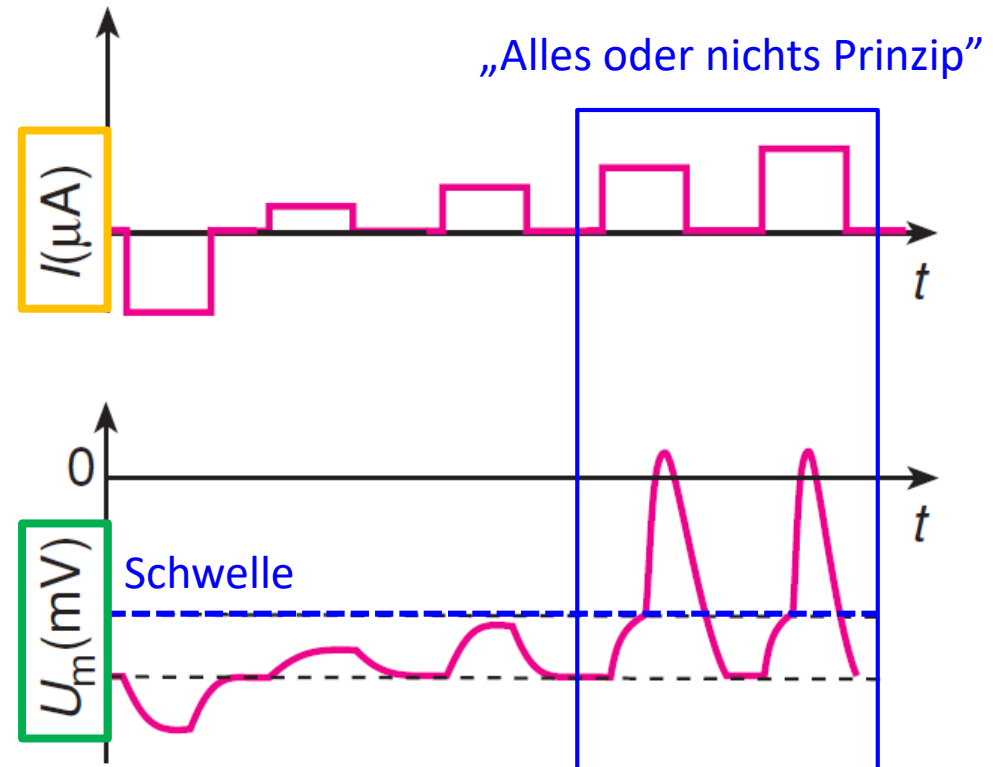
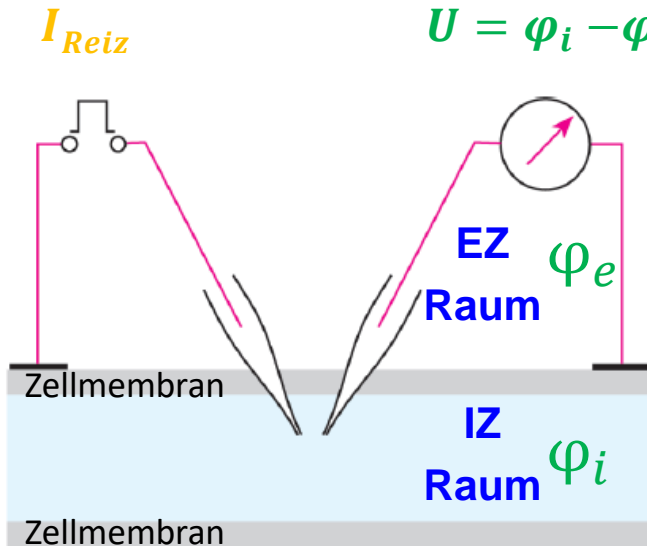
**Nanobiotechnologie und Einzelmolekül-Forschungsgruppe und
Myofilament-Mechanobiophysik Forschungsgruppe,
Semmelweis Universität,
Institut für Biophysik und Strahlenbiologie.**

19. April 2022

Aktionspotenzial #1

stimulierende
Elektroden

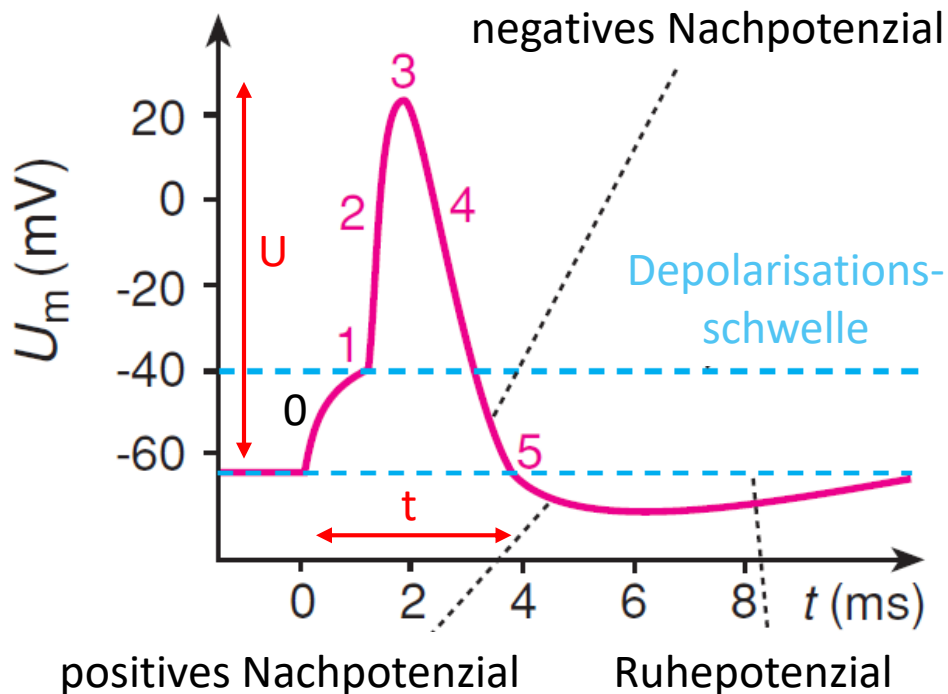
registrierende
Elektroden



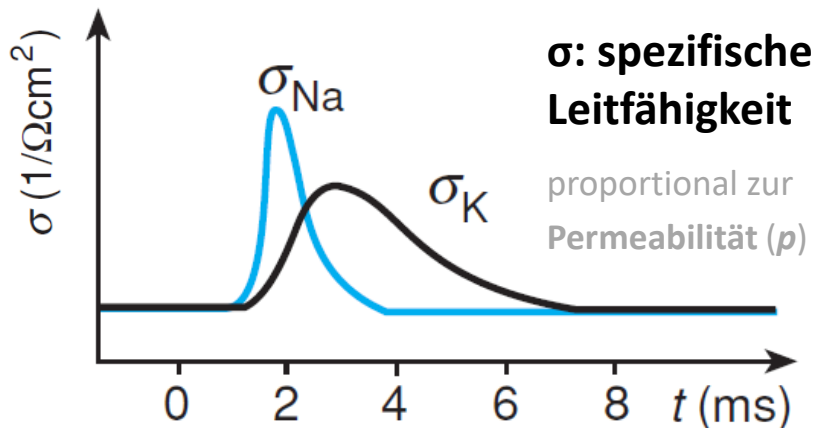
unter einem Schwellenwert: Größe der Antwortsignale ist proportional zur Stromstärke

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)

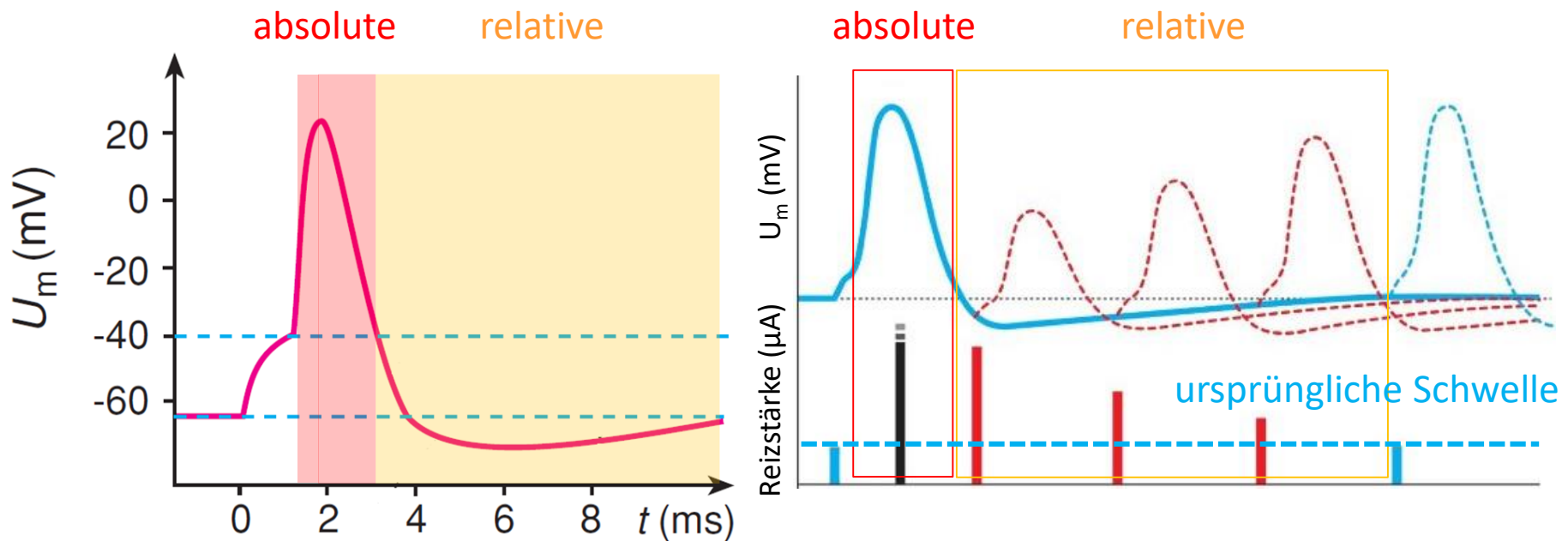


- **$U \sim 100 \text{ mV}$**
- **$t \sim 1-5 \text{ ms}$**
- (Skelettmuskel und Neuron)**

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.

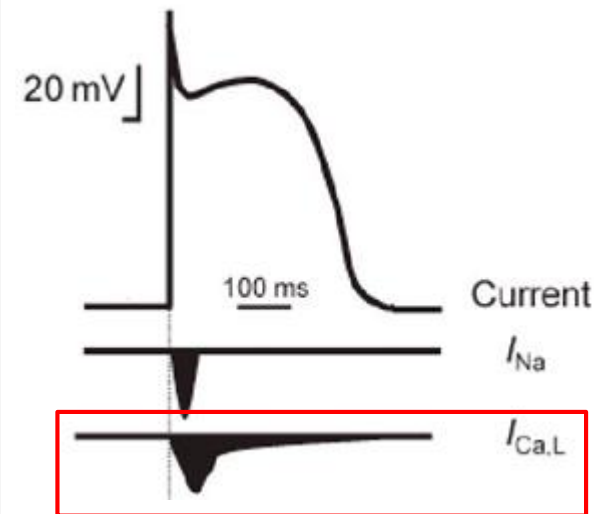
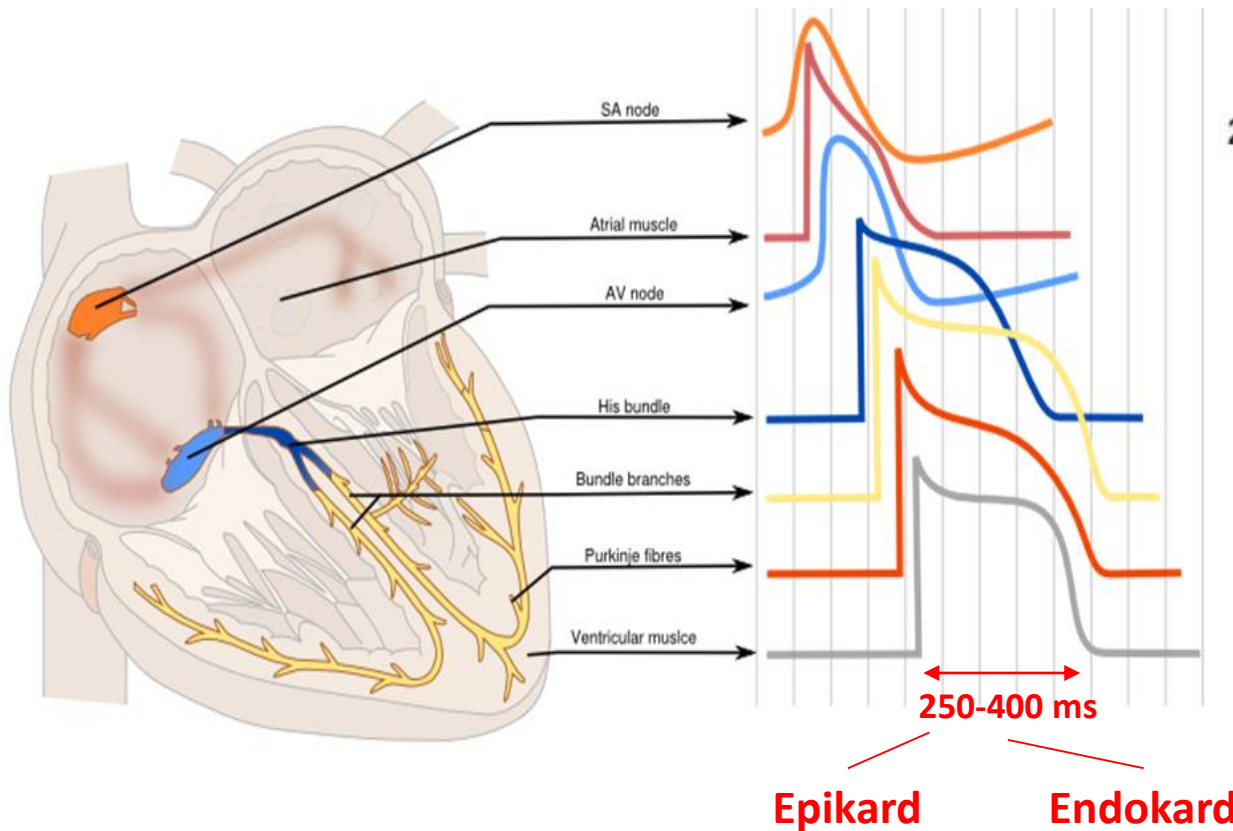
- **relative:** AP geht nur mit überschwelliger Reiz

Wiederöffnung der geschlossenen spannungsgesteuerten Na^+ -Kanäle.

**verhindert
die rückwärtige
Ausbreitung
des Aktionspotenzials**

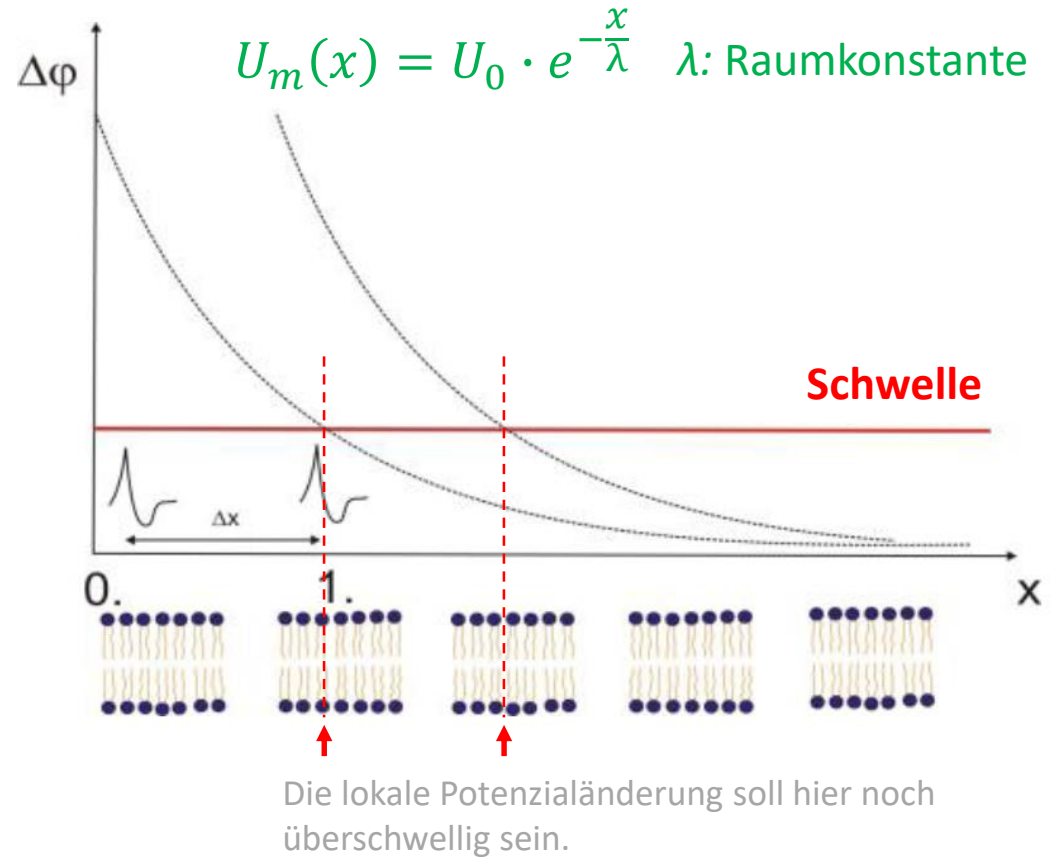
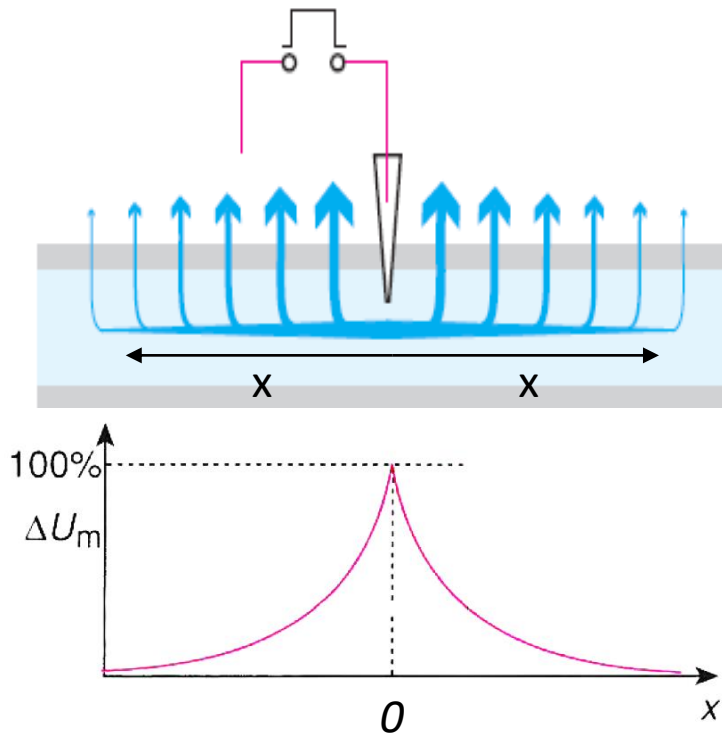
Eigenschaften des Aktionspotenzials #2

Spezielles Aktionspotenzial: Herzkammer-Muskelzellen



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

Ausbreitung des Aktionspotenzials #1

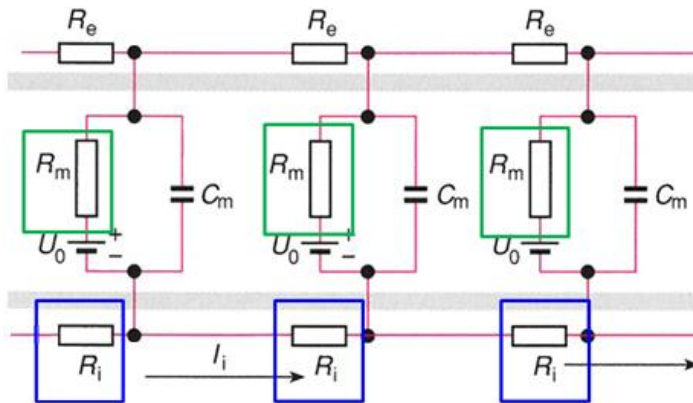


Eigenschaften:

- 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

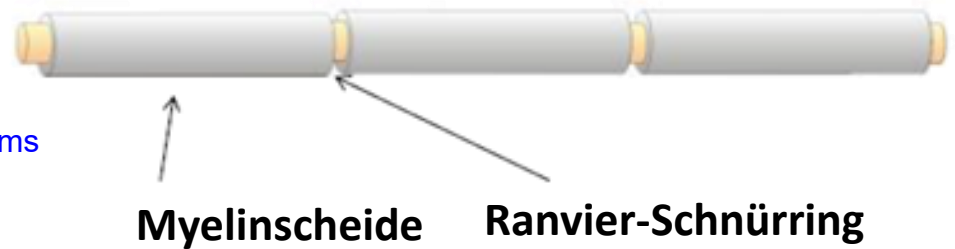
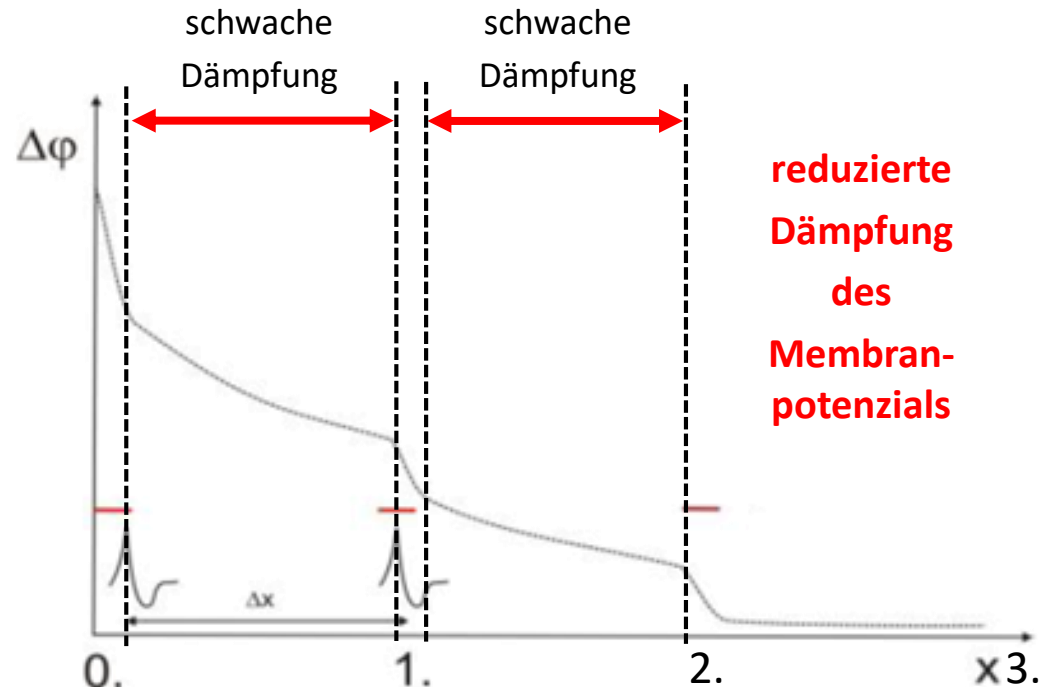
elektrisches Modell der Membran



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

R_m : Widerstand der Membran
in Querrichtung

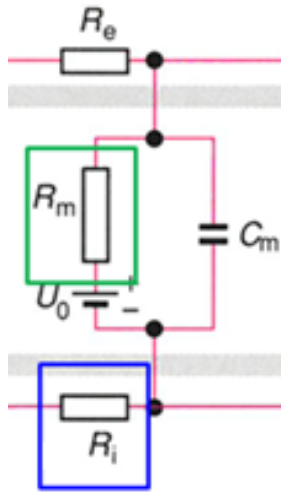
R_i : Widerstand des intrazellulären Raums



R_m ist groß: hohe Raumkonstante λ : **Myelinscheide**

R_i ist klein: hohe Raumkonstante λ : **große Querschnittsfläche (A) der Nerven**

Ausbreitung des Aktionspotenzials #3






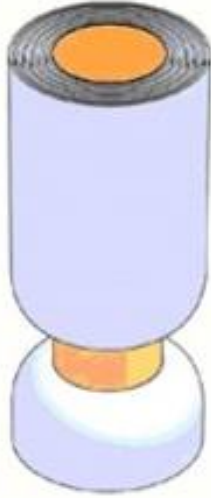
$$\lambda \sim \sqrt{\frac{R_m}{R_i}}$$

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

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

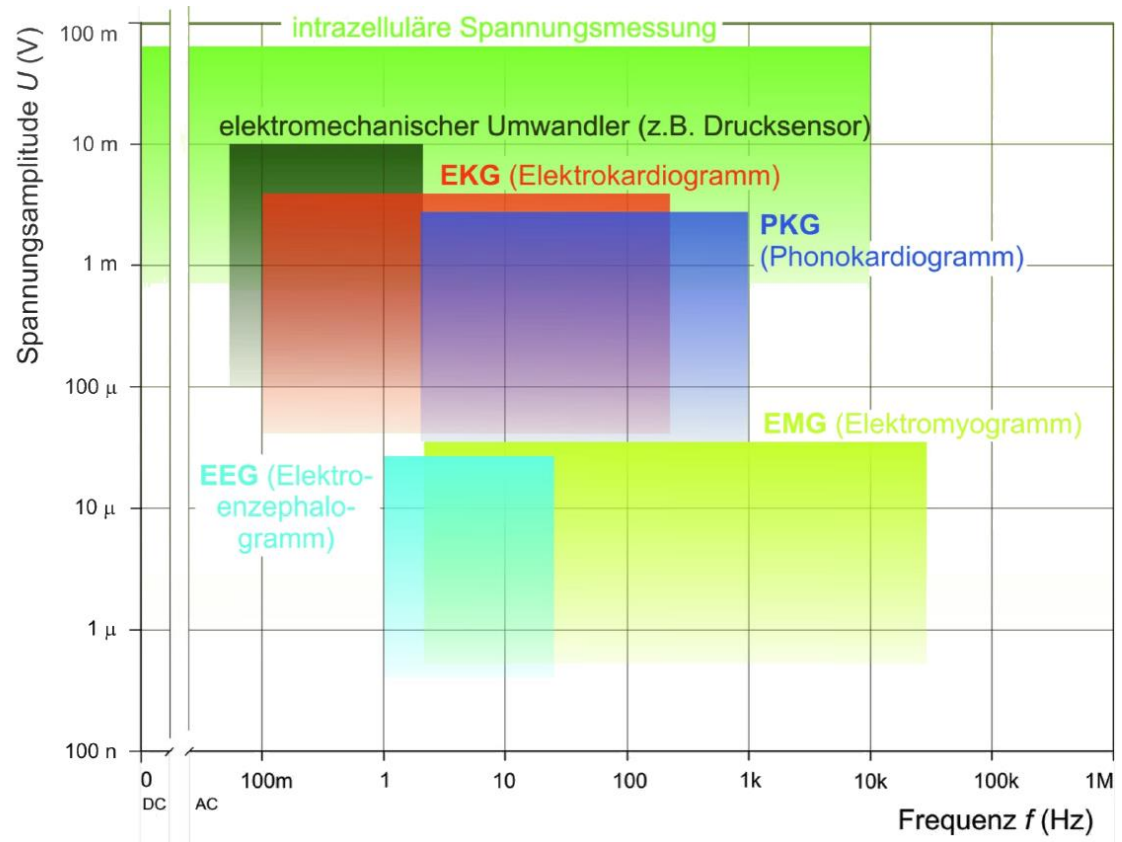
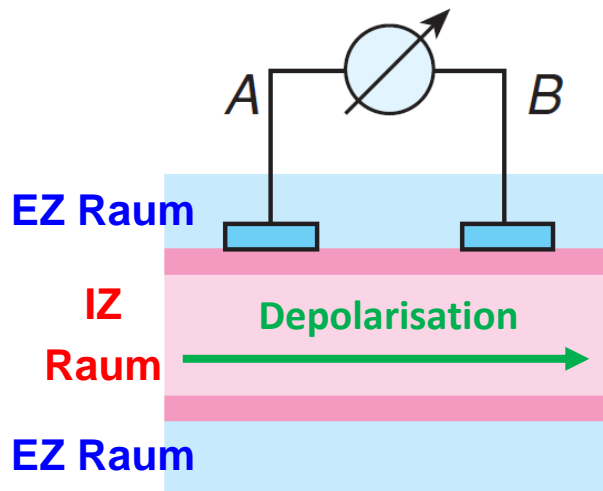
große Querschnitt: schnellere Leitung

Medizinische Anwendungen

Elektrische Signale auf der Körperoberfläche (Diagnostik)

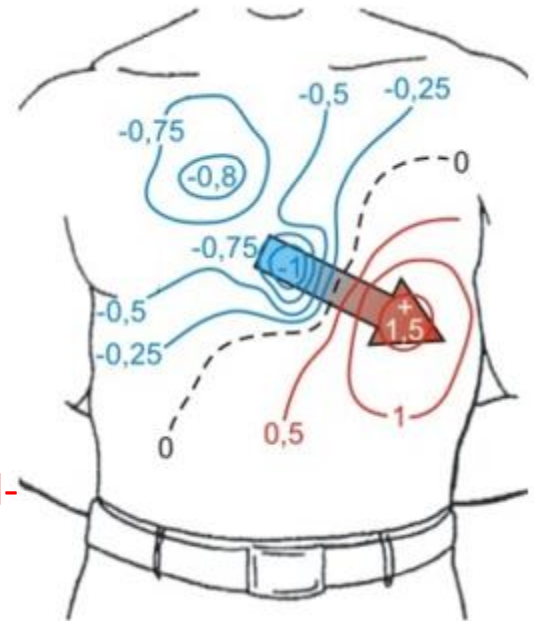
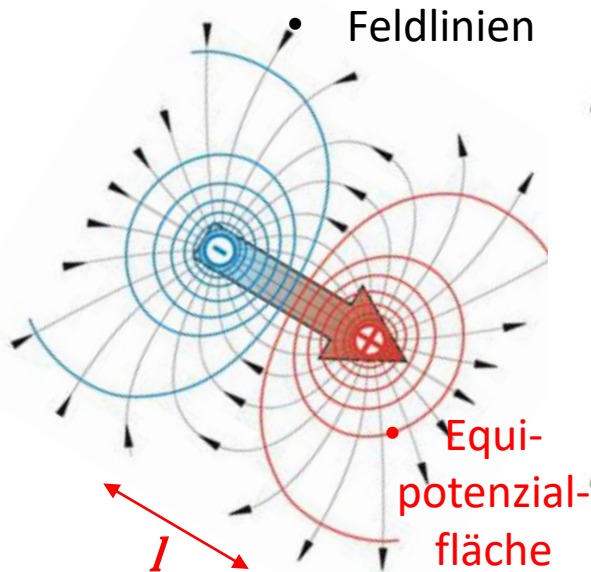
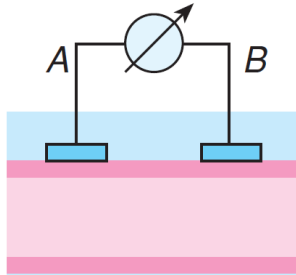
- Elektrokardiographie (EKG)
- Elektroenzephalografie (EEG)
- Elektromyographie (EMG)
- Elektrokulographie (EOG)
- Elektroretinographie (ERG)

Messmethode:
Spannungsmessung mit
Oberflächenelektroden.



EKG #1

Das Ladungsfeld des Herzens: Dipolfeld

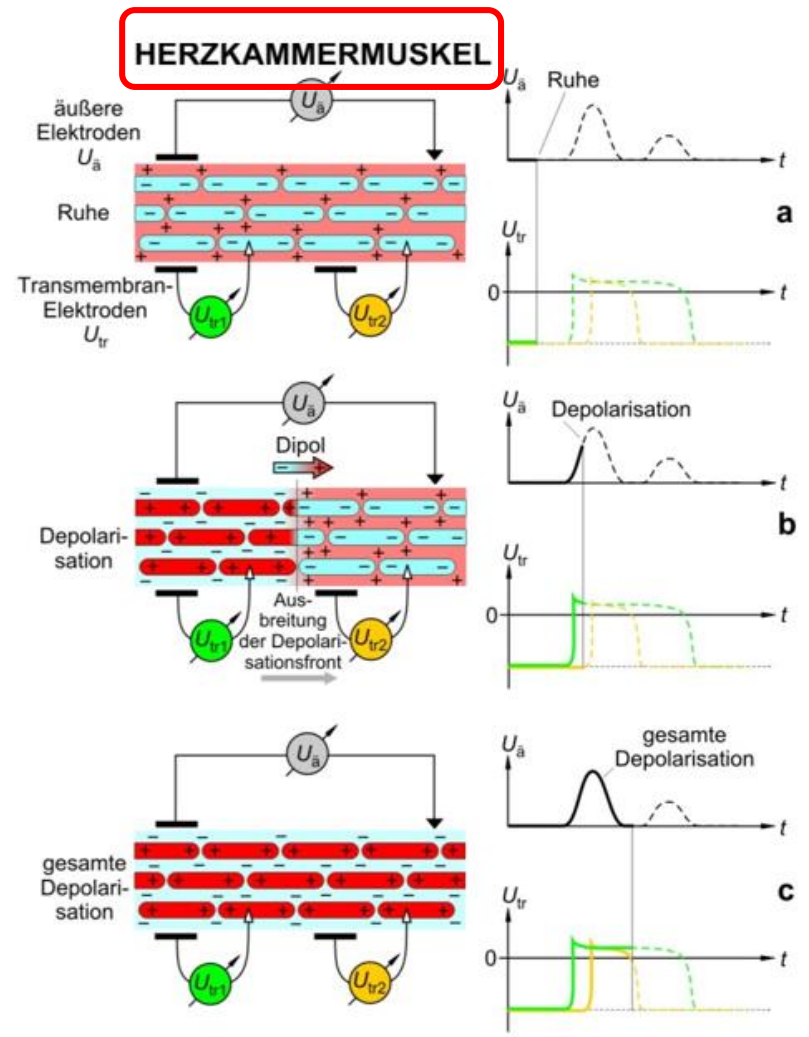
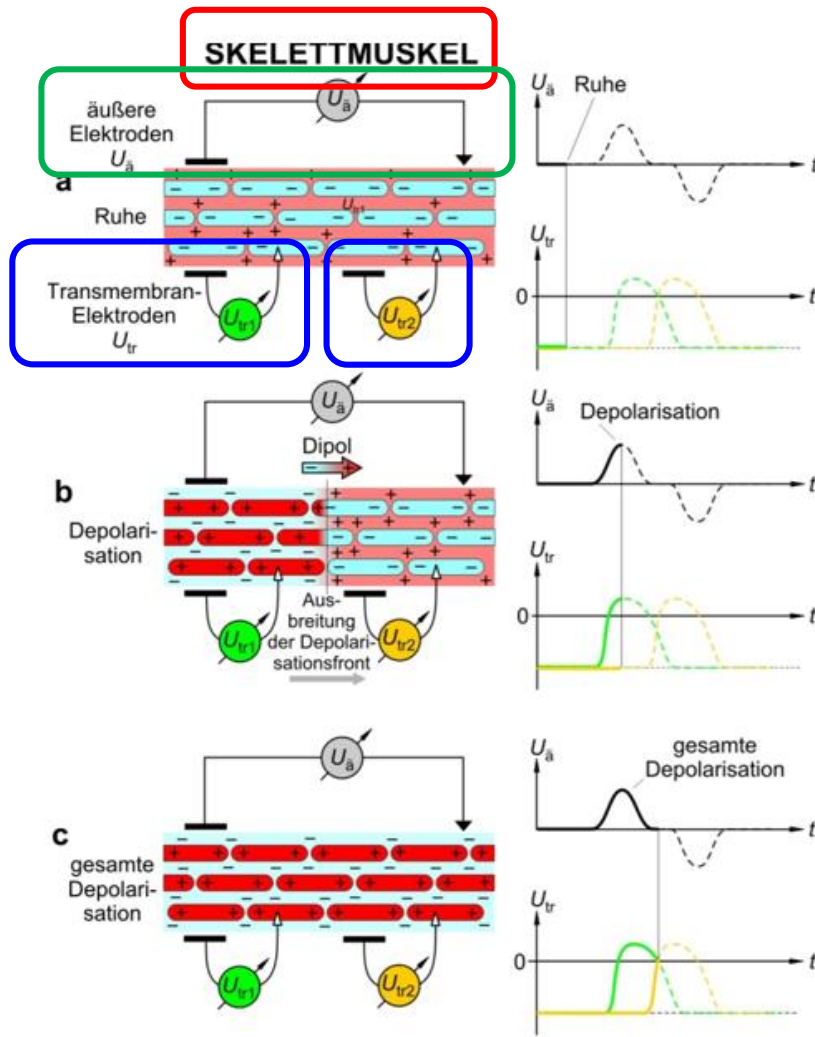


Dipolmoment: d

$$d = Q \cdot l$$

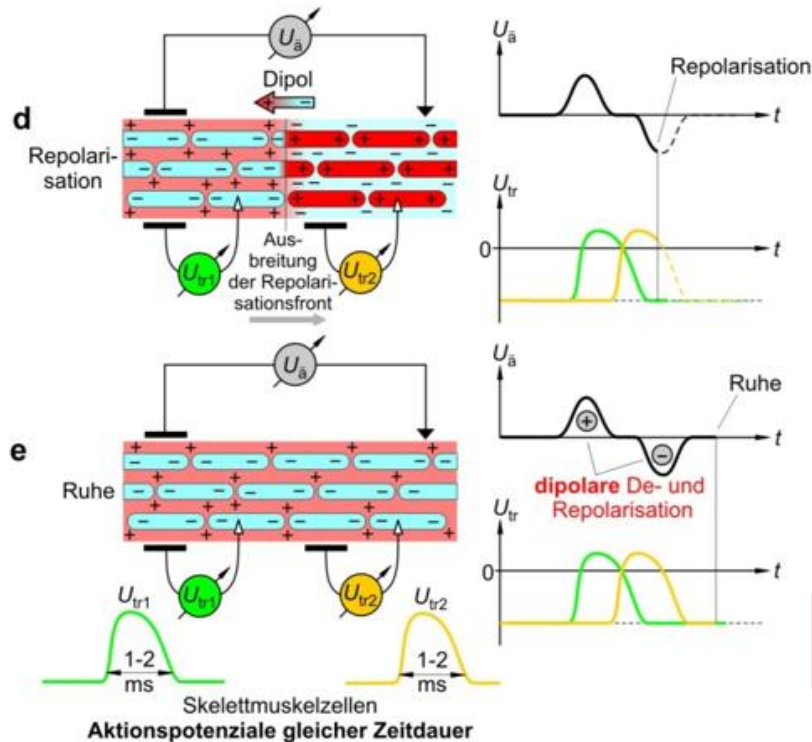
Der Herzdipol ändert seine Richtung und Größe nach dem Erregungszustand des Herzens (quasi-) periodisch.

EKG #2

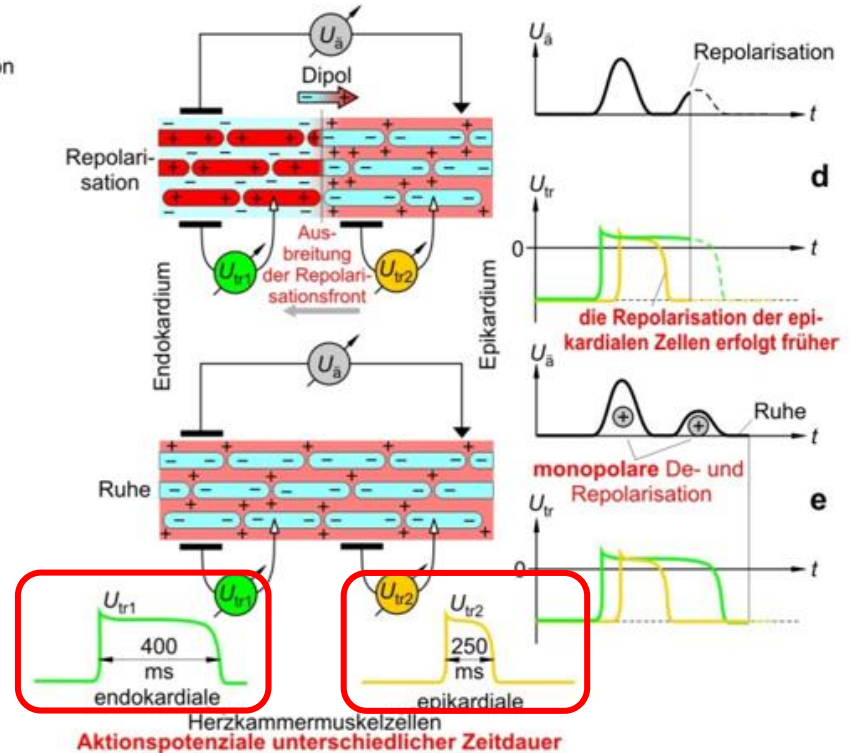


EKG #3

SKELETTMUSKEL



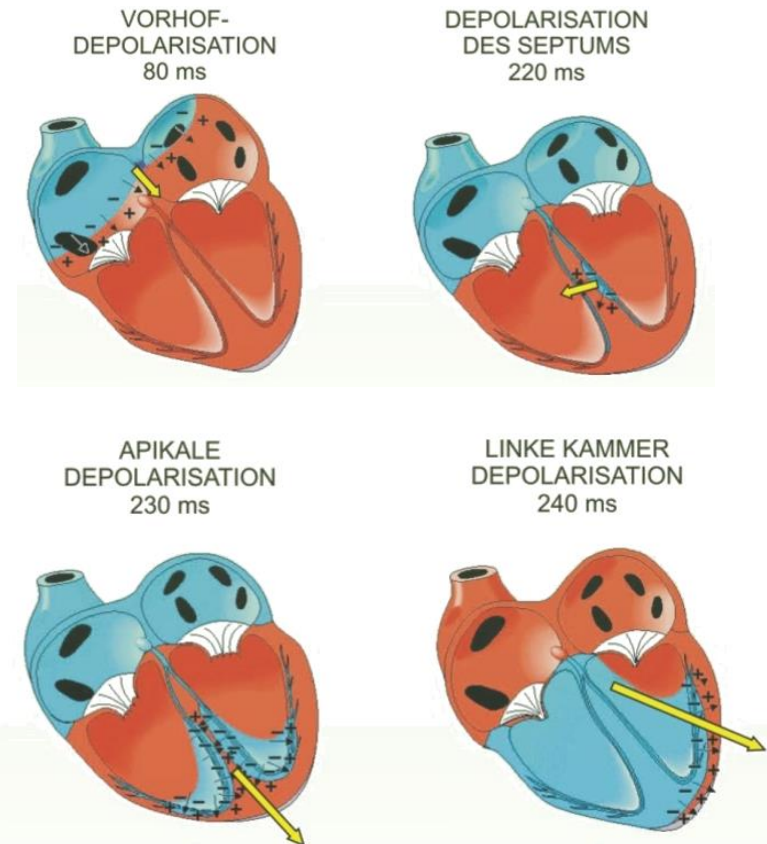
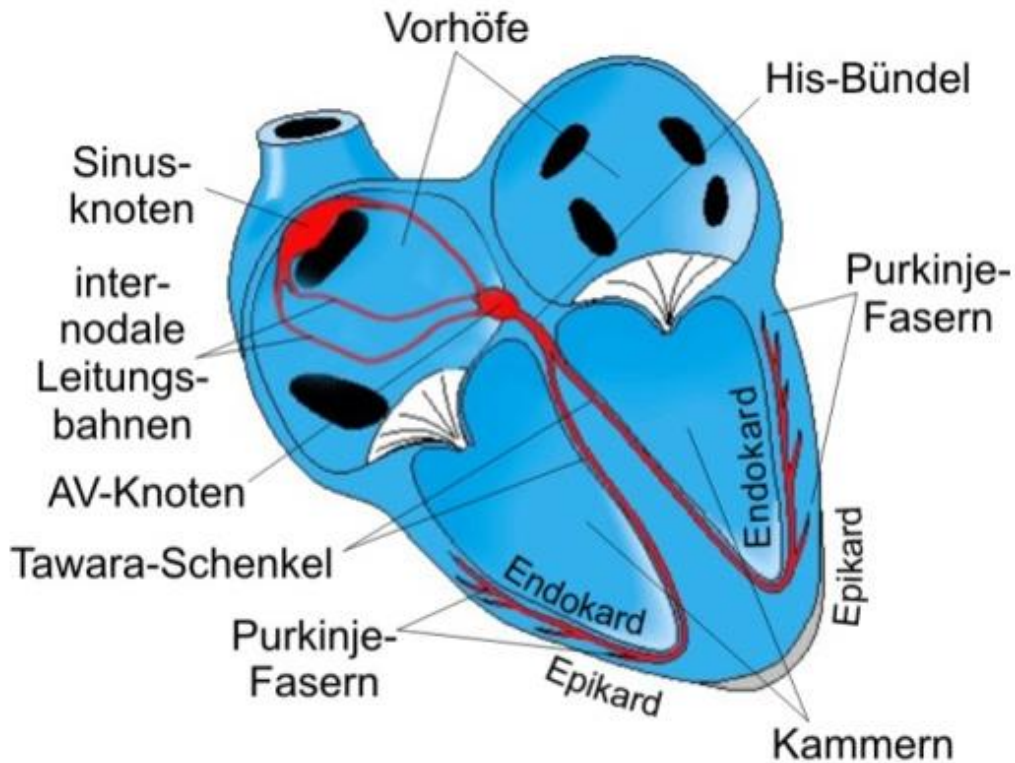
HERZKAMMERMUSKEL



- **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



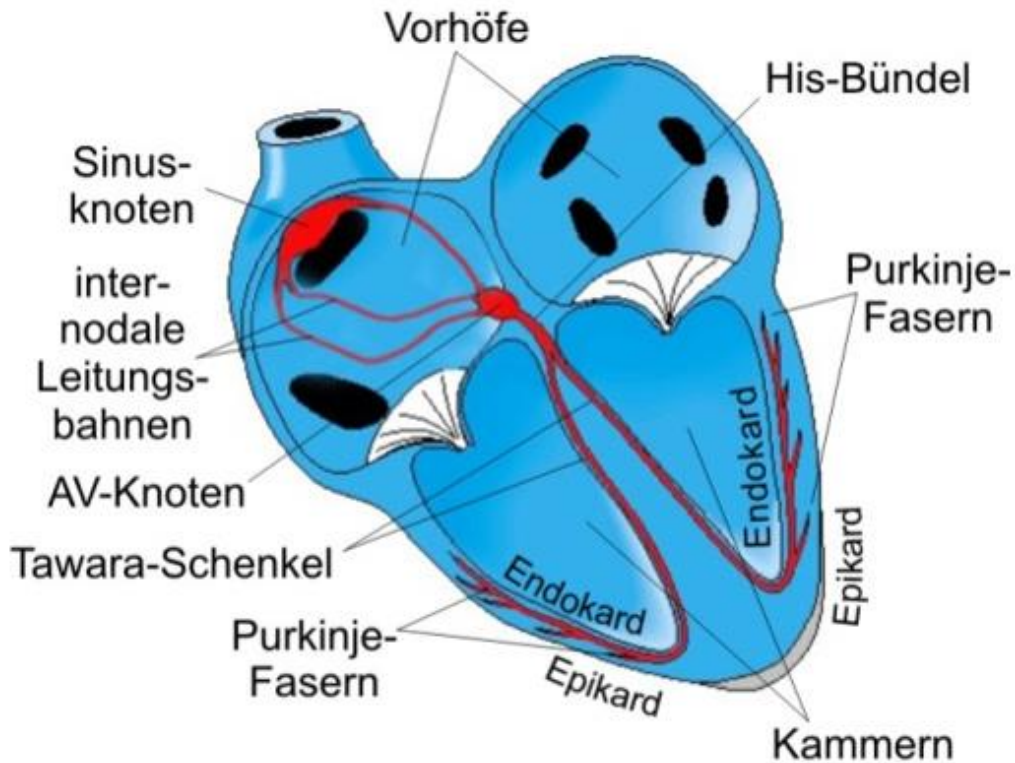
Die Farben repräsentieren das Potenzial (die Ladung) des EC-Raums.

rot: EC positiv (IC negativ)

blau: EC negativ (IC positiv)

EKG #5

Erregungsbildung und Erregungsleitung im Herzen



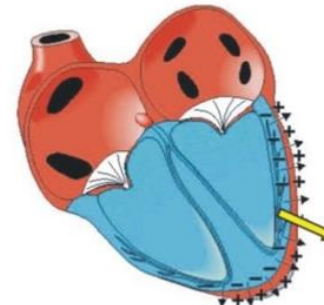
LINKE KAMMER
DEPOLARISATION
250 ms



VOLLSTÄNDIGE
KAMMER DEPOLARISATION
350 ms



KAMMER
REPOLARISATION
450 ms



VOLLSTÄNDIGE
KAMMER REPOLARISATION
600 ms



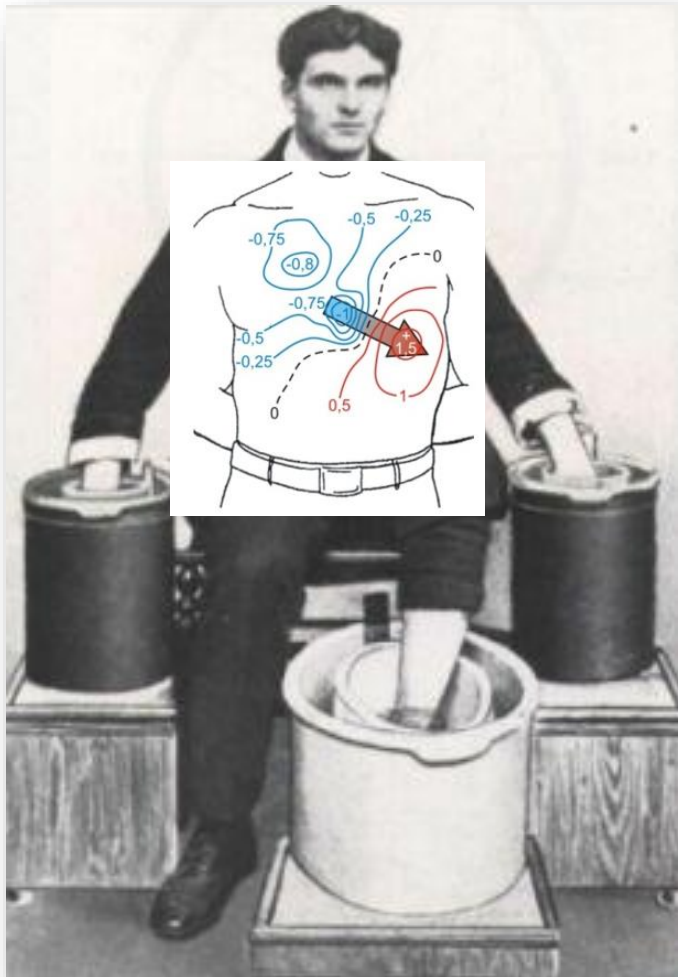
Die Farben repräsentieren das Potenzial (die Ladung) des EC-Raums.

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:

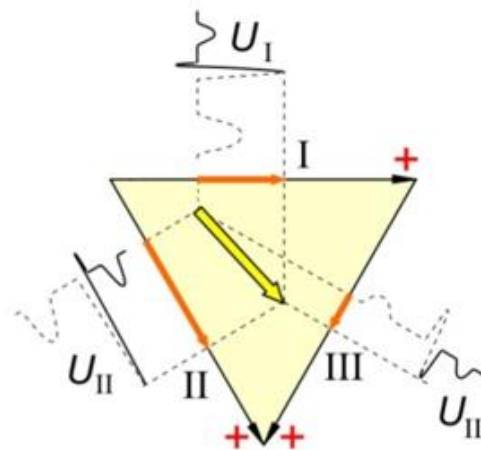
- **bipolare:** Spannung zwischen zwei differenten Elektroden.
 - Einthoven: I, II, III
- **unipolare:** Spannung zwischen einer differenten und einer indifferenten Elektrode.
 - Wilson: V1, V2, V3, V4, V5, V6
 - (Goldberger: aVR, aVL, aVF)

EKG #7

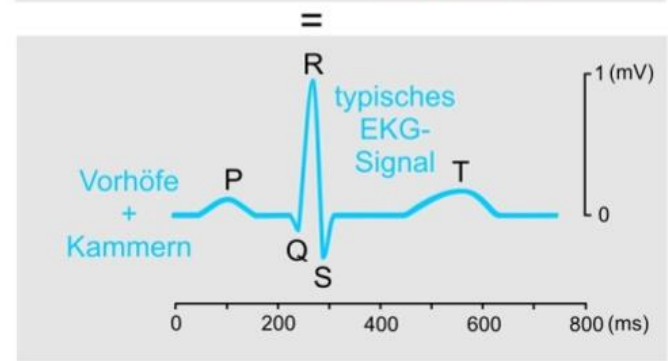
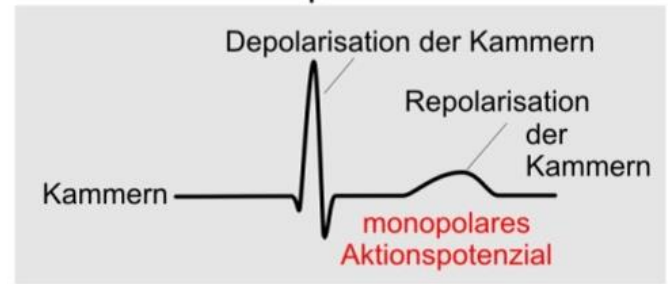
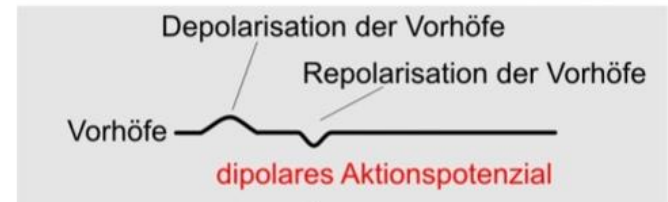
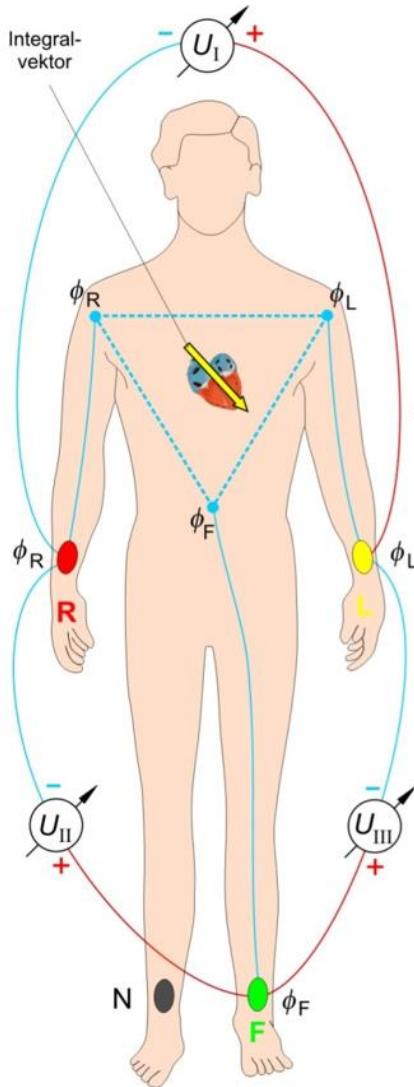
Die Standardableitungen nach Einthoven

- bipolar
- frontal

Einthoven-Dreieck



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



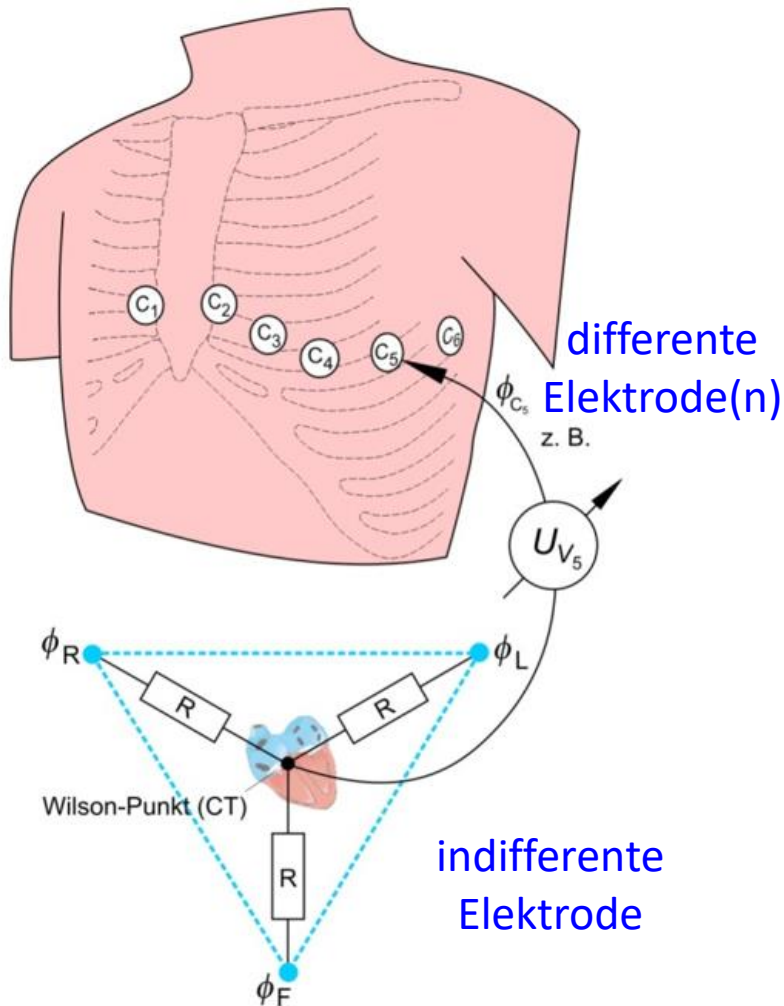
typische EKG-Kurve

Farbkodierung: RA, LA, LF, RF

EKG #8

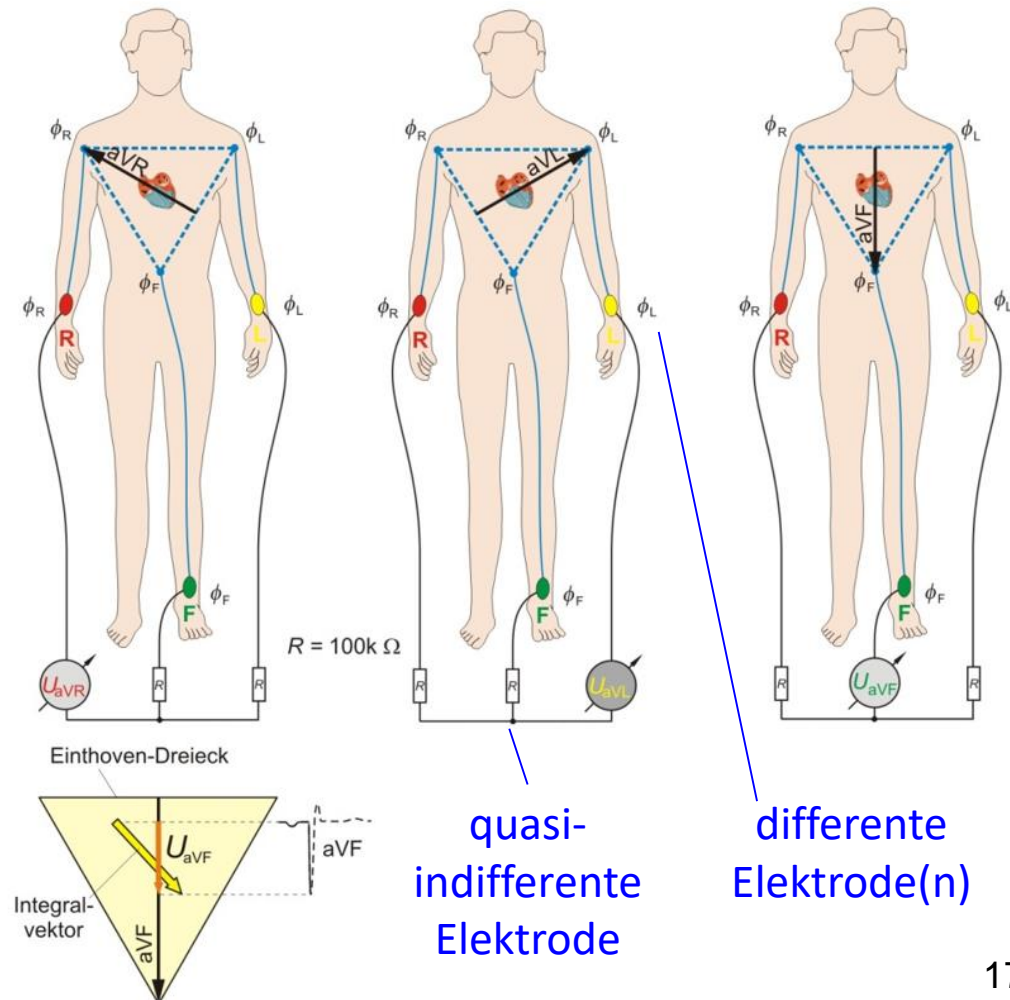
Ableitungen nach Wilson

- unipolar
- horizontal



Ableitungen nach Goldberger

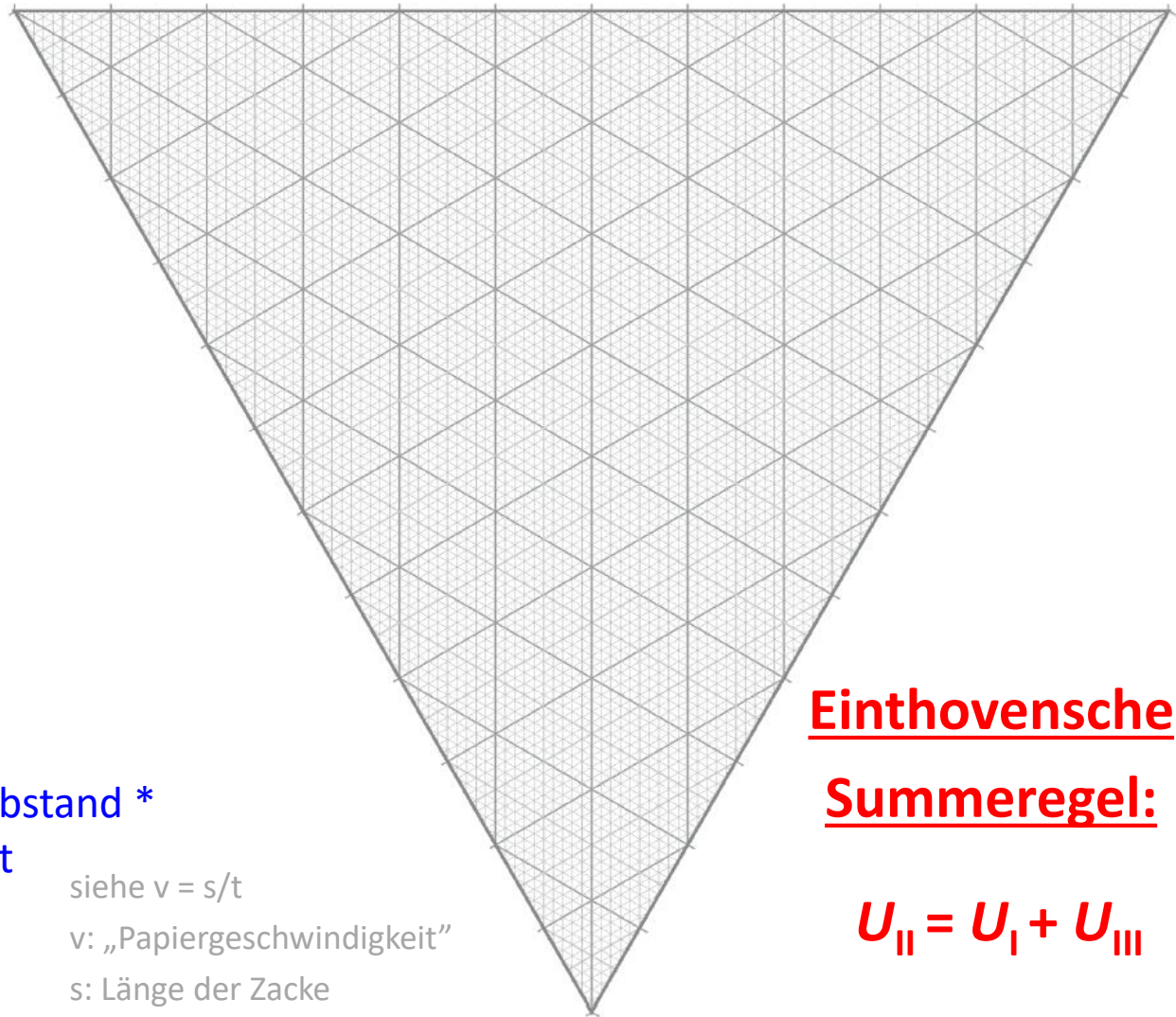
- „quasi-unipolar“
- frontal (30° gedreht vgl. Einthoven)



EKG #9

- Kalibrations-
zeichen (1 mV)

Die Bestimmung der Herzachse

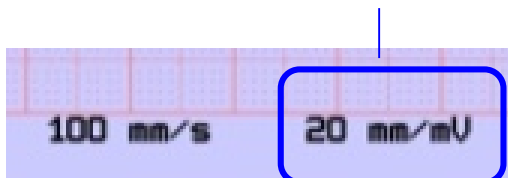


Einthovensche
Summeregeln:

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



- Spannung = vertikaler Abstand *
vertikale Empfindlichkeit



siehe $v = s/t$

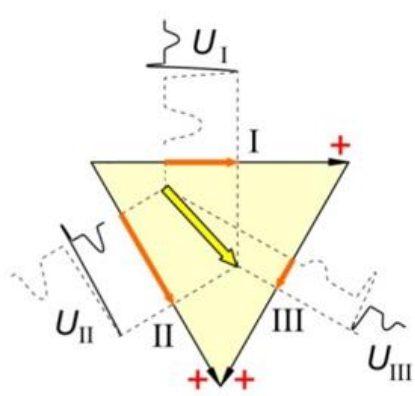
v: „Papiergeschwindigkeit“

s: Länge der Zucke

t: Zeit des EKG-Segments

EKG #9

Die Beurteilung der Herzachse



Verschiebung der Seiten des Einthoven-Dreiecks

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

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

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

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

