

Erregungsprozesse. Aktionspotenzial. Elektrische Methoden in der Medizin.

Balázs Kiss

kissb3@gmail.com



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

02. Mai 2024

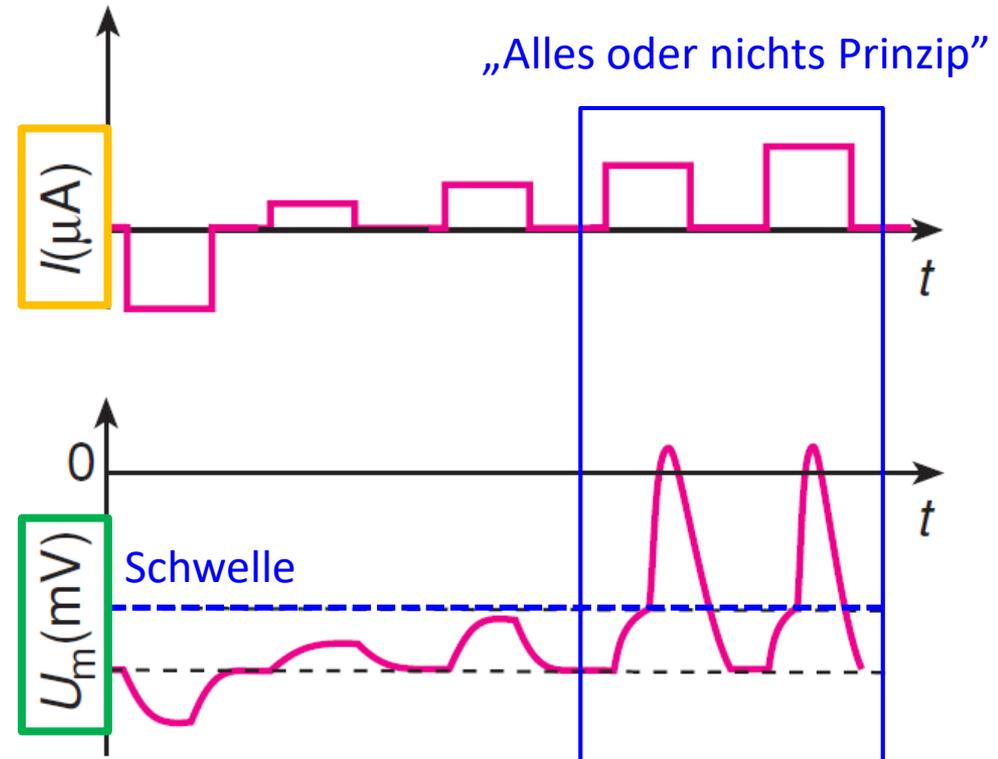
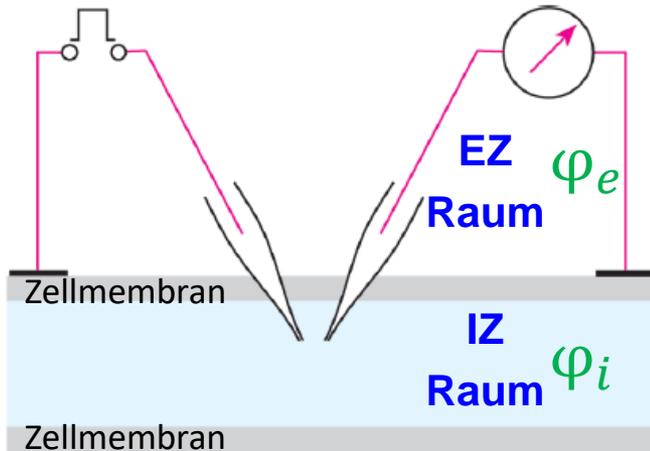
Aktionspotenzial #1

stimulierende
Elektroden

registrierende
Elektroden

I_{Reiz}

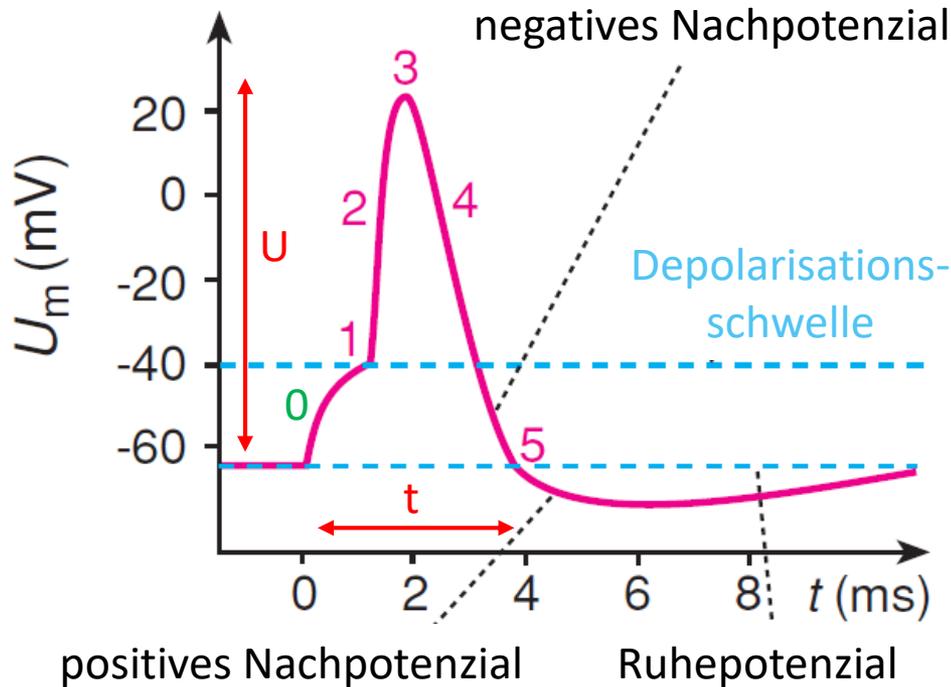
$U = \varphi_i - \varphi_e$



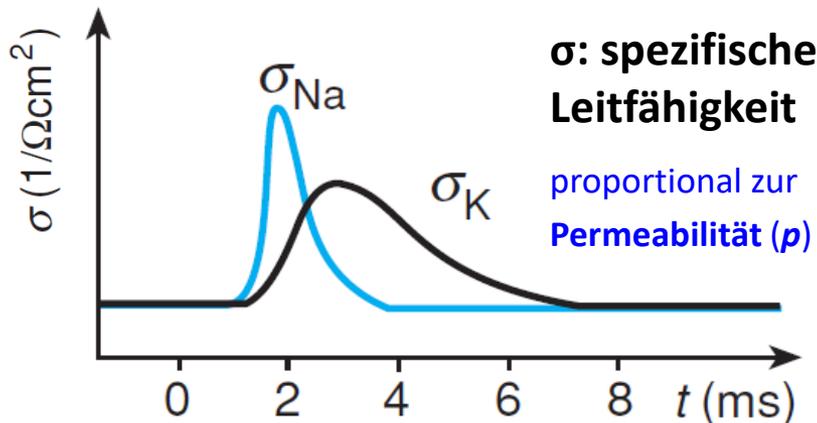
unter einem Schwellenwert: Größe der Antwortsignale ist proportional zur Stromstärke

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)

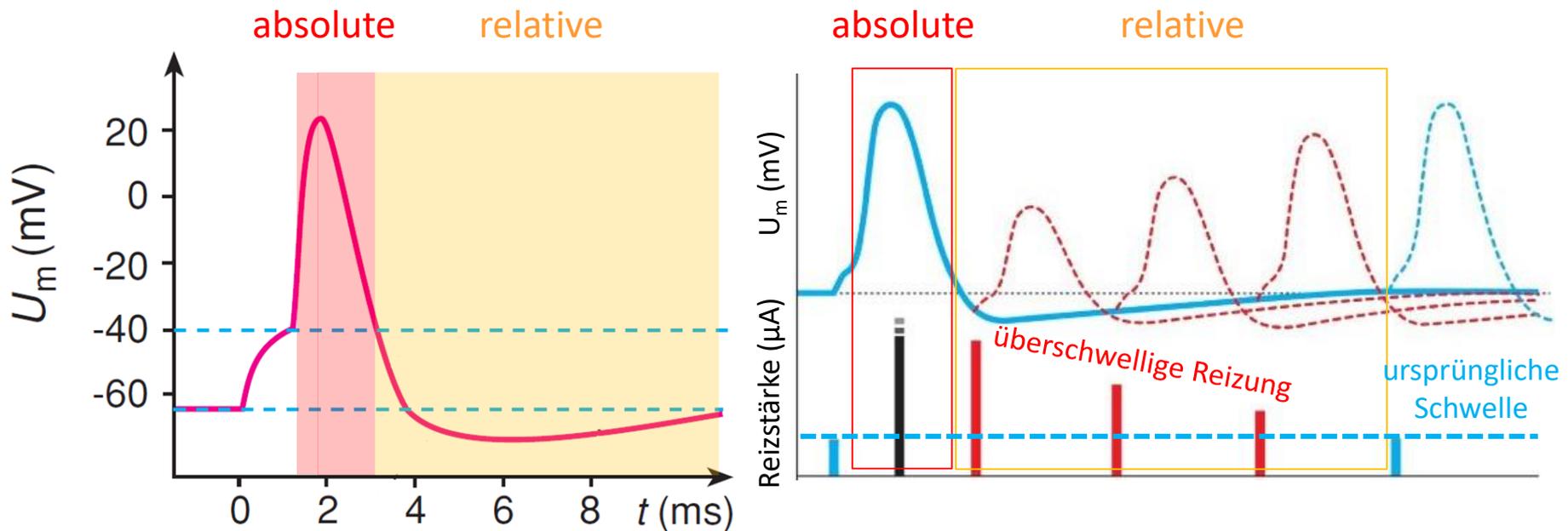


- **$U \sim 100$ mV**
 - **$t \sim 1-5$ ms**
- (Skelettmuskel und Neuron)**

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.

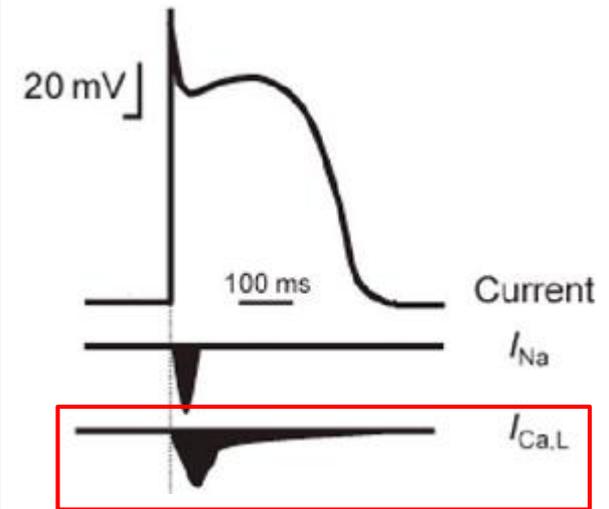
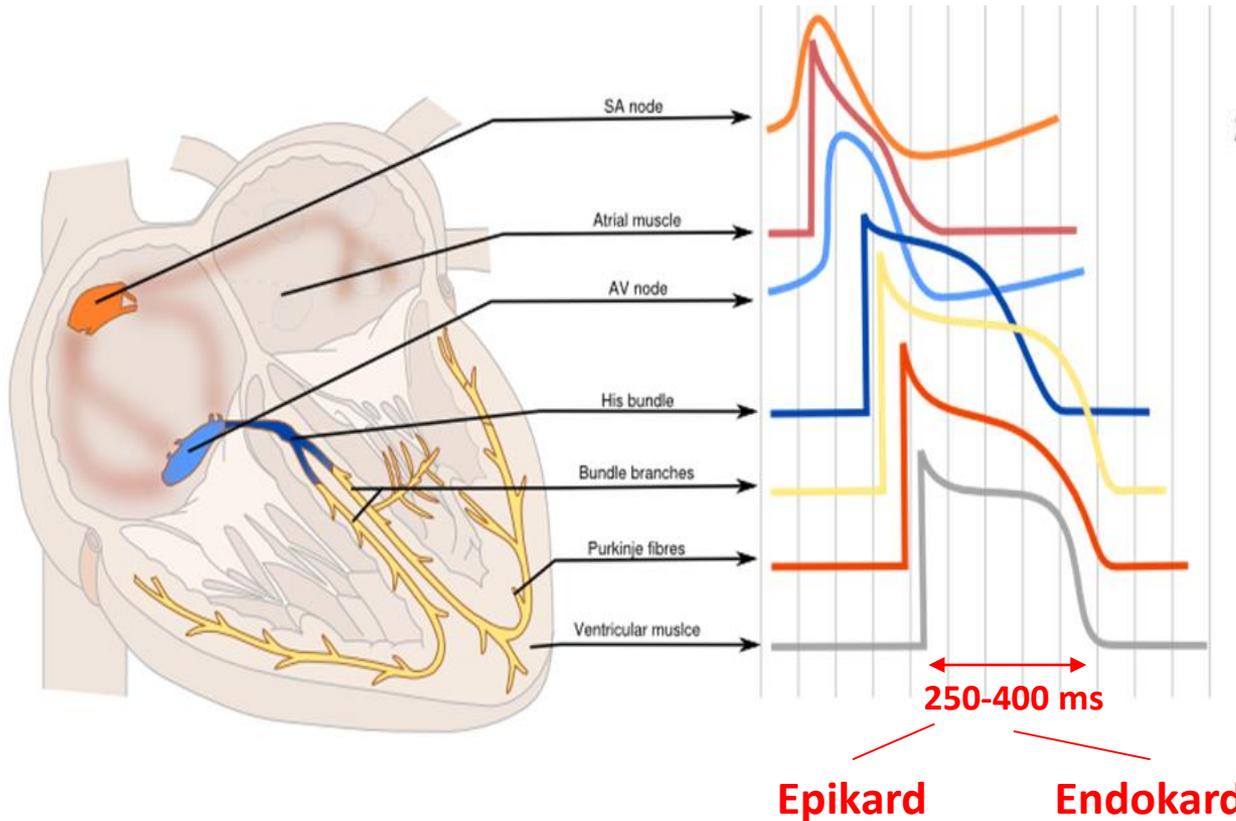
- **relative:** AP geht nur mit überschwelliger Reiz

Wiederöffnung der geschlossenen spannungsgesteuerten Na^+ -Kanäle.

**verhindert
die rückwärtige
Ausbreitung
des Aktionspotenzials**

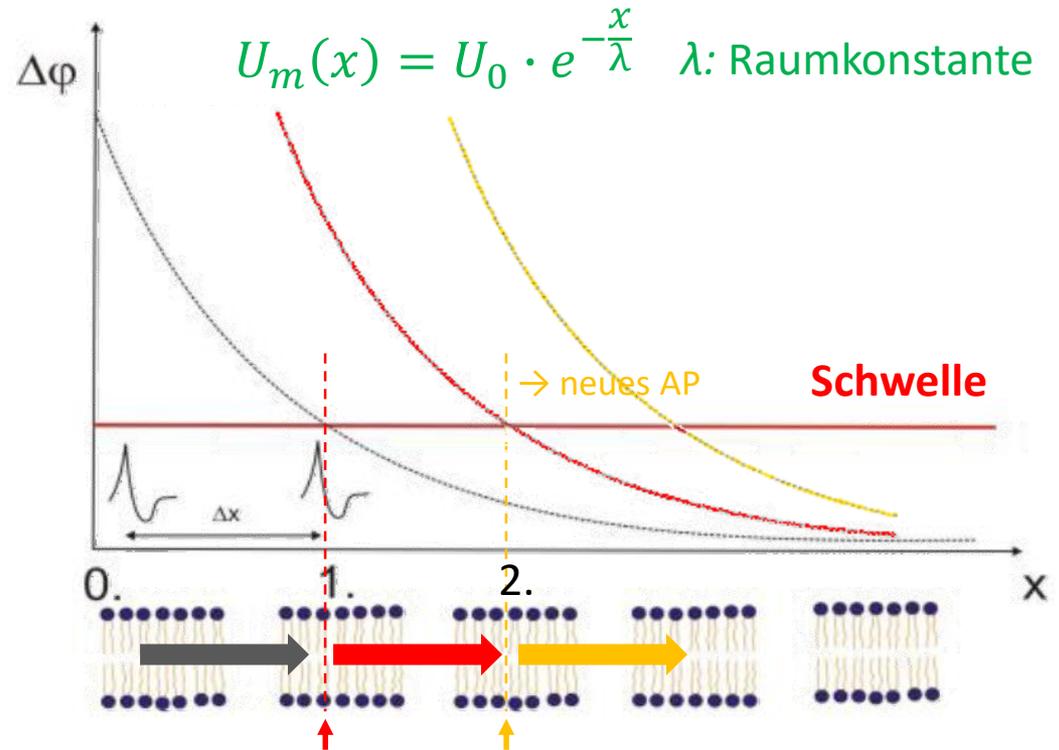
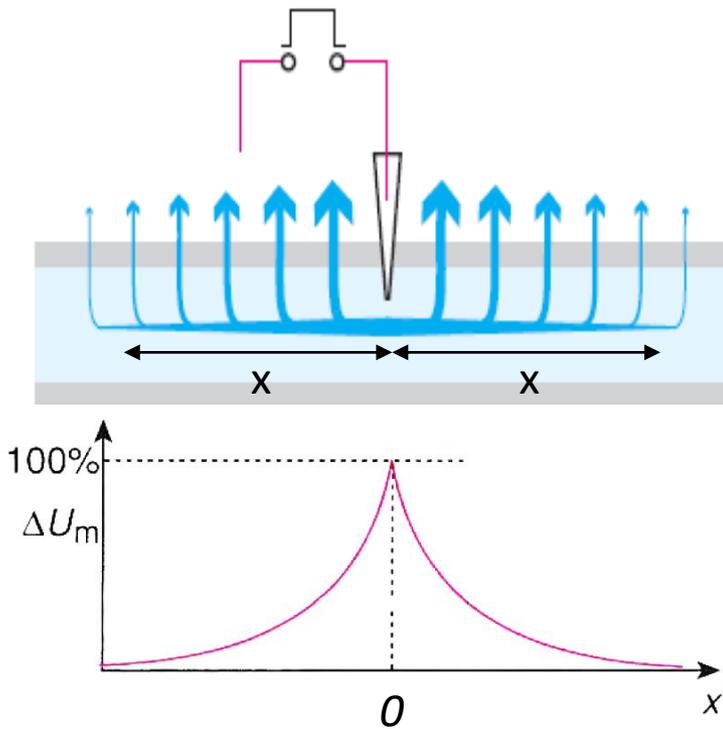
Eigenschaften des Aktionspotenzials #2

Spezielles Aktionspotenzial: Herzkammer-Muskelzellen



**spannungsgesteuerte
Ca²⁺-Kanäle
(Ca²⁺: Einstrom)**

Ausbreitung des Aktionspotenzials #1



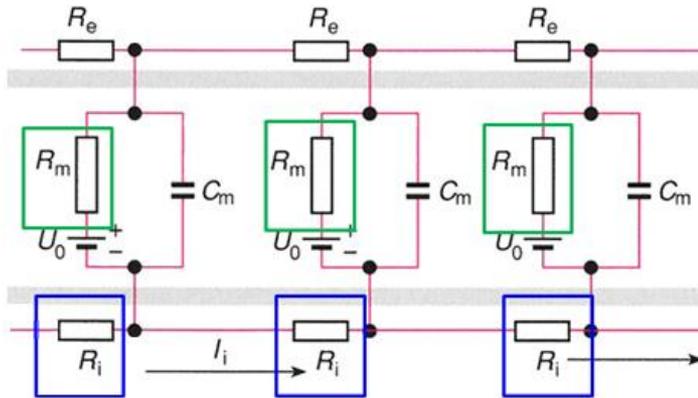
Die lokale Potenzialänderung soll hier noch überschwellig sein. → AP

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

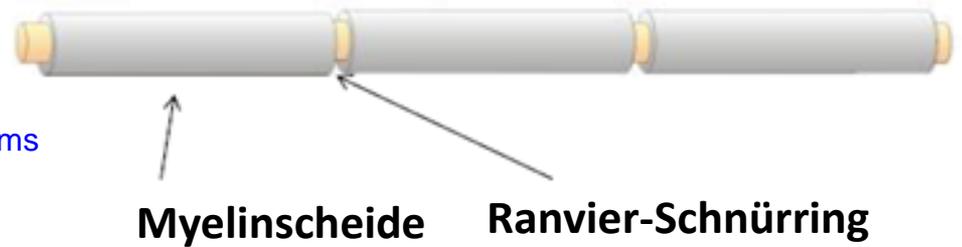
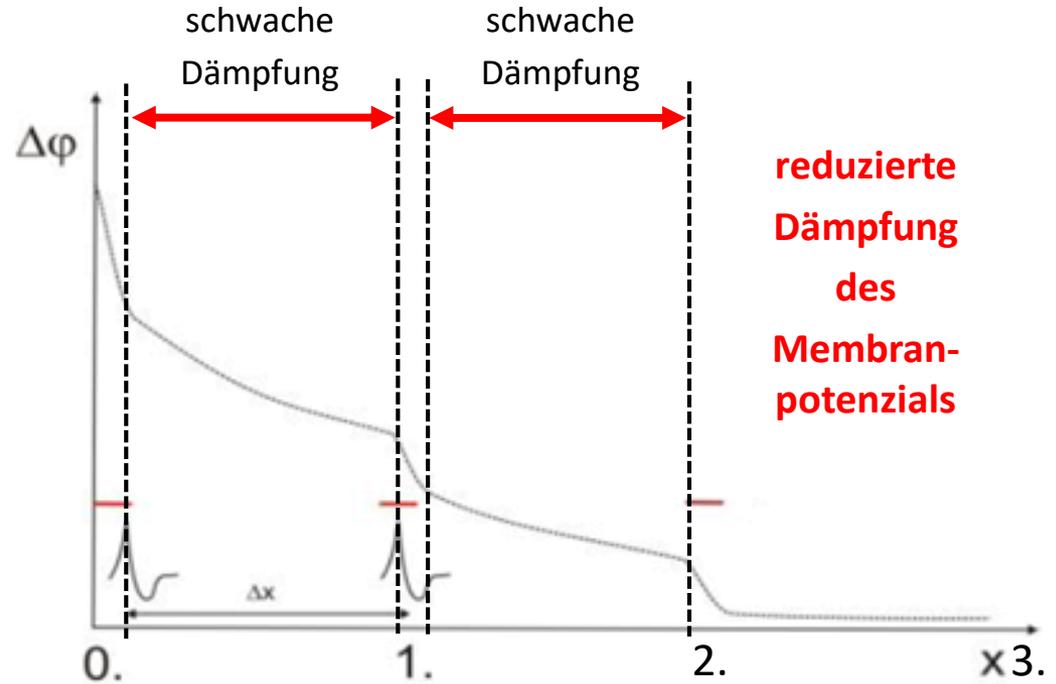
Ausbreitung des Aktionspotenzials #2

elektrisches Modell der Membran



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

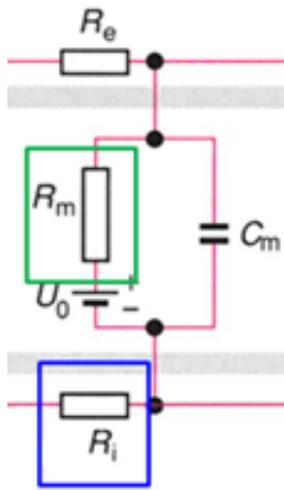
R_m : Widerstand der Membran in Querrichtung
 R_i : Widerstand des intrazellulären Raums



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
Leitungsgeschwindigkeit	0,5-2 m/s	5-30 m/s	35-75 m/s	80-120 m/s
Rezeptoren	Schmerz Temperatur		Haut- Mechanos.	Propriozeption Skelettmuskel

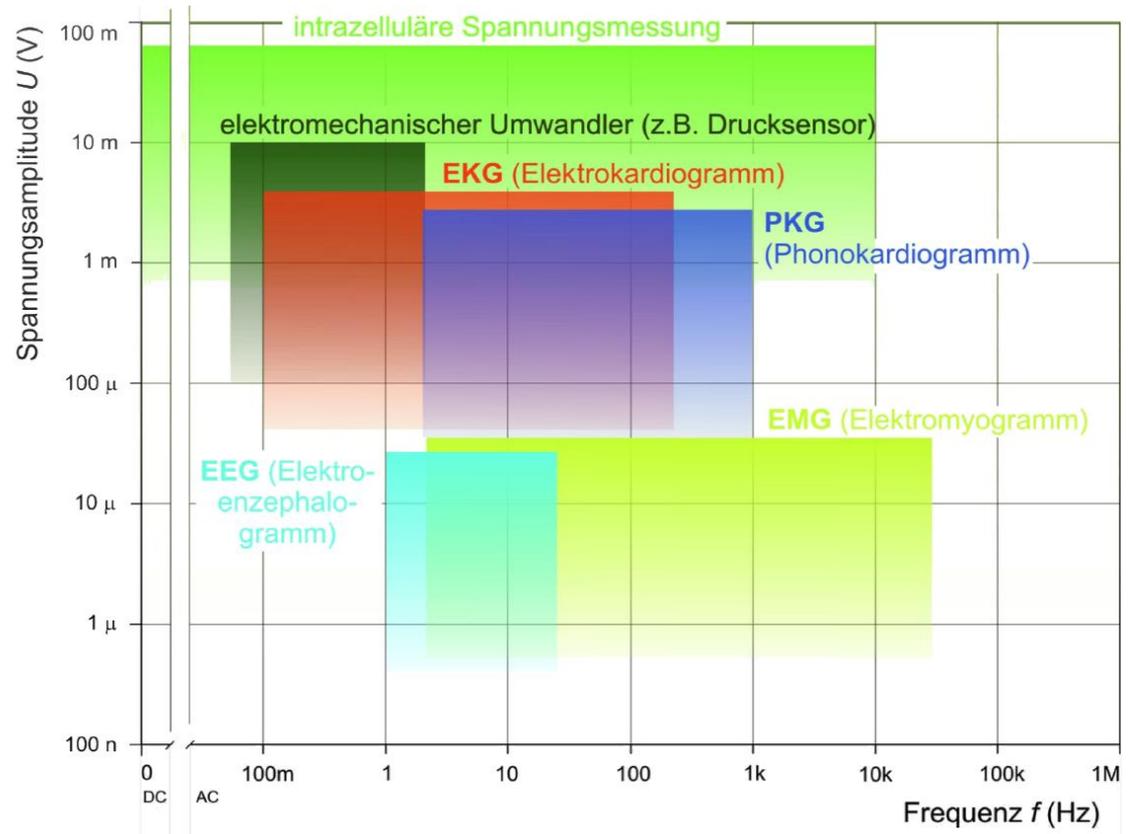
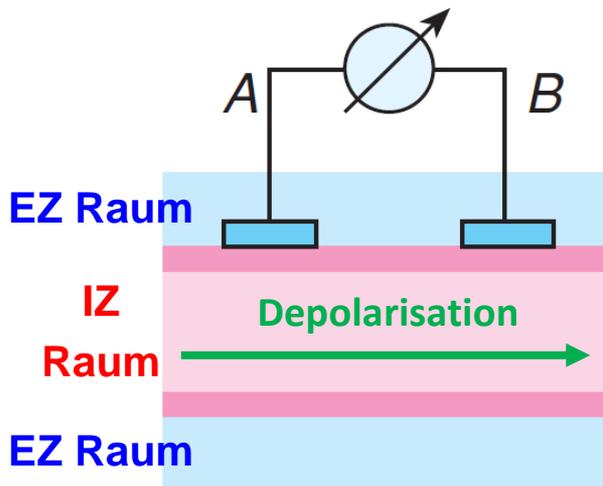
große Querschnitt: schnelle Leitung

Medizinische Anwendungen

Elektrische Signale auf der Körperoberfläche (Diagnostik)

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

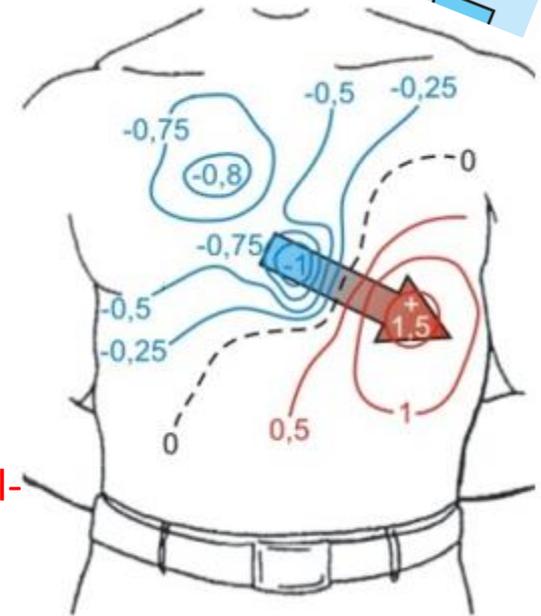
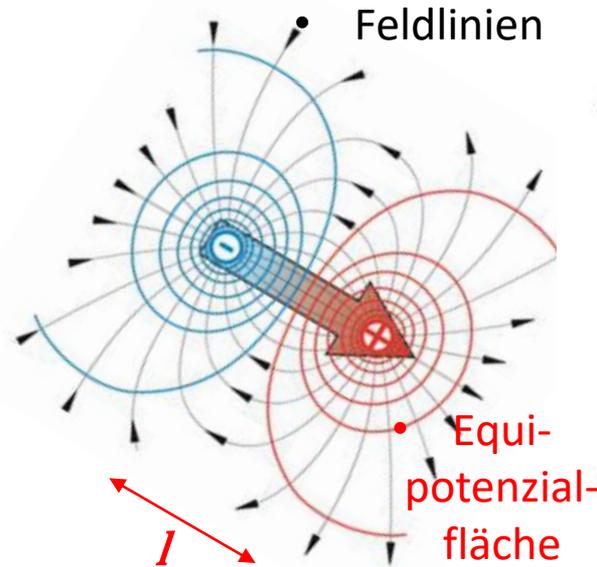
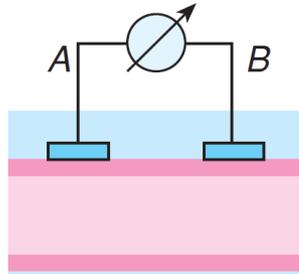
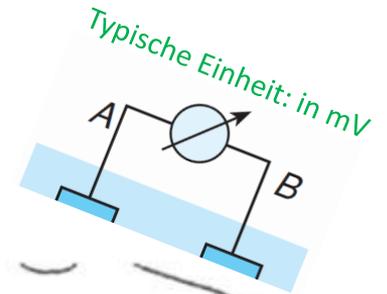
Messmethode:
Spannungsmessung mit
Oberflächenelektroden.



- die Oberflächenelektroden messen das Potenzial des EZ Raums

EKG #1

Das Ladungsfeld des Herzens: Dipolfeld



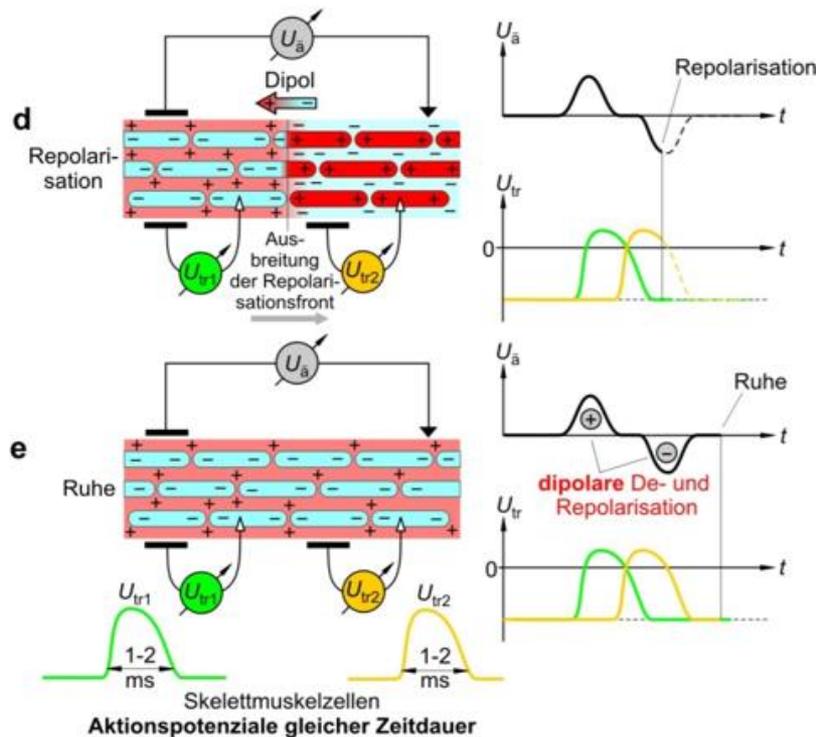
Dipolmoment: d

$$d = Q \cdot l$$

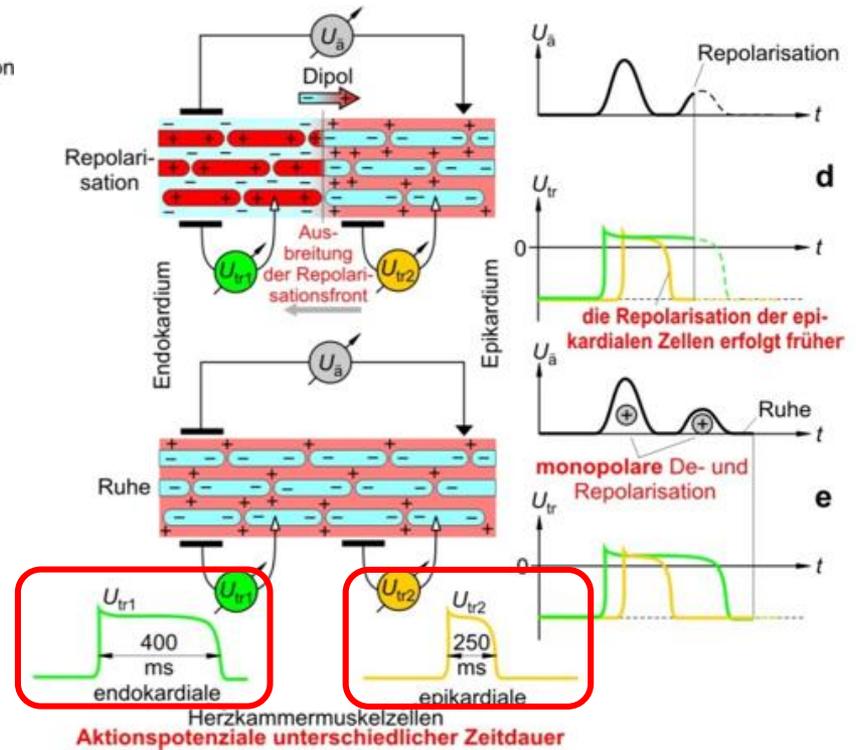
Der Herzdipol ändert seine Richtung und Größe nach dem Erregungszustand des Herzens (quasi-) periodisch.

EKG #3

SKELETTMUSKEL



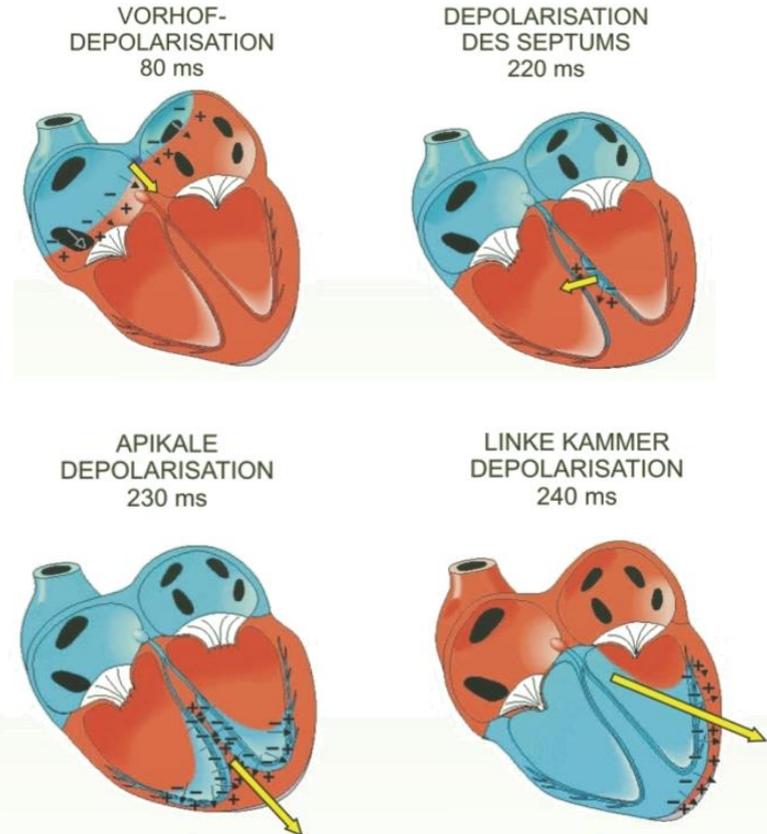
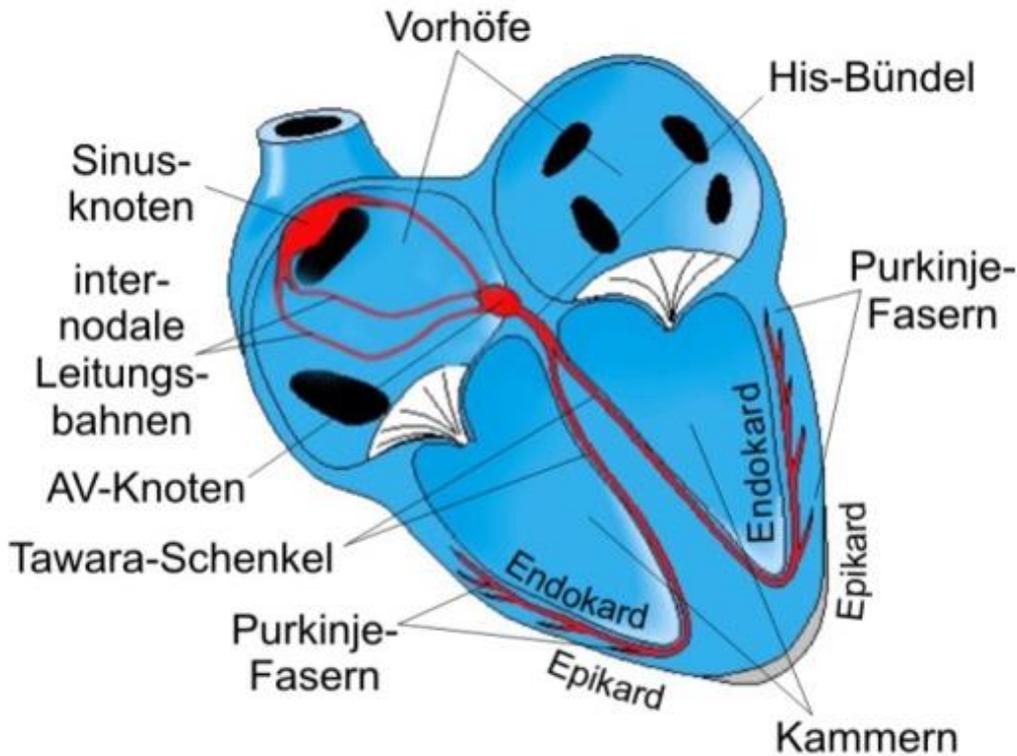
HERZKAMMERMUSKEL



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

EKG #4

Erregungsbildung und Erregungsleitung im Herzen



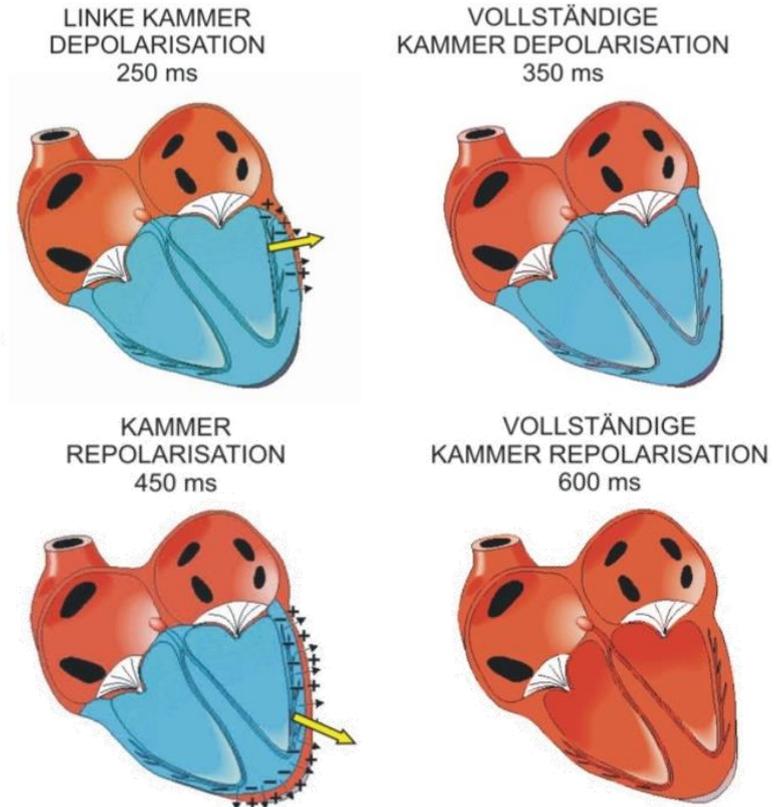
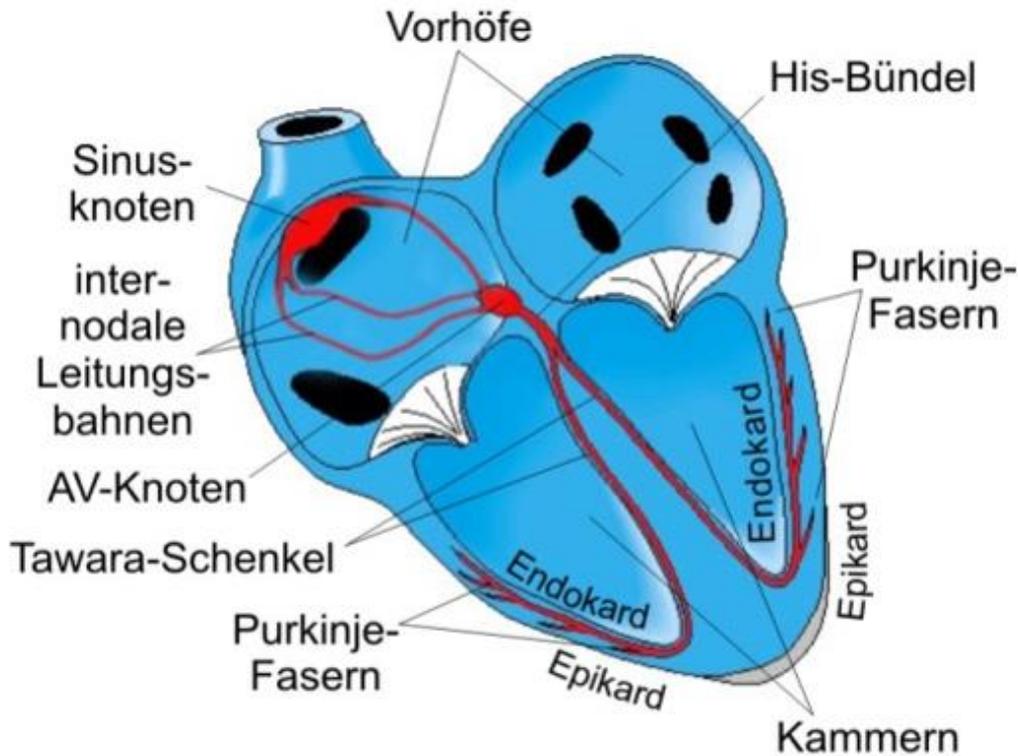
Die Farben repräsentieren das Potenzial (die Ladung) des EC-Raums.

rot: EC positiv (IC negativ)

blau: EC negativ (IC positiv)

EKG #5

Erregungsbildung und Erregungsleitung im Herzen



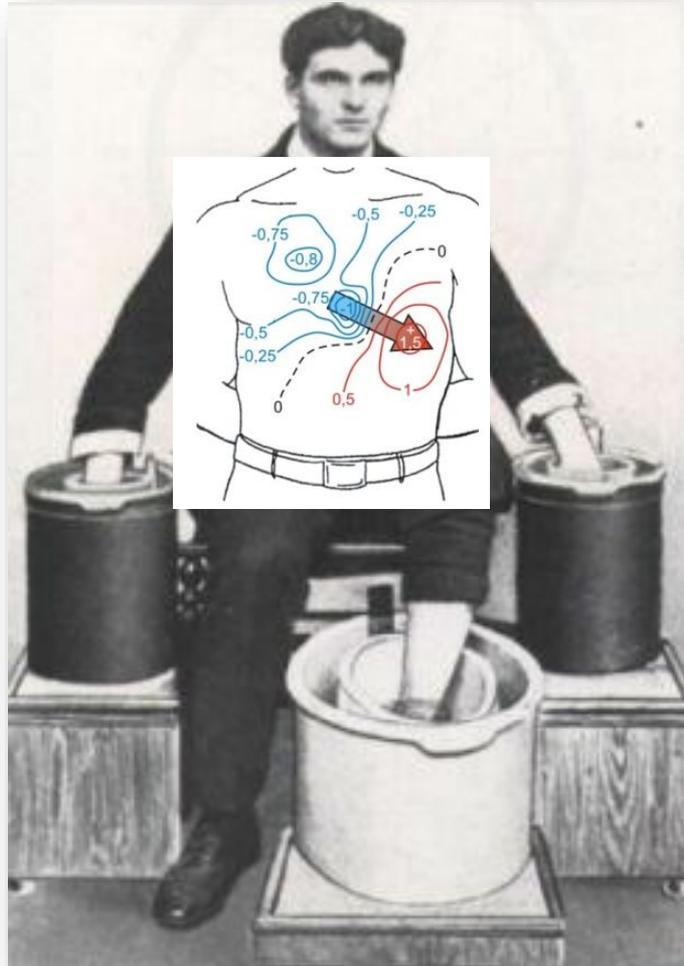
Die Farben repräsentieren das Potenzial (die Ladung) des EC-Raums.

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:

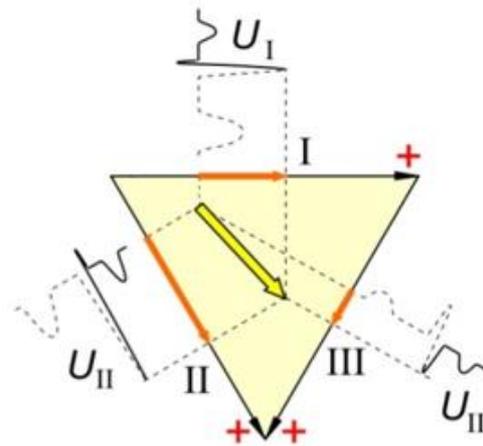
- **bipolare:** Spannung zwischen zwei unterschiedlichen Elektroden.
 - Einthoven: I, II, III
- **unipolare:** Spannung zwischen einer unterschiedlichen und einer indifferenten Elektrode.
 - Wilson: V1, V2, V3, V4, V5, V6
 - (Goldberger: aVR, aVL, aVF)

EKG #7

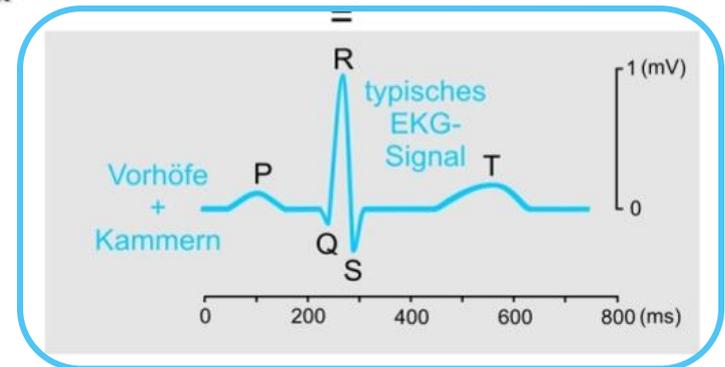
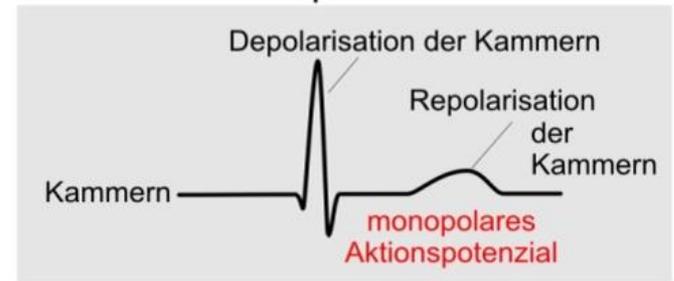
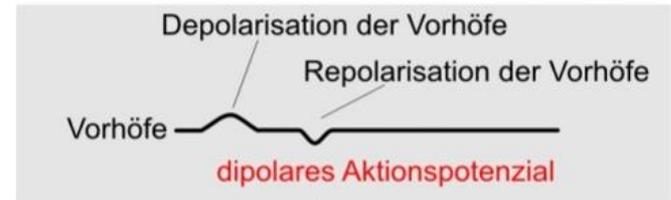
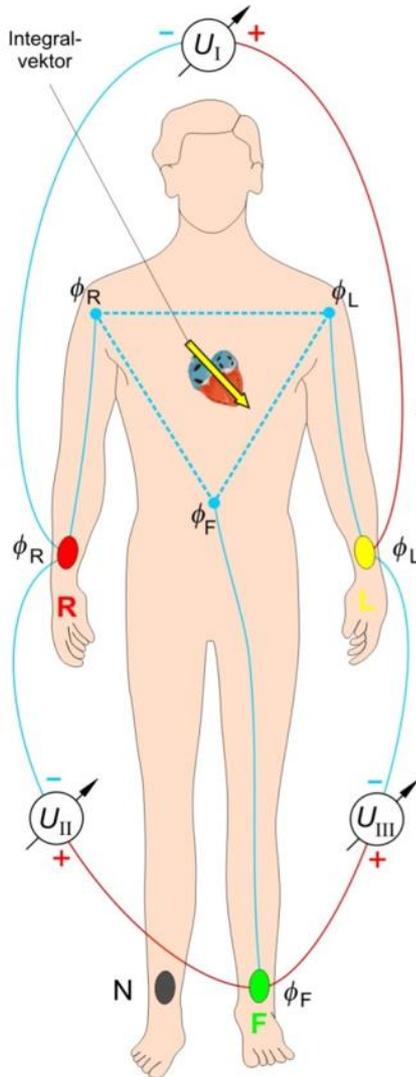
Die Standardableitungen nach Einthoven (I, II, III)

- bipolar
- frontal

Einthoven-Dreieck



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

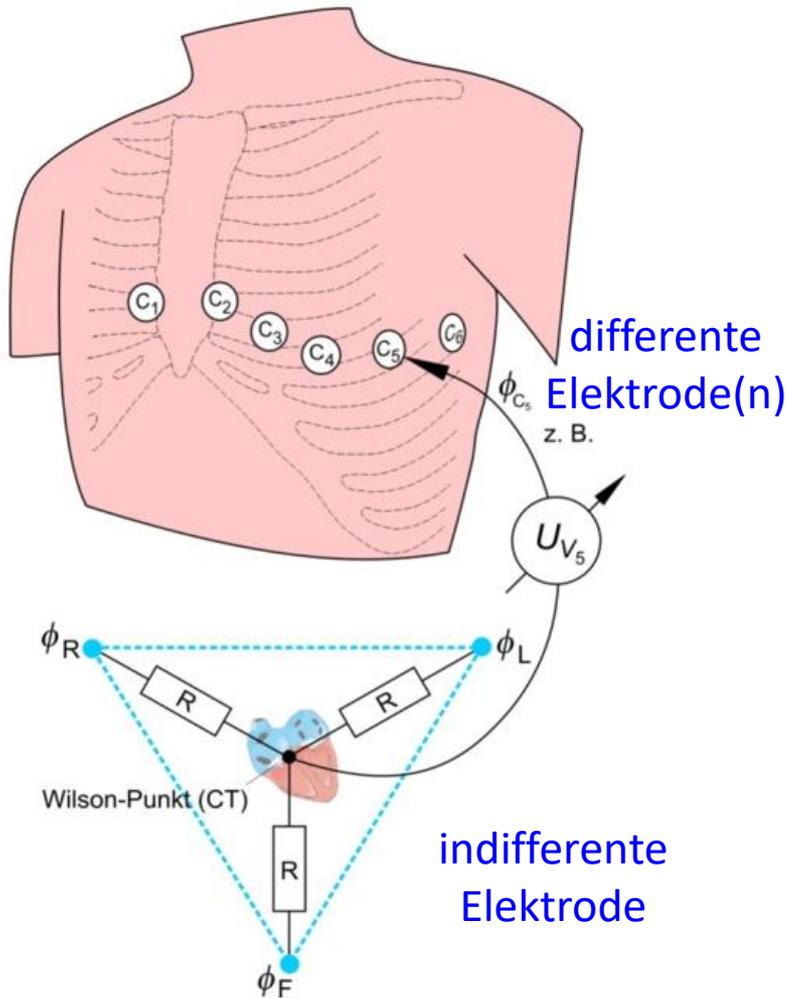


Farbkodierung: RA, LA, LF, RF

EKG #8

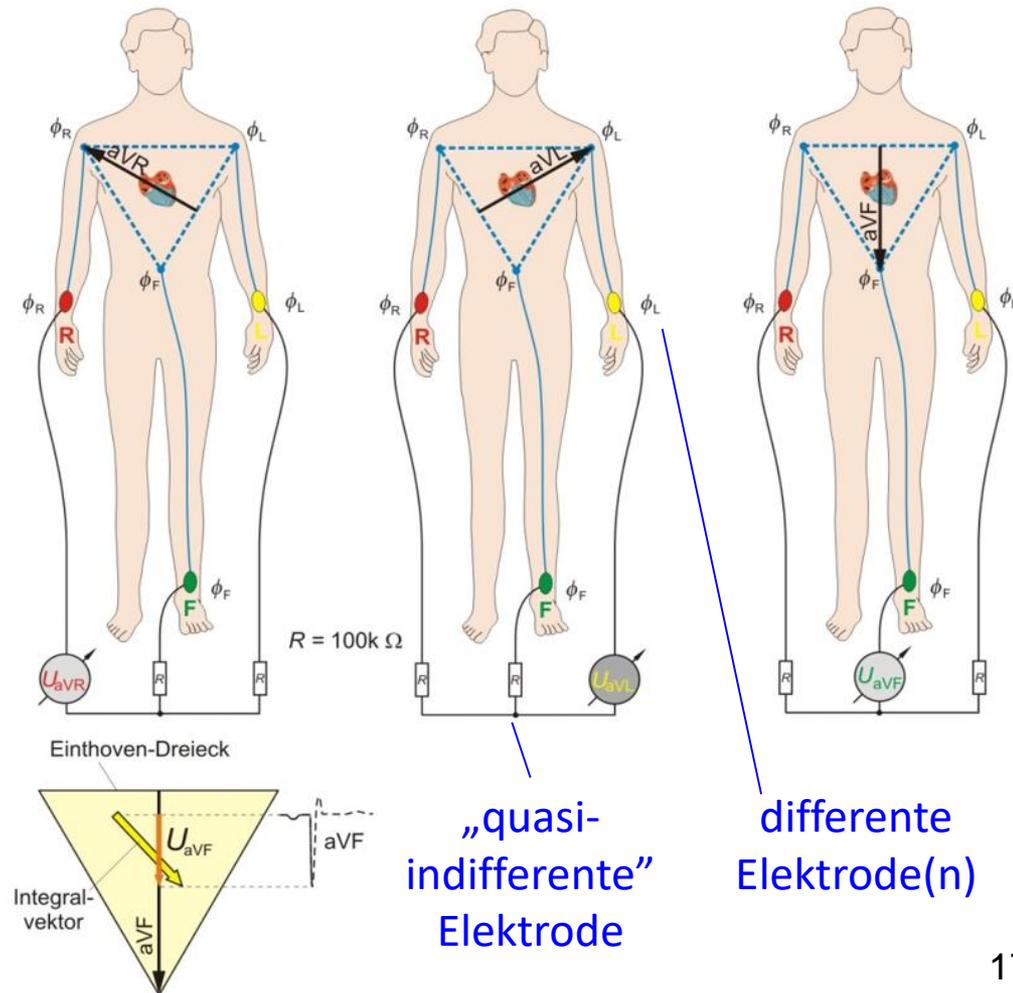
Ableitungen nach Wilson (V1-6)

- unipolar
- horizontal



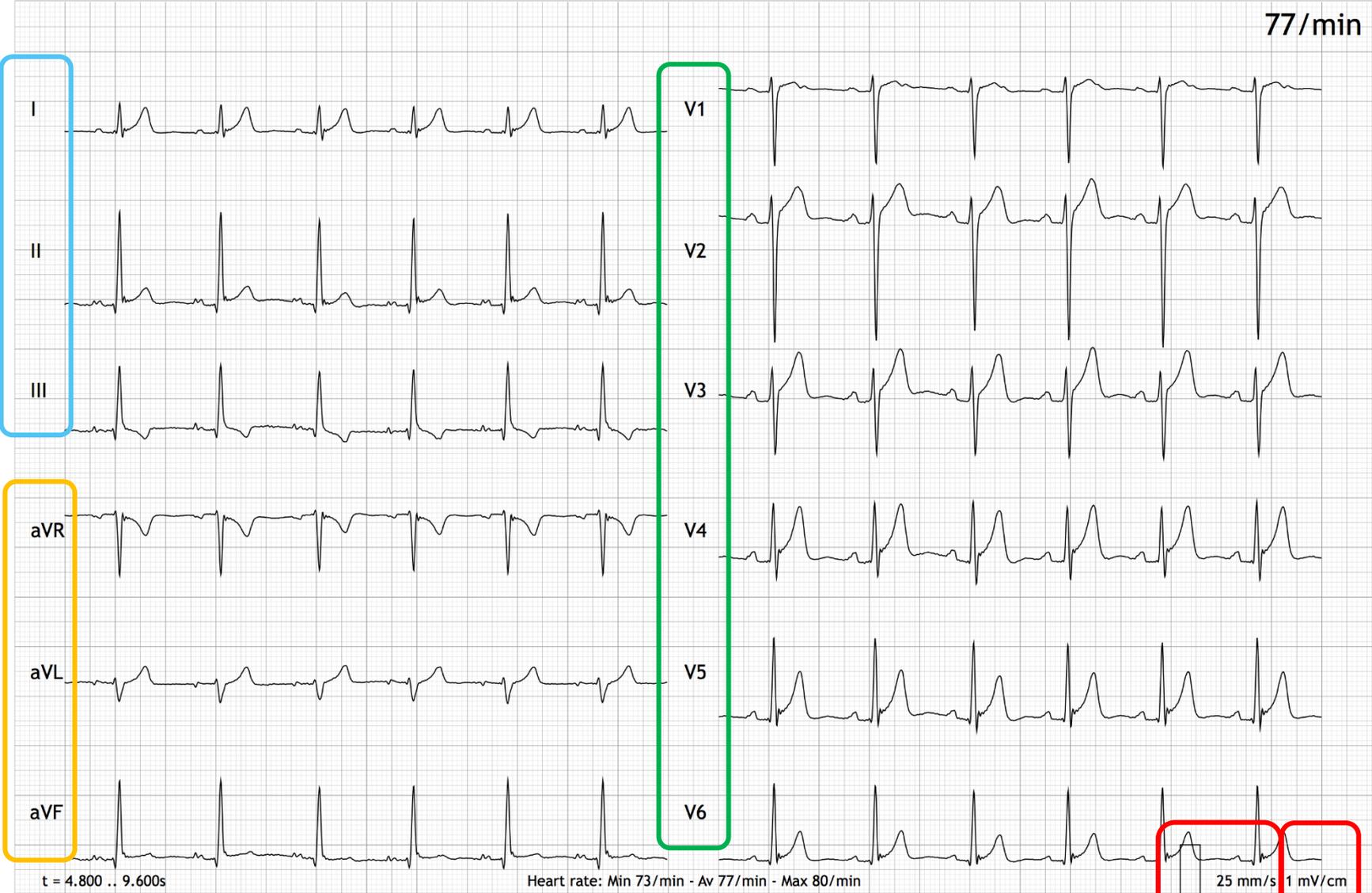
Ableitungen nach Goldberger (aVR, aVL, aVF)

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



EKG #9

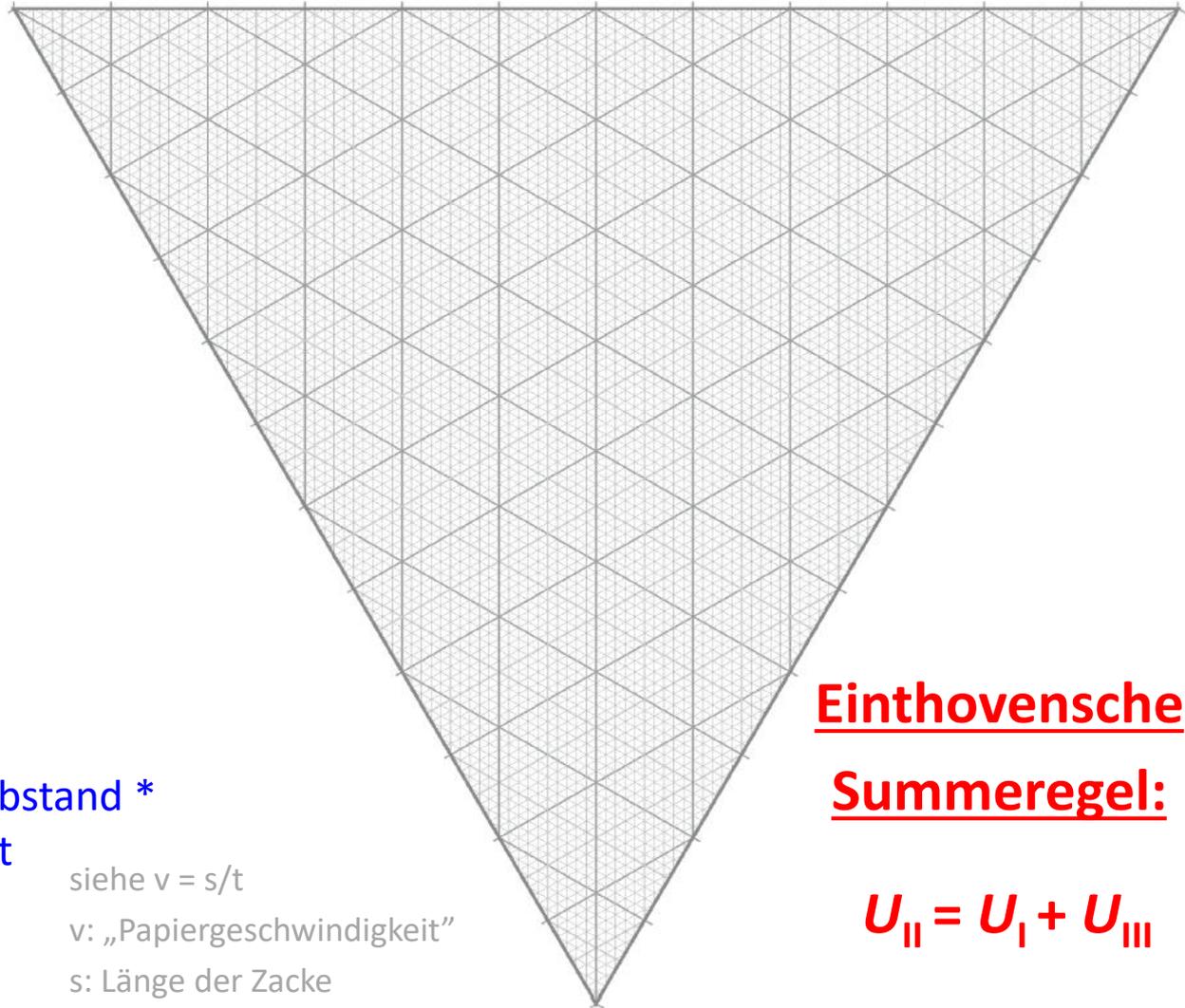
Standard 12-Kanal EKG-Aufnahme



EKG #10

- Kalibrationszeichen (1 mV)

Die Bestimmung der Herzachse

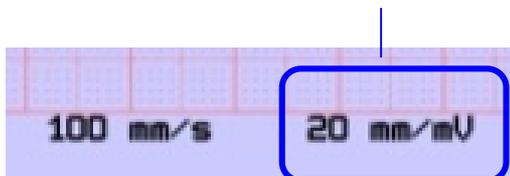


Einthovensche
Summeregeln:

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



- Spannung = vertikaler Abstand *
vertikale Empfindlichkeit



siehe $v = s/t$

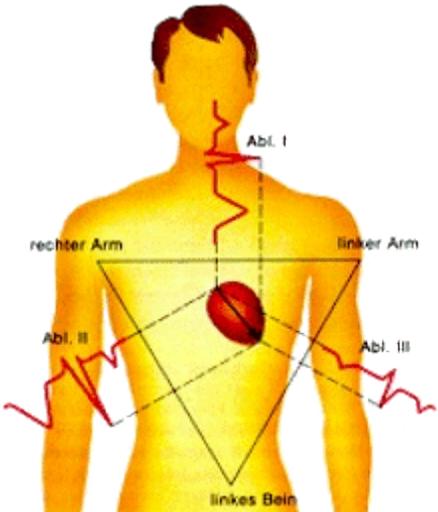
v: „Papiergeschwindigkeit“

s: Länge der Zucke

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

