

# **Erregungsprozesse. Aktionspotenzial.**

## **Elektrische Methoden in der Medizin.**

**Balázs Kiss**

kissb3@gmail.com



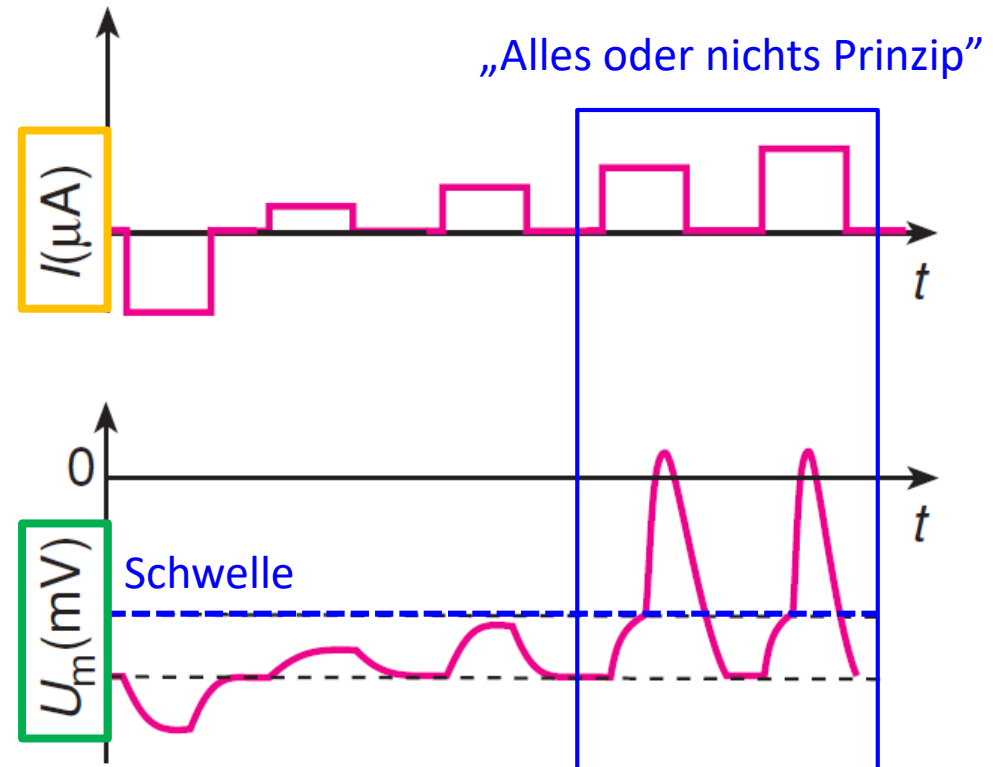
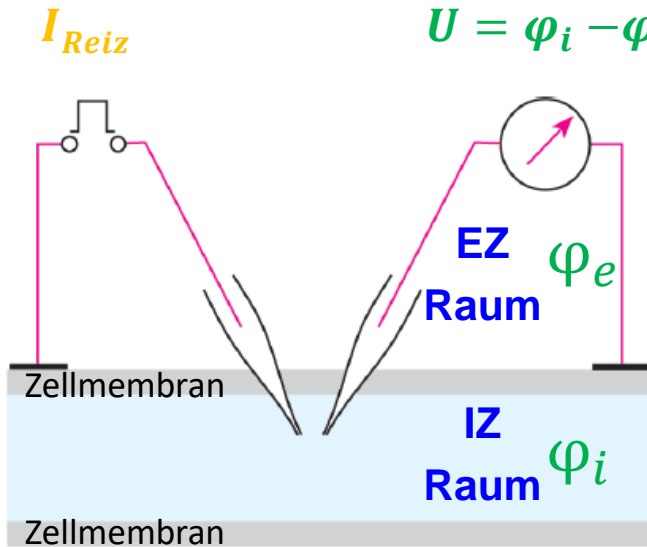
**Myofilament-Mechanobiophysik Forschungsgruppe,  
Semmelweis Universität,  
Institut für Biophysik und Strahlenbiologie.**

*02. Mai 2024*

# Aktionspotenzial #1

stimulierende  
Elektroden

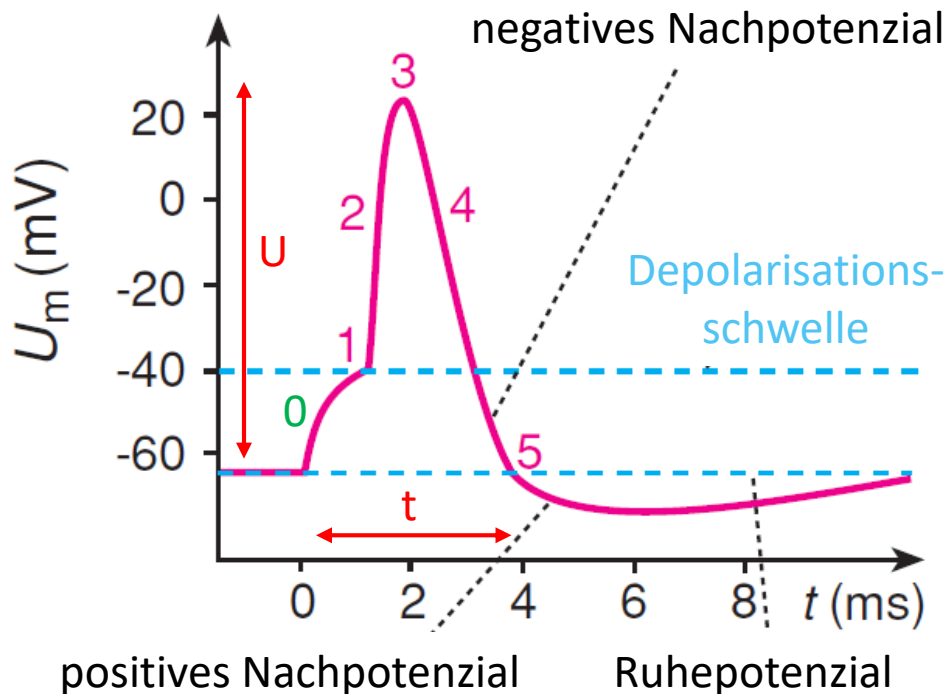
registrierende  
Elektroden



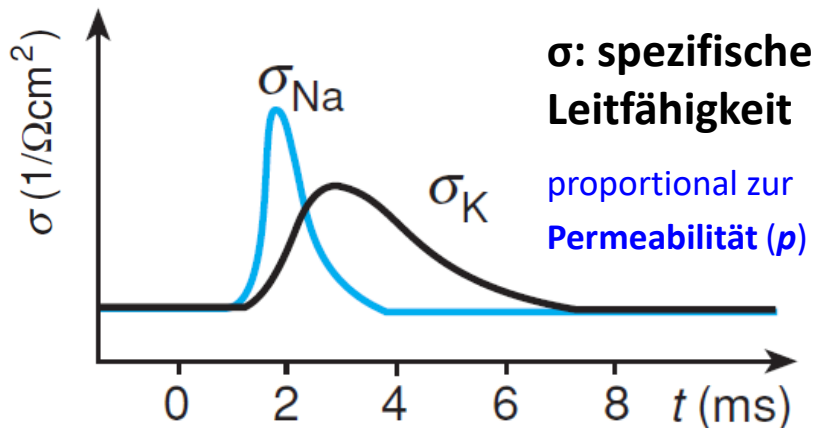
unter einem Schwellenwert: Größe der Antwortsignale ist proportional zur Stromstärke

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

# Aktionspotenzial #2



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

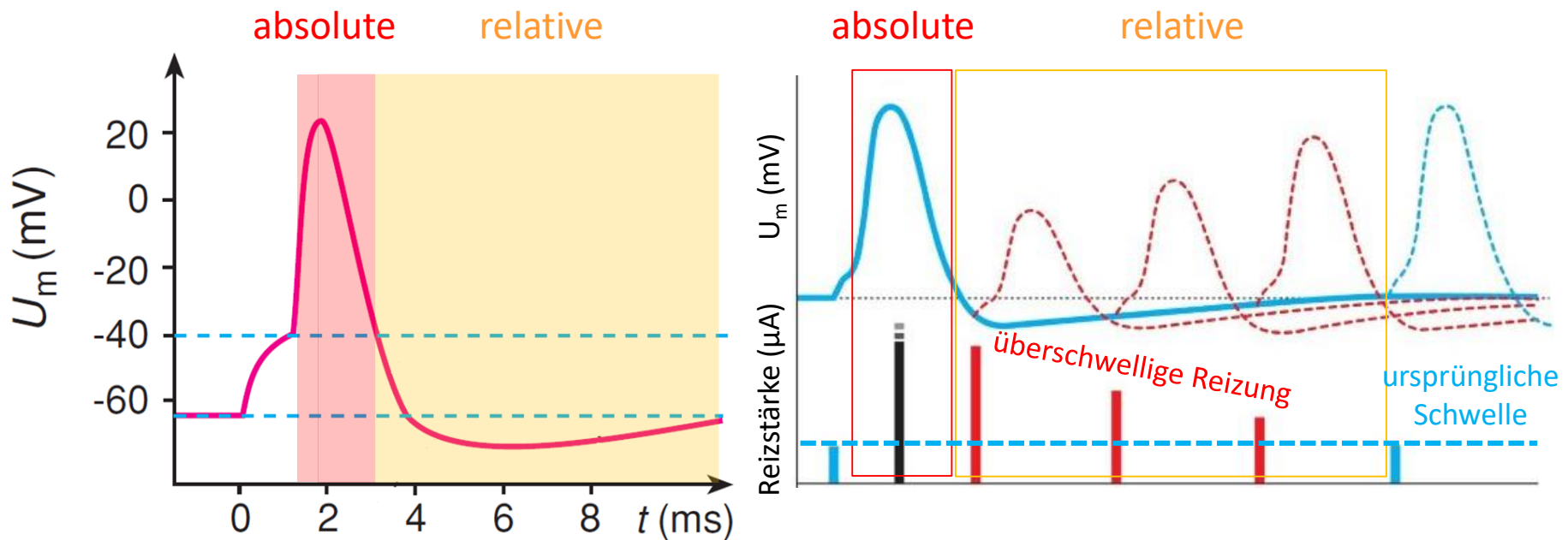


- **$U \sim 100 \text{ mV}$**
- **$t \sim 1-5 \text{ ms}$**
- (Skelettmuskel und Neuron)**

# 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  $\text{Na}^+$ -Kanäle

Die Reizschwelle ist praktisch unendlich groß.

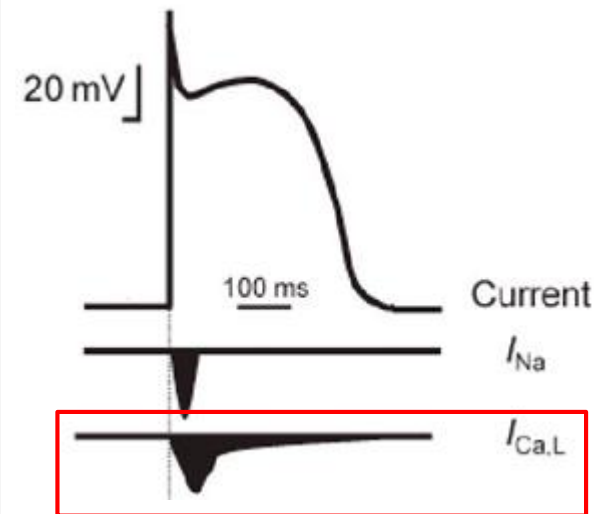
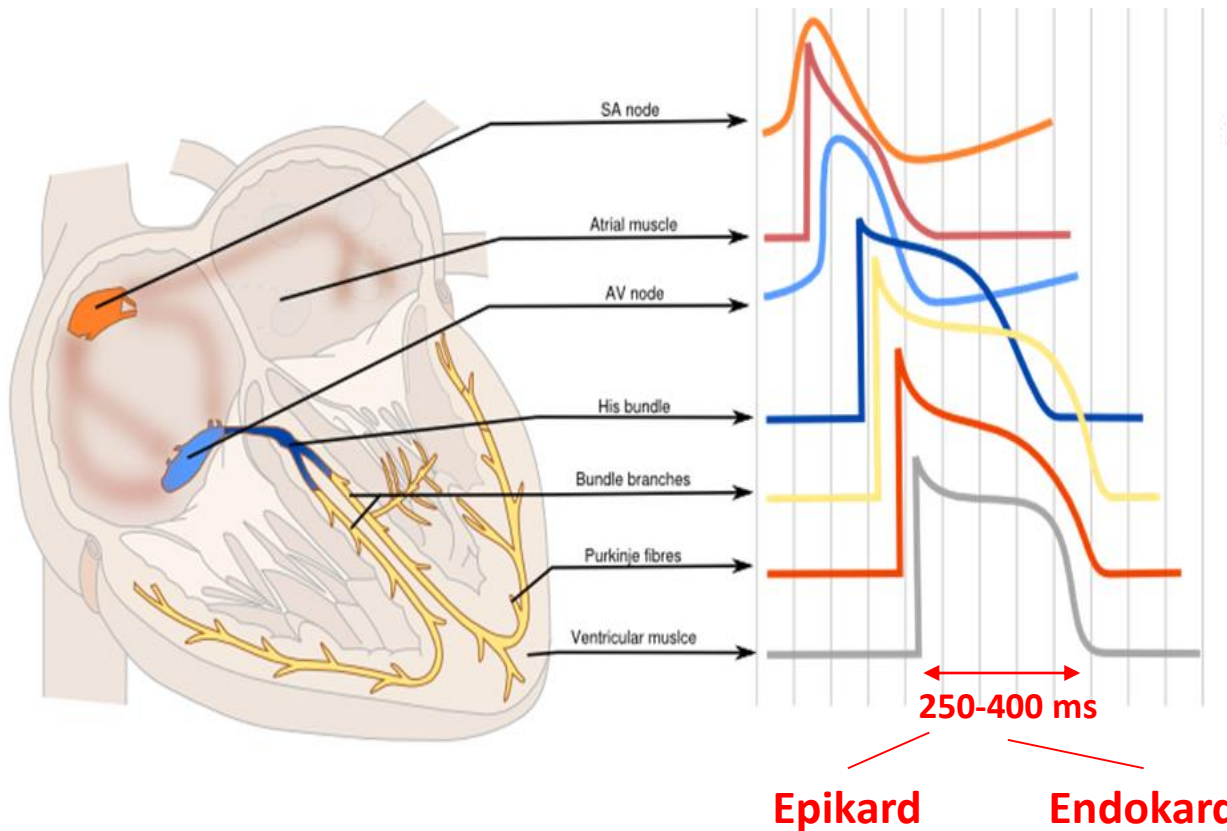
- **relative:** AP geht nur mit überschwelliger Reiz

Wiederöffnung der geschlossenen spannungsgesteuerten  $\text{Na}^+$ -Kanäle.

**verhindert  
die rückwärtige  
Ausbreitung  
des Aktionspotenzials**

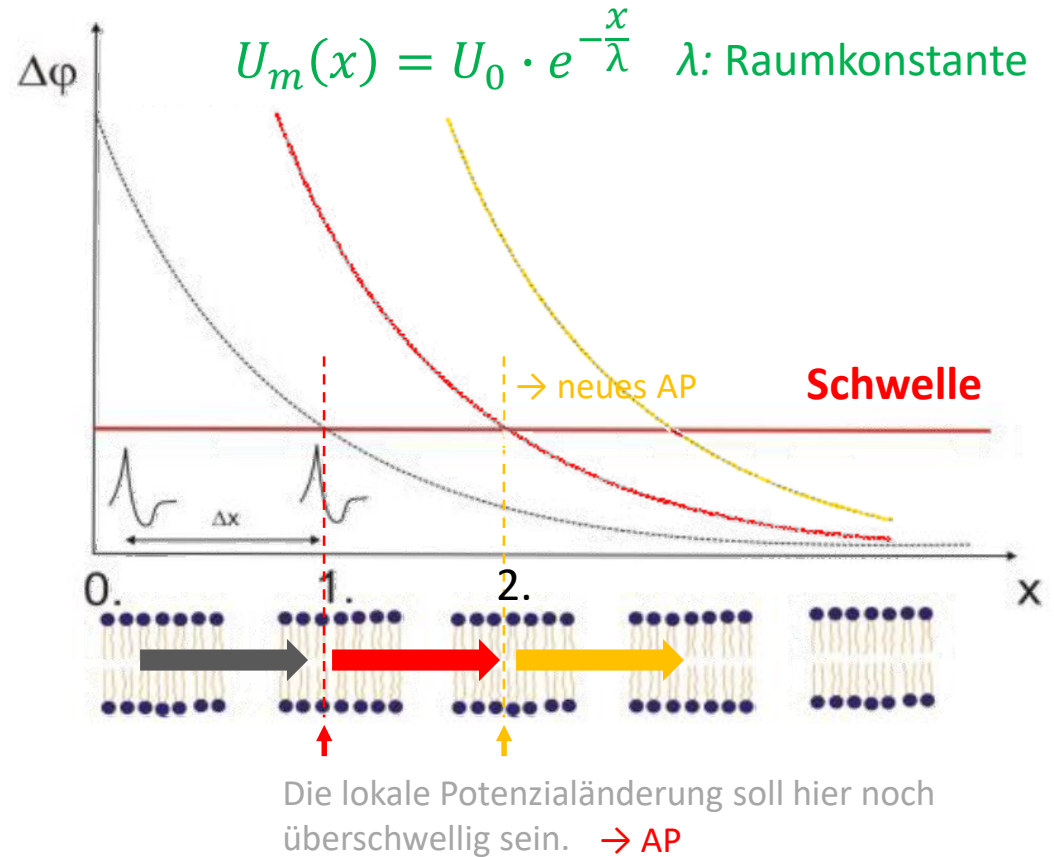
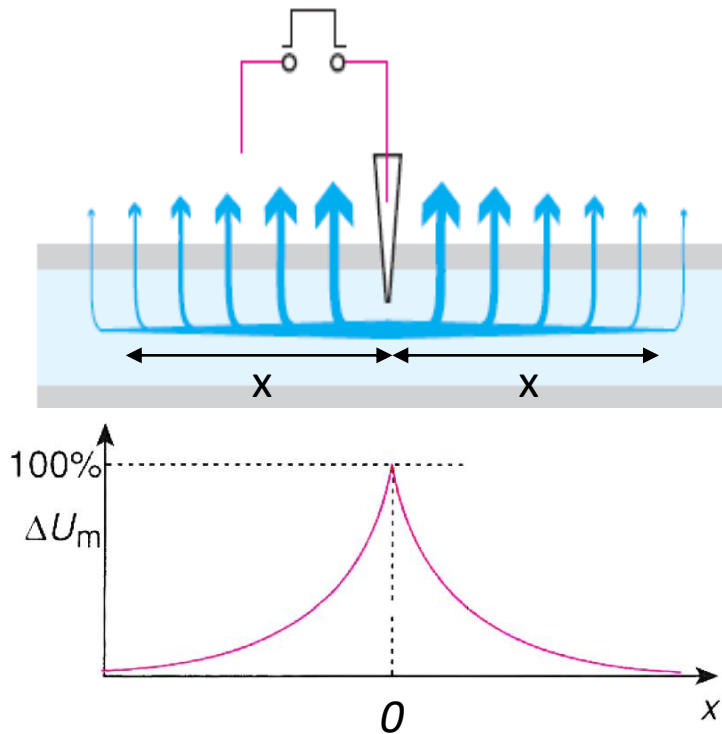
# Eigenschaften des Aktionspotenzials #2

## Spezielles Aktionspotenzial: Herzkammer-Muskelzellen



**spannungsgesteuerte**  
**Ca<sup>2+</sup>-Kanäle**  
(Ca<sup>2+</sup>: Einstrom)

# Ausbreitung des Aktionspotenzials #1

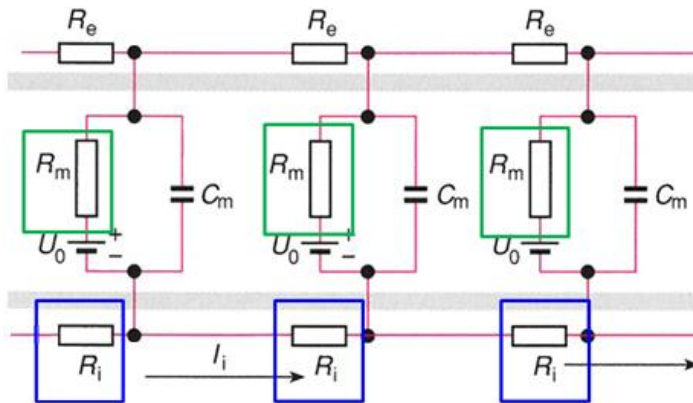


## Eigenschaften:

- 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

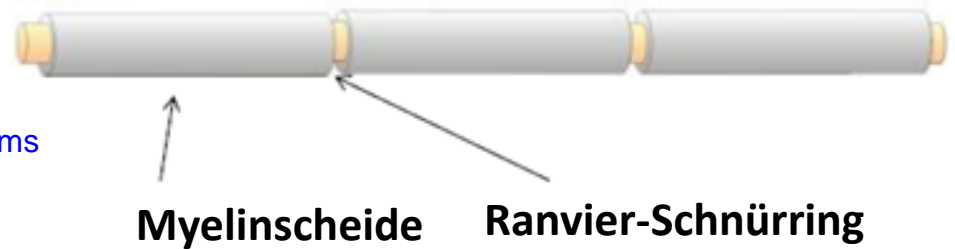
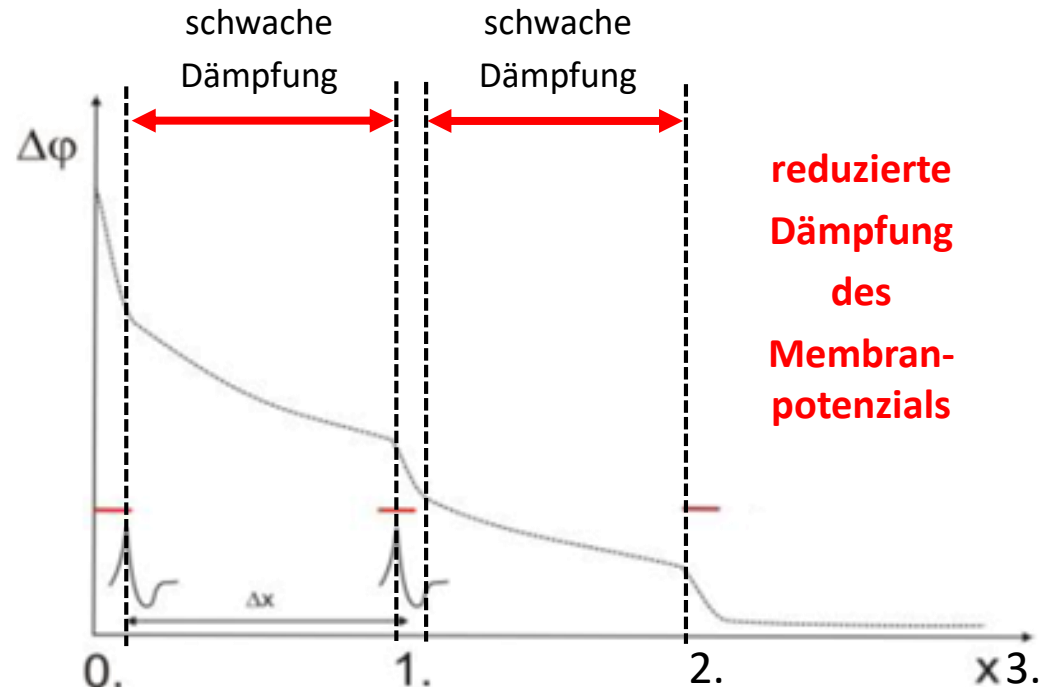
## elektrisches Modell der Membran



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

$R_m$ : Widerstand der Membran  
in Querrichtung

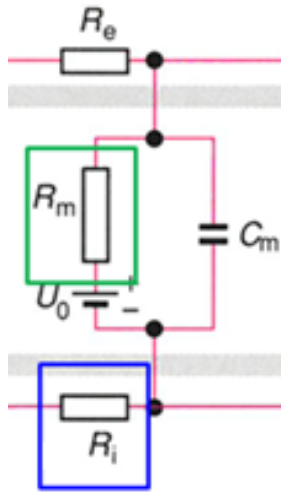
$R_i$ : Widerstand des intrazellulären Raums



$R_m$  ist groß: hohe Raumkonstante  $\lambda$ : Myelinscheide

$R_i$  ist klein: hohe Raumkonstante  $\lambda$ : große Querschnittsfläche der schnell leitenden Nerven

# Ausbreitung des Aktionspotenzials #3



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

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

$\rho$ : spezifischer Widerstand

$l$ : Länge des Leiters

$A$ : Querschnittsfläche des Nerves

Axone ... ...von der Haut ...von Muskeln	C IV	A delta III	A beta II	A alpha I
Durchmesser	0,2-1,5 $\mu\text{m}$	1-5 $\mu\text{m}$	6-12 $\mu\text{m}$	13-20 $\mu\text{m}$
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

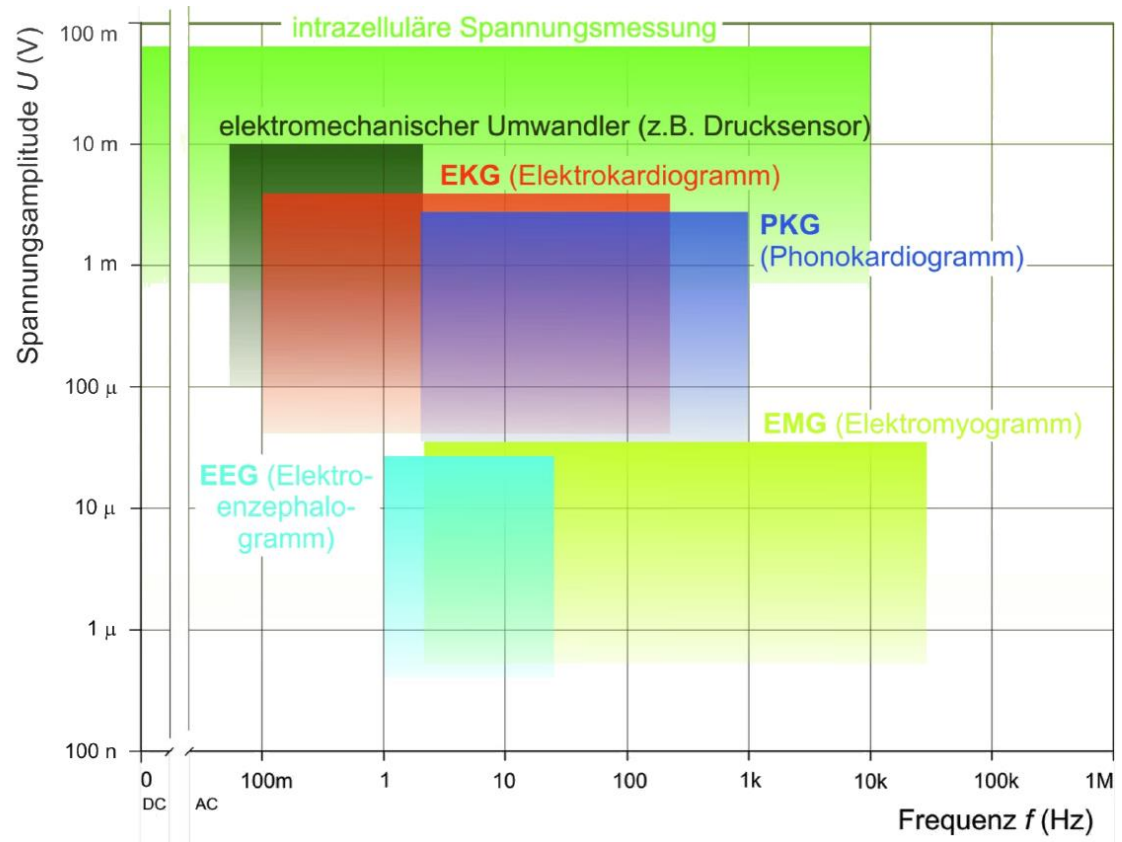
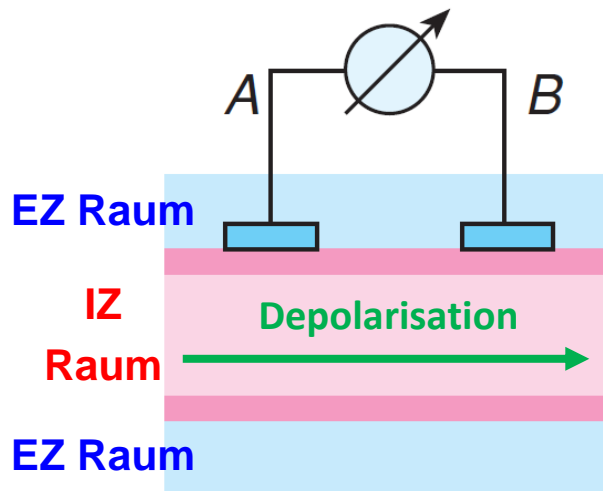


# Medizinische Anwendungen

## Elektrische Signale auf der Körperoberfläche (Diagnostik)

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

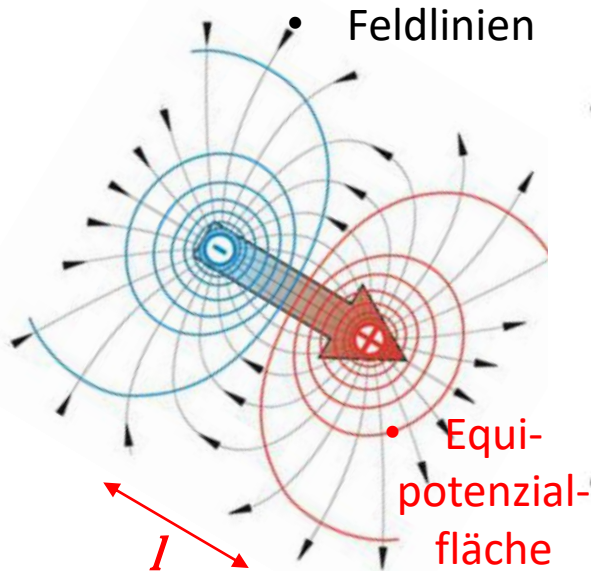
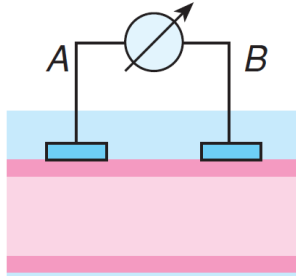
**Messmethode:**  
Spannungsmessung mit  
Oberflächenelektroden.



- die Oberflächenelektroden messen das Potenzial des EZ Raums

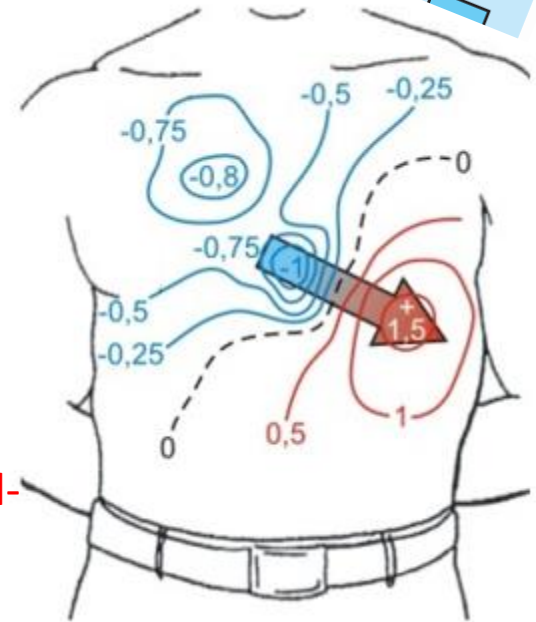
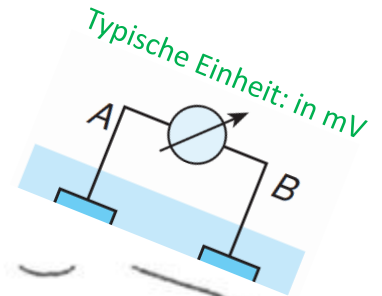
# EKG #1

## Das Ladungsfeld des Herzens: **Dipolfeld**



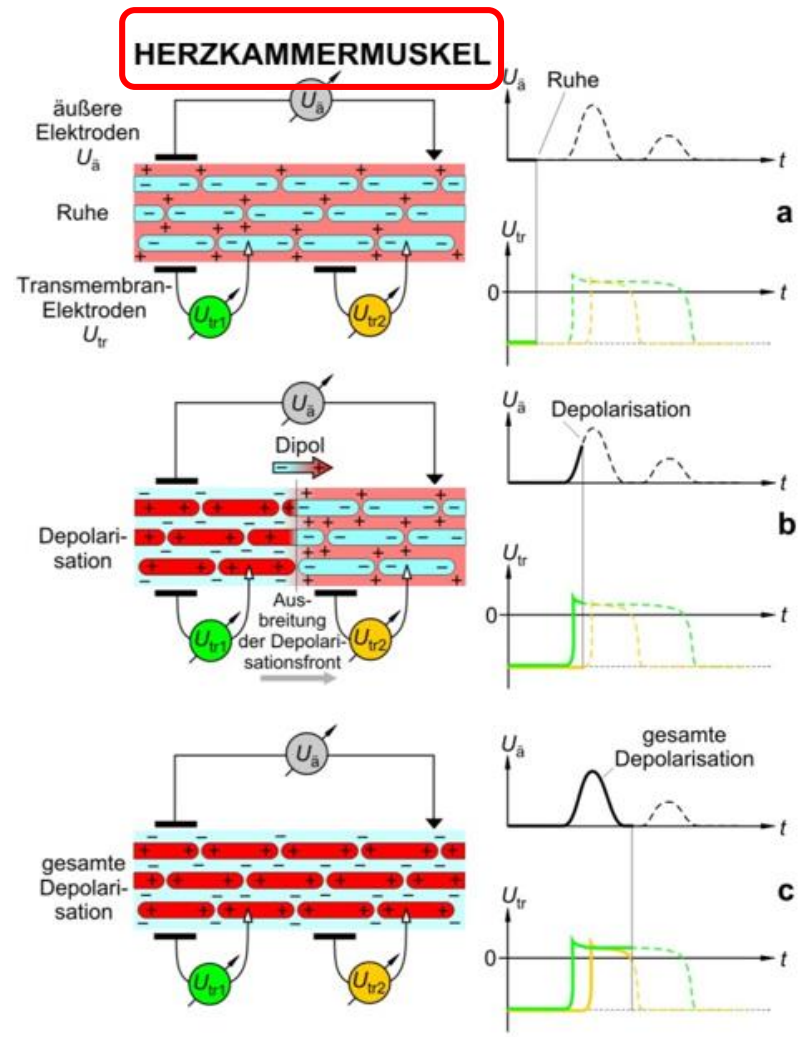
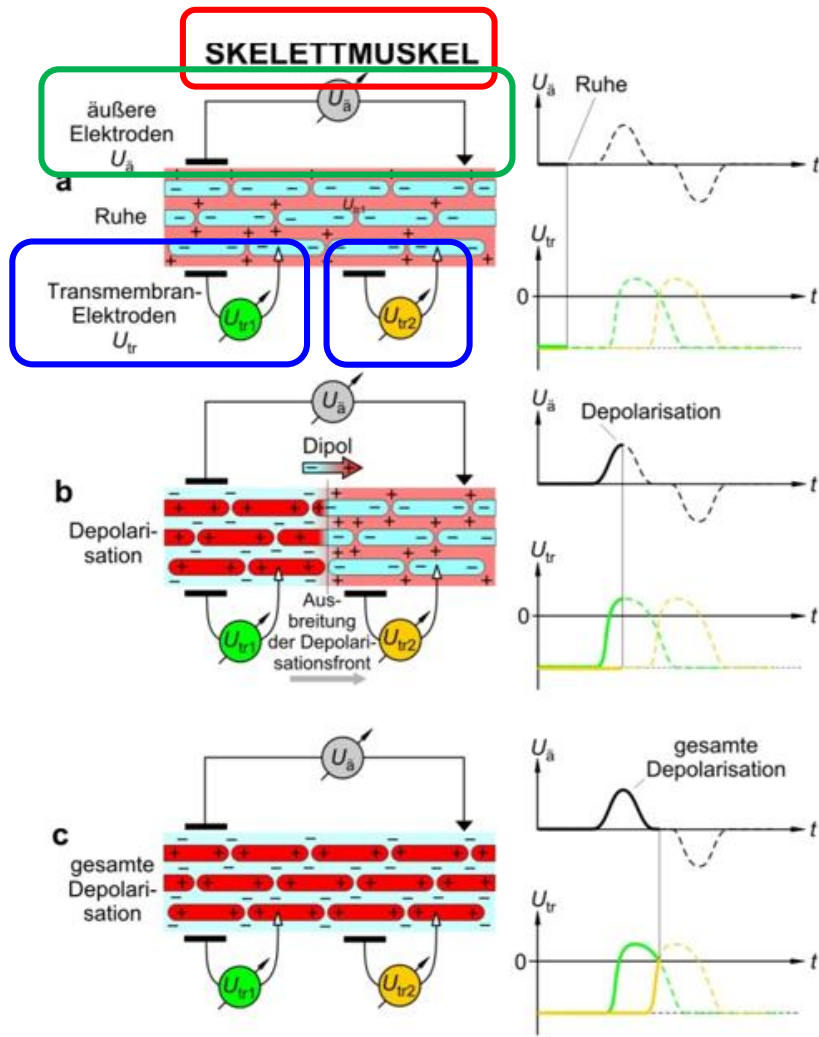
**Dipolmoment:  $d$**

$$d = Q \cdot l$$



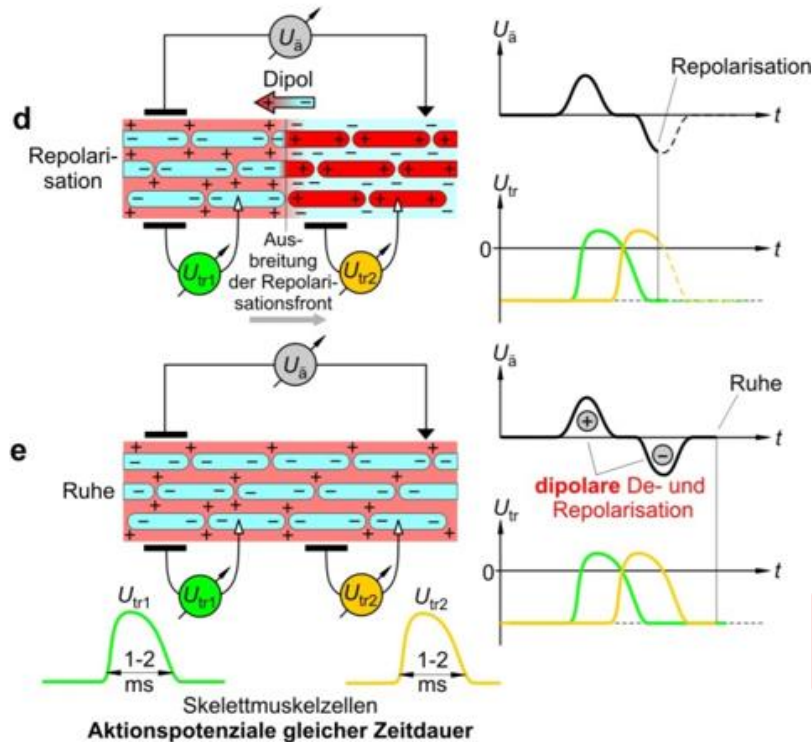
Der Herzdipol ändert seine Richtung und Größe nach dem Erregungszustand des Herzens (quasi-) periodisch.

# EKG #2

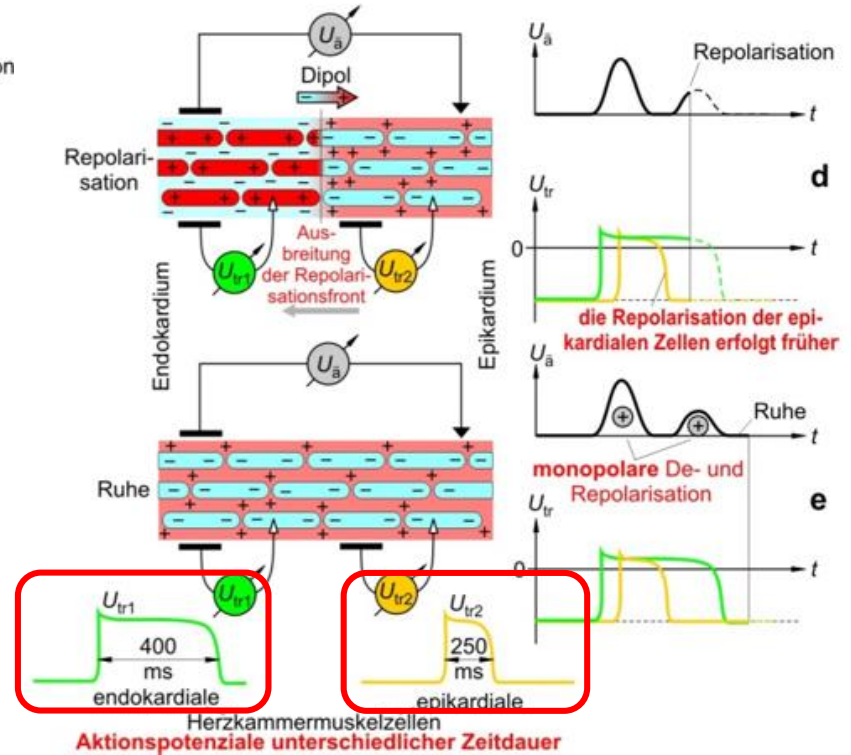


# EKG #3

## SKELETTMUSKEL



## HERZKAMMERMUSKEL

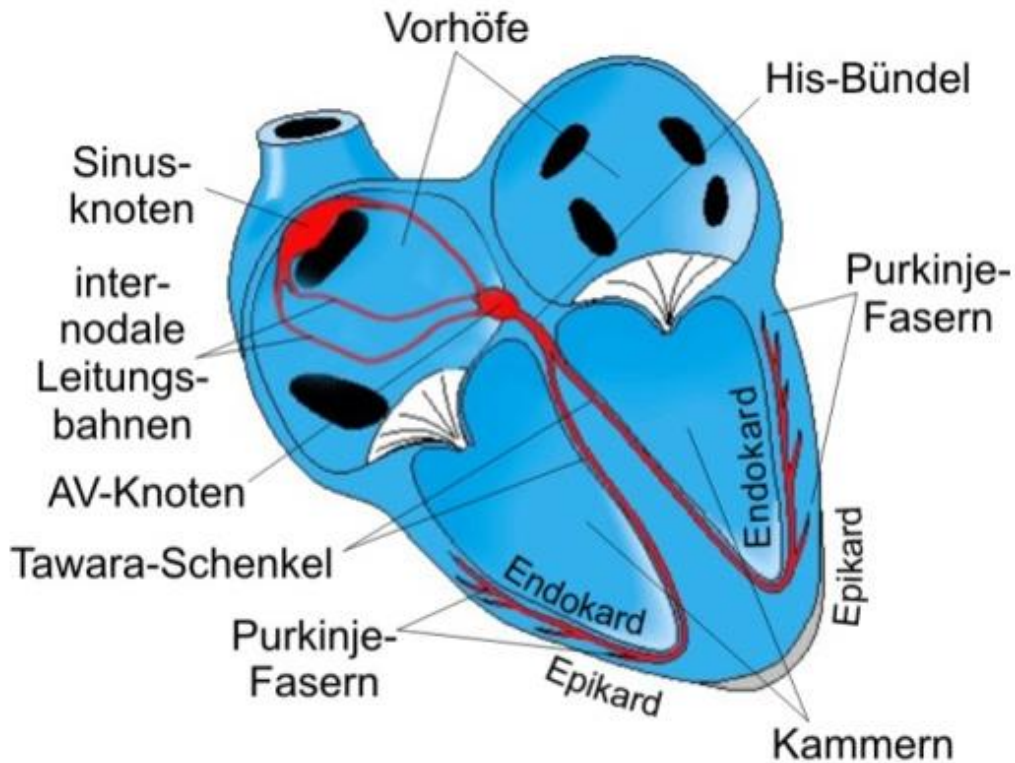


- **Skelettmuskelzellen:** kurze, aber gleich lange Aktionspotenziale (1-2 ms): positiven Depolarisationsfront und negative Repolarisationsfront (**dipolare Potenzialänderung gemessen mit Oberflächen Elektroden**).
- **Herzkammermuskelzellen:** ein vom Endokard zum Perikard hin immer kürzer werdendes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

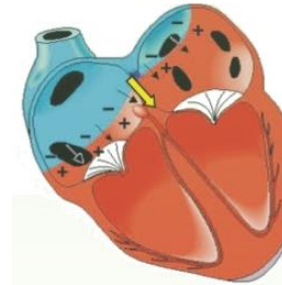


# EKG #4

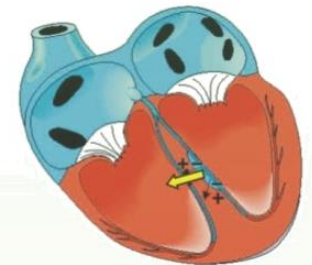
## Erregungsbildung und Erregungsleitung im Herzen



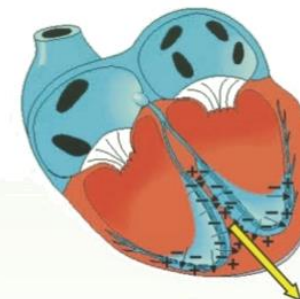
VORHOF-  
DEPOLARISATION  
80 ms



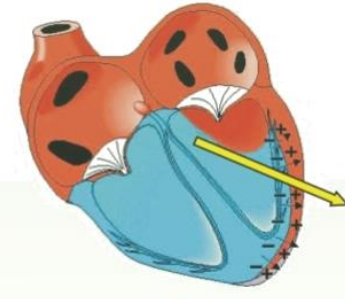
DEPOLARISATION  
DES SEPTUMS  
220 ms



APIKALE  
DEPOLARISATION  
230 ms



LINKE KAMMER  
DEPOLARISATION  
240 ms



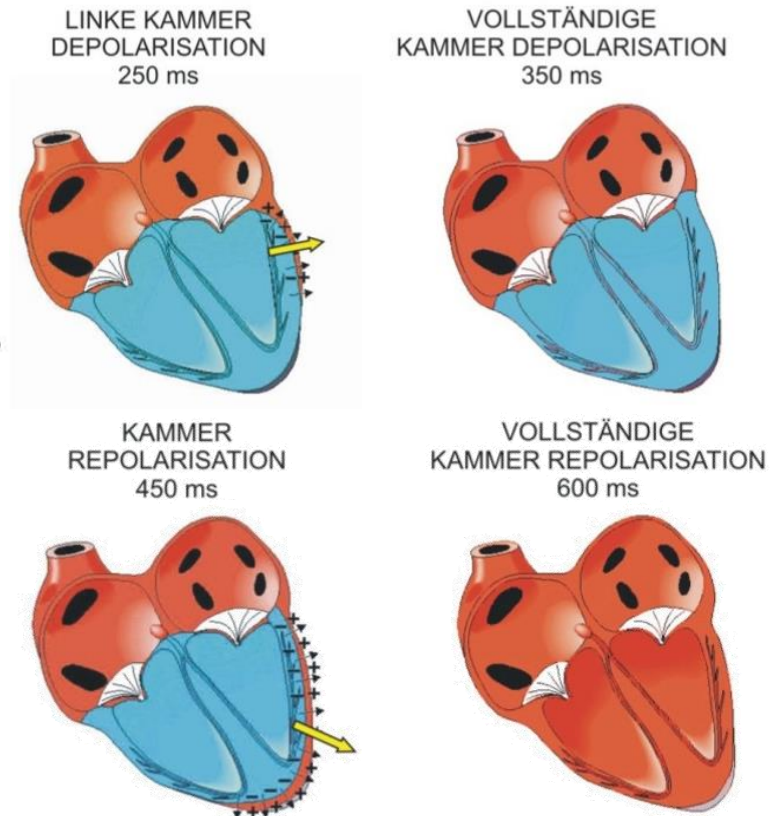
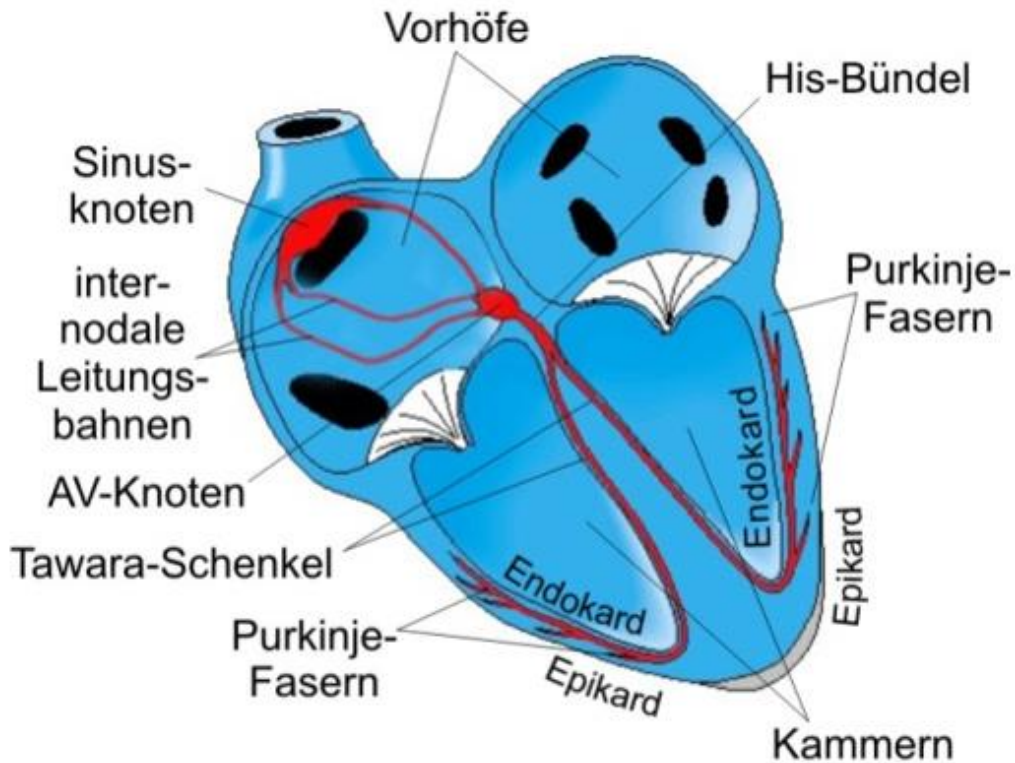
Die Farben repräsentieren das Potenzial (die Ladung) des EC-Raums.

rot: EC positiv (IC negativ)

blau: EC negativ (IC positiv)

# EKG #5

## Erregungsbildung und Erregungsleitung im Herzen



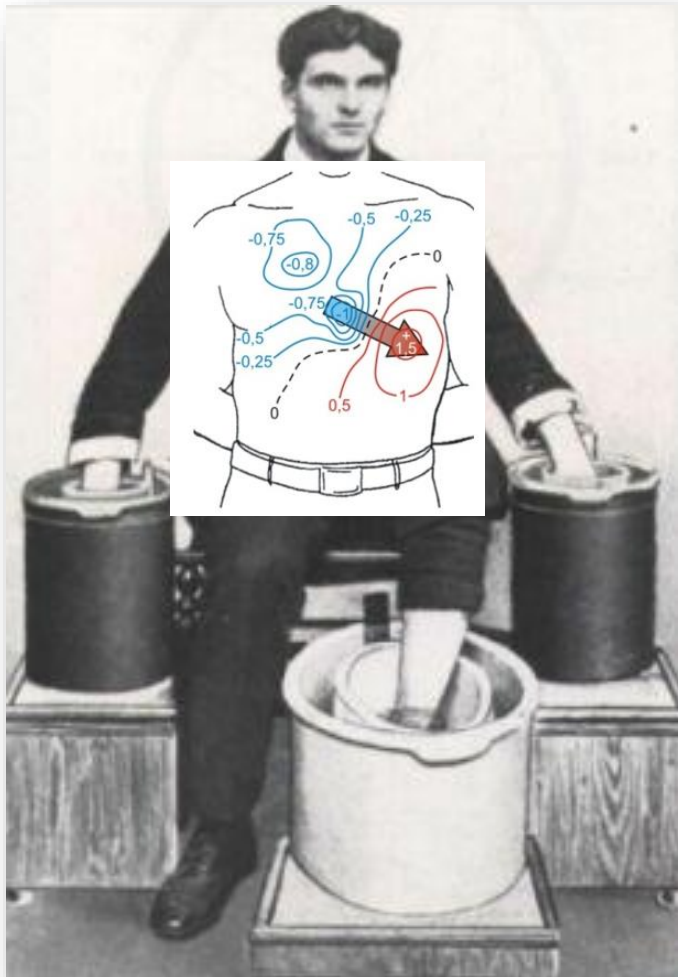
Die Farben repräsentieren das Potenzial (die Ladung) des EC-Raums.

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:

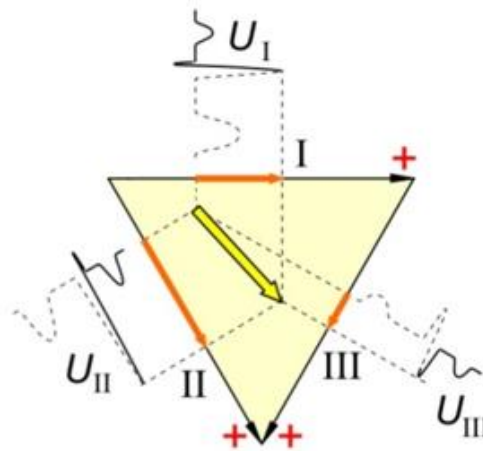
- **bipolare:** Spannung zwischen zwei differenten Elektroden.
  - Einthoven: I, II, III
- **unipolare:** Spannung zwischen einer differenten und einer indifferenten Elektrode.
  - Wilson: V1, V2, V3, V4, V5, V6
  - (Goldberger: aVR, aVL, aVF)

# EKG #7

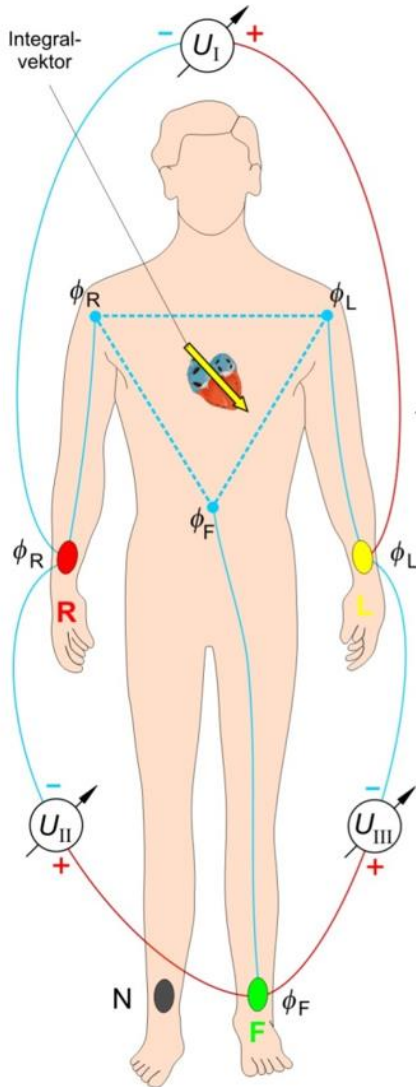
## Die Standardableitungen nach Einthoven (I, II, III)

- bipolar
- frontal

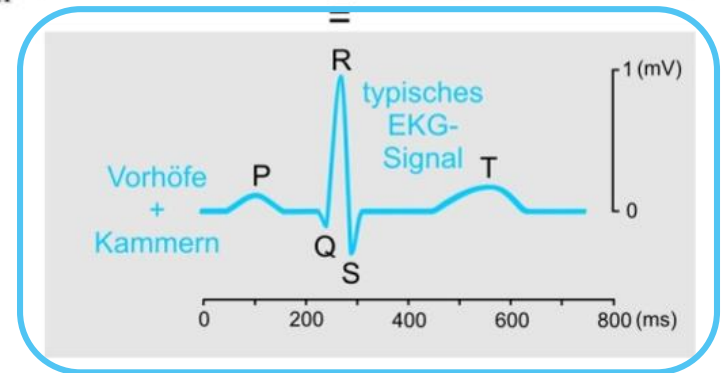
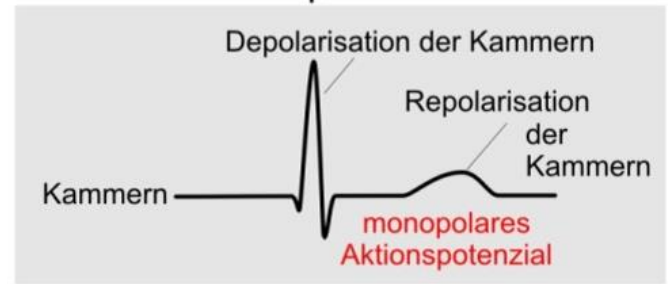
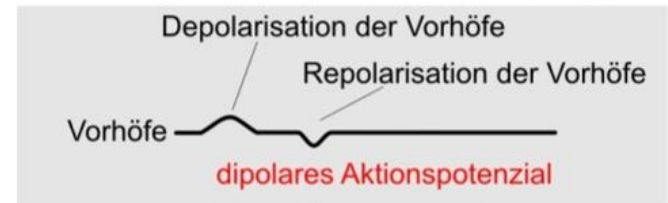
### Einthoven-Dreieck



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



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



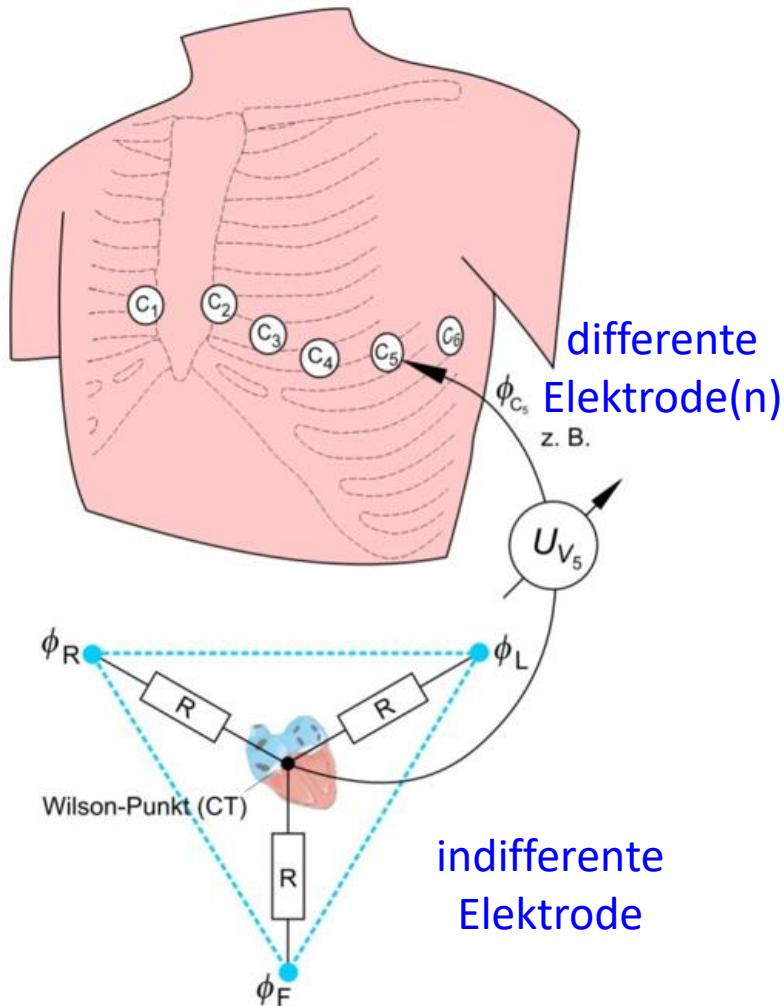
typische EKG-Kurve



# EKG #8

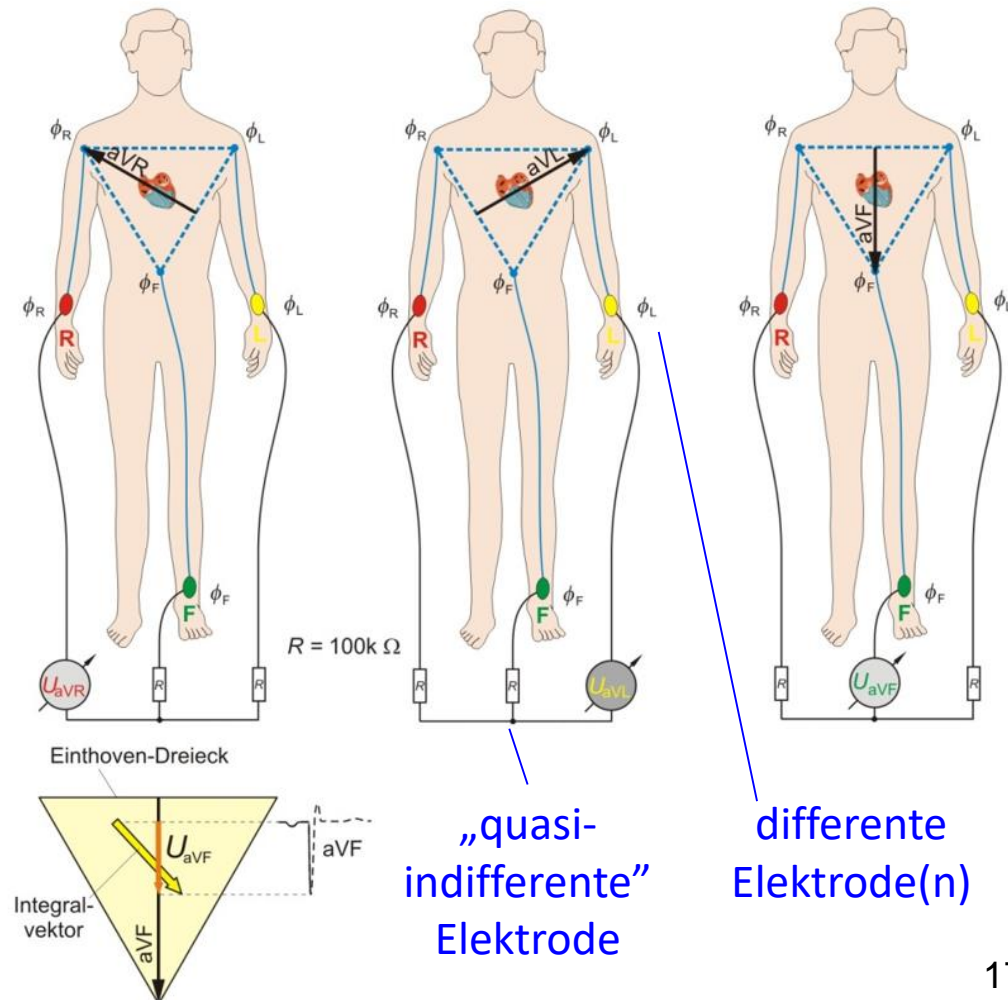
## Ableitungen nach Wilson (V1-6)

- unipolar
- horizontal



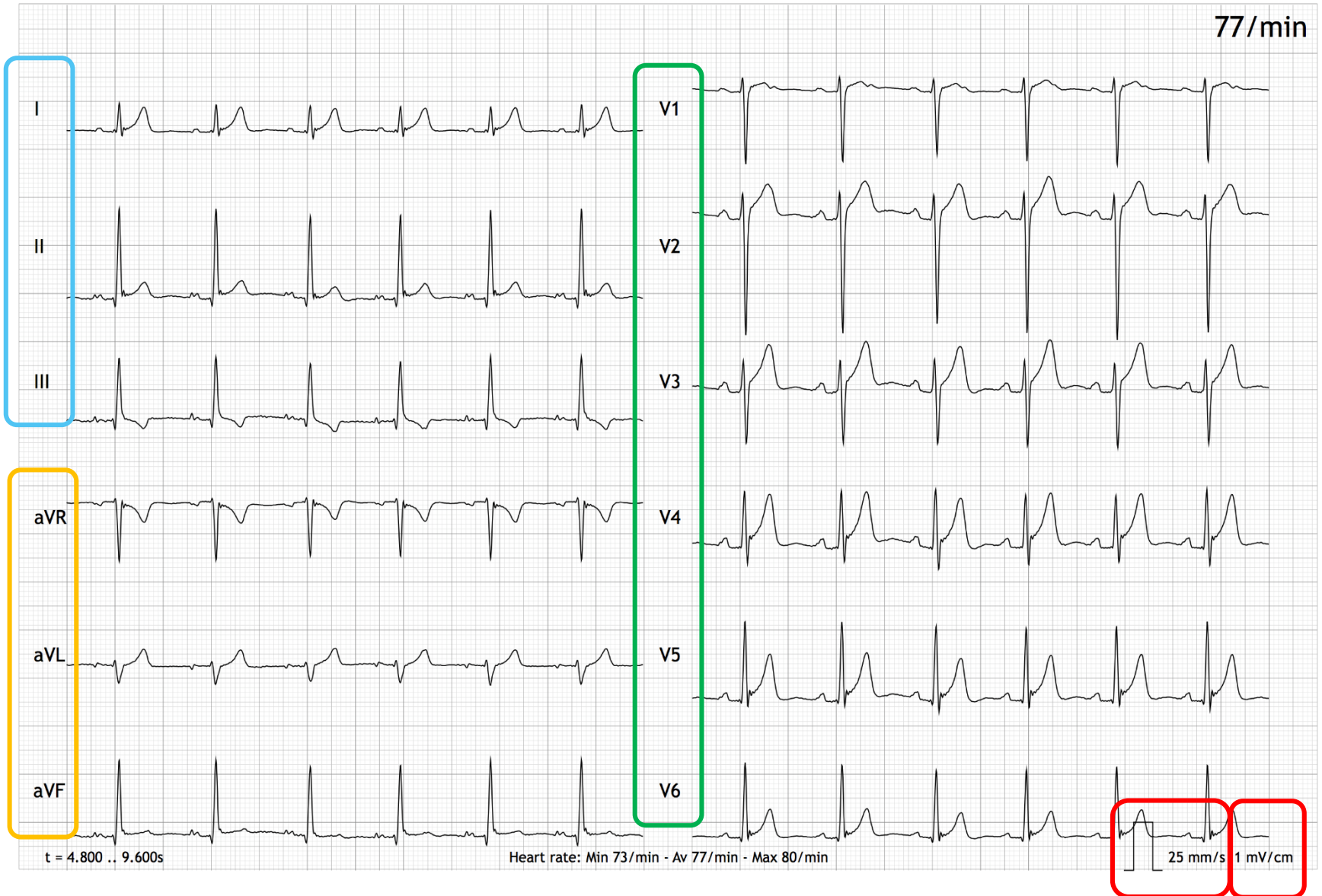
## Ableitungen nach Goldberger (aVR, aVL, aVF)

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



# EKG #9

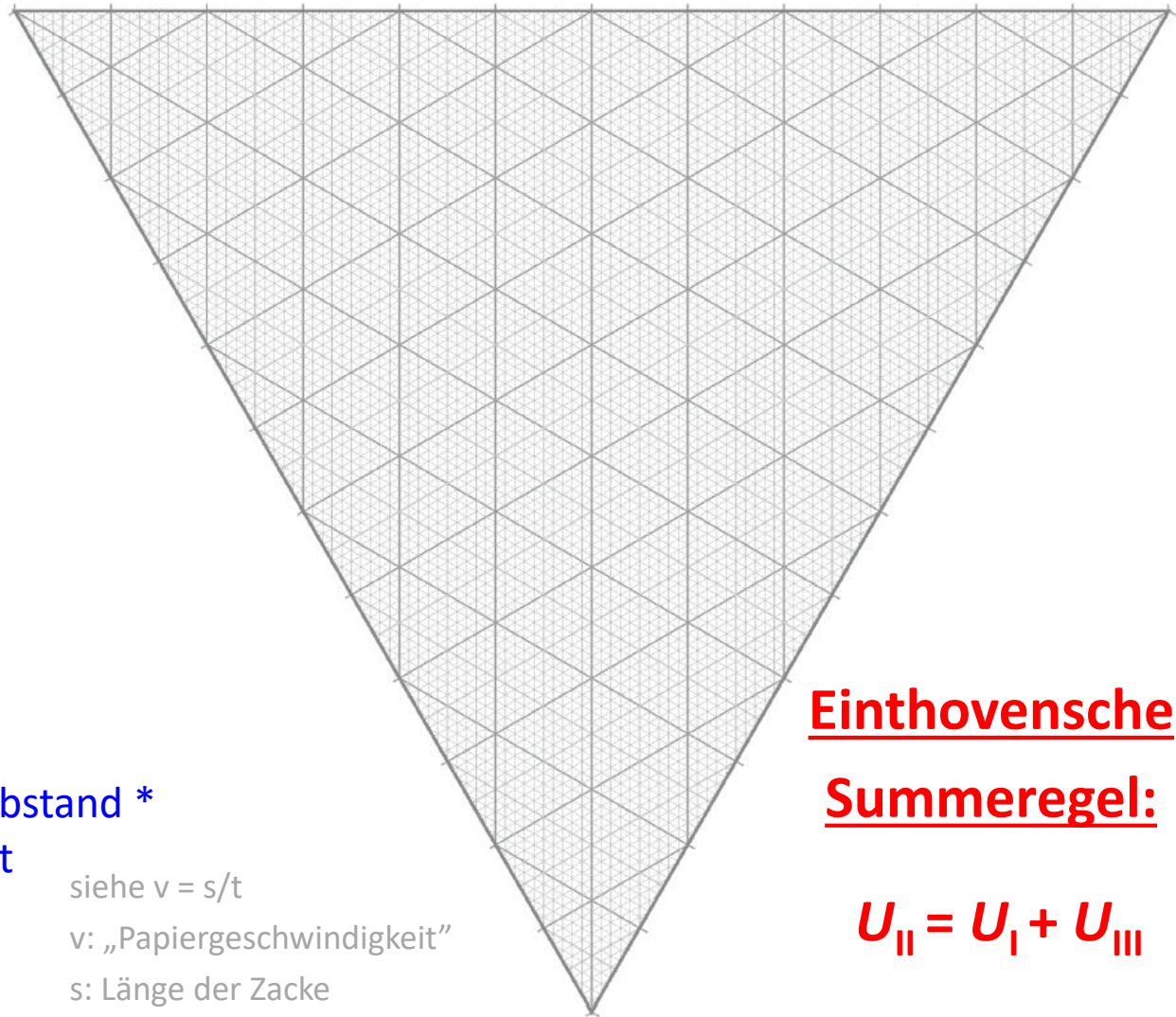
## Standard 12-Kanal EKG-Aufnahme



# EKG #10

- Kalibrationszeichen (1 mV)

## Die Bestimmung der Herzachse

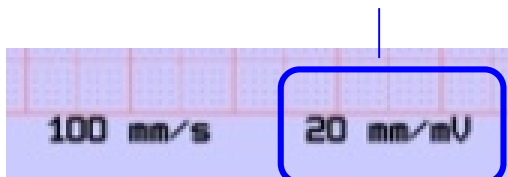


**Einthovensche**  
**Summeregeln:**

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



- Spannung = vertikaler Abstand \*  
vertikale Empfindlichkeit



siehe  $v = s/t$

v: „Papiergeschwindigkeit“

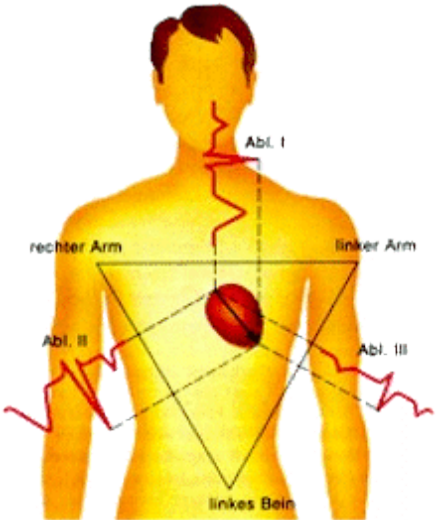
s: Länge der Zucke

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

