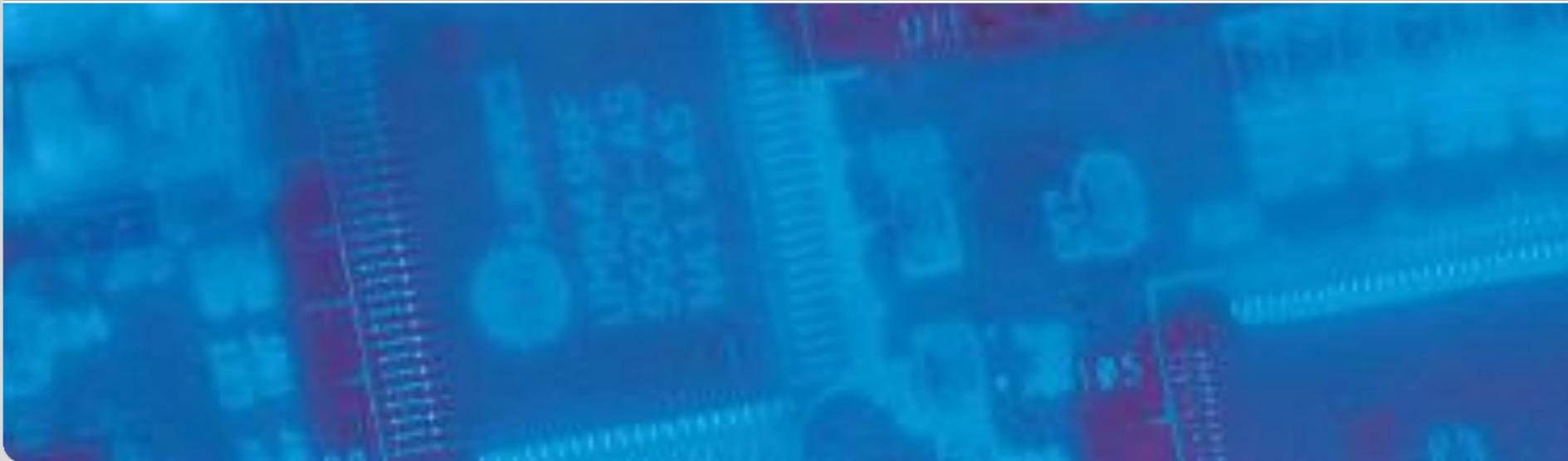


Biomedizinische Messtechnik I

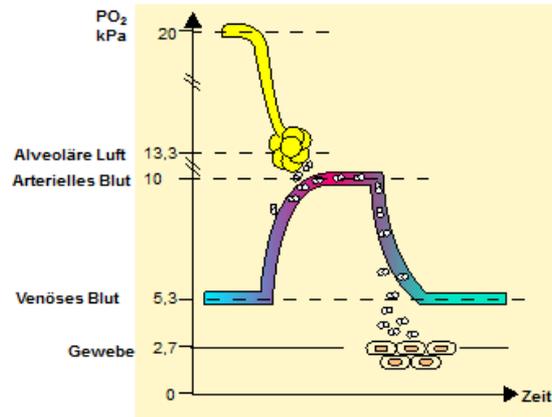
Prof. Wilhelm Stork

Institut für Technik der Informationsverarbeitung (ITIV)



Wiederholung

Zellulärer Gasaustausch Sauerstoff



Sauerstoffsättigung

- Normal: 97-100%
- Behandlungsbedürftig: < 90%
- Gefährlich: < 85%

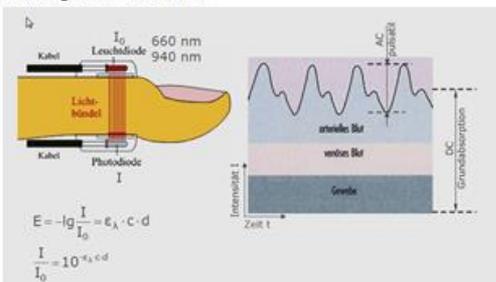
Gebräuchliche Abkürzungen für Sauerstoffsättigungen verschiedener Herkunft

| | |
|-------------|---|
| sO_2 | Sauerstoffsättigung allgemein |
| S_aO_2 | arterielle Sauerstoffsättigung (Messung in arterieller Blutprobe) |
| S_pO_2 | pulsoxymetrisch gemessene Sauerstoffsättigung (quasi-arteriell) |
| S_vO_2 | venöse Sauerstoffsättigung |
| $S_{zv}O_2$ | zentralvenöse Sauerstoffsättigung |
| $S_{mv}O_2$ | gemischtenvenöse Sauerstoffsättigung |



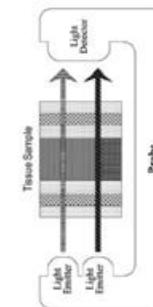
Pulsoximetrie: Messprinzip

- Durchstrahlung von Gewebe mit Licht bekannter Wellenlänge
- Messung der Absorption (Bestimmung von α)
- Extinktionskoeffizient ϵ bekannt \rightarrow Berechnung der Konzentrationsverhältnisse
- Berücksichtigung von N Konzentrationen $\rightarrow N$ Gleichungen notwendig \rightarrow Messungen bei N Wellenlängen notwendig!
- Schichtdicke d muss bei allen Messungen konstant (oder bekannt) sein! Aber: Dickenänderung durch Pulsation!



Pulsoximeter-transmissiv

I Transmission

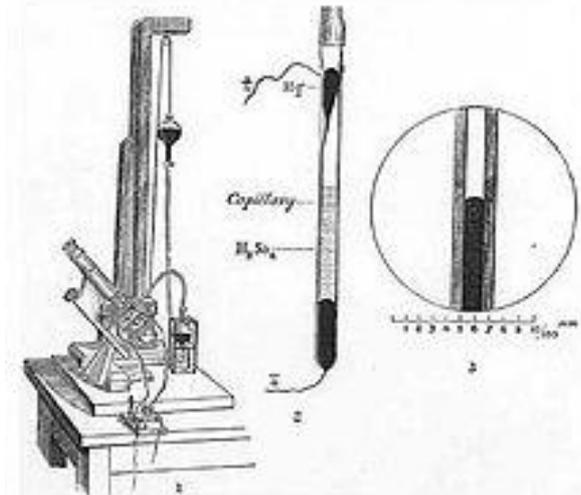
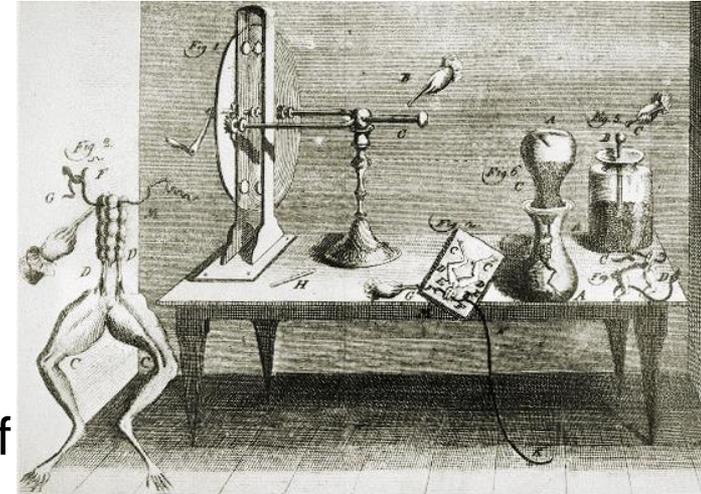


Elektrokardiographie

- Historisches
- Anatomie des Herzens
- Erregungszentren, Reizleitungssystem, Arbeitsmyokard und Erregungsausbreitung
- Wie wird die Herzmuskelzelle elektrisch erregt?
- Wie entsteht die Erregung?
- Wie entstehen gefährliche kreisende Erregungen auf dem Herzmuskel?

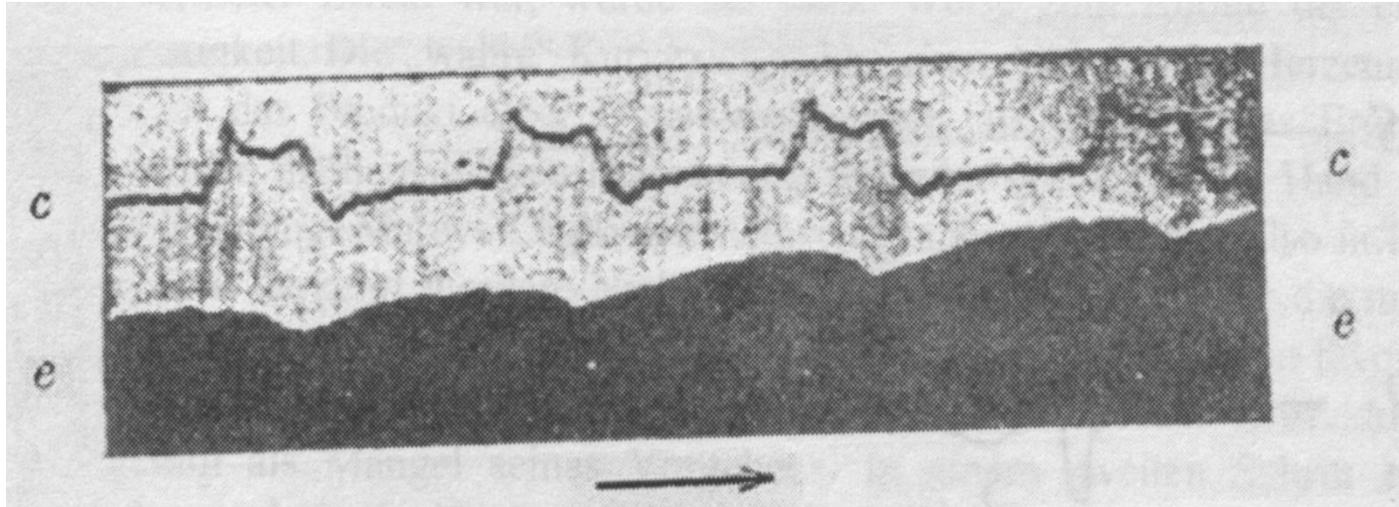
Geschichte der Elektrokardiographie

- 1760 L. Galvani beschreibt Wirkung elektrischer Ströme auf Muskeln
- 1843 C. Matteucci weist elektrische Erscheinungen bei Muskelaktivität nach
- 1876 E. J. Marey zeichnet elektrische Herzsignale mit Hilfe eines Elektrometers auf
- 1889 A. D. Waller demonstriert die Aufzeichnung des rhythmischen Herzschlags über ein Kapillarelektrometer
- 1895 W. Einthoven führt die noch heute gültige „P/Q/R/S/T“- Nomenklatur ein
- 1906 Aufzeichnung des EKG mit einem Saitengalvanometer durch W. Einthoven



Geschichte der Elektrokardiographie

- Aufzeichnung des „ersten Bilds“ des EKG des Menschen durch A. Waller



- Oben: Pulswelle
- Unten: Vergrößerte Abbildung der Schwankungen der Quecksilbersäule eines Kapillarelektrometers über der Zeit

Quelle: Waller, Philosophical Transactions of the Royal Society, London B 180: 189, 1889

Entnommen aus: E. Konecny, V. Roelcke, B. Weiss (Hrsg.): Medizintechnik im 20. Jahrhundert, VDE-Verlag, 2003

Geschichte der Elektrokardiographie

- W. Einthoven: *1860-1927+
Professor für Physiologie an
der Universität Leiden
- Korrektur der automatischen
Kapillarelektrometer-
aufzeichnung und
Einführung der P/Q/R/S/T-
Nomenklatur
- 1924 Nobelpreis für Medizin

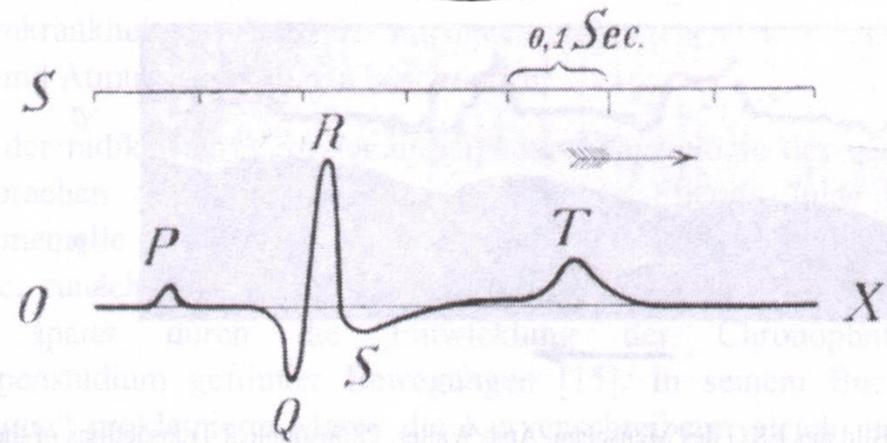
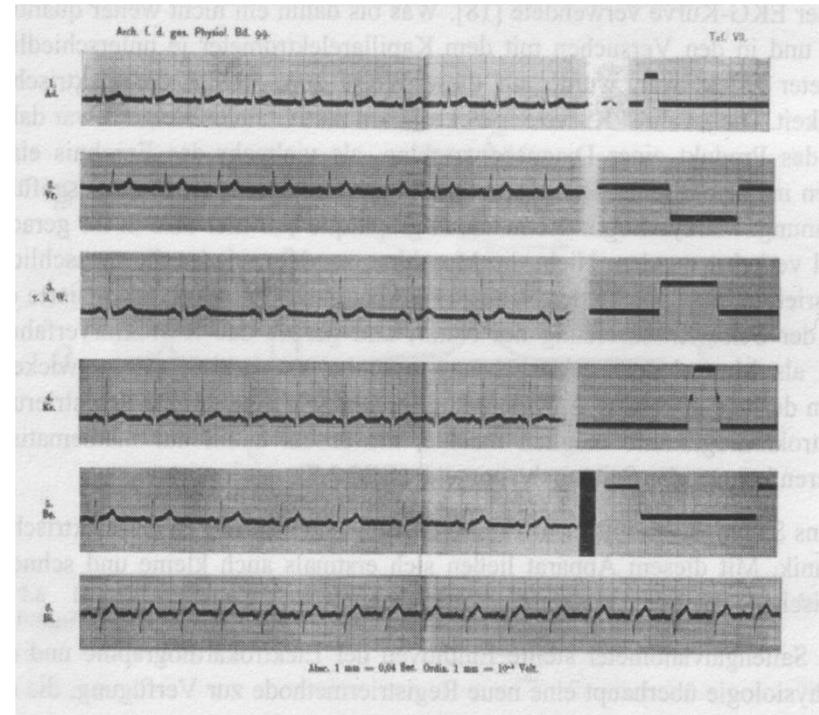
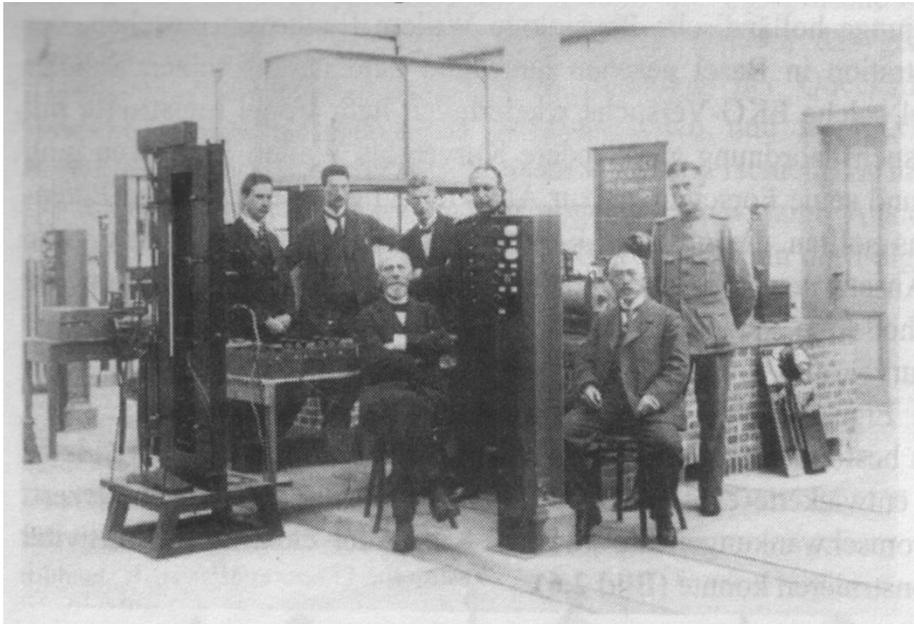


Fig. 2.

Quelle: Einthoven, Pflüger's Archiv 99: 473, 1903
 Entnommen aus: E. Konecny, V. Roelcke, B. Weiss
 (Hrsg.): Medizintechnik im 20. Jahrhundert, VDE-
 Verlag, 2003

Geschichte der Elektrokardiographie

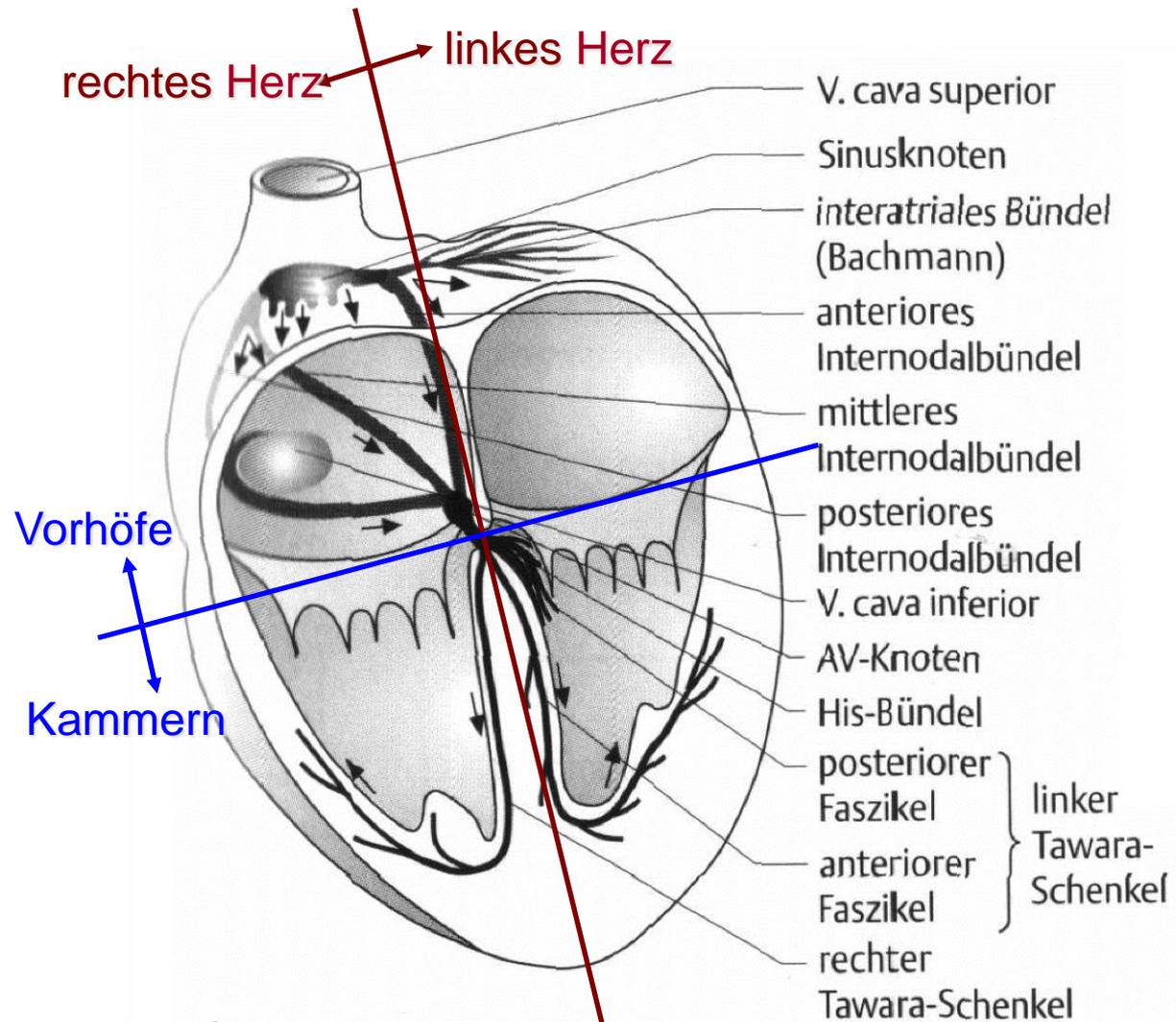
- W. Einthoven: Aufnahme des EKG mit einem Saitengalvanometer incl. automatischer Belichtung und Aufprägung eines Rastergitters



Quelle: Einthoven, Pflüger's Archiv 99: 473, 1903

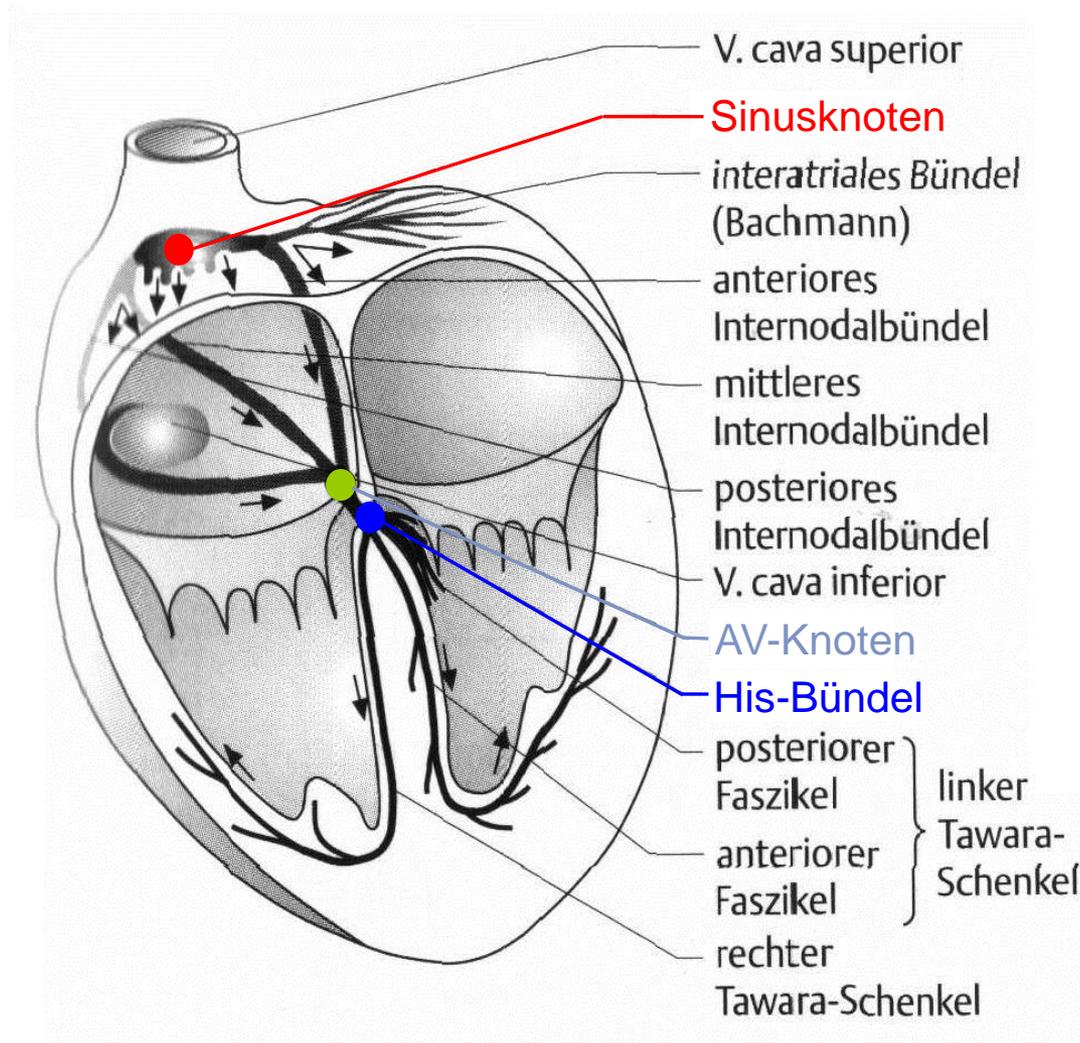
Entnommen aus: E. Konecny, V. Roelcke, B. Weiss (Hrsg.): Medizintechnik im 20. Jahrhundert, VDE-Verlag, 2003

Anatomie des Herzens



Quelle:
 B.-D. Gonska, R.Heinecker: EKG in Klinik und Praxis, Stuttgart, New York, Thieme, 1999

Erregungszentren

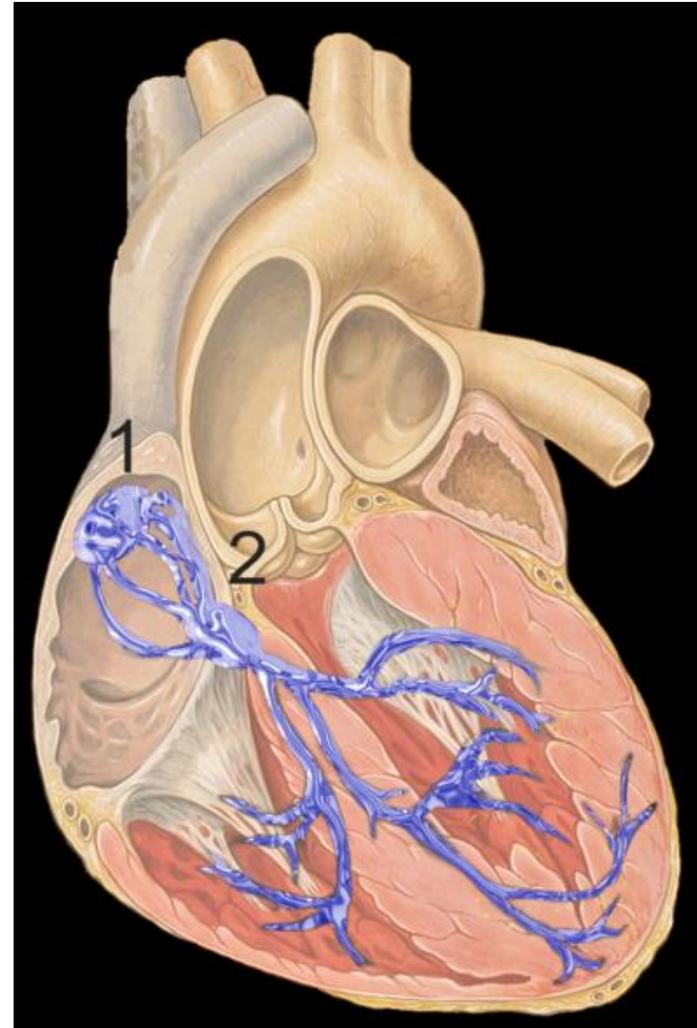


Verschiedene Erregungszentren im Herzen

1. Sinusknoten, Eigenfrequenz ca. 60-80bpm
(primäres Erregungszentrum → Erregung des gesamten Herzens)
 2. AV-Knoten, Eigenfrequenz ca. 40-50bpm
(sekundäres Erregungszentrum → nur Kammererregung)
 3. His-Bündel, Eigenfrequenz ca. 20-30bpm
(tertiäres Erregungszentrum → nur Kammererregung)
 4. Tawara-Schenkel
(dezentrale Strukturen mit Eigenerregbarkeit → Kammerteilerregung)
- Mehrere Sicherungsebenen, um den Blutkreislauf aufrecht zu erhalten, falls ein höheres Erregungszentrum ausfällt

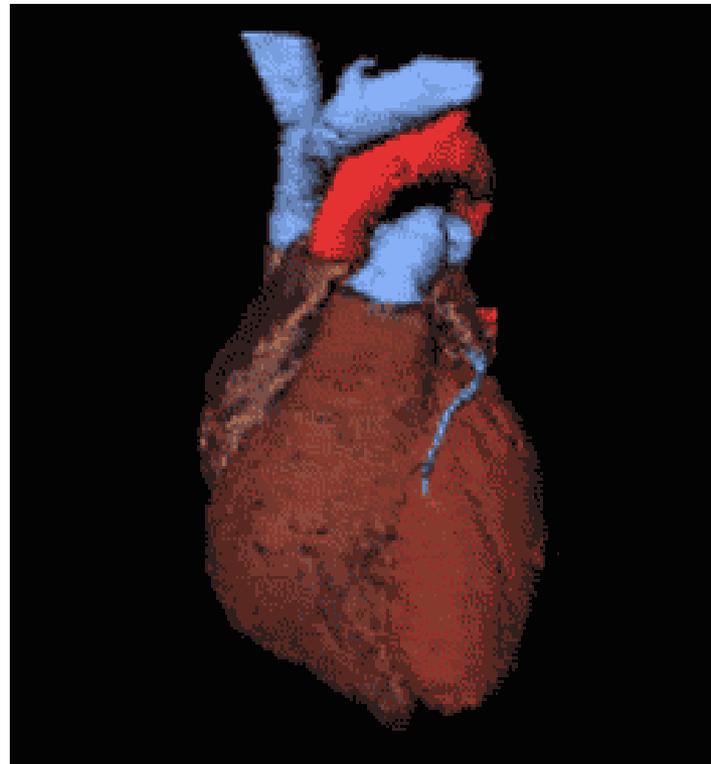
Reizleitungssystem

- Das Reizleitungssystem (RLS) ermöglicht erst die koordinierte Kontraktion des Herzens
- Schnellere und gezieltere Weiterleitung der Erregung, spezialisierte Zellen mit hoher Reizleitungsgeschwindigkeit (2m/s vs. 0.5m/s)
- AV-Knoten Verbindung zwischen Vorhöfen und Kammern mit 0.1m/s langsam
- Austritt an den Enden der Purkinje-Fasern ins normale Arbeitsmyokard



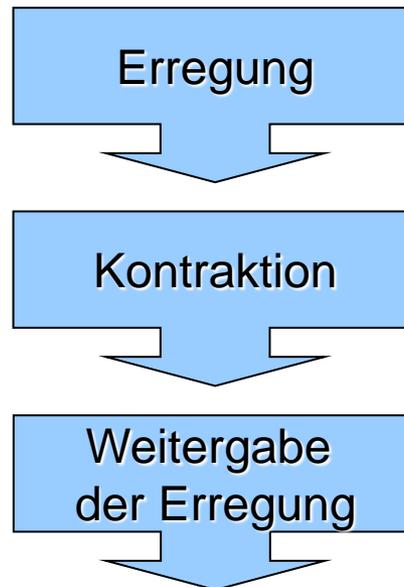
Visualisierung der Erregungsausbreitung

- Forschungsarbeiten am Institut für Biomedizinische Technik (Prof. Dössel): Herzautomat



Myokard und Erregungsausbreitung

- Herzmuskelzellen werden elektrisch zur mechanischen Kontraktion angeregt:



- Herzmuskelzellen haben keine Vorzugsrichtung: Erregung kann aus allen Richtungen kommen und wird an alle benachbarten unerregten Zellen weitergegeben

Erregung der Herzmuskelzellen

- Aufrechterhaltung des Membranruhepotentials durch verschiedene Konzentrationen von Na^+ -, K^+ - und Ca^{2+} -Ionen im Intra- und Extrazellulärraum

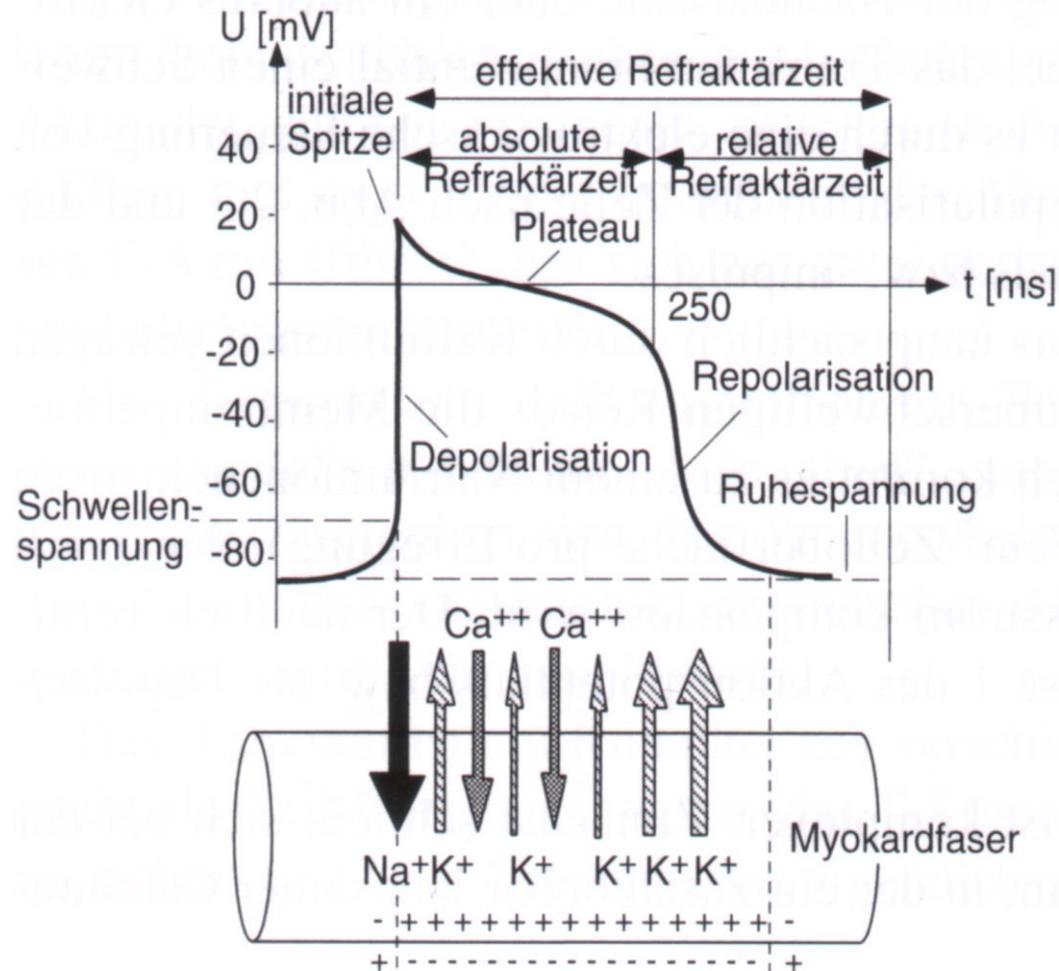
- Störung des Gleichgewichts (Eintreffen der Erregung)
 - Ionenverschiebungen über die Zellmembran
 - ab einer Schwellenspannung „Lawineneffekt“

- Das Ruhepotential bricht zusammen
 - Depolarisation
 - Zelle wird erregt

Erregung der Herzmuskelzellen

- Besonderheit der Myokardzellen
 - Plateauphase
 - Refraktärzeit
- Durch aktive Arbeit wird das Ruhepotential wiederhergestellt
 - Zelle kann wieder erregt werden
- Elektromechanische Kopplung
 - Umwandlung der elektrischen Erregung in mechanische Arbeit (Kontraktion)

Erregung der Herzmuskelzellen



Quelle: A. Bolz, W. Urbaszek, Technik in der Kardiologie, Springer, 2002

Wie entsteht die Erregung?

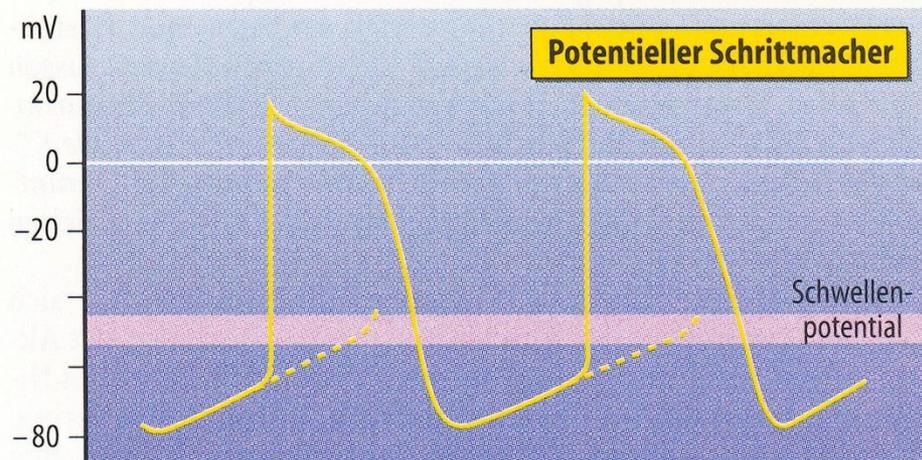
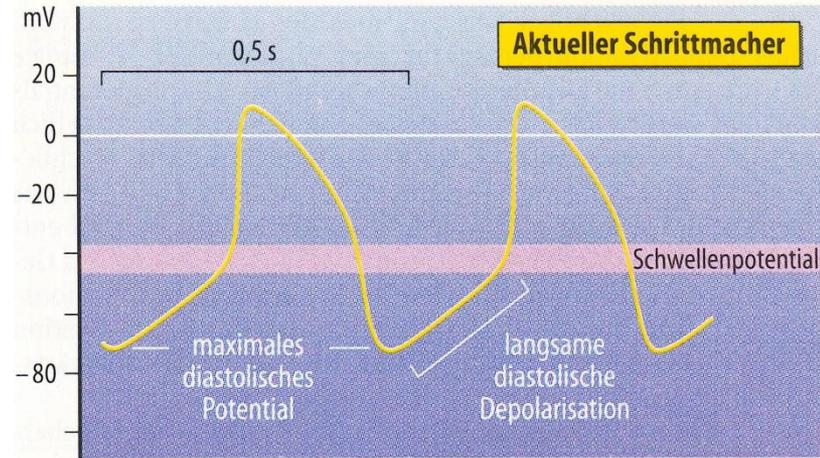
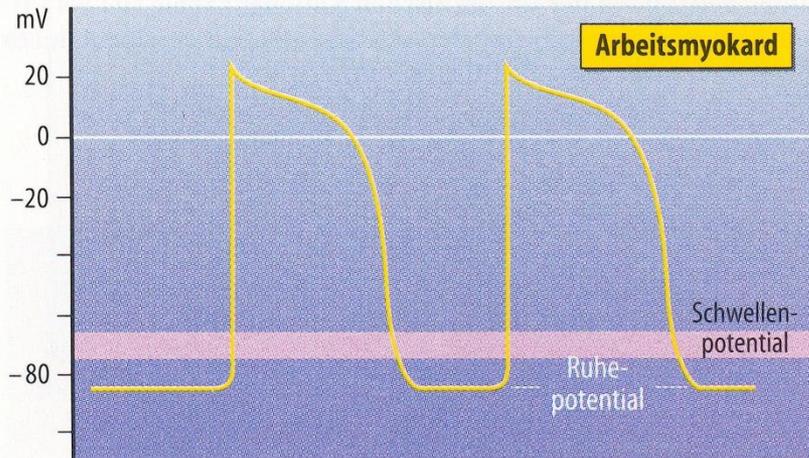
- Schrittmacherzellen haben kein stabiles Ruhepotential
 - Schwellenspannung wird nach einer gewissen Zeit automatisch erreicht
 - Depolarisation
- „Autorhythmie“ des Erregungszentrum
- Schrittmacher(SM)-zellen konzentriert im Sinusknoten, AV-Knoten, His-Bündel

Wie entsteht die Erregung?

- SM-Zellen im Sinusknoten depolarisieren am schnellsten, in sekundären und tertiären Erregungszentren immer langsamer
 - Sinusknotenerregung „überholt“ die anderen
 - Eigenerregungsfrequenz nimmt ab, je tiefer das Erregungszentrum liegt

Erregungsbildung

■ Veranschaulichung der Autorhythmie



Quelle:
R.F. Schmidt, G. Thews
(Hrsg.), Die Physiologie
des Menschen, Springer,
1995

Einflussfaktoren für die Herzarbeit

- **Chronotropie:** Veränderung der Erregungsfrequenz im Sinusknoten
 - Veränderung des Schwellenpotenzials
 - Änderung des maximalen diastolischen Potenzials (MDP)
 - Änderung der Steigung der spontanen Depolarisation

- **Dromotropie:** Veränderung der Leitungsgeschwindigkeit
 - Beeinflussung des MDP
 - Steilheit der Depolarisation

- **Inotropie:** Kontraktilität der Herzmuskulatur
 - Regulierung der zellinternen Ca^{2+} -Konzentration

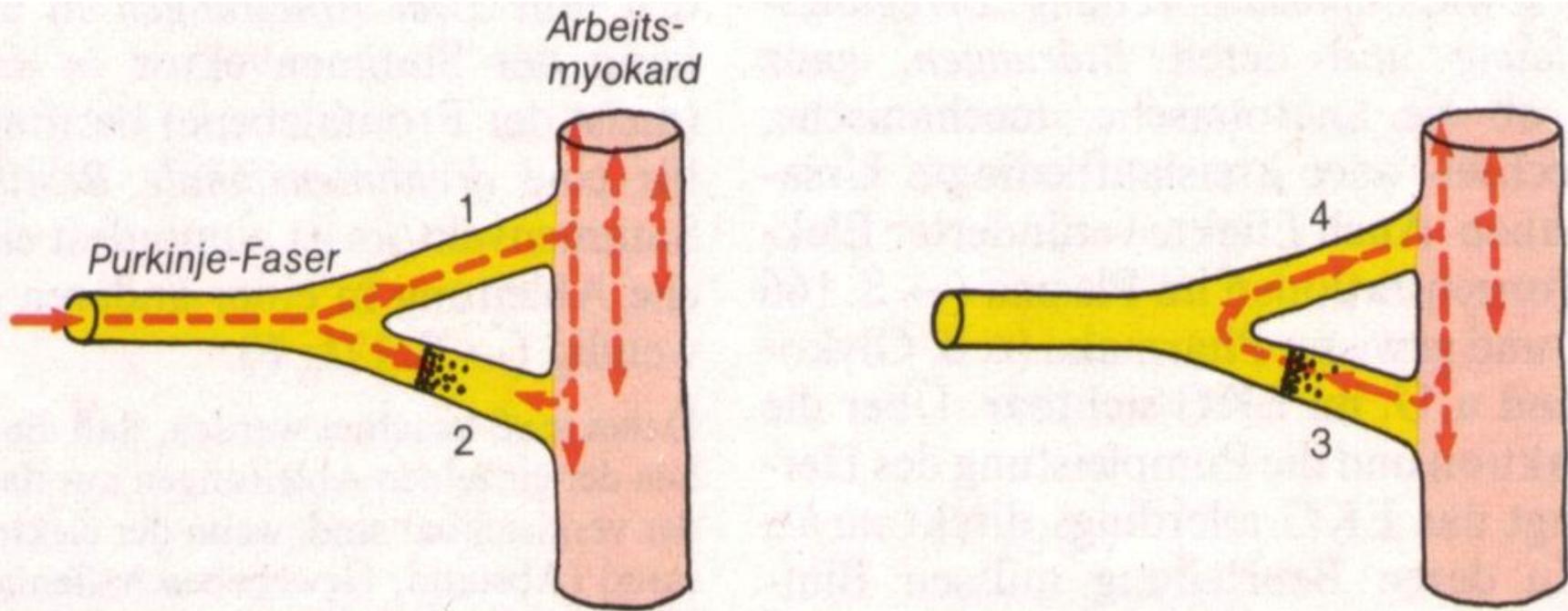
- **Bathmotropie:** Veränderung der Reizschwelle
 - Membranpermeabilität

Kreisende Erregung

- Das Gute an der Refraktärzeit:
 - Richtungsvorgabe für Erregungsausbreitung
 - „Prinzip der verbrannten Erde“ führt zum Erlöschen der aktuellen Erregungsfront
 - Erst nach einer gewissen Zeit ist das Herz wieder erregbar → Herz kann „in Ruhe pumpen“

- Entstehung einer kreisenden Erregung
 - Einschränkung der Erregbarkeit des Herzgewebes durch z.B. Sauerstoffarmut, Ischämie, Elektrolytverschiebungen, Infarkt Narben etc.
 - Verzögerung der Erregungsleitung in Teilbereichen, während umliegende Areale normal erregt werden
 - Erregung aus beeinträchtigtem Areal kann schon wieder auf aktivierbares Gewebe treffen → Ausbildung einer kreisenden Erregung

Prinzip der kreisenden Erregung



- 1 Normale Vorwärtsleitung
- 2 Verminderte Vorwärtsleitung und Block

- 3 Retrograde Fortleitung
- 4 Wiedereintritt (Re-entry) der Erregung

Quelle: S. Silbernagl, Taschenatlas der Physiologie, Thieme, 1991

Pathologie der kreisenden Erregung

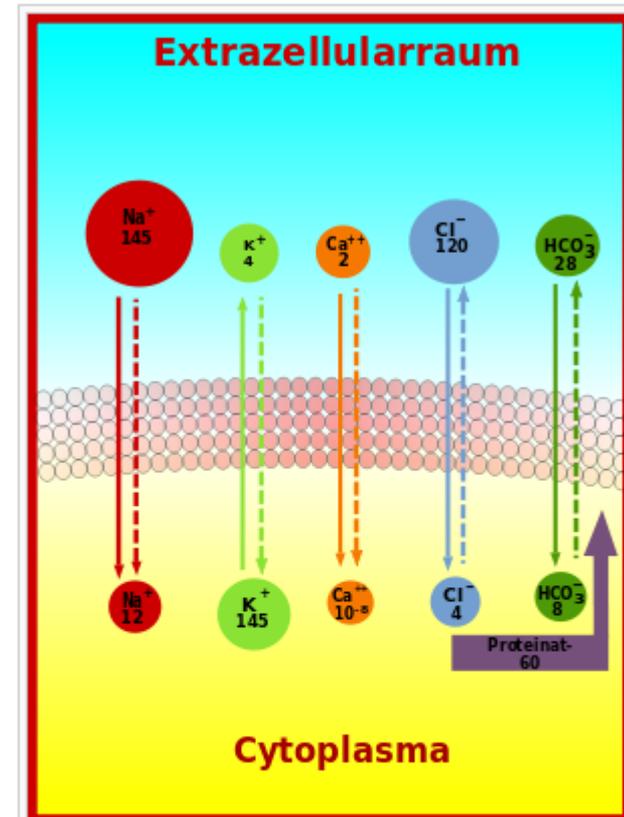
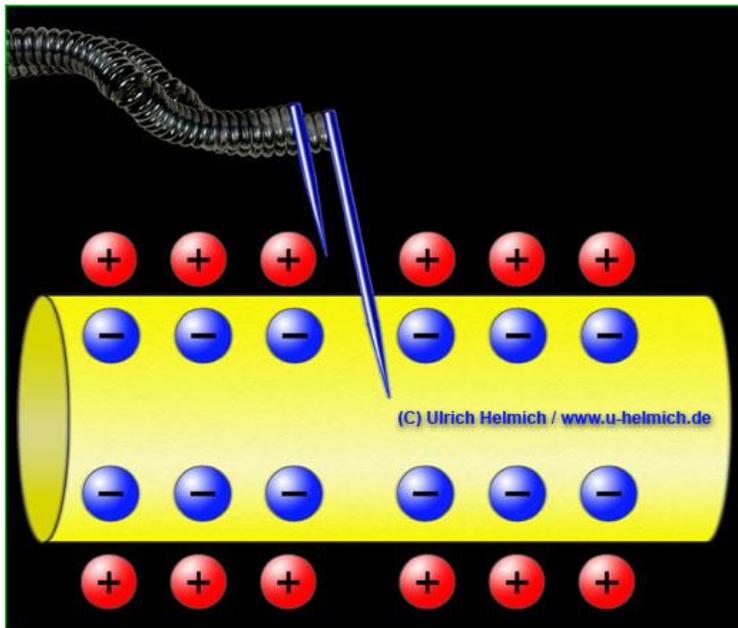
- Betroffene Areale nehmen nicht mehr effektiv an der Kontraktion teil
→ Verminderung der kardialen Pumpleistung
- Gefahr der relativen Ischämie der betroffenen Gebiete
→ Gefahr der Ausbreitung der kreisenden Erregung
- Große kreisende Erregungen können in kleinere „aufbrechen“
→ weitere Verminderung der Kontraktion und Pumpleistung
→ Einzelareale arbeiten gegeneinander
→ zunehmende Chaotisierung der Erregung
- Teufelskreis bis zum effektiven Kreislaufstillstand und schließlich bis zum Tod

Elektrokardiographie

- Begriffe der Elektrokardiographie
- Was sieht man in einem EKG?
- Elektroden
- EKG-Verstärkungstechnik
- Ableitungssysteme
- EKG-Analysen

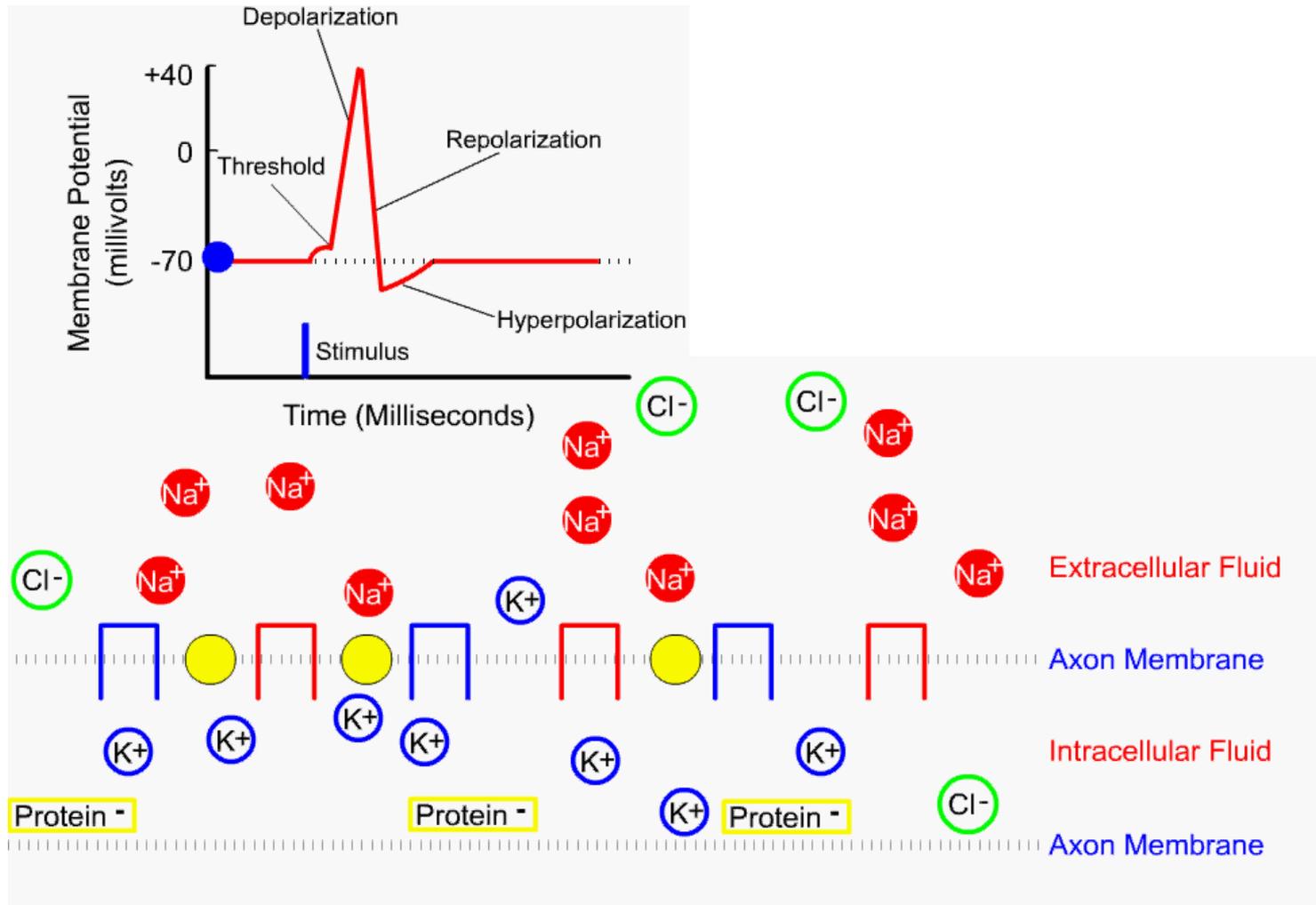
Membranpotential

- Konzentrationsunterschied von positiven und negativen Ionen innerhalb und außerhalb der Zellmembran
- => negatives Ruhepotential ca -50 ~ -100 mV



Schematische Darstellung der wichtigsten Ionengradienten über die Plasmamembran. Durchgehende Pfeile geben die Richtung des Konzentrations-, gestrichelte die Richtung des Potentialgradienten an. Alle Konzentrationsangaben in mmol/l.

Reizleitung - Aktionspotential



Membranpotential an verschiedenen Orten

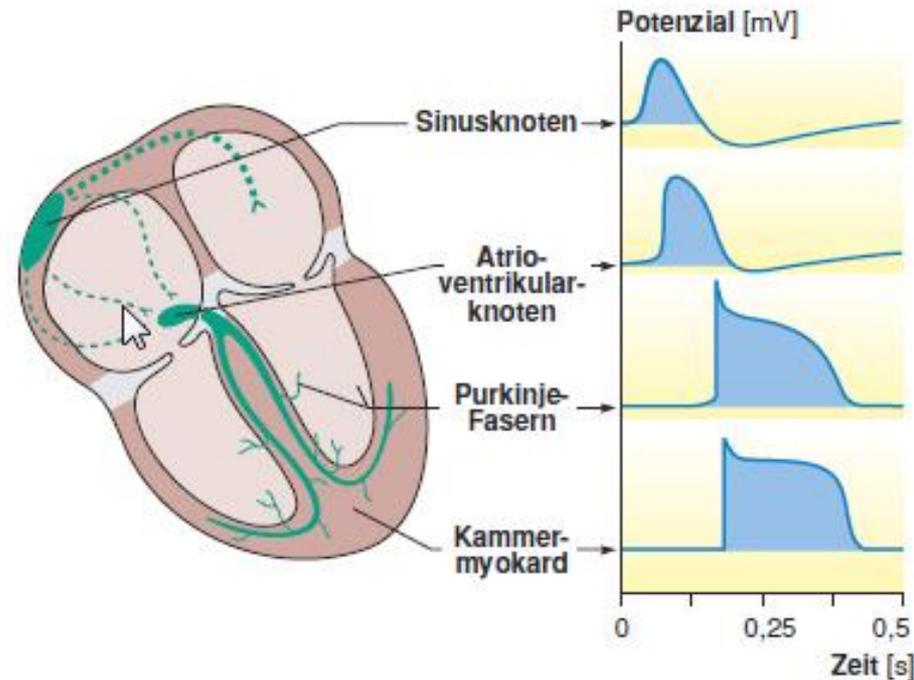
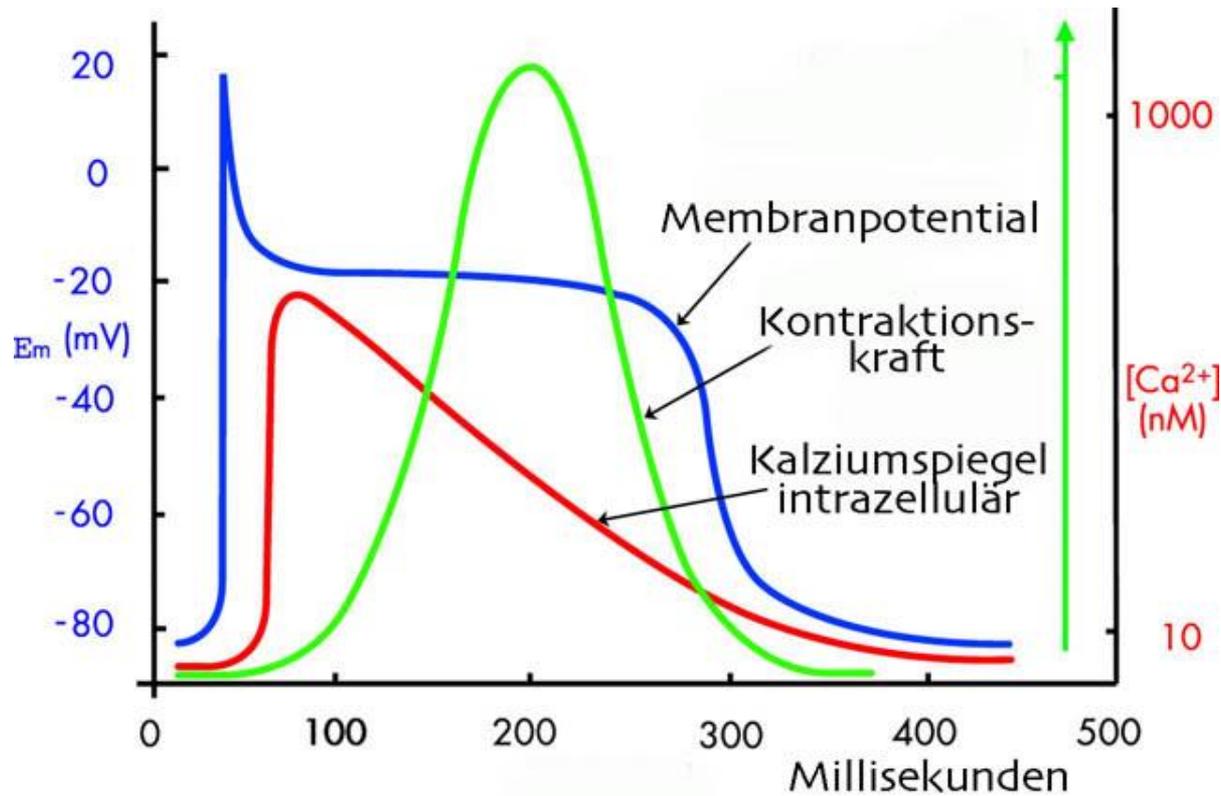


Abb. 8-9 Elektrische Ableitungen am Herzen. Elektrische Ableitungen (rechts) aus verschiedenen Anteilen des Erregungsbildungs- und -leitungssystems bzw. des Kammermyokards. Die Fähigkeit zur spontanen diastolischen Depolarisation nimmt vom Sinusknoten zur Peripherie des Erregungsbildungs- und -leitungssystems hin ab. Die Übergangsstellen vom Erregungsleitungssystem auf das Arbeitsmyokard, also die terminalen Aufzweigungen der Purkinje-Fasern, zeigen elektrische Entladungen, die denen des Kammermyokards sehr ähnlich sind.

Membranpotential vs. Kontraktion und Ionenkonzentration in einer Myocard Zelle



Erregungsausbreitung im Herzv(Angaben in ms)

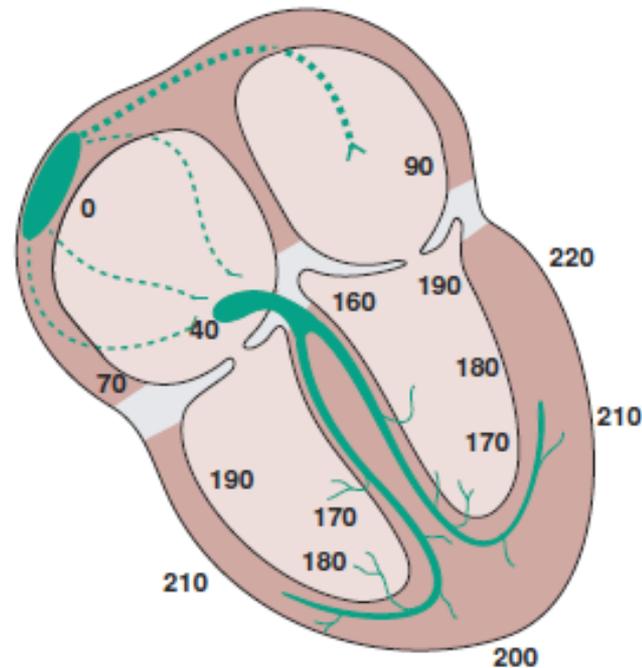
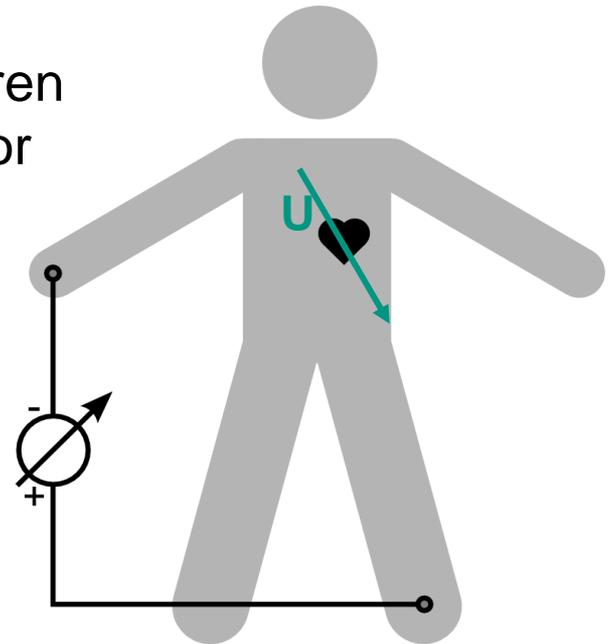


Abb.8-10 Ausbreitung der Erregung vom Sinusknoten bis zu den einzelnen Stellen im Herzen in Millisekunden. Hierbei sind nicht die angegebenen Absolutzahlen wichtig – sie variieren mit der Herzfrequenz –, sondern die Relationen. Die unterbrochenen grünen Striche im Bereich der Vorhöfe zeigen spezielle, geringfügig schneller als die Vorhofmuskulatur leitende Bahnen (Internodalbündel und interatriales Bündel). Diese Bahnen unterscheiden sich u.a. durch ihre geringere Leitungsgeschwindigkeit von denen des Erregungsbildungs- und -leitungssystems.

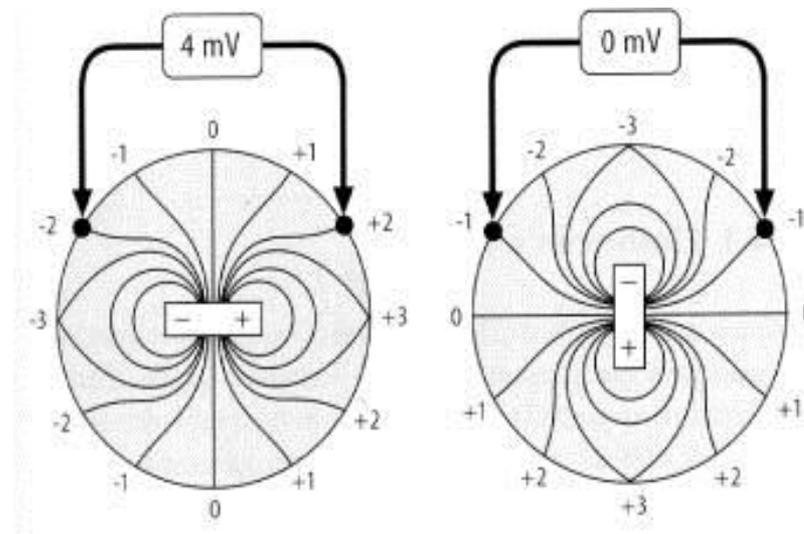
Wie entsteht das EKG?

- Messung von Spannungen (Potentialunterschieden) zwischen Ableitpunkten auf dem Körper
- Die Spannungen entstehen durch Summation vieler mikroskopisch kleiner Potentiale (Membranpotential)
- Modellbildung: Man fasst alle kleinen zellulären Potentiale zu einem großen Spannungsvektor (Dipol) zusammen
- Dieser Dipol ist räumlich und zeitlich veränderlich (3-D)



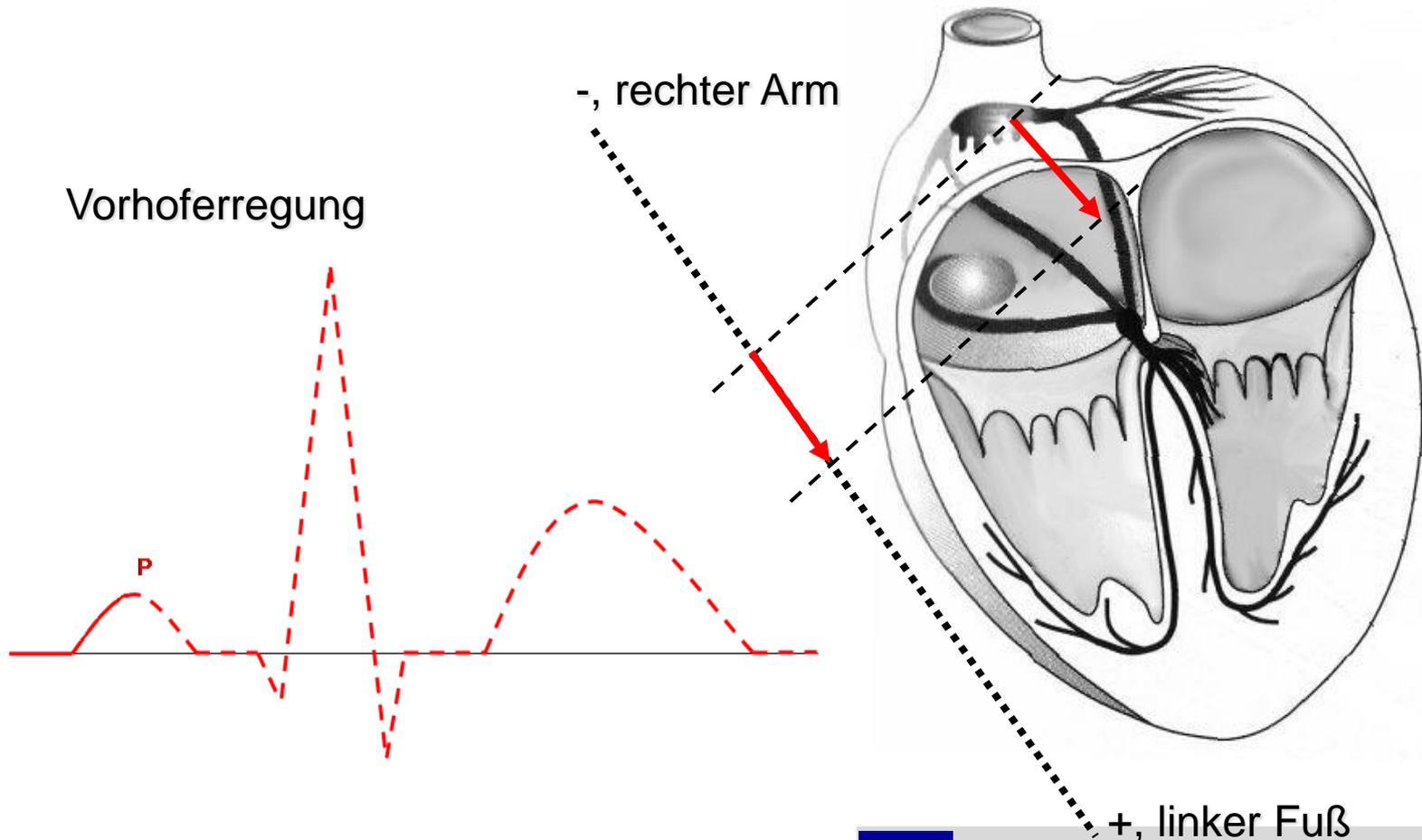
Wie entsteht das EKG?

- Ausschläge (gemessene Spannungen) in den einzelnen Ableitungen sind
 - Messungen von Spannungsdifferenzen zwischen verschiedenen Äquipotenziallinien des Summendipolvektors bzw. räumliche Projektionen des Dipolvektors auf die Ableitungslinie



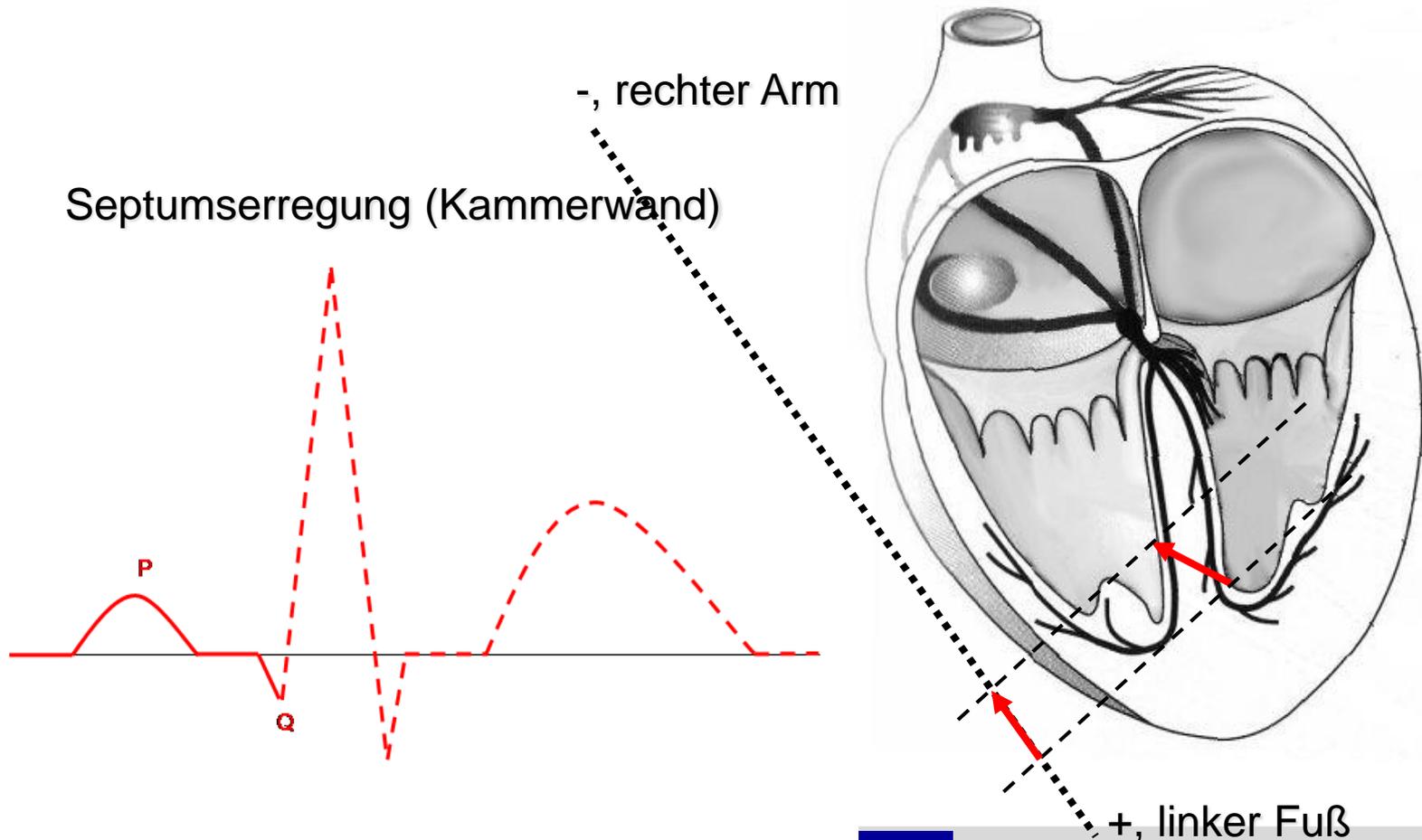
Wie entsteht das EKG?

■ Veranschaulichung der Projektion



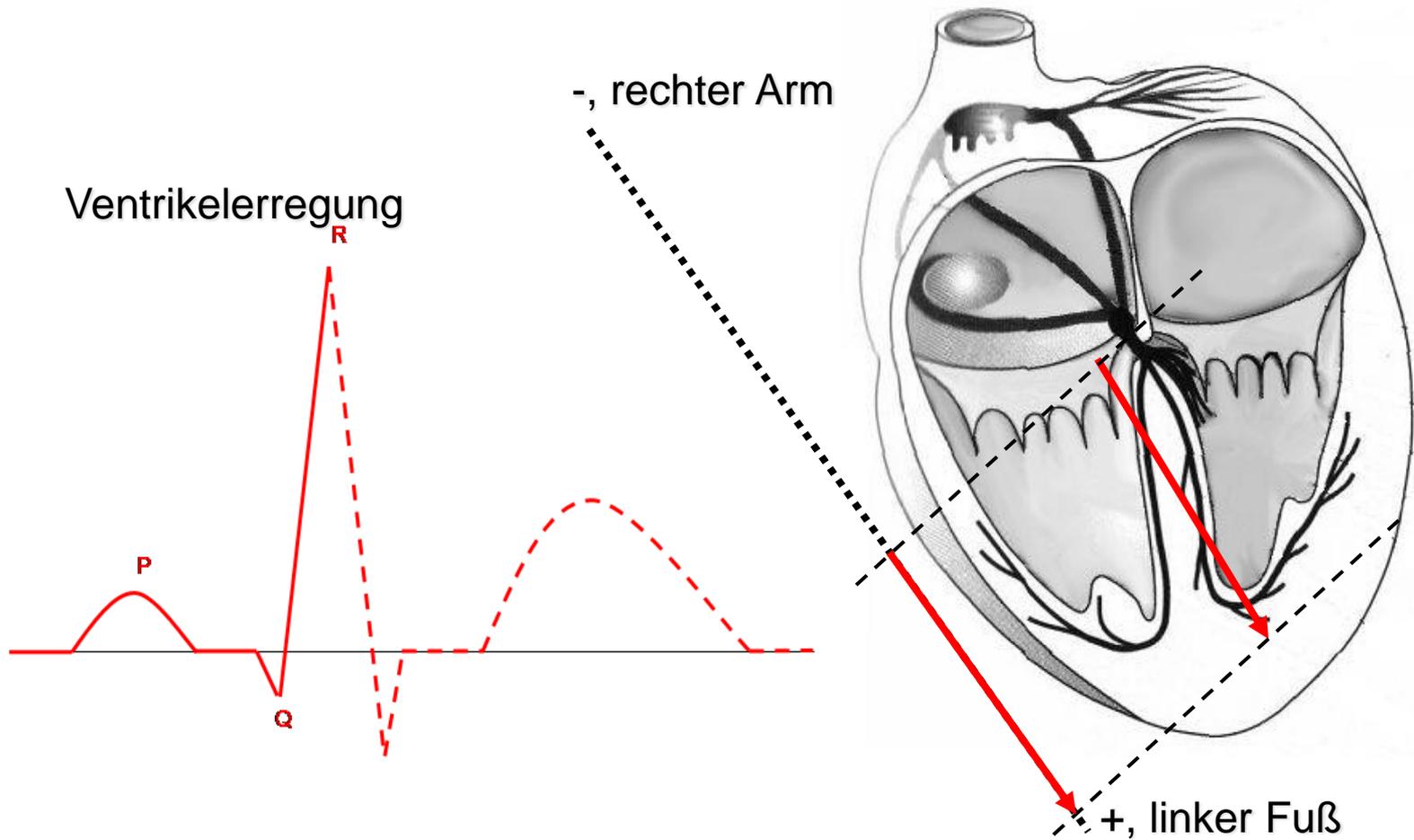
Wie entsteht das EKG?

■ Veranschaulichung der Projektion



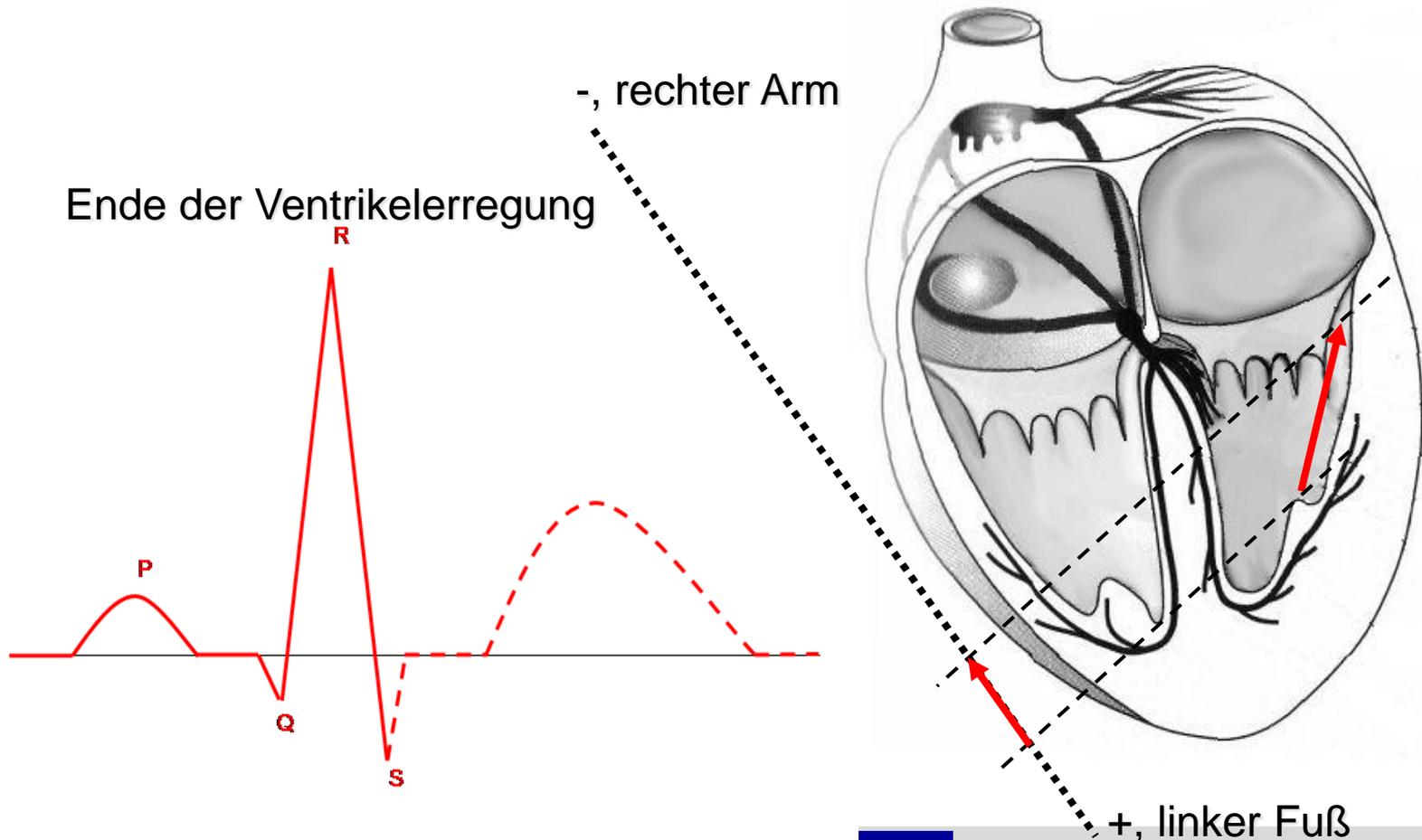
Wie entsteht das EKG?

■ Veranschaulichung der Projektion



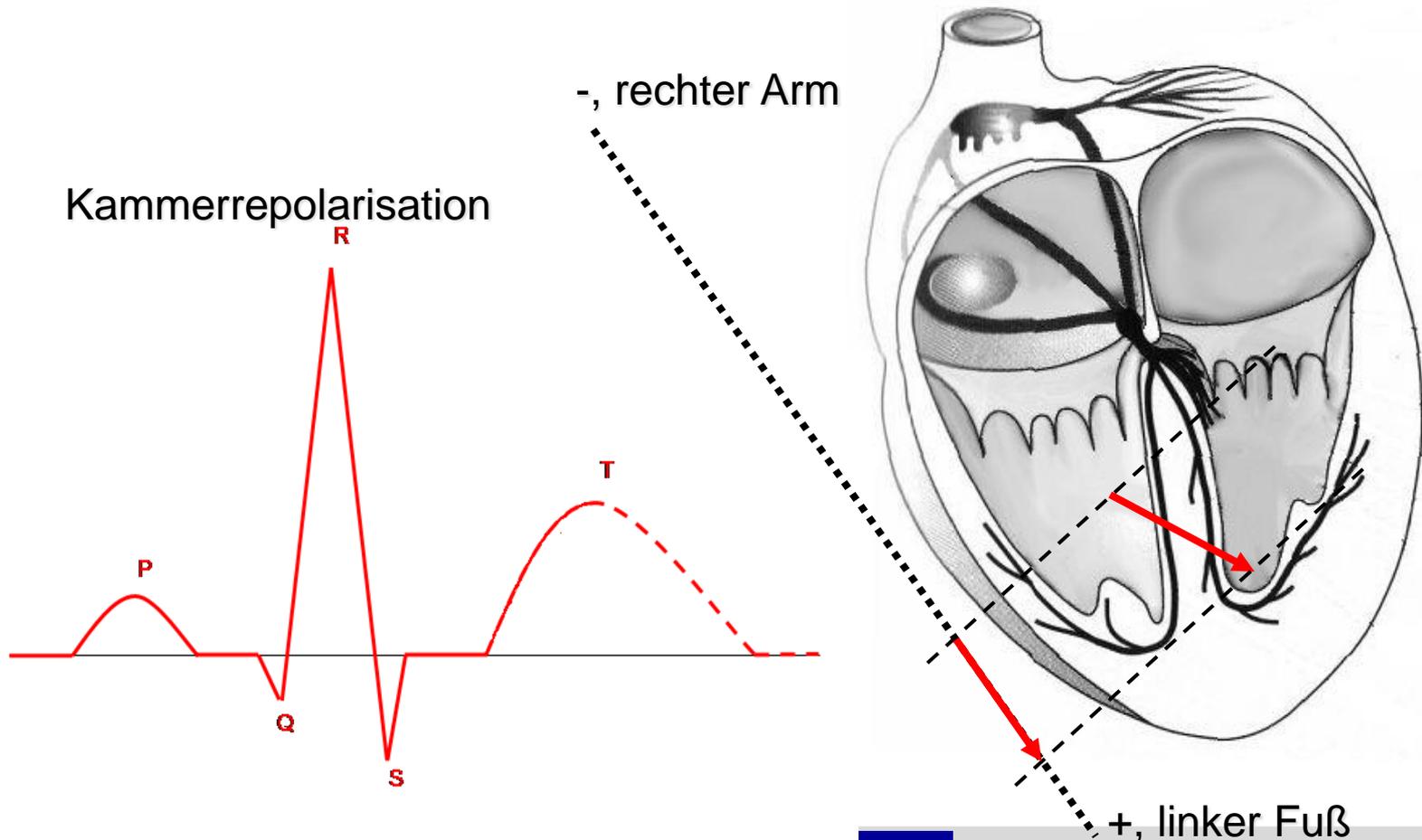
Wie entsteht das EKG?

■ Veranschaulichung der Projektion



Wie entsteht das EKG?

■ Veranschaulichung der Projektion

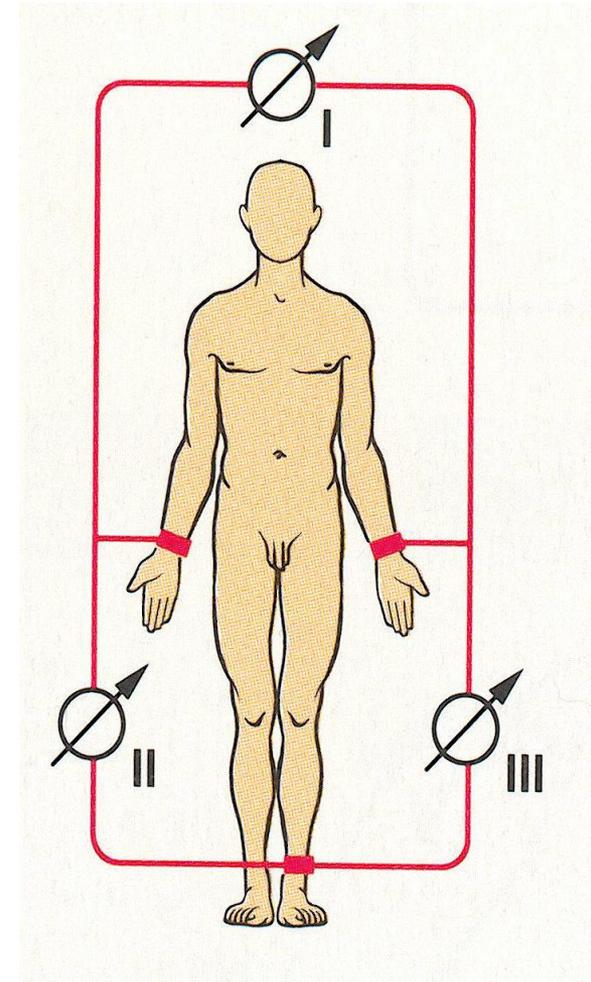
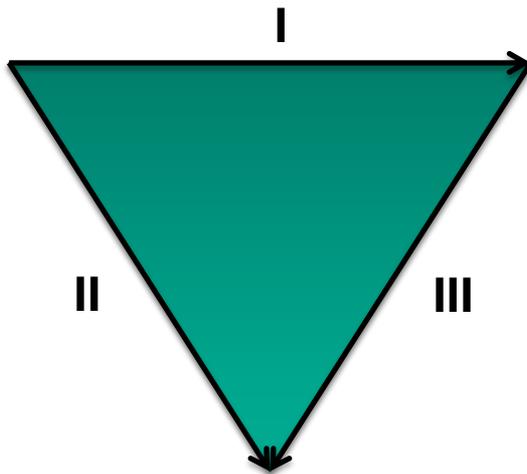


EKG-Ableitverfahren

- Vollständige Information des Herz-Dipols bei dessen Projektion auf drei linear unabhängige Ebenen, z.B.
 - Frontalebene
 - Horizontalebene
 - Sagittalebene
- Durch Körperform, Herzlage und Inhomogenitäten ist solch eine Projektion sehr schwierig
 - Zunächst empirisch gefundene Ableitorte
 - Beobachtung von Herzpathologien und Auswirkungen im EKG
- In der klinischen Praxis durchgesetzt haben sich
 - Einthoven-Extremitätenableitungen (3 Kanäle)
 - Goldberger-Extremitätenableitungen (3 Kanäle)
 - Wilson-Brustwandableitungen (6 Kanäle)

Einthoven-Ableitung

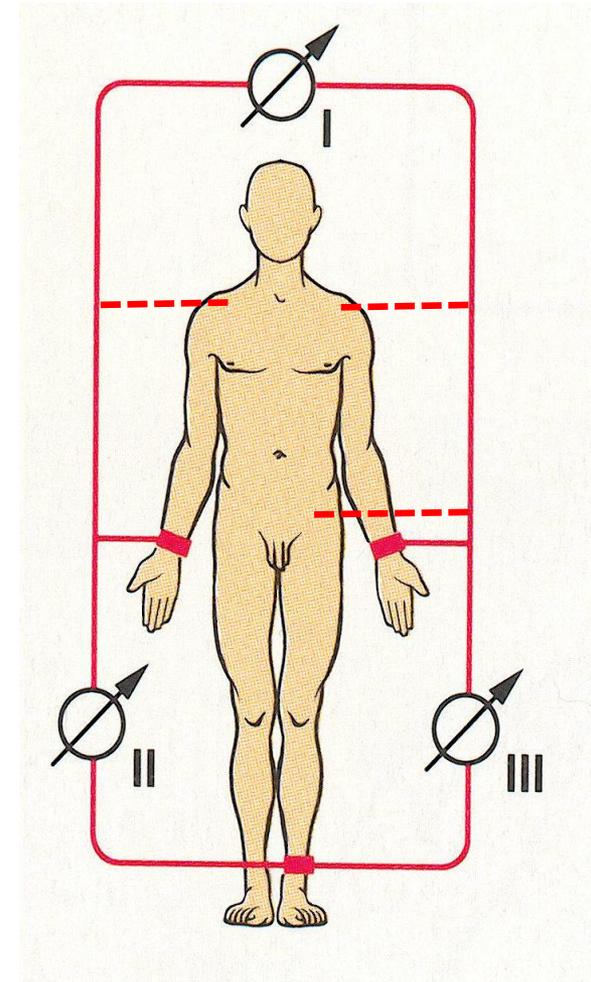
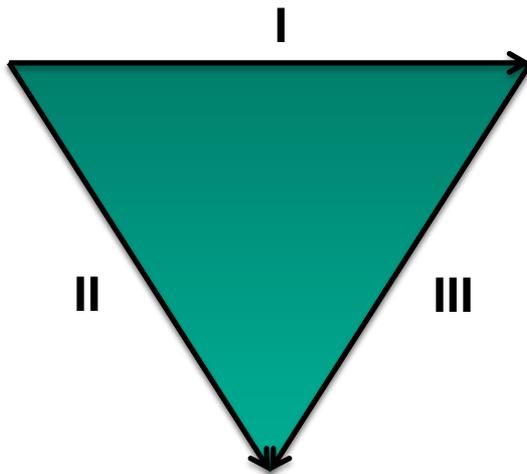
- „Der Klassiker“
- Einthoven-Dreieck
 - Die Ableitlinien bilden ein geschlossenes Dreieck, das sog. Einthovendreieck. Dessen Kanten (also die einzelnen Ableitungen) stehen untereinander in folgender Beziehung: $II = I + III$



Quelle:
 R.F. Schmidt, G.
 Thews (Hrsg.), Die
 Physiologie des
 Menschen,
 Springer, 1995

Einthoven-Ableitung

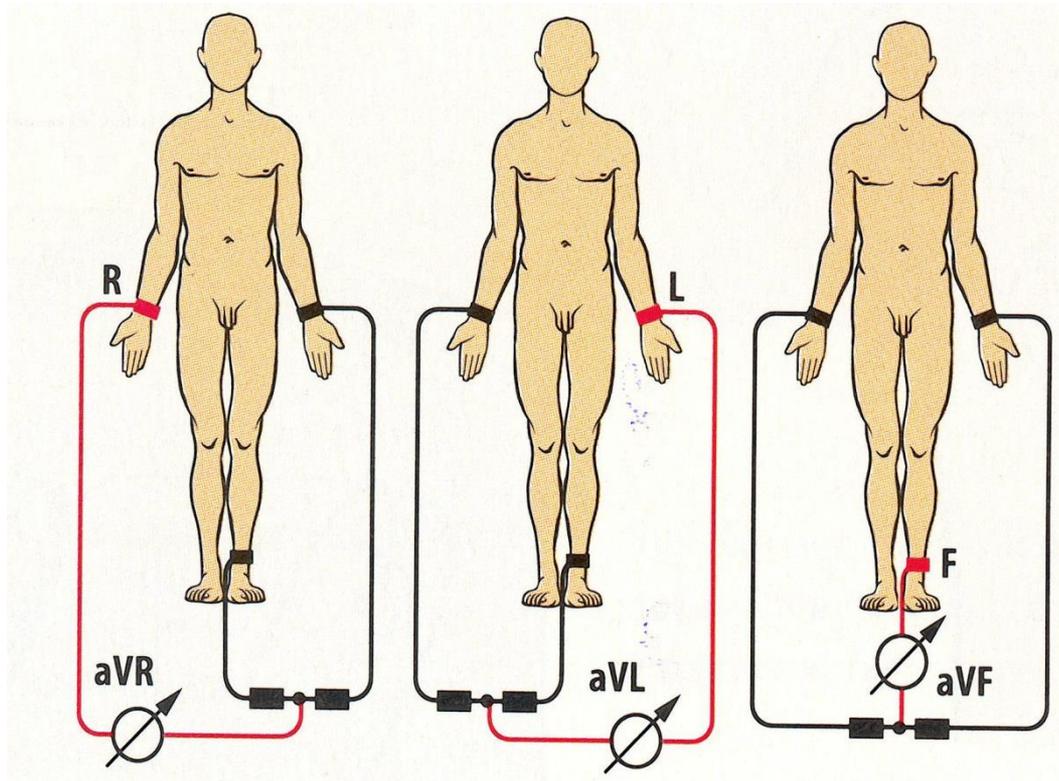
- „Der Klassiker“
- Einthoven-Dreieck
 - Die Ableitlinien bilden ein geschlossenes Dreieck, das sog. Einthovendreieck. Dessen Kanten (also die einzelnen Ableitungen) stehen untereinander in folgender Beziehung: $II = I + III$



Quelle:
 R.F. Schmidt, G.
 Thews (Hrsg.), Die
 Physiologie des
 Menschen,
 Springer, 1995

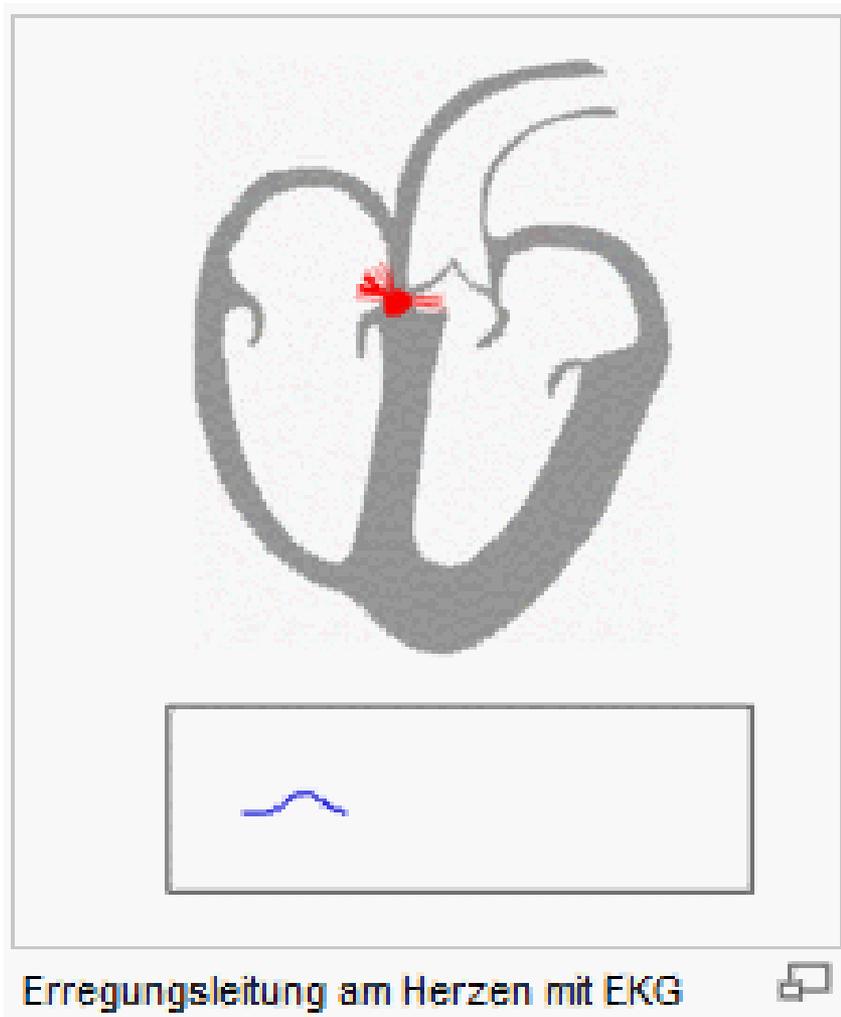
Goldberger-Ableitungen

- Kein Informationszugewinn gegenüber Einthoven!!
- Bei aktuellen Konfigurationen oft errechnet

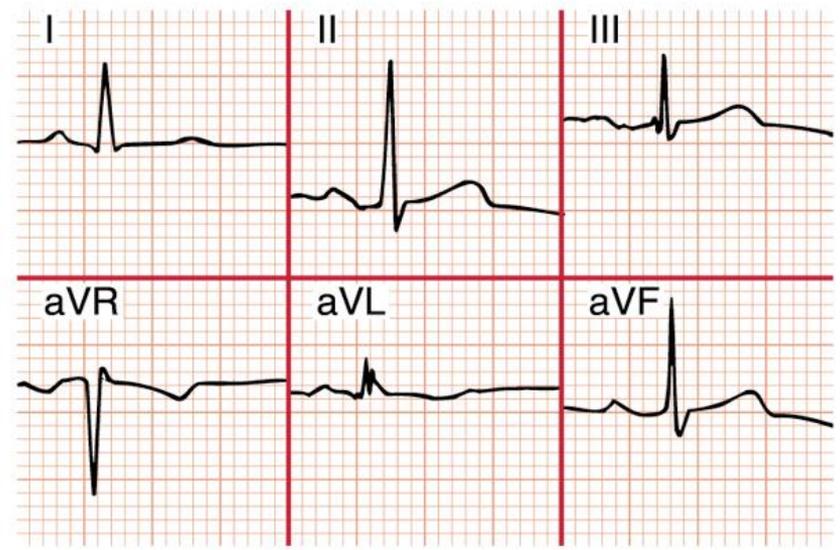
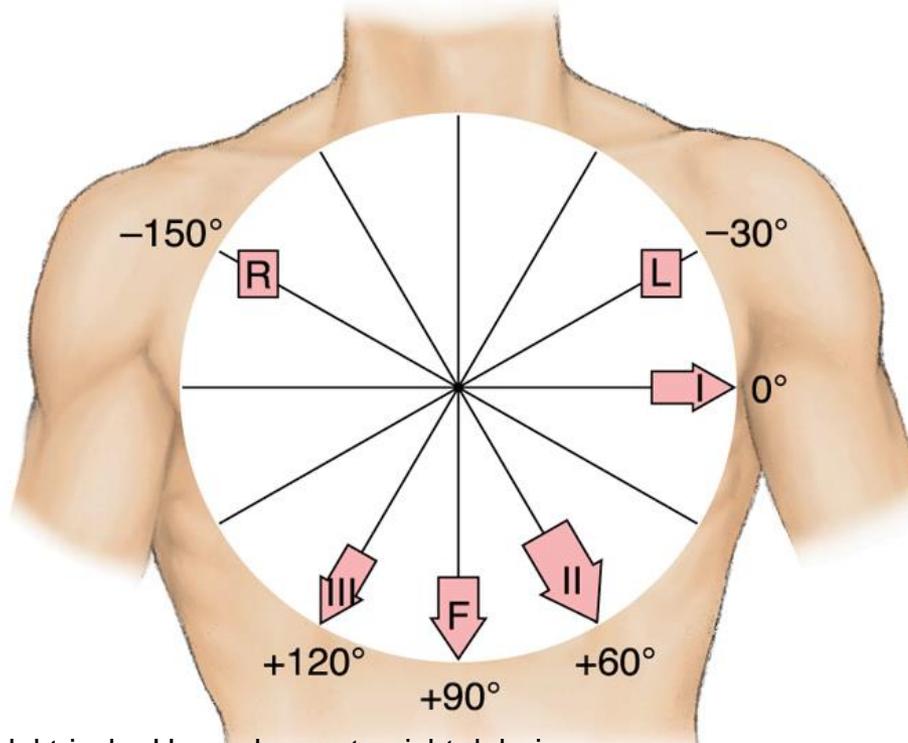


Quelle:
 R.F. Schmidt, G.
 Thews (Hrsg.), Die
 Physiologie des
 Menschen,
 Springer, 1995

EKG und Herzaktivität



Cabrera-Kreis



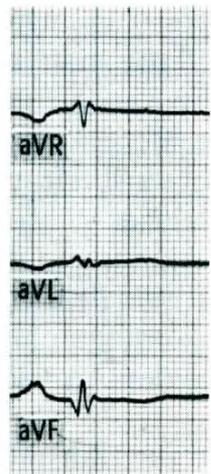
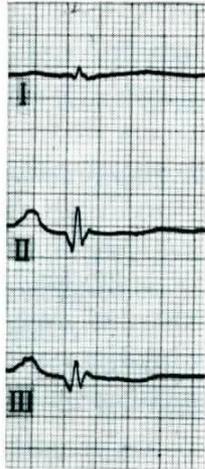
calhoun.cc.al.us

Unterschiedliche EKG-Ableitungen führen zu unterschiedlichen Morphologien

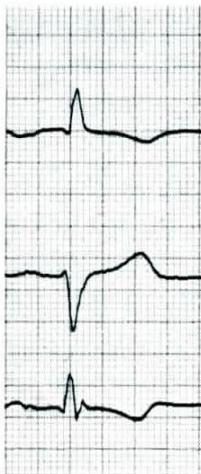
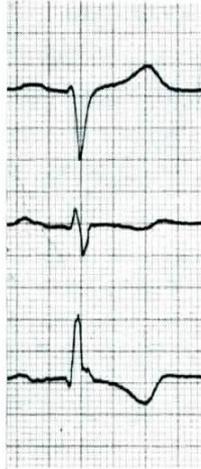
Die elektrische Herzachse entspricht dabei der Hauptausbreitungsrichtung der elektrischen Erregung. Bestimmte Lagetypen müssen von vornherein als pathologisch gelten (z.B. überdrehter Rechtstyp)
 Eine Änderung der Herzachse kann auf eine Herzerkrankung wie Herzinfarkt oder Lungenembolie hindeuten.

Lagetypen

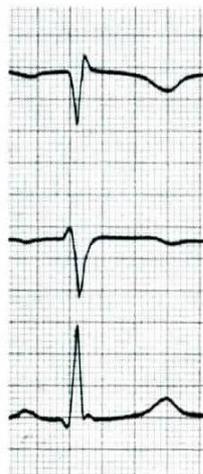
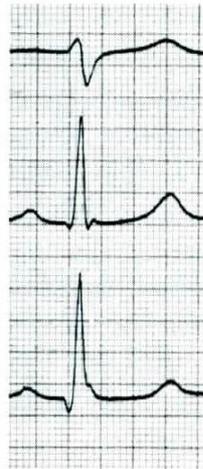
Sagittaltyp



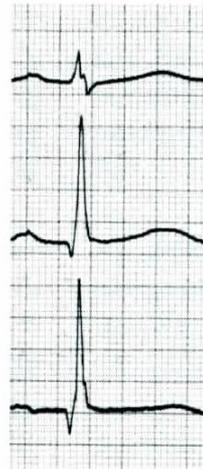
überdrehter
Rechtstyp



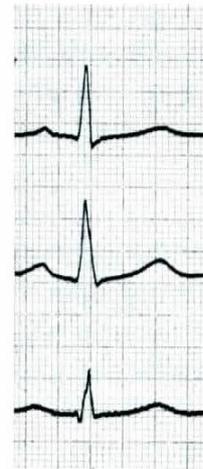
Rechtstyp



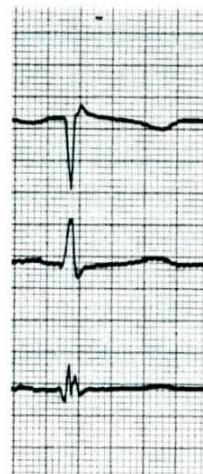
Steiltyp



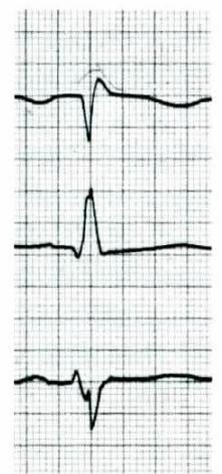
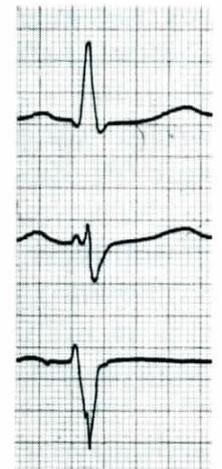
Indifferenztyp



Linkstyp



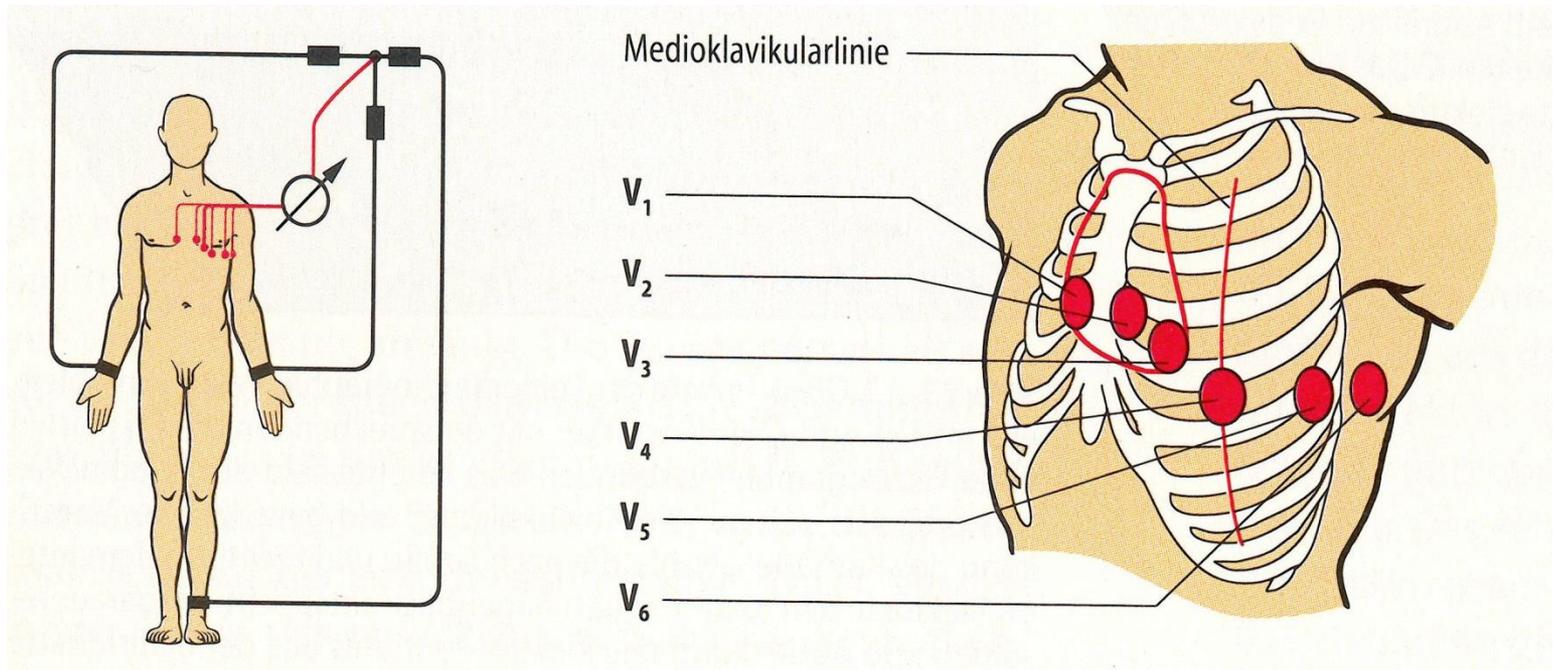
überdrehter
Linkstyp



Gonska, Heinecker: EKG in Klinik und Praxis. Thieme Verlag

Wilson-Brustwandableitungen

- Zusammenschaltung der Einthoven-Elektroden
- Bildung eines virtuellen „central terminals“
- Beobachtung v.a. auch der Herz hinterwand möglich



Quelle:
 R.F. Schmidt, G.
 Thews (Hrsg.), Die
 Physiologie des
 Menschen,
 Springer, 1995

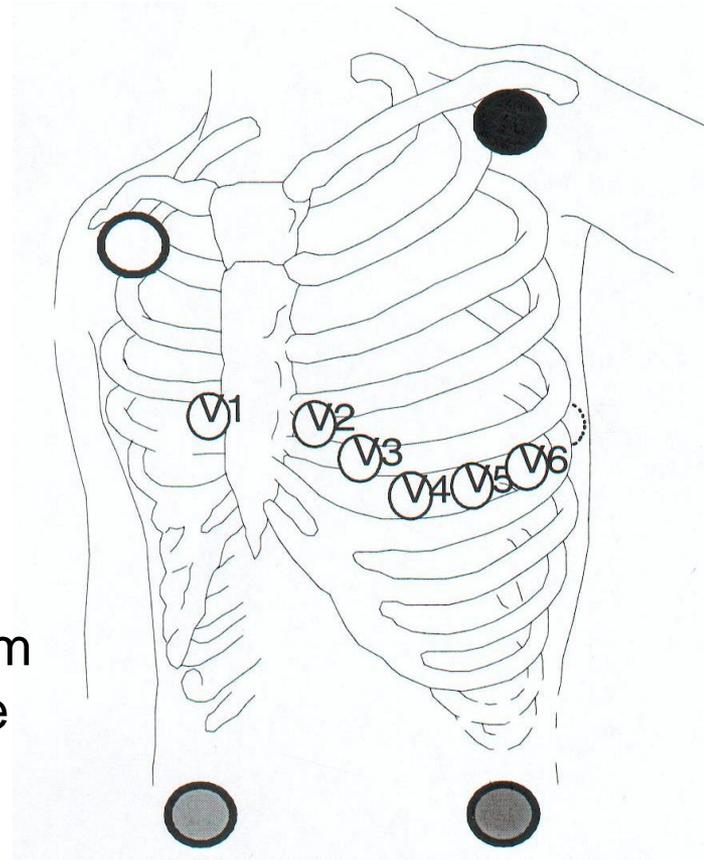
12-Kanal-Standard-EKG

- 3 Einthoven- und 3 Goldberger-Ableitungen
 - Oft auf der Brust abgeleitet

- 6 Wilson-Ableitungen

- Benötigt:
 - 8 EKG-Verstärker
 - 9 bis 10 Elektroden

- Andere Ableitungen wären möglich, deren veränderte Form würde aber eine neue klinische Interpretation benötigen.



Quelle:
 Hewlett Packard, White
 Paper Viridia, 1998

12-Kanal-EKG

