

Biomedizinische Messtechnik I

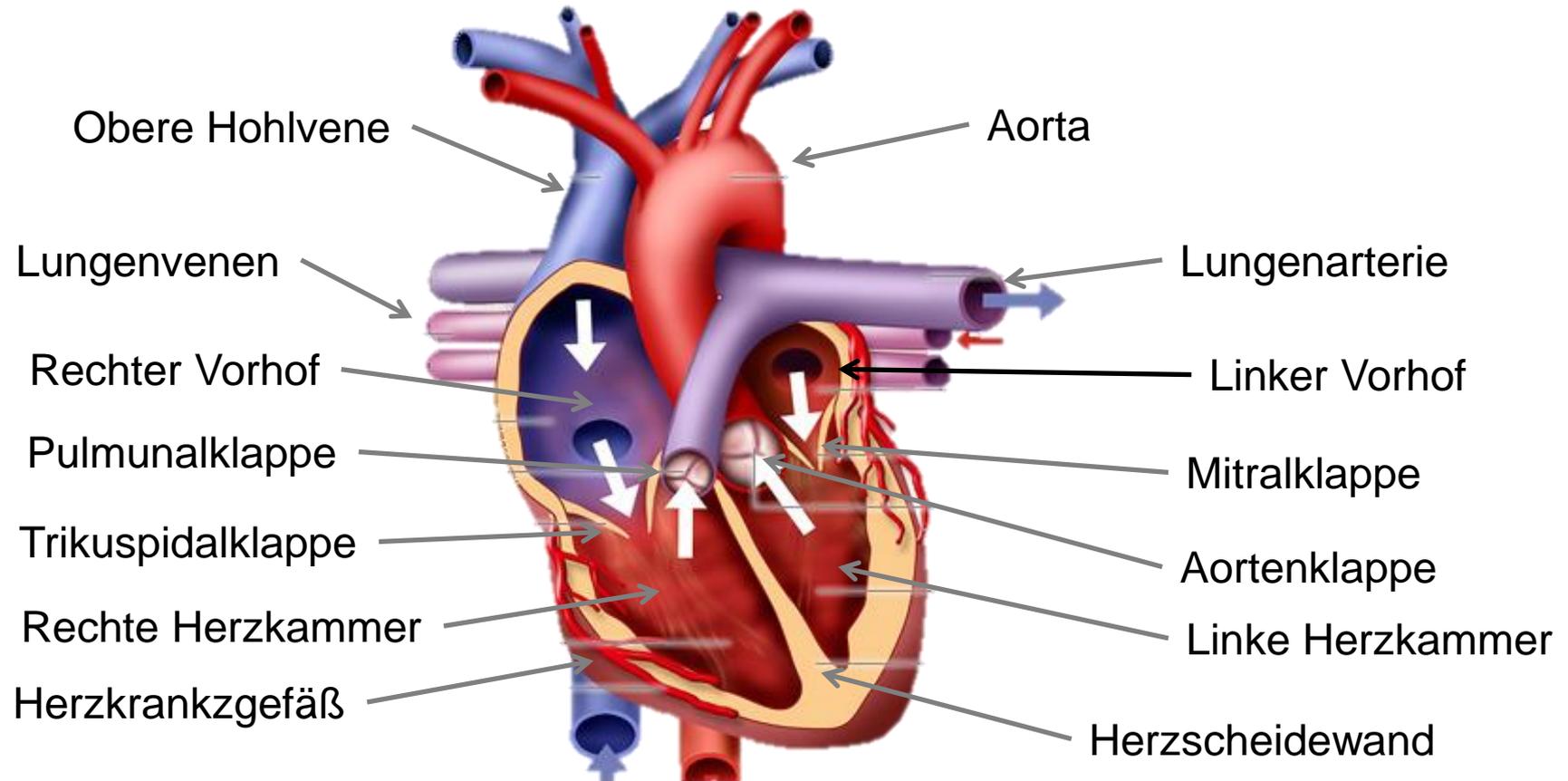
Prof. Wilhelm Stork

Heute vertreten durch: Dr.-Ing. Silvester Fuhrhop (fuhrhop@kit.edu)

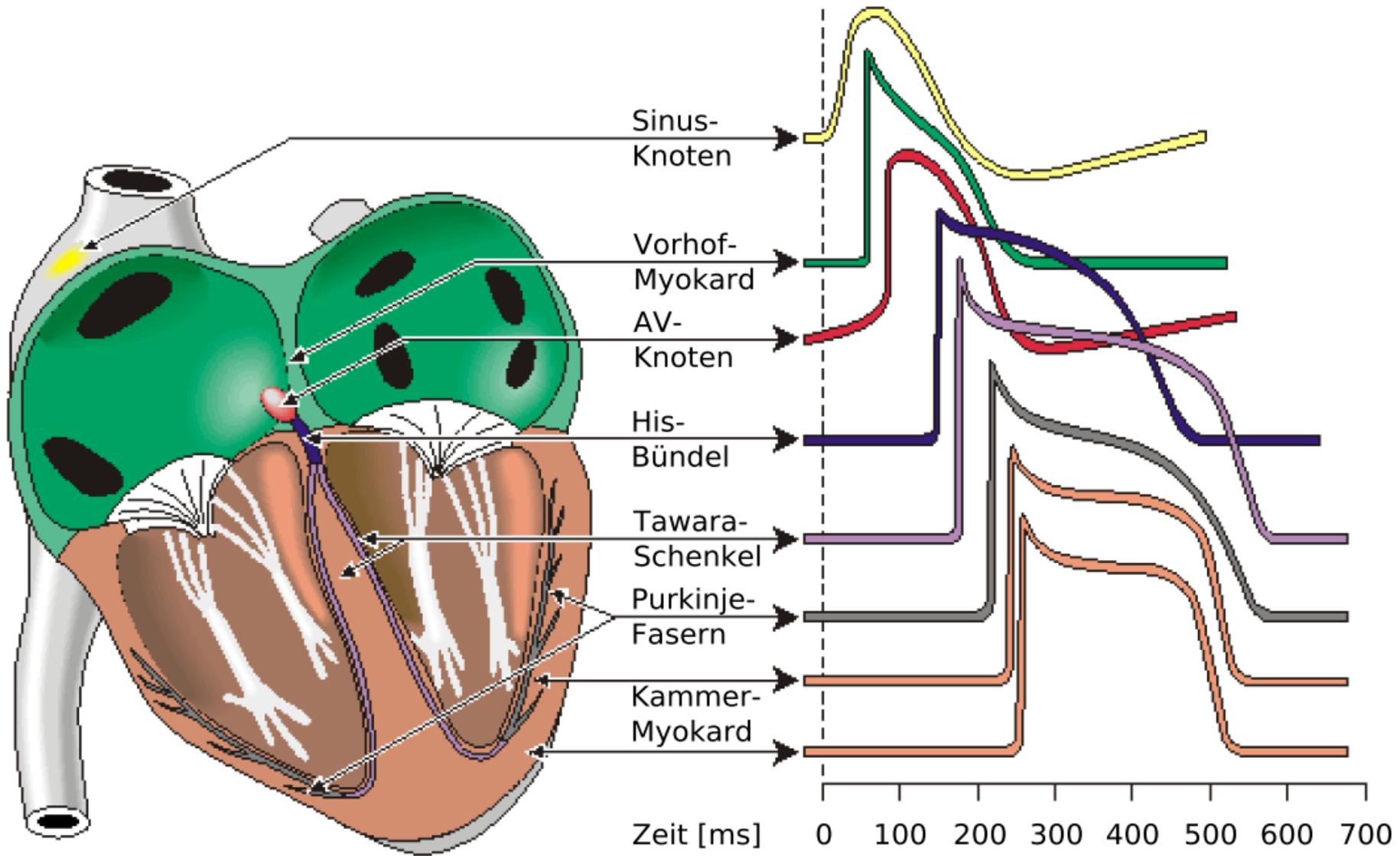
Institut für Technik der Informationsverarbeitung (ITIV)

Pumpvorgang des Herzens

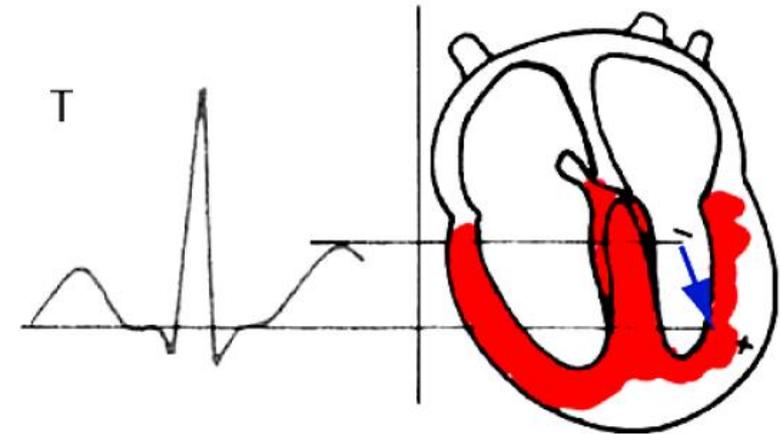
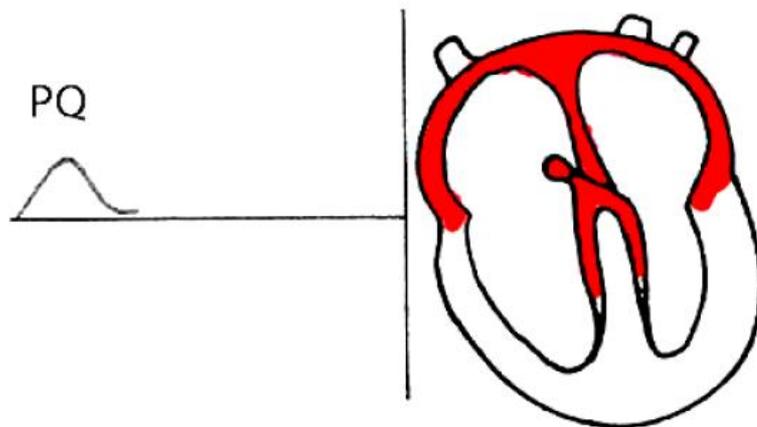
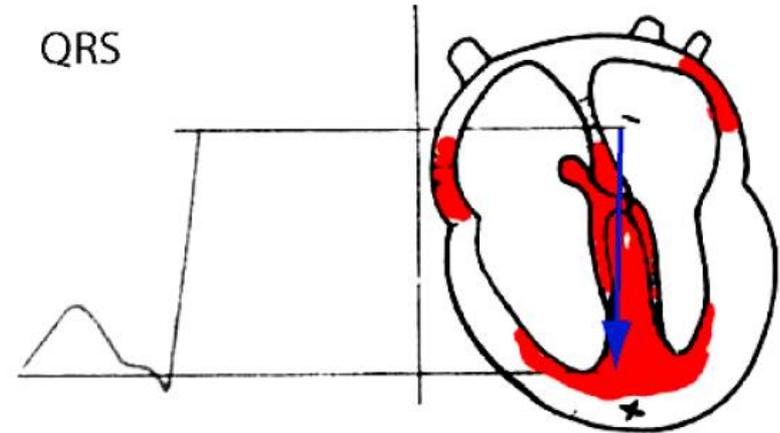
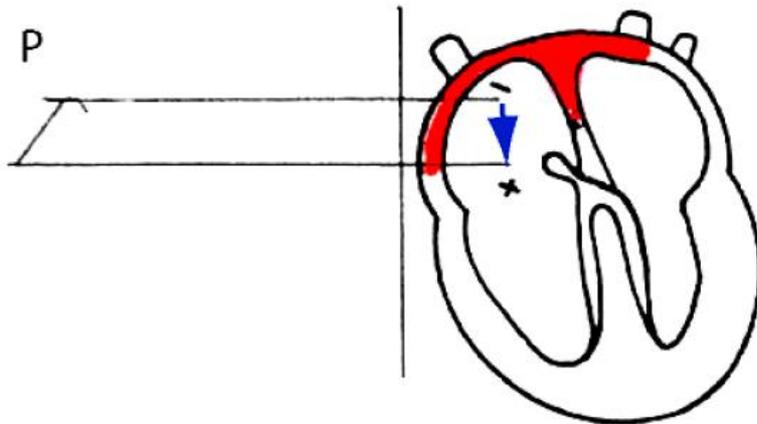
- 70 Schläge x 60 Min x 24 h = ca. 100.000 Pumpzyklen / Tag
- Ca. 36 Mio. Pumpzyklen / Jahr
- Ca. 3 Mrd. Pumpzyklen in 80 Jahren



Aktionspotentiale verschiedener Zellen des Herzens



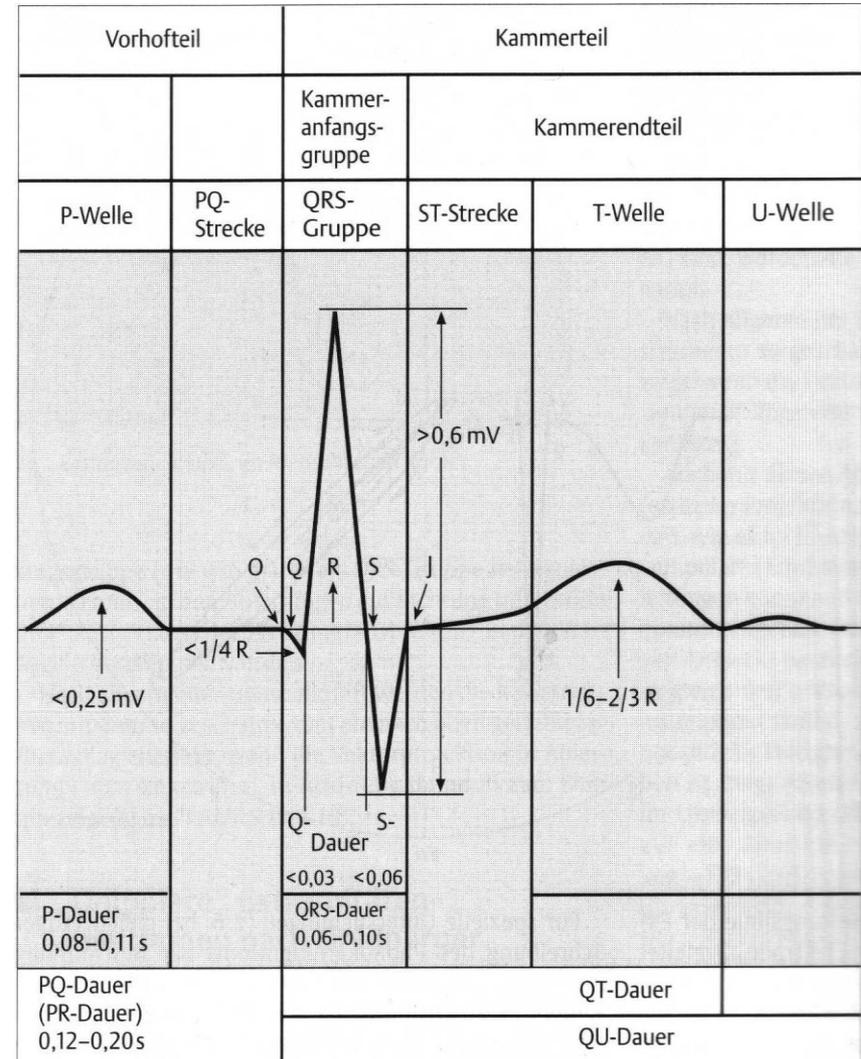
Richtung und Stärke des Integralvektors für die EKG-Ableitung für V II



Quelle: Kurzlehrbuch Physiologie. Urban und Fischer Verlag

Begriffe und Normwerte

- P-Welle:
Aktivität der Vorhöfe
- QRS-Komplex:
Depolarisation/ Erregung der Kammern
- ST-Strecke:
Vollständige Erregung der Kammer
- T-Welle:
Kammerrepolarisation
- U-Welle



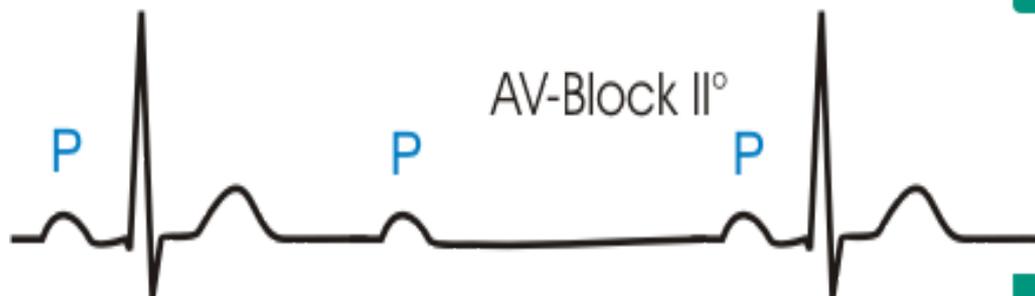
Quelle: B.-D. Gonska, R.Heinecker: EKG in Klinik und Praxis, Stuttgart, New York, Thieme, 1999

Pathologien im EKG:

Erregungsbildungsstörungen: AV-Block



- AV-Block Grad I
 - verspätet einsetzenden Kontraktion der Herzkammern
Verlängerung (über 200 ms)

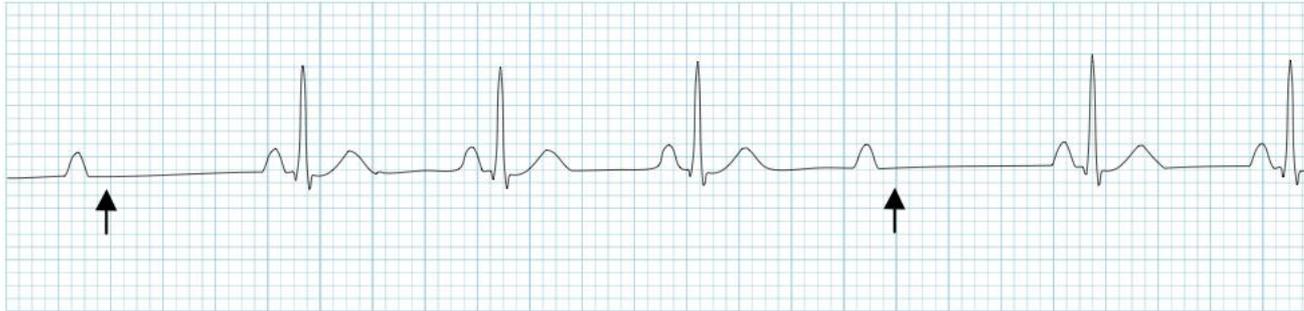


- AV-Block Grad II
 - Teilweises ausfallen der Erregungsleitung

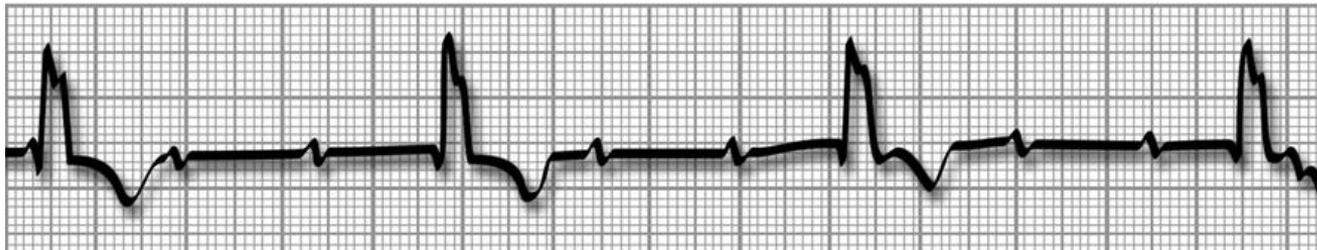


- AV-Block Grad III
 - Ausfall der Erregungsleitung zwischen Vorhof und Kammer
 - Vorhof „normal“ getaktet
 - Pumpfrequenz der Ventrikel bei 20- 40 /min = Frequenz des sekundären (AV-Knoten) oder der tertiären Erregungszentren

Pathologien im EKG: Erregungsbildungsstörungen



■ AV Block Grad II

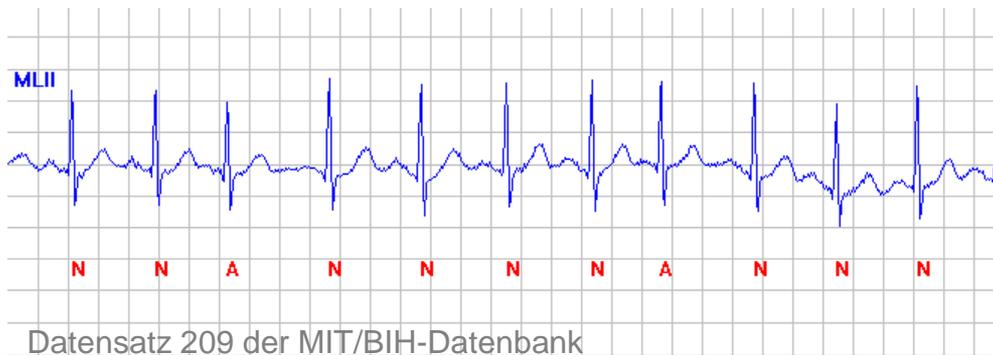


■ AV Block Grad III

Pathologien im EKG: Erregungsbildungsstörungen: Extrasystolen



Ventrikuläre Extrasystole



Supraventrikuläre Extrasystole

- Zusätzliches Schrittmacherzentrum
 - in der Kammer
→ ventrikuläre Extrasystole
Stolperer, andere Morphologie, gefährlich => kreisenden Erregungen
 - im Vorhof
→ supraventrikuläre Extrasystole (Stolperer, wenig gefährlich)
- Detektion und Differentialdiagnose z.B. über folgende Parameter:
 - RR-Intervall
 - RR/RR_{avg}
 - QRS-Breite
 - Polarität und Amplitude
 - Weitere Formfaktoren

Pathologien im EKG:

Erregungsbildungsstörungen: Extrasystolen



■ VES

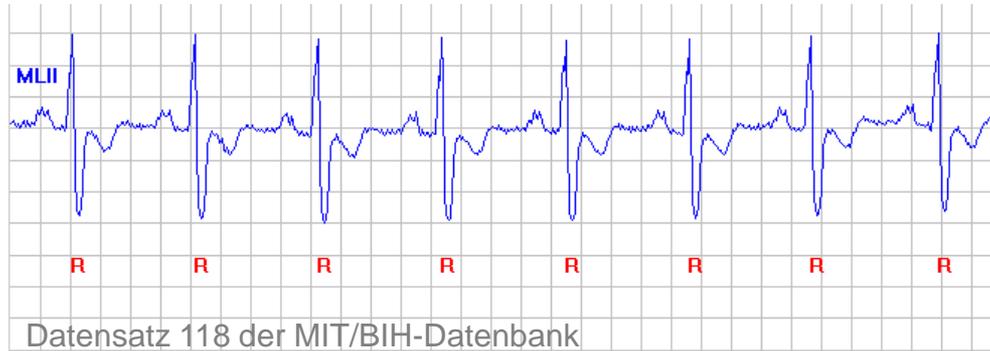


■ VES

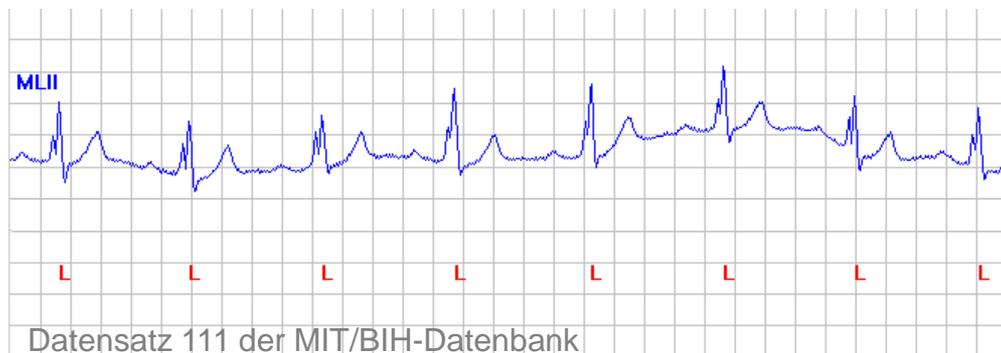


■ SVES

Pathologien im EKG: Erregungsleitungsstörungen



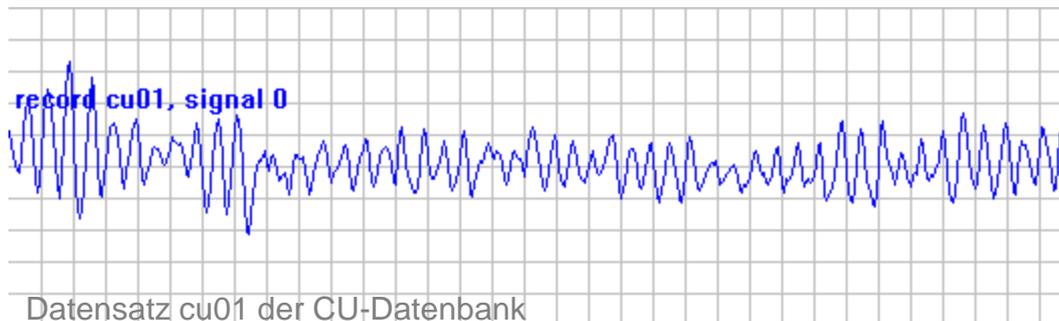
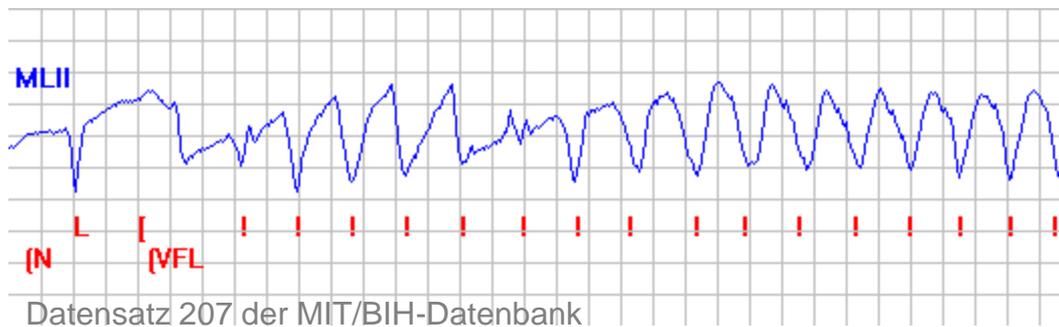
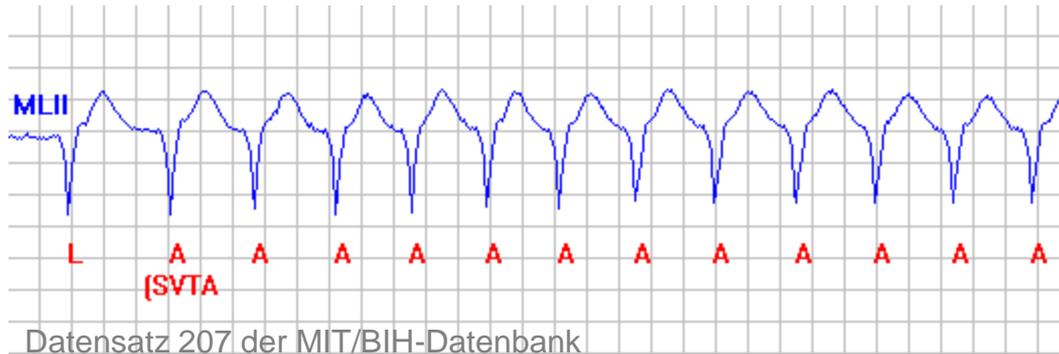
Rechtsschenkelblock



Linksschenkelblock

- Hemmung bzw. Block der Erregungsweiterleitung im Reizleitungssystem, bei distaler Lokalisation (Tawara-Schenkel) Ausbildung eines Schenkelblocks
 - Die Erregung des Kammermyokards erfolgt auf „Umwegen“
 - Morphologieveränderungen
- Ursachen können Entzündungen, Durchblutungsstörungen sein

Pathologien im EKG: Tachykardien (Herzrasen)



- Gefährdungspotenzial von Tachykardien abhängig vom Erregungszentrum
 - supraventr. Tachykardien im Normalfall unkritisch
 - ventrikuläre Tachykardien gefährlich, da Ausbildung eines Re-Entry-Phänomens möglich
→ effektiver Pumpverlust
- Tachykardien können auch durch zusätzliche Erregungsbahnen zwischen Vorhof und Kammer entstehen
→ WPW- und LGL-Syndrom

Pathologien im EKG: Weitere Krankheitsbilder

- Ischämie (Unterversorgung Herzgewebe) und akute Infarktgeschehen führen zu einer Veränderung der ST-Strecke und der Repolarisation, nekrotisiertes Gewebe führt auch zu Änderungen der QRS-Morphologie
- Erregungsrückbildungsstörungen verlängern das QT-Intervall und können Hinweise auf eine Gefährdung für Re-Entry-Mechanismen sein.
- Die Bestimmung der Herzratenvariabilität und der Herzratturbulenz geben Hinweise auf die sympathikovagale Regelgüte

Übersicht verschiedener Rhythmusstörungen



Supraventrikuläre Extrasystole



Sinus-Pause



Ventrikuläre Extrasystole



Bigeminus



AV-Block 2nd°, type 2



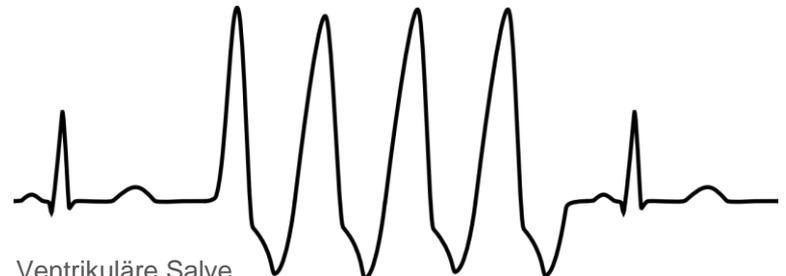
Asystolie



Kammerflattern



Vorhofflattern



Ventrikuläre Salve

Elektroden – Wozu?

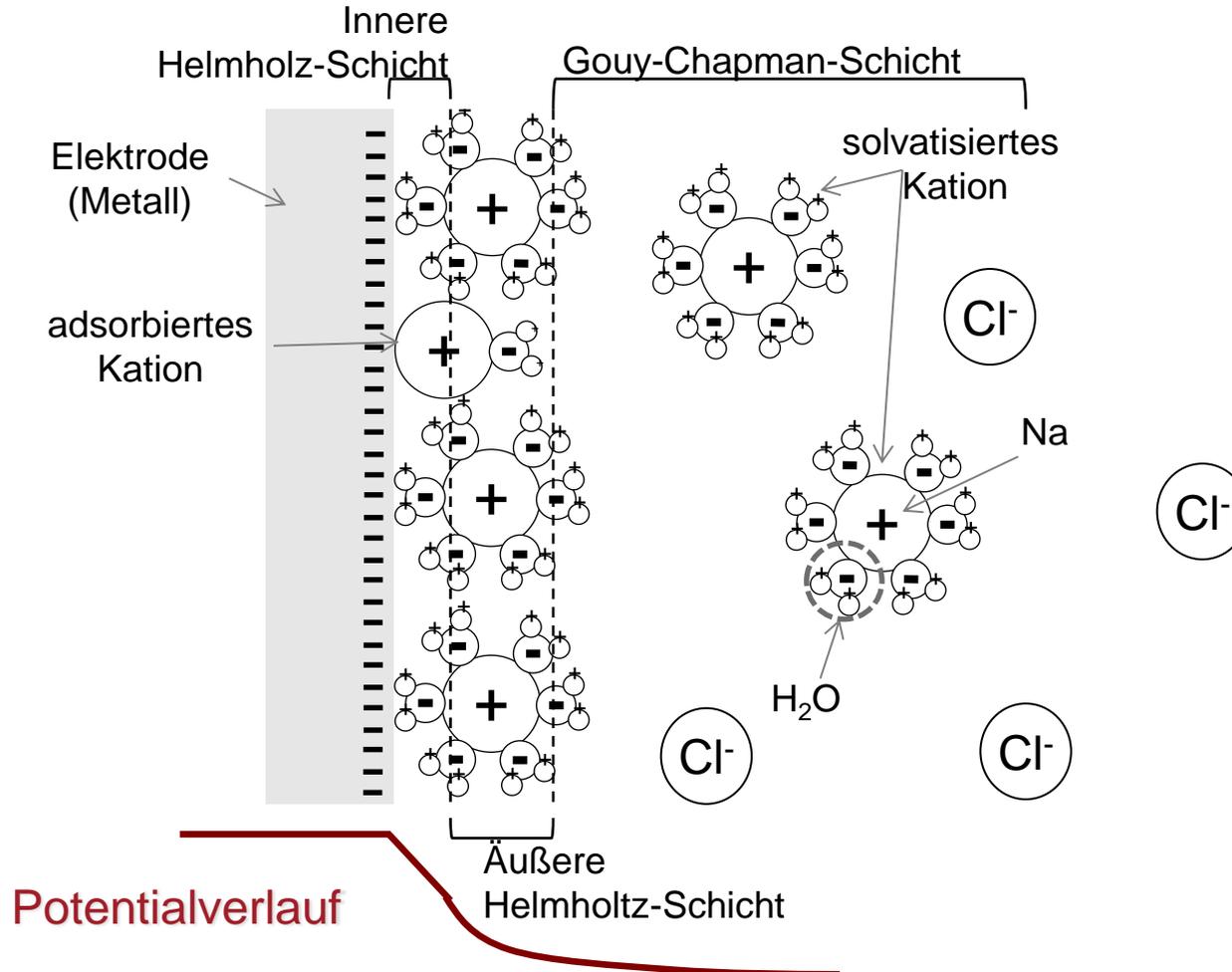
- Ankopplung eines technischen Messsystems an den Körper
- Körper ist Ionenleiter
 - 0,9% NaCl (physiologische Kochsalzlösung)
 - NaCl ist in Lösung zu Na⁺ und Cl⁻ dissoziiert
 - Diese Ionen stehen als freie Ionen zum Ladungstransport zur Verfügung
- Messschaltung: Ladungstransport durch Elektronen
 - Wechsel der Ladungsträgerart: an der Schnittstelle Elektrode/Haut
 - Ionenleiter (im Körper) → Elektronenleiter (im Elektrodenmetall)

Entstehung der Phasengrenze Elektrolyth/Elektrode

- Durch Eintauchen von Metallen in eine Lösung finden an der Elektrodenfläche Oxidations- und Reduktionsvorgänge statt
 - Lösen von Metallionen aus Metallgitter durch Oxidation. Wandern des Ions in die Lösung.
 - Durch Oxidation überschüssigen Elektronen bleiben im Metall und stoßen sich gegenseitig ab.
 - Anlagerung der Elektroden an der Oberfläche des Metalls
 - In Lösung gegangene Elektroden sind positiv geladen.
 - Anlagerung der gelösten Ionen an der Metalloberfläche
 - Gelöstes Ion kann Elektron aufnehmen = Reduktion
- Nach dem Eintauchen ist eine der beiden Reaktionen (Oxidation/Reduktion) energetisch günstiger als Gegenreaktion
 - Aufbau eines Potentials
- Bei gewissen Potential wird elektrochemisches Gleichgewicht erreicht (beide Reaktionen laufen mit derselben Häufigkeit ab)
= Halbzellenpotential
- Das Halbzellenpotential ist materialabhängig (elektrochemische Spannungsreihe)

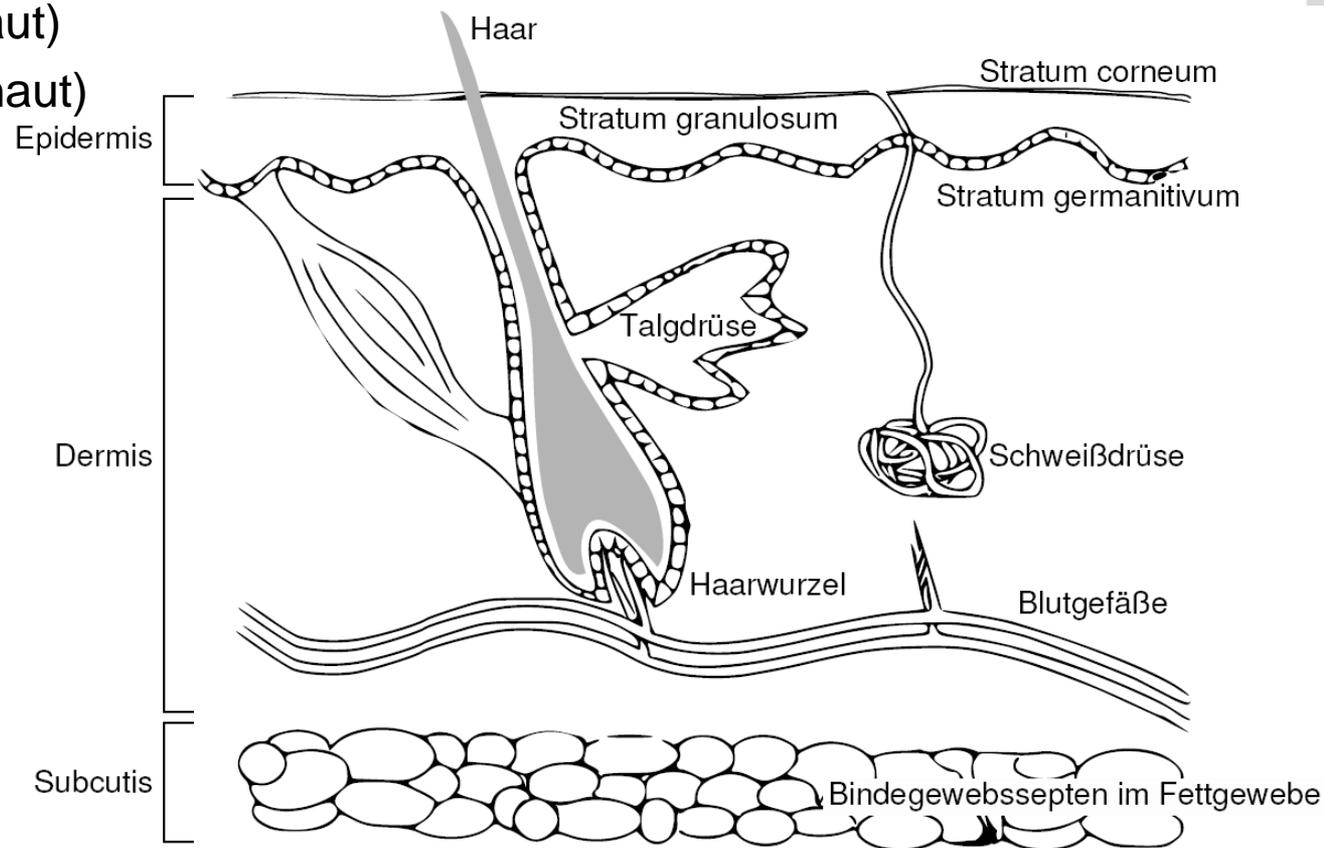
Aufbau der Phasengrenze Elektrolyth/Elektrode

■ Helmholtz Doppelschicht

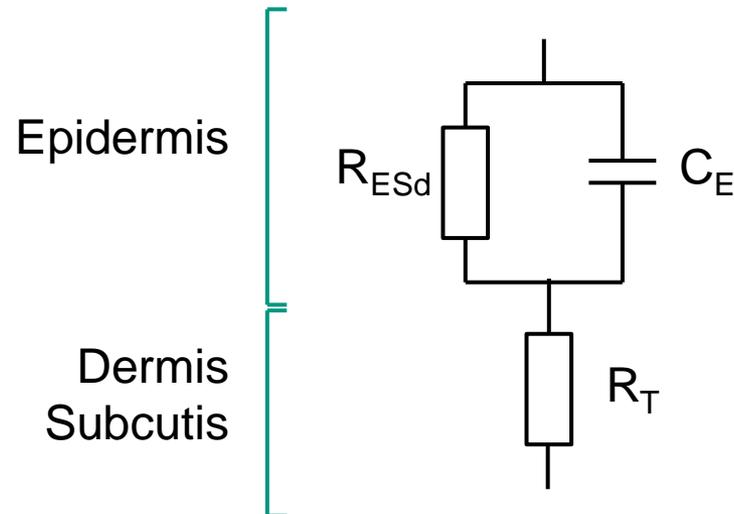


Die menschliche Haut

- Geschichteter Aufbau
 - Epidermis (Oberhaut)
 - Dermis (Lederhaut)
 - Subcutis (Unterhaut)



Haut-Ersatzschaltbild

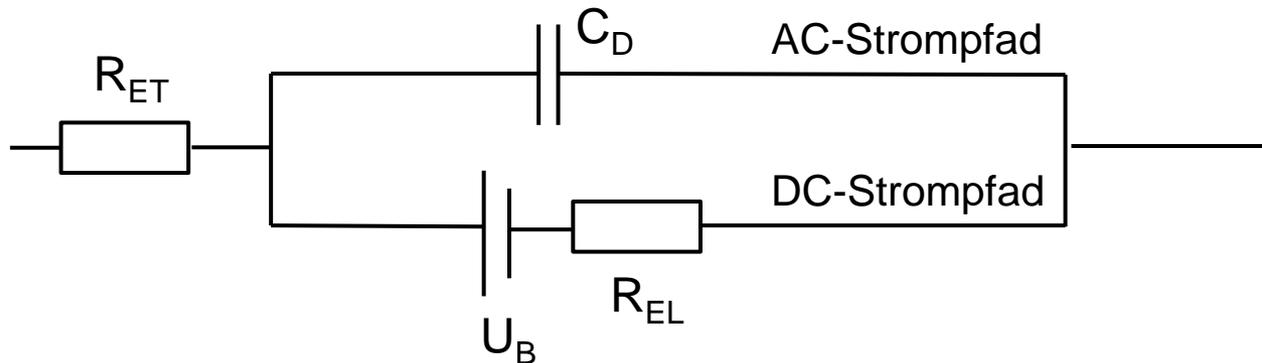


C_E : Impedanz der Hornschicht (Epidermis)

R_{ESd} : Widerstand der Schweißdrüsen und
Haarbälge

R_T : Widerstand der tiefergelegenen
Hautschichten

Elektrode-Elektrolyth-Ersatzschaltbild (vereinfacht)



C_D : Helmholtz-Doppelschicht

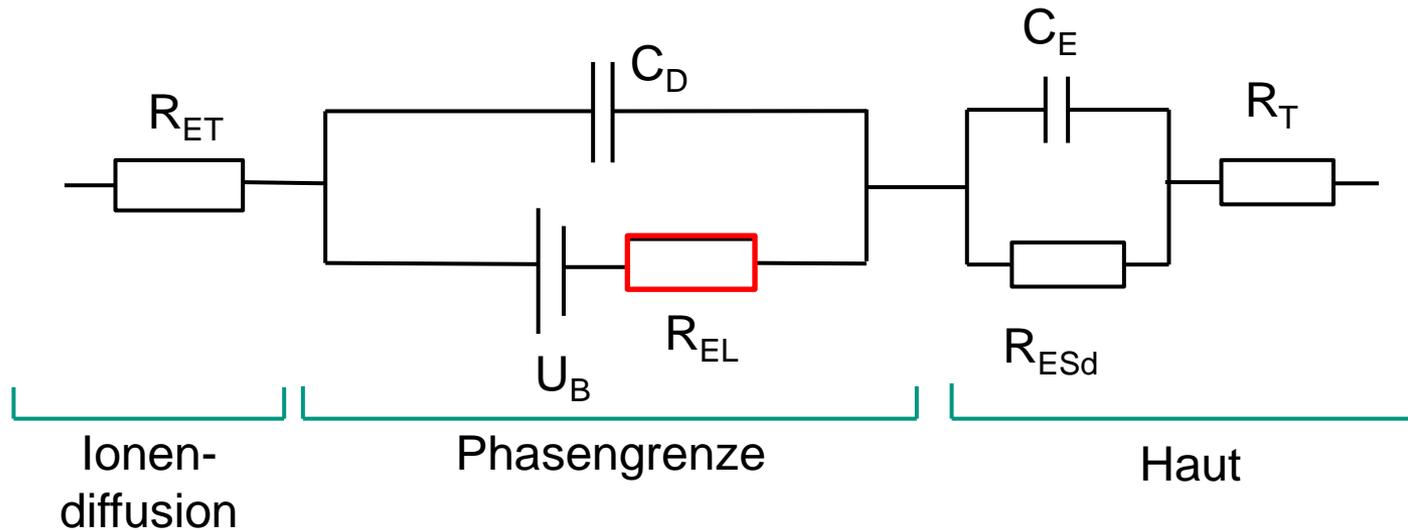
R_{ET} : Diffusion der Ionen im Elektrolyth

Z_{sorp} : Adsorption und Desorption an Elektrodenoberfläche

U_B : Halbzellenpotential

R_{EL} : Nötige Energie für Elektrodenreaktion (Ladungsübertritt an Phasengrenze)

Ersatzschaltbild Elektrode-Elektrolyth-Haut

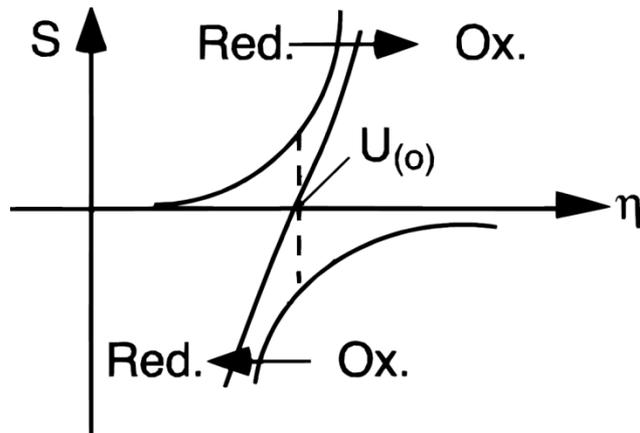


- Elektroden mit großen R_{EL} nennt man polarisierbar, da sie für niederfrequente Ströme einen hohen Übergangswiderstand aufweisen
→ Hoher Spannungsabfall bei Ladungsdurchtritt

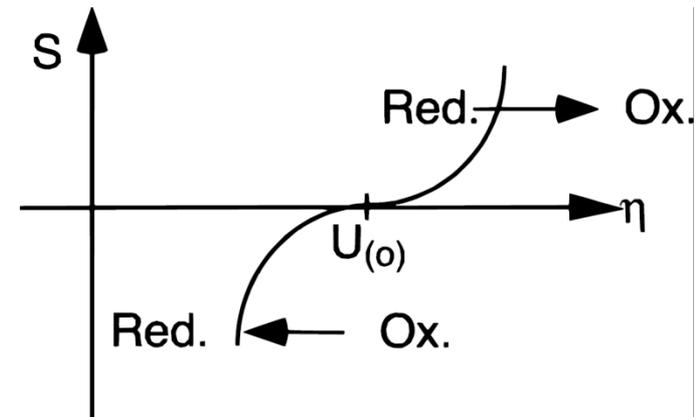
Elektroden – Polarisierbarkeit

- Je höher die Spannung liegt, mit der die Elektrodenreaktion für den Ladungstransfer aktiviert wird, desto höher ist R_{EL} und desto polarisierbarer ist die Elektrode

Unpolarisierbare Elektrode



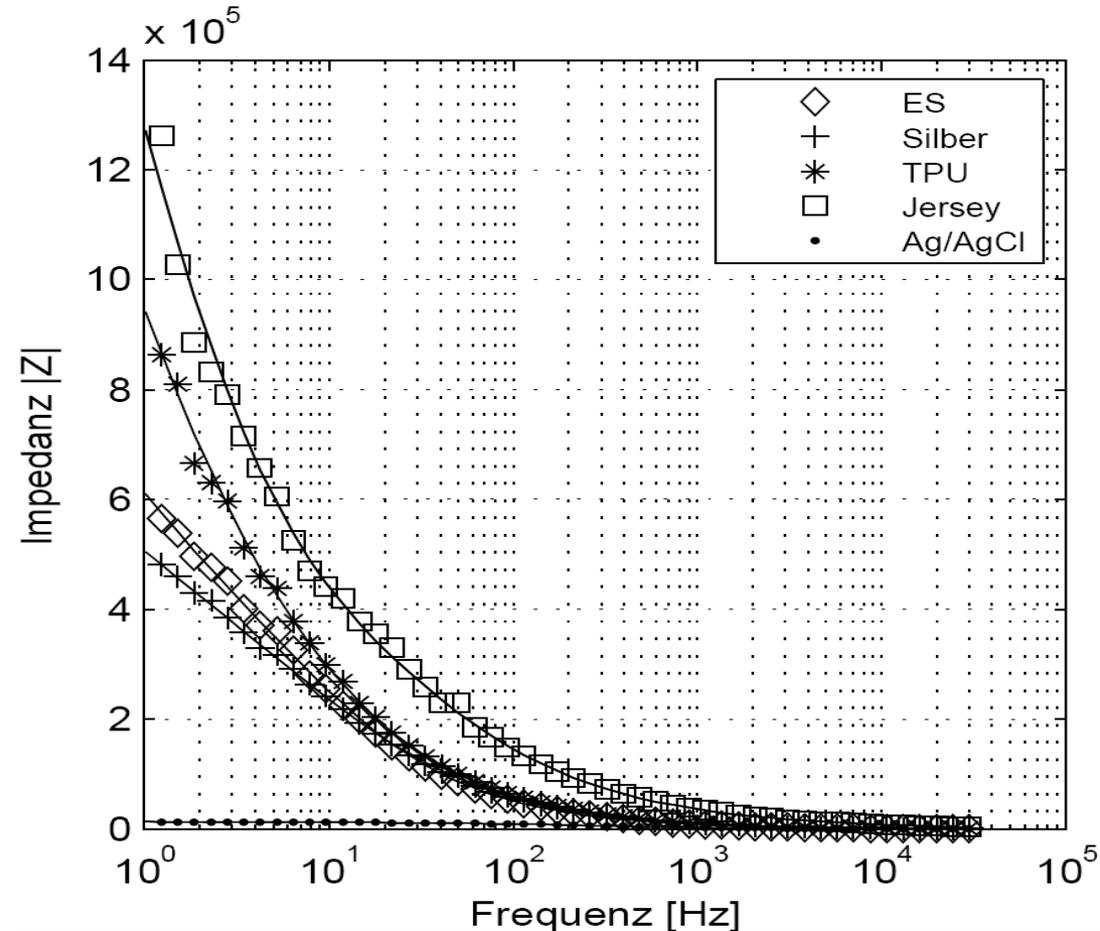
Polarisierbare Elektrode



η : Elektrodenüberspannung
 S : Stromdichte

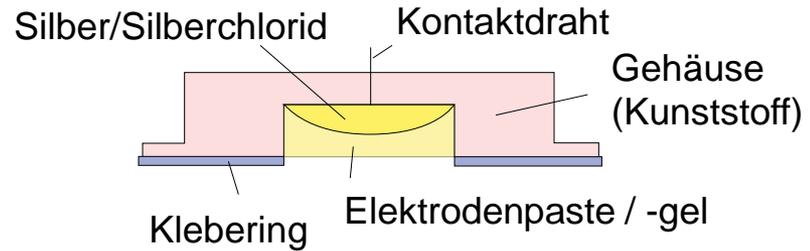
Elektrode Frequenzgang

- Frequenzabhängige Übergangsimpedanz
 - Bei niedrigen Frequenzen dominieren die Widerstände
 - Bei höheren Frequenzen dominieren die Kapazitäten



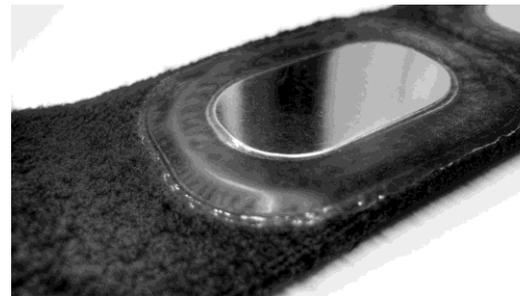
Elektrodentypen

- Silber(Ag)/Silberchlorid(AgCl)-Elektroden

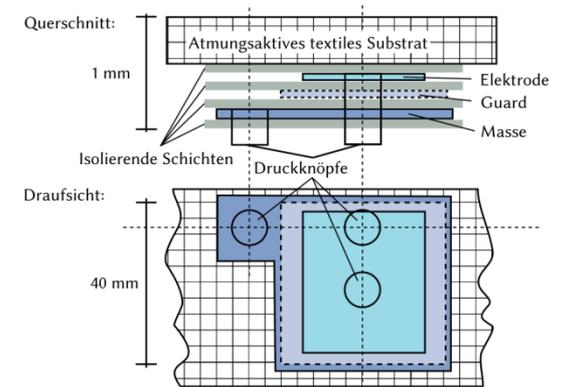
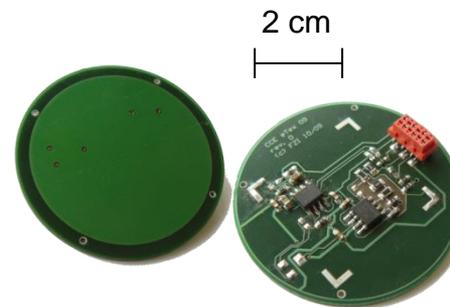


- Trockenelektroden

- Metall
- Leitfähiger Kunststoff
- Leitfähige Textilien



- Kapazitive Elektroden



Elektrodentypen – Vor- und Nachteile

	Ag/AgCl	Trocken	Kapazitiv (CCE)
Hautverträglichkeit	-	+	+
Signalqualität	+	○	-
Langzeitstabilität	-	+	+

→ Klinischer Gold-Standard: Ag/AgCl-Elektroden

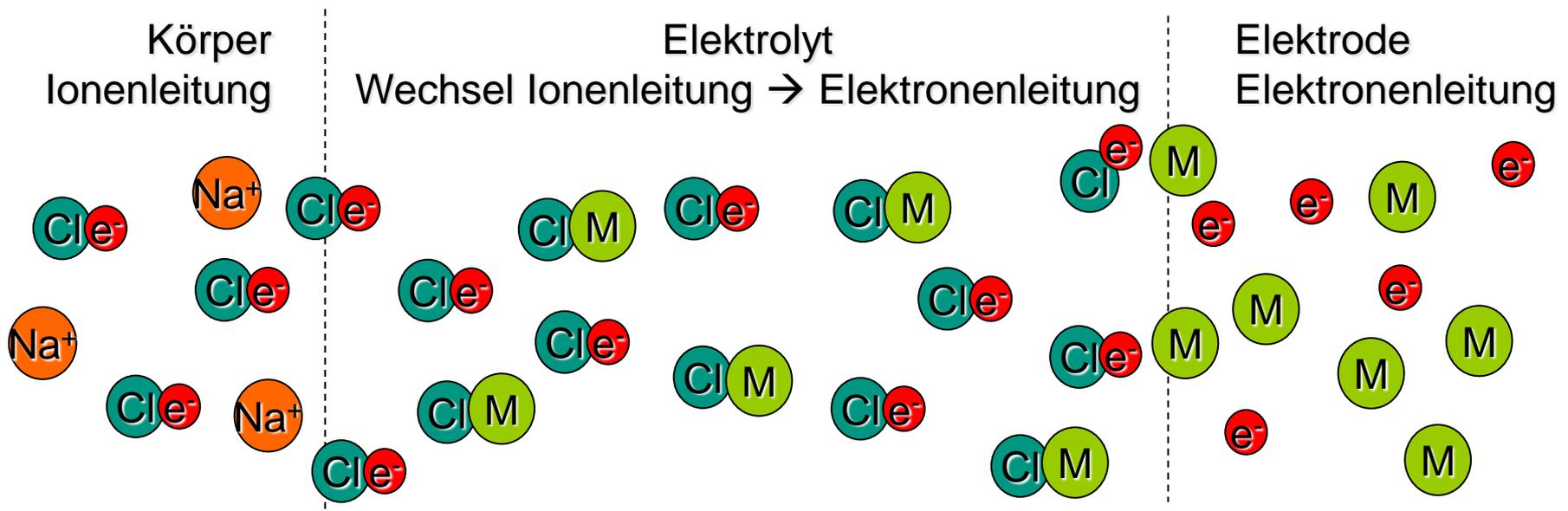
corvolution

DEMO

Funktionsprinzip Ag/AgCl-Elektrode

■ Wieso Elektrodengel?

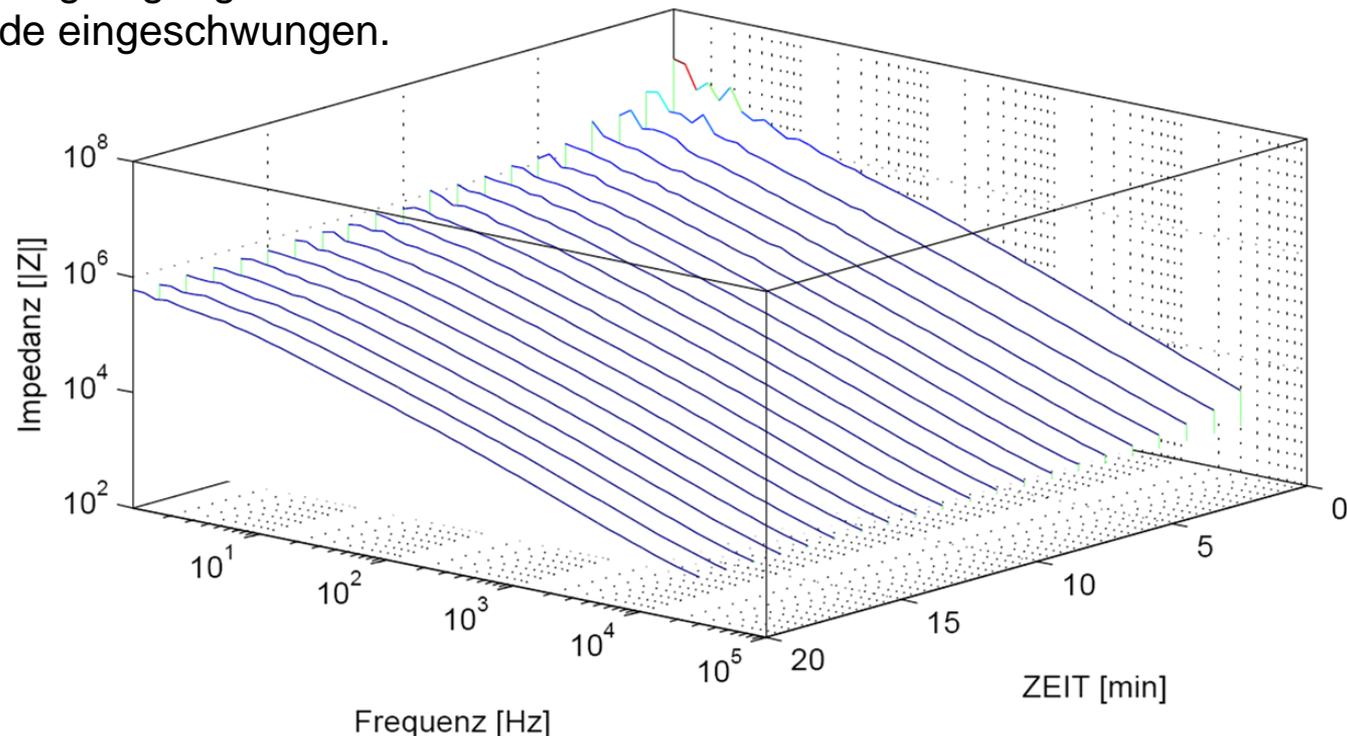
- enthält ein Elektrolyt → Ionen für Ladungstransport
- Verbesserung der Leitfähigkeit
- „Dämpfungselement“ für Änderungen des elektrochemischen Gleichgewichts an Phasengrenzen
- Verringerung der Helmholtz-Doppelschicht (geringere Wasserkonzentration)



- Bei entsprechender Anpassung: Elektrode wird nahezu unpolarisierbar

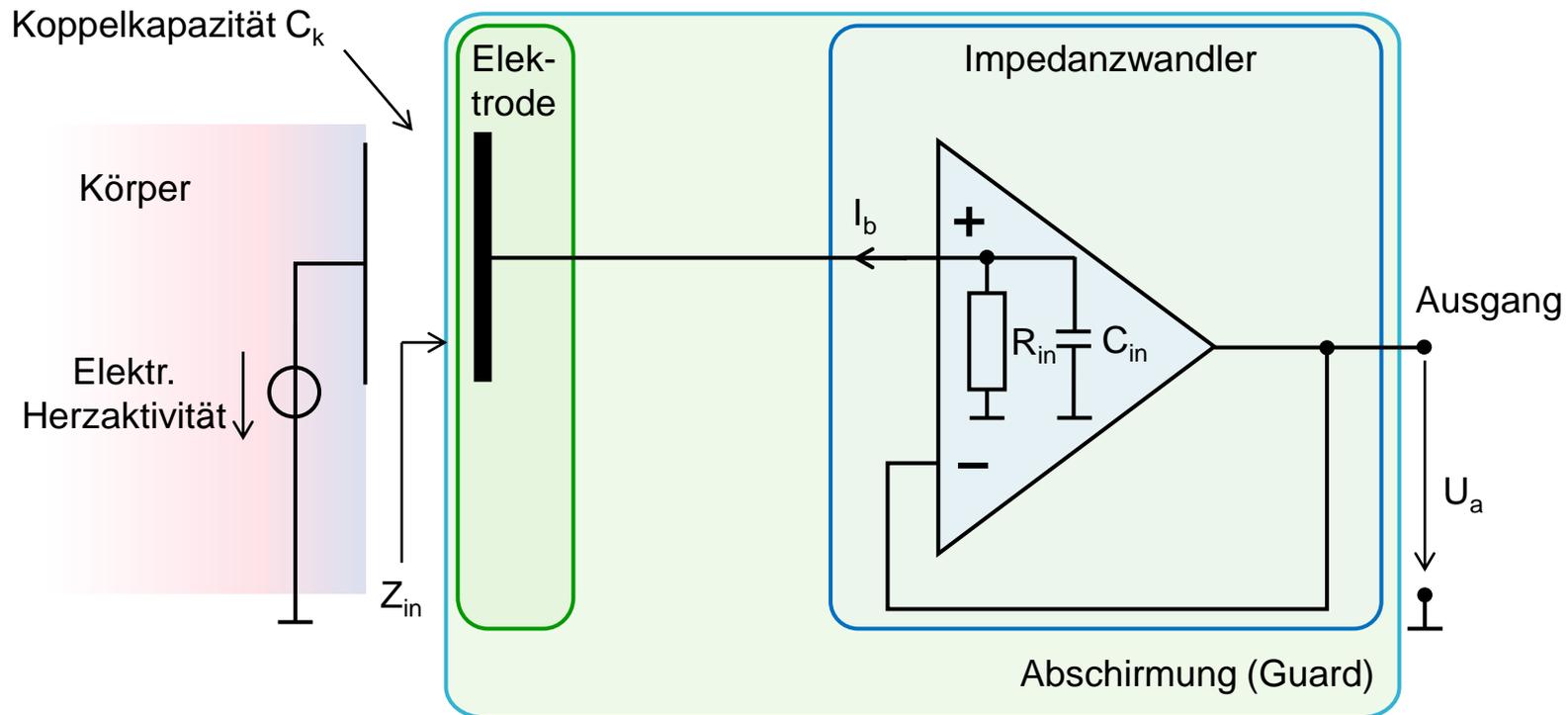
Funktionsprinzip Trocken-Elektrode

- Prinzipbedingt kein Elektroden-Gel vorhanden
- Elektrolyth wird durch Hautfeuchte und Schweiß gebildet
 - Einschwingvorgang der Hautfeuchte. Nach maximal 30 Minuten in Ruhe ist die Elektrode eingeschwungen.



- Polarisierbare Elektrode → Hohe Übergangsimpedanz bei den für das EKG relevanten Frequenzen (>150 Hz)

Funktionsprinzip kapazitive Elektrode



- Hochpassverhalten:

$$|H(j\omega)| = \frac{1}{\sqrt{\left(1 + \frac{C_{in}}{C_k}\right)^2 + \frac{1}{\omega^2 C_k^2 R_{in}^2}}}$$

mit $Z_{in} = R_{in} // C_{in}$

Funktionsprinzip kapazitive Elektrode – Dimensionierung

- Szenario: ambiente Messung durch Kleidung
- Annahmen:
 - Kleidungsdicke von 2 mm; Zusätzlicher Luftspalt von 1 mm
 - Untere Grenzfrequenz: $f_g = 0,67$ Hz (DIN 60601-2-47)
 - Akzeptierte Dämpfung im Durchgangsbereich: $A' = 1$ dB

Kontaktart	Elektroden-durchmesser	Koppelkapazität C_k	Koppelimpedanz Z_k	Minimaler Eingangswiderstand R_{in}	Maximale Eingangskapazität C_{in}
Kleidung	40 mm	7,8 pF	30,5 G Ω	52,1 G Ω	0,9 pF
	90 mm	39,4 pF	6,0 G Ω	10,3 G Ω	4,8 pF
Kleidung & Luftspalt	40 mm	2,4 pF	97,6 G Ω	166,8 G Ω	0,3 pF
	90 mm	12,3 pF	19,3 G Ω	33,0 G Ω	1,5 pF

- Vergleichswerte:
 - Standard EKG-Verstärker: $R_{in} = 10$ M Ω
 - Beste verfügbare OPs: $C_i = 0,5$ bis 1 pF
- Extreme Anforderungen an die Schaltungstechnik

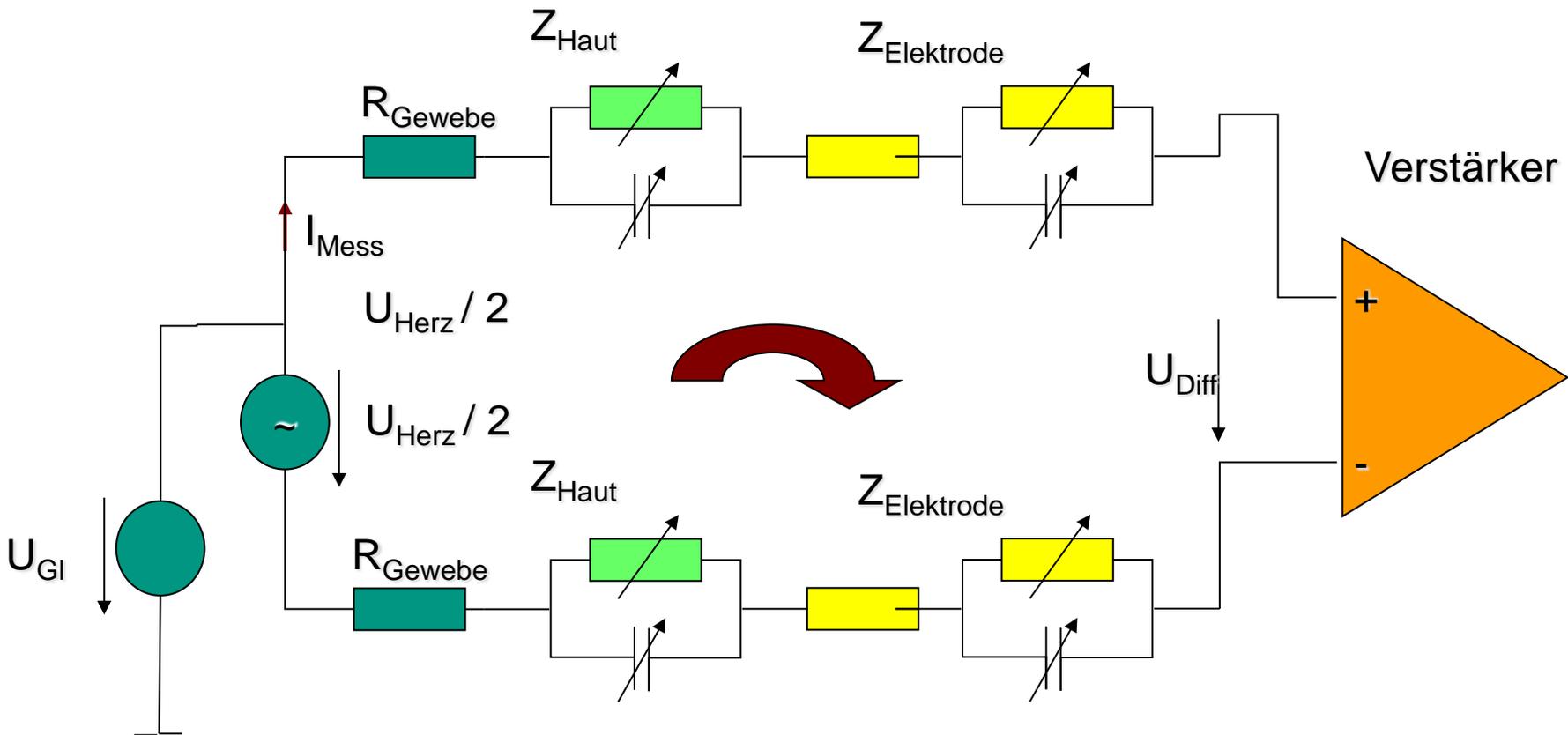
EKG-Verstärkungstechnik

- Was wird beim EKG gemessen?
 - Potenzialdifferenz bzw. Differenzspannung zwischen zwei Elektroden
 - Projektion des Herzvektors auf die (elektrische) Ableitungslinie
 - Herzdipol ist Summenvektor räumlich und zeitlich verteilter Einzelpotenziale der Herzzellen

 - Warum muss das EKG-Signal verstärkt werden?
 - Signalamplitude des EKGs: $\sim 2\text{mV}$
 - Signalamplitude von Störsignalen: $\sim 2,4\text{V}$
- Messung sehr kleiner Spannungen in einem stark gestörten Umfeld

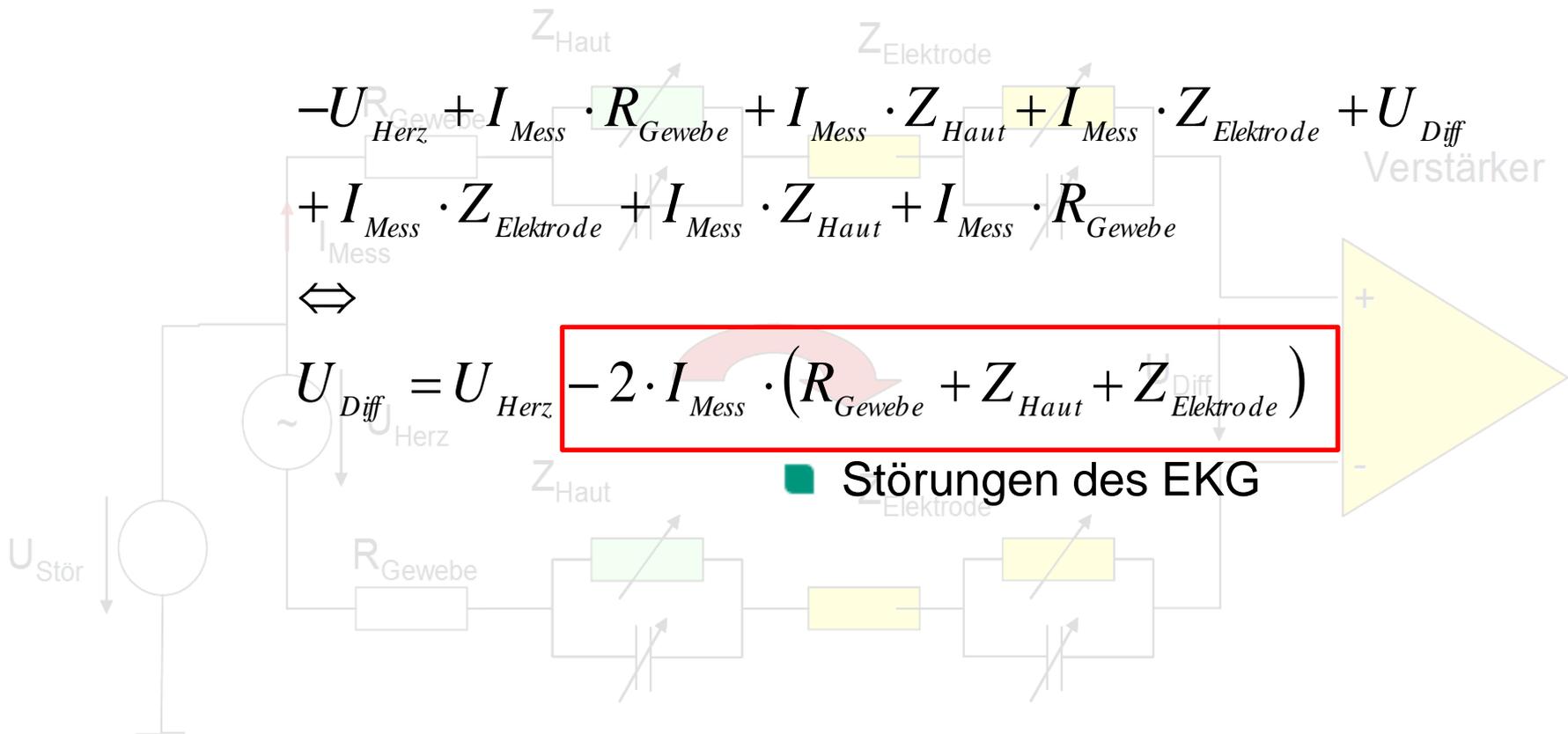
EKG-Verstärkungstechnik – Störungen

■ Modellierung der Signalkette



EKG-Verstärkungstechnik

- Aufstellen der Maschengleichung und Umformen nach U_{Diff}

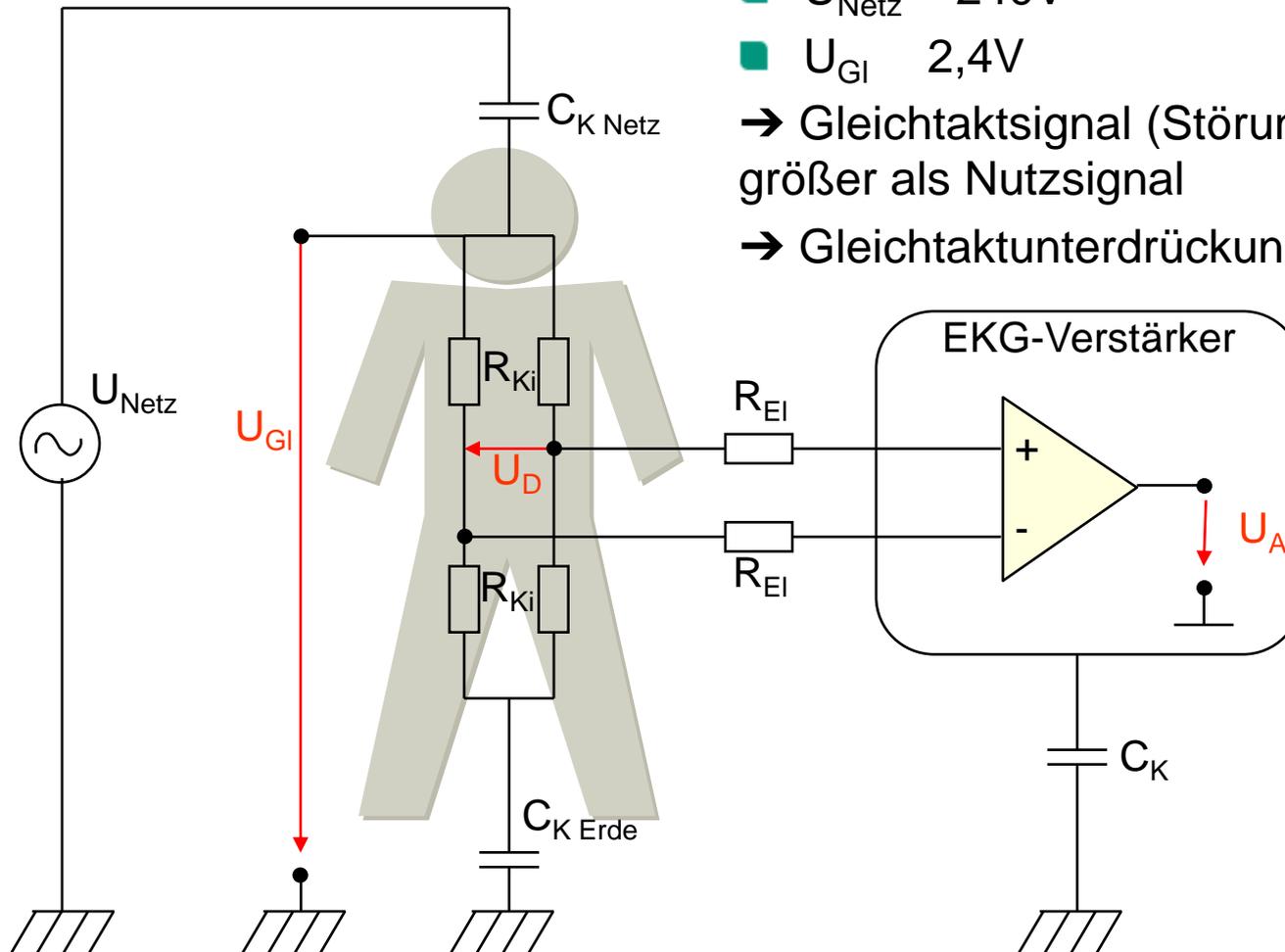


EKG-Verstärkungstechnik

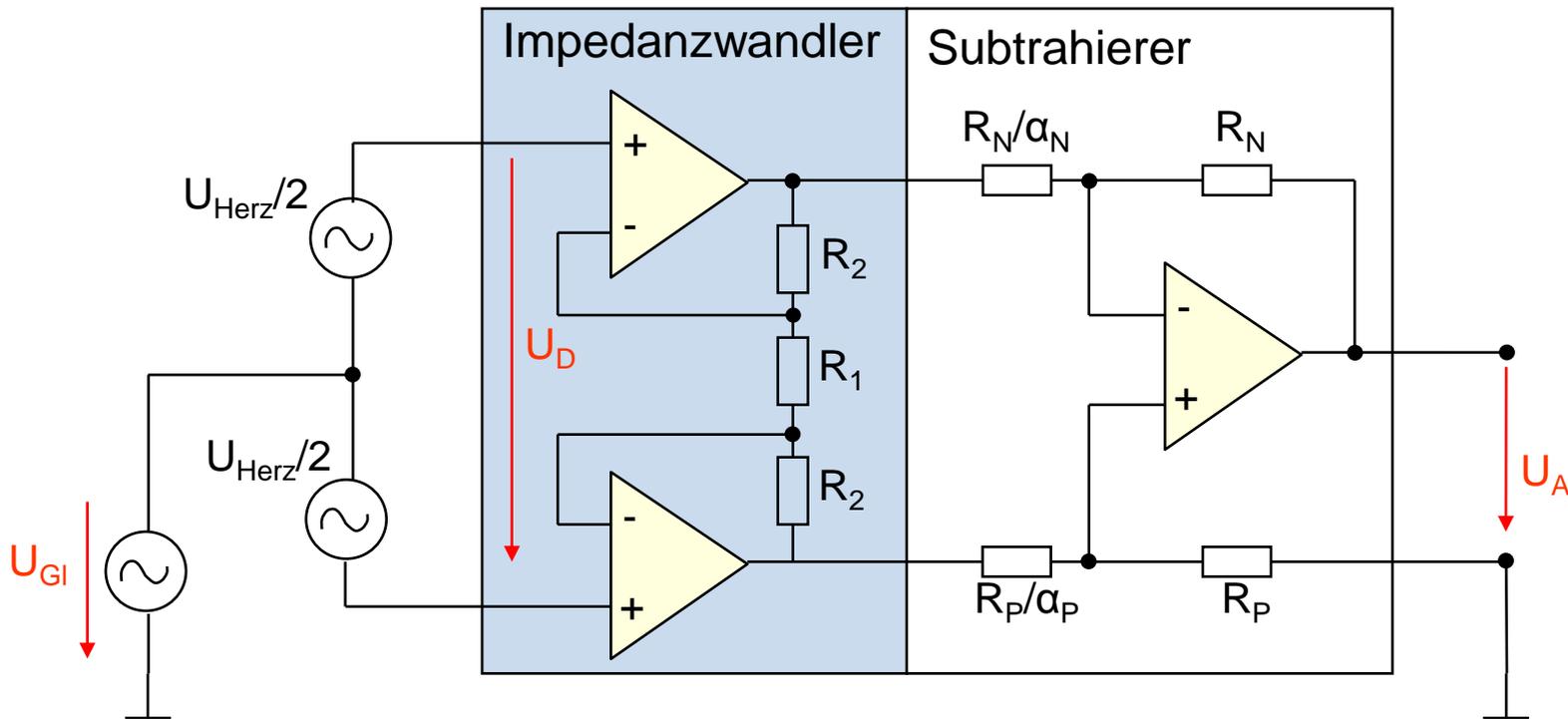
- Was lernen wir daraus?
 - Messstrom muss möglichst klein sein, um das Herzsignal nicht zu stark zu schwächen
 - Hohe Eingangsimpedanz des Messverstärkers.
 - Impedanzen von Elektrode und Haut sollten möglichst klein sein
 - Vor allem bei stark polarisierbaren Elektroden problematisch

EKG-Verstärkungstechnik – Ursache der Gleichtakteinkopplung

- U_D 2mV (EKG-Signal)
 - $U_{\text{Netz}} = 240\text{V}$
 - $U_{\text{Gl}} = 2,4\text{V}$
- Gleichtaktsignal (Störung) bis zu 60dB größer als Nutzsignal
- Gleichtaktunterdrückung $\gg 60\text{dB}$



EKG-Verstärkungstechnik – Differenzverstärker



Verstärkung:

$$U_A = \left(\frac{1 + \alpha_N}{1 + \alpha_P} \cdot \alpha_P - \alpha_N \right) \cdot U_{Gl} + \frac{1}{2} \left(\frac{1 + \alpha_N}{1 + \alpha_P} \cdot \alpha_P + \alpha_N \right) \cdot U_D$$

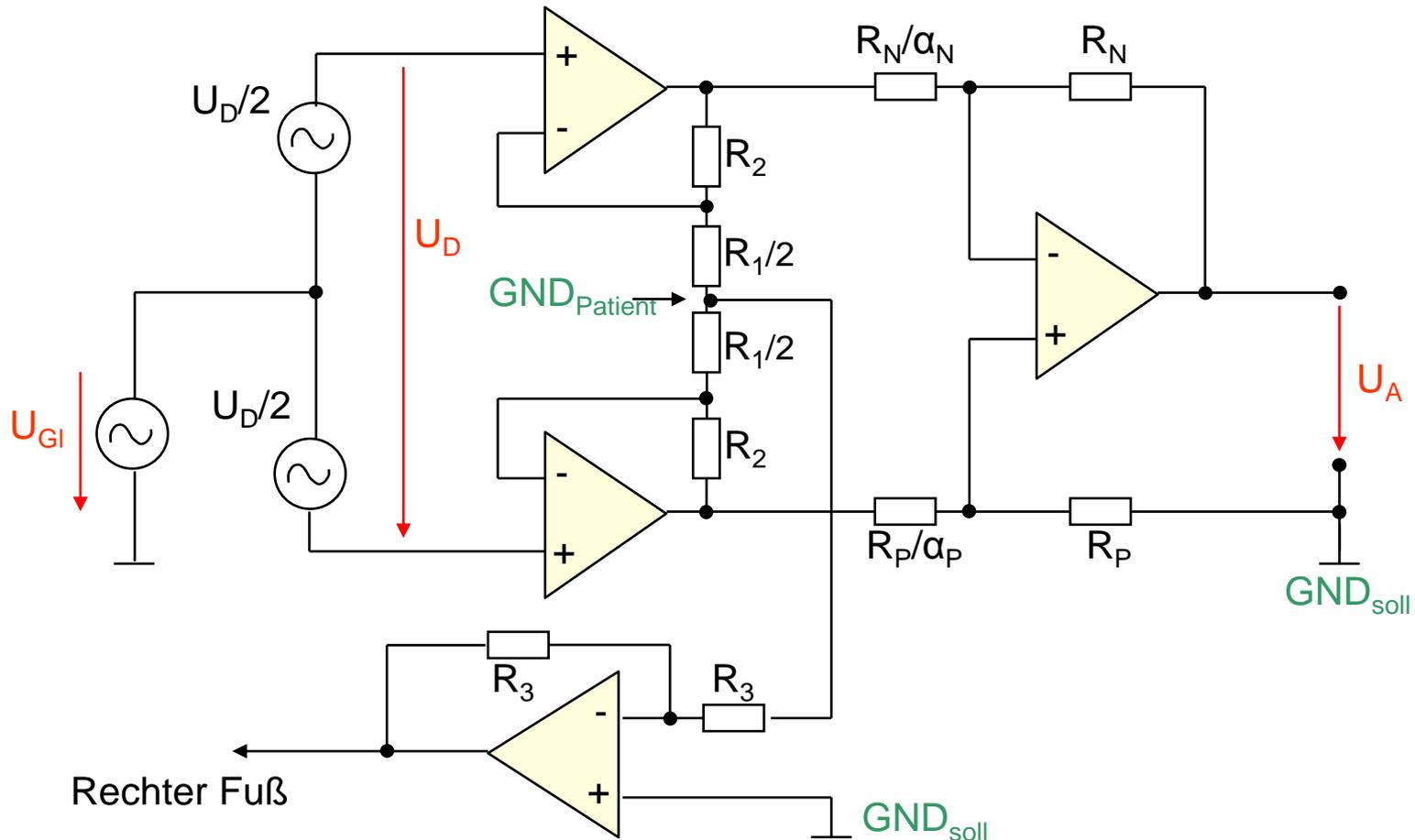
EKG-Verstärkungstechnik

- Keine Auswirkungen des Gleichtaktsignals nur dann, wenn Eingangszweige vollständig symmetrisch sind!!
 - Praktisch ist das nicht der Fall!
- Gleichtaktsignale koppeln doch auf das Messsignal ein!

- Gegenmaßnahmen?
 - Abgleich der beiden Signaleingangszweige
 - Hohe Differenzverstärkung, niedrige Gleichtaktverstärkung
 - Verringerung von Signaleinstreuungen (Schirmung, Kabelverdrillung etc.)

EKG-Verstärkungstechnik – DRL

■ Verbesserung des CMRR: Driven-Right-Leg



■ Einkopplung des invertierten Offsetsignals auf den Patienten

→ Potentialunterschied zwischen Patient und Schaltung wird ausgeglichen

EKG-Verstärkungstechnik

- Maß für die Güte eines EKG-Verstärkers
 - **Gleichtaktunterdrückung** (CMRR = Common Mode Rejection Ratio)
 - CMRR-Werte größer als 100dB sind gut
 - Berechnung der CMRR:

$$CMRR|_{dB} = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{A_D}{A_{Gl}} \right) \approx 20 \cdot \log_{10} \left((1 + \alpha) \frac{\alpha}{\Delta\alpha} \right)$$

A_D : Differenzverstärkung

α : Verstärkungsfaktor

A_{Gl} : Gleichtaktverstärkung

$\Delta\alpha$: Differenz zwischen α_1 und α_2

EKG-Verstärkungstechnik

- Einfluss von Differenzen zwischen den Signalzweigen auf die CMRR
 - $\alpha = 500, \Delta \alpha = 25$ (5%) / 5 (1%) / 0,5 (0,1%)

Toleranz ($\Delta \alpha / \alpha$)	5%	1%	0,1%
CMRR (dB)	80	94	114

- Umrechnung auf Absolutwerte:

$$CMRR=114dB \Rightarrow A_D = A_{Gl} \cdot 10^{CMRR/20} = 501187 \cdot A_{Gl}$$

EKG-Verstärkungstechnik

- Trotz des sehr großen Verhältnisses zwischen Differenz- und Gleichtaktverstärkung kann das Signal immer noch stark gestört sein!
 - Bsp.: $\alpha = 500$, $U_{\text{Herz}} = 1\text{mV}$, $U_{\text{Stör}} = 10\text{V}$

Toleranz ($\Delta \alpha / \alpha$)	5%	1%	0,1%
CMRR (dB)	80	94	114
Nutzsignal: Störsignal	1:1	5:1	50:1

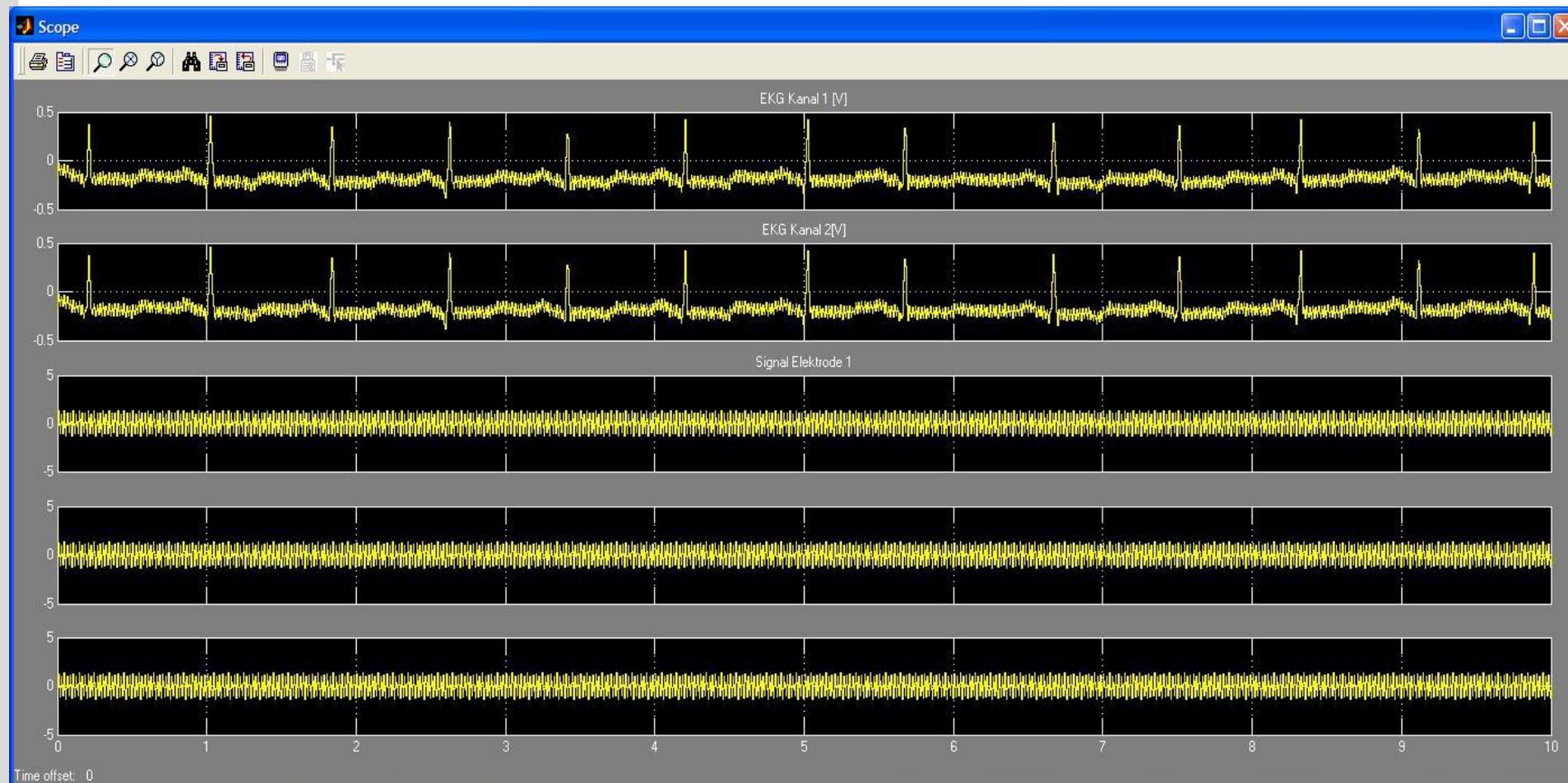
→ Verringerung der Störsignalamplitude!

EKG-Verstärkungstechnik

- Weitere Begriffe aus dem Umfeld EKG-Verstärker
 - Impedanzwandlerstufe
 - Bezugspotenzialsteuerung („driven right leg“)
 - Schutzdioden
 - Instrumentenverstärker
 - Galvanische Trennung

Demo: Auswirkungen von Unsymmetrien

■ Leichte Unsymmetrie



Demo: Auswirkungen von Unsymmetrien

■ Symmetrie \rightarrow CMRR $\rightarrow \infty$

