

# Elektronikpraktikum Auswertung: Versuchstag 4

## Operationsverstärker am Beispiel eines empfindlichen Messverstärkers zur Aufnahme eines Elektrokardiogramms

Gruppe 01  
Patrick Heuer  
Benjamin Lotter

# Übersicht

- 1 Einführung
  - Versuchseinführung
  - Operationsverstärker
- 2 Differenzverstärker
- 3 Invertierender Verstärker
- 4 Aktiver Tiefpass 4. Ordnung
- 5 EKG-Verstärkerschaltung
- 6 Komparator
- 7 Verstärkerschaltung mit Komperator

# Übersicht

- 1 Einführung
  - Versuchseinführung
  - Operationsverstärker
- 2 Differenzverstärker
- 3 Invertierender Verstärker
- 4 Aktiver Tiefpass 4. Ordnung
- 5 EKG-Verstärkerschaltung
- 6 Komparator
- 7 Verstärkerschaltung mit Komperator

# Versuchseinführung

Ziel:

Aufnahme eines Elektrokardiogramms am Oszilloskop mithilfe von Operationsverstärkern

# Versuchseinführung

## Definition: EKG

Das Elektrokardiogramm (EKG) ist die Aufzeichnung der Summe der elektrischen Aktivitäten aller Herzmuskelfasern.

Elektrokardiogramm heißt auf Deutsch Herzspannungskurve, gelegentlich wird es auch Herzschrift genannt.

(Quelle: wikipedia.de)

## Deshalb notwendig:

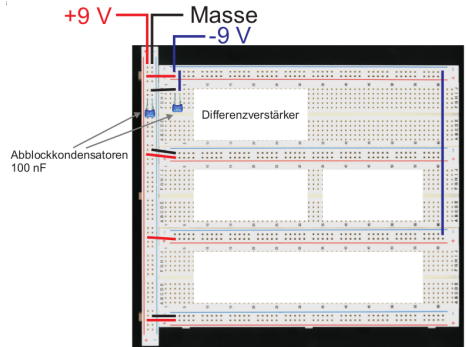
- Empfindlicher Messverstärker der Potenzialunterschiede von  $10\mu V$  herausfiltern kann

# Probleme bei der Messung

- Potentialunterschiede sehr klein

# Probleme bei der Messung

- Potentialunterschiede sehr klein
  - Differenzverstärker mit hoher Gleichtaktunterdrückung



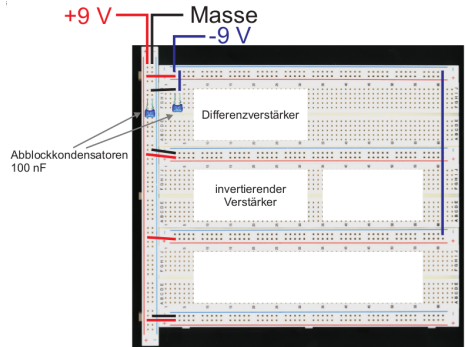
# Probleme bei der Messung

- Potentialunterschiede sehr klein
  - Differenzverstärker mit hoher Gleichtaktunterdrückung
- Signal sehr schwach



# Probleme bei der Messung

- Potentialunterschiede sehr klein
  - Differenzverstärker mit hoher Gleichtaktunterdrückung
- Signal sehr schwach
  - Verstärker mit hohem Gesamtverstärkungsfaktor  $G = 10000$

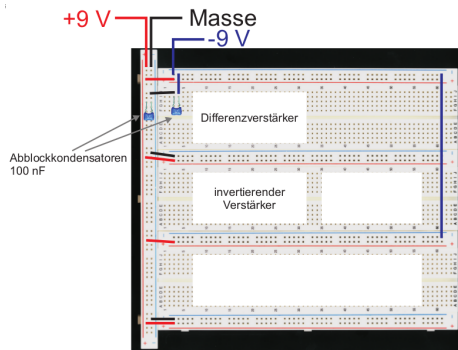


# Probleme bei der Messung

- Potentialunterschiede sehr klein
  - Differenzverstärker mit hoher Gleichtaktunterdrückung
- Signal sehr schwach
  - Verstärker mit hohem Gesamtverstärkungsfaktor  $G = 10000$
- DC-Störung

# Probleme bei der Messung

- Potentialunterschiede sehr klein
  - Differenzverstärker mit hoher Gleichtaktunterdrückung
- Signal sehr schwach
  - Verstärker mit hohem Gesamtverstärkungsfaktor  $G = 10000$
- DC-Störung
  - DC-Unterdrückung (Hochpass)

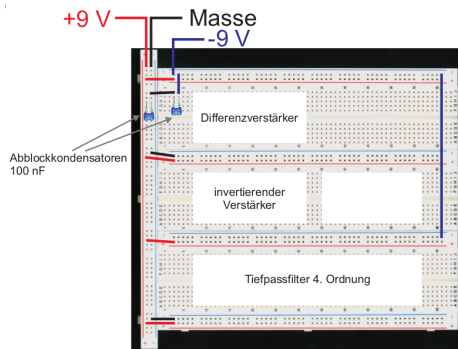


# Probleme bei der Messung

- Potentialunterschiede sehr klein
  - Differenzverstärker mit hoher Gleichtaktunterdrückung
- Signal sehr schwach
  - Verstärker mit hohem Gesamtverstärkungsfaktor  $G = 10000$
- DC-Störung
  - DC-Unterdrückung (Hochpass)
- 50Hz-AC-Störung

# Probleme bei der Messung

- Potentialunterschiede sehr klein
  - Differenzverstärker mit hoher Gleichtaktunterdrückung
- Signal sehr schwach
  - Verstärker mit hohem Gesamtverstärkungsfaktor  $G = 10000$
- DC-Störung
  - DC-Unterdrückung (Hochpass)
- 50Hz-AC-Störung
  - Tiefpass hoher Ordnung

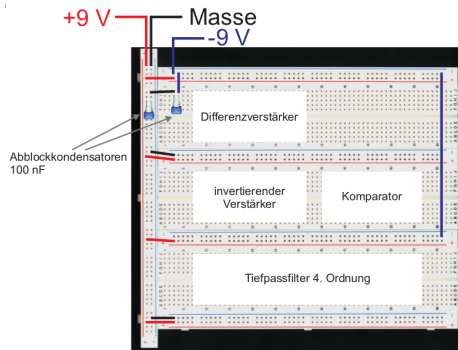


# Probleme bei der Messung

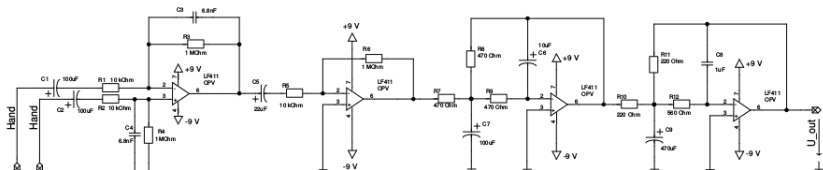
- Potentialunterschiede sehr klein
  - Differenzverstärker mit hoher Gleichtaktunterdrückung
- Signal sehr schwach
  - Verstärker mit hohem Gesamtverstärkungsfaktor  $G = 10000$
- DC-Störung
  - DC-Unterdrückung (Hochpass)
- 50Hz-AC-Störung
  - Tiefpass hoher Ordnung
- Visualisierung mit LED

# Probleme bei der Messung

- Potentialunterschiede sehr klein
  - Differenzverstärker mit hoher Gleichtaktunterdrückung
- Signal sehr schwach
  - Verstärker mit hohem Gesamtverstärkungsfaktor  $G = 10000$
- DC-Störung
  - DC-Unterdrückung (Hochpass)
- 50Hz-AC-Störung
  - Tiefpass hoher Ordnung
- Visualisierung mit LED
  - Komparator



# Gesamtschaltbild

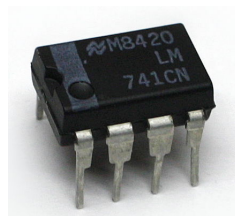
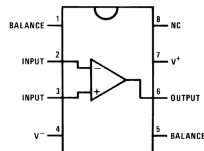




# Operationsverstärker

- Variables Bauteil für verschiedene Schaltungen
- Aufbau:
  - invertierender Eingang
  - nichtinvertierender Eingang
  - Ausgang
  - Versorgungseingänge
- Eigenschaften (ideal):
  - unendlich große Gegenaktverstärkung
  - perfekte Gleichaktunterdrückung
  - unendliche Verstärkung

Dual-In-Line Package



# Operationsverstärker

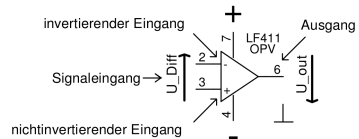
## Goldene Regeln:

- 1 Der Ausgang wird stets Versuchen eine Spannung auszugeben so dass die Differenz der Eingangsspannung 0 ist:

$$\Delta U = U_+ - U_- = 0$$

- 2 In die Eingänge + und - fließt kein Strom:

$$I_+ = I_- = 0$$



# Übersicht

- 1 Einführung
  - Versuchseinführung
  - Operationsverstärker
- 2 Differenzverstärker
- 3 Invertierender Verstärker
- 4 Aktiver Tiefpass 4. Ordnung
- 5 EKG-Verstärkerschaltung
- 6 Komparator
- 7 Verstärkerschaltung mit Komperator

# Differenzverstärker

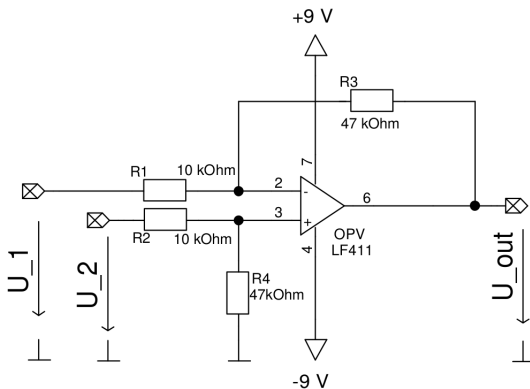
## Differenzverstärker

- ähnelt dem invertiertem Verstärker
- bestimmt Potentialdifferenzen an den Anschlüssen

# Versuchsaufbau

## Versuch

- Aufbau wurde mit DAQ-Box Verbunden
- Bestimmung von Gegentaktverstärkung, Gleichtaktverstärkung und Gleichtaktunterdrückung



# CMRR

## Gleichtaktunterdrückung

- Gegentaktverstärkung:

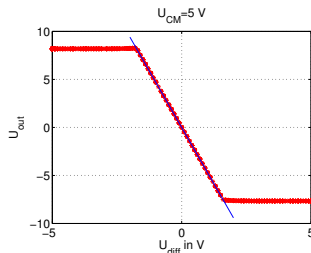
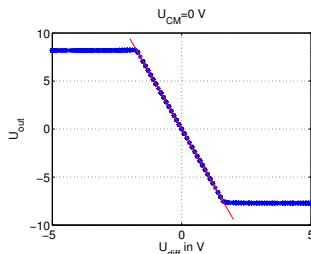
$$G_{diff} = \frac{\partial U_{out}}{\partial U_{diff}} = -\frac{R_3}{R_1} = -4.7$$

- Gleichtaktverstärkung

$$G_{CM} = 0$$

- Gleichtaktunterdrückung

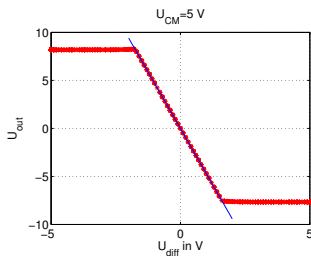
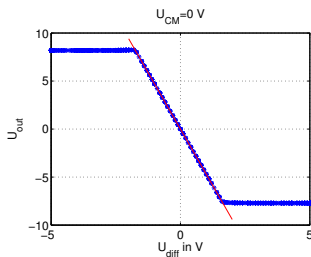
$$CMRR = \frac{|G_{diff}|}{|G_{CM}|} = \infty$$



# CMRR

## Gleichtaktunterdrückung

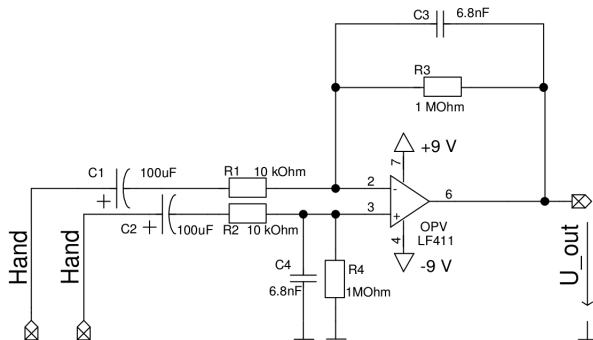
	Theorie	Messung
$G_{diff}$	-4.7	-4.704
$G_{CM}$	0 -0.0004	
CMRR	$\infty$	11760



# Versuchsaufbau mit Kondensator

## Versuch

- Einbau von Kondensatoren und Erhöhung der Widerstände
- Analyse der Schaltung
- Analyse des EKG-Signals





# Übertragungsfunktion

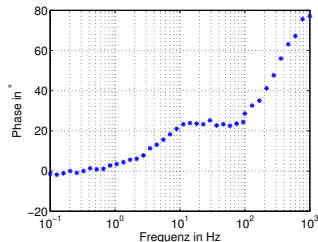
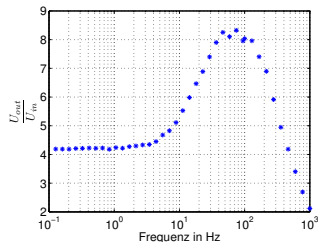
## Übertragungsfunktion

$$\left| \frac{U_{in}}{U_{out}} \right| = \frac{1}{\sqrt{R_1^2 + \left( \frac{1}{2\pi f \cdot C_1} \right)^2} \cdot \sqrt{\frac{1}{R_2^2} + (2\pi f \cdot C_3)^2}}$$

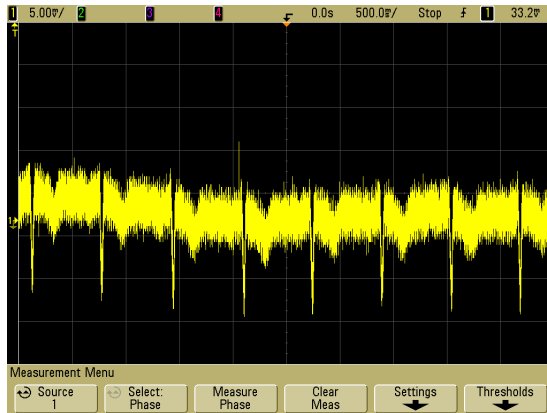
# Bodediagramm

## Ergebnis

- Werte Stimmen nicht mit erwartetem Verlauf überein
- Wahrscheinlich Fehler bei Messung (Spannung falsch abgegriffen)



# Störungen im EKG



## Herzschlag

- Herzschlag ist erkennbar
- Starkes Rauschen → noch keine Messungen möglich

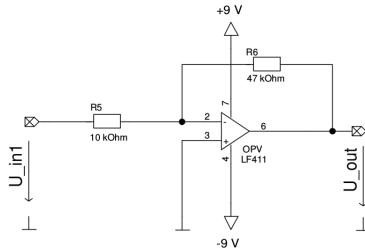
# Übersicht

- 1 Einführung
  - Versuchseinführung
  - Operationsverstärker
- 2 Differenzverstärker
- 3 Invertierender Verstärker
- 4 Aktiver Tiefpass 4. Ordnung
- 5 EKG-Verstärkerschaltung
- 6 Komparator
- 7 Verstärkerschaltung mit Komperator

# Invertierender Verstärker

## Invertierender Verstärker

- $U_{in}$  liegt auf invertierendem Eingang
- $U_{out}$  Rückgekoppelt mit  $U_{in}$ .
- Goldene Regel: OPV wird versuchen  $U_{out}$  so auszugeben dass Eingangsdifferenz = 0



# Invertierender Verstärker

## Technische Funktionsweise:

- OPV gibt Spannung  $U_{R_2}$  so aus dass  $U_{diff} = 0$ :

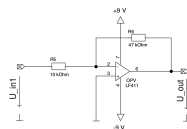
$$U_a = -U_{R_1}$$

- Da  $I_- = 0$ , muss  $I_{R_1} = I_{R_2} = I$ :

$$U_a = -U_{R_1} = -I \cdot R_2 = -\frac{U_e}{R_1} \cdot R_2 = -\frac{R_2}{R_1} \cdot U_e$$

- Also gilt für die Verstärkung:

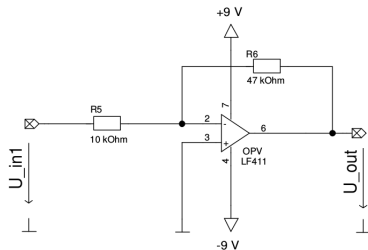
$$V = \frac{U_a}{U_e} = -\frac{R_2}{R_1}$$



# Versuchsaufbau

## Versuch

- Aufbau wurde mit Batteriespannung  $\pm 9V$  betrieben
- Bestimmung der Spannungsverstärkung



# Bestimmung der Verstärkung

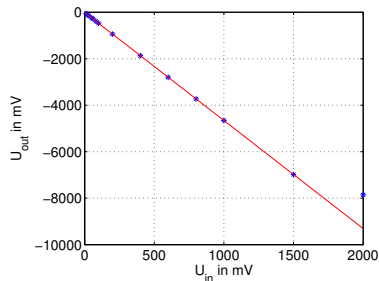
## Verstärkung

- Theoretischer Wert:

$$V = -\frac{R_2}{R_1} = -\frac{-47k\Omega}{10k\Omega} = -4.7$$

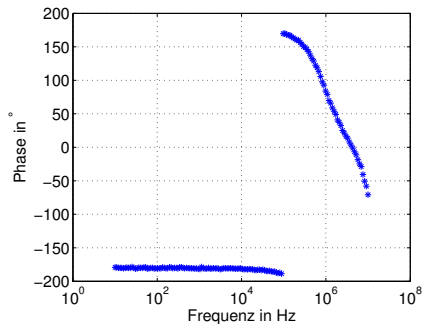
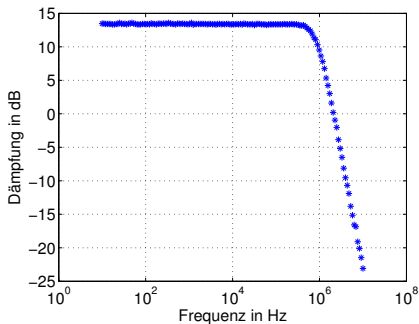
- Ermittelter Wert (Fit):

$$V = -4.65$$





# Bodediagramm



- Hohe Verstärkung bei niedrigen Frequenzen:
- Zusammenbruch bei hohen Frequenzen: Tiefpass mit 3dB-Frequenz: 690kHz Messgeräten

# Versuchsaufbau mit Kondensator

## Versuch

- Aufbau wurde mit Batteriespannung  $\pm 9V$  betrieben
- Setze  $R_6 = 1M\Omega$
- Einbau von Kondensator  $C_5 = 22\mu F$  vor  $R_5$

## Theoriewerte:

- für Impedanz an  $R_5$  gilt:

$$R_5 \rightarrow R_5 + \frac{1}{i\omega \cdot C}$$

- also folgt für Verstärkung:

$$V = \frac{R_6}{R_5 + \omega \cdot C}$$

# Verstärkung mit Kondensator

## Messung

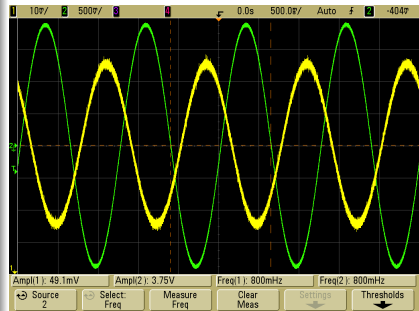
- Aus Theorie folgt mit  $\omega = 800\text{mHz}$ ,  $R_2 = 1\text{M}\Omega$ ,  $R_1 = 10\text{k}\Omega$ ,  $C = 22\mu\text{F}$ :

$$V = -99.9$$

- Mit  $A_2 = 3.75\text{V}$  und  $A_1 = 49.1\text{mV}$  tatsächliche Verstärkung:

$$V = \frac{A_2}{A_1} \approx -83.3$$

- DC-Offset wird fast vollständig herausgefiltert
- Phasenverschiebung um  $\sim 143^\circ$



# Erbenisse

## Ergebnisse

- höherer Widerstand  $R_6$  verbessert Verstärkung
- Kondensator filter Offset heraus
- Potential an invertierendem Eingang wird "virtuell" genannt da dort ein Massepotenzial ohne Verbindung zur Masse anliegt

# Übersicht

- 1 Einführung
  - Versuchseinführung
  - Operationsverstärker
- 2 Differenzverstärker
- 3 Invertierender Verstärker
- 4 Aktiver Tiefpass 4. Ordnung**
- 5 EKG-Verstärkerschaltung
- 6 Komparator
- 7 Verstärkerschaltung mit Komperator

# Aktiver Tiefpass

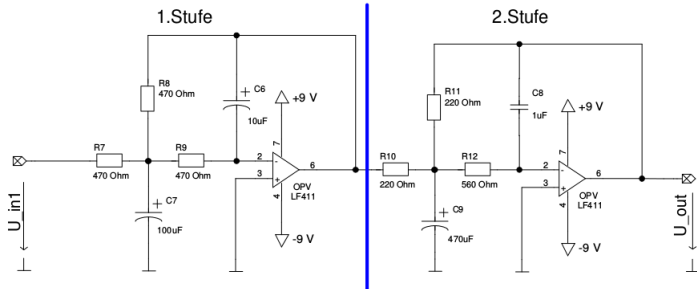
## Aktiver Tiefpass 4. Ordnung (3dB-Tschebyscheff)

- starker Filter mit steil Abfallenden Flanken
- aufgebaut aus 2 Stufen

# Versuchsaufbau

## Versuch

- Analyse der einzelnen Stufen
- Analyse der Reihenschaltung



# 1.Stufe

## Ergebnisse

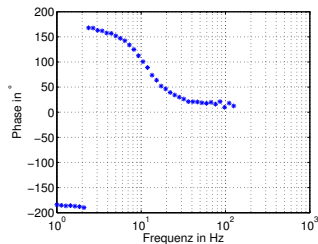
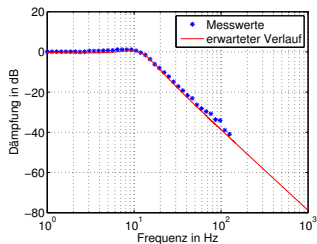
- Theoretische Formeln sind lang und kompliziert, daher werden hier nur die Ergebnisse gezeigt



# 1.Stufe

## 1.Stufe

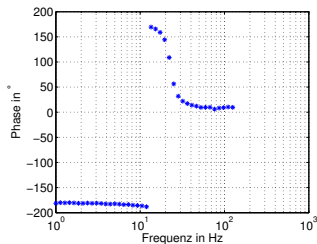
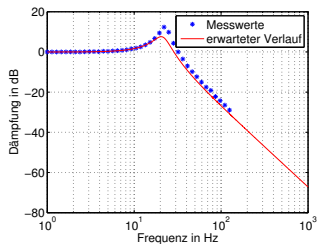
	Theorie	Messung
Welligkeit	1.10	1.18
Dämpfung pro Dekade	-40.50	-40.47
Grenzfrequenz	13.91	15.24



# 2.Stufe

## 2.Stufe

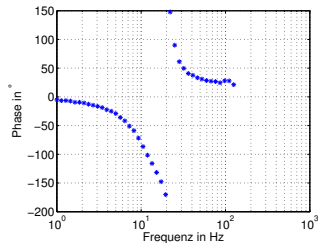
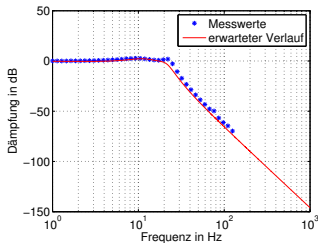
	Theorie	Messung
Welligkeit	15.05	12.34
Dämpfung pro Dekade	-46.29	-44.98
Grenzfrequenz	32.31	36.244



# Gesamtschaltung

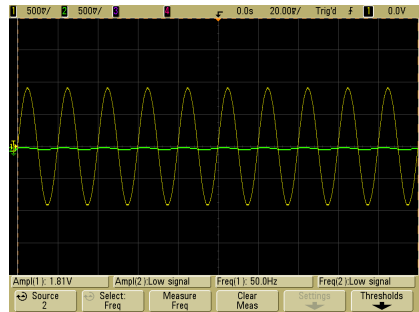
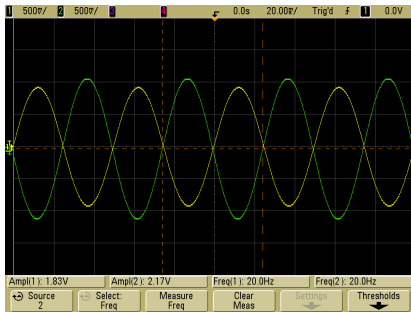
## Gesamtschaltung

	Theorie	Messung
Welligkeit	4.69	2.64
Dämpfung pro Dekade	-90.80	-89.63
Grenzfrequenz	23.48	25.0



# Vergleich

## Vergleich 20Hz und 50Hz



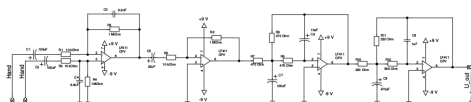
# Übersicht

- 1 Einführung
  - Versuchseinführung
  - Operationsverstärker
- 2 Differenzverstärker
- 3 Invertierender Verstärker
- 4 Aktiver Tiefpass 4. Ordnung
- 5 **EKG-Verstärkerschaltung**
- 6 Komparator
- 7 Verstärkerschaltung mit Komperator

# EKG-Verstärkerschaltung

## Versuch

- Verbinden aller Einzelbauteile
- Aufnahme eines EKGs
- Bodediagramm der Gesamtschaltung



# Entstehung der Potentialdifferenz

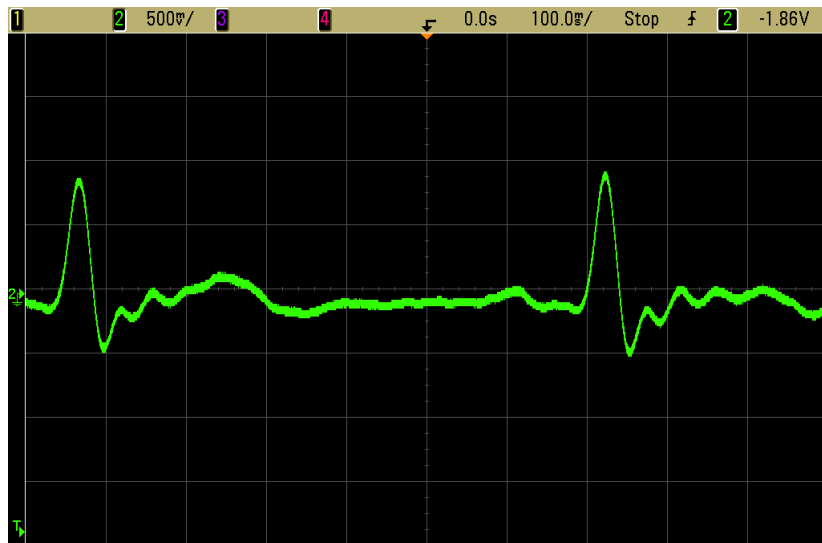
## Erzeugung

- Sinusknoten regt durch elektrische Signale verschiedene Teile der Herzmuskeln an

## Wie entsteht die Differenz?

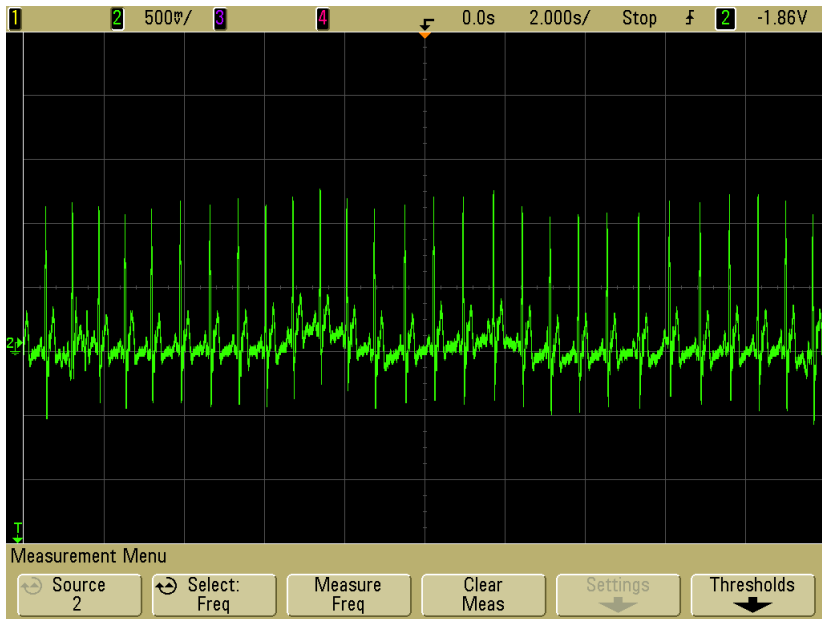
- Signale brauchen verschieden lang um zu verschiedenen Teilen des Körpers zu kommen → Potentialdifferenz

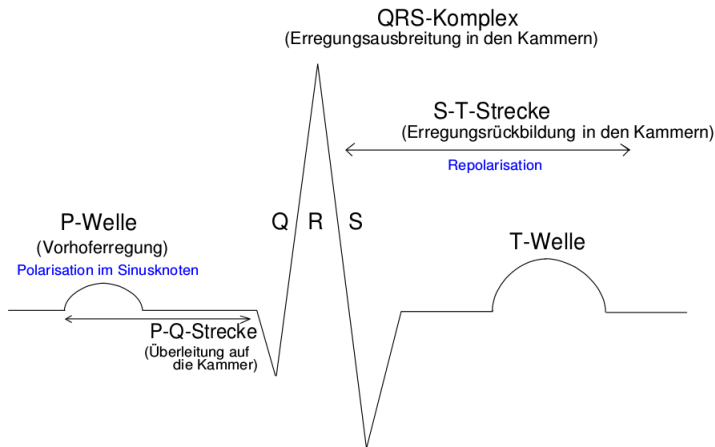
# Bilder



Measurement Menu







- *PQ-Strecke*: 90ns
- *ST-Strecke*: 240ms

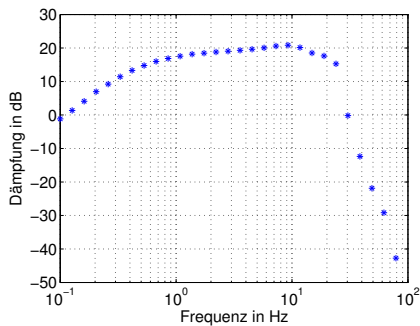
# Verfolgung des Signals

## Signalmodulation:

- Gelb: Eingangssignal nach Differenzverstärker
- Grün: Verstärktes Signal nach Invertierendem Verstärker
- Lila: Gefiltertes Signal nach Tiefpassfilter



# Bode-Diagramm



# Übersicht

- 1 Einführung
  - Versuchseinführung
  - Operationsverstärker
- 2 Differenzverstärker
- 3 Invertierender Verstärker
- 4 Aktiver Tiefpass 4. Ordnung
- 5 EKG-Verstärkerschaltung
- 6 Komparator
- 7 Verstärkerschaltung mit Komperator

# Komparator

## Komparator

- OPV vergleicht die Eingangsspannungen  $U_{in}$  und  $U_{ref}$  am invertierenden bzw nichtinvertierenden Eingang.
- $U_{in} > U_{ref}$ : OPV gibt die an  $V^+(7)$  angelegte Spannung aus, andernfalls  $V^-(4)$ .

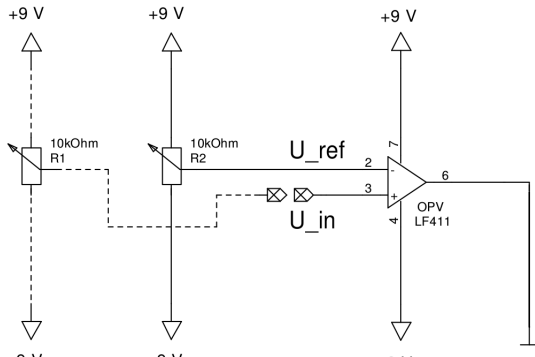
## Technische Funktionsweise:

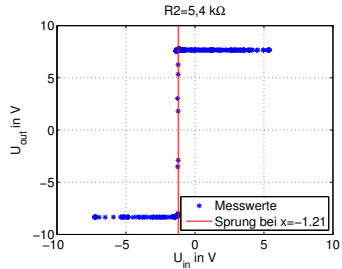
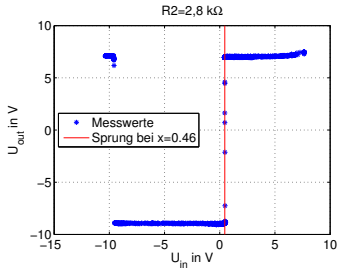
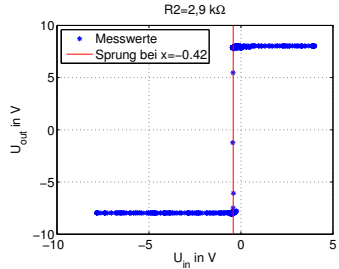
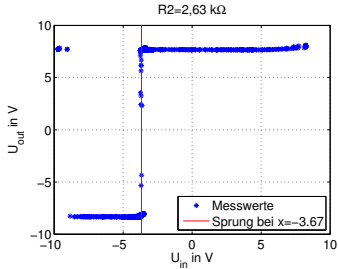
- Differenzverstärker verstärkt  $U_{in} - U_{out}$
- zusätzlicher Verstärker  $\rightarrow U_{out}$  erreicht sehr schnell die maximal mögliche Verstärkung (=Versorgungsspannung)

# Versuchsaufbau

## Aufbau

- Komperator wurde ohne Last am Ausgang mit Spannung  $\pm 9V$  betrieben
- $U_{in}$  wurde in Abhängigkeit von  $U_{ref}$  untersucht
- besonders von Interesse: Umschaltunkt







# Ergebnisse

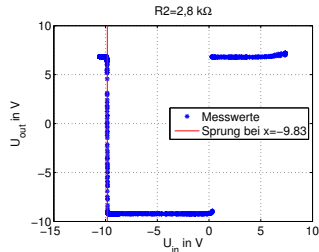
## Auswertung

- Ergebnisse stimmen i.A gut mit Theorie überein
- $U_{out}$  liegt nicht ganz bei  $\pm 9V \rightarrow$  Bauart des Komparators limitiert  $V_{out}$
- Verstärkungsfaktor (gemittelt):  $V$

# Auffälligkeiten

## negativer Sprung

- weiterer Sprung bei  $U_{in} = -9.83V$



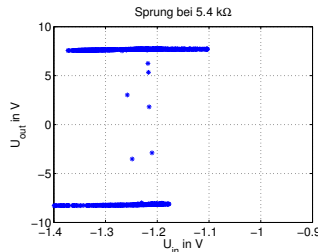
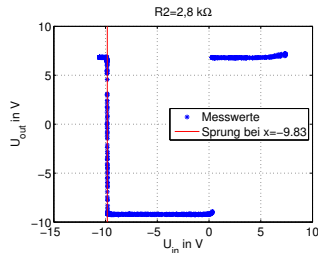
# Auffälligkeiten

## negativer Sprung

- weiterer Sprung bei  $U_{in} = -9.83V$

## Messungenauigkeit

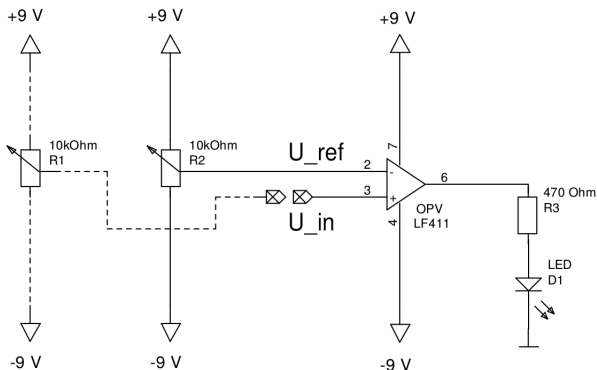
- Sehr ungenaue Messung im Sprungbereich
- Überlagerung der  $x$ -Werte macht Fitten schwierig
- "An Schieber regeln" ist keine gute Messmethode



# Versuchsaufbau mit LED

## Aufbau

- LED mit Last (zum Schutz der LED) wurde eingebaut
- Betrieb mit sinusförmiger Wechselspannung
- Untersuchung des Verhaltens am Oszilloskop



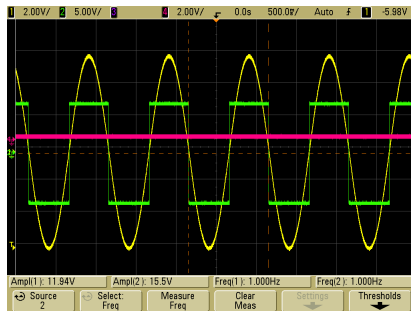
# Ergebnis

## Betrachtung

- Komparator erzeugt verstärkte Rechteckspannung
- Komparator "schaltet" wenn  $U_{in} > U_{ref}$
- $Amplitude(U_{out}) < 18V$
- LED blinkt regelmäßig

## Erklärung:

- Verhalten erklärt sich direkt aus vorherigen Ergebnissen
- Komparator kann Rechtecksspannung erzeugen → Verwendung für Blinkschaltung



Gelb :  $U_{in}$

Rosa :  $U_{ref}$

Grün :  $U_{out}$

# Übersicht

- 1 Einführung
  - Versuchseinführung
  - Operationsverstärker
- 2 Differenzverstärker
- 3 Invertierender Verstärker
- 4 Aktiver Tiefpass 4. Ordnung
- 5 EKG-Verstärkerschaltung
- 6 Komparator
- 7 Verstärkerschaltung mit Komperator

# LED

## Optische Pulskontrolle

Durch den Anschluss des Komperators an die Schaltung konnte der Pulsschlag and der LED beobachtet werden.