

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


./img/schaltungen/g

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 $G = 10000$


img/schaltungen/g

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)

./img/schaltungen/g

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


[./img/schaltungen/g](#)

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


img/schaltungen/g


Gesamtschaltbild

 /img/schaltungen/alles_zusammen

Operationsverstärker

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

 ./img/misc/opv_

 ./img/misc/opv_

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:

$$I_+ = I_- = 0$$

./img/misc/opv_

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

 ./img/schaltung/dif_verst_1.png

CMRR

Gleichtaktunterdrückung

- Gegentaktverstärkung:

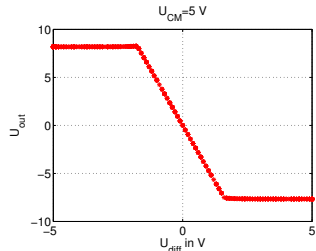
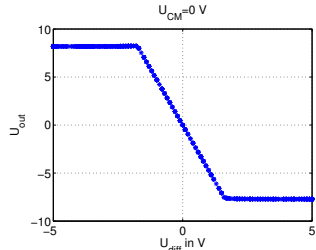
$$G_{diff} = \frac{\partial U_{out}}{\partial U_{diff}} = -\frac{R_3}{R_1} = -4.7$$

- Gleichtaktverstärkung

$$G_{CM} =$$

- Gleichtaktunterdrückung

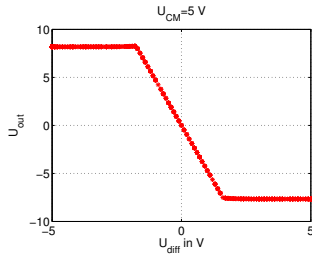
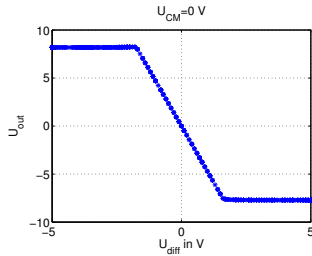
$$CMRR = \frac{G_{diff}}{|G_{CM}|} =$$



CMRR

Gleichtaktunterdrückung


	Theorie	Messung
G_{diff}	-4.7	
G_{CM}	0	
CMRR	∞	



Versuchsaufbau mit Kondensator

Versuch

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

 ./img/schaltung/dif_verst_2.png

Übertragungsfunktion

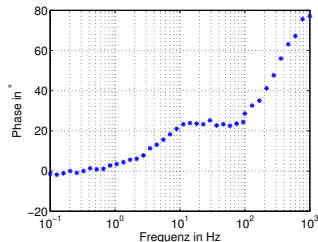
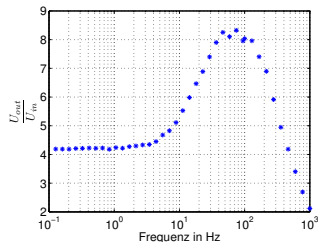
Übertragungsfunktion

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

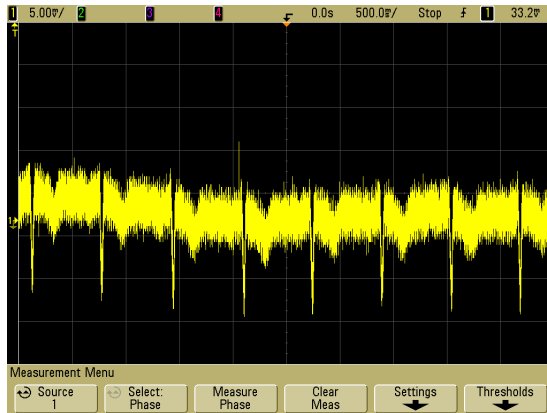
Bodediagramm

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

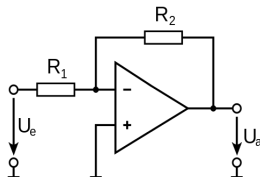
Übersicht

- 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 $U_{diff} = 0$:

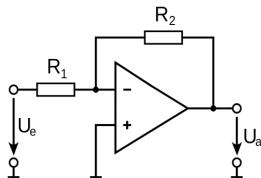
$$U_a = -U_{R_1}$$

- 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

 ./img/schaltung/inv_verst_1.png

Bestimmung der Verstärkung

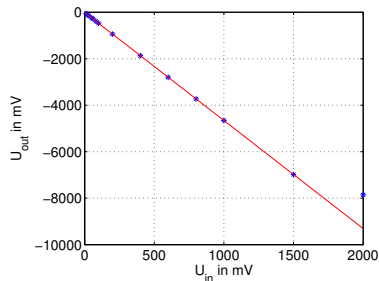
Verstärkung

- Theoretischer Wert:

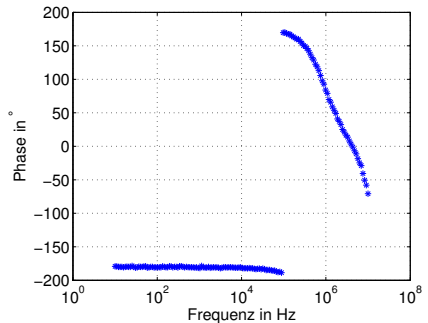
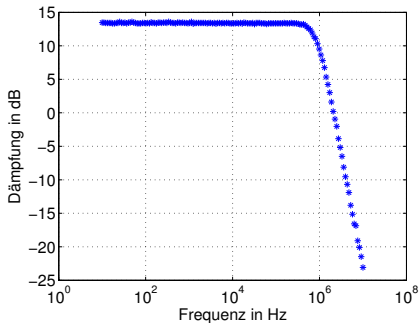
$$V = -\frac{R_2}{R_1} = -\frac{-47k\Omega}{10k\Omega} = -4.7$$

- Ermittelter Wert (Fit):

$$V = -4.65$$



Bodediagramm



- Hohe Verstärkung bei niedrigen Frequenzen:
- Zusammenbruch bei hohen Frequenzen: Wechselwirkung mit den 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

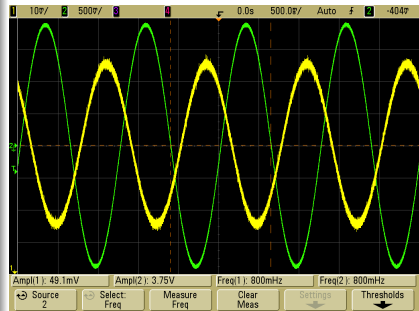
- Aus Theorie folgt mit $\omega = 800\text{mHz}$, $R_2 = 1\text{M}\Omega$, $R_1 = 10\text{k}\Omega$, $C = 22\mu\text{F}$:

$$V = -99.9$$

- 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



`./img/schaltung/tiefpass.png`

1.Stufe



Ergebnisse

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



	Theorie	Messung
Welligkeit		
Dämpfung pro Dekade		
Grenzfrequenz		

 ./img/plots/Auf_4_bode-eps  ./img/plots/Auf_4_bode-eps

	Theorie	Messung
Welligkeit		
Dämpfung pro Dekade		
Grenzfrequenz		

 ./img/plots/Auf_4_bode-eps  ./img/plots/Auf_4_bode-eps

	Theorie	Messung
Welligkeit		
Dämpfung pro Dekade		
Grenzfrequenz		

 ./img/plots/Auf_4_bode-eps  ./img/plots/Auf_4_bode-eps


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

 /img/schaltung/gesamt.png

Entstehung der Potentialdifferenz

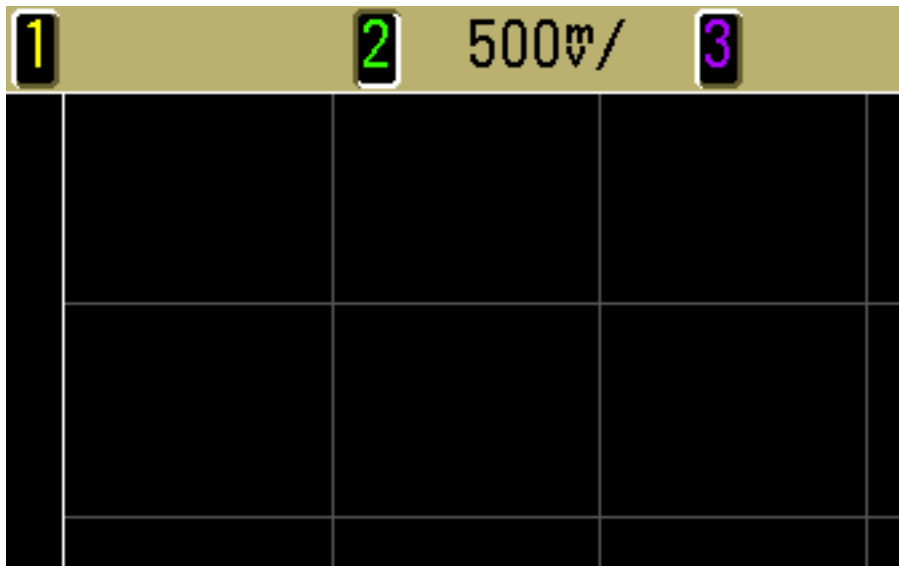
Erzeugung

- 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



1

2

500mV/

3



./img/schaltung/wellen.png

- *PQ*-Strecke:
- *ST*-Strecke:

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:

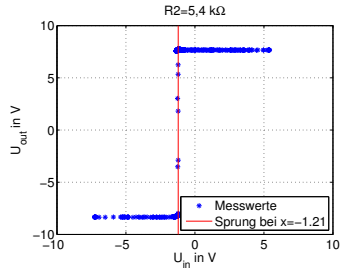
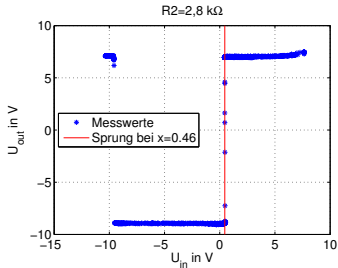
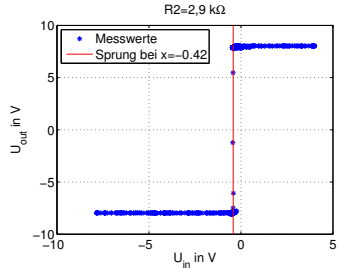
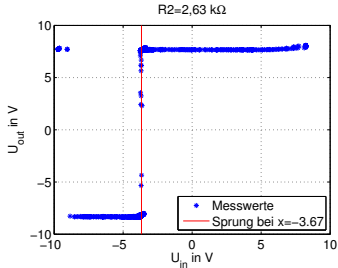
- Differenzverstärker verstärkt $U_{in} - U_{out}$
- zusätzlicher Verstärker $\rightarrow U_{out}$ erreicht sehr schnell die maximal mögliche Verstärkung (=Versorgungsspannung)

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: Umschaltpunkt

 ./img/schaltung/komperator_1.png



Ergebnisse

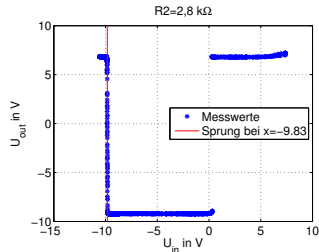
Auswertung

- 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 $U_{in} = -9.83V$



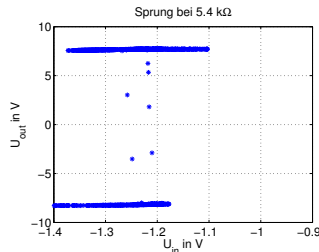
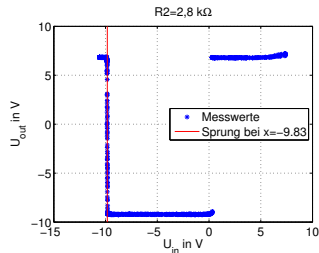
Auffälligkeiten

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

 ./img/schaltung/komperator_2.png

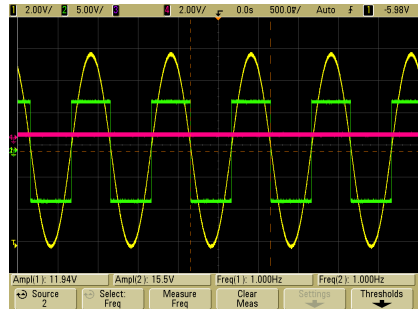
Ergebnis

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