

Vorbereitung Operationsverstärker

Marcel Köpke & Axel Müller

30.05.2012

Inhaltsverzeichnis

1	Emitterschaltung eines Transistors	4
1.1	Einstufiger, gleichstromgegekoppelter Transistorverstärker	5
1.2	Bestimmung der Verstärkung mit einer Dreiecksspannung	6
1.3	Entfernen des Emittterkondensators	6
1.4	Frequenzabhängigkeit der Verstärkung	7
2	Grundschtaltung eines Operationsverstärkers	8
2.1	Nichtinvertierender Verstärker	8
2.2	Nachweis: Hoher Eingangswiderstand/kleiner Ausgangswiderstand	9
2.3	Verstärkung in Abhängigkeit der Frequenz	10
3	Die Invertierende Grundschtaltung	11
3.1	Invertierende Grundschtaltung eines OPV mit $v \approx 10$	11
3.2	Addierer für zwei Eingangssignale	11
3.3	Integrierer	12
3.4	Differenzierer	13
4	Komplexere Schaltungen mit Operationsverstärker	14
4.1	Idealer Einwegrichter	14
4.2	Generator für Dreieck- und Rechtecksignal	14
4.3	Programmierte Differentialgleichung zweiter Ordnung	15

Vorwort

Für Experimentalphysiker ist es oft wichtig im Labor Spannungen zu verstärken. In diesem Versuch werden zwei entsprechende Methoden vorgestellt, der Transistor und der Operationsverstärker. Das Augenmerk liegt dabei auf der Anwendung dieser Verstärker und nicht auf der genauen Funktionsweise.

1 Emitterschaltung eines Transistors

Die Emitterschaltung wird deswegen häufig benutzt, weil sie die größte Strom- und Spannungsverstärkung von allen Transistorschaltungen liefert.

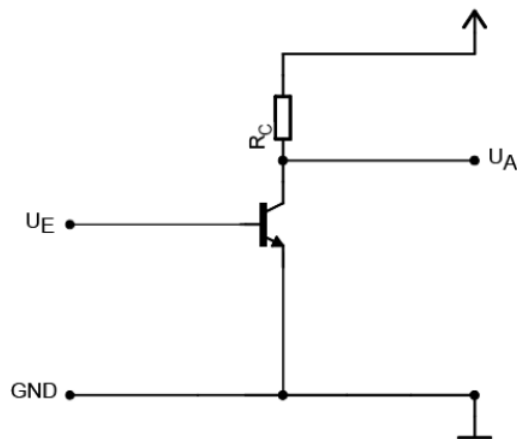


Abbildung 1.1: Grundsaltung

Allerdings beeinflussen die Eigenschaften des Transistors, wie etwa Temperaturabhängigkeit, sehr stark die Verstärkereigenschaften. Aus diesem Grund werden häufig erweiterte Schaltungen

1.1 Einstufiger, gleichstromgegekoppelter Transistorverstärker

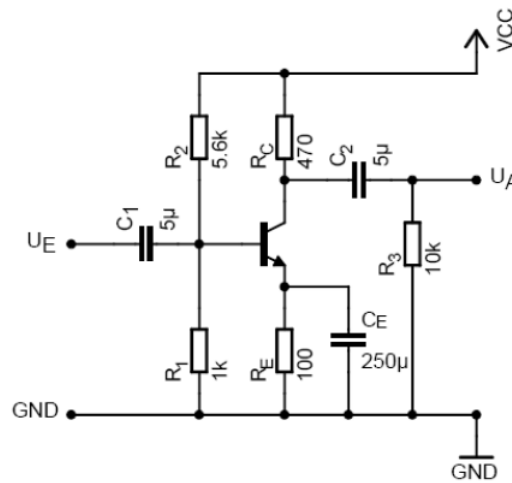


Abbildung 1.2: Schaltplan

Hierbei ist der Widerstand R_E für die Stromgegenkopplung verantwortlich: Wird eine höhere Eingangsspannung U_E angelegt, so fließt auch ein höherer Emittterstrom. An R_E liegt dann aber auch eine höhere Spannung an, wodurch das Emittterpotential angehoben wird. Dadurch fließt folglich weniger Strom. Die Verstärkung wird hier zwar verringert, jedoch ist der Stromfluss relativ unabhängig von der angelegten Eingangsspannung. Durch den Kondensator C_E wird die Gleichstromgegenkopplung realisiert: Für niedrige Frequenzen bzw. Gleichstrom bleibt der Ersatzwiderstand von $R_E || C_E$ groß, die Impedanz des Kondensators kann vernachlässigt werden. Wegen $Z_C = \frac{1}{i\omega C}$ wird der Ersatzwiderstand für steigende Frequenzen immer kleiner. Dies führt dazu, dass die Verstärkung bei hohen Frequenzen besonders groß ist. Die Widerstände R_1 und R_2 dienen als Spannungsteiler. Mit ihnen wird das Potential des Eingangssignals angehoben., sodass der Arbeitspunkt eingestellt werden kann. Dies ist notwendig, da ein npn-Transistor nur positive Eingangsspannungen oberhalb der Diodenknickspannung verarbeiten kann. Sobald also bipolare Wechsellspannung angelegt wird, ist es nötig das Potential soweit anzuheben, damit nur noch Spannungen oberhalb dieser Schwelle durchkommen. Die Kondensatoren C_1 und C_2 dienen dazu, nur die Wechselstromanteile des Eingangs- bzw. Ausgangssignals durchzulassen. Dadurch soll ein möglicher negativer Offset unterdrückt werden. Der Kollektorwiderstand R_C steuert den Kollektorstrom, damit darüber die Verstärkung geregelt werden kann. Im Versuch soll nun dieser Verstärker aufgebaut und sein Arbeitspunkt bestimmt werden.

1.2 Bestimmung der Verstärkung mit einer Dreiecksspannung

Wir legen nun eine Dreiecksspannung mit der Frequenz ca. 1kHz als Eingangsspannung an und regeln die Amplitude, bis als Ausgangsspannung 1V bzw. 10V anliegen. Aus der abgelesenen Eingangsspannung bestimmen wir nun die Verstärkung:

$$v_U = \frac{U_A}{U_E}$$

1.3 Entfernen des Emitterkondensators

Durch das Entfernen von C_E wird die Schaltung stromgekoppelt, wie bereits oben beschrieben wurde. Um die Verstärkung berechnen zu können wird der Transistor vereinfacht als Kollektorwiderstand r_C und er sehr kleine Basiswiderstand r_B betrachtet:

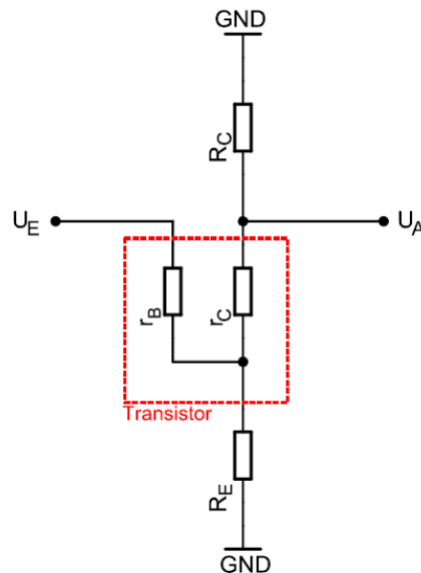


Abbildung 1.3: Schaltplan

Somit erhält man für die Eingangsimpedanz:

$$\begin{aligned} Z_E &= r_B + (R_E || r_C) \cdot (\beta + 1) \\ &\approx R_E \cdot (\beta + 1) \end{aligned}$$

und für die Ausgangsimpedanz:

$$\begin{aligned} Z_A &= R_C || (r_C + (R_E || \frac{r_B}{\beta})) \\ &\approx R_C \end{aligned}$$

Für die Verstärkung gilt also:

$$|v_U| = \left| \frac{U_A}{U_E} \right| = \frac{Z_A \cdot I_A}{Z_E \cdot I_E} = \frac{R_C \cdot I_A}{R_E \cdot (\beta + 1) \cdot I_E}$$

Mit der Stromverstärkung β folgt:

$$\left| \frac{U_A}{U_e} \right| = \frac{R_C \cdot I_E \cdot \beta}{R_E \cdot (\beta + 1) \cdot I_E} = \frac{R_C}{R_E} \cdot \frac{\beta}{\beta + 1} \approx \frac{R_C}{R_e}$$

Es muss beachtet werden, dass die Emitterschaltung invertiert. Für die Spannungsverstärkung gilt also:

$$v_U = -\frac{R_C}{R_E}$$

Offensichtlich hängt die Spannungsverstärkung vernachlässigbar vom transistorabhängigen Wert β ab. Bei den gegebenen Widerständen ergibt sich für die Verstärkung:

$$v_U = -4,7$$

Dieser Faktor soll nun experimentell überprüft werden.

1.4 Frequenzabhängigkeit der Verstärkung

Nun soll für die obigen Schaltungen die Frequenzabhängigkeit der Verstärkung gemessen werden. Es ist zu erwarten, dass jeweils die Verstärkung für niedrige Frequenzen gering ausfällt, da C_1 und C_2 als Hochpass dienen. Bei der Gleichstromgegenkopplung sollte zudem die Verstärkung bei hohen Frequenzen zusätzlich zunehmen da die Impedanz von C_E und damit auch der Ersatzwiderstand $R_E || C_E$ für hohe Frequenzen klein wird.

2 Grundschtaltung eines Operationsverstärkers

Die 3 goldenen Regeln des idealen Operationsverstärkers

1. Die Verstärkung eines idealen OPV's ist unendlich groß. Daraus folgt: $U_N \approx U_P$, da sonst der Ausgang übersteuert würde.
2. Der Eingangswiderstand ist unendlich groß. Es fließt also kein Strom in den OPV.
3. Der Ausgangswiderstand ist Null. Damit ist die Ausgangsspannung unabhängig von der Ausgangsstromstärke I_A .

Für den realen Operationsverstärker gilt die endlich große Verstärkung:

$$v_U = \frac{U_A}{U_N - U_P}$$

$U_N - U_P$ ist die angelegte Spannungsdifferenz, U_A die Ausgangsspannung. Für $v_U < 0$ spricht man von einem invertierenden Verstärker.

2.1 Nichtinvertierender Verstärker

Beim nichtinvertierenden Verstärker handelt es sich um eine Schaltung, bei der das Ausgangssignal die gleiche Polarität wie das Eingangssignal hat.

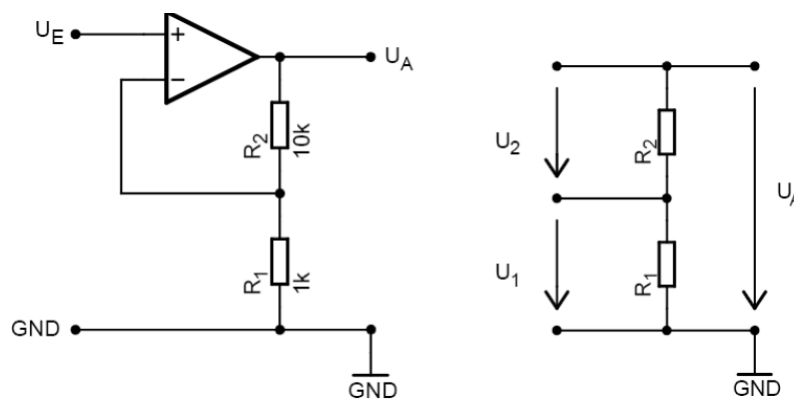


Abbildung 2.1: Schaltpläne

Hier wird das Ausgangssignal auf die Eingangsspannung U_N zurückgekoppelt. Dadurch wird die Spannungsdifferenz $U_P - U_N$ mit zunehmender Ausgangsspannung kleiner. Mit der ersten goldenen Regel gilt:

$$U_E = U_A \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

Somit gilt für den Spannungsverstärkungsfaktor:

$$v_U = \frac{U_A}{U_E} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

Mit der Dreieckspannung sollte experimentell, mit den gegebenen Widerständen, ein Wert von $v_U = 11$ erreicht werden.

2.2 Nachweis: Hoher Eingangswiderstand/kleiner Ausgangswiderstand

Um den Eingangswiderstand zu bestimmen, schließt man einen Messwiderstand R_M seriell an den Eingang.

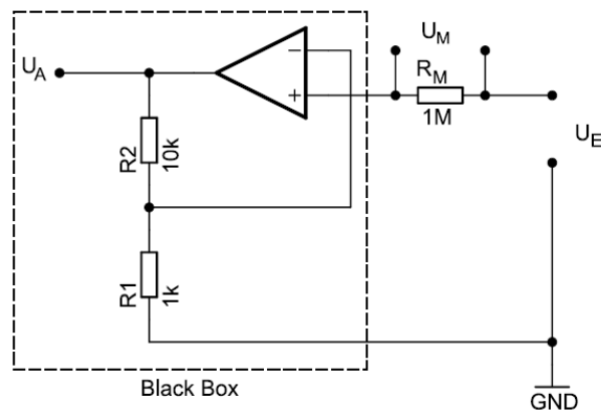


Abbildung 2.2: Messung des Eingangswiderstands

Den Eingangswiderstand X bestimmt man mit der Gesamteingangsspannung, und der Spannung, die am Messwiderstand abfällt U_{R_M} :

$$X = R_M \cdot \left(\frac{U_E}{U_{R_M}} - 1 \right)$$

Beim Messen des Ausgangswiderstand ergibt sich das Problem, dass der OPV intern nachregelt, weshalb die folgende Methode relativ ungenau ist: Parallel zum Ausgang wird ein Potentiometer eingebaut. Es wird so eingestellt, dass das Ausgangssignal der Hälfte

des ursprünglichen Signals entspricht. Der Widerstand der Potentiometers ist dann etwa gleich wie der Ausgangswiderstand des OPV's.

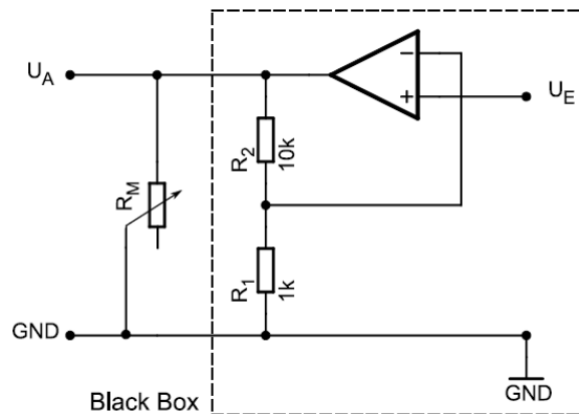


Abbildung 2.3: Messung des Ausgangswiderstands

2.3 Verstärkung in Abhängigkeit der Frequenz

Nun soll die Verstärkung in Abhängigkeit von der Frequenz bestimmt werden. Hier ist zu erwarten, dass die Verstärkung mit zunehmender Frequenz abnimmt. Dies kann durch Rückkopplung teilweise kompensiert werden, sodass erst bei hohen Frequenzen der Abfall zustande kommt. Die Rückkopplung führt allerdings auch zu Verzerrungen, da das rückgekoppelte Signal eine Zeitverzögerung hat. Dies kommt besonders deutlich bei hohen Frequenzen zum tragen.

3 Die Invertierende Grundschtaltung

3.1 Invertierende Grundschtaltung eines OPV mit $v \approx 10$

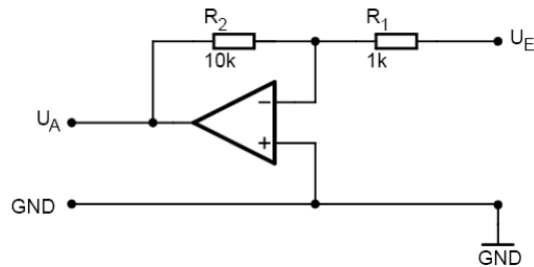


Abbildung 3.1: Schaltplan

Da der OPV den Ausgang so nachregelt, dass die Differenzspannung Null wird, liegt U_P auf dem Nullpotential und die gesamte Eingangsspannung auf R_1 . Der gesamte Strom fließt durch R_2 (goldene Regel: Eingangswiderstand unendlich). Die Invertierung kommt daher, weil Eingangs- und Ausgangsstrom in entgegengesetzte Richtung gemessen werden. Damit gilt:

$$v_U = \frac{U_A}{U_E} = \frac{-R_2 \cdot I_E}{U_E} = \frac{-R_2 \frac{U_E}{R_1}}{U_E} = -\frac{R_2}{R_1}$$

Mit den gegebenen Widerständen soll nun die Verstärkung $v = -10$ nachgewiesen werden.

3.2 Addierer für zwei Eingangssignale

Hier wird zur vorigen Schaltung einfach ein weiterer Eingang zugeschalten.

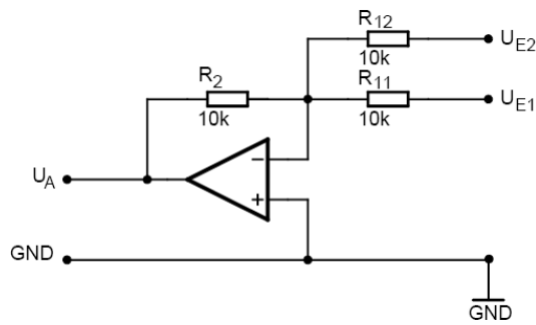


Abbildung 3.2: Schaltplan

Für die Ausgangsspannung erhält man nun:

$$U_A = -R_2 \cdot \left(\frac{U_{E1}}{R_{11}} + \frac{U_{E2}}{R_{12}} \right)$$

Mit den Widerständen R_{11} und R_{12} könnten nun die Spannungen noch gewichtet werden. Werden beide Gleich groß gewählt ergibt sich:

$$U_A = -(U_{E1} + U_{E2})$$

Diese Addition wird nun mit verschiedenen Eingangssignalen durchgeführt.

3.3 Integrierer

Hier wird anstelle des Widerstands im invertierenden Verstärker über einen Kondensator rückgekoppelt.

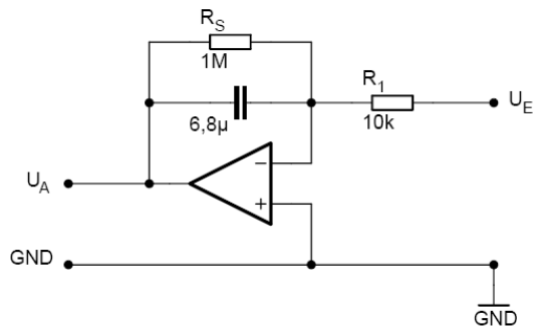


Abbildung 3.3: Schaltplan

Auch hier befindet sich wieder der negative Ausgang auf dem Nullpotential. Mit der Knotenregel gilt:

$$I_E + I_C = 0$$

Somit erhält man für den Strom durch den Kondensator:

$$C = \frac{Q}{U}$$

$$\Rightarrow I_C = C \frac{dU_A}{dt}$$

Für die Ausgangsspannung gilt somit:

$$U_A = \frac{Q}{C} = \frac{1}{C} \cdot \int_0^t I_C(t) dt + Q_0$$

Q_0 ist die Ladung die sich anfangs im Kondensator befindet.

$$\Rightarrow U_A = -\frac{1}{R \cdot C} \int_0^t U_E(t) dt + U_A(0)$$

Das Ausgangssignal ist somit das zeitliche Integral der Eingangsspannung. Der Widerstand R_S ermöglicht das Entladen des Kondensators und verhindert somit, dass sich Ladung durch unsymmetrische Spannung ansammelt.

3.4 Differenzierer

Durch Vertauschen von Widerstand und Kondensator erhält man den Differenzierer

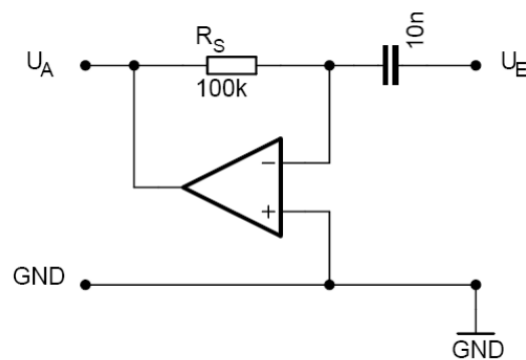


Abbildung 3.4: Schaltplan

Auch hier gilt wieder:

$$I_A = -I_E$$

Somit erhält man für die Ausgangsspannung:

$$U_A = R_S \cdot I_A = -R_S \cdot I_E$$

Mit $I_E = \dot{Q} = C \cdot \frac{dU_E}{dt}$ folgt:

$$U_A = -R_S \cdot C \cdot \frac{dU_E}{dt}$$

Das Ausgangssignal ist also die erste zeitliche Ableitung des Eingangssignals.

4 Komplexere Schaltungen mit Operationsverstärker

4.1 Idealer Einwegrichter

Ein einfacher Einwegrichter mit einer Diode ohne OPV hat den Nachteil, dass an ihm immer die Diodenknickspannung abfällt, also nie die gesamte Halbwelle durchgelassen wird. Beim idealen Einwegrichter wird dies behoben.

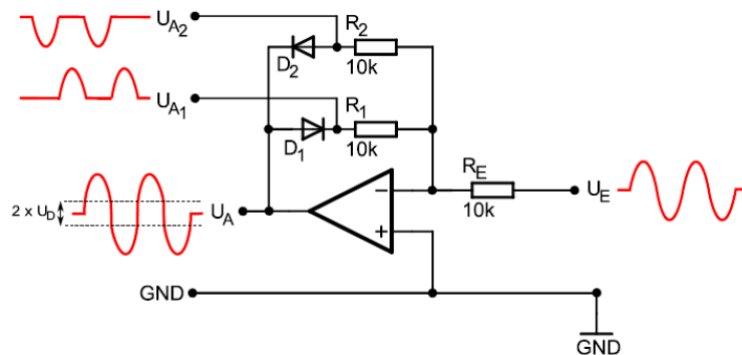


Tabelle 4.1: Schaltplan

Je nachdem, ob die eingehende Spannung positiv oder negativ ist, ist immer je ein Zweig gesperrt bzw. aktiviert. Die Erhöhung der Ausgangsspannung entspricht der Spannung, die an den Dioden abfällt. An U_{A1} und U_{A2} erhält man so ohne Verluste gerade den invertierten positiven bzw. negativen Anteil der Eingangsspannung.

4.2 Generator für Dreieck- und Rechtecksignal

Hierfür werden zwei OPV's aneinandergeschlossen, der eine arbeitet als Schmitt-Trigger, der andere als Integrierer

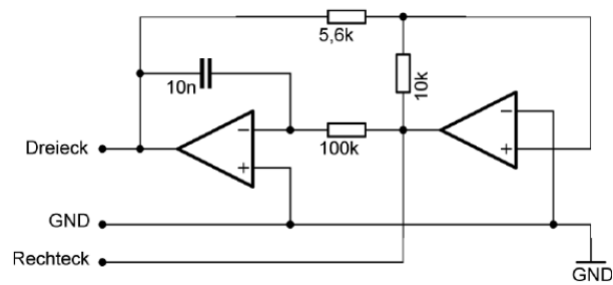


Abbildung 4.1: Schaltplan

Der Schmitt-Trigger gibt bei eingehender Gleichspannung eine bestimmte Spannung aus, wobei sich den Kondensator auflädt. Wird die Ladung auf dem Kondensator zu hoch, schaltet der Schmitt-Trigger durch Rückkopplung um, sodass der Kondensator umgekehrt aufgeladen und die invertierte Spannung ausgegeben wird. Somit ist das Ergebnis eine Rechteckspannung. Integriert ergibt dies die Dreieckspannung.

4.3 Programmierte Differentialgleichung zweiter Ordnung

Eine Differentialgleichung zweiter Ordnung hat die Form:

$$\ddot{x}(t) + 2\beta\dot{x}(t) = -\omega_0^2 x(t)$$

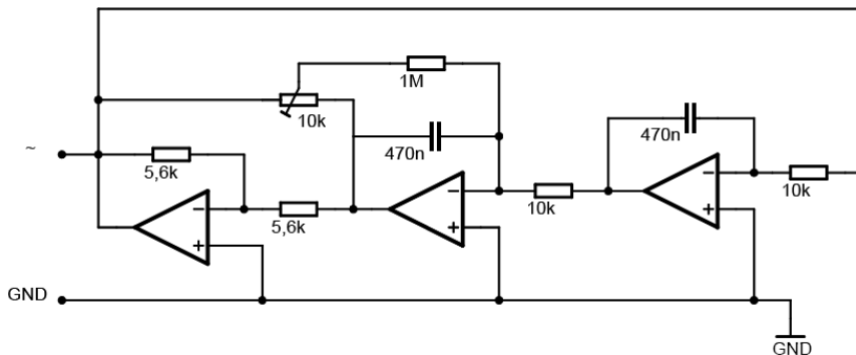


Abbildung 4.2: Schaltplan

Am Mittelabgriff kann man am einen Potentiometer die \dot{x} -Komponente einstellen. Dadurch lassen sich Schwingfall, Kriechfall und aperiodischer Grenzfall einstellen. ω_0 wird durch die verwendeten Widerstände und Kondensatoren festgelegt.