

Vorbereitung

Operationsverstärker Versuch P2-59,60,61

Iris Conradi und Melanie Hauck
Gruppe Mo-02

27. Mai 2011

Inhaltsverzeichnis

1	Emitterschaltung eines Transistors	3
1.1	Einstufiger Transistorverstärker	4
1.2	Dreiecksspannung	5
1.3	Entfernen des Emitterkondensators	5
1.4	Frequenzabhängigkeit der Verstärkung	6
	Operationsverstärker	6
2	Nichtinvertierende Grundsaltung	7
2.1	Nichtinvertierender Verstärker	7
2.2	Eingangs- und Ausgangswiderstand	9
2.3	Frequenzabhängige Verstärkung	9
3	Invertierende Grundsaltung	9
3.1	Invertierender Verstärker	9
3.2	Addierer	10
3.3	Integrierer	11
3.4	Differenzierer	11
4	Komplexere Schaltungen	12
4.1	Einweggleichrichtung	12
4.2	Signalgeneratoren	13
4.3	Differentialgleichung	14
	Literatur	14

1 Emitterschaltung eines Transistors

Abbildung 1 zeigt eine erweiterte Emitterschaltung eines npn-Transistors.

Ein Transistor weist eine lineare Stromverstärkung auf. Auch die Spannungsverstärkung hängt von dem Stromverstärkungsfaktor ab. Da dieser einer starken Exemplarstreuung unterworfen ist, ist es wünschenswert die Spannungsverstärkung von der Stromverstärkung unabhängig zu machen.

Dies wird durch den Widerstand R_E erreicht. Der Kollektorstrom I_C lässt sich somit näherungsweise über das Verhältnis der Spannung die über R_E abfällt und seinen Wert bestimmen (Vernachlässigung des Basisstroms). Somit kann der Kollektorstrom und damit die Spannungsverstärkung unabhängig vom Basisstrom bestimmt werden. Dieses Verfahren wird als Stromgegenkopplung bezeichnet.

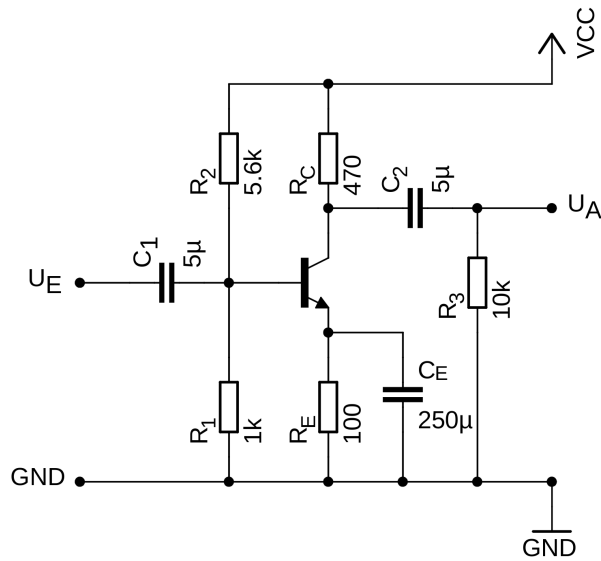


Abbildung 1: erweiterte Emitterschaltung

Wenn Stromgegenkopplung vorgenommen wird, so sinkt jedoch der Spannungsverstärkungsfaktor. Dies kann man sich aber auch zu Nutze machen. Durch Einbauen des Kondensators C_E kann man den Wechselspannungsanteil gegenüber dem Gleichspannungsanteil bevorzugen. Wenn der Kondensator für die vorliegende Wechselspannung eine geringere Impedanz hat als der Widerstand R_E , so wird sie geringer gegengekoppelt. Die Verstärkung sinkt also für hochfrequente Anteile nicht so stark ab.

Einen Transistor kann man sich grob aus zwei Dioden aufgebaut vorstellen. Um eine Wechselspannung um Null zu verstärken müssten Ströme in beiden Richtungen vom Transistor durchgelassen werden. Da dies nicht der Fall ist, muss man die Wechselspannung künstlich um einen Gleichspannungsanteil anheben und diesen am Ausgang wieder entfernen. Über den Spannungsteiler aus R_1 und R_2 kann man diese „Ruhespannung“ ($U_E = 0V$, Arbeitspunkt) einstellen. Der Kondensator C_1 soll schon im Eingangssignal vorhandene Gleichspannungsanteile herausfiltern. Mit dem Kondensator C_2 wird am Ausgang der Gleichspannungsanteil entfernt.

1.1 Einstufiger Transistorverstärker

Eine Schaltung wie in Abbildung 1 soll aufgebaut werden. Der Arbeitspunkt ist richtig eingestellt, wenn das die hohen Elongationen am Ausgangssignal nicht „abgeschnitten“ sind.

1.2 Dreiecksspannung

Wir legen Dreiecksspannungen verschiedener Amplituden an und beobachten das Ausgangssignal. Zum einen kann beurteilt werden, in wie weit das Signal verzerrt wurde. Außerdem kann die Amplitude des Ausgangssignals gemessen werden. Damit kann die Verstärkung bestimmt werden. Im Idealfall ist diese bei allen Eingangsamplituden gleich.

1.3 Entfernen des Emitterkondensators

Durch Entfernen von C_E werden alle Frequenzen des Eingangssignals vollständig stromgeggekoppelt. Somit ist der Verstärkungsfaktor für alle Frequenzen gleich.

Zur Berechnung des Spannungsverstärkungsfaktors vernachlässigt man die Beschaltung zur Einstellung des Arbeitspunktes. Zur Herleitung wird das Kleinsignalersatzschaltbild (vgl. Abbildung 2) verwendet. Mit Hilfe dieser Schaltung und dem Wissen, dass im

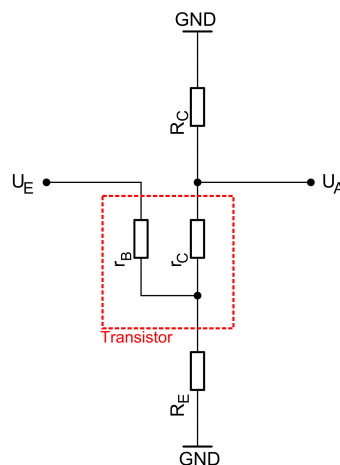


Abbildung 2: Kleinsignalersatzschaltbild

Transistor der Widerstand zwischen Basis und Emitter viel kleiner ist als der zwischen Kollektor und Emitter können die Ausgangs- und Eingangsimpedanzen näherungsweise bestimmt werden.

$$v_u = \left| \frac{U_A}{U_E} \right| = \left| \frac{Z_A I_A}{Z_E I_E} \right| \quad (1)$$

Die Impedanzen lassen sich nähern, in dem man für Reihenschaltungen (+) den großen Widerstand, für Parallelschaltungen (||) den kleinen Widerstand verwendet. Außerdem

gilt $\beta \gg 1$. Weiterhin muss beachtet werden, dass durch den Transistor eine Stromverstärkung (Faktor: β) geschieht.

$$Z_A = r_B + (R_E || r_C)(\beta + 1) \approx R_E \cdot \beta \quad (2)$$

$$Z_E = R_C || (r_C + (R_E || \frac{r_B}{\beta})) \approx R_C \quad (3)$$

Diese Näherungen werden in obige Gleichung eingesetzt. Für das Verhältnis der Ausgangs- und Eingangsströme kann der Stromverstärkungsfaktor eingesetzt werden. Es ergibt sich:

$$v_u = -\frac{R_C}{R_E} \quad (4)$$

Das Vorzeichen erhält man, da die Verstärkung der Emitterschaltung invers ist.

1.4 Frequenzabhängigkeit der Verstärkung

Wie schon erwähnt, ist die Verstärkung ohne Kondensator für alle Frequenzen gleich. Im anderen Fall werden höher frequente Signalanteile stärker verstärkt.

Bei beiden Schaltungen sorgen die Kondensatoren an Ein- und Ausgang dafür, dass tiefe Frequenzen über diese Schaltungen nur schlecht übertragen werden. Somit werden diese insgesamt weniger verstärkt.

Operationsverstärker

Abbildung 3 zeigt ein vereinfachtes Schaltbild eines Operationsverstärkers.

Im rot markierten Bereich wird aus der Differenz der beiden Eingangsspannungen U_N und U_P ein Differenzstrom gebildet. Dieser wird im Darlington-Transistor (blau markiert) sehr stark verstärkt. Die Verstärkung des Darlington-Transistors ist jedoch abhängig von der Last am Ausgang. Daher wird ein Impedanzwandler benötigt. Er gewährleistet, dass am Ausgang des Darlington-Transistors eine hohe Impedanz vorliegt. So ist dieser durchgängig gering belastet und verstärkt so besonders stark. Am Ausgang des Operationsverstärkers (OPV) sorgt der Impedanzwandler für eine niedrige Impedanz. Durch den Impedanzwandler geschieht also eine Entkopplung des Darlington-Transistors vom Ausgang des OPVs. Die Spannung, die über die Dioden (5) anliegt ist fest, da man eine Konstantstromquelle verwendet. Die Spannung die über den Darlington-Transistor abfällt wird durch den Differenzstrom bestimmt (Änderung des Widerstandes des Darlington-Transistors). Dadurch ist die „Potentiallage“ (bezogen auf -U) der beiden Basen der

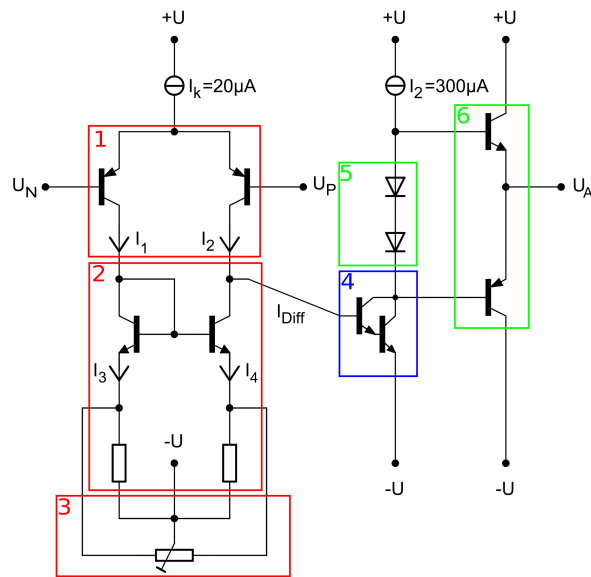


Abbildung 3: Prinzipschaltbild Operationsverstärker

Transistoren in 6 bestimmt. Verändert sich die Ausgangslast, so verändern sich die Ströme durch die Transistoren in 6 so, dass U_A immer das Potential hat, wie der Punkt zwischen den Dioden in (5). Ändert sich der Differenzstrom nicht, so ist U_A für jede Last gleich.

Für einen idealen OPV gelten die sogenannten „drei goldenen Regeln“:

- Die Verstärkung ist unendlich groß: daher darf die Differenz der Eingangsspannungen nicht zu groß sein.
- Der Eingangswiderstand ist unendlich groß.
- Der Ausgangswiderstand ist Null. Jeder für den Widerstand der Last nötige Strom kann aufgebracht werden. Daher ist die Ausgangsspannung bei vorgegebener Differenz der Eingangsspannungen bei jeder Last gleich groß (außer der Ausgangsstrom überschreitet eine bestimmte Grenze).

2 Nichtinvertierende Grundsaltung

2.1 Nichtinvertierender Verstärker

Abbildung 4 zeigt den Aufbau der nichtinvertierenden Grundsaltung. Es handelt sich um einen Verstärker. Da der OPV die Differenz zwischen den Eingangssignalen verstärkt,

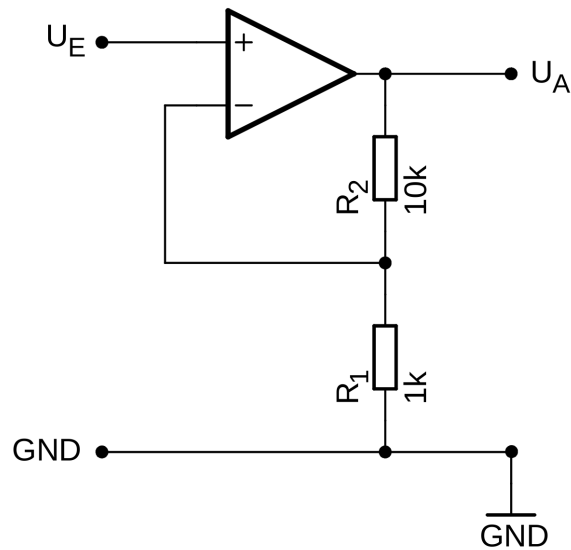


Abbildung 4: nichtinvertierende Grundsaltung

ist U_A immer dann groß, wenn die Differenz groß ist. Wenn die Differenz positiv ist (Eingänge mit den angegebenen Vorzeichen gewertet) so ist auch U_A positiv. Durch die Kopplung des Ausgangs mit dem invertierenden Eingang liegt zwischen den Widerständen R_1 und R_2 etwa die Spannung U_E an. Die verbleibende Differenz zwischen den beiden Eingangsspannungen ist sehr klein. Da sie jedoch so stark verstärkt wird, reicht es aus um am invertierenen Eingang das Potential U_E zu halten.

Somit ist bekannt, dass über R_1 die Spannung anliegt $U_{R_1} = U_E$. R_2 und R_1 bilden einen Spannungsteiler. Es gilt also

$$\frac{U_{R_2}}{U_{R_1}} = \frac{R_2}{R_1} \quad (5)$$

Damit ergibt sich:

$$U_A = U_E \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \quad (6)$$

Somit gilt für die Verstärkung:

$$v_u = \frac{U_A}{U_E} = 1 + \frac{R_2}{R_1} \quad (7)$$

2.2 Eingangs- und Ausgangswiderstand

Die Eingangsimpedanz des Verstärkers Z_E kann über einen Spannungsteiler zwischen bekanntem Widerstand R und Eingangsimpedanz bestimmt werden. Hierzu muss die Eingangsspannung U die auf den Spannungsteiler gegeben wird bekannt sein, die Spannung über dem bekannten Widerstand U_R muss gemessen werden.

$$Z_E = R \cdot \frac{U - U_R}{U_R} \quad (8)$$

Die Ausgangsimpedanz der Verstärkerschaltung kann man mit Hilfe eines Potentiometers abschätzen. Man betrachtet eine Reihenschaltung von Innenwiderstand der Schaltung und Potentiometer. Über diese Reihenschaltung fällt die Ausgangsspannung ab. Wenn der Widerstand des Potentiometers deutlich größer ist als der Innenwiderstand, so fällt die Ausgangsspannung quasi vollständig über dem Potentiometer ab. Wenn die Impedanz des Potentiometers und die Ausgangsimpedanz jedoch etwa gleich groß sind, so fällt nunoch die halbe Ausgangsspannung über dem Potentiometer ab.

2.3 Frequenzabhängige Verstärkung

Bei steigender Frequenz ist ein Abfall der Verstärkung zu erwarten.

Dieses Tiefpassverhalten der Verstärkerschaltung ist durch die Existenz parasitärer Kapazitäten zu erklären.

3 Invertierende Grundschtaltung

3.1 Invertierender Verstärker

In Abbildung 5 ist die invertierende Grundschtaltung zu sehen. Auch mit dieser Schaltung kann ein Eingangssignal verstärkt werden. Hierzu wird wieder das Ausgangssignal rückgekoppelt.

Die goldene Regel besagt, dass der Operationsverstärker die Ausgangsspannung so regelt, dass die Differenz der Eingangssignale möglichst gering ist. Der nichtinvertierende Eingang ist an GND angeschlossen, somit liegt auch am invertierenden Eingang das GND-Potential an. Daher liegt die gesamte Spannung U_E über dem Widerstand R_1 an. Eine weitere goldene Regel besagt, dass der Widerstand am Eingang des OPVs unendlich hoch ist. Somit fließt kein Strom in den OPV hinein. Der Strom durch den Widerstand R_2 ist also betragsmäßig gleich dem Strom $I = U_E/R_1$ durch den Widerstand R_1 . Über diesen Widerstand fällt die Spannung $-U_A$ ab, da zwischen den Widerständen

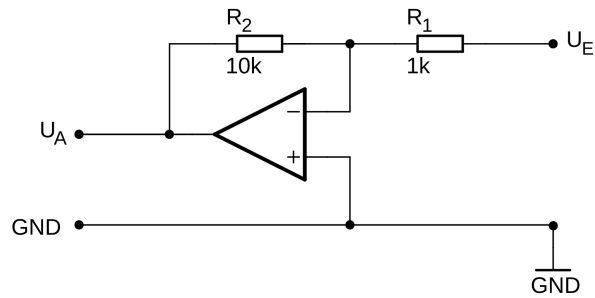


Abbildung 5: Invertierende Grundsaltung

GND anliegt. Über diese Beziehungen kann man die Ausgangsspannung in Abhängigkeit der Eingangsspannung bestimmen. Damit kennt man den Verstärkungsfaktor.

$$v_u = -\frac{R_2}{R_1} \quad (9)$$

Die Ausgangsspannung hat das invertierte Vorzeichen.

3.2 Addierer

Abbildung 6 zeigt einen aus der invertierenden Grundsaltung erstellten Addierer.

Der Strom durch R_2 entsteht hier also durch Addition der beiden Eingangsströme.

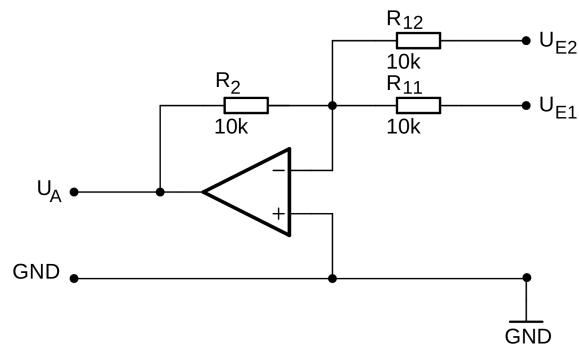


Abbildung 6: Addierer

Diese kann man wieder durch das Verhältnis der Spannungen zu den Widerständen bilden. Somit ergibt sich analog zu oben:

$$U_A = -R_2 \left(\frac{U_{E1}}{R_{11}} + \frac{U_{E2}}{R_{12}} \right) \quad (10)$$

Wenn man alle drei Widerstände gleich groß wählt, so werden die Eingangsspannungen einfach addiert. Durch eine andere Wahl der Widerstände können vor der Addition noch Faktoren an die Eingangsspannungen multipliziert werden.

3.3 Integrierer

Abbildung 7 zeigt eine Variation der invertierenden Grundschialtung. Der Widerstand R_2 wurde durch einen Kondensator ersetzt. Der Widerstand R_S ist nur nötig um einen Offset in der Eingangsspannung abzufangen. Er ist jedoch für die Wirkung der Schaltung als Integrierer nicht relevant. Der Gleichspannungsanteil wird nicht integriert.

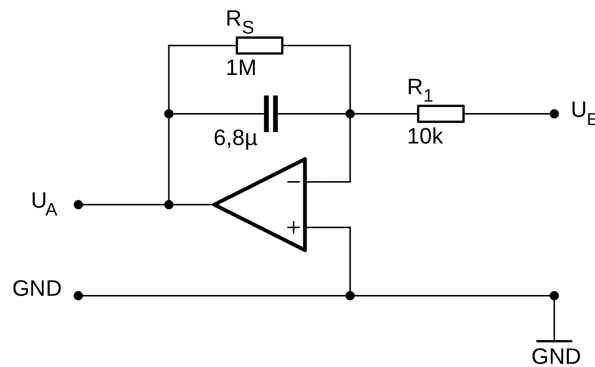


Abbildung 7: Integrierer

Für die Ausgangsspannung gilt $U_A = Q/c$, wobei die Ladung als zeitliche Integration des Stromes aufzufassen ist. Der Strom kann wieder über die Eingangsspannung ausgedrückt werden. Damit ergibt sich:

$$U_A = -\frac{1}{R_1 C} \int_0^t U_E(t') dt' + U_A(0) \quad (11)$$

dabei bedeutet der Term $U_A(0)$ eine zuvor schon vorhandene Spannung und somit eine zuvor am Kondensator anliegende Ladung.

Man erkennt also, dass die Ausgangsspannung der integrierten Eingangsspannung entspricht, natürlich wieder mit negativem Vorzeichen.

3.4 Differenzierer

Der Differenzierer ist in Abbildung 8 abgebildet.

Der Strom durch den Kondensator erhält man also zeitliche Ableitung der Ladung. Für

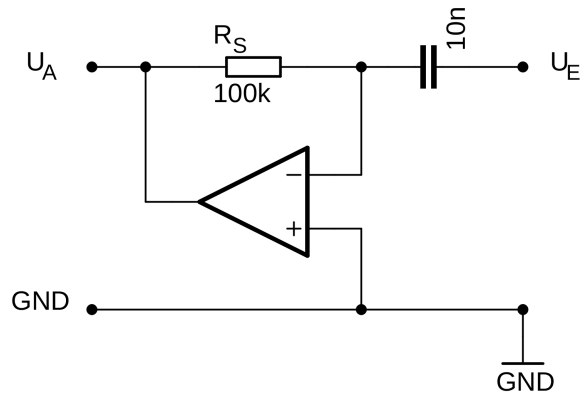


Abbildung 8: Differenzierer

diese gilt zudem $Q = CU_E$.

Durch analoges Vorgehen zu den vorherigen Aufgabenteilen erhält man:

$$U_A = -R_S \cdot C \cdot \frac{dU_E}{dt} \quad (12)$$

Somit zeigt diese Schaltung ein differenzierendes Verhalten.

4 Komplexere Schaltungen

Abbildung 9 zeigt einen idealen Einweggleichrichter (Ausgänge U_{A1} und U_{A2}). Im Gegensatz zum einfachen Diodengleichrichter wird die volle Halbwelle übertragen.

4.1 Einweggleichrichtung

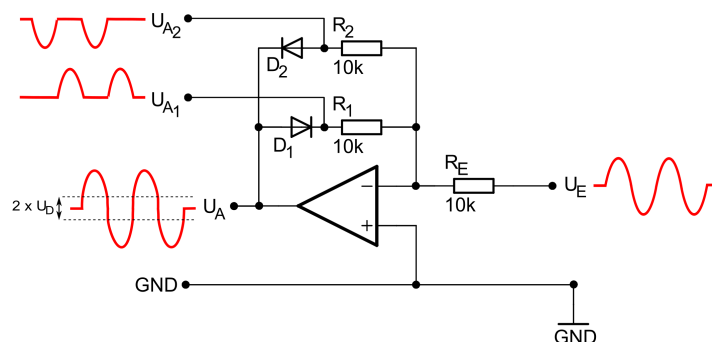


Abbildung 9: Gleichrichter

Jenachdem welche Halbwelle gerade am Eingang vorliegt, geschieht die Rückkopplung über einen der beiden „Äste“. Positive Halbwellen werden über D_2 übertragen. Da es sich von der Grundbauweise um die invertierende Grundschialtung handelt, erhält man die invertierte Halbwelle am Ausgang U_{A2} .

Da die Widerstände gleich groß sind, werden die Halbwellen nicht verstärkt. Am Ausgang U_A zeigt sich eine gestreckte Welle, da die Spannung U_A immer um die Spannung erhöht ist, die beim vorgegebenen Strom an der Diode abfällt.

4.2 Signalgeneratoren

Abbildung 10 zeigt eine Schaltung an der man Rechteck- und Dreieckspannung abgreifen kann.

Der rechte OPV ist in dieser Schaltung immer im Sättigungsbereich ($\pm 15\text{ V}$) da die

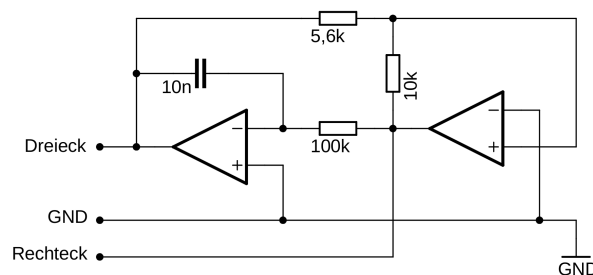


Abbildung 10: Signalgenerator

Differenzspannung an den Eingängen immer recht groß ist. Am Ausgang dieses OPVs kann man also die Rechteckspannung abgreifen.

Liegen am Ausgang dieses OPVs (Schmitt-Trigger) beispielsweise 15 V an, so liegt am Eingang des Integrierers (linker OPV) eine positive Spannung an. Somit herrscht am Ausgang des Integrierers eine negative Spannung. Diese steigt (betragsmäßig) mit der Zeit an. Auch diese Spannung wird an den Eingang des Schmitt-Triggers rückgekoppelt. Am nichtinvertierenden Eingang des Schmitt-Triggers überlagern sich also die positive Ausgangsspannung des Schmitt-Triggers und die negative Spannung des Integrierers. Die negative Spannung steigt, wenn sie die positive überwiegt, so liegt eine negative Differenzspannung am Schmitt-Trigger an. Dieser geht sofort (da Differenz groß) in die negative Sättigung. Nun muss die Kondensatorladung erst abgebaut werden (damit ist ein „Dreieck“ vollständig). Dann beginnt der umgekehrte Prozess.

Damit dieser Ablauf beginnt, muss eine Differenzspannung am Schmitt-Trigger vorliegen. Diese kann man beispielsweise erreichen, in dem man den Kondensator zuvor auflädt.

4.3 Differentialgleichung

In Abbildung 11 ist die Schaltung eines Sinusgenerators zu sehen. Er basiert auf der Differential-/ Integralgleichung eines harmonischen Oszillators. Wenn man die Schal-

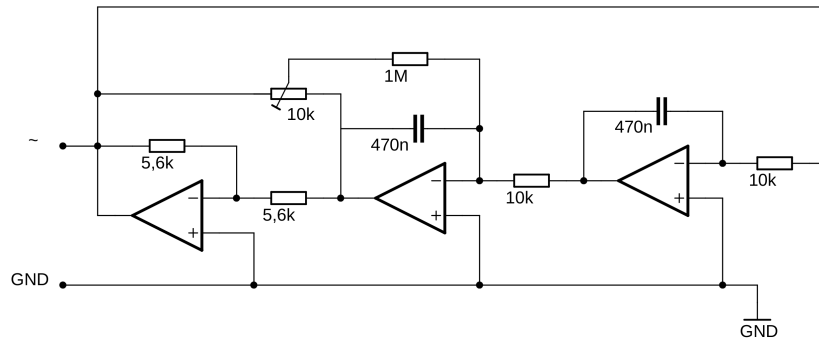


Abbildung 11: Sinusgenerator

tung ohne das Potentiometer und ohne den $1\text{M}\Omega$ Widerstand betrachtet, so wird durch die Schaltung ein ungedämpfter harmonischer Oszillator realisiert. Durch das negierte Integrieren und den Vorzeichenwechsel (invertierender Verstärker mit Faktor 1) wird aus dem Sinus wieder ein Sinus generiert.

Wenn man die beiden Widerstände in die Gleichung einfügt, so kann man mit dem Potentiometer verschiedene Dämpfungen realisieren.

Literatur

- U. Tietze, Ch. Schenk: Halbleiterschaltungstechnik; Springer 13. Auflage
- Vorbereitungshilfe