

Praktikumsvorbereitung

Operationsverstärker

André Schendel, Silas Kraus
Gruppe DO-20

31. Mai 2012

Grundlagen

0.1 Halbleiterdotierung

Ein Halbleiter im Grundzustand ist schlecht leitend. Durch Einwirkung von Wärme oder Licht kann er jedoch leitend werden: Mit zunehmender Temperatur sinkt der Widerstand des Halbleiters:

$$R_{T_2} = R_{T_1} \cdot (1 + a(T_2 - T_1))$$

mit dem materialspezifischen Temperaturbeiwert a .

Eine Methode, einen Halbleiter dauerhaft leitfähig zu machen, ist das Dotieren. Dabei werden Fremdatome (z.B. Arsen oder Indium) in das Grundgitter (z.B. Silizium oder Germanium) eingebracht. So bleiben im Gitter freie Elektronen (bzw. bei Indium Defektelektronen) übrig, weil die Fremdatome eine höhere (niedrigere) Anzahl von Valenzelektronen haben. Diese Elektronen (Löcher) agieren nun als negative (positive) Ladungsträger.

0.2 Halbleiterdiode

Eine Halbleiterdiode besteht aus einer dünnen Halbleiterschicht (z.B. Silizium) zwischen zwei Anschlüssen, welches auf einer Hälfte positiv und auf der anderen negativ dotiert ist. (p-Dotierung: positive Ladungsträger, Löcher; n-Dotierung: negative Ladungsträger, Elektronen) Zwischen den beiden Bereichen existiert eine Grenzschicht, in der sich Löcher und freie Elektronen zu festen Gitterelektronen kombinieren. Hier befinden sich nur sehr wenige freie Ladungsträger. Es gibt nun zwei Möglichkeiten, die Diode anzuschließen:

1. Sperrschaltung: Der Plus-Pol wird an die n-dotierte Hälfte angeschlossen.

⇒ Die Ladungsträger werden vom neutralen Bereich weggezogen. Dadurch vergrößert sich der neutrale Bereich in der Mitte noch und die Diode wird nichtleitend. Es fließt kein Strom.

2. Durchlassschaltung: Der Plus-Pol wird an die p-dotierte Hälfte angeschlossen.

⇒ Die Ladungsträger werden in den neutralen Bereich gedrängt. Die Diode wird leitend und der Strom fließt.

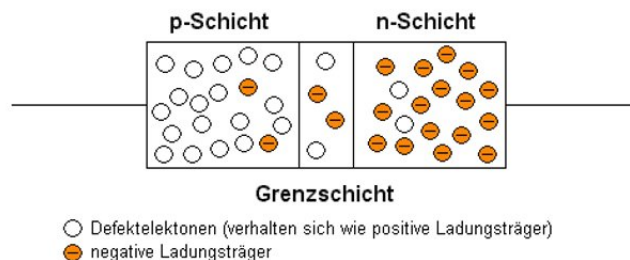


Abbildung 1: Diode ohne äußere Spannung. Quelle: http://www.christoph-weiser.de/physik/hj11I/diode_aufbau.gif

0.3 Transistor

Ein npn-Transistor besteht prinzipiell aus zwei Dioden. In der Mitte befindet sich der p-dotierte Bereich - die Basis (B) - und auf beiden Seiten je ein n-dotierter Bereich - der Emmitter (E) bzw. der Kollektor (C). Zwischen E und C soll der eigentliche Strom fließen, an B liegt die Steuerspannung U_B .

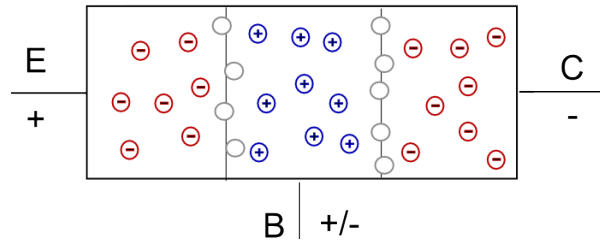


Abbildung 2: Transistor im Grundzustand

Liegt an B eine negative Spannung U_B , werden die Löcher aus den neutralen Zonen herausgezogen und sperren den Strom. Ist U_B positiv, werden sie hineingedrängt, das Material wird leitend und der Strom fließt vom Emmitter zum Kollektor.

Ein pnp- Transistor verhält sich umgekehrt: Er sperrt bei positiver Spannung U_B und öffnet bei negativen Signalen.

So lässt sich an einem Transistor ein hoher Laststrom durch Emmitter und Kollektor mithilfe eines niedrigen Steuerstroms durch die Basis steuern. Er kann beispielsweise als Schalter oder zur Signalverstärkung in einer Emitterschaltung verwendet werden.

0.4 Emitterschaltung

Eine Emitterschaltung dient dazu, eine schwache Eingangsspannung zu verstärken. Dabei wird das Eingangssignal an die Basis eines Kondensators angeschlossen und steuert so eine um ein vielfaches größere Kollektor-Emmitter-Spannung, welche durch eine zweite Spannungsquelle erzeugt wird. So kann das Eingangssignal verstärkt werden:

$$v_i = \beta, \quad v_u = -\beta \frac{R_C}{r_B} \quad (1)$$

mit v_i und v_u als Verstärkung für Stromstärke und Spannung. β ist der Verstärkungsfaktor des Transistors.

Allerdings kann mit dieser Schaltung keine Ausgangsspannung mit wechselndem Vorzeichen erzeugt werden, da eine negative Eingangsspannung keine negative Ausgangsspannung erzeugt, sondern nur den Kondensator sperrt. Deshalb muss für eine Spannungsänderung in beide Richtungen bereits eine Ruhespannung vorhanden sein, damit u_e nicht das Vorzeichen wechselt. Aus diesen Ruhespannungen bzw. Ruhestromen, um die sich die Eingangsspannung bewegen soll, wird der Arbeitspunkt der Schaltung bestimmt. Dabei ist darauf zu achten, dass die Arbeitsgerade nie die Leistungshyperbel $P_{max} = u_{CE} \cdot i_C$ überschreitet, da sonst der Transistor zerstört wird. (Ausnahme: Anwendung als Schalter mit nur kurzzeitigem Überschreiten der Hyperbel)

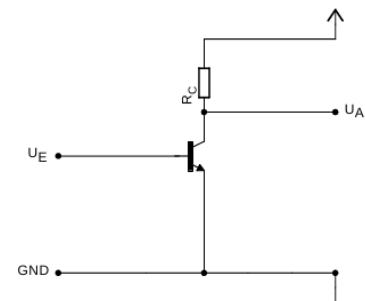


Abbildung 3: Emitterschaltung ohne Stromgegenkopplung. (Quelle: Vorbereitungshilfe, Seite 6)

0.5 idealer Operationsverstärker

Ein Operationsverstärker ist eine recht komplexe Schaltung. Um die Verstärkung dennoch mit nicht allzu großem Aufwand berechnen zu können, wird der OV als ideal angenommen und die "3 goldenen Regeln" eingeführt:

1. $v \rightarrow \infty$: Die Verstärkung des OV's sei unendlich. Weil das Ausgangssignal dann sofort übersteuert würde, folgt daraus: $\frac{U_N}{U_P} \approx 1$.
2. $R_E \rightarrow \infty$: Es sollen keine Ströme durch den OV fließen, also muss der Eingangswiderstand unendlich sein.
3. $R_A \rightarrow 0$: Damit die Spannung am Ausgang lastunabhängig ist, muss der Ausgangswiderstand möglichst klein sein.

1 Emitterschaltung

1.1 Aufbau

Der gleichstromgegenggekoppelte Transistorverstärker wird in der Messtechnik sehr häufig verwendet. Es handelt sich dabei um eine verbesserte Emitterschaltung, welche unter anderem Gleichstromsignale ausfiltert und die starke Abhängigkeit der Spannungsverstärkung vom Verstärkungsfaktor unterdrückt.

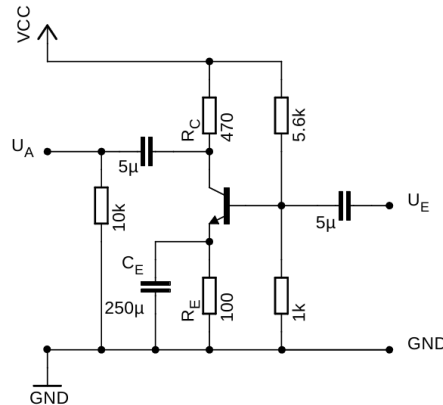


Abbildung 4: gleichstromgegenggekoppelter Transistorverstärker. (Quelle: Vorbereitungshilfe, Seite 8)

Aus der Formel (1) für die Verstärkung von Stromstärke und Spannung zeigt sich, dass v_U vom Faktor β und vom Eingangswiderstand r_B abhängt. Der Verstärkungsfaktor β ist stark temperaturabhängig und unterliegt einer großen Serienstreuung, das heißt 2 Bauteile der gleichen Serie haben oft unterschiedliche β . Deshalb wird im Transistorverstärker der Widerstand R_E eingebaut, um das Emittorpotential anzuheben. Dadurch wird die Verstärkung der Schaltung verringert, aber die β -Abhängigkeit verschwindet. Dieser Effekt wird Gegenkopplung genannt.

Wenn nun noch der Kondensator C_E parallel zu R_E geschaltet wird, können hochfrequente Signale über seine Impedanz den Widerstand umgehen und werden voll verstärkt.

(Die Impedanz des Kondensators ist $Z_C = \frac{1}{i\omega C}$. Für große ω wird sein Widerstand also verschwinden.)

Durch die teilweise Überbrückung des Kondensators über die Widerstände $5.6k$ und $1k$ wird der Arbeitspunkt des Kondensators angehoben, sodass auch negative Signalamplituden übertragen werden können. (Der Arbeitspunkt wird durch Messung der Spannung zwischen U_E und GND bestimmt.)

Der so entstehende unerwünschte Offset wird wieder herausgefiltert, indem noch ein Kondensator 5μ verwendet wird, dessen Impedanz wieder das Gleichstrompotential unterdrückt und höherfrequente Signale durchlässt.

1.2 Dreiecksspannung

An den Eingang des Verstärkers soll eine Dreiecksspannung $\approx 1kHz$ angelegt und deren verstärktes Signal am Ausgang beobachtet werden. Die Eingangsamplitude soll auf $U_A = 3V_{ss}$ und $10V_{ss}$ eingestellt werden. Die Verstärkung ist dann einfach:

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

1.3 Dreiecksspannung ohne C_E

Erneut soll bei den selben Eingangsamplituden die Verstärkung berechnet werden, allerdings wird diesmal der Emittorkondensator C_E ausgebaut. Damit können auch hohe Frequenzen den Widerstand R_E nicht mehr überbrücken, der Transistorverstärker wird "stromgegenggekoppelt" für alle Frequenzen. Damit wird nun nicht mehr die Basis-Emitter-Spannung, sondern der Basis-Emitter-Strom verstärkt. Die Spannungsverstärkung wird dann über die Widerstände berechnet. Dazu muss allerdings die sogenannte Kleinsignalnäherung angewandt werden, bei der nichtlineare Bauteile durch lineare genähert und alle Spannungsquellen als geerdet betrachtet werden. Dann ergibt sich die Spannungsverstärkung aus den Stromstärken I und Impedanzen Z der Bauteile:

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

Mit der Stromverstärkung $\beta = \frac{I_A}{I_E}$

$$\Rightarrow v_U = -\frac{R_C}{R_E} \approx -4,7 \text{ (mit den gegebenen Widerstandswerten)}$$

(negatives VZ, weil die Schaltung invertierend ist.)

1.4 quantitative Messungen

Um einen fundierten Überblick über das Verhalten des Verstärkers bei verschiedenen Frequenzen soll nun die Verstärkung sowohl bei Gesamtstrom- (SGK) als auch bei Gleichstromgegenkopplung (GSGK) für die Frequenzen (10/25/50/100/500Hz /1/5/10/50/100kHz) berechnet werden.

Es ist zu erwarten, dass bei kleinen Frequenzen sowohl SGK als auch GSGK die selbe Verstärkung liefern, da die Impedanz des Kondensators als Hochpass wirkt. Bei höheren Frequenzen wird die Signalverstärkung bei GSGK immer stärker ansteigen, während die Verstärkung der SGK relativ linear verlaufen sollte.

2 Operationsverstärker

2.1 Nichtinvertierende Grundschaltung

Im Folgenden soll ein OV in der sogenannten nichtinvertierenden Grundschaltung verwendet werden:

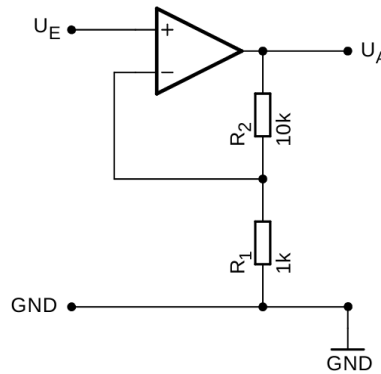


Abbildung 5: Schaltskizze des nichtinv. OV (Quelle: Vorbereitungshilfe, Seite 12)

Die Rückkopplung des Ausgangssignals auf den “-” -Eingang des OV wirkt Veränderungen des Eingangssignals entgegen und macht ihn erst überhaupt als Messverstärker nutzbar, da die Signalverstärkung sonst viel zu stark wäre.

Um die Verstärkung berechnen zu können, muss die Idealisierung der “goldenen Regeln” angewandt werden. Die Spannungsdifferenz zwischen den Eingängen muss also 0 sein, da sonst ein unendlich großes Ausgangssignal herauskäme. Dann kann die Verstärkung über die beiden Widerstände R_1 und R_2 berechnet werden:

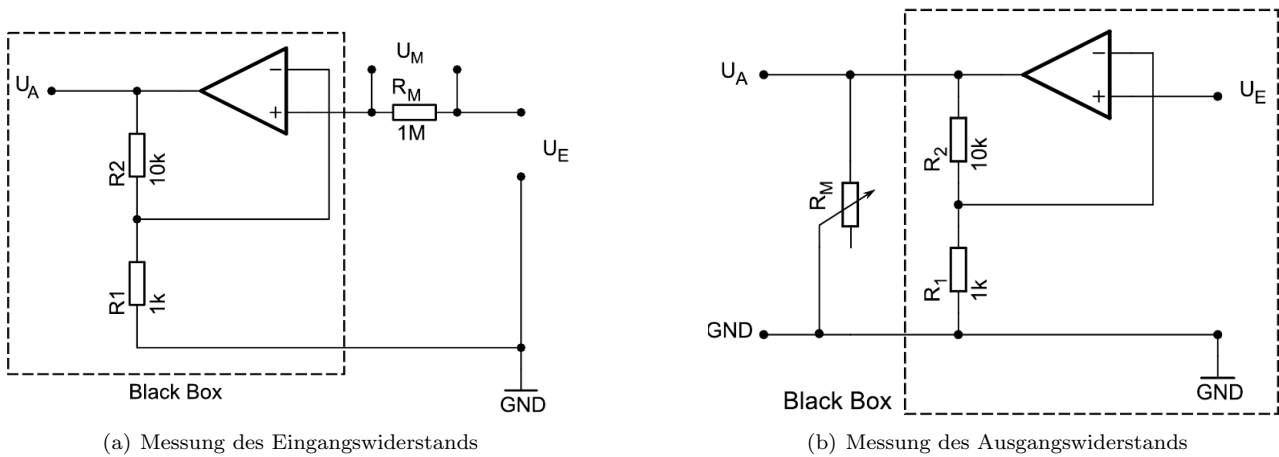
$$\begin{aligned} \frac{U_2}{U_1} &= \frac{R_2}{R_1} & | & \text{Addiere 1 dazu.} \\ \frac{U_2 + U_1}{U_1} &= 1 + \frac{R_2}{R_1} & | & U_2 + U_1 = U_A \text{ und } U_1 = U_E \\ \Rightarrow v_U = \frac{U_A}{U_E} &= 1 + \frac{R_2}{R_1} & | & \text{(mit eingesetzten Werten) } \Rightarrow v = 11 \end{aligned}$$

2.2 Nachweis hoher Eingangs- / kleiner Ausgangswiderstand

Es soll gezeigt werden, dass die Näherungen der goldenen Regeln überhaupt berechtigt sind. Um den Eingangswiderstand zu berechnen, wird ein zusätzlicher Messwiderstand R_M eingefügt und die Spannungen U_E und U_M gemessen. Der Eingangswiderstand wird dann folgendermaßen berechnet:

$$\frac{U_E}{U_M} = \frac{R_{Ein} + R_M}{R_M} \quad \Rightarrow R_{Ein} = R_M \cdot \left(\frac{U_E}{U_M} - 1 \right)$$

Der Ausgangswiderstand R_{Aus} kann nur grob abgeschätzt werden. Dazu wird ein Potentiometer parallel zum Ausgang geschaltet und dessen Widerstand kontinuierlich reduziert, bis die Ausgangsspannung beginnt, abzusinken. An diesem Punkt beginnt der Potentiometerwiderstand, sich in ähnlichen Größenordnungen wie R_{Aus} zu bewegen.



2.3 Verstärkung in Abhängigkeit von der Frequenz

Wie in den vorigen Aufgaben soll nun quantitativ das Verhalten des OV's für die Frequenzen (10/100/1000Hz/10/25/50/75/100) untersucht werden. Es ist zu erwarten, dass ohne Gegenkopplung die Verstärkung mit zunehmender Frequenz immer weiter abnimmt.

3 invertierende Grundschtaltung

3.1 invertierender Verstärker mit $v \approx 10$

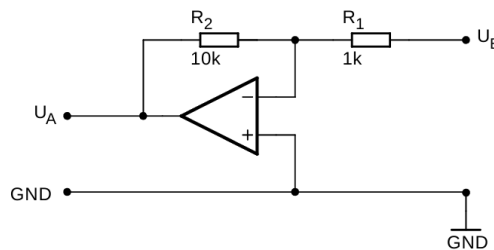


Abbildung 6: invertierender Verstärker (Quelle: Vorbereitungshilfe, Seite 15))

Wieder muss zur Berechnung ein idealer OV angenommen werden. Nach der 3. goldenen Regel ist $U_N = U_P$, die in diesem Fall also beide auf (virtueller) Masse liegen. Da der Eingangswiderstand des OV unendlich groß sein soll, fließt der gesamte Strom über R_1 und R_2 . Also gilt:

$$I_E = \frac{U_E}{R_E} \quad \text{und} \quad U_A = R_2 \cdot I_A \quad \Rightarrow \quad v_U = \frac{U_A}{U_E} = -\frac{R_2}{R_1} \quad (= 10 \text{ für } R_1 = 1k\Omega, R_2 = 10k\Omega)$$

3.2 Addierer

Zur Addition zweier Signale wird einfach noch ein zusätzlicher Eingang zur vorherigen Schaltung aus 3.1 hinzugefügt.

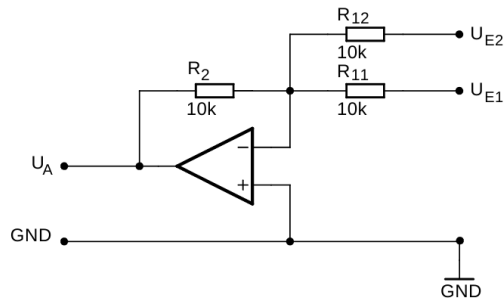


Abbildung 7: Addierschaltung (Quelle: Vorbereitungshilfe, Seite 16)

Da in diesem Fall die Vorwiderstände R_{11} und R_{12} gleich gewählt wurden, ergibt sich einfach:

$$U_A = -(U_E^1 + U_E^2)$$

Es sollen verschiedene Rechteck-, Dreieck- und Sinusspannungen angelegt werden.

3.3 Integrierer

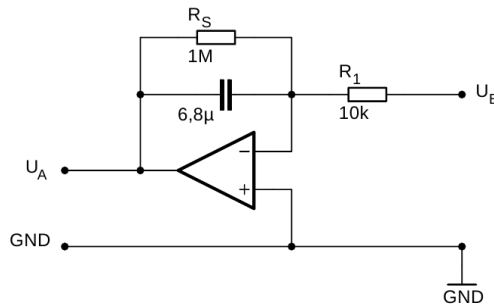


Abbildung 8: Integriererschaltung (Quelle: Vorbereitungshilfe, Seite 17)

Diese Schaltung integriert über die Eingangsspannung und gibt das Ergebnis je eines Signaldurchlaufs negiert aus. Dabei erfolgt die tatsächliche Integration im Kondensator. Der Widerstand R_S dient nur der Stabilisierung. Es gilt:

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

und mit $I_C = -I_E$:

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

Die Funktion der Schaltung soll mit Rechteck- und Dreieckspannung zwischen 50 und 100Hz überprüft werden.

3.4 Differenzierer

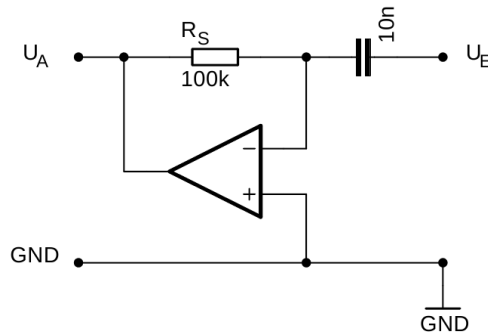


Abbildung 9: Differenzierschaltung (Quelle: Vorbereitungshilfe, Seite 17)

Um einen Differenzierer zu erhalten, müssen lediglich in obiger Schaltung Kondensator und Vorwiderstand vertauscht werden. Der Stabilisierungswiderstand parallel zum Kondensator entfällt. Wie zuvor beim Integrierer gilt: $I_A = -I_E$ und deshalb:

$$U_A = -R_S \cdot I_E$$

I_E kann ausgedrückt werden durch $I_E = \dot{Q} = C \cdot \frac{dU_E}{dt}$.

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

4 Komplexere Schaltungen

4.1 Einweggleichrichter

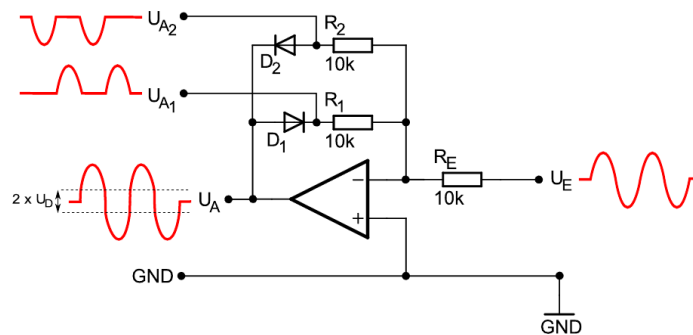


Abbildung 10: Gleichrichterschaltung (Quelle: Vorbereitungshilfe, Seite 19)

Der ideale Gleichrichter dient dazu, Signale mit wechselndem Vorzeichen in Signale gleichen Vorzeichens umzuwandeln, indem jeweils die nicht erwünschte Amplitude "abgeschnitten" wird. Dies würde auch mit einer einfachen Diode mit Widerstand funktionieren, aber diese benötigt eine gewisse Grundspannung, die Diodenknickspannung ($\sim 0.3V$), bevor sie sperrt. Es wird also noch ein kleiner Teil des negativen Signals durchgelassen. Beim Einweggleichrichter ist das nicht der Fall.

Diese Eigenschaft soll experimentell getestet werden.

4.2 Signalgenerator

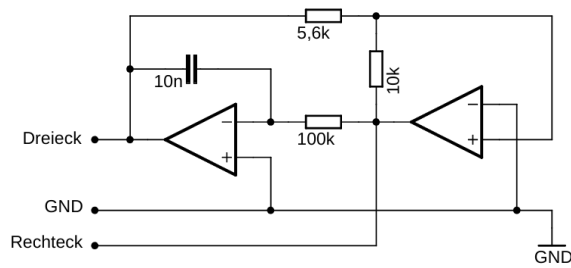


Abbildung 11: (Quelle: Vorbereitungshilfe, Seite 19)

Dieser Generator soll periodische Dreieck- und Rechteckspannungen erzeugen. Um die Funktionsweise zu verstehen, betrachten wir die Schaltung. In der linken Hälfte erkennen wir einen Integrierer. Der rechte OV wirkt als sogenannter "Schmitt-Trigger". Er gibt entweder -15V oder $+15\text{V}$ aus, je nachdem, ob die anliegende Spannung am invertierenden oder nichtinvertierenden Eingang höher ist.

Wenn zu Beginn zufällig -15V am Schmitt-Trigger-Ausgang anliegen, wird dieses Potential auf den nichtinv. Eingang des Triggers zurückgekoppelt und hält ihn in dieser Schaltstellung. Gleichzeitig läuft aber das durch den $100\text{k}\Omega$ -Widerstand abgeschwächte Signal zum Integrierer, der über einen gewissen Zeitraum ein positives Potential aufbaut, welches ebenfalls auf den nichtinv. Eingang des Triggers rückgeführt wird. Sobald dieses Positive Signal überwiegt, schaltet der Trigger um und der Kreislauf beginnt von neuem, diesmal mit umgekehrten Vorzeichen.

4.3 Differentialgleichung

Zum Abschluss soll ein Sinusgenerator gebaut werden:

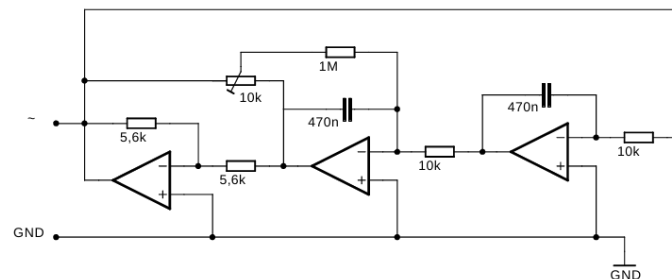


Abbildung 12: (Quelle: Vorbereitungshilfe, Seite 20)

Diese Schaltung wirkt als Differentialgleichung 2. Ordnung. Sie kann also durch einen harmonischen Oszillator gelöst werden. Es ergeben sich harmonische Schwingungen. Es soll versucht werden, die Schaltung so einzustellen, dass Schwingfall, Kriechfall und aperiodischer Grenzfall entstehen.

PS: Ja, ich zum Beispiel.