

Versuchsvorbereitung P2-59: Operationsverstärker

Kathrin Ender, Michael Walz
Gruppe 10

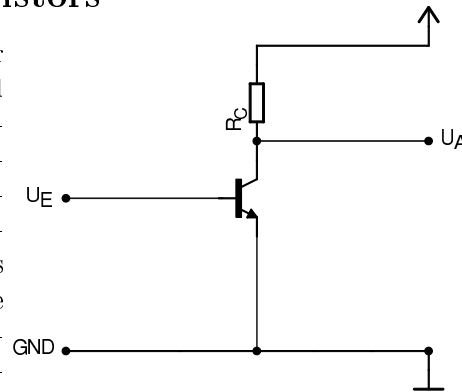
21. Juni 2008

Inhaltsverzeichnis

1	Emitterschaltung eines Transistors	2
1.1	Einstufiger Transistorverstärker	2
1.2	Bestimmung der Verstärkung	2
1.3	Verstärkung ohne Emitterkondensator	3
1.4	Frequenzabhängigkeit der Verstärkung	3
2	Grundsaltungen eines Operationsverstärkers	4
2.1	Nichtinvertierender Verstärker	4
2.2	Eingangswiderstand und Ausgangswiderstand	5
2.3	Frequenzabhängigkeit der Verstärkung	5
3	Invertierende Grundsaltung	6
3.1	Invertierender Verstärker mit zehnfacher Verstärkung	6
3.2	„Addierer“	6
3.3	Integrierer	7
3.4	Differenzierer	7
4	Komplexere Schaltungen	8
4.1	Einweggleichrichter	8
4.2	Generator für Dreiecks- und Rechtecksignale	8
4.3	Programmierte Differentialgleichung 2. Ordnung	9

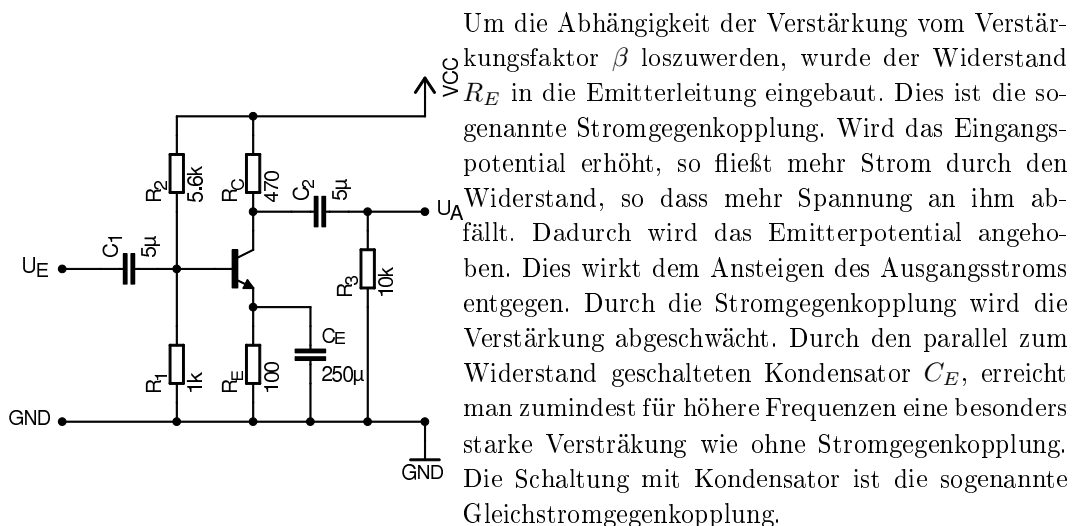
1 Emitterschaltung eines Transistors

Die Schaltungen eines Transistors werden immer nach dem Anschluss benannt an dem der Ground anliegt. Die einfache Emitterschaltung ist im nebenstehenden Schaltplan dargestellt. Die Emitterschaltung liefert zwar die größte mit einer Transistorgrundschaltung mögliche Strom- und Spannungsverstärkung, um sie sinnvoll verwenden zu können, muss sie jedoch modifiziert werden. So ist zum Beispiel die Abhängigkeit der Verstärkung vom - auch bei baugleichen Transistoren - stark schwankenden Verstärkungsfaktor β unerwünscht.



Außerdem können mit dem einfachen Aufbau nur positive Signale, die über der Diodenknickspannung liegen verstärkt werden. Im Versuch wird daher eine modifizierte Schaltung aufgebaut.

1.1 Einstufiger Transistorverstärker



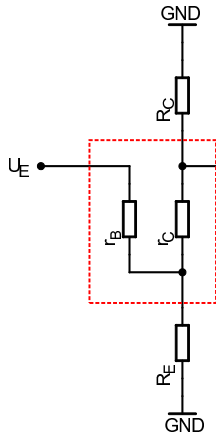
Um die Abhängigkeit der Verstärkung vom Verstärkungsfaktor β loszuwerden, wurde der Widerstand R_E in die Emittterleitung eingebaut. Dies ist die sogenannte Stromgegenkopplung. Wird das Eingangspotential erhöht, so fließt mehr Strom durch den Widerstand, so dass mehr Spannung an ihm abfällt. Dadurch wird das Emittterpotential angehoben. Dies wirkt dem Ansteigen des Ausgangsstroms entgegen. Durch die Stromgegenkopplung wird die Verstärkung abgeschwächt. Durch den parallel zum Widerstand geschalteten Kondensator C_E , erreicht man zumindest für höhere Frequenzen eine besonders starke Verstärkung wie ohne Stromgegenkopplung. Die Schaltung mit Kondensator ist die sogenannte Gleichstromgegenkopplung.

Die Widerstände R_1 und R_2 dienen dazu das Potential des Emitters anzuheben, so dass auch Signale, die kleiner als die Diodenknickspannung sind registriert werden. Damit das erhaltene Signal nicht um einen Gleichspannungsoffset verschoben ist, wird der Gleichstromanteil durch die Kondensatoren C_1 und C_2 unterdrückt.

1.2 Bestimmung der Verstärkung

Es soll die Verstärkung des aufgebauten einstufigen Transistorverstärkers bestimmt werden. Dafür verwenden wir eine Dreiecksspannung von etwa 1kHz. Es sollen verschiedene Ausgangsamplituden (von $1V_{SS}$ bis $10V_{SS}$) über Variation des Eingangssignales eingestellt werden. Die Ausgangsamplituden können oszillographisch betrachtet werden. Da die Verstärkung stark Frequenzabhängig ist, lässt sie sich nur schwer rechnerisch bestimmen.

1.3 Verstärkung ohne Emitterkondensator



Den Verstärkungsfaktor ohne Emitterkondensator hingegen kann man rechnerisch bestimmen. Man verwendet dazu eine lineare Ersatzschaltung für den Transistor, der an sich ein nicht lineares Bauelement ist. Der Transistor kann ersatzweise durch zwei Widerstände dargestellt werden. r_C der Kollektorwiderstand ist sehr groß. r_B der Basiswiderstand ist sehr klein. In einer parallel Schaltung können sehr große Widerstände vernachlässigt werden, in einer Reihenschaltung sehr kleine.

Man kann nun die Eingangs- und Ausgangsimpedanzen berechnen. Bei der Berechnung der Impedanz gelten natürlich die Rechenregeln für den Gesamtwiderstand von Widerstandsnetzwerken, zusätzlich müssen die Widerstände aber noch gewichtet werden mit dem Strom der durch sie fließt. Es wird dieselbe Schreibweise wie in der Versuchsvorbereitungshilfe verwendet: $R_1 + R_2$ ist eine Reihenschaltung und $R_1 || R_2$ ist eine Parallelschaltung.

Bei der Berechnung der Eingangsimpedanz wird der Widerstand r_B mit eins gewichtet, der Widerstand r_C mit¹ β , R_C mit null² und R_E mit³ $1 + \beta$. Es ergibt sich also:

$$Z_E = r_B + [\beta r_C || (\beta + 1)R_E] \approx r_B + (1 + \beta)R_E \approx (1 + \beta)R_E$$

Für die Ausgangsimpedanz werden R_C und r_C mit 1 gewichtet, r_B mit $1/\beta$ und R_E mit $\beta - 1 + 1$.

$$Z_A = R_C || [r_C + (\beta^{-1}r_B || (1 + \beta^{-1})R_E)] \approx R_C || [r_C + \beta^{-1}r_B] \approx R_C || r_C \approx R_C$$

Die Verstärkung erhält man aus:

$$\frac{U_A}{U_E} = \frac{Z_A \cdot I_A}{Z_E \cdot I_E} \quad \text{mit} \quad \frac{I_A}{I_E} = \beta$$

$$\frac{U_A}{U_E} = \frac{R_C}{R_E} \cdot \frac{\beta}{1 + \beta} \approx \frac{R_C}{R_E}$$

Man erhält also die Verstärkung:

$$U_A = \frac{R_C}{R_E} \cdot U_E$$

1.4 Frequenzabhängigkeit der Verstärkung

In dieser Aufgabe ist die Frequenzabhängigkeit der Verstärkung sowohl für eine gleichstromgegekoppelte als auch für eine stromgegekoppelte Schaltung zu untersuchen. Bei beiden Schaltungen sollten niedrige Frequenzen nur gering verstärkt werden, wegen des Ein- und Ausgangskondensators (C_1 und C_2), die jeweils als Hochpass wirken. Für den gleichstromgegekoppelten Fall ist ein starker Anstieg der Verstärkung bei hohen Frequenzen zu erwarten.

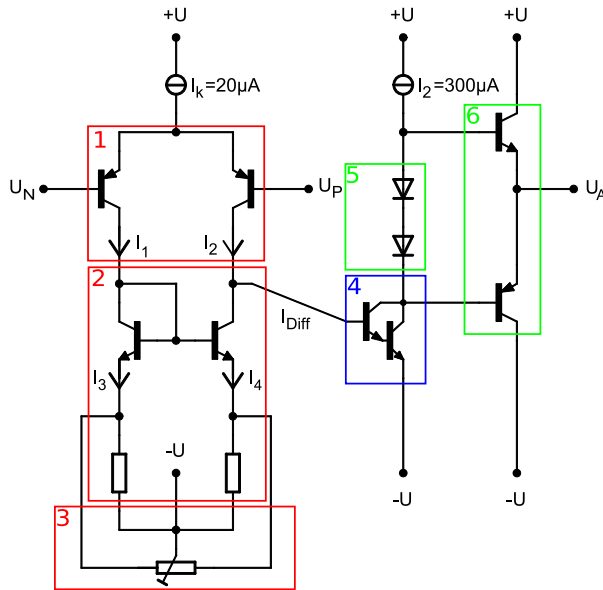
Es soll die Verstärkung für beide Schaltungen jeweils bei 10|50|100|500|1k|5k|10k|50|100k[HZ] gemessen werden.

¹da der Strom durch ihn um β größer ist

²es fließt kein Strom durch R_C

³Kollektor- und Basisstrom addieren sich

2 Grundsaltungen eines Operationsverstärkers



Da in den folgenden Versuchen mit Operationsverstärkern gearbeitet wird, werden wir zunächst die Funktionsweise und den Aufbau eines OPVs genauer betrachten. Ein stark vereinfachtes Prinzipschaltbild ist nebenstehend abgebildet. Der Operationsverstärker setzt sich aus 3 Stufen zusammen: Eingangsstufe (links), Verstärkerstufe (mitte unten) und Endstufe (rechts und mitte oben). Die Eingangsstufe besteht aus Differenzverstärker(1), Stromspiegel(2) und Nullpunkteinstellung(3). In der Eingangsstufe wird eine Spannungsdifferenz der beiden Eingänge U_N und U_P in einen Differenzstrom umgewandelt.

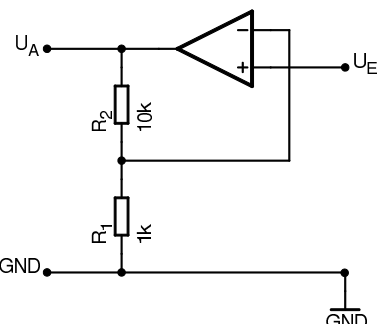
Dieser Differenzstrom wird an die Verstärkerstufe weitergegeben und dort mittels zweier hintereinander geschalteter Transistoren⁴ verstärkt. Diese Verstärkung ist allerdings noch von der Ausgangslast abhängig. Um dies zu beheben ist die Endstufe nötig. Eine komplementäre Emitterfolge dient als Impedanzwandler. Ihr Eingangswiderstand ist sehr hoch und der Ausgangswiderstand gering.

Für einen idealen Operationsverstärker gelten die „3 goldenen Regeln“:

- Bei einem idealen OPV ist die Verstärkung unendlich. Soll der Ausgang nicht übersteuern so müssen die Eingangsspannungen U_P und U_N gleich groß sein.
- Es soll kein Strom in den idealen OPV fließen. Dies gilt nur für einen unendlichen großen Eingangswiderstand.
- Die Ausgangsspannung soll unabhängig von der Ausgangslast sein. Dies gilt nur für einen verschwundenen Ausgangswiderstand.

2.1 Nichtinvertierender Verstärker

In in diesem Versuchsteil soll ein nichtinvertierender Operationsverstärker mit einer Verstärkung von etwa 10 aufgebaut werden. Da ein OPV aufgrund seiner sehr hohen Verstärkung praktisch nicht als Verstärker verwendet werden könnte, wird eine Gegenkopplung eingebaut. Ein Teil des Ausgangssignals wird dabei auf den invertierenden Eingang des OPV gelegt, so dass einer Veränderung des Eingangssignals entgegengesteuert wird.



Da die Verstärkung eines idealen OPVs unendlich ist (1. Goldene Regel), kann die Ausgangsspannung nur vom maximalen Ausschlag unterschiedlich sein, wenn an den beiden Eingängen ein gleich großes Potential anliegt. Die beiden Widerstände R_1 und R_2 fungieren als Spannungsteiler. Über den Spannungsteiler wird bestimmt welche Spannung am invertierenden

⁴Dies nennt man Darlingtontransistor

Eingang anliegt. Es gilt:

$$\frac{U_2}{R_2} = \frac{U_1}{R_1} \quad \text{und} \quad U_A = U_1 + U_2$$

Damit das Potential an beiden Eingängen gleich ist muss $U_1 = U_E$ sein.

$$\Rightarrow \frac{U_A - U_E}{R_2} = \frac{U_E}{R_1} \Leftrightarrow U_A = \underbrace{\left(\frac{R_2}{R_1} + 1 \right)}_{\text{Verstärkungsfaktor}} \cdot U_E$$

Mit dem vorgegebenen Aufbau erreichen wir also eine 11-fache Verstärkung. Die Verstärkung soll am Beispiel einer Dreiecksspannung am Oszilloskop betrachtet werden.

2.2 Eingangswiderstand und Ausgangswiderstand

Es soll die Größenordnung des Eingangs- und des Ausgangswiderstandes des OPVs bestimmt werden. Aufgrund der goldenen Regeln, die für einen idealen OPV gelten, erwarten wir einen großen Eingangswiderstand und einen kleinen Ausgangswiderstand.

Um den Eingangswiderstand zu bestimmen kann man einen Messwiderstand in Reihe vor den OPV schaltet. Misst man nun die über dem Messwiderstand R_M abfallende Spannung U_M so kann man bei bekannter Eingangsspannung den Eingangswiderstand R_E bestimmen.

$$\frac{U_E}{R_E + R_M} = \frac{U_M}{R_M} \Leftrightarrow R_E = \left(\frac{U_E}{U_M} - 1 \right) \cdot R_M$$

Um den Ausgangswiderstand zu bestimmen kann man parallel zum Ausgangswiderstand des OPV ein Potentiometer schalten. Der Strom, der durch den Ausgangswiderstand R_A fließt bleibt gleich, da sich jedoch der Gesamtausgangswiderstand R_G ändert, ändert sich die Ausgangsspannung U_A . Es gilt:

$$\frac{1}{R_A} + \frac{1}{R_M} = \frac{1}{R_G}$$

Ist der Messwiderstand gleich dem Ausgangswiderstand so gilt:

$$U_A^{\text{neu}} = R_G \cdot I = \frac{R_A}{2} \cdot I = 0,5 \cdot U_A^{\text{ohne}}$$

Wenn die Ausgangsspannung also auf die Hälfte der Ausgangsspannung ohne Messwiderstand abgefallen ist, ist der Messwiderstand genauso groß wie der Ausgangswiderstand.

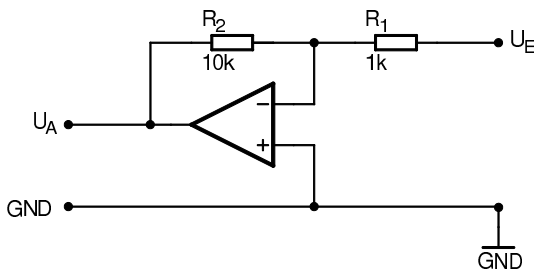
2.3 Frequenzabhängigkeit der Verstärkung

In diesem Versuchsteil soll die Frequenzabhängigkeit der Verstärkung beobachtet werden. Dafür soll ein sinusförmiges Eingangssignal mit einer Amplitude von $0,5V_{SS}$ beobachtet werden. Wir erwarten, dass die Verstärkung wegen der Gegenkopplung in einem Frequenzbereich zunächst nahezu konsant ist. Ab einer Grenzfrequenz sollte die Verstärkung dann stark abfallen.

3 Invertierende Grundschtaltung

3.1 Invertierender Verstärker mit zehnfacher Verstärkung

Es soll ein invertierender Verstärker aufgebaut werden:



Für einen idealen Operationsverstärker gilt, dass seine Verstärkung maximal ist. Ein Gleichgewicht kann in der Schaltung also nur erreicht werden, wenn die Spannung am negativen Eingang gleich der Spannung am positiven Eingang (=Masse) ist.

Ist dies erreicht, so fällt U_E vollständig am Widerstand R_1 ab. Da der Strom vollständig durch den zweiten Widerstand fließt⁵, muss die Spannung die an ihm abfällt $\frac{R_2}{R_1} \cdot U_E$ sein.

Das negative⁶ dieser Spannung liegt dann am Ausgang an:

$$U_A = - \underbrace{\frac{R_2}{R_1}}_v \cdot U_E$$

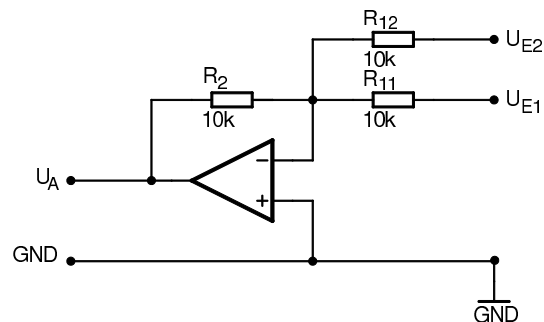
Verstärkungsfaktor $v \approx -10$

3.2 „Addierer“

Nun soll ein Spannungsaddierer gebaut werden. Die Überschrift ist ein Anführungszeichen gesetzt, da der „Addierer“ die Spannungen nicht nur addiert, sondern auch noch invertiert.

Der Addierer funktioniert wie die Schaltung aus 3.1. Am negativen Eingang des Operationsverstärkers soll die virtuelle Masse anliegen. Die Spannungen U_{E1} und U_{E2} müssen also an den Widerständen R_{11} und R_{12} abfallen.

Da alle Widerstände gleich groß sind, fallen diese Faktoren weg. Am Widerstand R_2 fällt damit $U_{E1} + U_{E2}$ ab.



Aus den gleichen Gründen wie oben, ist diese Spannung dann negativ:

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

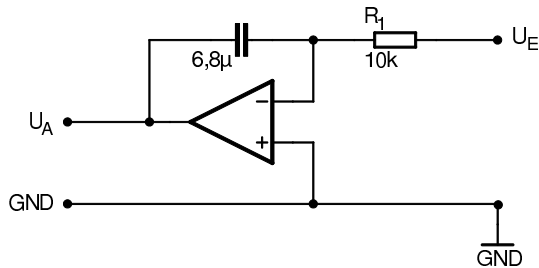
Als Eingangssignale können eine Dreiecks-, Rechteck oder Sinusspannung gewählt werden. Das Ergebnis soll am Oszilloskop betrachtet werden.

⁵Für einen idealen Operationsverstärker ist der Eingangswiderstand unendlich groß.

⁶Es entsteht die negative Spannung, da am negativen Eingang des Operationsverstärkers bereits 0V anliegen und dann am Widerstand R_2 nochmals weiter eine Spannung abfällt.

3.3 Integrierer

Es soll eine Schaltung aufgebaut werden, die ein Eingangssignal „integriert“. Dieses Verhalten soll mit Rechtecks- und Dreieckssignalen (10Hz–50Hz) getestet werden.



Es gilt wieder die bekannte Überlegung. Die Spannung am Minuspol muss null sein. Damit ist der fließende Strom:

$$I = \frac{U_E}{R_1}$$

Da aber für die Ladung des Kondensators

$$Q = \int I dt$$

gilt, findet man für seine Spannung

$$U = \frac{Q}{C} = \frac{1}{R \cdot C} \int U_E dt$$

Da am Ausgang wieder nur die negative Spannung anliegt, folgt daraus, dass die Schaltung integriert und das Ergebnis negiert ausgibt. Da der Konstante Term der Integration nicht festgelegt ist, kann das Ausgangssignal durch eine konstante Spannung verschoben sein.

Im Versuch ist noch ein Widerstand parallel zum Kondensator eingebaut, der zur Stabilisierung des Integrierers dient.

3.4 Differenzierer

Auch ein Differenzierer soll nun aufgebaut und mit Rechtecks- und Dreieckssignalen (100Hz–500Hz) getestet werden.

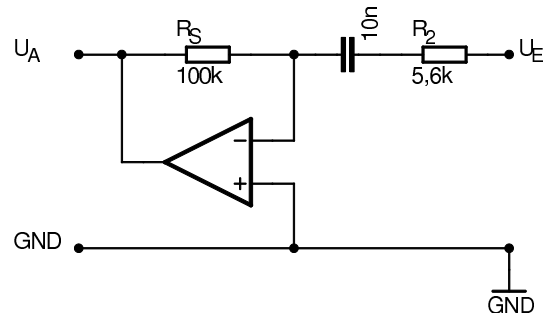
Der Widerstand R_2 dient laut Aufgabenblatt nur zur Vermeidung von Störungen und wird im Folgenden vernachlässigt.

Mit der bekannten Überlegung folgt für den fließende Strom I als Ableitung der Ladung Q des Kondensators:

$$I = \dot{Q} = \frac{d}{dt} (C \cdot U_E) = C \cdot \dot{U}_E$$

Für die Ausgangsspannung ergibt sich damit:

$$U_A = -R_S \cdot C \cdot \dot{U}_E$$

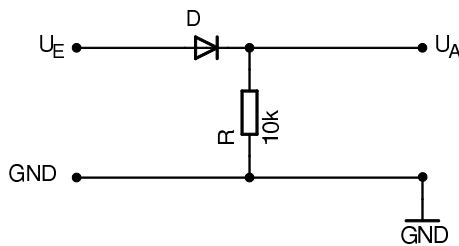


4 Komplexere Schaltungen

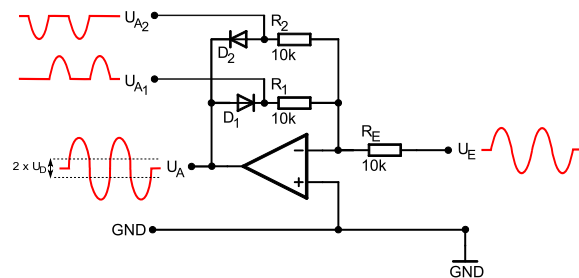
Im Folgenden werden etwas komplexere Schaltungen aufgebaut. Laut der Vorbereitungshilfe sind zu diesen Schaltungen keine ausführlichen Herleitungen erforderlich, sodass wir uns hier etwas kürzer fassen werden. Am häufigsten wird hier das Integrierglied Verwendung finden.

4.1 Einweggleichrichter

Nun sollen zwei Einweggleichrichter gebaut und mit verschiedenen Spannungssignalen ($< 1\text{kHz}$) untersucht werden.



Dies ist ein ganz simpler Gleichrichter, der nur aus einer Diode besteht. Sein großer Nachteil ist, dass es an der Diode sogar in Durchlassrichtung eine kleine Spannung abfällt, sodass dieser Spannungsteil an der gleichgerichteten Kurve unten abgeschnitten ist.

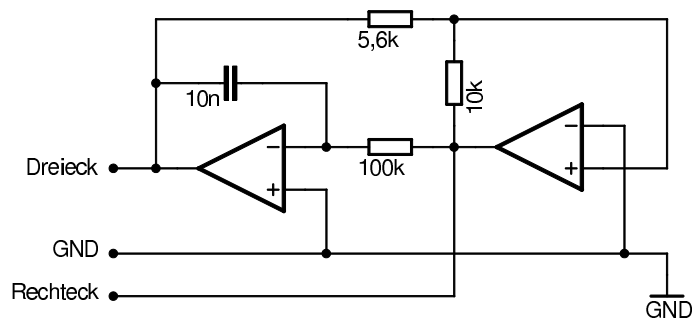


Dieser Gleichrichter ist intelligenter. Am Eingangswiderstand R_E muss wieder die gesamte Spannung abfallen. Nun ist die Schaltung so gebaut, dass immer nur eine der beiden Dioden leitet. Da die Widerstände alle gleichdimensioniert sind, fällt damit an $R_{1/2}$ nochmals die Eingangsspannung ab. Man erhält damit an den Ausgängen einmal den negativen und einmal den positiven Stromanteil⁷.

4.2 Generator für Dreiecks- und Rechtecksignale

Im rechten Schaubild dient der rechte Operationsverstärker als Schmitt-Trigger, der linke als Integrator.

Durch die Rückkopplung über den $5,6\text{k}\Omega$ -Widerstand ist die Differenzspannung des rechten Operationsverstärker nie null, so dass hier immer eine maximale Verstärkung (hier $\pm 15\text{V}$) auftritt.



Ebenfalls durch die Rückkopplung springt die Spannung immer rechteckmäßig von $+15\text{V}$ zu -15V und umgekehrt. Der Operationsverstärker verstärkt hier also nicht mehr ideal⁸, sondern kann durch die Netzspannung begrenzt maximal $\pm 15\text{V}$ ausgeben. Diese Rechtecksspannung wird dann integriert und liefert die Dreiecksspannung.

⁷ natürlich wieder invertiert

⁸ Nach den goldenen Regeln müsste seine Verstärkung unendlich sein.

4.3 Programmierte Differentialgleichung 2. Ordnung

Im diesem letzten Versuchsteil soll eine Differentialgleichung 2. Ordnung simuliert werden. Es soll die bekannte Schwingungsgleichung dargestellt werden:

$$\ddot{x} + 2\gamma\dot{x} + \omega_0^2 x = 0$$

Im rechten Schaltbild erkennt man die beiden integrierenden Schaltungen und eine invertierend verstärkende Schaltung.

Über die Wert für die Widerstände und Kondensatoren sind die Konstanten der Differentialgleichung festgelegt. Vorteil dieser Schaltung ist, dass sie im mittleren Abgriff (also bei der Dämpfung) einen Potentiometer eingebaut hat, sodass man leicht die drei qualitativ verschiedenen Fälle der DGL betrachten kann.

