

Prak.: P2 Semester: SS20 Wochentag: B Gruppennr.: 12

Name: Hohenstein Vorname: Michael

Name: Michel Vorname: Alexis

Emailadresse(n): alexis.michel@gmx.de, michael.hohenstein@gmx.de

Versuch: Operationsverstärker (P2-59, 60, 61) Fehlerrech.: Nein

Betreuer: Paul Masuch Durchgeführt am: 12.8.2020

Wird vom Betreuer ausgefüllt.

1. Abgabe am: _____

Rückgabe am: _____ Begründung:

2. Abgabe am: _____

Ergebnis: + / 0 / - Fehlerrechnung: Ja / Nein

Datum: _____ Handzeichen: _____

Bemerkungen:

Inhaltsverzeichnis

1	Transistorschaltungen	1
1.1	gleichstromgegekoppelter Transistorverstärker	1
1.2	Anregung mit einer Dreiecksspannung	2
1.3	stromgegekoppelter Transistorverstärker	3
1.4	Vergleich der Verstärkungen	4
2	Grundschialtung eines Operationsverstärkers	5
2.1	nichtinvertierender Verstärker	5
2.2	Innenwiderstände des Operationsverstärkers	6
2.3	Verstärkung in Abhängigkeit der Frequenz	7
3	Invertierte Grundschialtung eines Operationsverstärkers	9
3.1	Der invertierende Verstärker	9
3.2	Addierer	10
3.3	Integrierer	12
3.4	Differenzierer	13
3.5	Ausblick	15
4	Komplexere Schaltungen mit Operationsverstärkern	16
4.1	Idealer Einweggleichrichter	16
4.2	Generator für Dreieck- und Rechtecksignale	18
4.3	Programmierbare Differentialgleichung zweiter Ordnung	19

Abbildungsverzeichnis

1.1	Schaltbild: einstufiger gleichstromgegekoppelter Transistorverstärker . .	1
1.2	Messung am Oszilloskop: 1.2 mit kleiner Amplitude	2
1.3	Messung am Oszilloskop: 1.2 mit großer Amplitude	2
1.4	Messung am Oszilloskop: 1.3 mit kleiner Amplitude	3
1.5	Messung am Oszilloskop: 1.3 mit großer Amplitude	3
1.6	Verstärkung der Transistorschaltungen in Abhängigkeit der Frequenz	4
2.1	Schaltbild: nichtinvertierender Verstärker mit Operationsverstärker mit Faktor x10	5
2.2	Messung am Oszilloskop: 2.1 Testen des Operationsverstärkers	5
2.3	Schaltbild: bestimmen des Ausgangswiderstandes am Operationsverstärker	6

2.4	Schaltbild: bestimmen des Eingangswiderstandes am Operationsverstärker .	7
2.5	Verstärkung des Operationsverstärkers in Abhängigkeit der Frequenz	8
2.6	Messung am Oszilloskop: 2.3 Operationsverstärker hat Probleme mit sehr hohen Frequenzen	8
3.1	Schaltbild: invertierender Verstärker	10
3.2	Schaltbild: Addierer	10
3.3	1 KHz Rechteck + 2 KHz Dreieck	11
3.4	1 KHz Rechteck + 2 KHz Rechteck	11
3.5	1 KHz Rechteck + 1,001 KHz Sinus, Ausschnitt aus einer Schwebung	12
3.6	Schaltbild: Integrierer	12
3.7	Integration eines Rechtecksignals	13
3.8	Integration eines Dreiecksignals	13
3.9	Schaltbild: Differenzierer	14
3.10	Differentiation eines Dreiecksignals	14
3.11	Differentiation eines Rechtecksignals	15
4.1	Schaltbild: einfacher Einweggleichrichter	16
4.2	Schaltbild: idealer Einweggleichrichter	17
4.3	Gleichrichter-Test	17
4.4	Gleichrichter: positive Halbwelle	17
4.5	Gleichrichter: negative Halbwelle	18
4.6	Schaltbild: Generator für Dreieck- und Rechtecksignale	18
4.7	Oszilloskop-Aufnahme des Generators	19
4.8	Schaltbild: Programmierbare Differentialgleichung zweiter Ordnung	19
4.9	Oszilloskop-Aufnahme der DGL (1)	20
4.10	Oszilloskop-Aufnahme der DGL (2)	20
4.11	Messung am Oszilloskop: 3.1 Operationsverstärker als invertierender Verstärker	21

Tabellenverzeichnis

3.1	gemessene Eingangs- und Ausgangsspannungen des invertierenden Verstärkers	10
-----	---	----

1. Transistorschaltungen

1.1 gleichstromgegengkoppelter Transistorverstärker

Bei diesem Versuch wurde der einstufige gleichstromgegengkoppelte Transistorverstärker aufgebaut. Ein Schaltbild des Aufbaus ist in Abbildung 1.1 zu sehen.

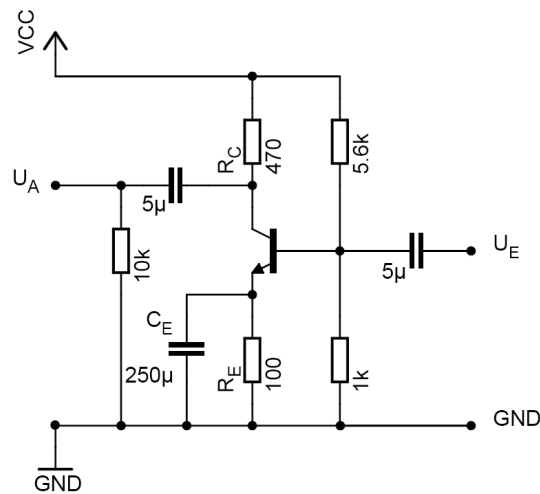


Abbildung 1.1: Schaltbild: einstufiger gleichstromgegengkoppelter Transistorverstärker

Die Schaltung wurde leicht modifiziert aufgebaut, statt der zwei $5\mu\text{F}$ Kondensatoren wurden zwei $4,7\mu\text{F}$ Kondensatoren verbaut.

Eine reine Emitterschaltung besteht nur aus einem PNP-Transistor und dem Widerstand R_C am Kollektor. Bei dieser ist jedoch der resultierende Ausgangsstrom abhängig von den genauen Beschaffenheiten des Transistors. Da Transistoren gewisse Fertigungstoleranzen und Temperaturabhängigkeiten haben braucht es zusätzliche Teile um die Schaltung verlässlich zu machen.

Durch den Widerstand R_E wird der Strom am Emitter limitiert. Als Konsequenz davon wird die Verstärkung schwächer, da am Emitter eine höhere Spannung anliegt. So fallen auch viele Verstärkungstoleranzen, die aus den Toleranzen des Transistors entstehen, weg. Um bei hochfrequenten Signalen trotzdem eine bessere Verstärkung zu erhalten wird der Kondensator C_E eingebaut. Da die Impedanz eines Kondensators proportional zu $1/f$ ist, ist der Widerstand der Spule für hohe Frequenzen 0, die Spannungsdifferenz zwischen Basis und Emitter und damit die Verstärkung steigt an.

Die Basis des Transistors schaltet erst beim Erreichen der Schwellspannung, da der Transistor ein Halbleiterbauteil ist, bei dem wie bei einer Diode die Spannung groß genug sein muss, dass ein Strom durch das positiv und negativ dotierte Material fließen zu lassen. Mit dem Spannungsteiler mit $5,6\text{k}\Omega$ und $1\text{k}\Omega$ wird der Arbeitspunkt des Transistors an der

Basis angehoben. Das ermöglicht auch das Verstärken von Wechselspannungen. Die Kondensatoren an Eingang und Ausgang dienen als Hochpass und filtern auch niederfrequente Signale.

1.2 Anregung mit einer Dreiecksspannung

Bei diesem Versuch wird die im vorherigen Versuch aufgebaute Schaltung mit einer Dreiecksspannung am Eingang angeregt. Dabei wurde eine Frequenz von 1 kHz verwendet. Zunächst wurde die Amplitude der Eingangsspannung so eingestellt, dass die Spitzenspannung am Ausgang V_{SS} rund 3 V beträgt. Das Bild am Oszilloskop ist in Abbildung 1.2 zu sehen. Die gelbe Linie ist hierbei die Anregungsspannung, die blaue zeigt den Spannungsverlauf am Ausgang des Verstärkers.

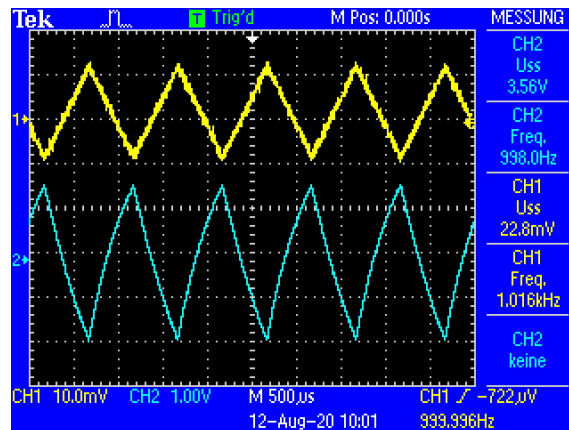


Abbildung 1.2: Messung am Oszilloskop: 1.2 mit kleiner Amplitude

Gemessen wurde eine Eingangsspannung von 22,8 mV und eine Ausgangsspannung von 3,48 V. Das entspricht einer Verstärkung von rund 152,6.

Anschließend wurde die Spannungsamplitude erhöht, um $V_{SS} \approx 10$ V zu erreichen. Das entstehende Bild am Oszi ist in Abbildung 1.3 zu sehen.

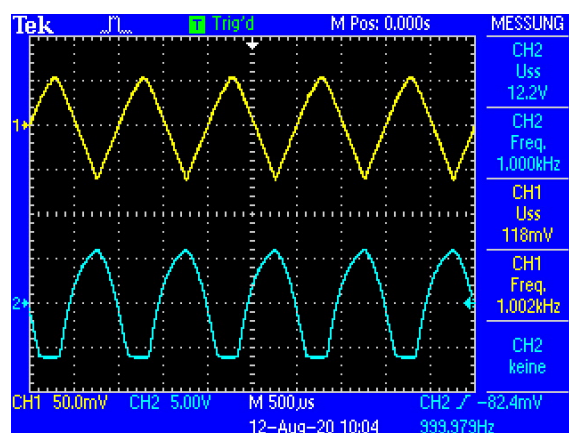


Abbildung 1.3: Messung am Oszilloskop: 1.2 mit großer Amplitude

Die Eingangsspannung wurde zu 118 mV eingestellt. Die Ausgangsspannung betrug 12,2 V. Das entspricht einer Verstärkung von rund 103,4, was deutlich unter der Verstärkung bei kleinerer Amplitude ist.

Ein möglicher Grund hierfür ist, dass die Spannungsamplitude nach unten den Arbeitsbereich des Verstärkers etwas verlässt, da die unteren Spitzen der blauen Dreieckskurve abgeschnitten sind. Allerdings ist die fehlende Spitze nur relativ klein, sodass zu erwarten wäre, dass die Verstärkung trotzdem bei größeren Amplituden kleiner ausfällt.

Als Mittelwert der Verstärkung ergibt sich dann ein Wert von 128,0.

Die Qualität des Verstärkers ist als eher schlecht zu bewerten, da die Verstärkung bei unterschiedlichen Amplituden nicht konstant ist. Zudem lässt sich bei beiden Amplituden eine deutliche Krümmung bei den Intervallen der Ausgangsspannung beobachten, die eigentlich linear sein sollten.

1.3 stromgegekoppelter Transistoverstärker

Nun soll der stromgekoppelte Transistorverstärker aufgebaut und betrachtet werden. Dafür wird der Kondensator C_e ausgesteckt.

In Bild 1.4 ist wieder das Verhalten des Verstärkers bei kleinen Amplituden zu sehen. Bei der Eingangsspannung handelt es sich wieder um 1 kHz Dreiecksspannung.

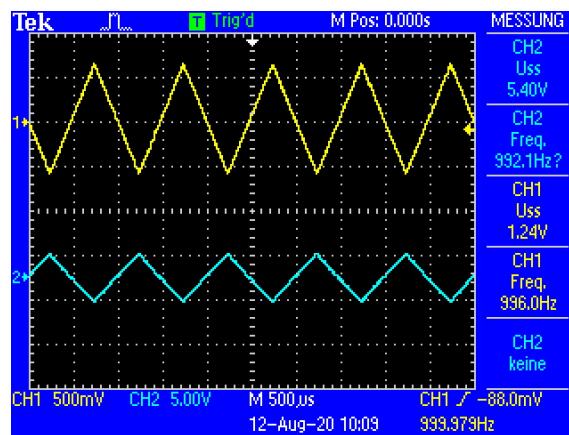


Abbildung 1.4: Messung am Oszilloskop: 1.3 mit kleiner Amplitude

Daraus bestimmen wir eine Eingangsspannung von 1,24 V und eine Ausgangsspannung von 5,40 V. Das entspricht einer Verstärkung von 4,35.

Auch hier wurde wieder eine zusätzliche Messung bei höherer Amplitude gemacht. Diese ist in Abbildung 1.5 zu sehen.

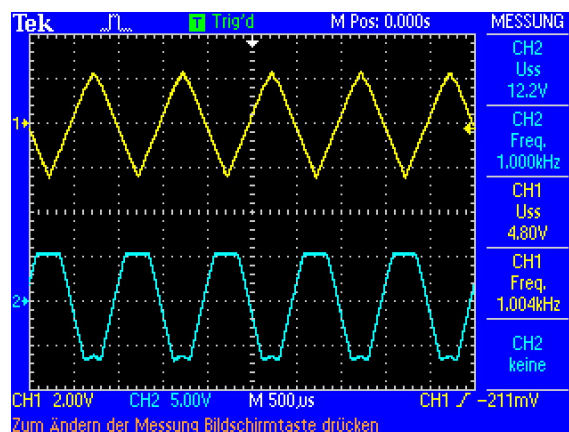


Abbildung 1.5: Messung am Oszilloskop: 1.3 mit großer Amplitude

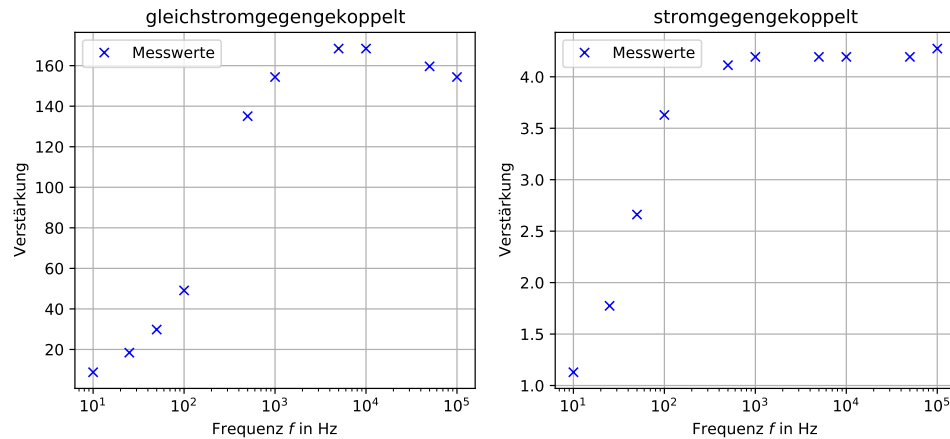


Abbildung 1.6: Verstärkung der Transistorschaltungen in Abhängigkeit der Frequenz

Die Eingangsspannung ist 4,80 V und die Ausgangsspannung ist 12,2 V. Das entspricht einer Verstärkung von 2,54. Allerdings lässt sich auch hier erkennen, dass der Arbeitsbereich überschritten wurde, da die Spitzen der Dreiecke abgeschnitten sind. Deshalb ist hier die Verstärkung etwas kleiner ausgefallen.

Als Mittelwert ergibt sich eine Verstärkung von 3,445. Der wahre Wert wird aber größer sein, da wie beschrieben der zweite Wert zu klein ausgefallen ist.

Am Emitter gilt in Näherung

$$R_E \cdot I_E = U_E. \quad (1.1)$$

Im stromgekoppelten Fall ist der Strom durch R_C und R_E annähernd identisch. Es folgt für den Spannungsabfall an R_C

$$R_C \cdot I_C = R_C \cdot I_E = U_E \frac{R_C}{R_E}. \quad (1.2)$$

Es ergibt sich eine theoretische Verstärkung von $R_C/R_E \approx 4,7$. Der gemessene Wert ist also etwas kleiner als die theoretische Vorhersage.

1.4 Vergleich der Verstärkungen

Bei dieser Aufgabe soll die Abhängigkeit der Verstärkung beider Verstärker untersucht werden. Dafür wird eine feste Amplitude der Eingangsspannung eingestellt, bei der Frequenzen von 10 Hz bis 100 kHz gemessen werden. Die Messwerte sind im Messprotokoll zu finden. Die dargestellten Messwerte sind in Abbildung 1.6 zu sehen. Dabei wird bei der Frequenz eine logarithmische Skala verwendet, um auch die Messwerte kleinerer Größenordnung besser vergleichen zu können.

Es lässt sich klar erkennen, dass im stromgegengeschalteten Fall die Verstärkung für große Frequenzen konstant ist, was zu erwarten war. Für kleinere Frequenzen ist die Verstärkung in beiden Fällen niedrig, was an den Hochpässen an Eingang und Ausgang liegt, die in beiden Fällen niederfrequente Signale filtern.

Im Fall der gleichstromgegengeschalteten Schaltung ist die Verstärkung klar frequenzabhängig, es sieht so aus, als ob es eine optimale Frequenz gibt, bei der am stärksten verstärkt wird. Das könnte eine Resonanz sein, die von C_E verursacht wird.

Es lässt sich auch klar erkennen, dass mit der gleichstromgegengeschalteten Schaltung deutlich größere Verstärkungen erreicht werden. Auch das war zu erwarten, da der Kondensator C_E für hohe Frequenzen den Widerstand R_C umgeht, welcher die Verstärkung limitiert.

2. Grundschtaltung eines Operationsverstärkers

2.1 nichtinvertierender Verstärker

Bei diesem Versuch solle ein nichtinvertierender Verstärker mit einem Operationsverstärker mit Faktor 10 aufgebaut werden.

Die Schaltung ist in Abbildung 2.1 abgebildet.

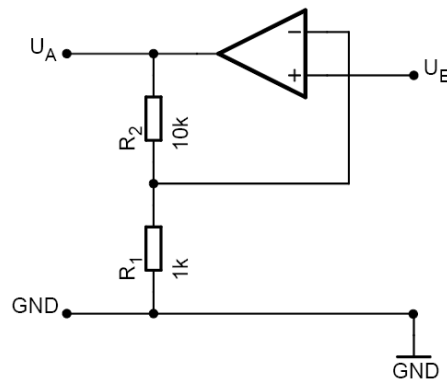


Abbildung 2.1: Schaltbild: nichtinvertierender Verstärker mit Operationsverstärker mit Faktor x10

Dieser Verstärker wurde zunächst auch mit einer Dreiecksspannung mit einer Frequenz von 1 kHz angeregt. Das dabei entstehende Bild am Oszilloskop ist in Abbildung 2.2 zu sehen.

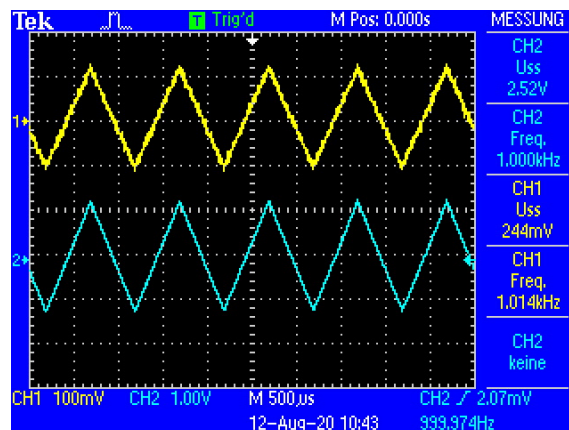


Abbildung 2.2: Messung am Oszilloskop: 2.1 Testen des Operationsverstärkers

Die Ein- und Ausgangsspannung wurde zu drei unterschiedlichen Amplituden gemessen, die Messwerte sind im Messprotokoll zu finden. Mit aufsteigender Amplitude ergibt sich eine Verstärkung von 10,5, 10,5 und 10,76. Der Mittelwerte ergibt sich zu rund 10,59. Zur theoretischen Herleitung muss man den Spannungsteilern im Schaltbild (Abbildung 2.1) beachten. Nach der ersten goldenen Regel muss in der Mitte des Spannungsteilers die Eingangsspannung U_E anliegen, da die Eingänge des Operationsverstärkers dieselbe Spannung haben müssen. Es gilt

$$U_E = R_1 I = U_A \frac{R_1}{R_1 + R_2}. \quad (2.1)$$

Damit lässt sich die theoretische Verstärkung berechnen zu

$$\text{Verstärkung} = \frac{U_A}{U_E} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} = 1 + \frac{R_2}{R_1} = 11. \quad (2.2)$$

Der gemessene Wert für die Verstärkung ist relativ nah an der theoretischen Vorhersage.

2.2 Innenwiderstände des Operationsverstärkers

Nach den goldenen Regeln für ideale Operationsverstärker ist der Eingangswiderstand unendlich groß und der Ausgangswiderstand 0. Das soll bei dieser Aufgabe überprüft werden.

Mit der Schaltung in Abbildung 2.3 wird der Ausgangswiderstand bestimmt.

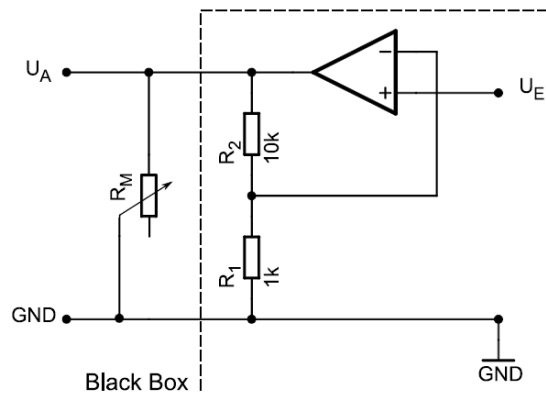


Abbildung 2.3: Schaltbild: bestimmen des Ausgangswiderstandes am Operationsverstärker

An den Operationsverstärker wird ein Potentiometer angeschlossen, bei welchem der Widerstand solange verkleinert wird, bis die Ausgangsspannung nur noch die halbe Amplitude hat. In diesem Fall hat das Potentiometer denselben Widerstand wie der Innenwiderstand der Schaltung des Operationsverstärkers. Der Ausgangswiderstand ist folglich

$$R_A = 131,6 \Omega, \quad (2.3)$$

was ein relativ kleiner Wert ist, wie zu erwarten war.

Die Messung des Eingangswiderstandes erfolgt über die Schaltung in Abbildung 2.4.

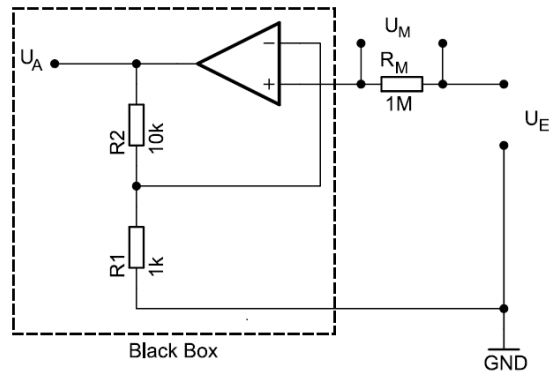


Abbildung 2.4: Schaltbild: bestimmen des Eingangswiderstandes am Operationsverstärker

Bei der Messung wird der Messwiderstand R_M verwendet. An diesem wird die Spannung gemessen. Der Strom durch den Eingang und den Messwiderstand ist identisch, die Schaltung kann wie ein Spannungsteiler betrachtet werden. Es folgt

$$\frac{U_E}{U_{RM}} = \frac{R_E + R_M}{R_M}. \quad (2.4)$$

Der Messwiderstand $R_M = 1 \text{ M}\Omega$ wurde verwendet. Die Spannung U_{RM} wurde mit dem Multimeter gemessen und betrug $U_{RM} = 96,2 \text{ mV}$. Am Oszilloskop konnte $U_E = 1,32 \text{ V}$ abgelesen werden. Umgestellt nach U_E und eingesetzt ergibt sich

$$R_E = R_M \cdot \left(\frac{U_E}{U_{RM}} - 1 \right) = 12,66 \text{ M}\Omega, \quad (2.5)$$

was ein sehr großer Wert ist, wie erwartet.

2.3 Verstärkung in Abhängigkeit der Frequenz

Es soll nun überprüft werden, wie frequenzabhängig die Verstärkung beim Operationsverstärker ist. Dafür wird genau wie in Aufgabe 1.4 die bei einer festen Eingangsspannung die Ausgangsspannung für ein großes Spektrum an Frequenzen gemessen. Im Gegensatz zu Aufgabe 1.4 wurde hier mit einer Sinusspannung und nicht mit einer Dreiecksspannung gemessen. Die Messwerte sind im Messprotokoll zu finden. Ein logarithmischer Plot der Messwerte ist in Abbildung 2.5 zu sehen.

Auffällig ist, dass der Operationsverstärker auch bei kleinen Frequenzen keinerlei Probleme hat, diese zu verstärken. Durch ein sehr breites Spektrum an Frequenzen liefert der Operationsverstärker eine sehr konstante Verstärkung. Lediglich bei sehr hohen Frequenzen bekommt der Operationsverstärker Probleme. Das kann man auch erkennen, wenn man sich das Bild des Oszilloskops bei 100 kHz anschaut, welches in Abbildung 2.6 zu sehen.

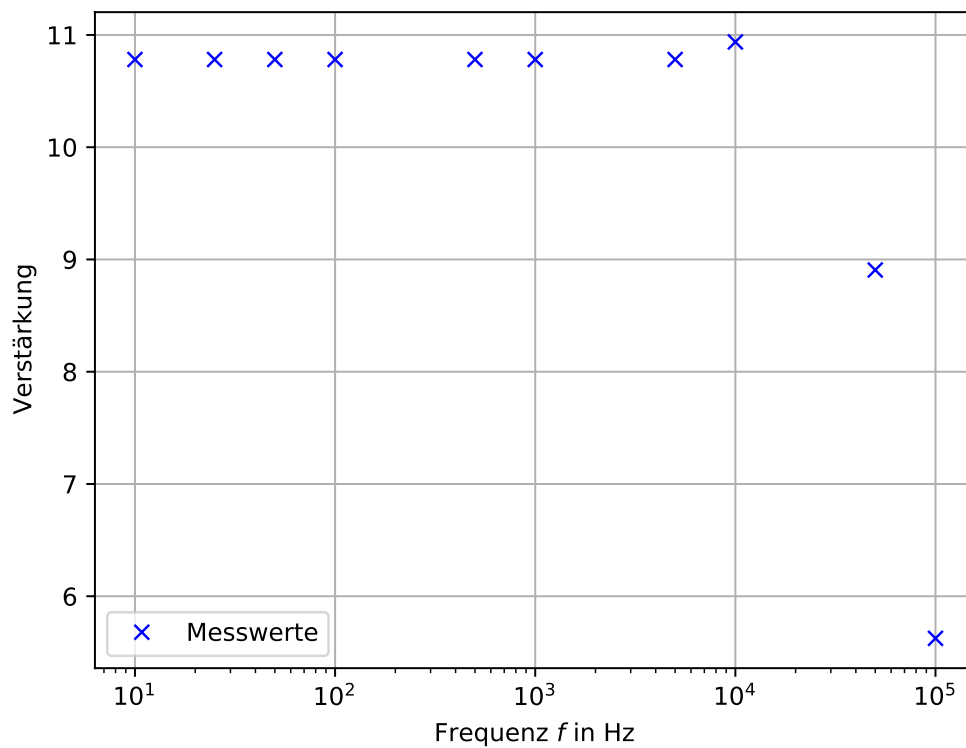


Abbildung 2.5: Verstärkung des Operationsverstärkers in Abhängigkeit der Frequenz

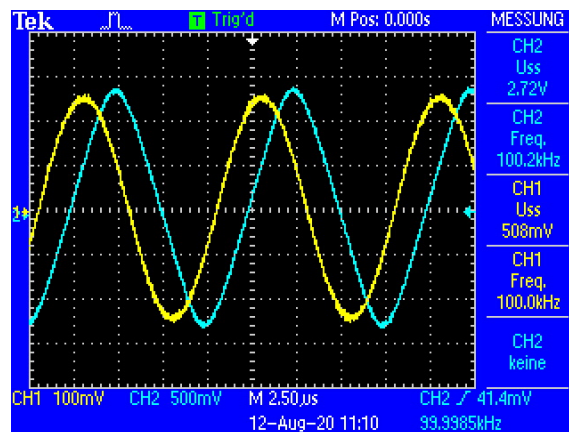


Abbildung 2.6: Messung am Oszilloskop: 2.3 Operationsverstärker hat Probleme mit sehr hohen Frequenzen

In Abbildung 2.6 ist klar zu erkennen, dass die blaue Kurve der verstärkten Spannung nicht ganz sinusförmig verläuft, sondern etwas zu spitz verläuft. Zudem ist Ausgangsspannung zur Eingangsspannung in der Phase versetzt.

Alle diese Indizien sprechen dafür, dass der Operationsverstärker bei hohen Frequenzen mit dem Regeln der Ausgangsspannung nicht mehr vollständig hinterherkommt.

3. Invertierte Grundsaltung eines Operationsverstärkers

3.1 Der invertierende Verstärker

Die in diesem Versuchsteil nachgebaute elektrische Schaltung wird als „invertierender Verstärker“ bezeichnet, da der Operationsverstärker über den invertierten Eingang betrieben wird, während er nichtinvertierende Eingang der Operationsverstärkers mit der Masse verbunden wird. Eine Schaltskizze ist in Abbildung 3.1 zu sehen. In dieser Schaltung wird mit dem Prinzip der Parallel-Spannungs-Gegenkopplung gearbeitet, da über den Widerstand R_2 ein Teil der Ausgangsspannung auf den negativen Eingang des Operationsverstärkers zurückgeführt wird.

Die Verstärkung lässt sich aus der dritte goldenen Regel für Operationsverstärker herleiten: $U_N = U_P = \text{GND}$. Der invertierende Eingang der Operationsverstärkers wird als „virtuelle Masse“ bezeichnet, da er das Potential der Erdung anstrebt. Weiterhin besagt die zweite goldene Regel, nach welcher der Eingangswiderstand unendlich groß ist, dass der Strom I_E aus dem Eingangssignal U_E über den Widerstand R_2 abfließen muss. Die Ausgangsspannung lässt sich somit durch den Zusammenhang

$$U_A = R_2 \cdot I_A = -R_2 \cdot I_E \quad (3.1)$$

ausdrücken, wobei das negative Vorzeichen aus der entgegengesetzten Messung der Ströme I_E und I_A folgt. Aus dem Ohmschen Gesetz folgt

$$I_E = \frac{U_E}{R_1} \quad (3.2)$$

womit sich schließlich die Ausgangsspannung in Abhängigkeit von der Eingangsspannung bestimmen lässt:

$$U_A = -R_2 \cdot I_E = -R_2 \cdot \frac{U_E}{R_1} = -\frac{R_2}{R_1} \cdot U_E. \quad (3.3)$$

Daraus lässt sich der Verstärkungsfaktor

$$v = -\frac{R_2}{R_1} \quad (3.4)$$

ablesen. Die Verstärkung ist also von dem Verhältnis der beiden Widerstände abhängig. Da in der Aufgabestellung ein invertierender Verstärker mit einer Verstärkung von $|v| = 10$ gefordert wurde, wurden die Widerstände $R_1 = 1 \text{ K}\Omega$ und $R_2 = 10 \text{ K}\Omega$ verwendet (siehe Abbildung 3.1). Daraus resultiert eine theoretische Verstärkung von

$$v = -\frac{R_2}{R_1} = \frac{10 \text{ K}\Omega}{1 \text{ K}\Omega} = -10, \quad (3.5)$$

welche mit einem Oszilloskop experimentell bestimmt werden kann.

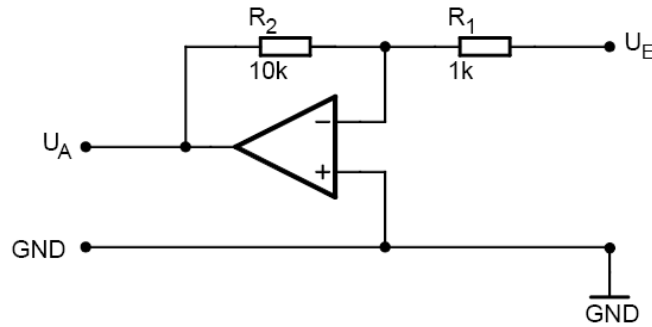


Abbildung 3.1: Schaltbild: invertierender Verstärker

Tabelle 3.1: gemessene Eingangs- und Ausgangsspannungen des invertierenden Verstärkers

U_E in V	U_A in V	$ v = \frac{U_A}{U_E}$
0,54	5,04	9,33
1,20	11,8	9,83
2,04	20,0	9,80

Für den Nachweis wurde dreimal die Eingangs- und Ausgangsspannung des Oszilloskops gemessen, wovon die Messwerte Tabelle 3.1 zu entnehmen sind. Dabei wurde auch die Verstärkungen berechnet und in die Tabelle aufgenommen. Der gemittelte Wert für den Betrag der Verstärkung beträgt 9,65. Mögliche Abweichungen vom berechneten Wert werden in Abschnitt 3.5 erläutert.

3.2 Addierer

Der Addierer ist eine elektronische Schaltung, die es ermöglicht, zwei unterschiedliche Spannungen zu addieren, die sich auf demselben Potential befinden. Die dazugehörige Schaltskizze ist in Abbildung 3.2 zu sehen. Dabei ist zu erkennen, dass der Aufbau ähnlich dem des invertierenden Verstärkers aussieht, bis auf den Unterschied, dass parallel zum Widerstand R_1 ein identisch großer Widerstand eingesetzt wurde, welcher mit dem zweiten Eingangssignal verbunden ist.

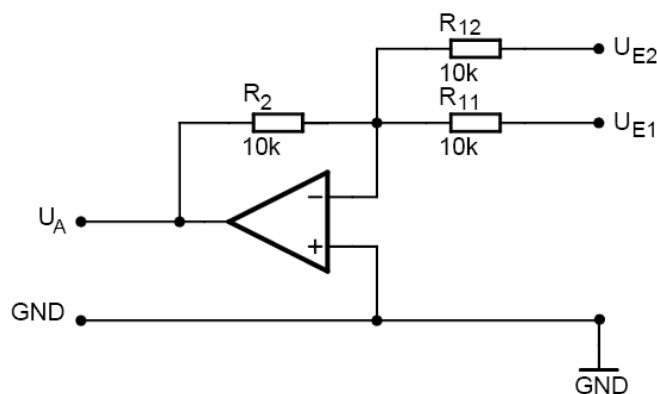


Abbildung 3.2: Schaltbild: Addierer

Erneut gilt:

$$U_A = R_2 \cdot I_A = -R_2 \cdot \left(\frac{U_{E1}}{R_{11}} + \frac{U_{E2}}{R_{12}} \right). \quad (3.6)$$

Diese Gleichung zeigt, dass man mit unterschiedlichen Widerständen R_{11} und R_{12} eine unterschiedliche Gewichtung der Eingangsspannungen U_{E1} und U_{E2} erzielen kann. Da aber die beiden in diesem Versuch dafür verwendeten Widerstände identisch waren, war die Ausgangsspannung proportional zur negativen Summe beider Eingangsspannungen. In Abbildung 3.3, 3.4 und 3.5 zeigen Oszilloskop-Aufnahmen von Additionen zweier Eingangssignale, wobei nur eines der Eingangssignale in gelb auf dem Oszilloskop dargestellt werden konnte. Das Ausgangssignal wurde in blau dargestellt.

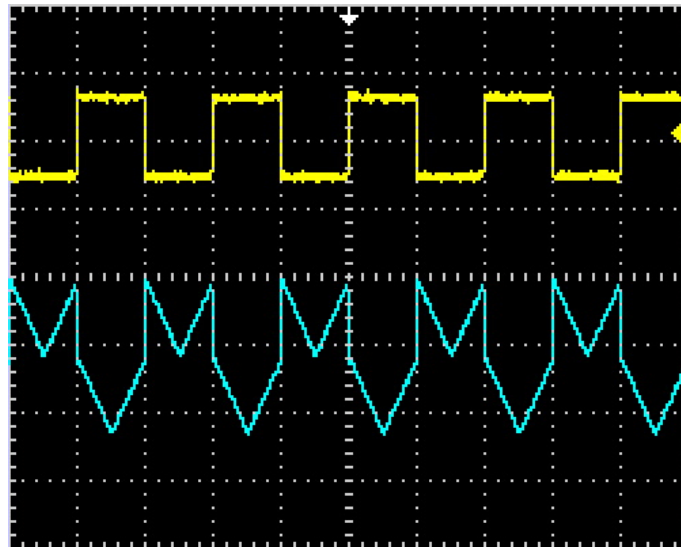


Abbildung 3.3: 1 KHz Rechteck + 2 KHz Dreieck

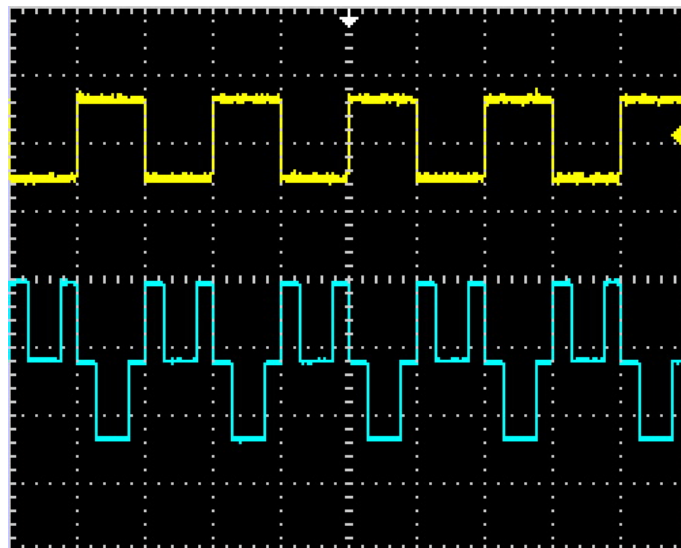


Abbildung 3.4: 1 KHz Rechteck + 2 KHz Rechteck

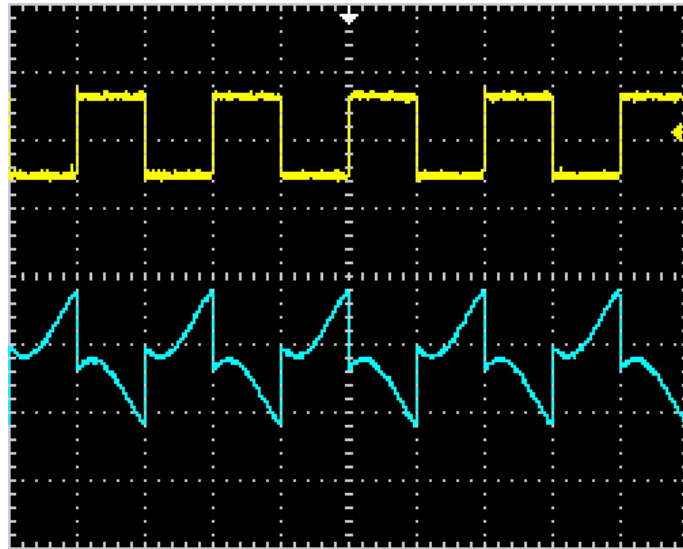


Abbildung 3.5: 1 KHz Rechteck + 1,001 KHz Sinus, Ausschnitt aus einer Schwebung

3.3 Integrierer

Beim Integrierer handelt es sich wieder um eine abwandlung der Schaltung des invertierenden Verstärkers. Der Aufbau ist in Abbildung 3.6 zu sehen.

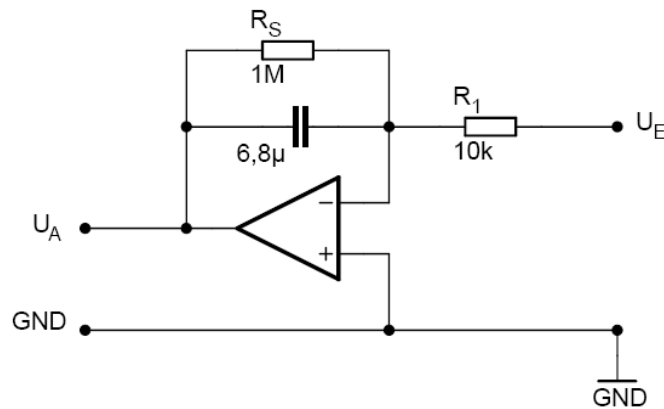


Abbildung 3.6: Schaltbild: Integrierer

Die Rückkopplung findet in diesem Fall nicht mehr über einen Widerstand, sondern über einen Kondensator statt, dessen Kapazität die Beziehung

$$U = \frac{Q}{C} = U_A \quad (3.7)$$

erfüllt. Somit ergibt sich für die Ausgangsspannung:

$$U_A = \frac{Q}{C} = \frac{1}{C} \cdot \int dt I = \frac{1}{R_1 \cdot C} \cdot \int dt U_E. \quad (3.8)$$

Die Eingangsspannung verhält sich wie das Integral der Eingangsspannung. Nach dem Aufbau der Schaltung wurde diese an einem Rechteck- und einem Dreiecksignal getestet. Die Dazugehörigen Oszilloskop-Aufnahmen sind in Abbildung 3.7 und 3.8 zu sehen. Die Aufnahmen bestätigen das zu erwartende Verhalten der Schaltung.

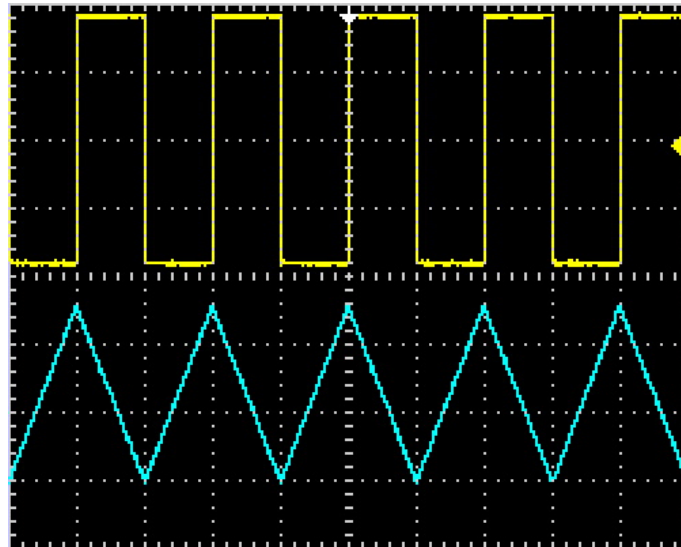


Abbildung 3.7: Integration eines Rechtecksignals

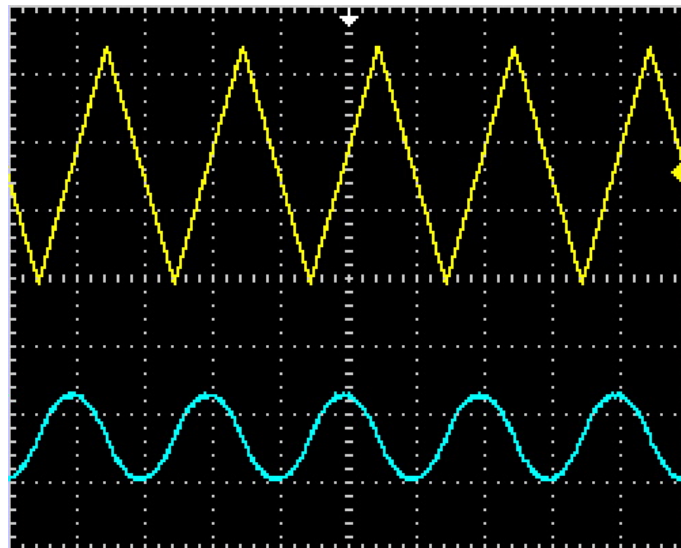


Abbildung 3.8: Integration eines Dreiecksignals

3.4 Differenzierer

Auch hier handelt es sich um eine Abwandlung des invertierenden Verstärkers, welcher in Abbildung 3.9 zu sehen ist. Die Eingangsspannung ist diesmal aber durch

$$U_E = \frac{Q_E}{C} \quad (3.9)$$

gegeben. Somit folgt der Eingangsstrom I_A dem Zusammenhang

$$I_A = \frac{dQ}{dt} = C \cdot \frac{dU_E}{dt}. \quad (3.10)$$

Der Ausgangsstrom berechnet sich daraus folgendermaßen:

$$U_A = R_S \cdot I = -R_S \cdot C \cdot \frac{dU_E}{dt}. \quad (3.11)$$

Auch hier wurde die Schaltung an zwei Signalen verifiziert. Die dazugehörigen Aufnahmen mit dem Oszilloskop sind in Abbildung 3.10 und 3.11 zu sehen, wobei die Eingangsspannungen gelb und die Ausgangsspannungen blau dargestellt werden.

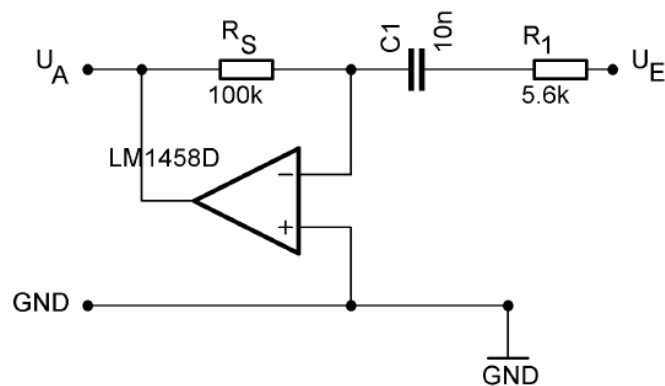


Abbildung 3.9: Schaltbild: Differenzierer

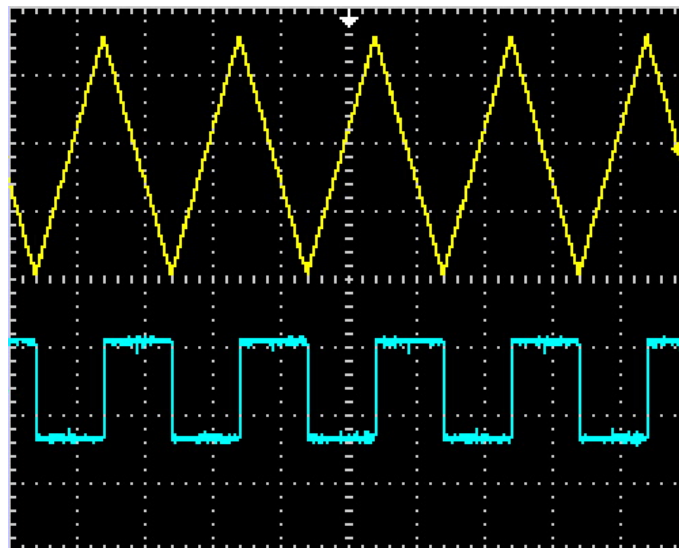


Abbildung 3.10: Differentiation eines Dreiecksignals

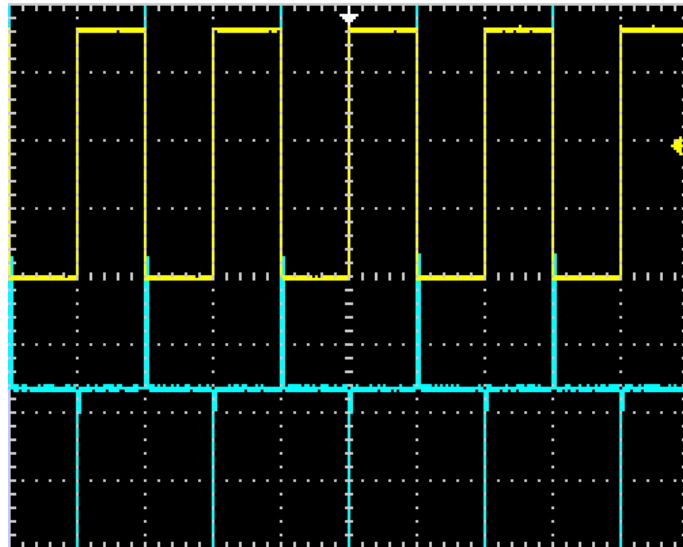


Abbildung 3.11: Differentiation eines Rechtecksignals

3.5 Ausblick

Die Verstärkung des invertierenden Verstärkers wurde über zwei Widerstände eingestellt. Diese können einer Schwankung unterliegen. Weiterhin wurde die Schaltung auf einem dafür vorbereiteten Steckbrett mit Kabeln zusammengebaut, wobei die Kabelwiderstände und die Widerstände der Steckverbinder einen Einfluss auf den Spannungsteiler ausüben können. Außerdem darf nicht vergessen werden, dass es sich bei der zweiten goldenen Regel für Operationsverstärker um eine Idealisierung handelt, die in der Realität nicht gegeben ist. Der Eingangswiderstand kann nicht unendlich groß werden, da der dicht dahinter befindende Bipolartransistor einen Strom vom Emitter zur Basis passieren lässt.

4. Komplexere Schaltungen mit Operationsverstärkern

4.1 Idealer Einweggleichrichter

Ein einfacher Gleichrichter besteht aus einer Diode, welche von einer Wechselspannung nur die positiven Halbwellen passieren lässt, und einem hochohmigen Pulldown-Widerstand, um das Potential des Ausgangssignals für den Betrieb der Diode in Sperrrichtung zu gewährleisten. Das dazugehörige Schaltbild ist in Abbildung 4.1 zu sehen. Der einfache Gleichrichter hat das Problem, dass er einerseits nur die positiven Halbwellen des Eingangssignals passieren lässt und dass an der Diode die Diodenknickspannung abfällt, was besonders bei kleinen Spannungen problematisch werden kann. Mithilfe eines Operationsverstärkers lässt sich ein idealer Einweggleichrichter bauen, siehe Abbildung 4.2. Durch diesen wird die Eingangsspannung um die Diodennickspannung erhöht, was zu einer Korrektur der Ausgangsspannung führt. Zur einfacheren Darstellung sind in Abbildung 4.2 die positive und die negative Halbwelle getrennt eingezeichnet. Mit einem Oszilloskop, dessen Aufnahmen in Abbildung 4.3 zu sehen sind, wurde die Funktionsweise dieser Schaltung verifiziert. Zur besseren Darstellung wurde in Abbildung 4.4 ein Bild von der positiven und in Abbildung 4.5 ein Bild von der negativen Halbwelle angefertigt.

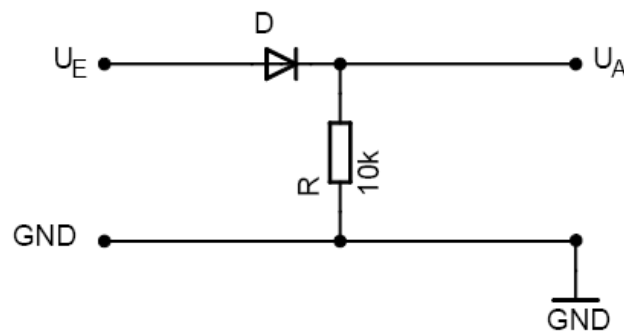


Abbildung 4.1: Schaltbild: einfacher Einweggleichrichter

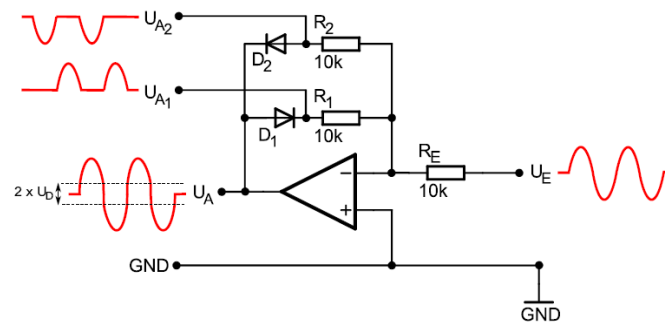


Abbildung 4.2: Schaltbild: idealer Einweggleichrichter

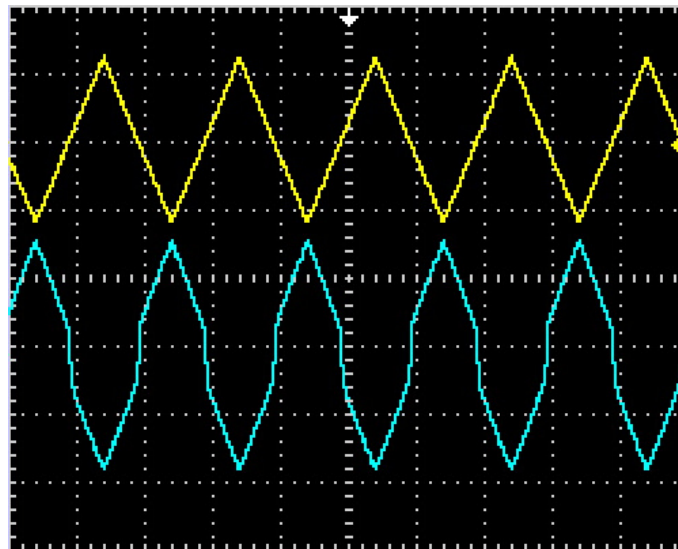


Abbildung 4.3: Gleichrichter-Test

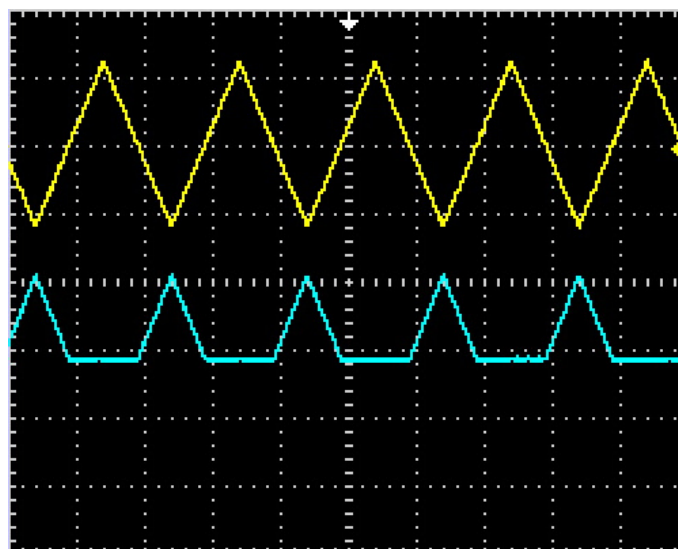


Abbildung 4.4: Gleichrichter: positive Halbwelle

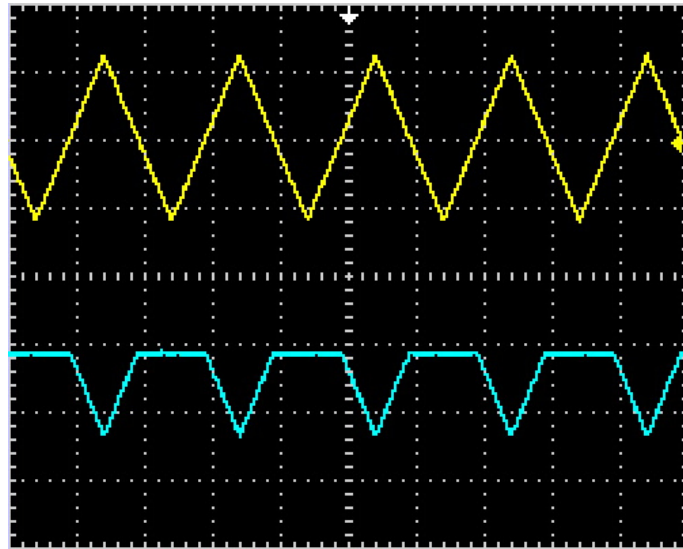


Abbildung 4.5: Gleichrichter: negative Halbwelle

4.2 Generator für Dreieck- und Rechtecksignale

Mithilfe eines Operationsverstärkers lässt sich, wie in Abbildung 4.6 dargestellt, ein Generator für Dreieck- und Rechtecksignale bauen. Dabei ist der linke Operationsverstärker wie ein Integrierer angeschlossen, während der rechte als Schmitt-Trigger arbeitet. Nachdem der Schmitt-Trigger, je nach Anfangsspannung, ein Signal von $\pm 15\text{ V}$ ausgibt, wird dieses Signal über einen $100\text{ k}\Omega$ Widerstand an den invertierten Eingang des Operationsverstärkers angelegt. Dies führt zu einer Aufladung des Kondensators und einem Anstieg des Potentials am Ausgang des linken Operationsverstärkers. Dieses Potential fällt zwischen dem $5,6\text{ k}\Omega$ Widerstand und dem $10\text{ k}\Omega$ Widerstand ab und erfüllt die Rückkopplung am invertierten Eingang des Schmitt-Triggers. Wenn die Ausgangsspannung des Schmitt-Triggers der hinter dem Kondensator anliegenden Spannung nicht mehr überwiegt, wird der Kondensator komplett entladen und lädt sich danach erneut auf, da der Schmitt-Trigger das Vorzeichen der Spannung beim Eintreten dieser Situation wechselt. Somit lässt sich am Ausgang des Schmitt-Triggers ein 30 V_{SS} Rechteck-Signal messen. Am Ausgang des Integrierers lässt sich eine konstant steigende und fallende Spannung, ein Dreieck-Signal messen. Die Schaltung wurde nachgebaut und mit einem Oszilloskop, dessen Aufnahmen in Abbildung 4.7 zu sehen sind, verifiziert. Dabei handelt es sich in dem Bild beim gelben Signal um das Dreieck-Signal und beim blauen Signal um das Rechteck-Signal.

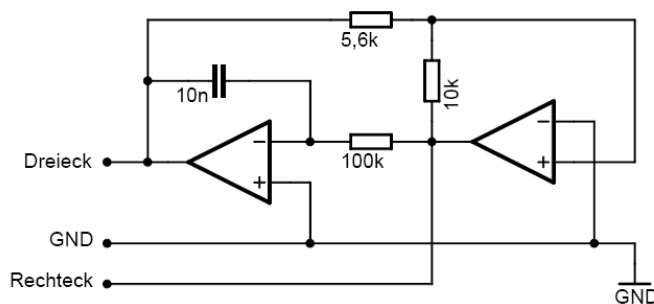


Abbildung 4.6: Schaltbild: Generator für Dreieck- und Rechtecksignale

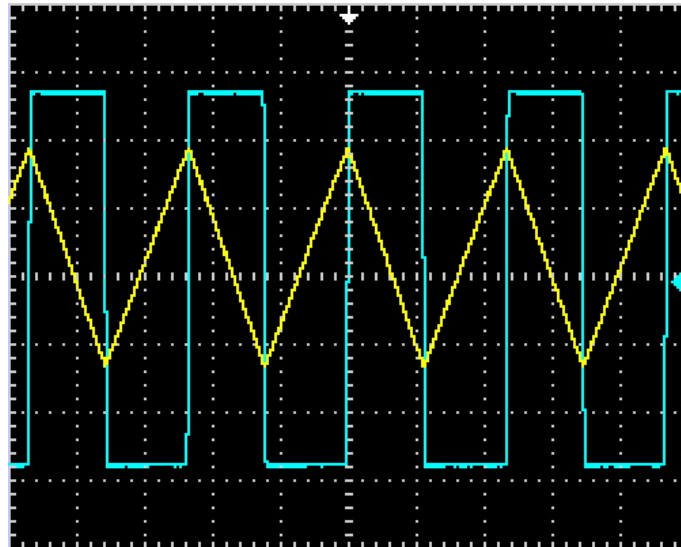


Abbildung 4.7: Oszilloskop-Aufnahme des Generators

4.3 Programmierbare Differentialgleichung zweiter Ordnung

Eine Differentialgleichung zweiter Ordnung der Form

$$\ddot{X}(t) + 2 \cdot \beta \cdot \dot{X}(t) = -\omega^2 \cdot X(t) \quad (4.1)$$

lässt sich mit dem in Abbildung 4.8 dargestellten Aufbau in eine elektrische Schaltung umsetzen. Dazu werden zwei Integrierer hintereinander angeschlossen. Ein dritter Operationsverstärker dient als Verstärker des für die Rückkopplung benötigten Signals. Mithilfe des Potentiometers kann eine variable Dämpfung eingesetzt werden, mit der auch der Schwingfall, Kriechfall und der aperiodische Grenzfall erzeugt werden können. Das Ausgangssignal des mittleren, als integrierer angeschlossenen Operationsverstärkers stellt den $\dot{X}(t)$ Anteil dar. Die Konstanten β und ω sind von den verwendeten Widerständen und Kondensatoren abhängig. Abbildung 4.9 und 4.10 stellen zwei Aufnahmen des Ausgangssignals mit dem Oszilloskop dar, mit welchen die Funktionsweise der Schaltung verifiziert werden konnte.

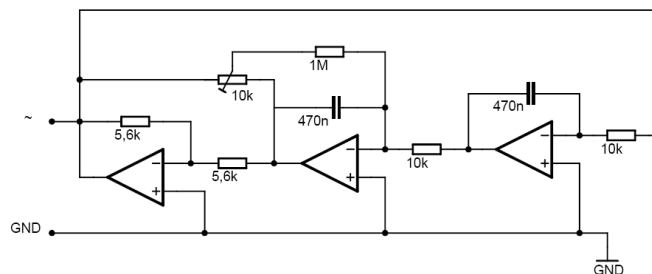


Abbildung 4.8: Schaltbild: Programmierbare Differentialgleichung zweiter Ordnung

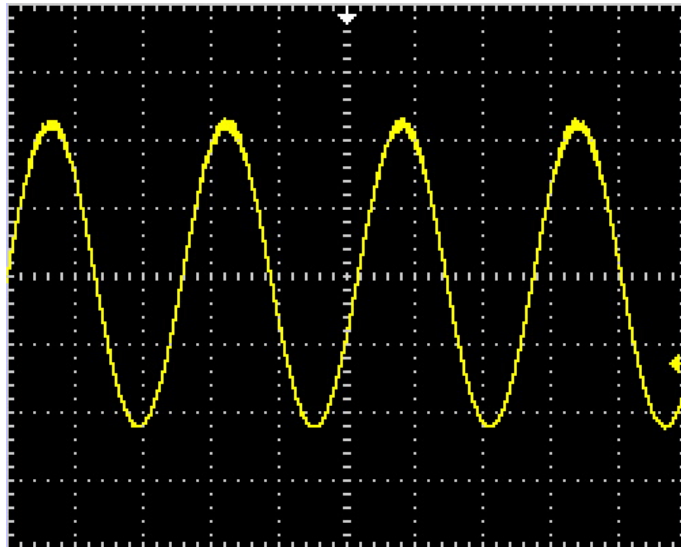


Abbildung 4.9: Oszilloskop-Aufnahme der DGL (1)

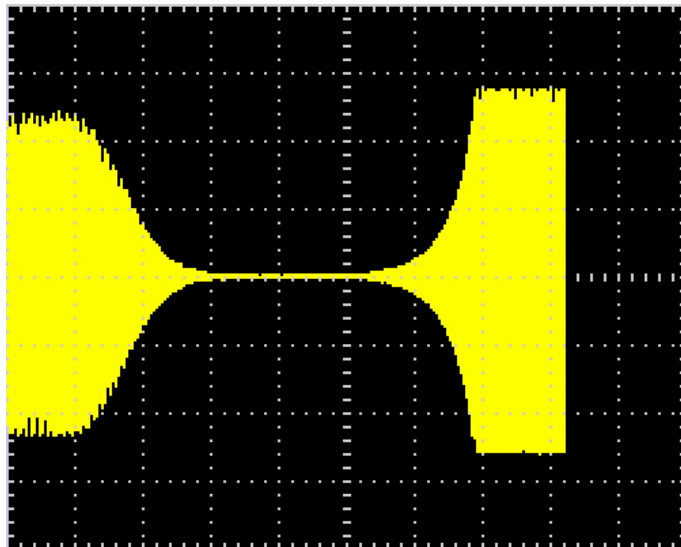


Abbildung 4.10: Oszilloskop-Aufnahme der DGL (2)

Korrektur und Hinzufügungen

1.3

Der gemessene Wert für die Verstärkung bei kleiner Amplitude (Verstärkung 4,35) ist kleiner als der berechnete (Verstärkung 4,7). Das liegt vermutlich daran, dass die Werte der Widerstände mit Kohleschicht gewisse Toleranzen aufweisen. Zudem können bei den durchaus lockeren Kabelverbindungen ebenfalls abweichende Kontaktwiderstände entstehen, die einen unbekannten Einfluss auf die Verstärkung haben.

3.1

Ein Bild des Oszilloskops mit dem invertieren Verstärker ist in Abbildung 4.11 zu sehen.

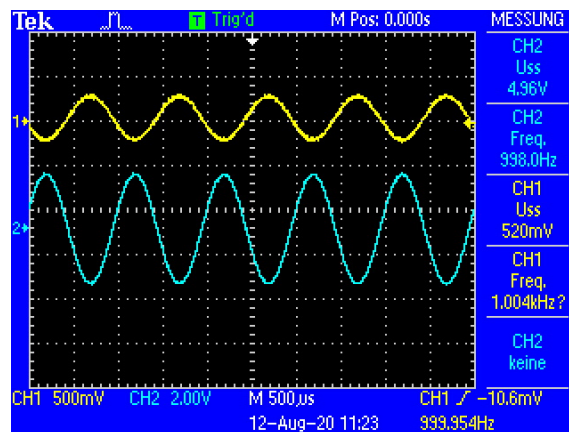


Abbildung 4.11: Messung am Oszilloskop: 3.1 Operationsverstärker als invertierender Verstärker

Es ist klar zu erkennen, dass das Signal invertiert wird, da die Eingangsspannung und die Ausgangsspannung des Sinussignals genau um die Phase π versetzt sind, was einer Invertierung entspricht.

4.1

Der ideale Einweggleichrichter kann wie eine reine Diodenschaltung verwendet werden, um ein Signal in positive und negative Halbwellen aufzuteilen. Im Gegensatz zur Diode muss keine Schwellenspannung berücksichtigt werden, da der ideale Einweggleichrichter die verbauete Diode um die Schwellenspannung anhebt. Somit eignet sich der ideale Einweggleichrichter auch zur präzisen Analyse schwacher Signale.