

Versuche P2-59,60,61

Operationsverstärker Versuchsauswertung

Marco A. Harrendorf und Thomas Keck, Gruppe: Mo-3
Karlsruhe Institut für Technologie, Bachelor Physik

Versuchstag: 23.05.2011

Inhaltsverzeichnis

1	Aufgabe 1: Emitterschaltung	3
1.1	Aufgabe 1.1: Gleichstromgegenggekoppelter Transistorverstärker	3
1.2	Aufgabe 1.2: Verstärkung einer Dreiecksspannung	3
1.3	Aufgabe 1.3: Stromgegenggekoppelter Transistorverstärker	3
1.4	Aufgabe 1.4: Verstärkung bei verschiedenen Frequenzen	4
2	Aufgabe 2: Grundsaltung des Operationsverstärkers	8
2.1	Aufgabe 2.1: Nichtinvertierender Verstärker	8
2.2	Aufgabe 2.2: Messung der Eingangs- und Ausgangsimpedanz	8
2.3	Aufgabe 2.3: Verstärkung bei verschiedenen Frequenzen	9
3	Aufgabe 3: Invertierender Verstärker	11
3.1	Aufgabe 3.1: Invertierender Verstärker	11
3.2	Aufgabe 3.2: Addierer für 2 Eingangssignale	11
3.3	Aufgabe 3.3: Integrierer	12
3.4	Aufgabe 3.4: Differenzierer	13
4	Aufgabe 4: Komplexere Schaltungen	15
4.1	Aufgabe 4.1: Idealer Einweggleichrichter	15
4.2	Aufgabe 4.2: Generator für Dreieck- und Rechtecksignale	15
4.3	Aufgabe 4.3: Programmierte Differentialgleichung 2. Ordnung	16
	Literatur	18

1 Aufgabe 1: Emitterschaltung

1.1 Aufgabe 1.1: Gleichstromgegengekoppelter Transistorverstärker

Die Funktion der einzelnen Bauelemente wurde bereits in der Vorbereitung analysiert und erklärt. Die Lage des Arbeitspunktes wurde durch den Versuchsaufbau und die Widerstände R_1 und R_2 bestimmt. Er lag auf einem Potential von 2.27 V über dem Ground. Der Arbeitspunkt wurde nochmals überprüft, indem die Eingangsspannung solange erhöht wurde, bis das Ausgangssignal verzerrt wurde. Während der nachfolgenden Messungen wurde die Eingangsspannung unterhalb der Verzerrungsgrenze gehalten.

1.2 Aufgabe 1.2: Verstärkung einer Dreiecksspannung

In diesem Versuch wurde die Emitterschaltung entsprechend der Abbildung in der Versuchsvorbereitung aufgebaut.

Als Eingangsspannung wurde eine Dreiecksspannung mit einer Spitzenspitzenspannung $U_E = 39.2 \text{ mV}$ und einer Frequenz $f = 1 \text{ kHz}$ gewählt, als Ausgangsspannung wurde dann die Spitzenspitzenspannung $U_A = 7.2 \text{ V}$ gemessen.

Hieraus ergibt sich folgende Spannungsverstärkung v_U :

$$v_U = \frac{U_A}{U_E} \\ \approx 184$$

Wie man an Abbildung 1 sieht, kommt es durch die Verstärkung zu einer Veränderung der Form der Dreiecksschwingung. Zwar liegen die Maxima und Minima von Eingangs- und Ausgangsspannung genau übereinander, allerdings ähneln die Geraden der Dreiecksspannung bei der Ausgangsspannung eher Bögen.

1.3 Aufgabe 1.3: Stromgegengekoppelter Transistorverstärker

In dieser Aufgabe wurde die gleiche Schaltung wie in Kapitel 1.2 verwendet, allerdings wurde der Emitterkondensator C_E aus der Schaltung entfernt, sodass es sich nun um einen stromgegengekoppelten Transistorverstärker handelt.

Als Eingangsspannung wurde eine Sinusspannung mit einer Spitzenspitzenspannung $U_E = 400 \text{ mV}$ und einer Frequenz $f = 1 \text{ kHz}$ gewählt, als Ausgangsspannung wurde dann die Spitzenspitzenspannung $U_A = 1.8 \text{ V}$ gemessen.

Hieraus ergibt sich folgende Spannungsverstärkung v_U :

$$v_U = \frac{U_A}{U_E} \\ \approx 4.5$$

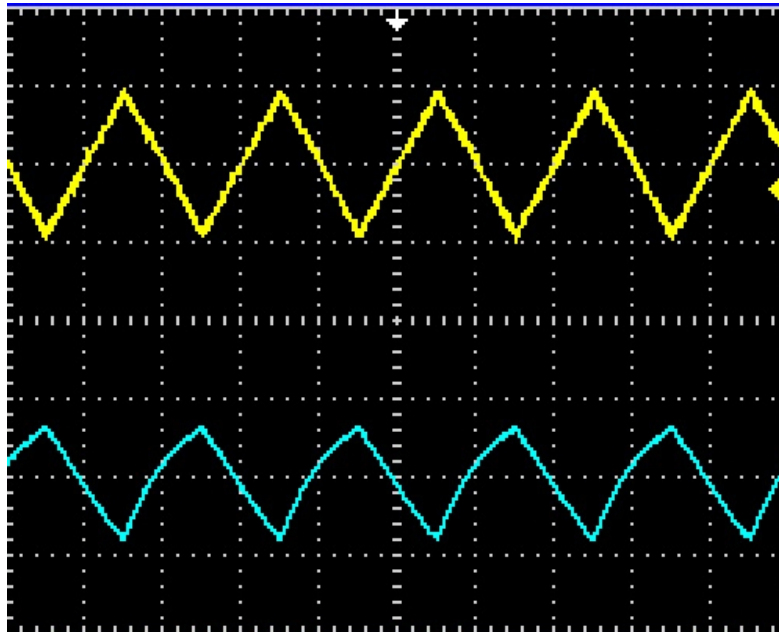


Abbildung 1: Darstellung der Eingangsspannung in $20 \frac{\text{mV}}{\text{div}}$ (oben) und der Ausgangsspannung in $5 \frac{\text{V}}{\text{div}}$ (unten) für den Versuch 1.2

Im Vergleich hierzu beträgt die in der Vorbereitung hergeleitete theoretische Verstärkung $v_{U,theo}$:

$$\begin{aligned} v_{U,theo} &= \frac{R_C}{R_E} \\ &= \frac{475 \, \Omega}{100 \, \Omega} = 4.7 \end{aligned}$$

Der experimentell bestimmte Wert für die Spannungsverstärkung v_U stimmt also sehr gut mit dem theoretischen Wert $v_{U,theo}$ überein.

1.4 Aufgabe 1.4: Verstärkung bei verschiedenen Frequenzen

In diesem Versuch wurde die Verstärkung des strom- und gleichstromgegekoppelten Verstärkers für verschiedene Frequenzen bestimmt.

Auswertung: Stromgegekoppelter Verstärker Die gemessenen Eingangsspannungen U_E und Ausgangsspannungen U_A sowie die hieraus berechnete Spannungsverstärkung v_U sind in Abhängigkeit von der Frequenz f der Eingangsspannung in Tabelle 1 für den stromgegekoppelten Verstärker aufgeführt. Weiterhin ist in Abbildung 2 die Spannungsverstärkung v_U über der Frequenz f dargestellt.

Man erkennt in der Abbildung 2 sehr deutlich, dass die Spannungsverstärkung v_U ab einer Frequenz $f \approx 500 \, \text{Hz}$ nahezu konstant ist und mit dem gemessenen Wert aus Kapitel 1.3

übereinstimmt. Die Konstanz der Spannungsverstärkung v_U liegt an der Rückkopplung, die durch den Emitterwiderstand R_E bzw. der über ihm abfallenden Spannung bedingt ist.

Die Spannungsverstärkung v_U ist bei geringen Frequenzen f deshalb nur gering, da die Koppelkondensatoren C_1 und C_2 wie ein Hochpassfilter wirken und daher niedrige Frequenzen f nur bedingt durchlassen.

Frequenz f	Eingangsspannung U_E	Ausgangsspannung U_A	Spannungsverstärkung v_U
10 Hz	4.20 V	4.48 V	1.07
25 Hz	2.96 V	6.90 V	2.33
50 Hz	2.40 V	8.30 V	3.46
100 Hz	2.40 V	9.90 V	4.13
500 Hz	2.32 V	10.40 V	4.48
1 kHz	2.32 V	10.40 V	4.48
5 kHz	2.32 V	10.60 V	4.57
10 kHz	2.32 V	10.40 V	4.48
50 kHz	2.32 V	10.40 V	4.48
100 kHz	2.32 V	10.40 V	4.48

Tabelle 1: Messwerte für die Spannungsverstärkung v_U des stromgegekoppelten Verstärkers

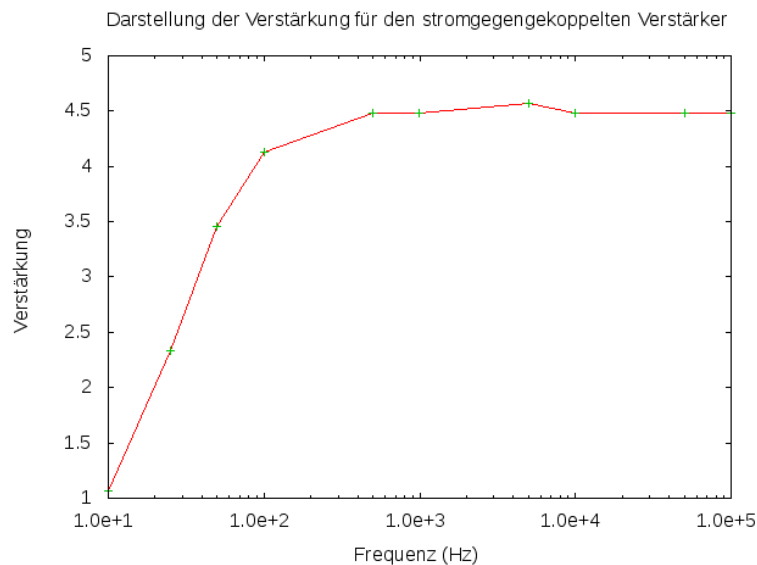


Abbildung 2: Darstellung der Spannungsverstärkung v_U für den stromgegekoppelten Verstärker

Auswertung: Gleichstromgegekoppelter Verstärker Die gemessenen Eingangsspannungen U_E und Ausgangsspannungen U_A sowie die hieraus berechnete Spannungsverstärkung

v_U sind in Abhängigkeit von der Frequenz f der Eingangsspannung in Tabelle 2 für den gleichstromgegekoppelten Verstärker aufgeführt. Weiterhin ist in Abbildung 3 die Spannungsverstärkung v_U über der Frequenz f dargestellt.

Man erkennt in der Abbildung 3 sehr deutlich, dass die Spannungsverstärkung v_U ab einer Frequenz $f \approx 500$ Hz nahezu konstant ist und mit dem gemessenen Wert aus Kapitel 1.2 übereinstimmt. Die Konstanz der Spannungsverstärkung v_U liegt an der Rückkopplung, die durch den Emitterwiderstand R_E bzw. der über ihm abfallenden Spannung bedingt ist.

Allerdings sollte die Spannungsverstärkung v_U bei höheren Frequenzen f allmählich wieder zunehmen, da dann der Emitterkondensator C_E durchlässig wird und die Stärke der Rückkopplung abnimmt. Dies konnte jedoch nicht gezeigt werden; es ist in der Tat sogar so, dass bei hohen Frequenzen die Spannungsverstärkung v_U sogar wieder geringfügig abnimmt. Dies liegt vermutlich daran, dass bei hohen Frequenzen der Verstärker nicht mehr in vollem Umfang mit dem Eingangssignal Schritt halten kann und es deswegen zu einer geringeren Spannungsverstärkung v_U kommt.

Auch bei diesem Aufbau ist die Spannungsverstärkung v_U bei geringen Frequenzen f nur gering, da auch hier die Koppelkondensatoren C_1 und C_2 wie ein Hochpassfilter wirken und daher niedrige Frequenzen f nur bedingt durchlassen.

Frequenz f	Eingangsspannung U_E	Ausgangsspannung U_A	Spannungsverstärkung v_U
10 Hz	2.16 V	7.00 V	3.24
25 Hz	750 mV	9.80 V	13.1
50 Hz	350 mV	10.40 V	29.7
100 Hz	60 mV	4.08 V	68.0
500 Hz	56 mV	9.40 V	167.9
1 kHz	56 mV	9.60 V	171.4
5 kHz	54 mV	10.40 V	192.6
10 kHz	57 mV	10.40 V	182.5
50 kHz	58 mV	10.40 V	179.3
100 kHz	57 mV	10.00 V	175.4

Tabelle 2: Messwerte für die Spannungsverstärkung v_U des gleichstromgegekoppelten Verstärkers

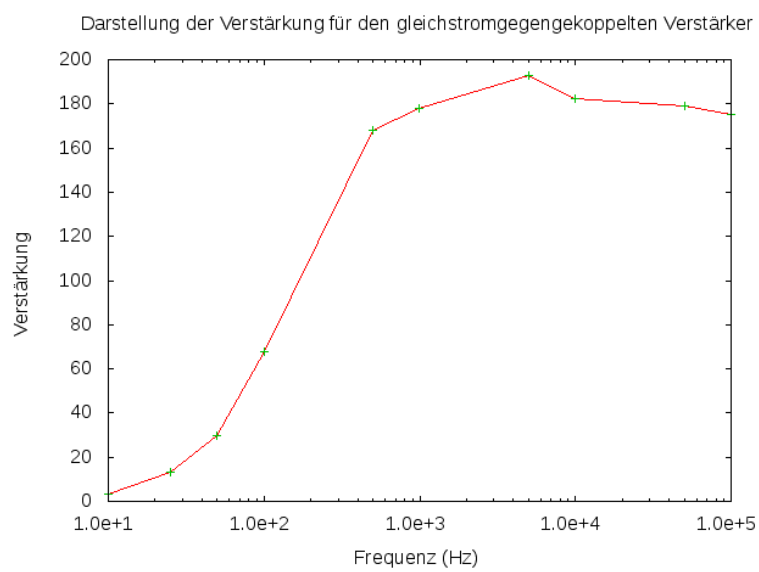


Abbildung 3: Darstellung der Spannungsverstärkung v_U für den gleichstromgegekoppelten Verstärker

2 Aufgabe 2: Grundsaltung des Operationsverstärkers

2.1 Aufgabe 2.1: Nichtinvertierender Verstärker

Entsprechend der Schaltskizze in der Versuchsvorbereitung wurde der nichtinvertierende Verstärker aufgebaut.

Als Eingangssignal wurde eine Dreiecksspannung mit einer Frequenz $f = 1 \text{ kHz}$ gewählt und für zwei Eingangsspannungen U_E die Ausgangsspannung U_A bestimmt und daraus die Spannungsverstärkung v_U berechnet.

Die Messwerte für die Spannungen (U_E , U_A) und die daraus berechnete Spannungsverstärkung v_U werden in Tabelle 3 wiedergegeben.

Im Vergleich dazu beträgt die theoretische Spannungsverstärkung $v_{U,theo}$:

	Eingangsspannung U_E	Ausgangsspannung U_A	Spannungsverstärkung v_U
Messwert 1	820 mV	8.80 V	10.73
Messwert 2	86 mV	950 mV	11.05
Mittelwert			(10.89 ± 0.23)

Tabelle 3: Messwerte und Spannungsverstärkung v_U für den nichtinvertierenden Verstärker

$$\begin{aligned}
 v_U &= 1 + \frac{R_2}{R_1} \\
 &= 11
 \end{aligned}$$

Die durch die Messungen bestimmte Spannungsverstärkung $\overline{v_U} = (10.89 \pm 0.23)$ stimmt also sehr gut mit der theoretischen Spannungsverstärkung $v_{U,theo} = 11$ überein.

2.2 Aufgabe 2.2: Messung der Eingangs- und Ausgangsimpedanz

In diesem Versuch wurde der Eingangswiderstand R_{Ein} und der Ausgangswiderstand R_{Aus} des Operationsverstärkers gemäß der Vorbereitung bestimmt.

Bestimmung des Eingangswiderstands R_{Ein} Zur Bestimmung des Eingangswiderstands R_{Ein} wurde ein Messwiderstand $R_M = 1031 \text{ k}\Omega$ in Reihe mit dem Operationsverstärker geschaltet und eine Eingangsspannung $U_E = 1.58 \text{ V}$ angelegt. Durch eine Spannungsmessung hinter dem Messwiderstand R_M konnte dann folgende Spannung bestimmt werden:

$$U_E - U_M = 780 \text{ mV}$$

Die Spannung über dem Messwiderstand U_M ergab sich dann zu $U_M = 700 \text{ mV}$.

Aus der in der Vorbereitung hergeleiteten Formel berechnet sich dann der Eingangswiderstand R_{Ein} zu:

$$\begin{aligned}
 R_{Ein} &= R_M \cdot \left(\frac{U_E}{U_M} - 1 \right) \\
 &= 1296 \text{ k}\Omega
 \end{aligned}$$

Dieser Widerstand ist also im Vergleich zu den anderen verwendeten Widerständen sehr groß, wie auch nach der Goldenen Regel erwartet wurde.

Bestimmung des Ausgangswiderstands R_{Aus} Zur Bestimmung des Ausgangswiderstands R_{Aus} wurde der Operationsverstärker parallel zu einem Potentiometer geschaltet. Für einen sehr großen am Potentiometer eingestellten Widerstand betrug die Ausgangsspannung $U_A = 2.52 \text{ V}$. Der am Potentiometer eingestellte Widerstand wurde nun soweit verringert, bis die Ausgangsspannung auf die Hälfte abgesunken war. Nach dem Prinzip des Spannungsteilers entspricht dann der Ausgangswiderstand des Operationsverstärkers R_{Aus} gerade dem am Potentiometer eingestellten Widerstand.

Unter Zuhilfenahme eines Widerstandsmessgeräts konnte der am Potentiometer eingestellte Widerstand und damit der Ausgangswiderstand R_{Aus} zu $R_{Aus} = 16.2 \Omega$ bestimmt werden. Dieser Widerstand ist also entsprechend der Goldenen Regel sehr klein.

2.3 Aufgabe 2.3: Verstärkung bei verschiedenen Frequenzen

In diesem Versuch wurde die Verstärkung des nichtinvertierenden Operationsverstärkers bestimmt.

Es wurde die Schaltung aus der Versuchsvorbereitung verwendet und als Eingangssignal eine Sinusspannung mit einer Spitzenspannung von ca. $U_{E,SS} \approx 0.5 V_{SS}$ gewählt.

Die gemessenen Eingangsspannungen U_E und Ausgangsspannungen U_A sowie die hieraus berechnete Spannungsverstärkung v_U sind in Abhängigkeit von der Frequenz f der Eingangsspannung in Tabelle 4 aufgeführt. Weiterhin ist in Abbildung 4 die Spannungsverstärkung v_U über der Frequenz f dargestellt.

Man erkennt in Abbildung 4, dass die Spannungsverstärkung v_U ab einer Frequenz $f \approx 25 \text{ kHz}$ abnimmt, bis sie für große Frequenzen $f \gg 100 \text{ kHz}$ ganz einbricht.

Dies liegt daran, dass bei hohen Frequenzen f die Rückkopplung, die für eine konstanten Spannungsverstärkung v_U benötigt wird, immer weniger wirksam wird.

Frequenz f	Eingangsspannung U_E	Ausgangsspannung U_A	Spannungsverstärkung v_U
10 Hz	504 mV	5.60 V	11.1
100 Hz	632 mV	6.96 V	11.0
1 kHz	632 mV	6.96 V	11.0
10 kHz	648 mV	7.04 V	10.9
25 kHz	648 mV	6.80 V	10.5
50 kHz	648 mV	5.28 V	8.1
75 kHz	648 mV	3.72 V	5.7
100 kHz	648 mV	2.84 V	4.4

Tabelle 4: Messwerte für die Spannungsverstärkung v_U des nichtinvertierenden Operationsverstärkers

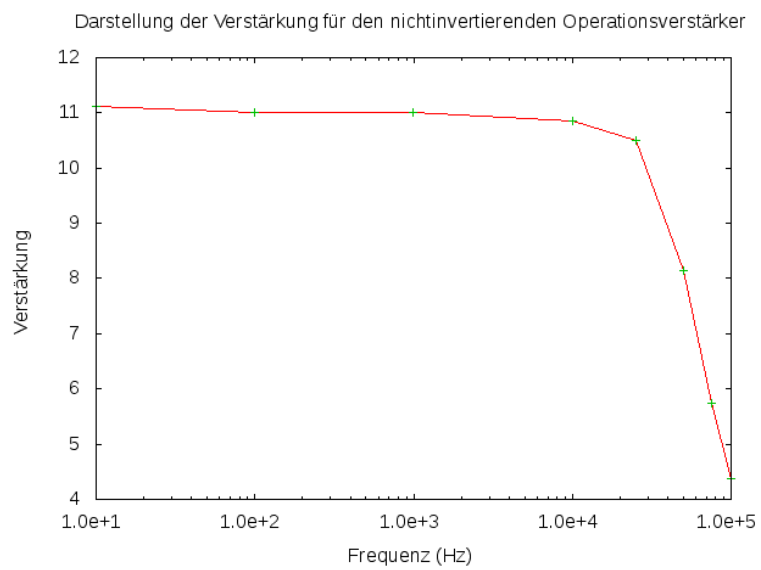


Abbildung 4: Darstellung der Spannungsverstärkung v_U für den nichtinvertierenden Operationsverstärker

3 Aufgabe 3: Invertierender Verstärker

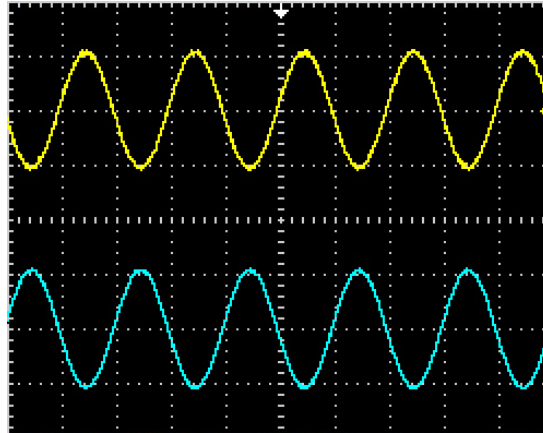


Abbildung 5: Invertierender Verstärker mit einem Verstärkungsfaktor $v = 10$. Oben in $200 \frac{\text{mV}}{\text{div}}$ unten in $2 \frac{\text{V}}{\text{div}}$

3.1 Aufgabe 3.1: Invertierender Verstärker

Der invertierende Verstärker wurde gemäß der Vorbereitung aufgebaut. Er ist die Grundschaltung für alle späteren Versuchsteile. Die Funktionsweise der Verstärkungsschaltung wurde mit einer Sinusspannung bei einer Frequenz von $f = 1\text{kHz}$ überprüft. Der Verstärkungsfaktor betrug bei einer Eingangsspannung von $U_E = 420\text{mV}$ und einer gemessenen Ausgangsspannung von $U_A = 4.2\text{V}$

$$\nu = 10 \quad (1)$$

Dies entspricht exakt dem theoretisch erwarteten Wert. In Abbildung 5 sieht man sehr schön die invertierende Eigenschaft des Verstärkers, das Ausgangssignal unten scheint gerade an der x-Achse in der Mitte gespiegelt zu sein. Das Signal war unverzerrt und stabil.

3.2 Aufgabe 3.2: Addierer für 2 Eingangssignale

Aufgrund des Fehlens eines zusätzlichen Funktionsgenerators, konnte die Addition nur mit einem Sinussignal und einem konstanten regelbaren Potential, welches über die 15 Volt Versorgungsspannung und den Potentiometer realisiert wurde, durchgeführt werden. Das Oszilloskop wurde dabei auf DC umgestellt, um den Gleichstromanteil der Addition darzustellen. In Schaubild 6 kann die Addition sehr schön gesehen werden. Oben ist jeweils das Sinussignal mit $f = 1\text{kHz}$ dargestellt, unten das erhaltene Ausgangssignal.

Links erkennt man das Sinussignal welches ohne angelegtes Potential erhalten wurde, rechts wurde es mit einem konstanten zusätzlichen Potential nach oben verschoben. Auch hier erkennt man die invertierende Eigenschaft sehr schön.

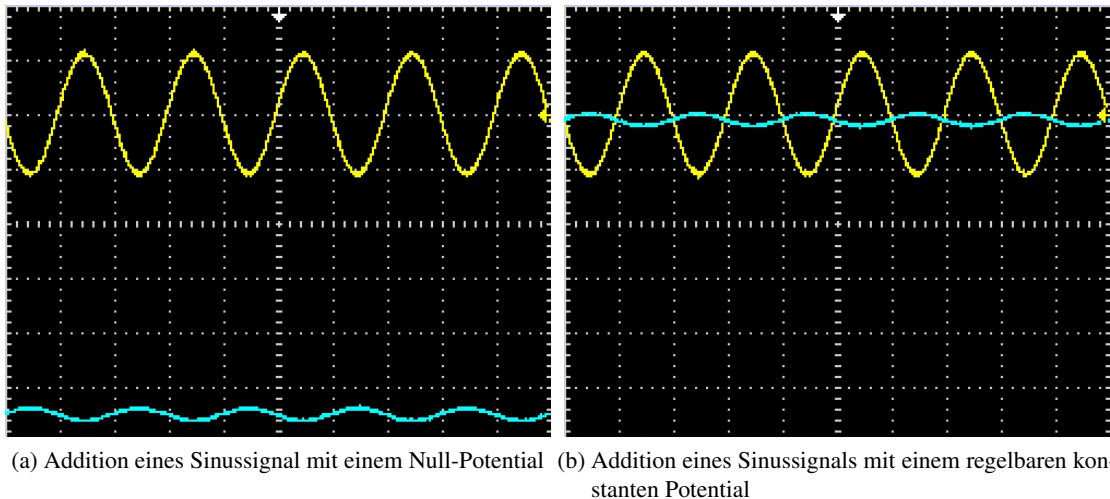


Abbildung 6: Sinussignal in $200 \frac{\text{mV}}{\text{div}}$ (oben) und Addition des Sinus mit regelbarem Potential $2 \frac{\text{V}}{\text{div}}$ (unten)

Zu beachten ist, dass das Eingangssignal nicht verstärkt oder gedämpft war, wie Abbildung 6 vermuten lassen könnte. Beide Sinussignale besitzen die gleiche Amplitude, das Eingangssignal ist in $200 \frac{\text{mV}}{\text{div}}$, das Ausgangssignal in $2 \frac{\text{V}}{\text{div}}$ dargestellt. Mit dieser Einstellung war es leichter den Gleichstromanteil exakt einzustellen und die beiden Signale im rechten Bild übereinander abzubilden.

3.3 Aufgabe 3.3: Integrierer

Die Schaltung wurde entsprechend der Versuchsvorbereitung aufgebaut. Das Integrationsverhalten konnte sehr gut beobachtet werden. Die Ergebnisse sind in Abbildung 7 zu sehen.

Zu beachten ist, dass das Ausgangssignal der Dreieckeingangsspannung Parabelbögen sind und nicht etwa eine trigonometrische Funktion.

Die Ausgangsspannungen sind in der Amplitude deutlich geschwächt, da die Integration jeweils nur über ein kleines Zeitintervall, der halben Periodendauer des Eingangssignals stattfand, welche im Versuch $T = 5\text{ms}$ betrug.

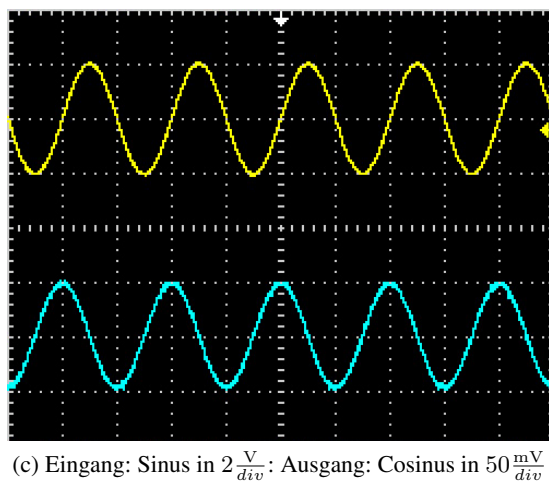
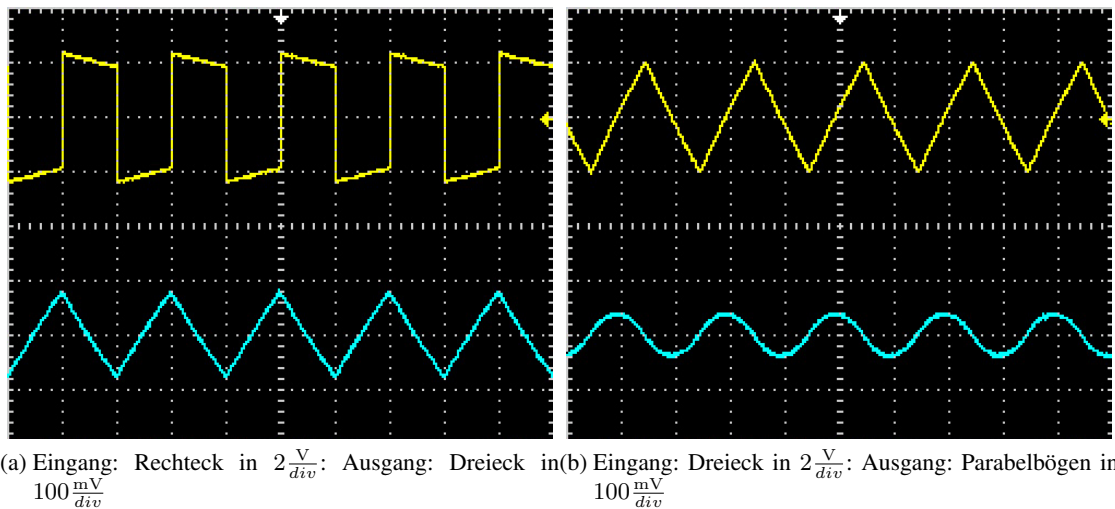


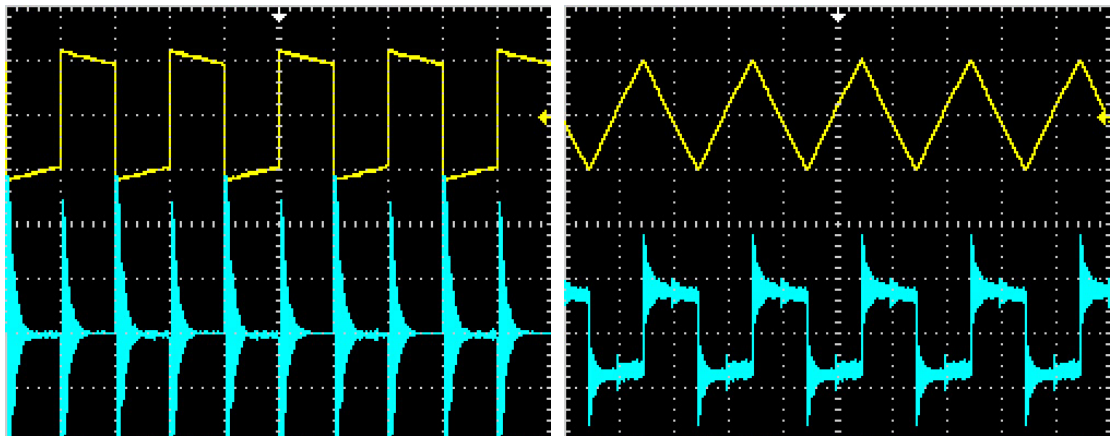
Abbildung 7: Integration verschiedener Eingangssignale mit $f = 100\text{Hz}$ (oben) und Ausgangssignal invertiertes Integral (unten)

3.4 Aufgabe 3.4: Differenzierer

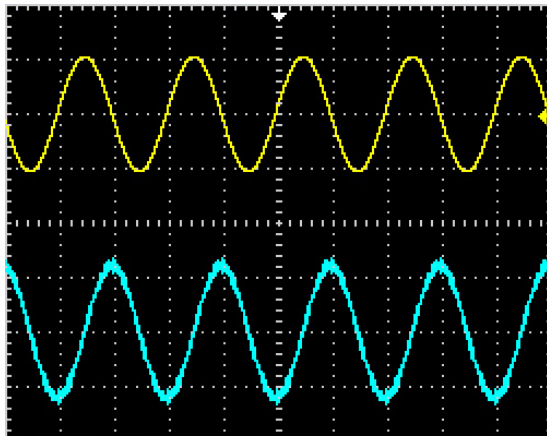
Im Versuch konnte das Differenzierverhalten der Schaltung sehr gut beobachtet werden. Beachtet werden muss die Invertierung des Ausgangssignales. Die Ergebnisse sind in Abbildung 8 dargestellt.

Die Amplitude der Ausgangssignale hängt dabei stark von der Zeitskala ab auf der sich das Eingangssignal ändert. Diese ist bei einer Rechteckspannung im theoretischen Idealfall 0, die Ausgangsspannung mit den Diracspitzen geht deshalb über die vollen 15V der maximalen Ausgangsleistung des Operationsverstärkers.

Bei einem dreiecksförmigen Eingangssignal erkennt man starke Ausschläge an den nicht diffe-



(a) Eingang: Rechteck in $2 \frac{\text{V}}{\text{div}}$: Ausgang: Diracspitzen in $5 \frac{\text{V}}{\text{div}}$ (b) Eingang: Dreieck in $2 \frac{\text{V}}{\text{div}}$: Ausgang: Rechteck in $1 \frac{\text{V}}{\text{div}}$



(c) Eingang: Sinus in $2 \frac{\text{V}}{\text{div}}$: Ausgang: Cosinus in $1 \frac{\text{V}}{\text{div}}$

Abbildung 8: Differentiation verschiedener Eingangssignale $f = 100\text{Hz}$ (oben) und Ausgangssignal invertiertes Differential (unten)

renzierbaren Knickstellen der Dreiecksspannung. Außerdem scheint das Signal auch innerhalb der einzelnen Flanken kleine Knicke aufzuweisen, da man auch hier im differenzierten Ausgangssignal Ausschläge erkennt. Das Eingangssignal ist also nicht exakt eine Dreiecksspannung.

Das Sinuseingangssignal wird dagegen sehr schön zu einem invertierten Cosinus differenziert.

4 Aufgabe 4: Komplexere Schaltungen

4.1 Aufgabe 4.1: Idealer Einweggleichrichter

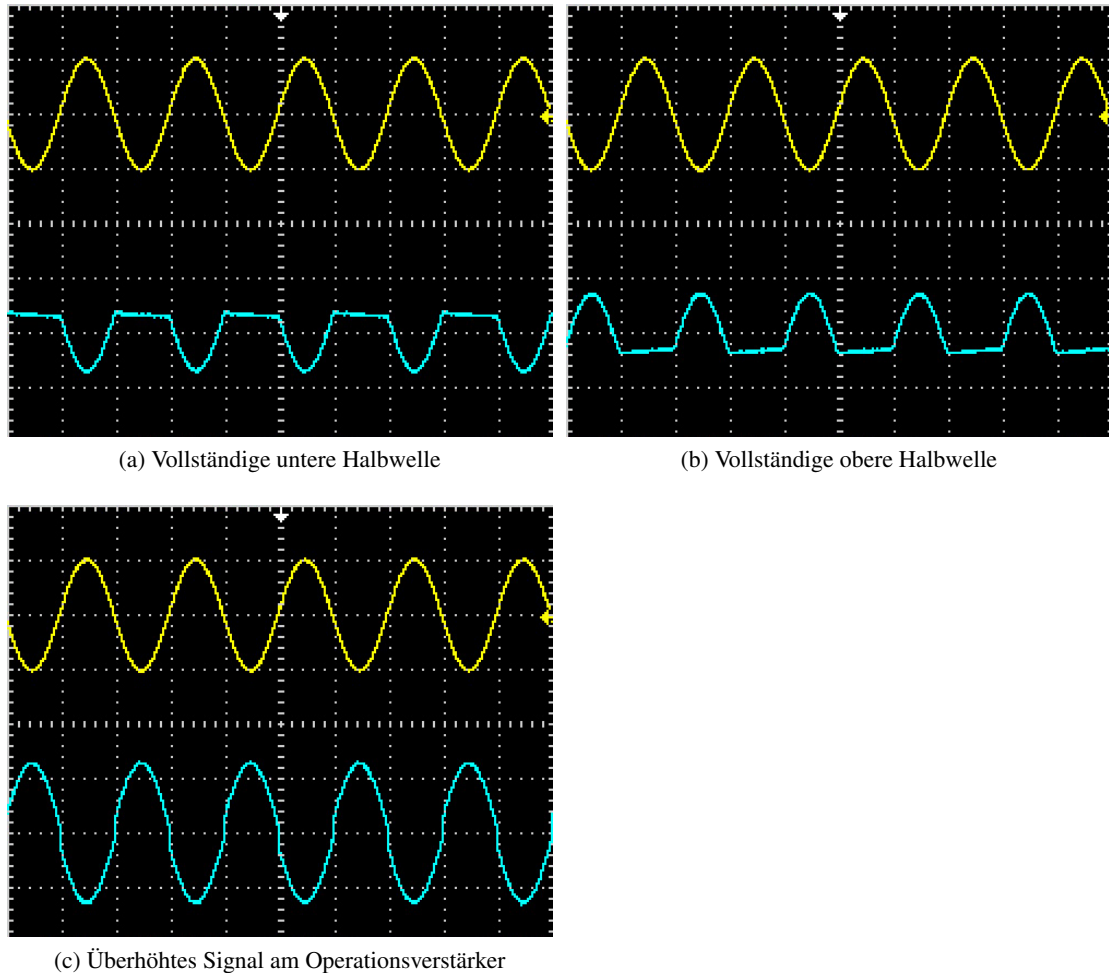


Abbildung 9: Idealer Gleichrichter: Eingang: Sinus $f = 100\text{Hz}$ in $2 \frac{\text{V}}{\text{div}}$ (oben) und Ausgang in $2 \frac{\text{V}}{\text{div}}$ (unten)

In Abbildung 9 erkennt man sehr gut die Spannungsüberhöhung am Operationsverstärker. Die beiden anderen Schaubilder zeigen jeweils die einzelnen Teilwellen ohne eine Beeinflussung der Knickspannung. Die Schaubilder geben das theoretisch erwartete Resultat sehr gut wieder.

4.2 Aufgabe 4.2: Generator für Dreieck- und Rechtecksignale

Die Schaltung wurde der Vorbereitung entsprechend aufgebaut und durchgeführt. Die Dreieck- und Rechteckspannung konnte an den dafür vorgesehenen Stellen abgegriffen werden, Schaubild 10 zeigt die beobachteten Signale. Die Ausgangsleistung der Rechteckspannung ging über

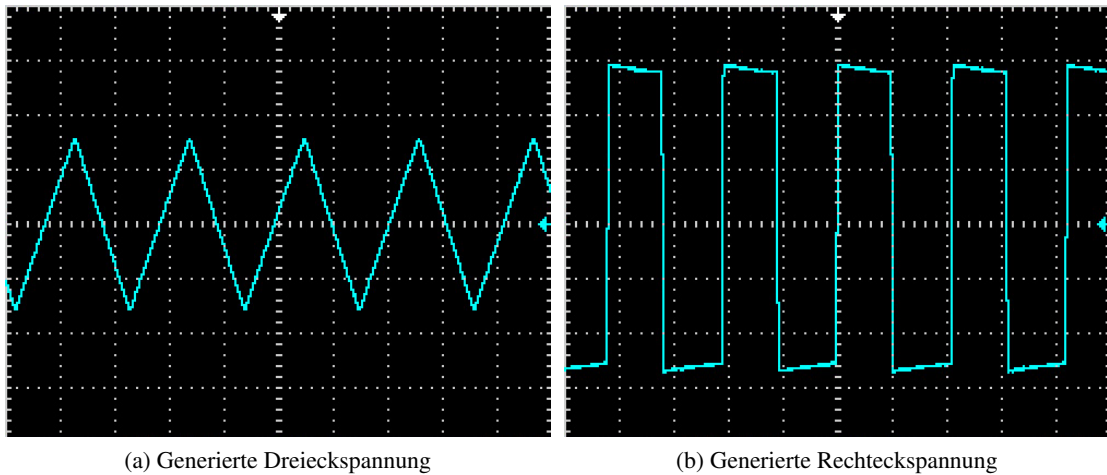


Abbildung 10: Funktionsgenerator für Dreieck und Rechteckspannungen in $5 \frac{\text{V}}{\text{div}}$

die vollen $\pm 15\text{V}$, die der Operationsverstärker über seine Versorgungsspannung liefern konnte. Das Signal besaß eine Frequenz von etwa 500Hz . Das Dreieckssignal besaß eine Spitzenspannung von 15V .

Auch dieses Ergebnis deckt sich mit den theoretischen Erwartungen.

4.3 Aufgabe 4.3: Programmierte Differentialgleichung 2. Ordnung

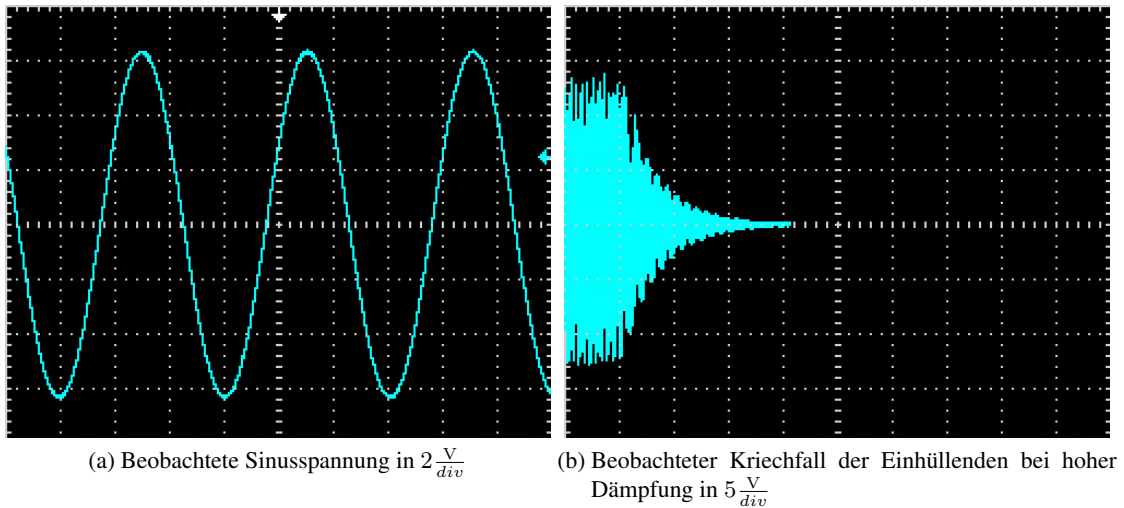


Abbildung 11: Programmierte Differentialgleichung 2. Ordnung

Vor dem 1. Integrator wurde die im Schaubild 11 dargestellte Sinus-Spannung abgegriffen.

Über das Potentiometer wurden verschiedene Dämpfungen eingestellt. Je nach Dämpfung war das Ausgangssignal kleiner oder größer. Ab einer bestimmten Dämpfung konnte man an der Einhüllenden der Schwingung einen exponentiellen Abfall ähnlich eines Kriechfalles beobachten (rechts in Abbildung 11).

Das Sinussignal besaß eine Frequenz von etwa 50Hz, die Ausgangsleistung betrug je nach Dämpfung zwischen der maximalen Ausgangsleistung des Operationsverstärkers und Null.

Auffällig war dass das Signal einige Sekunden braucht, um sich bei einer Veränderung der Dämpfung über das Potentiometer wieder neu einzustellen. Die Schaltung besitzt eine Art von „Trägheit“.

Literatur

[Aufgabenstellung] Aufgabenstellung zu den Versuchen P2-59,60,61

[Vorbereitungshilfe] Vorbereitungshilfe zu den Versuchen P2-59,60,61