

Physikalisches Anfängerpraktikum - P2

Operationsverstärker
P2-59

Auswertung von
Tobias Renz und **Raphael Schmager**

Gruppe: **Do-28**

Durchgeführt am 21. Juni 2012



Einfache elektrische Verstärkerschaltungen sind vielfach verwendete Hilfsmittel im physikalischen Labor. Jeder Experimentalphysiker (und auch jeder Physiklehrer) sollte in der Lage sein, Sie bei Bedarf rasch zu konzipieren und aufzubauen.

Bei diesem Versuch lernen Sie zwei Grundbausteine von Verstärkerschaltungen kennen, den Transistor und den Operationsverstärker. Im Vordergrund steht dabei die Anwendung dieser beiden Elemente in konkreten Schaltungen und nicht ihr 'halbleiterphysikalisches Innenleben', das erst in späteren Vorlesungen behandelt werden wird. Hier genügen zunächst einfache Modellvorstellungen.

Aufgaben:

1. Emitterschaltung eines Transistors: Das ist die am häufigsten verwendete Transistorverstärkerschaltung. Verwenden Sie dafür aber hier nicht zuviel Zeit. Die Aufgaben zum Operationsverstärker (ab Aufgabe 2) sollen vorrangig erarbeitet werden.

1.1 Bauen Sie auf der Experimentier-Steckplatine den einstufigen gleichstromgegekoppelten Transistorverstärker auf. Welche Funktionen haben die einzelnen Bauelemente, speziell R_c ? Überprüfen Sie die Lage des Arbeitspunktes. Wozu dient der Kondensator C_c ? Erläutern Sie Sinn und Wirkungsweise der Gegenkopplung.

1.2 Führen Sie dem Verstärker als Eingangssignal eine Dreiecksspannung mittlerer Frequenz (ca. 1kHz) zu und beobachten Sie oszilloskopisch das Ausgangssignal und bestimmen Sie die Verstärkung. Stellen Sie durch Variation der Amplitude des Eingangssignals verschiedene Ausgangsamplituden (etwa $3V_{SS}$ und $10V_{SS}$) ein und beurteilen Sie die Qualität des Verstärkers.

1.3 Entfernen Sie den Emitterkondensator C_c . Beobachten Sie wieder das Ausgangssignal bei verschiedenen Amplituden und bestimmen Sie die Verstärkung dieses stromgegekoppelten Verstärkers. Warum finden Sie gerade den Wert R_c/R_e als Verstärkungsfaktor? Erklären Sie die Wirkungsweise der Gegenkopplung durch R_c (Stromgegekoppelter Verstärker).

1.4 Bestimmen Sie die Verstärkung des Strom- und Gleichstromgegekoppelten Verstärkers für verschiedene Frequenzen (10/25/50/100/500Hz /1/5/10/50/100kHz).

Besonders wichtig ist hierbei der Frequenzbereich 10Hz bis 500Hz. Plotten Sie für beide Schaltungen den Verlauf der Verstärkung und erklären Sie diesen.

2. Grundschaltung eines Operationsverstärkers:

2.1 Bauen Sie auf der Experimentier-Steckplatine mit einem Operationsverstärker einen nichtinvertierenden Verstärker mit etwa zehnfacher Verstärkung. Überprüfen Sie die Funktion der Schaltung. Führen Sie dem Eingang eine Dreiecksspannung mittlerer Frequenz (1kHz) zu und beobachten Sie oszilloskopisch das Ausgangssignal. Vergleichen Sie die experimentell und rechnerisch ermittelten Verstärkungsfaktoren.

2.2 Demonstrieren Sie den hohen Eingangswiderstand und den kleinen Ausgangswiderstand dieser Schaltung mit Hilfe geeigneter Verfahren.

2.3 Bestimmen Sie die Verstärkung in Abhängigkeit von der Frequenz (10/100/1000Hz /10/25/50/75/100kHz). Wählen Sie als Eingangssignal eine Sinuswechselspannung mit einer Amplitude von $0,5V_{SS}$ und beobachten Sie das Ausgangssignal oszilloskopisch. Können Sie die bei hohen Frequenzen auftretenden Verzerrungen erklären?

3. Die invertierende Grundschaltung: Dies ist wohl die wichtigste Grundschaltung von Operationsverstärkern.

3.1 Bauen Sie mit einem Operationsverstärker einen invertierenden Verstärker mit zehnfacher Verstärkung auf. Überprüfen Sie die Funktion und erklären Sie die Wirkungsweise der Schaltung. Leiten Sie die Verstärkung her.

3.2 Bauen Sie einen „Addierer“ für zwei Eingangssignale auf. Als Eingangssignale können Sie Dreieck-, Rechteck- oder Sinusspannung (bis 1kHz) und eine mit den auf der Platine vorhandenen Potentiometern realisierbare regelbare Gleichspannungen im Bereich -15V ... +15V verwenden. Beobachten Sie die Ausgangsspannung oszilloskopisch. Schalten Sie den Eingang des Oszilloskops auf „DC-Kopplung“, damit die Gleichspannung korrekt dargestellt wird.

3.3 Bauen Sie den „Integrierer“ auf. Schalten Sie wieder zurück auf „AC-Kopplung“. Verwenden Sie als Eingangssignal Rechteck- und Dreiecksspannungen niedriger Frequenz (im Bereich 50Hz bis 100Hz) und großer Amplitude, beobachten Sie oszilloskopisch. Erklären Sie die Wirkungsweise der Schaltung (ohne Berücksichtigung des Widerstandes R_s , der nur der Stabilisierung des Integrierers dient).

3.4 Bauen Sie den „Differenzierer“ auf. Testen Sie die Funktion mit Rechteck- und Dreieckssignalen (im Bereich 50Hz bis 500Hz). Erklären Sie die Wirkungsweise der Schaltung.

4. Komplexere Schaltungen mit Operationsverstärkern: Im Folgenden werden nun einige etwas komplexere Schaltungen aufgebaut und untersucht. Welche der beiden Grundschaltungen erkennen Sie dabei am häufigsten wieder?

4.1 Bauen Sie mit einem Operationsverstärker einen idealen Einweggleichrichter auf und überprüfen Sie seine Funktion mit verschiedenen Eingangswchselspannungssignalen ($f < 1\text{kHz}$). Was sind die Vorteile dieser Schaltung gegenüber einer einfachen Gleichrichterschaltung mit einer Diode und einem Widerstand? Probieren Sie es aus! Wofür könnte ein solcher idealer Gleichrichter Verwendung finden?

4.2 Bauen Sie mit zwei Operationsverstärkern einen Generator für Dreieck- und Rechtecksignale auf. Erklären Sie die Funktionsweise der angegebenen Schaltung. *Hinweis:* Einer der Operationsverstärker arbeitet als Schwellenwertschalter, der andere als Integrierer.

4.3 Bauen Sie die so genannte „Programmierte Differentialgleichung 2. Ordnung“ auf. Diese Generatorschaltung zur Erzeugung von Sinuswchselspannungen ermöglicht die Simulation einer Integralgleichung 2. Ordnung. Sie erkennen die beiden hintereinandergeschalteten Integrierer. Mit dem Potentiometer können Sie die Dämpfung der Schwingung einstellen. Die Schwingungsamplitude wächst an oder klingt ab, je nachdem ob Sie den Schleifer des Potentiometers aus der Mittelstellung nach rechts oder nach links gedreht haben. Eine genaue Beschreibung dieser Schaltung finden Sie in 'Tietze, Schenk: Halbleiterschaltungstechnik'. Versuchen Sie, durch Variation des Potentiometerwiderstands die drei Fälle - Schwingfall, aperiodischer Grenzfall und Kriechfall - zu simulieren.

Zubehör:

Experimentier-Steckplatine mit 1 Transistor (2N2219A, npn) und 3 Operationsverstärkern (LM741) sowie diversen Verbindungskabeln, Dioden, Widerständen, Kondensatoren (nötigenfalls benachbarte Werte verwenden!)

Funktionsgenerator (0,2Hz .. 2MHz; Sinus oder Rechteck oder Dreieck; 0 .. $\pm 10\text{V}$)

Oszilloskop (Tektronix , 2 Kanäle))

Literatur:

Transistorverstärker:

Böger, Kähler, Weigt: *Bauelemente der Elektronik und ihre Anwendungen*, 3.Aufl., Kap.10, speziell 10.6.1

Bishop: *Einführung in lineare elektronische Schaltungen* (1977), Kap.3

Operationsverstärker:

Bishop: *Einführung in lineare elektronische Schaltungen* (1977), Kap.5.7, 6.1, 6.2, 7

Weddigen, Jüngst: *Elektronik* (1993)

Rohde: *Elektronik für Physiker*, Kap. 3 und 4

Physikalisches Anfängerpraktikum - P2

Operationsverstärker
P2-61

Versuchsvorbereitung von
Tobias Renz und **Raphael Schmager**

Gruppe: **Do-28**

Durchgeführt am 21. Juni 2012

Einleitung

In diesem Versuch werden wir uns mit zwei Grundbausteinen von Verstärkerschaltungen beschäftigen. Verstärkerschaltungen sind wichtige Hilfsmittel in physikalischen Labors und man sollte sich deshalb damit auskennen.

Zunächst werde ich einige Grundlagen behandeln, bevor ich die einzelnen Aufgaben des Versuchs erläutere.

0 Grundlagen

0.1 Der Transistor

Ein Transistor ist aus drei dotierten Halbleiterschichten aufgebaut, wobei die mittlere Schicht sehr dünn ist und anders dotiert wie die zwei äußeren Schichten. Es kann somit entweder npn-Transistoren oder pnp-Transistoren geben. Die erste Schicht wird als Emitter (E), die mittlere als Basis (B) und die dritte als Kollektor (C) bezeichnet.

Durch Dotierung wird die geringe Leitfähigkeit der Halbleiter erhöht. Dabei unterscheidet man zwischen n- und p-Dotierung.

Bei der **n-Dotierung** werden Fremdatome eingebracht, die ein Valenzelektron mehr besitzen als die Atome des Halbleiters. Hat man einen Halbleiter aus Germanium (vierwertig), so kann mit Arsen (fünfwertig) dotiert werden. Dabei verbinden sich vier der fünf Valenzelektronen von Arsen mit vier Valenzelektronen benachbarter Germanium Atome. Das fünfte Elektron ist ungebunden und erhöht somit die elektrische Leitfähigkeit.

Bei der **p-Dotierung** hingegen wird ein ein Fremdatom benutzt, das ein Valenzelektron weniger besitzt als die Atome des Halbleiters. Ein Valenzelektron des Halbleiteratoms bleibt somit ungepaart und es entsteht ein sogenanntes Defektelektron. Dadurch, dass ein benachbartes Valenzelektron in dieses Loch "springen" kann wird somit auch die elektrische Leitfähigkeit erhöht. Ein solches Loch wird als bewegliche positive Ladung aufgefasst.

0.1.1 Halbleiterdiode

Bringt man nun ein n-Dotierten und einen p-Dotierten Halbleiter zusammen so entsteht eine Diode. Bei diesem np-Übergang kann man nun drei Fälle betrachten:

- legt man keine äußere Spannung an, so wandern freie Elektronen der n-Schicht am Übergang in die p-Schicht und freie Defektelektronen aus der p-Schicht in die n-Schicht. An der Grenzschicht kommt es also zur Rekombination von Elektronen mit Defektelektronen und somit verarmt die Grenzschicht an Ladungsträgern. Es entsteht die sogenannte Sperrschicht.
- legt man nun den positiven Pol einer externen Spannungsquelle an die n-Schicht, so werden die freien Elektronen aus der n-Schicht gezogen und die freien Defektelektronen aus

der p-Schicht. Die Sperrschicht wird somit vergrößert. Die Spannung ist in **Sperrrichtung** angelegt.

- legt man nun den positiven Pol an die p-Schicht, so ist die Diode in Durchlassrichtung geschaltet. Die Sperrschicht wird abgebaut und es kann ein elektrischer Strom fließen.

Einen Transistor wir in der Regel so an eine Spannungsquelle angeschlossen, dass die Basis-Emitter-Diode (BE-Diode) in Durchlassrichtung und die Basis-Kollektor-Diode (BC-Diode) in Sperrichtung gepolt ist. Ist der Transistor so angeschlossen, so wird es als Verstärkerbetrieb bezeichnet. Fließt zunächst kein Emitter-Basis Strom, so kann auch kein Emitter-Kollektor Strom fließen. Fließt aber nun ein Emitter-Basis Strom, so durchbrechen die meisten Elektronen die sehr dünne Basisschicht und gelangen zum Kollektor. Es wird somit der geringe Emitter-Basis Strom verstärkt.

0.2 Der Operationsverstärker $\mu A741$

Der Operationsverstärker (OPV) $\mu A741$ wurde 1968 entwickelt und wird auch heute noch produziert und eingesetzt. Dieses Modell ist also sozusagen der Urvater heutiger OPV. Das Schaltbild des OPV $\mu A741$ besteht aus 20 Transistoren, 11 Widerständen und einem Kondensator und ist deshalb recht umfangreich. Hier wird das Prinzip des Operationsverstärkers an einer einfacheren Prinzipschaltskizze erläutert.

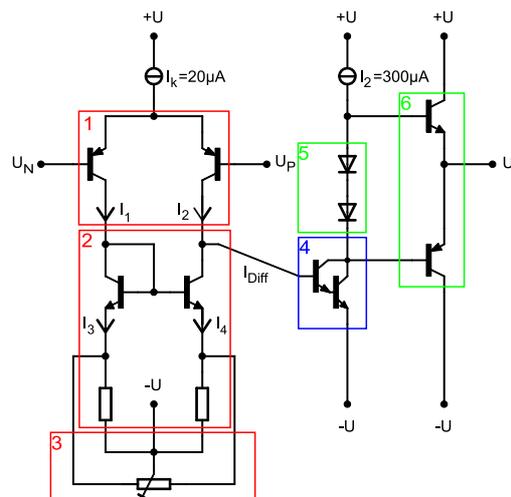


Abbildung 1: Prinzipschaltskizze eines OPV

Der OPV setzt sich drei Schaltelementen den sogenannten Stufen zusammen. Die sind die Eingangsstufe (rot), die Verstärkerstufe (blau) und die Endstufe (grün). Es wird angenommen, dass für die beiden positiven Eingangsspannungen U_N, U_P gilt:

$$U_N > U_P \tag{1}$$

Eingangsstufe:

Die Eingangsstufe ist aus drei verschiedenen Elementen aufgebaut

- Differenzverstärker (1): Der Strom wird am Differenzverstärker antiproportional zur Eingangsspannung geregelt, man erhält hier also $I_2 > I_1$.
- Stromspiegel (2): Der Stromspiegel ist aus zwei identischen npn-Transistoren aufgebaut und beide sind an ein gemeinsames Basispotential und an ein identisches Emitterpotential angeschlossen. Dadurch ist ihr Basisstrom identisch und somit auch der Kollektorstrom identisch, also $I_3 = I_4$. Da bei uns $I_2 > I_1$ ist, fließt die Differenz $I_{diff} = I_2 - I_1$ zur Verstärkerstufe ab.
- Nullpunktseinstellung (3): Durch den regelbaren Widerstand lässt sich das Emitterpotential nachjustieren.

Verstärkerstufe (4):

Es werden zwei hintereinander geschaltete npn-Transistoren zur Verstärkung benutzt, wobei sich deren Verstärkungsfaktoren multiplizieren. Die Verstärkung ist aber von der angeschlossenen Last abhängig und kann deshalb nicht als Ausgang verwendet werden.

Endstufe (grün):

- Spannungsteiler (5): Durch die beiden Dioden werden die Arbeitspunkte der komplementären Transistoren des Emitterfolgers auf das richtige Potential zu heben.
- komplementärer Emitterfolger (6): Dadurch lässt sich ein hoher Wirkungsgrad erreichen und der Emitterfolger dient als Impedanzwandler.

0.3 der ideale Operationsverstärker

Für einen idealen Operationsverstärker gelten die "drei goldenen Regeln":

- 1 $\nu \rightarrow \infty$: Die Verstärkung ν ist unendlich. Daraus folgt dann, dass $U_N \approx U_P$, da sonst der Ausgang übersteuern würde.
- 2 $R_E \rightarrow \infty$: Der Eingangswiderstand ist unendlich groß und es fließt somit kein Strom in den OPV.
- 3 $R_A \rightarrow 0$: Der Ausgangswiderstand ist Null, d.h. die Ausgangsspannung ist unabhängig vom Ausgangsstrom.

1 Emitterschaltung

Eine Transistorschaltung wird immer danach benannt, an welchem Anschluss die Erde (der Ground) angeschlossen ist. Für die Emitterschaltung wird meistens ein npn-Transistor verwendet und ist folgendermaßen aufgebaut.

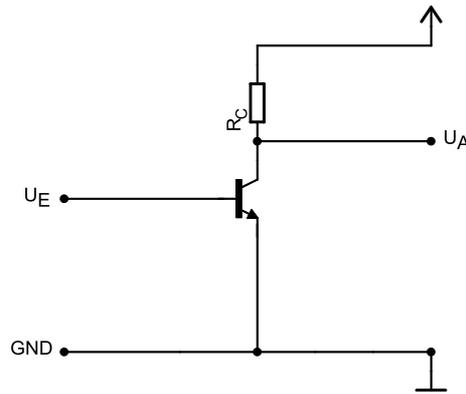


Abbildung 2: Emitterschaltung

Die Emitterschaltung ist die Transistorgrundschaltung mit der höchsten Strom und Spannungsverstärkung.

$$\frac{I_A}{I_E} = v_i = \beta \quad (2)$$

wobei I_A (I_E) der Ausgangsstrom (Eingangsstrom) ist.

$$\frac{U_A}{U_E} = v_u = -\beta \cdot \frac{R_C}{r_B} \quad (3)$$

wobei r_B der Eingangswiderstand des Transistors ist.

Die Strom- und Spannungsverstärkung ist somit Abhängig vom Verstärkungsfaktor β des Transistors. Dies ist ein Nachteil, da beim Austausch des Transistors Änderungen in Strom und Spannungsverstärkung auftreten. Der Zusammenhang zwischen Eingangsspannung und Basisstrom (I_E) ist abhängig vom Basis-Emitter Widerstand und dieser ist temperaturabhängig. Dadurch ist der Ausgangsstrom auch von der Temperatur abhängig.

Aus diesen Gründen kann dieser Aufbau in dieser Form in den meisten Fällen nicht genutzt werden, sondern muss verändert werden.

1.1 Einstufiger gleichstromgegekoppelter Transistorvorverstärker

Für die Stromgegenkopplung wird ein zusätzlicher Widerstand R_E in die Emitterschaltung eingefügt. Wird nun die Eingangsspannung U_E erhöht, so fließt ein größerer Basisstrom und damit auch ein größerer Strom durch den Widerstand R_E , an welchen nun eine höhere Spannung abfällt. Das Emitterpotential wird angehoben und die Spannungsdifferenz zwischen Basis und Emitter somit abgesenkt. Dies wirkt somit dem Anstieg des Ausgangsstroms entgegen.

Dadurch wird die Spannungsverstärkung reduziert, aber gleichzeitig stabilisiert und unabhängig von den Eigenschaften des Transistors gemacht.

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

Bei sehr schnell veränderlichen Signalen wird zusätzlich ein Kondensator C_E so eingebaut, dass er den Widerstand R_E überbrückt. Dies ist dann die sogenannte Gleichstromgegenkopplung.

Die Impedanz eines Kondensators ist $Z = \frac{1}{i\omega C}$, somit verhält sich die Schaltung für Gleichstromanteile ($\omega \ll 1$) wie ohne Kondensator und für schnell ändernde Signale ($\omega \gg 1$) verhält sich die Schaltung ähnlich einer "reinen" Emitterschaltung.

Es soll nun der einstufige Transistorvorverstärker aufgebaut werden.

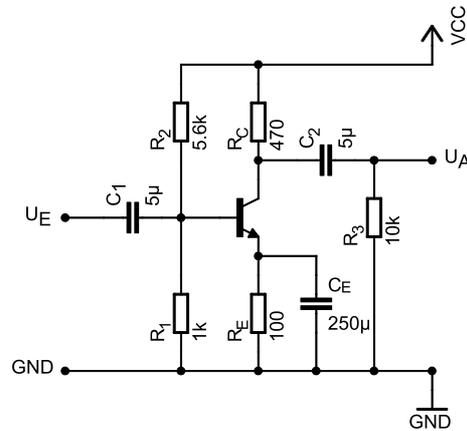


Abbildung 3: Einstufiger Transistorvorverstärker

Die Widerstände R_1 und R_2 heben das Potential des Eingangssignals an und es kann somit der Arbeitspunkt eingestellt werden. Dies ist wichtig, wenn bipolare Signale angelegt werden. Da ein npn-Transistor verhält sich eingangsseitig wie eine Diode und reagiert somit nur auf positive Signale oberhalb der Diodenknicke Spannung U_D . Von einem angelegten Sinusssignal wird somit nur die positive Halbwelle oberhalb von U_D verstärkt. Durch die Widerstände kann der Arbeitspunkt nun so eingestellt werden, dass nur noch positive Signale oberhalb U_D anliegen. Die Kondensatoren C_1 und C_2 dienen dazu die Verschiebung des Ausgangssignals wieder rückgängig zu machen, da sie nur Wechselanteile des Eingangs- bzw. Ausgangssignals durchlassen.

1.2 Dreiecksspannung bei Gleichstromgegenkopplung

Nun wird dem Verstärker als Eingangssignal eine Dreiecksspannung mittlerer Frequenz von ca. 1kHz zugeführt und das Ausgangssignal oszilloskopisch beobachtet. Dabei soll die Amplitude der Eingangsspannung so variiert werden, dass die Ausgangsamplitude einmal eine Spannung von $3 V_{SS}$ und einmal eine Spannung von $10 V_{SS}$ hat. Die Verstärkung lässt sich dann wie folgt berechnen:

$$\nu_u = \frac{U_A}{U_E} \quad (5)$$

1.3 Dreiecksspannung bei Stromgegenkopplung

Es wird nun der Kondensator entfernt und man erhält somit einen stromgegengekoppelten Verstärker. Nun soll wieder das Ausgangssignal bei verschiedenen Amplituden beobachtet werden und der Verstärkungsfaktor bestimmt werden.

Im Gegensatz zur Gleichstromgegenkopplung kann der Verstärkungsfaktor mit Hilfe des Kleinsignalverhaltens hergeleitet werden. Beim Kleinsignalverhalten wird eine komplexe Schaltung vereinfacht durch Netzwerke linearer Bauelemente beschrieben. Dabei werden alle Potentialquellen auf Masse gelegt betrachtet und lineare Ersatzschaltbilder für nichtlineare Bauelemente eingeführt.

Ein Transistor kann dann durch zwei Widerstände dargestellt werden, einem sehr kleinen Basiswiderstand r_B und einem sehr großen Kollektorwiderstand r_C .

Es ergibt sich folgendes Ersatzschaltbild:

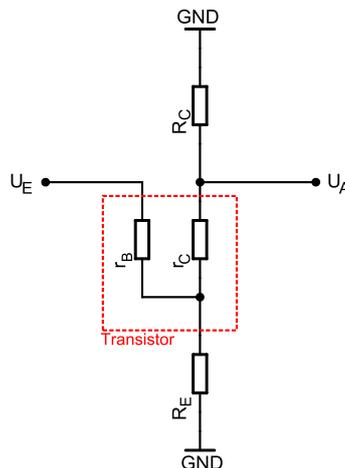


Abbildung 4: stromgegekoppelte Grundschaltung für Kleinsignalnäherung

Für den Verstärkungsfaktor gilt:

$$|\nu_u| = \left| \frac{U_A}{U_E} \right| = \frac{Z_A \cdot I_A}{Z_E \cdot I_E} \quad (6)$$

Nun müssen die Eingangs- bzw. Ausgangsimpedanz bestimmt werden. Dabei entspricht + einer Reihenschaltung und || einer Parallelschaltung zweier Widerstände. Außerdem wird genähert, dass in einer Reihenschaltung (Parallelschaltung) der größte (kleinste) Widerstand überwiegt. Nun wird noch der jeweilige Widerstand unterschiedlich gewichtet, je nachdem welcher Strom ihn durchläuft.

Bei der Berechnung der Eingangsimpedanz wird r_B mit 1 gewichtet ($I_E = 1$) und der Widerstand r_C mit β ($= \frac{I_A}{I_E} = I_A$). R_E muss somit mit $\beta + 1$ und R_C mit 0 gewichtet werden. Damit ergibt sich die Eingangsimpedanz zu:

$$\begin{aligned} Z_E &= r_B + (\beta \cdot r_C || (\beta + 1) \cdot R_E) \\ &\approx r_B + (\beta + 1) \cdot R_E \\ &\approx R_E \cdot (\beta + 1) \end{aligned} \quad (7)$$

Analog kann auch die Ausgangsimpedanz berechnet werden.

Hier wird R_C und r_C mit 1 ($I_A = 1$) gewichtet, r_B mit $\frac{1}{\beta}$ ($= \frac{I_E}{I_A} = I_E$) und R_E mit $1 + \frac{1}{\beta}$ ($=$

$I_A + I_E$).

Damit ergibt sich die Ausgangsimpedanz zu:

$$\begin{aligned}
 Z_A &= R_C \parallel \left(r_C + \left(\frac{r_B}{\beta} \parallel \left(1 + \frac{1}{\beta} \right) R_E \right) \right) \\
 &\approx R_C \parallel \left(r_C + \frac{r_B}{\beta} \right) \\
 &\approx R_C \parallel r_C \\
 &\approx R_C
 \end{aligned} \tag{8}$$

Nun kann endlich der Verstärkungsfaktor berechnet werden:

$$\begin{aligned}
 |\nu_u| &= \frac{Z_A \cdot I_A}{Z_E \cdot I_E} \\
 &= \frac{R_C \cdot I_A}{R_E \cdot (\beta + 1) \cdot I_E} \\
 &= \frac{R_C \cdot I_A \cdot \beta}{R_E \cdot (\beta + 1) \cdot I_A} \\
 &= \frac{R_C}{R_E} \cdot \frac{\beta}{\beta + 1} \\
 &\approx \frac{R_C}{R_E} = -\frac{R_C}{R_E}
 \end{aligned} \tag{9}$$

Wobei sich das Vorzeichen aus Gleichung (4) ergibt. Es wurde also gezeigt, dass sich der Verstärkungsfaktor für die stromgegekoppelte Verstärkerschaltung mit vielen Näherungen berechnet werden kann. Dies gilt auch nur für kleine Signale, deshalb wird erwartet, dass bei größerer Amplitude der gemessene Wert vom berechneten Wert abweicht.

1.4 Frequenzabhängigkeit der Verstärkung

Es soll die Verstärkung des Strom- sowie Gleichstromgegekoppelten Verstärkers bei verschiedenen Frequenzen bestimmt werden.

Es werden für niederfrequente Signale sehr niedrige Verstärkungen erwartet, da die Kopplungskondensatoren als Hochpass fungieren.

Zusätzlich nimmt die Verstärkung an der gleichstromgegekoppelten Schaltung für große Frequenzen stark zu.

2 Nichtinvertierende Grundschaltung

Ein OPV kann ohne Rückkopplung oder Mitkopplung aufgrund seiner extrem hohen Verstärkung nur als Schalter bzw. Komparator verwendet werden. Damit er als Verstärker fungieren kann, muss er mit Gegenkopplung betrieben werden. Dabei wird ein Teil des Ausgangssignals mit invertiertem Vorzeichen so auf den Eingang zurückgekoppelt, dass Veränderungen

des Eingangssignals entgegen gewirkt wird. Es wird also immer auf den invertierenden Eingang zurückgekoppelt.

2.1 Nichtinvertierender Verstärker

Die nichtinvertierende Grundsaltung ist folgendermaßen aufgebaut:

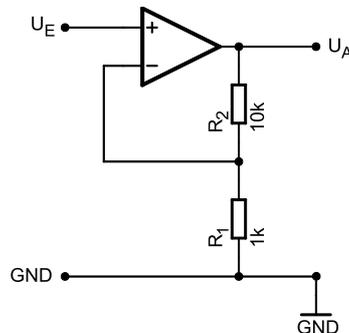


Abbildung 5: nichtinvertierende Grundsaltung

Die Verstärkung eines idealen Operationsverstärker ist nach der zweiten Goldenen Regel unendlich. Um nun am Ausgang ein vom maximalen Ausschlag unterschiedliche Spannung messen, muss die Spannungsdifferenz der Eingänge null sein. Daraus folgt, dass am invertierenden Eingang auch die Eingangsspannung U_E anliegen.

Wir betrachten nun die Spannungen an den Widerständen R_1 und R_2 (Spannungsteiler). Wobei die Spannung U_1 (U_2) am Widerstand R_1 (R_2) abfällt und für die Gesamtspannung $U_A = U_1 + U_2$ gilt.

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{R_2}{R_1} \quad (10)$$

$$\Rightarrow \frac{U_1}{U_1} + \frac{U_2}{U_1} = \frac{U_A}{U_1} = 1 + \frac{R_2}{R_1} \quad (11)$$

mit $U_1 = U_E$ folgt:

$$U_A = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \cdot U_E \quad (12)$$

Damit ergibt sich die Verstärkung zu:

$$\nu_u = 1 + \frac{R_2}{R_1} = 11 \quad (13)$$

2.2 Eingangswiderstand

Es soll nun der hohe Eingangswiderstand und der kleine Ausgangswiderstand der Schaltung gezeigt werden.

Um den hohen Eingangswiderstand der Schaltung zu zeigen, wird ein Messwiderstand R_M in Reihe in die Eingangsleitung geschaltet und sowohl die Eingangsspannung U_E also auch die über

dem Widerstand R_M abfallende Spannung U_M gemessen. Dies kann nun wie ein Spannungsteiler betrachtet werden und man erhält:

$$\frac{U_E}{U_M} = \frac{R_E + R_M}{R_M} \quad (14)$$

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

Der Ausgangswiderstand R_A lässt sich nicht so einfach bestimmen, aber eine grobe Abschätzung lässt sich einfach durchführen. Man schließt einen Potentiometer R_M parallel zum Ausgang und verändert somit den Gesamtwiderstand R_G :

$$R_G = \frac{1}{\frac{1}{R_A} + \frac{1}{R_M}} \quad (15)$$

und erhält für die neue Ausgangsspannung U_{A*} :

$$U_{A*} = R_A \cdot I \left(\frac{R_M}{R_A + R_M} \right) \quad (16)$$

Man sieht, dass so lange der Potentiometerwiderstand deutlich größer als der Ausgangswiderstand ist, sich die Ausgangsspannung nicht ändert.

Ist $R_M = R_A$ so erhält man:

$$U_{A*} = \frac{1}{2} \cdot R_A \cdot I = \frac{1}{2} \cdot U_A \quad (17)$$

2.3 Frequenzabhängigkeit

Nun soll noch die Verstärkung in Abhängigkeit von der Frequenz gemessen werden.

Aufgrund der Gegenkopplung erwartet man eine konstante Verstärkung in einem bestimmten Frequenzbereich. Ab einer Grenzfrequenz sollte die Verstärkung dann abfallen.

3 Die invertierende Grundschtaltung

Dies ist wohl die wichtigste und am meisten gebrauchte Grundschtaltung von Operationsverstärkern.

3.1 Invertierender Verstärker

Dabei liegt die Eingangsspannung nicht wie bei der nichtinvertierenden Grundschtaltung am positiven Eingang angelegt, sondern über einen Widerstand R_1 am invertierten Eingang (-). Der positive Eingang liegt dabei auf Masse und es wird über einen zweiten Widerstand R_2 ein Teil der Ausgangsspannung wieder auf den negativen Eingang zurückgeführt.

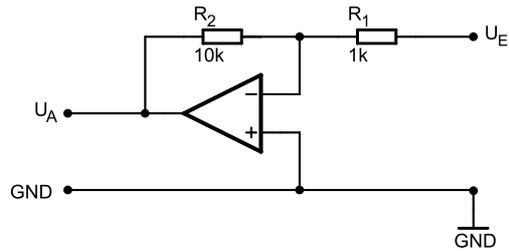


Abbildung 6: invertierende Grundschtaltung

Um die Verstärkung zu berechnen, benutzen wir auch hier wieder die erste Goldenen Regel, die besagt, dass die Verstärkung unendlich ist. Somit muss die Differenzspannung zwischen den Eingängen null sein. Somit liegt also der negative sowie der positive Eingang auf dem Nullpotential $U_N (= \text{GND})$. Die gesamte Eingangsspannung muss folglich am Widerstand R_1 abfallen.

$$I_E = \frac{U_E}{R_1} \quad (18)$$

Die zweite Goldene Regel besagt, dass der Eingangswiderstand unendlich hoch ist und damit kann der gesamte Strom I_E nur über R_2 zum Ausgang weiterfließen.

$$U_A = R_2 \cdot I_A = -R_2 \cdot I_E \quad (19)$$

Es gilt $I_A = -I_E$ da die beiden Ströme in entgegengesetzter Richtung gemessen werden. Damit ergibt sich für die Verstärkung ν_u :

$$U_A = -R_2 \cdot I_E = -\frac{R_2}{R_1} \cdot U_E = \nu_u \cdot U_E \quad (20)$$

mit $\nu_u = -\frac{R_2}{R_1}$

3.2 Addierer für zwei Eingangssignale

Es soll nun ein Addierer für zwei Eingangssignale aufgebaut werden und als Eingangssignale können Dreieck-, Rechteck-, Sinus- und Gleichspannungen verwendet werden.

Ein Addierer ist fast genau genau gleich aufgebaut wie der invertierende Verstärker aus Aufgabe 3.1. Diese Schaltung wird nur um einen Eingang erweitert.

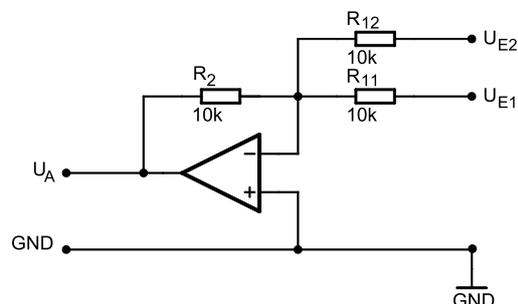


Abbildung 7: Addierer

Die beiden Eingangssignale U_{E1} und U_{E2} werden addiert und die negierte Summe ausgegeben. Über die Widerstände R_{12} bzw. R_{11} lässt sich das Eingangssignal gewichten.

Da wieder der Eingangswiderstand des OPV unendlich groß ist, kann der gesamte Strom ($I_E + I_A$) nur über den Widerstand R_2 zum Ausgang weiterfließen:

$$U_A = -R_2 \cdot (I_{E1} + I_{E2}) \quad (21)$$

mit:

$$I_{E1} = \frac{U_{E1}}{R_{11}} \quad I_{E2} = \frac{U_{E2}}{R_{12}} \quad (22)$$

Damit ergibt sich die Ausgangsspannung zu:

$$U_A = -R_2 \cdot \left(\frac{U_{E1}}{R_{11}} + \frac{U_{E2}}{R_{12}} \right) \quad (23)$$

Man sieht nun, dass über die beiden Widerstände R_{12} bzw. R_{11} sich die Eingangssignale gewichten lassen und über den Widerstand R_2 das Ausgangssignal noch verstärkt werden kann. Da bei uns alle Widerstände gleich groß sind ergibt sich:

$$U_A = -(U_{E1} + U_{E2}) \quad (24)$$

3.3 Integrierer

Es soll nun ein Integrierer aufgebaut werden und als Eingangssignal sollen Dreiecks- und Rechteckspannungen mit niedriger Frequenz und großer Amplitude verwendet werden.

Der Integrierer ist zur invertierenden Grundschaltung nur dadurch verändert, dass der Widerstand R_2 durch einen Kondensator C ersetzt wird. Im Schaltbild sieht man noch einen Widerstand R_S , der im folgenden nicht beachtet wird, da er nur zur Stabilisierung dient.

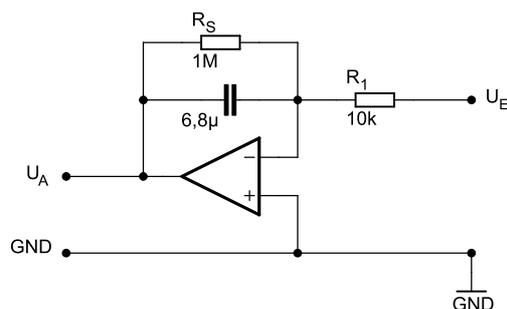


Abbildung 8: Integrierer

Der positive und negative Eingang liegen wieder auf dem Nullpotential U_N und der Eingangswiderstand des OPV unendlich ist fließt der gesamte Eingangsstrom I_E über den Kondensator:

$$I_C = -I_E \quad (25)$$

Für die Ausgangsspannung U_A gilt:

$$U_A = \frac{Q}{C} = \frac{1}{C} \cdot \int_0^t I_C(t) dt + Q_0 = -\frac{1}{R \cdot C} \cdot \int_0^t U_E(t) dt + U_A(0) \quad (26)$$

Man sieht nun, dass das Eingangssignal integriert wird und die Negation davon ausgegeben wird.

3.4 Differenzierer

Den Differenzierer erhält man ganz leicht aus dem Integrierer, indem man den Widerstand an der Eingangsspannung mit dem Kondensator tauscht. In der Vorbereitungshilfe ist zusätzlich noch ein Widerstand in Reihe zum Kondensator geschaltet, da er aber am Prinzip des Differenzierers nichts ändert, wurde er hier weggelassen.

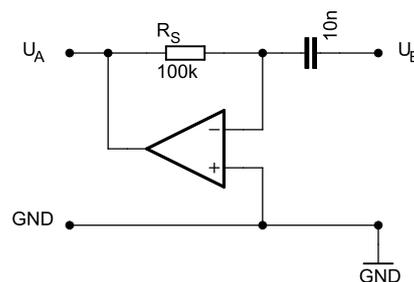


Abbildung 9: Differenzierer

Der Gesamte Eingangsstrom I_E fließt durch den Widerstand R_S und somit gilt für die Ausgangsspannung:

$$U_A = R_S \cdot I_A = -R_S \cdot I_E \quad (27)$$

wobei der Strom I_E folgendermaßen mit der Eingangsspannung verknüpft ist:

$$I_E = \dot{Q} = C \cdot \frac{dU_E}{dt} \quad (28)$$

Damit ergibt sich sofort, dass die Ausgangsspannung proportional zur negierten Ableitung der Eingangsspannung ist:

$$U_A = -R_S \cdot C \cdot \frac{dU_E}{dt} \quad (29)$$

4 Komplexere Schaltungen mit Operationsverstärkern

In diesem Aufgabenteil werden jetzt noch etwas kompliziertere Schaltungen aufgebaut.

4.1 Einweggleichrichter

Aus einem bipolaren Signal wird mit Hilfe eines Einweggleichrichters ein unipolares Signal, indem nur Anteile eines bestimmten Vorzeichens durchgelassen werden.

Einfacher Einweggleichrichter

Bevor ein Einweggleichrichter mit Hilfe eines OPV besprochen wird, wird zunächst erst der "Einfache Einweggleichrichter" erläutert.

Wie schon gesagt, besteht er aus einer Diode und einem Widerstand R mit $R_{Durchlass} \ll R \ll R_{Sperr}$.

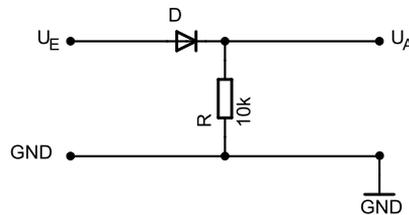


Abbildung 10: Einfacher Einweggleichrichter

Diese Diode ist so gepolt, dass die Komponenten des Eingangssignal mit positivem Vorzeichen durchgelassen werden und am Widerstand R abfallen. Komponenten mit negativem Vorzeichen fallen hingegen an der Diode (R_{Sperr} ab).

Der Nachteil ist nur, dass immer die Schwellspannung an der Diode abfällt und somit nicht die komplette Halbwelle ausgegeben wird.

Bei einem idealen Einweggleichrichter hingegen kann die Komplette Halbwelle passieren.

Idealer Einweggleichrichter

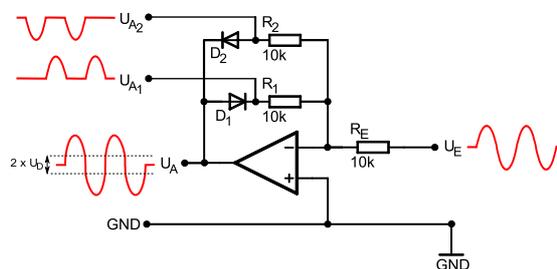


Abbildung 11: Einfacher Einweggleichrichter

U_E ist die Eingangsspannung, das in positives und negatives Signal aufgespalten wird und als Spannung U_{A1} bzw. U_{A2} ausgegeben wird - je nach Vorzeichen.

Die Gleichung ist eine Abwandlung des invertierenden Verstärkers, enthält jedoch zwei Gegenkopplungswege, von denen je nach aktuellem Vorzeichen nur einer aktiv ist.

Für die Widerstände gilt $R R_1 = R_2 = R_E = R$ und für die Ausgangsspannung ergibt sich dann:

$$U_A = -(R_D + R_{1/2}) \cdot I_E = -\frac{R_D}{R_E} \cdot U_E - U_E \tag{30}$$

wobei $U_D = \frac{R_D}{R_E} \cdot U_E$ ist. Greift man nun die Spannung nach dem Widerstand ab erhält man die am Ausgang die komplette Halbwelle, die aber negiert ist.

4.2 Generator für Dreiecks- und Rechteckspannungen

Mit zwei Operationsverstärkern soll ein Generator für Dreieck- und Rechteckspannungen aufgebaut werden.

Er besteht aus zwei OPV und generiert an einem Ausgang Rechteckspannung und gleichzeitig an einem anderen Ausgang Dreieckspannung, obwohl nur Gleichspannung angelegt wird.

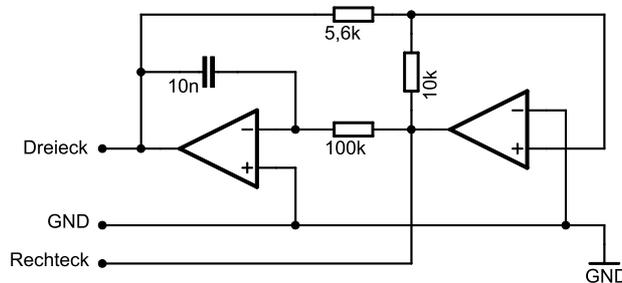


Abbildung 12: Generator für Dreieck- und Rechteckspannung

Der linke OPV arbeitet als Integrator und der rechte als Schmitt-Trigger, wobei der Schmitt-Trigger -15V bzw. $+15\text{V}$ ausgibt, je nachdem ob die Spannung am invertierenden oder am nichtinvertierenden Eingang höher ist.

Über die Gegenkopplung über den $5,6\text{k}\Omega$ und den $10\text{k}\Omega$ Widerstand liegt an den beiden Eingängen des Schmitt-Triggers immer eine Differenzspannung ungleich null an. Der OPV hat somit immer eine maximale Verstärkung und gibt somit immer -15V oder $+15\text{V}$ aus.

Nehmen wir an, es liegt am Ausgang des Schmitt-Triggers eine Spannung von -15V an, so wird der Kondensator aufgeladen (positive Ladung links). Nun wird ein Teil dieses positive Potential über den $5,6\text{k}\Omega$ Widerstand auf den nichtinvertierenden Eingang zurückgeführt, gleichzeitig wird aber auch das negative Ausgangspotential über den $10\text{k}\Omega$ auf diesen Eingang zurückgeführt. Solange das negative Potential überwiegt, gibt der OPV die -15V aus. Ist der Kondensator aber stark genug aufgeladen damit die positive Spannung überwiegt gibt der Schmitt-Trigger nun $+15\text{V}$ aus. Am Ausgang des Schmitt-Triggers kann als eine Rechteckspannung abgegriffen werden.

Am Ausgang des Integrators liegt nun eine zum Integral über die Rechteckspannung proportionale Spannung an. Dies ist die gewünschte Dreieckspannung.

4.3 Programmierte Differentialgleichung 2.Ordnung

Nun soll noch die Differentialgleichung zweiter Ordnung gelöst werden.

$$\ddot{x}(t) + 2\beta\dot{x}(t) = -\omega_0x(t) \quad (31)$$

Die Lösung dieser DGl ist wohlbekannt und dieser Schaltung dient somit dazu Sinuswechselspannungen zu erzeugen. Mithilfe des Potentiometers kann die Dämpfung (β) variiert werden.

Um diese Gleichung zu simulieren, werden zwei Integrationsglieder in der Hinleitung und ein negativ verstärkendes Glied in der Rückleitung benötigt.

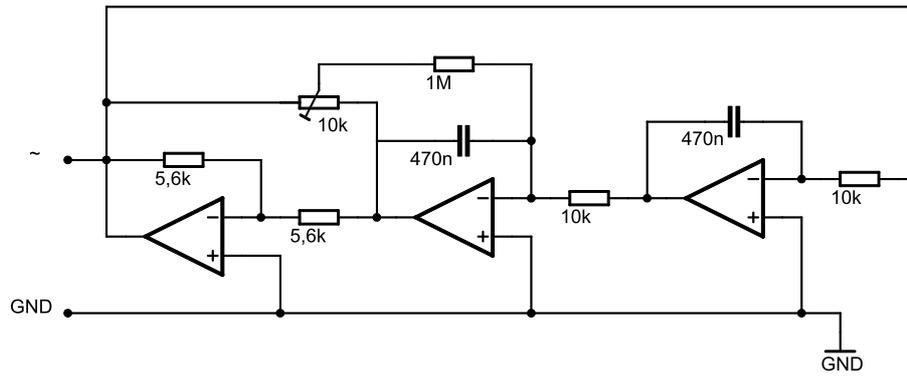


Abbildung 13: Sinusgenerator

Man erkennt die beiden Integrierer (rechts) und den invertierenden Verstärker (links). Der ganz rechte Eingang entspricht der $\ddot{x}(t)$ Komponente. An diesen Eingang werden die $\dot{x}(t)$ Komponente (Mittelabgriff mit dem Potentiometer) und die $x(t)$ Komponente zugeführt. Man erhält also die gewünschte DGL, und die Dämpfung kann über den Potentiometer variiert werden um die drei Fälle: Schwingfall, Kriechfall und aperiodischer Grenzfall zu simulieren.

Physikalisches Anfängerpraktikum - P2

Operationsverstärker
P2-59

Auswertung von
Tobias Renz und **Raphael Schmager**

Gruppe: **Do-28**

Durchgeführt am 21. Juni 2012

1 Emitterschaltung eines Transistors

1.1 Einstufiger gleichstromgegekoppelter Transistorvorverstärker

Als erstes haben wir den einstufigen gleichstromgegekoppelter Transistorvorverstärker nach der Schaltskizze in der Vorbereitung aufgebaut. Da aber keine Kondensatoren mit $5\mu\text{F}$ zur Verfügung standen benutzen wir für die zwei Kopplungskondensatoren (C_1 und C_2) Kondensatoren mit einer Kapazität von $4,7\mu\text{F}$. Die Funktionsweise der einzelnen Bauelemente und die Wirkungsweise der Gegenkopplung wurde bereits in der Vorbereitung ausführlich diskutiert und es wird an dieser Stelle auf die Vorbereitung verwiesen.

Nun sollte noch die Lage des Arbeitspunktes bestimmt werden. Dazu haben wir die Spannung U_1 zwischen Basis und Ground gemessen. Dies Spannung entspricht gerade dem Arbeitspunkt. Wir haben folgenden Wert gemessen:

$$U_1 = 2,22\text{V} \quad (1)$$

Am zweiten Widerstand des Spannungsteilers fällt somit eine Spannung von:

$$U_2 = U_1 \cdot \frac{R_2}{R_1} = 2,22\text{V} \cdot 5,6 = 12,43 \quad (2)$$

und die Versorgungsspannung ergibt sich aus der Summe von U_1 und U_2 zu:

$$2,22\text{V} + 12,43\text{V} = 14,6\text{V} \quad (3)$$

Die Betriebsspannung sollte laut Vorbereitungshilfe 15V betragen, unser berechneter Wert stimmt somit recht gut mit dem erwarteten Wert überein.

1.2 Verstärkung des gleichstromgegekoppelten Transistorvorverstärkers

Um den Verstärkungsfaktor zu bestimmen haben wir dem Verstärker als Eingangssignal eine Dreiecksspannung mit einer Frequenz von 1kHz zugeführt und mithilfe des Oszilloskop die Eingangsspannung sowie die Ausgangsspannung gemessen. Bei den Spannungen haben wir jeweils den Spitze-Spitze Wert gemessen.

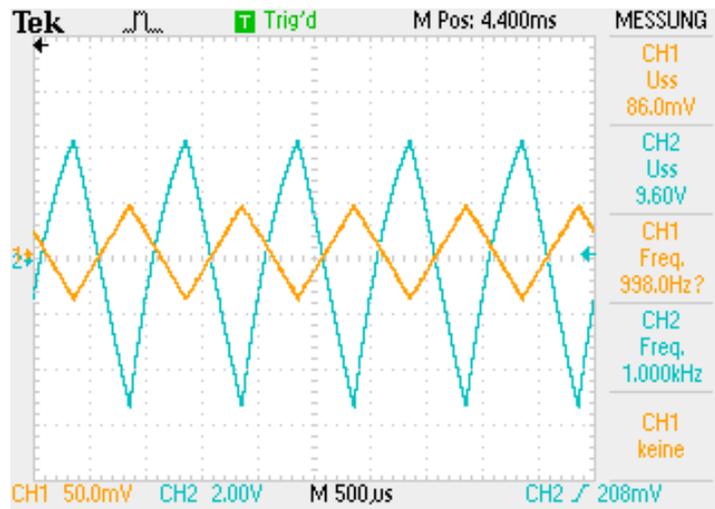


Abbildung 1: Bestimmung des Verstärkungsfaktors

Hier haben wir von einer Messung ein Bild gemacht. Man sieht, dass wenn die Eingangsspannung (orange) ein Maximum hat, die Ausgangsspannung (blau) gerade ein Minimum hat. Dies bedeutet, dass der Verstärkungsfaktor negativ sein muss.

Aus unseren Messwerten kann dann der Verstärkungsfaktor ν berechnet werden:

$$\nu = \frac{U_A}{U_E} \quad (4)$$

Es ergaben sich folgende Messwerte:

$$\begin{aligned} CH_1: U_{Ein} &= 86,0mV & CH_2: U_{Aus} &= -9,68V & \Rightarrow \nu_u &= -112,6 \\ CH_1: U_{Ein} &= 44,0mV & CH_2: U_{Aus} &= -4,88V & \Rightarrow \nu_u &= -110,9 \end{aligned} \quad (5)$$

Als Mittelwert erhalten wir für die Verstärkung $\nu = -111,75 \pm 0,8\%$

1.3 Verstärkung des stromgegekoppelten Transistorvorverstärkers

Wir haben nun den Emitterkondensator C_e entfernt und erhalten somit Stromgegenkopplung. Die Verstärkung wurde in der Vorbereitung hergeleitet und ergibt sich genähert zu:

$$\nu_u = -\frac{R_C}{R_E} = -\frac{470\Omega}{100\Omega} = -4,7 \quad (6)$$

mit $R_C = 470\Omega$ und $R_E = 100\Omega$.

Wir haben am Eingang wieder eine Dreiecksspannung mit einer Frequenz von 1kHz angelegt und bei zwei verschiedenen Eingangsspannungen die Ausgangsspannung gemessen.



Abbildung 2: Bestimmung der Verstärkung

An den beiden Signalen sieht man wieder, dass die Verstärkung wie erwartet negativ ist.

Für unsere Messwerte und die zugehörige Verstärkung ergaben sich folgende Wert:

$$\begin{aligned}
 CH_1 : U_{Ein} &= 1,92V & CH_2 : U_{Aus} &= -8,32V & \Rightarrow \nu_u &= -4,33 \\
 CH_1 : U_{Ein} &= 0,88V & CH_2 : U_{Aus} &= -3,84V & \Rightarrow \nu_u &= -4,36
 \end{aligned} \tag{7}$$

Als Mittelwert erhalten wir für die Verstärkung $\nu = -4,35$. Eigentlich sollten wir eine Verstärkung von -4,7 erhalten. Unser Wert weicht um ca. 7% von diesem Wert ab. Diese Abweichung ist nicht zu groß und der theoretische Wert konnte somit verifiziert werden.

1.4 Verstärkung bei verschiedenen Frequenzen

Bei dieser Aufgabe haben wir die Abhängigkeit der Verstärkung von der Frequenz beim Strom- und Gleichstromgegekoppelten Verstärker untersucht. Dazu haben wir die Frequenz des Eingangssignals verändert und jeweils dazu die Eingangs- und Ausgangsspannung gemessen.

1.4.1 Stromgegekoppelter Verstärker

Zunächst haben wir den stromgegekoppelten Verstärker untersucht und haben folgende Messwerte aufgenommen und die Verstärkung $\nu_u = \frac{U_A}{U_E}$ zu jedem Messwert gemessen. Wir haben wieder die Spitze-Spitze Werte gemessen und CH1 entspricht der Eingangsspannung U_E und CH2 der Ausgangsspannung U_A

f/Hz	$CH_1 U_{1SS} / V$	$CH_2 U_{2SS} / V$	$\nu / 1$
10	1,34	-1,42	-1,06
25	1,32	-3,16	-2,39
50	1,3	-4,48	-3,45
100	1,28	-5,2	-4,06
500	1,28	-5,52	-4,31
1000	1,26	-5,52	-4,38
5000	1,34	-5,68	-4,24
10000	1,32	-5,6	-4,24
50000	1,32	-5,6	-4,24
100000	1,32	-5,6	-4,24

Tabelle 1: Verstärkung des stromgegekoppelten Verstärkers

Die Verstärkung sollte nun über der Frequenz aufgetragen werden. Aus Gründen der Übersichtlichkeit haben wir die Frequenz logarithmisch aufgetragen und an der y -Achse $-\nu_u$.

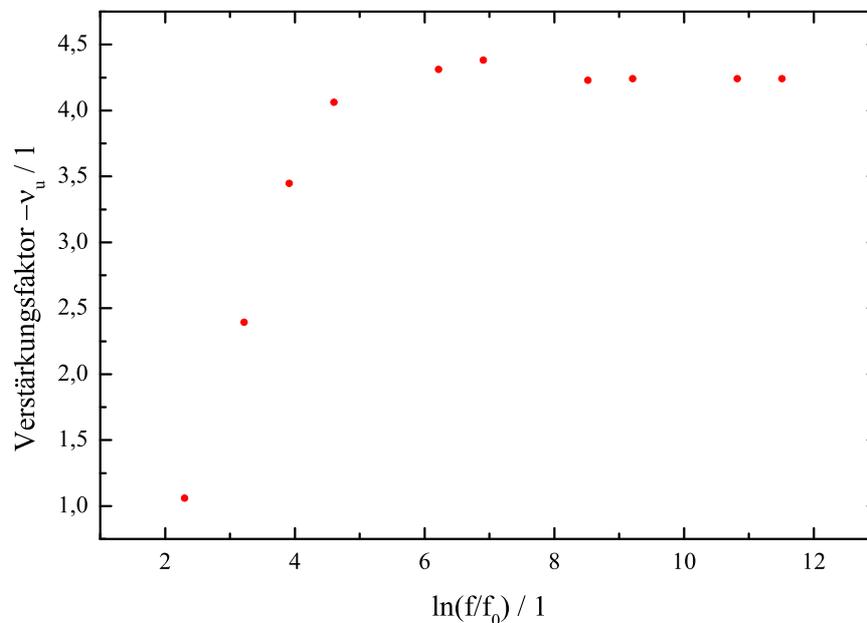


Abbildung 3: Verstärkung in Abhängigkeit der Frequenz

Man sieht, dass die Verstärkung bei niedrigen Frequenzen geringer ist und ab einer bestimmten Frequenz (ca. 200Hz) annähernd konstant ist. Da wir den Stromgegekoppelten Verstärker betrachten, sollte die Verstärkung eigentlich nicht frequenzabhängig sein. Das die Verstärkung bei niedrigen Frequenzen so gering ist, liegt an den Kopplungskondensatoren, die die Spannung bei niedrigen Frequenzen stark abschwächt.

1.4.2 Gleichstromgegekoppelter Verstärker

Nun haben wir die Verstärkung in Abhängigkeit der Frequenz beim gleichstromgegekoppelten Verstärker gemessen. Es ergaben sich folgende Messwerte:

f/Hz	$CH_1 U_{1SS} / \text{mV}$	$CH_2 U_{2SS} / \text{V}$	$\nu / 1$
10	120	-0,44	-3,667
25	119	-1,6	-13,445
50	117	-3,52	-30,085
100	114	-5,88	-51,579
500	112	-8,24	-73,571
1000	112	-8,48	-75,714
5000	112	-8,48	-75,714
10000	116	-8,64	-74,483
50000	116	-8,64	-74,483
100000	114	-8,64	-75,789

Tabelle 2: Verstärkung des gleichstromgegekoppelten Verstärkers

Wir haben nun wieder $-\nu_u$ über der logarithmischen Frequenz aufgetragen.

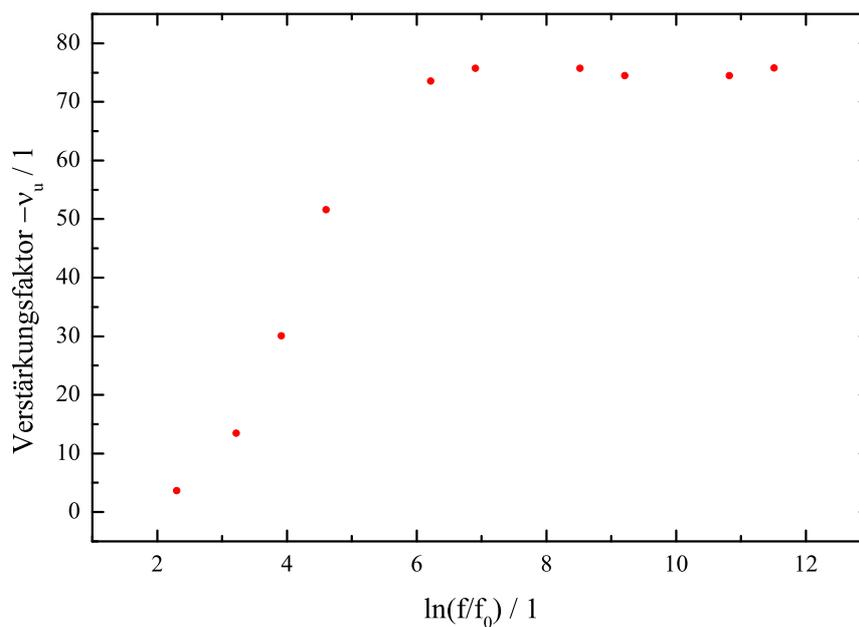


Abbildung 4: Verstärkung in Abhängigkeit der Frequenz

Die Frequenz nimmt mit steigender Frequenz zu und ist dann ab einer bestimmten Frequenz (ca. 500Hz) annähernd konstant bei einer Verstärkung von ca. -75. Beim Gleichstromgegekoppelten Verstärker ist parallel zum Widerstand noch ein Kondensator eingebaut. Bei niedrigen Frequenzen fließt fast der gesamte Strom über den Widerstand und man hat eine Stromge-

gengkoppelte Spannung mit Verstärkung $\nu_u = -\frac{R_C}{R_E}$ und außerdem die oben beschriebene Abschwächung durch die Kopplungskondensatoren. Bei höheren Frequenzen fließt fast der gesamte Strom über den Kondensator und man erhält einen Verstärker ohne Stromgegenkopplung und somit eine deutlich höhere Verstärkung. Aus diesen Gründen ist die Verstärkung bei niedrigen Frequenzen geringer.

Komisch ist, dass die Verstärkung nur bis zu einem Wert von ca. -75 ansteigt. In Aufgabe 1.2 haben wir die Verstärkung für diesen Verstärker bei einer Frequenz von 1kHz zu $\nu_u = -111,7$ bestimmt und hätten auch bei dieser Messung Verstärkungen in diesem Bereich erwartet. Da die gemessene Ausgangsspannung 10V nicht übersteigt und wir immer eine schöne Dreiecksspannung als Ausgangsspannung sehen konnten, sind wir uns sicher nicht übersteuert zu haben. Wir können deshalb leider nicht erkennen wo dieser Fehler gemacht wurde.

2 Grundschtaltung eines Operationsverstärkers

2.1 Nichtinvertierenden Operationsverstärker

Auf der Versuchsplatine wurde ein nichtinvertierender Operationsverstärker mit einer etwa zehnfachen Verstärkung aufgebaut. Am Eingang wurde eine Dreiecksspannung mit 1kHz angelegt. Das Aus- und Eingangssignal wurde oszilloskopisch beobachtet:

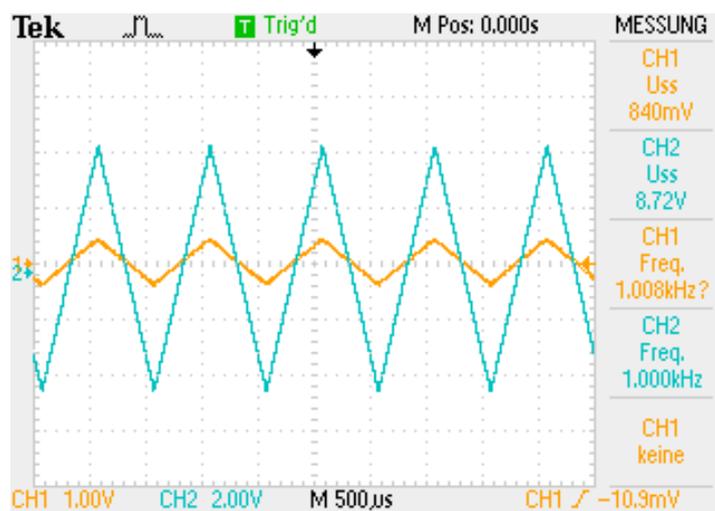


Abbildung 5:

Man erkennt, dass das Ausgangssignal das gleiche Vorzeichen, wie das Eingangssignal hat. Es wird also nicht invertiert.

Wir haben jeweils bei zwei Eingangsspannungen die dazugehörige Ausgangsspannung bestimmt. Damit kann der (positive) Verstärkungsfaktor berechnet werden:

$$\begin{aligned}
 CH_1 : U_{Ein} = 252mV & \quad CH_2 : U_{Aus} = 2,60V & \Rightarrow \nu_u = 10,32 \\
 CH_1 : U_{Ein} = 820mV & \quad CH_2 : U_{Aus} = 8,80V & \Rightarrow \nu_u = 10,73
 \end{aligned}
 \tag{8}$$

Der berechnete Verstärkungsfaktor ist:

$$\nu_u = 1 + \frac{R_2}{R_1} = 1 + \frac{10k\Omega}{1k\Omega} = 11 \quad (9)$$

Der Mittelwert unseres gemessenen Verstärkungsfaktors beträgt: 10,53. Dieser weicht zum berechneten Wert um 4,3% ab.

2.2 Ein -und Ausgangswiderstände

Wir haben nun den Ein -und Ausgangswiderstand der Schaltung gemessen. Um den Eingangswiderstand zu bestimmen haben wir einen $1M\Omega$ Vorwiderstand R_M verwendet. Dieser wurde zwischen Eingangssignal und nicht invertiertem Eingang am Operationsverstärker geschaltet. Nun haben wir die Spannungsdifferenz zwischen Eingang und Erde (GND) vor und hinter R_M gemessen. Grund dafür war, dass wir beides mit dem Oszilloskop (genauere Messung) welches auch auf dem gleichen geerdeten Potential lag, messen konnten.

$$U_{Ein} = 704mV \quad U_V = 352mV \quad \Rightarrow \quad U_m = U_{Ein} - U_V = 352mV = \frac{1}{2}U_{Ein} \quad (10)$$

Nach Gleichung 14 in der Vorbereitung ergibt sich der Vorwiderstand dann zu:

$$R_E = R_M \cdot \left(\frac{U_E}{U_M} - 1 \right) = R_M = 1M\Omega \quad (11)$$

Danach war noch der Ausgangswiderstand zu messen. Hier konnten wir nicht einfach einen Widerstand in Reihe schalten, da der Impedanzwandler im Operationsverstärker dauernd nachregelt; dieser ist extra so gebaut, dass wir eine sehr geringe Ausgangsimpedanz haben. Außerdem ist der Innenwiderstand des Oszilloskops sehr groß im Vergleich zu dem zu Messenden Ausgangswiderstand der Schaltung.

Es wird stattdessen ein Potentiometer parallel zum Ausgang eingebaut. Damit ändert sich der Gesamtwiderstand R_G (vgl. Formel 15 bis 17 in Vorbereitung).

Nun haben wir den Potentiometer so lange herunter geregelt, bis wir die halbe Ausgangsspannung erhielten. Den Widerstandswert des Potentiometers haben wir mit dem Multimeter welches uns zur Verfügung stand gemessen. Dieser entspricht nach Herleitung dem Ausgangswiderstand von. Also erhalten wir:

$$R_A = 112,3\Omega \quad (12)$$

2.3 Frequenzabhängigkeit der Verstärkung

Nun Bestimmen Sie die Verstärkung in Abhängigkeit von der Frequenz. Als Eingangsspannung wurde eine Sinuswechselspannung mit einer Amplitude von etwa $0,5V_{SS}$ gewählt.

Bei verschiedenen Frequenzen wurde nun jeweils Eingangs- und Ausgangsspannung abgelesen. In der Tabelle wurde auch gleich der Verstärkungsfaktor ν bestimmt. Bei 25kHz und bei 100kHz wurde jeweils ein Bild am Oszilloskop gemacht. Beim ersten Bild erkennt man noch eine schöne Verstärkung des Signals.

f/Hz	$CH_1 U_{1SS} / \text{V}$	$CH_2 U_{2SS} / \text{V}$	$\nu / 1$
10	0,504	5,52	10,952
100	0,504	5,44	10,794
1000	0,504	5,44	10,794
10000	0,52	5,8	11,154
25000	0,52	5,36	10,308
50000	0,52	4,32	8,308
75000	0,52	3,16	6,077
100000	0,528	2,48	4,697

Tabelle 3: Frequenzabhängige Verstärkung des nichtinvertierenden Verstärkers

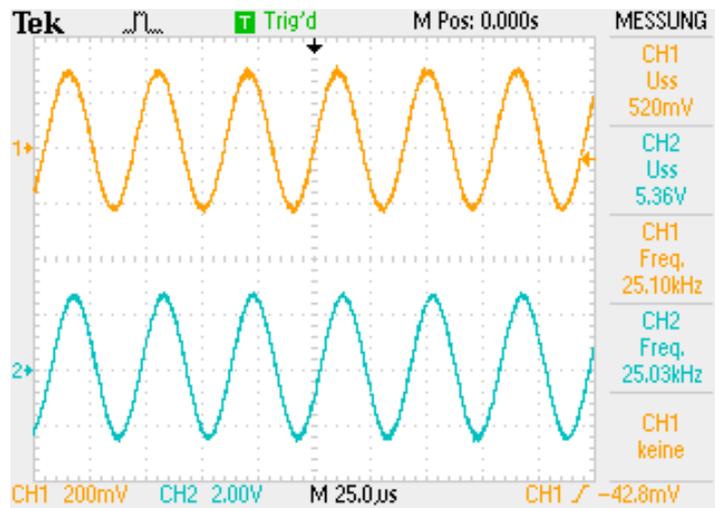


Abbildung 6: Verstärkung bei 25kHz

Wohingegen bei einer Frequenz von 100kHz schon leichte Abweichungen des Verstärkten Signals vom Ausgangssignal zu erkennen sind. Das Sinussignal ähnelt hier eher einem Dreieck.

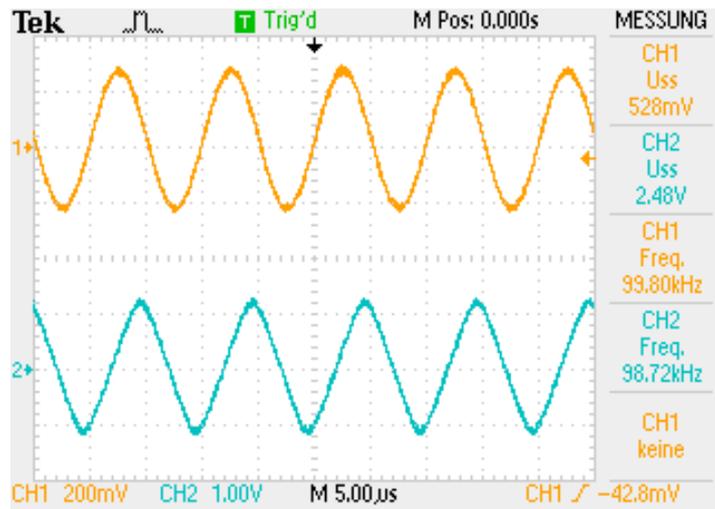


Abbildung 7: Verstärkung bei 100kHz

Des weiteren erkennen wir auch einen Starke Einbruch ab einer Grenzfrequenz. Hierzu wurde der Verstärkungsfaktor über der logarithmischen Frequenz aufgetragen. Ab etwa 25kHz fällt die Verstärkung; dies ist auch in der Tabelle zu erkennen.

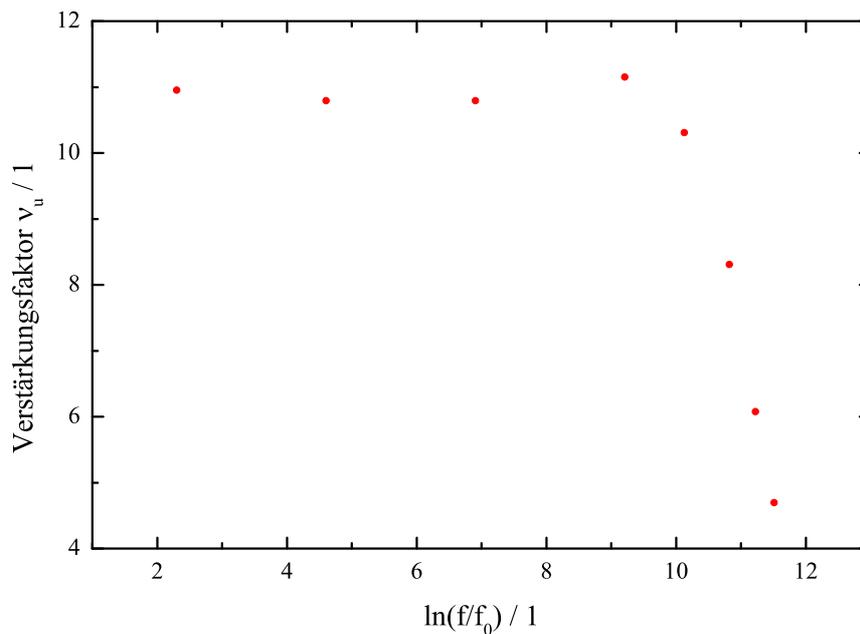


Abbildung 8: Verstärkungsfaktor in Abhängigkeit der Frequenz

Dies liegt wohl daran, dass wir mit den angesteuerten Frequenzen über die internen Schaltfrequenzen des Operationsverstärkers kommen und dieser somit nicht mehr fehlerfrei funktioniert. Die Gegenkopplung hängt dann hinterher und wir sehen eine Verzerrung des Signals.

3 Die invertierende Grundsaltung

3.1 invertierender Verstärker mit zehnfacher Verstärkung

Wir haben den invertierenden Verstärker nach der Schaltskizze in der Vorbereitung aufgebaut. Dort wurde auch die Verstärkung hergeleitet:

$$\nu_u = -\frac{R_2}{R_1} = -10 \quad (13)$$

Da der Widerstand $R_2 = 10\text{k}\Omega$ und $R_1 = 1\text{k}\Omega$, hat der aufgebaute Verstärker eine theoretische Verstärkung von -10.

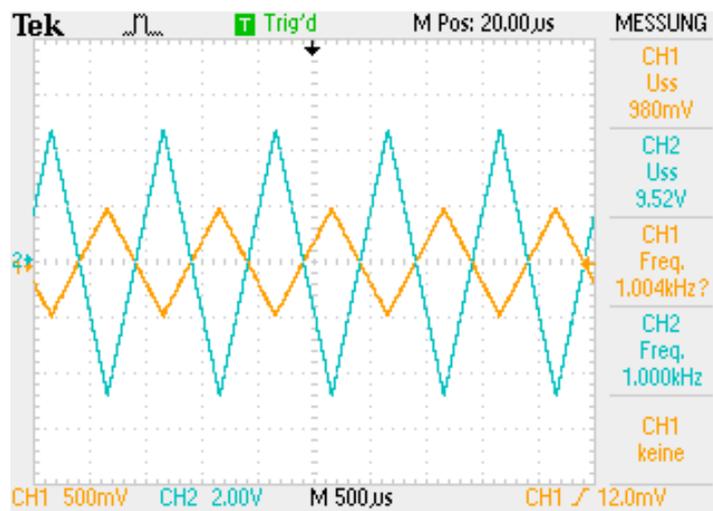


Abbildung 9: Bestimmung des Verstärkungsfaktors

Um die Verstärkung zu messen haben wir wieder eine Dreiecksspannung von 1kHz an den Eingang angelegt und mithilfe des Oszilloskop den Spitze-Spitze-Wert der Eingangs- und Ausgangsspannung gemessen und die Verstärkung $\nu_u = \frac{U_A}{U_E}$ zum jeweiligen Messwert berechnet. Es ergaben sich folgende Werte:

$$\begin{aligned} CH_1 : U_{Ein} &= 408\text{mV} & CH_2 : U_{Aus} &= -4,08\text{V} & \Rightarrow \nu_u &= -10 \\ CH_1 : U_{Ein} &= 960\text{mV} & CH_2 : U_{Aus} &= -9,60\text{V} & \Rightarrow \nu_u &= -10 \end{aligned} \quad (14)$$

Wir erhalten also für die Verstärkung genau den berechnete Wert $\nu_u = -10$.

3.2 Addierer für zwei Eingangssignale

Wir haben den Addierer wie in der Vorbereitung besprochen aufgebaut. Diesen Versuch haben wir mit einer anderen Gruppe zusammen durchgeführt um zwei Funktionsgeneratoren zur Verfügung zu haben. Dadurch können wir als Eingangsspannung U_{E1} bzw. U_{E2} eine Sinus-, Dreieck-, oder Rechteckspannung mit variabler Frequenz anlegen. Es stehen uns also viele

Möglichkeiten offen um den Addierer zu testen.

Wir haben den Addierer für fünf verschiedene Eingangssignale getestet möchten in dieser Auswertung aber nur die schönsten zwei Ergebnisse darstellen um die Auswertung nicht mit Bilder zu überladen und somit unübersichtlich zu machen.

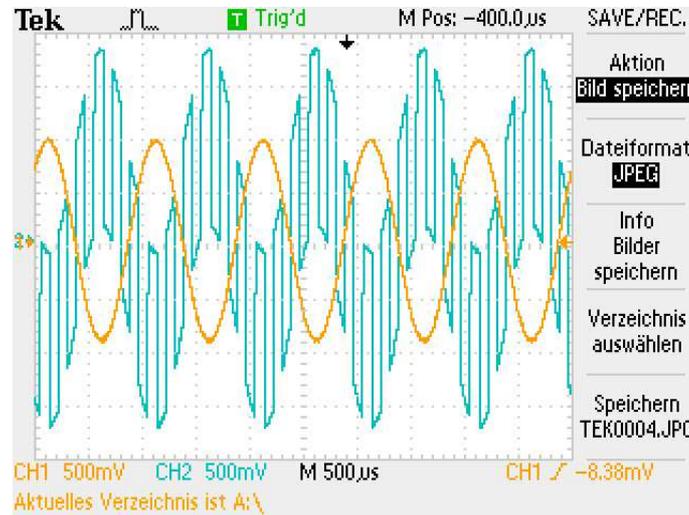


Abbildung 10: Addition von Sinus- und Rechteckspannung

Hier haben wir eine Sinusspannung von 1kHz und eine Rechteckspannung von 6kHz addiert und erhalten die blaue Kurve als Ergebnis. Man kann an dieser addierten Spannung noch die Rechteck- und die Sinusspannung erkennen.

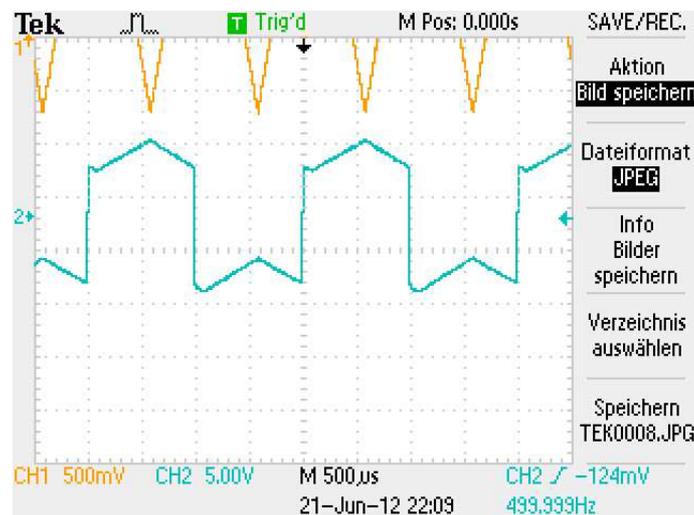


Abbildung 11: Verstärkung bei 25kHz

Hier haben wir eine Rechteckspannung mit 1kHz und eine Dreieckspannung mit 500Hz addiert.

Auch hier sieht man die Dreieck- und die Rechteckanteile.

Indem man die Frequenzen leicht veränderte konnte man als Ausgangssignal auch Schwebungen erhalten.

3.3 Integrierer

Nun haben wir den Integrierer aufgebaut, dessen Funktionsweise auch schon in der Vorbereitung diskutiert wurde.

Als Eingangssignal haben wir die Dreieck- und die Rechteckspannung verwendet und das Eingangs- und Ausgangssignal mit dem Oszilloskop beobachtet.

Zuerst haben wir als Eingangsspannung eine Dreieckspannung mit einer Frequenz von 50Hz angelegt. Als Ergebnis erwarten wir Parabeln.

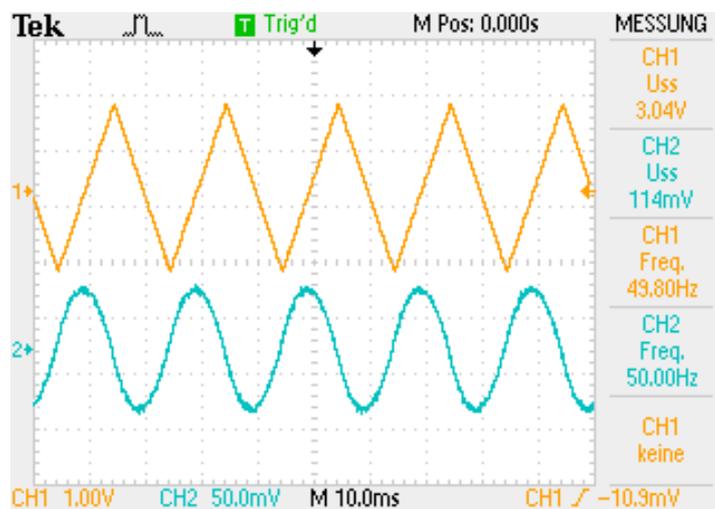


Abbildung 12: Integration einer Dreieckspannung

Das Ergebnis, ist das erwartete. Die Eingangsspannung (CH1) wurde integriert und man erhält als Ausgangsspannung (CH2) die erwarteten Hyperbeln.

Nun haben wir noch die Rechteckspannung bei einer Frequenz von 50Hz an den Eingang gelegt und integriert. Als Ergebnis erwarten wir eine Dreieckspannung.

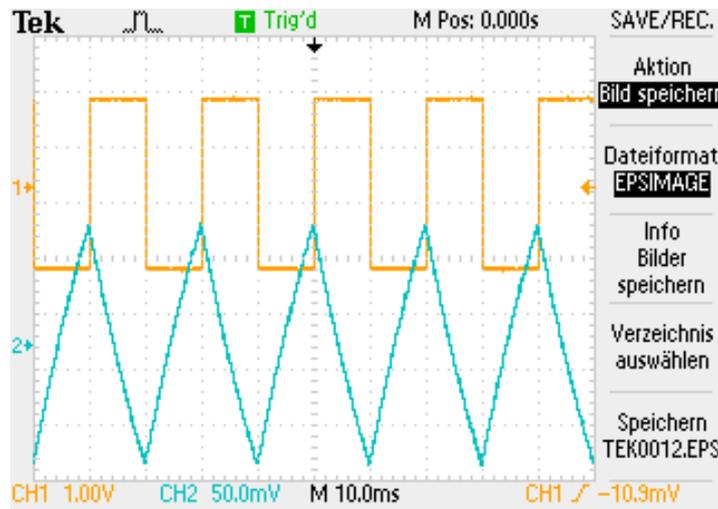


Abbildung 13: Integration einer Rechteckspannung

Auch hier wurde das Eingangssignal (CH1) wie erwartet integriert und man erhält als Ausgangssignal (CH2) eine Dreiecksspannung.

3.4 Differenzierer

Nachdem nun integriert wurde, sollte nun auch noch differenziert werden. Dazu haben wir den in der Vorbereitung besprochenen Differenzierer aufgebaut und die Funktion getestet, indem wir Rechteck- und Dreiecksspannungen im Bereich 50Hz bis 500Hz angelegt haben und das Eingangssignal, sowie das Ausgangssignal beobachtet haben.

Zuerst legen wir eine Rechteckspannung mit einer Frequenz von 50Hz an den Eingang an.

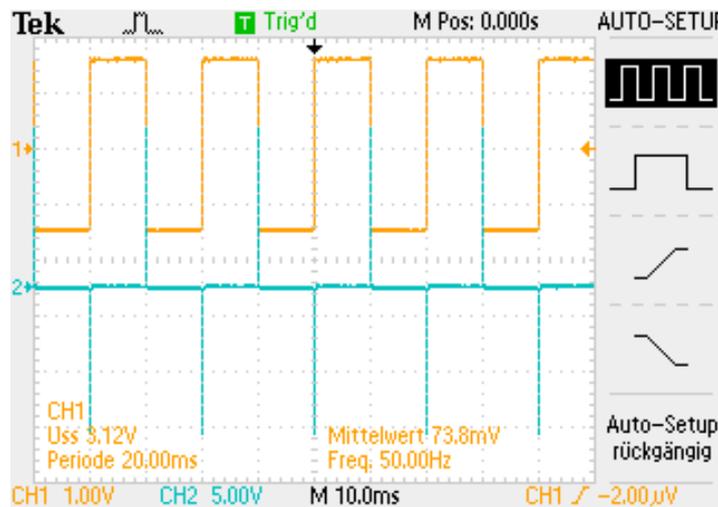


Abbildung 14: Differenziation

Man sieht sehr schön, dass die Ausgangsspannung (CH2) Delta-Peaks an den Stellen der Vor-

zeichenwechsel beim Eingangssignal (CH1) aufzeigt. Daran sieht man, dass das Eingangssignal differenziert wurde, da die Ableitung einer Rechteckspannung gerade die Delta-Distribution ist.

Nun haben wir noch eine Dreieckspannung mit einer Frequenz von 500Hz als Eingangssignal verwendet und die Funktion des Differenzierers getestet.

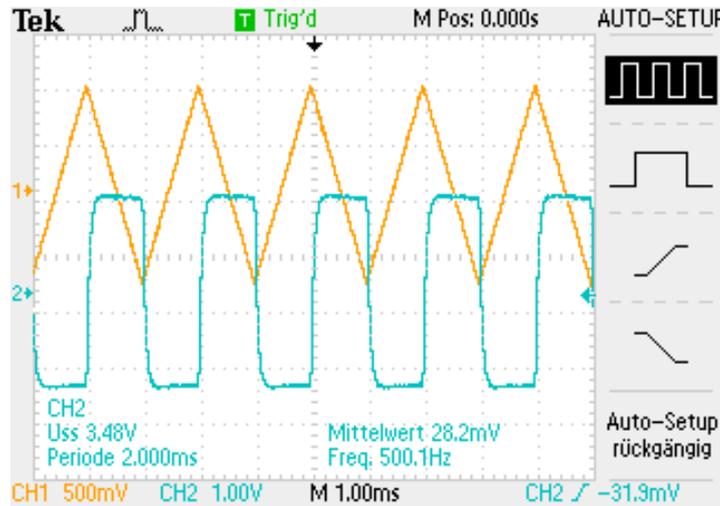


Abbildung 15: Differenziation

Auch hier sieht man, dass das Eingangssignal differenziert wurde, da man als Ausgangssignal eine Rechteckspannung erhält und die Ableitung einer Dreieckspannung gerade eine Rechteckspannung ist.

4 Komplexere Schaltungen mit Operationsverstärkern

4.1 Der ideale Einweggleichrichter

Zunächst haben wir den einfachen Einweggleichrichter bestehend nur aus Diode und Widerstand aufgebaut. Die Diode wurde so gepolt, dass sie nur die negative Halbwelle hindurchlässt.

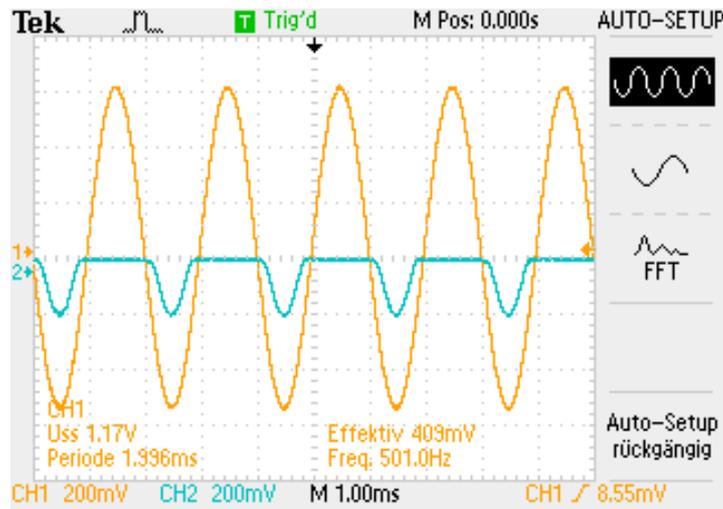


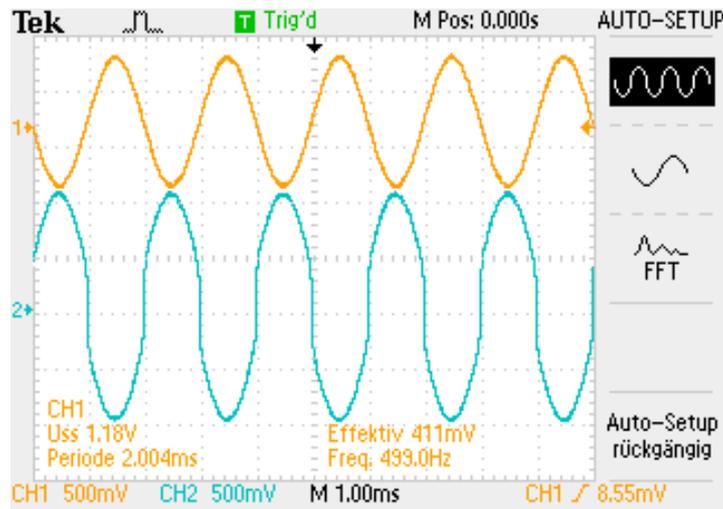
Abbildung 16: Einweggleichrichter aus Diode und Widerstand

Wie bereits in der Vorbereitung beschrieben fällt bei Durchlassrichtung jedoch die Schwellspannung mit ab. Dies hat zur Folge, dass wir nicht die komplette Halbwelle ausgegeben wird, sondern eine um die Schwellspannung verminderte.

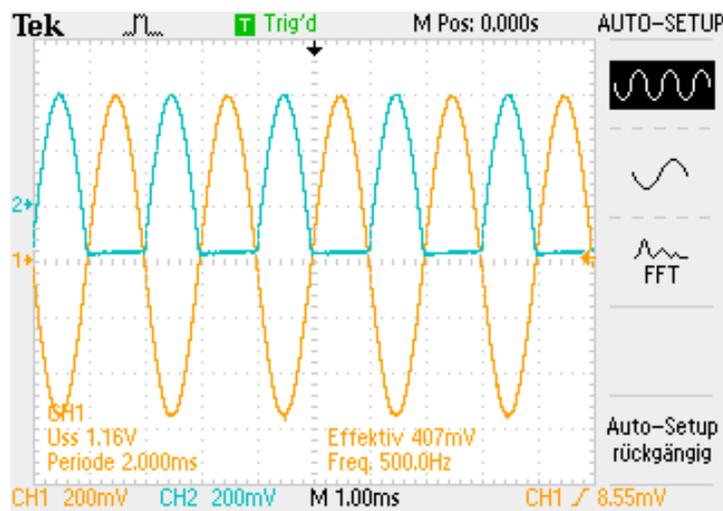
Dies will man jedoch nicht. Um die ganze positive oder negative Halbwelle zu bekommen bedient man sich eines idealen Einweggleichrichters. Verwendung finden solche Gleichrichter in vielen Elektrischen Bauteilen. Beispielsweise in Haushaltsgeräten, welche eine Gleichspannung benötigen.

Dieser wurde nun aufgebaut. Er besteht aus einer Abwandlung der Schaltung des invertierten Verstärkers.

Am Ausgang U_A konnten wir nun das vermutete Bild der beiden addierten Halbwellen zuzüglich der Doppelten Diodenschwellspannung beobachten.

Abbildung 17: Spannung am Ausgang U_A

Am Ausgang U_{A1} erhielten wir den positiven Teil des Sinussignals, welches wir am Eingang angelegt hatten. Hier ist zu erkennen, dass wir nun eine unverfälschte Halbwelle erhielten.

Abbildung 18: Halbwellenspannung am Ausgang U_{A1}

Für den Ausgang U_{A2} haben wir genau den unverfälschten negativen Anteil des Sinussignals bekommen. Auf das Bild wird an dieser Stelle verzichtet.

Beim idealen Einweggleichrichter wird also wie hergeleitet der Fehler der Dioden -Schwellspannung korrigiert.

4.2 Generator für Dreiecks- und Rechteckspannung

Zunächst haben wir die Schaltung wie in Abbildung 12 in der Vorbereitung aufgebaut. Der Generator besteht aus zwei Operationsverstärker. Einer wird als Schmitt-Trigger verwendet

und erzeugt bis zu einer bestimmten Grenzspannung eine Konstante Spannung von +15V oder -15V. Ab dieser polt dieser seine Ausgangsspannung um.

Der Integrierer gibt sein Ausgangssignal (eine fallende oder steigende Gerade) an diesen Schmitt-Trigger. Welcher wiederum eine Rechteckspannung an den Integrierer gibt.

Am Oszilloskop haben wir nun das Ausgangssignal des Schmitt-Triggers, sowie des Integrierers beobachtet. Wie zu erwarten haben wir ein Rechteck und ein Dreiecksignal erhalten.

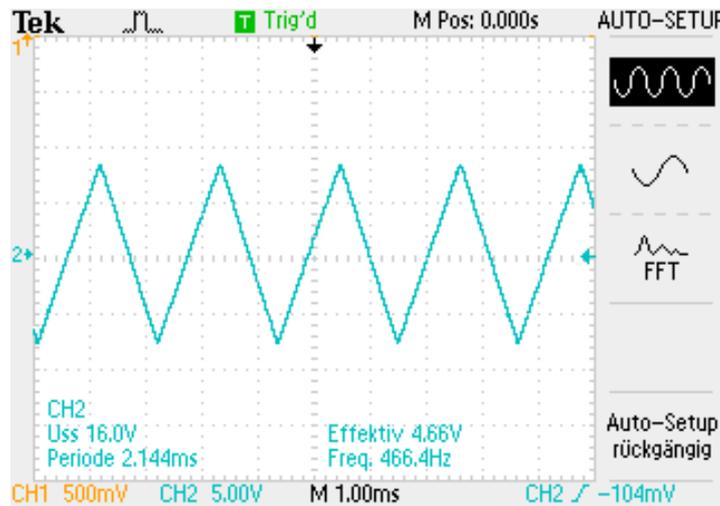


Abbildung 19: Dreieckspannung am Integrierer

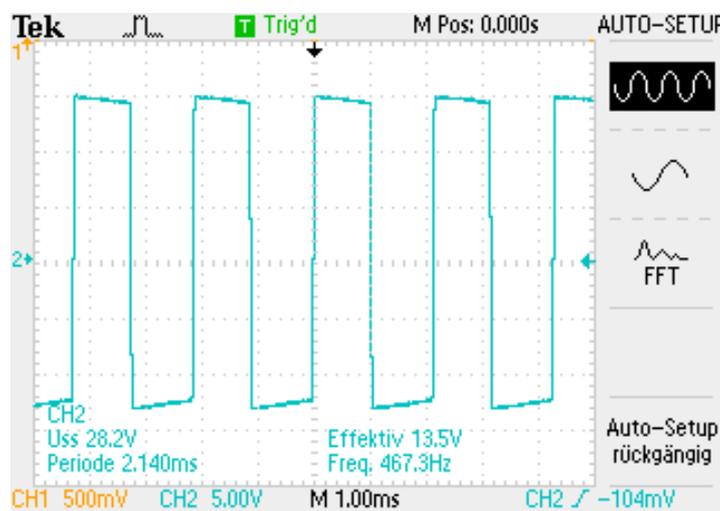


Abbildung 20: Rechteckspannung am Schmitt-Trigger

Man erkennt, dass beide Signale etwa die gleiche Frequenz besitzen. Das liegt daran, dass die beiden Bauteile miteinander gekoppelt sind.

4.3 Programmierte DGL 2. Ordnung

Zuletzt wurde noch die Differentialgleichung zweiter Ordnung des harmonischen Oszillators mit Hilfe einer komplexeren Schaltung gelöst. Dazu mussten wir alle drei auf der Schaltplatte befindlichen Operationsverstärker wie in Abbildung 13 in der Versuchsvorbereitung zusammenschließen. Dabei dienten zwei der Operationsverstärker als Integrierer, der dritte als Invertierer.

Wir beobachteten nun wieder das Ausgangssignal am Oszilloskop. Wir bekamen eine ungedämpfte harmonische Schwingung.

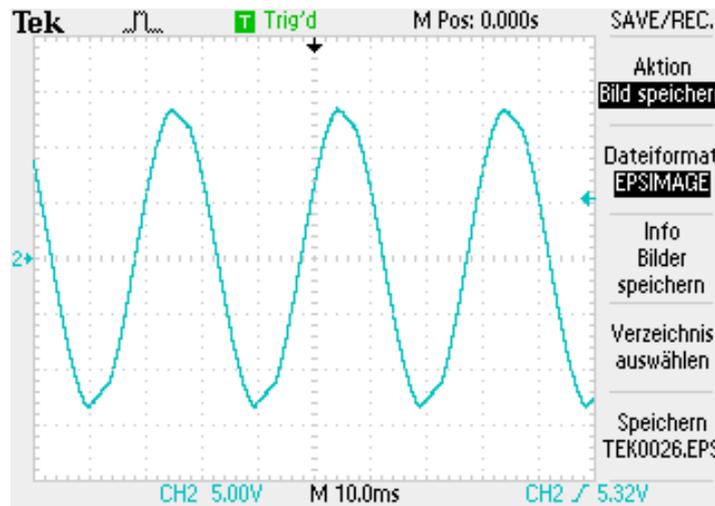


Abbildung 21: Ungedämpfte harmonische Schwingung

Der Dämpfungsfaktor wurde nun mit dem Potentiometer zügig erhöht und anschließend wieder verringert. Dabei veränderte sich die Einhüllende. Man erkennt deutliche einen Abfall.

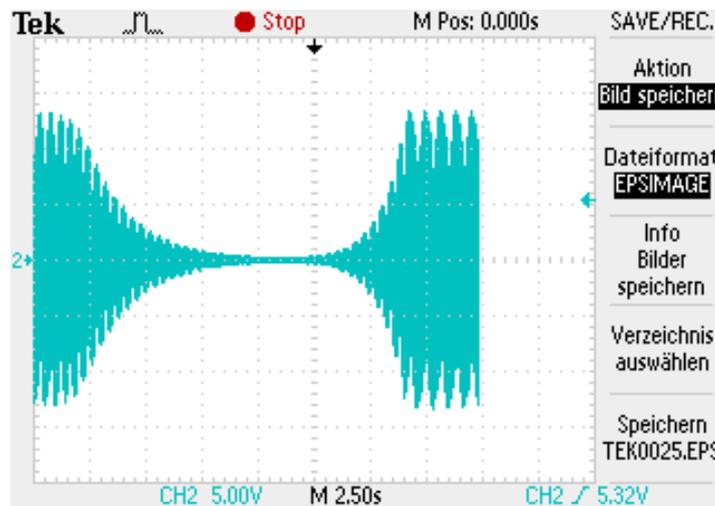


Abbildung 22: Einhüllende durch Dämpfung

Rechts ist noch einmal die Ungedämpfte Schwingung zu sehen.