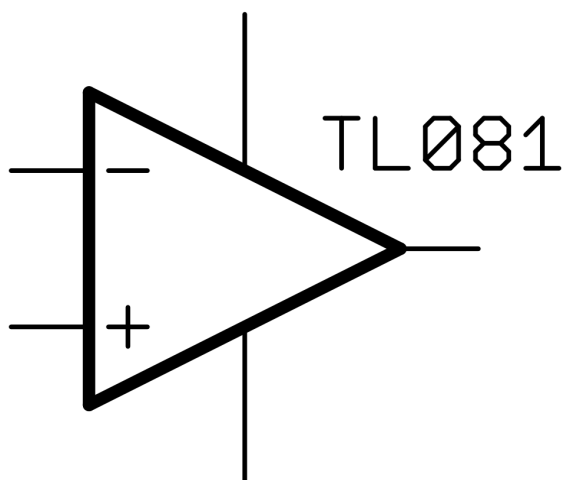




**BERGISCHE
UNIVERSITÄT
WUPPERTAL**

EP-b: EP4
Der Operationsverstärker
8. März 2021

Alexander Adam **Friedrich Jahns**
1946255 1960002



Zielsetzung des Versuchs

Der Operationsverstärker ist eines der wichtigsten Bauteile in der heutigen analogen Schaltungen. Er ist einer der bedeutendsten Halbleiterbausteine und sein Innenleben besteht aus einer Vielzahl an Transistoren und einigen Dioden. In dieser Versuchsreihe wird primär untersucht inwiefern der Operationsverstärker verschiedene Verstärkerschaltungen ermöglicht beziehungsweise vereinfacht, welche durch einzelne Transistoren nicht realisierbar wären.

Geräte

- Netzgerät der Firma Hameg (2 Variable Gleichspannungsausgänge bis 20V, 1 konstanter 5V Gleichspannungsausgang, 1 Funktionsgenerator)
- Oszilloskop von Tektronix mit zwei Kanälen
- Operationsverstärker TL081
- Lautsprecher (8Ω)
- Diverse Potentiometer, Widerstände, Kondensatoren und Diode(n) (siehe Schaltpläne)
- Optional: Rastersteckplatten von Leybold mit Zubehör

Inhaltsverzeichnis

1	Offsetabgleich	4
1.1	Aufbau der Schaltung	4
1.2	Auswertung	4
2	Impedanzwandler für Gleichspannung	5
2.1	Aufbau der Schaltung	5
2.2	Auswertung	5
3	Impedanzwandler für Wechselspannung	5
3.1	Aufbau der Schaltung	6
3.2	Auswertung	6
4	Spannungsverstärker für Wechselspannung	6
4.1	Aufbau der Schaltung	6
4.1.1	Die maximale Eingangsspannung	7
4.1.2	Das Verstärkungs-Bandbreite-Produkt	7
5	Invertierender Spannungsverstärker für Wechselspannung	8
5.1	Aufbau der Schaltung	8
5.2	Auswertung	9
6	Differenzierer	9
6.1	Aufbau der Schaltung	10
6.2	Resultat	10
7	Integrierer	10
7.1	Aufbau der Schaltung	10
7.2	Resultat	11
8	Strommessungen mit dem Op-Amp	11
8.1	Aufbau der Schaltung	12
8.2	Resultat	12
9	Vergrößerung der Ausgangsleistung	12
9.1	Aufbau der Schaltung	13
9.2	Resultat	13
10	Zusammenfassung	13
11	Anhang	15

1 Offsetabgleich

Da der Operationsverstärker wie der Name schon sagt ein Verstärker ist und zwei Eingänge besitzt (normal und negiert verstärkt) schlagen sich leichte Unterschiede in der inneren Konstruktion im großen Maße auf die verstärkten Signale wieder. Bei Verstärkungsfaktoren von ungefähr 100.000 wird das eine der beiden Signale so unmittelbar auf Maximum also Betriebsspannung verstärkt (im Versuch selbst +15V,-15V). Im Versuch werden für die Betriebsspannung zwei Gleichspannungsnetzteile verwendet, eins für das positive eins für das negative Potential weshalb der jeweils andere Anschluss der Beiden Netzteile zur Masse angeschlossen werden muss.

1.1 Aufbau der Schaltung

Im Operationsverstärker ist ein zusätzliches Potentiometer verbaut durch dessen Einstellung sich der Offset ausgleichen lässt. Dafür verbindet man den Operationsverstärker mit seiner Versorgungsspannung sowie seine beiden Eingänge und den Ausgang zu Masse um so den Offset auf 0 einzustellen. Aufgrund der großen Verstärkung wird dies aber kaum möglich sein weshalb es sinnvoll ist die Verstärkung durch die in Abbildung 1 dargestellten Schaltung zu reduzieren. Dadurch wird es möglich den Offset für alle folgenden Versuche auf etwa 0 einzustellen. Nach ein paar Minuten Betrieb kommt es durch Erwärmung zu leichten Schwankungen der Ausgangsspannung. Laut dem Datenblatt liegt die Schwankung der Offsetspannung bei $\pm 2\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ ¹

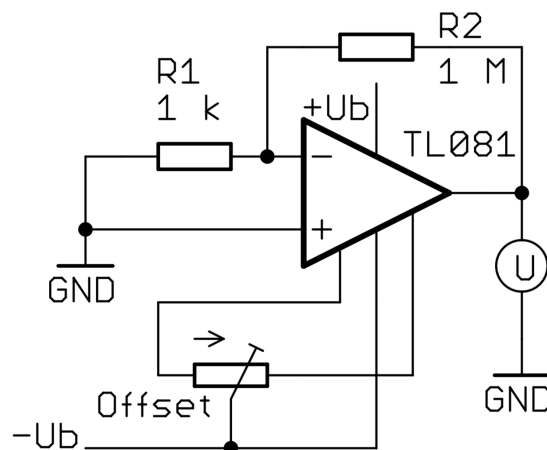


Abbildung 1: Schaltung zum Offsetabgleich

1.2 Auswertung

Die Offsetspannung konnte zu Beginn auf 0 ± 0.05 Volt eingestellt werden. Nach einigen Minuten gab es eine leichte Erhöhung von ca. 0.1 welche kompensiert wurde. Während des gesamten Versuches wurde außerdem die Spannung regelmäßig vermessen und gegebenenfalls angepasst.

¹Datasheet page 12: <https://www.ti.com/product/TL081>

2 Impedanzwandler für Gleichspannung

Für Messgrößen mit sehr kleinen Strömen kann die direkte Messung, beispielsweise mit einem DVM, bereits zum Zusammenbruch des Signals führen. Es bietet sich daher an mithilfe des Operationsverstärkers einen Impedanzwandler zu bauen, welcher einen Verstärkungsfaktor von 1 hat und verhindert das durch den Anschluss eines Messgerätes das Signal an der Quelle zusammen bricht.

2.1 Aufbau der Schaltung

Um einen Verstärkungsfaktor von genau 1 zu erreichen wird der Ausgang des Operationsverstärkers an dessen negierten Pol rückgekoppelt. Dadurch wird bei einer Verstärkung über 1 der negierte Eingang verstärkt und die Spannung fällt wieder bis auf das Eingangsniveau des positiven eingangs ab. So regelt sich der Operationsverstärker auf einen Verstärkungsfaktor von 1. Dabei wird die schwache Stromquelle im Versuch durch eine 5V Gleichspannung mit einem Widerstand von $10\text{M}\Omega$ Simuliert. Aufgrund der so sehr kleinen Spannungen müssen die Messungen der Spannungen an verschiedenen Teilen der Schaltung separat voneinander durchgeführt werden um den Einfluss des Messgerätes auf die Schaltung zu minimieren.

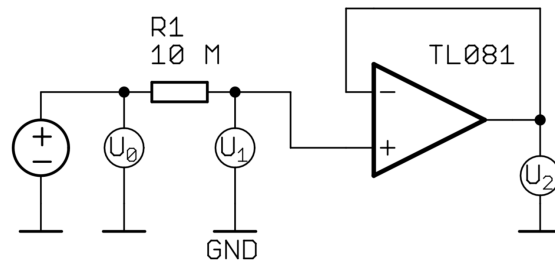


Abbildung 2: Impedanzwandler für Gleichspannungen

2.2 Auswertung

Die 5 Volt Quelle liefert eine Spannung von $4.96\text{V} \pm 0.01\text{V}$. Nach R_1 fiel die Spannung ab auf einen Wert von $2.46\text{V} \pm 0.01\text{V}$ während nach dem Op-Amp eine Spannung von $4.97\text{V} \pm 0.01\text{V}$ gemessen werden konnte. Die Spannung wurde somit eindeutig um den Faktor 1 verstärkt. Der Spannungswert von $2.46\text{V} \pm 0.01\text{V}$ lässt sich dabei auf den Stromfluss über das DVM zurückführen, da der Innenwiderstand vom DVM deutlich kleiner ist als der Eingangswiderstand vom OP-Amp. Der Op-Amp war also in der Lage den durch die Messung selbst verursachten Spannungsabfall im Messstrom zu verhindern.

3 Impedanzwandler für Wechselspannung

Der Operationsverstärker ist nicht in der Lage für beliebig hohe Frequenzen seine Verstärkung ideal auszuführen. Darum gilt es zu messen für welche Frequenzen die Funktion noch ausreichend erhalten ist.

3.1 Aufbau der Schaltung

Als Ausgangsschaltung wird die bereits in 2.1 verwendete Schaltung verwendet. Dabei wird die Gleichspannungsquelle durch einen Funktionsgenerator und die Spannungsmessgeräte zur Messung der Eingangs- und Ausgangsspannung durch die zwei Channel eines Oszilloskops ersetzt.

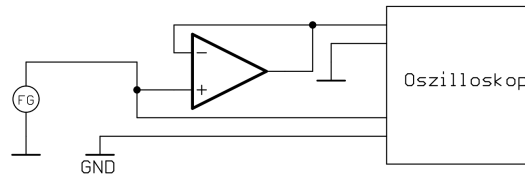


Abbildung 3: Impedanzwandler für Wechselspannung

3.2 Auswertung

Im Anhang sind die Oszilloskopbilder für verschiedene Frequenzen des Eingangssignal hinterlegt (siehe 16). Es zeigt sich dass zwischen 3 MHz und 5 MHz die Verstärkung stark abnimmt um circa 20%; Bei 6 MHz ist diese bereits um 50% gefallen. Der Op-Amp lässt sich somit bis 5 MHz betreiben ohne einen zu signifikanten Spannungsabfall des Ausgangssignal.

4 Spannungsverstärker für Wechselspannung

Will man nun die Spannung um einen bestimmten wert größer als 1 verstärken muss der negierte Eingang des Operationsverstärkers über einen Spannungsteiler an den Ausgang angeschlossen werden. Das Verhältnis der Widerstände des Spannungsteilers bestimmt so den Faktor der Verstärkung. Zu beachten ist, dass der Op-Amp eine Spannung nicht über seine Versorgungsspannung hinaus verstärken kann. Außerdem hängt die reale Verstärkung ebenfalls von der Eingangsfrequenz ab. Die Frequenz, ab welcher die Verstärkung um 3 dB abgeschwächt ist beziehungsweise auf $\sqrt{2}/2$ abgesunken ist, wird Grenzfrequenz genannt und hängt, annähernd linear, von dem theoretischen Verstärkungsfaktor ab. Das Produkt aus der Verstärkung und Grenzfrequenz bildet somit eine Konstante, welche nur von den Eigenschaften des Op-Amp abhängt.

4.1 Aufbau der Schaltung

Im unterschied zu 3.1 wird nun die Rückkopplung des Ausgangs zum negierten Eingang über einen Widerstand R_2 geführt und der negierte Eingang über einen weiteren Widerstand R_1 zur Masse angeschlossen. Das Verhältnis von R_2 zu R_1 bestimmt so die am negierten Eingang anliegende Spannung und so auch die gesamte Verstärkung des Operationsverstärkers. Um die unterschiedlichen Verstärkungen von 101,11 und 1 zu bekommen wird für R_2 : 100 k Ω , 10 k Ω und keinem Widerstand eingesetzt.

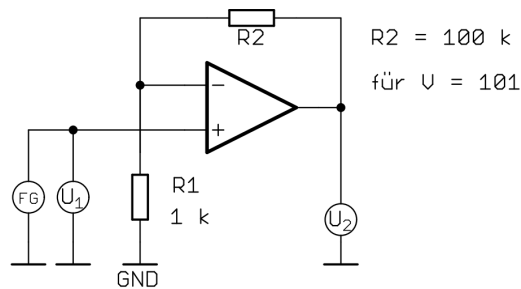


Abbildung 4: Spannungsverstärker für Wechselspannungen

4.1.1 Die maximale Eingangsspannung

Bei einer Verstärkung von 101 der Eingangsspannung lässt sich diese bis 272 mV (Peak to Peak) erhöhen bis eine Verzerrung des Ausgangssignal erfolgt, wie im folgenden Oszilloskopbild zu sehen ist:

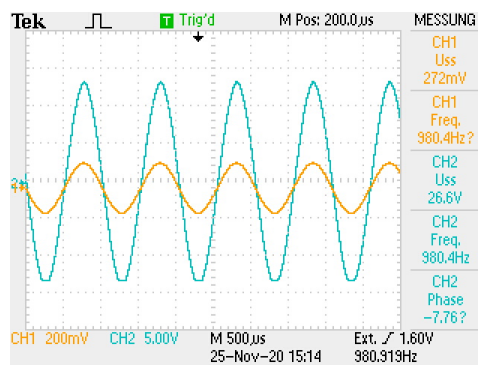


Abbildung 5: Maximale Eingangsspannung vor einer Verzerrung

Für diese Eingangsspannung resultiert die Ausgangsspannung in einem Wert von 26.6V (Peak to Peak). Theoretisch gesehen könnte diese erhöht werden bis 30V, da dies die anliegende Versorgungsspannung ist. Da jedoch der Op-Amp aus Transistoren, beziehungsweise Dioden besteht, fällt diese theoretische Maximalspannung geringer aus. Sonstige Verluste können ebenfalls durch weitere reale Widerstände entstehen.

4.1.2 Das Verstärkungs-Bandbreite-Produkt

Um das Verstärkungs-Bandbreite-Produkt zu bestimmen wurde zu drei Verschiedenen Verstärkungen die Bandbreite gemessen. Die folgenden drei Oszilloskopbilder zeigen den Moment, zu welchem die Verstärkung um 3dB abgesunken ist:

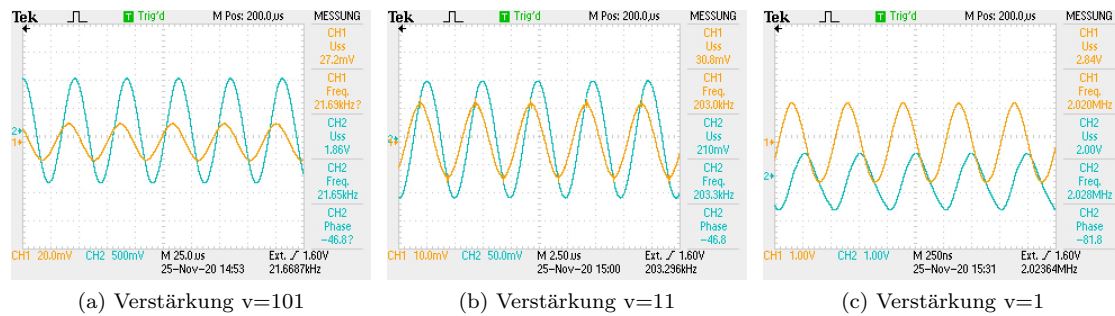


Abbildung 6: Einstellung der Bandbreite (3dB Abfall der Verstärkung)

Für eine Verstärkung um den Faktor eins wurde die Spannung in den Volt-Bereich erhöht, um sonstige Störeffekte im MHz-Bereich zu unterdrücken, dies hat keinen Einfluss auf die Bandbreite. Sowohl die relevanten Daten aus den Oszilloskopbildern, als auch das Produkt aus Bandbreite und Verstärkung, sind in der folgenden Tabelle erfasst.

Tabelle 1: Daten der Oszilloskopbilder

Verstärkung	USS Eingang	USS Ausgang	Bandbreite	Verstärkungs-Bandbreite-Produkt
101	27.2 mV	1.86 V	21.69 kHz	2.190 MHz
11	30.8 mV	210 mV	203.0 kHz	2.233 MHz
1	2.84 V	2.00 V	2.020 MHz	2.020 MHz

Es zeigt sich, wie erwartet, dass das Verstärkungs-Bandbreite-Produkt nur leicht variiert für verschiedene Verstärkungen. Das Produkt beträgt somit $2.147 \text{ Mhz} \pm 0.112 \text{ Mhz}$

5 Invertierender Spannungsverstärker für Wechselspannung

Für eine beliebige invertierte Verstärkung muss grundsätzlich nur die Schaltung aus 3 invertiert werden.

5.1 Aufbau der Schaltung

Im Vergleich zu 4.1 wird nun der negierte Eingang über R_1 zum positiven Potential und der nicht negierte Eingang zur Masse angeschlossen. So liegt die Spannung nun über einen Spannungsteiler am negierten Eingang und das Verhältnis von R_2 zu R_1 bestimmt die negative Verstärkung.

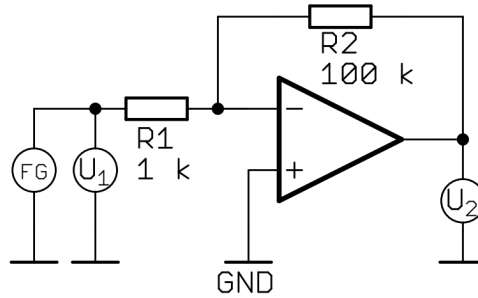


Abbildung 7: Invertierender Spannungsverstärker für Wechselspannung

5.2 Auswertung

Durch Anlegen einer Sinuswelle an den invertierenden Eingang wird diese invertiert, welches gleichbedeutend ist mit einer Phasenverschiebung um 180° Grad. Dieser Effekt kann in den folgenden Oszilloskopbildern deutlich erkannt werden.

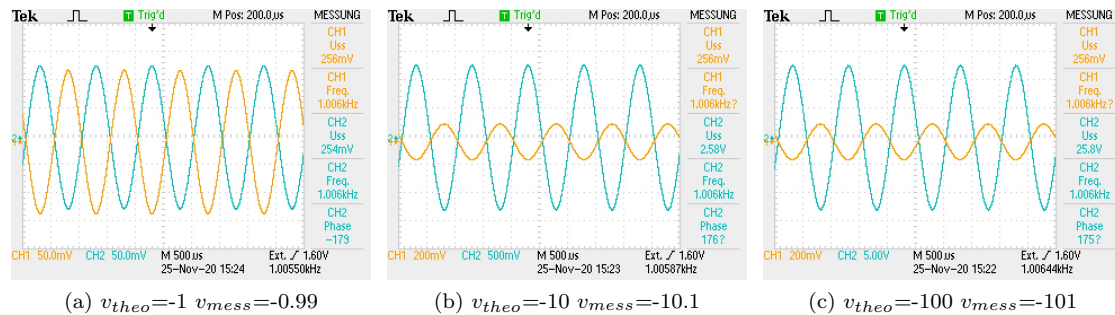


Abbildung 8: Invertierender Wechselspannungsverstärker mit $f=1\text{kHz}$

Unterhalb den Oszilloskopbildern steht zudem der theoretische Verstärkungswert, welcher bestimmt wird durch das Widerstandsverhältnis, als auch der tatsächlich gemessene Verstärkungsfaktor. Wie erkennbar ist weichen diese Werte stets um nicht mehr als 1% von den errechneten Werten ab. Die Verstärkung kann somit zuverlässig durch den äußeren Spannungsteiler gesetzt werden.

6 Differenzierer

Die Schaltung des Differenzierers liefert wie der Name bereits andeutet am Ausgang die zeitliche Änderung der Eingangsspannung. Für eine eingehende Sinuswelle wird eine ausgehende Cosinuswelle erwartet, welche jedoch durch den invertierenden Eingang wiederum um π verschoben ist. Die Dreieckswelle wird vermutlich in einer rechteckigen Welle resultieren, da diese jeweils aus konstant steigenden und fallenden Teilen besteht. Für die letzte eingehende Welle, die Rechteckwelle, werden lediglich Spannungspikes erwartet, an den Stellen, wo die Welle ihre Polarität ändert.

6.1 Aufbau der Schaltung

Die Schaltung ähnelt dabei sehr der aus 5.1. Die Unterschiede sind dabei lediglich ein anders gewählter Widerstand für R_2 und ein kleiner Kondensator, welcher den Widerstand R_1 ersetzt.

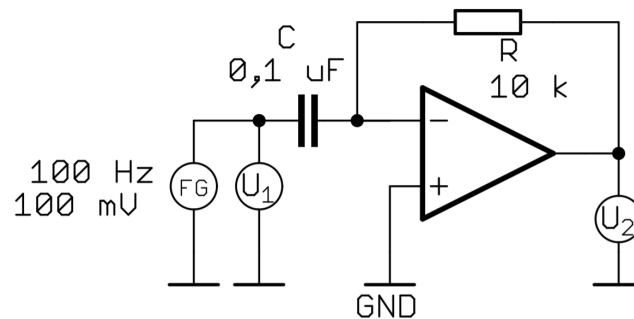


Abbildung 9: Schaltung des Differenzierers

6.2 Resultat

Die folgenden Aufnahmen sind die Resultate der verschiedenen Eingangswellen. Wie zu erkennen ist, stimmen die Wellenformen mit den erwarteten Funktionen überein.

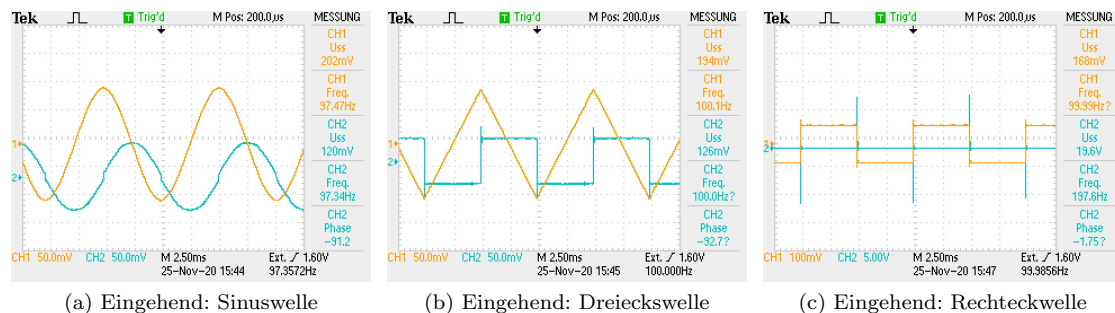


Abbildung 10: Ein-/Ausgangswellen des Differenzierers mit $f=100\text{Hz}$

7 Integrierer

Ähnlich wie beim Differenzierer deutet der Name des Integrierers auch seine Funktion an. Für eine Sinuswelle wird offensichtlich erneut eine Cosinuswelle erwartet. Die Dreieckswelle wird vermutlich in einer Sinusförmigen Funktion resultieren, wobei Herr Kind den Hinweis gab, dass es sich um aneinandergereihte Parabeln handeln könnte. Für die Rechteckwelle wird eine Dreieckswelle erwartet.

7.1 Aufbau der Schaltung

Der Schaltung ist in ihrer Funktion genau umgekehrt zu der des Differenzierers aus 6.1. In der Schaltung selbst bedeutet dies lediglich den Tausch des Kondensators und des Widerstands R

gegeneinander. Durch den Offset kann es leicht passieren, dass der Kondensator sich auflädt und seine Funktion in der Schaltung so einstellt. Um dies zu verhindern kann man einen großen Widerstand parallel zum Kondensator schalten welcher die übermäßige Aufladung verhindert.

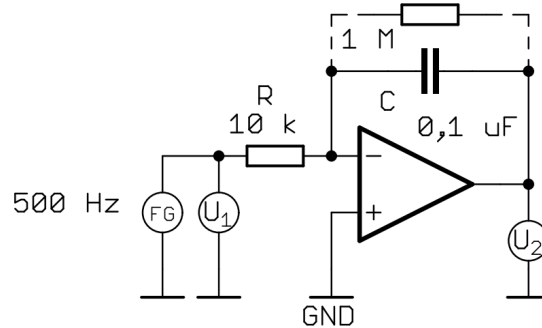


Abbildung 11: Schaltung des Integrierers

7.2 Resultat

Die folgenden Aufnahmen sind die Resultate der verschiedenen Eingangswellen. Wie zu erkennen ist, stimmen die Wellenformen mit den erwarteten Funktionen überein, wobei bei der Dreiecks- welle der genaue Wellentyp schwer erkennbar ist.

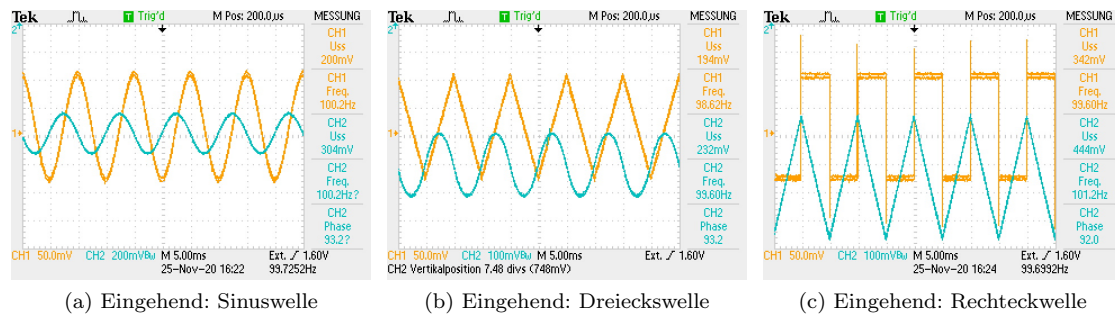


Abbildung 12: Ein-/Ausgangswellen des Differenzierers mit $f=100\text{Hz}$

8 Strommessungen mit dem Op-Amp

Will man nun einen Sensor ausmessen, wie in diesem Beispiel eine Photodiode die Höchstspannungen von etwa $0,6\text{V}$ liefert, so erreicht man die genauesten Messergebnisse, wenn man diese kurzschließt. Der Kurzschluss wird erzielt, indem der nicht negierte Eingang auf Masse und der Sensor an den negierten Eingang gelegt wird. Am negierten Eingang liegt dann eine virtuelle Masse an, da der Op-Amp die Spannungsdifferenz zwischen seinen Eingängen auf 0 bringt. Der fließende Strom lässt sich nun messen, indem ein Rückkopplungswiderstand eingeführt wird. Aus dem Gesetz von Ohm und der Tatsache, dass $-I_{PH} = I_R$ ist, ergibt sich

$$I_R = \frac{U_a - 0}{R} = -I_{PH} \Rightarrow U_a = -I_{PH} \cdot R$$

8.1 Aufbau der Schaltung

Dafür wird die Photodiode zusammen mit dem Rückkopplungswiderstand der Ausgangsspannung an den negierten Eingang des Operationsverstärkers angeschlossen. Der nicht negierte Eingang wird einfach zur Masse angeschlossen.

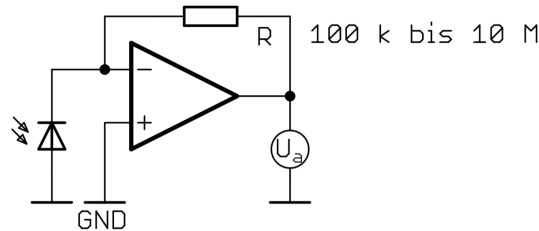


Abbildung 13: Schaltung zur Vermessung der Photodiode

8.2 Resultat

Die Messreihe wurde mit zwei unterschiedliche Rückkopplungswiderstände durchgeführt:

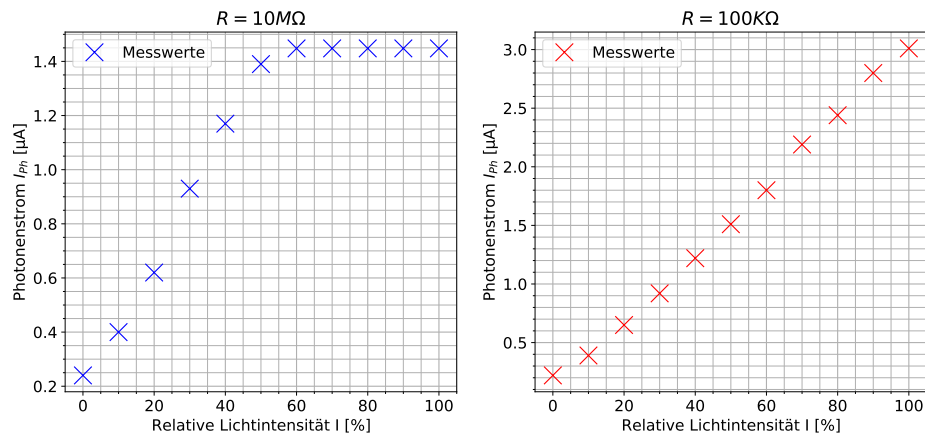


Abbildung 14: Messung des Photostroms mittels unterschiedlichen Rückkopplungswiderständen

Bei Verwendung des 10 MΩ Widerstand wird deutlich, dass der Op-Amp an die Grenzen seiner Versorgungsspannung gerät.² Unter Verwendung des 100 kΩ Widerstand wird jedoch die Proportionalität des Photonenstrom von der Lichtintensität deutlich. Der Op-Amp konnte somit erfolgreich eingesetzt werden um den Photonenstrom zu messen ohne diesen zu beeinflussen.

9 Vergrößerung der Ausgangsleistung

Will man nun ein Signal über einen Spannungsverstärker verstärktes Signal über einen Verbraucher wie z.B. einen Lautsprecher ausgeben, so reichen die vom Operationsverstärker ausgehen-

² $U_{max}/R = I_{max} \quad 15V/10M\Omega = 1.5\mu A$

den Ströme kaum aus um diesen zu betreiben. Stattdessen kann hinter den Operationsverstärker ähnlich wie in Versuch EP3 ein Emitterfolger geschaltet werden welcher die nötige Leistung bzw. den nötigen Strom liefert um den Lautsprecher zu betreiben. Dabei sollte dem Lautsprecher allerdings ein Koppelkondensator vorgeschaltet werden um eine Beschädigung des Lautsprechers durch Gleichspannungsanteile der Spannung zu verhindern.

9.1 Aufbau der Schaltung

Dabei muss dem Invertierten Spannungsverstärker aus 5 lediglich ein Emitterfolger Nachgeschaltet werden. An diesem kann dann der Lautsprecher über den beschriebenen Koppelkondensator betrieben werden.

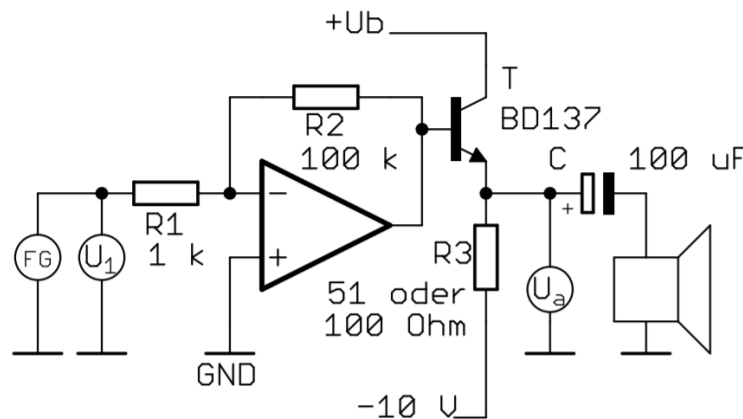


Abbildung 15: Spannungs und Stromverstärkung

9.2 Resultat

Wie erwartet war der Spannungsverstärker ohne Emitterfolger kaum in der Lage den Lautsprecher zu betreiben. Das Ergebnis beschränkte sich dabei auf einen nur sehr schwach hörbaren Ton. Durch Anschluss des Emitterfolgers an die Ausgangsspannung des Spannungsverstärkers jedoch wurde das Signal als deutlicher Lauter Ton hörbar.

10 Zusammenfassung

Um die Spannung einer schwachen Stromquelle durch den Anschluss des Messgerätes nicht zusammenbrechen zu lassen bietet es sich an einen Impedanzwandler zu Verwenden. Dieser erlaubt es mit einer Verstärkung von 1 die Spannung hinter dem Operationsverstärker zu messen, so dass diese nicht zusammen bricht.

Legt man nun eine Wechselspannung an den Impedanzwandler so stellt man fest, dass die Verstärkung ab bestimmten Frequenzen stark abnimmt. Diese Grenzwelle ist abhängig von der Verstärkung, während das Produkt aus der Grenzfrequenz und Verstärkung konstant ist. Für den hier verwendeten Op-Amp TL081 beträgt das Verstärkungs-Bandbreite-Produkt circa 2 MHz. Bei anschließen der Wechselspannung an den negierenden Eingang wird die Spannung ebenfalls um π verschoben.

Die Differenzierer und Integrierer Eigenschaften des Op-amp konnten erfolgreich an einer Sinus-,Dreieck- und Rechteckwelle nachgewiesen werden.

Die reale Anwendung zum messen des Photostrom einer Photodiode verlief ebenfalls erfolgreich, wobei die Erkenntnis gewonnen wurde, den Rückkopplungswiderstand entsprechend dem Anwendungsbereich zu wählen.

Um das Signal eines schwachen Messstroms zu verstärken kann durchaus eine einfache Spannungsverstärkerschaltung mit dem Operationsverstärker verwendet werden. Will man dieses Signal nun aber über einen Verbraucher wie z.B. einen Lautsprecher ausgeben so fehlt es ihm an Leistung weshalb es sinnvoll ist dafür eine Kombination aus Spannungsverstärkung und Stromverstärkung durch einen Emitterfolger zu verwenden.

11 Anhang

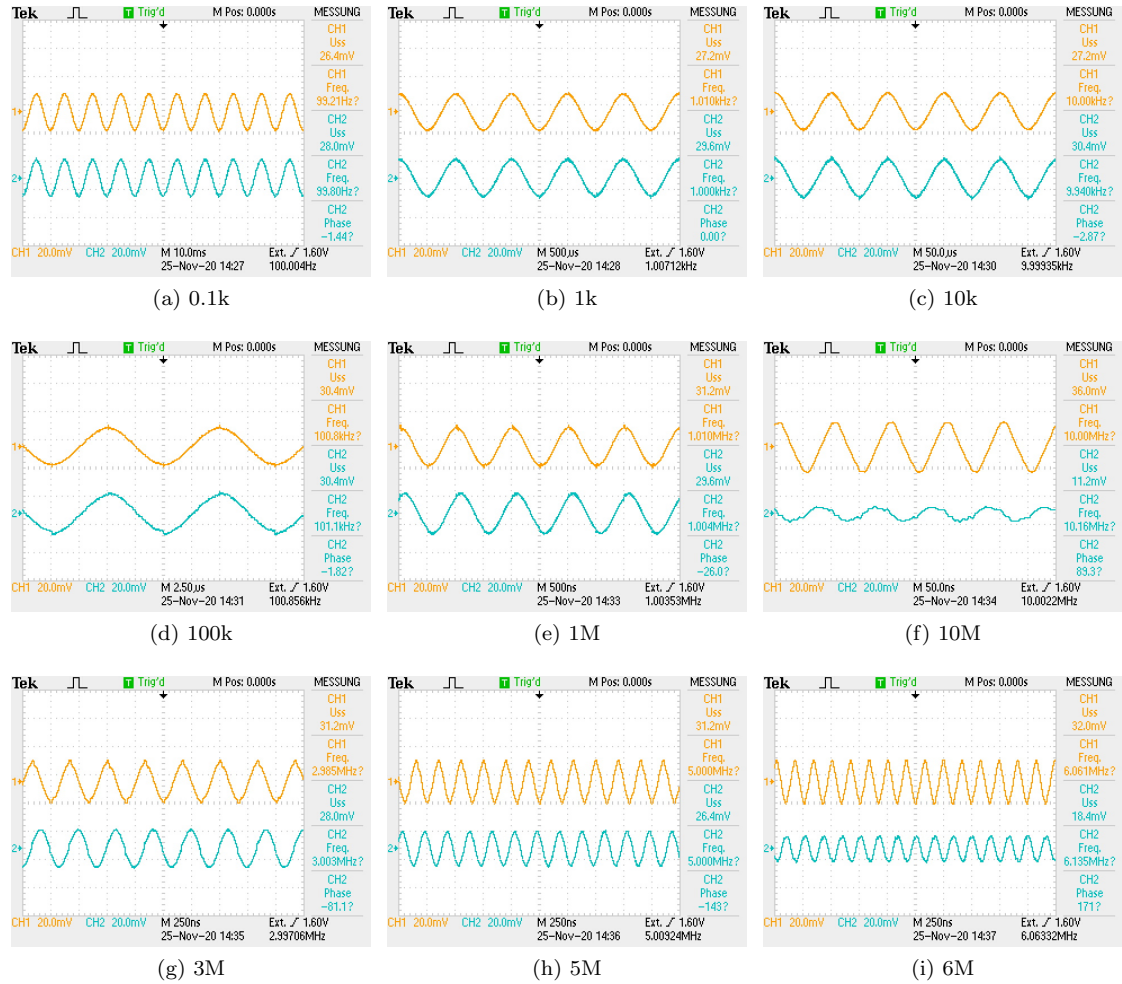


Abbildung 16: Oszilloskopbilder des Impedanzwandlers mit entsprechenden Frequenzen