

Ausarbeitung Versuch 242 Spannungsverstärkung

Lucas Eekhof

Motivation

Operationsverstärker sind elektrische Bauelemente, die eingehende Signale mithilfe einer Betriebsspannung verstärken können. Durch Rückkopplung über Widerstände oder Kondensatoren ergeben sich interessante Verhalten. Diese sollen beobachtet und quantifiziert werden.

Physikalischer Hintergrund

Das zentrale Bauteil des Versuchs ist der Operationsverstärker. Das elektrische Bauteil hat zwei Signaleingänge und zwei Eingänge für die Betriebsspannung, sowie einen Ausgang. Operationsverstärker sind Differenzverstärker, ihre Ausgangsspannung U_A ergibt sich also als Vielfaches der Differenz ihrer nicht invertierenden Eingangsspannung U^+ , und ihrer invertierenden Ausgangsspannung U^- , mit dem Verstärkungsfaktor v_0 nach

$$U_A = v_0(U^+ - U^-) \quad (1)$$

Der Spannungsverlauf um die Nullspannung herum ist also linear - Die Verstärkung kann jedoch maximal auf die angelegte Betriebsspannung erfolgen, dort knickt der lineare Verstärkungsverlauf zu einer Konstanten ab.

Eine Rückkopplung der Ausgangsspannung in einen invertierenden Eingang wird Gegenkopplung genannt, diese führt zu weiteren beachtenswerten Eigenschaften. Für diesen Fall wird die Gegenkopplung über einen ohmschen Widerstand R_2 geführt, während die Eingangsspannungsdifferenz zwischen einer über den ohmschen Widerstand R_1 laufenden Spannungsquelle, und einer Erdung hergestellt wird. Auf diese Weise erhält man den invertierenden Verstärker. Die Gegenkopplung zwingt in diesem Aufbau den Eingang des Verstärkers auf 0 V. Vernachlässigt man nun den Stromfluss durch den für gewöhnlich sehr hochohmigen Verstärker, und betrachtet den Stromfluss I_1 durch R_1 , sowie I_2 durch R_2 , erhält man nach der Maschenregel:

$$I_1 = \frac{U_E}{R_1} \quad ; \quad -I_2 = \frac{U_A}{R_2} \quad (2)$$

Das führt auf die Verstärkergleichung für Gleichspannung:

$$U_A = -\frac{R_2}{R_1} U_E \quad (3)$$

Legt man eine Wechselfspannung an, so entspricht die Verstärkung für niedrige Frequenzen derjenigen im Gleichspannungsfall, nimmt allerdings für höhere Frequenzen nach einer bestimmten Bandbreite exponentiell ab, im Diagramm:

¹Wagner, Jens: „Physikalisches Praktikum PAP 2.2 für Studierende der Physik“, 2019

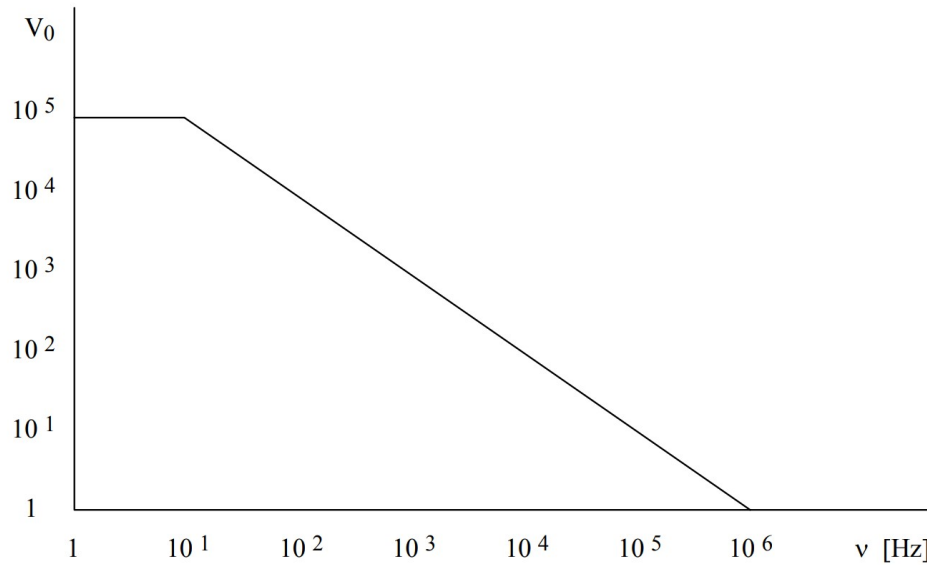


Abbildung 1: Der Verstärkungsfaktor logarithmisch gegen die angelegte Wechselspannungsfrequenz¹

Dabei ist das Produkt von Bandbreite und Verstärkung konstant, wodurch niedrigere Verstärkungen größere Bandbreiten haben, aber danach auf dem selben Wege exponentiell abfallen. Insgesamt weist der Aufbau also Tiefpassfiltereigenschaften auf.

Versuchsordnung

Teil 1

a)

Es wird an einen Operationsverstärker eine Betriebsspannung von $15\text{ V}/-15\text{ V}$ angelegt. Das Eingangssignal vor dem Operationsverstärker wird in den Kanal 1 des Oszilloskops eingekoppelt. Der Eingangswiderstand des Operationsverstärkers beträgt $3\text{ k}\Omega$. Der Ausgang des Operationsverstärkers wird mit Kanal 2 abgegriffen.

b)

Im bestehenden Aufbau aus Teil 1a) wird nun als neues Eingangssignal für den Operationsverstärker eine Sinusspannung mit einer Frequenz von $(1000 \pm 1)\text{ Hz}$ von einem Funktionsgenerator (3MHz DDS Function Generator 4055 von Peaktech) bereitgestellt.

Teil 2

a)

Der Aufbau entspricht dem aus Teil 1b).

b)

Im bestehenden Aufbau aus 2a) wird noch ein Kondensator mit einer Kapazität von 560 pF zum eingestellten Rückkopplungswiderstand von $48,7\text{ k}\Omega$ parallel geschaltet.

c)

Der Aufbau aus 2a) wird wiederhergestellt, dabei wird jedoch ein Kondensator am Eingang von $C = 47\text{ nF}$ in Reihe geschaltet. Die Peak-to-Peak-Spannung am Eingang beträgt wieder 1 V .

Teil 3

Abschließend werden nun von der Konfiguration aus 2a) ausgehend einige Beobachtungen gemacht. Dazu werden die verschiedenen bisher genutzten Widerstände, sowie die Kondensatoren, in unterschiedlichen Kombinationen wie zuvor in den Schaltkreis eingebaut. Die Eingangsspannung wird nun als Rechteckssignal mit einer Amplitude von 1 V eingegeben, ihre Frequenz wird zwischen verschiedenen Beobachtungen variiert.

Messprotokoll

Die hier aufgezeichneten Messdaten wurden dem Video unter <https://www.youtube.com/watch?v=g70e00YepN8> am 09.03.2021 entnommen. Als Messgerät dient für den gesamten Versuch das Oszilloskop TBS 1072B-EDU von Tektronix.

Messung 1

a) Operationsverstärker als Verstärker für Gleichspannung

Es werden für elf verschiedene Eingangsspannungen U_1 von -250 mV bis $+250\text{ mV}$ die Ausgangsspannungen U_A aus dem Verstärkerglied gemessen, bei Einstellungen des Rückkopplungswiderstandes von $R_G = 48,7\text{ k}\Omega$ und $R_G = 274\text{ k}\Omega$:

Tabelle 1: Verstärkte Gleichspannungen bei $R_G = 48,7\text{ k}\Omega$

Messung	U_1 [V]	U_A [V]
1	$-0,25 \pm 0,01$	$4,2 \pm 0,1$
2	$-0,20 \pm 0,01$	$3,4 \pm 0,1$
3	$-0,15 \pm 0,01$	$2,6 \pm 0,1$
4	$-0,10 \pm 0,01$	$1,7 \pm 0,1$
5	$-0,05 \pm 0,01$	$0,9 \pm 0,1$
6	$0,00 \pm 0,01$	$0,06 \pm 0,02$
7	$0,05 \pm 0,01$	$-0,8 \pm 0,1$
8	$0,10 \pm 0,01$	$-1,6 \pm 0,1$
9	$0,15 \pm 0,01$	$-2,4 \pm 0,1$
10	$0,20 \pm 0,01$	$-3,2 \pm 0,1$
11	$0,25 \pm 0,01$	$-4,0 \pm 0,1$

Tabelle 2: Verstärkte Gleichspannungen bei $R_G = 274\text{ k}\Omega$

Messung	U_1 [V]	U_A [V]
1	$-0,25 \pm 0,01$	$15,0 \pm 0,2$
2	$-0,20 \pm 0,01$	$15,0 \pm 0,2$
3	$-0,15 \pm 0,01$	$14,7 \pm 0,2$
4	$-0,10 \pm 0,01$	$10,0 \pm 0,2$
5	$-0,05 \pm 0,01$	$5,0 \pm 0,1$
6	$0,00 \pm 0,01$	$0,40 \pm 0,05$
7	$0,05 \pm 0,01$	$-4,4 \pm 0,1$
8	$0,10 \pm 0,01$	$-9,0 \pm 0,2$
9	$0,15 \pm 0,01$	$-13,5 \pm 0,2$
10	$0,20 \pm 0,01$	$-13,5 \pm 0,2$
11	$0,25 \pm 0,01$	$-13,5 \pm 0,2$

b) Operationsverstärker als Verstärker für Wechselfspannung

Es wird bei Rückkopplungswiderständen von $R_G = 274\text{ k}\Omega$ und $R_G = 680\text{ k}\Omega$ die Peak-to-Peak-Spannung U_{pp} am Ausgang des Verstärkergliedes unter verschiedenen Peak-to-Peak-Eingangsspannungen U_1 zwischen 0 V und 1 V gemessen. Bei diesen Rückkopplungswiderständen ist der Fehler von U_1 vernachlässigbar.

Tabelle 3: Verstärkte Wechselspannungen bei $R_G = 274 \text{ k}\Omega$

Messung	U_1 [V]	U_{pp} [V]
1	0,01	$0,88 \pm 0,02$
2	0,02	$1,70 \pm 0,05$
3	0,04	$3,50 \pm 0,05$
4	0,06	$5,2 \pm 0,1$
5	0,08	$7,0 \pm 0,1$
6	0,10	$8,8 \pm 0,2$

Tabelle 4: Verstärkte Wechselspannungen bei $R_G = 680 \text{ k}\Omega$

Messung	U_1 [V]	U_{pp} [V]
1	0,01	$2,20 \pm 0,05$
2	0,02	$4,4 \pm 0,1$
3	0,04	$8,8 \pm 0,2$
4	0,06	$13,0 \pm 0,2$
5	0,08	$17,5 \pm 0,2$
6	0,10	$22,0 \pm 0,2$

Messung 2

a)

Es wird der Frequenzgang der Peak-to-Peak-Ausgangsspannung U_A des gegengekoppelten Verstärkers bei Eingangsfrequenzen f_1 von 100 Hz bis 300 Hz mit dem Oszilloskop zu drei Messpunkten pro Dekade aufgenommen, jeweils bei Rückkopplungswiderständen von $R_G = 48,7 \text{ k}\Omega$, $R_G = 274 \text{ k}\Omega$ und $R_G = 680 \text{ k}\Omega$, mit Peak-to-Peak-Eingangsspannungen U_G von jeweils $(1,00 \pm 0,02) \text{ V}$, $(0,30 \pm 0,02) \text{ V}$ und $(0,30 \pm 0,02) \text{ V}$.

Tabelle 5: Frequenzgang der Peak-to-Peak-Ausgangsspannung bei $R_G = 48,7 \text{ k}\Omega$ und $U_G = (1,00 \pm 0,02) \text{ V}$

Messung	f_1 [Hz]	U_A [V]
1	100	1,56
2	300	1,56
3	600	1,56
4	$1 \cdot 10^3$	1,56
5	$3 \cdot 10^3$	1,56
6	$6 \cdot 10^3$	1,56
7	$1 \cdot 10^4$	1,56
8	$3 \cdot 10^4$	1,36
9	$6 \cdot 10^4$	1,06
10	$1 \cdot 10^5$	0,78
11	$3 \cdot 10^5$	0,30

Tabelle 6: Frequenzgang der Peak-to-Peak-Ausgangsspannung bei $R_G = 274 \text{ k}\Omega$ und $U_G = (0,30 \pm 0,02) \text{ V}$

Messung	f_1 [Hz]	U_A [V]
1	100	2,60
2	300	2,60
3	600	2,60
4	$1 \cdot 10^3$	2,60
5	$3 \cdot 10^3$	2,50
6	$6 \cdot 10^3$	2,20
7	$1 \cdot 10^4$	1,80
8	$3 \cdot 10^4$	0,84
9	$6 \cdot 10^4$	0,45
10	$1 \cdot 10^5$	0,28
11	$3 \cdot 10^5$	0,09

Tabelle 7: Frequenzgang der Peak-to-Peak-Ausgangsspannung bei $R_G = 680 \text{ k}\Omega$ und $U_G = (0,30 \pm 0,02) \text{ V}$

Messung	f_1 [Hz]	U_A [V]
1	100	6,80
2	300	6,80
3	600	6,70
4	$1 \cdot 10^3$	6,60
5	$3 \cdot 10^3$	5,40
6	$6 \cdot 10^3$	3,80
7	$1 \cdot 10^4$	2,50
8	$3 \cdot 10^4$	0,88
9	$6 \cdot 10^4$	0,45
10	$1 \cdot 10^5$	0,28
11	$3 \cdot 10^5$	0,09

Die Einstellungsgenauigkeit der Frequenz beträgt geschätzt $\pm 2\%$, die Messgenauigkeit der Peak-to-Peak-Ausgangsspannung geschätzt $\pm 5\%$.

b)

Es wird die gleiche Messung wie schon in Messung 2a) in der Konfiguration mit $R_G = 48,7 \text{ k}\Omega$ angestellt, allerdings mit einem zum Rückkopplungswiderstand parallel geschalteten Kondensator von 560 pF :

Tabelle 8: Frequenzgang der Peak-to-Peak-Ausgangsspannung bei $R_G = 48,70 \text{ k}\Omega$ mit parallelem Kondensator $C = 560 \text{ pF}$ und $U_G = (1,00 \pm 0,02) \text{ V}$

Messung	f_1 [Hz]	U_A [V]
1	100	1,56
2	300	1,56
3	600	1,56
4	$1 \cdot 10^3$	1,56
5	$3 \cdot 10^3$	1,38
6	$6 \cdot 10^3$	1,12
7	$1 \cdot 10^4$	0,80
8	$3 \cdot 10^4$	0,31
9	$6 \cdot 10^4$	0,16
10	$1 \cdot 10^5$	0,10
11	$3 \cdot 10^5$	0,03

Auch hier beträgt die Einstellungsgenauigkeit der Frequenz geschätzt $\pm 2\%$, und die Messgenauigkeit der Peak-to-Peak-Ausgangsspannung geschätzt $\pm 5\%$.

c)

Es wird wieder analog zu 2a) gemessen, diesmal mit einem Kondensator von $C = 47 \text{ nF}$, und nur bis zu einer Frequenz von 20 kHz , sowie einer Peak-to-Peak-Eingangsspannungen $U_G = (1,00 \pm 0,02) \text{ V}$.

Tabelle 9: Frequenzgang der Peak-to-Peak-Ausgangsspannung bei $R_G = 48,70 \text{ k}\Omega$ mit Kondensator am Eingang von $C = 47 \text{ nF}$ und $U_G = (1,00 \pm 0,02) \text{ V}$

Messung	f_1 [Hz]	U_A [V]
1	100	0,41
2	300	0,76
3	600	1,04
4	$1 \cdot 10^3$	1,52
5	$3 \cdot 10^3$	1,56
6	$6 \cdot 10^3$	1,57
7	$1 \cdot 10^4$	1,56
8	$2 \cdot 10^4$	1,51

Auch hier beträgt die Einstellungsgenauigkeit der Frequenz geschätzt $\pm 2\%$, und die Messgenauigkeit der Peak-to-Peak-Ausgangsspannung geschätzt $\pm 5\%$.

Messung 3

Als erste Konfiguration wird am Eingang ein Kondensator von $C = 22 \text{ }\mu\text{F}$ geschaltet, für den Rückkopplungswiderstand wird $R_G = 48,7 \text{ k}\Omega$ gewählt. Es ist zu beobachten, dass das Ausgangssignal weiterhin invertiert verstärkt rechteckförmig bleibt, mit einer Peak-to-Peak-Spannung von $(1,60 \pm 0,10) \text{ V}$. Ebenso kann eine Phasenverschiebung beobachtet werden. Die Form der Kurve ändert sich mit steigendem Widerstand immer weiter zu einer gegen den Peak der verstärkten Eingangsspannung steigenden Sättigungskurve an ihrem Rising-Edge, und eine gegen das Minimum der Eingangsspannung sättigende Kurve in ihrem Falling-Edge. Weiterhin ist bei erhöhtem Widerstand auch eine größere Verstärkung zu beobachten, auf eine Peak-to-Peak-Ausgangsspannung von $(8,88 \pm 0,10) \text{ V}$ für $R_G = 274 \text{ k}\Omega$ und $(22,8 \pm 1,0) \text{ V}$ für $R_G = 680 \text{ k}\Omega$. Schaltet man parallel zum Rückkopplungswiderstand einen Kondensator von $C = 560 \text{ pF}$, wird das Verhalten noch deutlicher.

Nun wird, bei einem Rückkopplungswiderstand $R_G = 48,7 \text{ k}\Omega$ ohne Kondensator am Ausgang, ein Kondensator am Eingang von 47 nF zugeschaltet. Die ausgehenden Spannungskurven folgen nun dem Eingangssignal an den Kanten, fallen allerdings über den konstanten Bereichen der Funktion stark ab.

Als letztes werden die beiden genutzten Widerstände gleichzeitig wie zuvor zugeschaltet. Man erkennt sowohl ein Abfallen an den Kanten, als auch über den konstanten Bereichen - Das Signal erinnert nun mehr an eine leicht

deformierte Sinusfunktion, als an eine Rechtecksfunktion:

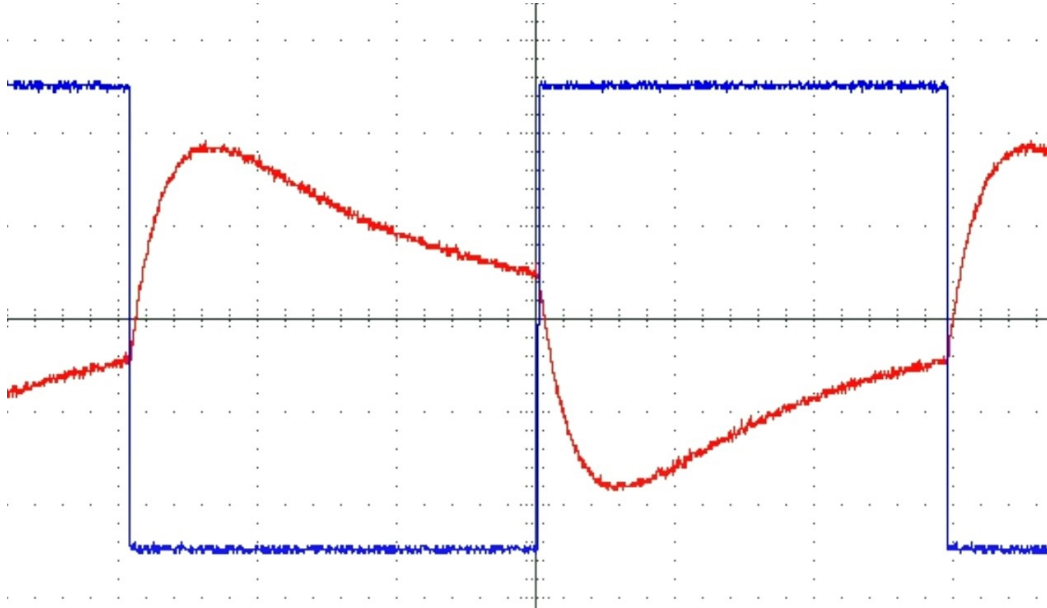


Abbildung 2: Die blaue Eingangsspannung wird zur fast sinusförmigen roten Ausgangsspannung überführt²

Auswertung und Diskussion

Die hier verwendeten Skripte sind der Ausarbeitung angehängt und entsprechend benannt.

Teil 1

a)

Fittet man auf die aufgenommenen Werte für $R_G = 48,7\text{k}\Omega$ die nach der hergeleiteten Theorie erwartete Gerade, im Diagramm:

²<https://www.youtube.com/watch?v=g70e00YepN8>, abgerufen am 12.03.2021

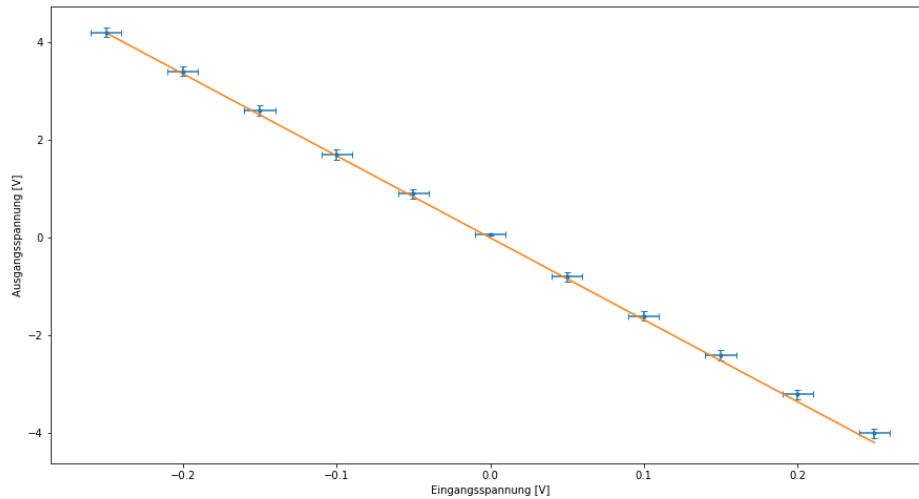


Abbildung 3: Der Verlauf der Ausgangsspannung bei Gleichspannung und $R_G = 48,7\text{k}\Omega$

Mit einer Steigung von $-16,75 \pm 0,29$.

In diesem Aufgabenteil wurde als Regressionsalgorithmus die „Orthogonal Distance Regression“ verwendet, die sowohl die Fehler der Versuchsparameter, als auch die der Messwerte berücksichtigt. In den folgenden Teilen der Auswertung waren die Fehler der Parameter ausreichend klein, sodass die „Least Squares“-Methode verwendet wurde.

Wiederholt man das Vorgehen für $R_G = 274\text{k}\Omega$, so erhält man:

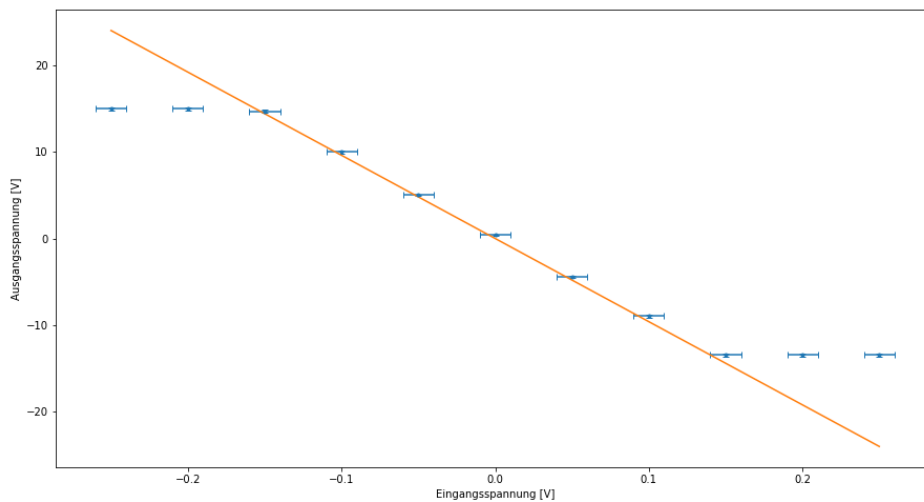


Abbildung 4: Der Verlauf der Ausgangsspannung bei Gleichspannung und $R_G = 274\text{k}\Omega$

Mit einer Steigung von $-96,26 \pm 1,85$.

Bei jedem der beiden Plots zeigt die negative Steigung die invertierende Eigenschaft des Verstärkers.

Vergleicht man die beiden Plots, so fällt sofort auf, dass es im Fall des höheren Rückkopplungswiderstandes zu einer Sättigung in den Bereichen hoher Spannungen kommt. Diese Limitation ist auf die begrenzt hohe Betriebsspannung des Operationsverstärkers zurückzuführen. Sie findet daher auch, wie erwartet, und aus den nicht weiter

gefitteten Werten ersichtlich, bei ± 15 V statt.

Quantitativ ist die Steigung im Plot wesentlich höher, was gemäß des höheren Rückkopplungswiderstandes auch zu erwarten ist: Aus (3) folgt die Linearität zum Rückkopplungswiderstand, was bei einem Verhältnis von $\frac{274 \text{ k}\Omega}{47,80 \text{ k}\Omega}$ auf eine etwa 5,73-mal höhere Verstärkung führen müsste. Beobachtet wird, mit Fehler nach Gauss, eine $5,75 \pm 0,15$ -fache Verstärkung, die Beobachtung ist also sehr gut mit der theoretischen Erwartung vereinbar, die relative Abweichung beträgt nur knapp 0,04 %.

b)

Trägt man das Verhalten der Peak-to-Peak-Ausgangsamplitude bei verschiedenen Eingangsspannungen für $R_G = 274 \text{ k}\Omega$ und $R_G = 680 \text{ k}\Omega$ auf so erhält man:

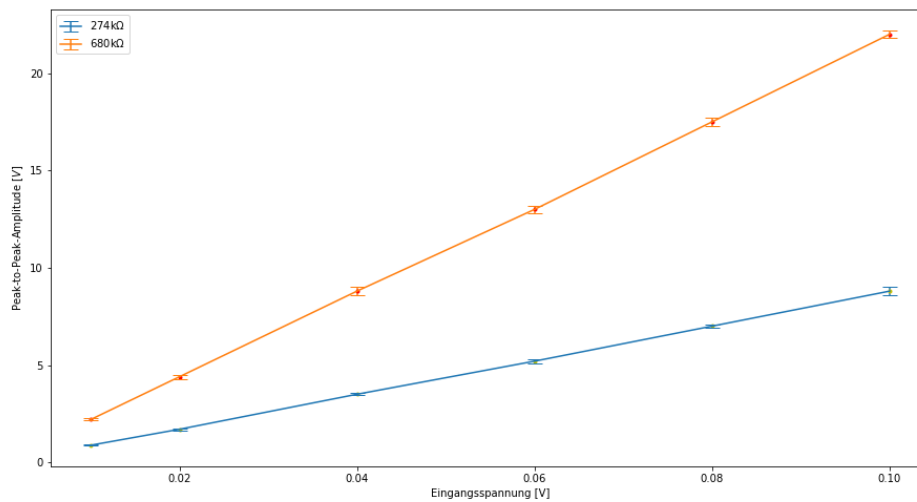


Abbildung 5: Die Peak-to-Peak-Amplituden bei Wechselspannung unter verschiedenen Rückkopplungswiderständen

Mit den Steigungen $87,27 \pm 0,92$ für $R_G = 274 \text{ k}\Omega$ und $219,00 \pm 2,95$ für $R_G = 680 \text{ k}\Omega$. Die theoretische Erwartung wäre hier, analog berechnet zu oben, etwa 2,48. Aus den gemessenen Steigungen erhält man $2,51 \pm 0,04$. Auch hier ist die theoretische Erwartung mit der Messung vereinbar. Die relative Abweichung ist mit 1,21 % auch hier recht gering.

Teil 2

a)

Der besprochene Frequenzgang der Schaltung wird am besten in der logarithmischen Darstellung deutlich. Hierbei werden die augenommenen Ausgangsspannungen noch durch ihre Eingangsspannungen geteilt, damit eine bessere Vergleichbarkeit der Graphen bezüglich dem untersuchten Verhalten gegeben ist:

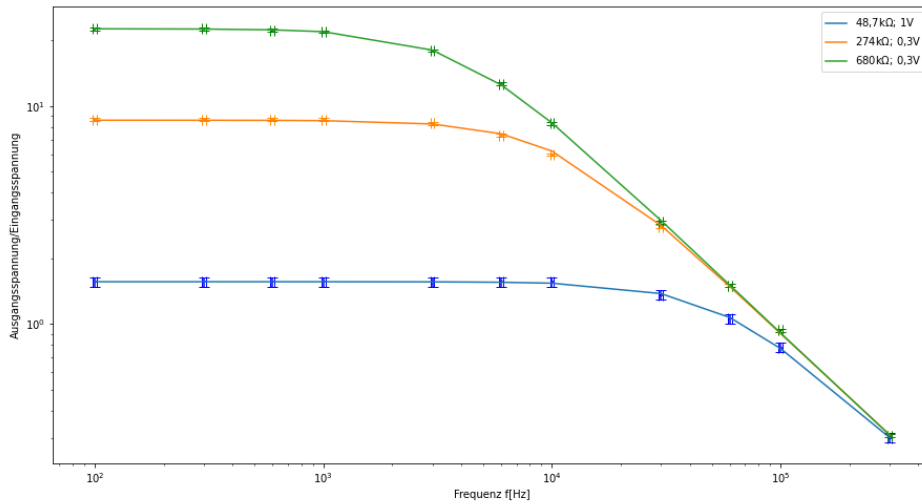


Abbildung 6: Die Frequenzgänge der Spannungen bei verschiedenen Widerständen

Das Verhalten der Graphen verläuft wie erwartet: Mit zunehmender Verstärkung wird die Bandbreite, bei der keine Dämpfung eintritt, immer geringer, diese Beziehung ist erkennbar linear.

b)

Es wird analog zu 2a) vorgegangen:

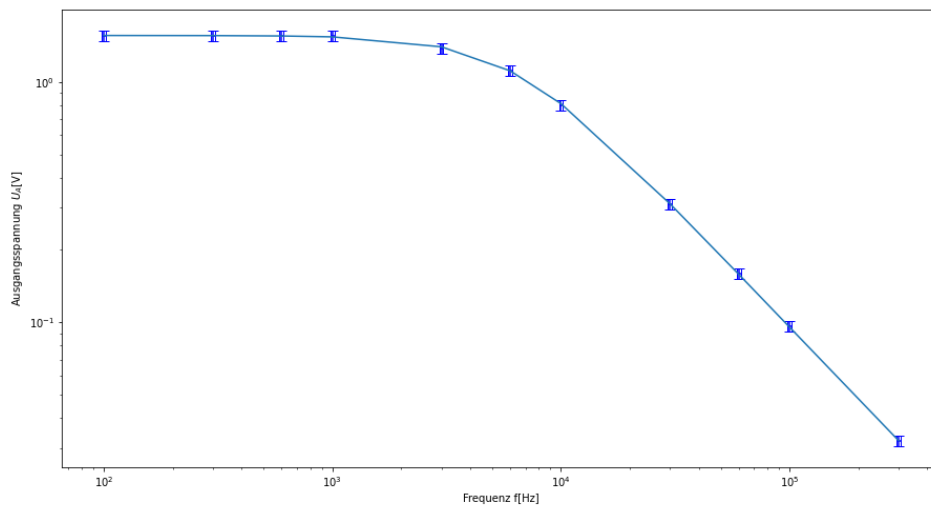


Abbildung 7: Frequenzgang mit Kondensator parallel zum Rückkopplungswiderstand

Es fällt auf, dass die Kurve sich zunächst analog zu ihrer Entsprechung in 2a) mit gleichem Widerstand verhält, dann aber viel früher abfällt (Siehe dazu auch Tabelle). Diese Verringerung der Bandbreite ist auf den Einsatz des Kondensators zurückzuführen: Er wirkt mit diesem Aufbau zusätzlich als Tiefpassfilter, wodurch höhere Frequenzen noch eher abgedämpft werden als alleine durch den Verstärkerschaltkreis.

c)

Die Auftragung der Messdaten mit am Eingang in Reihe geschalteten Kondensator erfolgt auch hier wieder logarithmisch:

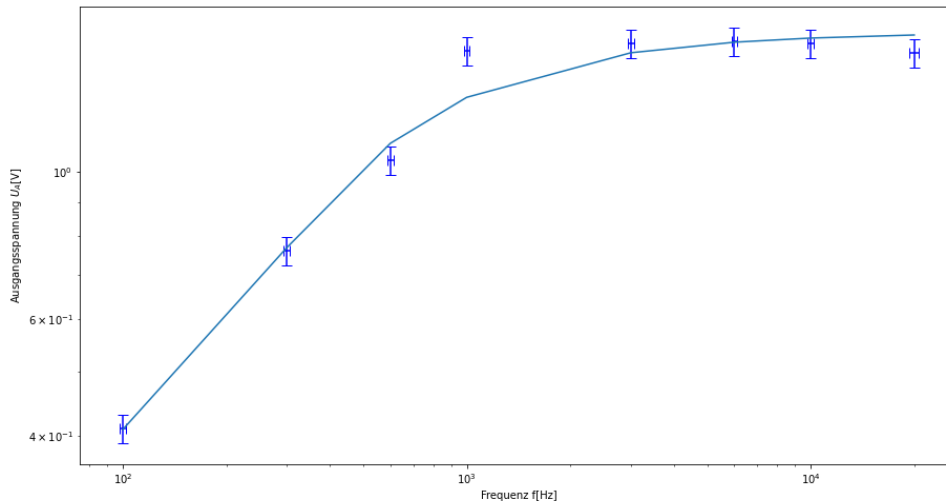


Abbildung 8: Frequenzgang mit Kondensator am Eingang

Die Kurve ist nun im Vergleich zu den vorherigen Messungen auf der Frequenzachse invertiert: Die Dämpfung wird also nun mit zunehmender Frequenz immer schwächer, die Schaltung verhält sich also als Hochpassfilter.

Auffällig ist einzig der etwas stark von der gefitteten Funktion abweichende Messwert Nr. 4 aus Tabelle . Eine mögliche Erklärung wäre die geringe Zahl an Messwerten: Vielleicht ist der reale Verlauf der Kurve an dieser Stelle in Wahrheit „unstetiger“, sodass links vom fraglichen Wert die Kurve noch weiter linear auf ihn zugelaufen wäre, und rechts von ihm der Verlauf hätte konstanter sein müssen, sodass an seiner Stelle ein „Knick“ entsteht. Bei einer höheren Zahl an Messungen für Frequenzen in diesem Bereich könnte man vermutlich einen besseren Fit erzeugen.

Teil 3

Das derartige „zerlaufen“ der Kanten ist auf die Tiefpassfiltereigenschaften (siehe Einleitung) der genutzten Konfiguration zurückzuführen: Das Rechtecksignal, welches sich idealerweise aus unendlich vielen Sinussignalen mit steigender Frequenz zusammensetzt, wird in den höheren Frequenzen sehr stark gedämpft, wodurch die Kanten weniger scharf definiert werden. Der Effekt nimmt entsprechend einem Tiefpass mit stärkerem Rückkopplungswiderstand, also größerer Verstärkung, zu. Da das Zuschalten des Kondensators am Ausgang wie oben behandelt die Tiefpasseigenschaften wesentlich verstärkt, bewirkt es auch hier eine weitere Verstärkung des Effekts.

In der zweiten Konfiguration deutet die Form der Kurve auf die Hochpasswirkung der Schaltung hin: Werden hohe Frequenzen, die für die Scharfen kanten der Funktion verantwortlich sind, weiter verstärkt, während die tiefen Frequenzen, welche vor allem über den größeren Konstanten bereichen zutage treten, gedämpft werden, bleiben die Kanten in ihrer Verstärkung eher unberührt, während die konstanten Bereiche aufgrund der Dämpfung abfallen müssen.

Bei der Kombination der Konfigurationen kombinieren sich auch ihre Filtereigenschaften - Dadurch dass sowohl sehr hohe, als auch sehr tiefe Frequenzen gedämpft werden, wird ein Bandpassfilter erzeugt. Das sorgt dafür, dass Kanten wie auch konstante Bereiche Dämpfungen erfahren, und dass sich das Signal stark an die Sinusfunktion derjenigen Frequenz annähert, die der Bandpassfilter nicht dämpft.

Fazit

Der Operationsverstärker erlaubt, neben der Signalverstärkung, in Kombination mit einigen weiteren elementaren Bauelementen zentrale Modifikationen eines Signals, wie die Hoch-, Tief-, oder Bandpassfilterung. Die erhaltenen

Messdaten aus diesem Versuch entsprachen gut den theoretischen Erwartungen und bestätigen das Modell. Teilweise sind die Messungen extrem genau an den Vorhersagen, die noch problematischen Ergebnisse ließen sich vermutlich durch eine selektive Erhöhung der Stichprobe besser einordnen.