

Versuch 242
Spannungsverstärkung mit dem Operationsverstärker
Viktor Ivanov
14. August 2024

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	2
1.1 Motivation	2
1.2 Physikalische Grundlagen	2
1.2.1 Differenzverstärker	2
1.2.2 Spannungsverstärkung des invertierenden Verstärkers	2
2 Messprotokol und Durchführung des Versuchs	4
3 Auswertung	11
3.1 Verstärkung bei Gleichspannung	11
3.2 Verstärkung bei Wechselspannung	12
3.3 Frequenzgang verschiedener Verstärkerkonstellationen	13
3.4 Impulsverstärkung	15
3.5 Zusammenfassung und Diskussion	15
3.5.1 Zusammenfassung	15
3.5.2 Diskussion	16
4 Anhang	19
4.1 Quellen	19
4.2 Python-Code	19

1 Einleitung

1.1 Motivation

In diesem Versuch untersuchen wir die Eigenschaften eines Verstärkers, da Verstärker ziemlich oft verwendete Geräte in der Praxis eines Physikers sind.

1.2 Physikalische Grundlagen

1.2.1 Differenzverstärker

Differenzverstärker sind die meistverwendeten Typen von Verstärker. Sie verstärken die Spannungsdifferenz zwischen zwei Eingängen. Wenn man den einen Eingang erdet und die zu verstärkende Spannung auf den anderen gibt, erhält man einen invertierbaren Verstärker, analog umgekehrt erhält man einen nicht invertierbaren Verstärker. In diesem Versuch betrieben wir den $\mu A741$ nur als invertierender Verstärker.

Es gibt drei wichtige Größen, die einen Operationsverstärker charakterisieren:

Eingangswiderstand Der Eingangswiderstand ist mit folgender Formel ausgedrückt:

$$R_e = \frac{U_e}{I_e} \quad (1)$$

Er sollte möglichst groß sein, damit das Eingangssignal nicht vom Verstärker belastet wird.
Beim $\mu A741$ liegt er bei $R_e = 10^6 \Omega$

Ausgangswiderstand Der Ausgangswiderstand ist mit folgender Formel ausgedrückt:

$$R_a = \frac{U_a}{I_a} \quad (2)$$

Er sollte möglichst klein sein, damit das Ausgangssignal unabhängig von der Last ist.
Beim $\mu A741$ liegt er bei $R_a = 50 \Omega$

Leerlaufverstärkung Die Leerlaufverstärkung ist mit folgender Formel ausgedrückt:

$$V_0 = \frac{U_a}{U_e} \quad (3)$$

Daher ist sie umgekehrt proportional zur Frequenz. Es ist wichtig zu bemerken, dass oberhalb von $10 Hz$ die Verstärkung nicht mehr zunimmt.

Im Datenblatt stehen Minimalwerte und ein typischer Wert, da die Leerlaufverstärkung von vielen Variablen abhängt. Der Frequenzgang von $\mu A741$ kann man in Abbildung 1 finden.

Wir werden versuchen, die Leerlaufverstärkung zu minimieren, wobei wir einen Widerstand einfügen. Wir machen das so, dass das Ausgangssignal um 180° um seiner Phase verschoben ist. Wenn er nicht um 180° verschoben ist, entsteht eine Mitkopplung und der Verstärker übersteuert. In Abbildung 2 sieht man einen invertierbaren und einen nicht invertierbaren Verstärker.

1.2.2 Spannungsverstärkung des invertierenden Verstärkers

Nach der Kirchoffsche Knotenregel gilt es für die Ströme am Eingang des invertierenden Verstärkers:

$$I_1 + I_2 - I_e = 0 \quad (4)$$

Bei Widerständen R_1 und R_2 kleiner als der Innenwiderstand R_i , können wir annehmen, dass der Eingangsstrom $I_e = 0$.

Wir erhalten dann:

$$I_1 + I_2 = \frac{U_1 - U_e}{R_1} + \frac{U_a - U_e}{R_2} = 0 \quad (5)$$

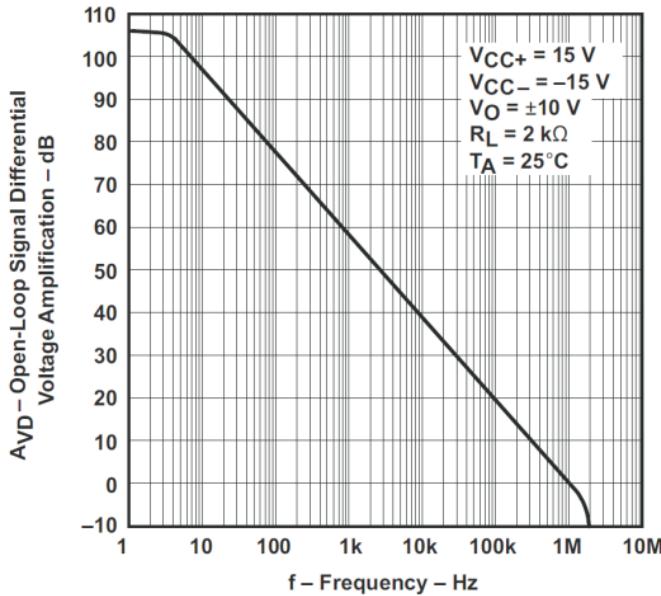


Abbildung 1: Frequenzgang der Leerlaufverstärkung aus dem Datenblatt des $\mu 741$

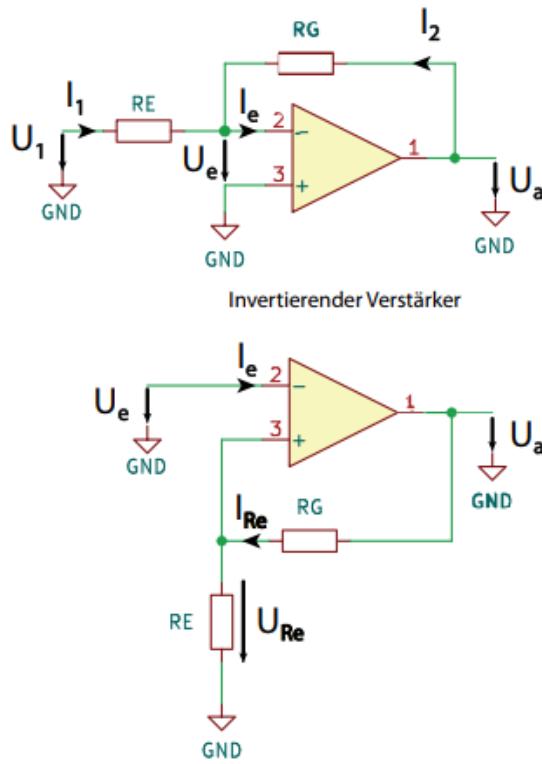


Abbildung 2: Verstärkerschaltungen eines OpAmp

Wenn wir 3 in 5 einsetzen, erhalten wir:

$$\frac{U_1}{U_a} = - \left[\frac{1}{V_o} + \frac{R_e}{R_g} \left(1 + \frac{1}{V_o} \right) \right] \quad (6)$$

Bei großen Verstärkungen ist $\frac{1}{V_0} \ll 1$. Wenn auch $\frac{R_e}{R_g} \gg \frac{1}{V_0}$ ist, dann gilt:

$$-\frac{U_a}{U_1} = \frac{R_g}{R_e} = V' \quad (7)$$

Wobei $\frac{U_a}{U_1}$ die Verstärkung des gegengekoppelten, invertierenden Verstärkers in Abbildung 1 ist.

In Abbildung 3 erkennen wir, dass sie Betriebsverstärkung bis 80kHz konstant bleibt und danach ist es gleich die Leerverstärkung.

Wenn wir in den Gegenkopplungszweig einen Kondensator hinzufügen, haben wir einen Tiefpass gemacht. Wenn wir dasselbe parallel zum Widerstand R_e machen, haben wir einen Hochpass am Eingang.

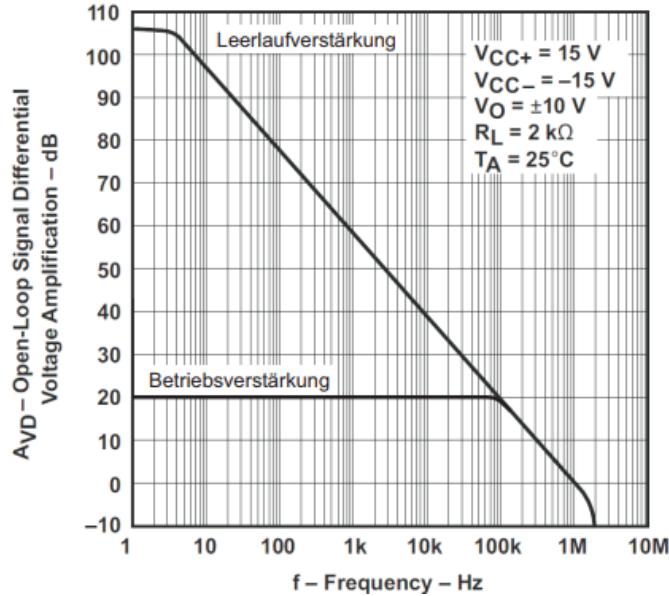


Abbildung 3: Frequenzgang der Betriebsverstärkung eines $V'=10$ Verstärkers

2 Messprotokol und Durchführung des Versuchs

Das Messprotokoll befindet sich auf der nächsten Seite.

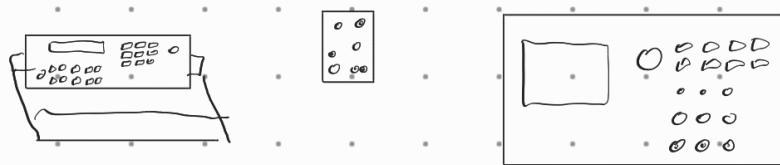
18.06.23

Versuch 242
Spannungsverstärkung mit dem
Operationsverstärker

Viktor Ivanov
Georg Quirll

I Messaufbau

- Operationsverstärker μA 741 mit entsprechender Beschaltung
- Peaktech Signalgenerator
- Tektronix TDS 1072 zweikanal Oszilloskop



Skizze 1: Versuchsaufbau

A1] μA 741 als Verstärker für Gleich- und Wechselspannungen

#	Eingangsspannung [mV]	ΔU_E [mV]	Ausgangsspannung [V]	ΔU_A [V]
1	250	0,5	-3,81	0,02
2	190	0,5	-2,83	0,02
3	130	0,5	-1,89	0,02
4	70	0,5	-0,903	0,02
5	0	0,5	0,201	0,02
6	-70	0,5	1,34	0,02
7	-130		2,29	0,02
8	-190		3,26	0,02
9	-250		4,21	0,02
				0,02

Tabelle 1: DC, $R = 48,7 \text{ k}\Omega$, Ein-Ausgangsspannungsmessung

#	Eingangsspannung $[mV]$	$\Delta U_E [mV]$	Ausgangsspannung $[V]$	$\Delta U_A [V]$
1	250	0,5	-12,8	0,02
2	190	0,5	-12,8	0,02
3	130	0,5	-10,6	0,02
4	70	0,5	-5,18	0,02
5	0	0,5	1,05	0,02
6	-70	0,5	7,96	0,02
7	-137	0,5	12,8	0,02
8	-151	0,5	14,0	0,02
9	-250	0,5	14,0	0,02
				0,02

Tabelle 2: DC, $R = 274 \text{ k}\Omega$, Ein-Ausgangsspannungsmessung

A 1 b) /

# Mess	$V_{SS} (V_{PP}) [V]$ (amt. Funkt.-Generator)	$V_{SS} (u_g) [V]$ (amt. Oszilloskop)	$\Delta u_g [mV]$	$U_a [V]$	$\Delta U_a [V]$
1	0,05	0,0432	4	0,352	$\pm 0,01$
2	0,2	0,170		1,44	$\pm 0,01$
3	0,4	0,336		2,88	$\pm 0,09$
4	0,6	0,5		4,28	
5	0,8	0,672		5,76	
6	1	0,840	8	7,20	0,08
7	1,217	1		8,60	

Tabelle 3: AC, $R_g = 274 \text{ k}\Omega$, Ein-Ausgangsspannungsmessung

# Mess	$V_{SS}(V_{PP})$ [V] (auf Funkt.-Generator)	$V_{SS}(U_g)$ [mV] (auf Oszilloskop)	$1U_g$ [mV]	U_a [V]	ΔU_a [V]
1	0,05	144	4	3,00	0,07
2	0,2	192	1	4,00	0,07
3	0,4	338	2	7,04	0,09
4	0,6	500	3	10,4	
5	0,8	672	4	14,2	
6	1	840	5	17,6	0,08
7	1,217	1	6	21,2	

Tabelle 3: AC, $R_g = 680 \text{ k}\Omega$, Ein-Ausgangsspannungsmessung

A2 | Frequenzgang verschiedener Verstärkerkonstellationen

# Mess	S [μHz]	ΔS [μHz]	U_a [V]	ΔU_a [V]
1	0,1	0,05	6,40	0,005
2	0,3		6,40	
3	0,6		6,40	
4	1		6,24	
5	3		5,60	
6	6		4,24	0,05
7	10		3,02	
8	30		1,2	
9	60		0,57	0,05
10	100		0,35	
	300		0,12	

Tabelle 4: $R_g = 680 \text{ k}\Omega$; U_g (Oszilloskop) = 0,3V

#Moss	$S [k\mu H]$	$\Delta S [k\mu H]$	$U_a [V]$	$\Delta U_a [V]$
1	0,1		2,57	0,005
2	0,3	0,05	2,56	
3	0,6		2,56	
4	1		2,56	
5	3		2,48	
6	6		2,32	0,02
7	10		2,02	0,02
8	30		1,02	0,01
9	60		0,56	
10	100		0,35	0,03
	300		0,12	0,05

Tabelle 5: $R_g = 274 k\Omega$; U_g (Oszilloskop) = 0,3V

#Moss	$S [k\mu H]$	$\Delta S [k\mu H]$	$U_a [V]$	$\Delta U_a [V]$
1	0,1		1,54	0,005
2	0,3	0,05	1,54	0,02
3	0,6		1,54	
4	1		1,54	
5	3		1,56	
6	6		1,56	
7	10		1,54	
8	30		1,42	
9	60		1,18	
10	100		0,9	
	300		0,39	

Tabelle 6: $R_g = 48 k\Omega$; U_g (Oszilloskop) = 1 V

- Wir haben jetzt eine Parallelschaltung $C = 560 \text{ pF}$

#Moss	$S_1 [\mu\text{H}]$	$\Delta S [\mu\text{H}]$	$U_a [V]$	$\Delta U_a [V]$
1	0,1		1,56	0,005
2	0,3	0,08	1,56	0,02
3	0,6		1,56	
4	1		1,54	
5	3		1,30	
6	6		1,12	
7	10		0,86	=
8	30		0,32	
9	60		0,16	
10	100		0,10	
	300		0,036	

Tabelle 7: $R_g = 48 \text{ k}\Omega$; $U_g(\text{Oszilloskop}) = 1 \text{ V}$

Parallelschaltung; S_1 in Position 3 ($C = 47 \text{ nF}$)

#Moss	$S_1 [\mu\text{H}]$	$\Delta S [\mu\text{H}]$	$U_a [V]$	$\Delta U_a [V]$
1	0,3		0,52	0,02
2	0,6	0,08	0,86	
3	1		1,13	
4	3		1,31	
5	6		1,08	
6	10		0,81	
7	20		0,46	=
8	30		0,32	

Tabelle 8: $R_g = 48 \text{ k}\Omega$; $U_g(\text{Oszilloskop}) = 1 \text{ V}$; $C = 560 \text{ pF}$

A3/ Rechteckmessung

- Bei höherer Verstärkung ($R_g \gg$), ist die Kante am flächsten, der Maximum wird später erreicht.
- Bei $C = 22\mu F$ beobachten wir einen Tiefpass, bei $C = 27\mu F$ ist das ein Hochpass
- Wenn wir bei S_2 auch ein Kondensator parallel hinzufügen, beobachten wir ein Tiefpassverhalten

J. Velt

3 Auswertung

3.1 Verstärkung bei Gleichspannung

Im ersten Versuchsteil haben wir den Operationsverstärker unter Gleichspannung untersucht. Im Messprotokoll haben wir in Tabelle 1 und Tabelle 2 bei verschiedenen Eingangsspannungen die Ausgangsspannungen gemessen. Die Daten haben wir in einem Python-Programm eingesetzt und eine lineare Funktion angepasst. Die Diagramme sind in Abbildungen 4 für $R = 48,7\text{k}\Omega$ und 5 für $R = 274\text{k}\Omega$ dargestellt.

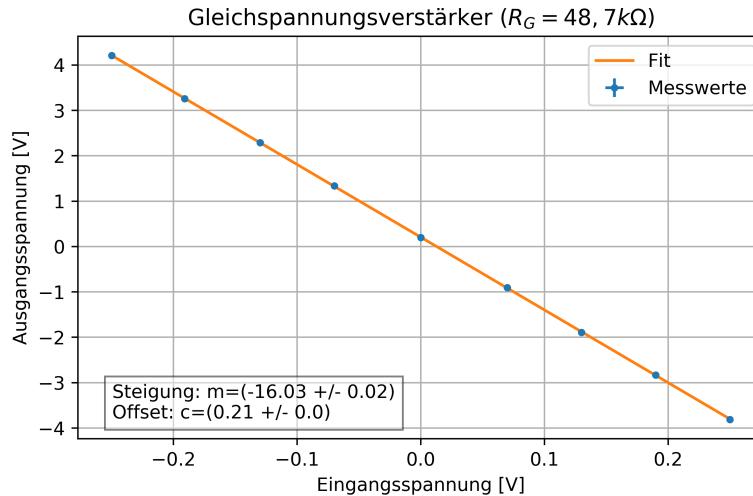


Abbildung 4: Ausgangs- gegen Eingangsspannung DC, $48,7\text{k}\Omega$

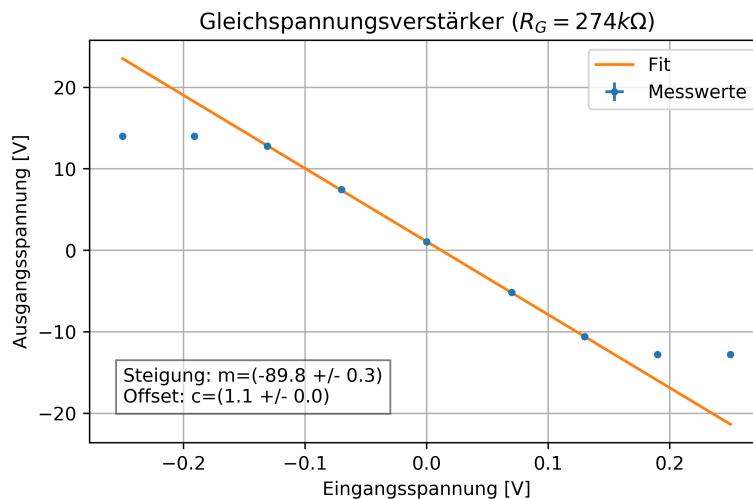


Abbildung 5: Ausgangs- gegen Eingangsspannung DC, $274\text{k}\Omega$

Es ist aus Abbildung 5 zu sehen, dass bei sehr kleinen und sehr großen Eingangsspannungen die Ausgangsspannung nicht höher/kleiner geht. Das ist wahrscheinlich, da der Operationsverstärker bis zu bestimmten Spannungen arbeitet und danach nicht mehr verstärkt.

Die beiden Graphen habe ich zusammengestellt, um den Unterschied leichter zu sehen. Das Diagramm ist in Abbildung 6 dargestellt.

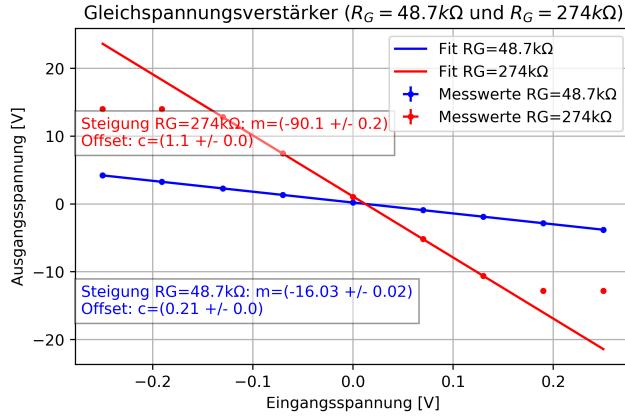


Abbildung 6: Ausgangs- gegen Eingangsspannung DC, 48,7k Ω und 274k Ω

Aus Gleichung 7 sehen wir, dass die Steigung der Graphen der Betriebsverstärkung entspricht:

$$V' = -\frac{U_a}{U_1} \quad (8)$$

Der Fehler nehmen wir aus dem Fehler der Steigung.

Wir können auch einen "theoretischen Wert" der Betriebsverstärkung aus derselben Gleichung berechnen:

$$V' = \frac{R_g}{R_e} = V' \quad (9)$$

Der Fehler beträgt aus dem Gauß'schen Fehlerfortpflanzungsgesetz:

$$\Delta V'_{theo} = V' \sqrt{\left(\frac{\Delta R_G}{R_G}\right)^2 + \left(\frac{\Delta R_E}{R_E}\right)^2} \quad (10)$$

Die Endergebnisse und die Abweichungen zwischen experimentellen und theoretischen Wert habe ich in Tabelle 9 dargestellt.

Tabelle 9: Verstärkungen DC bei verschiedenen Widerstände

	V'_{exp} []	$\Delta V'_{exp}$ []	V'_{theo} []	$\Delta V'_{theo}$ []	σ -Abweichung [σ]
$R = 48.7 k\Omega$	16.028	0.020	16.2	1.1	0.18
$R = 274 k\Omega$	89.8	0.3	91	6	0.24

Die Ergebnisse besprechen wir in der Diskussion.

3.2 Verstärkung bei Wechselspannung

Im nächsten Versuchsanteil haben wir dasselbe wie im ersten gemacht, aber mit Wechselspannung (AC). Wir haben die Ein- und Ausgangsspannungen bei den Widerständen $R = 274 k\Omega$ und $R = 680 k\Omega$ gemessen. Die Daten habe ich in Diagrammen 7 und 8 geplottet und lineare Funktionen angepasst.

Ich habe aus den Daten in den beiden Diagrammen ein gemeinsames Diagramm erstellt, Abbildung 9. Auf demselben Weg wie bei der Gleichspannung habe ich die experimentellen und theoretischen Betriebsverstärkungen berechnet und die in Tabelle 10, zusammen mit denen σ -Abweichungen geschrieben. Die Ergebnisse besprechen wir in der Diskussion.

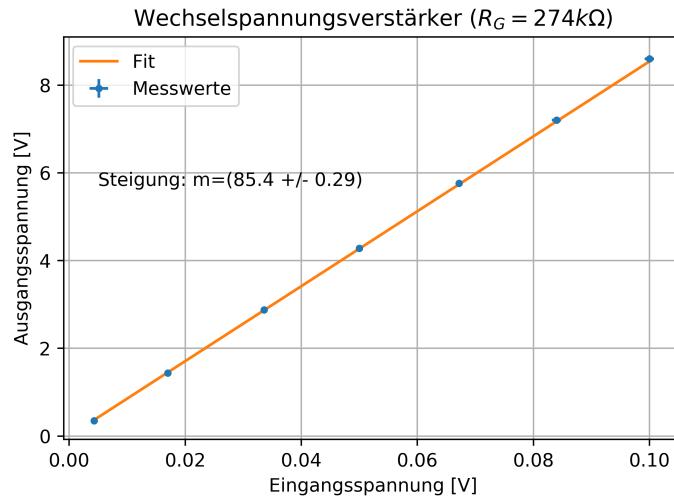


Abbildung 7: Ausgangs- gegen Eingangsspannung AC, $R = 274\text{k}\Omega$

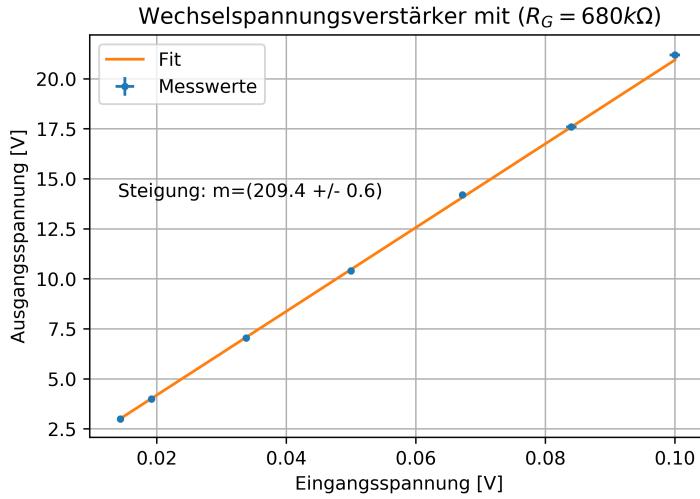


Abbildung 8: Ausgangs- gegen Eingangsspannung AC, $R = 680\text{k}\Omega$

Tabelle 10: Verstärkungen AC bei verschiedenen Widerständen

	V'_{exp} []	$\Delta V'_{exp}$ []	V'_{theo} []	$\Delta V'_{theo}$ []	σ -Abweichung [σ]
$R = 274\text{k}\Omega$	85.40	0.29	91	6	0.92
$R = 680\text{k}\Omega$	209.4	0.6	227	16	1.07

3.3 Frequenzgang verschiedener Verstärkerkonstellationen

In diesem Versuchsteil haben wir verschiedenen Schaltungen untersucht (die Schaltungen sind im Messprotokoll geschrieben). Wir haben bei verschiedenen Frequenzen die Ausgangsspannungen gemessen.

Die Schaltungen besitzen eine Gleichspannung U_G , einen Widerstand R und manche hatten auch eine Kapazität C . Die Daten habe ich in einem Diagramm eingesetzt und die verschiedenen Schaltungen verschiedenen Farben zugeordnet, Abbildung 10.

Wie in Abbildung 3 zu sehen, die blaue, gelbe und grüne Messreihen nehmen linear ab nach einer gewissen Frequenz, wobei je größer der gegengekoppelten Widerstand, desto höheren Frequenz gebraucht wird, von Betriebsverstärkung

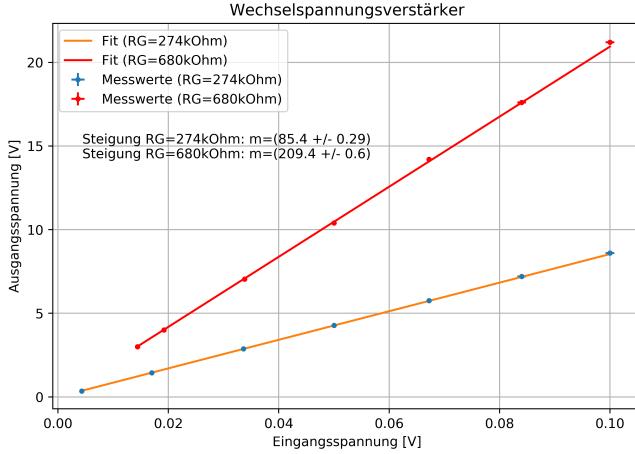


Abbildung 9: Ausgangs- gegen Eingangsspannung AC, verschiedene Spannungen

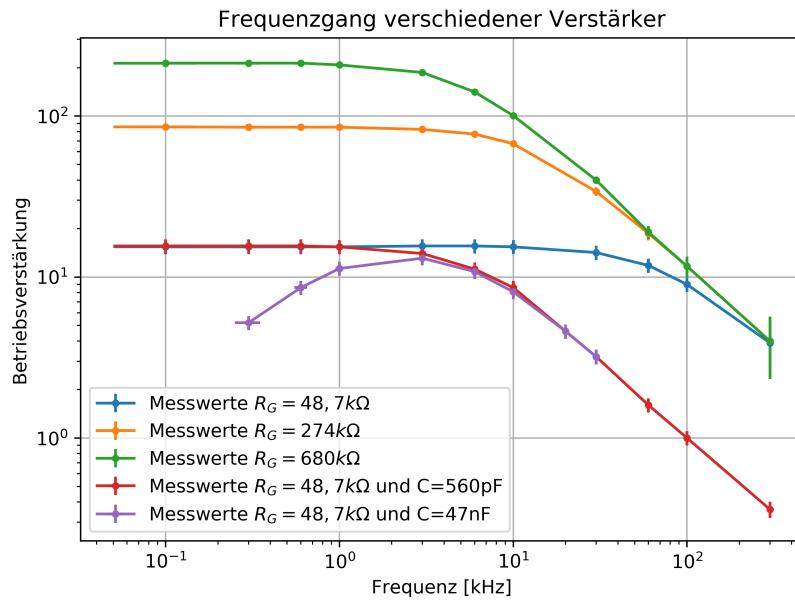


Abbildung 10: Frequenzen gegen Ausgangsspannung verschiedene Schaltungen

zur Leerverstärkung zu wechseln. Sie verhalten sich ein bisschen wie einen Tiefpassfilter, aber nicht so stark wie die rote Kurve, über denen wir später sprechen werden.

Die roten und lila Kurven sind von Schaltungen mit Kondensatoren.

Die rote hat einen parallel geschalteten Kondensator mit Kapazität $C = 560\text{ pF}$. Wie in der Einleitung besprochen, das entspricht einem Tiefpass, was von Abbildung 10 bestätigt wurde.

Die Lila-Kurve sollte einem in Reihe geschalteten Kondensator mit Kapazität $C = 47\text{ nF}$ entsprechen, was ein Hochpass ist, aber wir sehen einen Widerspruch im Bild 10. Meiner Meinung ist, dass wir den parallel-geschalteten Kondensator nicht herausgenommen haben und daher bei der lila wir einen Tief- und einen Hochpass haben, was als einen Bandpassfilter arbeitet.

3.4 Impulsverstärkung

Im letzten Versuchsteil haben wir ein Rechtecksignal auf den Verstärker gegeben. Wir haben danach Bilder für jede Einstellung der Gegenkopplung der Ausgangsspannung U_g und des FFT der Ausgangsspannung aufgenommen. Die Bilder sind in Abbildungen 11, 12, 13 und 14 zu finden.

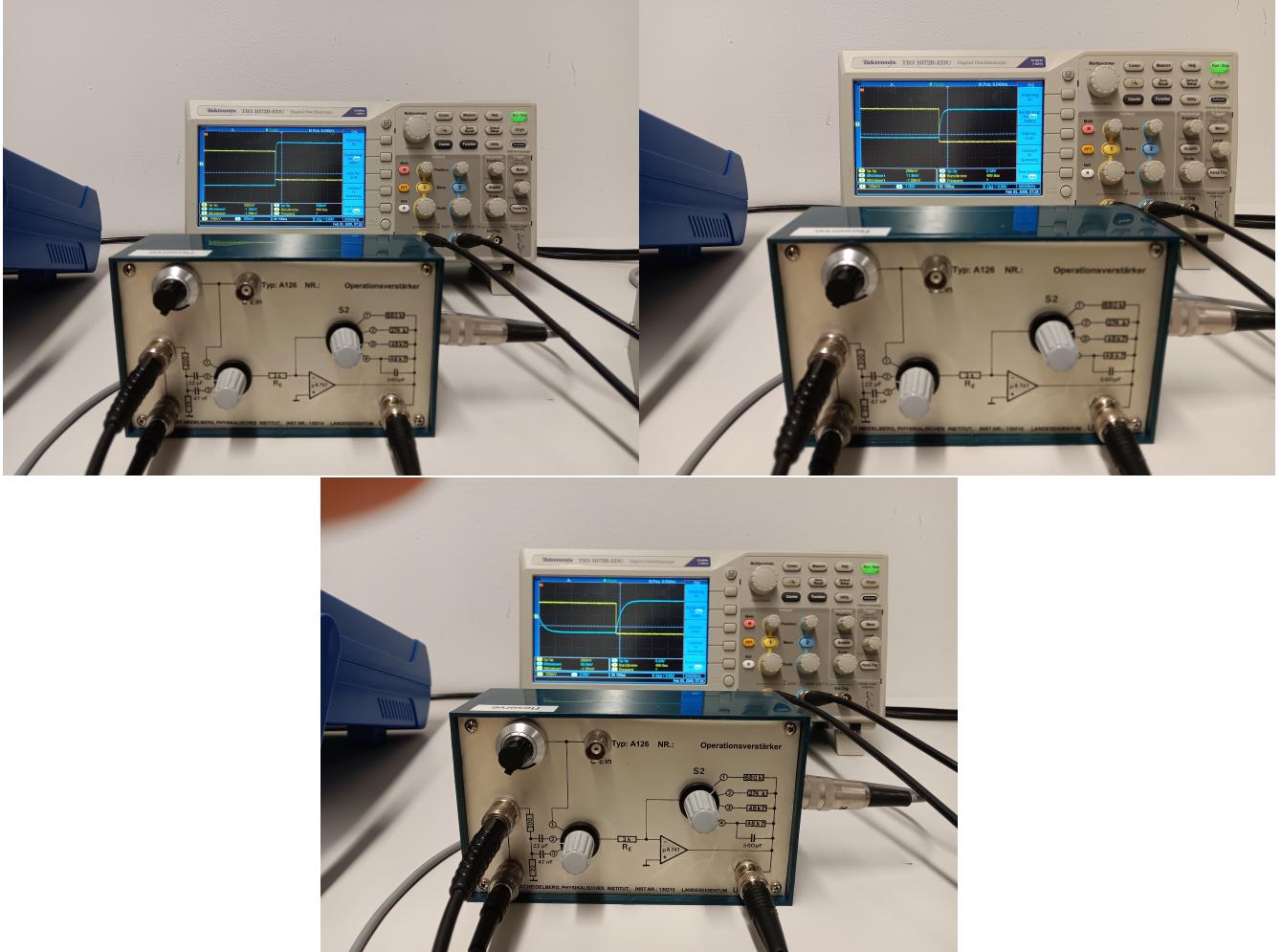


Abbildung 11: Rechteckssignal, S1: $C = 22\mu F$ Links: $R = 48,7k\Omega$ Rechts: $R = 274k\Omega$, Unten: $R = 680k\Omega$

Die Bilder besprechen wir in der Diskussion.

3.5 Zusammenfassung und Diskussion

3.5.1 Zusammenfassung

In diesem Versuch habe ich zuerst die Verstärkung bei Gleichspannung untersucht, wobei ich die Daten aus Tabellen 1 und 2 in Diagrammen geplottet habe, lineare Funktionen angepasst habe und aus der Steigung die experimentellen Werte der Betriebsverstärkung aus Gleichung 7 bestimmt habe. Aus derselben Gleichung habe ich auch die theoretischen Werte berechnet und die mit den experimentellen verglichen. Die Ergebnisse habe ich in Tabelle 9 dargestellt.

Im nächsten Teil habe ich das analoge gemacht, aber mit Wechselspannung. Die Daten sind in der Tabelle 10 dargestellt.

Die Ergebnisse aus Teilen 3.1 und 3.2 habe ich in Tabelle 11 zusammengefasst.

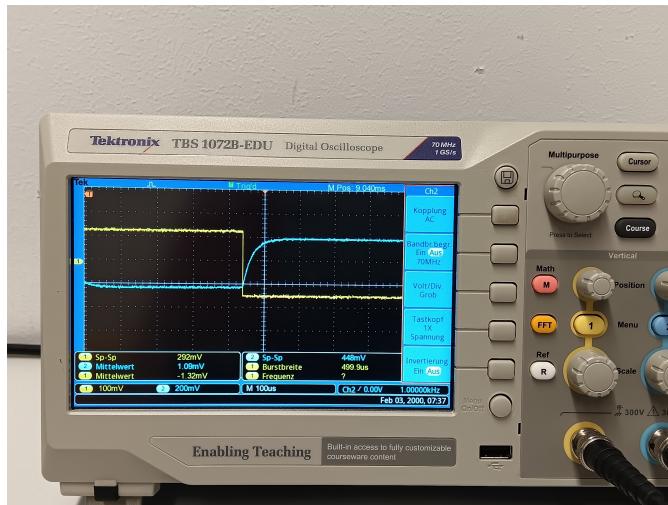


Abbildung 12: Rechteckssignal, S1: $C = 22\mu F$ S2: $R = 48,7k\Omega$, $C = 560pF$

Tabelle 11: Verstärkungen DC bei verschiedenen Widerständen, DC und AC

		V'_{exp} []	$\Delta V'_{exp}$ []	V'_{theo} []	$\Delta V'_{theo}$ []	σ -Abweichung [σ]
DC	$R = 48,7k\Omega$	16.028	0.020	16.2	1.1	0.18
	$R = 274k\Omega$	89.8	0.3	91	6	0.24
AC	$R = 274k\Omega$	85.40	0.29	91	6	0.92
	$R = 680k\Omega$	209.4	0.6	227	16	1.07

Im Teil 3.3 habe ich die Frequenzen gegen Ausgangsspannungen bei verschiedenen Schaltungen in Diagramm 10 dargestellt und die kommentiert.

Im letzten Teil habe ich die Bilder, die wir während des Versuchs aufgenommen haben, importiert.

3.5.2 Diskussion

Wir beobachten, dass bei der Gleichspannung die Abweichungen zwischen experimentellen und theoretischen Werten klein sind, sie liegen in dem 1σ -Bereich und sind daher insignifikant. Die relativen Fehler von den experimentellen Werten liegen zwischen 0,12% und 0,28%, was sehr klein ist. Die relativen Fehler von den theoretischen Werten liegen um die 7%, das ist ein bisschen größer als bei den experimentellen, aber ist noch akzeptabel. Der Fehler des Widerstands beträgt 5%, wenn wir Geräte mit kleineren Fehlern hatten, würde es möglich sein, die relativen Fehler auch kleiner zu machen.

Im Allgemeinen kann man über dieses Versuchsteil sagen, dass die Formel 7 für Gleichspannung gilt und auch, dass es keine systematischen Fehler bis jetzt aufgetreten sind.

Im nächsten Versuchsteil, bei denen wir Wechselspannung verwendet haben, haben wir Abweichungen von 0,92 σ und 1,07 σ . Beide liegen um den 1σ -Bereich und sind daher insignifikant, aber sind viel größer als bei der Gleichspannungsmessung. Die relativen Fehler sind ungefähr gleich wie beim ersten Versuchsteil. Die größere Abweichung könnte daran liegen, dass wir angenommen haben, dass die Frequenz klein genug ist und die Messung noch beim flachen Teil des Bodendiagramms sich befindet. Die Messung haben wir bei einer Frequenz von $f = 1kHz$ gemacht. In Abbildung 10 sehen wir, dass die Messung bei der Frequenz $f = 1kHz$ noch im Plateaubereich sich befindet, aber fängt an ein bisschen abzunehmen. Wir können aber noch sagen, dass bei kleinen Frequenzen Formel 7 immer noch gilt.

Im Teil 3.3 haben wir schon die wichtigste Sache besprochen. Das einzige Unerwartete, was wir in Diagramm 10 gesehen haben, ist, dass die lila Kurve (diese mit dem in Reihe geschalteten Kondensator) Bandpassfilter-Eigenschaften

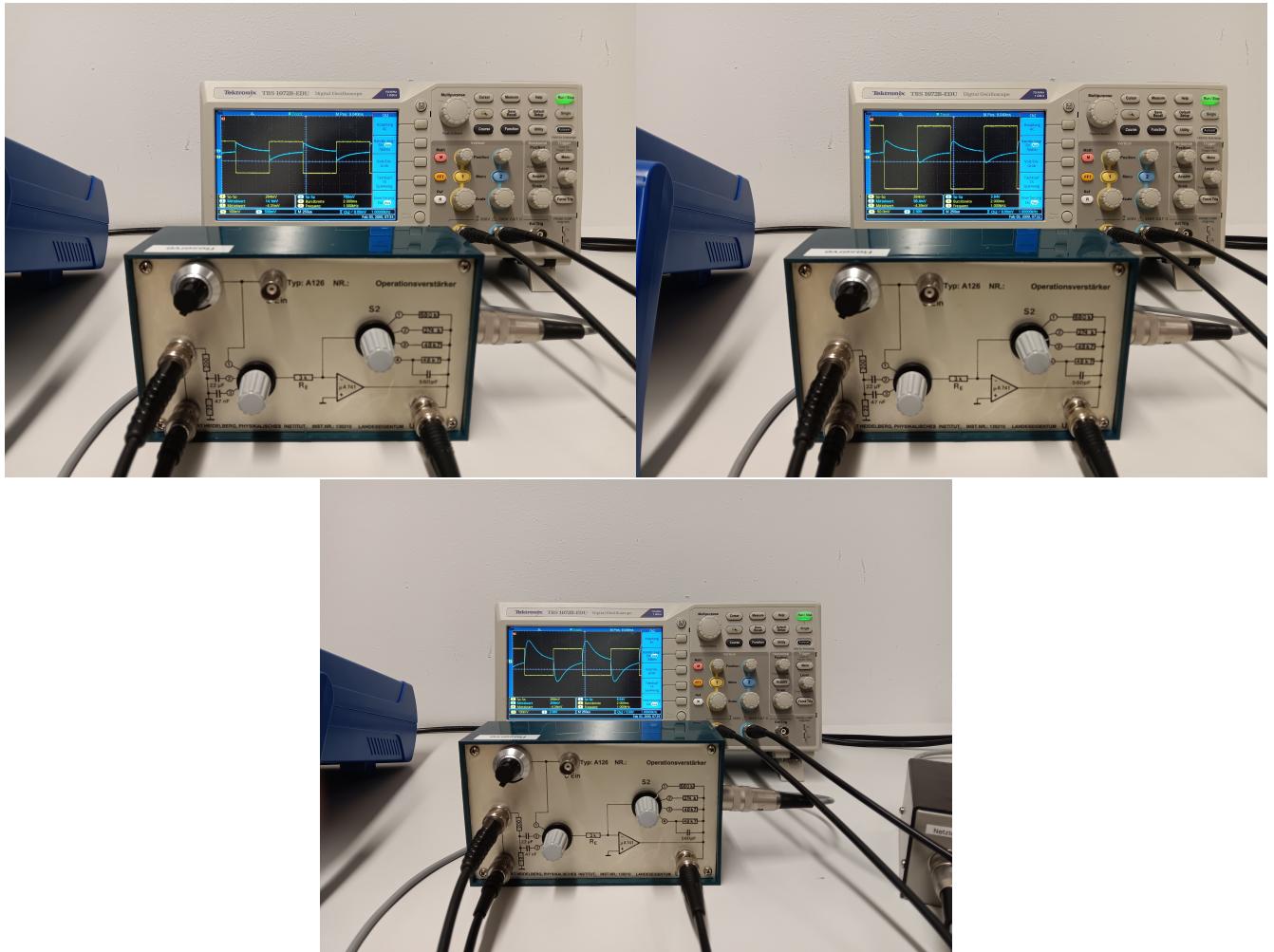


Abbildung 13: Rechteckssignal, S1: $C = 47nF$ Links: $R = 48.7k\Omega$ Rechts: $R = 274k\Omega$, Unten: $R = 680k\Omega$

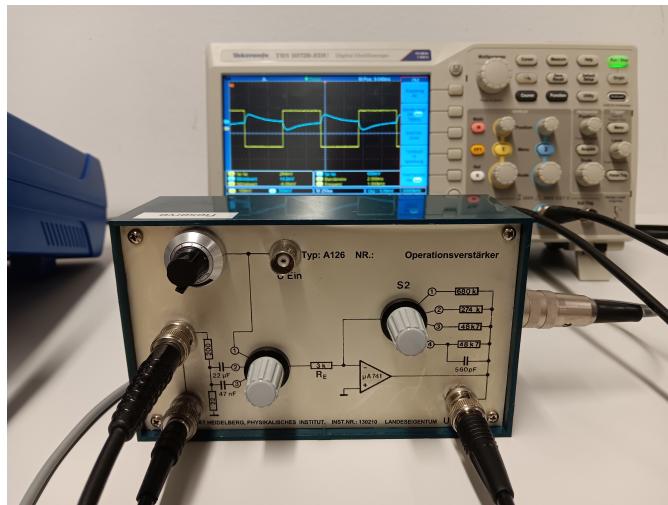


Abbildung 14: Rechteckssignal, S1: $C = 47nF$ S2: $R = 48,7k\Omega$, $C = 560pF$

zeigt. Nach meiner Meinung ist das ein systematischer Fehler. Ich glaube, dass wir vergessen haben, die parallel geschalteten Kondensator auszuschalten und daher haben wir sowohl Tiefpass als auch Hochpass-Eigenschaften gezeigt .

Wir sehen noch, dass je größer der Widerstand, desto "früher" (bei kleinerer Frequenz) die Betriebsverstärkung über in die Leerverstärkung des Operationsverstärkers geht und daher mehr als einen Tiefpass sich verhältet.

Als wir wissen, ein Rechtecksignal ist praktisch eine Überlagerung von Sinussignalen mit unterschiedlichen Frequenzen. Zur Veranschaulichung habe ich ein Bild aus Wikipedia in Abbildung 15 importiert.

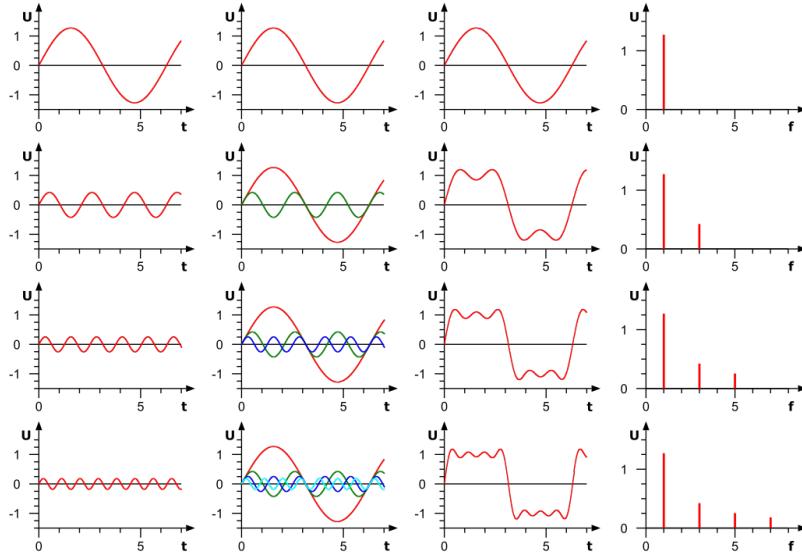


Abbildung 15: Rechteckssignal als eine Überlagerung von Sinussignalen

Wir sehen, dass die Sinussignale mit hohen Frequenzen für die flachen Teile des Rechtecks verantwortlich sind und die Sinussignale mit kleinen Frequenzen für die Kanten des Rechtecks verantwortlich sind.

Wir sehen daher aus Bild 11, dass wenn wir bei S1 eine Kapazität von $C = 22\mu F$ haben, die Sinussignale mit niedrigen Frequenzen abgeschirmt sind und je kleiner der Widerstand bei S2, desto mehr sind sie abgeschirmt (Hochpassverhalten). Wenn auch eine Kapazität parallel zum Widerstand eingeschaltet ist, arbeitet die ganze Schaltung als einen Hochpass.

Wenn wir in Platz S1 einer kleineren Kapazität einschalten, sehen wir, dass die Schaltung eher ein Tiefpassverhalten hat, je größer der Widerstand (und daher größer die Verstärkung), desto mehr ist den Tiefpassverhalten zu sehen, wobei bei der parallelen Kapazität zeigt die Schaltung ein sehr sichtbares Tiefpassverhalten.

Die beobachteten Verhalten sind genau wie erwartet, sie entsprechen der Theorie und auch den schon besprochenen Frequenzgängen bei verschiedenen Frequenzen aus Absatz 3.3.

Im Allgemeinen ist dieser Versuch einigermaßen erfolgreich, wir haben die möglichen Fehlerquellen und mögliche Verbesserungen des Versuchs besprochen. Das einzige, was unerwartet war, ist die lila Kurve aus Absatz 3.3, die wahrscheinlich aus einem systematischen Fehler stammt.

Ich fand der Versuch sehr nützlich, da wir als Physiker sicherlich mit Verstärkern arbeiten werden und es ist sehr wichtig zu wissen wie verschiedene Schaltungen und Verstärkerkonstellationen funktionieren.

4 Anhang

4.1 Quellen

Alle Informationen, die ich im Protokoll verwendet habe, stammen aus der Praktikumsanleitung, Ausgabe 4.2023.

4.2 Python-Code

Der Python-Code befindet sich auf der nächsten Seite.

242 Python copy

August 14, 2024

1 Versuch 242: Spannungsverstärker

```
[1]: import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np
from scipy.optimize import curve_fit
%matplotlib inline

def sigabw(A,B,a,b):
    return abs(A-B)/np.sqrt(a**2+b**2)
```

1.1 Aufgabe 1

1.1.1 a) Gleichspannungsverstärker

```
[2]: #Theoretische Verstärkung
#Data Import
RE=3 #kOhm
RE_err=RE*0.05
RG=np.array([48.7, 274]) #kOhm
RG_err=RG*0.05

#Berechnen der Werte
V_theo=RG/RE
V_theo_err=np.sqrt((RG_err/RE)**2+(RG*RE_err/RE**2)**2)

print('Theoretische Verstärkung:')
print('RG=48.7kOhm: V=( '+str(round(V_theo[0],1))+ ' +/- '
    ↴ ' '+str(round(V_theo_err[0],1))+ ' )')
print('RG=274kOhm: V=( '+str(round(V_theo[1],1))+ ' +/- '
    ↴ ' '+str(round(V_theo_err[1],1))+ ' )')
```

Theoretische Verstärkung:

RG=48.7kOhm: V=(16.2 +/- 1.1)

RG=274kOhm: V=(91 +/- 6)

```
[3]: #Experimentelle Verstärkung
```

```

#Data Import
UE=np.array([-250, -191, -130, -70, 0, 70, 130, 190, 250])*10**(-3) #V
UE_err=2*np.ones(9)*10**(-3) #V
#RG=48.7kOhm
UA1=np.array([4.21,3.26,2.29,1.34,0.201,-0.903,-1.89,-2.83,-3.81]) #V
UA1_err=np.ones(9)*10**(-2)*2 #V

# Define fitting function with an offset
def linear_with_offset(x, m, c):
    return m*x + c

# Fitting data with offset
popt1, pcov1 = curve_fit(linear_with_offset, UE, UA1, sigma=UA1_err)

# Plotting data with the improved fit
plt.errorbar(UE, UA1, xerr=UE_err, yerr=UA1_err, fmt=". ", label='Messwerte')
plt.plot(UE, linear_with_offset(UE, *popt1), label='Fit')

# Adjust the placement of the text
plt.text(0.05, 0.05, f'Steigung: m={round(popt1[0], 2)} +/- {round(np.sqrt(pcov1[0, 0]), 2)}\nOffset: c={round(popt1[1], 2)} +/- {round(np.sqrt(pcov1[1, 1]), 2)}',
         transform=plt.gca().transAxes, fontsize=10, color='red',
         bbox=dict(facecolor='white', alpha=0.5))

plt.xlabel('Eingangsspannung [V]')
plt.ylabel('Ausgangsspannung [V]')
plt.title('Gleichspannungsverstärker ($R_G=48,7k\Omega$)')
plt.grid()
plt.legend()
plt.tight_layout()
plt.savefig("242 A1.png", format='png', dpi=500)
plt.show()

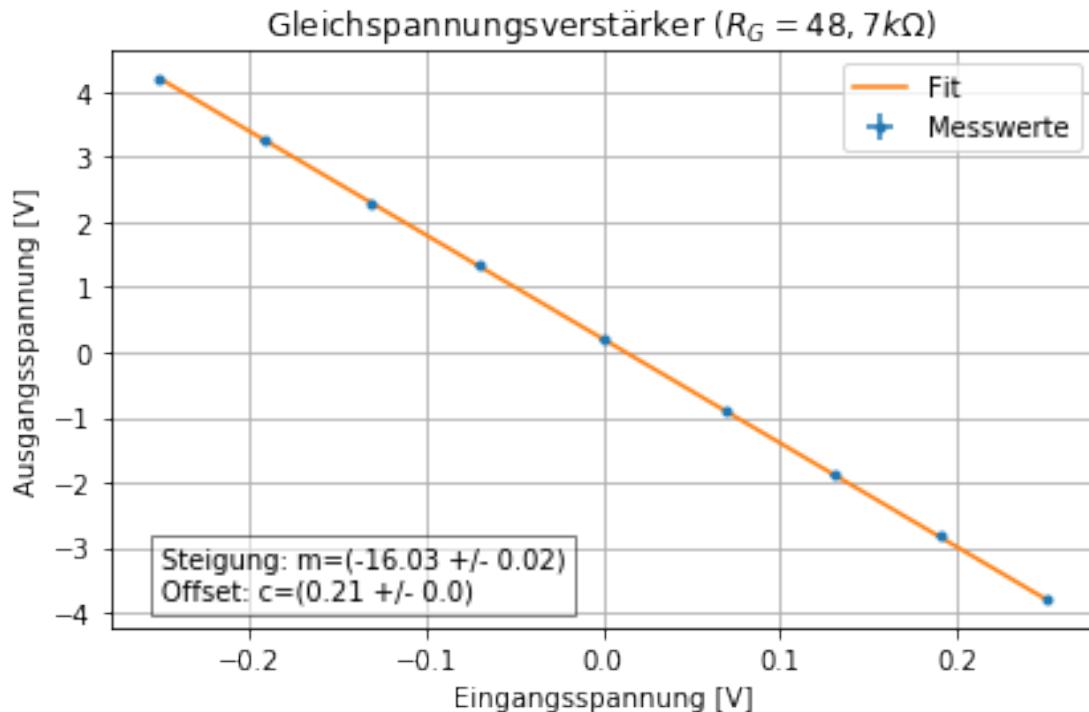
#Verstärkung
V1_exp=-popt1[0]
V1_exp_err=np.sqrt(pcov1[0,0])

#Sigmaabweichung
V1_sig=sigabw(V_theo[0], V1_exp, V_theo_err[0], V1_exp_err)

print("V_exp = ",V1_exp,"+/-",V1_exp_err )
print("V_theo = ",V_theo,"+/-",V_theo_err)
print('Sigmaabweichung: ')

```

```
print('RG=48.7kOhm: '+str(round(V1_sig,2))+' sigma')
```



$V_{\text{exp}} = 16.02764821975703 \pm 0.020668297744845982$
 $V_{\text{theo}} = [16.23333333 91.33333333] \pm [1.14787001 6.45824193]$
Sigmaabweichung:
RG=48.7kOhm: 0.18 sigma

```
[4]: # Data Import
UE = np.array([-250, -191, -131, -70, 0, 70, 130, 190, 250]) * 10**(-3) # V
UE_err = 2 * np.ones(9) * 10**(-3) # V

# RG=274kOhm
UA2 = np.array([14.0, 14.0, 12.8, 7.46, 1.05, -5.18, -10.6, -12.8, -12.8]) # V
UA2_err = 2 * np.ones(9) * 10**(-1) # V

# Define fitting function with offset
def linear_with_offset(x, m, c):
    return m * x + c

# Fitting data with offset, considering only the 5 central values
popt2, pcov2 = curve_fit(linear_with_offset, UE[2:7], UA2[2:7], sigma=UA2_err[2:
    ↵7])
```

```

# Plotting data
plt.errorbar(UE, UA2, xerr=UE_err, yerr=UA2_err, fmt=". ", label='Messwerte')
plt.plot(UE, linear_with_offset(UE, *popt2), label='Fit')

# Adjust the placement of the text
plt.text(0.05, 0.1, f'Steigung: m={round(popt2[0], 1)} +/- {round(np.sqrt(pcov2[0, 0]), 1)}\nOffset: c={round(popt2[1], 1)} +/- {round(np.sqrt(pcov2[1, 1]), 1)}',
         transform=plt.gca().transAxes, fontsize=10, color='red', bbox=dict(facecolor='white', alpha=0.5))

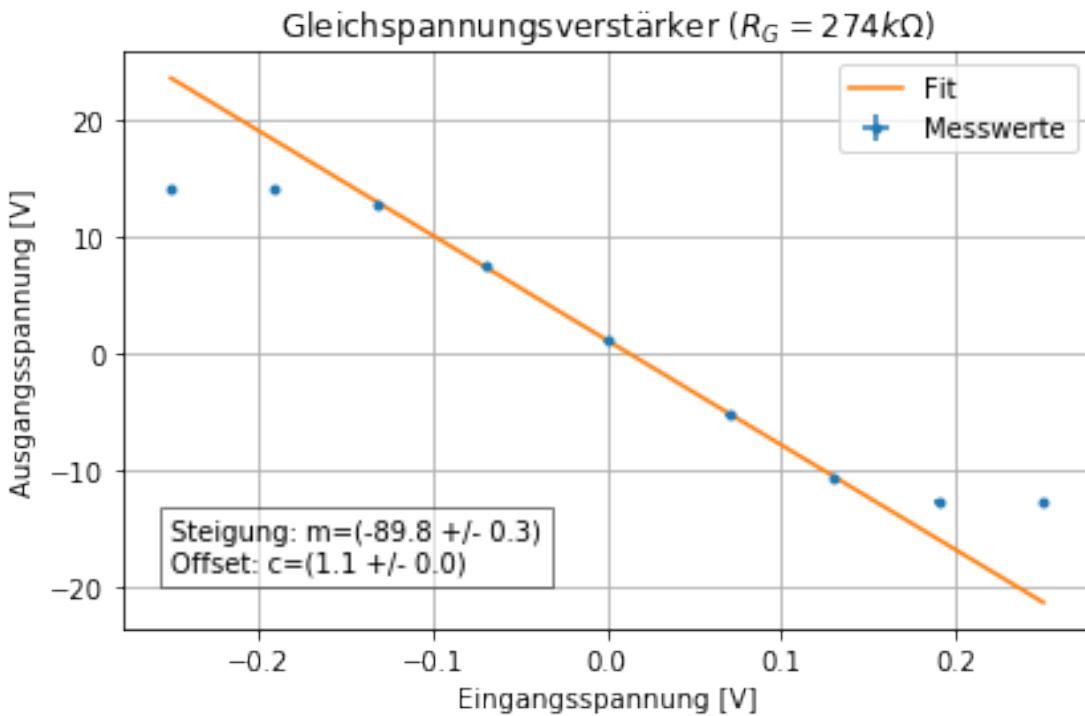
plt.xlabel('Eingangsspannung [V]')
plt.ylabel('Ausgangsspannung [V]')
plt.title('Gleichspannungsverstärker ($R_G=274k\Omega$)')
plt.grid()
plt.legend()
plt.tight_layout()
plt.savefig("242 A2.png", format='png', dpi=500)
plt.show()

# Verstärkung
V2_exp = -popt2[0]
V2_exp_err = np.sqrt(pcov2[0, 0])

# Sigmaabweichungen
V2_sig = sigabw(V_theo[1], V2_exp, V_theo_err[1], V2_exp_err)

print("V_exp = ", V2_exp, "+/-", V2_exp_err)
print('Sigmaabweichungen:')
print('RG=274kOhm: ' + str(round(V2_sig, 2)) + ' sigma')

```



$V_{\text{exp}} = 89.79530697274963 \pm 0.30252077714237935$

Sigmaabweichungen:

$R_G=274\text{k}\Omega$: 0.24 sigma

```
[5]: # Define the linear function with an offset
def linear_with_offset(x, m, c):
    return m * x + c

# Data for  $R_G=48.7\text{k}\Omega$ 
UE1 = np.array([-250, -191, -130, -70, 0, 70, 130, 190, 250]) * 10**(-3)  # V
UE1_err = 2 * np.ones(9) * 10**(-3)  # V
UA1 = np.array([4.21, 3.26, 2.29, 1.34, 0.201, -0.903, -1.89, -2.83, -3.81])  # V
UA1_err = np.ones(9) * 10**(-2) * 2  # V

# Data for  $R_G=274\text{k}\Omega$ 
UE2 = np.array([-250, -191, -130, -70, 0, 70, 130, 190, 250]) * 10**(-3)  # V
UE2_err = 2 * np.ones(9) * 10**(-3)  # V
UA2 = np.array([14.0, 14.0, 12.8, 7.46, 1.05, -5.18, -10.6, -12.8, -12.8])  # V
UA2_err = 2 * np.ones(9) * 10**(-1)  # V

# Fitting data for  $R_G=48.7\text{k}\Omega$ 
popt1, pcov1 = curve_fit(linear_with_offset, UE1, UA1, sigma=UA1_err)
```

```

# Fitting data for RG=274kΩ, considering only the 5 central values
popt2, pcov2 = curve_fit(linear_with_offset, UE2[2:7], UA2[2:7],  

    ↳sigma=UA2_err[2:7])

# Plotting data for RG=48.7kΩ
plt.errorbar(UE1, UA1, xerr=UE1_err, yerr=UA1_err, fmt=". ", label='Messwerte  

    ↳RG=48.7kΩ', color='blue')
plt.plot(UE1, linear_with_offset(UE1, *popt1), label='Fit RG=48.7kΩ',  

    ↳color='blue')

# Plotting data for RG=274kΩ
plt.errorbar(UE2, UA2, xerr=UE2_err, yerr=UA2_err, fmt=". ", label='Messwerte  

    ↳RG=274kΩ', color='red')
plt.plot(UE2, linear_with_offset(UE2, *popt2), label='Fit RG=274kΩ',  

    ↳color='red')

# Adding text annotations for fits
plt.text(0.01, 0.15, f'Steigung RG=48.7kΩ: m={round(popt1[0], 2)} +/-  

    ↳{round(np.sqrt(pcov1[0, 0]), 2)})\nOffset: c={round(popt1[1], 2)} +/-  

    ↳{round(np.sqrt(pcov1[1, 1]), 2)})',  

    transform=plt.gca().transAxes, bbox=dict(facecolor='white', alpha=0.  

    ↳4), color='blue')

plt.text(0.01, 0.65, f'Steigung RG=274kΩ: m={round(popt2[0], 1)} +/- {round(np.  

    ↳sqrt(pcov2[0, 0]), 1)})\nOffset: c={round(popt2[1], 1)} +/- {round(np.  

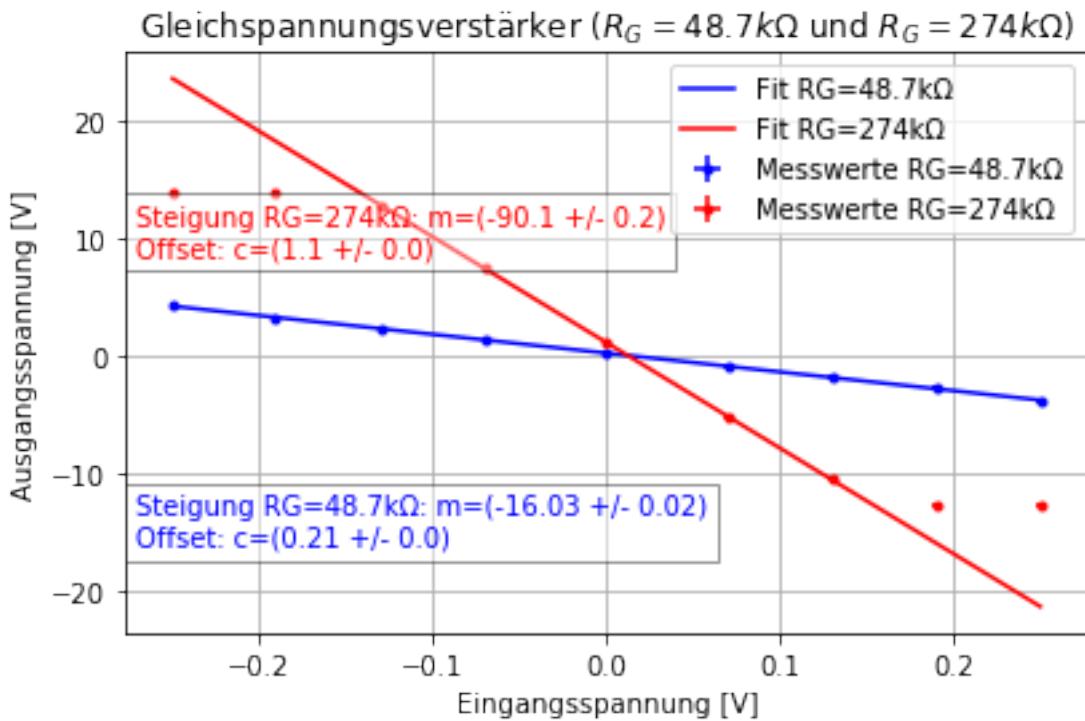
    ↳sqrt(pcov2[1, 1]), 1)})',  

    transform=plt.gca().transAxes, bbox=dict(facecolor='white', alpha=0.  

    ↳4), color='red')

# Labels and titles
plt.xlabel('Eingangsspannung [V]')
plt.ylabel('Ausgangsspannung [V]')
plt.title('Gleichspannungsverstärker ($R_G=48.7k\Omega$ und $R_G=274k\Omega$)')
plt.grid()
plt.legend()
plt.tight_layout()
plt.savefig("242A1A2.png", format='png', dpi=500)
plt.show()

```



1.1.2 b) Wechselspannung

```
[6]: #Theoretische Verstärkung
#Data Import
RE=3 #kOhm
RE_err=RE*0.05
RG2=np.array([274, 680]) #kOhm
RG2_err=RG2*0.05

#Berechnen der Werte
V2_theo=RG2/RE
V2_theo_err=np.sqrt((RG2_err/RE)**2+(RG2*RE_err/RE**2)**2)

print('Theoretische Verstärkung:')
print('RG=274kOhm: V=(+'+str(round(V2_theo[0]))+' +/- '
    +'+'+str(round(V2_theo_err[0]))+')')
print('RG=680kOhm: V=(+'+str(round(V2_theo[1]))+' +/- '
    +'+'+str(round(V2_theo_err[1]))+')')
```

Theoretische Verstärkung:

RG=274kOhm: V=(91 +/- 6)

RG=680kOhm: V=(227 +/- 16)

```
[7]: # Data Import
UG = np.array([0.0432, 0.17, 0.336, 0.5, 0.672, 0.84, 1]) # V
UG_err = np.array([0.004, 0.004, 0.004, 0.004, 0.004, 0.008, 0.008]) # V
U1 = 0.1 * UG
U1_err = 0.1 * UG_err

# RG=274kOhm
UA3 = np.array([0.352, 1.44, 2.88, 4.28, 5.76, 7.20, 8.60]) # V
UA3_err = np.array([0.01, 0.01, 0.04, 0.04, 0.04, 0.08, 0.08]) # V

# RG=680kOhm
UG1 = np.array([0.144, 0.192, 0.338, 0.5, 0.672, 0.84, 1]) # V
UG1_err = np.array([0.004, 0.004, 0.004, 0.004, 0.004, 0.008, 0.008]) # V
U2 = 0.1 * UG1
U2_err = 0.1 * UG1_err

UA4 = np.array([3, 4, 7.04, 10.4, 14.2, 17.6, 21.2]) # V
UA4_err = np.array([0.01, 0.01, 0.04, 0.04, 0.04, 0.08, 0.08]) # V

# Define fitting function
def linear(x, m):
    return m * x

# Fitting data
popt3, pcov3 = curve_fit(linear, U1, UA3, sigma=UA3_err)
popt4, pcov4 = curve_fit(linear, U2, UA4, sigma=UA4_err) # Use U2 for the
→second fit

# Plotting data for RG=274kOhm
plt.errorbar(U1, UA3, xerr=U1_err, yerr=UA3_err, fmt=". ", label='Messwerte')
plt.plot(U1, linear(U1, *popt3), label='Fit')
plt.text(0.005, 5.7, 'Steigung: m=' + str(round(popt3[0], 2)) + ' +/- '
→' + str(round(np.sqrt(pcov3[0, 0]), 2)) + ')')
plt.xlabel('Eingangsspannung [V]')
plt.ylabel('Ausgangsspannung [V]')
plt.title('Wechselspannungsverstärker ($R_G=274k\Omega$)')
plt.legend()
plt.grid()
plt.savefig("242_A3.png", format='png', dpi=500)
plt.show()

# Plotting data for RG=680kOhm
plt.errorbar(U2, UA4, xerr=U2_err, yerr=UA4_err, fmt=". ", label='Messwerte') #_
→Correct U2 for x-axis
plt.plot(U2, linear(U2, *popt4), label='Fit') # Correct U2 for x-axis
plt.text(0.014, 14.1, 'Steigung: m=' + str(round(popt4[0], 1)) + ' +/- '
→' + str(round(np.sqrt(pcov4[0, 0]), 1)) + ')')
```

```

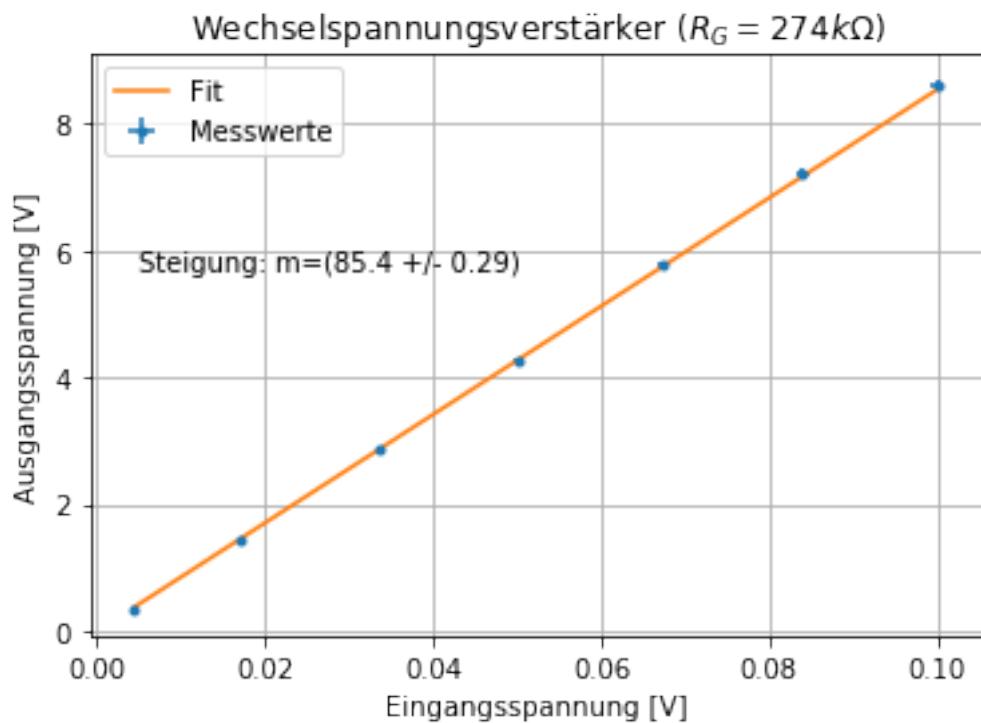
plt.xlabel('Eingangsspannung [V]')
plt.ylabel('Ausgangsspannung [V]')
plt.title('Wechselspannungsverstärker mit ($R_G=680k\Omega$)')
plt.legend()
plt.grid()
plt.savefig("242_A4.png", format='png', dpi=500)
plt.show()

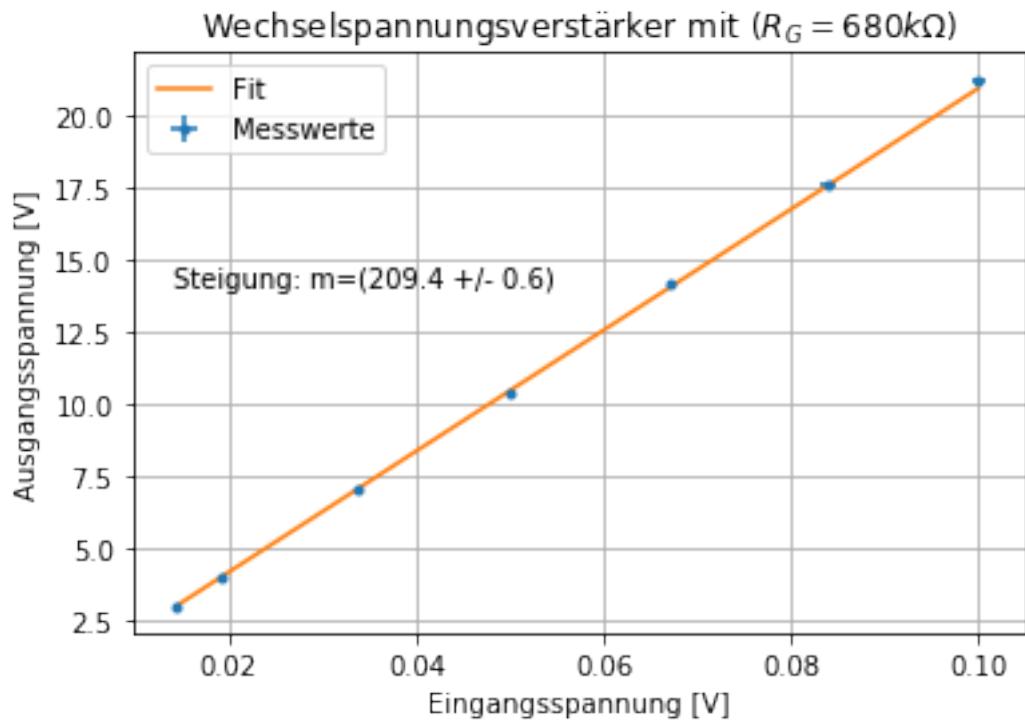
# Verstärkung
V3_exp = popt3[0]
V3_exp_err = np.sqrt(pcov3[0, 0])
V4_exp = popt4[0]
V4_exp_err = np.sqrt(pcov4[0, 0])

# Sigmaabweichungen
V3_sig = sigabw(V2_theo[0], V3_exp, V2_theo_err[0], V3_exp_err)
V4_sig = sigabw(V2_theo[1], V4_exp, V2_theo_err[1], V4_exp_err)

print("V_exp = ", V3_exp, "+/-", V3_exp_err)
print("V_2_exp = ", V4_exp, "+/-", V4_exp_err)
print('Sigmaabweichungen:')
print('RG=274kOhm: ' + str(round(V3_sig, 2)) + ' sigma')
print('RG=680kOhm: ' + str(round(V4_sig, 2)) + ' sigma')

```





$$V_{exp} = 85.39704678295199 \pm 0.2866478283278898$$

$$V_2_{exp} = 209.43402155179035 \pm 0.6216751603418031$$

Sigmaabweichungen:

$R_G=274k\Omega$: 0.92 sigma

$R_G=680k\Omega$: 1.07 sigma

```
[8]: # Data Import for first experiment
UE = np.array([-250, -191, -130, -70, 0, 70, 130, 190, 250]) * 10**(-3) # V
UE_err = 2 * np.ones(9) * 10**(-3) # V
UA1 = np.array([4.21, 3.26, 2.29, 1.34, 0.201, -0.903, -1.89, -2.83, -3.81]) # V
UA1_err = np.ones(9) * 10**(-2) * 2 # V

# Fitting function
def linear(x, m):
    return m * x

# Fitting data for first experiment
popt1, pcov1 = curve_fit(linear, UE, UA1, sigma=UA1_err)

# Data Import for second experiment
UG = np.array([0.0432, 0.17, 0.336, 0.5, 0.672, 0.84, 1]) # V
UG_err = np.array([0.004, 0.004, 0.004, 0.004, 0.004, 0.008, 0.008]) # V
```

```

U1 = 0.1 * UG
U1_err = 0.1 * UG_err

# RG=274kOhm
UA3 = np.array([0.352, 1.44, 2.88, 4.28, 5.76, 7.20, 8.60]) # V
UA3_err = np.array([0.01, 0.01, 0.04, 0.04, 0.04, 0.08, 0.08]) # V

# RG=680kOhm
UG1 = np.array([0.144, 0.192, 0.338, 0.5, 0.672, 0.84, 1]) # V
UG1_err = np.array([0.004, 0.004, 0.004, 0.004, 0.004, 0.008, 0.008]) # V
U2 = 0.1 * UG1
U2_err = 0.1 * UG1_err

UA4 = np.array([3, 4, 7.04, 10.4, 14.2, 17.6, 21.2]) # V
UA4_err = np.array([0.01, 0.01, 0.04, 0.04, 0.04, 0.08, 0.08]) # V

# Fitting data for second experiment
popt3, pcov3 = curve_fit(linear, U1, UA3, sigma=UA3_err)
popt4, pcov4 = curve_fit(linear, U2, UA4, sigma=UA4_err) # Use U2 for the
# second fit

# Fitting data for second experiment
popt3, pcov3 = curve_fit(linear, U1, UA3, sigma=UA3_err)
popt4, pcov4 = curve_fit(linear, U2, UA4, sigma=UA4_err) # Use U2 for the
# second fit

# Plotting only the second subplot
plt.figure(figsize=(7, 5))

# Plotting data for RG=274kOhm and RG=680kOhm
plt.errorbar(U1, UA3, xerr=U1_err, yerr=UA3_err, fmt=". ", label='Messwerte'
# (RG=274kOhm)')
plt.plot(U1, linear(U1, *popt3), label='Fit (RG=274kOhm)')
plt.errorbar(U2, UA4, xerr=U2_err, yerr=UA4_err, fmt=". ", label='Messwerte'
# (RG=680kOhm)', color='red')
plt.plot(U2, linear(U2, *popt4), label='Fit (RG=680kOhm)', color='red')

# Displaying the fitted slope values
plt.text(0.05, 0.65, f'Steigung RG=274kOhm: m={round(popt3[0], 2)} +/-'
# {round(np.sqrt(pcov3[0, 0]), 2)}\n'
# f'Steigung RG=680kOhm: m={round(popt4[0], 1)} +/-'
# {round(np.sqrt(pcov4[0, 0]), 1)})',
transform=plt.gca().transAxes)

# Plot labels and title
plt.xlabel('Eingangsspannung [V]')

```

```

plt.ylabel('Ausgangsspannung [V]')
plt.title('Wechselspannungsverstärker')
plt.grid()
plt.legend()

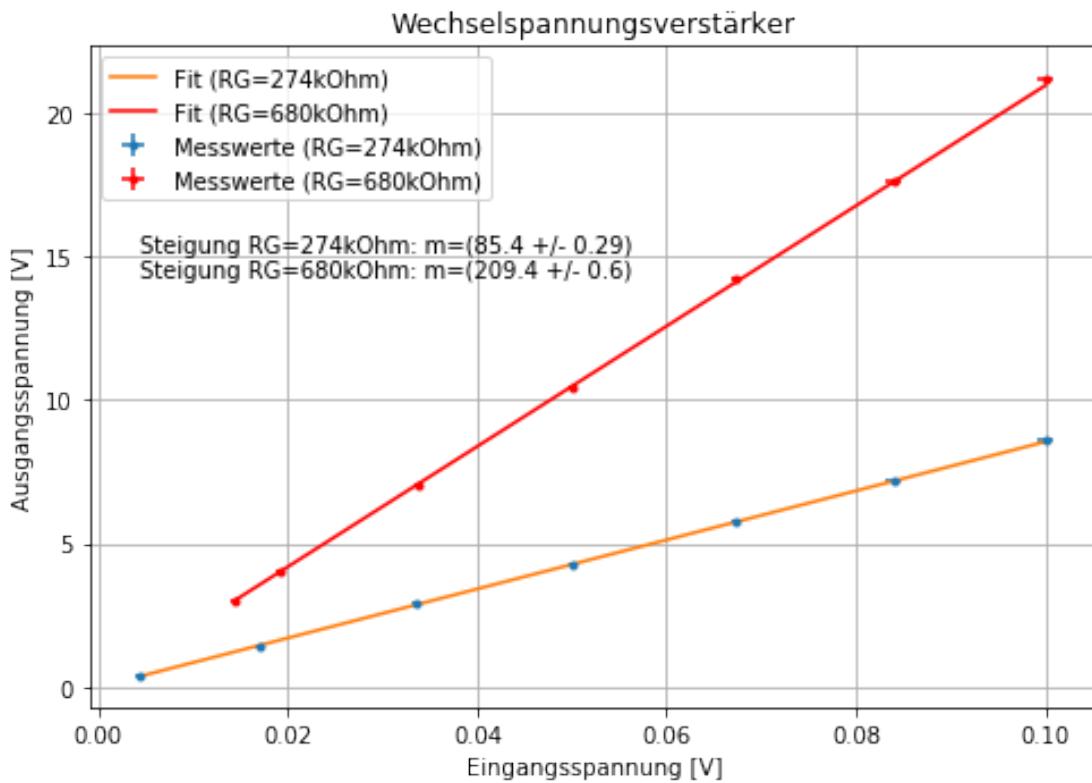
# Saving and showing the plot
plt.tight_layout()
plt.savefig("A3A4.png", format='png', dpi=500)
plt.show()

# Verstärkungen
V1_exp = -popt1[0]
V1_exp_err = np.sqrt(pcov1[0, 0])
V3_exp = popt3[0]
V3_exp_err = np.sqrt(pcov3[0, 0])
V4_exp = popt4[0]
V4_exp_err = np.sqrt(pcov4[0, 0])

# Sigmaabweichungen
V1_sig = sigabw(V_theo[0], V1_exp, V_theo_err[0], V1_exp_err)
V3_sig = sigabw(V2_theo[0], V3_exp, V2_theo_err[0], V3_exp_err)
V4_sig = sigabw(V2_theo[1], V4_exp, V2_theo_err[1], V4_exp_err)

print('Sigmaabweichungen:')
print('RG=48.7kOhm: ' + str(round(V1_sig, 2)) + ' sigma')
print('RG=274kOhm: ' + str(round(V3_sig, 1)) + ' sigma')
print('RG=680kOhm: ' + str(round(V4_sig, 1)) + ' sigma')

```



Sigmaabweichungen:

RG=48.7kOhm: 0.17 sigma

RG=274kOhm: 0.9 sigma

RG=680kOhm: 1.1 sigma

1.2 Aufgabe 2 a), b) und c)

```
[9]: #Data Import
f=np.array([0.1, 0.3, 0.6, 1, 3, 6, 10, 30, 60, 100, 300]) #kHz
f_err=0.05*np.ones(11) #kHz

#UG=0.3Vss
#RG=680kOhm
UA7=np.array([6.40, 6.40, 6.40, 6.24, 5.60, 4.24, 3.02, 1.2, 0.57, 0.35, 0.12]) #V
UA7_err=0.05*np.ones(11) #V

#RG=274kOhm
UG3=0.3 #V
UG3_err=0.01 #V
U13=0.1*UG3
U13_err=0.1*UG3_err
```

```

UA6=np.array([2.57, 2.56, 2.56, 2.56, 2.48, 2.32, 2.02, 1.02, 0.56, 0.35, 0.12]) #V
UA6_err=0.05*np.ones(11) #V

#UG=1Vss, RG=48.7kOhm
UG2=1 #V
UG2_err=0.1 #V
U12=0.1*UG2
U12_err=0.1*UG2_err
UA5=np.array([ 1.54, 1.54, 1.54, 1.54, 1.56, 1.56, 1.54, 1.42, 1.18, 0.9, 0.39]) #V
UA5_err=0.02*np.ones(11) #V

#UG=1Vss
#RG=48.7kOhm, C=560pF, UG=1Vss
UA8=np.array([1.56, 1.56, 1.56, 1.54, 1.40, 1.12, 0.86, 0.32, 0.16, 0.10, 0.036]) #V
UA8_err=np.append(0.02*np.ones(5), 0.002*np.ones(6))

#C=47nF, RG=48.7kOhm
f2=np.array([0.3, 0.6, 1, 3, 6, 10, 20, 30])
f2_err=0.05*np.ones(8)

UA9=np.array([0.52, 0.86, 1.13, 1.31, 1.08, 0.81, 0.46, 0.32]) #V
UA9_err=0.01*np.ones(8) #V

# Betriebsverstärkung berechnen
V5 = UA5 / U12
V5_err = np.sqrt((UA5_err / U12)**2 + (UA5 / U12**2 * U12_err)**2)
V6 = UA6 / U13
V6_err = np.sqrt((UA6_err / U13)**2 + (UA6 / U13**2 * U13_err)**2)
V7 = UA7 / U13
V7_err = np.sqrt((UA7_err / U13)**2 + (UA7 / U13**2 * U13_err)**2)
V8 = UA8 / U12
V8_err = np.sqrt((UA8_err / U12)**2 + (UA8 / U12**2 * U12_err)**2)
V9 = UA9 / U12
V9_err = np.sqrt((UA9_err / U12)**2 + (UA9 / U12**2 * U12_err)**2)

# Daten plotten
plt.figure(figsize=(7, 5))
plt.xscale('log')
plt.yscale('log')

# Verwendung von `f` für `f1` und `f_err` für `f1_err`
plt.errorbar(f, V5, xerr=f_err, yerr=V5_err, fmt=".-", label='Messwerte' #R_G=48,7k\Omega'
              #R_G=274k\Omega'
plt.errorbar(f, V6, xerr=f_err, yerr=V6_err, fmt=".-", label='Messwerte' #R_G=48,7k\Omega'
              #R_G=274k\Omega')

```

```

plt.errorbar(f, V7, xerr=f_err, yerr=V7_err, fmt=".-", label='Messwerte  

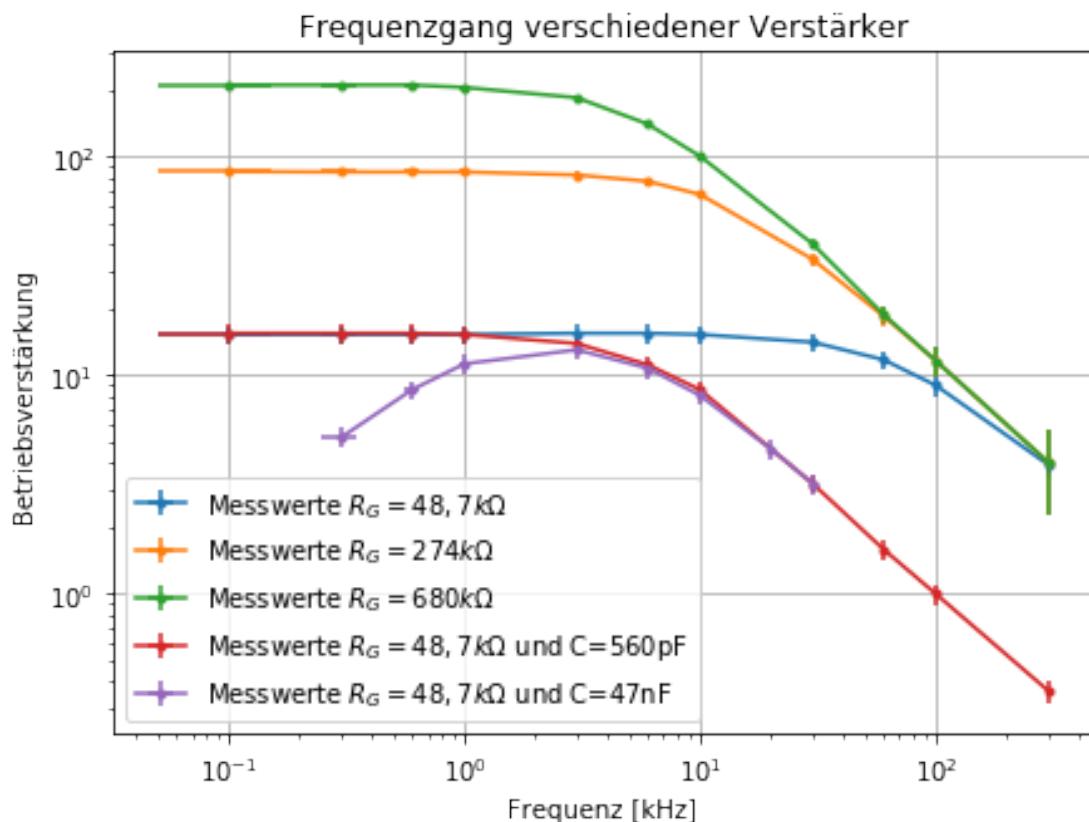
↪$R_G=680k\Omega$')
plt.errorbar(f, V8, xerr=f_err, yerr=V8_err, fmt=".-", label='Messwerte  

↪$R_G=48,7k\Omega$ und $C=560pF$')
plt.errorbar(f2, V9, xerr=f2_err, yerr=V9_err, fmt=".-", label='Messwerte  

↪$R_G=48,7k\Omega$ und $C=47nF$')

plt.xlabel('Frequenz [kHz]')
plt.ylabel('Betriebsverstärkung')
plt.title('Frequenzgang verschiedener Verstärker')
plt.legend()
plt.grid()
plt.savefig("242_A5.png", format='png', dpi=500)
plt.show()

```



[]: