

v51

Operationsverstärker

Hau Zhang

hau.zhang@tu-dortmund.de

Matthias Raschke

matthias-daniel.raschke@tu-dortmund.de

Durchführung: 20.11.2023

Abgabe: 27.11.2023

TU Dortmund – Fakultät Physik

Inhaltsverzeichnis

1	Zielsetzung	3
2	Theorie	3
2.1	Invertierender Verstärker	5
2.2	Integrator	6
2.3	Differentiator	7
2.4	Schmitt-Trigger	8
2.5	Generator	9
2.6	Generator mit variierender Amplitude	9
3	Durchführung	10
4	Auswertung	11
4.1	Invertierender Verstärker	11
4.2	Integrator und Differenziator	14
4.3	Schmitt-Trigger	17
4.4	Frequenz Generator	18
4.5	Gedämpfte Schwingung	19
5	Diskussion	25
5.1	Invertierender Verstärker	25
5.2	Integrator und Differenziator	25
5.3	Schmitt-Trigger	26
5.4	Frequenz Generator	26
5.5	Gedämpfte Schwingung	26
	Literatur	26

1 Zielsetzung

Das Ziel des Versuchs ist es, verschiedene Schaltungen von Operationsverstärkern zu untersuchen. Es werden verschiedene Eigenschaften der Schaltungen vermessen und mit der Theorie verglichen.

2 Theorie

Ein Operationsverstärker verstärkt die Differenz der Eingangsspannungen U_+ und U_- . Ein schematischer Aufbau ist in Abbildung 1 dargestellt.

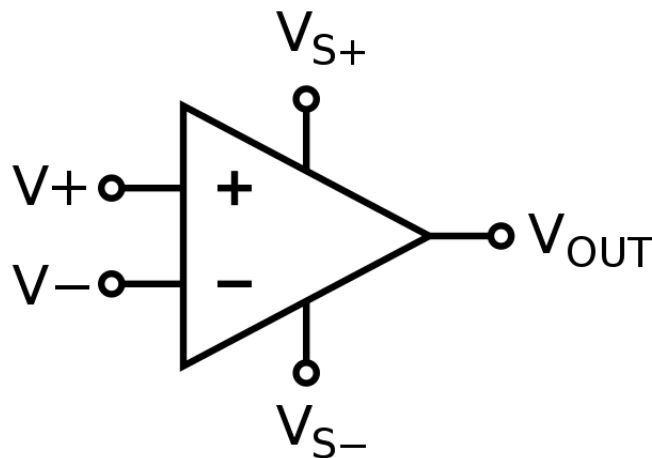


Abbildung 1: Die Abbildung zeigt den schematischen Aufbau eines Operationsverstärkers [2].

Die Verstärkung der Ausgangsspannung ist durch

$$U_o = A(U_+ - U_-) \quad (1)$$

gegeben. Hier ist A der Verstärkungsfaktor (gain factor). U_+ wird non-inverting-input und U_- inverting-input genannt. Es wird von einem positiven Feedback gesprochen, wenn das Ausgangssignal positiv ist, also $U_+ > U_-$ gilt. Analog wird von negativen Feedback gesprochen, wenn $U_+ < U_-$ gilt. Der Verstärker muss an einer Gleichstromquelle angeschlossen sein, damit er funktioniert. Dies ist in Abbildung 1 durch $U_{S\pm}$ eingezeichnet. Die Gleichspannungen müssen möglichst symmetrisch um null gewählt werden, damit der Ausgangsbereich, welcher durch diese Gleichspannungen definiert ist, auch symmetrisch ist. Der Ausgangsbereich ist in Abbildung 2 zu sehen.

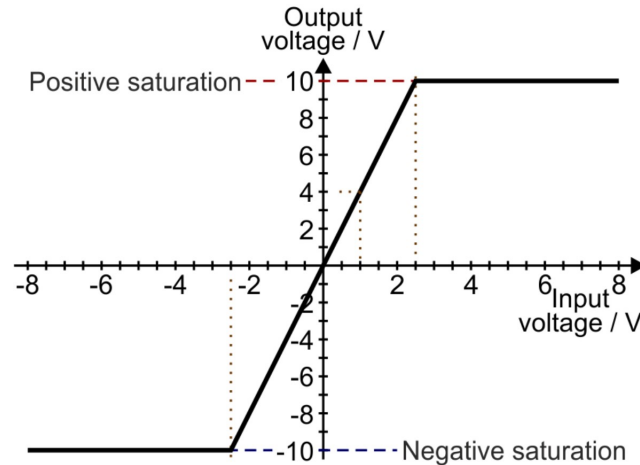


Abbildung 2: Die Abbildung zeigt die Verstärkungskurve eines Operationsverstärkers [3].

Wird die Eingangsspannung über den Ausgangsbereich hinaus verstärkt, so gibt der Operationsverstärker $U_{S\pm}$ aus. Wird mit idealen Operationsverstärkern gerechnet, so bleiben die Rechnungen vergleichsweise einfach. Ein idealer Operationsverstärker zeichnet sich durch eine unendlich hohe Bandbreite, einem unendlich hohen Eingangswiderstand, einer unendlich hohen Verstärkung, keinem Rauschen, keiner Eingangs-Off-Set-Spannung und keinem Ausgangswiderstand aus. Reale Operationsverstärker erfüllen all diese Kriterien nicht. In den folgenden Rechnungen wird der Einfachheit halber von einem idealen Operationsverstärker ausgegangen. In diesem Versuch wird ein LM741 in einem DIL8 Gehäuse verwendet. Daher wird hier kurz auf die Pinconfiguration eines solchen eingegangen. Die Pinconfiguration ist in Abbildung 3 abgebildet. Die Anschlüsse 2,3,4,6 und 7 entsprechen den Punkten aus Abbildung 1. Das "NC" des achten Pin steht für "not connected", also wird dieser nicht verwendet. Die Pins eins und fünf werden in diesem Experiment auch nicht angeschlossen.

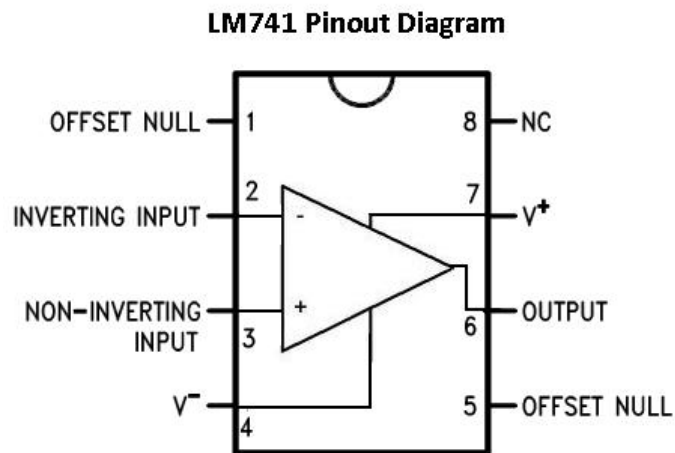


Abbildung 3: Die Abbildung zeigt die Pinconfiguration eines LM741 [1].

2.1 Invertierender Verstärker

Das Schaltbild eines invertierenden Verstärkers ist in Abbildung 4 zu sehen. Mithilfe der Kirchhoffschen Knotenregel folgt

$$\frac{U_i}{R_1} + \frac{U_o}{R_2} = 0 \implies U_o = -\frac{R_2}{R_1} U_i. \quad (2)$$

Damit ergibt sich als Verstärkungsfaktor

$$V = -\frac{R_2}{R_1}. \quad (3)$$

Das Minuszeichen gibt an, dass bei Gleichstrom Eingangs- und Ausgangsspannung entgegengesetzte Vorzeichen haben und bei Wechselstrom die Eingangs- und Ausgangsspannung um 180° phasenverschoben sind.

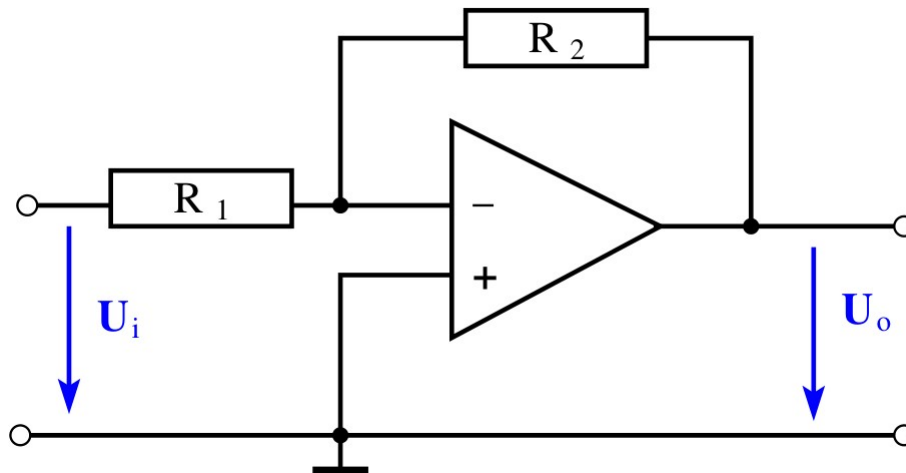


Abbildung 4: Die Abbildung zeigt das Schaltbild eines invertierenden Verstärkers [4].

2.2 Integrator

Das Schaltbild eines Integrators ist in Abbildung 5 zu sehen. Dieser soll das Eingangssignal integrieren und dann wieder als Ausgangssignal ausgeben. Aus der Knotenregel des ersten Knoten ergibt sich

$$\int I_C dt = CU_o, \quad (4)$$

wobei zusätzlich $I_C = \frac{U_i}{R}$ gilt. Damit ergibt sich insgesamt für die Ausgangsspannung

$$U_o = -\frac{1}{RC} \cdot \int U_i dt. \quad (5)$$

Also ist das Ausgangssignal dieser Schaltung tatsächlich das Integral über das Eingangssignal. Um das Frequenzverhalten des Integrators zu bestimmen, wird der Ansatz $U_i = U_0 \sin(\omega t)$ in Gleichung 5 eingesetzt. Damit ergibt sich

$$U_o = \frac{U_0}{RC\omega} \cos(\omega t), \quad (6)$$

was verdeutlicht, dass bei einer sinusförmigen Eingangsspannung die Ausgangsspannung um 90° phasenverschoben ist.

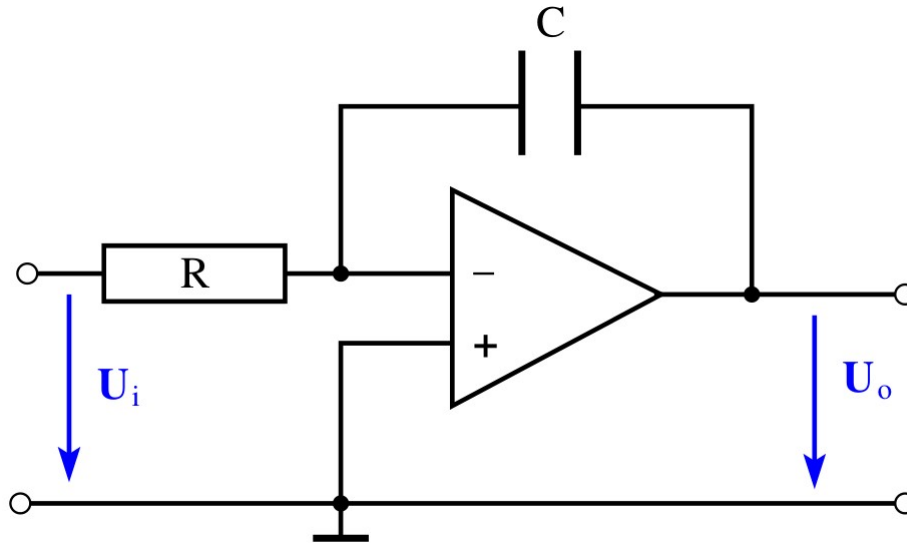


Abbildung 5: Die Abbildung zeigt das Schaltbild eines Integrators [4].

2.3 Differentiator

Das Schaltbild eines Differentiators ist in Abbildung 6 zu sehen. Die Aufgabe dieses Operationsverstärkers ist es, das Eingangssignal zu differenzieren und auszugeben. Aus der Knotenregel des ersten Knoten ergibt sich

$$\int I_C dt = CU_i, \quad (7)$$

wobei zusätzlich $I_C = \frac{U_o}{R}$ gilt. Damit ergibt sich insgesamt für die Ausgangsspannung

$$U_o = -RC \cdot \frac{dU_i}{dt}. \quad (8)$$

Also ist das Ausgangssignal dieser Schaltung tatsächlich die Ableitung des Eingangssignals. Um das Frequenzverhalten des Differentiators zu bestimmen, wird der Ansatz $U_i = U_0 \sin(\omega t)$ in Gleichung 8 eingesetzt. Damit ergibt sich

$$U_o = -U_0 RC \omega \cos(\omega t), \quad (9)$$

was verdeutlicht, dass für eine sinusförmige Eingangsspannung die Ausgangsspannung um 90° phasenverschoben ist.

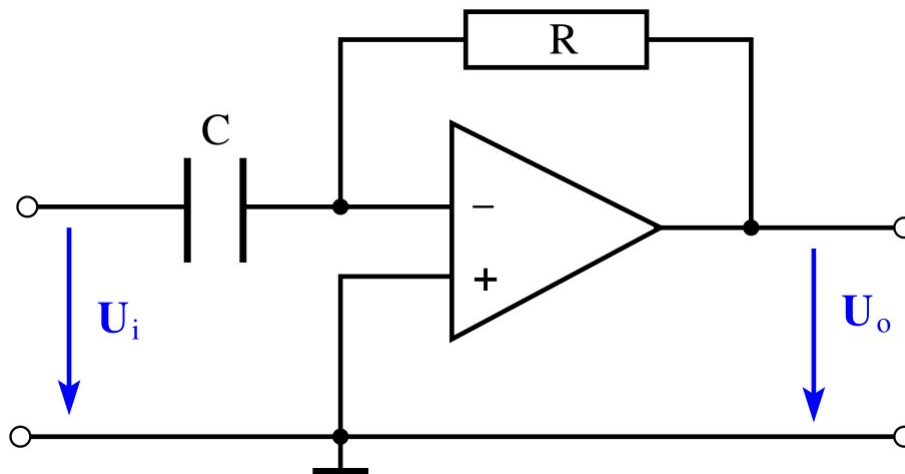


Abbildung 6: Die Abbildung zeigt das Schaltbild eines Differentiators [4].

2.4 Schmitt-Trigger

Das Schaltbild eines Schmitt-Triggers ist in Abbildung 7 zu sehen. Dieser besitzt die Eigenschaft eines Schalters. Werden die Schwellenwerte

$$U_{\pm} = \pm \frac{R_1}{R_2} U_S \quad (10)$$

überschritten beziehungsweise unterschritten, so ergibt sich als Ausgangssignal $U_o = \pm U_S$.

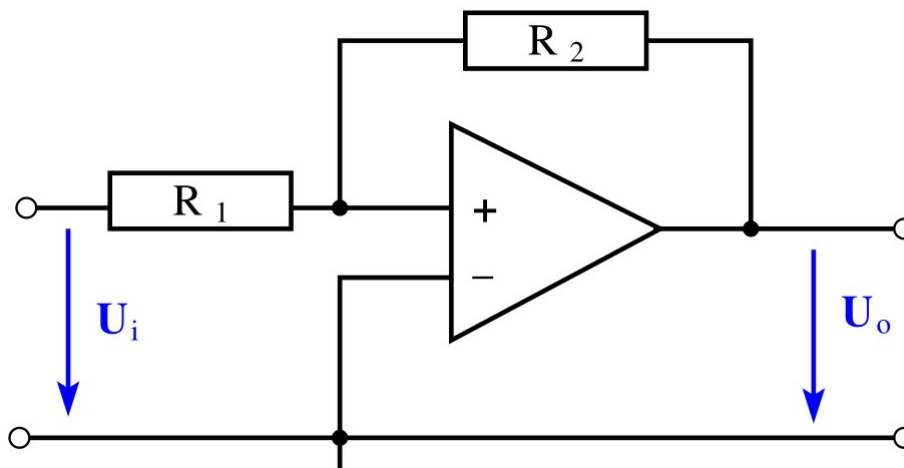


Abbildung 7: Die Abbildung zeigt das Schaltbild eines Schmitt-Triggers [4].

2.5 Generator

Das Schaltbild eines Generators ist in Abbildung 8 zu sehen. Dieser besteht aus einem Schmitt-Trigger und einem Integrator. Der Schmitt-Trigger liefert eine Rechteckspannung, welche durch den Integrator in eine Dreiecksspannung überführt wird. Die Frequenz und die Amplitude des Ausgangssignals sind durch

$$f_o = \frac{R_2}{4CR_1R_3} \quad \text{und} \quad U_o = U_{\max} \frac{R_1}{R_2} \quad (11)$$

gegeben.

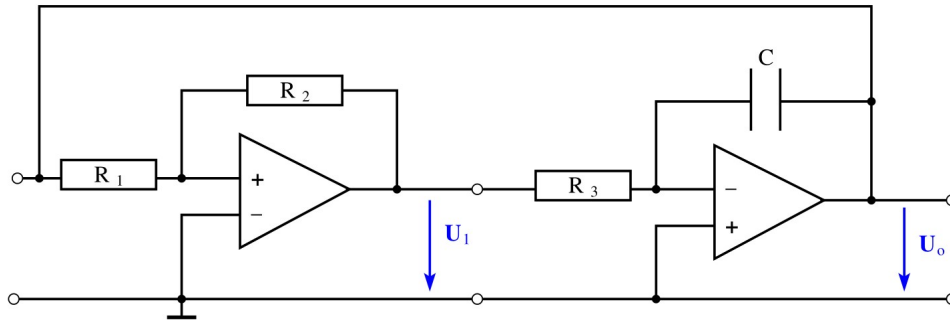


Abbildung 8: Die Abbildung zeigt das Schaltbild eines Generators [4].

2.6 Generator mit variierender Amplitude

Das Schaltbild eines Generators mit variierender Amplitude ist in Abbildung 9 zu sehen. Dieser Operationsverstärker besteht aus zwei Integratoren und einem invertierenden Verstärker. Die Differentialgleichung, welche diese Schaltung beschreibt, ist durch

$$\frac{d^2 U_o}{dt^2} - \frac{\eta}{10RC} \cdot \frac{dU_o}{dt} + \frac{1}{R^2 C^2} U_o = 0 \quad (12)$$

gegeben. Hier ist η der Dämpfungsfaktor, welcher zwischen 0 und 1 liegt. Mit der Näherung $(\frac{\eta}{10RC})^2 \ll (\frac{1}{RC})^2$ ergibt sich als Lösung der Differentialgleichung

$$U_o = U_0 \exp\left(\frac{t}{\tau}\right) \sin\left(2\pi \frac{t}{T}\right) \quad (13)$$

Dabei ist $T = 2\pi RC$ die Periodendauer der gedämpften Schwingung und $\tau = \frac{20RC}{|\eta|}$ die Abklingzeit der gedämpften Schwingung.

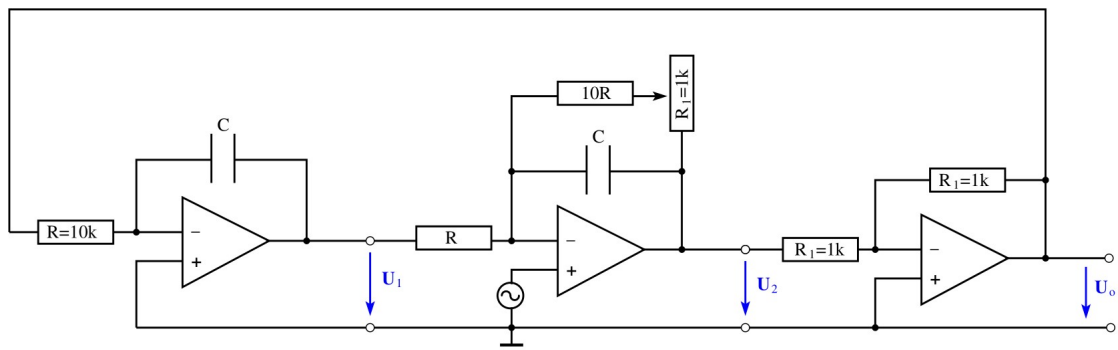


Abbildung 9: Die Abbildung zeigt das Schaltbild eines Generators mit variierender Amplitude [4].

3 Durchführung

In diesem Versuch werden auf einem Steckbrett verschiedene Schaltungen aufgebaut und ihre Funktionsweise untersucht. Dafür steht, neben dem Steckbrett und der Bauteile, auch ein Oszilloskop für die Messungen, eine Gleichspannungsquelle für die Stromversorgung der Operationsverstärker und ein Generator für das Eingangssignal zur Verfügung.

Invertierender Verstärker

Zunächst wird die Schaltung nach Abbildung 4 aufgebaut. Wir verwenden die Widerstände $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$ und $R_2 = 100 \text{ k}\Omega$. Nun wird die Amplitude und die Phase in Abhängigkeit der Frequenz über mehrerer Dekaden vermessen. Die Messwerte werden solange aufgenommen, bis das Ausgangssignal nicht mehr stabil ist. Die Messung wird für zwei weitere Kombinationen von R_1 und R_2 wiederholt.

Integrator

Die Schaltung wird nach Abbildung 5 aufgebaut. Für den Widerstand und die Kapazität werden die Werte $R = 10 \text{ k}\Omega$ und 100 nF verwendet. Dann vermessen wir die Ausgangsspannung in Abhängigkeit der Frequenz. Zusätzlich speichern wir ein Bild des Ausgangssignals auf dem Oszilloskop für eine Dreieck- und ein Rechteckeingangsspannung.

Differentiator

Zuerst wird die Schaltung nach Abbildung 6 aufgebaut. Es werden für den Widerstand und die Kapazität die Werte $R = 100 \text{ k}\Omega$ und 22 nF verwendet. Die Messung verläuft dann analog zum Integrator.

Schmitt-Trigger

Es wird die Schaltung nach Abbildung 7 aufgebaut. Für die Widerstände werden die Werte $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$ und $R_2 = 100 \text{ k}\Omega$ verwendet. Dann wird bei einer beliebigen Frequenz (hier 1 kHz) die Amplitude erhöht, bis auf dem Oszilloskop eine stabile Rechteckspannung

als Ausgangssignal zu erkennen ist. Nun wird die Amplitude wieder leicht gesenkt, bis das Ausgangssignal anfängt zu kippen und instabil wird. Dies ist dann der Schwellenwert des Schmitt-Triggers.

Generator

Zunächst wird die Schaltung nach Abbildung 8 aufgebaut. Für die Widerstände werden die Werte $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 100 \text{ k}\Omega$ und $R_3 = 1 \text{ k}\Omega$ gewählt. Für die Kapazität wird $C = 1 \text{ }\mu\text{F}$ verwendet. Das Ausgangssignal sollte eine Dreiecksspannung sein. Das Bild auf dem Oszilloskop wird gespeichert.

Generator mit variierender Amplitude

Die Schaltung wird nach Abbildung 9 aufgebaut. Für den zweiten(von links) Widerstand wird der Wert $R = 1 \text{ k}\Omega$ und für den dritten(von links) $10R = 10 \text{ k}\Omega$ verwendet. Für die Kapazität wird zwischen $C = 22 \text{ nF}$ oder $C = 100 \text{ nF}$ gewählt. Als Eingangssignal wird eine Rechteckspannung verwendet. Auf dem Oszilloskop sollte beim positiven Peak der Rechteckspannung ein exponentiell gedämpftes Ausgangssignal entstehen. Bei den negativen Peaks der Rechteckspannung sollte ein exponentiell steigendes Ausgangssignal zu erkennen sein. Es wird ein Bild des Oszilloskops gespeichert.

4 Auswertung

4.1 Invertierender Verstärker

Bei invertierenden Verstärkern werden drei verschiedene Konfigurationen der Eingangsspannung und der Widerstände untersucht. Dabei werden die Verstärkung $\frac{V_{aus}}{V_{in}}$ gegen die Frequenz ν auf doppellogarithmische Plot aufgetragen. auf einem doppelt logarithmischen Diagramm aufgetragen. Die dabei verwendeten Daten sind in den Tabellen Tabelle 2, Tabelle 3 und Tabelle 4 zu finden. Mithilfe einer Ausgleichsgeraden der Form

$$A = a \cdot \nu^b \quad (14)$$

lassen sich die beiden Enden des Plateaus (Cutoff Frequency) durch die Schnittpunkte mit der gemittelten konstanten Verstärkung U_{konst} bestimmen. Daraus lässt sich die Bandbreite der Konfiguration durch die Subtraktion beider Cutoff-Frequenzen einfach berechnen. Für die erste Konfiguration werden die Widerstände $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$ und $R_2 = 10 \text{ k}\Omega$ sowie die Eingangsspannung $U_{\text{ein}} = 2.5 \text{ V}$ verwendet. Die Ergebnisse werden graphisch in Abbildung 10 dargestellt, sowie die zweite Konfiguration mit $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 100 \text{ k}\Omega$ und $U_{\text{ein}} = 90 \text{ mV}$ in Abbildung 11, und die dritte Konfiguration mit $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 1 \text{ k}\Omega$ und $U_{\text{ein}} = 500 \text{ mV}$ in Abbildung 12. Auch werden die gesamte Phaseverschiebung allen Konfiguration auf Abbildung 13 graphisch dargestellt. Dabei verwendeten Fit-Parameter unterschiedliche Konfiguration sind wie folgt:

$$a_1 = (3.229 \pm 0.126)$$

$$b_1 = (0.330 \pm 0.014)$$

$$U_{\text{konst},1} = (9.67 \pm 0.12)$$

$$\begin{aligned}
a_{2,1} &= (29.305 \pm 1.590) \\
b_{2,1} &= (0.354 \pm 0.020) \\
a_{2,2} &= (470908.531 \pm 55553.540) \\
b_{2,2} &= (-0.933 \pm 0.012) \\
U_{\text{konst},2} &= (95.4 \pm 1.1) \\
\\
a_3 &= (0.285 \pm 0.016) \\
b_3 &= (0.374 \pm 0.020) \\
U_{\text{konst},3} &= (0.78 \pm 0.06)
\end{aligned}$$

Die aus der Messung resultierende Verstärkung, Bandbreite und die Frequenzgrenze $\nu_{\min/\max}$ werden gemeinsam in Tabelle 1 aufgetragen. Dabei lassen sich die Frequenzgrenze und die Bandbreite der ersten und dritten Konfiguration aus dem Gain-Bandwidth Product (GBP) der zweiten Konfiguration berechnen.

Parameter	Konfiguration 1	Konfiguration 2	Konfiguration 3
U_{konst}	9.67 ± 0.12	95.4 ± 1.1	0.78 ± 0.06
ν_{\max} Hz	$(8.9 \pm 1.5) \cdot 10^4$	$(9.1 \pm 1.6) \cdot 10^3$	$(1.10 \pm 0.21) \cdot 10^6$
ν_{\min} Hz	28 ± 5	28 ± 7	15 ± 5
GBP	$(8.6 \pm 1.5) \cdot 10^5$	$(8.6 \pm 1.5) \cdot 10^5$	$(8.6 \pm 1.5) \cdot 10^5$
Bandbreite	$(8.9 \pm 1.5) \cdot 10^4$	$(9.1 \pm 1.6) \cdot 10^3$	$(1.10 \pm 0.21) \cdot 10^6$

Tabelle 1: Ergebnisse der Messungen der invertierten Verstärker.

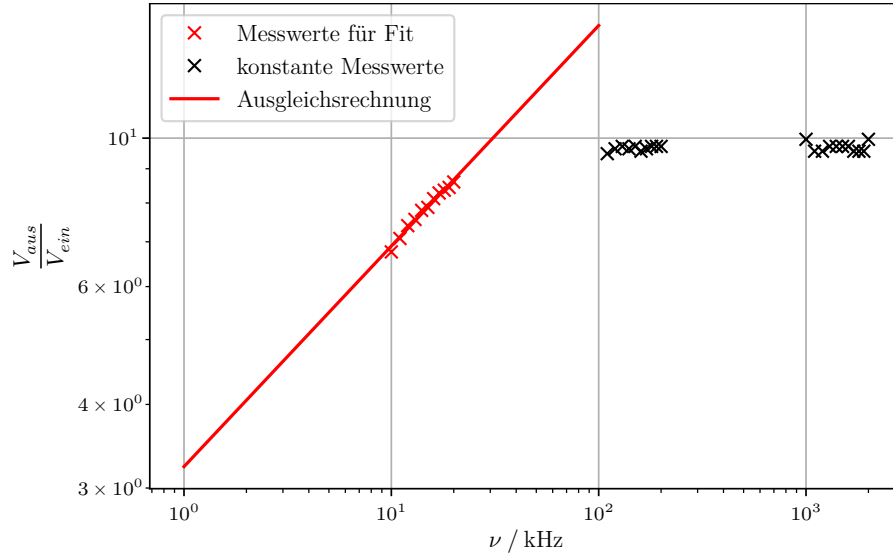


Abbildung 10: Plot der ersten Konfiguration mit $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 10 \text{ k}\Omega$ und $U_{\text{ein}} = 2.5 \text{ V}$ und der entsprechenden Fit-Funktion.

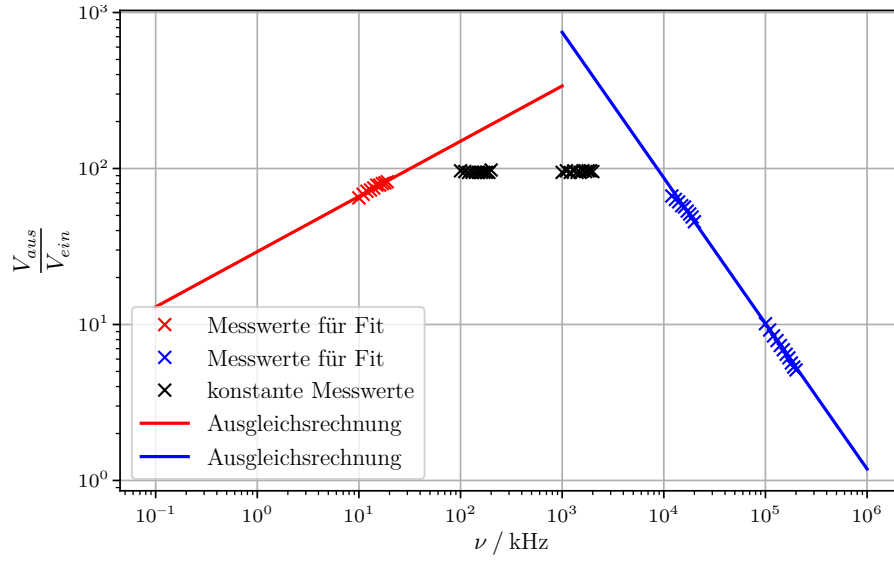


Abbildung 11: Plot der zweiten Konfiguration mit $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 100 \text{ k}\Omega$ und $U_{\text{ein}} = 90 \text{ mV}$ und der entsprechenden Fit-Funktion.

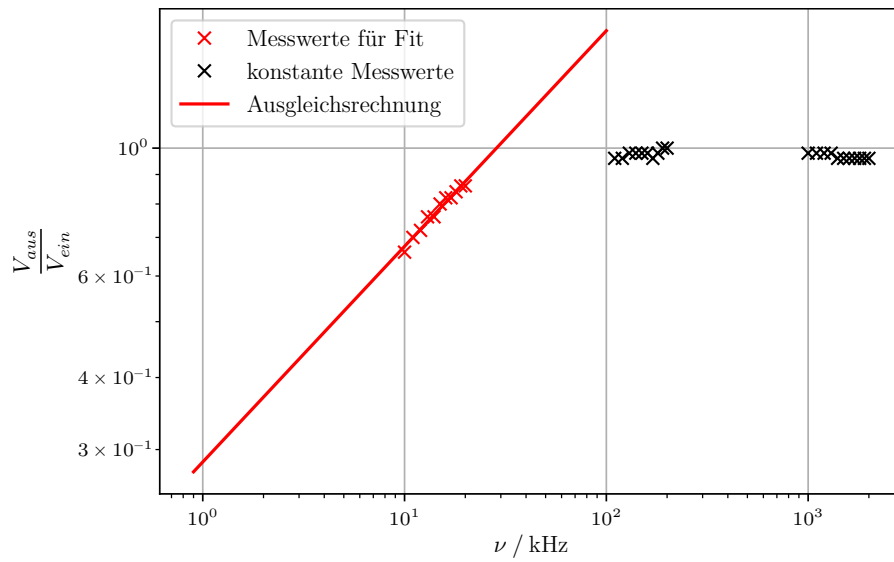


Abbildung 12: Plot der dritten Konfiguration mit $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 1 \text{ k}\Omega$ und $U_{\text{ein}} = 500 \text{ mV}$ und der entsprechenden Fit-Funktion.

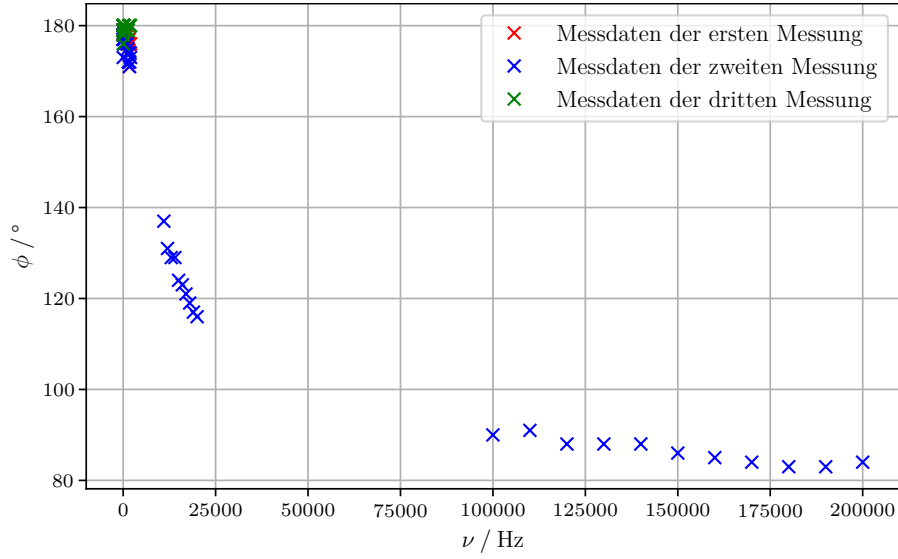


Abbildung 13: Plot der phaseverschiebung alle Konfiguration in Abhängigkeit von der Frequenzänderung.

4.2 Integrator und Differenziator

Für die Auswertung des Integrators und Differentiators wird die Ausgangsspannung U_A in Abhängigkeit von der Frequenz ν gemessen. Beim Integrator wurde ein Kondensator mit einer Kapazität von $C = 100 \text{ nF}$ und einem Widerstand von $R = 10 \text{ k}\Omega$ verwendet. Beim Differentiator wurde ein Kondensator mit einer Kapazität von $C = 2 \text{ nF}$ und $R = 100 \text{ k}\Omega$ eingesetzt. Die Messwerte sind in Tabelle 5 und Tabelle 6 aufgeführt sowie in Abbildung 14 und Abbildung 15 graphisch dargestellt. Dabei wurde eine Fit-Funktion durch die Messwerte gelegt, die die gleiche Struktur aufweist wie die Fit-Funktion im Abschnitt des Invertierenden Verstärkers. Die resultierenden Fit-Parameter und die gemäß Gleichung 5 und Gleichung 8 berechneten Zeitkonstanten C_{konst} lauten wie folgt:

$$a_{\text{int}} = 63.136 \pm 8.55$$

$$b_{\text{int}} = -0.722 \pm 0.05$$

$$C_{\text{konst}} = 159.155$$

$$a_{\text{diff}} = 0.017 \pm 0.003$$

$$b_{\text{diff}} = 0.958 \pm 0.035$$

$$C_{\text{konst}} = 0.014$$

Des Weiteren wurde untersucht, welches Signal der Integrator und der Differenziator bei einer Dreiecks- und Rechteckeingangsspannung liefert. Die Ergebnisse sind in Abbildung 18, Abbildung 19, Abbildung 16 und Abbildung 17 dargestellt, wobei das Eingangssignal grün und das Ausgangssignal gelb ist.

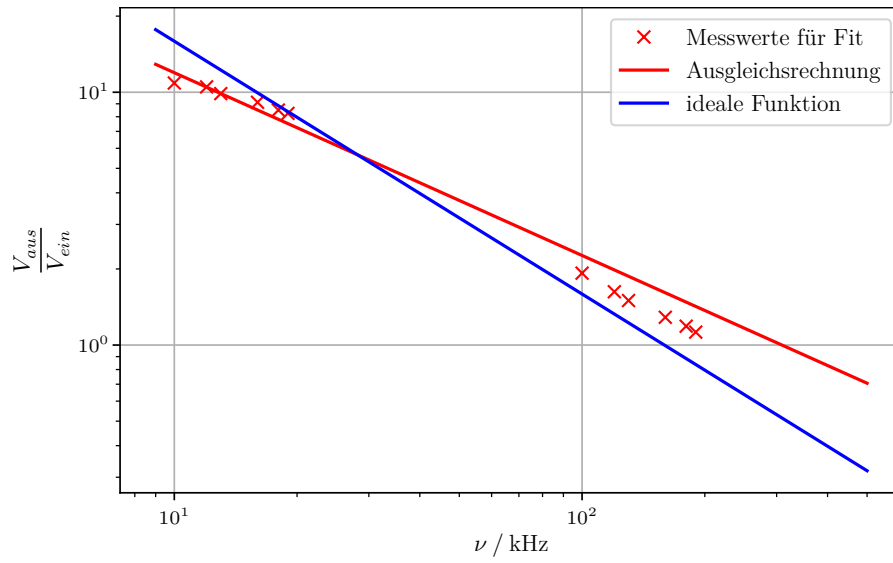


Abbildung 14: Plot der Verstärkung in Abhängigkeit von Frequenz bei einem Integrator und der entsprechenden Fit-Funktion.

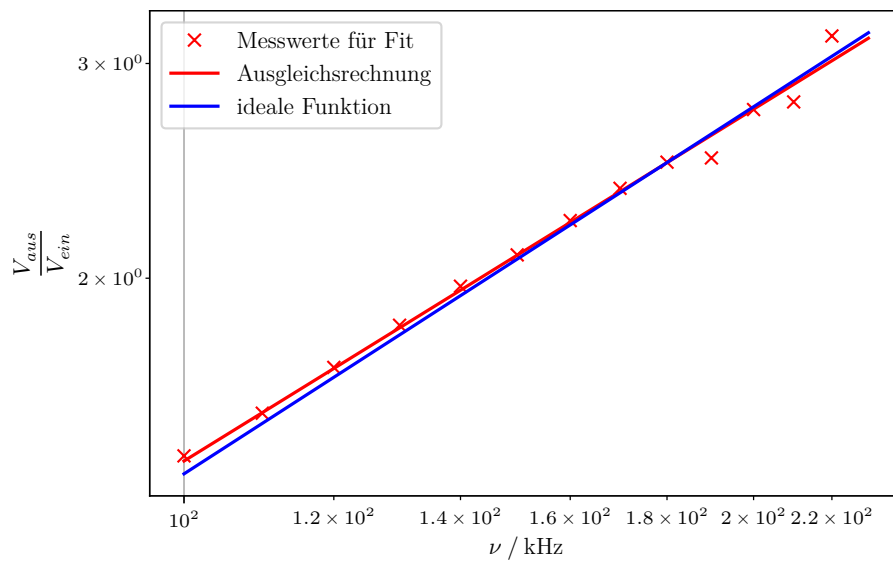


Abbildung 15: Plot der Verstärkung in Abhängigkeit von Frequenz bei einem Differentiator und der entsprechenden Fit-Funktion.

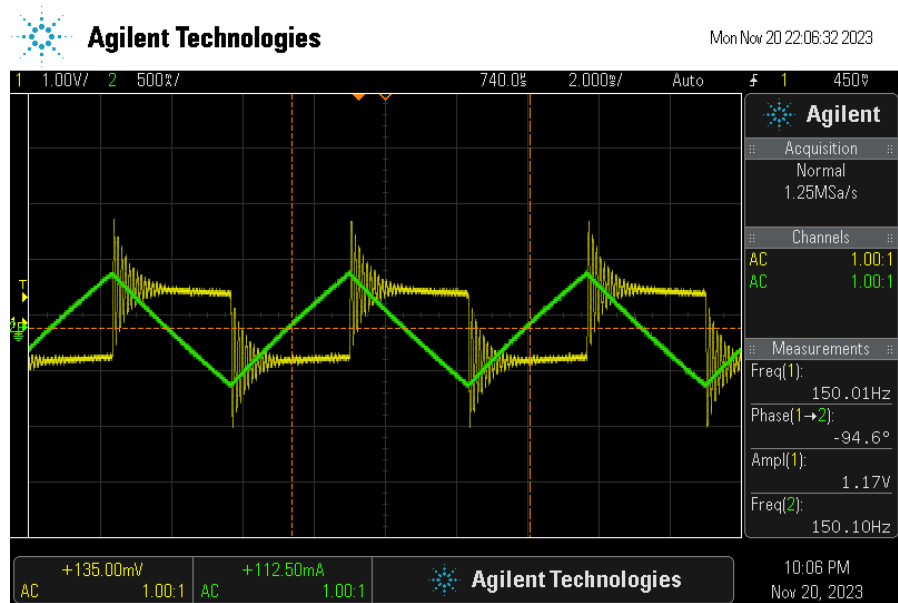


Abbildung 16: Signale des Differentiator mit Dreieckseingangsspannung.

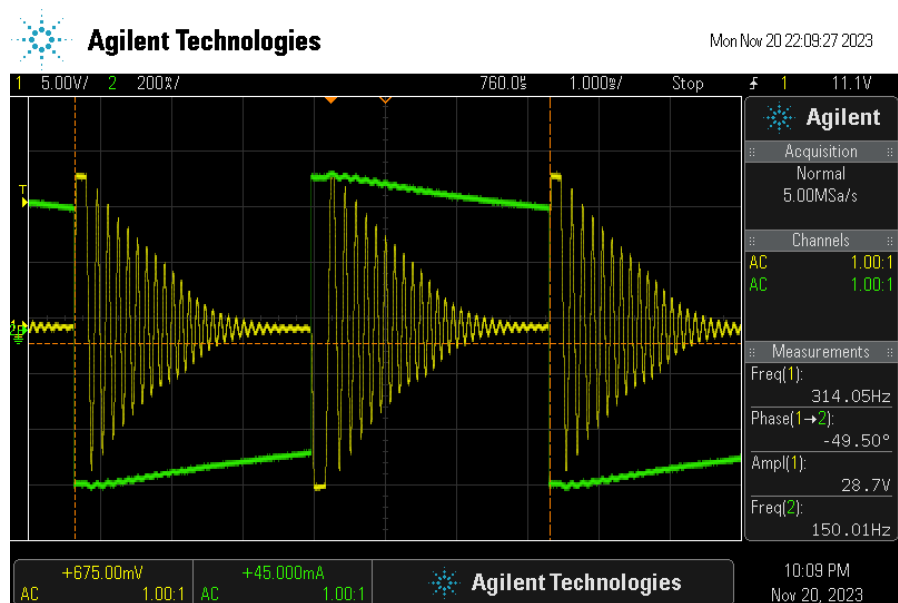


Abbildung 17: Signale des Differentiator mit Rechteckeingangsspannung.

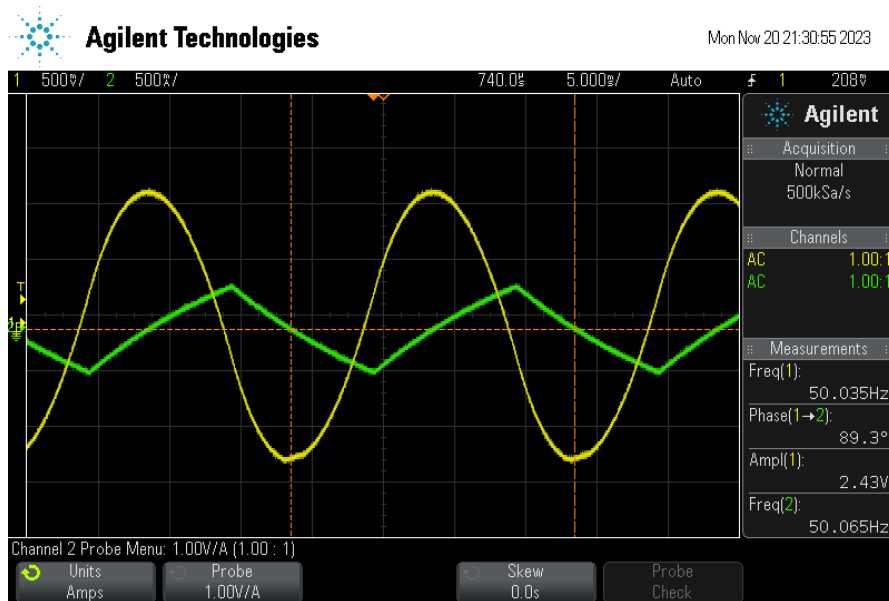


Abbildung 18: Signale des Integrator mit Dreieckseingangsspannung.

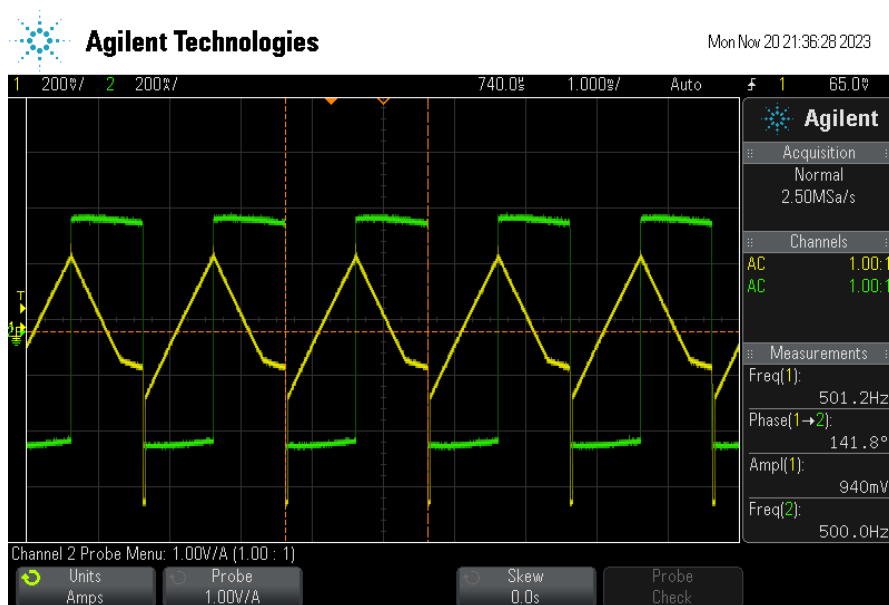


Abbildung 19: Signale des Integrator mit Rechteckeingangsspannung.

4.3 Schmitt-Trigger

Mit den aus der Durchführung beschriebene Widerständekonfiguration lassen sich $U_{\pm} = \pm 2.81 \text{ V}$ gemäß Gleichung 10 bestimmen. Bei der experimentele Bestimmen von Schwellenwert wurde eine Eingangsspannung $U_{\text{Schwell}} = 2.997 \text{ V}$ gemessen, für die sich ein stabiles

Rechtecksignal ergibt. In Abbildung 20 ist die Messung am Schwellwertpunkt dargestellt.

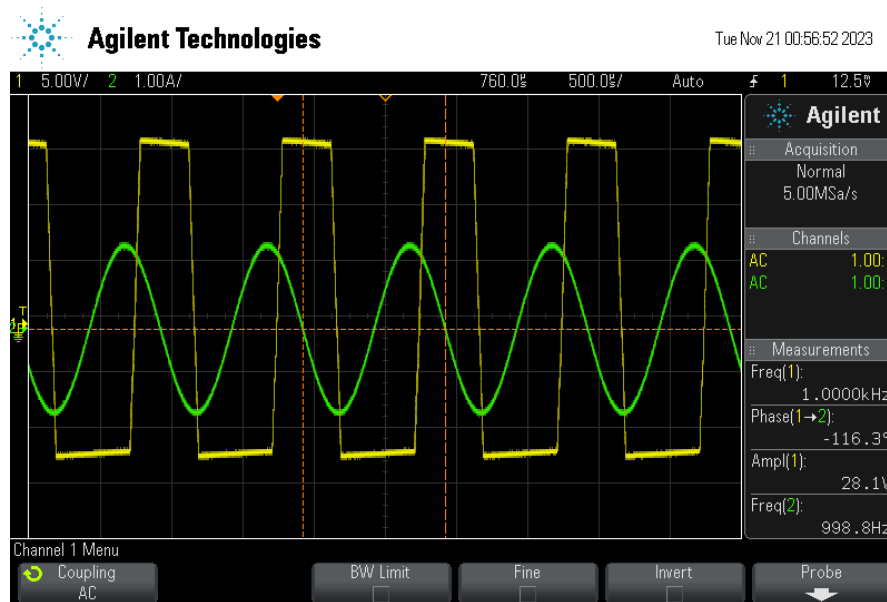


Abbildung 20: Bild vom Oszilloskop bei der Messung der Schwellenwert.

4.4 Frequenz Generator

Mit der aus der Durchführung beschriebenen Konfiguration des Generators wurde ein Bild vom Oszilloskop beim Anlegen der sinusförmigen Spannung aufgenommen, welche in der Abbildung 21 zu sehen ist. Aus dem Bild lassen sich die Frequenz $\nu = 4.0212 \text{ kHz}$ und die Amplitude $U = 2.89 \text{ V}$ ablesen. Die theoretischen Werte für die Frequenz und die Amplitude, lassen sich durch (11) bestimmen.

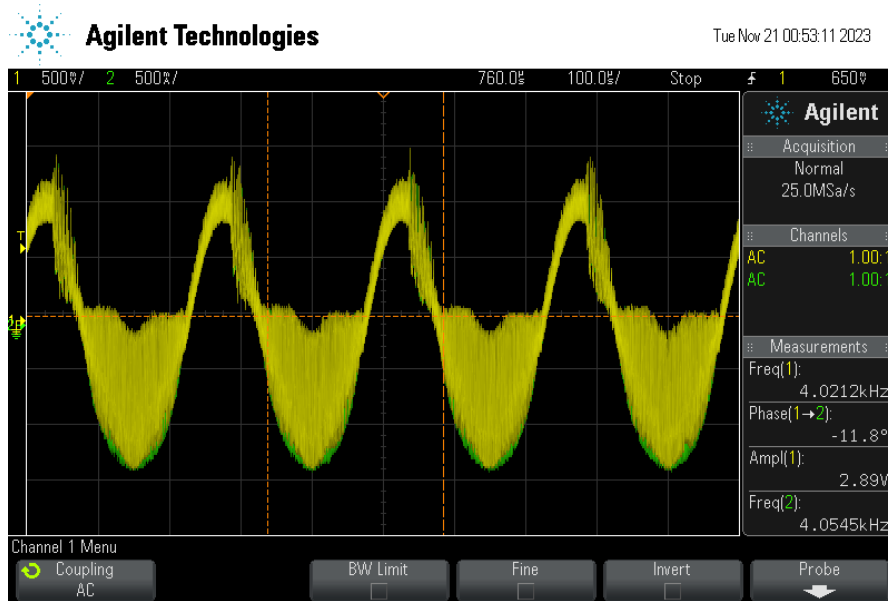


Abbildung 21: Bild vom Oszilloskop bei der Messung von Frequenz Generator.

4.5 Gedämpfte Schwingung

Mit einem geeigneten Aufbau lässt sich eine gedämpfte Schwingung mit bestimmter Amplitude erzeugen. Die theoretische Abklingzeit kann gemäß

$$\tau = \frac{10RC}{|\eta|} \quad (15)$$

bestimmt werden, wobei ein Kondensator mit einer Kapazität von $C = 22 \text{ nF}$ und ein Widerstand von $R = 1 \text{ k}\Omega$ verwendet werden. Dies führt zu einer theoretischen Abklingzeit von $\tau_{\text{theo}} = 4.4 \text{ ms}$. Die experimentelle Abklingzeit kann durch eine geeignete Fit-Funktion der Form

$$f(x) = a \cdot e^{-\frac{x}{\tau}} + c \quad (16)$$

bestimmt werden. Die Messdaten zur Bestimmung der Abklingzeit sind in Tabelle 7 aufgeführt. Der Kurvenverlauf der Messdaten sowie die dabei verwendete Fit-Funktion sind in Abbildung 22 dargestellt. Die dabei verwendeten Fit-Parameter sind wie folgt:

$$\begin{aligned} a &= 11896.25 \pm 25066.20 \text{ V} \\ \tau &= (0.00012 \pm 2.90 \cdot 10^{-4}) \text{ s} \\ c &= (2.45 \pm 0.144) \text{ V} \end{aligned}$$

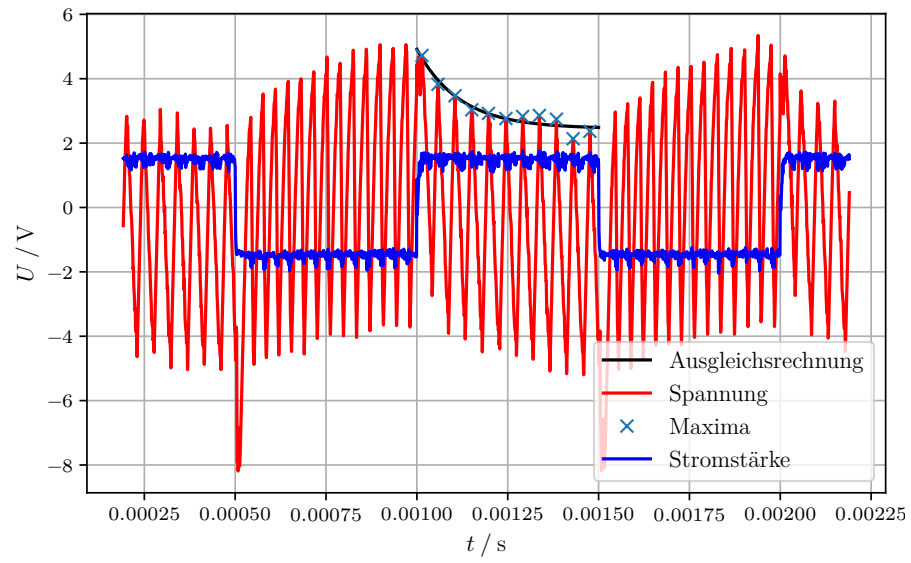


Abbildung 22: Der Kurvenverlauf der gedämpften Schwingung sowie die einhüllende Fit-Funktion der positiven Maxima einer bestimmten Sequenz.

Tabelle 2: Erste Messung des intertierten Verstärkers mit $U_{ein} = 2.5 \text{ V}$, $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$,
und $R_2 = 2.5 \text{ k}\Omega$.

$\nu / \text{ Hz}$	$U_{aus} / \text{ V}$	$\phi / ^\circ$
10	16.9	178
11	17.7	178
12	18.5	178
13	18.9	178
14	19.5	178
15	19.7	179
16	20.3	179
17	20.7	179
18	20.9	179
19	21.1	179
20	21.5	179
100	24.1	179
110	23.7	180
120	24.1	179
130	24.3	179
140	24.1	179
150	24.3	179
160	23.9	179
170	24.1	179
180	24.3	179
190	24.3	179
200	24.3	179
1000	24.9	178
1100	23.9	179
1200	23.9	178
1300	24.3	178
1400	24.3	177
1500	24.3	176
1600	24.3	177
1700	23.9	171
1800	23.9	176
1900	23.9	176
2000	24.9	176

Tabelle 3: Zweite Messung des intertierten Verstärkers mit $U_{ein} = 90 \text{ mV}$, $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$, und $R_2 = 100 \text{ k}\Omega$.

ν / Hz	U_{aus} / V	$\phi / ^\circ$	ν / Hz	U_{aus} / V	$\phi / ^\circ$
10	5.83	173	1500	8.5	172
11	6.15	178	1600	8.7	174
12	6.43	178	1700	8.6	171
13	6.55	178	1800	8.7	172
14	6.75	179	1900	8.7	174
15	7.04	177	2000	8.6	173
16	7.04	177	11000	6.5	137
17	7.20	180	12000	6.0	131
18	7.28	177	13000	5.7	129
19	7.4	179	14000	5.5	129
20	7.48	179	15000	5.2	124
100	8.7	178	16000	5.1	123
110	8.6	178	17000	4.8	121
120	8.5	177	18000	4.6	119
130	8.5	179	19000	4.4	117
140	8.5	178	20000	4.1	116
150	8.5	176	100000	0.91	90
160	8.5	176	110000	0.83	91
170	8.5	177	120000	0.76	88
180	8.5	178	130000	0.71	88
190	8.5	178	140000	0.66	88
200	8.8	178	150000	0.62	86
1000	8.5	176	160000	0.58	85
1100	8.7	176	170000	0.55	84
1200	8.5	174	180000	0.51	83
1300	8.7	175	190000	0.48	83
1400	8.5	172	200000	0.46	84

Tabelle 4: Dritte Messung des Intertierten Verstärkers mit $U_{ein} = 500 \text{ mV}$, $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$,
und $R_2 = 1 \text{ k}\Omega$.

$\nu / \text{ Hz}$	$U_{aus} / \text{ V}$	$\phi / ^\circ$
10	0.33	179
11	0.35	179
12	0.36	180
13	0.38	180
14	0.38	178
15	0.40	179
16	0.41	179
17	0.41	179
18	0.42	176
19	0.43	178
20	0.43	180
100	0.49	179
110	0.48	180
120	0.48	180
130	0.49	179
140	0.49	179
150	0.49	180
160	0.49	180
170	0.48	179
180	0.49	179
190	0.50	180
200	0.50	180
1000	0.49	179
1100	0.49	179
1200	0.49	179
1300	0.49	179
1400	0.48	179
1500	0.48	180
1600	0.48	180
1700	0.48	180
1800	0.48	180
1900	0.48	180
2000	0.48	180

Tabelle 5: Messung des Integrators mit $U_{ein} = 800 \text{ mV}$, $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$, und $C = 100 \text{ nF}$.

$\nu / \text{ Hz}$	$U_{aus} / \text{ V}$
10	8.7
12	8.4
13	7.9
16	7.3
18	6.8
19	6.6
100	1.54
120	1.3
130	1.2
160	1.03
180	0.95
190	0.90

Tabelle 6: Messung des Differenziators mit $U_{ein} = 1 \text{ V}$, $R_1 = 100 \text{ k}\Omega$, und $C = 22 \text{ nF}$.

$\nu / \text{ Hz}$	$U_{aus} / \text{ V}$
100	1.43
110	1.55
120	1.69
130	1.83
140	1.97
150	2.09
160	2.23
170	2.37
180	2.49
190	2.51
200	2.75
210	2.79
220	3.16

Tabelle 7: Daten der positiven Maxima der gedämpften Schwingung.

t / s	U / V
0.001014	4.722
0.001058	3.828
0.001105	3.471
0.001151	3.033
0.001197	2.923
0.001245	2.762
0.001291	2.827
0.001337	2.828
0.001384	2.742
0.00143	2.134
0.001476	2.265

5 Diskussion

In den folgenden Kapiteln werden die Messergebnisse der Auswertungskapitel diskutiert. Es wird mit der theoretischen Vorhersage verglichen und erklärt, um was für potentielle Fehler es sich handelt.

5.1 Invertierender Verstärker

Bei der Auswertung der Verstärkung weichen die experimentellen Werte in drei verschiedenen Konfigurationen jeweils um 3.3%, 4.6% und 22% nach unten ab. Die dabei verwendeten Messwerte sind $U_{1,\text{exp}} = 9.67$, $U_{2,\text{exp}} = 95.4$ und $U_{3,\text{exp}} = 0.78$, während die theoretischen Werte $U_{1,\text{theo}} = 10$, $U_{2,\text{theo}} = 100$ und $U_{3,\text{theo}} = 1$ sind. Dies hat den Grund, dass die ideale maximale Verstärkung in der Realität aufgrund von Störeffekten nicht erreicht werden kann. Da bei der Messung nicht ausreichend effektive Daten aus der ersten und dritten Konfiguration aufgenommen wurden, lassen sich allein durch die Auswertung der zweiten Konfiguration keine Aussagen über die Bandbreite und das GBP treffen.

5.2 Integrator und Differenziator

Bei der Auswertung des Integrators und des Differenzierers wurde eine Abweichung von 152% für die Zeitkonstante des Integrators gemessen. Dabei ist $a_{\text{int,exp}} = 63.136 \text{ s}$ und $b_{\text{int,exp}} = -0.722$, und $a_{\text{int,theo}} = 159.154 \text{ s}$ und $b_{\text{int,theo}} = -1$. Diese Abweichung hängt stark mit der Abweichung des Exponenten der Fit-Funktion zusammen, der um 27.8% von dem theoretischen Wert abweicht. Beim Vergleich der beiden Kurven in der Abbildung 14 zeigen sich jedoch an der Auswertungsstelle nahezu identische Verläufe. Im Gegensatz dazu gibt es beim Differenzierer eine Abweichung von 21.4% von der theoretischen Zeitkonstante, wobei auch der Exponent nur um 4.2% vom theoretischen

Wert abweicht. Dabei ist $a_{\text{diff,exp}} = 0.017 \text{ s}$ und $b_{\text{diff,exp}} = 0.958$, und $a_{\text{diff,theo}} = 0.014 \text{ s}$ und $b_{\text{diff,theo}} = 1$.

5.3 Schmitt-Trigger

Bei der Schmitt-Trigger ergibt sich eine relative Abweichung von 6.2% für die Schwellenwert. Diese Messung entspricht ziemlich genau die Erwartung aus der Theorie. Dabei ist $U_{\pm,\text{exp}} = 2.997 \text{ V}$ und $U_{\pm,\text{theo}} = 2.81 \text{ V}$

5.4 Frequenz Generator

Bei dem Frequenzgenerator wurde ein Signal mit sehr starkem Rauschen im Hintergrund gemessen, das auf unerklärliche Weise entsteht. Aufgrund dieses starken Rauschens lassen sich die auszuwertenden Werte, nämlich die Frequenz und die Amplitude, nur begrenzt genau vom Oszilloskop ablesen. Es wurde eine Frequenz von $\nu = 4.0212 \text{ kHz}$ und eine Amplitude von $U = 2.89 \text{ V}$ gemessen, die sich von den theoretischen Werten $U_{\text{theorie}} = 2.5 \text{ kHz}$ um 60.8% unterscheiden. Da keine Eingangsspannung gemessen wurde, lassen sich die theoretischen Werte für die Amplitude nicht auswerten.

5.5 Gedämpfte Schwingung

Bei der Auswertung der Abklingzeit der gedämpften Schwingung taucht erneut unerklärliches Rauschen im Hintergrund auf, weshalb die gemessenen Daten nicht genau den Erwartungen entsprechen. Obwohl die gedämpfte Schwingung nicht bis zur Null abnimmt, wurde die Auswertung der Abklingzeit anhand einer Umhüllenden der positiven Maxima durchgeführt. Diese liefert eine Abklingzeit von $\tau = 0.00012 \text{ s}$, die um 97.3% von dem theoretischen Wert $\tau_{\text{theo}} = 4.4 \text{ ms}$ abweicht. Diese Abweichung ist auch aufgrund des starken Rauschens zu erwarten.

Literatur

- [1] *LM741 pinout diagram*. URL: http://www.learningaboutelectronics.com/images/LM741_pinout_diagram.jpg (besucht am 23.11.2023).
- [2] *operational amplifier symbol*. URL: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/9/97/Op-amp_symbol.svg/768px-Op-amp_symbol.svg.png?20210812010730 (besucht am 23.11.2023).
- [3] *Operational Amplifiers*. URL: http://d6vsczyu1rky0.cloudfront.net/33619_b/wp-content/uploads/2020/03/op-amps.pdf (besucht am 23.11.2023).
- [4] *Versuch V51: Operationsverstärker*. TU Dortmund, Fakultät Physik.