

Fortgeschrittenenpraktikum

## **V51 - Operationsverstärker**

Leander Flottau	Jannis Vornholt
leander.flottau@udo.edu	jannis.vornholt@udo.edu

November 29, 2023

TU Dortmund University – Department of Physics

# Contents

<b>1</b>	<b>Ziel</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Theorie</b>	<b>3</b>
2.1	Schaltungen mit Operationsverstärkern . . . . .	3
2.1.1	Invertierter Linearverstärker . . . . .	3
2.1.2	Umkehrintegrator . . . . .	4
2.1.3	invertierter Differentiator . . . . .	5
2.1.4	Schmitt-Trigger . . . . .	6
2.1.5	Signalgenerator . . . . .	6
2.1.6	Signalgenerator mit variierenden Amplituden . . . . .	8
<b>3</b>	<b>Durchführung</b>	<b>8</b>
<b>4</b>	<b>Auswertung</b>	<b>10</b>
4.1	Fehlerrechnung . . . . .	10
4.2	Invertierender Verstärker . . . . .	10
4.3	Integrator . . . . .	12
4.4	Differentiator . . . . .	12
4.5	Schmitt Triger . . . . .	13
4.6	Generator . . . . .	13
4.7	Gedämpfte Schwingung . . . . .	13
<b>5</b>	<b>Diskussion</b>	<b>21</b>

# 1 Ziel

Bei diesem Versuch werden die Eigenschaften von Operationsverstärkern untersucht. Dafür werden Operationsverstärker in verschiedene Schaltungen eingebaut und ihre Funktionsweise getestet.

## 2 Theorie

Operationsverstärker sind Differenzverstärker, die Ausgangsspannung  $U_A$  ist proportional zu der Differenz der beiden Eingangsspannungen  $U_P$ ,  $U_N$

$$U_A = V \cdot (U_P - U_N).$$

Somit ist die Ausgangsspannung in der Phase der am nicht-invertierten Eingang (+) anliegenden Spannung  $U_P$  und gegenphasig zur am invertierten Eingang (-) anliegenden Spannung  $U_N$ . Das Proportionale Verhältnis der Ausgangsspannung gegenüber der Differenz der beiden Eingangsspannungen, besteht nur im Bereich

$$-U_S < U_A < U_S,$$

wobei  $U_S$  die angelegte Betriebsspannung ist. Außerhalb dieses Bereiches entspricht die Ausgangsspannung  $\pm U_S$ .

Der ideale Operationsverstärker hat eine Leerlaufverstärkung von  $V = \infty$ . Zudem sind die Eingangswiderstände  $r_p$  und  $r_n$  ebenfalls unendlich groß und der Ausgangswiderstand  $r_a = 0$ . Die Übertragungsbandbreite reicht dabei von 0 bis  $\infty$ .

Diese Bedingungen lassen sich bei einem realen Operationsverstärker nicht umsetzen. Dies führt zu einer Leerlaufverstärkung von  $V \propto 10^4 - 10^6$  und einer Übertragungsbandbreite von 10 Hz bis 10 kHz. Zusätzlich entsteht eine geringe Gleichtaktverstärkung, so wie eine Offsetspannung, wenn beide Eingangsspannungen 0 betragen. Diese Offsetspannung ist als

$$U_0 = U_P - U_N$$

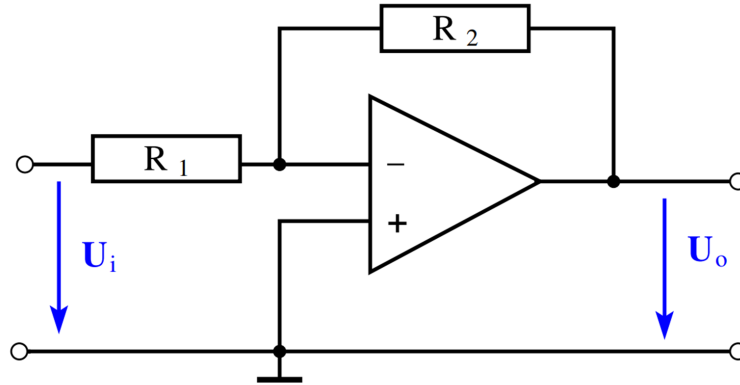
definiert, wobei die Eingangsspannungen so gewählt sind, dass  $U_A = 0$ .

### 2.1 Schaltungen mit Operationsverstärkern

#### 2.1.1 Invertierter Linearverstärker

In Abbildung 1 ist ein invertierter Linearverstärker gezeigt. Bei diesem wird die Ausgangsspannung über den Widerstand  $R_2$  in den invertierten Eingang des Operationsverstärkers gegeben. Dadurch kommt es bei einer Zunahme der Ausgangsspannung zu einer Abnahme der Eingangsspannung. Diese Gegenkopplung wirkt einer Ausgangsspannung im gesättigten Bereich entgegen.

Aus der Proportionalität der Ausgangsspannung zur Eingangsspannung ergibt sich



**Figure 1:** Schematische Darstellung eines invertierenden Verstärkers [**Anleitung**].

$$U_N = -\frac{U_A}{V}. \quad (1)$$

Mit der Annahme  $I_N = 0$ , folgt aus der Knotenregel für den Knoten vor dem invertierten Eingang

$$\frac{U_N - U_1}{U_A - U_1} = \frac{R_1}{R_1 + R_N}. \quad (2)$$

Unter Berücksichtigung von Formel 1 und 2, so wie der Näherung  $V \gg 1$  ergibt sich

$$\frac{1}{V'} = \frac{1}{V} + \frac{R_1}{R_N}. \quad (3)$$

Gut zu sehen ist, dass die Verstärkung bei  $\frac{R_N}{R_1} \ll V$  nahezu nur noch von dem Verhältnis der Widerstände abhängt. Diese Gegenkopplung verringert damit die starken schwankungen von  $V$  und erhöht so die Stabilität des Verstärkers.

### 2.1.2 Umkehrintegrator

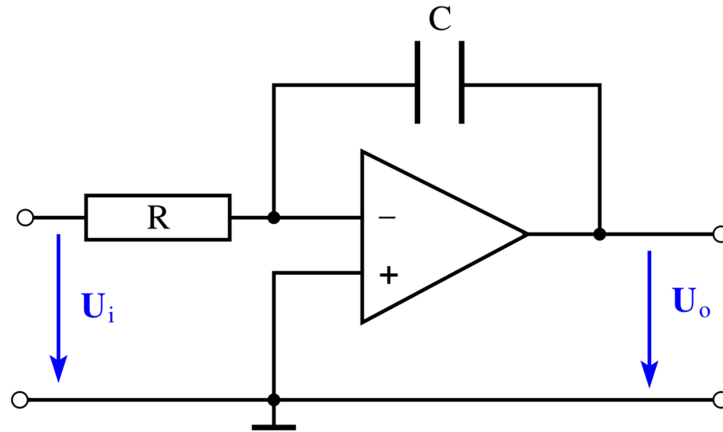
Tauscht man den Widerstand in der Rückkopplung des invertierten Linearverstärker durch einen Kondensator, so erhält man einen Umkehrintegrator. Dieser ist in Abbildung 2 dargestellt.

Durch die Knotenregel und der Näherung  $I_N = 0$ , ergibt sich für den Knoten vor dem invertierten Eingang

$$I_1 + I_C = 0. \quad (4)$$

Weiterhin gilt

$$I_1 = \frac{U_1}{R_1}, \quad (5)$$



**Figure 2:** Schematische Darstellung eines Umkehrintegrators [**Anleitung**].

so wie

$$\int I_C dt = CU_A. \quad (6)$$

Daraus berechnet sich die Ausgangsspannung zu

$$U_A = -\frac{1}{RC} \int U_1 dt. \quad (7)$$

Für eine sinusförmige Eingangsspannung  $U_1 = U_0 \sin(\omega t)$  folgt nun

$$U_A = -\frac{U_0}{RC\omega} \cos(\omega t). \quad (8)$$

### 2.1.3 invertierter Differentiator

Werden nun der Widerstand und der Kondensator des Umkehrintegrators vertauscht, so entsteht der invertierte Differentiator, abgebildet in Abbildung 3.

Für den Knoten vor dem invertierten Eingang ergibt sich dann

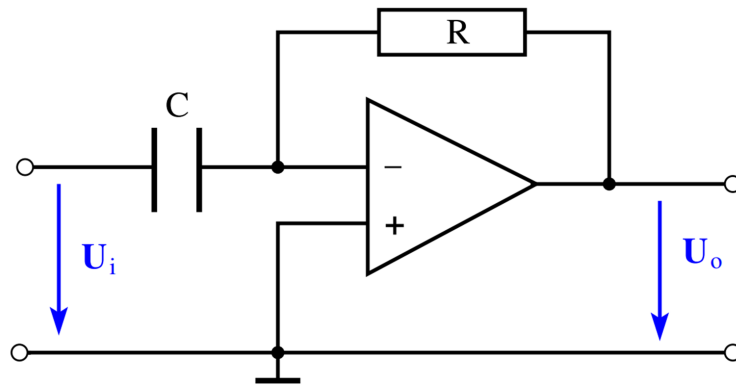
$$I_1 + I_A = 0,$$

mit den Strömen

$$I_1 = \dot{Q} = C \cdot \dot{U}_1$$

$$I_A = \frac{U_A}{R}.$$

Damit hängt die Ausgangsspannung von der zeitlichen Ableitung der Eingangsspannung ab



**Figure 3:** Schematische Darstellung eines invertierten Differentiators [Anleitung].

$$U_A = -RC \cdot \dot{U}_1.$$

Für eine Eingangsspannung  $U_1 = U_0 \sin(\omega t)$  ergibt sich dann die Ausgangsspannung

$$U_A = -RCU_0\omega \cdot \cos(\omega t), \quad (9)$$

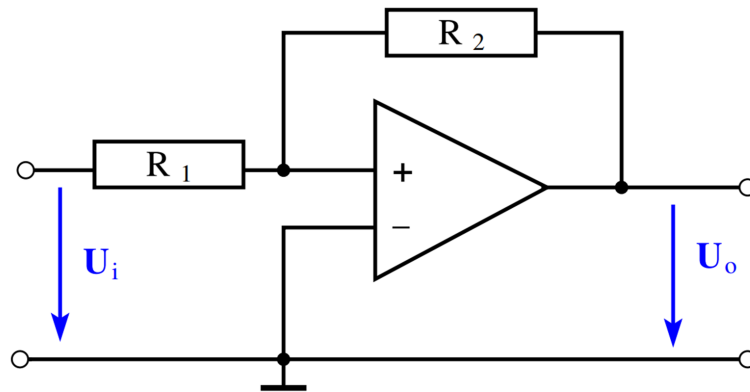
welche proportional zur Frequenz ist.

#### 2.1.4 Schmitt-Trigger

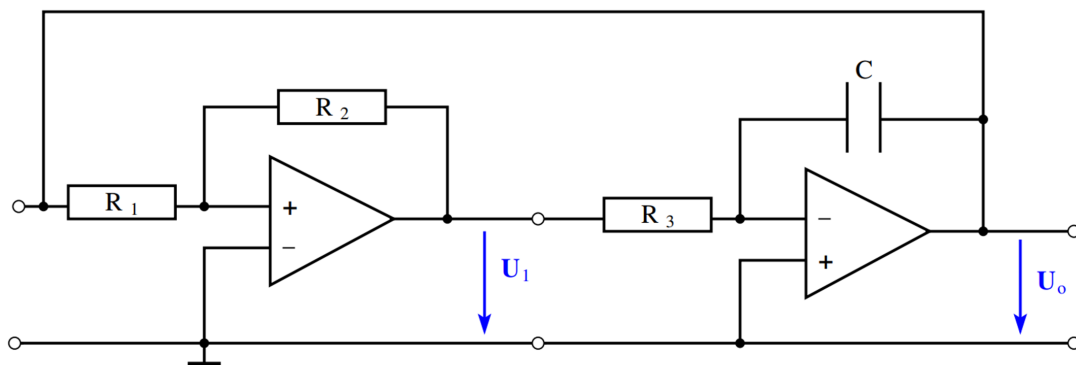
Bei dem Schmitt-Trigger, gezeigt in Abbildung 4, wird das Ausgangssignal über einen Widerstand in den nicht invertierten Eingang des Operationsverstärkers gegeben. Dadurch wird das Eingangssignal verstärkt, wodurch der Schmitt-Trigger einem Schalter ähnelt. Übersteigt die Spannungsdifferenz an den Eingängen einen bestimmten Schwellenwert, so springt die Ausgangsspannung schlagartig auf  $\pm U_S$ . Daraus ergibt sich für die Ausgangsspannung eine Rechtecksspannung. Die Schwellenwerte sind gegeben durch  $-\frac{R_1}{R_P}U_S$  und  $\frac{R_1}{R_P}U_S$ .

#### 2.1.5 Signalgenerator

Die Kombination aus Schmitt-Trigger und Integrator ist in Abbildung 5 dargestellt und entspricht einem Signalgenerator, welcher spontan anfängt zu schwingen. Die Rechtecksspannung am Ausgang des Schmitt-Triggers wird durch den Integrator integriert, was zu einer Dreiecksspannung am Ausgang des Integrators führt. Diese Dreiecksspannung wird wiederum als Eingangsspannung für den Schmitt-Trigger genutzt. Die Frequenz des schwingenden Systems ergibt sich zu  $\nu_{Dreieck} = \frac{R_2}{4CR_1R_3}$  und die Amplitude entspricht dem Wert  $A = U_{\max} \frac{R_4}{R_2}$ .



**Figure 4:** Schematische Darstellung eines Schmitt-Triggers [Anleitung].



**Figure 5:** Schematische Darstellung eines Signalgenerators [Anleitung].

### 2.1.6 Signalgenerator mit variierenden Amplituden

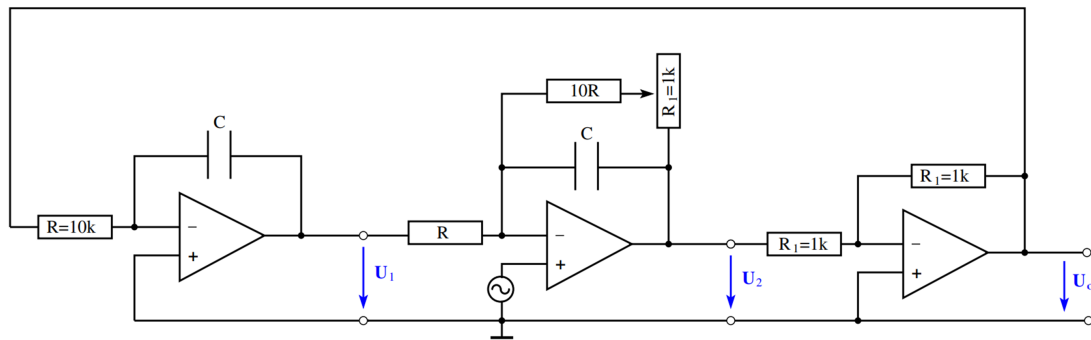
Durch den in Abbildung 6 gezeigten Aufbau kann durch eine Rechtecksspannung als Eingangsspannung, eine gedämpfte Schwingung erzeugt werden. Diese Gedämpfte Schwingung hat die Periodendauer

$$T = 2\pi RC \quad (10)$$

und eine Zerfallszeit von

$$\tau = \frac{20RC}{|\rho|}, \quad (11)$$

dabei gilt  $-1 \leq \rho \leq 1$  ist eine Konstante.



**Figure 6:** Schematische Darstellung eines Signalgenerators mit variierender Amplitude [Anleitung].

## 3 Durchführung

Die in Kapitel 2 dargestellten Schaltungen, werden nach Vorbild ihrer jeweiligen Abbildungen aufgebaut und getestet.

- Bei dem invertierten Linearverstärker wird eine Sinusspannung eingegeben und anschließend für verschiedene Frequenzen die Amplitude, so wie die Phasendifferenz zwischen Eingangs- und Ausgangsspannung gemessen. Dies wird für drei verschiedene Verhältnisse zwischen  $R_1$  und  $R_2$  durchgeführt.
- Beim Integrator, so wie Differentiator werden ebenfalls die Amplituden der Ausgangsspannung bei verschiedenen Frequenzen einer eingehenden Sinusspannung untersucht. Zusätzlich werden über einen Signalgenerator Dreiecks- und Rechtecksspannungen als Eingangsspannung genutzt und das Verhalten der Ausgangsspannung mit Hilfe eines Oszilloskops untersucht.



- Beim Schmitt-Trigger wird der Schwellenwert gesucht. Dafür wird die Eingangsspannung so lange erhöht, bis die Ausgangsspannung ihr Vorzeichen wechselt. Zudem wird der Schwellenwert mit Hilfe einer Dreiecksspannung ermittelt. Dafür wird eine Dreiecksspannung als Eingangsspannung angelegt, die deutlich größer als der Schwellenwert ist. Durch ein Oszilloskop kann dann der Schwellenwert abgelesen werden.
- Beim Signalgenerator werden sowohl die Ausgangsspannung des Schmitt-Triggers, so wie die des Integrators, auf einem Oszilloskop abgebildet und verglichen.
- Bei der gedämpften harmonischen Schwingung werden die Eingangs- und Ausgangsspannung auf dem Oszilloskop dargestellt und untersucht.

## 4 Auswertung

### 4.1 Fehlerrechnung

Für die Fehlerrechnung wurde die Gaußsche Fehlerfortpflanzung

$$\Delta f = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 (\Delta x)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2 (\Delta y)^2 + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial z}\right)^2 (\Delta z)^2} \quad (12)$$

für fehlerbehaftete Werte  $x, y, \dots, z$  mit den Unsicherheiten  $\Delta x, \Delta y, \dots, \Delta z$  sowie der Fehler des Mittelwertes:

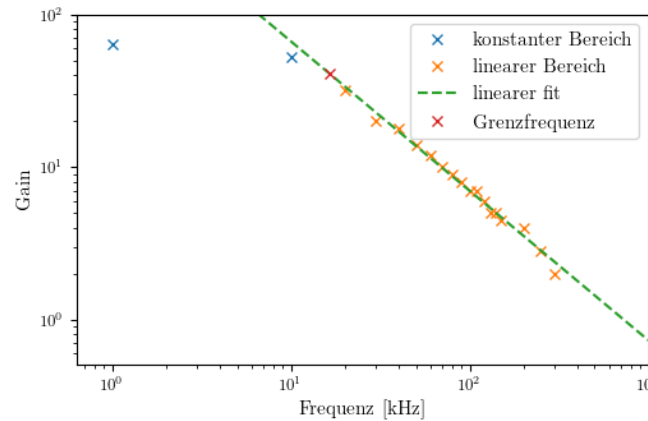
$$\Delta \bar{x} = \sqrt{\frac{1}{N(N-1)} \sum_{k=1}^N (x_k - \bar{x})^2} \quad (13)$$

mit dem Mittelwert  $\bar{x}$  verwendet.

### 4.2 Invertierender Verstärker

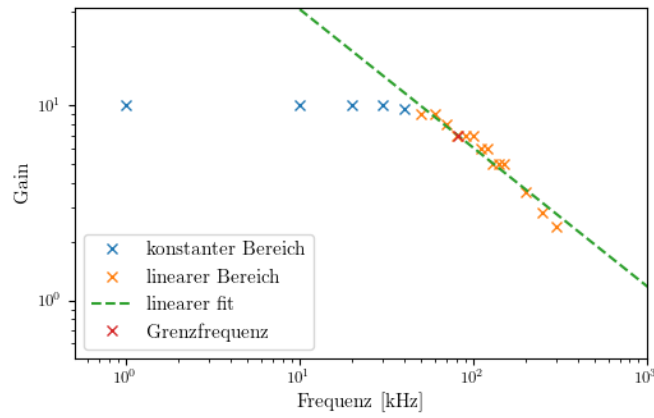
Für den Invertierenden Verstärker wurden die Amplitude und die Phasenverschiebung  $\Phi$  der Amplitude der Ausgangsspannung  $U_A$  in Abhängigkeit von der Frequenz  $f$  gemessen. Eine solche Messung wurde mit drei verschiedenen Konfigurationen von Widerständen ausgeführt.

Mittels der Eingangsamplitude des Signalgenerators wurde für alle Messungen aus den gemessenen Amplituden jeweils die Verstärkung  $G$  bestimmt und anschließend in einem doppellogarithmischen Koordinatensystem in Abhängigkeit von der Frequenz abgebildet. Die Ergebnisse sind in den Abbildungen ??, ??, ?? dargestellt. Die

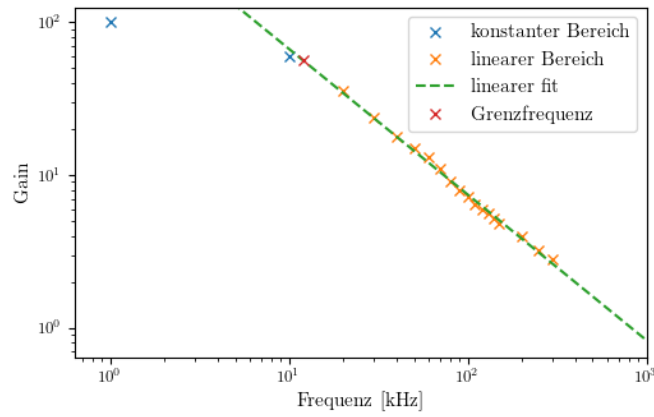


**Figure 7:** Verstärkung in Abhängigkeit von der Frequenz in doppellogarithmischer Darstellung für einen invertierten Verstärker mit Widerständen  $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$  und  $R_2 = 68 \text{ k}\Omega$

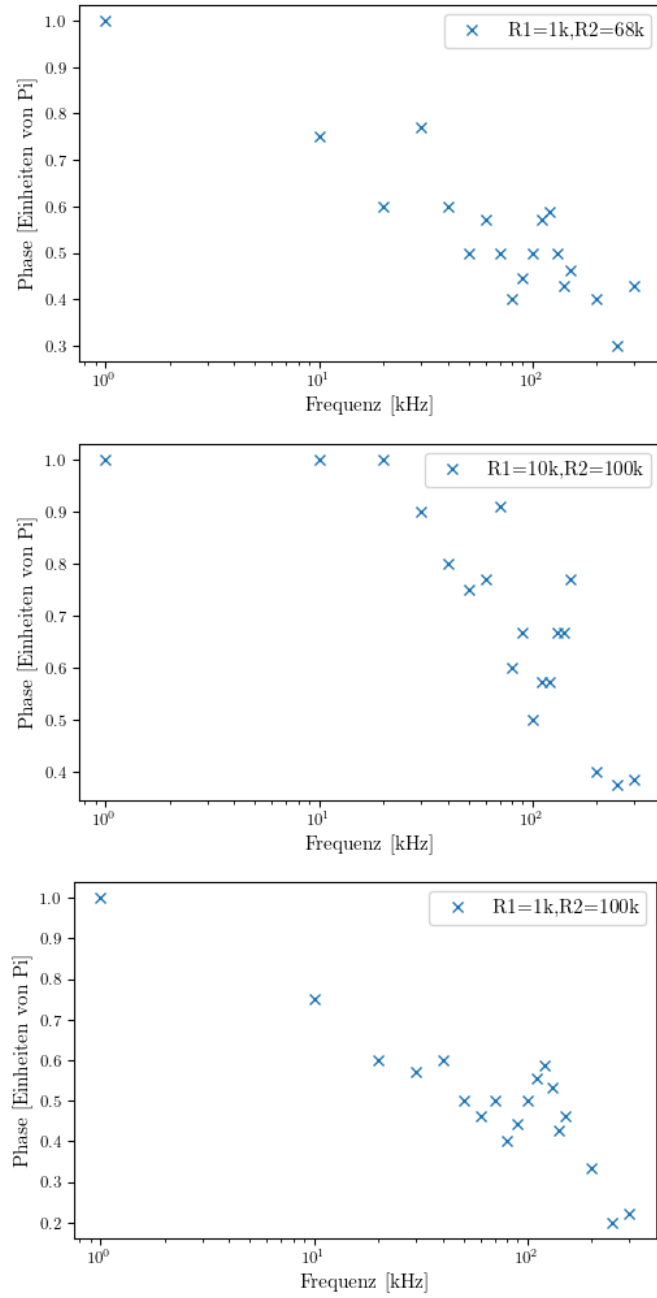
Phasenverschiebungen der drei Messreihen finden sich in Abbildung Im Bereich des



**Figure 8:** Verstärkung in Abhängigkeit von der Frequenz in doppellogarithmischer Darstellung für einen invertierten Verstärker mit Widerständen  $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$  und  $R_2 = 100 \text{ k}\Omega$



**Figure 9:** Verstärkung in Abhängigkeit von der Frequenz in doppellogarithmischer Darstellung für einen invertierten Verstärker mit Widerständen  $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$  und  $R_2 = 100 \text{ k}\Omega$



**Figure 10:** Phasenverschiebung in Einheiten von  $\pi$  Abhängigkeit von der Frequenz in halblogarithmischer Darstellung für einen invertierten Verstärker für alle die drei vorgenommenen Messreihen.

linearen Zusammenhang zwischen beiden Größen kann ein Fit der Form:

$$\log(G) = m \log(f) + b \quad (14)$$

welche im nicht logarithmischen Raum einer Funktion der Form:

$$G(f) = Bf^m \quad (15)$$

entspricht. Für die drei Messreihen lauten die Fitfunktionen:

$$G_1(f) = (634, 79 \pm 76, 14) f^{-0,98 \pm 0,26} \quad (16)$$

$$G_2(f) = (157, 25 \pm 36, 32) f^{-0,71 \pm 0,05} \quad (17)$$

$$G_3(f) = (605.03 \pm 63, 597) f^{-0,95 \pm 0,02} \quad (18)$$

Die annähernd konstante Verstärkung im niederfrequenteren Bereich  $G_c$  kann durch den Mittelwert der entsprechenden Messpunkte ermittelt werden. Mithilfe dieses Wertes sowie der gefitteten Funktionen im linearen Bereich kann die Grenzfrequenz  $f_g$  bestimmt werden. Diese ist definiert als die Frequenz, bei der die konstante Verstärkung sich um 3 dB bzw. den Faktor  $1/\sqrt{2}$  verringert hat. Die Grenzfrequenz kann gemäß der gefitteten Funktion durch die Formel

$$f_g = \left( \frac{V_c}{B\sqrt{2}} \right)^m \quad (19)$$

Die Widerstände der Messreihen sowie die berechneten Verstärkungen und Grenzfrequenzen lauten:

Messung 1:

$$R_1 = 1 \text{ k}\Omega \quad R_2 = 68 \text{ k}\Omega \quad G_c = 58 \pm 6 \quad f_g = (16.4 \pm 2.3) \text{ kHz}$$

Messung 2:

$$R_1 = 10 \text{ k}\Omega \quad R_2 = 100 \text{ k}\Omega \quad G_c = 9,9 \pm 0,1 \quad f_g = (85 \pm 33) \text{ kHz}$$

Messung 3:

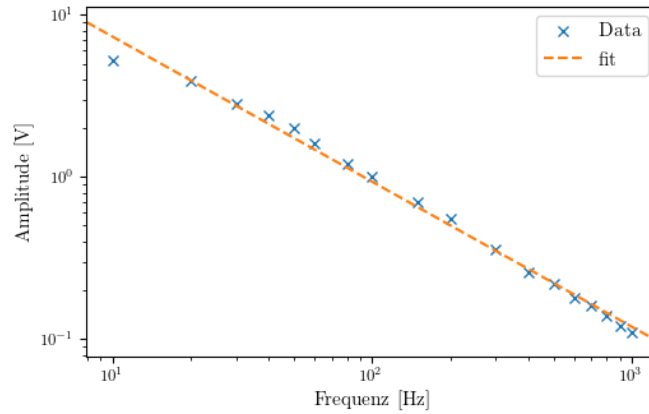
$$R_1 = 1 \text{ k}\Omega \quad R_2 = 100 \text{ k}\Omega \quad G_c = 80 \pm 20 \quad f_g = (12.0 \pm 3.5) \text{ kHz}$$

### 4.3 Integrator

Für den Integrator wurden ein Widerstand von  $R = 10 \text{ k}\Omega$  und ein Kondensator mit der Kapazität von  $C = 100 \text{ nF}$  verwendet. Abbildung ?? zeigt die Amplitude der Ausgangsspannung in Abhängigkeit von der Frequenz. Zusätzlich ist eine Fitfunktion:

$$U_{int}(f) = (57, 52 \pm 5, 7) f^{-0,89 \pm 0,19} \quad (20)$$

angelegt. Ein solcher Verlauf entspricht der Erwartung für den Verstärkungsverlauf eines Integrators. Die Bilder in Abbildung ?? des zeigen das Ausgangssignal des Integrators für verschiedene Eingangsspannungen. Wie zu erwarten ergibt sich aus einem Sinussignal nach Integration ein Cosinussignal, aus einer Rechteckspannung eine Dreieckspannung und aus einer Dreieckspannung ein Parabolischer Verlauf.



**Figure 11:** Amplitude in Abhängigkeit von der Frequenz in doppellogarithmischer Darstellung für einen Integrator mit Widerstand  $R = 10 \text{ k}\Omega$  und Kapazität  $C = 100 \text{ nF}$

#### 4.4 Differentiator

Der Differentiator verwendet einen Widerstand von  $R = 100 \text{ k}\Omega$  und eine Kapazität von  $C = 22 \text{ nF}$ . Die Amplitude des Ausgangssignals in Abhängigkeit von der Frequenz findet sich in Abbildung ???. Der zugehörige Fit lautet:

$$U_{diff}(f) = (0,009 \pm 0,000, 5) f^{0,96 \pm 0,01} \quad (21)$$

Wie zu erwarten steigt die Amplitude bzw. die Verstärkung mit steigender Frequenz an, wie sich auch im Fit zeigt. Wie beim Integrator wird auch beim Differentiator durch die Fotos (??) die Reaktion auf die unterschiedlichen Eingangssignale veranschaulicht. Das Ausgangssignal erwartungsgemäß die Ableitung der jeweiligen Eingangsfunktion.

#### 4.5 Schmitt Trigger

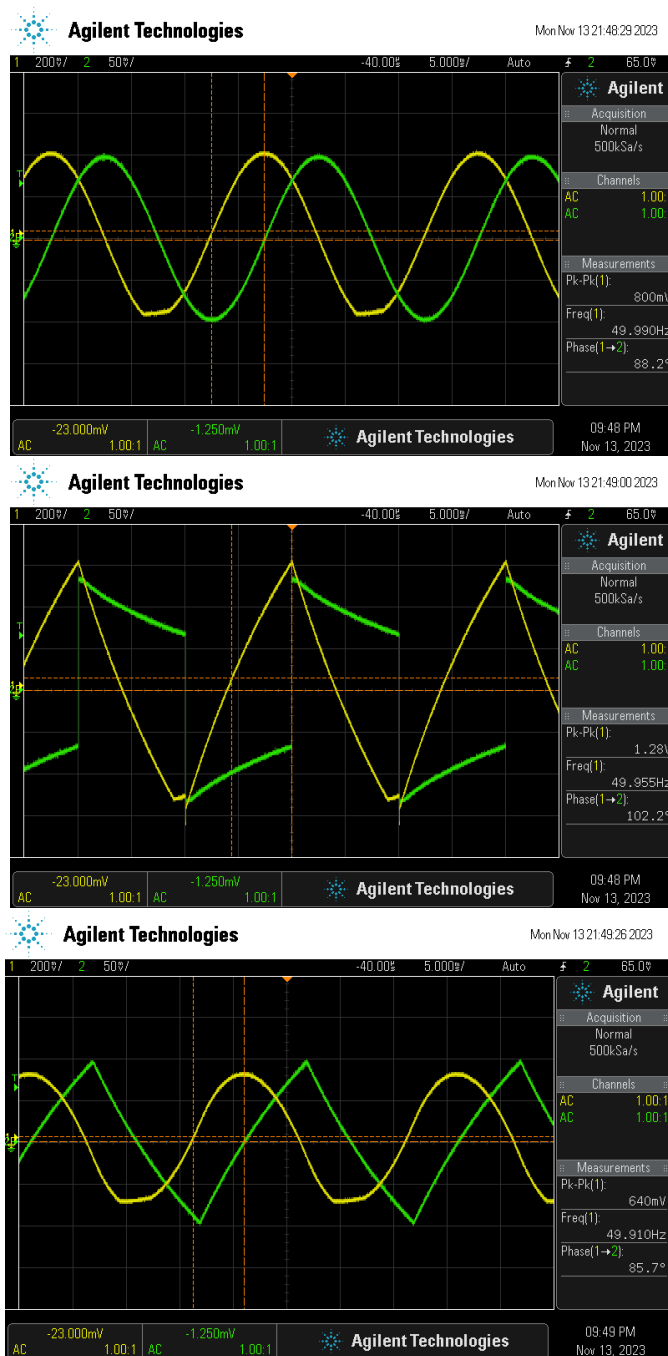
Für den Schmitt Trigger wurden die Widerstände  $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$  und  $R_2 = 100 \text{ k}\Omega$  sowie die Betriebsspannungen  $U_{\pm} = \pm 15 \text{ V}$  verwendet. Somit ergeben sich die theoretischen Kippspannungen zu:

$$U_{kipp,\pm} = U_{\pm} \frac{R_1}{R_2} = \pm 1.5 \text{ V} \quad (22)$$

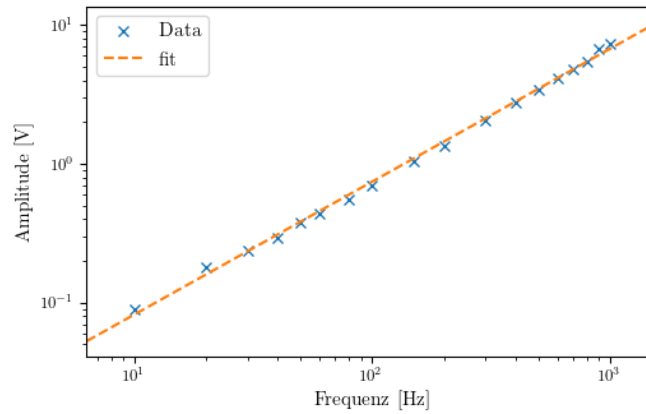
Durch variieren der Amplitude des Eingangssignals konnte der Kippunkt und somit der Betrag der Kippspannung zu  $U_{kipp} = 1.465 \text{ V}$  ermittelt werden. Weiterhin wurden durch Anlegen einer Dreiecksspannung an jeweils drei Punkten der Kippunkt der Ausgangsspannung am Oszilloskop beobachtet. Durch Bildung der Mittelwerte führt dies zu den Kippspannungen:

$$U_{kipp,+} = (1.567 \pm 0.060) \text{ V} \quad (23)$$

$$U_{kipp,-} = (1.500 \pm 0.058) \text{ V} \quad (24)$$



**Figure 12:** Ausgangssignal eines Integrators (gelb) für Sinus-, Rechteck und Dreiecksspannungen als Eingangssignal (grün)



**Figure 13:** Amplitude in Abhängigkeit von der Frequenz in doppellogarithmischer Darstellung für einen Differentiator mit Widerstand  $R = 100\text{ k}\Omega$  und Kapazität  $C = 22\text{ nF}$

## 4.6 Generator

Für die Konstruktion des Generators wurden die Widerstände  $R_1 = 10\text{ k}\Omega$ ,  $R_2 = 100\text{ k}\Omega$  und  $R_3 = 1\text{ k}\Omega$  sowie die Kapazität  $C = 10^{-6}\text{ F}$  verwendet. Dies liefert eine theoretische Frequenz des Ausgangssignals von:

$$f_a = \frac{R_2}{4CR_1R_3} = 2.5\text{ kHz} \quad (25)$$

sowie eine Amplitude von

$$U_a = U_{max} \frac{R_1}{R_2} = 1.4\text{ kHz} \quad (26)$$

Die experimentellen Werte der Generierten Ausgangsspannung  $f_{a,exp} = 1.62\text{ kHz}$ ,  $U_{a,exp} = 2.1\text{ V}$  lassen sich der Abbildung ?? entnehmen.

## 4.7 Gedämpfte Schwingung

Für die gedämpfte Schaltung wurde eine Schaltung mit den Kenndaten  $R = 1\text{ k}\Omega$  und  $C = 100\text{ nF}$  verwendet. Die resultierende gedämpfte Schwingung ist in Abbildung ?? zu sehen. Die theoretische Periodendauer lässt sich damit durch die Formel

$$T_{theo} = 2\pi RC = 628.3\text{ }\mu\text{s} \quad (27)$$

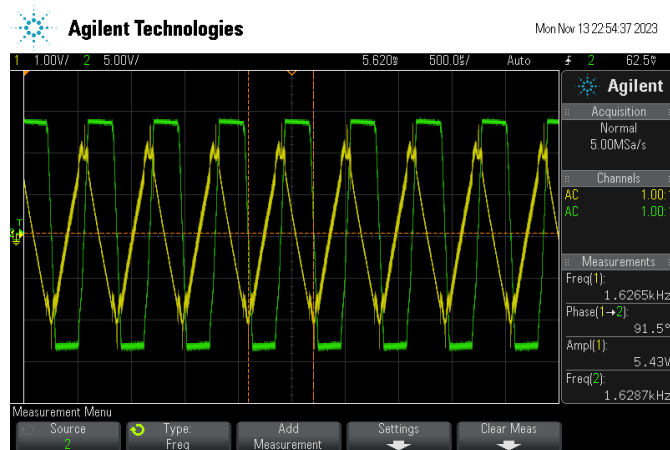
berechnen. Um die Periodendauer sowie die Abklingzeit  $\tau$  zu berechnen wird eine der Schwingungen ausgewählt und ein exponentieller Fit an die Maxima angelegt um die einhüllende zu bestimmen. Das Ergebniss findet sich in Abbildung ?. Die zugehörige Fitfunktion lautet:

$$U_{schwing}(t) = a \exp(-mt) = (0,015 \pm 0,0004) \exp(-(1912,84 \pm 86,98)t) \quad (28)$$

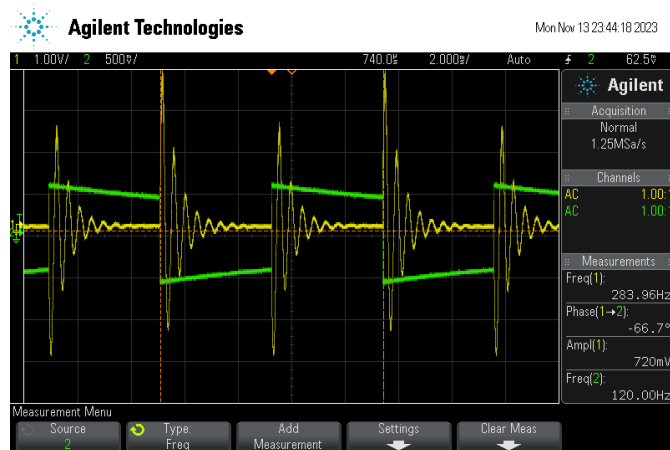




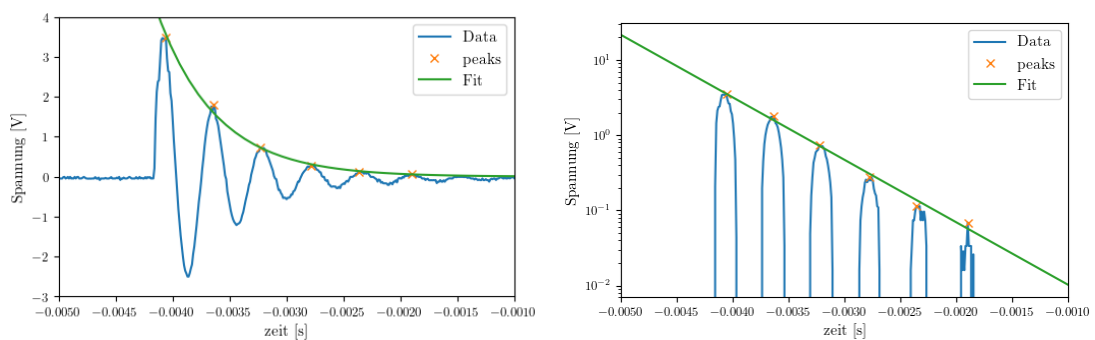
**Figure 14:** Ausgangssignal eines Differentiators (gelb) für Sinus-, Rechteck und Dreiecksspannungen als Eingangssignal (grün)



**Figure 15:** Dreiecksschwingung und Rechteckschwingung des Generators



**Figure 16:** Ausgangssignal eines Integrators (gelb) für Sinus-, Rechteck und Dreiecksspannungen als Eingangssignal (grün)



**Figure 17:** Amplitude in Abhängigkeit von der Zeit für eine gedämpfte Schwingung in regulärer und halblogarithmischer Darstellung

woraus die Abklingzeit

$$\tau = 1/m = (523.0 \pm 23.8) \mu\text{s} \quad (29)$$

bestimmt werden kann. Weiterhin kann durch die mittlere Distanz zwischen den Maxima die Periodendauer bestimmt werden:

$$T_{exp} = (432.0 \pm 9.7) \mu\text{s} \quad (30)$$

## 5 Diskussion

Die Messungen des invertierenden Verstärkers zeigen sehr gut die Frequenzabhängigkeit der Amplitude auf. Durch den gut erkennbaren linearen Verlauf war die Grenzfrequenz ohne Probleme bestimmbar und auch die konstante Verstärkung liegt im aus der Theorie erwarteten Bereich. Abhängig vom Verhältnis der Widerstände ist allerdings der konstante Bereich des Verlaufs nicht in allen Messreihen gleich gut zu erkennen. Dies wird dadurch bestärkt, dass die Messwerte in linearen Abständen gewählt wurden und somit auf einer logarithmischen Skala in den niedrigen Größenordnungen Messwerte fehlen. Weiterhin können Innenwiderstände und andere Störeffekte, die in dem Modell eines idealen Operationsverstärkers nicht berücksichtigt sind Gründe für Abweichungen sein. Die Frequenzabhängigkeit der Phase lässt zwar qualitativ den Verlauf erkennen, die Messung ist jedoch sehr ungenau und stark gestreut. Dies liegt vermutlich daran, dass die Phasenverschiebung mit bloßem Auge anhand der Verschiebung auf dem Oszilloskop abgelesen wurde, was sehr fehleranfällig ist.

Die Messungen der Integrator und Differentiator Schaltungen konnten erfolgreich den jeweiligen aus der Theorie erwarteten Verlauf der Verstärkung in Abhängigkeit von der Frequenz nachweisen. Durch das Anlegen verschiedener Spannungsformen konnte außerdem die Eigenschaft der Schaltungen das Eingangssignal zu integrieren bzw. zu differenzieren gezeigt werden.

Für den Schmitt Trigger konnten die beiden Kippunkte mit zwei unterschiedlichen Methoden mit geringer Unsicherheit sehr präzise mit Abweichungen von 4,5% und 2,3% vom Theoriewert bestimmt werden.

Im Gegensatz dazu konnten bei den Generator-Schaltungen zwar die erwarteten Schwingungen erzeugt und vermessen werden, die gemessenen Werte weichen jedoch mit 34,8% und 50% für Frequenz und Amplitude der ungedämpften Schwingung sowie 31,2% für die Periodendauer der gedämpften Schwingung deutlich von den berechneten Theoriewerten ab. Dies ist vor allem deshalb verwunderlich, weil die Ergebnisse qualitativ sehr gut zu den Erwartungen passen und keine der experimentellen Messungen mit großen Unsicherheiten behaftet sind. Dies legt einen systematischen Fehler, beispielsweise in den für die Berechnung der Theoriewerte verwendeten Konstanten nahe.