

V51

KORRIGIERT - Der Operationsverstärker

Celina Wieberg
celina.wieberg@tu-dortmund.de

Aaron Schink
aaron.schink@tu-dortmund.de

Durchführung: 27.10.2025

Abgabe: DATUM

Inhaltsverzeichnis

1. Zielsetzung	3
2. Theorie	3
2.1. Operationsverstärker	3
2.1.1. Idealer und realer OP-Amp	3
2.1.2. Inverting-Amplifier	4
2.1.3. Integrator	5
2.1.4. Differentiator	6
2.1.5. Schmitt-Trigger	6
2.1.6. Generatoren	8
3. Durchführung	9
3.1. Versuchsaufbau	10
3.2. Versuchsdurchführung	12
3.2.1. Inverting-Amplifier	12
3.2.2. Integrator	12
3.2.3. Differentiator	12
3.2.4. Schmitt-Trigger	12
3.2.5. Generator	12
3.2.6. Generator mit variierender Amplitude	13
4. Auswertung	13
4.1. Inverting-Amplifier	13
4.2. Integrator	16
4.3. Differentiator	18
4.4. Schmitt-Trigger	20
4.5. Generator	21
4.6. Generator mit variierender Amplitude	21
5. Diskussion	24
5.1. Inverting-Amplifier	24
5.2. Integrator	24
5.3. Differentiator	25
5.4. Schmitt-Trigger	25
5.5. Generatoren	25
A. Originaldaten	26
Literatur	31

1. Zielsetzung

In diesem Experiment werden auf einem Breadboard Operationsverstärker mit verschiedenen Widerständen und Kondensatoren verbunden, um Integration, Differentiation, Inversions-Verstärkung, Schmitt-Trigger und Signal-Generation zu demonstrieren.

2. Theorie

Im Folgenden wird das Grundprinzip von Operationsverstärkern erklärt, sowie die möglichen Funktionen in Kombination mit weiteren elektrischen Bauteilen beschrieben.

2.1. Operationsverstärker

2.1.1. Idealer und realer OP-Amp

Operationsverstärker (OP-Amps) sind elektrische Bauteile, die die Differenz von zwei eingehenden Signalen verstärken können. In Abbildung 1 sind eine Ausführung eines LM741-OP-Amps sowie der prinzipielle Aufbau mit Pin-Konfiguration dargestellt.

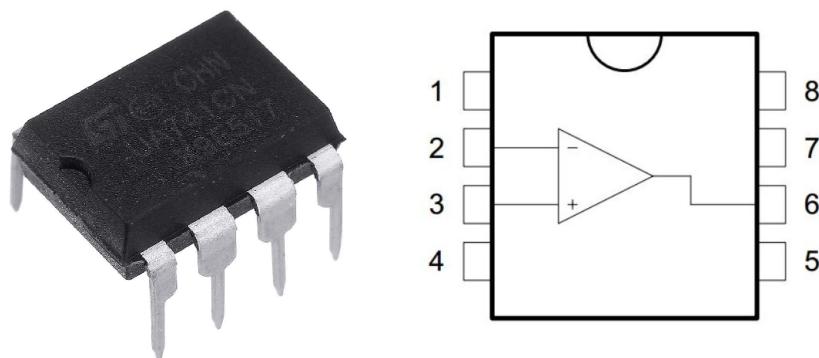


Abbildung 1: Links: LM741. Die Auskerbung gibt die Orientierung des Verstärkers an. Rechts: Pin-Konfiguration eines LM741 in einem DIL8 Housing [9].

Pin 1 und 5 werden als Offset-Null 1 und 2 bezeichnet. Pin 2 ist der sogenannte Inverting Input, Pin 3 der Non-Inverting Input. Pin 4 ist für die negative Betriebsspannung, Pin 7 für die positive Betriebsspannung. Pin 6 ist der Output, Pin 8 hat keinen Nutzen. Der Output A_o durch den Inverting Input mit Amplitude A_- und dem Non-Inverting Input mit Amplitude A_+ wird beschrieben durch

$$A_o = A \cdot (A_+ - A_-),$$

dabei ist A die Amplifikation [1]. In einem idealen OP-Amp ist diese unendlich hoch, was jede noch so kleine Signaldifferenz verstärken würde. In der Realität ist dies nicht möglich, weshalb diese nur sehr hoch eingestellt wird. Die Betriebsspannungen bestimmen

die Range des Outputs, weshalb diese so gewählt werden, dass sie symmetrisch um 0 V liegen.

Des Weiteren unterscheiden sich ideale und reelle OP-Amps insbesondere durch ihre Impedanzen. Input-Impedanzen sind idealerweise unendlich hoch, sodass es einen Strom-Rückfluss gibt, während sie in Realität nur endlich hoch eingestellt werden können. Die Output-Impedanzen sind idealerweise 0, realistisch sind aber nur sehr kleine, von Null verschiedene Werte. Die Bandbreite der ausgebauten Frequenzen ist im idealen OP-Amp unendlich, im reellen aber endlich. Die Slew-Rate, also die Verzögerung zwischen Input und Output, ist im perfekten OP-Amp null, aber in Realität im Bereich von wenigen V/ μ s [1].

Der Output eines OP-Amps kann als Feedback für den Input verwendet werden. Wird er in den Inverting Input gespeist, spricht man von negativem Feedback. Negatives Feedback stabilisiert den Output und erhöht die Bandbreite. Positives Feedback, das heißt, wenn der Output in den Non-Inverting Input gespeist wird, saturiert den Output und ermöglicht Oszillationen. Somit kann ein Schmitt-Trigger gebaut werden.

Über Feedback-Schaltungen mit verschiedenen elektrischen Komponenten können weitere Operatoren realisiert werden [1]. Wenn ein Eingang auf die Erde geschaltet ist, kann ein einzelnes Signal mit den im Folgenden erklärten Schaltungen bearbeitet werden.

2.1.2. Inverting-Amplifier

Das Schaltbild eines Inverting-Amplifiers ist in Abbildung 2 dargestellt.

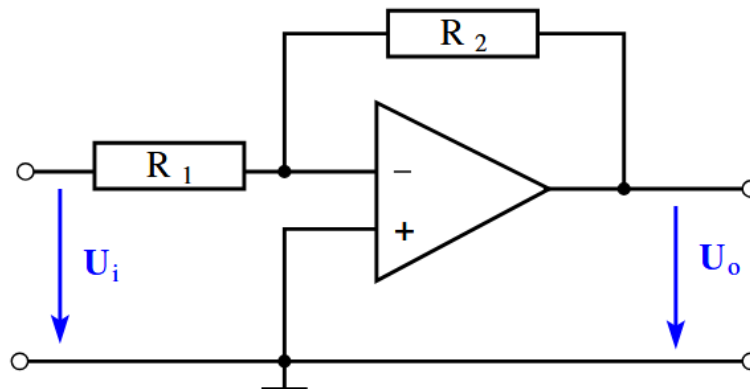


Abbildung 2: Schaltbild eines Inverting-Amplifiers mit zwei Widerständen und einem OP-Amp [10].

Ein Inverting-Amplifier invertiert eingehende Signale. Über die Kirchhoff'schen Regeln [7] kann nachgerechnet werden, dass

$$A = -\frac{R_2}{R_1} \quad (1)$$

gilt, wobei R_1 und R_2 die Widerstände im Schaltbild sind.

2.1.3. Integrator

Das Schaltbild eines Integrators ist in Abbildung 3 dargestellt.

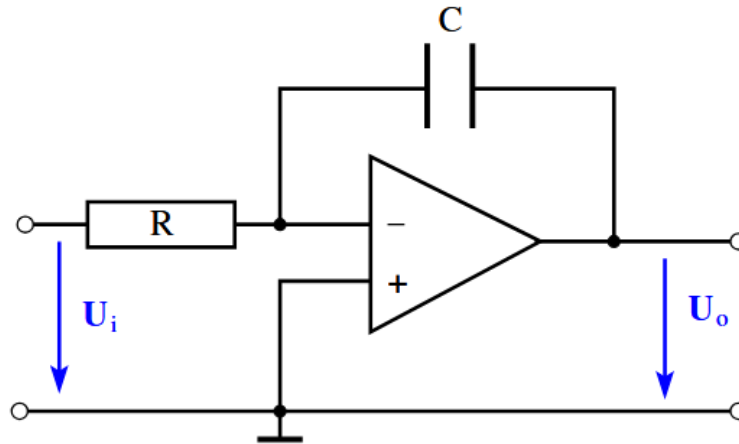


Abbildung 3: Schaltbild eines Integrators mit Widerstand, Kondensator und OP-Amp [10].

Diese Schaltung kann ein eingehendes Signal integrieren, was über die Knotenregeln [7] hergeleitet werden kann, sodass gilt

$$U_o = -\frac{1}{RC} \int U_i dt$$

mit dem Widerstand R und der Kapazität C . Ist das Eingangssignal sinusartig,

$$U_i = U_0 \sin(\omega t),$$

ergibt sich für die Verstärkung des Ausgangssignal der betragsmäßige Faktor

$$A = \frac{1}{RC\omega} \quad (2)$$

mit der Zeit t , der Maximalspannung U_0 und der Eingangsfrequenz ω . Das Vorzeichen wird hier weggelassen, aber es ist anzumerken, dass ein Integrator auch einen Vorzeichenwechsel verursacht. Wird die Frequenz größer, verkleinert ein Integrator das Ausgangssignal.

2.1.4. Differentiator

Das Schaltbild eines Differentiators ist in Abbildung 4 dargestellt.

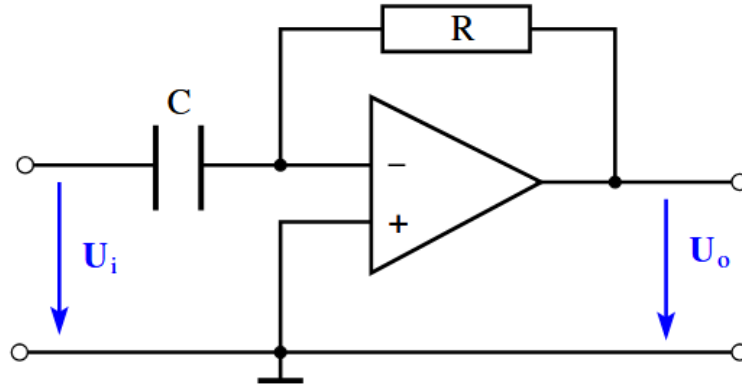


Abbildung 4: Schaltbild eines Differentiators mit Widerstand, Kondensator und OP-Amp [10].

Ein Differentiator kann das Signalprofil eines eingehenden Signales zeitlich differenzieren, was ebenfalls über die Knotenregeln [7] gezeigt werden kann. Dabei gilt

$$U_o = -RC \frac{dU_i}{dt}$$

mit dem Widerstand R , der Kapazität C und der Eingangsspannung U_i mit der Zeit t . Analog wie beim Integrator kann gezeigt werden, dass für ein sinusartiges Eingangssignal das Amplitudenverhalten gegeben ist über

$$A = -RC\omega \quad (3)$$

mit der Frequenz ω . Somit wird das Ausgangssignal stärker mit höherer Frequenz.

2.1.5. Schmitt-Trigger

Ein Schmitt-Trigger ist ähnlich wie ein Inverting-Amplifier aufgebaut mit dem Unterschied, dass positives statt negatives Feedback benutzt wird, siehe Abbildung 5.

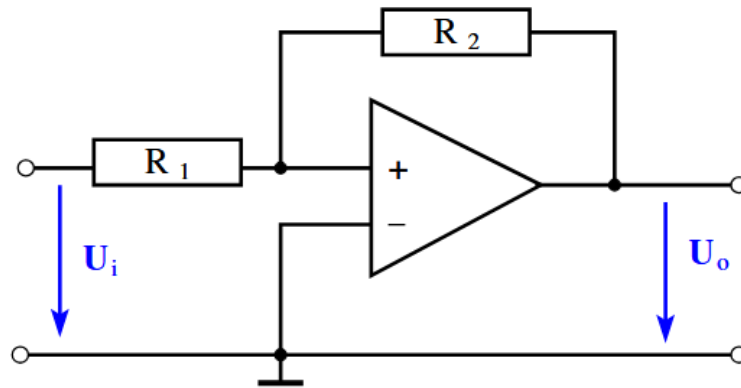


Abbildung 5: Schaltbild eines Schmitt-Triggers mit Widerständen und OP-Amp [10].

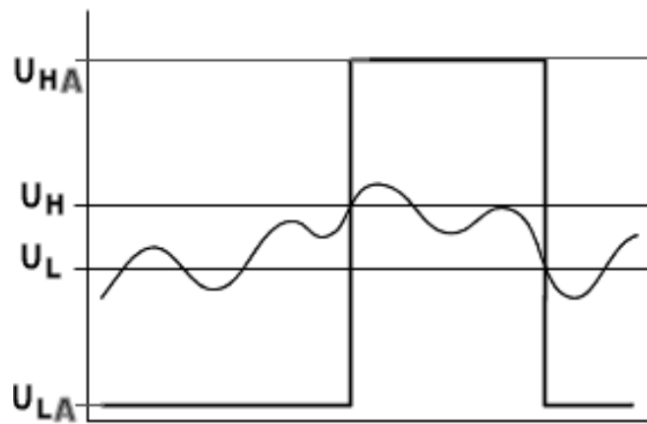


Abbildung 6: Skizzenhaftes Verhalten eines Schmitt-Triggers. Die wellige Kurve ist das Eingangssignal, das Rechtecksignal der Output. Die Schwellwerte heißen hier U_H und U_L . Die Betriebsspannungen sind hier U_{HA} und U_{LA} [8].

Ein Schmitt-Trigger ist ein sogenannter Komparator, der ein binäres Signal in Höhe der beiden Betriebsspannungen U_S ausgibt, sobald das Eingangssignal klein oder groß genug ist. Wird ein Schwellwert U_+ (U_-) erstmals überschritten (unterschritten), so springt der Output auf $+U_S$ ($-U_S$), dargestellt in Abbildung 6. Das bedeutet, wie in Abbildung 6 erkennbar, dass, sobald ein Eingangssignal die obere Schwelle überschritten hat, das Ausgangssignal gleich bleibt, auch wenn sie diese Schwelle wieder unterschreitet. Diese Hysterese im Output ist in Abbildung 7 dargestellt.

Die Schwellwerte lassen sich berechnen zu

$$U_{\pm} = \pm \frac{R_1}{R_2} U_S \quad (4)$$

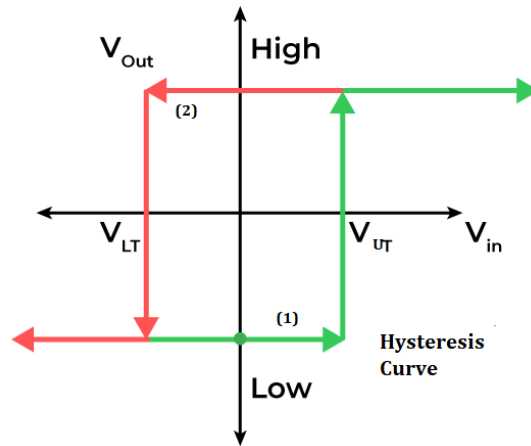


Abbildung 7: Skizzenhafte Charakteristik eines Schmitt-Triggers mit Eingangsspannung auf der x -Achse und Ausgangsspannung auf der y -Achse [5].

mit der Ausgangssättigungsspannung U_S und den Widerständen R_1 und R_2 .

2.1.6. Generatoren

Es lassen sich auch Signalgeneratoren bauen. Der Output des Schmitt-Triggers, der eine Rechteckspannung erzeugt, kann integriert werden, sodass eine Dreiecksspannung entsteht, wie in Abbildung 8 dargestellt.

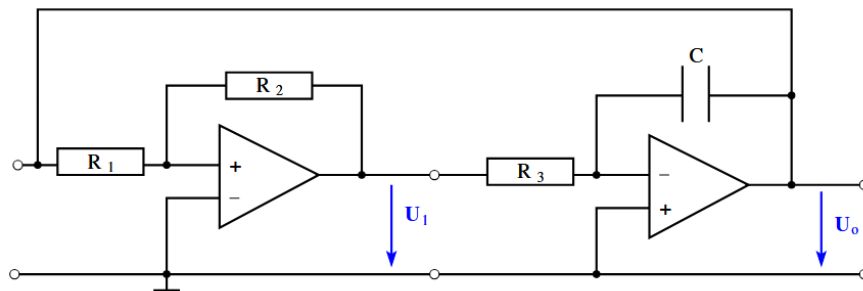


Abbildung 8: Schaltbild eines Generators bestehend aus Schmitt-Trigger (linker OP-Amp) und Integrator (rechter OP-Amp) [10].

Die Frequenz des ausgegebenen Signals lautet

$$f = \frac{R_2}{4CR_1R_3} \quad (5)$$

und die dazugehörige Amplitude ist

$$U_o = U_{\max} \frac{R_1}{R_2} \quad (6)$$

[10], mit Kapazität C und den Widerständen R_1 , R_2 und R_3 .
Ein Generator mit variierender Amplitude ist in Abbildung 9 dargestellt.

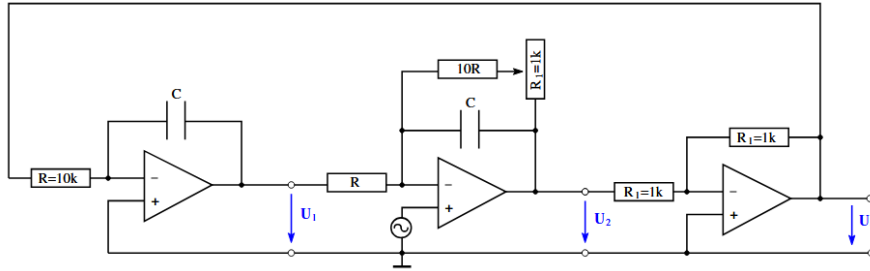


Abbildung 9: Schaltbild eines Generators mit variierender Amplitude, bestehend aus zwei Integratoren und einem invertierenden Verstärker. Die Schaltung ist mit einem regelbaren Widerstand versehen, um die Dämpfung der Oszillation zu variieren [10].

Die Ausgangsspannung der in Abbildung 9 dargestellten Schaltung wird beschrieben durch

$$\frac{d^2 U_o}{dt^2} - \frac{\eta}{10RC} \frac{dU_o}{dt} + \frac{1}{R^2 C^2} U_o = 0,$$

wobei η der Dämpfungsfaktor ist und zwischen -1 und 1 liegt. Die DGL besitzt näherungsweise die Lösung

$$U_o = U_0 \exp\left(\frac{t}{\tau}\right) \sin\left(2\pi \frac{t}{T}\right) \quad (7)$$

mit der Periodendauer T und der Abklingzeit τ , die gegeben sind über

$$T = 2\pi RC \quad (8)$$

und

$$\tau = \frac{20RC}{|\eta|} \quad (9)$$

[10].

3. Durchführung

Im Folgenden wird der grundsätzliche Aufbau des Versuches sowie die Durchführung der einzelnen Aufgaben beschrieben.

3.1. Versuchsaufbau

Der Versuch wird auf einem Breadboard durchgeführt, dargestellt in Abbildung 10, die Verbindungen der Anschlüsse sind in Abbildung 11 visualisiert. Des Weiteren stehen eine Spannungsquelle, ein Signalgenerator und ein Oszilloskop zur Verfügung. Kleine Kupferkabel können verschiedene elektrische Bauteile miteinander verbinden. Diese sind alle in Abbildung 12 zu sehen.

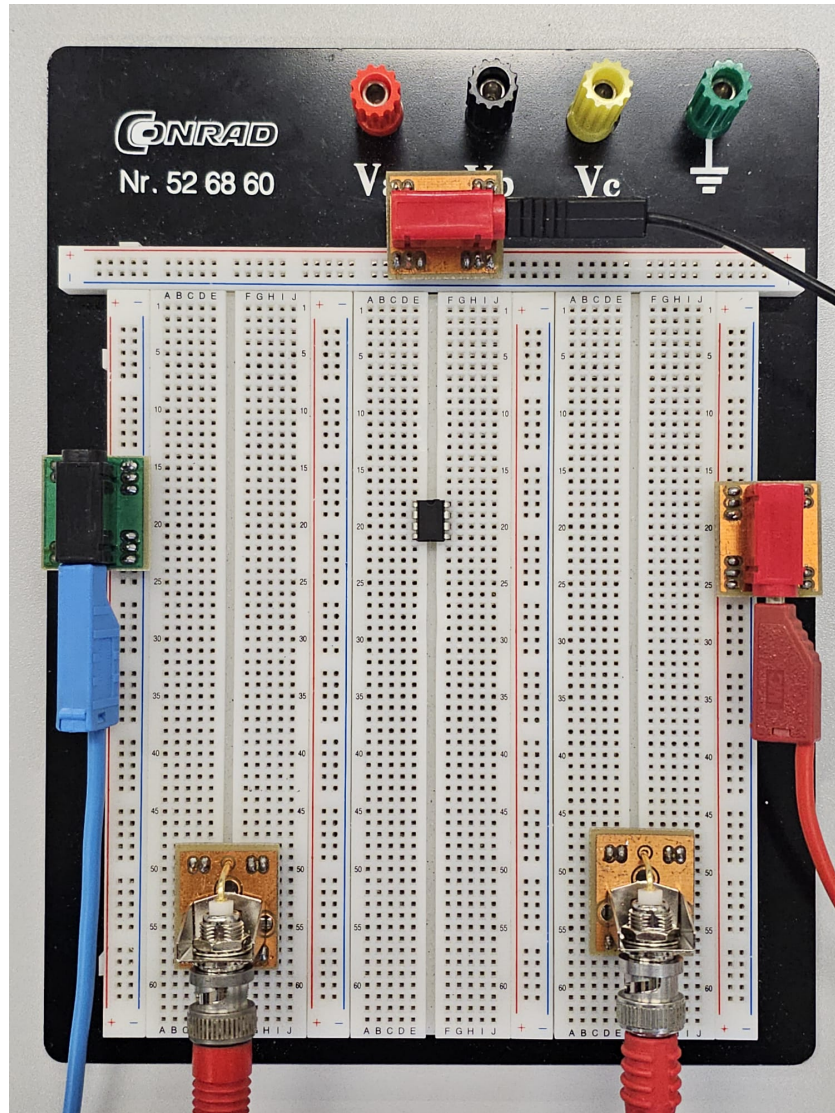


Abbildung 10: Das verwendete Breadboard. Das blaue Kabel links bzw. das rote Kabel rechts sind die negativen bzw. positiven Enden der Betriebsspannung. Das schwarze Kabel oben ist die Erde. Die Kabel unten links und rechts greifen das Eingangs- und Ausgangssignal ab. In der Mitte in Schwarz befindet sich ein OP-Amp [10].

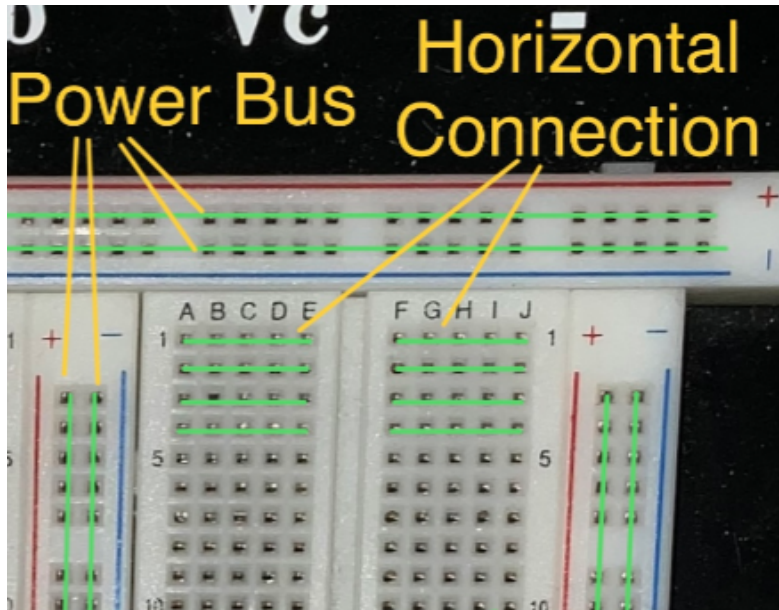


Abbildung 11: Visualisierung der Verbindungen in einem Breadboard. Die +- und -Spalten verbinden durchgehend, während die Anschlüsse in einer Zeile nur von A bis E bzw. F bis J verbinden. Entnommen aus [10].



Abbildung 12: Weitere Geräte, die im Versuch verwendet wurden. Von links nach rechts, von oben nach unten: Signalgenerator, Oszilloskop, Spannungsquelle, Kasten mit elektrischen Bauteilen, Breadboard, Multimeter [10].

3.2. Versuchsdurchführung

Die Betriebsspannungen werden für den gesamten Versuch auf $\pm 15\text{ V}$ eingestellt. Die Frequenzen und Amplituden der Eingangssignale können mit dem Signalgenerator geregelt werden, der Sinus-, Rechteck- und Dreiecksspannungen bereitstellen kann. Die Frequenzen und Amplituden der Ausgangsspannungen können am Oszilloskop ausgelesen werden.

3.2.1. Inverting-Amplifier

Der Inverting-Amplifier wird gemäß Abbildung 2 aufgebaut. Es wird ein Sinus-Signal eingespeist, dessen Frequenz variiert wird. Die Amplitude des Ausgangssignals wird gemessen. Es werden drei Messungen für den Inverting-Amplifier durchgeführt, jeweils mit verschiedenen Widerständen. Die erste Messung wird durchgeführt mit $R_1 = 1\text{ k}\Omega$ und $R_2 = 100\text{ k}\Omega$, die zweite Messung mit $R_1 = 1\text{ k}\Omega$ und $R_2 = 10\text{ k}\Omega$ und die dritte Messung mit $R_1 = 1\text{ k}\Omega$ und $R_2 = 150\text{ k}\Omega$.

3.2.2. Integrator

Der Integrator wird gemäß Abbildung 3 aufgebaut, der Widerstand beträgt $R = 10\text{ k}\Omega$ und die Kapazität $C = 100\text{ nF}$. Über den Amplitudenregler am Frequenzgenerator wird die Eingangsamplitude einer Sinusspannung für Frequenzen über verschiedene Dekaden geregelt und die Ausgangsamplitude gemessen. Anschließend wird für eine Dreiecksspannung und eine Rechtecksspannung ein Bild der integrierten Signale aufgenommen.

3.2.3. Differentiator

Die Messung für den Differentiator erfolgt komplett analog wie zum Integrator, nur mit dem Schaltbild aus Abbildung 4, einem Widerstand $R = 100\text{ k}\Omega$ und einer Kapazität $C = 22\text{ nF}$. Auch hier werden entsprechende Bilder für verschiedene Signalprofile aufgenommen.

3.2.4. Schmitt-Trigger

Der Schmitt-Trigger wird gemäß Abbildung 5 aufgebaut, dabei ist $R_1 = 10\text{ k}\Omega$ und $R_2 = 100\text{ k}\Omega$. Um den Schwellwert zu finden, wird die Amplitude eines Sinussignals kleinschrittig erhöht, bis diese groß genug ist, um den Zustand des Triggers zu ändern und ein Rechtecksignal ausgegeben wird.

3.2.5. Generator

Der Generator wird wie in Abbildung 8 aufgebaut. Die Größen der verwendeten Bauteile lauten dabei $R_1 = 10\text{ k}\Omega$, $R_2 = 100\text{ k}\Omega$, $R_3 = 1\text{ k}\Omega$ und $C = 1\text{ }\mu\text{F}$. Wie in der Theorie beschrieben liegt hier ein Schmitt-Trigger gefolgt von einem Integrator vor, sodass das vom Trigger erzeugte Rechtecksignal integriert wird und ein Dreieckssignal entsteht. Ein Bild wird aufgenommen, sowohl die Amplitude als auch die Frequenz können abgelesen werden.

3.2.6. Generator mit variierender Amplitude

Der Generator wird wie in Abbildung 9 dargestellt aufgebaut. Die Widerstände können dem Schaltbild entnommen werden, als Kapazitäten wird $C = 100 \text{ nF}$ benutzt. Das Eingangssignal ist eine Rechteckspannung. Für die beiden extremalen Einstellungen des Potentiometers werden die Messwerte des Oszilloskops aufgezeichnet.

4. Auswertung

Für die Auswertung wird die Python-Bibliothek `numpy` [3] benutzt. Die Fits werden mit `curve_fit` aus `scipy.optimize` [11] ausgeführt. Die Fehlerrechnung wird mit `uncertainties` [6] durchgeführt. Plots werden mit Hilfe von `matplotlib.pyplot` [4] durchgeführt.

In abgebildeten Aufnahmen des Oszilloskops ist in gelb das Eingangssignal und in grün das Ausgangssignal dargestellt.

4.1. Inverting-Amplifier

Für den Inverting-Amplifier werden jeweils verschiedene Verhältnisse von Widerständen verwendet. Das Verhältnis A zwischen gemessener Ausgangsspannung U_{out} und eingestellter Eingangsspannung U_{in} in Abhängigkeit von der Frequenz wird in einem doppellogarithmischen Plot dargestellt und die abnehmende Flanke mit einer Potenzfunktion

$$A(f) = a \left(\frac{f}{1 \text{ Hz}} \right)^b$$

gefittet. Das annähernd konstante Plateau bei $A(f) = A_0$ wird durch der Mittelwert der Messwerte bestimmt und mit dem Erwartungswert von Gleichung 1 verglichen. Die Cutoff-Frequenz f_c ergibt sich durch

$$\frac{A_0}{\sqrt{2}} = a \left(\frac{f_c}{1 \text{ Hz}} \right)^b.$$

Die Plots für die drei verschiedenen Widerstandsverhältnisse werden in Abbildung 13, Abbildung 14 und Abbildung 15 dargestellt. Die Fitparameter, Cutoff-Frequenz und Verstärkungen finden sich in Tabelle 1

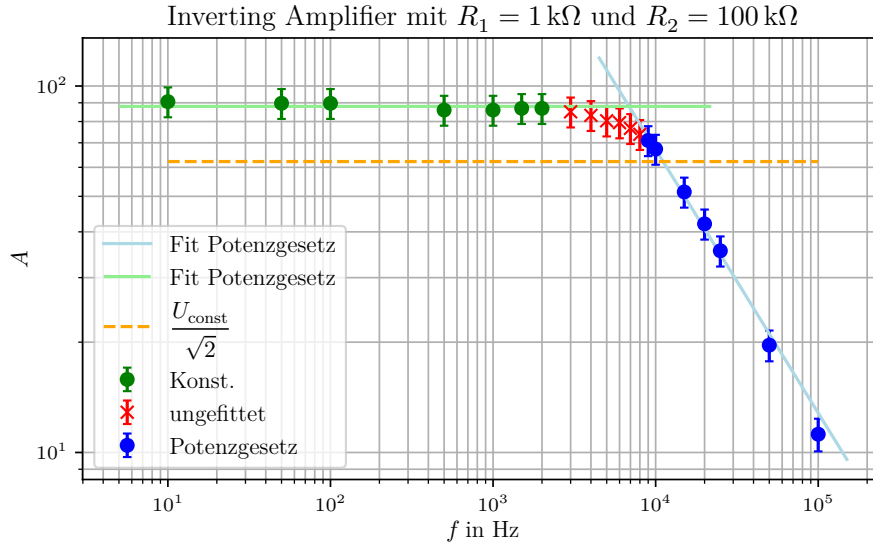


Abbildung 13: Inverting-Amplifier mit $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$ und $R_2 = 100 \text{ k}\Omega$ und eingezeichneten Fits.

Abbildung 13 zeigt eine konstante Verstärkung bis in den kHz-Bereich, darüber hinaus folgt einem exponentiellen Zerfall.

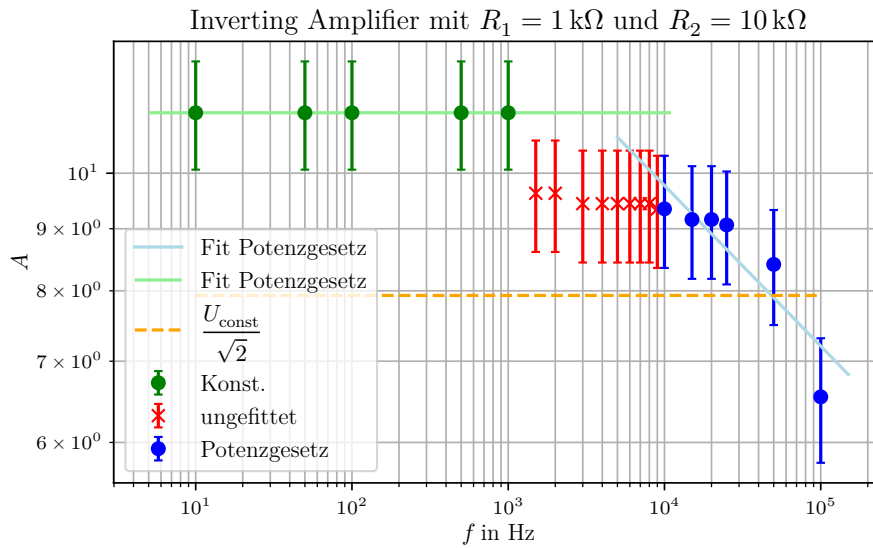


Abbildung 14: Inverting-Amplifier mit $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$ und $R_2 = 10 \text{ k}\Omega$ und eingezeichneten Fits.

Abbildung 14 zeigt eine konstante Verstärkung bis in den kHz-Bereich. Eine weitere annähernd konstante, aber kleinere Verstärkung fällt im 10 kHz-Bereich auf. Die exponentielle Natur des Zerfalls bei höheren Frequenzen ist hier weniger deutlich, aber vorhanden.

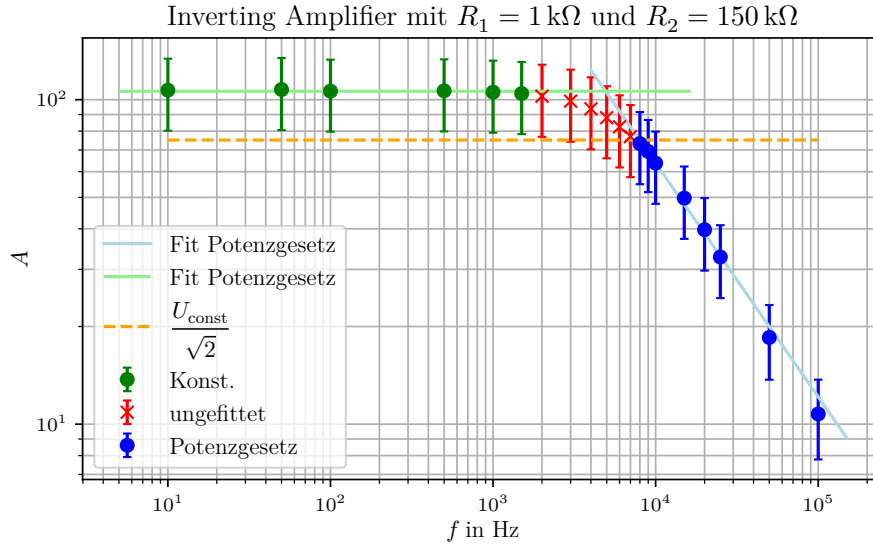


Abbildung 15: Inverting-Amplifier mit $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$ und $R_2 = 150 \text{ k}\Omega$ und eingezeichneten Fits.

Abbildung 15 zeigt eine konstante Verstärkung bis über den kHz-Bereich hinaus, ab circa 10 kHz folgt sie wieder einem exponentiellen Zerfall.

Tabelle 1: Widerstand R_2 , weil R_1 konstant ist, theoretische Verstärkung A_{theo} , gemittelte Verstärkung A_0 , Abweichung der Verstärkung ΔA , Fitparameter a und b und Cutoff-Frequenz f_c verschiedener Widerstandsverhältnisse.

R_2 in $\text{k}\Omega$	A_{theo}	A_0	ΔA	a	b	f_c in Hz
100	100	$88,0 \pm 0,7$	12 %	$(5,06 \pm 1,19) \cdot 10^4$	$-0,719 \pm 0,025$	$(1,1 \pm 0,5) \cdot 10^4$
10	10	$11,2 \pm 0,1$	12 %	$33,1 \pm 11,5$	$-0,132 \pm 0,035$	$(0,5 \pm 1,9) \cdot 10^5$
150	150	$106,0 \pm 0,4$	29 %	$(4,85 \pm 1,06) \cdot 10^4$	$-0,72 \pm 0,02$	$(8,0 \pm 3,3) \cdot 10^3$

Wegen der Konstanz der ersten Messwerte wird auf einen Fit mit einem Potenzgesetz verzichtet. Die untere Cutoff-Frequenz wird somit auf 0 gesetzt, sodass die Bandbreite gleich f_c ist.

4.2. Integrator

Für den Integrator wird ebenfalls die Verstärkung A ermittelt. Gemäß Gleichung 2 wird die Frequenz f in die Kreisfrequenz $\omega = 2\pi f$ umgerechnet und die Verstärkung A gegen die inverse Kreisfrequenz ω geplottet. Mit einem linearen Fit der Form

$$A(f) = m \cdot \frac{1}{\omega} + b, \quad (10)$$

wobei $m = \frac{1}{RC}$ in 1/s der inversen Zeitkonstanten RC entspricht, lässt sich die Zeitkonstante ermitteln. Dies geschieht in Abbildung 16

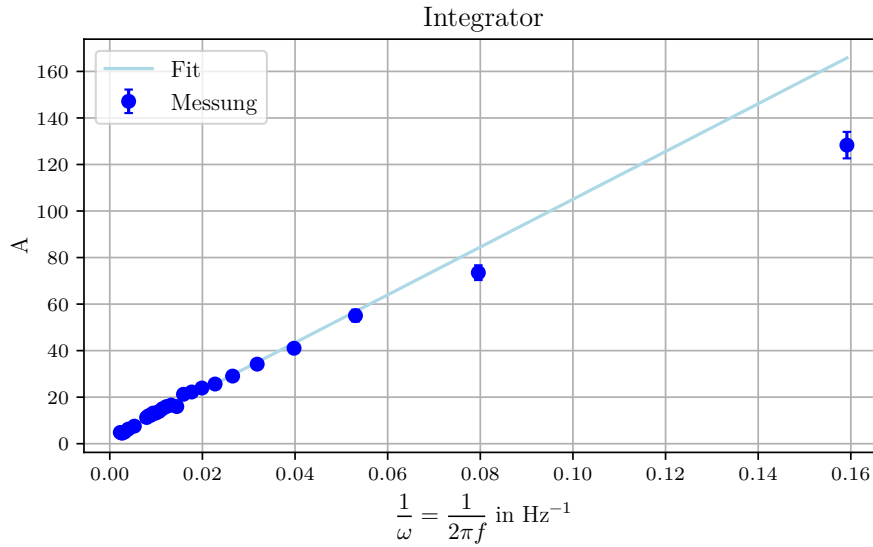


Abbildung 16: Verstärkungsfaktoren gegen die inverse Frequenz mit Fit zur Bestimmung der Zeitkonstante bei $R = 100 \text{ k}\Omega$ und $C = 100 \text{ nF}$.

Die ermittelten Fitparameter sind

$$m = (1,03 \pm 0,03) \cdot 10^3 \frac{1}{\text{s}}$$

$$b = 2,34 \pm 0,26$$

und ergeben eine Zeitkonstante von

$$\tau = (0,00097 \pm 0,00003) \text{ s.}$$

Mit den eingestellten $R = 100 \text{ k}\Omega$ und $C = 22 \text{ nF}$ ergibt sich eine theoretische Zeitkonstante von

$$\tau_{\text{Integrator}} = RC = 0,001 \text{ s.}$$

Die Abweichung zwischen Theoriewert und Messwert beträgt

$$\Delta\tau = 2,6 \text{ \%}.$$

Zur Demonstration, dass der Integrator ein Eingangssignal zeitlich integriert, sind in Abbildung 17, Abbildung 18 und Abbildung 19 jeweils eine Sinus-, Rechteck- und Dreiecksspannung als Eingang und ihr zugehöriger Output dargestellt.

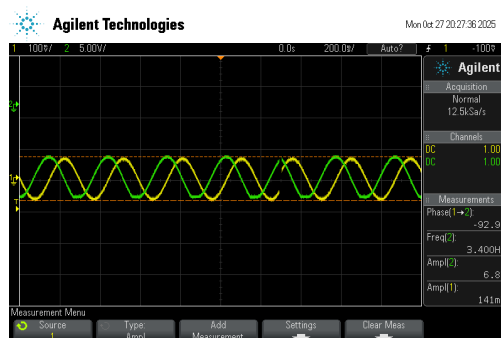


Abbildung 17: Die Sinusspannung wird zu einer Cosinusspannung integriert.

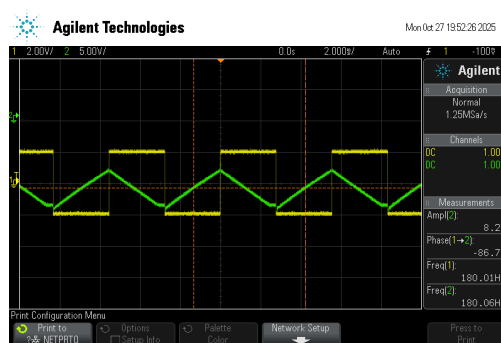


Abbildung 18: Die Rechteckspannung wird zu einer negativen Dreiecksspannung integriert.

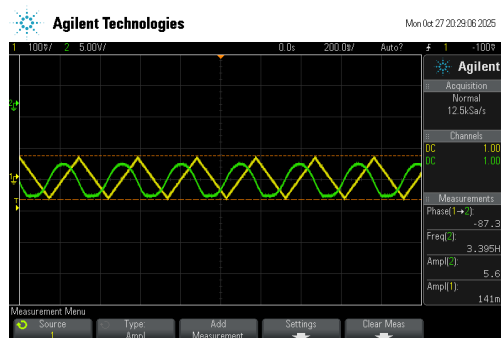


Abbildung 19: Die Dreiecksspannung wird zu einer negativen parabolischen Spannung integriert.

4.3. Differentiator

Für den Differentiator wird ebenfalls die Verstärkung A wie für den Inverting-Amplifier ermittelt. Gemäß Gleichung 3 wird f in $\omega = 2\pi f$ umgerechnet und A gegen ω geplottet. Mit einem linearen Fit wie in Gleichung 10 wobei jetzt $m = RC$ in s der Zeitkonstanten RC entspricht, lässt sich die Zeitkonstante ermitteln. Dies geschieht in Abbildung 20

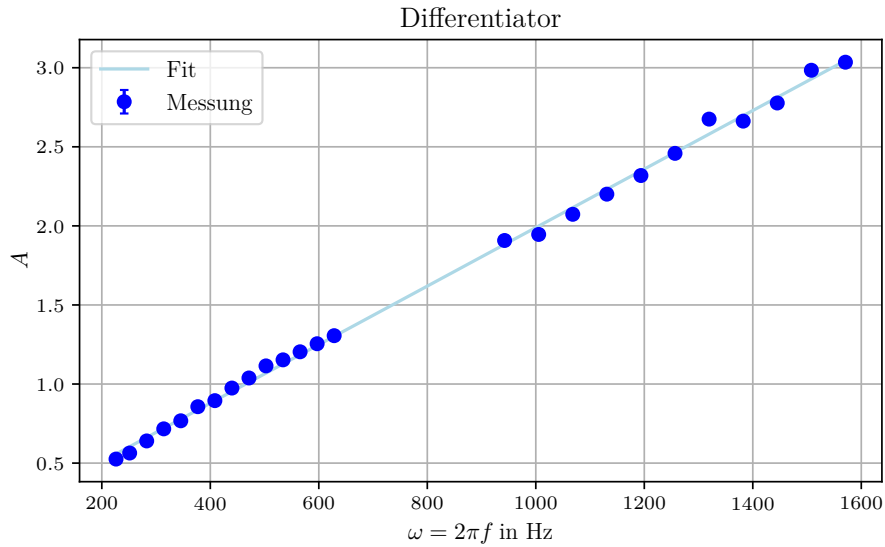


Abbildung 20: Verstärkungsfaktoren gegen die Frequenz mit Fit zur Bestimmung der Zeitkonstante bei $R = 100 \text{ k}\Omega$ und $C = 22 \text{ nF}$.

Die ermittelten Fitparameter lauten

$$m = (1,85 \pm 0,02) \cdot 10^{-3} \text{ s}$$

$$b = 0,139 \pm 0,015$$

und ergeben eine Zeitkonstante von

$$\tau = (0,00185 \pm 0,00001) \text{ s.}$$

Mit den eingestellten $R = 100 \text{ k}\Omega$ und $C = 22 \text{ nF}$ ergibt sich eine theoretische Zeitkonstante von

$$\tau_{\text{Integrator}} = RC = 0,0022 \text{ s.}$$

Die Abweichung zwischen Theoriewert und Messwert beträgt

$$\Delta\tau = 16 \%$$

Zur Demonstration, dass der Differentiator als dieser fungiert, sind in Abbildung 21, Abbildung 22 und Abbildung 23 jeweils eine Sinus-, Rechteck- und Dreiecksspannung als Eingang und ihr zugehöriger Output dargestellt.

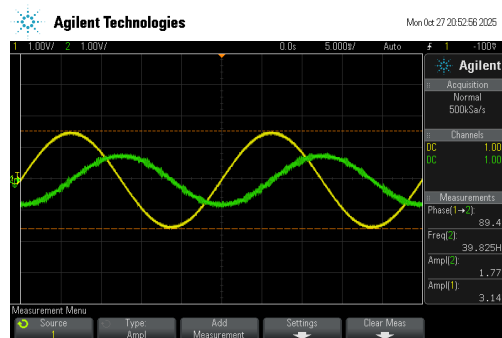


Abbildung 21: Die Sinusspannung wird zu einer negativen Cosinusspannung differenziert.

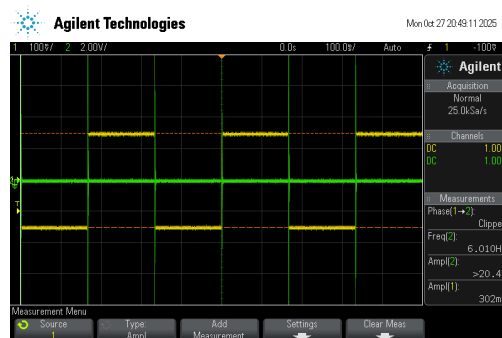


Abbildung 22: Rechteckspannung wird zu negativen Signal-Peaks differenziert.

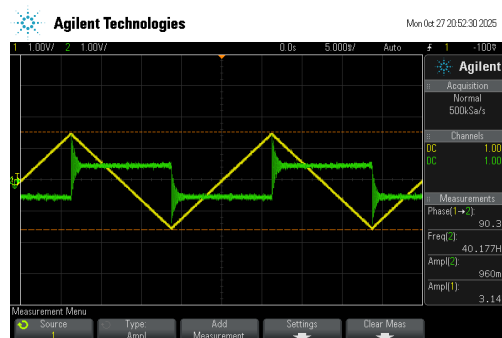


Abbildung 23: Dreiecksspannung wird zu einer negativen Rechteckspannung differenziert.

4.4. Schmitt-Trigger

Die Ausgangssättigungsspannung mit $R_1 = 10\text{ k}\Omega$ und $R_2 = 100\text{ k}\Omega$ ergibt sich zu

$$U_S = (28,1 \pm 0,1)\text{ V}$$

und die Schwellwert-Spannung ergibt nach Gleichung 4 einen Theoriewert von

$$U_{\pm} = (2,81 \pm 0,01)\text{ V}.$$

Der Schwellwert wird im Experiment ermittelt und beträgt

$$U_{\pm} = (2,980 \pm 0,001)\text{ V}.$$

Die Abweichung zwischen Theoriewert und Messwert beträgt somit

$$\Delta U_{\pm} = 6\%.$$

Die Aufnahme des hier verwendeten Schmitt-Triggers befindet sich in Abbildung 24.

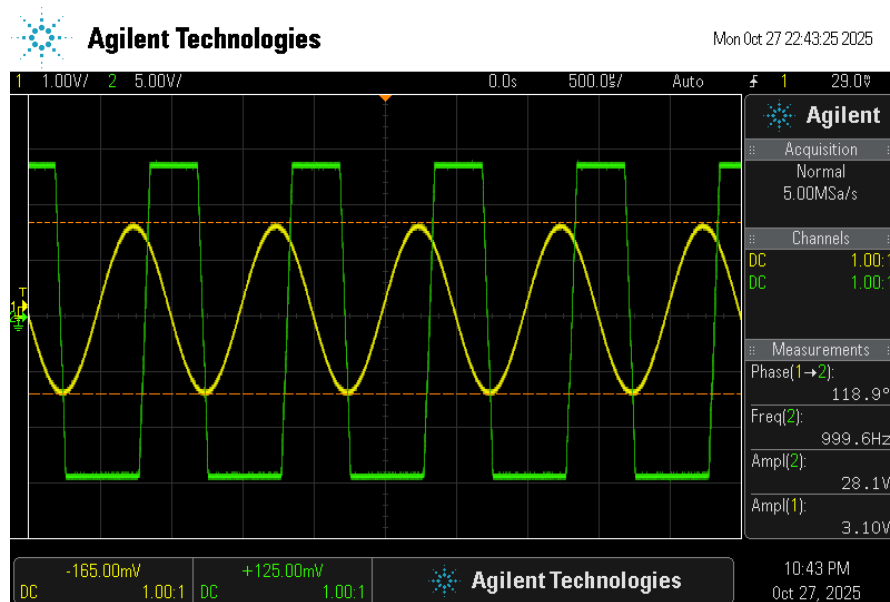


Abbildung 24: Aufnahme des Trigger-Signals am Oszilloskop.

4.5. Generator

Vom ersten Signalgenerator kann die Frequenz gemäß Gleichung 5 berechnet werden. Diese beläuft sich auf

$$f = 2500 \text{ Hz.}$$

Die Messung ist dargestellt in Abbildung 25 und die dort gemessene Frequenz beträgt

$$f = (1,65 \pm 0,10) \cdot 10^3 \text{ Hz}$$

Die Abweichung zwischen Theoriewert und Messwert beträgt

$$\Delta f = 34 \text{ \%}.$$

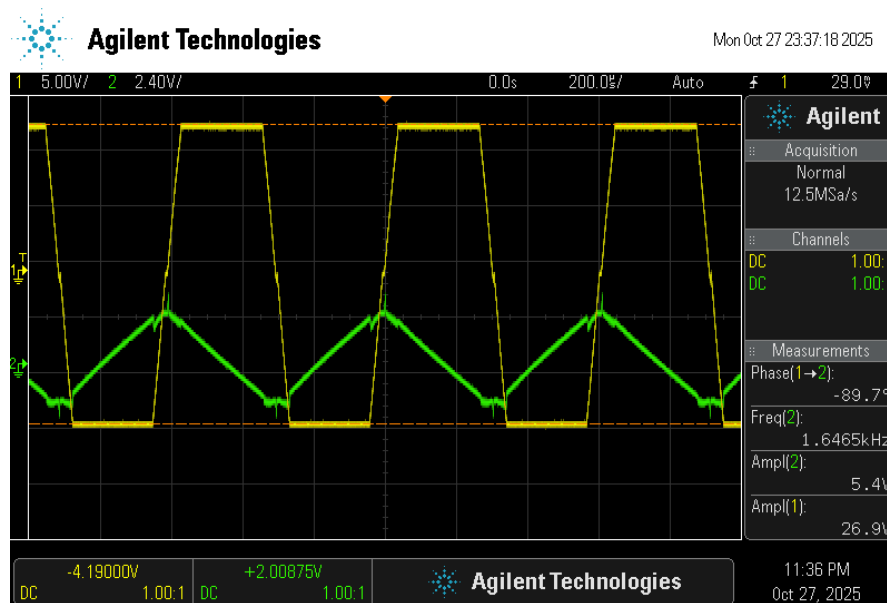


Abbildung 25: Generator, der eine Rechteckspannung eines Schmitt-Triggers integriert.

4.6. Generator mit variierender Amplitude

Für die Schwingdauer T und Abklingzeit τ des dämpfbaren Oszillators ergeben sich nach Gleichung 8 und Gleichung 9 mit $\eta = \pm 1$

$$T = 0,00628 \text{ s}$$

$$\tau = 0,02 \text{ s}$$

Die Aufnahmen vom Oszilloskop befinden sich in Abbildung 26 und Abbildung 27.

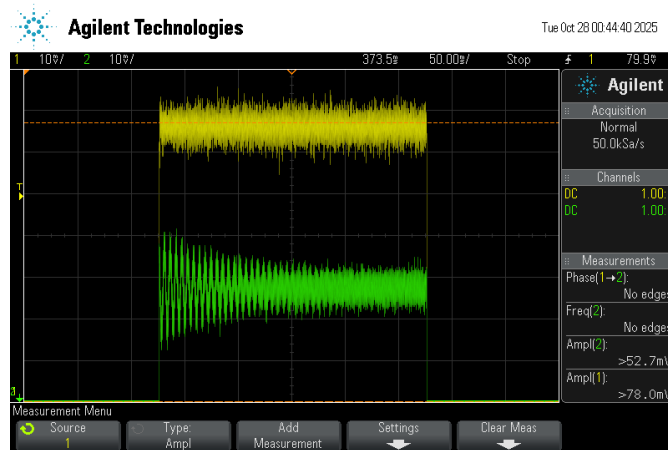


Abbildung 26: Oszilloskopaufnahme des Outputsignals bei maximaler eingestellten Dämpfung.

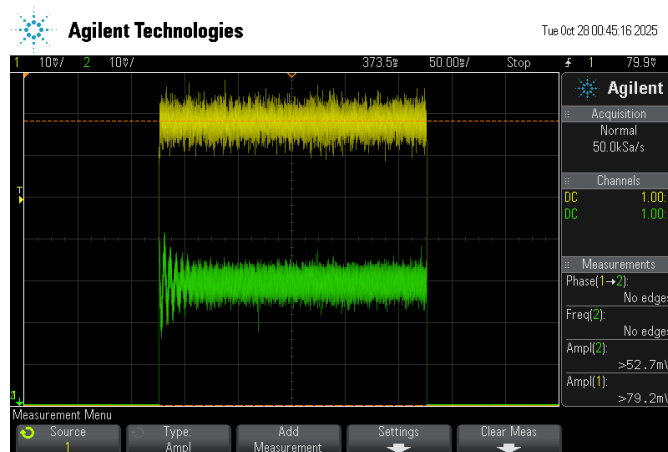


Abbildung 27: Oszilloskopaufnahme des Outputsignals bei minimaler eingestellten Dämpfung.

Ein Fit nach Gleichung 7 ist nicht möglich. Um sinnvolle Werte zu ermitteln, werden die Messdaten verkürzt und transformiert. Die Messung in Abbildung 28 wird auf alle Datenpunkte mit $U > 0,03$ und dann mit $t < 0,3$ gekürzt, für Abbildung 29 ist $t < 0,28$, anschließend wird U um den Mittelwert in diesem Intervall verschoben und der Datensatz in t auf 0 gesetzt. Mit `scipy.signal.find_peaks` werden die Peaks der Oszillationen rausgesucht. Aufgrund der zitternden Oszillationen wird den Peaks in U und t ein Fehler von 0,0015 V bzw. s zugeschrieben.

Die transformierten Messpunkte befinden sich in Abbildung 28 und Abbildung 29.

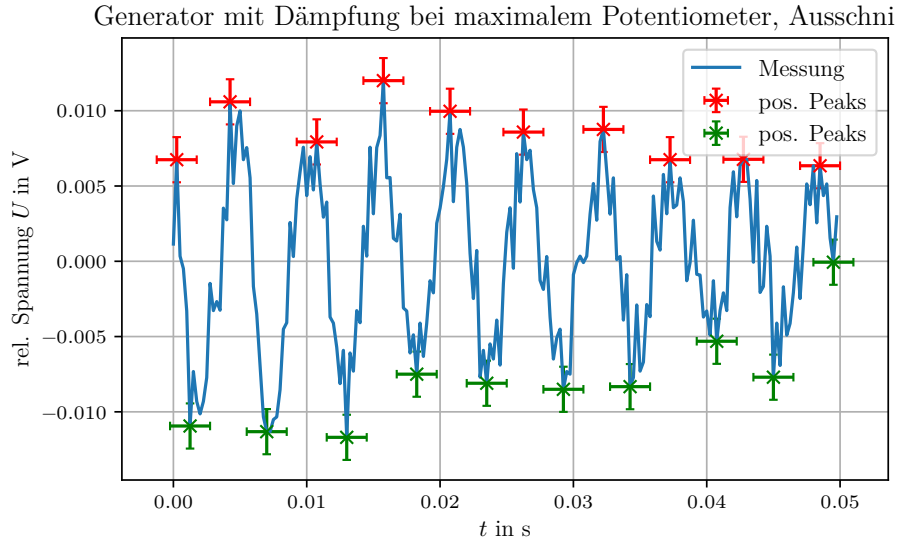


Abbildung 28: Transformierte Messdaten und eingezeichnete gefundene Peaks bei maximaler Dämpfung.

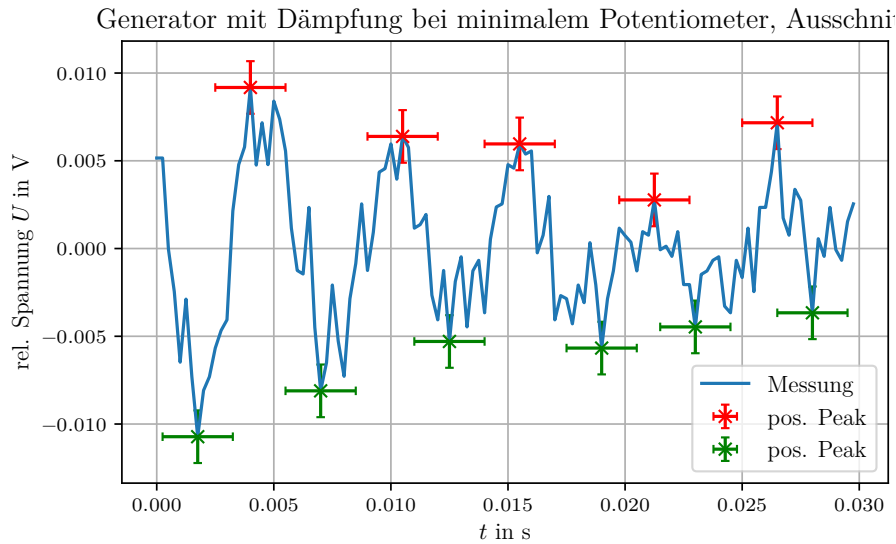


Abbildung 29: Transformierte Messdaten und eingezeichnete gefundene Peaks bei minimaler Dämpfung.

Um T zu bestimmen, werden die Abstände vom positiven zum positiven bzw. negativen zum negativen Peak gemittelt. Um τ zu bestimmen, werden die negativen Peaks mit -1 multipliziert und ihr Abfall mit

$$U(t) = U_0 e^{-\frac{t}{\tau}}$$

gefittet.

Die errechneten und bestimmten Periodendauern, Abklingzeiten, U_0 und Abweichungen sind in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2: Errechnete und bestimmte Werte des Generators. Der Eintrag unter „Dämpfung“ steht qualitativ für maximale bzw. minimale Dämpfung.

Dämpfung	T_{theo} in s	T in s	ΔT	τ_{theo} in s	τ in s	$\Delta\tau$	U_0 in V
+1	0,006 28	$0,005\,36 \pm 0,000\,16$	15 %	0,02	$0,081 \pm 0,025$	310 %	0.011(1)
-1	0,006 28	$0,005\,42 \pm 0,000\,25$	14 %	0,02	$0,027 \pm 0,006$	38 %	0.010(1)

Es ist zu beachten, dass die Dämpfung nicht am Potentionmeter abgelesen werden kann. Dies führt insbesondere bei maximaler Dämpfung zu einer großen Abweichung, wie in Tabelle 2 erkennbar ist. Mit den errechneten τ lassen sich über Gleichung 9 die Dämpfungen, die anliegen müssen, errechnen. Diese betragen

$$|\eta_{+1}| = 0,25 \pm 0,08$$

und

$$|\eta_{-1}| = 0,73 \pm 0,16.$$

5. Diskussion

Zuletzt werden die theoretischen Erkenntnisse und gemessenen Werte hinsichtlich ihrer Genauigkeit diskutiert.

5.1. Inverting-Amplifier

Die gemessenen Verstärkungsfaktoren mit den dazugehörigen Bandbreiten betragen $88,0 \pm 0,7$ mit $(1,1 \pm 0,5) \cdot 10^4$ Hz, $11,2 \pm 0,1$ mit $(0,5 \pm 1,9) \cdot 10^5$ Hz und $106,0 \pm 0,4$ mit $(8,0 \pm 3,3) \cdot 10^3$ Hz. Die Abweichungen der Verstärkungsfaktoren um jeweils 12 %, 12 % und 29 % von den Theoriewerten von 100, 10 und 150 sind nicht groß. Die Abweichungen sind entweder auf Ungenauigkeiten der benutzten Widerstände oder auf unbeachtete Impedanzen im Breadboard zurückzuführen. Die Bandbreiten nehmen mit größerer Verstärkung ab und kleinerer Verstärkung zu.

5.2. Integrator

Das integrierende Verhalten eines Integrators ist klar demonstriert. Des Weiteren ist die Abweichung der gemessenen zur errechneten Zeitkonstanten von $(0,000\,97 \pm 0,000\,03)$ s zu 0,001 s mit 2,6 % minimal. Abbildung 16 lässt vermuten, dass ein Fit mit einer Potenzfunktion eventuell genauer sein könnte, allerdings entspricht das nicht den hier gestellten theoretischen Erwartungen. Da der Kondensator parallel zum OP-Amp geschaltet ist, kann es zu Abweichungen in der Verstärkung kommen, was in Abbildung 16 bei hohen inversen Kreisfrequenzen erkennbar ist.

5.3. Differentiator

Das differenzierende Verhalten eines Differentiators ist klar demonstriert. Die Abweichung der gemessenen zur errechneten Zeitkonstanten von $0,0022\text{ s}$ zu $(0,00185 \pm 0,00001)\text{ s}$ ist mit 16% größer als beim Integrator. Der lineare Fit in Abbildung 20 passt allerdings sehr gut zu den Messdaten. Integratoren glätten eingehende Signale, also auch Rauschen, während Differentiatoren stärker auf Rauschsignale reagieren [2]. Das Hochpassverhalten lässt viele Rauschquellen im höheren Frequenzbereich durch, sodass die hier gemessenen Signale größere Fehler beinhalten. Auch die Schaltung beeinflusst hier die Signalform, da der in Reihe geschaltete Kondensator bei Unregelmäßigkeiten diese hier verändert.

5.4. Schmitt-Trigger

Die Abweichung zwischen der theoretischen Schwellspannung von $(2,81 \pm 0,01)\text{ V}$ und der gemessenen Spannung von $(2,980 \pm 0,001)\text{ V}$ beträgt 6% , ist also sehr klein.

5.5. Generatoren

Der Frequenzunterschied von 34% zwischen der theoretischen Frequenz von 2500 Hz und der ermittelten Frequenz von $(1,65 \pm 0,10) \cdot 10^3\text{ Hz}$ ist verglichen mit anderen berechneten Abweichungen groß. Die Frequenz ist, wie in Gleichung 5 zu sehen ist, direkt von den Größen der verwendeten Bauteile abhängig, die außerdem eine hohe Temperaturabhängigkeit aufweisen.

Es konnte kein herkömmlicher Fit einer Lösung auf die Messwerte für den variablen Generator durchgeführt werden. Die theoretische, berechnete Periodendauer T beträgt $0,00628\text{ s}$. Die gemessenen Periodendauern betragen $(0,00536 \pm 0,00016)\text{ s}$ und $(0,00542 \pm 0,00025)\text{ s}$. Die entsprechenden Abweichungen betragen 15% bzw. 14% . Die theoretische, berechnete Abklingzeit τ beträgt $0,02\text{ s}$. Die gemessene Abklingzeit bei maximaler Dämpfung beträgt $(0,081 \pm 0,025)\text{ s}$. Die Abweichung beträgt 310% . Die gemessene Abklingzeit bei minimaler Dämpfung beträgt $(0,027 \pm 0,006)\text{ s}$, die Abweichung beträgt 38% .

Die Bestimmung des Dämpfungsfaktors ist nicht quantitativ, sondern nur qualitativ. Das Potentiometer wurde in beiden Messungen bis zum Anschlag hoch- und runtergeregt. Das bedingt die großen Abweichungen der Theoriewerte. Über die berechneten Abklingzeiten τ können Werte für die maximale und minimale Dämpfung berechnet werden, diese betragen $|\eta_{+1}| = 0,25 \pm 0,08$ und $|\eta_{-1}| = 0,73 \pm 0,16$. Die Richtigkeit dieser Werte ließe sich in Messungen bei mehr und verschiedenen als nur den extremalen Dämpfungen genauer bestimmen.

A. Originaldaten

Inverting amplifier: $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$; $R_2 = 100 \text{ k}\Omega$

Frequency [Hz]	Phase (°)	Amplitude u_2 [V]
10	180	9,7V
50	"	9,6V
100	"	9,6V
500	-175	9,2V
1000	-175	9,2V
1500	-170	9,3V
2000	-167	9,3V
5000	-150	8,6V
10000	-130	7,2V
25000	-110	3,8V
50000	-100	2,7V
100000	-92	1,2V
30000	-165°	9,1V
4000	-160°	8,9V
6000	-150°	8,5V
7000	-150°	8,2V
8000	-140°	7,9V
9000	-130°	7,6V
15000	-120°	5,5V
20000	-110°	4,5V

Amplitude : 107mV

$$R_1 = 1 \text{ k}\Omega \quad R_2 = 10 \text{ k}\Omega$$

Frequency [Hz]	phase (°)	Amplitude 2 [V]
20	180°	1.2 V
50	-175°	1.2 V
100	-175°	1.2 V
500	"	"
1000	-170°	1.2 V
1500	-180°	1.03 V
2000	-180°	1.03 V
3000	-177°	1.01 V
4000	-175°	1.01 V
5000	-177°	1.01 V
6000	-175°	1.01 V
7000	"	"
8000	"	"
9000	-173°	1.0 V
10000	-171°	1.00 V
15000	-163°	0.98 V
30000	"	1.
40000	-161°	0.97 V
50000	-163°	0.90 V
100000	-170°	0.70 V

$$A_{mid}: 107 \text{ nV}$$

Frequency [Hz]	phase (°)	Amplitude 2 [V]	$R_1 = 1\text{ k}\Omega$	$R_2 = 250\text{ k}\Omega$
10	-180°	4.28 V		
50	-180°	4.30 V		
100	-180°	4.25 V		
500	-175°	4.26 V		
1000	?	4.22 V		
1500	?	4.18 V		
2000		4.1 V		
3000		3.96 V		
4000		3.75 V		
5000		3.52 V		
6000		3.30 V		
7000		3.08 V		
8000		2.93 V		
9000		2.775 V		
10000		2.55 V		
15000		1.99 V		
20000		1.59 V		
25000		1.31 V		
30000		0.74 V		
100000		0.43 V		

Amp: 40 mV

$$V_1 = V_2 = 15V \quad (4V \text{ af frequency})$$

$$A_1 = A_2 = 0,1A$$

Integrator Amp:

$$R_1 = 10k\Omega \quad C = 100nF$$

Scope 0:

freq 1: 180 Hz freq 2: 180 Hz RectEck
 $V_{in} = 8,3V$ $V_{out} = 0,1V$

Sinus:

freq 2 [Hz]	Amp 1 [V]	Amp 2 [V]	
1	113 mV	24,5 V	Amplitude: 100 mV
2	117 mV	2,6 V	
3	109 mV	6 V	
4	117 mV	4,8	
5	117 mV	4,0	
6	117 mV	3,4	
7	117	3,0	
8	117	2,8	
9	117	2,6	
10	113	2,4	
11	213 mV	3,8	Amp: 200 mV
12	217 mV	3,6	
13	213	3,4	
14	217	3,2	
15	217	3,0	
16	219	2,8	
17	213	2,8	
18	"	2,6	
19	217	2,6	
20	217	2,4	
30	318	2,4	Lower signal
40	310 mV	2	
50	310 mV	1,6	
60	310 mV	1,4	
70	310 mV	1,5	
80	310 mV		

Scope 1: sinus Free

Scope 2: Triangular

Differentiator

$R = 100k\Omega$ $C = 22nF$

Scope 3: Rectifier 4 300Hz

Scope 4: Triangular 40Hz

Scope 5: Sine 5 40Hz

Freq 2 [Hz]	Amp 1 [V]	Amp 2 [V]
36	3.14	1.65
40	3.14	1.77
45	3.14	2.01
50	3.14	2.25
55	3.14	2.41
60	3.14	2.69
65	3.14	2.81
70	3.14	3.06
75	1/	3.26
80		3.50
85		3.62
90		3.78
95		3.94
100		4.10
150	3.14	5.19
160		6.11
170		6.51
180		6.91
190		7.28
200		7.72
210		8.40
220		8.36
230		8.72
240		9.37
250		9.57
500		
1000		
1500		
2000		
5000		
10000		

Amp: 40mV

Schmitt-Trigger:

Amp: $2,084 \pm 0,001$

SGate at 2,085

Scope 6

Generator:

Scope 7:

4,7 KHz Frequency
16 V Amplitude

Literatur

- [1] GCE Electronics. *Chapter 4 : Operational Amplifiers*. URL: https://d6vsczyu1rky0.cloudfront.net/33619_b/wp-content/uploads/2020/03/op-amps.pdf.
- [2] Stephan Giglberger. *Anleitung zum Grundlagenpraktikum A für Bachelor of Nanoscience - Versuch f - Lock-ion Verstärker*. URL: https://www.uni-regensburg.de/assets/physik/praktika/Nano/versuch_f.pdf.
- [3] Charles R. Harris u. a. „Array programming with NumPy“. In: *Nature* 585.7825 (Sep. 2020), S. 357–362. DOI: 10.1038/s41586-020-2649-2. URL: <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2649-2>.
- [4] John D. Hunter. „Matplotlib: A 2D Graphics Environment“. Version 1.4.3. In: *Computing in Science & Engineering* 9.3 (2007), S. 90–95. DOI: 10.1109/MCSE.2007.55. URL: <http://matplotlib.org/>. Current version 3.7.2, DOI: 10.5281/zenodo.8118151.
- [5] jaya27sodhani. *Schmitt Trigger*. URL: <https://www.geeksforgeeks.org/electronics-engineering/schmitt-trigger/>.
- [6] Eric O. Lebigot. *Uncertainties: a Python package for calculations with uncertainties*. Version 3.1.7. URL: <http://pythonhosted.org/uncertainties/>.
- [7] LeifiPhysik. *KIRCHHOFFsche Gesetze*. URL: <https://www.leifiphysik.de/elektrizitaetslehre/komplexere-schaltkreise/grundwissen/kirchhoffsche-gesetze>.
- [8] mikrocontroller.net. *Schmitt-Trigger*. URL: <https://www.mikrocontroller.net/articles/Schmitt-Trigger>.
- [9] TECHTONICS. *4N33 Optocoupler IC*. URL: <https://techtionics.in/product/4n33-optocoupler-ic/>.

- [10] *V51 Circuits with operational amplifiers*. TU Dortmund, Fakultät Physik. 2025.
- [11] Pauli Virtanen u. a. „SciPy 1.0: Fundamental Algorithms for Scientific Computing in Python“. In: *Nature Methods* 17 (2020), S. 261–272. DOI: 10.1038/s41592-019-0686-2.