

TECHNISCHE UNIVERSITÄT
DORTMUND

FORTGESCHRITTENENPRAKTIKUM PHYSIK
SOMMERSEMESTER
2016

V 51
Der Operationsverstärker

25.05.2016

1. ABGABE

Leonard Wollenberg
Joshua Luckey

leonard.wollenberg@tu-dortmund.de
joshua.luckey@tu-dortmund.de

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
2	Theorie	3
2.1	Linearverstärker	5
2.2	Umkehr-Integrator und Umkehr-Differenzierer	8
2.3	Schmitt-Trigger	9
2.4	Operationsgenerator als Dreiecksgenerator	10
3	Durchführung	12
3.1	Messungen zum Linearverstärker	12
3.2	Vermessung des Amperemeters	12
3.3	Umkehrintegrator und Umkehrdifferenzierer	12
3.4	Schmitt-Trigger	12
3.5	Dreiecksgenerator	12
4	Fehlerrechnung	13
5	Auswertung	14
5.1	Gegengekoppelter Verstärker	14
5.2	Amperemeter mit geringem Eingangswiderstand	22
5.3	Integrator- und Differentiatorschaltung	25
5.4	Schmitt-Trigger	30
5.5	Funktionsgenerator	30
6	Diskussion	32

1 Einleitung

In diesem Versuch wird die Funktionsweise von Operationsverstärkern behandelt. Dazu wird die Arbeitsweise eines realen und eines idealen Operationsverstärkers behandelt. Zum Schluss werden Schaltungen diskutiert die sich Operationsverstärker zunutze machen.

2 Theorie

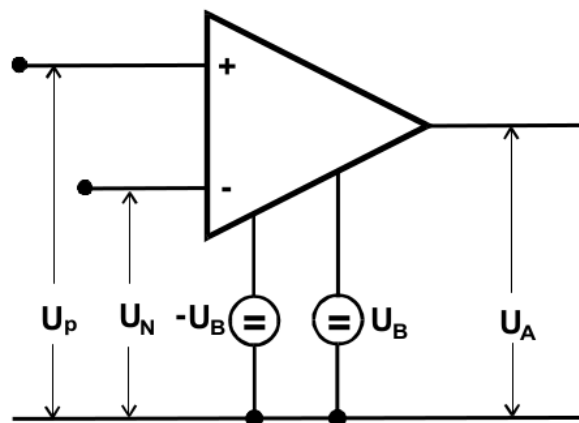


Abbildung 1: Hier ist die skizzierte Schaltung eines Operationsverstärkers dargestellt. [1]

In Abbildung 1 ist die Schaltung für einen Operationsverstärker dargestellt. Ein Operationsverstärker wird durch zwei konstante Betriebsspannungen U_B und $-U_B$ betrieben. Weiter ist die resultierende Ausgangsspannung U_A als

$$U_A = V(U_p - U_N) \quad (1)$$

gegeben. Dabei ist U_p die Spannung des nicht-invertierenden Eingangs, U_N die Spannung des invertierenden Eingangs und V ist die Leerlaufverstärkung. Dabei wird die Spannung verstärkt, wenn

$$-U_B < U_A < U_B$$

außerhalb dieses Intervalls ist die Ausgangsspannung $U_A = \pm U_B$. Die Kennlinie ist in Abbildung 2 dargestellt. Ein Operationsverstärker wird, neben der Leerlaufverstärkung V , durch mehrere Komponenten beschrieben. Den beiden Eingangswiderständen r_{e_p} und r_{e_N} sowie den Ausgangswiderstand r_a . Die Leerlaufverstärkung V ist im allgemeinen Fall sehr groß und abhängig von der Frequenz, weswegen sie für einen idealen Operationsverstärker als unendlich angenommen wird. Die Eingangswiderstände sind sehr groß, weswegen die idealen als unendlich angenommen werden. Der Ausgangswiderstand hingegen ist klein,

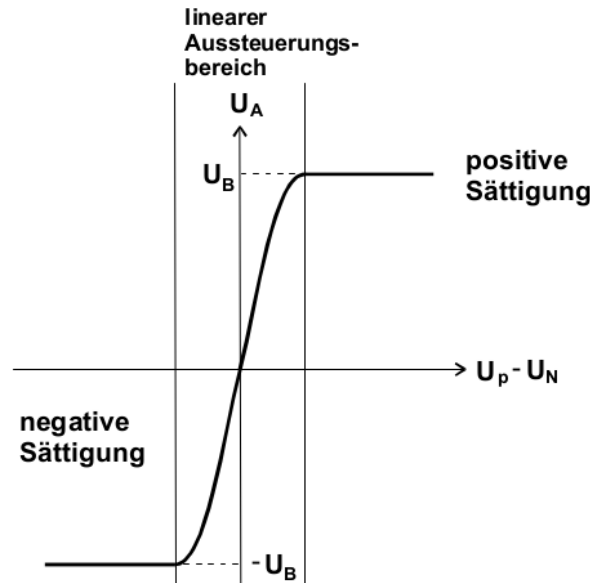


Abbildung 2: Hier ist die Kennlinie eines Operationsverstärkers Dargestell. [1]

weshalb der ideale als null angenommen werden kann.

$$V_{id} = \infty, \quad r_{eid} = \infty, \quad r_{aid} = 0 \quad (2)$$

Für einen realen Operationsverstärker müssen weitere Kenngrößen eingeführt werden. Aufgrund von Asymmetrien in einem realen Operationsverstärker ist die Ausgangsspannung ungleich null, auch wenn zwei gleiche Spannungen an den Eingängen angelegt werden. Deshalb ist es hilfreich die Gleichtaktverstärkung V_{Gl} zu definieren

$$V_{Gl} := \frac{\Delta U_A}{\Delta U_{Gl}}. \quad (3)$$

Weiter treten Eingangsströme I_N und I_p auf, aufgrund der endlichen Eingangswiderstände r_e in einem realen Operationsverstärkers. Daraus lässt sich der Eingangsruhestrom I_B definieren als

$$I_B := \frac{1}{2} (I_p + I_N) \quad (4)$$

und ebenfalls lässt sich der Offsetstrom I_0 definieren

$$I_0 := I_p - I_N, \quad \text{für } U_N = U_p = 0. \quad (5)$$

Durch die Ströme I_p und I_N lässt sich der Differenzeingangswiderstand r_D definieren

als

$$r_D := \begin{cases} \frac{\Delta U_p}{\Delta I_p}, & \text{wenn } U_N = 0 \\ \frac{\Delta U_N}{\Delta I_N}, & \text{wenn } U_p = 0 \end{cases} \quad (6)$$

genauso wie der Gleichaktwiderstand r_{Gl}

$$r_{Gl} = \frac{\Delta U_{Gl}}{I_{Gl}}. \quad (7)$$

Wobei gilt, das $U_{Gl} = U_p = U_N$ und $I_{Gl} = I_p + I_N$ ist. Weil für einen realen Operationsverstärker die Ausgangsspannung U_A nicht null ist, wenn $U_N = U_p$ ist, wird die Offsetspannung U_0 eingeführt:

$$U_0 := U_p - U_N, \text{ wenn gilt } U_A = 0. \quad (8)$$

2.1 Linearverstärker

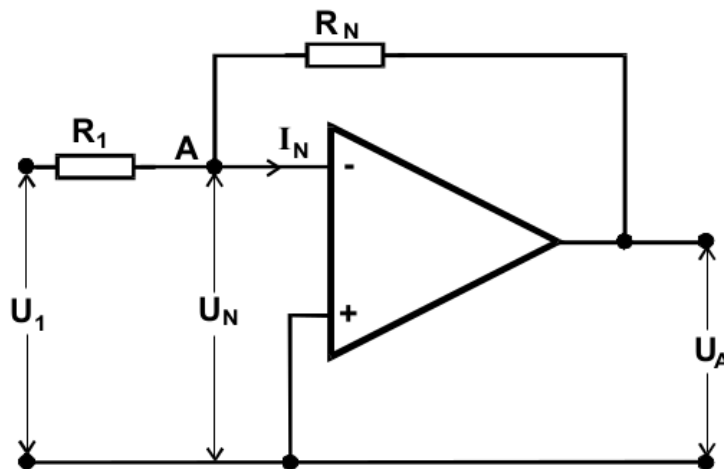


Abbildung 3: Hier ist die Schaltung eines gegen gekoppelten invertierter Linearverstärker skizziert. [1]

Aufgrund der großen Leerlaufverstärkung, kann ein Operationsverstärker nicht direkt als Linearverstärker eingesetzt werden. Dies wird umgangen indem die Schaltung nach Abbildung 3 verwendet wird. Dabei wird ein Teil der Ausgangsspannung, mithilfe eines Gegengenkopplungsweig, auf den invertierenden Eingang zurückgegeben. Deswegen wird die Schaltung auch gegen gekoppelter invertierter Linearverstärker genannt. Das sorgt dafür das bei größerer Ausgangsspannung die Eingangsspannung abnimmt. Die Eingangsspannung des nicht invertierten Eingangs U_N ist nah zu null. Mithilfe der Kirchhoffschen

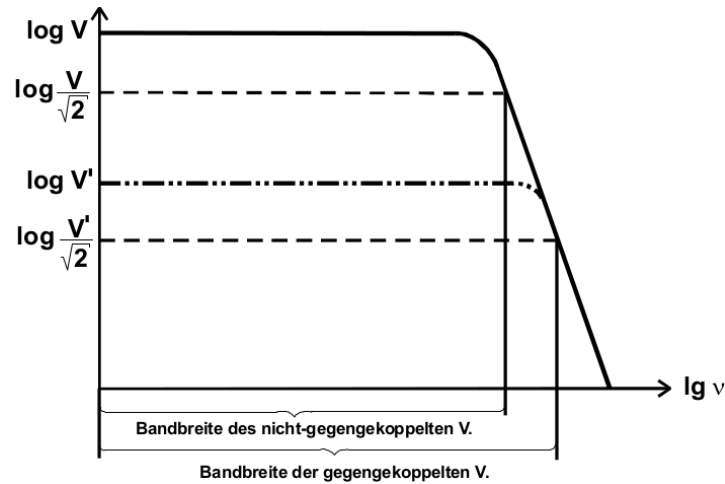


Abbildung 4: Frequenzband des Linearverstärkers. [1]

Knotenregel kann gezeigt werden, dass für die Verstärkung V' gilt

$$V' = -\frac{R_N}{R_1}. \quad (9)$$

Dies gilt für einen idealen Operationsverstärker. Für einen realen mit endlicher Leerlaufverstärkung gilt

$$\frac{1}{V'} \approx \frac{1}{V} + \frac{R_1}{R_N}. \quad (10)$$

Es lässt sich erkennen, dass die Verstärkung V' für den idealen und realen Operationsverstärker gleich sind wenn gilt $R_N/R_1 \ll V$. Die Gegenkopplung stabilisiert die Verstärkung. Der Ausgangswiderstand wird durch den Faktor g verkleinert, aufgrund der Gegenkopplung. Dabei ist g definiert als

$$g := \frac{V}{V'}. \quad (11)$$

Ein weiterer Vorteil der Gegenkopplung ist, dass die Schwankung der Leerlaufverstärkung durch den Faktor g vermindert wird.

$$\frac{\Delta V'}{V'} = \frac{1}{g} \frac{\Delta V}{V} \quad (12)$$

Zum Schluss wird das Frequenzband durch den Faktor g vergrößert. Dies ist in Abbildung 4 dargestellt. Wenn die Kurven nach der Abbildung beschrieben werden, ist das Produkt aus Bandbreite und Verstärkung V' eine konstante und wird Transitfrequenz genannt. Diese liegt vor, wenn die Verstärkung V' auf den Wert 1 abgesunken ist. Ein Nachteil des gegen gekoppelten invertierten Linearverstärkers ist der geringe Eingangswiderstand, dies verfälscht die Spannungsmessung an einem hochohmigen Spannungs-

messgerät. Deshalb wird dafür eine Schaltung nach Abbildung 5 verwendet. Die wird

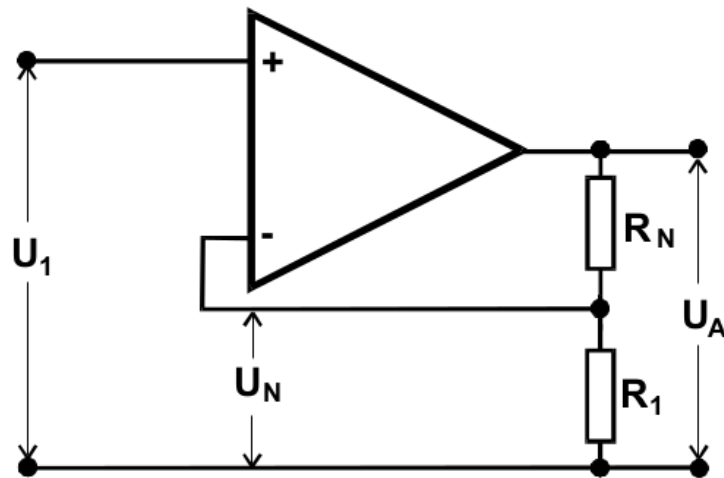


Abbildung 5: Hier ist die Schaltung eines nicht-invertierender Elektrometerverstärkers dargestellt. [1]

Elektrometerverstärker genannt. Bei dieser schaltung ist der Eingangswiderstand gegeben durch

$$r_e \approx 2r_{Gl} \propto 10 \text{ G}\Omega. \quad (13)$$

Die Verstärkung V' unter der Voraussetzung eines idealen Operationsverstärkers ist gegeben durch

$$V' = \frac{R_N + R_1}{R_1} \quad (14)$$

Wenn der Strom gemessen werden soll, muss der Eingangswiderstand klein sein. Um dies zu erreichen wird eine Schaltung nach Abbildung 6 verwendet. Für die Ausgangsspannung

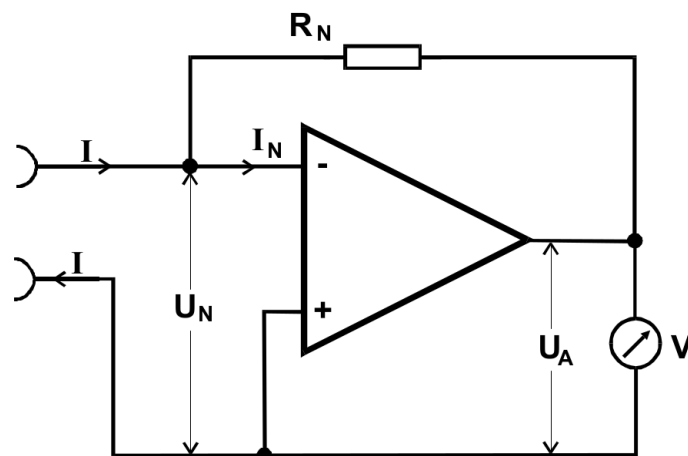


Abbildung 6: Hier ist die Schaltung eines Amperemeters dargestellt. [1]

U_A ist dann

$$U_A = IR_N, \quad (15)$$

dass bedeutet, die Ausgangsspannung U_A ist proportional zum Eingangsstrom I . Für den Eingangswiderstand gilt

$$r_e = \frac{R_N}{V}.$$

2.2 Umkehr-Integrator und Umkehr-Differenzierer

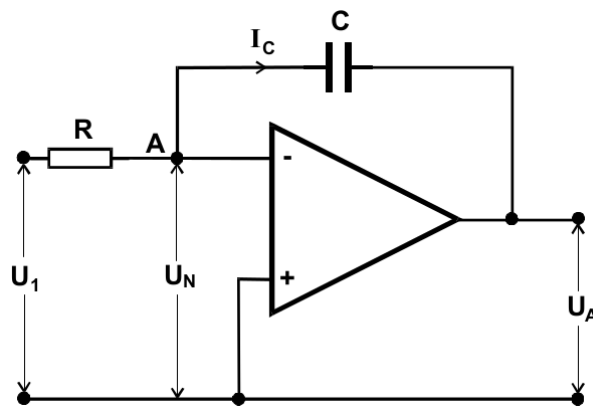


Abbildung 7: Hier ist die Schaltung des Umkehr-Integrators dargestellt. [1]

Mithilfe eines Operationsverstärkers kann auch ein Signal integriert werden. Dazu wird ein Rückkopplungszweig mit Kondensator mit der Kapazität C geschaltet, wie in Abbildung 7 dargestellt. Daraus folgt für die Ausgangsspannung

$$U_A = -\frac{1}{RC} \int U_1(t) dt. \quad (16)$$

Aufgrund des Minuszeichens wird die Schaltung Umkehr-Integrator genannt. Wenn eine Sinusspannung $U_1 = U_0 \sin(\omega t)$ angelegt wird folgt für die Ausgangsspannung

$$U_A = \frac{U_0}{\omega RC} \cos(\omega t). \quad (17)$$

Es lässt sich erkennen das die Amplitude invers von der Frequenz ω abhängig ist. Durch vertauschen des Kondensators und dem Widerstand, lässt sich ein Umkehr-Differenzierer bauen, wie in Abbildung 8 dargestellt. Die Ausgangsspannung ist gegeben durch

$$U_A = -RC \frac{dU_1}{dt}. \quad (18)$$

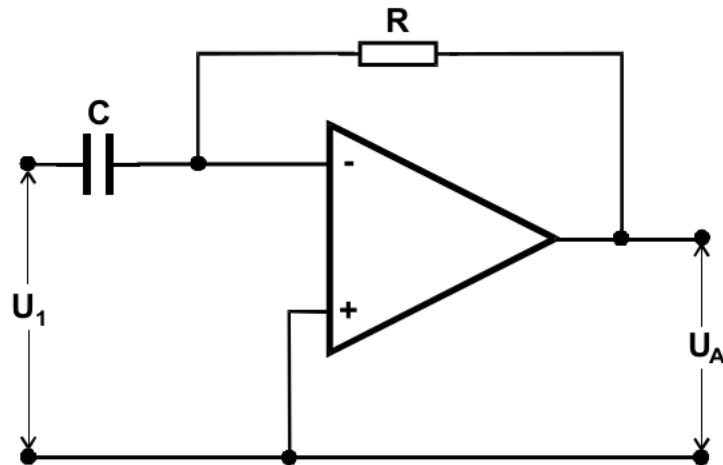


Abbildung 8: Hier ist die Schaltung eines Umkehr-Differenzierers skizziert. [1]

Es lässt sich erkennen, anhand des Beispiels der Sinusspannung, dass das Ausgangssignal linear von der Frequenz ω abhängig ist.

2.3 Schmitt-Trigger

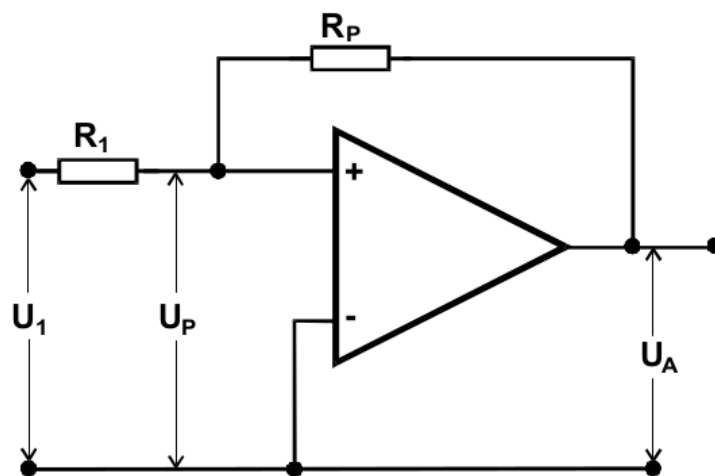


Abbildung 9: Hier ist die Schaltung für einen Schmitt-Trigger dargestellt. [1]

Ein Schmitt-Trigger vergrößert die Verstärkung V' , so dass die Ausgangsspannung entweder U_B oder $-U_B$ sein kann. Dies wird erreicht in dem eine Rückkopplung in den nicht-invertierten Eingang des Operationsverstärker stattfindet, wie in Abbildung 9 dargestellt. Die Ausgangsspannung springt nach

$$U_A = \begin{cases} +U_B, & \text{wenn } U_1 > +\frac{R_1}{R_P}U_B \\ -U_B, & \text{wenn } U_1 < -\frac{R_1}{R_P}U_B \end{cases} \quad (19)$$

zwischen der Spannungen U_B und $-U_B$.

2.4 Operationsgenerator als Dreiecksgenerator

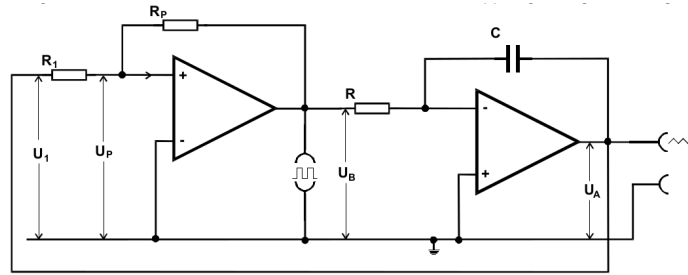


Abbildung 10: Hier ist die Schaltung eines Dreiecksgenerator dargestellt. [1]

Mithilfe mehrerer Operationsverstärker, kann ein Dreiecksgenerator gebaut werden. Die Schaltung besteht im wesentlichen aus einem Schmitt-Trigger und einem Integrator und ist in Abbildung 10 dargestellt. Dabei werden die beiden Ausgangsspannungen auf den nicht-invertierten Eingang des ersten Operationsverstärkers geleitet. Der Schmitt-Trigger liefert eine konstante Spannung, die vom Integrator integriert wird. Dadurch das die Spannung ebenfalls auf den Trigger zurück geführt wird, springt der Wert ab einem Bestimmten Punkt von U_B auf $-U_B$ und liefert somit eine Rechteckspannung und dadurch das jetzt eine negative Spannung integriert wird fällt das Signal nach dem zweiten Operationsverstärker.

Aufgrund des oben geschilderten Verhaltens der beiden Operationsverstärker sind die Frequenzen der erzeugten Rechteck- f_R und Dreiecksspannung f_D gleich, es gilt also $f_R = f_D = f$. Um diese theoretisch zu berechnen, wird die Amplitude der Dreiecksspannung als Ausgangsspannung des Integrators betrachtet, der die konstante Ausgangsspannung des Schmitt-Triggers integriert. Dabei wird der Zeitraum von einer halben Periodendauer T betrachtet und angenommen, dass die negative und positive Amplitude der Dreiecksspannung den gleichen Betrag haben.

$$\begin{aligned}\hat{U}_D &= \frac{1}{RC} \int_0^{T/2} U_R dt - \hat{U}_D \\ 2\hat{U}_D &= \frac{1}{RC} \int_0^{T/2} U_B dt \\ \hat{U}_D &= \frac{1}{RC} \frac{T}{4} U_B = \frac{1}{4RC} \frac{1}{f} U_B\end{aligned}\tag{20}$$

Ferner gilt für die Amplitude der Dreiecksspannung aufgrund der Eigenschaften des Schmitt-Triggers

$$\hat{U}_D = \frac{R_1}{R_P} U_B.\tag{21}$$

Durch Elimination der Spannung \hat{U}_D ergibt sich die Frequenz f beider Spannungen zu

$$f = \frac{1}{4RC} \frac{1}{f} \frac{R_1}{R_P}. \quad (22)$$

In der Durchführung wurde der Versuchsaufbau um zwei Widerstände R_0 und R'_0 ergänzt, die in Reihe mit dem Widerstand R geschaltet wurden, um die Amplitude der Spannung zu dämpfen, die an den zweiten Operationsverstärker angelegt wird. Daher muss der in Gleichung (22) verwendete Widerstand R um diese beiden Widerstände zu

$$f = \frac{1}{4(R + R_0 + R'_0)C} \frac{1}{f} \frac{R_1}{R_P}. \quad (23)$$

korrigiert werden.

Die Amplitude der Rechtecks- und Dreiecksspannung werden ebenfalls durch diese beiden Widerstände beeinflusst, da der Wert von \hat{U}_R nach diesen beiden Widerständen nicht mehr U_B entspricht. Der Ausgangsstrom I_R ergibt sich nach dem Ohmschen-Gesetz zu

$$I_R = \frac{U_B}{R + R_0 + R'_0}. \quad (24)$$

Durch Subtraktion des Spannungsabfalls $\Delta U_{R_0, R'_0}$ über die beiden Widerstände R_0 und R'_0 von U_B ergibt sich die reale Amplitude der Rechtecksspannung \hat{U}_R .

$$\begin{aligned} \hat{U}_R &= U_B - \Delta U_{R_0, R'_0} \\ &= U_B - I_R \cdot (R_0 + R'_0) \\ &= \left(1 - \frac{R_0 + R'_0}{R + R_0 + R'_0}\right) U_B \end{aligned} \quad (25)$$

Und damit die reale Amplitude der Dreiecksspannung zu

$$\begin{aligned} \hat{U}_D &= \frac{R_1}{R_P} \hat{U}_R \\ &= \frac{R_1}{R_P} \left(1 - \frac{R_0 + R'_0}{R + R_0 + R'_0}\right) U_B. \end{aligned} \quad (26)$$

3 Durchführung

3.1 Messungen zum Linearverstärker

In dieser Messreihe soll eine Schaltung nach Abbildung 3 untersucht werden. Dazu wird zunächst der Frequenzgang f für verschiedene Verstärkungen V' gemessen. Weiter wird für eine Verstärkung V' die Phase zwischen Eingangsspannung U_E und Ausgangsspannung U_A für verschiedene Frequenzen f untersucht.

3.2 Vermessung des Amperemeters

Es wird der Eingangswiderstand r_e und die Leerlaufverstärkung V eines Amperemeters bestimmt, die Schaltung wird nach Abbildung 6 aufgebaut. Dazu werden die Eingangsspannung U_N und die Ausgangsspannung U_A und die Generatorspannung U_g aufgenommen in Abhängigkeit der Frequenz f gemessen. Dabei wird ein Widerstand R_N mit $10\text{ k}\Omega$ verwendet.

3.3 Umkehrintegrator und Umkehrdifferenzierer

Es wird ein Umkehrintegrator nach Abbildung 7 aufgebaut. Dabei wird die Frequenzabhängigkeit f der Ausgangsspannung U_A untersucht, wenn eine Sinusspannung angelegt wird. Weiter werden Bilder mithilfe eines Oszilloskops aufgenommen, wenn eine Rechtecks- und eine Dreiecksspannung anliegt. Dies wird auch für einen Umkehrdifferenzierer untersucht der durch Abbildung 8 aufgebaut wird.

3.4 Schmitt-Trigger

Als nächstes wird eine Schaltung nach Abbildung 9 untersucht. Dazu wird ein Generator mit einer Sinusspannung an den Eingang eingebaut und am Ausgang wird ein Oszilloskop angeschlossen. Es wird die Spannung des Generators von 0 V hochgestellt, bis der Trigger anfängt zu kippen. Und es wird die Doppelte Betriebsspannung $2U_B$ ermittelt.

3.5 Dreiecksgenerator

Es wird ein Dreiecksgenerator nach Abbildung 10 untersucht. Mithilfe eines Oszilloskops kann die Zeitabhängigkeit überprüft werden. Es wird die Frequenz und die Amplitude der Dreiecksspannung gemessen.

4 Fehlerrechnung

Im folgenden Abschnitt werden die, für die Auswertung der aufgenommenen Daten verwendeten Gleichungen aufgezeigt und erläutert.

Der Mittelwert aus mehreren Ergebnissen einer Messung wurde mit Hilfe von

$$\langle x \rangle = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n x_i \quad (27)$$

berechnet. Für die Berechnung der statistischen Abweichung wurde die folgende Gleichung verwendet:

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=0}^n (x_i - \langle x \rangle)^2}. \quad (28)$$

Für die Ungenauigkeit der aufgenommenen Messwerte wurde im allgemeinen die kleinste Skaleneinheit des verwendeten Messgeräts angenommen. Für die Fehlerfortpflanzung dieser Unsicherheiten wurde die gaußsche Fehlerfortpflanzung verwendet. Damit berechnet sich der Fehler σ_y einer Größe $y = y(\vec{x})$, mit den Messgrößen $\dim \vec{x} = n$, wie folgt:

$$\sigma_y = \sqrt{\sum_{i=0}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \sigma_{x_i} \right)^2}. \quad (29)$$

Die relative Abweichung eines Messergebnisses x vom gegebenen Theoriewert x_{theo} wurde mit folgender Gleichung berechnet:

$$\Delta_{\text{rel}} x = \frac{|x - x_{\text{theo}}|}{x_{\text{theo}}}. \quad (30)$$

Die in der Auswertung angefertigten Regressionskurven wurden mit Hilfe der *Python*-Bibliothek *scipy* [2] durchgeführt.

5 Auswertung

In den folgenden Abschnitten werden die aufgenommenen Messwerte für jeder der aufgebauten Schaltungen einzeln ausgewertet. Aufgrund von nicht lösbaren Problemen bei der Durchführung des Versuchs wurden uns nach drei Versuchstagen die Logarithmierer-/Exponentialgeneratorschaltung und die Schaltung zur Erzeugung der gedämpften Sinusspannung erlassen.

5.1 Gegengekoppelter Verstärker

Für die vier Schaltungen eines gegengekoppelten Verstärkers, die in diesem Versuchsteil aufgebaut wurden, wurden die Widerstandspaare R_N und R_1 in Tabelle 1 verwendet. Die unterschiedlichen Schaltungen werden der Reihenfolge in dieser Tabelle nach (von oben nach unten) im Folgenden als erste bis vierte Schaltung bezeichnet. Neben den jeweiligen Werten der Widerstände ist auch das Verhältnis R_N/R_1 angegeben welches nach Gleichung (9) den Betrag der Verstärkung der Schaltung angibt.

Widerstand $R_N/\text{k}\Omega$	Widerstand $R_1/\text{k}\Omega$	Verhältnis $\frac{R_N}{R_1}$
100 ± 1	100 ± 1	$1,00 \pm 0,01$
$10,0 \pm 0,1$	100 ± 1	$0,100 \pm 0,001$
$10,0 \pm 0,1$	$32,0 \pm 0,3$	$0,312 \pm 0,004$
$32,0 \pm 0,3$	$10,0 \pm 0,1$	$3,20 \pm 0,05$

Tabelle 1: Werte der 4 Widerstandspaare, die für die unterschiedlichen Schaltungen des gegengekoppelten Verstärkers verwendet wurden. Zusätzlich angegeben ist das Verhältnis dieser beiden Widerstände.

In den folgenden Tabellen 2 – 5 und den zugehörigen Abbildungen 11 – 14 ist jeweils die Verstärkung der vier Schaltungen in Abhängigkeit der Frequenz dargestellt. Die Abbildungen erlauben den Vergleich der theoretischen Verstärkung, die dem Widerstandsverhältnis R_N/R_1 entspricht mit dem gemessenen Werte der mittleren maximalen Verstärkung.

Es ist zu erkennen, dass für Widerstandsverhältnisse ≥ 1 der theoretische Wert gut mit dem gemittelten Wert übereinstimmt. Die relativen Abweichungen der Messwerte von den theoretischen Werten sind in einzeln in Tabelle 6 aufgeführt. Bei den Widerstandsverhältnissen < 1 zeigt sich eine deutlich größere Abweichung der gemessenen Werte, welche aufgrund der doppellogarithmischen Darstellung jedoch größer zu sein scheint als diese in Wirklichkeit ist.

Die Parameter der Ausgleichsrechnungen der Form

$$V'(f) = f^a \cdot 10^b \quad (31)$$

der abfallenden Verstärkung sind zusammen mit der Grenzfrequenzen und dem Verstärkung-Bandbreiten-Produkten in Tabelle 7 eingetragen. In doppellogarithmischer Darstellung haben die Parameter a und b die Bedeutung der Steigung respektive des y -Achsenabschnittes der Geraden. Des Weiteren wurde auch die Leerlaufspannung V mittels Gleichung (10) abgeschätzt und in Tabelle 7 eingetragen.

Frequenz f/kHz	Ausgangsspannung U_A/mV	Verstärkung V
$1,00 \pm 0,01$	78 ± 5	$1,11 \pm 0,07$
$5,00 \pm 0,05$	72 ± 5	$1,03 \pm 0,07$
$10,0 \pm 0,1$	57 ± 5	$0,81 \pm 0,07$
$15,0 \pm 0,1$	45 ± 5	$0,64 \pm 0,07$
$20,0 \pm 0,2$	37 ± 5	$0,53 \pm 0,07$
$25,0 \pm 0,2$	31 ± 5	$0,44 \pm 0,07$
$30,0 \pm 0,3$	25 ± 5	$0,36 \pm 0,07$
$35,0 \pm 0,4$	25 ± 5	$0,36 \pm 0,07$
$75,0 \pm 0,8$	20 ± 5	$0,29 \pm 0,07$
100 ± 1	15 ± 5	$0,21 \pm 0,07$

Tabelle 2: Messwerte der Frequenz und der Ausgangsspannung der ersten Schaltung eines gegengekoppelten Verstärkers. Zusätzlich ist die Verstärkung dieser Schaltung angegeben.

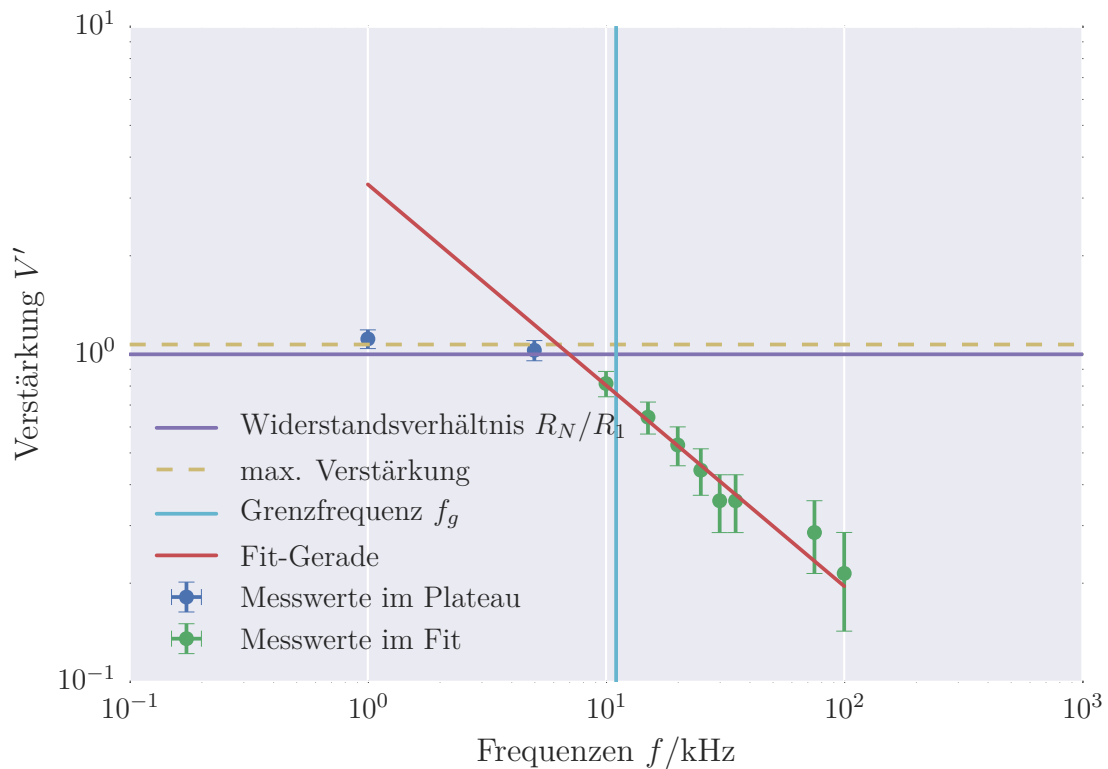


Abbildung 11: Doppellogarithmische Darstellung der Verstärkung der ersten gegengekoppelten Verstärkerschaltung in Abhängigkeit der Frequenz der Eingangsspannung. Zusätzlich wurden die Ausgleichsgerade durch die abfallenden Messwerte und eine senkrechte Gerade bei der Grenzfrequenz eingezeichnet. Ferner sind noch zwei waagerechte Geraden dargestellt. Die eine markiert den Mittelwert der Messwerte im Plateau und die andere den theoretischen Wert dieser Größe.

Frequenz f/Hz	Ausgangsspannung $U_{A,\text{int}}/\text{mV}$	Ausgangsspannung $U_{A,\text{diff}}/\text{mV}$
100 ± 1	670 ± 10	140 ± 10
200 ± 2	350 ± 10	240 ± 10
300 ± 3	250 ± 10	350 ± 10
400 ± 4	180 ± 10	450 ± 10
500 ± 5	160 ± 10	550 ± 10
600 ± 6	140 ± 10	640 ± 10
700 ± 7	120 ± 10	740 ± 10
800 ± 8	100 ± 10	840 ± 10
900 ± 9	90 ± 10	920 ± 10
1000 ± 10	80 ± 10	1040 ± 10

Tabelle 3: Messwerte der Frequenz der Eingangsspannung und der Ausgangsspannung für die Schaltungen eines Umkehrintegrators und -differentiators.

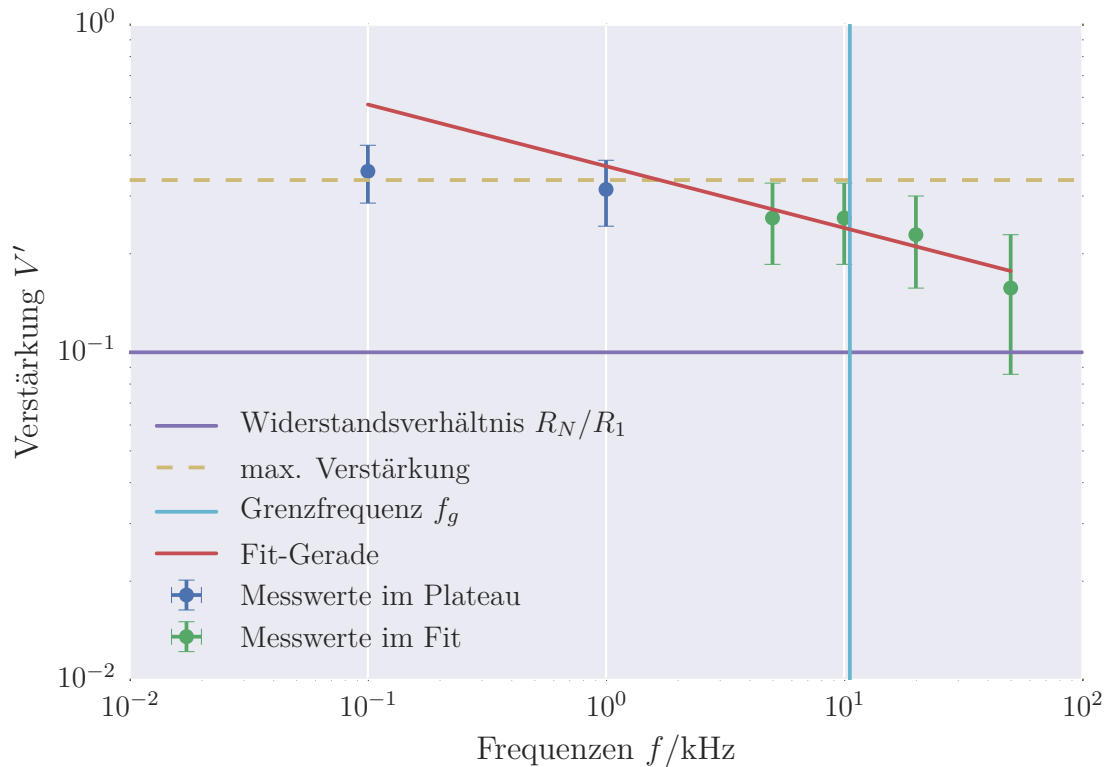


Abbildung 12: Doppellogarithmische Darstellung der Verstärkung der zweiten gegengekoppelten Verstärkerschaltung in Abhängigkeit der Frequenz der Eingangsspannung. Zusätzlich wurden die Ausgleichsgerade durch die abfallenden Messwerte und eine senkrechte Gerade bei der Grenzfrequenz eingezeichnet. Ferner sind noch zwei waagerechte Geraden dargestellt. Die eine markiert den Mittelwert der Messwerte im Plateau und die andere den theoretischen Wert dieser Größe.

Frequenz f/kHz	Ausgangsspannung U_A/mV	Verstärkung V
$0,0100 \pm 0,0001$	37 ± 5	$0,53 \pm 0,07$
$0,100 \pm 0,001$	35 ± 5	$0,50 \pm 0,07$
$1,00 \pm 0,01$	38 ± 5	$0,54 \pm 0,07$
$10,0 \pm 0,1$	32 ± 5	$0,46 \pm 0,07$
$20,0 \pm 0,2$	30 ± 5	$0,43 \pm 0,07$
$30,0 \pm 0,3$	25 ± 5	$0,36 \pm 0,07$
$40,0 \pm 0,4$	19 ± 5	$0,27 \pm 0,07$
$50,0 \pm 0,5$	19 ± 5	$0,27 \pm 0,07$
100 ± 1	16 ± 5	$0,23 \pm 0,07$

Tabelle 4: Messwerte der Frequenz und der Ausgangsspannung der dritten Schaltung eines gegengekoppelten Verstärkers. Zusätzlich ist die Verstärkung dieser Schaltung angegeben.

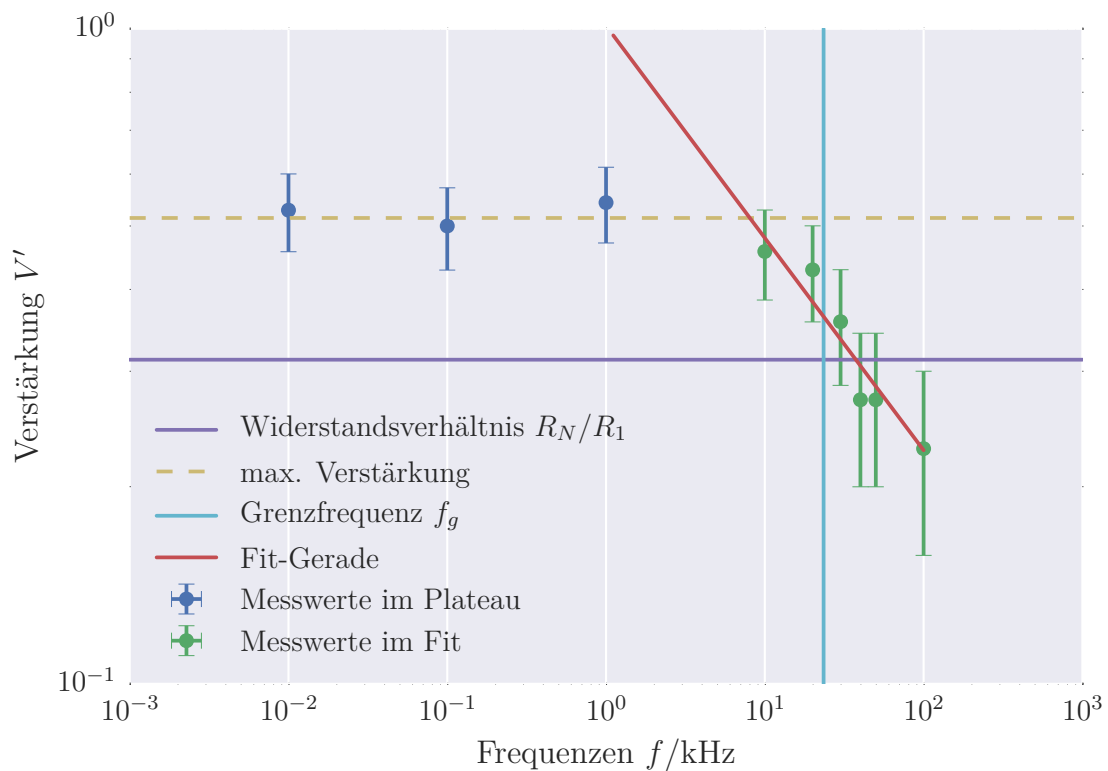


Abbildung 13: Doppellogarithmische Darstellung der Verstärkung der dritten gegengekoppelten Verstärkerschaltung in Abhängigkeit der Frequenz der Eingangsspannung. Zusätzlich wurden die Ausgleichsgerade durch die abfallenden Messwerte und eine senkrechte Gerade bei der Grenzfrequenz eingezeichnet. Ferner sind noch zwei waagerechte Geraden dargestellt. Die eine markiert den Mittelwert der Messwerte im Plateau und die andere den theoretischen Wert dieser Größe.

Frequenz f/kHz	Ausgangsspannung U_A/mV	Verstärkung V
$0,100 \pm 0,001$	220 ± 5	$3,14 \pm 0,08$
$1,00 \pm 0,01$	230 ± 5	$3,29 \pm 0,09$
$5,00 \pm 0,05$	160 ± 5	$2,29 \pm 0,08$
$10,0 \pm 0,1$	100 ± 5	$1,43 \pm 0,07$
$20,0 \pm 0,2$	60 ± 5	$0,86 \pm 0,07$
$30,0 \pm 0,3$	45 ± 5	$0,64 \pm 0,07$
$50,0 \pm 0,5$	35 ± 5	$0,50 \pm 0,07$
100 ± 1	25 ± 5	$0,36 \pm 0,07$

Tabelle 5: Messwerte der Frequenz und der Ausgangsspannung der vierten Schaltung eines gegengekoppelten Verstärkers. Zusätzlich ist die Verstärkung dieser Schaltung angegeben.

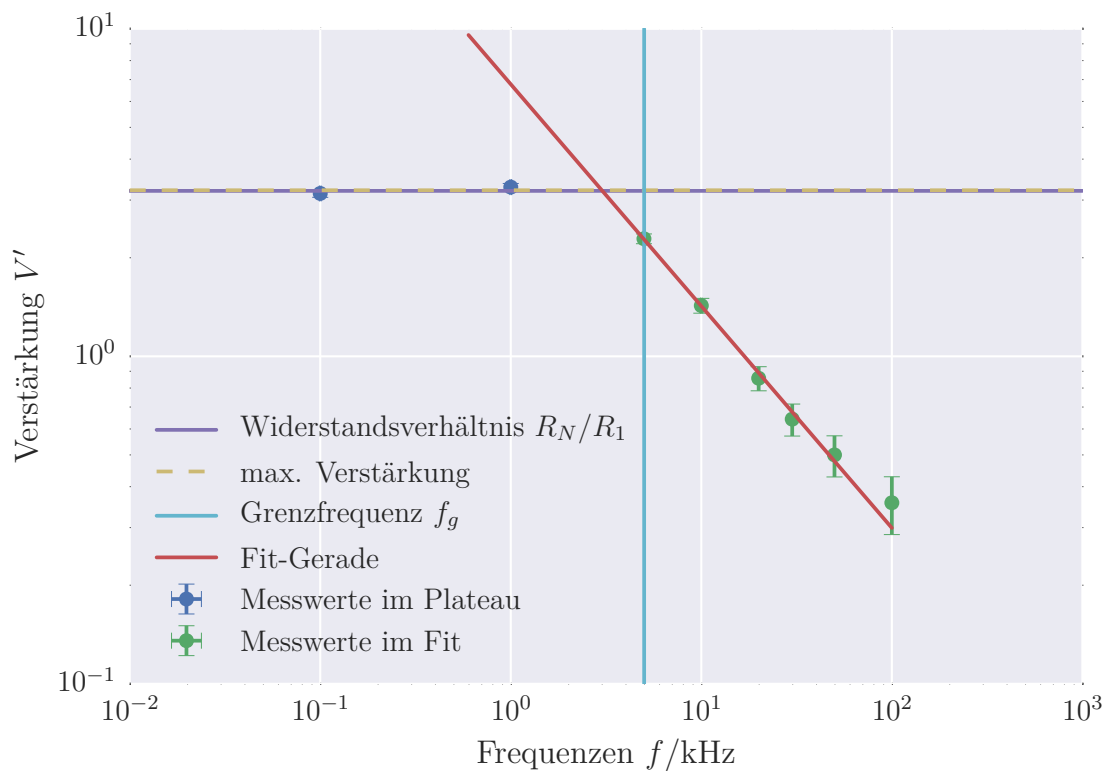


Abbildung 14: Doppellogarithmische Darstellung der Verstärkung der vierten gegengekoppelten Verstärkerschaltung in Abhängigkeit der Frequenz der Eingangsspannung. Zusätzlich wurden die Ausgleichsgerade durch die abfallenden Messwerte und eine senkrechte Gerade bei der Grenzfrequenz eingezeichnet. Ferner sind noch zwei waagerechte Geraden dargestellt. Die eine markiert den Mittelwert der Messwerte im Plateau und die andere den theoretischen Wert dieser Größe.

Theoretische Verstärkung V'	Gemessene Verstärkung $\overline{V'_{\max}}$	relative Abweichung $\Delta_{\text{rel}} V/\%$
1,000	1,071	7,143
0,100	0,336	235,714
0,312	0,514	64,571
3,200	3,214	0,446

Tabelle 6: Vergleich der Werte der theoretischen Verstärkung der Schaltung, welche dem Verhältnis der verbauten Widerstände entspricht, mit dem Mittelwert der der gemessenen Verstärkungen vor dem linearen Abfall in doppellogarithmischer Darstellung.

Der Frequenzgang der Verstärkerschaltung lässt sich mit dem in Abbildung 15 dargestellten Ersatzschaltbild eines idealen Operationsverstärkers mit nachgeschaltetem Tiefpass erklären.

Steigung a	y -Achsenabschnitt b	Grenzfrequenz f_g/kHz	Verstärkung-Bandbreite $f_g V'_{\text{max}}/\text{kHz}$	Leerlaufverstärkung V
$-0,61 \pm 0,04$	$0,52 \pm 0,06$	11,025	11,813	$-15,000$
$-0,19 \pm 0,07$	$-0,43 \pm 0,08$	10,562	3,546	$-0,142$
$-0,32 \pm 0,06$	$0,00 \pm 0,08$	23,453	12,061	$-0,796$
$-0,68 \pm 0,02$	$0,83 \pm 0,02$	5,013	16,112	$-720,000$

Tabelle 7: Parameter der Ausgleichskurven der abfallenden Verstärkung, sowie die Grenzfrequenz und das Verstärkung-Bandbreiten-Produkt für jeder der vier Schaltungen. Bezeichnet werden die Parameter mit Steigung und y -Achsenabschnitt, da die Parameter in doppellogarithmischer Darstellung diese Bedeutung haben.

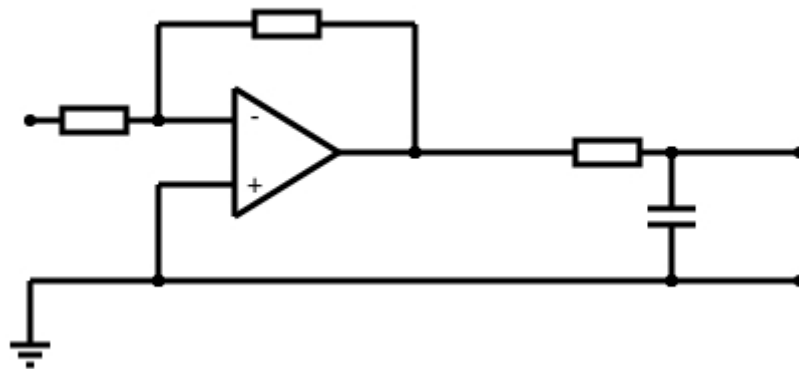


Abbildung 15: Ersatzschaltbild eines realen Operationsverstärkers in dem dieser durch einen idealen Operationsverstärker und einen nachgeschalteten Tiefpass ersetzt wird. Der Tiefpass beschreibt dabei interne Widerstände und Kapazitäten des realen Operationsverstärkers.

Die Messwerte des Frequenzgangs der Phasenbeziehung zwischen Ein- und Ausgangsspannung sind in Tabelle 8 aufgelistet und in Abbildung 16 graphisch dargestellt. Für einen Phasenunterschied von 180° ergibt sich aus der Gegenkopplung der Schaltung eine Mitkopplung.

Frequenz f/kHz	Phase $\Delta\phi/^\circ$
$0,100 \pm 0,001$	175 ± 5
$0,200 \pm 0,002$	170 ± 5
$0,300 \pm 0,003$	168 ± 5
$0,400 \pm 0,004$	168 ± 5
$0,500 \pm 0,005$	165 ± 5
$1,00 \pm 0,01$	162 ± 5
$2,00 \pm 0,02$	150 ± 5
$3,00 \pm 0,03$	140 ± 5
$4,00 \pm 0,04$	130 ± 5
$5,00 \pm 0,05$	125 ± 5
$10,0 \pm 0,1$	110 ± 5
$20,0 \pm 0,2$	90 ± 5

Tabelle 8: Messwerte der Frequenz und der Phase zwischen Eingangs- und Ausgangsspannung der vierten Schaltung eines gegengekoppelten Verstärkers.

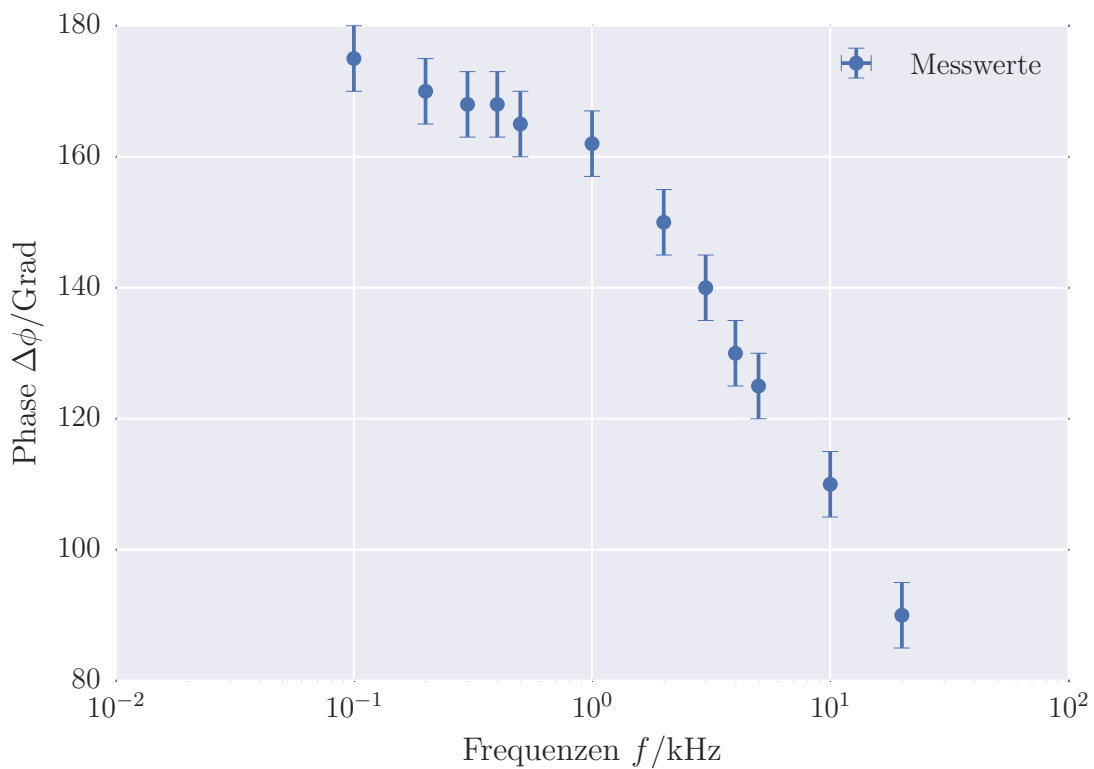


Abbildung 16: Halblogarithmische Darstellung der Phase zwischen Aus- und Eingangsspannung der vierten gegengekoppelten Verstärkerschaltung in Abhängigkeit der Frequenz.

5.2 Amperemeter mit geringem Eingangswiderstand

Die am Amperemeter aufgenommenen Messwerte sind in Tabelle 9 einzusehen, wobei zusätzlich die theoretische Ausgangsspannung $U_{A,theo}$ nach Gleichung (15) und die relative Abweichung der gemessenen Ausgangsspannung U_A zu dieser bestimmt wurde. Für den Aufbau der Schaltung wurden die Widerstände $R_V = (100 \pm 1) \Omega$ und $R_N = (10,0 \pm 0,1) k\Omega$. In Tabelle 10 sind die berechneten Werte für Strom I , Innenwiderstand r_e und die Leerlaufverstärkung V angegeben. Die graphischen Darstellungen der letzten beiden Größen in Abhängigkeit der Frequenz sind in Abbildung 17 und Abbildung 18 gezeigt.

Frequenz f/kHz	Generatorspannung U_g/mV	Eingangsspannung U_E/mV	Ausgangsspannung U_A/V	Ausgangsspannung $U_{A,theo}/V$	Ausgangsspannung $\Delta_{rel}U_A/\%$
100 ± 1	$0,209 \pm 0,001$	$0,023 \pm 0,002$	$20,0 \pm 0,1$	$20,9 \pm 0,3$	4 ± 2
200 ± 2	$0,207 \pm 0,001$	$0,023 \pm 0,002$	$20,0 \pm 0,1$	$20,7 \pm 0,3$	3 ± 2
500 ± 5	$0,207 \pm 0,001$	$0,030 \pm 0,002$	$20,0 \pm 0,1$	$20,7 \pm 0,3$	3 ± 2
750 ± 8	$0,207 \pm 0,001$	$0,035 \pm 0,002$	$20,0 \pm 0,1$	$20,7 \pm 0,3$	3 ± 2
1000 ± 10	$0,207 \pm 0,001$	$0,040 \pm 0,002$	$20,0 \pm 0,1$	$20,7 \pm 0,3$	3 ± 2
1500 ± 15	$0,207 \pm 0,001$	$0,050 \pm 0,002$	$19,0 \pm 0,1$	$20,7 \pm 0,3$	8 ± 2
2000 ± 20	$0,207 \pm 0,001$	$0,060 \pm 0,002$	$19,0 \pm 0,1$	$20,7 \pm 0,3$	8 ± 2
2500 ± 25	$0,207 \pm 0,001$	$0,075 \pm 0,002$	$19,5 \pm 0,1$	$20,7 \pm 0,3$	6 ± 2
3000 ± 30	$0,207 \pm 0,001$	$0,085 \pm 0,002$	$19,5 \pm 0,1$	$20,7 \pm 0,3$	6 ± 2
3500 ± 35	$0,207 \pm 0,001$	$0,095 \pm 0,002$	$19,5 \pm 0,1$	$20,7 \pm 0,3$	6 ± 2
4000 ± 40	$0,207 \pm 0,001$	$0,105 \pm 0,002$	$18,0 \pm 0,1$	$20,7 \pm 0,3$	14 ± 2
4500 ± 45	$0,207 \pm 0,001$	$0,110 \pm 0,002$	$18,7 \pm 0,1$	$20,7 \pm 0,3$	10 ± 2
5000 ± 50	$0,207 \pm 0,001$	$0,125 \pm 0,002$	$18,3 \pm 0,1$	$20,7 \pm 0,3$	13 ± 2
5500 ± 55	$0,207 \pm 0,001$	$0,140 \pm 0,002$	$18,0 \pm 0,1$	$20,7 \pm 0,3$	14 ± 2
6000 ± 60	$0,207 \pm 0,001$	$0,150 \pm 0,002$	$17,5 \pm 0,1$	$20,7 \pm 0,3$	18 ± 2
6500 ± 65	$0,207 \pm 0,001$	$0,160 \pm 0,002$	$17,3 \pm 0,1$	$20,7 \pm 0,3$	19 ± 2
7000 ± 70	$0,207 \pm 0,001$	$0,170 \pm 0,002$	$16,9 \pm 0,1$	$20,7 \pm 0,3$	22 ± 2
7500 ± 75	$0,207 \pm 0,001$	$0,185 \pm 0,002$	$16,5 \pm 0,1$	$20,7 \pm 0,3$	25 ± 2
8500 ± 85	$0,207 \pm 0,001$	$0,195 \pm 0,002$	$16,3 \pm 0,1$	$20,7 \pm 0,3$	26 ± 2
9000 ± 90	$0,207 \pm 0,001$	$0,200 \pm 0,002$	$15,7 \pm 0,1$	$20,7 \pm 0,3$	31 ± 2
$10\,000 \pm 100$	$0,207 \pm 0,001$	$0,215 \pm 0,002$	$14,7 \pm 0,1$	$20,7 \pm 0,3$	40 ± 2

Tabelle 9: Messwerte der Frequenz der Eingangsspannung, der Generator-, der Eingangs- und Ausgangsspannung der Amperemeterschaltung. Zusätzlich ist die theoretische Ausgangsspannung und der relative Unterschied zwischen dieser und der gemessenen angegeben.

Frequenz f/kHz	Strom I/A	Eingangswiderstand r_e/Ω	Leerlaufverstärkung V
100 ± 1	$0,002\,09 \pm 0,000\,02$	11 ± 1	908 ± 80
200 ± 2	$0,002\,07 \pm 0,000\,02$	11 ± 1	899 ± 79
500 ± 5	$0,002\,07 \pm 0,000\,02$	14 ± 1	690 ± 47
750 ± 8	$0,002\,07 \pm 0,000\,02$	16 ± 1	591 ± 35
1000 ± 10	$0,002\,07 \pm 0,000\,02$	19 ± 1	517 ± 27
1500 ± 15	$0,002\,07 \pm 0,000\,02$	24 ± 1	413 ± 18
2000 ± 20	$0,002\,07 \pm 0,000\,02$	28 ± 1	345 ± 13
2500 ± 25	$0,002\,07 \pm 0,000\,02$	36 ± 1	276 ± 8
3000 ± 30	$0,002\,07 \pm 0,000\,02$	41 ± 1	243 ± 7
3500 ± 35	$0,002\,07 \pm 0,000\,02$	45 ± 1	217 ± 6
4000 ± 40	$0,002\,07 \pm 0,000\,02$	50 ± 1	197 ± 5
4500 ± 45	$0,002\,07 \pm 0,000\,02$	53 ± 1	188 ± 4
5000 ± 50	$0,002\,07 \pm 0,000\,02$	60 ± 1	165 ± 4
5500 ± 55	$0,002\,07 \pm 0,000\,02$	67 ± 1	147 ± 3
6000 ± 60	$0,002\,07 \pm 0,000\,02$	72 ± 1	138 ± 3
6500 ± 65	$0,002\,07 \pm 0,000\,02$	77 ± 1	129 ± 2
7000 ± 70	$0,002\,07 \pm 0,000\,02$	82 ± 1	121 ± 2
7500 ± 75	$0,002\,07 \pm 0,000\,02$	89 ± 1	111 ± 2
8500 ± 85	$0,002\,07 \pm 0,000\,02$	94 ± 1	106 ± 2
9000 ± 90	$0,002\,07 \pm 0,000\,02$	96 ± 1	103 ± 2
$10\,000 \pm 100$	$0,002\,07 \pm 0,000\,02$	103 ± 1	96 ± 2

Tabelle 10: Aus den gemessenen Spannungen der Amperemeterschaltung berechnete Werte des Stroms und des Eingangswiderstands sowie die aus letzterem berechneten Werte der Leerlaufverstärkung.

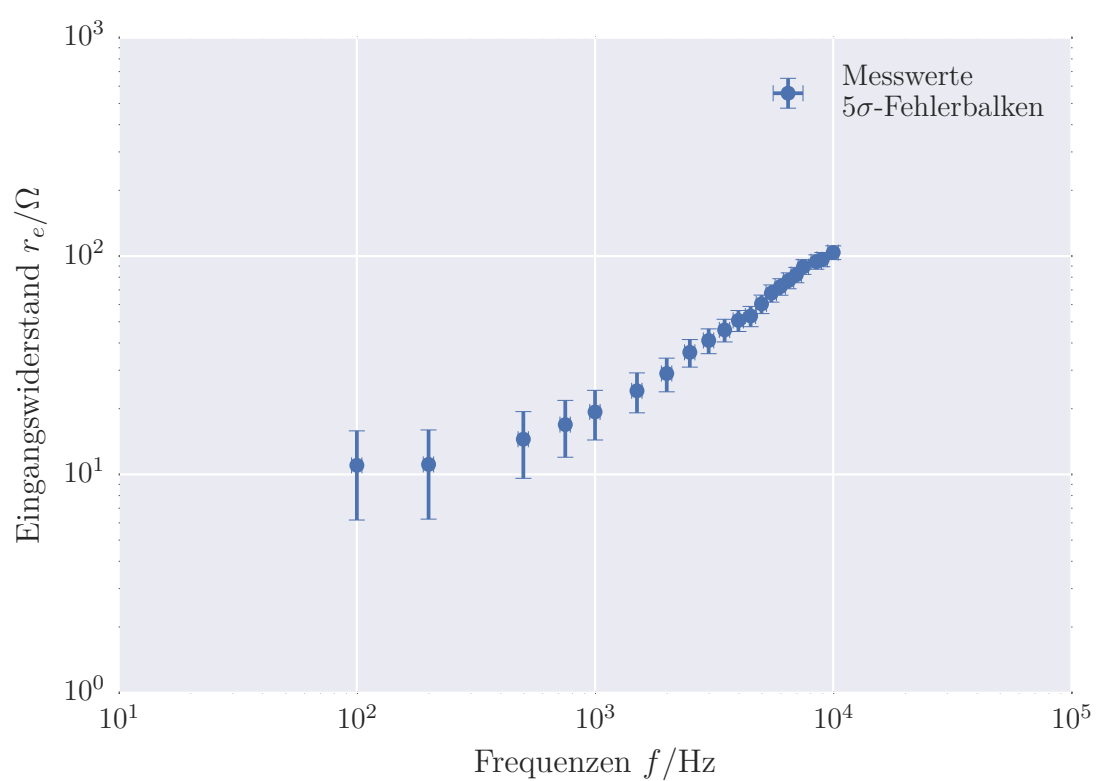


Abbildung 17: Doppellogarithmische Darstellung des Eingangswiderstands der Amperemeterschaltung in Abhängigkeit der Frequenz.

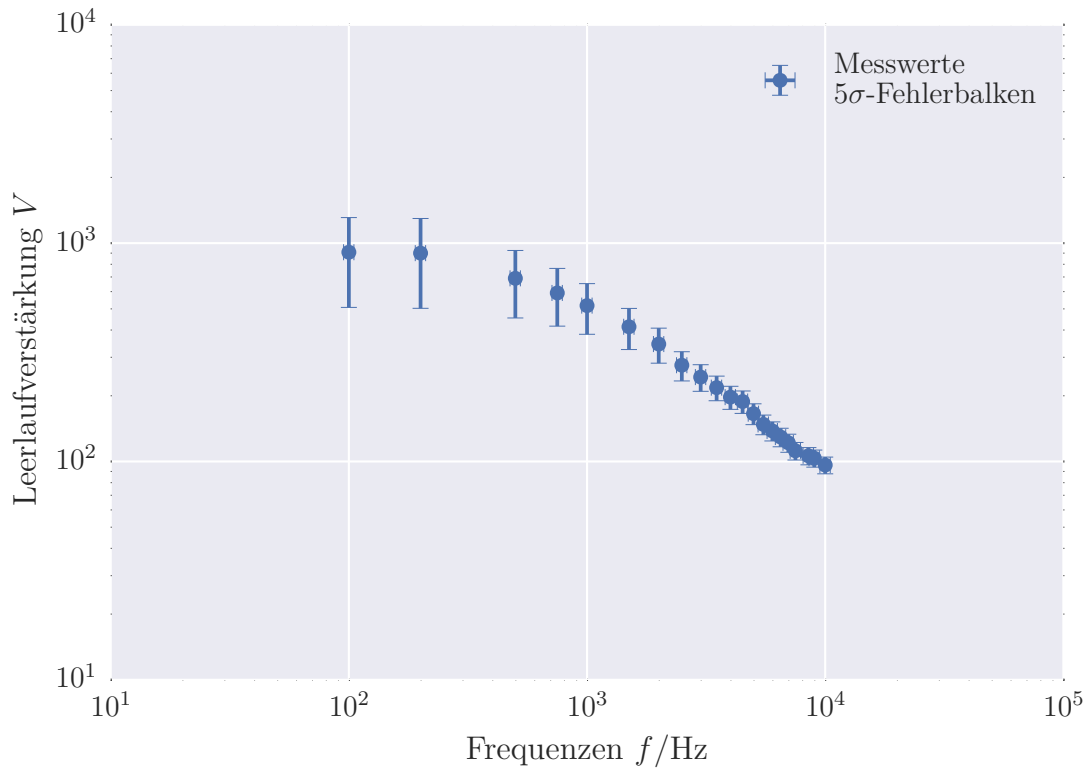


Abbildung 18: Doppellogarithmische Darstellung der Leerlaufverstärkung der Amperemeterschaltung in Abhängigkeit der Frequenz.

5.3 Integrator- und Differentiatorschaltung

Die von Integrator- und Differentiatorschaltung aufgenommenen Messwerte befinden sich in Tabelle 11. Die doppellogarithmische Darstellung der Frequenzabhängigkeit der Ausgangsspannung des Integrators ist in Abbildung 19 und die des Differentiators in Abbildung 23 gezeigt. Zusätzlich zu den Messwerten ist auf das Ergebnis einer Ausgleichsrechnung nach Gleichung (31) abgebildet. Die Parameter der Ausgleichskurven sind:

$$a_{\text{int}} = -0,91 \pm 0,01 \quad b_{\text{diff}} = 0,90 \pm 0,01 \quad (32)$$

$$a_{\text{int}} = 4,64 \pm 0,02 \quad b_{\text{diff}} = 0,31 \pm 0,03 \quad (33)$$

In den Abbildungen 20 – 22 und 24 – 26 sind jeweils die Ausgangsspannungen des Integrators respektive des Differentiators für die drei Eingangsspannungen Sinus, Dreieck und Rechteck dargestellt.

Frequenz f/Hz	Ausgangsspannung $U_{A,\text{int}}/\text{mV}$	Ausgangsspannung $U_{A,\text{diff}}/\text{mV}$
100 ± 1	670 ± 10	140 ± 10
200 ± 2	350 ± 10	240 ± 10
300 ± 3	250 ± 10	350 ± 10
400 ± 4	180 ± 10	450 ± 10
500 ± 5	160 ± 10	550 ± 10
600 ± 6	140 ± 10	640 ± 10
700 ± 7	120 ± 10	740 ± 10
800 ± 8	100 ± 10	840 ± 10
900 ± 9	90 ± 10	920 ± 10
1000 ± 10	80 ± 10	1040 ± 10

Tabelle 11: Messwerte der Frequenz der Eingangsspannung und der Ausgangsspannung für die Schaltungen eines Umkehrintegrators und -differentiators.

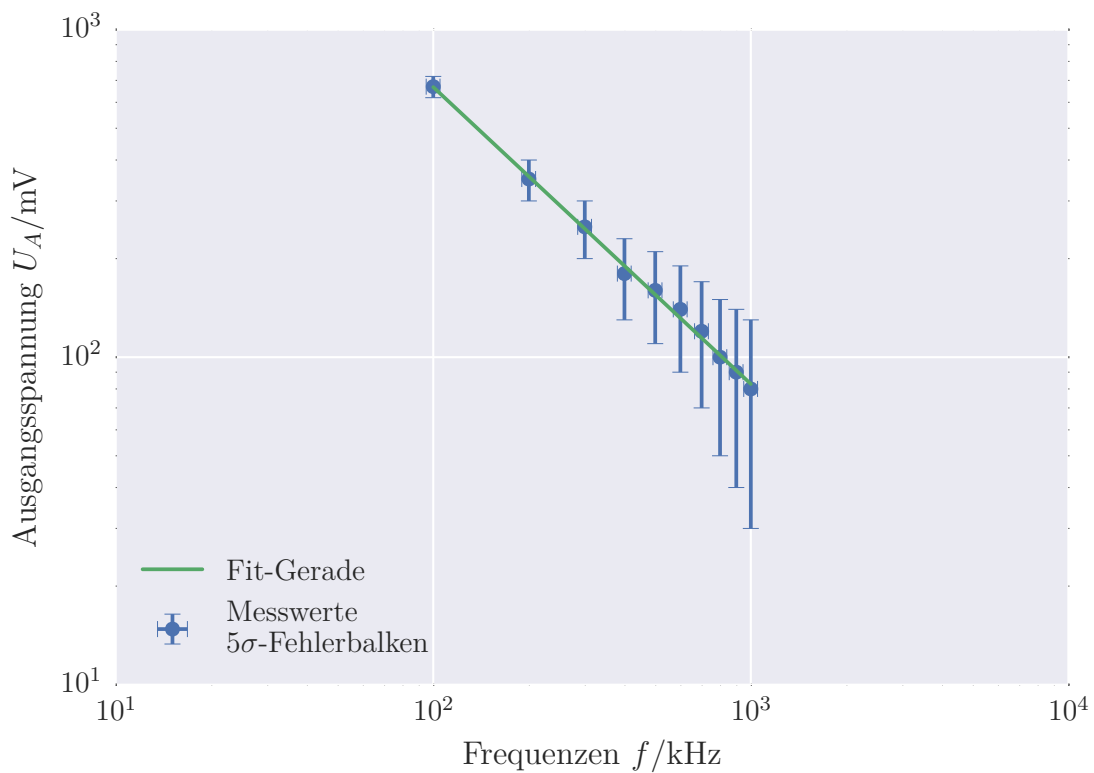


Abbildung 19: Doppellogarithmische Darstellung des Ausgangsspannung der Integratorschaltung in Abhängigkeit der Frequenz. Zusätzlich dargestellt ist eine in dieser Darstellung lineare Ausgleichskurve.

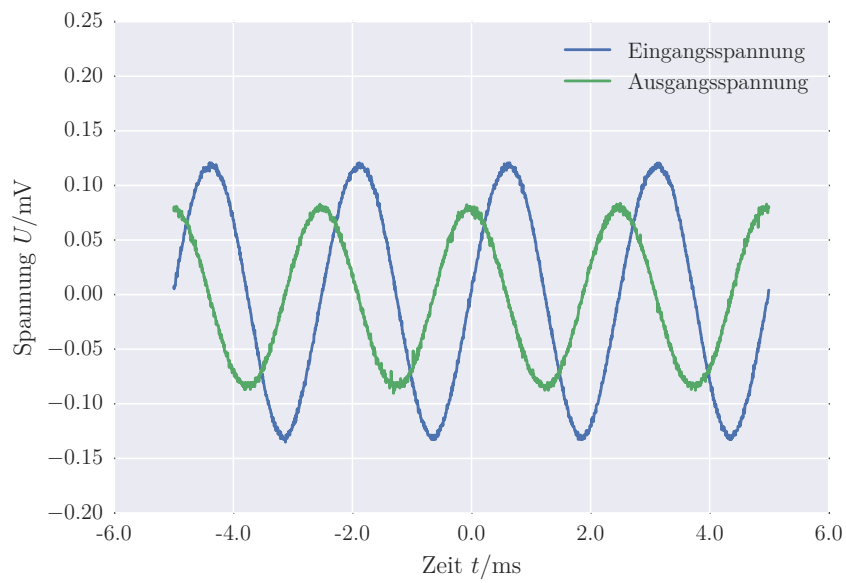


Abbildung 20: Vom Oszilloskop aufgenommene Ein- und Ausgangsspannungen der Integratorschaltung. Auf dem Eingang liegt hier eine Sinusspannung.

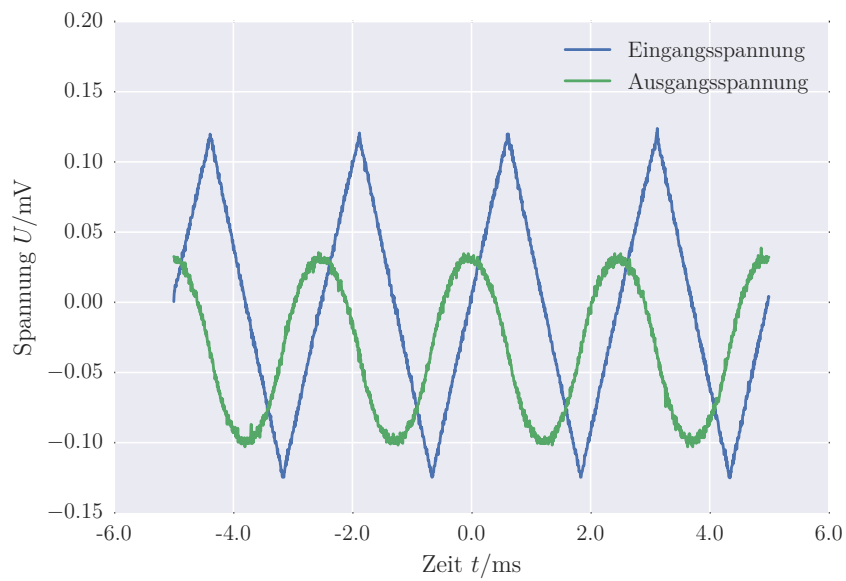


Abbildung 21: Vom Oszilloskop aufgenommene Ein- und Ausgangsspannungen der Integratorschaltung. Auf dem Eingang liegt hier eine Dreiecksspannung.

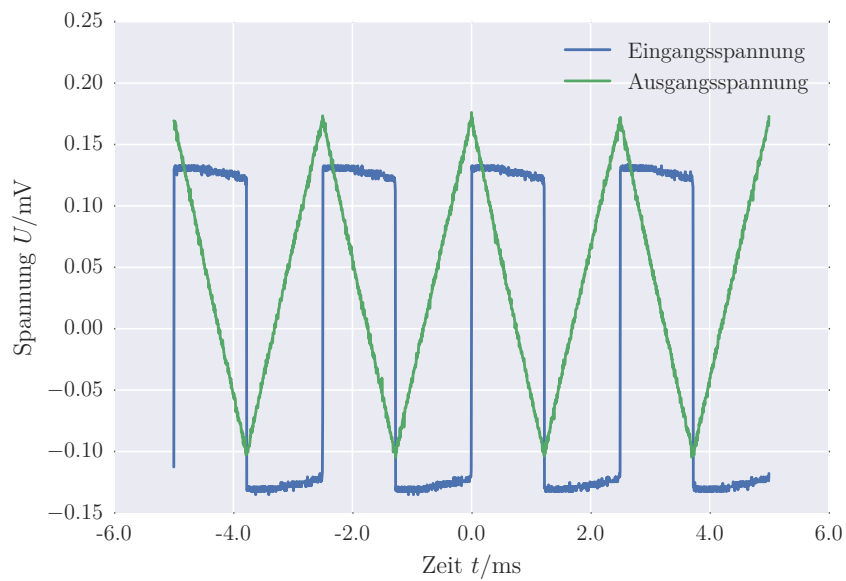


Abbildung 22: Vom Oszilloskop aufgenommene Ein- und Ausgangsspannungen der Integratorschaltung. Auf dem Eingang liegt hier eine Rechteckspannung.

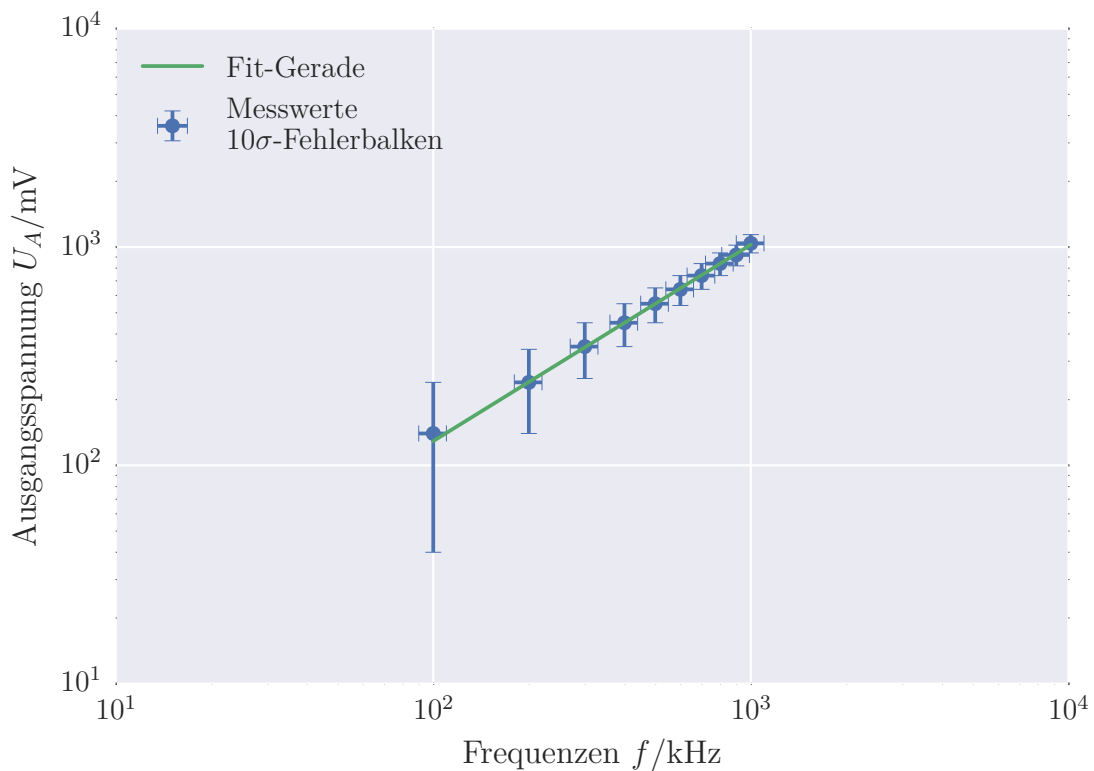


Abbildung 23: Doppellogarithmische Darstellung des Ausgangsspannung der Differentiatorschaltung in Abhängigkeit der Frequenz. Zusätzlich dargestellt ist eine in dieser Darstellung lineare Ausgleichskurve.

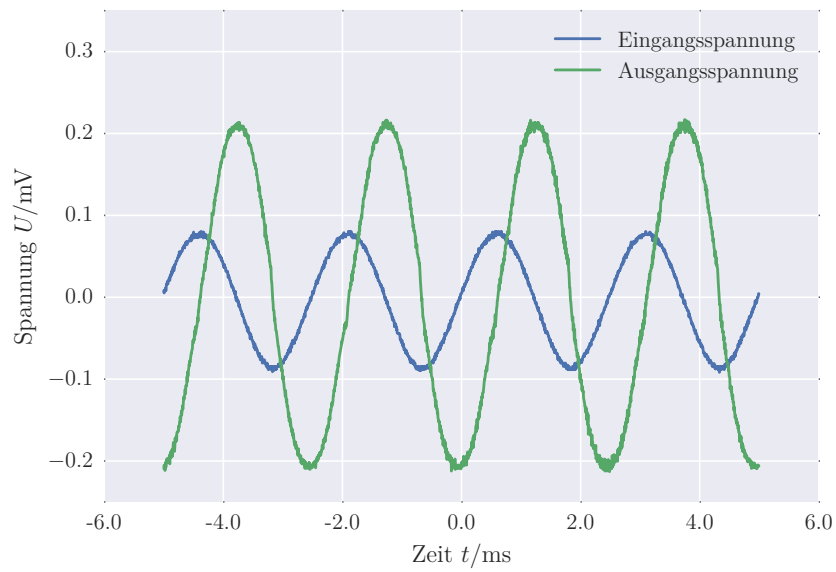


Abbildung 24: Vom Oszilloskop aufgenommene Ein- und Ausgangsspannungen der Differentiatorschaltung. Auf dem Eingang liegt hier eine Sinusspannung.

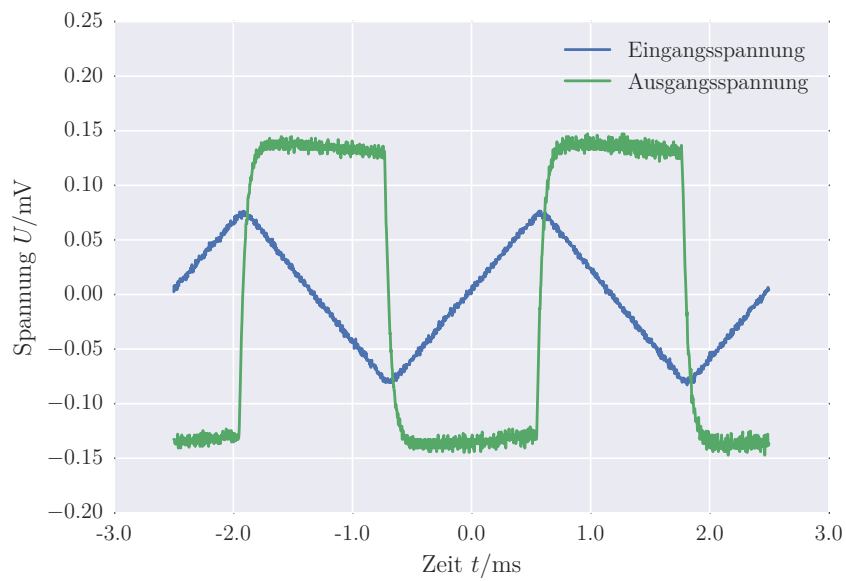


Abbildung 25: Vom Oszilloskop aufgenommene Ein- und Ausgangsspannungen der Differentiatorschaltung. Auf dem Eingang liegt hier eine Dreiecksspannung.

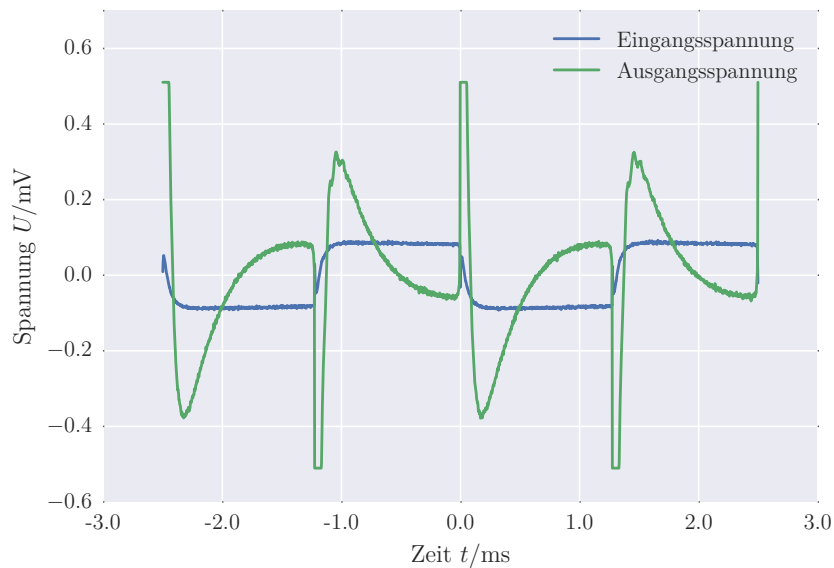


Abbildung 26: Vom Oszilloskop aufgenommene Ein- und Ausgangsspannungen der Differentiatorschaltung. Auf dem Eingang liegt hier eine Rechteckspannung.

5.4 Schmitt-Trigger

Die für den Aufbau der Schmitt-Trigger-Schaltung verwendeten Bauteile und aufgenommenen Messwerte hatten die folgenden Größen:

$$R_1 = (470,0 \pm 0,5) \, \Omega$$

$$R_P = (10\,000,0 \pm 1000,0) \, \Omega$$

$$U_K = (340,0 \pm 10,0) \, \text{mV}$$

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

$$U_B = \frac{U_A}{2}$$

Die gemessene Kippspannung des Schmitt-Triggers U_K weicht damit von dem nach Gleichung (19) theoretisch bestimmten Wert $U_{K,\text{theo}} = (0,66 \pm 0,01) \, \text{V}$ in etwa um 68 % ab.

5.5 Funktionsgenerator

Für den Aufbau der Schaltung wurden die folgenden Bauteile verwendet:

$$R = (560 \pm 6) \, \Omega \quad C = (1,00 \pm 0,01) \, \mu\text{F}$$

$$R_1 = (1000 \pm 10) \, \Omega \quad R_0 = (32,0 \pm 0,3) \, \text{k}\Omega$$

$$R_P = (100 \pm 1) \, \text{k}\Omega \quad R'_0 = (10,0 \pm 0,1) \, \text{k}\Omega$$

Die Schaltung wurde um die zwei Widerstände R_0 und R'_0 ergänzt, die sich so ergebene Schaltung ist in Abbildung 27 dargestellt.

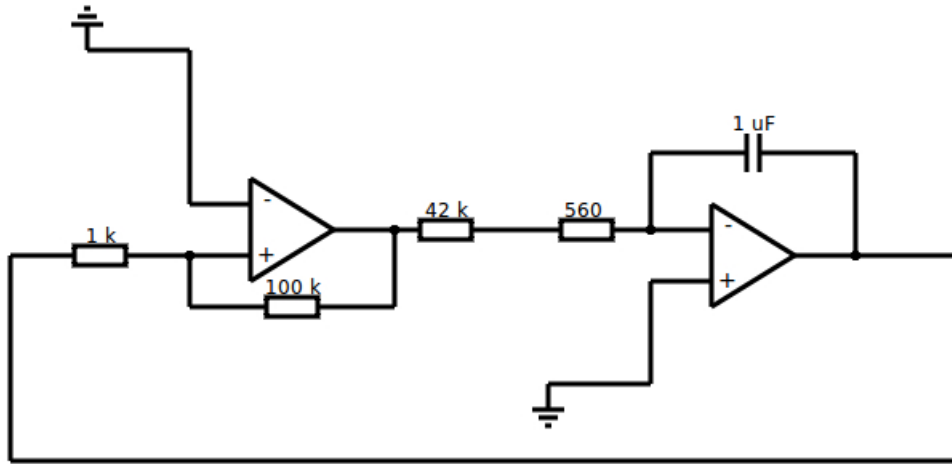


Abbildung 27: Die verwendete Schaltung eines Funktionsgenerators. Es wurden zwei zusätzliche Widerstände in Reihe (dargestellt ist nur die Summe beider Widerstände) geschaltet, um die Eingangsspannung des zweiten Operationsverstärkers zu verringern.

Die Frequenz und Amplitude der Rechteck- respektive Dreiecksspannung ergaben sich zu:

$$\begin{aligned} f_R &= (570 \pm 1) \text{ Hz} & f_D &= (570 \pm 1) \text{ Hz} \\ U_{A,R} &= (0,235 \pm 0,001) \text{ V} & U_{A,D} &= (0,165 \pm 0,001) \text{ V} \end{aligned}$$

Die theoretische Frequenz ergibt sich nach Gleichung (23) mit der Korrektur durch die beiden Widerstände R_0 und R'_0 zu

$$f_{R,theo} = f_{D,theo} = (587 \pm 11) \text{ Hz.} \quad (34)$$

Die Scheitelwerte der Spannungen ergeben sich ebenfalls nach Korrektur durch R_0 und R'_0 aus Gleichung (25) respektive Gleichung (26) zu

$$U_{A,R,theo} = (0,197 \pm 0,003) \text{ V} \quad (35)$$

$$U_{A,D,theo} = (0,150 \pm 0,002) \text{ V.} \quad (36)$$

Die Ausgangsspannungen des Funktionsgenerators, die mit Hilfe des Oszilloskops aufgenommen wurden sind in Abbildung 28 dargestellt.

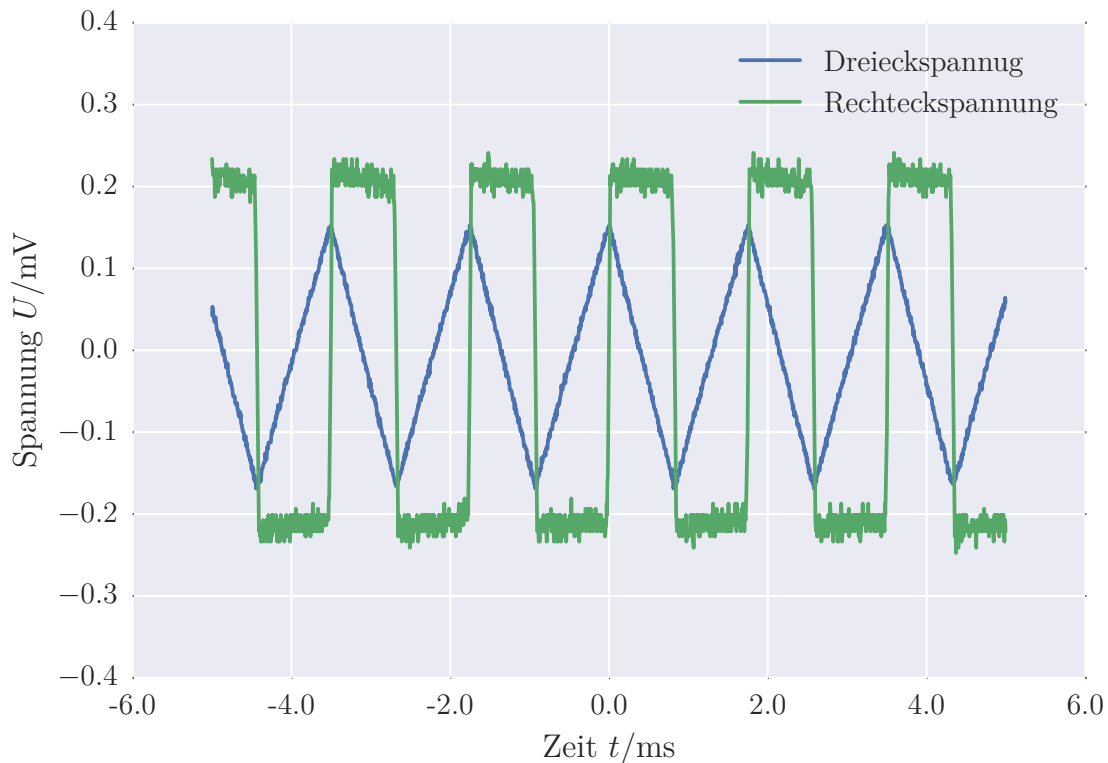


Abbildung 28: Vom Oszilloskop aufgenommene Rechteck- und Dreiecksspannung der Funktionsgeneratorschaltung.

6 Diskussion

Im Folgenden sollen die während des Versuchs aufgenommenen Messwerte und durch die Auswertungen erhaltenen Ergebnisse noch einmal auf abschließend diskutiert und auf Plausibilität hin überprüft werden.

Das aufgenommene Frequenzverhalten der Verstärkung der gegengekoppelten Verstärkerschaltungen kann als plausibel angesehen werden. In allen vier Messreihen ist ein eindeutiges Einbrechen der Verstärkung ab einer bestimmten Frequenz zu erkennen. Für die Schaltungen mit einem Widerstandsverhältnis ≥ 1 weist der Mittelwert der gemessenen maximalen Verstärkung nur sehr geringe Abweichungen (7% respektive 0,5%) zur theoretischen Verstärkung auf. Bei den übrigen Schaltungen mit einem Widerstandsverhältnis < 1 weichen dies stark ab. Dieses Verhalten ist durch ein gegeneinander Arbeiten der Leerlaufverstärkung und der Dämpfung durch das gegeben Widerstandsverhältnis zu begründen. Ein ähnliches Verhalten lässt sich bei den berechneten Verstärkung-Bandbreite-Produkten beobachten, diese stimmen nicht miteinander überein (obwohl diese konstant sein sollten), liegen jedoch, mit Ausnahme einer Messung, in der selben Größenordnung. Die Abweichende Messung ist auch hier diejenige mit dem geringsten Widerstandsverhältnis und entsprechend der größten Dämpfung.

Aus den abgeschätzten Leerlaufverstärkungen lässt sich erkennen, dass die vierte Schaltung die Bedingung $R_N/R_1 \ll V$ am besten erfüllt.

Die Amperemeterschaltung lieferte wie zu erwarten ein mit zunehmender Frequenz abnehmende Verstärkung und ein entsprechende Zunahme des Eingangswiderstands. Ferner stimmen die theoretisch berechneten Ausgangsspannungen mit zunächst geringen Fehlern $< 10\%$ mit der gemessenen überein. Für höhere Frequenzen lässt sich eine Zunahme dieser Abweichung beobachten. Der Grund für diese Beobachtung liegt in der mit zu nehmender Frequenz schlechter erfüllten Bedingung $R_V \gg r_e$, welche erfüllt sein muss, damit r_e nur von dem Strom und der Eingangsspannung abhängt.

Sowohl die Integrator- als auch die Differentiatorschaltung liefern Ausgangsspannungen, die der Theorie entsprechend anti-proportional respektive proportional zur Frequenz der Eingangsspannung sind. Wiederum beider Schaltungen erfüllen ihre Aufgaben vollständig im betrachteten Frequenzbereich. Entsprechend sind die jeweiligen Ausgangsspannungen für die drei unterschiedlichen Eingangsspannungen (Sinus, Rechteck, Dreieck) mit den zeitlich integrierten respektive differenzieren Verläufen dieser Spannungen zu identifizieren. Lediglich die Differenzierung der Rechteckspannung ist mit realen Schaltungen nur schwerlich zu bewerkstelligen, da die entsprechende Ausgangsspannung einem Delta-Kamm entspräche, dessen unendliche Höhe und infinitesimale Breite der Peaks durch reale schaltungen nicht geliefert werden können. In Abbildung 26 ist jedoch im Ansatz hohe und schmale Peaks zu erkennen, die einem Delta-Kamm ähneln. Ferner lassen sich auch Effekte erkennen, die durch die reale Elektronik erzeugt werden so zum Beispiel die Relaxation der Ausgangsspannung von einem Peak zur Null und die Auswirkung des Peaks in der Ausgangsspannung auf die Eingangsspannung.

Durch Anwendung der notwendigen Korrekturen durch die beiden zusätzlichen Widerstände ergibt sich, dass die gemessene Frequenzen der erzeugten Spannungen des Funktionsgenerators mit einer ungefähren Abweichung von 3% dem theoretischen Wert entspricht. Und auch die gemessenen Amplituden der Spannungen weisen Abweichungen von 19% (Rechteck) und 10% (Dreieck) auf.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass trotz einiger Problem in der Durchführung des Versuch und im Umgang mit den verwendeten Schaltungen die erhaltenen Ergebnisse als plausibel zu bewerten sind.

Literatur

- [1] Bärbel Sigmann. *Versuchsanleitung. Der Operationsverstärker*. URL: <http://129.217.224.2/HOMEPAGE/PHYSIKER/MASTER/SKRIPT/V51.pdf> (besucht am 23.05.2016).
- [2] SciPy developers. *SciPy*. URL: <http://docs.scipy.org/doc/> (besucht am 16.02.2015).