

Versuch V06: Grundsaltungen mit Operationsverstärkern

Henri Menke* und Jan Trautwein†
Gruppe 1-11 — Platz k
(Betreuer: Kim Kafenda)
(Datum: 25. November 2013)

Im Versuch werden die Eigenschaften und typischen Schaltungen von Operationsverstärkern untersucht. Es werden die Verstärkungen der verschiedenen Typen gemessen und mit den theoretischen Werten verglichen. Ein Schmitt-Trigger wird ebenfalls betrachtet und dessen Schalthysterese untersucht.

INHALT

I. Grundlagen	1
A. Operationsverstärker	1
B. Anwendungen	1
1. Invertierender Operationsverstärker	1
2. Der Summationsverstärker	2
3. Der Differenzverstärker	2
4. Der nichtinvertierende Operationsverstärker (Elektrometerverstärker)	2
5. Schmitt-Trigger	3
II. Versuchsaufbau und -durchführung	3
A. Invertierender Verstärker	3
B. Schmitt-Trigger	3
C. Differenz- und Summationsverstärker	3
D. Nichtinvertierender Verstärker	3
III. Formeln	4
IV. Messwerte	4
V. Auswertung	4
A. Invertierender Verstärker	4
B. Schmitt-Trigger	5
C. Differenz- und Summationsverstärker	6
D. Nichtinvertierender Verstärker	6
VI. Fehlerrechnung	7
VII. Zusammenfassung	7
Literatur	8

I. GRUNDLAGEN

A. Operationsverstärker

Als Operationsverstärker (engl.: *operational amplifier*, OpAmp) wird ein integrierter Schaltkreis bezeichnet, der beliebige Eingangsspannungen verstärken kann. Das

* henrimenke@gmail.com

† jan.manuel.trautwein@web.de

Schaltbild eines Operationsverstärkers ist in Abbildung 1 dargestellt.

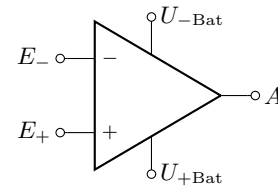


ABB. 1. Schaltbild eines idealen Operationsverstärkers.

Der Operationsverstärker in Abbildung 1 besitzt einen invertierenden Eingang E_- , einen nichtinvertierenden Eingang E_+ und einen Ausgang A . Zudem besitzt er die Versorgungsleitungen U_{-Bat} und U_{+Bat} .

Die Differenz der an E_- und E_+ anliegenden Spannungen wird vom Operationsverstärker nach dem Muster verstärkt, dass

$$\begin{pmatrix} E_+ \\ E_- \end{pmatrix} \rightarrow U_A = \begin{cases} U_{+Bat} & \text{für } E_+ > E_- \\ \frac{1}{2}(U_{+Bat} + U_{-Bat}) & \text{für } E_+ = E_- \\ U_{-Bat} & \text{für } E_+ < E_- \end{cases}$$

Für einen idealen Operationsverstärker gilt dabei, dass $U_{\pm Bat} = \pm\infty$. Zudem gelten zwei weitere Bedingungen:

1. Der Widerstand beider Eingänge ist unendlich, d. h. es fließt kein Strom in den Eingängen.
2. Der Widerstand des Ausgangs ist null, d. h. die Ausgangsspannung ist unabhängig vom Lastwiderstand.

In Abbildung 2 liegt E_+ auf Masse und E_- bildet aufgrund von $E_+ = E_- = 0$ einen *virtuellen Massepunkt*.

B. Anwendungen

1. Invertierender Operationsverstärker

Die einfachste Anwendung des Operationsverstärkers ist der Umkehrverstärker oder invertierender Operationsverstärker. Eine Schaltskizze ist in Abbildung 2 zu sehen. Für den Eingangswiderstand R_1 gilt

$$R_1 = \frac{U_E}{I_E}$$

Für die Ausgangsspannungen gilt wegen der Eigenschaften 1 und 2 und der Beschaltung mit Gegenkopplung

$$U_A = -U_E \frac{R_N}{R_1}$$

Die Verstärkung beträgt somit

$$V = -\frac{R_N}{R_1}$$

Dabei stellt R_1 einen Spannungs-Strom-Wandler und die restliche Schaltung eine Strom-Spannungs-Wandler dar.

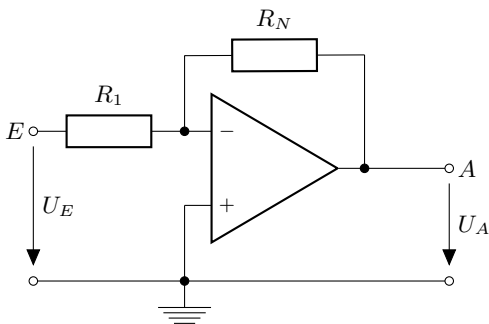


ABB. 2. Schaltbild eines invertierenden Operationsverstärkers.

2. Der Summationsverstärker

Legt man an den invertierenden Eingang eine zusätzliche Eingangsspannung an, so ergibt sich der Umkehraddierer oder auch Summationsverstärker, wie er in Abbildung 3 abgebildet ist.

Für die Ausgangsspannung gilt hier

$$U_A = -R_N \sum_i \frac{U_{E_i}}{R_i}$$

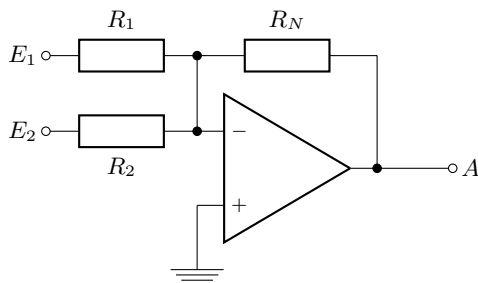


ABB. 3. Schaltbild eines Operationsverstärkers als Summationsverstärker.

3. Der Differenzverstärker

Im Schaltbild in Abbildung 4 ist ein Subtrahierer oder Differenzverstärker abgebildet.

Um mit einem Operationsverstärker zwei Spannungen voneinander zu subtrahieren muss zur Eingangsspannung am invertierenden Eingang E_- zusätzlich eine Spannung am nichtinvertierenden Eingang E_+ angelegt werden. Da immer noch gilt $E_+ = E_-$ verliert E_- seine Eigenschaft als virtueller Massepunkt.

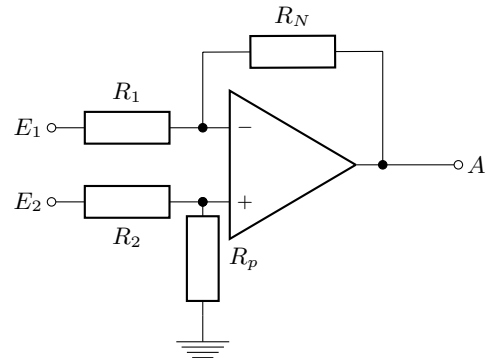


ABB. 4. Schaltbild eines Operationsverstärkers als Differenzverstärker.

Für seine Ausgangsspannung gilt

$$U_A = -U_{E_1} \cdot \frac{R_N}{R_1} + U_{E_2} \cdot \frac{R_p \cdot (R_N + R_1)}{R_1 \cdot (R_p + R_2)}$$

4. Der nichtinvertierende Operationsverstärker (Elektrometerverstärker)

In Abbildung 5 ist der nichtinvertierende Operationsverstärker oder Elektrometerverstärker abgebildet.

Im Gegensatz zu den anderen Verstärkern ändert er das Vorzeichen der Spannung nicht, außerdem ist sein Eingangswiderstand unendlich (idealisiert).

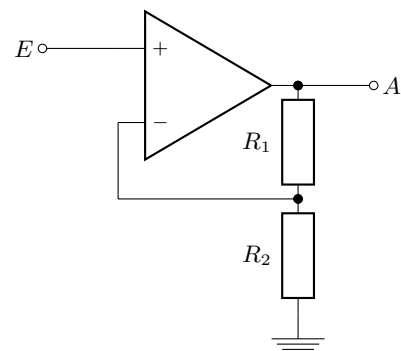


ABB. 5. Schaltbild eines Operationsverstärkers als nichtinvertierender Verstärker.

Die Ausgangsspannung ist wegen $U_{E_+} = U_{E_-} = U_E$

gegeben durch

$$U_A = \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) U_E$$

5. Schmitt-Trigger

Vertauscht man beim invertierenden Operationsverstärker einfach die beiden Eingänge, so erhält man eine positive Rückkopplung. Dies ist bekannt als Schmitt-Trigger; ein Schaltbild ist in Abbildung 6 zu sehen.

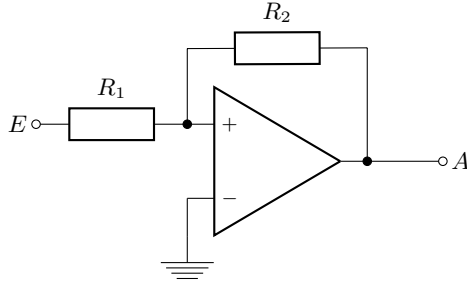


ABB. 6. Schaltbild eines Operationsverstärkers als Schmitt-Trigger.

Der Schmitt-Trigger wirkt als Schwellwertschalter, da er solange die Ausgangsspannung $U_A = U_{-Bat}$ liefert, bis die Schwellspannung U_{S+} von U_E überschritten wird, springt dann auf $U_A = U_{+Bat}$ und liefert dies solange bis U_E kleiner als U_{S-} wird.

Diese Schwellspannungen sind

$$U_{S+} = U_{+Bat} \frac{R_1}{R_2}$$

$$U_{S-} = U_{-Bat} \frac{R_1}{R_2}$$

II. VERSUCHSAUFBAU UND -DURCHFÜHRUNG

Der Versuch besteht aus mehreren Teilen. Zuerst wird der invertierende Verstärker und Schmitt-Trigger untersucht, dann der Differenz- und Summationsverstärker. Zum Schluss wird noch der nichtinvertierende Verstärker untersucht.

A. Invertierender Verstärker

Der invertierenden Verstärker wird nach ABB. 2 aufgebaut. Es werden folgende Widerstände verwendet: $R_N = 10\text{ k}\Omega$ und $R_1 = 1\text{ k}\Omega$. Als Betriebsspannungen U_{\pm} für den Operationsverstärker dienen die Anschlüsse auf dem Steckbrett, diese haben $+15\text{ V}$ und -15 V . Alle Messungen werden mit LabVIEW erfasst.

Es soll die Gleichspannungsverstärkung gemessen werden, dazu wird die Eingangsspannung U_E von 0 V soweit hochgefahren, bis die Ausgangsspannung U_A gleich der Betriebsspannung ist. Die Spannung U_- wird währenddessen mit dem Handmultimeter gemessen. Nun wird der Rückkopplungswiderstand R_N entfernt und die Messung erneut durchgeführt. Für die nächste Messung werden andere Widerstände eingesetzt, $R_N = \Omega$ und $R_1 = \Omega$. Eine weitere Messung wird vorgenommen wenn der Eingang E_+ des OpAmp offen gelassen wird.

B. Schmitt-Trigger

Um einen Schmitt-Trigger zu bekommen, werden die beiden Eingänge vertauscht, sodass man die Schaltung nach ABB. 6 erhält. Der Eingang E wird mit dem Frequenzgenerator verbunden. Dort wird eine 100 Hz -Dreiecksspannung mit einer Peak-to-Peak-Amplitude von $U_{Vpp} = 2\text{ V}$ eingestellt. Über eine BNC-Stück wird die Eingangsspannung außerdem mit Kanal 1 des Oszilloskops verbunden. Die Ausgangsspannung wird mit Kanal 2 des Oszilloskops verbunden.

Die Ausgangspegel und die Schaltschwelle wird mit Hilfe der Cursorfunktion des Oszilloskops ermittelt. Mit LabVIEW und der `oszisnapshot.vi` wird ein Diagramm der Ausgangsspannung U_A über der Eingangsspannung U_E aufgenommen. Nun wird der Widerstand R_1 zu $R_1 = 3.3\text{ k}\Omega$ geändert und $U_{Vpp} = 5\text{ V}$ und das Diagramm erneut aufgenommen.

C. Differenz- und Summationsverstärker

Der Differenzverstärker wird nach ABB. 4 aufgebaut, dabei sind $R_1 = R_2 = R_p = 10\text{ }\Omega$ und $R_N = 22\text{ }\Omega$.

Es soll die Ausgangsspannung in Abhängigkeit von der Eingangsspannung für beide Eingänge getrennt gemessen werden. Dazu wird zunächst der Eingang E_2 auf Masse gelegt und anschließend E_1 . Mit LabVIEW werden die Messungen aufgenommen. Dabei läuft die Eingangsspannung erneut von 0 V soweit hochgefahren, bis der OpAmp in Sättigung geht.

Nun wird einmal an beiden Eingängen die gleiche Spannung $U_{E1} = U_{E2} = U_E$ angelegt und einmal $U_{E1} = -U_{E2} = U_E$, es wird erneut gemessen.

Die vorliegende Schaltung wird leicht modifiziert, sodass man einen Summationsverstärker erhält (siehe ABB. 12). Die Messung der Ausgangsspannung über der Eingangsspannung erfolgt mit demselben LabVIEW-Programm.

D. Nichtinvertierender Verstärker

Der nichtinvertierende Verstärker wird nach ABB. 5 aufgebaut. Dabei ist $R_2 = 220\text{ }\Omega$. R_1 wird so gewählt, dass eine Verstärkung von 10 entsteht.

Mit LabVIEW wird die Ausgangsspannung in Abhängigkeit der Eingangsspannung gemessen.

Schlussendlich wird noch durch Strom- und Spannungsmessung der Eingangswiderstand des OpAmp bestimmt.

III. FORMELN

Die folgenden Zeichen und Einheiten wurden im Weiteren verwendet

- V ohne Einheit: Verstärkung
 - Index inv : des invertierenden Verstärkers.
 - Index \pm : des (nicht)invertierenden Eingangs des Differenzverstärkers.
 - Index el : des Elektrometerverstärkers.
- R in Ohm (Ω): Widerstand
 - Index N : Rückkopplungswiderstand
 - Index i : ein Beschaltungswiderstand
 - Index P : Beschaltungswiderstand vor Masse beim Differenzverstärker
- U in Volt (V): Spannung
 - Index \pm : positive und negative Betriebsspannung des OpAmps
 - Index A : Ausgangsspannung des OpAmps
 - Index E_i : Eingangsspannung an Eingang E_I
 - Index S_{\pm} : positive und negative Schaltschwelle des Schmitt-Triggers

Invertierender Verstärker: Die Verstärkung eines invertierenden Verstärkers berechnet sich nach:

$$V_{inv} = -\frac{R_N}{R_1} = \frac{U_A}{U_E} \quad (1)$$

Schmitt-Trigger: Für die Berechnung der Schaltschwellen des Schmitt-Triggers gilt:

$$U_{S_+} = U_+ \cdot \frac{R_1}{R_2} \quad (2)$$

und

$$U_{S_-} = U_- \cdot \frac{R_1}{R_2} \quad (3)$$

dabei ist $U_{S_+} > 0\text{ V}$ und $U_{S_-} < 0\text{ V}$.

Differenzverstärker: Die Ausgangsspannung des Differenzverstärkers ist wie folgt zu berechnen:

$$U_A = -U_{E_1} \cdot \frac{R_N}{R_1} + U_{E_2} \cdot \frac{R_P(R_N + R_1)}{R_1(R_P + R_2)} \quad (4)$$

Beim Summationsverstärker gilt für die Ausgangsspannung:

$$U_A = -R_N \cdot \sum_{i=1}^n \frac{U_{E_i}}{R_i} \quad (5)$$

Nichtinvertierender Verstärker: Die Ausgangsspannung des nichtinvertierenden Verstärkers berechnet sich nach:

$$U_A = \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) \cdot U_E \quad (6)$$

für seine Verstärkung gilt somit

$$V_{el} = 1 + \frac{R_1}{R_2} \quad (7)$$

IV. MESSWERTE

Beim *invertierenden Verstärker* wurde im Bereich $U_E = 0\text{ V}, \dots, 1.413\text{ V}$ gemessen. Ohne Gegenkopplungswiderstand wurde eine Ausgangsspannung von $U_A = -14.144\text{ V}$ gemessen. Der Gegenkopplungswiderstand für eine bestimmte Verstärkung kann berechnet werden mittels

$$R_N = R_1 \cdot 10^{V/20},$$

wobei V die Verstärkung in dB ist.

Für den *Schmitt-Trigger* wurde am Oszilloskop eine Peak-to-Peak-Spannung von $U_{Vpp} = 28.6\text{ V}$, eine Effektivspannung von $U_{eff} = 14.2\text{ V}$ und mit der Cursorfunktion die Schaltschwellen bei $U_{S_{\pm}} = \pm 1.46\text{ V}$ abgelesen. Für eine weitere Messung wurde R_1 variiert zu $R_1 = 3.3\text{ k}\Omega$.

V. AUSWERTUNG

A. Invertierender Verstärker

In ABB. 7 wurde die Ausgangsspannung U_A gegen die Eingangsspannung U_E geplottet. Es ist deutlich der

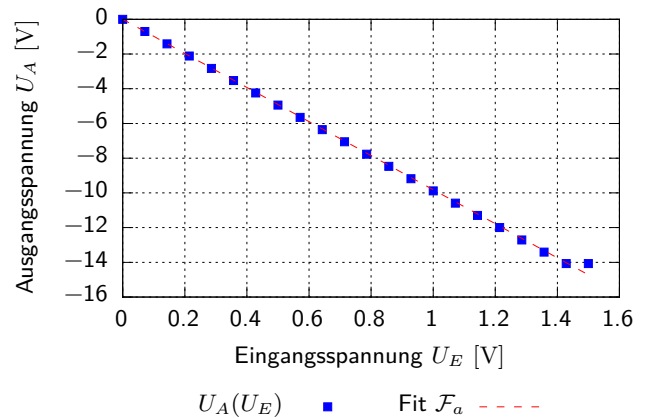


ABB. 7. Gleichspannungsverstärkung des invertierenden Operationsverstärkers.

lineare Zusammenhang zu sehen. Der lineare Fit

$$\mathcal{F}_a(x) = a \cdot x$$

liefert für die Steigung den Wert $a = -9.813$, dieser stimmt bis auf eine relative Abweichung von ca. 1.9% genau mit der theoretisch berechneten Verstärkung überein:

$$V_{\text{inv}} = -\frac{R_N}{R_1} = \frac{-10 \text{ kV}}{1 \text{ kV}} = -10 \quad (8)$$

Ab einer Eingangsspannung von ca. 1.4 V, steigt die Ausgangsspannung auf Grund der *Over-Voltage-Protection* nicht weiter an. Von da an ist die Ausgangsspannung konstant $U_A = 14.1 \text{ V}$. Dies liegt daran, dass der OpAmp mit einer Sättigungsspannung von $U = 15 \text{ V}$ betrieben wird. Wäre die Betriebsspannung höher, so würde auch die Eingangsspannung weiter linear verstärkt werden. Die Messung von U_- mit dem Handmultimeter ergibt einen leicht fluktuierenden Wert von $U_- \approx 0 \text{ V}$, solange bis der OpAmp in Sättigung gelangt, dann steigt U_- an. In diesem Bereich ist U_- also unabhängig von der Eingangsspannung U_E , es liegt ein *virtueller Massepunkt* vor.

Wird der Gegenkopplungswiderstand entfernt, so misst man sofort eine Ausgangsspannung von $U_A = -14.144 \text{ V} \approx 15 \text{ V}$. Es wird also bis zur Betriebsspannung verstärkt. Dies liegt daran, dass die Rückkopplung dafür gesorgt hat, dass an den beiden Eingängen dasselbe Potential herrscht. Ist dies nicht mehr möglich, so ist U_- kein virtueller Massepunkt mehr und die Potentialdifferenz wird „unendlich“ (bis zur Betriebsspannung) verstärkt.

Wird der Eingang E_+ des OpAmp offen gelassen, so erhält man folgendes Diagramm: Die Ausgangsspannung

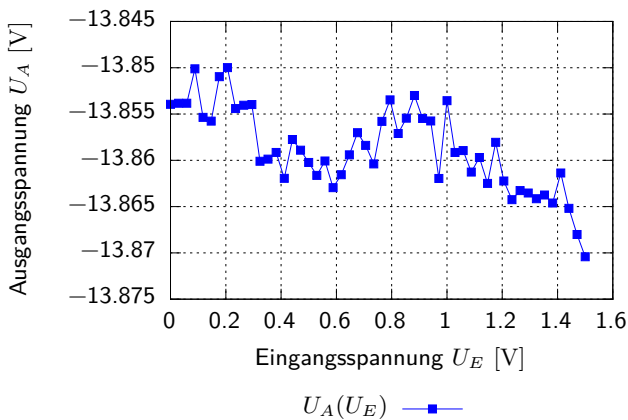


ABB. 8. Gleichspannungsverstärkung des invertierenden Operationsverstärkers bei offenem E_+ -Kanal.

fluktuiert in der Nähe der Betriebsspannung.

Durch bloßes Vertauschen der Eingänge lässt sich *kein* nichtinvertierender Verstärker aufbauen. Das liegt daran, dass so der Ausgang mit dem positiven Eingang E_+ rückgekoppelt wäre, da aber der Ausgang ebenfalls eine positive Spannung liefert, ist es nicht möglich die Potentialdifferenz zwischen E_+ und E_- auszugleichen. Somit würde sofort die maximale Verstärkung erreicht werden. Eine solche Schaltung wird Schmitt-Trigger genannt.

B. Schmitt-Trigger

Wird an den Schmitt-Trigger eine 100 Hz-Dreiecksspannung angelegt erhält man für unterschiedliche R_1 -Werte die Diagramme in ABB. 9 und 10. Wie in den

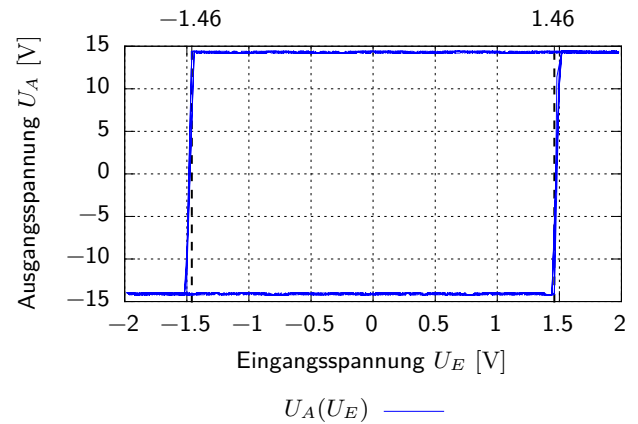


ABB. 9. Hysteresis-Kurve des Schmitt-Triggers bei $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 10 \text{ k}\Omega$ und $U_{Vpp} = 2 \text{ V}$.

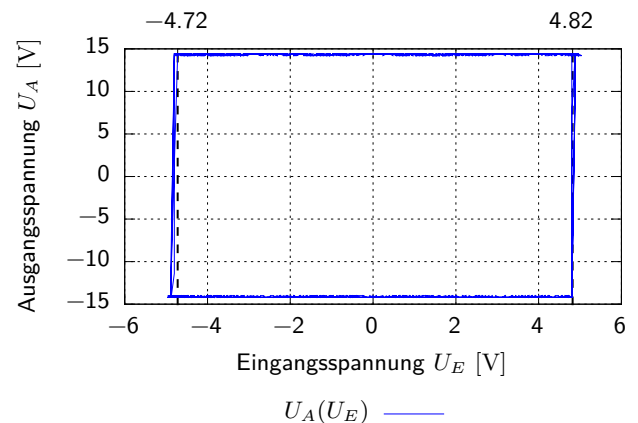


ABB. 10. Hysteresis-Kurve des Schmitt-Triggers bei $R_1 = 3.3 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 10 \text{ k}\Omega$ und $U_{Vpp} = 5 \text{ V}$.

ABB. 9 und 10 zu sehen ist, besitzt der Schmitt-Trigger die Eigenschaft, ab einer bestimmten Eingangsspannung direkt auf die maximal zu erreichende Spannung zu springen (Schwellwertschalter). Es gibt eine positive und negative Schwellspannung mit gleichem Betrag, die Ausgangsspannung springt beim Überschreiten auf die positive bzw. negative Betriebsspannung. Auch zu erkennen ist, dass mit größerem Widerstand R_1 die Schwellspannung anwächst.

Die mit dem Cursor des Oszilloskops abgelesenen Ausgangspegel betragen 14.3 V und die Schwellspannungen $U_{S_{\pm}} = \pm 1.46 \text{ V}$. Über Formel (2) und (3) berechnen sich die Schwellspannungen zu $U_{S_{\pm}} = \pm 999 \text{ V}$.

C. Differenz- und Summationsverstärker

In ABB. 11 sieht man die Abhängigkeit der Ausgangsspannung von der Eingangsspannung für $E_1 = \text{GND}$, $E_2 = \text{GND}$, $E_1 = E_2$ und $E_1 = -E_2$. An die Messwerte wurde jeweils eine Ursprungsgerade gefittet mit

$$\mathcal{F}_a(x) = a \cdot x.$$

In Tabelle I sind die nach Formel 4 theoretisch berechneten Werte der Verstärkung und die durch das Plotprogramm ausgegebenen Verstärkungen (Steigung der Fitgeraden) aufgelistet. Ist einer der beiden Eingänge auf

	Fit	berechnet
$E_1 = \text{GND}$	1.642	1.6
$E_2 = \text{GND}$	-2.306	-2.2
$E_1 = E_2$	-0.657	-0.6
$E_1 = -E_2$	-3.963	-3.8

TAB. I. Vergleich zwischen den gemessenen Verstärkungen und den theoretisch berechneten.

Masse gesetzt so lassen sich die Formeln

$$V_{E_1} = -\frac{R_N}{R_1}$$

und

$$V_{E_2} = \frac{R_P(R_N + R_1)}{R_1(R_P + R_2)}$$

nach R_1 bzw. R_2 auflösen. Mit der gemessenen Verstärkung berechnet man für die Eingangswiderstände:

$$R_1 = -\frac{22 \text{ k}\Omega}{-2.306} = 9.54 \text{ k}\Omega$$

und

$$R_2 = \frac{R_P(R_N + R_1)}{V_{E_2} \cdot R_1} - R_P = 12.47 \text{ k}\Omega$$

Wird die Schaltung zu einem Summationsverstärker umgebaut und die Eingangsspannungen $E_1 = -E_2$ angelegt, so erhält man ABB. 12. Beachtet man die Skala der y -Achse, so erkennt man, dass die Ausgangsspannung im Wesentlichen verschwindet. Dies stimmt mit den Erwartungen überein. Der Grund für das leichte Ansteigen der Ausgangsspannung ist die nicht verschwindende Gleichtaktverstärkung.

Da wir den Summationsverstärker nicht mit $E_1 \neq -E_2$ gemessen haben, ist es nicht möglich dessen Verstärkung auszurechnen.

D. Nichtinvertierender Verstärker

Nach Formel (7) berechnet sich für eine Verstärkung von $V = 10$ der Widerstand R_1 zu

$$R_1 = (V - 1)R_2 = (10 - 1)220 \Omega = 1980 \Omega$$

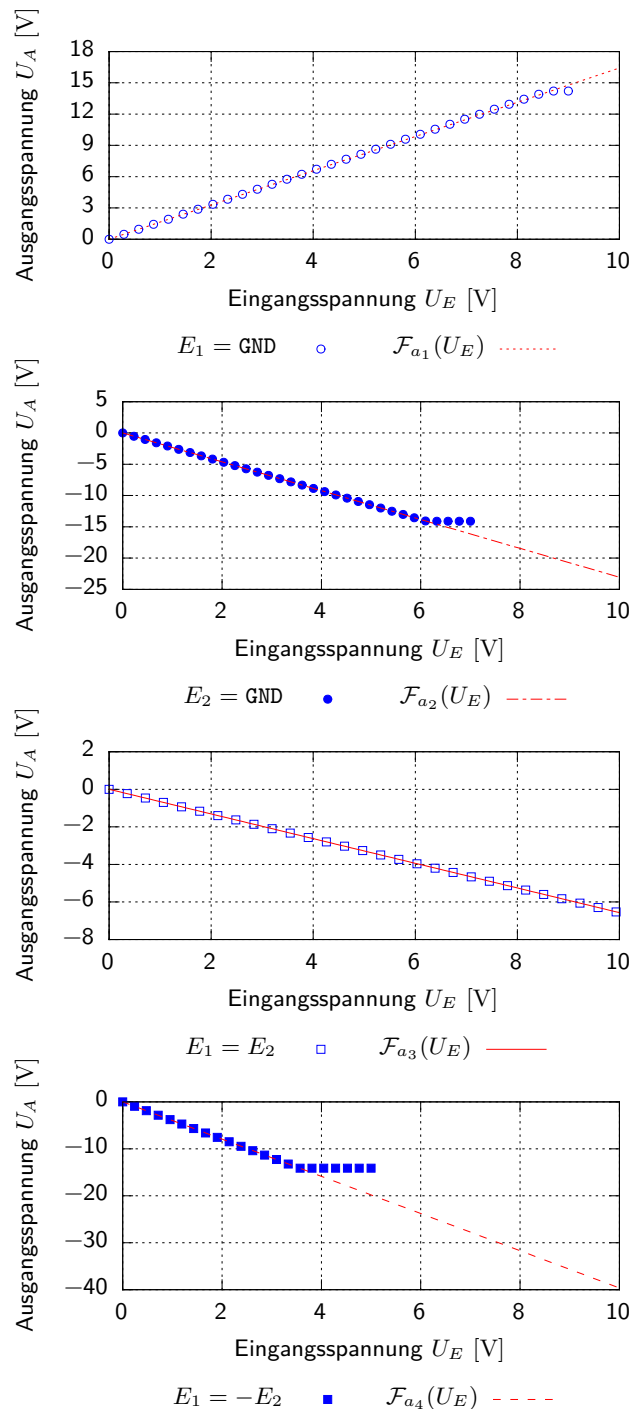


ABB. 11. Gleichspannungsverstärkung des Differenzverstärkers abhängig von der Beschaltung der Eingänge.

Der Widerstand wird mit Hilfe einer Widerstandsdekade realisiert. In ABB. 13 ist die Ausgangsspannung in Abhängigkeit der Eingangsspannung aufgetragen. Der Fit liefert für die positive Gleichspannungsverstärkung den Wert $V = 9.985$, welcher gut mit dem theoretischen Wert übereinstimmt.

Um den Eingangswiderstand zu messen, wird ein Strom-

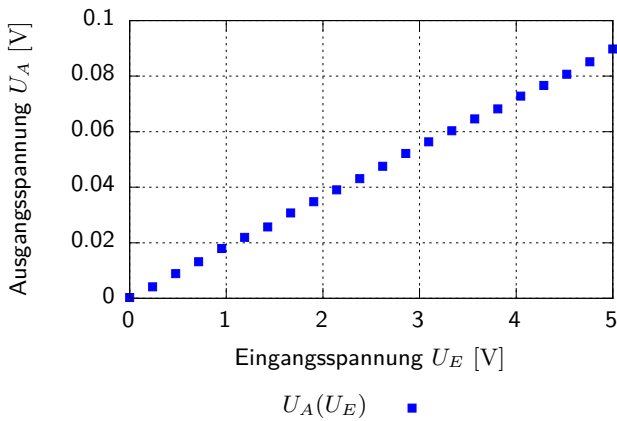


ABB. 12. Gleichspannungsverstärkung des Summationsverstärkers bei $E_1 = -E_2$.

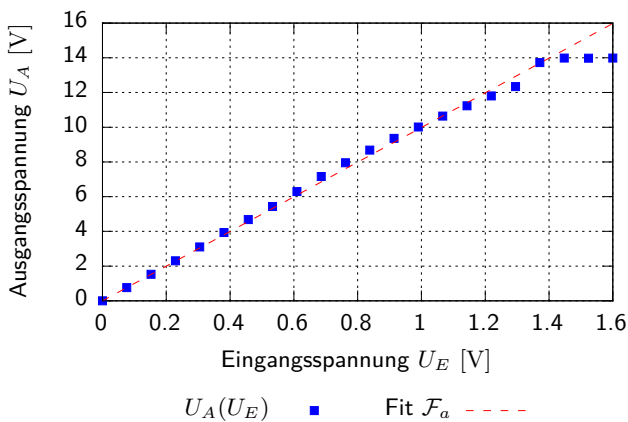


ABB. 13. Gleichspannungsverstärkung des nicht invertierenden Verstärkers.

messgerät von den Eingang geschaltet. Über die Eingangsspannung aufgetragen erhält man den Plot in Abbildung 14. Es fließt so gut wie kein Strom, der Strom fluktuiert um die Null im μA -Bereich. Somit ist der Widerstand sehr groß, für unsere Messwerte liegt er im Bereich einiger Megaohm. Da diese Beschaltung des OpAmp wie ein Elektroskop zur Spannungsmessung verwendet werden kann und ebenfalls einen sehr hohen Eingangswiderstand hat, spricht man auch von einem Elektrometerverstärker.

VI. FEHLERRECHNUNG

Da für den Versuch professionelle Messgeräte verwendet wurden, sind in Gewicht fallende Fehlerquellen weitgehend auszuschließen. Zu beachten ist jedoch, dass für den Versuch der Operationsverstärker als ideal angenommen wurde. Da sämtliche theoretischen Werte unter dieser Voraussetzung berechnet wurden, kann nicht exakt der tatsächliche Wert bestimmt werden.

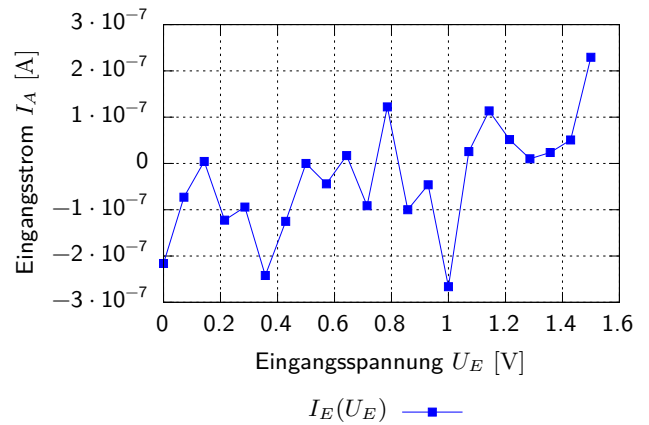


ABB. 14. Eingangsstrom des nicht invertierenden Verstärkers.

Invertierender Verstärker: Theoretisch ergibt sich $\hat{V} = -10$, aus der Messung haben wir erhalten $V = -9.813$. Die relative Abweichung beträgt also

$$Q[\hat{V}, V] = \frac{-10 - (-9.813)}{-10} = 1.9\%$$

Differenzverstärker: Der Differenzverstärker wurde in verschiedenen Regimes vermessen: $E_1 = \text{GND}$, $E_2 = \text{GND}$, $E_1 = E_2$ und $E_1 = -E_2$, die zugehörigen Werte sind in Tabelle I dargestellt. Es wird jeweils die relative Abweichung vom theoretisch berechneten Wert ermittelt.

$$Q[\hat{V}_{E_1=\text{GND}}, V_{E_1=\text{GND}}] = \frac{1.6 - 1.642}{1.6} = 2.6\%$$

$$Q[\hat{V}_{E_2=\text{GND}}, V_{E_2=\text{GND}}] = \frac{-2.2 - (-2.306)}{-2.2} = 4.8\%$$

$$Q[\hat{V}_{E_1=E_2}, V_{E_1=E_2}] = \frac{-0.6 - (-0.657)}{-0.6} = 9.5\%$$

$$Q[\hat{V}_{E_1=-E_2}, V_{E_1=-E_2}] = \frac{-3.8 - (-3.963)}{-3.8} = 4.3\%$$

Nichtinvertierender Verstärker: Der theoretische Wert wurde als $\hat{V} = 10$ berechnet, der aus dem Fit erhaltene ist $V = 9.985$. Die relative Abweichung beträgt

$$Q[\hat{V}, V] = \frac{10 - (9.985)}{10} = 0.2\%$$

VII. ZUSAMMENFASSUNG

In diesem Versuch sollten Operationsverstärker und die Funktionen der verschiedenen Rückkopplungsnetzwerke untersucht werden.

Im ersten Teil des Versuchs wurde der invertierende Verstärker untersucht. Die gemessene Verstärkung lag mit -9.813 nahe am theoretisch berechneten Wert von -10 .

Wird der Gegenkopplungswiderstand entfernt, so erhält man sofort die maximale Ausgangsspannung. Das gleiche Ergebnis erhält man, wenn der Eingang E_+ offen gelassen wird.

Mit vertauschten Eingängen erhält man den Schmitt-Trigger. Es wurde dessen Hysterese-Kurve aufgezeichnet und verifiziert, dass er die Eigenschaften eines Schwellwertschalters besitzt.

Nun wurden Differenz- und Summationsverstärker angeschaut. Beim Differenzverstärker wurde die Verstärkung für verschiedene Beschaltungen der Eingänge gemessen. Außerdem wurden die Eingangswiderstände gemessen,

zu $R_1 = 9.54 \text{ k}\Omega$ und $R_2 = 12.47 \text{ k}\Omega$. In Wirklichkeiten hatten beide Eingangswiderstände den Wert $R = 10 \Omega$.

Beim Summationsverstärker wurde, durch anliegen entgegengesetzter Spannungen, dessen Summationsverhalten gezeigt da, wie zu erwarten, so gut wie keine Ausgangsspannung hervorgerufen wurde.

Schlussendlich wurde noch der nichtinvertierende Verstärker untersucht. Die Schaltung wurde mit Hilfe einer Widerstandsdekade so dimensioniert, dass eine Verstärkung von $V = 10$ eintritt. Über eine zwischengeschaltete Stromstärkemessung wurde gezeigt, dass der Operationsverstärker einen sehr große Eingangswiderstand besitzt.

[1] *Versuchsanleitung*, Universität Stuttgart (2013).