

Elektronikpraktikum im WS 2010/11

UNIVERSITÄT STUTTGART

Protokoll zum Versuch

V06: Grundsaltungen mit Operationsverstärkern

Stephan Ludwig, Nicolai Lang

5. Dezember 2010

Zusammenfassung

Der folgende Versuch befasst sich mit den Grundsaltungen und Eigenschaften von Operationsverstärkern. Im Speziellen werden die Verstärkungen von invertierendem und nichtinvertierendem Verstärker, Differenz- sowie Summationsverstärker gemessen und mit den theoretisch errechneten Werten verglichen. Desweiteren wird der Schmitt-Trigger auf seine Funktionsweise hin untersucht und eine Messung der Schalthysterese durchgeführt.

Verfasser	Lang, Nicolai (2439501, B.Sc. Physik)
Mitarbeiter	Ludwig, Stephan (2526605, B.Sc. Physik)
Gruppennummer	1-16
Versuchstag	29. November 2010
Betreuer	Tomas Rendler

Inhaltsverzeichnis

1. Grundlagen	3
1.1. Der ideale Operationsverstärker	3
1.2. Anwendungen	4
1.2.1. Der invertierende Verstärker	4
1.2.2. Der Summationsverstärker	5
1.2.3. Der Differenzverstärker	5
1.2.4. Der nichtinvertierende Verstärker (Elektrometerverstärker)	6
1.2.5. Der Schmitt-Trigger	7
1.2.6. Beispielrechnungen	7
2. Messprinzip, Schaltpläne und Versuchsablauf	8
2.1. Invertierender Verstärker	8
2.2. Schmitt-Trigger	8
2.3. Differenzverstärker	9
2.4. Summationsverstärker	9
2.5. Nichtinvertierender Verstärker	10
3. Berechnungen & Formeln	12
4. Auswertung	13
4.1. Invertierender Verstärker	13
4.2. Schmitt-Trigger	16
4.3. Differenzverstärker	18
4.4. Summationsverstärker	21
4.5. Nichtinvertierender Verstärker	23
5. Fehlerrechnung	24
6. Zusammenfassung	25
A. Messwerte	26

1. Grundlagen

1.1. Der ideale Operationsverstärker

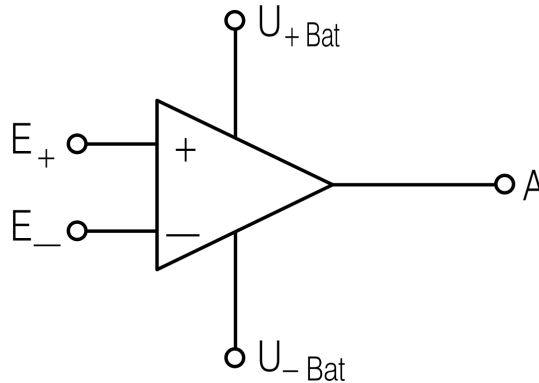


Abbildung 1: Schaltzeichen eines *idealen Operationsverstärkers* (die Eingänge mit den positiven und negativen Versorgungsspannungen werden oft weggelassen).

Definition Ein *idealer Operationsverstärker* ist ein hypothetisches Bauteil der Elektrotechnik, welches mit dem in Abb. 1 dargestellten Schaltsymbol bezeichnet wird. Die folgende Theorie stützt sich ausschließlich auf die postulierten Eigenschaften des besagten Bauteils **ohne** die Frage der Realisierbarkeit näher zu erörtern. Wir definieren die ideale (*) Operationsverstärkerfunktion $\lambda_{U_{\pm}}^*$ formal als Funktion mit den folgenden Eigenschaften:

$$\lambda_{U_{\pm}}^* : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}: (E_+, E_-) \rightarrow \begin{cases} U_+ & \text{für } E_+ > E_- \\ \frac{1}{2}(U_+ + U_-) & \text{für } E_+ = E_- \\ U_- & \text{für } E_+ < E_- \end{cases} \quad (1)$$

Die Sättigungsspannungen $U_{\pm} \equiv U_{\pm \text{Bat}} \equiv \pm\infty$ werden als Parameter betrachtet und daher im Schaltsymbol oft unterdrückt. Wir definieren noch die Eigenschaften (α) und (β) wie folgt:

$$\alpha \quad : \iff \quad \text{Der (elektrische) Innenwiderstand aller Eingänge ist unendlich.} \quad (2)$$

$$\beta \quad : \iff \quad \text{Der (elektrische) Innenwiderstand aller Ausgänge ist null.} \quad (3)$$

Dann bezeichnen wir das Tupel $\Lambda_{U_{\pm}}^* = (\lambda_{U_{\pm}}^*, \alpha, \beta)$ als *idealen Operationsverstärker*.

Interpretation Es stellt sich nun natürlich die Frage, was für ein (hypothetisches) Bauteil wir oben eigentlich definiert haben. Die Interpretation gestaltet sich aber vergleichsweise einfach:

- (1) Die zwei Eingänge E_{\pm} (wir vernachlässigen im Folgenden die Parameter U_{\pm} , welche die positive bzw. negative Betriebsspannung darstellen) sind extrem hochohmig was dazu führt, dass von diesen kein Strom in den Operationsverstärker (im Folgenden kurz: OpAmp) fließen kann. Der Ausgang A hingegen besitzt einen Innenwiderstand von 0Ω was dazu führt, dass die an ihm Anliegende Ausgangsspannung U_A unabhängig von der Last ist.
- (2) Liegen die beiden Eingänge E_+ und E_- auf dem selben Potential $E_+ = E_- = E$, so liegt der Ausgang $A = \Lambda_{U_{\pm}}^*(E, E) = \frac{1}{2}(U_+ + U_-)$ auf dem Mittelwert der Betriebsspannungen. In der Regel wählt man $U_- = -U_+$ womit $A = \Lambda_{U_{\pm}}^*(E, E) = 0$ folgt. Gilt hingegen $E_+ > E_-$ (liegt der sog. nichtinvertierende Eingang bzgl. des sog. invertierenden Einganges also auf positivem

Potential) verstärkt der OpAmp diese Differenz mit einer Verstärkung von “ $+\infty$ ” wobei er natürlich an die von seiner Betriebsspannung auferlegten Grenze U_+ stößt. Ist hingegen $E_+ < E_-$ (liegt der invertierende Eingang also bzgl. des nichtinvertierenden auf positivem Potential) so verstärkt der OpAmp den Betrag der Differenz um “ $-\infty$ ” und gibt folglich die negative Betriebsspannung U_- aus. Da obige Funktion $\lambda_{U_{\pm}}^*$ nur von relativen Beziehungen zwischen den Eingangssignalen abhängt, benötigt ein OpAmp **keine** Masse als Referenzpunkt.

Virtuelle Masse Betrachten wir Abb. 2. In diesem Fall liegt E_+ auf Masse ($E_+ = 0$) und E_- bildet einen sog. *virtuellen Massepunkt*, da $E_- = E_+ = 0$ gilt. Wichtig ist hierbei, dass diese Eigenschaft **nicht** Resultat einer internen Verbindung von E_+ und E_- sondern vielmehr Folge der oben definierten Eigenschaften ist. Unser hier betrachteter idealer OpAmp besitzt keine innere Struktur.

Diese Eigenschaft lässt sich wie folgt verstehen: Sei $E_- > 0$. In diesem Fall fällt das Potential an A und erzeugt eine Potentialtreppe von E über E_- nach A . Dieser Potentialabfall hört erst auf, wenn das Potential an A durch den Spannungsteiler bewirkt, dass $E_- = E_+ = 0$ gilt. Wäre $E_- < 0$ läuft der selbe Prozess nur mit umgekehrten Vorzeichen ab. Damit wird E_- stabil auf Masse gehalten. Die Verbindung von A zu E_- über den Widerstand R_N bezeichnet man als Gegenkopplung, da es sich um eine negative Rückkopplung handelt.

1.2. Anwendungen

1.2.1. Der invertierende Verstärker

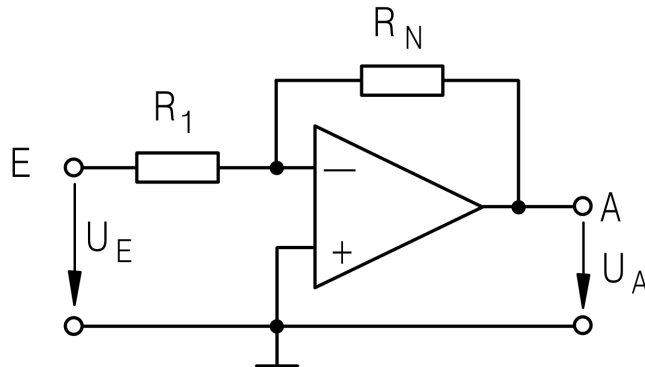


Abbildung 2: Schaltung eines Operationsverstärkers als *invertierender Verstärker*.

In Abb. 2 ist die Schaltung eines *Umkehrverstärkers* abgebildet. Dessen Name begründet sich in dem Umstand, dass die an E anliegende Spannung um einen gewissen, von der Beschaltung abhängigen **negativen** Faktor verstärkt wird. Das Potential an A ist dem an E also entgegengesetzt. Die Verstärkung dieser Schaltung lässt sich einfach errechnen, wenn man die oben definierten Eigenschaften des OpAmp zu Grunde legt.

Wie wir oben gesehen haben befindet sich an E_- ein virtueller Massepunkt. Demnach gilt $U_{E_-} = 0$ und durch R_1 fließt nach dem Ohmschen Gesetz der Strom $I_E = \frac{U_E}{R_1}$. Da in den Eingang E_- des OpAmp kein Strom fließen kann, muss dieser vollständig durch den Gegenkopplungswiderstand R_N abgeleitet werden. Dann muss aber $U_A = -I_E \cdot R_N$ gelten, da nur diese Potentialdifferenz zur virtuellen Masse obigen Strom hervorruft. Setzen wir die vorherigen Formeln ineinander ein, erhalten wir

$$U_A = -U_E \cdot \frac{R_N}{R_1} \quad (4)$$

Damit beträgt die Verstärkung $V_{inv} = -\frac{R_N}{R_1}$ (man beachte das Minus) und der Eingangswiderstand $R_E = R_1 = \frac{U_E}{I_E}$. Eine Verallgemeinerung des hier behandelten invertierenden Verstärkers wird im nächsten Abschnitt vorgestellt.

1.2.2. Der Summationsverstärker

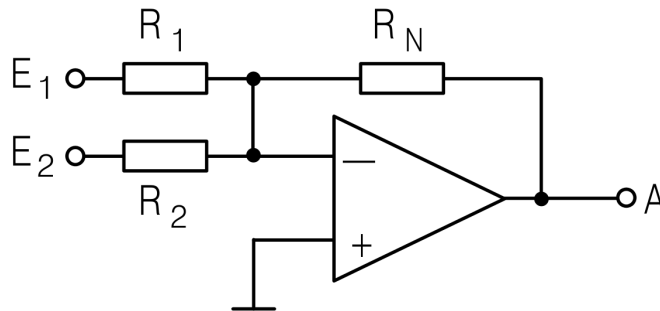


Abbildung 3: Schaltung eines Operationsverstärkers als *Summationsverstärker*.

Die in Abb. 3 dargestellte Schaltung wird als *Summationsverstärker* bezeichnet und unterscheidet sich nur wenig vom oben beschriebenen invertierenden Verstärker. Letztlich fungiert der Widerstand R_1 beim invertierenden Verstärker als *Spannungs-Strom-Wandler*. Die angelegte Spannung wird auf Grund des virtuellen Massepunktes zu einem durch R_1 bestimmten Strom umgewandelt, welcher über R_N abfließt. Die gegengekoppelte OpAmp-Schaltung sorgt nun ihrerseits für eine *Strom-Spannungs-Wandlung* indem sie jeden in die virtuelle Masse fließenden Strom als Spannungsäquivalent dem Ausgang beaufschlagt. Damit lassen sich aber an die virtuelle Masse weitere Spannungs-Strom-Wandler koppeln, welche ihren Strom an die virtuelle Masse abführen. Dies geschieht durch die parallel geschalteten Widerstände R_1 und R_2 in Abb. 3 (man könnte noch weitere parallel schalten). Auf diese Weise lassen sich die an den Eingängen anliegenden Spannungen selektiv verstärken, invertieren und zu einem Ausgangssignal addieren. Dann gilt:

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

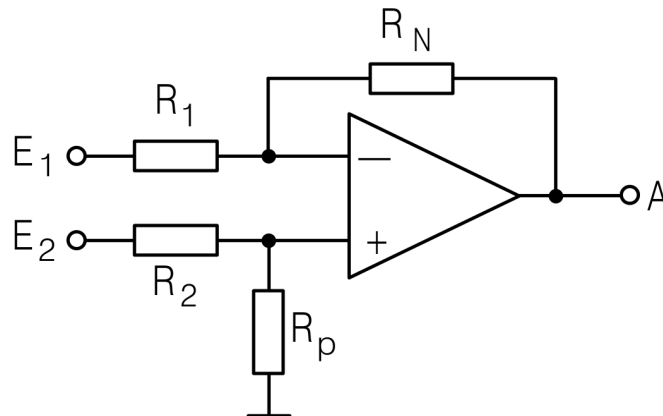
Wegen der invertierenden und addierenden Eigenschaft wird ein solcher Verstärker auch als *Umkehraddierer* bezeichnet.

1.2.3. Der Differenzverstärker

Eine weitergehende Verallgemeinerung der vorangegangenen Schaltungen ist in Abb. 4 dargestellt. Die Schaltung wird gemeinhin als *Differenzverstärker* oder auch *Subtrahierer* bezeichnet. Da die negative Verstärkung der am invertierenden Eingang anliegenden Spannungen (bzw. der dort hin fließenden Ströme) direkt vom Summationsverstärker übernommen wurde, gilt für diese auch weiterhin obige Verstärkung. Die am nichtinvertierenden Eingang anliegenden Spannungen führen durch den aus R_2 und R_p bestehenden Spannungsteiler zu einem von Null verschiedenen Potential an E_+ . Da immer noch $E_- = E_+$ gilt kann E_- nun kein virtueller Massepunkt mehr sein. Eine elementare Rechnung führt auf die Ausgangsspannung

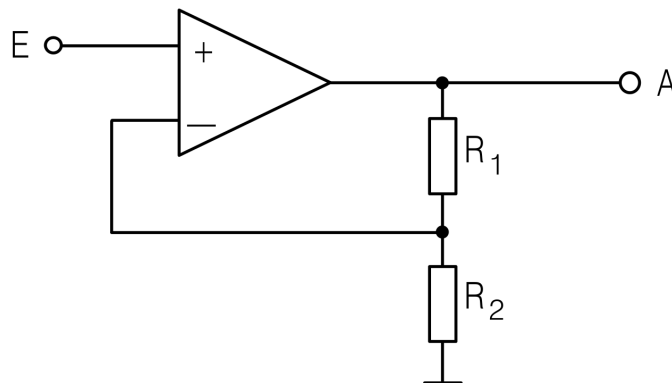
$$U_A = -U_{E_1} \cdot \frac{R_N}{R_1} + U_{E_2} \cdot \frac{R_p(R_N + R_1)}{R_1(R_p + R_2)} \quad (6)$$

Man erkennt sofort, dass sich das Ausgangspotential U_A aus dem um $V_{inv} = -\frac{R_N}{R_1}$ verstärkten (und damit invertierten) Potential an E_1 und dem um $V_{ninv} = \frac{R_p(R_N + R_1)}{R_1(R_p + R_2)}$ verstärkten (und

Abbildung 4: Schaltung eines Operationsverstärkers als *Differenzverstärker*.

damit nicht invertierten) Potential an E_2 additiv zusammensetzt. Damit lassen sich mit obiger Schaltung Spannungen gewichtet addieren und subtrahieren. Da der gesamte an E_2 fließende Strom über Masse abfließen muss, ergibt sich der Eingangswiderstand des nichtinvertierenden Eingangs zu $R_{E_2} = R_2 + R_P$.

1.2.4. Der nichtinvertierende Verstärker (Elektrometerverstärker)

Abbildung 5: Schaltung eines Operationsverstärkers als *nichtinvertierender Verstärker*.

Der in Abb. 5 dargestellte *nichtinvertierende Verstärker* unterscheidet sich in zweierlei Hinsicht von den bisher behandelten Verstärkern. Erstens ist seine Verstärkung positiv - er invertiert das Eingangssignal also nicht sondern behält das Vorzeichen der Spannung bei. Zweitens ist der Eingangswiderstand im Idealfall unendlich (in der Praxis im $M\Omega$ -Bereich), da die Eingangsspannung direkt am nichtinvertierenden Eingang E_+ anliegt. Einen quantitativen Ausdruck für die Verstärkung erhält man durch Anwendung der Spannungsteilerformel unter Berücksichtigung von $U_{E_-} = U_{E_+} = U_E$:

$$U_A = U_E \cdot \frac{R_1 + R_2}{R_2} = \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) \cdot U_E \quad (7)$$

Die Verstärkung ergibt sich also zu $V_{el} = 1 + \frac{R_1}{R_2}$, der Eingangswiderstand ist wie oben erläutert unendlich. Da $V_{el} \geq 0$ invertiert dieser Verstärker das Eingangssignal nicht. Wegen seines hohen

Eingangswiderstandes eignet sich diese Schaltung hervorragend um Spannungsmessungen durchzuführen ohne durch fließende Ströme die zu messende Quelle zu belasten und wird daher auch als *Elektrometerverstärker* bezeichnet.

1.2.5. Der Schmitt-Trigger

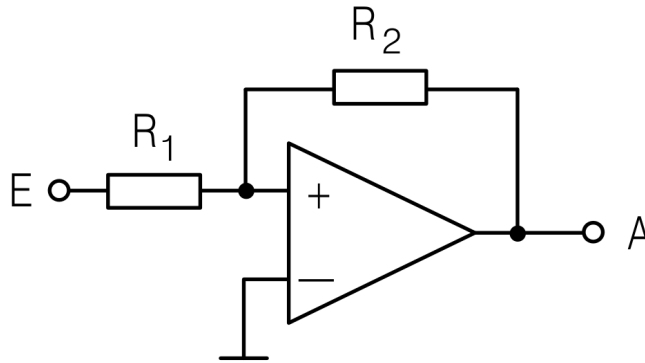


Abbildung 6: Schaltung eines Operationsverstärkers als *Schmitt-Trigger*.

Vertauscht man in Abb. 2 den invertierenden mit dem nichtinvertierenden Eingang, so stellt sich eine positive Rückkopplung ein (eine sog. Mit-Kopplung) und man erhält die Schaltung aus Abb. 6 welche unter dem Namen *Schmitt-Trigger* bekannt ist. Dieser besitzt die Eigenschaft so lange in negativer Spannungssättigung ($U_A = U_-$) zu verharren bis das Potential an E eine gewisse positive Schwellenspannung U_{S+} übersteigt. Dann “klappt” das Potential an U_A um auf U_+ und bleibt dort ebenfalls stabil bis U_E die negative Schwelle U_{S-} unterschreitet. Allgemein folgt für die Schaltschwellen aus elementarer Rechnung unter Beachtung der OpAmp-Eigenschaften:

$$U_{S+} = U_+ \cdot \frac{R_1}{R_2} \quad \text{und} \quad U_{S-} = U_- \cdot \frac{R_1}{R_2} \quad (8)$$

Die durch dieses Schaltverhalten erzeugte Hysteresenkurve hat für niedrige Frequenzen eine rechteckige Form und soll später im Versuch beschrieben werden.

1.2.6. Beispielrechnungen

Invertierender Verstärker Für die Verstärkung eines invertierenden Verstärkers soll gelten

$$|V_{inv}| = 34\text{dB} = 20 \cdot \lg \left| \frac{U_A}{U_E} \right| \text{dB} \Rightarrow 34 = 20 \cdot \lg \left| \frac{U_A}{U_E} \right| \Rightarrow \left| \frac{U_A}{U_E} \right| = 10^{\frac{34}{20}} \quad (9)$$

Mit Gleichung (4) folgt

$$\frac{R_N}{R_1} = \left| \frac{U_A}{U_E} \right| = 10^{\frac{34}{20}} \approx 50.12 \quad (10)$$

Die Widerstände können nun in weiten Bereichen beliebig gewählt werden, solange ihr Verhältnis das Gewünschte ist.

Nichtinvertierender Verstärker Für einen nichtinvertierenden Verstärker soll ebenfalls $\frac{U_A}{U_E} = 10^{\frac{34}{20}}$ sein. Gemäß Gleichung (7) muss gelten

$$\frac{U_A}{U_E} = 1 + \frac{R_1}{R_2} \Rightarrow 1 + \frac{R_1}{R_2} = 10^{\frac{34}{20}} \Rightarrow \frac{R_1}{R_2} = 10^{\frac{34}{20}} - 1 \approx 49.12 \quad (11)$$

Auch in diesem Fall lässt sich je ein Widerstand frei wählen, während der andere so dimensioniert werden muss, dass das gewünschte Verhältnis gegeben ist.

2. Messprinzip, Schaltpläne und Versuchsablauf

2.1. Invertierender Verstärker

Messprinzip und Versuchsaufbau Die Schaltung wird gemäß Abb. 1 aufgebaut. Der Operationsverstärker wird mit den vom Steckbrett gelieferten Spannungen $U_{\pm} = \pm 15\text{V}$ betrieben. Alle folgenden Messungen werden (wenn nicht anders angegeben) mit LabVIEW automatisch ausgeführt.

Versuchsablauf

1. Die Gleichspannungsverstärkung wird gemessen, indem U_E in geeigneten Bereichen durchlaufen (bis der OpAmp in Sättigung geht) und die Ausgangsspannung U_A mit dem Tischmultimeter erfasst wird. Mit dem Handmultimeter wird während obiger Messungen die Spannung U_{E-} bezüglich Masse beobachtet.
2. Der Widerstand R_N wird entfernt. Es wird wieder eine Messreihe nach obigem Muster aufgenommen.
3. Die Widerstände R_N und R_1 werden variiert. Die Spannungsverstärkung wird von neuem automatisch gemessen.
4. Die Verbindung zwischen E_+ und Masse wird getrennt. Es folgt eine weitere Messreihe von U_A in Abhängigkeit von U_E .

Versuchsparameter

- $R_1 = 1\text{k}\Omega$
- $R_N(1) = 10\text{k}\Omega$, $R_N(2) = 20\text{k}\Omega$
- $U_{\pm} = \pm 15\text{V}$ (Versorgungsspannung des OpAmp)
- **Benutzte Geräte:** $1\text{k}\Omega$ -Widerstand, $10\text{k}\Omega$ -Widerstand, Operationsverstärker OP27G, Keithley 2100 (Tischmultimeter), TTI (Konstantspannungsquelle), Digitales Handmultimeter, Steckbrett mit Spannungsquelle.

Anmerkungen und Vorkommnisse Keine ◀

2.2. Schmitt-Trigger

Messprinzip und Versuchsaufbau Die Schaltung wird nach Abb. 6 aufgebaut. E wird mit dem Funktionsgenerator verbunden. A wird an CH2 des Oszilloskops angeschlossen. Zudem wird das Triggersignal vom Funktionsgenerator zum Oszilloskop geführt. Das vom Funktionsgenerator erzeugte Signal wird mittels BNC-T-Stück zudem an CH1 des Oszilloskops angelegt.

Versuchsablauf

1. Die Messdaten beider Kanäle des Oszilloskops werden mit Hilfe von LabVIEW gespeichert. Hierfür werden unterschiedliche Skalierungen am Oszilloskop gewählt um eine möglichst breite Datenbasis für spätere Auswertungen zu erhalten.
2. Der Widerstand R_1 wird variiert. Obige Aufnahme von U_A und U_E über das Oszilloskop wird wiederholt.

Versuchsparameter

- Signaltyp *Rampe* (50% Anstiegszeit)
- $\nu = 500\text{Hz}$ (Frequenz des angelegten Signals)
- $U_E = 5.00\text{V}_{pp}$ (Peak-to-Peak-Spannung)
- $R_1(1) = 1\text{k}\Omega$, $R_1(2) = 100\Omega$, $R_1(3) = 2\text{k}\Omega$
- $R_2 = 10\text{k}\Omega$
- $U_{\pm} = \pm 15\text{V}$ (Versorgungsspannung des OpAmp)
- **Benutzte Geräte:** $1\text{k}\Omega$ -Widerstand, $10\text{k}\Omega$ -Widerstand, Operationsverstärker **OP27G**, Keithley 3390 (Funktionsgenerator), Tektronix (Digitaloszilloskop, 2 Kanäle), Steckbrett mit Spannungsquelle, BNC-T-Stück.

Anmerkungen und Vorkommnisse Keine ◀

2.3. Differenzverstärker

Messprinzip und Versuchsaufbau Die Schaltung wird nach Abb. 4 aufgebaut. An die Eingänge E_1 und E_2 wird jeweils Output 1 bzw. 2 der Spannungsquelle TTI angeschlossen. A wird mit dem Tischmultimeter verbunden. Alle Messungen werden mit LabVIEW automatisch durchgeführt.

Versuchsablauf

1. Eingang E_2 wird mit Masse verbunden. Dann wird mit LabVIEW automatisch eine Messreihe über verschiedene U_{E_1} durchgeführt (bis der OpAmp in Sättigung geht) wobei U_A gemessen wird. Anschließend wird E_1 auf Masse gelegt und die selbe Messreihe für Spannungen U_{E_2} durchgeführt.
2. Nun wird $U_{E_1} = U_{E_2} = U_E$ gesetzt. Wieder wird U_A in Abhängigkeit von U_E gemessen. Abschließend wird $U_{E_1} = -U_{E_2} = U_E$ realisiert. Auch hier wird die Spannungsverstärkung mit LabVIEW aufgenommen.

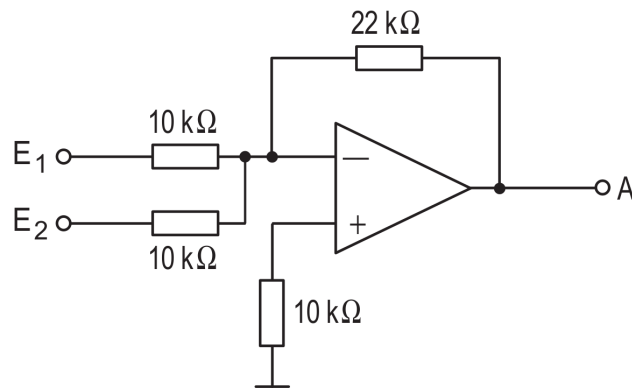
Versuchsparameter

- $R_1 = R_2 = R_p = 10\text{k}\Omega$
- $R_N = 22\text{k}\Omega$
- $U_{\pm} = \pm 15\text{V}$ (Versorgungsspannung des OpAmp)
- **Benutzte Geräte:** $10\text{k}\Omega$ -Widerstand (3x), $22\text{k}\Omega$ -Widerstand, Operationsverstärker **OP27G**, Keithley 2100 (Tischmultimeter), TTI (Konstantspannungsquelle, 2 Outputs), Steckbrett mit Spannungsquelle.

Anmerkungen und Vorkommnisse Keine ◀

2.4. Summationsverstärker

Messprinzip und Versuchsaufbau Die Schaltung aus dem vorhergehenden Versuch wird leicht modifiziert und wie in Abb. 7 dargestellt aufgebaut. Die angeschlossenen Geräte entsprechen dem vorangegangenen Versuch.

Abbildung 7: Schaltung des Operationsverstärkers als *Summationsverstärker*.

Versuchsablauf

1. Mit LabVIEW werden die beiden Ausgänge der Spannungsquelle TTI getrennt angesteuert. Dann werden mehrere Messreihen durchgeführt, wobei U_A gemessen wird. Hierbei werden die Spannungen U_{E_1} und U_{E_2} gleichzeitig *linear* zu *unterschiedlichen* Maximalspannungen hochgeregelt.

Versuchsparameter

- $R_1 = R_2 = R_p = 10\text{k}\Omega$
- $R_N = 22\text{k}\Omega$
- $U_{\pm} = \pm 15\text{V}$ (Versorgungsspannung des OpAmp)
- **Benutzte Geräte:** 10kΩ-Widerstand (3x), 22kΩ-Widerstand, Operationsverstärker OP27G, Keithley 2100 (Tischmultimeter), TTI (Konstantspannungsquelle, 2 Outputs), Steckbrett mit Spannungsquelle.

Anmerkungen und Vorkommnisse Keine ◀

2.5. Nichtinvertierender Verstärker

Messprinzip und Versuchsaufbau Die Schaltung wird Abb. 5 entsprechend aufgebaut. E wird mit der Konstantspannungsquelle und A mit dem Tischmultimeter verbunden. Die Messungen werden mit LabVIEW ausgeführt.

Versuchsablauf

1. Die Ausgangsspannung U_A wird in Abhängigkeit von der Eingangsspannung U_E gemessen (bis der OpAmp in Sättigung geht).
2. Zwischen die Spannungsquelle und den Eingang E wird das Tischmultimeter in Reihe geschaltet. Nun wird manuell für verschiedene Eingangsspannungen der fließende Strom bestimmt.

Versuchsparameter

- $R_1 = 2\text{k}\Omega$
- $R_1 = 220\Omega$
- $U_{\pm} = \pm 15\text{V}$ (Versorgungsspannung des OpAmp)
- **Benutzte Geräte:** $2\text{k}\Omega$ -Widerstand, 220Ω -Widerstand, Operationsverstärker OP27G, Keithley 2100 (Tischmultimeter), TTI (Konstantspannungsquelle), Steckbrett mit Spannungsquelle.

Anmerkungen und Vorkommnisse Keine ◀

3. Berechnungen & Formeln

Im Folgenden ist

- V_{inv} : $[V_{inv}] = 1$ die Verstärkung des invertierenden Verstärkers.
- V_{\pm} : $[V_{\pm}] = 1$ die Verstärkung des (nicht)invertierenden Einganges des Differenzverstärkers.
- V_{el} : $[V_{el}] = 1$ die Verstärkung des Elektrometerverstärkers.
- R_N : $[R_N] = 1\Omega$ der Rückkopplungswiderstand (siehe entsprechenden Schaltplan).
- R_i : $[R_i] = 1\Omega$ ein Beschaltungswiderstand (siehe entsprechenden Schaltplan).
- R_P : $[R_P] = 1\Omega$ ein Beschaltungswiderstand zu GND (siehe entsprechenden Schaltplan).
- U_{\pm} : $[U_{\pm}] = 1V$ die Betriebsspannung (\pm) des OpAmps.
- U_A : $[U_A] = 1V$ die Ausgangsspannung des OpAmps.
- U_{E_i} : $[U_{E_i}] = 1V$ die Eingangsspannung des OpAmps an E_i .
- $U_{S_{\pm}}$: $[U_{S_{\pm}}] = 1V$ die Schaltschwelle (\pm) des Schmitt-Triggers.

Invertierender Verstärker Für die Verstärkung eines invertierenden Verstärkers gilt

$$V_{inv} = -\frac{R_N}{R_1} = \frac{U_A}{U_E} \quad (12)$$

wobei $V_{inv} \leq 0$ auf die Inversion der Ausgangsspannung hinweist.

Schmitt-Trigger Die Schaltschwellen des Schmitt-Triggers lassen sich wie folgt aus den Beschaltungswiderständen errechnen:

$$U_{S_+} = U_+ \cdot \frac{R_1}{R_2} \quad \text{und} \quad U_{S_-} = U_- \cdot \frac{R_1}{R_2} \quad (13)$$

wobei $U_{S_+} \geq 0V$ und $U_{S_-} \leq 0V$ ist.

Differenzverstärker Die Ausgangsspannung des Differenzverstärkers ist gegeben durch

$$U_A = -U_{E_1} \cdot \frac{R_N}{R_1} + U_{E_2} \cdot \frac{R_P(R_N + R_1)}{R_1(R_P + R_2)} \quad (14)$$

Hier bei ist die Verstärkung der subtrahierten Spannungen $V_- = -\frac{R_N}{R_1}$ (am invertierenden Eingang) und die Verstärkung der addierten Spannungen $V_+ = \frac{R_P(R_N + R_1)}{R_1(R_P + R_2)}$ (am nichtinvertierenden Eingang).

Summationsverstärker Die Ausgangsspannung des Summationsverstärkers ist gegeben durch

$$U_A = -R_N \cdot \sum_{i=1}^n \frac{U_{E_i}}{R_i} \quad (15)$$

Im Spezialfall gleichgewichteter Eingänge gilt

$$U_A = -\frac{R_N}{R_1} \cdot \sum_{i=1}^n U_{E_i} \quad (16)$$

Nichtinvertierender Verstärker Die Ausgangsspannung und die Verstärkung des nichtinvertierenden Verstärkers sind wie folgt gegeben

$$U_A = \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) \cdot U_E \quad \Rightarrow \quad V_{el} = 1 + \frac{R_1}{R_2} \quad (17)$$

4. Auswertung

4.1. Invertierender Verstärker

1. Gleichung (12) zufolge entspricht die Steigung der Geraden für $U_A \geq U_-$ in den Abbildungen 8 und 10 gerade der Verstärkung $V_{inv}(i)$ der Schaltung welche von der Widerstandskonfiguration bestimmt wird. Wegen Gleichung (12) setzen wir Fitfunktionen vom Typ

$$f_a(U_E) = a \cdot U_E \quad (18)$$

- an. `gnuplot` liefert bei der Ausgangsbeschaltung $a(1) = -10.0549$. Damit ergibt sich die Verstärkung $V_{inv}(1) \approx -10.1$, welche mit der theoretisch errechneten von $V_{inv}^*(1) = -\frac{10k\Omega}{1k\Omega} = -10$ in guter Näherung übereinstimmt. Die mit dem digitalen Handmultimeter durchgeführten Messungen ergaben während der Messreihe $U_{E-} = -0.0002V = \text{const.}$ Die virtuelle Masse wurde also experimentell bestätigt. Trat der OpAmp in die Spannungssättigung ein, so variierte U_{E-} von diesem Zeitpunkt an mit der angelegten Spannung – es handelte sich also um keinen virtuellen Massepunkt mehr. Die Wirkungsweise der Gegenkopplung wurde in Abschnitt 1.2.1 ausführlich diskutiert.
2. In Abb. 9 ist U_A als Funktion von U_E aufgetragen, wobei der Gegenkopplungswiderstand R_N aus der Schaltung genommen wurde. Da in die Eingänge des idealen Operationsverstärkers kein Strom fließt, kann nun an R_1 auch keine Spannung mehr abfallen – er ist für das Verhalten der nun vorliegenden Schaltung ohne Belang. Daher wurde der OpAmp bei diesem Versuch effektiv ohne Beschaltung betrieben. Er gehorchte folglich den in Abschnitt 1.1 beschriebenen Eigenschaften. Speziell führt $U_E = U_{E-} > U_{E+} = 0V$ über die “unendliche” Verstärkung sofort zur Spannungssättigung $U_A = U_-$. Dies ist in Abb. 9 gut zu erkennen.
 3. Wir wollen eine Verstärkung von $V_{inv}^*(2) = -20$ erreichen. Mit Gleichung (12) erhalten wir für $R_1 = 1k\Omega$ den Gegenkopplungswiderstand $R_N(2) = 20k\Omega$ (die Wahl eines der beiden Widerstände ist frei, da nur deren Verhältnis die Verstärkung bestimmt). In Grafik 10 ist die mit den gerade errechneten Widerständen durchgeführte Gleichspannungsverstärkung dargestellt. Wir fitten wieder eine Funktion f_a für $U_A \geq U_-$ mit `gnuplot` und erhalten als Parameter $a(2) = -20.1347$. Damit ergibt sich die Verstärkung $V_{inv}(2) \approx -20.1$ welche mit der theoretisch angestrebten Verstärkung $V_{inv}^* = -20$ gut übereinstimmt.
 4. Entfernen wir in der Ausgangsschaltung die Verbindung von E_+ zu GND so ergibt sich die in Abb. 11 dargestellte Abhängigkeit von U_A bezüglich U_E . Zu beachten ist hierbei die Skala der y-Achse. Im Grunde springt der OpAmp zu Beginn der Messung in den Sättigungsbereich mit $U_A = U_+$. Die in Abb. 11 beobachtbaren Schwankungen und der Spannungsdrift nach oben sind den inneren Eigenschaften und Unzulänglichkeiten des OpAmp geschuldet. Das undefinierte Potential an E_+ führt letztendlich zu einem “zufälligen” Verhalten des Ausgangs. In unserem Fall scheinen kleine Effekte (vermutlich verursacht durch den Aufbau des OpAmp) dazu geführt zu haben, dass der Ausgang immer auf die positive Betriebsspannung geschaltet wurde.
 5. Legen wir E_- auf Masse und benutzen den nichtinvertierenden Eingang E_+ für die zu verstärkende Spannung, so ergibt sich *kein* nichtinvertierender Verstärker. Läge E_+ dann auf leicht positiven Potential würde auch A auf ein Potential größer Null gebracht. Da nun aber eine positive Rückkopplung durch R_N erzeugt wird, kann E_+ nicht auf Masse zurückgezogen werden. Letztlich springt der OpAmp sofort in die Sättigung $U_A = U_+$. Ein Vergleich mit Abb. 6 zeigt zudem, dass eine solche Vertauschung der Eingänge den invertierenden Verstärker zum Schmitt-Trigger transformiert. Dessen Funktion wurde in den Grundlagen schon erläutert.

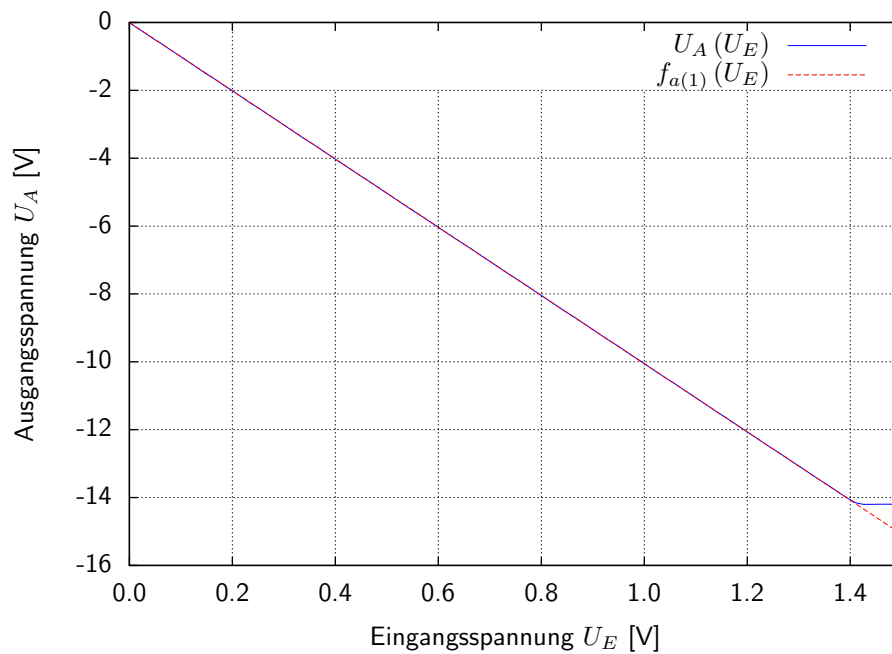


Abbildung 8: Gleichspannungsverstärkung des invertierenden Verstärkers mit Anfangsbeschlattung (LabVIEW Messung).

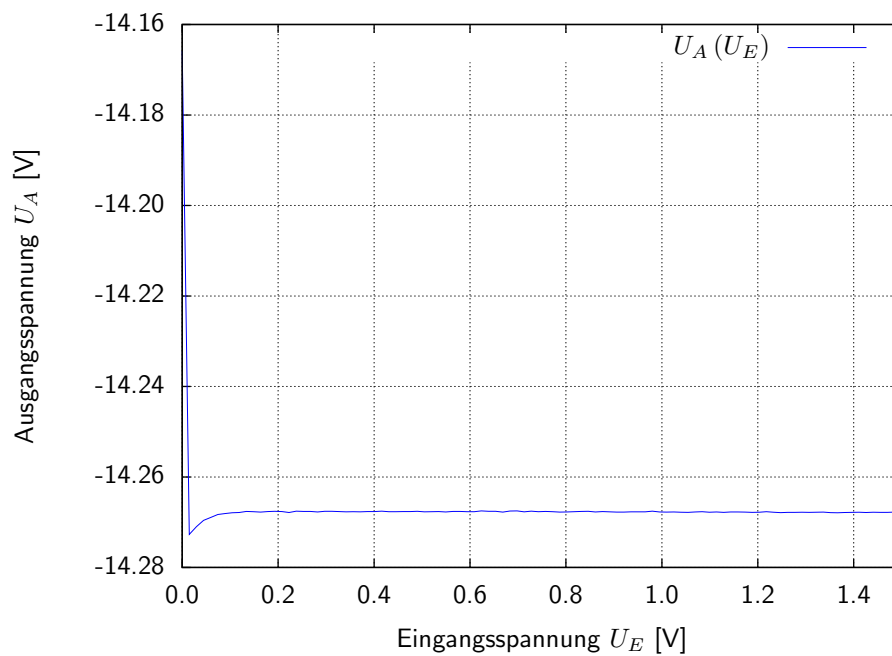


Abbildung 9: Gleichspannungsverstärkung des invertierenden Verstärkers ohne Gegenkopplungs-widerstand (LabVIEW Messung).

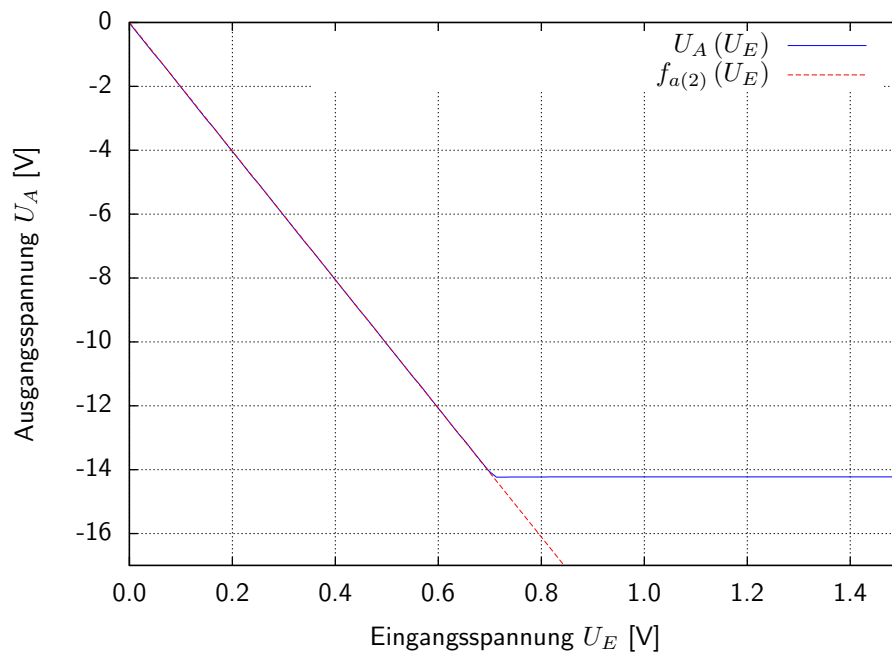


Abbildung 10: Gleichspannungsverstärkung des invertierenden Verstärkers mit selbst festgelegten Widerständen (LabVIEW Messung).

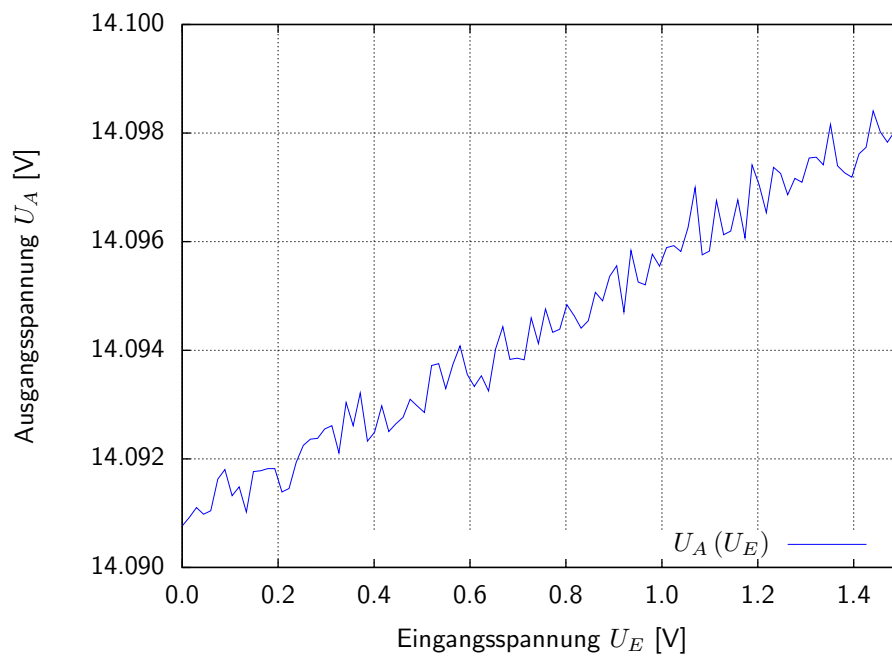


Abbildung 11: Gleichspannungsverstärkung des invertierenden Verstärkers mit undefiniertem Potential an E_+ (LabVIEW Messung).

4.2. Schmitt-Trigger

Die in Abb. 6 dargestellte Schaltung besitzt die Eigenschaften eines Schwellwertschalters (Trigger), wie man anhand der Grafiken 12, 13 und 14 sieht.

Steigt die Eingangsspannung U_E von -5V auf $+5\text{V}$ so verharrt das Ausgangspotential U_A bis zu einer positiven Schwellspannung U_{S_+} bei U_- . Erst beim Überschreiten dieser Spannung springt der Ausgang von U_- auf U_+ ; der OpAmp wird also ständig in Spannungssättigung betrieben. Fällt die Eingangsspannung nun umgekehrt von $+5\text{V}$ auf -5V so bleibt $U_A = U_+$ bis $U_E = U_{S_-}$ erreicht ist. Dort springt die Ausgangsspannung auf U_- zurück und ein Durchlauf der Hysteresenkurve ist beendet. Eine Darstellung der Ein- und Ausgangsspannungen über die Zeit ist in Abb. 15 dargestellt und beleuchtet diese Zusammenhänge aus einer anderen Perspektive.

Der Vergleich mit der Theorie liefert mit Hilfe von Gleichung (13) bei den unterschiedlichen Widerstandswerten:

- $R_1(1) = 1\text{k}\Omega$ und $R_2 = 10\text{k}\Omega$ führt zu $U_{S_{\pm}} = \pm 0.1 \cdot 15\text{V} = \pm 1.5\text{V}$. Abb. 12 bestätigt diese Schaltschwelle.
- $R_1(2) = 100\Omega$ und $R_2 = 10\text{k}\Omega$ führt zu $U_{S_{\pm}} = \pm 0.01 \cdot 15\text{V} = \pm 0.15\text{V}$. Abb. 13 bestätigt diese Schaltschwelle.
- $R_1(3) = 2\text{k}\Omega$ und $R_2 = 10\text{k}\Omega$ führt zu $U_{S_{\pm}} = \pm 0.2 \cdot 15\text{V} = \pm 3.0\text{V}$. Abb. 14 bestätigt diese Schaltschwelle.

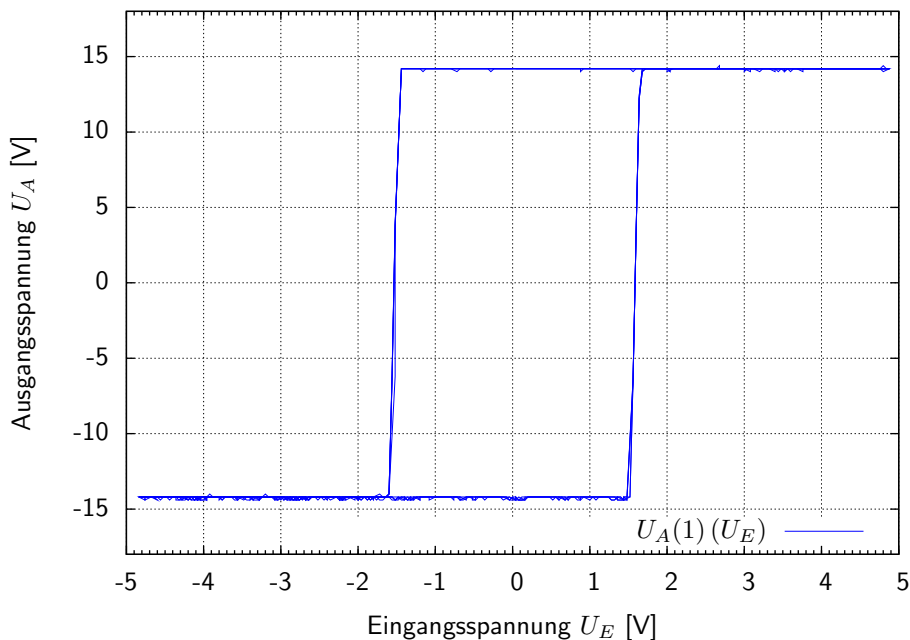


Abbildung 12: Hysteresekurve des Schmitt-Triggers mit $R_1(1) = 1\text{k}\Omega$ und $R_2 = 10\text{k}\Omega$ (LabVIEW Messung).

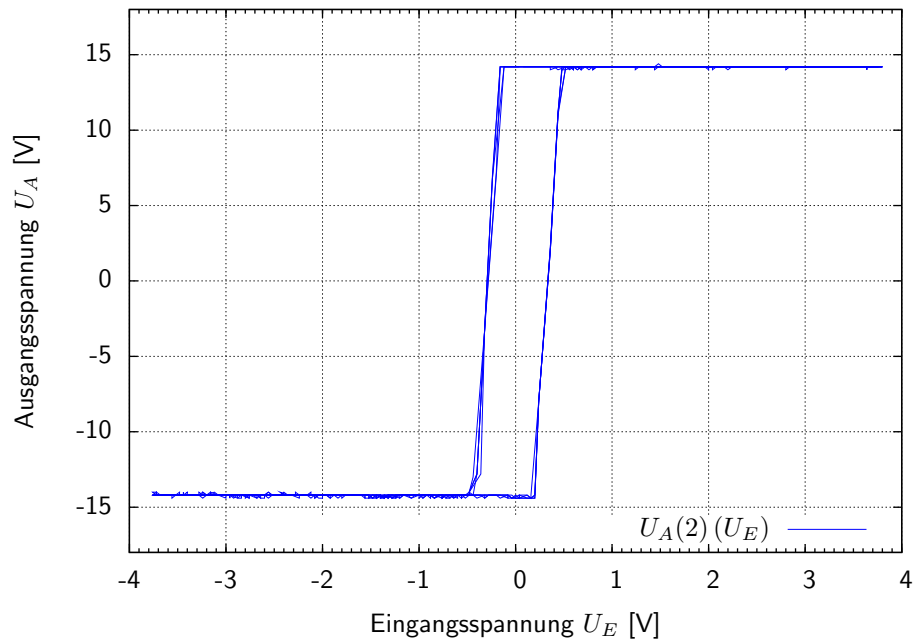


Abbildung 13: Hysteresekurve des Schmitt-Triggers mit $R_1(2) = 100\Omega$ und $R_2 = 10\text{k}\Omega$ (LabVIEW Messung).

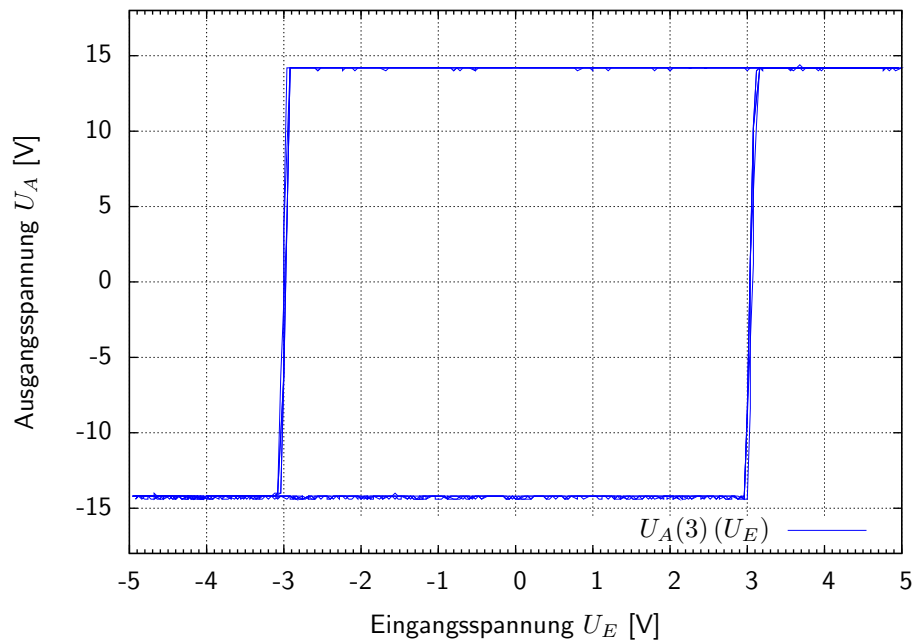


Abbildung 14: Hysteresekurve des Schmitt-Triggers mit $R_1(3) = 2\text{k}\Omega$ und $R_2 = 10\text{k}\Omega$ (LabVIEW Messung).

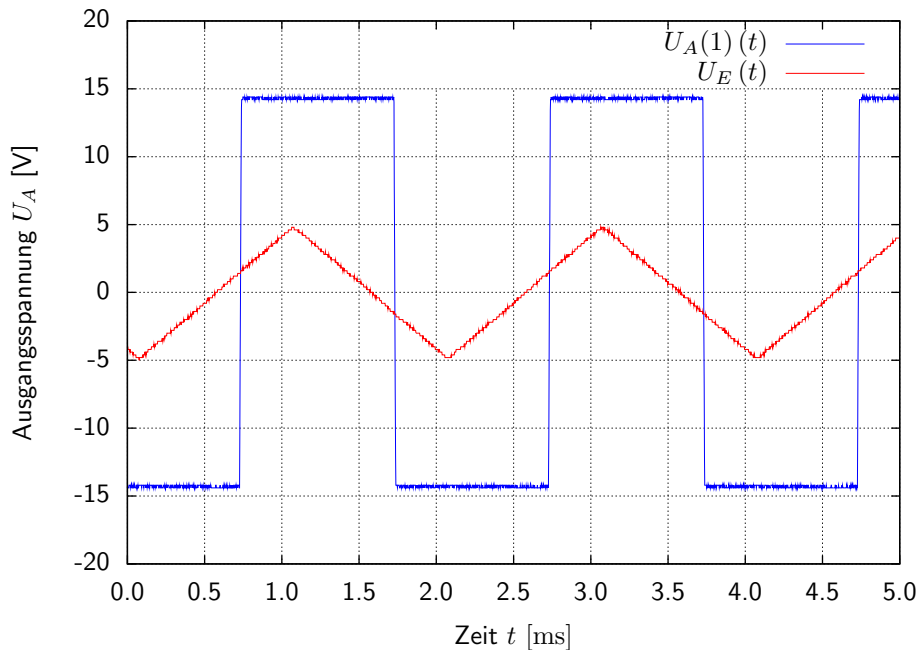


Abbildung 15: Spannungsverläufe am Schmitt-Trigger mit $R_1(1) = 1\text{k}\Omega$ und $R_2 = 10\text{k}\Omega$ (LabVIEW Messung).

4.3. Differenzverstärker

Die Abbildungen 16, 17, 18 und 19 zeigen die Ergebnisse der Messungen mit dem Differenzverstärker.

- In Abb. 16 ist die Gleichspannungsverstärkung für die subtrahierten Spannungen an E_1 (invertierender Eingang) aufgetragen. Bei dieser Messung wurde E_2 auf GND gelegt. Eine Fitfunktion vom Typ f_a ergibt den Fitparameter $a(3) = -2.19762$ und damit die Verstärkung $V_- \approx -2.2$. Abbildung 17 zeigt die analoge Messung mit E_1 auf GND. Hier ergibt sich $a(4) = 1.58794$ und die Verstärkung $V_+ \approx 1.6$.

- Gleichung (14) liefert einen funktionalen Zusammenhang von U_A und U_{E_i} der Form

$$U_A(U_{E_1}, U_{E_2}) = \hat{V}_- \cdot U_{E_1} + \hat{V}_+ \cdot U_{E_2} \quad (19)$$

Unsere Messungen erlauben nun die Bestimmung von \hat{V}_\pm , denn es gilt

$$U_A(U_{E_1}, 0) = \hat{V}_- \cdot U_{E_1} \Rightarrow \hat{V}_- = \frac{U_A}{U_{E_1}} = V_- \quad (20)$$

$$U_A(0, U_{E_2}) = \hat{V}_+ \cdot U_{E_2} \Rightarrow \hat{V}_+ = \frac{U_A}{U_{E_2}} = V_+ \quad (21)$$

Damit ergibt sich die Ausgangsfunktion numerisch zu

$$U_A(U_{E_1}, U_{E_2}) = -2.19762 \cdot U_{E_1} + 1.58794 \cdot U_{E_2} \quad (22)$$

- Analog zum bisherigen Vorgehen ergeben sich die Gesamtverstärkungen $a(5) = -0.609855$ für $U_{E_1} = U_{E_2} \equiv U_E$ und $a(6) = -3.78613$ für $U_{E_1} = -U_{E_2} \equiv U_E$. Also ergibt sich $V_{E_1=E_2} \approx -0.6$

und $V_{E_1=-E_2} \approx -3.8$. Um die Ausgangsfunktion (22) experimentell zu verifizieren wurden in den Abbildungen 18 und 19 die zugehörigen Funktionen

$$U_{A(1)}(U_{E_1}, U_{E_2}) = U_A(U_E, U_E) = (-2.19762 + 1.58794) \cdot U_E = -0.60968 \cdot U_E \quad (23)$$

$$U_{A(2)}(U_{E_1}, U_{E_2}) = U_A(U_E, -U_E) = -(2.19762 + 1.58794) \cdot U_E = -3.78556 \cdot U_E \quad (24)$$

geplottet (man vergleiche die Steigungen mit den oben bestimmten Gesamtverstärkungen!). Man erkennt an den Abbildungen, dass die Geraden der Fits auf den Geraden der Ausgangsfunktion und den Messwerten liegen. Die Abweichungen dieser Messungen sind demnach sehr gering.

Die Eingangswiderstände ergeben sich wie folgt: *Es ist mir nicht bekannt, wie man aus den gegebenen Messdaten die Eingangswiderstände berechnen könnte.*

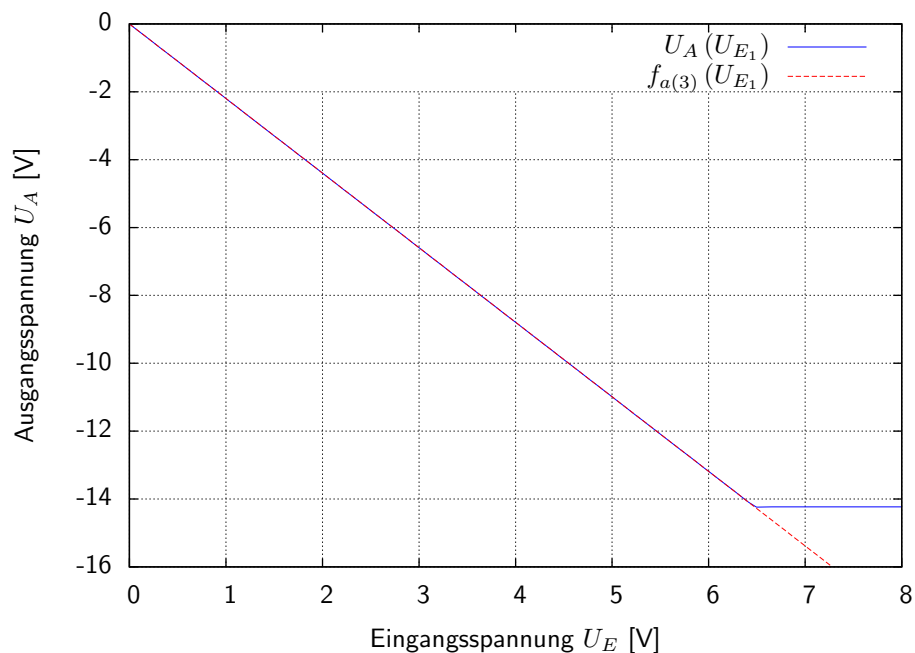


Abbildung 16: Gleichspannungsverstärkung von Eingang E_1 des Differenzverstärkers (LabVIEW Messung).

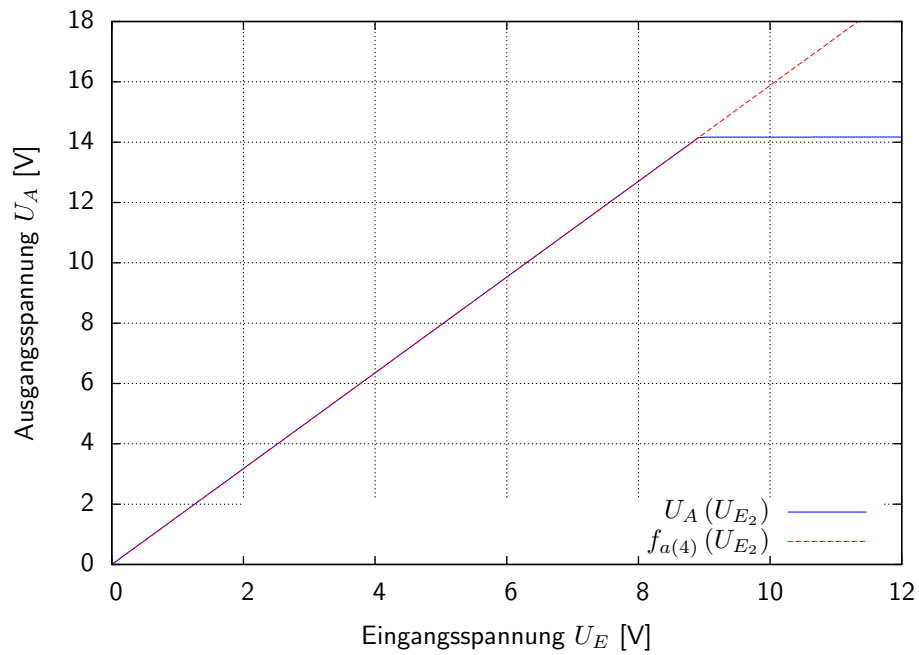


Abbildung 17: Gleichspannungsverstärkung von Eingang E_2 des Differenzverstärkers (LabVIEW Messung).

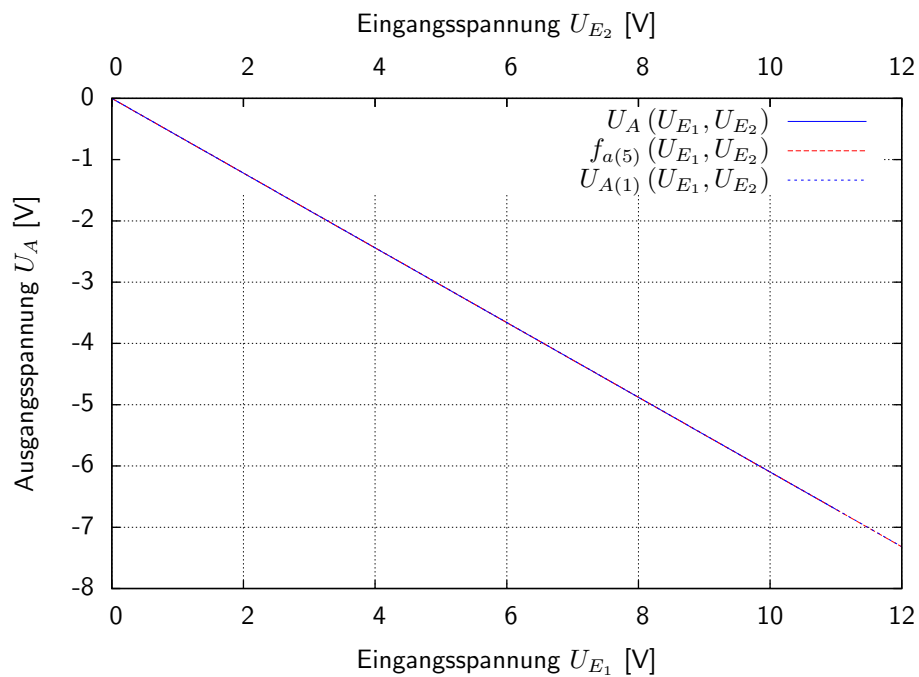


Abbildung 18: Gleichspannungsverstärkung mit $E_1 = E_2$ des Differenzverstärkers (LabVIEW Messung). Die drei Geraden liegen auf Grund der hohen Genauigkeit übereinander und sind kaum zu unterscheiden.

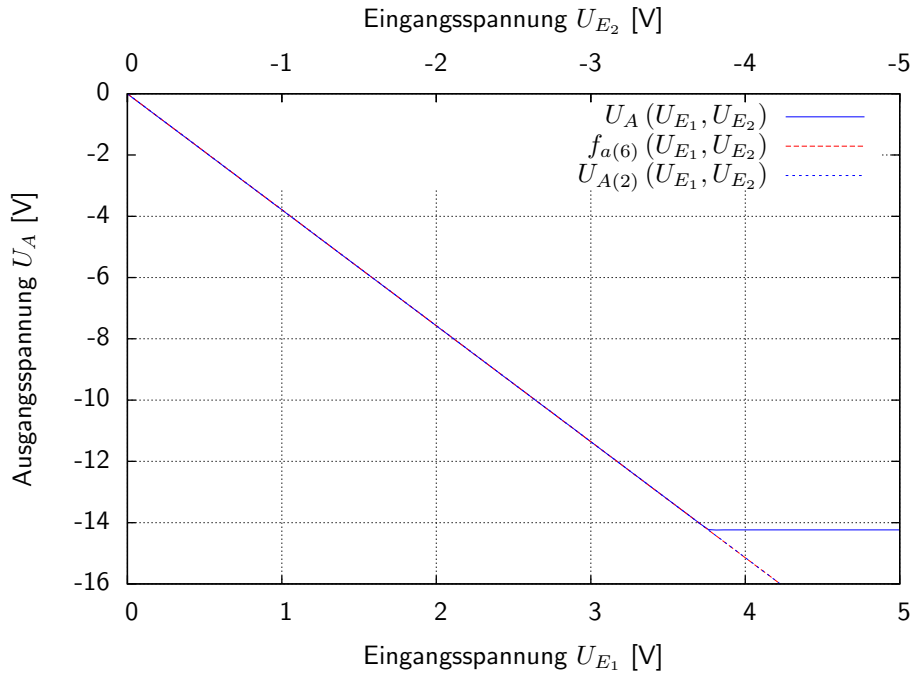


Abbildung 19: Gleichspannungsverstärkung mit $E_1 = -E_2$ des Differenzverstärkers (LabVIEW Messung). Die drei Geraden liegen auf Grund der hohen Genauigkeit übereinander und sind kaum zu unterscheiden.

4.4. Summationsverstärker

Um zu zeigen, dass die Ausgangsspannung U_A proportional zur Summe der Eingangsspannungen U_{E_i} ist, haben wir Messungen durchgeführt bei denen die Spannungen an beiden Eingängen wie folgt parametrisiert wurde:

$$U_{E_1}(t) = U_{E_1}^{max} \cdot t \quad \text{und} \quad U_{E_2}(t) = U_{E_2}^{max} \cdot t \quad \text{mit} \quad 0 \leq t \leq 1 \quad (25)$$

In Abb. 20 wurde $U_{E_1}^{max} = 4.0\text{V}$ und $U_{E_2}^{max} = 3.0\text{V}$ gewählt. Folglich endet die Kurve bei $U_{E_1}^{max} + U_{E_2}^{max} = 7.0\text{V}$ auf der x-Achse. In Abb. 21 wurde $U_{E_1}^{max} = 4.0\text{V}$ und $U_{E_2}^{max} = 1.0\text{V}$ gesetzt. Folglich endet die Kurve bei $U_{E_1}^{max} + U_{E_2}^{max} = 5.0\text{V}$ auf der x-Achse. In beiden Abbildungen wurde U_A über die *Summe* der Eingangsspannungen $U_{E_1} + U_{E_2}$ aufgetragen. Da es sich (bis zur Sättigungsspannung) offenbar um Geraden handelt konnten wir experimentell die Summiereneigenschaft der verwendeten Schaltung nachweisen:

$$U_A \propto (U_{E_1} + U_{E_2}) \quad \Rightarrow \quad U_A = V_{\Sigma} \cdot (U_{E_1} + U_{E_2}) \quad (26)$$

Die Verstärkung V_{Σ} ergibt sich durch den Fitparameter der Fitfunktion f_a zu $a(7) = -2.2014$ und $a(8) = -2.19999$. Da beide Verstärkungen die selben sein müssen mitteln wir $a(7)$ und $a(8)$ und erhalten $V_{\Sigma} = -2.200695 \approx -2.2$. Der Vergleich mit der Theorie liefert mit Gleichung (16) den Wert

$$U_A = -\frac{R_N}{R_1} \cdot (U_{E_1} + U_{E_2}) \quad \Rightarrow \quad V_{\Sigma} = -\frac{R_N}{R_1} = -\frac{22\text{k}\Omega}{10\text{k}\Omega} = -2.2 \quad (27)$$

Die Abweichung zum Messwert ist demnach minimal.

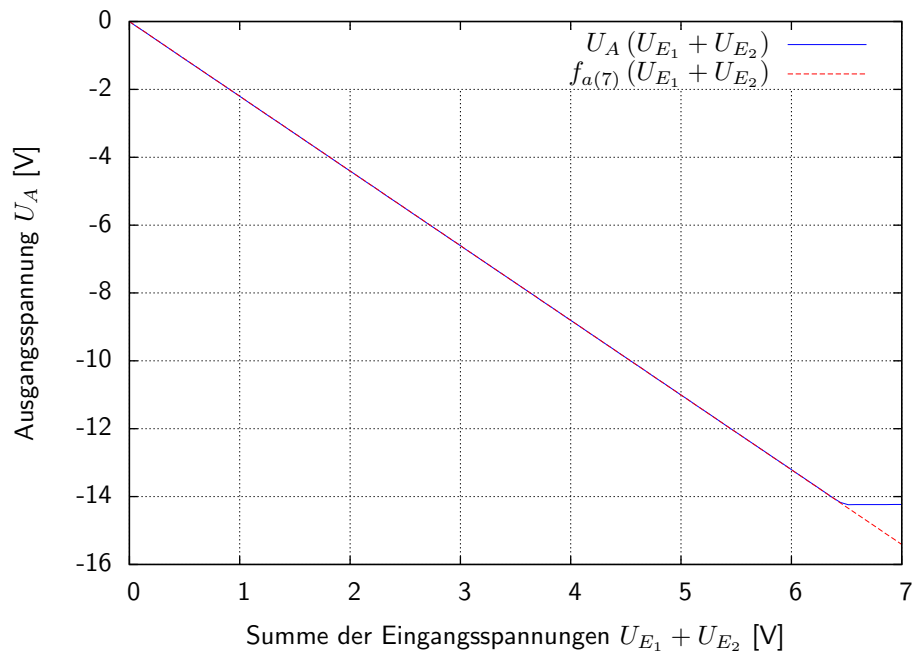


Abbildung 20: Gleichspannungsverstärkung des Summationsverstärkers mit $0V \leq U_{E_1} \leq 4V$ sowie $0V \leq U_{E_2} \leq 3V$ (LabVIEW Messung).

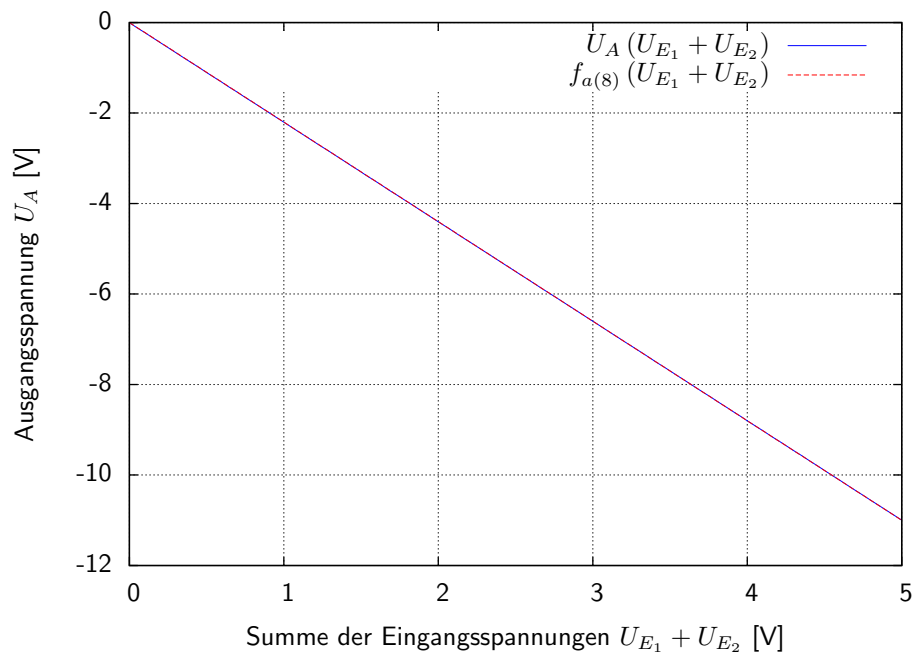


Abbildung 21: Gleichspannungsverstärkung des Summationsverstärkers mit $0V \leq U_{E_1} \leq 4V$ sowie $0V \leq U_{E_2} \leq 1V$ (LabVIEW Messung). Die Fitkurve und die gemessene Kurve liegen aufeinander und lassen sich daher nicht unterscheiden.

4.5. Nichtinvertierender Verstärker

Abbildung 22 stellt die Gleichspannungsverstärkung des nichtinvertierenden Verstärkers dar.

1. Soll der nichtinvertierende Verstärker eine Verstärkung von $V_{el}^* \approx 10$ besitzen, folgt aus Gleichung (17) mit $R_2 = 220\Omega$

$$R_1^* = R_2 \cdot (V_{el}^* - 1) = 1980\Omega \approx 2k\Omega \quad \Rightarrow \quad R_1 = 2k\Omega \quad (28)$$

2. Die Fitfunktion f_a in Abbildung 22 erfordert den Fitparameter $a(9) = 10.0427$ und damit die Verstärkung $V_{el} \approx 10.0$ welche in guter Näherung mit dem theoretischen Wert übereinstimmt.
3. Um eine Näherung für den Eingangswiderstand des nichtinvertierenden Verstärkers (i.e. des Operationsverstärkers) zu erhalten wurden bei zwei verschiedenen Spannungen die fließenden Ströme am Eingang gemessen. Mit dem Ohmschen Gesetz folgt für den mittleren Eingangswiderstand:

$$R_{E+} = \frac{1}{2} \left(\frac{U_E^{(1)}}{I_E^{(1)}} + \frac{U_E^{(2)}}{I_E^{(2)}} \right) = \frac{1}{2} \left(\frac{5.0V}{16.095mA} + \frac{8.0V}{33.243mA} \right) \approx 275.7\Omega \quad (29)$$

Mit hoher Wahrscheinlichkeit wurde hier ein Ablesefehler begangen, da übliche Eingangswiderstände von Operationsverstärkern im $M\Omega$ -Bereich liegen. Wegen des hohen Eingangswiderstandes eignet sich die hier untersuchte Schaltung zur Verstärkung von Messsignalen um auch kleine Spannungen präzise messen zu können. Da in den Eingang praktisch kein Strom fließt, wird die (Spannungs)Quelle nicht belastet und ein Abfall von Spannung am Innenwiderstand der Quelle wird vermieden (Siehe Abschnitt 1.2.4). Daher wird der nichtinvertierende Verstärker auch *Elektrometerverstärker* genannt.

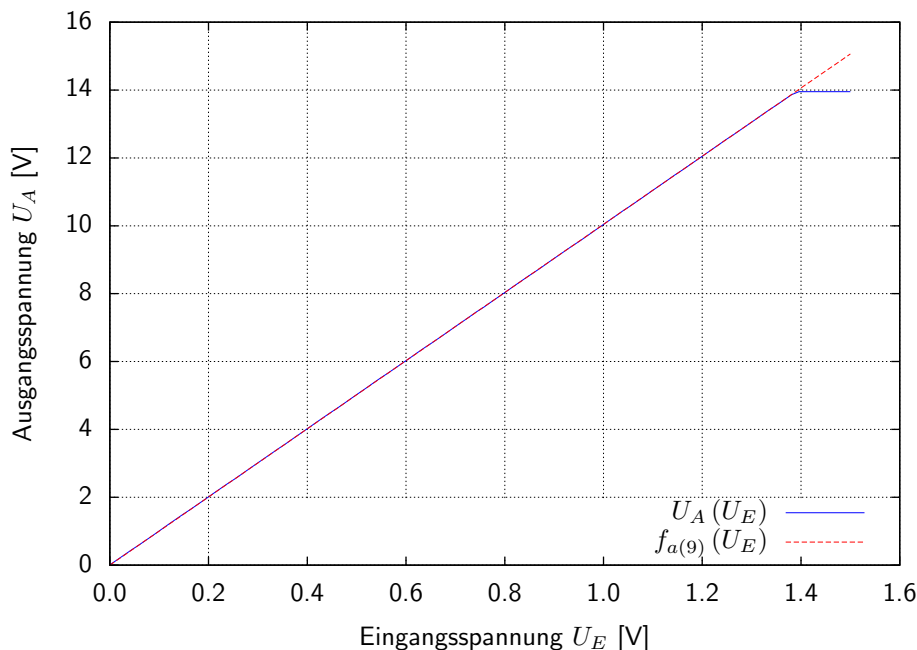


Abbildung 22: Gleichspannungsverstärkung des nichtinvertierenden Verstärkers (LabVIEW Messung).

5. Fehlerrechnung

Invertierender Verstärker Mit $V_{inv}(1) = -10.0549$ und $V_{inv}^*(1) = -\frac{R_N(1)}{R_1} = -10$ ergibt sich für die relative Abweichung

$$\delta[V_{inv}(1)] = \frac{V_{inv}(1) - V_{inv}^*(1)}{V_{inv}^*(1)} = 5.49 \cdot 10^{-3} \approx 0.5\% \quad (30)$$

Mit $V_{inv}(2) = -20.1347$ und $V_{inv}^*(2) = -\frac{R_N(2)}{R_1} = -20$ ergibt sich für die relative Abweichung

$$\delta[V_{inv}(2)] = \frac{V_{inv}(2) - V_{inv}^*(2)}{V_{inv}^*(2)} = 6.735 \cdot 10^{-3} \approx 0.7\% \quad (31)$$

Nun soll noch exemplarisch die erwartete **Toleranz der Verstärkungen** mit Hilfe einer Fehlerfortpflanzung errechnet werden. Die benutzten Widerstände hatten einen Toleranzbereich von $\delta R = \pm 5\%$ (goldener Toleranzring). Damit folgt die erwartete Toleranz der Verstärkung

$$\Delta[V_{inv}^*] = \left| \frac{\partial V_{inv}^*}{\partial R_1} \right| \cdot \Delta R_1 + \left| \frac{\partial V_{inv}^*}{\partial R_N} \right| \cdot \Delta R_N = \frac{R_N}{R_1^2} \cdot \Delta R_1 + \frac{1}{R_1} \cdot \Delta R_N \quad (32)$$

Damit folgt in den beiden Fällen mit den absoluten Toleranzen $\Delta R_1 = R_1 \cdot \delta R_1 = 50\Omega$ und $\Delta R_N = R_N \cdot \delta R_N = 500\Omega$:

$$\Delta[V_{inv}^*(1)] = 1.0 \quad \Rightarrow \quad \delta[V_{inv}^*(1)] = \left| \frac{\Delta[V_{inv}^*(1)]}{V_{inv}^*(1)} \right| = 10\% \quad (33)$$

$$\Delta[V_{inv}^*(2)] = 2.0 \quad \Rightarrow \quad \delta[V_{inv}^*(2)] = \left| \frac{\Delta[V_{inv}^*(2)]}{V_{inv}^*(2)} \right| = 10\% \quad (34)$$

Differenzverstärker Mit $V_- = -2.19762$ und $V_-^* = -\frac{R_N}{R_1} = -2.2$ ergibt sich für die relative Abweichung

$$\delta[V_-] = \frac{V_- - V_-^*}{V_-^*} = -1.08 \cdot 10^{-3} \approx -0.1\% \quad (35)$$

Mit $V_+ = 1.58794$ und $V_+^* = \frac{R_P(R_N+R_1)}{R_1(R_P+R_2)} = 1.6$ ergibt sich für die relative Abweichung

$$\delta[V_+] = \frac{V_+ - V_+^*}{V_+^*} = -7.5375 \cdot 10^{-3} \approx -0.8\% \quad (36)$$

Mit $V_{E_1=E_2} = -0.609855$ und $V_{E_1=E_2}^* = V_-^* + V_+^* = -0.6$ ergibt sich für die relative Abweichung

$$\delta[V_{E_1=E_2}] = \frac{V_{E_1=E_2} - V_{E_1=E_2}^*}{V_{E_1=E_2}^*} = 0.016425 \approx 1.6\% \quad (37)$$

Mit $V_{E_1=-E_2} = -3.78613$ und $V_{E_1=-E_2}^* = V_-^* - V_+^* = -3.8$ ergibt sich für die relative Abweichung

$$\delta[V_{E_1=-E_2}] = \frac{V_{E_1=-E_2} - V_{E_1=-E_2}^*}{V_{E_1=-E_2}^*} = -3.65 \cdot 10^{-3} \approx -0.4\% \quad (38)$$

Summationsverstärker Mit $V_\Sigma = -2.200695$ und $V_\Sigma^* = -\frac{R_N}{R_1} = -2.2$ ergibt sich für die relative Abweichung

$$\delta[V_\Sigma] = \frac{V_\Sigma - V_\Sigma^*}{V_\Sigma^*} \approx 3.16 \cdot 10^{-4} \approx 0.03\% \quad (39)$$

Nichtinvertierender Verstärker Mit $V_{el} = 10.0427$ und $V_{el}^* = 1 + \frac{R_1}{R_2} = \frac{111}{11} \approx 10.09$ ergibt sich für die relative Abweichung

$$\delta[V_{el}] = \frac{V_{el} - V_{el}^*}{V_{el}^*} \approx -4.78 \cdot 10^{-3} \approx -0.5\% \quad (40)$$

6. Zusammenfassung

Invertierender Verstärker Die lineare Verstärkung des invertierenden Verstärkers wurde mit hoher Genauigkeit verifiziert. Die Verstärkung ergab sich dabei zu

$$V_{inv}(1) \approx -10.1 \quad \text{mit} \quad \delta[V_{inv}(1)] \approx 0.5\% \quad \text{und} \quad \Delta[V_{inv}^*(1)] = 10\% \quad (41)$$

mit einem theoretischen Wert von $V_{inv}^*(1) = -10$. Wurde die Verstärkung auf den gewünschten Wert von $V_{inv}^*(2) = -20$ eingestellt ergab die Messung

$$V_{inv}(2) \approx -20.1 \quad \text{mit} \quad \delta[V_{inv}(2)] \approx 0.7\% \quad \text{und} \quad \Delta[V_{inv}^*(2)] = 10\% \quad (42)$$

Die negativen Verstärkungen weisen hierbei auf die Inversion des Ausgangssignales hin. Ohne Gegenkopplungswiderstand wurde eine instantan unendliche Verstärkung gemessen, welche sich durch die Spannungssättigung $U_A = U_-$ bemerkbar machte. Wurde die Verbindung zwischen E_+ und GND entfernt, ergab sich $U_A = U_+$; der OpAmp befand sich demnach in positiver Spannungssättigung. Da E_+ in diesem Fall kein definiertes Potential besaß muss dies als "zufälliges" Ergebnis gedeutet werden.

Schmitt-Trigger Die Eigenschaft des Schmitt-Triggers als Schwellwertschalter wurde verifiziert. Überschritt die Eingangsspannung die Schaltschwelle U_{S+} sprang der OpAmp in den Zustand $U_A = U_+$. Fiel sie unter U_{S-} schaltete der Ausgang praktisch instantan auf $U_A = U_-$ um. Die gemessene Schalthysterese ist Konsequenz dieser Schwellwertüberschreitungen.

Differenzverstärker Die Verstärkungen der additiven und subtraktiven Signale (i.e. der Signale am nichtinvertierenden und invertierenden Eingang) ergaben sich zu

$$V_- \approx -2.2 \quad \text{mit} \quad \delta[V_-] \approx -0.1\% \quad (43)$$

$$V_+ \approx 1.6 \quad \text{mit} \quad \delta[V_+] \approx -0.8\% \quad (44)$$

Damit ergab sich die Ausgangsfunktion

$$U_A(U_{E_1}, U_{E_2}) = -2.2 \cdot U_{E_1} + 1.6 \cdot U_{E_2} \quad (45)$$

welche durch Messungen mit $U_{E_1} = U_{E_2}$ und $U_{E_1} = -U_{E_2}$ verifiziert werden konnte. Hierbei ergaben sich die Verstärkungen

$$V_{E_1=E_2} \approx -0.6 = \frac{U_A(U_E, U_E)}{U_E} \quad \text{mit} \quad \delta[V_{E_1=E_2}] \approx 1.6\% \quad (46)$$

$$V_{E_1=-E_2} \approx -3.8 = \frac{U_A(U_E, -U_E)}{U_E} \quad \text{mit} \quad \delta[V_{E_1=-E_2}] \approx -0.4\% \quad (47)$$

Summationsverstärker Der untersuchte Summationsverstärker gewichtete beide Eingänge gleich, da $R_1 = R_2$. In Folge dessen war die Ausgangsspannung proportional zur Summe der Eingangsspannungen und es ließ sich eine gemeinsame Verstärkung angeben, welche gemessen wurde zu

$$V_\Sigma \approx -2.2 \quad \text{mit} \quad \delta[V_\Sigma] \approx 0.03\% \quad (48)$$

Der Summationsverstärker summiert demnach die Eingangsspannungen *gewichtet* auf und erzeugt eine zu dieser *gewichteten* Summe proportionale Ausgangsspannung.

Nichtinvertierender Verstärker Die Verstärkung des nichtinvertierenden Verstärkers wurde zu

$$V_{el} \approx 10.0 \quad \text{mit} \quad \delta[V_{el}] \approx -0.5\% \quad (49)$$

gemessen. Die positive Verstärkung ist hier kennzeichnend für die Eigenschaft, das Ausgangssignal *nicht* zu invertieren. Der Eingangswiderstand eines solchen Verstärkers ist extrem hoch, was ihn als Verstärker für Spannungsmessungen qualifiziert.

A. Messwerte

.

.