



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN
Vienna University of Technology

Elektrotechnische Grundlagen (LU 182.692)

Skriptum zur 3. Laborübung “Operationsverstärker”

Martin Delvai
Wolfgang Huber
Andreas Steininger
Thomas Handl
Bernhard Huber
Christof Pitter
Wolfgang Puffitsch

Technische Universität Wien
Institut für Technische Informatik (182)
1040, Treitlstraße 3, 3. Stock

Stand: November 2011

Inhaltsverzeichnis

1	Vorbereitungen zur Übung	2
1.1	Grundlagen Operationsverstärker	2
1.1.1	Funktionsweise Invertierender OPV	2
1.1.2	Funktionsweise Nichtinvertierender OPV	3
1.1.3	Funktionsweise Invertierender Schmitt-Trigger	3
1.2	Simulation Nichtinvertierender OPV	5
1.3	Simulation Invertierender OPV	5
1.4	Simulation Integrierer	6
1.5	Simulation Invertierender Schmitt-Trigger	7
2	Funktionsweise Nichtinvertierender OPV	8
3	OPV und Grenzfrequenz	10
4	Funktionsweise Invertierender OPV	11
5	Integrierer	12
6	Funktionsweise Invertierender Schmitt-Trigger	13

Abbildungsverzeichnis

1	Operationsverstärker (OPV)	2
2	Beschaltung des Invertierenden OPV	3
3	Beschaltung des Nichtinvertierenden OPV	3
4	Beschaltung des invertierenden Schmitt-Trigger	4
5	Kennlinie des invertierenden Schmitt-Trigger	4
6	OPV in LTSpice	5
7	Nichtinvertierender Verstärker	8
8	Pinbelegung der OPV	8
9	Invertierender Verstärker	11
10	Integrierer	12
11	Invertierender Schmitt-Trigger	13

1 Vorbereitungen zur Übung

1.1 Grundlagen Operationsverstärker

Verstärker sind Schaltelemente die Signale kleiner Eingangsamplitude in Signale größerer Ausgangsamplitude umsetzen. Ein Operationsverstärker, kurz OPV, ist ein mehrstufiger, hochverstärkender, galvanisch gekoppelter Differenzverstärker. Er kann sowohl Gleichspannung als auch Wechselspannung verstärken!

Der OPV hat einen positiven (+) und einen negativen (-) Eingang siehe Abbildung 1. Die Differenz der beiden Spannungen wird verstärkt auf dem Ausgang ausgegeben. Je nach Ansteuerung der Eingänge entscheidet sich, ob die Ausgangsspannung gleichphasig zur Eingangsspannung ist oder nicht. Wird der positive Eingang des Operationsverstärkers gesteuert, so ist die Ausgangsspannung zur Eingangsspannung phasengleich. Wird der negative Eingang des Operationsverstärkers gesteuert, so ist die Ausgangsspannung um 180° phasenverschoben zur Eingangsspannung.

Der Operationsverstärker wird mit zwei identischen Gleichspannungen betrieben. Eine davon ist positiv. Die andere ist negativ. OPVs werden nur im beschalteten Zustand eingesetzt, durch die hohe Verstärkung reichen schon sehr kleine Spannungen aus, um den Operationsverstärker bis an die positive oder negative Versorgungsspannung auszusteuern.

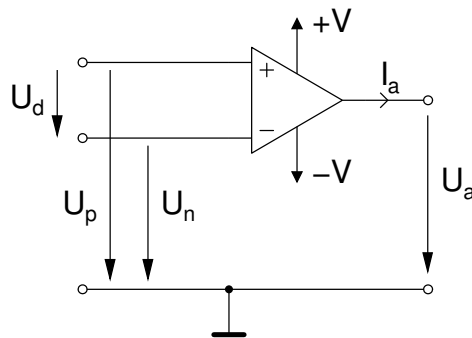


Abbildung 1: Operationsverstärker (OPV)

In der Elektronik sind vor allem 2 OPV-Schaltungen von großer Bedeutung, die nachfolgend kurz beschrieben werden.

1.1.1 Funktionsweise Invertierender OPV

Der Operationsverstärker des invertierenden Verstärkers wird mit Gegenkopplung betrieben siehe Abbildung 2. Dazu wird ein Teil der Ausgangsspannung über den Widerstand R_2 auf den negativen Eingang(-) des OPV zurückgeführt. Die Eingangsspannung U_e liegt über den Widerstand R_1 am negativen Eingang des OPV an. Die Masse (0V) liegt am positiven Eingang des OPV an. Beim Invertierenden Verstärker sind Ausgangs- und Eingangsspannung gegeneinander um 180° phasenverschoben.

Die Spannungsverstärkung berechnet sich aus:

$$V_u = -(U_a/U_e) = -(R_2/R_1)$$

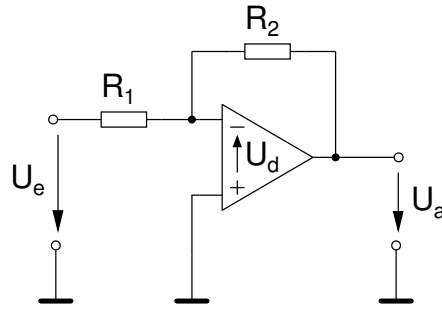


Abbildung 2: Beschaltung des Invertierenden OPV

1.1.2 Funktionsweise Nichtinvertierender OPV

Die Operationsverstärkerschaltung des Nichtinvertierenden Verstärkers ist eine Schaltung mit Reihen-Spannungs-Gegenkopplung (siehe Abbildung 3). Bei der Schaltung des Nichtinvertierenden Verstärkers ist das Eingangssignal zum Ausgangssignal gleichphasig.

Die Spannungsverstärkung berechnet sich aus:

$$V_u = (R_1 + R_2)/R_1 = 1 + (R_2/R_1)$$

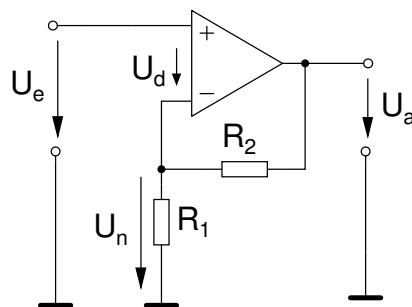


Abbildung 3: Beschaltung des Nichtinvertierenden OPV

1.1.3 Funktionsweise Invertierender Schmitt-Trigger

Im Gegensatz zu den oben angeführten Schaltungen wird der Operationsverstärker beim Schmitt-Trigger mit Mitkopplung betrieben. Verglichen mit dem nichtinvertierenden OPV sind die Eingänge des Operationsverstärkers vertauscht, und ein Teil der Ausgangsspannung wird über R_2 an den positiven Eingang(+) des OPV zurückgeführt (siehe Abbildung 4). Dadurch wird die Differenz der Eingangsspannungen vergrößert, und der OPV gerät in die Sättigung. Die Ausgangsspannung des OPV in der Sättigung ist von der Versorgungsspannung abhängig. Je nach Typ des OPV wird die positive bzw. negative Versorgungsspannung jedoch nicht ganz erreicht. Wie weit die Ausgangsspannung an die Versorgungsspannung heranreicht ist auch nicht notwendigerweise symmetrisch für die minimale und maximale Ausgangsspannung.

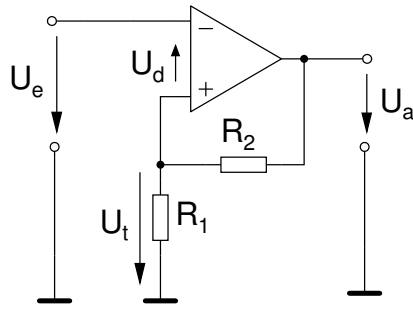


Abbildung 4: Beschaltung des invertierenden Schmitt-Trigger

R_1 und R_2 bilden einen Spannungsteiler für U_a , sodass die Spannung U_t am positiven Eingang des OPV von U_a abhängt. Dadurch ergeben sich zwei Schaltpegel U_{low} und U_{high} , ab denen der Schmitt-Trigger zwischen minimaler und maximaler Ausgangsspannung umschaltet. Wie in Abbildung 5 ersichtlich, unterscheidet sich daher die Kennlinie für ansteigende Eingangsspannungen von der für abfallende Eingangsspannungen.

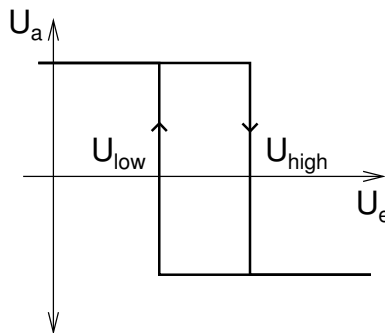


Abbildung 5: Kennlinie des invertierenden Schmitt-Trigger

1.2 Simulation Nichtinvertierender OPV

Aufgabenstellung

Bauen Sie die Schaltung aus Abbildung 7 auf und simulieren Sie das Verhalten des Systems mit LTSpice. Eine Hilfe stellt die Abbildung 6 dar. Verwenden Sie für alle Simulationen den OPV LT1014.

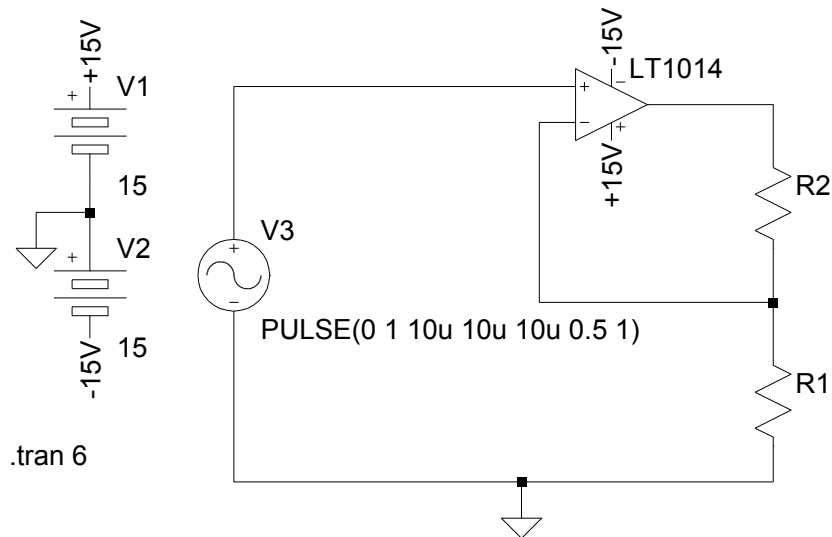


Abbildung 6: OPV in LTSpice

Durchführung

1. Dimensionieren Sie die Schaltung aus Abbildung 7 so, dass die Verstärkung zwischen 4 und 6 ist. Verwenden Sie für die Widerstände die Werte, die Sie dann auch bei der Übung einsetzen werden (siehe Kapitel 2).
2. Verwenden Sie als Eingangssignal eine Rechteckspannung ($V_{\text{initial}} = 0$, $V_{\text{on}} = 1$, $T_{\text{delay}} = 10 \mu\text{s}$, $T_{\text{rise}} = 10 \mu\text{s}$, $T_{\text{fall}} = 10 \mu\text{s}$, $T_{\text{on}} = 1$, $T_{\text{period}} = 2$).
3. Simulieren Sie die Ein- und Ausgangsspannung im Bereich von 0 bis 6 s.
4. Protokollieren Sie Ihre Ergebnisse und die Wirkungsweise der Schaltung.

1.3 Simulation Invertierender OPV

Aufgabenstellung

Bauen Sie die Schaltung aus Abbildung 9 auf und simulieren Sie das Verhalten des Systems mit LTSpice.

Durchführung

1. Dimensionieren Sie die Schaltung aus Abbildung 9 so, dass die Verstärkung zwischen -4 und -6 liegt. Verwenden Sie für die Widerstände die Werte, die Sie dann auch bei der Übung einsetzen werden (siehe Kapitel 4).
2. Verwenden Sie als Eingangssignal eine Gleichspannung von 0.5 V.
3. Simulieren Sie die Ein- und Ausgangsspannung im Bereich von 0 bis 6 s und protokollieren Sie Ihr Ergebnis.
4. Messen und protokollieren Sie:
 - Ströme und Spannungen an den Widerständen
 - Spannungen zwischen den Eingängen des OPV
 - Ströme an den Eingängen des OPV
 - Spannung am Ausgang des OPV
5. Erstellen Sie ein Bodediagramm (nur Betragsdiagramm) von dieser Verstärkerschaltung. Legen Sie dafür eine sinusförmige Spannung mit der Amplitude 1 V_{pp} an den Eingang des Verstärkers und simulieren Sie den Amplitudengang im Bereich von 1 Hz bis 10 MHz.
6. Protokollieren Sie das Bodediagramm.
7. Wie groß ist die Grenzfrequenz, also jene Frequenz bei der die Verstärkung um den Faktor $\frac{1}{\sqrt{2}}$ bzw. um 3 dB abgesunken ist?
8. Dimensionieren Sie den Verstärker erneut, sodass er eine Verstärkung von ca. -2 besitzt.
9. Simulieren Sie das Bodediagramm auch für diesen Verstärker.
10. Erkennen Sie einen Unterschied zum vorherigen Bodediagramm? Wie können Sie sich diesen erklären?

1.4 Simulation Integrierer

Aufgabenstellung

Bauen Sie die Schaltung aus Abbildung 10 auf und simulieren Sie das Verhalten des Systems mit LTSpice.

Durchführung

1. Verwenden Sie als Eingangssignal eine Rechteckspannung ($V_{\text{initial}} = 0$, $V_{\text{on}} = 1$, $T_{\text{delay}} = 10 \mu\text{s}$, $T_{\text{rise}} = 10 \mu\text{s}$, $T_{\text{fall}} = 10 \mu\text{s}$, $T_{\text{on}} = 0.1$, $T_{\text{period}} = 0.2$).
2. Simulieren Sie die Ein- und Ausgangsspannung im Simulationsbereich von 0 bis 2 s und protokollieren Sie Ihr Ergebnis.
3. Erstellen Sie ein Bodediagramm im Bereich von 1 Hz - 1 MHz. Legen Sie dafür eine sinusförmige Spannung mit der Amplitude 1 Vpp an den Eingang des Verstärkers.
4. Protokollieren Sie Ihre Ergebnisse und die Wirkungsweise der Schaltung.

1.5 Simulation Invertierender Schmitt-Trigger

Aufgabenstellung

Bauen Sie die Schaltung aus Abbildung 11 auf und simulieren Sie das Verhalten des Systems mit LTSpice. Beachten Sie dabei die im Vergleich zu den vorigen Simulationen geänderte Versorgungsspannung.

Durchführung

1. Verwenden Sie als Eingangssignal eine Sinusspannung (DC offset = 2.5, Amplitude = 2.5, Freq = 5).
2. Simulieren Sie die Ein- und Ausgangsspannung sowie die Spannung am positiven Eingang des OPV im Simulationsbereich von 0 bis 1 s und protokollieren Sie Ihr Ergebnis.
3. Berechnen Sie die Spannung am positiven Eingang des OPV für die maximale bzw. minimale Ausgangsspannung. Hinweis: Verwenden Sie das Superpositionsprinzip um den durch R_1 , R_2 und R_3 gebildeten Spannungsteiler für U_v und U_a getrennt zu berechnen.
4. Ändern Sie als Eingangssignal auf eine Rechteckspannung mit folgenden Parametern: $V_{\text{initial}} = 0$, $V_{\text{on}} = 5$, $T_{\text{delay}} = 0$, $T_{\text{rise}} = 0.1$, $T_{\text{fall}} = 0.1$, $T_{\text{on}} = 0$, $T_{\text{period}} = 0.2$ (mit den angegebenen Parametern degeneriert das Rechtecksignal zu einem Dreieckssignal).
5. Wiederholen Sie die Simulation mit dem veränderten Eingangssignal und vergleichen Sie die Ergebnisse der Simulationen.
6. Protokollieren Sie Ihre Ergebnisse und die Wirkungsweise der Schaltung.

2 Funktionsweise Nichtinvertierender OPV

Lernziel

- Kennen lernen der Arbeitsweise eines Nichtinvertierenden Operationsverstärkers
- Verständnis der Funktionsweise von OPV-Grundsaltungen

Aufgabenstellung

In der Übung soll eine einfache Nichtinvertierende Operationsverstärkerschaltung aufgebaut werden. Es sollen die Ströme und Spannungen in dieser Schaltung gemessen und dadurch das Verhalten des OPV nachvollzogen werden.

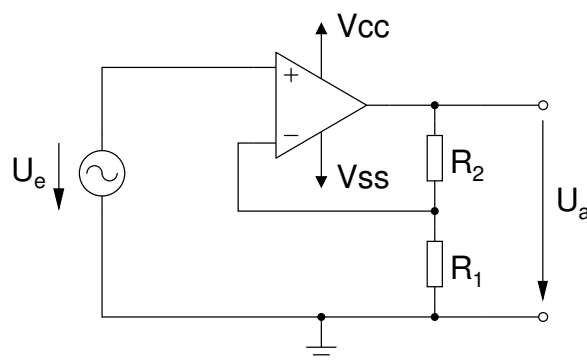


Abbildung 7: Nichtinvertierender Verstärker

Zum Aufbau der Schaltungen stehen die Operationsverstärkertypen LM741 und LM324 zur Verfügung. Abbildung 8 zeigt die Pinbelegung dieser OPV.

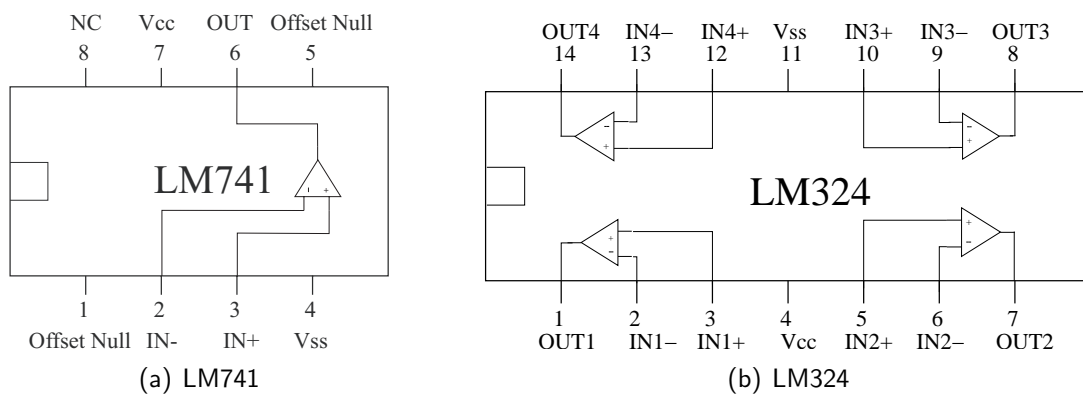


Abbildung 8: Pinbelegung der OPV

Durchführung

1. Dimensionieren Sie die Schaltung aus Abbildung 7 so, dass die Verstärkung zwischen 4 und 6 ist. Wählen Sie die Widerstände so, dass der Messfehler, hervorgerufen durch die Messgeräte, nicht ins Gewicht fällt (siehe Laborübung 1). Bauen Sie die Schaltung auf und legen Sie eine Gleichspannung von 0.5 Volt an. Das Netzgerät wird für die ± 15 V Versorgungsspannung des OPV benutzt. Der Frequenzgenerator kann als Gleichspannungsquelle benutzt werden, indem der Offset = 0.5 V und Amplitude = 1 mVpp gesetzt wird.
2. Überprüfen Sie die Funktion der Schaltung. Messen und protokollieren Sie:
 - Ströme und Spannungen an den Widerständen
 - Spannungen zwischen den Eingängen des OPV
 - Ströme an den Eingängen des OPV
 - Spannung am Ausgang des OPV
3. Ändern sie die Eingangsspannung von 0.5 V auf 1 V, und führen sie die Messungen erneut aus.
4. Was hat sich geändert? Was ist gleich geblieben? Versuchen Sie aus den Messergebnissen die Funktionsweise eines idealen Nichtinvertierenden OPV abzuleiten in Bezug auf:
 - Eingangswiderstand
 - Ausgangswiderstand
 - Verstärkung.
5. Erzeugen Sie mit dem Frequenzgenerator eine Dreiecksspannung mit 1 Vpp. Führen Sie diese Spannung dem Eingang einmal mit der Frequenz 100 Hz und einmal mit 100 kHz zu. Beobachten und protokollieren Sie Ihre Ergebnisse.

3 OPV und Grenzfrequenz

Lernziel

- Grenzen der OPV aufzeigen
- Zusammenhang zwischen Verstärkung und Grenzfrequenz erkennen

Aufgabenstellung

In diesem Teil der Übung sollen die Grenzen des OPV bezüglich seines Frequenzbereichs untersucht werden. Die Verstärkerschaltung wird mit einem niederfrequenten Eingangssignal eingespeist. Anschließend wird die Frequenz sukzessive erhöht und die Ausgangsspannung gemessen. Mit den erhaltenen Messpunkten soll das Bodediagramm (nur das Betragsdiagramm) gezeichnet werden. Daraufhin soll die Verstärkung der Schaltung verändert werden und der Zusammenhang zwischen Verstärkung und Grenzfrequenz untersucht werden.

Durchführung

1. Verwenden Sie die Schaltung aus der vorigen Teilübung.
2. Schalten Sie eine Wechselspannung am Eingang des Verstärkers (Sinus, 100 Hz, Offset = 0V, Amplitude = 1V)
3. Messen Sie die Eingangsspannung und Ausgangsspannung mit dem Oszilloskop.
4. Erzeugen Sie ein Bode-Diagramm (nur Amplitudengang). Erhöhen Sie die Frequenz bis 1MHz. Was verändert sich? Die Grenzfrequenz ist jene Frequenz, bei der die Verstärkung um den Faktor $\frac{1}{\sqrt{2}}$ also um -3 dB abgesunken ist.
5. Messen sie die Eingangs- und Ausgangsspannung bei 0.01-, 0.1-, 1-, 10- 100-fachen der Grenzfrequenz. Zeichnen sie zusätzliche Punkte um die Grenzfrequenz ein. (ca. 10 Punkte symmetrisch um die Grenzfrequenz)
6. Dimensionieren Sie den Verstärker erneut, sodass er eine Verstärkung zwischen 2 und 4 besitzt.
7. Führen Sie die Punkte 4 und 5 mit dieser Schaltung aus. Zeichnen Sie das Bodediagramm auch für diesen Verstärker.
8. Erkennen Sie einen Unterschied zum vorherigen Bodediagramm? Wie können Sie sich diesen erklären?

4 Funktionsweise Invertierender OPV

Lernziel Kennen lernen der Arbeitsweise eines Invertierenden Operationsverstärkers

Aufgabenstellung

In der Übung soll eine einfache Invertierende Operationsverstärkerschaltung aufgebaut werden. Es sollen die Ströme und Spannungen in dieser Schaltung gemessen und dadurch das Verhalten des OPV nachvollzogen werden.

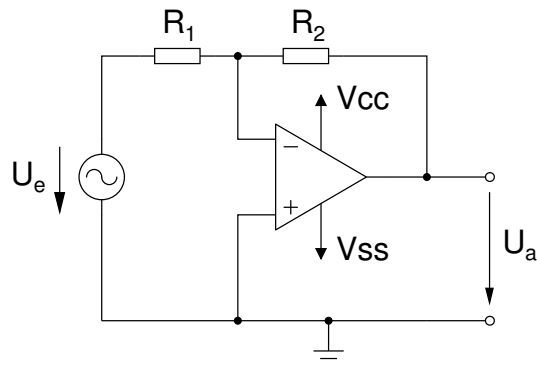


Abbildung 9: Invertierender Verstärker

Durchführung

1. Dimensionieren Sie die Schaltung aus Abbildung 9 so, dass die Verstärkung zwischen -4 und -6 ist. Wählen Sie die Widerstände so, dass der Messfehler, hervorgerufen durch die Messgeräte, nicht ins Gewicht fällt. Bauen Sie die Schaltung auf und legen Sie eine Gleichspannung von 0.5 Volt an. Das Netzgerät wird für die ± 15 V Versorgungsspannung des OPV benutzt. Der Frequenzgenerator kann als Gleichspannungsquelle benutzt werden, indem der Offset = 0.5 V und Amplitude = 1 mVpp gesetzt wird.
2. Überprüfen Sie die Funktion der Schaltung. Messen und protokollieren Sie:
 - Ströme und Spannungen an den Widerständen
 - Spannungen zwischen den Eingängen des OPV
 - Messen Sie die Ströme an den Eingängen des OPV
 - Spannung am Ausgang des OPV

5 Integrierer

Lernziel Kennen lernen der Arbeitsweise eines Integrierers

Aufgabenstellung

In der Übung soll eine einfache integrierende Operationsverstärkerschaltung aufgebaut und deren Funktionsweise untersucht werden.

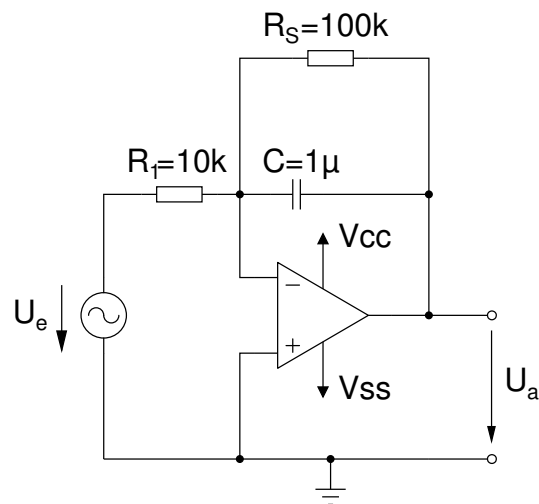


Abbildung 10: Integrierer

Durchführung

1. Bauen Sie die Schaltung aus Abbildung 10 auf. Verwenden Sie als Eingangssignal eine Rechteckspannung mit der Frequenz 5 Hz und einer Amplitude von 1 Vpp. Das Netzgerät wird für die ± 15 V Versorgungsspannung des OPV benutzt.
2. Beobachten und protokollieren Sie das Ergebnis.
3. Erklären Sie die Wirkungsweise der Schaltung (ohne Berücksichtigung des Widerstandes R_S , der nur der Stabilisierung des Integrierers dient).

6 Funktionsweise Invertierender Schmitt-Trigger

Lernziel Kennen lernen der Arbeitsweise eines Schmitt-Triggers

Aufgabenstellung

In der Übung soll ein invertierender Schmitt-Trigger aufgebaut und dessen Funktionsweise untersucht werden.

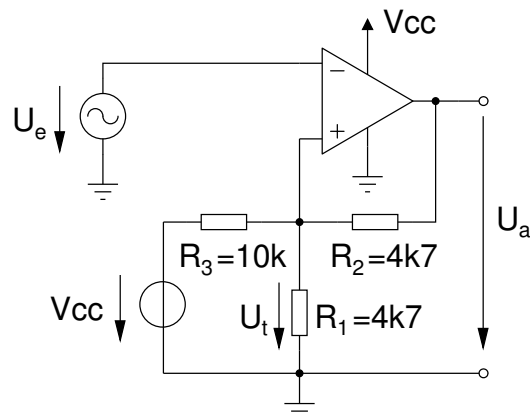


Abbildung 11: Invertierender Schmitt-Trigger

Durchführung

- Bauen Sie die Schaltung aus Abbildung 11 mit dem OPV LM324 auf. Verwenden Sie das Netzgerät zur Erzeugung der Versorgungsspannung V_{cc} von +5 V. Verbinden Sie als Eingangssignal eine Sinusspannung mit der Frequenz 5 Hz, einem Offset von 2.5 V und einer Amplitude von 5 Vpp.
- Beobachten Sie und protokollieren Sie die Eingangsspannung, die Ausgangsspannung und die Spannung U_t . Wie beeinflusst die Eingangsspannung die Ausgangsspannung? In welcher Beziehung steht U_t zu U_a und V_{cc} ?
- Vergleichen Sie die gemessenen Werte für die Ausgangsspannung und U_t mit den Werten aus der Simulation. Welche Unterschiede erkennen Sie?
- Verringern Sie die Amplitude des Eingangssignals. Inwiefern ändert sich dadurch das Ausgangssignal?
- Zeichnen Sie mit dem XY-Modus des Oszilloskops die Kennlinie der Schaltung auf und interpretieren Sie diese. Verändern Sie für die Aufzeichnung der Kennlinie die Frequenz des Eingangssignals passend.