

Versuch 2

Bipolartransistoren**1. Einleitung**

In diesem Versuch werden zunächst die elementaren Eigenschaften bipolarer Transistoren untersucht. Anschließend erfolgt ihr Einsatz in einigen Verstärker- Grundsaltungen.

Bei allen Versuchsaufgaben: Noch bevor Sie irgendeine Messung an den Schaltungen oder Bauelementen durchführen, entwerfen Sie zunächst Ihre Schaltung theoretisch unter Anwendung von EWB! Analysieren und bewerten Sie die Eigenschaften der im Entwurf verwendeten Bauelemente! Vergleichen Sie bei allen Verstärker- Schaltungen Ihre Messresultate mit den Simulationsergebnissen aus EWB! Welche Unterschiede gibt es und warum?

Dieser Versuch ist in vier Abschnitte unterteilt:

1. Aufnahme der I-U-Kennlinien von npn- und pnp-Transistoren in Emitterschaltung
2. Kollektorschaltung
3. Emitterschaltung
4. Differenzverstärker

Bipolare Transistoren sind aktive, nichtlineare Halbleiterbauelemente mit drei Anschlüssen. In diesen Bauelementen steuert das Signal an einem Anschluss die nichtlinearen I-U-Kennlinien zwischen den anderen Anschlüssen. Solche aktiven Bauelemente benötigen eine externe DC-Stromversorgung.

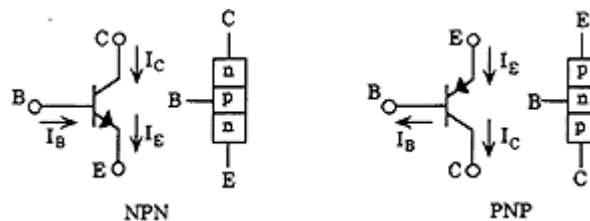


Abb.1 Schematische Darstellung von npn- und pnp-Transistoren.

Es gibt zwei Arten von Bipolartransistoren: npn und pnp. "p" und "n" bezeichnen jeweils die Dotierung der Schichten (Leitungstyp). Die drei Schichten bzw. Gebiete in Folge werden als Emitter, Basis und Kollektor bezeichnet. In Abb. 1 sind beide Transistortypen schematisch dargestellt. Der Pfeil (auf dem Emitter) bezeichnet im Schaltzeichen den Typ des Transistors, indem er die technische Richtung des aktuellen Stroms anzeigt (für npn-Transistoren zeigt der Pfeil nach außen, für pnp-Transistoren nach innen).

Bezeichnungsweise:

- DC- Strom und Spannung werden mit großen Buchstaben I und U angegeben.
- AC- Strom und Spannung werden mit kleinen Buchstaben i und u bezeichnet.
- Die Ströme in den drei Transistorgebieten werden I_B , I_C bzw. I_E genannt und stets in positiver Richtung dargestellt (siehe Abb.1).
- Die Spannungen in bezug auf die Masse werden mit U_B , U_C und U_E bezeichnet.
- Eine Spannungsdifferenz wird mit $U_{BE} = U_B - U_E$, U_{CB} oder U_{CE} bezeichnet.
- Die Spannung von einer Spannungsquelle wird mit U_{BB} , U_{CC} oder U_{EE} bezeichnet.

Physikalisch gesehen ist ein Transistor ein Halbleiterbauelement mit zwei pn-Übergängen (Dioden). Normalerweise wird der Emitter-Basis-Übergang in Durchlaßrichtung (entspricht der Richtung des Pfeils in Abb.1) und der Kollektor-Basis-Übergang in Sperrrichtung betrieben. Dadurch wird der Strom in npn-Transistoren vom Kollektor zum Emitter (nicht aus der Basis) und in pnp-Transistoren vom Emitter zum Kollektor geleitet. Es gilt dann $U_C > U_B > U_E$ für einen npn-Transistor bzw. $U_C < U_B < U_E$ für

einen npn-Transistor. Emittter und Basis sind nicht einfach vertauschbar. Um die gewünschten Transistorfunktionen zu realisieren, werden beide Übergänge unterschiedlich hergestellt.

Die Abb.2 zeigt, wie die Transistoranschlüsse belegt sind. Die meisten Transistoren werden entweder in runden Metall- (TO) oder kleinen Plastikgehäusen verpackt. Im Falle runder Metallgehäuse ist die Basis fast immer das mittlere Pin. Der Emittter steht am nächsten zur Nase, die sich auf dem Gehäuserand befindet. Der Kollektor ist meist elektrisch an das Metallgehäuse angeschlossen. Für Transistoren in Plastikgehäusen (sogenannte Miniplasttransistoren) gibt es *kein* Standardlayout; die Anordnung der Anschlüsse ist *in Datenblättern nachzuschlagen*.



Abb.2 Zwei unterschiedliche Transistorgehäuseformen

2. Transistorkennlinien

Studieren Sie zunächst die Eigenschaften eines npn-Transistors (BC546) und eines pnp-Transistors (BC556): Diese Transistoren werden auch im weiteren Versuch verwendet.

Mit Hilfe eines Transistor-Testers nehmen Sie bei verschiedenen I_B -Werten eine Kurvenschar von I_C als Funktion von U_{CE} auf (Kennlinienfeld). Beachten Sie dabei *unbedingt* die Grenzwerte für die Ströme und Spannungen (vgl. Datenblätter): Verwenden Sie mit Rücksicht auf die Stromverstärkung keine zu hohen Basis-Ströme; beginnen Sie mit kleinen Werten! Bezeichnen Sie auf den Kurven die verschiedenen Funktionsbereiche des Transistors (Sperrbereich, Sättigungsbereich, aktiver Bereich)! Bei einigen U_{CE} schätzen Sie die Stromverstärkung des Transistors $\beta = I_C/I_B$ ab. Um ein Gefühl für die Änderungen der Parameter bei verschiedenen Bauelementen zu bekommen, vergleichen Sie Ihre Transistoren mit je einem anderen gleichen Typs (npn oder pnp).

Sehen Sie sich die Eigenschaften idealer pnp- und npn-Transistoren in EWB an! Vergleichen Sie diese idealen Transistoren mit anderen Transistoren aus der EWB-Bibliothek. Die wichtigen Eigenschaften sind $\beta(\beta_F)$, r_b (R_B), r_c (R_C), r_e (R_E).

3. Kollektorschaltung

Die Kollektorschaltung hat einen hohen Eingangs- und einen niedrigen Ausgangswiderstand. Sie wird deshalb als Impedanzwandler eingesetzt, wenn hochohmige Signalquellen an niederohmige Lasten angepasst werden müssen. Liegt die positive Halbwelle am Eingang, dann steigt der Ausgangsstrom und damit die Ausgangsspannung; sie ist also zur Eingangsspannung gleichphasig. Gleichzeitig folgt aber die Emitterspannung bis auf eine geringe Differenz der Eingangsspannung. Diese Schaltung heißt deshalb auch **Emitterfolger**. Die Spannungsverstärkung liegt damit unter dem Wert Eins, eine Strom- und Leistungsverstärkung findet aber statt. Konstruieren Sie eine Schaltung wie in Abb.3.

Simulieren Sie die Schaltung mit EWB! Falls notwendig, müssen die Komponenten von Ihnen geändert werden. Die an Eingang und Ausgang gekoppelten Kondensatoren (C1 und C2) sind in die Schaltung eingebaut, um Signalquelle bzw. Verbraucher/Last galvanisch von der DC-Versorgungsspannung zu entkoppeln. Stellen Sie den Arbeitspunkt des Emitters (auf etwa $U_{CC}/2$) ein, als Betriebsspannung wählen wir $U_{CC} = +15$ V.

Denken Sie an zwei nützliche Tatsachen:

- Wenn der Transistor in seinem aktiven Bereich arbeitet, ist die DC-Emitterspannung die einer Diode mit absinkender Basisspannung, d.h. $|U_E| \approx |U_B - 0.6|$. Damit der Transistor immer leitend bleibt, darf U_B nicht unter 0.6 V absinken!

- Sie wollen den Eingangsspannungsteiler (R1 und R2) unempfindlich gegenüber dem inneren Widerstand an der Basis haben ($\cong \beta R_E$).

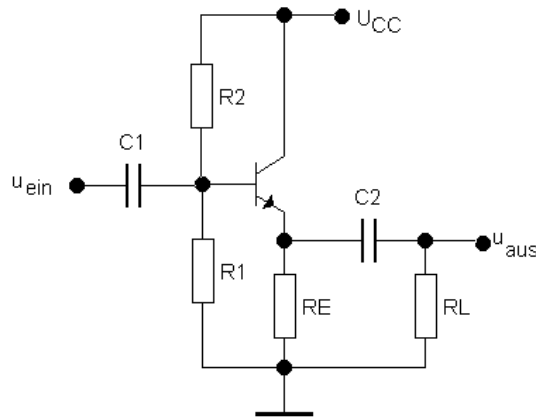


Abb.3 Transistorverstärker in Kollektorschaltung

Nehmen Sie Ihre Schaltung in Betrieb und vergleichen Sie die Ergebnisse mit der Simulation! Funktioniert die Schaltung so, wie Sie es erwartet haben?

Messen Sie die Verstärkung als Funktion der Frequenz, stellen Sie in einem Diagramm die Messergebnisse dar! Bestimmen Sie, in welchem Frequenzbereich die Verstärkung bzgl. des Maximums nicht unter 3 dB absinkt! Man bezeichnet diesen Frequenzbereich als die *Bandbreite*. Erklären Sie, wie beide Koppelkondensatoren die Frequenzcharakteristik beeinflussen! Benutzen Sie ein kleines Eingangssignal (kleiner als 1 V Spitze-Spitze, $U_{SS} < 1$ V) und messen Sie den Ausgangs- und Eingangswiderstand für einige Frequenzen innerhalb der Bandbreite: Überlegen Sie sich, wie Sie das tun können!

Versuchen Sie dann, die Eingangsspannung soweit zu erhöhen, bis das Ausgangssignal des Verstärkers verzerrt wird. Erklären Sie, warum das geschieht!

4. Emitterschaltung

Durch Anschließen eines Widerstandes in der Basisschaltung können wir unsere Schaltung als Spannungsverstärker verwenden.

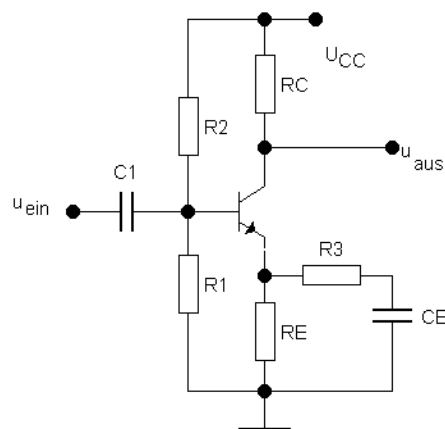


Abb.4 Emitterschaltung

Legen Sie eine Spannung von etwa $2/3 U_{CC}$ und einen Strom von 1 mA an den Kollektor an (Arbeitspunkteinstellung)! Wiederholen Sie diese Messung mit einem anderen Transistor! Ist die Spannung abhängig vom verwendeten Transistor?

Die Kleinsignalverstärkung ist:

$$A_V = -\frac{\mathbf{b} \cdot Z_C}{\mathbf{b} \cdot r_D + R_S + (\mathbf{b} + 1) \cdot Z_E} \approx -\frac{Z_C}{Z_E}$$

Dabei sind Z_C und Z_E die Impedanzen in der Kollektor- und Emitter-Schaltung. R_S ist der Widerstand der Quelle und r_D ist der differentielle Widerstand der Diode.

Zunächst messen Sie die Verstärkung ohne R_3 und C_E . Stellen Sie das Oszilloskop dabei auf AC-Kopplung, damit die DC-Spannung abgeblockt wird! Danach versuchen Sie durch zusätzlichen Einbau von R_3 und C_E eine Erhöhung der Verstärkung zu erzielen. Man braucht zwar einerseits ein großes R_E für eine hinreichende DC-Spannung, reduziert aber andererseits damit auch die Verstärkung. Das Einfügen von R_3 und C_E beeinflusst den DC-Betrieb nicht, sehr wohl aber das AC-Signal. R_3 unterdrückt die Abhängigkeit der Verstärkung von r_D , weil sonst r_D zur Verzerrung führt. Messen Sie den Ausgangswiderstand des Verstärkers! Denken Sie dabei daran, dass jeder Lastwiderstand am Ausgang mit einem großen Kondensator angeschlossen werden muss, um Änderungen des DC-Arbeitspunktes zu vermeiden!

Wie der Emitterfolger hat dieser Verstärker auch Grenzen:

- Er kann keine DC-Signale verstärken.
- Seine Verstärkung ist klein.
- Er ist ein unsymmetrischer Verstärker, was bedeutet, dass eine Seite des ankommenden Signals an Masse liegt.

Mit Hilfe eines sog. Operationsverstärkers kann man alle diese Probleme beheben. Die folgende Schaltung ist der erste wesentliche Baustein für einen Operationsverstärker.

5. Differenzverstärker

Im Idealfall hat ein Differenzverstärker ein Ausgangssignal proportional zur Differenz der Eingangsspannungen. Eine wichtige Eigenschaft solcher Verstärker ist die Gleichtaktunterdrückung: Werden die beiden Eingänge des Differenzverstärkers miteinander verbunden und mit einer gemeinsamen Spannung (der sog. Gleichtaktspannung) angesteuert, dann ist die Ausgangsspannung im Idealfall gleich Null. Diese Eigenschaft ist in vielen Bereichen sehr nützlich, u.a. zur Unterdrückung von Stör-signalen.

Bauen Sie die in Abb. 5 dargestellte Schaltung auf:

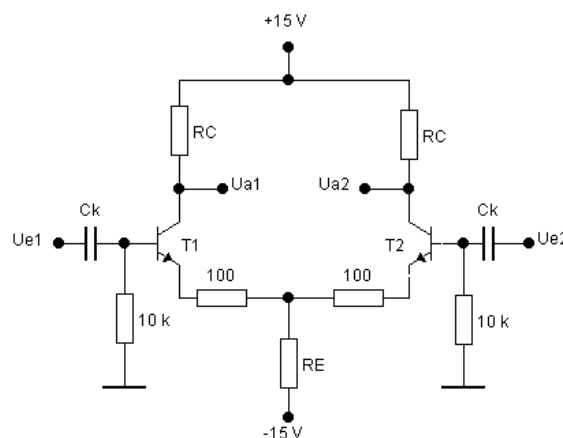


Abb.5 Fundamentale Schaltung eines Differenzverstärkers

Setzen Sie mit Hilfe von R_E den DC-Kollektorstrom auf 2 mA (durch *jeden* Transistor). Die Kollektorspannung sollte sich auf etwa auf 7 V einstellen.

Zuerst betreiben Sie die Schaltung als unsymmetrischen Verstärker: Legen Sie Eingang 2 an Masse und an Eingang 1 eine Spannung von 100 mV (V_{SS}). Messen Sie die untere Grenzfrequenz (am 3 dB-Punkt)! Wählen Sie eine Frequenz innerhalb der Bandbreite und messen Sie die Differenzverstärkung A_{diff} . Überlegen Sie sich genau, wo und was Sie dazu messen müssen! Danach legen Sie an beide Eingänge das gleiche Signal an: Messen Sie die Gleichtaktverstärkung! Berechnen Sie daraus die Gleichtaktunterdrückung (CMRR) in dB. Messen Sie Eingangs- und Ausgangswiderstand mit geeigneten einfachen Mitteln! Die Gleichtaktunterdrückung des Differenzverstärkers lässt sich durch das Ersetzen von R_E mit einer Konstantstromquelle drastisch erhöhen: Benutzen Sie die in Abb.6 dargestellte Schaltung versuchsweise als Konstantstromquelle.

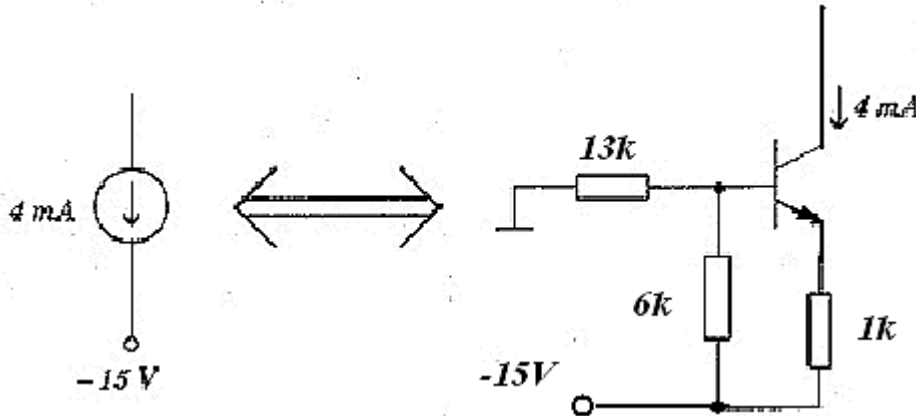


Abb.6 Einfache Konstantstromquelle für den Differenzverstärker in Abb.5

Wählen Sie geeignete Widerstände, um den gleichen DC-Strom wie zuvor einzustellen: Betrachten Sie bitte die angegebenen Widerstandswerte nur als Anhaltspunkt. Bestimmen Sie nun erneut die Gleichtaktunterdrückung!

Die beiden 100Ω- Widerstände in Abb.5 haben einen großen Einfluss auf die Verstärkung und den Ausgangswiderstand des Differenzverstärkers. Das ist durch einen Kurzschluss über die Widerstände zu überprüfen. Sie sollten eine größere Verstärkung, aber einen kleineren Ausgangswiderstand beobachten. Die Verstärkung hängt jetzt vom DC-Strom der Stromquelle ab (diese Eigenschaft wird zur Herstellung von programmierbaren Verstärkern verwendet).

Überprüfen Sie als nächstes, ob Ihre Schaltung tatsächlich ein Differenzverstärker ist: Messen Sie die Spannung am 100Ω- Widerstand in der Schaltung, die in Abb. 7 gezeigt ist. Welche Gleichtaktspannung sieht der Verstärker?

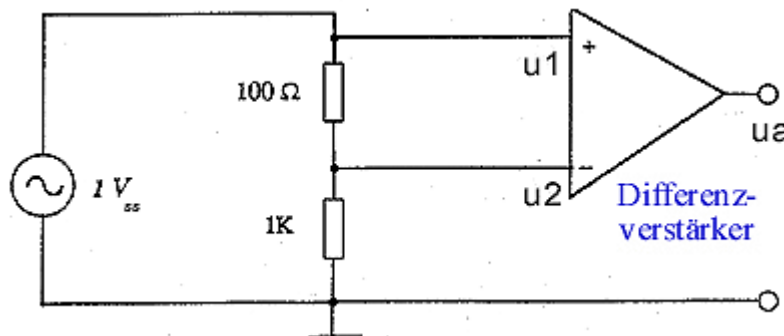


Abb. 7. Aufbau zur Messung der Gleichtaktspannung des Differenzverstärkers in Abb. 5

Testen Sie die Darlington-Schaltung aus Abb. 8 zur Verbesserung des Eingangswiderstandes. Mit Darlington-Schaltungen können Sie viel größere Vorwiderstände benutzen und die Eingangswiderstände wesentlich erhöhen. Überprüfen Sie, ob das auch bei Ihrem Aufbau zutrifft!

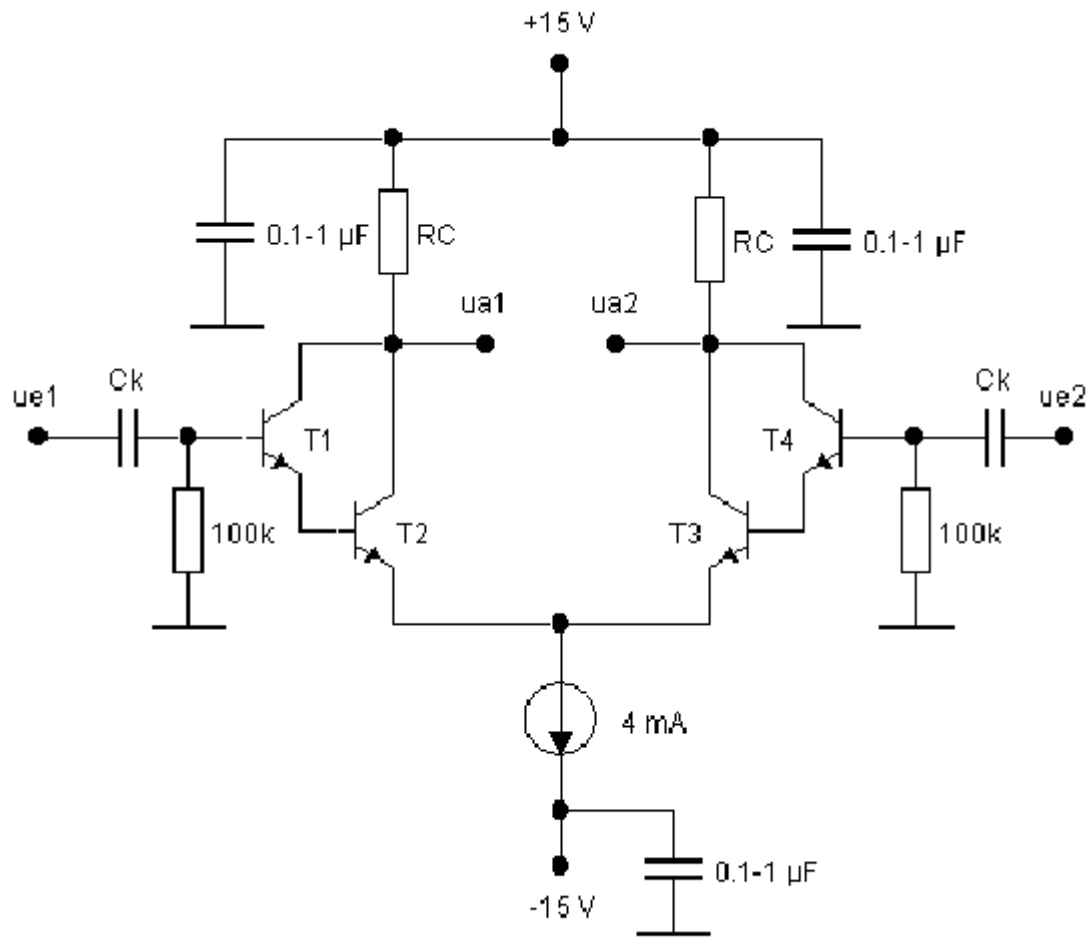


Abb.8 Erhöhung des Eingangswiderstandes von Differenzverstärkern durch Einsatz der Darlington-Schaltung

Generelle Bemerkungen:

- Achten Sie immer darauf, dass Ihre Leitungsführung so kurz wie nur möglich ist!
- Schließen Sie äußere Gleichspannungsquellen für (störende) Wechselspannungen immer gegen die Masse kurz, indem Sie - wie in Abb.8 gezeigt - Kondensatoren einsetzen, die möglichst nahe an den aktiven Bauelementen sitzen sollten.

Beachten Sie diese wichtigen *Grundregeln* nicht, werden Sie sehr unangenehme Erfahrungen sammeln: In nahezu jedem Verstärker kann es durch unbeabsichtigte Rückkopplung (z.B. durch ungünstige Leitungsführung) und durch Einkopplung von Störsignalen (z.B. aus der Gleichspannungsversorgung) zu unerwünschten Oszillationen kommen. Das äußert sich als hochfrequenteres Störsignal, das auf Ihrem eigentlichen Nutz-Signal liegt.