

Versuch C 13: Transistorverstärker

1. Literatur: W. Walcher, Praktikum der Physik
Gerthsen-Kneser-Vogel, Physik
Kohlrausch, Praktische Physik, Bd. 2
Unger/Schultz, Elektronische Bauelemente und Netzwerke,
Bd. 1

Stichworte: Transistor, Kennlinien, Emitter-, Basis-, Kollektorschaltung
Arbeitspunkt, Strom-, Spannungs-, Leistungsverstärkung,
Frequenzgang, Strom-Gegenkopplung

2. Grundlagen

Die für den vorliegenden Versuch notwendigen Grundkenntnisse der physikalischen Eigenschaften von Transistoren als Halbleiterbauelemente werden hier vorausgesetzt. Siehe dazu z.B. Versuch C11: *Kennlinien von HL-Diode und Transistor*.

Die wesentliche Ursache für die Verstärkung elektrischer Signale durch einen Transistor beruht auf seiner Eigenschaft, mittels eines geringen Stroms zwischen Basis und Emitter einen wesentlich größeren Strom zwischen Kollektor und Emitter zu steuern. Die für die jeweilige Anwendung gewünschte Verstärkung des Transistors kann zum einen durch die Auswahl der drei möglichen Grundschaltungen *Emitter-, Basis-, Kollektorschaltung* zwischen Eingangs-, Ausgangs- und Versorgungsspannung erfolgen. Zum anderen kann sie durch die einzelne Beschaltung seiner Anschlüsse hinsichtlich spezieller Anforderungen an den Verstärker erreicht bzw. optimiert werden.

Im vorliegenden Versuch werden die Verstärkereigenschaften eines ein- sowie zweistufigen Verstärkers in Emitterschaltung mit dem npn-Si-Transistor BC 140 für verschiedene Beschaltungen untersucht.

2.1 Transistor als Verstärker

Abb. 1b zeigt zur Übersicht das Schaltsymbol eines npn-Transistors mit den Strömen I_B , I_C und I_E durch seine Anschlüsse Basis, Kollektor und Emitter sowie die Spannungen U_{BE} und U_{CE} zwischen Basis und Emitter bzw. Kollektor und Emitter. U_B ist die Betriebsspannung, R_L der für die Spannungsverstärkung nötige Lastwiderstand. Abb. 1a gibt schematisch die wichtigen Kennlinien $I_C(U_{CE})$, $I_C(I_B)$ und $I_B(U_{BE})$ wieder. Man beachte, dass die nach unten aufgetragene Spannung U_{BE} und der nach links aufgetragene Strom I_B positive Größen sind.

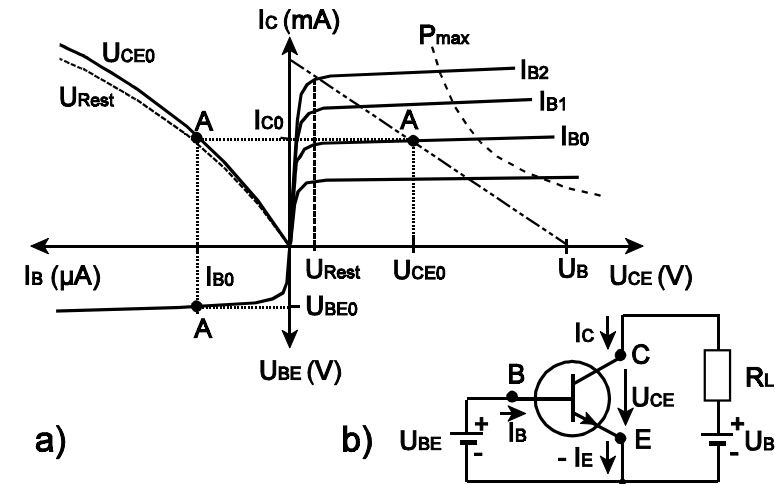


Abb. 1: npn-Transistor: a) Kennlinienfeld $I_C(I_B)$, $I_C(U_{CE})$, $I_B(U_{BE})$;
b) Anschlussschema für Ströme und Spannungen

Die Kennlinie $I_B(U_{BE})$ zeigt, dass oberhalb der Diffusionsspannung U_D des pn-Übergangs zwischen Basis und Emitter ($U_D \approx 0,6$ V für Si) I_B mit steigender Spannung U_{BE} steil ansteigt. I_B ist hauptsächlich durch U_{BE} festgelegt und nahezu unabhängig von U_{CE} , solange $U_{CE} > U_{BE}$ ist.

Die Kennlinie $I_C(I_B)$ bestimmt die statische Stromverstärkung $B = I_C/I_B$. ($B = 50 - 500$). Sie ist ebenfalls von U_{CE} nur wenig abhängig, solange $U_{CE} > U_{Rest} \approx U_D$ ist.

Die Kennlinie $I_C(U_{CE})$ zeigt, dass I_C für $U_{CE} > U_{Rest}$ kaum von U_{CE} , dagegen stark vom Parameter I_B abhängt. Die gestrichelt gezeichnete Hyperbel $P_{max} = (I_C U_{CE})_{max}$ gibt die maximal zulässige Verlustleistung des betreffenden Transistors an.

Die statische Einstellung der Spannung U_{BE0} legt die statischen Ströme I_{B0} und I_{C0} für die Spannung U_{CE0} fest, d.h. den jeweiligen *Arbeitspunkt A*.

Die statische Spannung U_{CE0} zwischen Kollektor und Emitter ist durch die Betriebsspannung U_B und den Lastwiderstand R_L festgelegt. Je größer der Strom I_C ist, desto größer ist der Spannungsabfall an R_L und desto kleiner die Spannung U_{CE} . Die durch den Punkt ($I_C = 0$, $U_{CE} = U_B$) strichpunktiert gezeichnete Gerade hat die Steigung $-1/R_L$. Sie schneidet die Kennlinie $I_C(U_{CE0})$ im Arbeitspunkt A (I_{C0} , U_{CE0}). Aus dem Kennlinienfeld, Abb. 1a, ist qualitativ ersichtlich, dass eine kleine positive Änderung der Spannung U_{BE} eine Verschiebung des Arbeits-

punktes auf der Geraden und damit eine große negative Änderung der Spannung U_{CE} bewirkt.

Für die Anwendung interessant ist vor allem die Verstärkung von Wechselströmen und -spannungen mittels Transistoren. Wird dem Gleichstrom I_{B0} ein Wechselstrom mit Amplitude ΔI_B überlagert, fließt ein zusätzlicher Kollektorstrom ΔI_C , dessen Amplitude das β -fache von ΔI_B beträgt. Man nennt:

$$\beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} \quad \text{dynamische Stromverstärkung} \quad (1)$$

β ist wegen der Nichtlinearität der Kennlinie $I_C(I_B)$ in der Regel etwas kleiner als die statische Stromverstärkung B .

Soll ein Transistor als Wechselstrom- bzw. Wechselspannungs-Verstärker betrieben werden, sind ebenfalls die Größen *dynamischer Eingangswiderstand* r_e und *dynamischer Ausgangswiderstand* r_a von Bedeutung:

$$r_e = \frac{\Delta U_{BE}}{\Delta I_B} \quad (U_{CE} = \text{const.}), \quad r_a = \frac{\Delta U_{CE}}{\Delta I_C} \quad (I_B = \text{const.}) \quad (2)$$

Die Werte β , r_e und r_a sind wesentliche Transistoreigenschaften und heißen *dynamische Kennwerte*.

2.2 Transistor-Grundsaltungen

Nicht nur die Transistoren allein, sondern auch die Schaltungsart und Beschaltungswiderstände bestimmen die Eigenschaften einer Transistorverstärkerstufe. Man unterscheidet drei Grundsaltungstypen: *Emitter-*, *Basis-* und *Kollektorschaltung* (s. Abb. 2).

Bei der Emitterschaltung (Abb. 2a) stellt der Emitter die für Eingang und Ausgang gemeinsame Elektrode dar, bei der Basisschaltung (Abb. 2b) die Basis und bei der Kollektorschaltung (Abb. 2c) sinngemäß der Kollektor. Es ist nämlich zu beachten, dass die Anschlüsse der Versorgungsspannung ($+U_B, 0V$) für Wechselspannungen grundsätzlich einen Kurzschluss darstellen.

Die häufigste und vorteilhafteste Schaltung ist die Emitterschaltung. Mit ihr kann sowohl große Strom-, Spannungs- als auch Leistungsverstärkung erzielt werden.

Für die Verstärkung von Wechselspannungen hoher Frequenz ist die

Basisschaltung am geeignetsten, da infolge der zwei pn-Übergänge die kapazitive Kopplung zwischen Eingang und Ausgang gering und damit die Grenzfrequenz

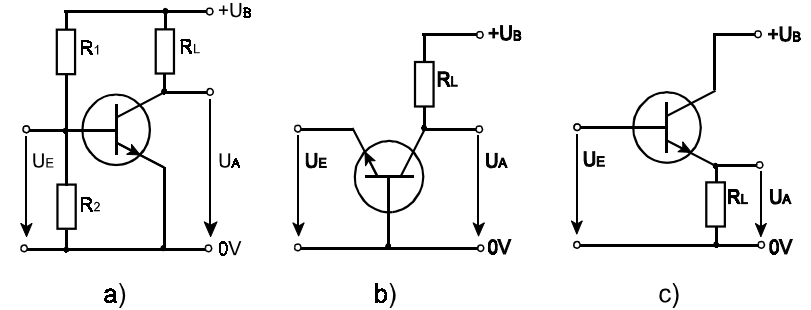


Abb. 2: npn-Transistorverstärker-Grundsaltungen: a) Emitterschaltung, b) Basisschaltung, c) Kollektorschaltung

für die Verstärkung hoch ist. Die Kollektorschaltung wird zur Anpassung als Impedanzwandler benutzt, da sie einen hohen Eingangs- und niedrigen Ausgangswiderstand besitzt.

Im folgenden wie auch in den durchzuführenden Experimenten wird lediglich die Emitterschaltung näher betrachtet.

2.3 Einstufiger Verstärker in Emitterschaltung

Abb.3 zeigt das Schaltbild eines einstufigen Transistorverstärkers in Emitterschaltung. Zum Betrieb des Si-Transistors ist auf der Eingangsseite (für geringe Spannungen U_E) lediglich eine kleine Gleichspannung U_{BE0} (ca. 0,7 V) zur

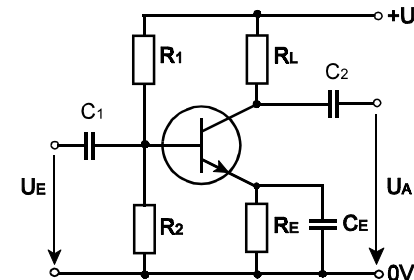


Abb. 3 Einstufiger Transistorverstärker in Emitterschaltung

Einstellung des Basisruhestroms I_{B0} nötig. Diese wird über den Spannungsteiler R_1/R_2 aus der Betriebsspannung entnommen. Die Widerstände R_1 und R_2 sind so zu bemessen, dass durch sie ein 5 bis 10 mal höherer Strom als der Basisstrom fließt. Auf diese Weise wird der Arbeitspunkt stabilisiert, d.h. U_{BE0} ist weitgehend unabhängig von I_B .

Für die Kollektor-Emitter-Strecke ist im Kurzschlussbetrieb des Transistors (z.B. zur Bestimmung seiner Kennlinien) lediglich eine Spannung U_{CE} etwas größer als die Spannung U_{Rest} nötig. Da jedoch Spannungs- als auch Leistungsverstärkung nur in Verbindung mit dem entsprechend dimensionierten Lastwiderstand R_L im Kollektorkreis möglich ist, muss die Betriebsspannung U_B mindestens um den Betrag $I_C R_L$ größer als U_{CE} sein.

Aus den Bemerkungen zur Kennlinie $I_C(U_{CE})$ im Abschnitt 2.1 folgt ferner: Je größer die Spannungsverstärkung, d.h. bei gegebener Änderung der Eingangsspannung ΔU_E die Änderung der Ausgangsspannung $\Delta U_A = \Delta U_{CE}$ sein soll, desto größer muss der Widerstand R_L und gegebenenfalls die Betriebsspannung U_B gewählt werden. Zur Vermeidung von nichtlinearen Verzerrungen der Ausgangsspannung ist sicherzustellen, dass die minimale Ausgangsspannung deutlich größer als die Spannung U_{Rest} ist (s. Abb. 1).

Hinsichtlich der thermischen Stabilität des Transistors ist es günstig, den Arbeitspunkt A (s. Abb. 1) so einzustellen, dass $U_{CE} \approx \frac{1}{2} U_B$ ist, d.h. dass der Lastwiderstand R_L etwa dem statischen Ausgangswiderstand des Transistors $R_a = U_{CE}/I_C$ entspricht. Infolge der Jouleschen Verlustleistung der Kollektor-Emitterstrecke $P_V = R_a I_C^2$ erwärmt sich zwangsläufig der Transistor. Die Erwärmung ist abhängig von der Montage auf einem entsprechend der Verlustleistung dimensionierten Kühlblech. Infolge der Erwärmung nimmt der Widerstand R_a des Halbleiters ab. Für $R_a < R_L$ nimmt damit auch die Verlustleistung P_V ab (Man überprüfe dies durch die Berechnung der Ableitung dP_V/dR_a). Infolgedessen wird die Temperaturerhöhung des Transistors begrenzt bzw. seine Temperatur einigermaßen stabilisiert.

Viel wirksamer zur Stabilisierung des Arbeitspunktes bzw. der Temperatur des Transistors ist der Widerstand R_E in der Emitterzuleitung, Abb. 3. Infolge der Erwärmung des Transistors erhöht sich bei konstanter Spannung U_{BE} der Basisstrom I_B und damit der Kollektorstrom I_C . Die Temperaturabhängigkeit $I_B(T)$ ist vergleichbar mit der einer HL-Diode in Flussrichtung (s. Abb. 4 in Versuch C11: *Kennlinien von HL-Diode und Transistor*). Dort ist der Kennlinienvorfaktor $j_R(0) \sim n_i^2$, bzw. mit Gl. (2) $\sim \exp(-\Delta W/kT)$. Infolge des erhöhten Stroms I_B bzw. I_C erhöht sich entsprechend I_E und damit der Spannungsabfall am Widerstand R_E . Dies bewirkt eine Verkleinerung der Basis-Emitter-Spannung U_{BE} und damit eine

entsprechende Reduzierung des Basisstroms I_B . Man nennt dieses sehr wirksame Verfahren zur thermischen Stabilisierung des Arbeitspunktes I_{B0} bzw. I_{C0} *Stromgegenkopplung*.

Wird die Transistorschaltung zur Verstärkung von Wechselspannungen benutzt, ist es zweckmäßig, die Eingangs- und gegebenenfalls die Ausgangsspannung durch Kondensatoren (C_1 und C_2 in Abb. 3) von den Gleichspannungen des Verstärkers zu entkoppeln. Der in Schaltung Abb. 3 zum Widerstand R_E parallel geschaltete Kondensator stellt bei einer der Frequenz der Wechselspannung angepassten Dimensionierung einen Kurzschluss des Signals in der Emitterzuleitung dar. Er bewirkt daher, dass die Stromgegenkopplung lediglich für den Emittergleichstrom, nicht jedoch für den Wechselstromanteil wirksam ist.

2.4 Zweistufiger Verstärker in Emitterschaltung

Reicht die erreichbare maximale Verstärkung einer Verstärkerstufe für die gewünschte Anwendung nicht aus, oder ist der einstufige Verstärker hinsichtlich seiner Übertragereigenschaften (z. B. Linearität des verstärkten Signals) nicht ausreichend, so können durch die Hintereinanderschaltung mehrerer Verstärkerstufen die Eigenschaften des Verstärkers entsprechend verbessert werden.

Die Ankopplung des Ausgangs einer Verstärkerstufe an den Eingang der nachfolgenden kann auf verschiedene Weise erfolgen: Für die Verstärkung von Gleichspannungen erfolgt sie galvanisch direkt mittels eines ohmschen Widerstandes, für die von Wechselspannungen entweder induktiv mittels eines Transformators oder kapazitiv mittels eines Kondensators.

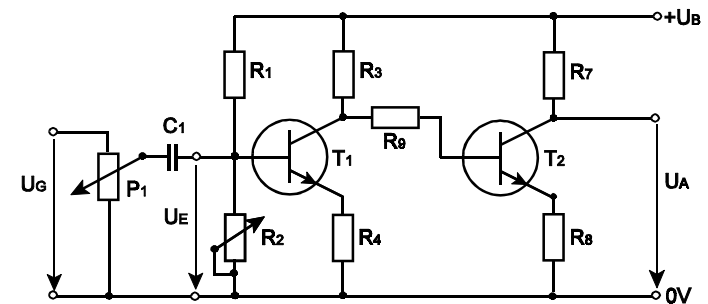


Abb. 4: Schaltbild des zweistufigen, galvanisch direkt gekoppelten Transistorverstärkers

Abb. 4 zeigt die Schaltung eines zweistufigen, galvanisch direkt gekoppelten Transistorverstärkers, der sowohl für die Verstärkung von Gleich- als auch Wechselspannungen geeignet ist. Mittels des Spannungsteilers R_1/R_2 wird der Arbeitspunkt des Transistors T_1 bzw. die statische Eingangsgleichspannung U_E des Verstärkers eingestellt. Die durch Verändern der Einstellung des Widerstands R_2 oder durch eine von außen angelegte Spannung bewirkte Erhöhung ΔU_E der Eingangsspannung wirkt unabhängig von der Einstellung des Arbeitspunkts wie eine zusätzliche Gleichspannung am Eingang. Diese wird durch eine entsprechende Erhöhung der Gleichspannung ΔU_A am Ausgang deutlich. Aus dieser kann die Gleichspannungsverstärkung $V_U = \Delta U_A / \Delta U_E$ berechnet werden.

Die Kopplung der Ausgangsspannung der ersten Verstärkerstufe zum Eingang der zweiten geschieht durch den Widerstand R_9 . Durch diesen wird zugleich die Einstellung des Arbeitspunkts des Transistors T_2 vorgenommen.

Die Schaltung, Abb. 4, ist auch zur Verstärkung von Wechselspannungen geeignet. Im vorliegenden Versuch wird mit dem Potentiometer P_1 ein Teil der vom Funktionsgenerator gelieferten Spannung U_G über den Kondensator C_1 auf den Verstärkereingang gelegt.

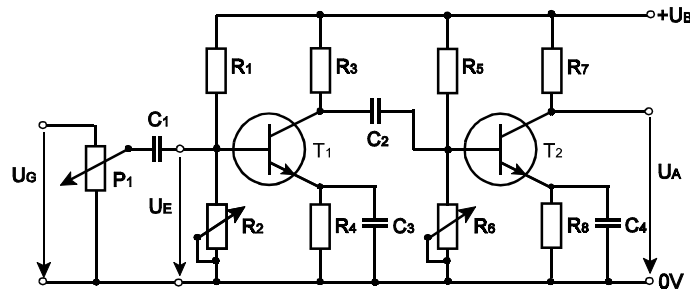


Abb. 5: Schaltbild des zweistufigen, kapazitiv gekoppelten Transistorverstärkers

Der kapazitiv gekoppelte Wechselspannungsverstärker (Schaltung Abb. 5) unterscheidet sich nur wenig vom direkt gekoppelten Verstärker. Hierbei sind lediglich der Widerstand R_9 , Abb. 4, durch den Kondensator C_2 ersetzt und der Spannungsteiler R_5/R_6 zur Einstellung der Basisgleichspannung von Transistor T_2 eingefügt. Außerdem sind die Kondensatoren C_3 und C_4 parallel zu den Emitterwiderständen R_4 und R_8 geschaltet, um die Wechselstromgegenkopplung für die Transistoren T_1 und T_2 kurzzuschließen bzw. zu reduzieren.

3. Aufgabenstellung

1. Aufgabe: Bauen Sie einen einstufigen Transistorverstärker auf und untersuchen Sie seine Eigenschaften.
2. Aufgabe: Bauen Sie einen zweistufigen, direkt gekoppelten Transistorverstärker auf und bestimmen Sie die Verstärkung von Gleich- und Wechselspannungen.
3. Aufgabe: Bauen Sie einen zweistufigen kapazitiv gekoppelten Transistorverstärker auf und bestimmen Sie die Verstärkung von Wechselspannungen verschiedener Frequenzen.

4. Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung

Abb. 6 zeigt den Versuchsaufbau zur Bestimmung der Eigenschaften des einstufigen Verstärkers.

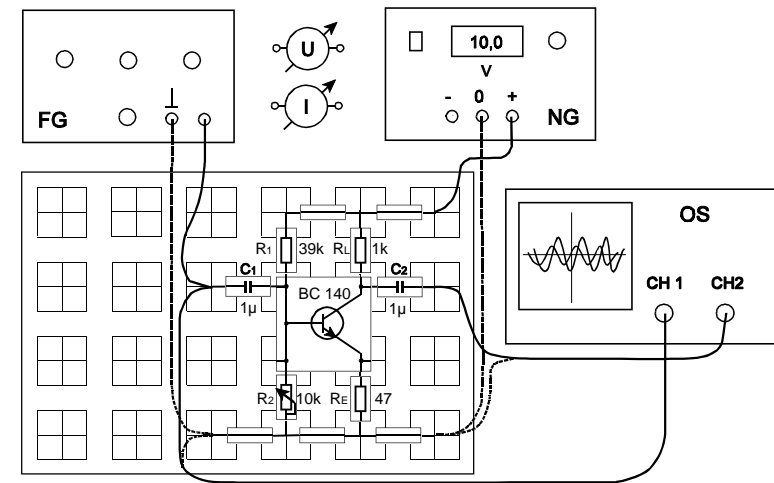


Abb. 6: Versuchsaufbau: Einstufige Verstärkerschaltung mit Transistor BC 140 auf Steckbrett, Funktionsgenerator FG, DC-Netzgerät NG, Zwei-Kanal-Oszilloskop OS

Auf einem Steckbrett sind Quadrate gezeichnet, deren Mittel-, Eck- und Seitenmittelpunkte Steckbuchsen haben, die innerhalb eines Quadrats jeweils leitend verbunden sind. Mit größeren steckbaren Kästen (Transistor BC 140,

Potentiometer 100k) sowie den Widerstands-, Kondensator- und Kurzschlusssteckern werden die Verstärker-Schaltungen des Versuchs gemäß den Schaltungen, Abb. 3, 4 und 5 aufgebaut.

Der Funktionsgenerator FG dient zur Bereitstellung von Sinus-Wechselspannungen variabler Amplitude und Frequenz für die Verstärkereingänge. Das Netzgerät NG liefert die einstellbare stabilisierte Gleichspannung $U_B = 10\text{ V}$. Zur Bestimmung der Amplituden U_S bzw. doppelten Amplituden U_{SS} sowie der Kurvenform und Phasenlage von Eingangs- und Ausgangsspannung dient ein Zweistrahl-Oszilloskop OS. Die Eingangsspannung U_E des jeweiligen Verstärkers wird mit Kanal I (CH I) registriert, der zugleich das Triggersignal liefert. Die Ausgangsspannung U_A wird mit Kanal II (CH II) gemessen bzw. aufgezeichnet. Die Messleitungen zum Oszilloskop sind Koaxialleitungen (Die Masse- bzw. Abschirmleitungen sind zur Unterscheidung in Abb. 6 punktiert gezeichnet). Zur Messung von Gleich- oder Wechselspannungen bzw. -strömen (Effektivwerte) der Ein- und Ausgänge stehen zusätzlich zwei Analog-Vielfachmessinstrumente zur Verfügung.

Machen Sie sich - sofern nicht schon geschehen - unbedingt mit der Bedienung bzw. mit der für die jeweilige Messung optimalen Einstellung des Oszilloskops vertraut! Fragen Sie gegebenenfalls Ihren stud. Betreuer bzw. Dozenten.

4.1 Einstufiger Verstärker

Bauen Sie die Schaltung des einstufigen Transistorverstärkers, Abb. 3 bzw. Abb. 6 auf dem Steckbrett auf. Lassen Sie zunächst den Kondensator $C_E = 4,7\ \mu\text{F}$ in der Emitterzuleitung weg.

Legen Sie die Betriebsspannung an und messen sie die Kollektor-Emitter-Spannung U_{CE} mit dem Spannungsmesser. Stellen Sie mit dem variablen Widerstand $R_2 = 10\text{ k}$ max. den Arbeitspunkt so ein, dass $U_{CE} = 5\text{ V}$ beträgt.

Welcher Zusammenhang besteht zwischen dem Widerstandswert R_2 und der Spannung U_{CE} ?

Bestimmen Sie Spannungs-, Strom- und Leistungsverstärkung der Schaltung. Schließen Sie dazu den Funktionsgenerator an und stellen Sie ihn so ein, dass $U_{ESS} = 200\text{ mV}$ bei 50 Hz (mit dem Oszilloskop gemessen) beträgt.

Bestimmen Sie mit dem Oszilloskop die Ausgangsspannung U_{ASS} und berechnen Sie aus dem Ergebnis die Spannungsverstärkung $V_U = U_{ASS}/U_{ESS}$.

Schalten Sie den Strommesser in Reihe mit dem Funktionsgenerator und messen Sie den Eingangswechselstrom I_{Eeff} (μA). Dabei ist die Eingangsspannung U_{ESS}

gegebenenfalls auf den Wert 200 mV nachzustellen. Bestimmen Sie mit dem Oszillogramm der Ausgangsspannung und dem Wert des Kollektorwiderstands ($R_L = 1\text{ k}$) den Kollektorwechselstrom. Beachten Sie hierbei (wie schon zuvor bemerkt), dass die Gleichspannungsquelle einen Wechselstromkurzschluss darstellt. Berechnen Sie hieraus die Stromverstärkung $V_I = I_{Aeff}/I_{Eeff}$ und mit dem Ergebnis für V_U die Leistungsverstärkung V_P .

Ermitteln Sie den Einfluss des Kollektor-Lastwiderstands R_L , indem Sie den 1k-Widerstand durch einen 1,5k-Widerstand ersetzen. Stellen Sie den Arbeitspunkt wieder auf $U_{CE} = 5\text{ V}$ ein. Bestimmen Sie wie zuvor Spannungs-, Strom- und Leistungsverstärkung und beschreiben Sie mit dem Ergebnis die Abhängigkeit der Verstärkungen von R_L .

Untersuchen Sie den Einfluss des in Abb.3 parallel zum Emitterwiderstand $R_E = 47\ \Omega$ geschalteten Kondensators $C_E = 4,7\ \mu\text{F}$ auf die Verstärkung. Stellen Sie dazu die Eingangsspannung U_{ESS} auf ca. 200 mV ein und bestimmen Sie die Ausgangsspannung U_{ASS} jeweils zunächst ohne, dann mit dazu geschaltetem Kondensator für die Frequenzen 100 Hz, 1 kHz und 10 kHz. Begründen Sie das Ergebnis hinsichtlich der Frequenzabhängigkeit der Spannungsverstärkung.

4.2 Zweistufiger, direkt gekoppelter Verstärker

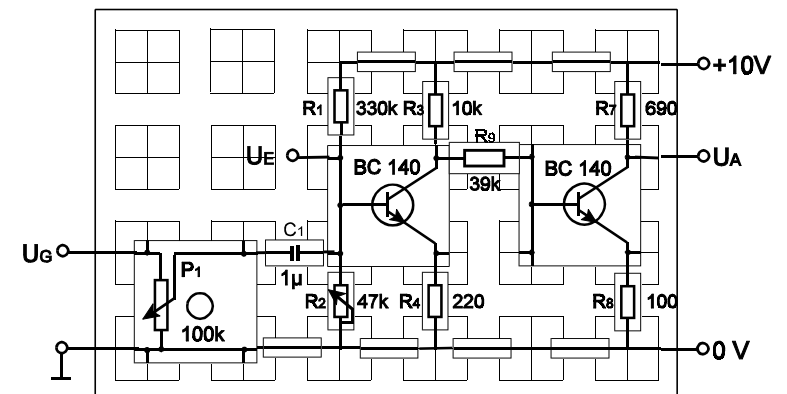


Abb. 7: Schaltung des zweistufigen, direkt gekoppelten Transistorverstärkers auf dem Steckbrett.

Bauen Sie die Schaltung gemäß Abb. 4 bzw. Abb. 7 auf dem Steckbrett auf. Stellen Sie den Widerstand $R_7 = 690\ \Omega$ durch die Parallelschaltung der

Widerstände 2,2 k und 1 k her. Stellen Sie mit dem veränderlichen Widerstand R_2 (47 k max.) die Eingangsgleichspannung U_E bzw. den Arbeitspunkt des ersten Transistors so ein, dass die Ausgangsgleichspannung $U_A = 5$ V beträgt. Messen Sie die für diese Ausgangsspannung erforderliche Eingangsspannung U_E .

4.2.1 Gleichspannungsverstärkung

Erhöhen Sie durch Verändern des Widerstands R_2 die Eingangsspannung um $\Delta U_E = 20, 35, 50$ und 65 mV und bestimmen Sie die jeweils resultierende Erhöhung ΔU_A der Ausgangsspannung. Berechnen Sie die für jede Spannungserhöhung ΔU_E resultierende Gleichspannungsverstärkung $V_U = \Delta U_A / \Delta U_E$.

4.2.2 Wechselspannungsverstärkung

Stellen Sie zur Bestimmung der Wechselspannungsverstärkung des Verstärkers die Eingangsgleichspannung wieder so ein, dass die Ausgangsgleichspannung 5 V beträgt. Trennen Sie die analogen Spannungsmesser vom Verstärker und schließen Sie das Oszilloskop an den Eingang U_E und Ausgang U_A des Verstärkers an.

Schließen Sie nun den Funktionsgenerator an den Eingang U_G des Verstärkers an. Stellen Sie die Frequenz $f = 1$ kHz ein und wählen Sie die Amplitude der Sinus-Ausgangsspannung des Generators so, dass durch Verstellen des Potentiometers P_1 die Eingangsspannungen $U_{ESS} = 20, 30, 50, 70$ und 100 mV bequem eingestellt werden können. Bestimmen Sie für diese Eingangsspannungen die jeweils resultierende Ausgangsspannung U_{ASS} und daraus die Wechselspannungsverstärkung V_U .

Vergleichen Sie Verstärkung des direkt gekoppelten Verstärkers für Gleich- und Wechselspannungen. Wie kann das Verhalten des Verstärkers bezüglich Gleich- und Wechselspannungen unterschiedlich gemacht werden?

Überbrücken Sie dazu die Widerstände R_3, R_4, R_7, R_8, R_9 nacheinander mit einem $1\mu\text{F}$ -Kondensator und stellen Sie fest, wie sich bei fester Eingangsspannung U_{ESS} die Ausgangsspannung U_{ASS} ändert. Bei welchen Widerständen ändert sich die Verstärkung besonders stark und warum?

4.3 Zweistufiger, kapazitiv gekoppelter Verstärker

Bauen Sie die Schaltung des kapazitiv gekoppelten Verstärkers, Abb. 5 bzw. Abb.8, auf dem Steckbrett auf, indem Sie die bestehende Schaltung entsprechend ändern. Ersetzen Sie den 39 k-Widerstand zwischen T_1 und T_2 durch den Kondensator $C_2 = 1\mu\text{F}$ und stecken Sie die Widerstände $R_5 = 39$ k und $R_6 = 10$ k max. zur Einstellung der Basisgleichspannung von T_2 ein. Versetzen Sie die Emitterwiderstände R_4 und R_8 um je einen Platz links und schalten Sie die beiden

Kondensatoren $C_3 = 1\mu\text{F}$ und $C_4 = 4,7\mu\text{F}$ jeweils parallel dazu.

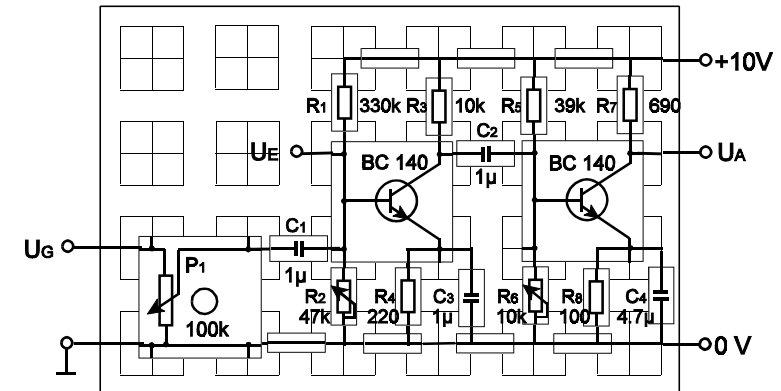


Abb. 8: Schaltung des zweistufigen, kapazitiv gekoppelten Transistorverstärkers auf dem Steckbrett

Stellen Sie mit den Basiswiderständen R_2 und R_6 die Arbeitspunkte der beiden Transistoren so ein, dass die Kollektorspannung (gegen Masse gemessen) jeweils 5 V beträgt.

Stellen Sie die Frequenz des Funktionsgenerators auf 50 Hz und seinen Ausgang sowie das Potentiometer P_1 auf eine Eingangsspannung $U_{ESS} = 300$ mV ein. Bestimmen Sie den Eingangswiderstand für Wechselstrom $r_E = U_E / I_E$, indem Sie I_{Eeff} mit den zwischen P_1 und C_1 geschalteten Strommesser (100µA-Bereich) bestimmen. Der Eingangswiderstand r_E ist über einen großen Bereich der Eingangsspannung und Frequenz nahezu konstant.

Nehmen Sie den Strommesser aus der Schaltung und stellen Sie die Eingangsspannung U_{ESS} auf 20 mV, 1 kHz. Berechnen Sie den nun viel kleineren Eingangsstrom $I_{ESS} = U_{ESS} / r_E$.

Bestimmen Sie die Kollektorspannung U_{C1SS} des ersten Transistors und $U_{C2SS} = U_{ASS}$ des zweiten. Bestimmen Sie die jeweilige Spannungsverstärkung $V_{U1,2}$ und die Gesamtspannungsverstärkung V_U .

Bestimmen Sie mit der Ausgangsspannung U_{ASS} und dem Kollektorwiderstand R_7 den Ausgangsstrom I_{ASS} und daraus die Stromverstärkung $V_I = I_{ASS} / I_{ESS}$. Ermitteln Sie die Leistungsverstärkung V_P der Schaltung. Diskutieren Sie das Ergebnis Ihrer Messungen.

Bestimmen Sie nun die Spannungsverstärkung V_U durch Messen der Ausgangsspannung U_{ASS} bei fester Eingangsspannung $U_{ESS} = 20 \text{ mV}$ für die Frequenzen:

$f = 50, 100, 300 \text{ Hz}$ sowie $1, 3, 10$ und 20 kHz

Stellen Sie gegebenenfalls die Eingangsspannung nach. Reduzieren Sie die Eingangsspannung, falls das Ausgangssignal zu groß oder verzerrt ist. Gelegentlich kann auch das Signal verrauscht bzw. mit Schwingungen überlagert sein. Entfernen Sie wechselweise eine der Abschirmungen der Signalleitungen zum Oszilloskop (Vermeidung von Erdungsschleifen) oder versuchen Sie durch Parallelschalten eines Kondensators $C' = 10 \text{ nF}$ zum Basiswiderstand R_6 die Schwingungen zu reduzieren.

Wiederholen Sie die Messung des Frequenzgangs, nachdem Sie die Kondensatoren C_3 , C_4 und C' aus der Schaltung entfernt haben.

Tragen Sie V_U über der Frequenz f auf und diskutieren Sie das Frequenzverhalten der Spannungsverstärkung für beide Fälle.

5. Fragen zur Selbstkontrolle

- 1) Wie ist ein npn-Transistor aufgebaut? Aus welchem Halbleitermaterial besteht er? Was bewirken die pn-Übergänge? Auf welche Weise kann mit einem Transistor ein Strom gesteuert werden?
- 2) Welchen Verlauf zeigen die Kennlinien $I_B(U_{BE})$, $I_C(I_B)$ und $I_C(U_{CE})$?
- 3) Welche Grundschaltungen von Transistorverstärkern gibt es? Welche sind ihre hinsichtlich der Anwendung spezifischen Eigenschaften?
- 4) Wie ist die statische Stromverstärkung B , wie die dynamische β definiert?
- 5) Beschreiben Sie die einstufige Emitterschaltung eines Transistor-Spannungsverstärkers. Wodurch ist der Arbeitspunkt festgelegt? Wie kann die Spannungs- bzw. Leistungsverstärkung einer Schaltung vergrößert werden?
- 6) Wie kann der Arbeitspunkt thermisch stabilisiert werden?
- 7) Wie unterscheidet sich ein mehrstufiger Transistorverstärker von einem einstufigen in der Wirkungsweise? Wie können die Verstärkerstufen mit einander gekoppelt sein?