

Versuch EP3 Der Transistor

I. Zielsetzung des Versuches

Transistoren sind die zentralen Verstärkerelemente der Halbleitertechnik. In diesem Versuch lernen Sie zunächst – ähnlich wie beim Versuch mit den Dioden – die elektrische Eigenschaften durch Aufnahme von Kennlinien kennen.

Im zweiten Versuchsteil bauen Sie verschiedene Schaltungen auf, um Spannungen oder Ströme zu verstärken. Sie lernen neben dem sogenannten Bipolartransistor (NPN oder PNP) auch den Feldeffekttransistor (FET) kennen, bauen Schaltungen zur Wechselspannungs-Verstärkung und Gleichspannungs-Stabilisierung auf.

II. Vorkenntnisse

1. allgemeine Vorkenntnisse

p- und n-dotierte Halbleiter, p-n-Grenzschicht, Funktionsweise einer Halbleiterdiode

2. spezielle Vorkenntnisse

Aufbau eines Transistors, Funktionsweise (Transistoreffekt), Transistortypen (nnp, pnp, JFET, MOSFET), Eingangskennlinie und Ausgangskennlinie, Verstärkung, Grundsaltungen.

Literatur:

R.MÜLLER: Grundlagen der Halbleiter-Elektronik

R.MÜLLER: Bauelemente der Halbleiter-Elektronik

W.WALCHER: Praktikum der Physik

GÄRTNER: Einführung in die Physik des Transistors

M.REISCH: Elektronische Bauelemente

BAYLEY: Introduction to semiconductor devices

MALMSTADT, ENKE: Electronics for scientists

C.F.G.DELANEY: Electronics For The Physicists

HERING, BRESSLER, GUTEKUNST: Elektronik für Ingenieure und Naturwissenschaftler

TIETZE, SCHENK: Halbleiter-Schaltungstechnik

III. Theorie zum Versuch

Die physikalischen Grundlagen von Halbleiterdiode und Halbleitertransistor sollten Ihnen aus früheren Versuchen, der Vorlesung und den Lehrbüchern bekannt sein.

Wir beschränken uns im folgenden auf die Theorie, die für die Versuchsdurchführung wichtig ist. Dabei wollen wir den Transistor aus der Sicht des Elektronikers betrachten.

1. Transistortypen

1.1. Aufbau eines npn-Transistors, Kennlinien

Der gewöhnliche (sogenannte bipolare) Transistor besteht aus drei dotierten Halbleiterschichten. Beim npn-Transistor liegt eine zentrale p-Schicht zwischen zwei n-Schichten. Zeichnet man diese Schichten so, wie sie in der Schaltung eingesetzt werden, so wird die untere n-Schicht als Emitter (E) bezeichnet, die mittlere ist die Basis (B) und die obere der Kollektor.

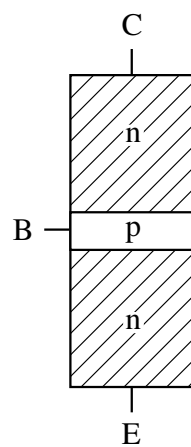


Abbildung 1: npn-Schicht

Betrachten wir zunächst nur den Übergang zwischen der mittleren p- und der unteren n-Schicht, also zwischen Basis und Emitter. Wir können dieses System mit einer Halbleiterdiode vergleichen.

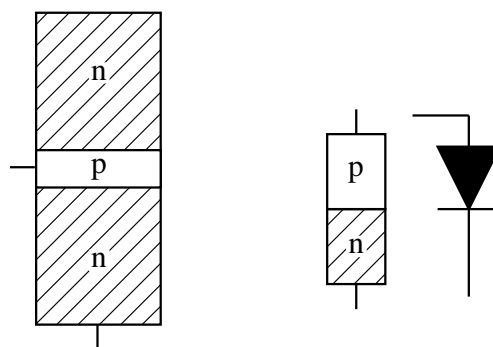


Abbildung 2: Vergleich: Transistor – Diode

Legen wir von Basis nach Emitter eine positive Spannung U_{BE} an, so ist dieser pn-Übergang in Durchlassrichtung geschaltet. Es fließt ein Strom, den wir beim Transistor *Basisstrom* nennen.

Wie bei der Diode deuten wir die Durchlassrichtung durch einen Pfeil an, der beim Transistor auf der Emitterlinie gezeichnet wird.

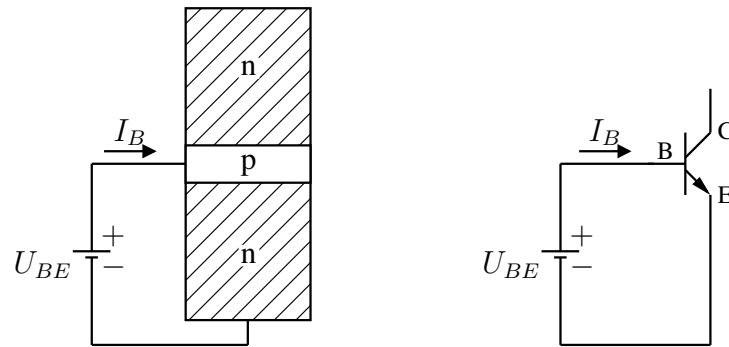


Abbildung 3: Transistor mit positiver Basis-Emitter-Spannung; Schema (links) und Schaltsymbol (rechts)

Eine negative Spannung bedeutet wie bei der Diode Sperrrichtung, es fließt kein Strom.

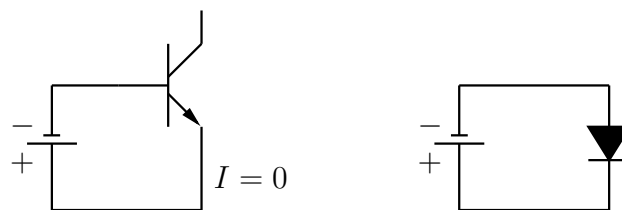


Abbildung 4: Bei negativer Basis-Emitter-Spannung fließt wie bei einer in Sperrrichtung betriebenen Diode kein Strom.

Wie bei der Diode ist der Zusammenhang zwischen Strom und Spannung exponentiell. Ab ca. 0,6 V beginnt (beim p-n-Übergang in Silizium) ein nennenswerter Strom zu fließen, der sehr schnell große Werte annehmen kann und den Halbleiterkristall zerstören kann. Der Zusammenhang ist außerdem von der Temperatur abhängig. Daher muss im Basisstromkreis immer ein (Vor-)widerstand sein, der den Strom begrenzt.

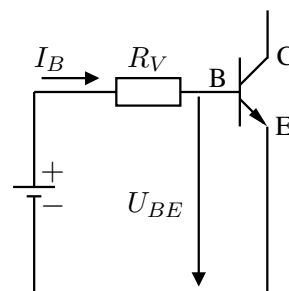


Abbildung 5: Basis-Emitter-Schaltung mit Vorwiderstand

Stellt man den Zusammenhang graphisch dar, so erhält man die *Eingangskennlinie* $I_B = f(U_{BE})$ des Transistors.

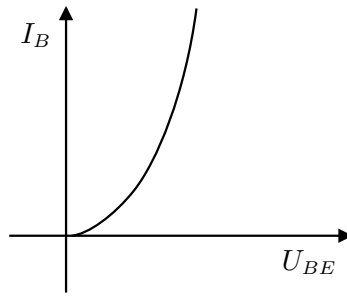


Abbildung 6: Eingangskennlinie beim Transistor

Betrachten wir nun die Verbindung zwischen Kollektor und Emmitter. Zunächst soll an der Basis nichts angeschlossen sein. Von Kollektor nach Emmitter liege eine positive Spannung U_{CE} an.

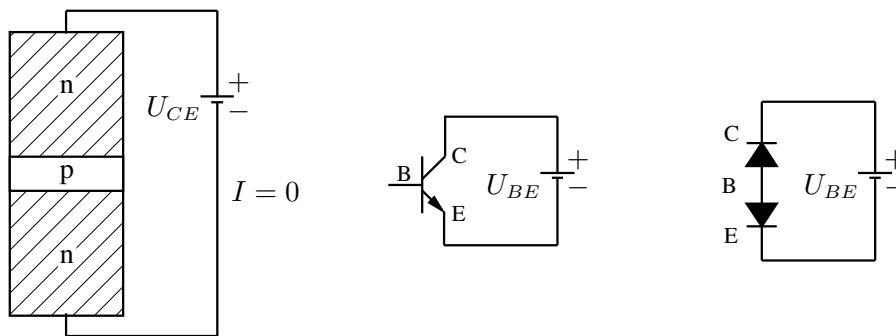


Abbildung 7: U_{CE} am Transistor

Es fließt kein Strom. Zwar „sieht“ die Basis höheres Potential als der Emmitter, d.h. die BE-Grenzschicht wäre in Durchlassrichtung betrieben. jedoch ist der Kollektor auf höherem Potential als die Basis, sodass der CB-Übergang in Sperrichtung geschaltet ist. Es kann also kein Strom fließen. Machen Sie sich das durch Vergleich mit der einfachen Diode klar.

Was geschieht nun, wenn zusätzlich eine positive Spannung U_{BE} angelegt wird? Dann wird die BE-Grenzschicht in Durchlassrichtung betrieben und es fließt ein Basisstrom: Elektronen wandern vom Minuspol am Emmitter zur Basis.

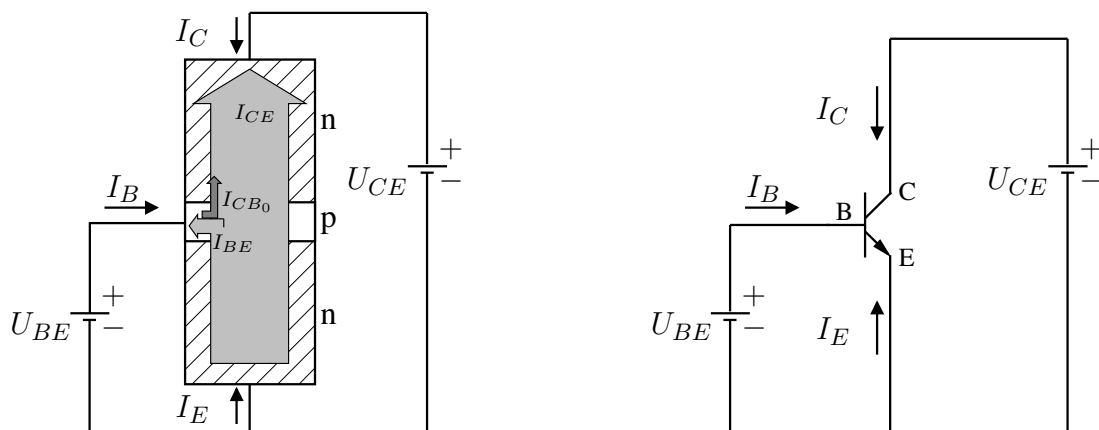


Abbildung 8: Transistorschaltung

Das Besondere beim Transistor ist nun, dass dessen drei Schichten unterschiedlich dick und unterschiedlich stark dotiert sind. Die Basisschicht ist sehr dünn und nur schwach dotiert. Der

Großteil der vom Emitter kommenden Elektronen rekombiniert daher nicht in der Basis, sondern diffundiert in die CE-Grenzschicht. Dort „sehen“ die Elektronen dann die positive Spannung am Kollektor und gelangen in der Mehrzahl zum Kollektoranschluss. Es fließt ein großer Kollektorstrom.

Mit einer Spannung U_{CE} kommen daher (bei gleicher U_{BE}) weniger Elektronen an der Basis an, als ohne U_{CE} . Die Eingangskennlinie wandert daher mit U_{CE} nach unten. In einer anderen Betrachtungsweise kann man sagen: man braucht dann eine höhere Basisspannung U_{BE} für den gleichgroßen Basisstrom I_B , d.h. die Kennlinie wandert nach rechts.

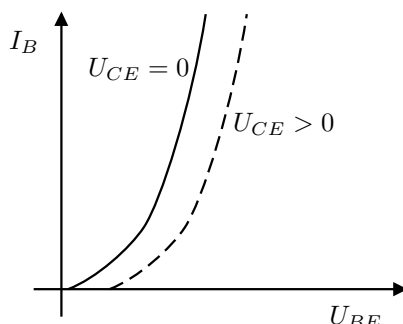


Abbildung 9: Eingangskennlinien beim Transistor; für höhere U_{CE} wandern die Kennlinien nach rechts.

Kommen wir zurück zum Kollektorstrom. Er ist nicht beliebig groß, sondern hat einen maximalen Wert, der vom Basisstrom abhängt. Je größer der Basisstrom, desto höher ist auch der Maximalwert (man spricht von Sättigungsstrom). Für $U_{CE} = 0$ fließt natürlich kein Kollektorstrom.

Trägt man den Zusammenhang zwischen Kollektorspannung U_{CE} und Kollektorstrom I_C graphisch auf, so erhält man eine *Ausgangskennlinie*. Die von I_B abhängig verschiedenen Kennlinien werden zu einem *Ausgangskennlinienfeld* zusammengefaßt.

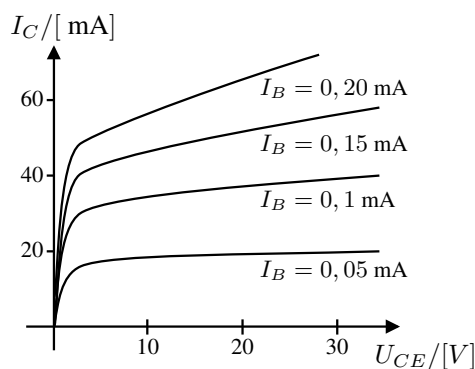


Abbildung 10: Ausgangskennlinien eines Transistors für unterschiedliche I_B

Der Zusammenhang zwischen I_B und dem Sättigungsstrom I_C ist in gewissen Grenzen linear¹, sodass man einen *Verstärkungsfaktor* β definieren kann:

$$I_C = \beta I_B$$

Bei einem pnp-Transistor ist die Funktionsweise gleich, wegen der getauschten p- und n-Gebiete müssen nur ebenfalls alle Spannungen getauscht werden. Basis und Kollektor des pnp-Transistors

¹Beim im Versuch verwendeten Typ BC550B oder BC547B ist β etwa 200 bis 500, das gilt aber nur für *kleine* I_C , z.B. in der Größenordnung von 10 mA. Das Datenblatt definiert β für einen Strom I_C von nur 2 mA. Bei großen Strömen (I_C bei 100 mA) ist β deutlich kleiner!

werden also an negative Spannung (bezogen auf den Emitter) gelegt. Die umgekehrte Durchlassrichtung des BE-Übergangs wird entsprechend durch einen Pfeil in Richtung der Basis symbolisiert.

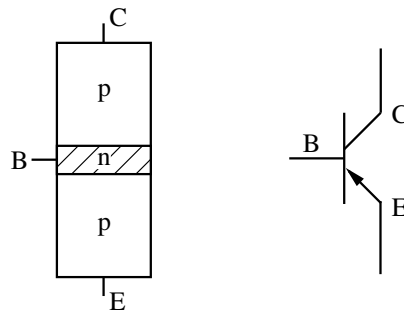


Abbildung 11: *pnp-Transistor: Schema (links), Schaltsymbol (rechts)*

1.2. Aufbau eines JFET-Transistors, Kennlinien

Es gibt weitere Bauformen von Transistoren. Während beim oben geschriebenen Bipolartransistor der pn-Übergang an der BE-Stecke zur Steuerung dient, wird beim *Feldeffekttransistor* (kurz: FET) die Stromstärke über ein elektrisches Feld gesteuert.

Die Funktionsweise ist wie folgt:

Betrachten wir zunächst ein Stück n-dotiertes Material. Sie wissen, dass die dotierten Halbleiter eine hohe Leitfähigkeit besitzen. Legen wir an den „oberen“ und „unteren“ Kontakt eine Spannung an (die Polarität ist zunächst egal), so wird ein Strom fließen. Wir können das zunächst mit einem Widerstand vergleichen.

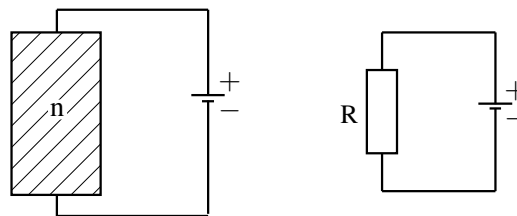


Abbildung 12: *Eine einfache n-Schicht wirkt grundlegend als OHMScher Widerstand.*

Daran ändert sich zunächst nichts wesentliches, wenn wir links und rechts zwei p-Gebiete anbringen, diese zwar miteinander verbinden, aber noch nicht an eine Spannung anschließen.

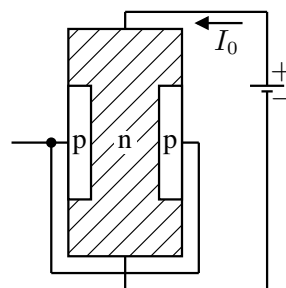


Abbildung 13: *n-Kanal JFET*

Was passiert aber, wenn an die beiden p-Gebiete eine negative Spannung (bezogen auf den S-Kontakt) anlegt wird? Dann haben wir die gleiche Situation wie bei einer Diode in Sperrichtung. Es baut sich ein Raumladungsgebiet auf, welches mehr und mehr einen Stromfluß durch das zentrale n-Gebiet behindert. Folglich nimmt der Strom ab, wenn die Spannung zunehmend negativ wird.

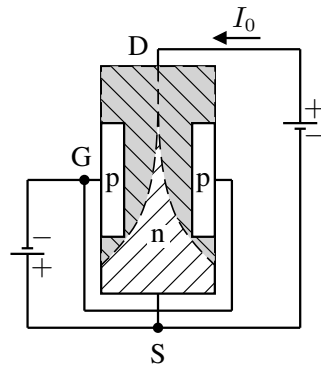


Abbildung 14: n-Kanal JFET mit negativer Gatespannung

Offenbar läßt sich jetzt die Stromstärke steuern durch eine Spannung. Der Spannungsanschluß wirkt wie ein Tor und wird daher *Gate (G)* genannt. Der Elektronenstrom fließt unten von der Quelle [engl. *Source (S)*] zur Senke [engl. *Drain (D)*].

Im Schaltbild wird dieser pn-Übergang wie beim Bipolartransistor mit einem Pfeil gekennzeichnet. Bei unserem n-Kanal-Typ zeigt er ins Gate hinein, bei einem p-Kanal-Typ zeigt er heraus.

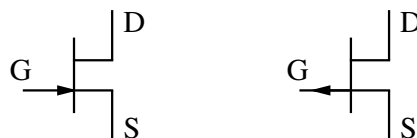


Abbildung 15: Schaltsymbol eines n-Kanal-JFET (links), bzw. eines p-Kanal-JFET (rechts)

Beachten Sie den Unterschied zum Bipolartransistor! Beim FET wird der pn-Übergang *in Sperr-Richtung* betrieben. Der Gatestrom ist daher nur der winzige Sperrstrom.

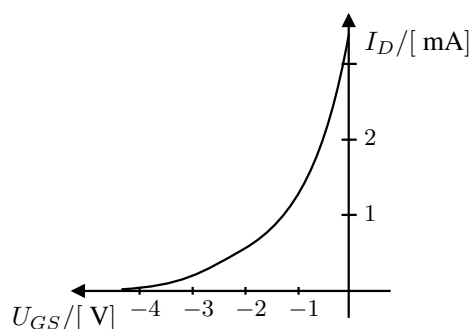


Abbildung 16: Kennlinie eines n-JFET

Die gerade gezeigte Bauform eines FET hat einen pn-Übergang, also eine elektrische Verbindung (engl. *junction*) und wird daher J-FET genannt. Genaugenommen unterscheidet man zwischen p-Kanal-JFET und n-Kanal-JFET, wie oben erwähnt.

1.3. Aufbau eines MOSFET-Transistors

Der Feldeffekt lässt sich aber auch erreichen, wenn das Gate durch eine extrem dünne Isolationschicht (z.B. aus Siliziumoxid) vom n- oder p-Kanal getrennt wird. Jetzt kann nahezu kein Strom mehr über das Gate fließen, das Gate ist extrem hochohmig (bis zu $10^{13} \Omega$). Man spricht von *isolated gate FET*, *IG-FET* oder – da es sich um eine Metallschicht (M) auf dem Oxid (O) über einem Halbleiter (Semiconductor S) handelt – vom MOS-FET.

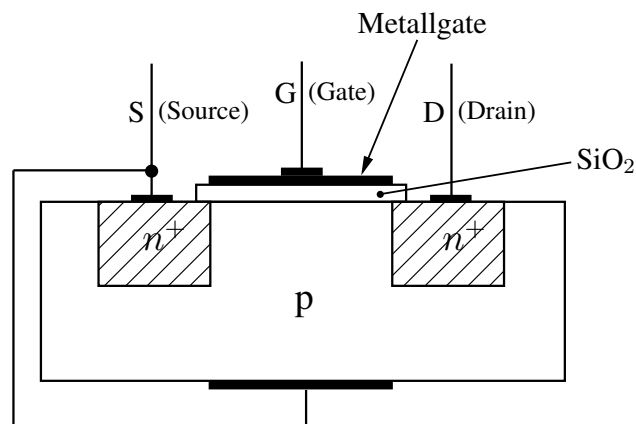
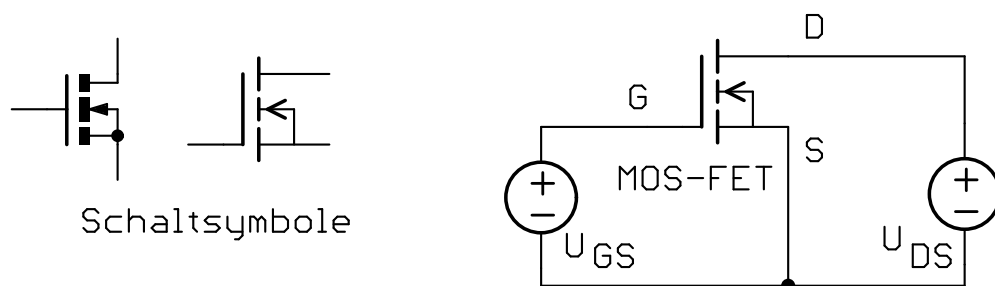


Abbildung 17: Schematische Darstellung eines MOSFETs

Legt man zwischen Gate (G) und Source (S) eine Spannung (beim dargestellten N-MOSFET Pluspol an G und Minuspol an S), so bildet sich ein elektrisches Feld aus, das die Konzentration der Ladungsträger und damit die Leitfähigkeit zwischen S und D verändert.



Schaltsymbole und Beschaltung eines MOSFETs

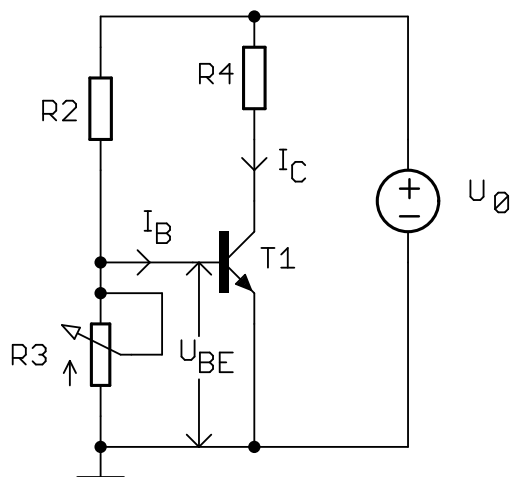
Diese MOS-FETs sind das zentrale Bauteil der modernen Digitalelektronik und lassen sich zu Milliarden in integrierten Schaltungen wie Mikroprozessoren und Speicherbausteinen integrieren.

Als einzelnes (diskretes) Bauteil waren MOS-FETs früher schwer zu handhaben, weil die nur wenige Nanometer dünne Oxidschicht des Gates extrem empfindlich ist. Die im Alltag überall auftretenden elektrostatischen Aufladungen können den Gateübergang auf mehrere Tausend Volt aufladen, und die damit verbundene Feldstärke zerstört sofort die Isolationschicht. Inzwischen sind aber auch einzelne MOS-FETs mit integrierten Schutzschaltungen erhältlich.

2. Schaltungstechnik

2.1. Grundschialtung zur Spannungsverstärkung

Betrachten wir einen npn-Transistor, dessen Kollektor über einen Widerstand R_C (im Schaltplan R4) an eine Gleichspannungsquelle U_0 angeschlossen ist. Damit ein Kollektorstrom I_C fließt, müssen wir einen Basisstrom I_B haben. Er wird bekanntlich von der Spannung U_{BE} hervorgerufen, die wir in den folgenden Schaltungen von derselben Gleichspannungsquelle beziehen, und zwar über einen einstellbaren Spannungsteiler.



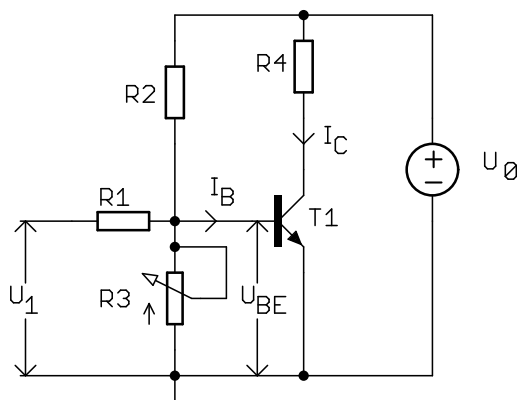
Für den Kollektorstrom gilt bekanntlich: $I_C = \beta I_B$.

Über dem Kollektorwiderstand fällt eine Spannung ab: $U_{R4} = R_4 I_C$

und es bleibt als Kollektorspannung: $U_{CE} = U_0 - U_{R4} = U_0 - R_4 I_C = U_0 - R_4 \beta I_B$

Wir wollen R_3 im Verhältnis zu R_2 so einstellen, dass der Kollektorstrom über R_4 gerade einen Spannungsabfall $U_0/2$ verursacht, d.h. dass auch $U_{CE} = U_{CE0} = U_0/2$. Diesen Zustand bezeichnen wir als *Arbeitspunkt*. Den Basisstrom im Arbeitspunkt nennen wir I_{B0} .

Wir gehen nun über einen weiteren Widerstand R_1 an den Spannungsteiler an der Basis und nehmen an, dass an R_1 eine Spannung U_1 liege, die um einen kleinen Betrag (einige 10 Millivolt) um die Basisspannung schwankt.



Aufgrund der Eingangseigenschaft der Basis (siehe Kennlinie) führt das vor allem zu einer Änderung des Basisstroms.

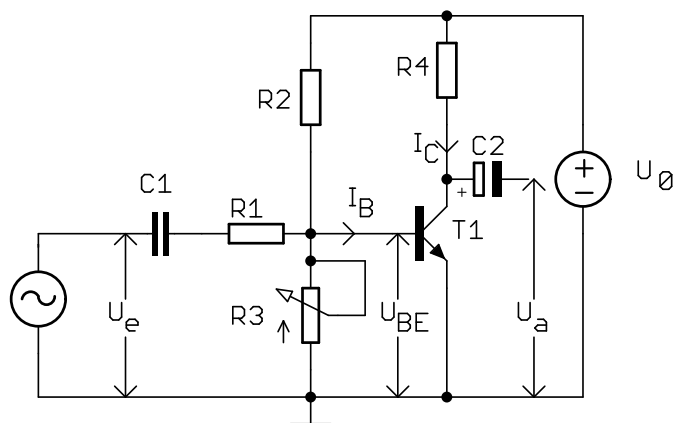
Der sich ändernde Basisstrom $I_B = I_{B0} + \Delta I_B$ führt zu einem sich ändernden größeren Kollektorstrom $I_C = I_{C0} + \Delta I_C$.

Am Kollektorwiderstand R_4 entsteht ein Spannungsabfall $U_4 = R_4 I_C = R_4 (I_{C0} + \Delta I_C)$.

Die Ausgangsspannung ist $U_C = U_0 - U_4$. Sie schwankt also um den Wert $-R_4 \Delta I_C$.

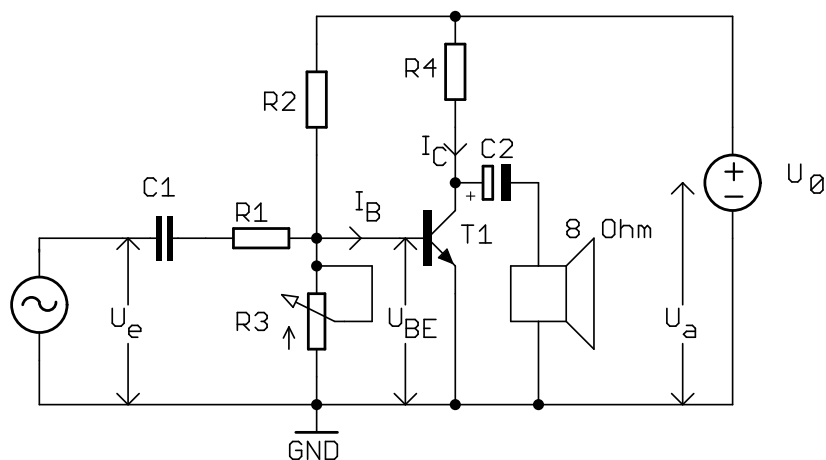
Eine genaue Betrachtung zum Verstärkungsfaktor A finden Sie im Anhang. Dort wird hergeleitet, daß $A = \frac{\Delta U_a}{\Delta U_e} = \frac{-I_C R_C}{U_T}$. Im dortigen Zahlenbeispiel ist A etwa 150 bis 200.

In der Praxis hat oder braucht man am Eingang und Ausgang Wechselspannungen, die symmetrisch um die Nulllinie schwingen. Die konstanten Gleichspannungsanteile sind unerwünscht. Sie lassen sich durch die Kondensatoren C_1 und C_2 leicht entfernen, denn diese laden sich im zeitlichen Mittel auf diese Spannungen auf.



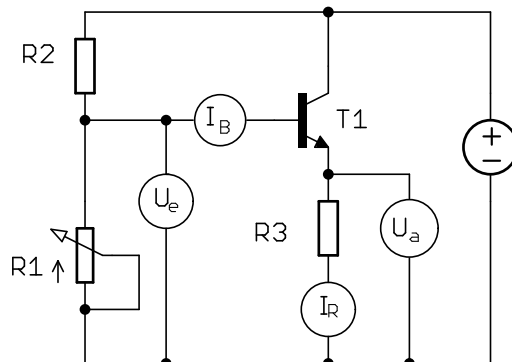
Die bisherige Rechnung ist davon ausgegangen, dass der Spannungsteiler aus R_4 und Transistor nicht belastet wird. In der Praxis braucht man aber z.T. erhebliche Ströme, wenn man z.B. einen Lautsprecher ansteuern will.

Überlegen Sie sich, was passiert, wenn an $R_4 = 1 \text{ k}\Omega$ ist und daran ein $8\text{-}\Omega$ -Lautsprecher geschaltet wird, denn C_2 spielt wechsellspannungsmäßig keine Rolle.



2.2. Grundsaltung zur Stromverstärkung

Was passiert, wenn der Lastwiderstand nicht an den Kollektor, sondern den Emitter geschaltet wird? Betrachten Sie die folgende Schaltung.



Die einstellbare Spannung U_e (Spannungsteiler R1, R2) gelangt unmittelbar an die Basis von Transistor T1. Nehmen wir an, sie sei 5 Volt. Gehen wir davon aus, dass im allerersten Moment noch kein Kollektor- oder Emitterstrom fließt. Der Spannungsabfall über R3 ist daher 0 V und der Emitter liegt auf 0 V. Dann aber ist die $U_{BE} = 5$ V, was lt. Eingangskennlinie zu einem riesigen Kollektor- bzw. Emitterstrom führen sollte. Aber: In dem Maße, wie der Emitterstrom ansteigt, nimmt ja auch der Spannungsabfall über R3 zu. Die Spannung am Emitter (bzgl. 0 V, also Masse) geht dadurch hoch und U_{BE} verringert sich im gleichen Maße. Sobald jedoch U_{BE} unter 0,6 V absinkt, bricht der Basisstrom und damit auch der Emitterstrom zusammen. Das System regelt sich daher so ein, dass ein so großer Emitterstrom fließt, bei dem U_{BE} etwa 0,6 V ist. Anders gesagt: Der Emitter folgt (im Abstand von diesen 0,6 V) der Basisspannung. Man spricht daher von einem **Emitterfolger**.

Für die Ströme gilt nun: $I_E = I_B + I_C$.

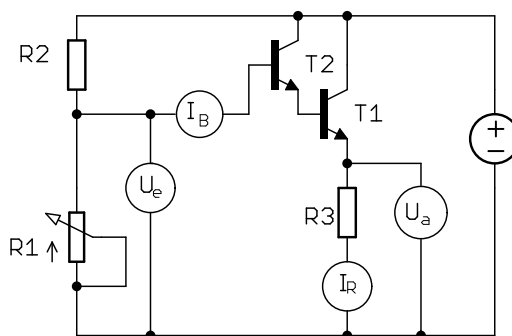
Da aber $I_C \gg I_B$, kann man annehmen $I_E \approx I_C$ und somit $I_E = \beta I_B$.

Der Emitterfolger verstärkt also den Strom um den Faktor β , die Spannung hingegen wird nicht verstärkt.

Zur Steuerung größerer Ströme werden Leistungstransistoren eingesetzt, deren β recht gering ist (10 bis 30 im Gegensatz zu 200 bis 500 bei Kleinsignaltransistoren).

Man kann jedoch der Basis des Leistungstransistors einen zusätzlichen Transistor vorschalten, der seinen Basisstrom um β_1 verstärkt an den Leistungstransistor weitergibt, der seinerseits nochmal um β_2 verstärkt. Die Gesamtstromverstärkung ist damit das Produkt $\beta_1 \beta_2$.

Man spricht von einer **Darlingtonstufe**.



Welche Last sieht ein Spannungsteiler, wenn er über einen Emitterfolger oder eine Darlingtonstufe an den Lastwiderstand R_3 gelegt wird? Die Spannung an R_3 ist in etwa die des Spannungsteilers, aber der Basisstrom ist um den Faktor β_1 bzw. $\beta_1\beta_2$ kleiner. Der scheinbare Widerstand ist also um diesen Faktor größer.

Beispiel: Bei $R_3 = 8 \Omega$ und einem $\beta_1\beta_2$ von $20 \times 300 = 6000$ ist die scheinbare Last nur noch $48 \text{ k}\Omega$.

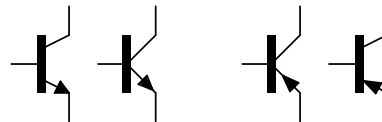
IV. Versuchsprogramm

1. Bauelement und Schaltsymbol

Transistoren werden in verschiedenen Gehäusen angeboten, z.B. im TO-92-Gehäuse (Foto oben links) oder bei großen Strömen im TO-3-Gehäuse (oben rechts). Es gibt aber auch kleinere Bauformen wie SOT23 (links ganz unten). Weitere Gehäusetyper sind zusätzlich abgebildet.

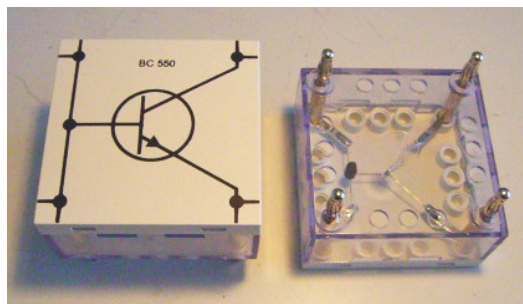


Gehäuseformen



Schaltsymbole NPN- und PNP-Transistor

In unserem Versuch ist der Transistor (TO-92-Gehäuse) in einem Steckelement eingebaut. Die Anschlüsse werden über Bananenstecker mit dem Steckbrett verbunden.



Transistor im Steckgehäuse

2. Eigenschaften von Transistoren

Wie bei der Diode lassen sich auch die Eigenschaften von Transistoren anhand von Kennlinien beschreiben.

Die **Eingangskennlinie** beschreibt den Zusammenhang zwischen der Basisspannung U_{BE} und dem Basisstrom I_B , also $I_B = f(U_{BE})$. Sie ist der Diodenkennlinie ähnlich.

Die **Ausgangskennlinie** beschreibt den Zusammenhang zwischen der Kollektorspannung U_{CE} und dem Kollektorstrom I_C , also $I_C = f(U_{CE})$. Charakteristisch ist, dass sich mit zunehmender Spannung U_{CE} der Kollektorstrom einem Maximalwert I_C nähert, dem Sättigungsstrom I_{Cs} .

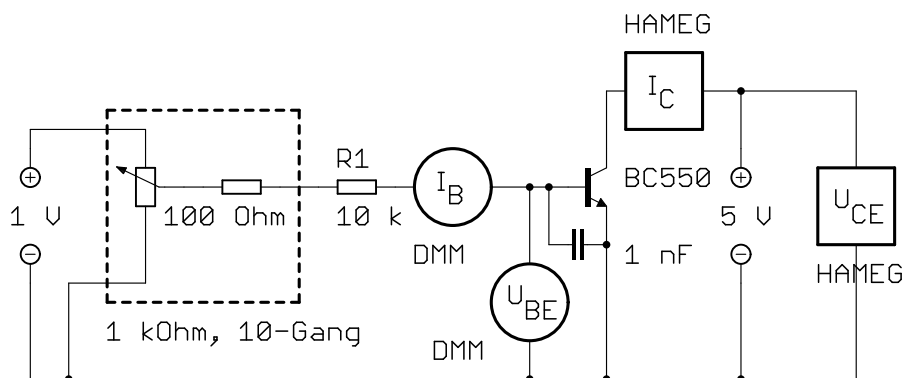
Die Höhe von I_{Cs} ist praktisch proportional zu I_B :

$I_C = \beta I_B$, man spricht vom Verstärkungsfaktor β . Aufgrund der statischen Messung (es werden ja Gleichströme gemessen) spricht man hier genauer von der statische Stromverstärkung $B = \frac{I_C}{I_B}$, siehe auch Anhang.

Die Kennlinien und die (statische) Stromverstärkung sollen nun mit den folgenden Schaltungen gemessen werden. Je Schaltung kommt man dabei mit 2 DMMs aus. Als Transistor wird der BC550 verwendet.

2.1. Messung der Eingangskennlinie

Für die Eingangskennlinie $I_B = f(U_{BE})$ brauchen Sie sehr fein einstellbare Spannungen U_{BE} . Stellen Sie daher an der HAMEG-Spannungsquelle 1 Volt ein und benutzen Sie das 1-k Ω -10-Gang-Potentiometer als Spannungsteiler. Zur Absicherung der Basis verwenden Sie noch einen Vorwiderstand R1 von 10 k Ω . Die Spannungsquelle für U_{CE} und I_C ist der zweite **regelbare** Ausgang des HAMEG-Netzgerätes, damit Sie dort U_{CE} oder I_C ablesen können und keine zusätzlichen DVMs brauchen. Nehmen Sie also **nicht** den mittleren 5-V-Festspannungsausgang!



I_B und U_{BE} messen Sie mit den beiden Digitalmultimetern².

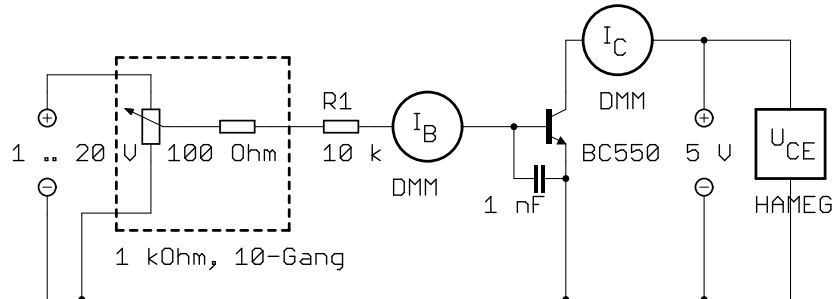
Den Wert von U_{CE} (5 Volt) lesen Sie am grünen Display des HAMEG-Netzgerätes ab. Mit den weißen Taster neben diesem Display können Sie bei Bedarf auch in Stromanzeige I_C umschalten. (Sollte es Probleme mit hochfrequenten Schwingungen geben, schalten Sie einen 1-nF-Kondensator zwischen Basis und Emitter.)

²Beachten Sie: Wenn Sie beim Amperemeter den Meßbereich ändern, ändert sich auch dessen Innenwiderstand und damit der Basisstrom, Sie müssen am Potentiometer also evtl. nachregeln. Der Innenwiderstand des Amperemeters ändert sich, weil die DMMs hier eigentlich 200-mV-Voltmeter sind, die den Spannungsabfall über einem Widerstand messen. Im 200-mA-Bereich wird also an 1 Ω gemessen, im 200- μ A-Bereich ist es aber 1 k Ω und im 20- μ A-Bereich sind es aber 10 k Ω .

2.2. Messung der Stromverstärkung

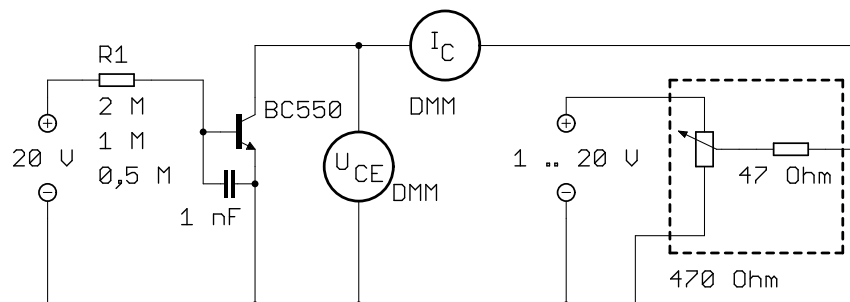
Als nächsten Punkt sollen Sie die (statische) Stromverstärkung $I_C = f(I_B)$ messen. Die Schaltung bleibt fast unverändert.

An der „linken“ Spannungsquelle für den Basisstrom dürfen Sie jetzt bis zu 20 Volt einstellen. Die Spannung U_{BE} interessiert hier nicht. Der Kollektorstrom I_C wird mit dem nun freien Digitalmultimeter gemessen. Für U_{CE} wählen Sie 5 Volt. I_C **sollte nicht größer als 50 mA werden.**



2.3. Messung der Ausgangskennlinie

Bei der Messung der Ausgangskennlinie $I_C = f(U_{CE})$ ist zu beachten, daß sich (bei konstantem U_{BE}) der Basisstrom I_B verändert, wenn sich der Kollektorstrom ändert. Wir wollen aber I_B konstant halten und brauchen daher eine Konstantstromquelle. Wie Sie wissen, kann man eine Konstantstromquelle (näherungsweise) aus einer Spannungsquelle bauen, wenn man eine hohe Spannung und einen hohen Innenwiderstand hat. Daher bauen wir folgende Schaltung auf:



Die Quelle für den Basisstrom wird auf 20 Volt eingestellt.

Wenn Sie $R1 = 2 \text{ M}\Omega$ wählen (das sind zwei in Serie geschaltete $1\text{-M}\Omega$ -Widerstände) ist der **Basisstrom konstant etwa $10 \mu\text{A}$** (Sie können es einmal nachmessen mit dem später für I_C zu verwendenden Amperemeter und dabei U_{CE} zwischen 0 und 20 V variieren).

Die beiden Digitalmultimeter werden für die Messung von I_C und U_{CE} verwendet.

Sie werden feststellen, daß die Stromsättigung schon bei Spannungen U_{CE} von deutlich unter 1 Volt einsetzt. Daher sollten Sie zunächst die „rechte“ Spannungsquelle auf 1 Volt einstellen und an einen Spannungsteiler anschließen, den Sie mit dem $470\text{-}\Omega$ -Potentiometer aufbauen. Jetzt können Sie U_{CE} sehr fein einstellen. Danach können Sie die „ rechte“ Spannungsquelle bis auf 20 Volt hochdrehen (das Potentiometer kann in der Schaltung bleiben).

Wiederholen Sie die Kennlinienmessung mit $R1 = 1 \text{ M}\Omega$, **d.h. mit einem Basisstrom von etwa $20 \mu\text{A}$.**

Machen Sie noch eine dritte Kennlinienmessung mit $R1 = 0,5 \text{ M}\Omega$ (das sind zwei parallelgeschaltete $1\text{-M}\Omega$ -Widerstände), d.h. mit einem **Basisstrom von etwa $40 \mu\text{A}$.**

3. Spannungsverstärkung mit Transistoren

Die Verstärkung kleiner (Wechsel-)spannungen gelingt, wenn die Eingangsspannung in einen proportionalen Basisstrom I_B umgewandelt wird, der dann als verstärkter Strom I_C über einen Kollektorwiderstand R_C wieder in eine Spannung umgesetzt wird.

Mit R_2 und R_3 wird ein Arbeitspunkt eingestellt (d.h. damit sich am Kollektor etwa die halbe Versorgungsspannung einstellt). Zur Kontrolle des Arbeitspunktes schließen Sie das Oszilloskop (Ch2) direkt am Kollektor an. Achten Sie darauf, daß es im Modus DC (und nicht AC) steht. (Warum?)

Über R_1 (Strombegrenzung) und C_1 wird das Eingangssignal auf die Basis gegeben. Die Frequenz darf dabei nicht zu klein sein: Berechnen Sie die Grenzfrequenz für $C_1 R_1$. Stellen Sie am Funktionsgenerator ein Sinussignal mit mindestens der 10fachen Frequenz ein.

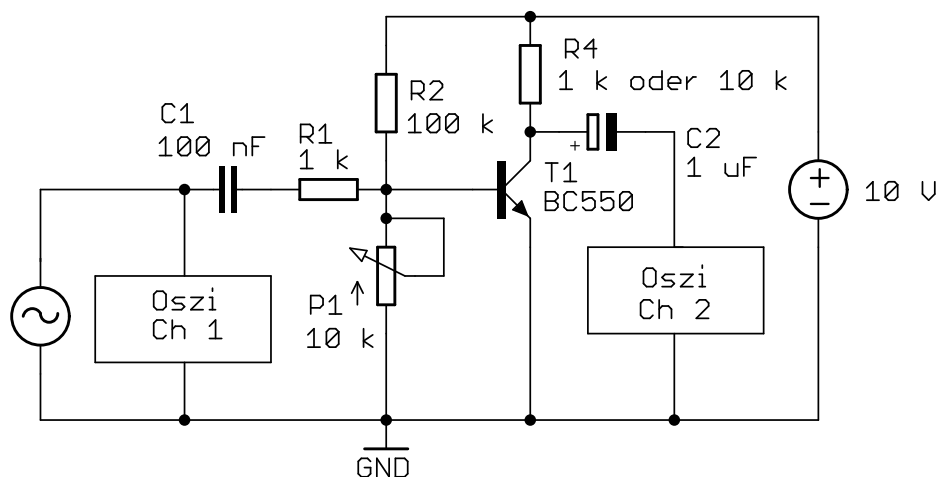
Die kleinen Änderungen des Basisstroms dI_B werden durch den Verstärkungsfaktor β zu großen Änderungen des Kollektorstroms $dI_C = \beta dI_B$.

Am Widerstand R_4 fällt eine Spannung $U_R = I_C R_4$ ab und am Kollektor bleibt $U_{CE} = U_0 - U_R$, die großen Spannungsänderungen dU_{CE} werden über C_2 ausgekoppelt.

Bauen Sie die folgende Schaltung auf. Im Schaltplan ist C2 gepolt, d.h. als Elektrolytkondensator gezeichnet, Sie können aber auch einen ungepolteten Kondensator nehmen (Schaltzeichen wie C1).

Geben Sie ein kleines (!) Sinussignal auf den Eingang. Sie können das FG-Signal durch drücken einer oder beider Tasten „-20 dB“ um den Faktor 10 oder 100 abschwächen. Messen Sie das Ausgangssignal mit dem Oszilloskop nach. Wie groß ist die Verstärkung? (Ein Faktor von 100 ist bei etwa 10 kHz realistisch.)

Wenn Ihr Ausgangssignal nicht sinnvoll erscheint, sehen Sie sich das Signal direkt am Kollektor an (also vor C2) und überprüfen Sie, ob Ihr Arbeitspunkt korrekt eingestellt ist.



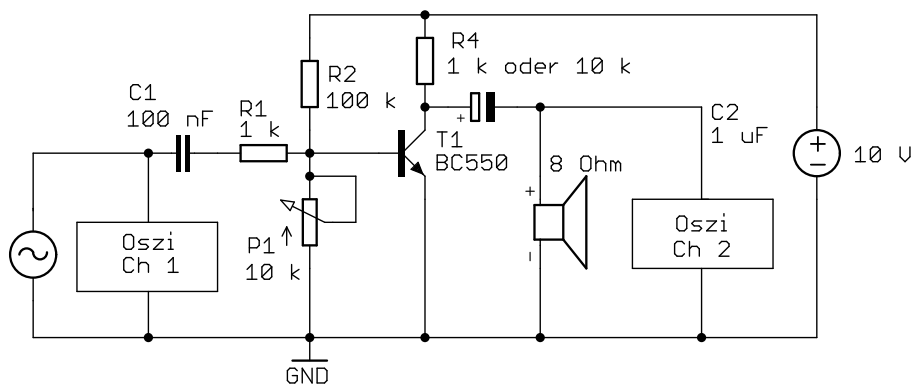
Bei kleinen oder verrauschten Signalen ist es schwierig, auf Ch1 oder Ch2 zu triggern. Verbinden Sie dann die Buchse TRIG OUTP. des Funktionsgenerators über ein BNC-Koaxialkabel mit der Buchse EXT TRIG des Oszilloskops und wählen Sie als Triggerquelle EXT.

Wir wollen nun versuchen, das Signal mit einem Lautsprecher hörbar zu machen. Schließen Sie (über den Kondensator C2, der den Gleichspannungsanteil zurückhält) den 8-Ω-Lautsprecher an. Die übrige Schaltung bleibt unverändert.

Eigentlich sollte ein mehrere Volt großes Signal sehr laut hörbar werden, das ist jedoch nicht der Fall. Warum? Beobachten Sie das Ausgangssignal gleichzeitig am Oszilloskop. Was ist passiert?

Messen Sie die Amplitude des Ein- und Ausgangssignals.

(Wenn Ihr Ausgangssignal nicht sinnvoll erscheint, sehen Sie sich das Signal direkt am Kollektor an (also *vor* C2) und überprüfen Sie, ob Ihr Arbeitspunkt korrekt eingestellt ist.)



4. Stromverstärkung mit der Emitterfolger-Schaltung

Wir haben gerade gesehen, dass eine Spannungsverstärkung allein nicht ausreicht, wenn gleichzeitig auch hohe Ausgangsströme gebraucht werden.

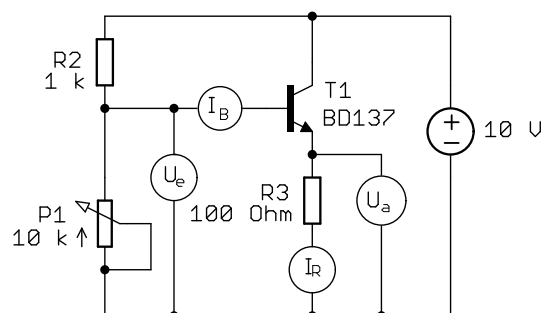
Zur Stromverstärkung eignet sich die Schaltung des sogenannten Emitterfolgers.

Bauen Sie die folgende Schaltung auf.

Geben Sie durch verändern von R1 verschiedene Gleichspannungen U_e auf den Eingang und messen Sie zunächst $U_a = f(U_e)$ und danach für mehrere U_e den Zusammenhang $I_R = f(I_B)$.

Wichtig: Für T1 nehmen Sie jetzt den BD137, zur Messung von I_R ein Amperemeter mit 2A-Meßbereich!

Messen Sie die Spannungsverstärkung in dieser Schaltung und die Stromverstärkung.

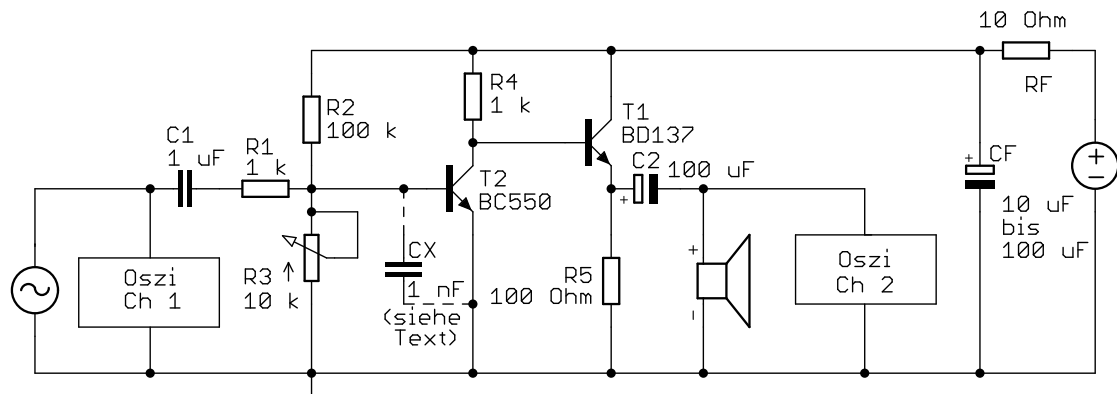


Nutzen Sie jetzt die Emitterfolgerschaltung, um einen größeren Strom für den Lautsprecher bereitzustellen.

Bauen Sie die folgende Schaltung auf. Achten Sie bei C2 auf die richtige Polung! **Nehmen Sie für R5 evtl. 51 Ω statt 100 Ω .**

Schalten Sie einen Kondensator 1 nF zwischen Basis und Emitter von T2 (im Schaltbild CX, gestrichelt), damit es nicht zu unerwünschten Schwingungen (hochfrequente Regelinstabilitäten) durch das Netzgerät kommt. Falls es auch mit CX noch zu Schwingungen in der Versorgungsspannung kommt, kann ein Tiefpaßfilter helfen (RF/CF), das zwischen Netzgerät und Schaltung gesetzt wird.

Messen Sie die Amplitude des Ein- und Ausgangssignals und vergleichen Sie die Werte mit denen aus der früheren Schaltung (d.h. die Schaltung auf Seite 16 ohne den BD137).

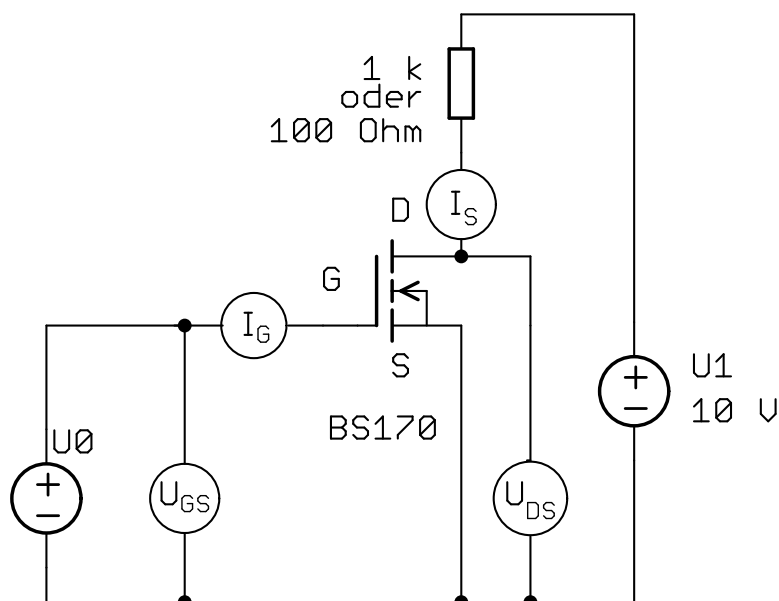


5. Feldeffekttransistoren

Auch wenn der Basisstrom I_B oft nur wenige μA beträgt, ist das in manchen Anwendungen zu groß. Mit einem Feldeffekttransistor (FET) lassen sich Ströme und Spannungen praktisch leistungslos steuern, denn der „Basisstrom“ (exakter: Gatestrom) ist jetzt im nA-Bereich und kleiner.

Bauen Sie die folgende Schaltung auf. Als MOS-FET verwenden Sie einen N-Typ (BS170 oder äquivalent). Wählen Sie für $R_1 = 1\text{ k}\Omega$ bei $U_1 = 10\text{ V}$, ggf. können Sie R_1 auch auf $100\ \Omega$ verringern. Die Gatespannung wird bei MOS-FETs ohne Vorwiderstand angeschlossen. **Achtung:** U_{DS} darf nicht vertauscht werden, weil sonst eine Schutz-Zenerdiode, die im Schaltsymbol *nicht* eingezeichnet ist, Durchlaßrichtung hätte.

Sie müssen *nicht* alle vier Größen I_S , I_G , U_{GS} , U_{DS} gleichzeitig messen, sondern nur die jeweils angegebenen.



Messen Sie $I_S = f(U_{GS})$ für U_{GS} von 0 bis +15 V. Für welchen Spannungsbereich leitet der Transistor, für welchen sperrt er?

Versuchen Sie, für einige Werte von U_{GS} den Gatestrom I_G zu messen. Beachten Sie, dass Sie nicht den Strom durch das Voltmeter ($R_i = 10\text{ M}\Omega$) mitmessen dürfen. Schalten Sie das Amperemeter I_G also unmittelbar vor den Gate-Anschluß. Wahrscheinlich ist I_G so klein, daß Sie selbst im μA -Bereich des Amperemeters nichts sehen. Falls Sie auch keinen Gatestrom messen: Wie groß kann I_G demnach höchstens sein? (Das Datenblatt nennt für $U_{GS} = 15\text{ V}$ einen I_G von typ. 10 pA , max. 10 nA .)

Hinweis: Lassen Sie das Gate nicht offen! Zwar ist dann der Gatestrom Null, aber das Gate holt sich durch äußere statische Ladungen irgendeine Spannung. Offenes Gate bedeutet also *nicht* $U_{GS} = 0!$

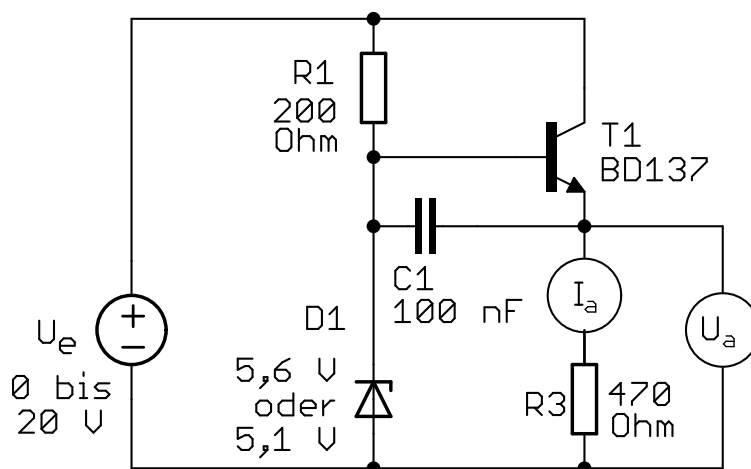
6. Spannungsstabilisierung mit Transistoren

Im Versuch zur Diode (EP3) haben Sie gelernt, wie man mit Zenerdioden konstante Gleichspannungen erzeugen kann. Aufgrund des Vorwiderstandes kann mit der einfachen Schaltung aber noch kein hoher Ausgangsstrom erreicht werden. Wird die Zenerspannung aber über einen Emitterfolger (d.h. einen Stromverstärker) geführt, sind wesentlich höhere Ströme möglich.

Bauen Sie die folgende Schaltung auf. Messen Sie $U_a = f(U_e)$ (bei einem festen R_L von z.B. $470\ \Omega$). U_e variieren Sie zwischen $0\ \text{V}$ und $20\ \text{V}$.

Messen Sie außerdem $U_a = f(I_a)$, also bei konstantem U_e und veränderlichem R_L (d.h. R3). Hierzu ersetzen Sie den Festwiderstand R3 durch das **470-Ohm-Potentiometer, wobei Sie dessen 47-Ohm-Schutzwiderstand unbedingt mitbenutzen**. Sie variieren R_L also zwischen ca. $47\ \Omega$ und $517\ \Omega$.

Der Kondensator C1 ($100\ \text{nF}$) verhindert hochfrequente Schwingungen die bei einigen Netzgeräten (U_e) durch Regel-Instabilitäten entstehen können.



Eine Gefahr dieser Schaltung ist, dass bei einem Kurzschluß ein zu hoher Ausgangsstrom fließt, der den Transistor zerstören könnte. Professionelle Regler haben daher noch weitere Schaltungsteile, die den Ausgangsstrom begrenzen.

Anhang

7. Verstärkungsfaktor eines Transistors in Emitterschaltung (für Interessierte, kein Lernstoff)

Die Verstärkung bei der Emitterschaltung auf Seite 9 (nicht zu verwechseln mit dem Emitterfolger!) läßt sich verstehen, wenn einige Transistoreigenschaften definiert werden³:

7.1. Steilheit

Betrachtet man Ein- und Ausgangskennlinie zusammen, so wird deutlich, daß eine *kleine* Änderung von U_{BE} eine große Änderung von I_C zur Folge hat.

Der Zusammenhang $I_C = f(U_{BE})$ wird auch **Übertragungskennlinie** genannt (sie gilt für ein konstantes U_{CE}) und durch die **Steilheit** S charakterisiert:

$$S = \frac{\partial I_C}{\partial U_{BE}} \quad \text{für } U_{CE} = \text{const.} \quad (7.1)$$

Für den Kollektorstrom I_C gilt ähnlich wie bei einer Diode:

$$I_C = I_{CS}(T, U_{CE}) e^{\frac{U_{BE}}{U_T}} \quad \text{mit} \quad U_T = \frac{kT}{e} \quad (7.2)$$

I_{CS} ist der **Kollektor-Sperrstrom** (von Temperatur T und U_{CE} abhängig),

$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{J}}{\text{K}}$ ist die Boltzmannkonstante,

$e = 1,6010^{-19} \text{C}$ ist die Elementarladung.

Bei Raumtemperatur ergibt sich für U_T 25,5 mV.

Durch Differenzieren von Gleichung 7.2 läßt sich S berechnen:

$$S = \frac{I_{CS}}{U_T} e^{\frac{U_{BE}}{U_T}} = \frac{I_C}{U_T} \quad (7.3)$$

Die Steilheit S ist also (wenn man von der Temperaturabhängigkeit der U_T absieht) *nur* vom Kollektorstrom abhängig. Es ist kein Transistor-Datenblatt erforderlich!

7.2. Differentieller Eingangswiderstand

Die Eingangskennlinie eines Transistors ist wie bei einer Diode

$$I_B = I_{BS} e^{\frac{U_{BE}}{m U_T}} \quad \text{mit} \quad m = \text{Korrekturfaktor, } \neq 1 \quad (7.4)$$

I_{BS} ist der **Basis-Sperrstrom**.

Man definiert nun den **differentiellen Eingangswiderstand** r_{BE} :

$$r_{BE} = \frac{\partial U_{BE}}{\partial I_B} \quad \text{für } U_{CE} = \text{const.}$$

Betrachten wir den Kehrwert von r_{BE} , so wird deutlich, daß dieser die differenzierte Eingangskennlinie ist:

³nach U. TIETZE, CH. SCHENK: Halbleiter-Schaltungstechnik, 18. Auflage 1993, Kap. 4

$$\frac{1}{r_{BE}} = \frac{\partial I_B}{\partial U_{BE}} = I_{BS} \frac{\partial}{\partial U_{BE}} e^{\frac{U_{BE}}{m U_T}} = \frac{I_{BS}}{m U_T} e^{\frac{U_{BE}}{m U_T}} = \frac{I_B}{m U_T}$$

Offenbar ist also

$$r_{BE} = \frac{m U_T}{I_B}$$

Er läßt sich nicht genau berechnen, weil die Größe des Korrekturfaktors m nicht genau bekannt ist. Kennt man jedoch die differentielle Stromverstärkung $\beta = \frac{\partial I_C}{\partial I_B}$ (siehe unten, Gleichung 7.7), kann r_{BE} aus der Steilheit S (Formel 7.1) berechnet werden:

$$r_{BE} = \frac{\partial U_{BE}}{\partial I_B} = \frac{\partial U_{BE}}{\partial I_C / \beta} = \frac{\beta}{S} = \frac{\beta U_T}{I_C} \quad (7.5)$$

7.3. Statische und differentielle Stromverstärkung

Beim Transistor ist in erster Näherung der Kollektorstrom zum Basisstrom proportional. Man definiert die **statische Stromverstärkung**:

$$B = \frac{I_C}{I_B} \quad (7.6)$$

Mit den Formeln 7.2 für I_C und 7.4 für I_B folgt:

$$B = \frac{I_C}{I_B} = \frac{I_{CS} e^{\frac{U_{BE}}{U_T}}}{I_{BS} e^{\frac{U_{BE}}{m U_T}}}$$

Wegen des Korrekturfaktors m ist B nicht konstant, sondern hängt von U_{BE} ab bzw. von $I_C = f(U_{BE})$.

Betrachtet man *Stromänderungen* im Arbeitspunkt, so gibt es eine **differentielle Stromverstärkung**

$$\beta = \frac{\partial I_C}{\partial I_B} \quad \text{für } U_{CE} = \text{const.} \quad (7.7)$$

7.4. Spannungsverstärkung in der Emitterschaltung

Betrachten wir nun einen Transistor in Emitterschaltung (siehe Seite 9). Die Eingangsspannung U_e sei ungefähr 0,6 V, und zwar so groß, daß ein Kollektorstrom I_C im Milliamperebereich fließe. Erhöht man U_e um einen kleinen Betrag ΔU_e , so nimmt der Kollektorstrom I_C um ΔI_C zu.

Da die Ausgangskennlinien (im Sättigungsbereich) nahezu horizontal sind, gehen wir im folgenden davon aus, daß I_C von U_{CE} unabhängig ist.

Liegt die Eingangsspannung direkt an der Basis, so ist $U_e = U_{BE}$. Dann können wir mit der Steilheit S rechnen:

$$\text{Wegen } S = \frac{\partial I_C}{\partial U_{BE}} \quad \text{ist} \quad \Delta I_C \approx S \Delta U_{BE} = S \Delta U_e$$

Nun gilt ja für die Ausgangsspannung U_a , daß sie durch den Spannungsabfall am Kollektorwiderstand R_C (im Schaltplan R_4) bestimmt wird:

$$U_a = U_0 - R_C I_C$$

und damit

$$\Delta U_a = -R_C \Delta I_C \approx -S R_C \Delta U_e$$

Daraus folgt für die **Spannungsverstärkung** A :

$$A = \frac{\Delta U_a}{\Delta U_e} \approx -S R_C$$

Mit Formel 7.3 folgt:

$$A = -\frac{I_C R_C}{U_T}$$

A ist also proportional zu I_C und R_C .

Beispielrechnung: Sei $U_0 = 10$ V, $R_C = 5$ k Ω und der Arbeitspunkt bei 5 V, d.h. durch den Widerstand R_C fließt ein Strom $I_C = 1$ mA. Dann wird

$$A = -\frac{1 \text{ mA} \cdot 5 \text{ k}\Omega}{26 \text{ mV}} = -192$$

Liegt die Eingangsspannung U_e nicht direkt, sondern über einen Vorwiderstand (im Schaltbild R_1) an der Basis, so reduziert sich die Basisspannung U_{BE} , denn es entsteht ja ein Spannungsteiler mit R_1 und dem Eingangswiderstand des Transistors r_e , dabei ist r_e praktisch gleich dem differentiellen Eingangswiderstand r_{BE} . Es wird also

$$U_{BE} = U_e \frac{r_e}{r_e + R_1}$$

Da nach Formel 7.5 $r_{BE} = \frac{\beta U_T}{I_C}$, kann man aus der differentiellen Stromverstärkung β , dem Kollektorstrom I_C den Eingangswiderstand r_{BE} d.h. r_e berechnen.

Für unser Zahlenbeispiel mit $I_C = 1$ mA (und $U_T = 26$ mV) ergibt sich unter der Annahme von $\beta = 500$ ein r_e von 13 k Ω . Falls z.B. der Vorwiderstand $R_1 = 1$ k Ω ist, reduziert sich also U_{BE} und damit auch der Verstärkungsfaktor um den Faktor $\frac{13}{1+13} =$ etwa 0,93.

Dabei haben wir aber noch nicht die Widerstände R_2 und R_3 berücksichtigt, die zur Arbeitspunkteinstellung erforderlich sind. Bezüglich des Spannungsteilers liegen sie beide parallel zu r_e . Nehmen wir an, R_2 sei 100 k Ω und R_3 sei 10 k Ω . Dann sieht R_1 die Parallelschaltung aus r_e , R_2 und R_3 , also $13 \parallel 100 \parallel 10 =$ etwa 5,35 k Ω und der Verstärkungsfaktor reduziert sich um den Faktor $\frac{5,35}{1+5,35} =$ etwa 0,84.