

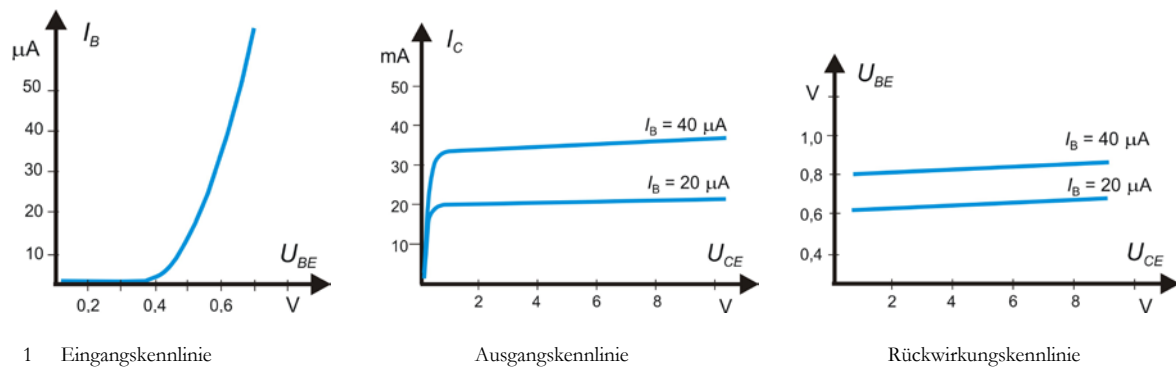
# C03 Transistor

## 1 Ziele

In diesem Versuch werden Eigenschaften und Anwendungen eines npn-Transistors (BD 135) untersucht. Dazu werden Sie Schaltungen aufbauen und ausprobieren und seine Kennlinien nutzen (Abschnitt 3): **Eingangskennlinie**  $I_B = I_B(U_{BE})$ ; **Steuerkennlinie**  $I_C = I_C(I_B)$  und **Ausgangskennlinie**  $I_C = I_C(U_{CE})$ .

**Hinweis:** Arbeiten Sie zügig und genau. Achten Sie auf Polaritäten und Messbereiche!

## 2. Zur Vorbereitung: Die Kennlinien des Transistors



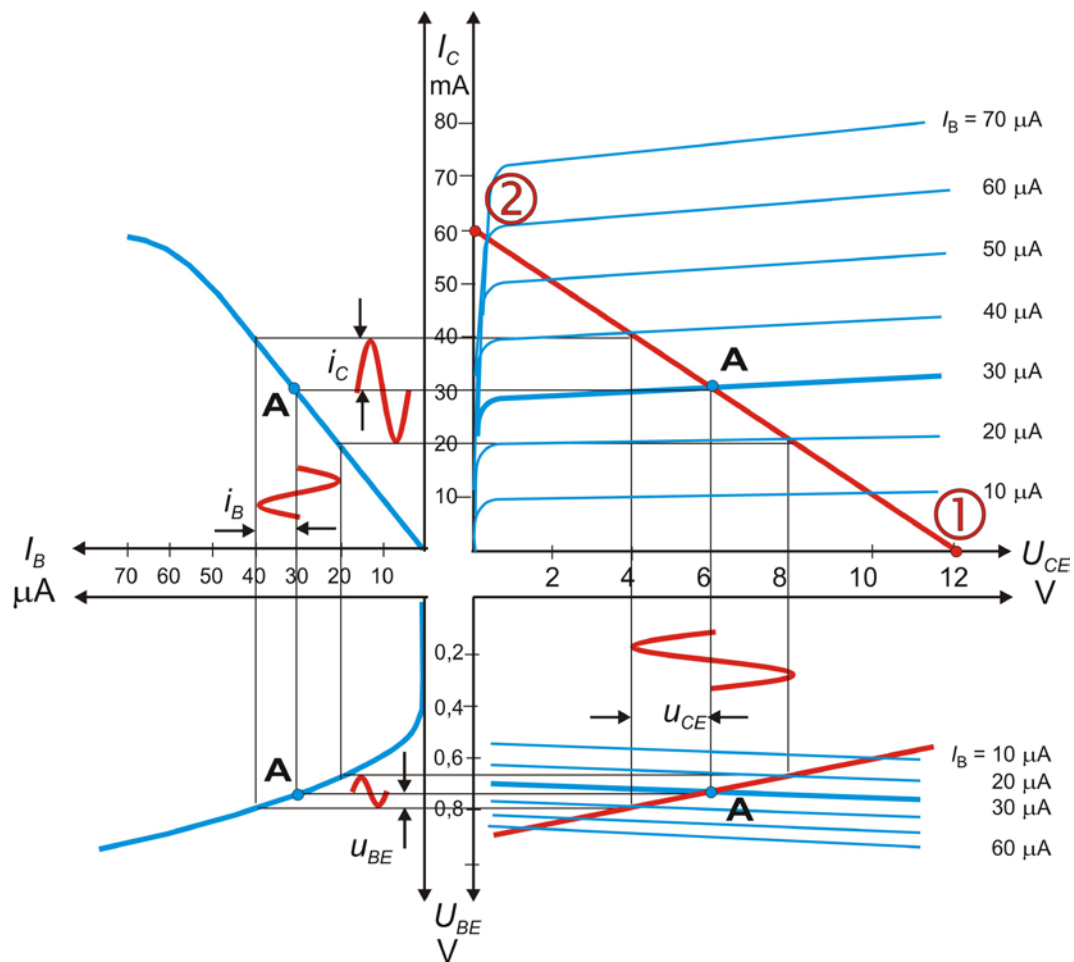
Eine systematische Messung und Darstellung von Eingangsgrößen (wie z. B.  $I_B$ ) und Ausgangsgrößen (wie z. B.  $I_C$ ) führt auf die *Kennlinien* von elektronischen Bauteilen. Danach lassen sich die Bauteile für bestimmte Aufgaben in einer elektronischen Schaltung auswählen.

**Eingangskennlinie  $I_B = I_B(U_{BE})$**  Diese Kennlinie gibt die Abhängigkeit des Basisstroms  $I_B$  von der anliegenden Basis-Emitter-Spannung  $U_{BE}$  an. Ohne zusätzliche Kollektor-Emitter-Spannung, also für  $U_{CE} = 0$  ist dies eine e-Funktion, die typische Kennlinie eines pn-Übergangs, also einer einfachen Diode:

$$I_B(U_{BE}) = I_S(T) \cdot \left( \exp\left(\frac{U_{BE}}{U_T}\right) - 1 \right), \text{ dabei sind } U_T = \frac{k \cdot T}{e} \text{ und } I_S \text{ der Sättigungssperrstrom.}$$

**Ausgangskennlinie  $I_C = I_C(U_{CE})$**  Das Kennlinienfeld zeigt, dass die Größe des Kollektorstroms  $I_C$  bei konstanter Kollektor-Emitter-Spannung  $U_{CE}$  stark vom Basisstrom  $I_B$  abhängt. Warum ist das so? Für  $U_{CE} = \text{const.}$  zeigt das Kennlinienfeld den schon bekannten linearen Zusammenhang  $I_C \sim I_B$ . Prüfen Sie das im Bild nach, skizzieren Sie danach den ungefähren Verlauf der Kennlinie für  $I_B = 50 \mu\text{A}$  in Abb. 1.

**Rückwirkungskennlinie  $U_{BE} = U_{BE}(U_{CE})$**  Eine Vergrößerung der Kollektor-Emitter-Spannung führt auch zu einer Erhöhung der Spannung  $U_{BE}$ . Eine Änderung der Ausgangsspannung wirkt daher auf die Eingangsspannung zurück. Diese Rückwirkung ist zumeist unerwünscht und wird in der Regel klein gehalten. Dies ist nicht durch schaltungstechnische Maßnahmen möglich. Einfluss hat nur der Transistor-Hersteller. Die Rückwirkungskennlinie bezieht sich auf einen bestimmten Basisstrom  $I_B$ .



2 Vierquadrantenkennlinienfeld des Transistors; die Arbeitsgerade ist hier für einen Lastwiderstand  $R_L = 200 \Omega$  bei der Betriebsspannung  $U_a = 12 \text{ V}$  eingezeichnet (Quelle: Beuth)

### Das Vierquadrantenkennlinienfeld

In Abb. 2 sind alle Kennlinien im sogenannten Vierquadrantenkennlinienfeld zusammengefasst. In jedem Quadranten wird eine Kennlinie bzw. Kennlinienschar dargestellt. Benachbarte Quadranten teilen sich jeweils eine der Achsen  $U_{CE}$ ,  $I_C$ ,  $I_B$  und  $U_{BE}$ . Diese Darstellung ist nützlich, da hier schnell aus der Kenntnis zweier vorgegebener Werte die beiden anderen Werte eindeutig bestimmt werden können.

Beispiel:  $I_B = 40 \mu\text{A}$ ,  $U_{CE} = 4 \text{ V}$  ergeben  $I_C = \dots$  und  $U_{BE} = \dots$

In Abb. 2 ist als Verbindung der beiden Punkte (1) und (2) die so genannte **Arbeitsgerade** eingezeichnet. Sie zeigt den Einfluss eines ohmschen Lastwiderstandes  $R_L$  im Kollektorkreis (vgl. 2. und 3. Versuchsreihe). Sie können sich die Lage der Arbeitsgeraden leicht überlegen:

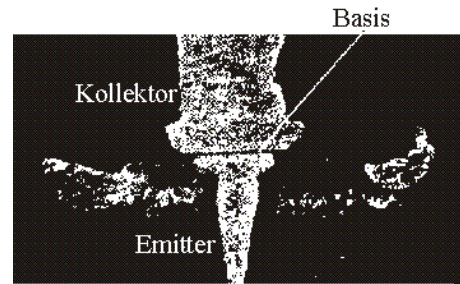
- Sperrt der Transistor, ist also  $I_C = 0$ , so ist auch der Spannungsabfall am Lastwiderstand  $U_{RL} = R_L \cdot I_C = 0$  und  $U_{CE} = U_a - U_{RL} = U_a$ ; Punkt (1) im Ausgangskennlinienfeld.
- Ist der Transistor in Abb. 7 voll durchgeschaltet, ist im Idealfall  $U_{CE} = 0$ . Der Strom durch den Lastwiderstand hat dann die Stromstärke  $I_C = U_a/R_L$ ; Punkt (2) im Ausgangskennlinienfeld.

Ist der Lastwiderstand  $R_L$  ohmsch, seine Kennlinie also eine Gerade (vgl. Versuch C10), ist diese durch die zwei Punkte völlig bestimmt. Die Arbeitszustände zwischen den genannten Extremwerten „liegen also auf der Arbeitsgeraden“. Mehr noch: In den hier benutzten Emitterschaltungen lassen sich nur Werte auf dieser Geraden realisieren, daher der Name Arbeitsgerade. Mit der Wahl eines Arbeitspunktes A auf der Arbeitsgeraden legt man **Ausgangsruhestrom**  $I_{C,0}$  und die **Ausgangsruhespannung**  $U_{CE,0}$  fest.

**Stichworte zur Vorbereitung:** pn-Übergang, Diode, Valenzelektron, Donatoren, Akzeptoren, Ladungsträgerdiffusion, Bändermodell, Fermi-niveau, npn-Transistor.

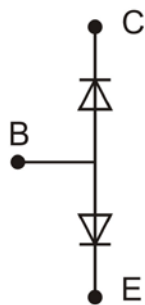
**Fragen:**

- Wie groß sind in Abb. 2 die zugehörigen Eingangsruhegrößen  $I_{B,0}$  und  $U_{BE,0}$ ?
- Die Kollektor-Emitterspannung  $U_{CE}$  betrage 3,7 V: Wie groß ist der Spannungsabfall an  $R_L$ ?
- Wie groß ist die Stromstärke  $I_C$  in dem Fall? Wie verläuft die Arbeitskennlinie für einen kleineren/größeren Widerstand  $R_L$ ?

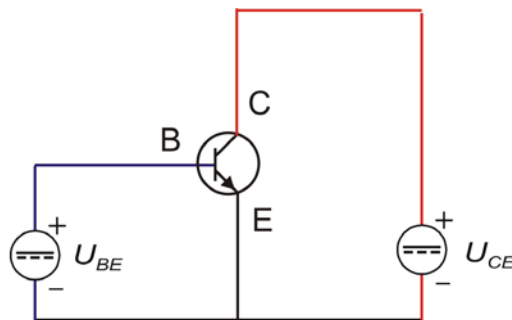


3 Die winzige Basis (Quelle: Dorn Bader, Schroedel Verlag)

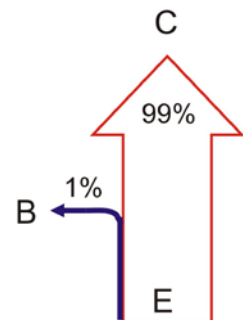
## 2 Emitterschaltung



4 Dioden-Ersatzschaltbild eines npn-Transistors



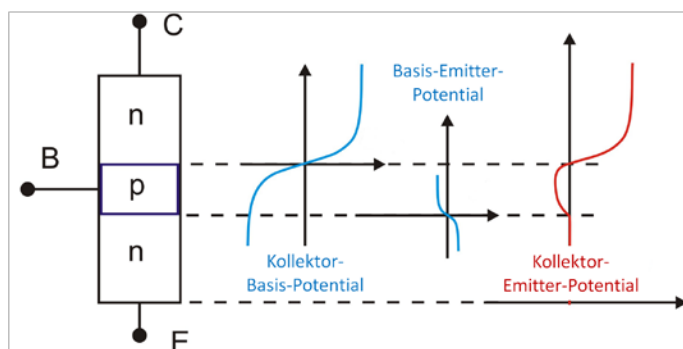
In der Emitterschaltung liegt E an Masse



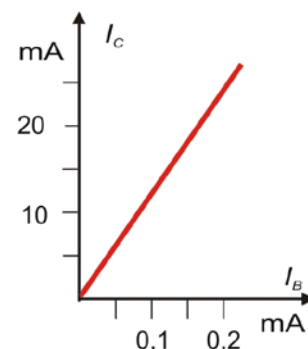
Elektronenstrom in der Emitterschaltung

In den Versuchen wird ein npn-Transistor in der **Emitterschaltung** benutzt. Ein wesentliches Merkmal dieser Schaltung ist: Ein kleiner Basisstrom  $I_B$  im Eingangskreis „bewirkt“ einen großen Kollektorstrom  $I_C$  im Ausgangskreis (Abb. 4c). Über einen weiten Bereich ist dabei der Kollektorstrom  $I_C$  nahezu proportional zum Basisstrom  $I_B$  (Abb. 2). Das Verhältnis  $I_C/I_B$  wird als **Stromverstärkung** bezeichnet – obwohl kein Strom „verstärkt“, sondern, wie eben beschrieben, ein Strom größerer Stromstärke ( $I_C$ ) von einem Strom mit einer kleineren Stromstärke ( $I_B$ ) *gesteuert* wird.

Abb. 5 zeigt, wie die pn-Übergänge im Transistor hintereinandergeschaltet sind. Der sog. **Transistoreffekt** ergibt sich, wenn die Basisschicht sehr dünn ist (Abb. 3; in der Größenordnung der Ausdehnung des an den Grenzflächen aufgebauten elektrischen Feldes, ca. 10  $\mu\text{m}$ ). Beschreiben und erklären Sie den Transistoreffekt anhand des Potenzialverlaufs durch die Grenzschichten nach Abb. 5.

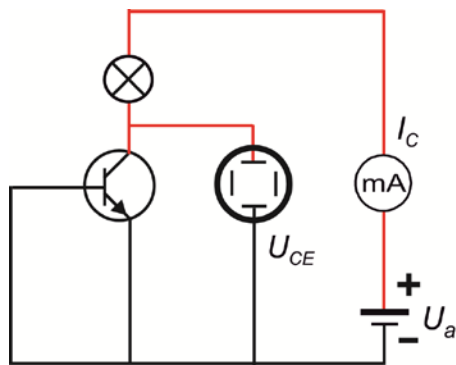
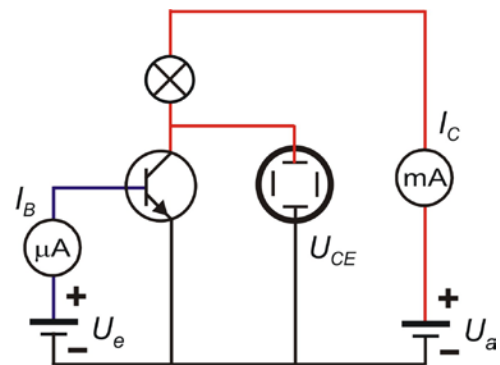


5 Grenzschichten Potenzialverläufe an den Bandkanten



Stromverstärkung:  $V_I = I_C/I_B \approx 100$

## 2.1 Erste Versuchsreihe: Der Transistor als Schalter

6 Wie groß ist hier  $U_{BE}$ ?7 Hier ist die Eingangsspannung  $U_e = 0,75$  V

(1) Schaltung nach Abb. 6:  $U_a = 12$  V. Wie groß ist  $U_{BE}$ ? Messen Sie nun  $I_C$  und  $U_{CE}$ :

- Die Stromstärke durch die Lampe ist ...
- Der Transistor verhält sich wie ein ..... Schalter, er sperrt.
- Die Spannung zwischen Masse und Kollektor beträgt .... V.
- Der Kollektor ist praktisch mit Massepotenzial verbunden/vom Massepotenzial getrennt.

(2) Schaltung nach Abb. 7:  $U_e = 0,75$  V. Messen Sie  $I_C$  und  $U_{CE}$ :

- Der Transistor leitet und verhält sich wie ein ..... Schalter.
- Das Potenzial des Kollektors sinkt auf .... V.
- Der Kollektor ist praktisch mit Massepotenzial verbunden/vom Massepotenzial getrennt.
- Der Kollektorstrom wird groß und vom Widerstand der Lampe begrenzt.
- Bei welchen Spannungswert  $U_e$  beginnt die Lampe zu Leuchten?

### Aufgaben:

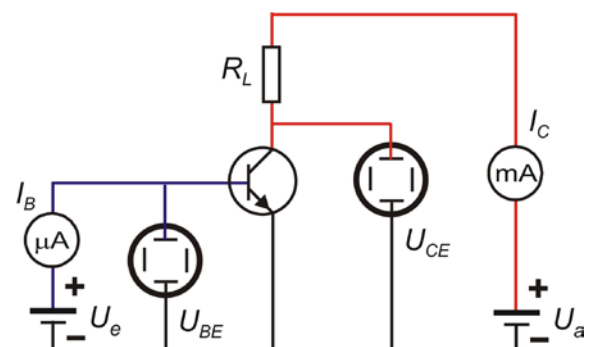
Geben Sie eine Erklärung der Versuchsergebnisse. Überlegen Sie sich dazu jeweils: Was ändert sich an den Grenzschichten C-B, B-E?

#### Ergebnis: Schalter-Funktion des Transistors in Emitterschaltung

- Hat die Basis Emitterpotenzial oder darunter, so sperrt der Transistor.
- Ist das Basispotenzial größer als das Emitterpotenzial, so leitet der Transistor.
- Ein hohes Basispotenzial erzeugt ein niedriges Kollektorpotenzial.

## 2.2 Zweite und dritte Versuchsreihe: Der Transistor als DC-Verstärker

Bei positivem Basispotenzial wird die C-E-Strecke leitend (Versuch 2.1). Nun sollen Steuerstrom  $I_B$  und Kollektorstrom  $I_C$  verglichen werden. Bauen Sie die Schaltung nach Abb. 8 auf (das Oszilloskop benötigen Sie erst im Versuch 2.3). Die Werte für  $I_B$ ,  $U_a$ , und  $R_L$  finden Sie am Arbeitsplatz. Sie messen den Kollektorstrom  $I_C$  als Funktion von  $I_B$ . Zur Spannungsversorgung verwenden Sie das graue Steuerpult mit den eingebauten Drehspulinstrumenten für  $I_B$  und  $I_C$ . An den Ausgangsbuchsen stehen die Spannungen  $U_{BE}$  und  $U_a$  zur Verfügung.

8 Ein kleiner Basisstrom  $I_B$  steuert den großen Kollektorstrom  $I_C$

Beim Transistor fließt bei der Durchlassspannung durch die B-E-Diode ein Strom von ca.  $200\ \mu\text{A}$  (bei normalen Dioden wären es etwa  $20\ \text{mA}$ ). Dafür steigt aber der Kollektorstrom jetzt auf ca.  $20\ \text{mA}$  an. Dieser **Transistoreffekt** (s. o.) beruht darauf, dass die Elektronen, die vom Emitter zur Basis strömen, in den Wirkungsbereich des positiven Kollektorpotenzials geraten und schnell abgesaugt werden können.

Auch Leistungen werden verstärkt:

Zum Ansteuern z. B. starker Motoren benötigt man einen Leistungsverstärker ( $P = U \cdot I$ ). Um die Leistungsverstärkung des DC-Verstärkers zu bestimmen, messen Sie  $U_{CE}$ ,  $U_{BE}$  und  $I_C$  für die angegebenen Werte von  $U_a$ ,  $R_L$ ,  $I_B$ . Jetzt setzen Sie das Oszilloskop ein (Abb. 8).

### Aufgaben:

- Graphische Darstellung  $I_C = I_C(I_B)$ . In welchem Bereich gilt ein linearer Zusammenhang  $I_C \sim I_B$ ?
- Wie groß ist in diesem linearen Bereich die **Stromverstärkung**  $V_I = I_C/I_B$ ?
- Wie groß sind die **Spannungsverstärkung**  $V_U = U_{R_L}/U_{BE} = (U_a - U_{CE})/U_{BE}$  und schließlich die **Leistungsverstärkung**  $V_P = V_I \cdot V_U$

### Ergebnis: DC-Strom- und Leistungs-„verstärkung“

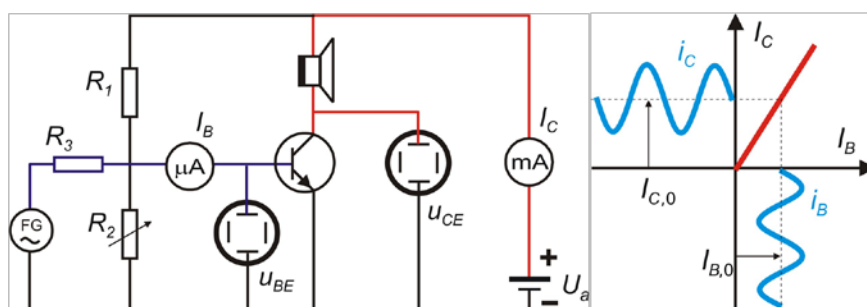
- $V_I$ : Ein kleiner Basisstrom  $I_B$  ( $\mu\text{A}$ -Bereich) steuert einen großen Kollektorstrom  $I_C$  ( $\text{mA}$ -Bereich).
- $V_P$ : Mit der kleinen Leistung  $U_{BE} \cdot I_B$  lässt sich die große Leistung  $U_{R_L} \cdot I_C$  steuern.

### 2.3 Vierte Versuchsreihe: Der Transistor als AC-Leistungsverstärker

Um die **Leistungsverstärkung** zu demonstrieren, haben die Erfinder des Transistors einen Lautsprecher verwendet. Wenn Sie den Lautsprecher direkt an den Funktionsgenerator anschließen, hören Sie nichts, wenn die Leistung des Generators nicht ausreicht, um den Lautsprecher zu betreiben. Die Schaltung nach Abb. 9 bringt Abhilfe (Parameterwerte für  $U_a$ ,  $u_e$ ,  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  am Arbeitsplatz).

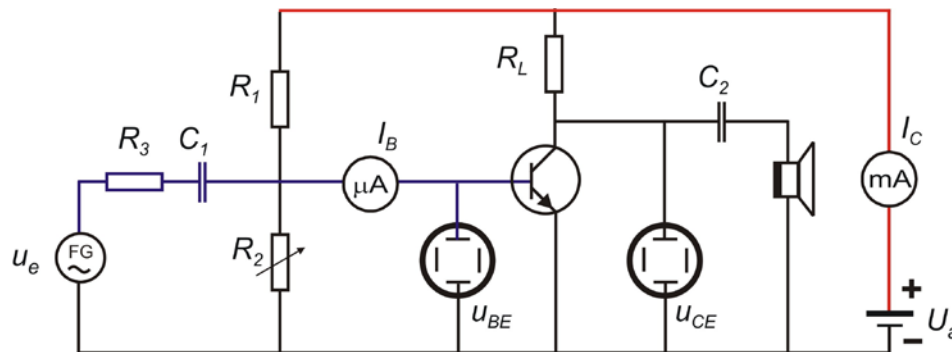
**Hinweis:** Verwenden bei diesem Versuchsteil nicht den  $I_B$ -Ausgang des grauen Steuerpults.

1. Stellen Sie die sinusförmige Eingangsspannung  $u_e$  (kleine Buchstaben benennen AC-Größen) auf den vorgegebenen Wert ein (mit dem Oszilloskop kontrollieren). Verändern Sie  $R_2$ . Wie ändert sich  $u_{CE}$ ?
2. **Arbeitspunkteinstellung:** Damit die Wechselströme  $i_c$  und  $i_B$  nicht abgeschnitten werden, muss man dem Eingangswechselstrom  $i_B$  einen Gleichstrom  $I_{B,0}$  überlagern, um den  $i_B$  ungestört oszillieren kann.  $I_{B,0}$  erzeugt einen mittleren Ausgangsstrom  $I_{C,0}$  um den herum dann auch der Wechselstrom  $i_c$  ungestört oszillieren kann (Abb. 9 rechts). Stellen Sie dazu  $R_2$  so ein, dass Sie einen möglichst sinusförmigen Verlauf von  $u_{CE}$  beobachten und bestimmen Sie  $I_{B,0}$  und  $I_{C,0}$ . Wie kommt es, dass der Spannungsteiler  $R_2/R_1$  die Stromstärke  $I_{B,0}$ , also den Arbeitspunkt, festlegt?
3. Zeichnen Sie qualitativ den Spannungsverlauf für  $u_e$ ,  $u_{BE}$ ,  $u_{CE}$ ?
4. Halten Sie jetzt  $R_2$  fest und vergrößern Sie die Eingangsspannung  $u_e$ . Bleibt  $u_{CE}$  sinusförmig?
5. Versuchen Sie, ein Ergebnis für diesen Versuch zu formulieren.



9 Ein AC-Leistungsverstärker; rechts: Ausgangs- und Eingangsstrom des Leistungsverstärkers

### 3 Verstärkerschaltung dimensionieren



10 Ein kompletter Transistor-Leistungsverstärker

Mit dem bisher Gelernten können Sie nun selbst eine Verstärkerschaltung berechnen und aufbauen.

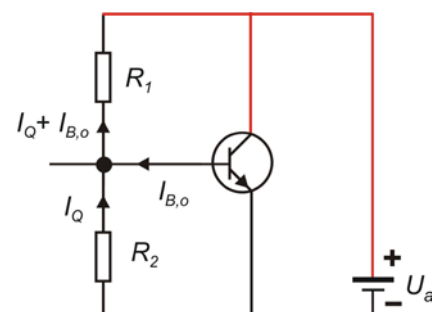
1. Am Arbeitsplatz sind vorgegeben:  $U_a$ ,  $R_L$ ,  $U_{CE,0}$ , und damit der Arbeitspunkt A.
2. Zeichnen Sie die entsprechende Arbeitsgerade und den Arbeitspunkt in das Vierquadrantenkennlinienfeld des Transistors (erhalten Sie vom Assistenten) ein.
3. Bestimmen Sie aus den Kennlinienfeldern die Ruhestromgrößen  $I_{B,0}$ ,  $U_{BE,0}$ ,  $I_{C,0}$ .
4. Berechnen Sie den Spannungsteiler nach Abb. 11.
5. Bauen Sie die Schaltung (zunächst ohne Wechselspannungsquelle  $u_e$ ) wie in Abb. 10 auf.
6. Messen Sie die Ruhestrome und Ruhespannungen.
7. Schalten Sie die Wechseleingangsspannung  $u_e$  hinzu. Stellen Sie die Amplitude so ein, dass das Ausgangssignal  $u_{CE}$  unverzerrt auf dem Oszilloskop erscheint. Messen Sie  $u_{BE}$  und  $u_{CE}$ .
8. Bestimmen Sie aus dem Kennlinienfeld die zugehörigen Werte für  $i_B$  und  $i_C$ .

#### Auswertung

- Vergleichen Sie die gemessenen Gleichstromwerte:  $I_{B,0}$ ,  $U_{BE,0}$ ,  $I_{C,0}$  und  $U_{CE,0}$  mit den konstruierten Werten im Vierquadrantenfeld.
- Vergleichen Sie die entsprechenden Wechselstromgrößen. Wie gut ist die Übereinstimmung?
- Bestimmen Sie die Verstärkungsfaktoren (2.2) analog hier für die Wechselstromgrößen.

#### Die Berechnung des Spannungsteilers ( $R_1$ und $R_2$ )

Die Arbeitsgerade macht es möglich, den Arbeitspunkt passend zu bestimmen. Für jeden vorgegebenen Arbeitspunkt können Sie die Werte für  $I_{B,0}$ ,  $I_{C,0}$  und  $U_{BE,0}$ ,  $U_{CE,0}$  eindeutig bestimmen – oder anders herum: Damit kann der Spannungsteiler  $R_1/R_2$ , der diesen Arbeitspunkt festlegt, genau dimensioniert werden. Dazu wählt man üblicherweise durch  $R_2$  einen Querstrom  $I_Q$ , der deutlich größer als  $I_{B,0}$  ist, typisch ist  $I_Q = 5 I_{B,0}$ . Dann bleibt auch bei kleineren Änderungen von  $i_B$  die Ansteuerung stabil.

11 Querstrom durch den Spannungsteiler  $R_1/R_2$ 

Durch  $R_1$  fließt ein Strom der Stärke  $I_{R1}$  mit  $I_{R1} = I_{B,0} + I_Q = 6 I_{B,0}$  und der Spannungsabfall an  $R_1$  beträgt:

$$U_{R1} = U_a - U_{BE,0}. \text{ Also können Sie berechnen: } R_1 = \frac{U_{R1}}{I_{R1}} = \frac{U_a - U_{BE,0}}{6 \cdot I_{B,0}} \text{ und } R_2 = \frac{U_{R2}}{I_{R2}} = \frac{U_{BE,0}}{5 \cdot I_{B,0}}.$$

**Frage:** Welchen Nachteil hätte ein zu großer/kleiner Querstrom?