

Labor Grundlagen der Elektrotechnik 2

Versuch 6: Emitterschaltung

Modul/Unit-Nr. TELG1003.3

Kurs-Nr. TEL0....GR....

Name der/s Studierenden:

-
- ☐ Laborausarbeitung in Ordnung.
- ☐ Laborausarbeitung ungenügend.

Betreuer:

Ort/Datum:

Unterschrift:

1.Fragen zur Einführung

- a) Welche zwei Grundtypen von Transistoren gibt es?
- b) Welche Schaltzeichen und Klemmenbezeichnungen gelten für beide Typen? Welche Ströme und Spannungen sind definiert worden (Bezeichnungen und Zählpfeile)?
- c) Welche Schaltbilder entstehen für beide Typen, wenn man jeden pn-Übergang durch eine Diode darstellt?
- d) Welche Eigenschaften des mittleren Teils, der Basis, kommen zu den Schaltungseigenschaften aus Frage c) hinzu, damit der Transistor seine Funktion als gesteuerte Stromquelle mit Stromverstärkung erhält?
- e) Womit beschreibt man die wichtigsten Eigenschaften eines Transistors, wenn man von seinem Frequenzverhalten absieht?

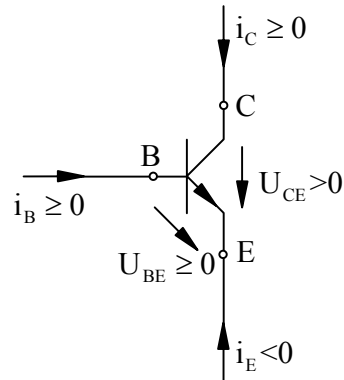
2. Vorbereitung

Der Transistor lässt sich als Schalter einsetzen und arbeitet dann in logischen Schaltungen, die die Schaltalgebra verwirklichen. Er übernimmt damit die Grundfunktion in der Digital- und Rechner-technik. Ein anderer wichtiger Verwendungszweck ist die formgetreue Verstärkung von elektrischen Signalen, die einer physikalischen Größe folgen ("analoge Signale") und ein lineares Übertragungsverhalten verlangen. Diese Verwendungsart soll in der Versuchsreihe "Grundsaltungen mit bipolaren Transistoren" behandelt werden; dabei kommen vorwiegend npn-Transistoren zum Einsatz.

2.1 Einige Bezeichnungen

- u, i Augenblickswert von Spannung und Strom mit beliebigem Zeitverhalten
- U, I Gleichwert von Spannung und Strom oder Effektivwert von periodischen Größen
- $\hat{u}, \hat{i}$ Maximalwerte, z.B. Amplituden sinusförmiger Signale
- u_{ss}, i_{ss} Scheitel-Scheitel-Werte: größter Auslenkungsbereich z.B. in der Umgebung eines Arbeitspunkts (Beispiel $u_{ss} = 2 \hat{u}$ bei einer sinusförmigen Wechselspannung)

2.2 Eigenschaften des npn-Transistors



Grenzwerte für den
Transistortyp BCY 59 :

$$i_C \leq 200\text{mA}$$

$$i_B \leq 50\text{mA}$$

$$u_{BE} < -7\text{ V}$$

$$u_{CE} < 45\text{V}$$

Bild1: npn-Transistor mit Spannungen und Strömen

Bild 1 zeigt das Schaltungssymbol eines npn-Transistors mit den auftretenden Strömen und Spannungen in der üblichen Pfeilungsart; sie sind bekanntlich durch einfache Gleichungen verknüpft:

$$i_C + i_B + i_E = 0$$

(1 a)

$$u_{CB} + u_{BE} = u_{CE}$$

(1 b)

Um die Zerstörung des Transistors zu vermeiden, dürfen Kollektorstrom und –spannung, sowie Basis-Emitter Sperrspannung und Basisstrom nicht über Grenzwerte ansteigen, die der Hersteller im Datenblatt angibt.

Die Zusammenhänge zwischen Strömen und Spannungen eines Transistors sind im Allgemeinen nicht linear, wie es unser Zweck verlangt, sondern müssen durch Kennlinien beschrieben werden, in denen man Bereiche möglichst linearen Verhaltens suchen muss. Die gebräuchlichen Kennlinien gehen vom Emitter E als Bezugsklemme aus, was wir in der ersten Grundsaltung, der „Emitterschaltung“, wieder finden werden. E ist der Verzweigungspunkt für den Eingangsstromkreis mit Signalquelle, Basis und Emitter und für den Ausgangsstromkreis mit Kollektor, Emitter und Belastung.

Bild 2 skizziert eine Messschaltung zur Aufnahme der Kennlinien:

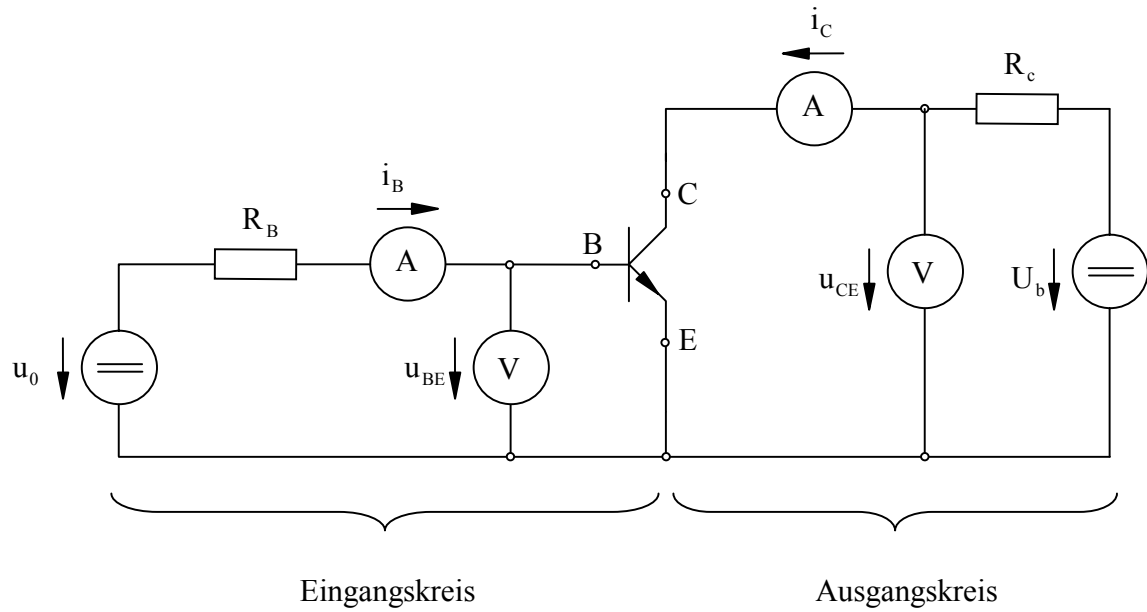


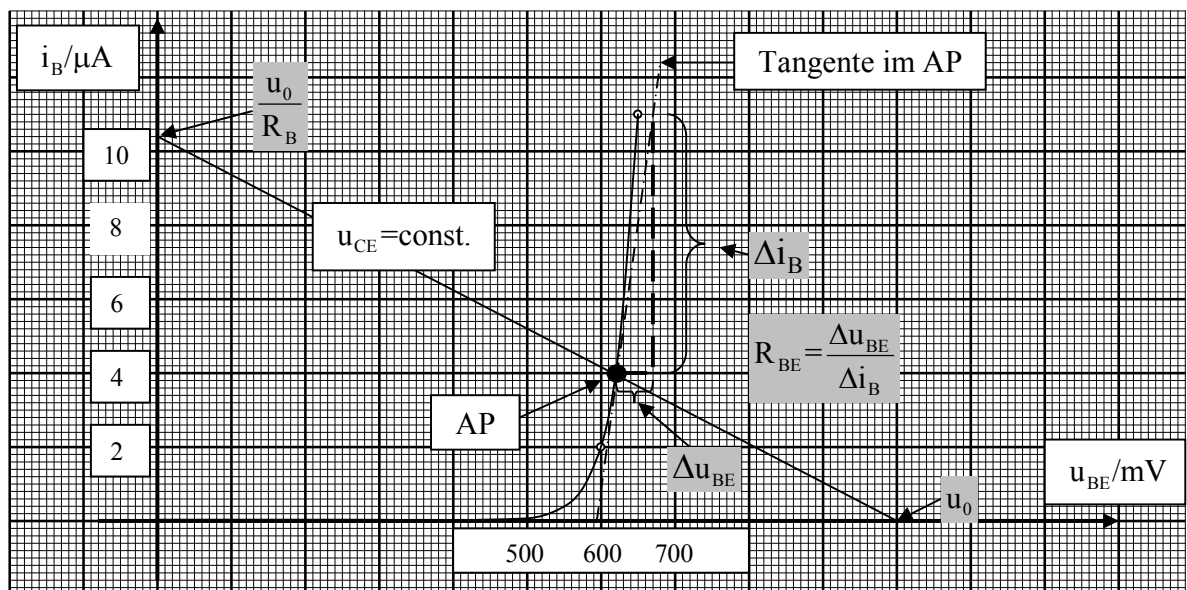
Bild 2

Eingangskennlinie:

Bild 3a zeigt ein Beispiel für das Schaubild zur Funktion

$$i_B = f(u_{BE})$$

(2a)



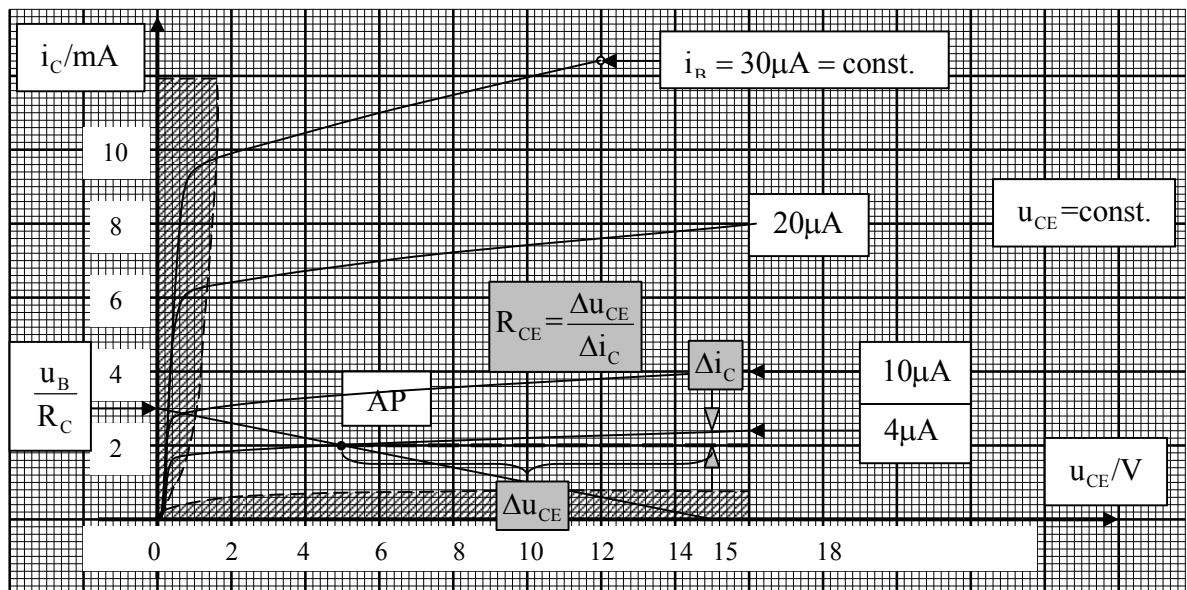


Bild 3b: Ausgangsennlinienfeld

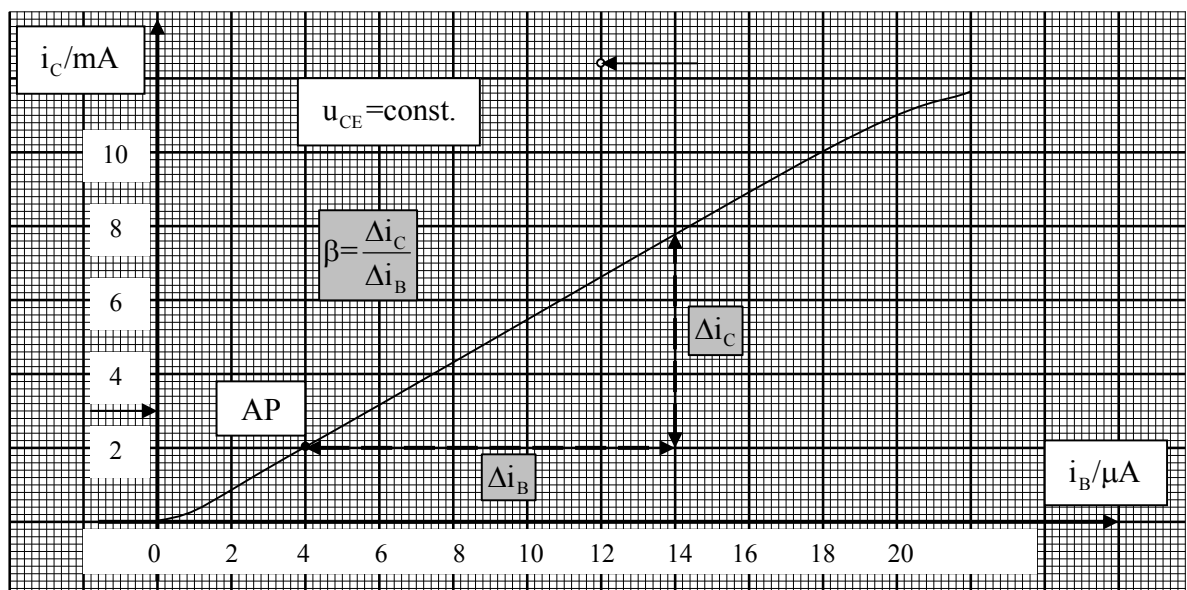


Bild 3c: Stromverstärkungskennlinie

mit dem konstant angenommenen Parameter u_{CE} , der mit wachsendem Betrag die Lage der Kennlinie nach rechts unwesentlich verschieben würde. Die Kurve entspricht der Kennlinie

einer Diode. Ausgehend von einem Arbeitspunkt AP ergeben die kleinen Änderungen Δi_B und Δu_{BE} den differentiellen Widerstand:

$$R_{BE} = \frac{\Delta u_{BE}}{\Delta i_B} \quad (2b)$$

Bild 3 b zeigt ein Beispiel für die Kurvenschar zur Funktion

$$i_C = f(u_{CE}) \quad (3a)$$

mit dem Parameter i_B , der mit wachsendem Betrag die Lage der Kennlinie wesentlich nach oben verschiebt und somit eine Steuerung des Kollektorstroms i_C ermöglicht.

Kleine

Änderungen im Arbeitspunkt AP ergeben den differentiellen Widerstand

$$R_{CE} = \frac{\Delta u_{CE}}{\Delta i_C} \quad (3b)$$

Stromverstärkungskennlinie:

Bild 3c zeigt ein Beispiel für das Schaubild zur Funktion

$$i_C = f(i_B) \quad (4a)$$

mit u_{CE} als Parameter, der mit wachsendem Betrag die Steigung der Kurve aus dem Ursprung heraus unwesentlich vergrößert. Kleine Änderungen im Arbeitspunkt AP ergeben die differentielle Stromverstärkung

$$\beta = \frac{\Delta i_C}{\Delta i_B} \quad (4b)$$

Diese Kennlinie beschreibt die Kopplung von Eingangs- und Ausgangskreis.

(Bemerkung: Die Gleichstromverstärkung $B = \frac{I_C}{I_B}$ ist mit guter Näherung gleich $\beta = di_C/di_B$)

Aus den Kennlinien (2a), (3a) und (4a) lassen sich weitere Kennlinien ableiten, die hier nicht behandelt werden.

Die folgenden Transistoreigenschaften sind den Kennlinien zu entnehmen:

- a) Kollektorstrom i_C und Basisstrom i_B sind nahezu proportional zueinander; das vergleichsweise große i_C ist durch das kleine i_B steuerbar.
- b) Der Zusammenhang zwischen Basisstrom i_B und Basis-Emitterspannung u_{BE} ist stark nichtlinear und von u_{CE} (fast) abhängig. Eine Mindestspannung $u_{BE} \approx 0,6V$ ist erforderlich, um den Transistor zu betreiben.
- c) Für $u_{CE} > 0,5V$ ist der Kollektorstrom von der Kollektor-Emitterspannung u_{CE} nahezu unabhängig.
Die Eigenschaften a) und c) verleihen dem Transistor Charakter einer gesteuerten Stromquelle.

Aufgabe 1:

In den Bildern 3a, b, c teilen strichpunktierte Linien die Bildfläche in Bereiche ein.
Was für Bereiche sind dies?
Was passiert in ihnen physikalisch?
Ergänzen Sie die Bilder durch die Bezeichnung der Bereiche.

Aufgabe 2:

- a) Welchen Widerstand R_{BE} lesen Sie aus Bild 3a ab?
- b) Welchen Widerstand R_{CE} lesen Sie aus Bild 3b ab?
- c) Welche Stromverstärkung β lesen Sie aus Bild 3c ab?

In den Bildern 3a,b sind zusätzlich die Arbeitsgeraden eingezeichnet, die - unabhängig vom Kennlinienfeld - den Einfluss der äußeren Beschaltung beschreiben, i_B und u_{BE} sind nach Bild 2 festgelegt durch die Beziehung

$$u_0 = R_B \cdot i_B + u_{BE}$$
$$\text{oder } i_B = - \frac{u_{BE}}{R_B} + \frac{u_0}{R_B} \quad (5)$$

Das Schaubild zu Gleichung (5) ist die genannte Arbeitsgerade, deren Verlauf deutlicher wird, wenn man Leerlaufspannung und Kurzschlussstrom betrachtet. Ihr Schnittpunkt mit der Kennlinie (3a), $i_B = f(u_{BE})$ ergibt den Arbeitspunkt AP.

Entsprechend gilt für den Ausgangskreis in Bild 2:

$$u_{CE} + i_C \cdot R_C = U_b$$

oder

$$i_C = - \frac{u_{CE}}{R_C} + \frac{U_b}{R_C} \quad (6)$$

Der Schnittpunkt mit der zum Strom i_B aus Gleichung (5) gehörigen Kennlinie (2b), $i_C = f (u_{CE})$ ergibt den Arbeitspunkt AP.

Aufgabe 3

- a) Im Ausgangskreis eines Transistors nach Bild 2 seien eine Batteriespannung $U_b = 7,5V$ und die Parallelschaltung zweier $4,7k\Omega$ -Widerstände, also $R_C = 2,35 k\Omega$ wirksam. Welcher Arbeitspunkt stellt sich ein, wenn $i_C = 2 mA$ sein soll? Welcher Basisstrom i_B fließt, wenn man das Kennlinienfeld nach Bild 3b zugrunde legt?
- b) Derselbe Transistor erhalte im Eingangskreis seinen Basisstrom i_B (vgl. Teil a) direkt aus der Spannungsversorgung $u_0 = U_b = 7,5V$. Wie groß muss R_B gewählt werden?

Für ein lineares Übertragungsverhalten liegt der Arbeitspunkt AP eines Transistors selbstverständlich im linearen Kennliniengebiet. Die zu verarbeitenden Signale steuern den Transistor in der Umgebung von AP aus. Jede Beschaltung muss also auf zwei Aufgaben hin untersucht werden:

- 1) Einstellen des Arbeitspunkts
- 2) Übertragungsverhalten für Signale.

Bei der zweiten Aufgabe bietet sich an, den linearen Kennlinienanteil herausgelöst mit AP als Ursprung zu betrachten. Ebenso ist es möglich, analytisch die Umgebung von AP durch die Ableitung von der Kennlinie in AP zu beschreiben.

Beispiele:

$$u = u(i);$$
$$R \, du/di \text{ in AP}$$
$$u_2 = u_2 (u_1);$$
$$\text{Spannungsverstärkung } v_u = du_2 / du_1 \text{ in AP}$$

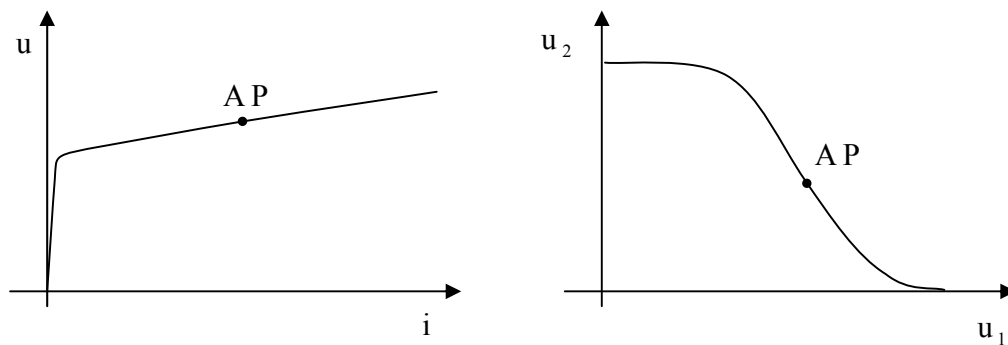


Bild 4

Bemerkung:

Der Abschnitt 2.2 bietet eine vorwiegend qualitative Beschreibung der Transistoreigenschaften als Vorbereitung zum Laborversuch. Demgegenüber gibt es die Möglichkeit, das Transistorverhalten in seinem linearen Bereich detailliert quantitativ zu beschreiben mit Ersatzschaltbildern oder Vierpolkenngrößen (h-Parameter). Beides ist hier nicht vorausgesetzt.

2.3 Transistor in Emitterschaltung

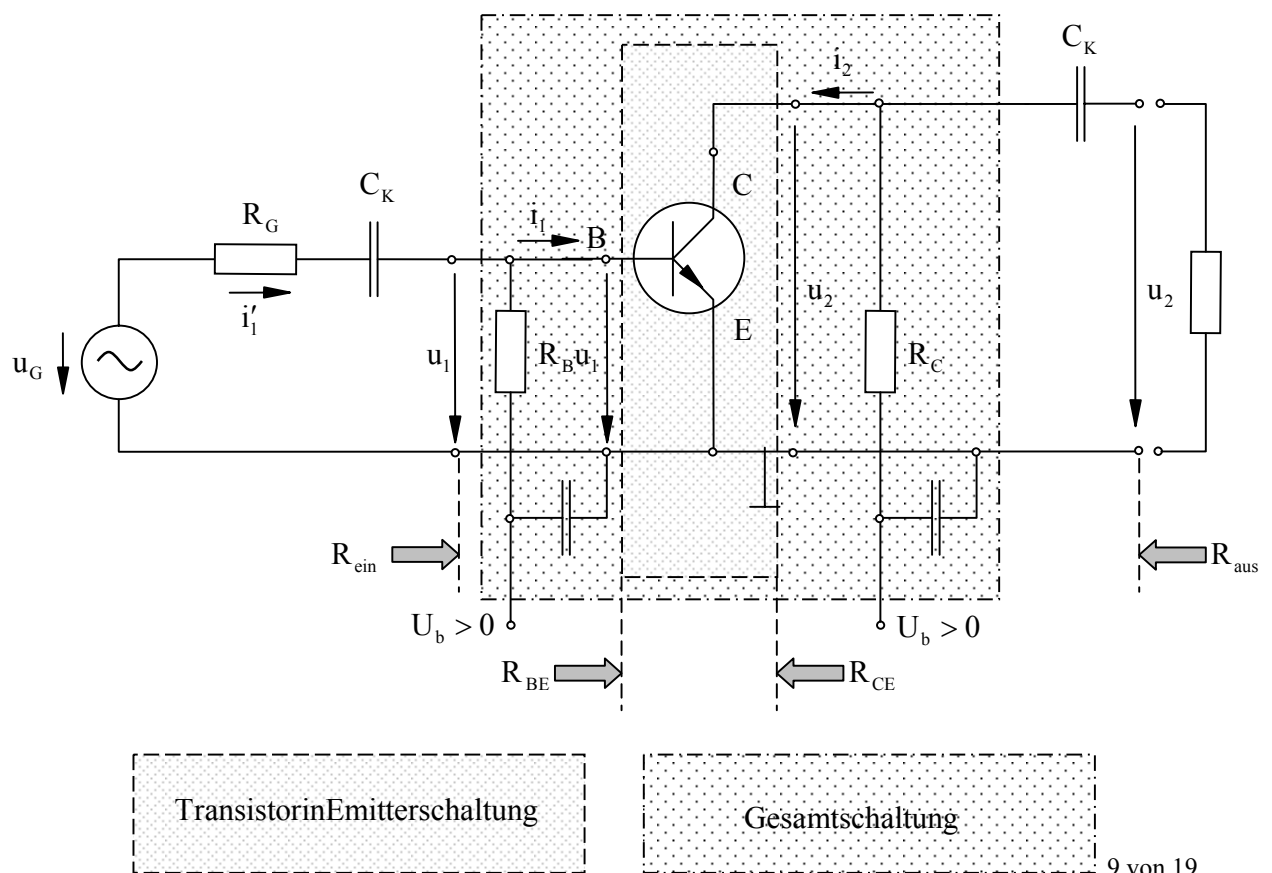


Bild 4a

Emitterschaltung heißt, dass der Emitterzweig der Transistorschaltung am Bezugspotential ansetzt und dem Eingangs- und Ausgangskreis gemeinsam angehört. Bild 4a zeigt die einfachste Beschaltung.

R_B und R_C legen die Arbeitsgeraden und somit die Arbeitspunkte fest (vgl. Bilder 3a,b).

Alle Kondensatoren stellen einen Kurzschluss für die Wechsignale $u_G(t)$ dar und dienen der Trennung von Bereichen mit unterschiedlichem Gleichpotential. Für Wechsignale sind die Klemmen U_b mit dem Bezugspotential belegt, auch wenn die zugehörigen Kondensatoren C_K nicht in der Schaltung sichtbar eingesetzt sind.

Ein Transistor in Emitterschaltung hat Kennwerte der folgende Größenordnung:

Eingangswiderstand	$R_{BE} \approx 5k\Omega$
Ausgangswiderstand R	$R_{CE} \approx 50k\Omega$
Stromverstärkung	$\beta \approx 300 \dots 500$

Dabei ist R_{BE} stark abhängig vom Arbeitspunkt; eine theoretische Betrachtung ergibt (vgl. Vorlesung Elektronik):

$$R_{BE} = \frac{U_T}{I_B} \quad (7)$$

$u_T = 26 \text{ mV}$ (Temperaturspannung bei $\vartheta = 25^\circ \text{ C}$)

i_B = Basisstrom im Arbeitspunkt

R_C nimmt den größten Einfluss auf die Spannungsverstärkung v_U : Ein von i_1 gesteuerter Strom

$i_2 > 0$ bewirkt ein Kollektorpotential

$$u_2 = U_b - i_2 \cdot R_C = U_b - \beta \cdot i_1 \cdot R_C$$

oder mit $R_{BE} = u_1/i_1$

$$u_2 = U_b - \beta \cdot R_C \cdot u_1/R_{BE}$$

Damit gilt:

$$v_U = \frac{du_2}{du_1} = -\beta \cdot \frac{R_C}{R_{BE}}$$

R_C bestimmt aber nicht allein das Widerstandsniveau im Ausgangskreis. In Bild 4a liegen vielmehr für Wechselsignale der Widerstand R_{CE} und der Lastwiderstand R_L parallel zu R_C und bilden zusammen den Widerstand im Ausgangskreis R_A mit

$$\frac{1}{R_A} = \frac{1}{R_C} + \frac{1}{R_{CE}} + \frac{1}{R_L}$$

oder $R_A = \frac{R_C \cdot R_{CE} \cdot R_L}{R_{CE} R_L + R_C R_L + R_C R_{CE}}$ (8)

Somit gilt für die Spannungsverstärkung v_U

$$v_U = \frac{du_2}{du_1} = -\beta \cdot \frac{R_A}{R_{BE}} \quad (9a)$$

mit R_A aus Gl. (8).

Mit Gl.(7) lässt sich auch schreiben:

$$v_U = -\beta \cdot \frac{I_B R_A}{U_T} = -\frac{I_C R_A}{U_T} \quad (9b)$$

I_C ist der Kollektorstrom im Arbeitspunkt; dies zeigt, dass der Arbeitspunkt die Spannungsverstärkung mitbestimmt.

Der Ausgangswiderstand R_{aus} (und gleichzeitige Innenwiderstand für die Last R_L) beträgt nach Bild 4a:

$$R_{aus} = \frac{R_{CE} \cdot R_C}{R_{CE} + R_C} \quad (10)$$

Ähnlich dem Ausgangskreis tritt parallel zum Eingang des Transistors der Basisvorwiderstand R_B . Somit gilt für den Eingangswiderstand der Schaltung:

$$R_{ein} = \frac{R_{BE} \cdot R_B}{R_{BE} + R_B} = \frac{U_T \cdot R_B}{R_B \cdot I_B + U_T} \quad (11)$$

$U_T = 26 \text{ mV}$

I_B = Basisstrom im Arbeitspunkt

Bemerkung:

Häufig sind die Schaltungsmaßnahmen zur Einstellung des Arbeitspunktes umfangreicher.

Entsprechend erweitert sich ihr Einfluss auf den Eingangswiderstand.

Die Wahl des Arbeitspunktes legt auch die Grenzen für eine lineare Aussteuerung fest:

Ein Ausgangspotential $> U_b$ ist nicht möglich; ebenso darf auf der Arbeitsgeraden der lineare Bereich in Richtung Übersteuerungsbereich nicht überschritten werden.

Bild 4b zeigt eine häufige Variante der Emitterschaltung: Zum einen wird der Arbeitspunkt durch einen Spannungsteiler vor der Basis eingestellt. Wichtiger ist aber der zusätzliche Widerstand im Emittierzweig, R_E .

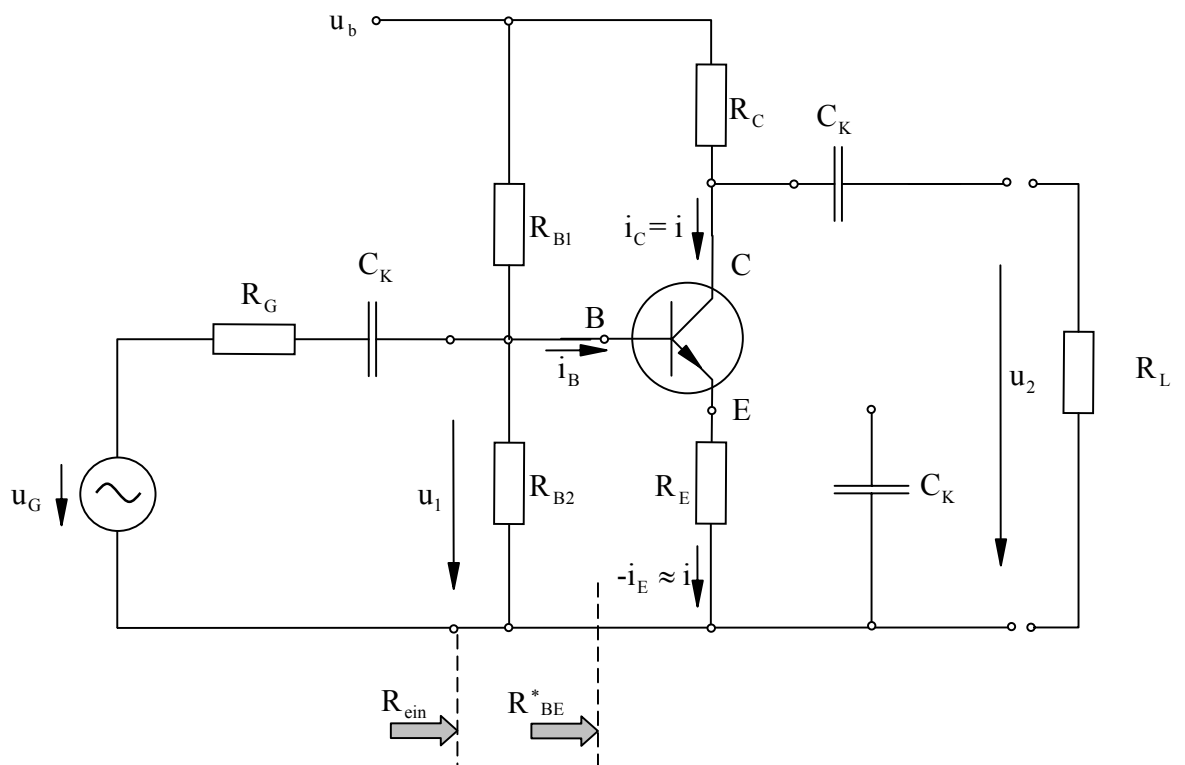


Bild 4b

Er stabilisiert den Arbeitspunkt. Ist dies allein erwünscht, lässt sich seine Wirkung auf Wechsignale durch die Parallelschaltung eines großen Kondensators C_K vermeiden.

Ohne C_K beeinflusst R_E die Schaltungseigenschaften.

(vgl. Vorl. Elektronik "Stromgegenkopplung")

Beim idealisierten Transistor fließt im Kollektor- und Emitterzweig ein Strom gleicher Größe i :

$$\begin{aligned} i_C &= \beta \cdot i_B = i \\ -i_E &= i_C + i_B = (\beta + 1) i_B \approx i_C \text{ für } \beta \gg 1 \\ -i_E &= i \text{ für } \beta \rightarrow \infty \end{aligned}$$

Ohne Lastwiderstand R_L ist dann der Spannungsfall

Im Kollektorzweig: $R_C \cdot i$

Im Emitterzweig: $R_E \cdot i$

Da, wiederum idealisiert, der Emitter der Basis im konstanten Potentialabstand u_{BE} folgt, gilt für die kleinen Änderungen der Wechsignale:

$$\begin{aligned} u_E &= u_1 = R_E \cdot i \\ \text{und} \\ u_C &= u_2 = -R_C \cdot i \end{aligned}$$

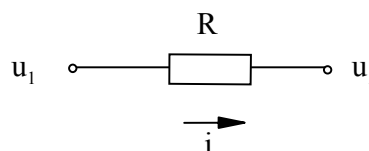
$$\text{und damit: } v_U = \frac{u_2}{u_1} = -\frac{R_C}{R_E} \quad (12)$$

R_E legt somit zusammen mit R_C die Spannungsverstärkung v_U dieser Emitterstufe fest. v_U ist jetzt von den Transistoreigenschaften unabhängig.

2.4. Bemerkungen zur Messtechnik

2.4.1 Zur Strommessung:

Ein Amperemeter muss man in der Regel (Ausnahme: "Stromzangen") in den stromführenden Zweig einschalten. Dies ist bei elektronischen Schaltungen häufig unerwünscht oder gar unmöglich. Daher begnügt man sich meist mit Spannungsmessung am bekannten Widerstand R :



$$i = (u_1 - u_2) / R \quad (13)$$

2.4.2 Zur Messung des Eingangswiderstands:

Da sich Transistorschaltungen bei Gleich- und Wechselströmen ungleich verhalten, lassen sich Ein- und Ausgangswiderstand elektronischer Schaltungen nicht einfach mit dem Ohmmeter erfassen. Statt dessen kann man die folgende Schaltung benutzen:

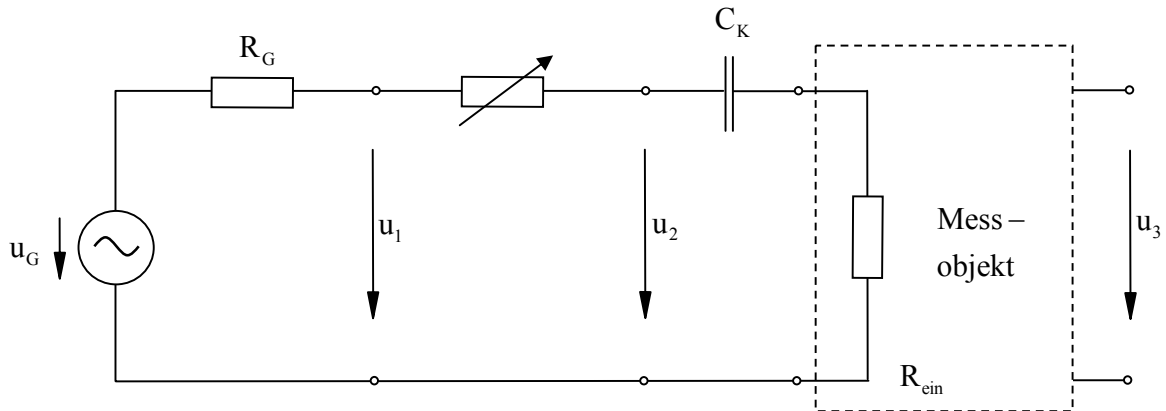


Bild 5

Ein Wechselspannungsgenerator speist über einen bekannten Vorwiderstand R_v und einen dämpfungsfreien Koppelkondensator C_K das Messobjekt; die Spannungen u_1 und u_2 werden gemessen. Dann gilt:

$$\frac{u_2}{u_1} = \frac{R_{\text{ein}}}{R_v + R_{\text{ein}}} \quad (\text{Spannungsteiler})$$

oder nach einfacher Umrechnung:

$$R_{\text{ein}} = \frac{u_2}{u_1 - u_2} R_v \quad (14a)$$

Bei veränderlichem R_v lässt sich einstellen: $u_2 = \frac{u_1}{2}$

Dann gilt statt (14a)

$$R_{\text{ein}} = R_v \quad \text{für} \quad u_2 = \frac{u_1}{2} \quad (14b)$$

Im Fall der Emitterstufe ist es sinnvoll, statt u_2 die Ausgangsspannung u_3 zu beobachten. Dabei gelten folgende Beziehungen:

- 1) Für $R_v = 0$: $u_3 = u_{30}$
- 2) Für $R_v = R_{\text{ein}}$: $u_3 = u_{30} / 2$

Voraussetzung: $R_G \ll R_{\text{ein}}$

2.4.3 Zur Messung des Ausgangswiderstands

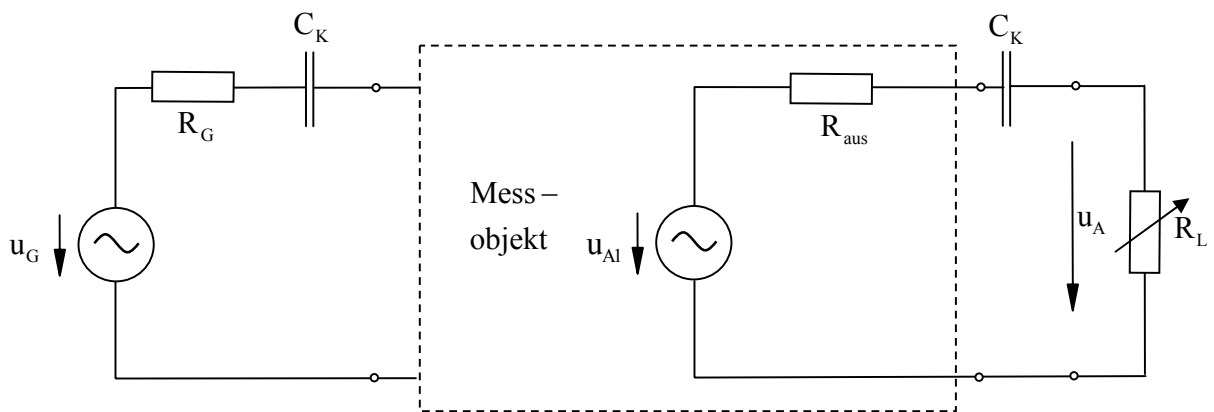


Bild 6

Entsprechend 2.4.2 kann gemäß Bild 6 der Ausgangswiderstand über die Messung der Ausgangsspannung bestimmt werden.

- 1) $R_L = \infty$: $u_A = u_{A1}$
- 2) $R_L \neq \infty$: $u_A = u_{A2}$

mit $\frac{u_{A2}}{u_{A1}} = \frac{R_L}{R_{\text{aus}} + R_L}$ (Spannungsteiler)

oder nach einfacher Umrechnung

$$R_{\text{aus}} = R_L \frac{u_{A1} - u_{A2}}{u_{A2}} \quad (15a)$$

Bei veränderlichem R_L lässt sich der Sonderfall einstellen: $u_{A2} = \frac{u_{A1}}{2}$.

Dann gilt statt (15a):

$$R_{\text{aus}} = R_L \text{ für } u_{A2} = u_{A1} / 2 \quad (15b)$$

Vor allem bei der Messung nach (15b) besteht die Gefahr, das Messobjekt zu sehr zu belasten, d.h. durch zu großen Ausgangsstrom zu zerstören, Dann ist es notwendig, das Messobjekt am Ausgang zu speisen und den Widerstand wie in Teil 2.4.2 zu bestimmen (vgl. Bild 7).

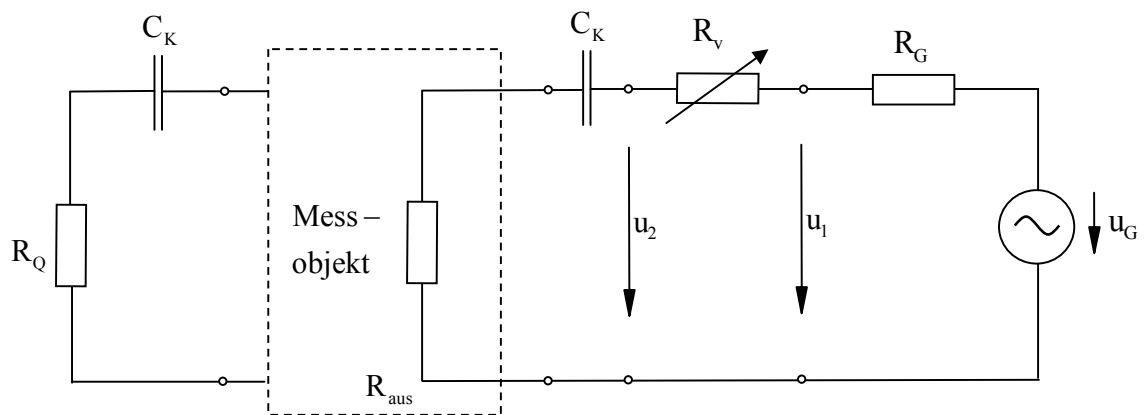


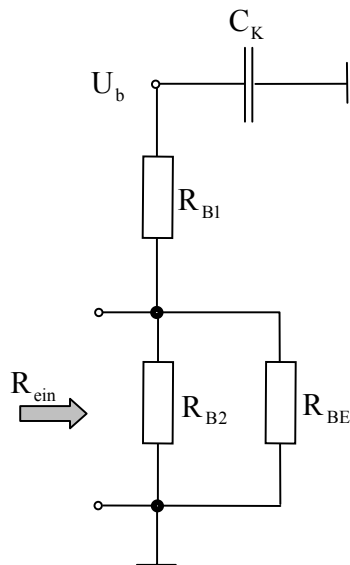
Bild 7

Dies ist möglich, solange die Transistorschaltung in ihrem Arbeitspunkt betrieben wird. Für R_{aus} ergibt sich:

$$R_{\text{aus}} = \frac{u_2}{u_1 - u_2} R_v$$

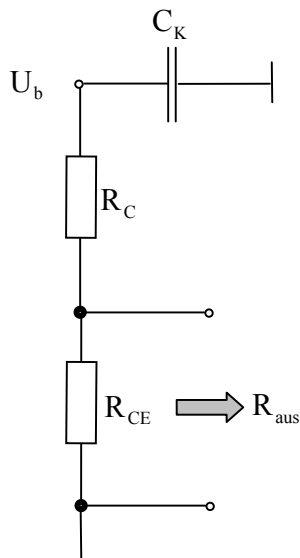
R_v darf nur so klein gewählt werden, dass das Signal an der Basis seine Sinusform noch beibehält. (Dies ist der Fall, wenn $\hat{u} < U_{BE}$, d.h. $< 0,6V$ ist.)

Aufgabe 4:



Bei einem Wechselsignal, das durch die Kapazität C_K mit guter Näherung kurzgeschlossen ist, wird in nebenstehender Schaltung ein Gesamtwiderstand R_{ein} gemessen.

Wie groß ist R_{BE} , wenn R_{B1} und R_{B2} bekannt sind?



Beim gleichen Wechselsignal wird in ebenstehender Schaltung ein Gesamtwiderstand R_{aus} gemessen. Wie groß ist R_{CE} , wenn R_C bekannt ist?

3. Messaufgaben und Auswertung

Emitterstufe mit Basisvorwiderstand ohne Emitterwiderstand

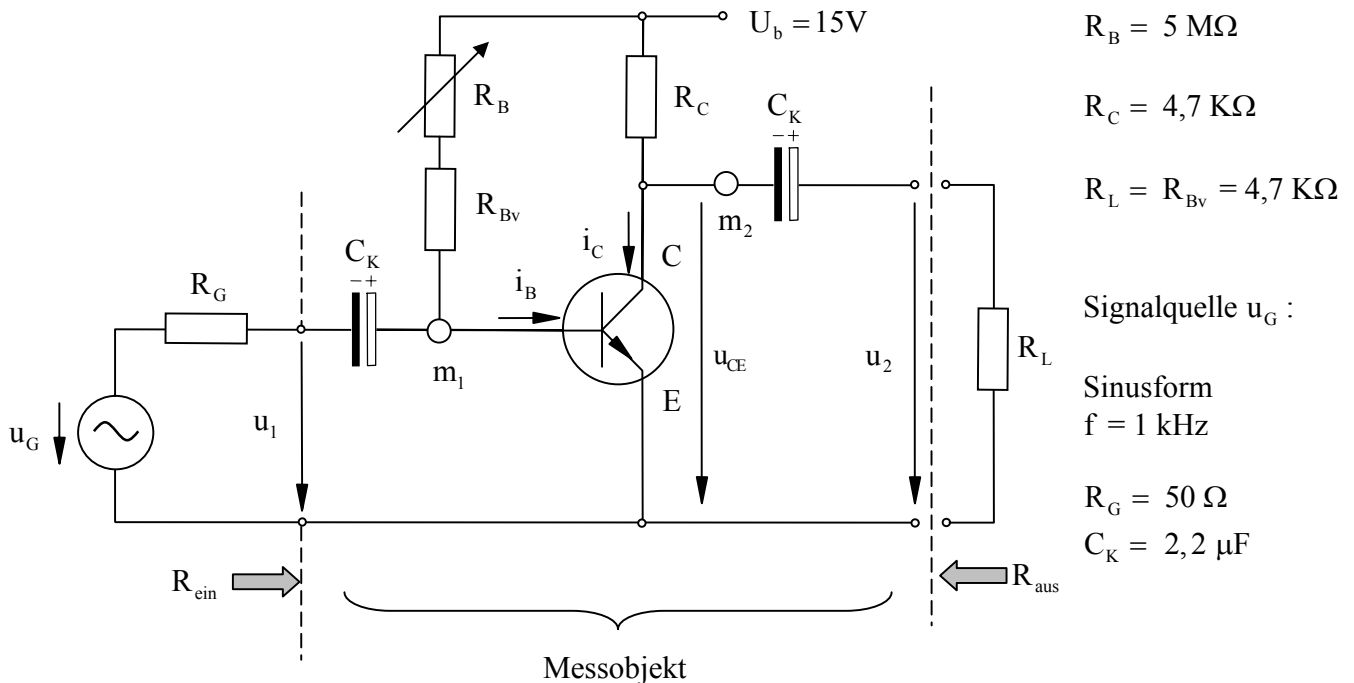


Bild 8

3.1 Bauen Sie das Messobjekt nach dem Schaltbild in Bild 8 noch ohne R_L auf, Messen Sie zuvor die genauen Werte von R_C und R_L

3.2 Stellen Sie mit Hilfe von R_B den Arbeitspunkt $u_{CE} = 5V$ ein (Messpunkt m_2),

Wie groß ist dann $i_C = I_C$?

3.3 Messen Sie das Basispotential (Messpunkt m_1) und, bei einem kurzen Abschalten und Herausnehmen von R_B - den Ohmwert von R_B .

Wie groß ist I_B ?

Wie groß ist die Stromverstärkung $\beta \approx B = \frac{I_C}{I_B}$?

Wie groß ist $R_{BE} = \frac{U_T}{I_B}$ zu erwarten? ($U_T = 26\text{mV}$)

- 3.4 Schließen Sie die Signalquelle an: Sinusförmiges Signal, $f = 1\text{ kHz}$.
Beobachten Sie die Signale u_1 und u_2 am Oszillographen.

Bei welchem Scheitel-Scheitelwert u_{2ssg} der Ausgangsspannung bleibt die Sinusform des Signals gerade noch erhalten?

Welche Halbwelle wird zuerst verformt; wie erklären Sie sich dies (Ausgangskennlinienfeld mit Arbeitsgerade)?

Halten Sie fest: Aussteuerbarkeit = u_{2ssg}

- 3.5 Wählen Sie $u_{2ss} < u_{2ssg}$

Wie groß ist die Spannungsverstärkung $v_U = \frac{u_2}{u_1}$

(Überschlägige Messung am Oszillographen, genauere Messung mit dem AC-Millivoltmeter).

Verändern Sie mit R_B den Arbeitspunkt: Was ändert sich an v_U ? Warum?

Schalten Sie den Lastwiderstand R_L hinzu: Was ändert sich an v_U ? Warum?

- 3.6 Messen Sie den Eingangswiderstand R_{ein} nach Teil 2.4.2, Bild 5.

Als R_v dient die Widerstandsdekade,

Wie groß ist R_{BE} ? Vergleichen Sie den Wert mit den Abschätzungen nach Aufgabe 2a und Messung 3.3.

- 3.7 Messen Sie den Ausgangswiderstand R_{aus} nach Teil 2.4.3 Bild 6. Als R_L dient die Widerstandsdekade.

Wie groß ist R_{CE} ?

- 3.8 Verändern Sie die Messfrequenz. Was ist an u_2 zu beobachten?

Bei welcher Frequenz ist u_2 auf das 0,7-fache des Maximalwerts abgesunken?