



Elektrotechnisches Grundlagenpraktikum

Kleinsignalverhalten bipolarer Transistoren

von

Dr.-Ing. A. Teltschik

Inhaltsverzeichnis

1	Lernziele	3
2	Literatur	3
3	Geräte	3
4	Theoretische Grundlagen	4
4.1	Statische Kennlinien und Kenngrößen des Bipolartransistors.....	5
4.1.1	Gleichstromverstärkung	5
4.2	Arbeitspunkt und Arbeitsgerade	6
4.3	Emitterschaltung als Kleinsignalverstärker für Wechselspannungen	8
4.3.1	Kleinsignalparameter, Vierpoldarstellung und Spannungsverstärkung.....	8
4.4	Emitterschaltung mit Stromgegenkopplung	13
4.5	Kollektorschaltung.....	16
5	Durchführung des Versuchs	19
5.1	Aufgabe 1: Emitterschaltung ohne Stromgegenkopplung	19
5.1.1	Aufgabe 1a: Kenngrößen, Arbeitspunkt und Arbeitsgerade.....	19
5.1.2	Aufgabe 1b: Eingangswiderstand der Emitterschaltung	24
5.1.3	Aufgabe 1c: Temperaturverhalten der Emitterschaltung.....	25
5.2	Aufgabe 2: Emitterschaltung mit Stromgegenkopplung	25
5.2.1	Aufgabe 2a: Spannungsverstärkung bei Stromgegenkopplung.....	25
5.2.2	Aufgabe 2b: Temperaturverhalten bei Stromgegenkopplung.....	27
5.3	Aufgabe 3: Kollektorschaltung.....	28
5.3.1	Aufgabe 3a: Bestimmung der Ausgangskennlinie	28
5.3.2	Aufgabe 3b: Temperaturverhalten der Kollektorschaltung	29
	ETGP - Versuchsfeedback	31
	Anhang A Datenblatt BC546	33

5 Durchführung des Versuchs

Hinweis: Verwenden Sie für alle Aufbauten ausschließlich die **kurzen grünen Kabel** für die Verbindung der **Transistor Basis zu den Basisvorwiderständen**. Durch die sehr kleinen Basisströme (wenige μA) minimieren Sie damit Störeinflüsse durch lange Kabel.



5.1 Aufgabe 1: Emitterschaltung ohne Stromgegenkopplung

5.1.1 Aufgabe 1a: Kenngrößen, Arbeitspunkt und Arbeitsgerade

Im Anhang finden Sie das Datenblatt des in diesem Versuch eingesetzten Transistortyps **BC546B**. Welche minimale und maximale Gleichstromverstärkung B garantiert der Hersteller für das Bauteil? Welche maximale Kollektor-Emitter-Spannung dürfen Sie anlegen?

Antwort:

$B_{min} = \underline{200}$	$B_{max} = \underline{450}$
aus späterer Berechnung (Seite 20): $B_{berechnet} = \underline{352}$	

Wie hoch ist der maximale Kollektorstrom $I_{C_{max}}$, den der Transistor führen darf?

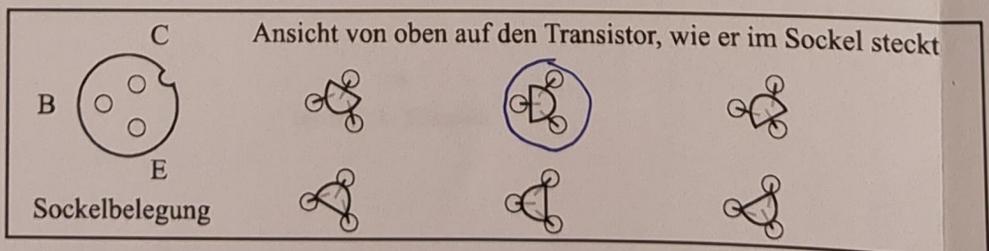
Wie groß muss dann der Kollektorwiderstand R_C mindestens dimensioniert werden, damit der Transistor für $U_{CE_{max}}$ nicht zerstört wird? Bestimmen Sie zusätzlich $R_{C_{min}}$ für $U_0 = 5\text{V}$ und $U_0 = 10\text{V}$.

Antwort:

$I_{C_{max}} = \underline{100\text{mA}}$	$U_0 = U_{CE_{max}}$	$U_0 = 5\text{V}$	$U_0 = 10\text{V}$
$U_{CE_{max}} = \underline{65\text{V}}$	$R_{C_{min}} \quad \underline{650\Omega}$	$\underline{50\Omega}$	$\underline{100\Omega}$

Im Datenblatt finden Sie ebenfalls Angaben zur Anschlussbelegung des Transistors. Bestimmen Sie die richtige Position, wie der Transistor in den Sockel der Versuchsbox zu stecken ist. Überprüfen Sie die Einbauposition des Transistors in der Versuchsbox auf ihre Richtigkeit.

Antwort:



5. Kapitel: Durchführung des Versuchs

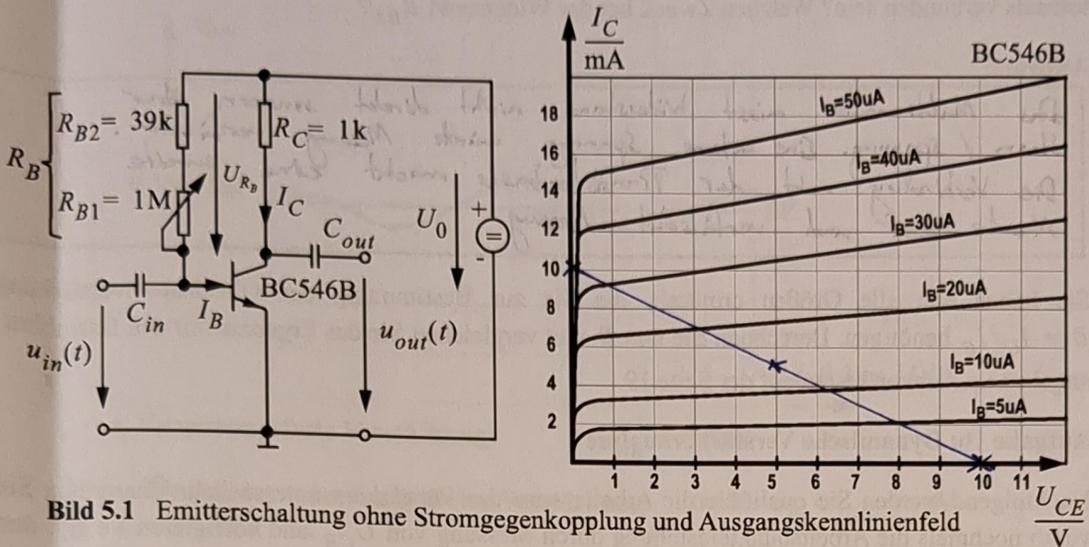


Bild 5.1 Emitterschaltung ohne Stromgegenkopplung und Ausgangskennlinienfeld

Bild 5.1 zeigt einen Spannungsverstärker in Emitterschaltung. Zeichnen Sie für $U_0 = 10V$ die Arbeitsgerade in das Ausgangskennlinienfeld und bestimmen Sie den optimalen Arbeitspunkt. Geben Sie den Bereich an, in welchem der Basisstrom laut Ausgangskennlinienfeld für den Arbeitspunkt liegen sollte.

Antwort:

$I_{C_{AP}} = \underline{50 \mu A}$	Aus Kennlinienfeld: $\underline{10} < I_{B_{AP}} < \underline{20}$
$U_{CE_{AP}} = \underline{5V}$	aus Messung: $I_{B_{AP}} = \frac{U_0 - U_{BE_{AP}}}{R_B} \Big _{AP} = \underline{14,2 \mu A}$
$U_{BE_{AP}} = \underline{0,66}$	

Bauen Sie nun die Schaltung nach Bild 5.1 auf. Es sei $U_0 = 10V$. Stellen Sie Ihren ermittelten Arbeitspunkt durch Variation von R_{B1} ein, indem Sie mit dem Multimeter die Kollektor-Emitter-Spannung $U_{CE_{AP}}$ ausmessen.

Messen Sie dann $U_{BE_{AP}}$ mit dem Multimeter und bestimmen Sie anschließend $I_{B_{AP}}$, indem Sie mit dem Multimeter R_B in stromlosem Zustand ausmessen.

Hinweis:

Zur Bestimmung von R_B mittels Ohmmeter (Ohmmessbereich des Multimeters) muss die Schaltung spannungsfrei sein und R_B darf nicht mit der Transistorbasis verbunden sein!

Vergleichen Sie Ihre Messung mit Ihrer Abschätzung aus dem Ausgangskennlinienfeld.

5.1 Aufgabe 1: Emitterschaltung ohne Stromgegenkopplung

Warum muss bei der Vermessung von R_B dieser spannungsfrei sein und darf nicht mit der Transistorbasis verbunden sein? Welchen Zweck hat der Widerstand R_{B2} ?

Antwort:

Das Multimeter misst Widerstand nicht direkt sondern über Strom / Spannung. Eine externe Spannung würde Messung verfälschen. Die Verbindung mit der Transistorbasis macht eine zweite Messung an und verfälscht Messung.

Sie haben nun alle Größen ermittelt, die Sie zur Bestimmung der Gleichstromverstärkung $B = I_C / I_B$ benötigen. Berechnen Sie nun B und vergleichen Sie das Ergebnis mit den Datenblattangaben im Antwortkasten auf der Seite 19.

Aufgabe 1b: Dynamische Verstärkeranalyse

Nachfolgend werden Sie qualitativ die Arbeitsweise des Verstärkers untersuchen. Überprüfen Sie vorab nochmals die Arbeitspunkteinstellung durch Messung von U_{CE} und korrigieren sie ggf. den Arbeitspunkt nach. Es sei weiterhin $U_0 = 10V$.

Stellen Sie den Funktionsgenerator auf seine Werkseinstellungen zurück (s. Geräteanleitung).

Speisen Sie nun in die Schaltung nach Bild 5.1 eine sinusförmige Eingangsspannung der Frequenz $f = 1kHz$ aus dem Funktionsgenerator als $u_{in}(t)$ ein. Untersuchen Sie, in welchem Bereich die Amplitude \hat{u}_{in} der Eingangsspannung liegen muss, damit die Ausgangsspannung $u_{out}(t)$ ein möglichst unverzerrtes, verstärktes Abbild der Eingangsspannung ist. Oszillografieren Sie dazu die Ausgangsspannung $u_{out}(t)$ (CH2) sowie die Eingangsspannung $u_{in}(t)$ (CH1) im Zweikanalbetrieb des Oszilloskops mit DC Signal-Coupling.

Hinweise:

Beginnen Sie bei der kleinstmöglichen Amplitude, die der Funktionsgenerator liefern kann. Dazu müssen Sie $-20dB$ Dämpfung über das Tastenfeld (SHIFT gefolgt von der Ziffer 8) und weitere $-20dB$ Dämpfung durch Ziehen des Amplitudenreglers aktivieren. Ist die $-20dB$ Dämpfung über das Tastenfeld aktiviert, so erscheint im Display $-20dB$ über der Frequenzanzeige. Da die Eingangsspannung sehr klein und verrauscht ist, empfiehlt es sich auf die Ausgangsspannung (CH2) zu triggern und den Filter LF-on im Trigger Filter Menü zu aktivieren. Mit Bandwidth 20MHz im VERT XY Menü lässt sich das Signalrauschen etwas eindämmen.

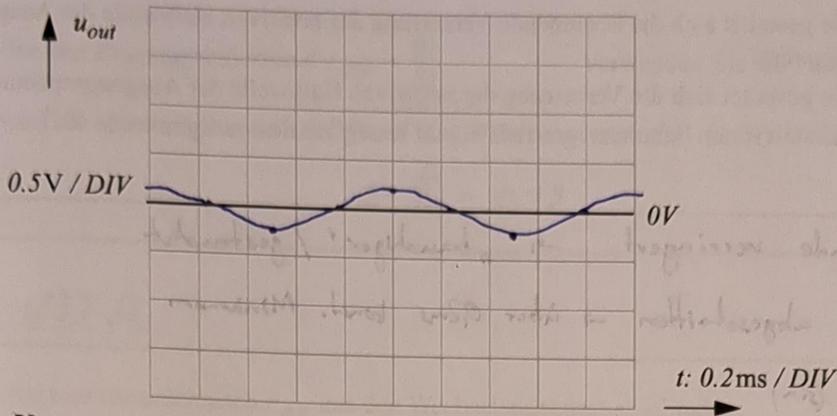
Wenn Sie die Versuchsbox einschalten finden noch Ausgleichsvorgänge am Ausgangskondensator C_{out} statt. Sie erkennen dies daran, dass das Oszillogramm der Ausgangsspannung langsam entlang der Y-Achse wandert. Um dies zu beschleunigen müssen Sie C_{out} entladen, indem Sie dessen Ausgang kurz mit Masse (GND) verbinden.

Beachten Sie die Skalierung und die 0V (GND) Position der Skizzen.

Erstellen Sie Skizzen der Ausgangsspannung für die drei auf der nachfolgenden Seite abgebildeten Fälle.

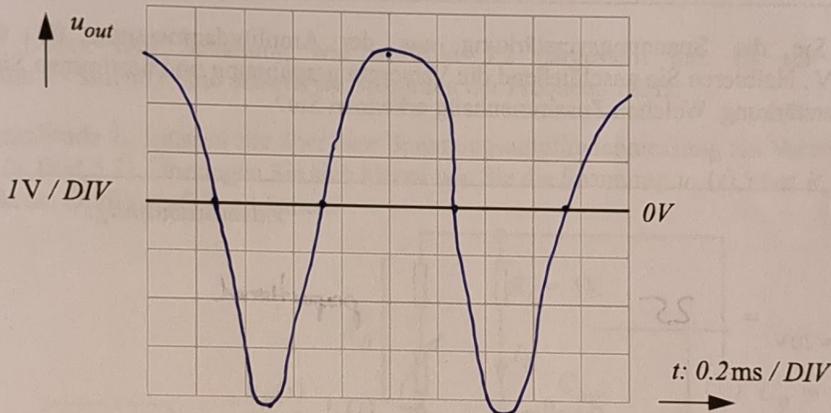
5. Kapitel: Durchführung des Versuchs

Skizzen:

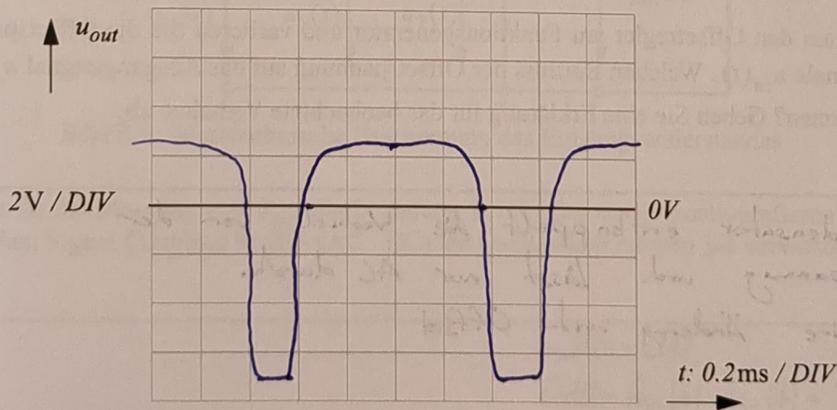


a. Verzerrungsfreie Verstärkung: $\hat{u}_{in} = 7.5\text{mV}$

Bereich der verzerrungsfreien Verstärkung: $0\text{mV} < \hat{u}_{in} < \text{---} \text{mV}$



b. Beginnende Verzerrung der positiven Halbwelle: $\hat{u}_{in} \approx 20\text{mV}$



c. Positive und negative Halbwelle stark verzerrt: $\hat{u}_{in} \approx 100\text{mV}$

Fragen:

1. Wie gestaltet sich die beginnende Verzerrung der positiven Halbwelle der Ausgangsspannung?
2. Wie gestaltet sich die Verzerrung der negativen Halbwelle der Ausgangsspannung?
3. Was fällt Ihnen beim unverzerrten Signal bezüglich dessen Symmetrie auf?

Antwort:

1. Amplitude verringert \rightarrow „bauchiger“ / gestaucht
2. Quasi abgeschnitten \rightarrow über 0,2ms konst. Minimum
3. sym. (sin)

Berechnen Sie die Spannungsverstärkung aus der Amplitudenmessung für den 1. Fall $\hat{u}_{in} = 7.5\text{mV}$. Halbieren Sie anschließend die Versorgungsspannung und bestimmen Sie erneut die Spannungsverstärkung. Welchen Zusammenhang erkennen Sie?

Antwort:

$$v_u|_{U_0 = 10\text{V}} = \underline{\quad 25 \quad}$$

$$v_u|_{U_0 = 5\text{V}} = \underline{\quad 12 \quad}$$

Zusammenhang:

proportional

Ziehen Sie nun den Offsetregler am Funktionsgenerator und variieren Sie die Offsetspannung des Eingangssignals $u_{in}(t)$. Welchen Einfluss der Offsetspannung auf das Ausgangssignal $u_{out}(t)$ können Sie erkennen? Geben Sie eine Erklärung für das beobachtete Verhalten ab.

Antwort:

Der Kondensator entkoppelt die Wechsel von der Gleichspannung und lässt nur AC durch.
 \rightarrow keine Änderung mit Offset

5. Kapitel: Durchführung des Versuchs

5.1.2 Aufgabe 1b: Eingangswiderstand der Emitterschaltung

Berechnen Sie den Eingangswiderstand $r_{BE} = \left. \frac{\beta}{S} \right|_{U_{CE} = \text{konst.}}$. Verwenden Sie als Näherung für β ihr berechnetes **B** aus Aufgabe 1a und für S die Näherung nach Gl. (4.10) auf Seite 10 für $\vartheta = 25^\circ\text{C}$.

$$S = \frac{I_C}{U_T} = 0,19$$

Antwort:

$$r_{BE} \approx 1833 \Omega$$

Bestimmen Sie nun messtechnisch r_{BE} aus den Wechselspannungsamplituden:

$$r_{BE} = \left. \frac{\hat{u}_{BE}}{\hat{i}_B} \right|_{U_{CE} = \text{konst.}} \quad \text{Gl. (5.1)}$$

Bauen Sie hierzu ihre Schaltung wie in Bild 5.2 dargestellt um. Es sei $U_0 = 10\text{V}$, $u_{in}(t) = 40\text{mV} \cdot \sin(\omega t)$ eine **offsetfreie** Spannung der Frequenz 1 kHz.

Die Stromamplitude \hat{i}_B müssen Sie über eine Spannungsamplitudenmessung am Vorwiderstand R_v bestimmen (s. Bild 5.2). Überlegen Sie sich hierzu wie Sie die Spannung $u_R(t)$ über R_v im Zweikanalbetrieb direkt Oszillografieren können.

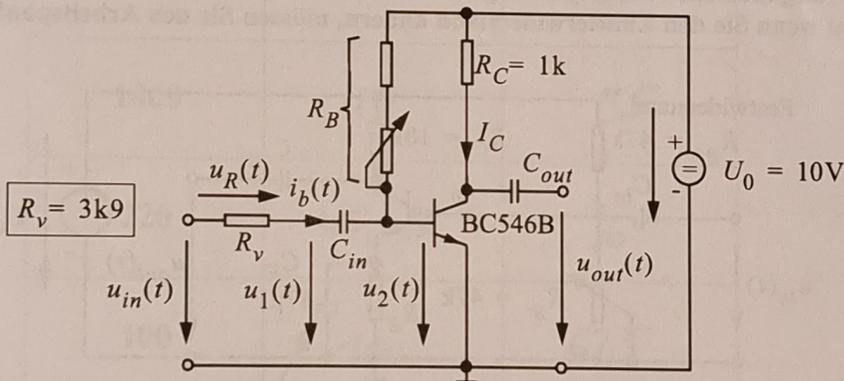


Bild 5.2 Messtechnische Bestimmung des Eingangswiderstandes

Müssen Sie für die Messung von \hat{u}_{BE} die Spannung $u_1(t)$ oder $u_2(t)$ oszillografieren oder ist dies egal? Welchen Signal Coupling Modus (AC / DC) am Oszilloskop müssen Sie verwenden? *egal*

Antwort:

$$r_{BE} = \frac{\hat{u}_{BE}}{\hat{i}_B} = \frac{14\text{mV}}{7\mu\text{A}} = 2\text{k}\Omega$$

$u_1(t) = u_2(t)$
 $\hat{u}_{BE} = \hat{u}_{in}(t) - \hat{u}_1(t) = 26\text{mV}$

5.1.3 Aufgabe 1c: Temperaturverhalten der Emitterschaltung

Verwenden Sie weiterhin die Schaltung nach Bild 5.2. Stellen Sie bei $U_0 = 10V$ nochmals den optimalen Arbeitspunkt ein und speisen Sie die Schaltung unverändert mit einer sinusförmigen Eingangsspannung der Frequenz 1kHz. Die Amplitude betrage weiterhin 40mV. Oszillografieren Sie $u_{CE}(t)$ im DC-Coupling Modus.

Kühlen Sie nun den Transistor mit dem bereitstehenden Kühl spray ab. Anschließend erwärmen Sie den Transistor mit dem bereitliegenden Föhn.

In welche Richtung verschiebt sich der Arbeitspunkt (U_{CE}) bei Temperaturveränderung?

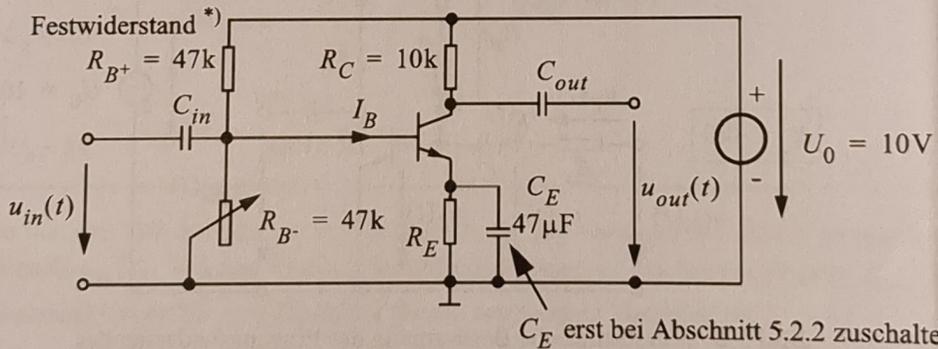
Antwort:

Temp ↑ : U_{CE} ↓ und auslesen

5.2 Aufgabe 2: Emitterschaltung mit Stromgegenkopplung

Für alle Aufgabenteile von Aufgabe 2 gilt:

Jedesmal wenn Sie den Emittterwiderstand ändern, müssen Sie den Arbeitspunkt neu einstellen!



*) 47k NICHT mit dem 1MΩ Poti einstellen sondern der Festwiderstand verwenden!

Bild 5.3 Emitterschaltung mit Stromgegenkopplung

5.2.1 Aufgabe 2a: Spannungsverstärkung bei Stromgegenkopplung

Bild 5.3 zeigt den Spannungsverstärker in Emitterschaltung mit Stromgegenkopplung. In diesem Versuch bestimmen Sie messtechnisch die Verstärkung der Emitterschaltung für unterschiedliche R_E , ohne kapazitive Überbrückung. Gehen Sie dabei wie folgt vor:

5. Kapitel: Durchführung des Versuchs

1. Auswahl von R_E und Aufbau der Schaltung **ohne** C_E und $u_{in}(t)$.
2. Einstellung des optimalen Arbeitspunktes mit R_B und dem Voltmeter.
Welche Spannung müssen Sie messen?
3. Einspeisung eines sinusförmigen Eingangssignals mit $\hat{u}_{in} = 20\text{mV}$ und $f = 1\text{kHz}$
4. Vermessung von \hat{u}_{out} mit dem Oszilloskop und Bestimmung der Verstärkung $|v_u|$.
5. Entfernen von $u_{in}(t)$... Neubeginn bei 1.

Hinweise:

! R_B ist ein sogenanntes 10-Gänge Potentiometer. Der Widerstandswert des Potis deckt den Bereich zwischen 470Ω ... $47\text{k}\Omega$ ab und wird über 10 Umdrehungen à 360° eingestellt, was ein präziseres Einstellen ermöglicht als dies bei einem herkömmlichen Poti mit einem nur 270° umfassenden Drehbereich gegeben ist.

Je kleiner der Emitterwiderstand wird, um so schwieriger gestaltet sich die Arbeitspunkteinstellung. Es genügt, wenn Sie in diesen Fällen U_{CE} auf $\pm 0.1\text{V}$ einstellen

R_E [Ω]	$ v_u \approx R_C/R_E$ $\approx 10\text{k}/R_E$	$ v_u = \frac{\hat{u}_{out}}{\hat{u}_{in}}$
2200	4,54	4,5
1000	10	9,5
220	45,45	36
100	100	62,5

Warum stimmt die Lösung $|v_u| \approx R_C/R_E$ für größere Werte von R_E besser als für kleinere?

Antwort:

Eigentlich $A = \frac{S \cdot R_C}{1 + S \cdot R_E} \approx \frac{R_C}{R_E} \rightarrow$ für große Widerstände verliert $1 + \dots$ an Einfluss

5.2.2 Aufgabe 2b: Temperaturverhalten bei Stromgegenkopplung

Prüfen Sie die Temperaturempfindlichkeit der Stromgegenkopplung nach Bild 5.3 auf Seite 25 ohne kapazitive Überbrückung von R_E für die beiden Widerstände $R_E = 1000\Omega$ und $R_E = 100\Omega$.

Stellen Sie auch hier zuerst (grob) den Arbeitspunkt ein, bevor Sie ein sinusförmiges Eingangssignal mit $\hat{u}_{in} = 20\text{mV}$ und $f = 1\text{kHz}$ einspeisen.

Oszillografieren Sie die Kollektorspannung U_C direkt am Kollektor des Transistor (also nicht $u_{out}(t)$) im DC-Coupling Modus und beobachten Sie die Signaldrift bei Temperaturänderung durch das Kühlspray und den Fön.

Für welchen Emitterwiderstand ist die Temperaturabhängigkeit am geringsten? Warum?

Antwort: DC

	Kalt	3,8V	→ kleine Amplitude	Temp ↑ = U_{BE} ↑ : I_C ↑
100Ω	Heiß	0,8V	→ Ampl > 1V	U_{BE} ↓
	Kalt	7V	→ kleine Amplitude	
1000Ω	Heiß	5V	→ — " —	U_{BE} ↓

Welche Eigenschaft des Spannungsverstärkers verschlechtert sich durch die verbesserte Temperaturstabilität?

Antwort:

Verlustleistung, reduzierte Verstärkung

Überbrücken Sie nun R_E mit $C_E = 47\mu\text{F}$ und wiederholen Sie den Versuch mit $\hat{u}_{in} = 10\text{mV}$.

Wie groß ist nun die Spannungsverstärkung $|v_u| = \frac{\hat{u}_{out}}{\hat{u}_{in}}$ in beiden Fällen? Erklären Sie den Unterschied zur Schaltung ohne C_E .

Antwort:

$$|v_u| = \frac{\hat{u}_{out}}{\hat{u}_{in}} \Big|_{R_E = 100\Omega} = \underline{200} \qquad |v_u| = \frac{\hat{u}_{out}}{\hat{u}_{in}} \Big|_{R_E = 1\text{k}\Omega} = \underline{180}$$

Erklärung:

AC-Anteil fällt nicht über R_E ab.

5.3 Aufgabe 3: Kollektorschaltung

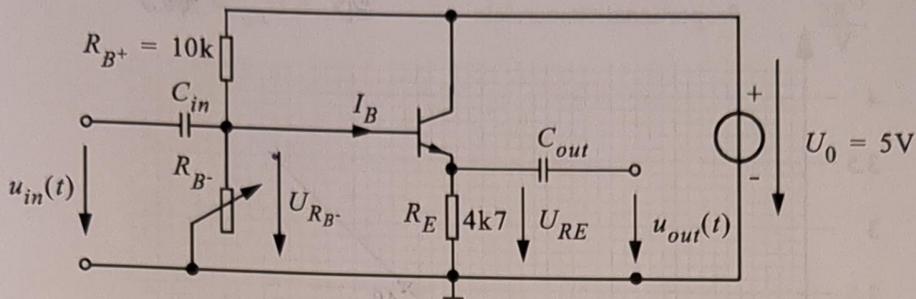


Bild 5.4 Kollektorschaltung

5.3.1 Aufgabe 3a: Bestimmung der Ausgangskennlinie

Betreiben Sie die Schaltung nach Bild 5.4 **ohne Eingangswechselfspannung** $u_{in}(t)$. Es sei $U_0 = 5V$. Zeichnen Sie die Übertragungskennlinie $U_{RE} = f(U_{RB^-})$ für $0V \leq U_{RB^-} \leq 4V$ in das Diagramm auf Seite 29. Variieren Sie hierzu mit R_{B^-} die Spannung U_{RB^-} von 0.3V an und messen Sie mit dem Multimeter die Gleichspannungen U_{RB^-} und U_{RE} . Um U_{RB^-} gut einstellen zu können, ist es zweckmäßig folgende Widerstandskombinationen für R_{B^-} zu verwenden:

$0.3V < U_{RB^-} \leq 0.85V$	$0.85V < U_{RB^-} \leq 4V$
$R_{B^-} = 47k \parallel 2k2$	$R_{B^-} = 47k$

Wählen Sie im Knickbereich ausreichend Messpunkte, um den Verlauf richtig darzustellen.

Tragen Sie anschließend den Proportionalitätsbereich und den optimalen Arbeitspunkt in das Diagramm ein und stellen Sie die Schaltung auf diesen Arbeitspunkt ein.

Speisen Sie nun in die Schaltung ein Sinussignal $u_{in}(t)$ der Frequenz 1 kHz ein und variieren Sie die Amplitude. (-20dB Dämpfungen am Funktionsgenerator abschalten).

Bestimmen Sie mit dem Oszilloskop, welche maximale Eingangsamplitude \hat{u}_{in} Ihr Eingangssignal haben darf, damit Sie ein verzerrungsfreies Ausgangssignal bekommen?



Dies gelingt am besten, wenn Sie $u_{in}(t)$ und $u_{out}(t)$ im AC-Coupling Modus mit identischer Eingangsverstärkung erfassen und überdeckend auf dem Oszilloskop darstellen.

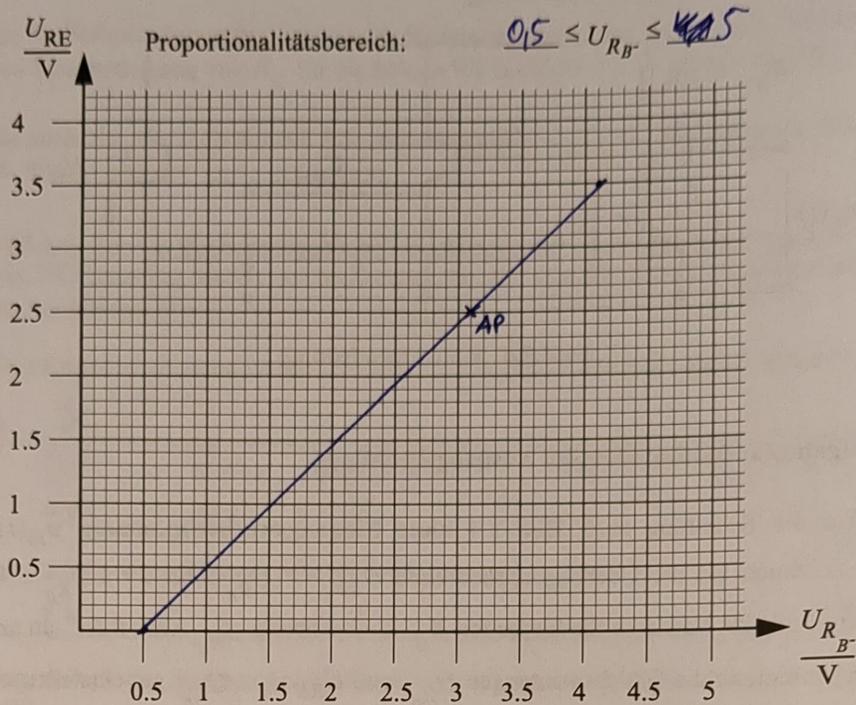


Bild 5.5 Übertragungskennlinie der Kollektorschaltung

Welche der Ausgangs-Halbwellen (Positive oder Negative) wird zuerst verzerrt? Warum?

Antwort:

$\hat{u}_{in_{max}} \approx 2,5V$ Erst untere Halbwellen,

Wenn $\hat{u}_{in_{max}} > U_{AP} = 2,5 \rightarrow$ untere Halbwellen wird null
"schlägt auf"

5.3.2 Aufgabe 3b: Temperaturverhalten der Kollektorschaltung

Untersuchen Sie das Temperaturverhalten der Kollektorschaltung, in dem Sie die Transistortemperatur mit dem bereitstehenden Kühspray und dem Fön verändern.

Welchen Einfluss hat eine Temperaturänderung auf den Arbeitspunkt / das Ausgangssignal? Warum?

Antwort:

K: U_{BE} fällt von $2,5V$ auf $2,35V$ (DC offset nach unten)
 H: U_{BE} steigt auf $2,6V \Rightarrow$ kann Temperaturabhängig