

Labor Grundlagen der Elektrotechnik 2

Versuch 8:

Teilschaltungen des Operationsverstärkers

Modul/Unit-Nr. TELG2002.2

Kurs-Nr. TEL.....GR.....

Name der/s Studierenden:

- ☐ Laborausarbeitung in Ordnung.
- ☐ Laborausarbeitung ungenügend.

Betreuer:

Ort/Datum:

Unterschrift:

1.Fragen zur Einführung

1.1 Wie lässt sich der Basis-Emitter-Widerstand R_{BE} eines Transistors bestimmen?

Wie ist der Kollektor-Emitter-Widerstand R_{CE} eines Transistors definiert?

Welche Größenordnungen haben R_{BE} , R_{CE} und Stromverstärkung β ?

1.2 Wie lässt sich die Spannungsverstärkung einer Emitterstufe ohne Widerstand R_E im Emitterkreis berechnen? Was ändert sich, wenn R_E eingefügt wird?

2.Vorbereitung

Verstärker für analoge Signale bestehen außer beim Einsatz im Bereich sehr hoher Frequenzen aus monolithisch integrierten Schaltungen. Diese sind in ihrem Aufbau der verwendeten Technologie angepasst und lassen auf den ersten Blick ihre Grundstruktur nicht erkennen. Bild 1 nennt die 3 Teilaufgaben, die bei diesen sog. Operationsverstärkern anfallen:



$$u_a = v(u_{e1} - u_{e2})$$

Bild 1:

Drei wesentliche Bausteine zur Lösung dieser Aufgaben werden im Folgenden untersucht: Konstantstromquelle, Differenzverstärker und komplementärer Spannungsfolger. Dabei reicht es aus, die Beschreibung der Transistoreigenschaften auf Bild 2 zu beschränken.

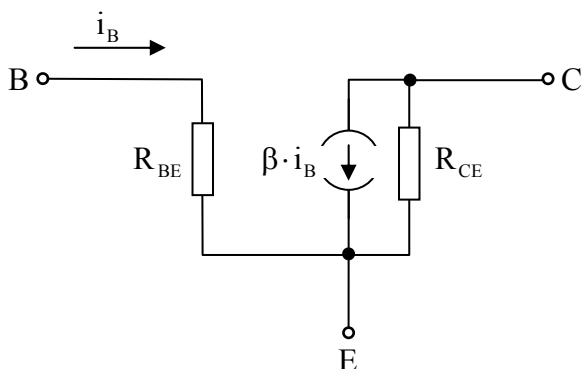


Bild 2:

B : Basis

E : Emitter

C : Kollektor

$R_{BE} := U_T / I_B$: Basis-Emitter-Widerstand

$R_{CE} :=$ Kollektor-Emitter-Widerstand

β : Stromverstärkung

i_B : Basisstrom im Arbeitspunkt

$U_T = 26\text{mV}$: Temperaturspannung
bei $\vartheta = 25^\circ\text{C}$

2.1 Die Konstantstromquelle

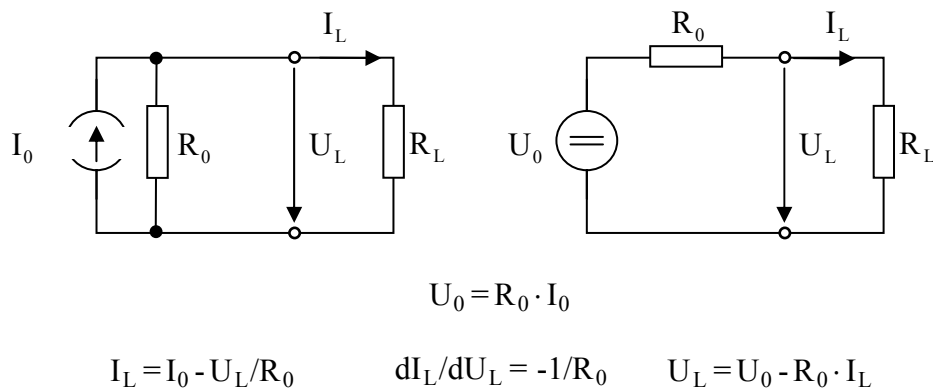


Bild 3

Bild 3 zeigt zwei äquivalente Schaltungen, die für $R_0 \gg R_L$ einen konstanten Strom I_L erzeugen. dI_L / dU_L strebt gegen 0, wenn der Quellenwiderstand R_0 über alle Grenzen geht. Da der Strom I_L in der rechten Schaltung mit wachsendem R_0 kleiner wird, müsste ein wachsendes U_0 den Ausgleich schaffen.

Mit kleinen Spannungen U_0 lässt sich dann das gleiche Ziel erreichen, wenn eine Schaltung eingesetzt wird, die - in einem begrenzten Spannungsbereich - einen hohen dynamischen Innenwiderstand R_0 aufweist. Dies leistet ein Transistor in Emitterschaltung, bei dem der Kollektorwiderstand den Lastwiderstand R_L bildet (vgl. Bild 4)

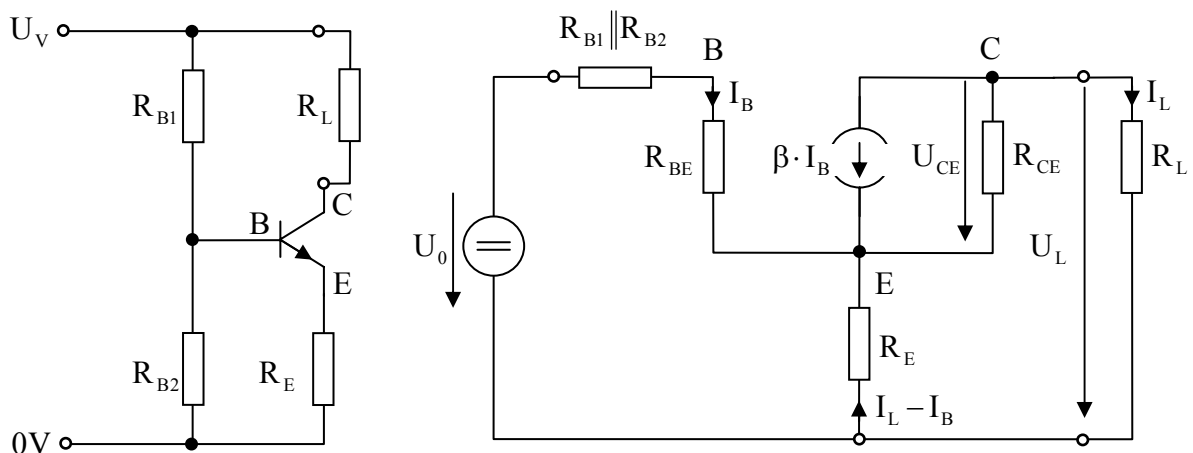


Bild 4

Der Gegenkopplungswiderstand R_E stellt hinreichend sicher, dass bei konstantem U_0 nur Spannungsänderungen

$$d U_{CE} = d U_L \quad (2a)$$

auftreten.

Ferner gilt für die Eingangsmasche:

$$U_0 = I_B (R_{B1} \parallel R_{B2}) + I_B R_{BE} + I_B R_E - I_L R_E \quad (2b)$$

und für den Kollektorknoten C:

$$I_L = -\beta I_B - U_{CE} / R_{CE} \quad (2c)$$

Der äquivalente Innenwiderstand R_0 der Stromquelle gemäß Gl.(1) ergibt sich aus Gl.(2a, b, c) zu

$$R_0 = R_{CE} \left(1 + \frac{\beta R_E}{R_{B1} \parallel R_{B2} + R_{BE} + R_E} \right)$$

Aufgabe 1

a) Verifizieren Sie Gleichung (3) !

b) Wie groß ist R_0 für

$$R_{CE} = 20 \text{ k}\Omega, \beta = 500, U_T = 26 \text{ mV} \quad |I_L| \approx \beta I_B = 20 \text{ mA}$$

$$R_{B1} \parallel R_{B2} = 4,7 \text{ k}\Omega \text{ und } R_E = 470 \Omega ?$$

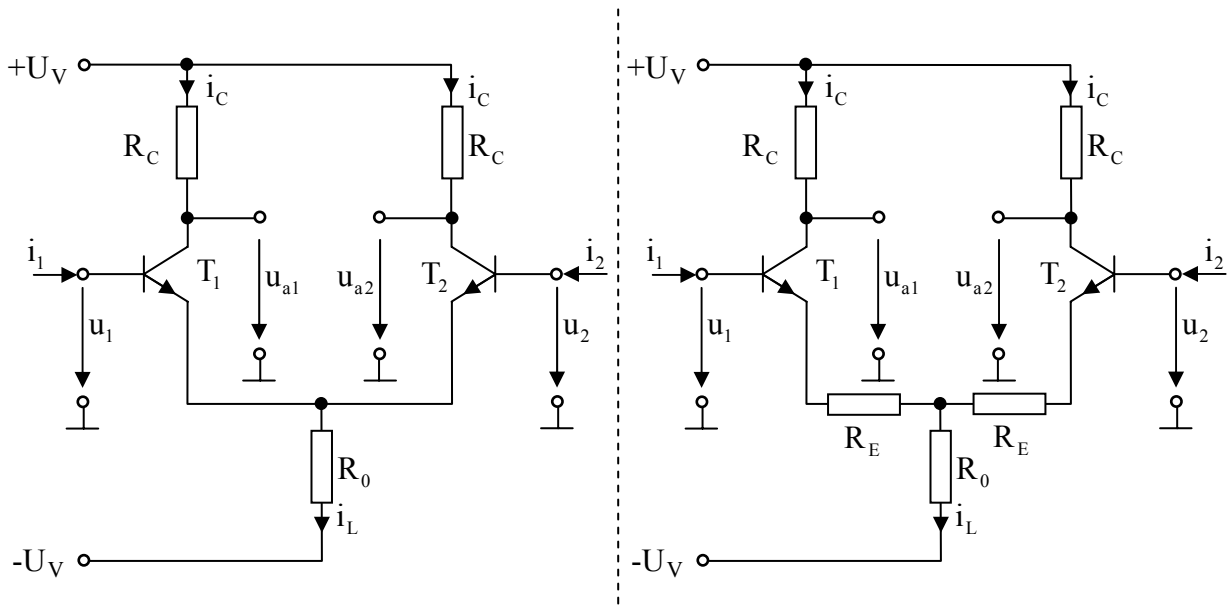
Aufgabe 2

In Bild 4 sei gegeben:

$$U_V = 30 \text{ V}; U_{BE} = 0,6 \text{ V}; R_E = 470 \Omega.$$

Wie ist der Spannungsteiler $t = R_{B2} / (R_{B1} + R_{B2})$ zu wählen, damit $I_L = 2 \text{ mA}$ wird ?

2.2 Der Differenzverstärker



$$(u_1 + u_2)/2 = u_G$$

$$u_1 - u_2 = u_D$$

Bild 5a:

$$(i_1 + i_2)/2 = i_G$$

$$i_1 - i_2 = i_D$$

Bild 5b:

Die Schaltungen in Bild 5 sind symmetrisch aufgebaut mit gemeinsam benutztem R_0 .

Zur Beschreibung ihrer Eigenschaften ist es günstig, die Eingangsgrößen

u_1, i_1 und u_2, i_2 umzudeuten in die Mittelwerte u_G und i_G und die Differenzen u_D und i_D .

Bei Gegentaktaussteuerung (Differenzsteuerung) ist jeder Transistor mit

$+u_D/2$ ($+i_D/2$) bez. $-u_D/2$ ($-i_D/2$) beteiligt; der Strom i_L ändert sich nicht.

Somit arbeiten beide Transistoren als Emitterstufen.

Für Bild 5a gilt daher:

$$u_{a1} = -\frac{1}{2} \cdot \beta \cdot \frac{R_C \parallel R_{CE}}{R_{BE}} \cdot u_D \quad (\text{bzw. } u_{a2} = \frac{1}{2} \cdot \beta \cdot \frac{R_C \parallel R_{CE}}{R_{BE}} \cdot u_D)$$

Die Differenzverstärkung beträgt somit

$$V_D = \frac{u_{a1}}{u_D} = -\frac{1}{2} \cdot \frac{\beta \cdot R_C \cdot R_{CE}}{R_{BE} (R_C + R_{CE})} \quad (R_{BE}, R_{CE} \text{ siehe Bild 2}) \quad (4a)$$

In Bild 5b gilt für $R_{CE}^* = R_{CE} \left(1 + \frac{\beta \cdot R_E}{R_{BE} + R_E}\right) \approx R_C$ und $R_{BE} \approx \beta R_E$:

$$V_D = \frac{u_{a1}}{u_D} = -\frac{1}{2} \cdot \frac{R_C}{R_E} \quad (4b)$$

Aufgabe 3

Vollziehen Sie die Gleichungen (4a, b) mit den Erkenntnissen des Versuchs 3 im 3. Halbjahr nach. Beachten Sie dabei vor allem die Bedeutung der Voraussetzungen zu Gl (4b) im Ersatzschaltbild der Emitterschaltung (für R_{CE}^* vgl. auch R_0 der Konstantstromquelle)

Die **Gleichtaktverstärkung** ergibt sich zu:

$$V_G = \frac{u_{a1}}{u_G} = \frac{u_{a2}}{u_G} = -\frac{R_C}{2 R_0} \quad (5)$$

(i.a. $R_0 \approx R_E \approx R_{BE} / \beta$)

Aufgabe 4

Welche einfache äquivalente Umformung in den Bildern 5a,b zeigt die Gültigkeit der Gl (5) ?

Weitere Eigenschaften ergeben sich direkt aus den Bildern 5a,b und den Kenntnissen über die Emitterschaltung:

	Bild 5a	Bild 5b
Differenzeingangswiderstand	$2 R_{BE}$	$2 (R_{BE} + \beta \cdot R_E) \approx 2 \cdot \beta \cdot R_E$
Gleichtakteingangswiderstand	$R_{BE} + 2 \cdot \beta \cdot R_0$	$R_{BE} + \beta \cdot (2 R_0 + R_E) \approx 2 \cdot \beta \cdot R_0$
Ausgangswiderstand	$R_C \approx R_{CE}$	$R_C \approx R_{CE}^*$

Aufgabe 5

Es ist $v_D \neq v_G$ erwünscht. Wie ist dies zu erreichen?

Aufgabe 6

Welche Aufgabe und Wirkung haben die Widerstände R_E ?

2.3 Der komplementäre Spannungsfolger.

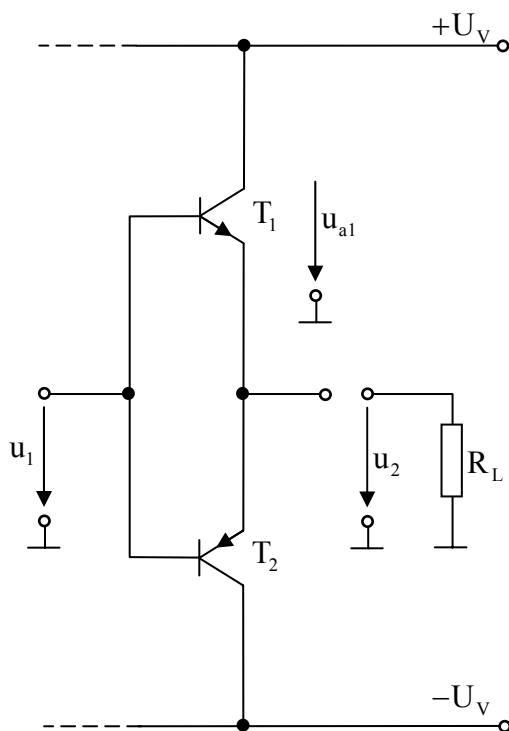


Bild 6a:

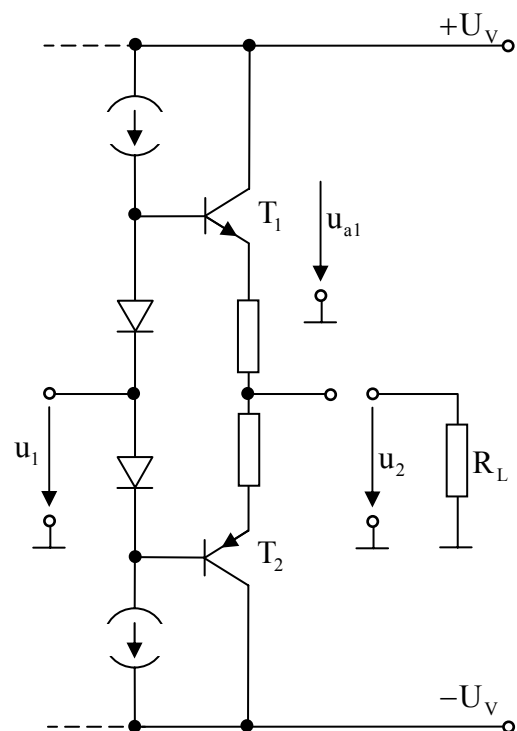


Bild 6b:

Nach einer hohen Spannungsverstärkung, z.B. durch eine Emitterstufe, bleibt die Aufgabe, mit einem kleinen Innenwiderstand eine große Ausgangsleistung bereitzustellen. Dazu bieten sich Spannungsfolger an. Wegen der symmetrischen Spannungsversorgung und dem Wunsch, zu 0V symmetrische Signale zu verstärken, ist der symmetrische Emitterfolger geeignet. Er arbeitet in einer Ausführung nach Bild 6a im Gegentakt (B-Betrieb), d.h. T_1 und T_2 wechseln sich im Stromfluss ab (vgl. Bild 7a).

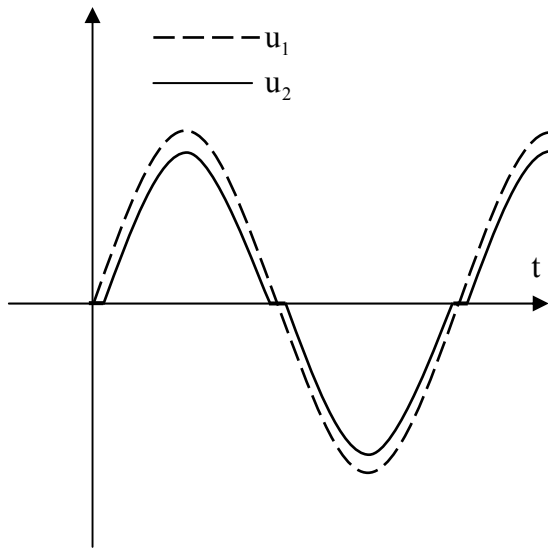


Bild 7a:

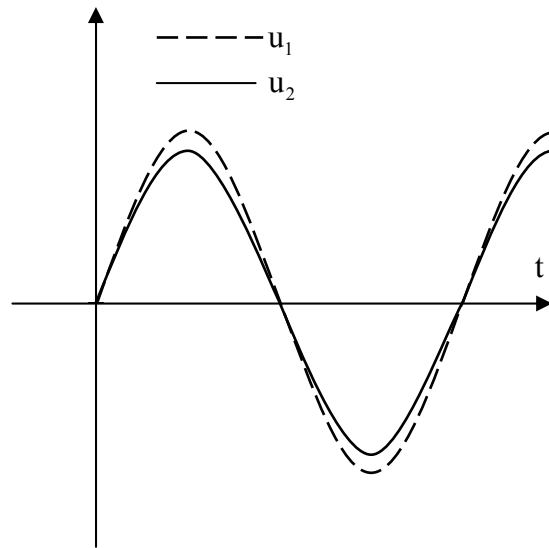


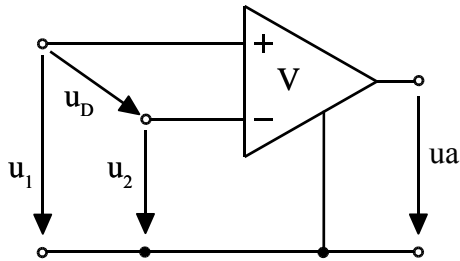
Bild 7b:

In beiden Takten folgt das Ausgangssignal dem Eingangssignal im Abstand U_{BE} . Dies führt zu sog. Übernahmeverzerrungen, die verringert werden können durch gleichzeitiges Leiten beider Transistoren (A-Betrieb) im Übernahmebereich. Eine mögliche Ausführung zeigt Bild 6b: Die beiden Dioden D_1 und D_2 trennen die Basispotentiale von T_1 und T_2 so, dass diese die Stromleitung stetig übergeben und übernehmen (Gegentakt-AB-Betrieb; vgl. Bild 7b). Die Widerstände R_E helfen dabei mit und begrenzen den Ausgangskurzschlussstrom.

2.4 Der Operationsverstärker

Die Schaltung in Bild 8 simuliert den Aufbau eines Operationsverstärkers. Zwischen Differenz- und Ausgangsstufe wirkt eine Emitterstufe mit Transistor T_4 . Ihr Kollektorwiderstand ist durch eine Stromquelle realisiert mit dem wirksamen (differentiellen) Widerstand R_0 aus Gl. (3). Eine weitere Stromquelle bildet den gemeinsamen Emitterzweig des Differenzverstärkers.

Bild 9 stellt einige wichtige Kenngrößen des Operationsverstärkers zusammen:

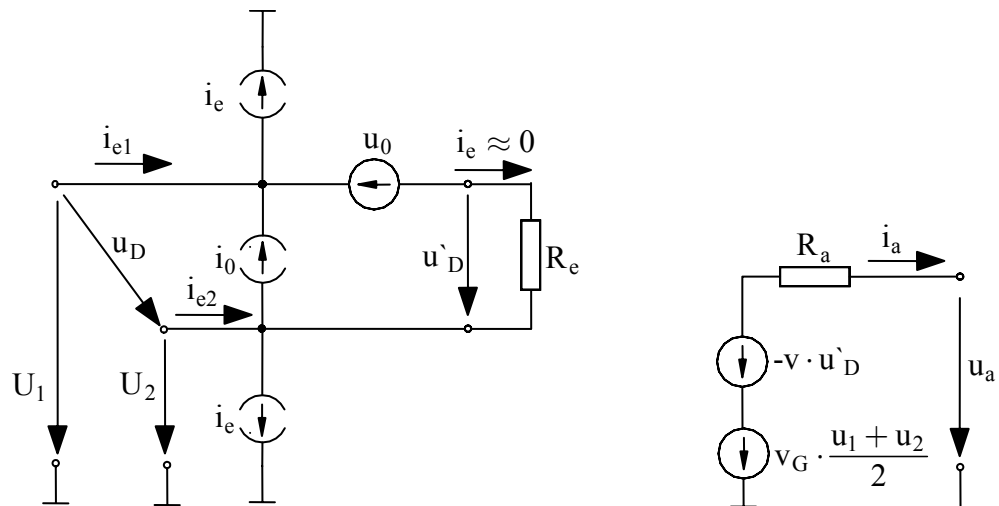


$V = V_D$: Differenzverstärkung
 V_G : Gleichtaktverstärkung
 G : Gleichtaktunterdrückung
 U_0 : Offsetspannung
 I_E : Eingangsruhestrom
 I_0 : Eingangs-Offset-Strom
 R_D : Differenz-Eingangswiderstand
 R_A : Ausgangswiderstand

Bild 9

Aufgabe 7

Wie sind die Kenngrößen in Bild 9 definiert? Vergleichen Sie hierzu Bild 10.



Gleichstromersatzschaltbild des Operationsverstärkers

Bild 10

Aufgabe 8

Welche weiteren spezielle Transistorschaltungen kennen Sie? Welche Vorteile könnten Sie in der Schaltung aus Bild 8 bringen?

3. Meßaufgaben und Auswertung

3.1 Konstantstromquelle

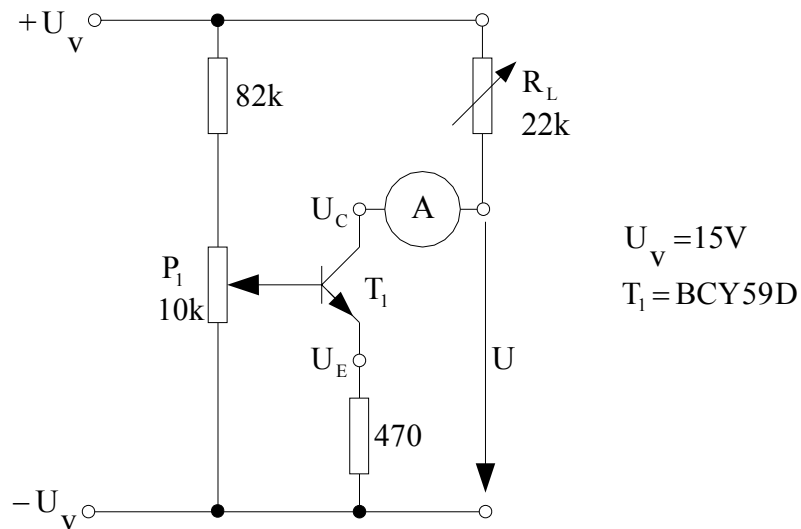


Bild 11

- Nehmen Sie die Schaltung nach Bild 11 in Betrieb. Wählen Sie $I_L = 2\text{ mA}$ bei $R_L = 0$
- Verändern Sie R_L .

Messen Sie dabei U . (Beachte: $U_E = \text{const.}$)

Messen Sie gleichzeitig I_L .

Wie groß ist $R_0 = \Delta U / \Delta I_L = \Delta U_{CE} / \Delta I_L$

Vergleichen Sie die Messung mit der theoretischen Vorhersage der Gl.(3) (Datenblatt!).

3.2 Differenzverstärker

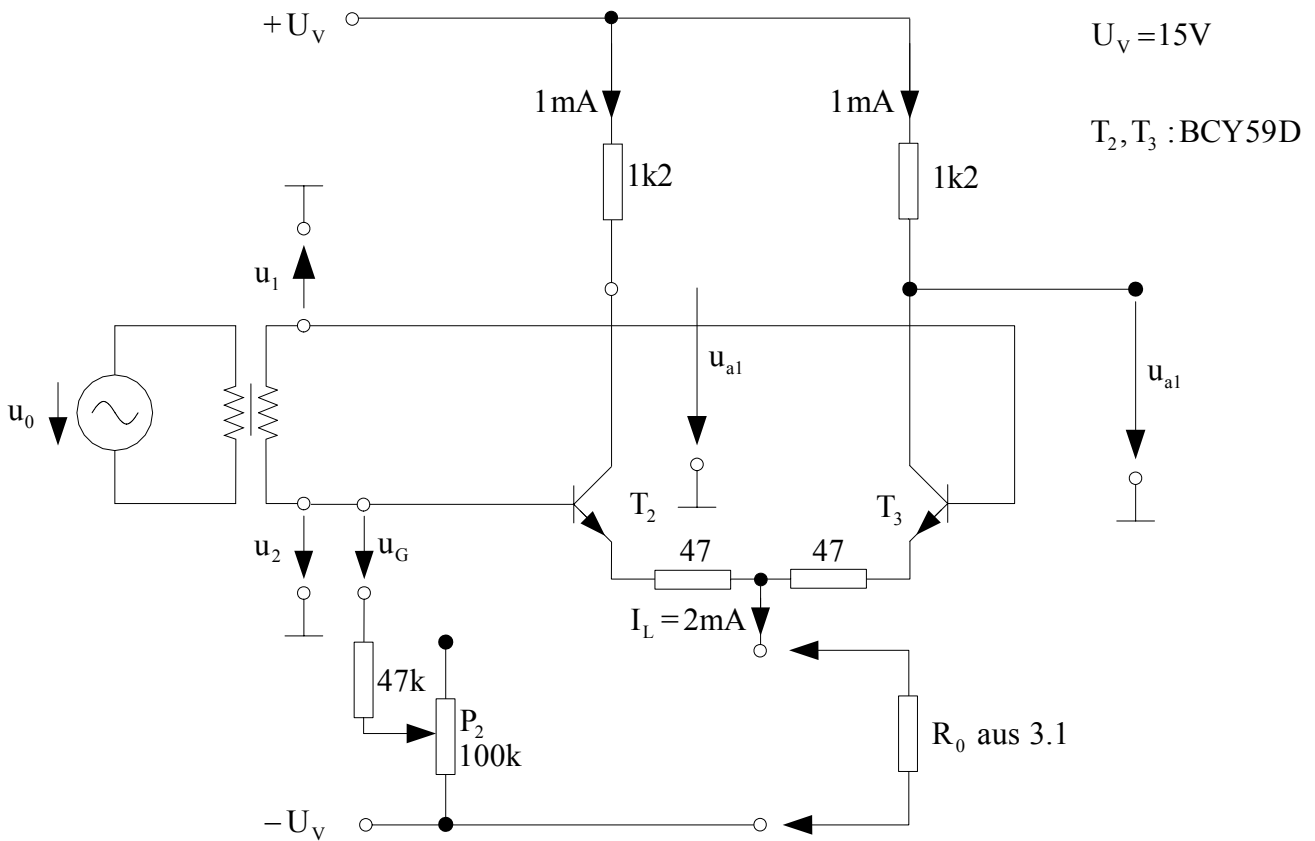


Bild 12

- Nehmen Sie die Schaltung nach Bild 12 in Betrieb; R_0 ist dabei die Stromquelle aus 3.1. Wählen Sie $I_L = 2\text{ mA}$!

Schließen Sie die Quellen u_G und $u_0 = u_D$ an und überzeugen Sie sich von der Funktionstüchtigkeit des Differenzverstärkers durch Änderung von u_G mit P_2 .

- Messen Sie $v_D = u_{a1}/u_G$. (Verwenden Sie u_0 als direkte, geerdete Quelle für u_D , d.h. ohne Übertrager!)
- Messen Sie $v_G = u_{a1}/u_G$. (Verwenden Sie u_0 als Quelle für u_G !)
- Vergleichen Sie die gemessenen Werte mit den theoretischen Vorhersagen der Gl.(4) und (5). Gilt Gl. (4b) für v_D ?
- Wie groß ist die Gleichtaktunterdrückung G ?

- Wie groß müsste ein ohmscher Widerstand R_0 sein, damit die Arbeitspunkte bleiben, d.h. u_E seinen Gleichwert behält, wenn $u_G = 0$ ist?

Wie groß ist dann die Gleichtaktunterdrückung G ?

3.3 Emitterstufe mit Stromquelle

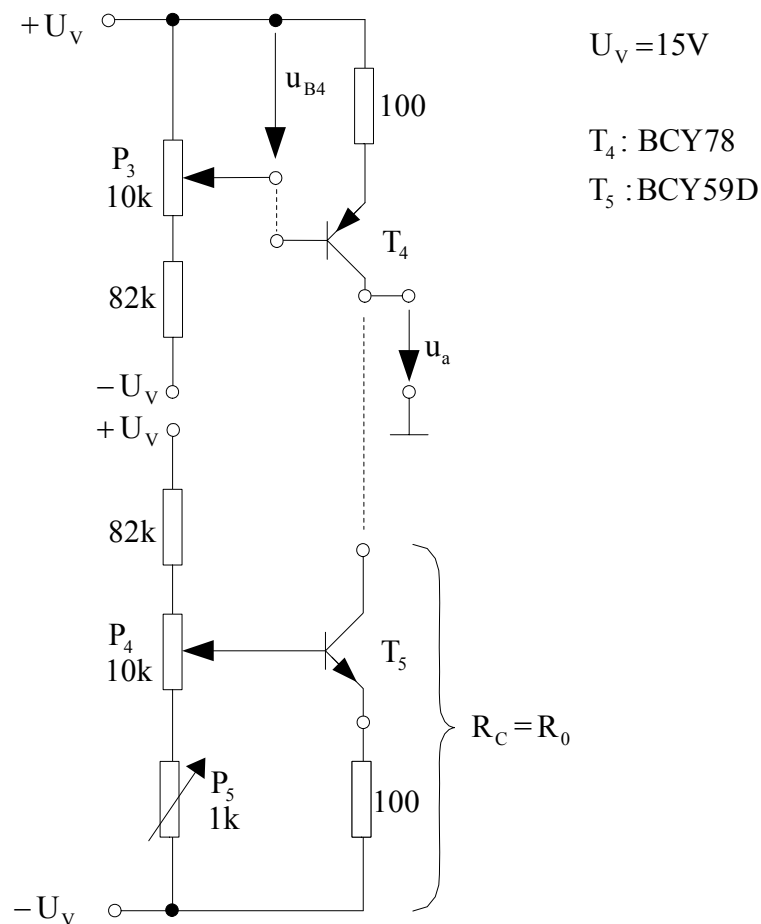


Bild 13

Nehmen Sie die Emitterstufe (T_4) nach Bild 13 in Betrieb.

Wählen Sie die Basisvorspannung $U_{B4} = 1,2 V$.

Stellen Sie über P_4, P_5 den Widerstand $R_C = R_0$ der Stromquelle (T_5) so ein, dass u_a ungefähr 0V wird.

Messen Sie v_u . Entspricht der Messwert Ihren Erwartungen?

3.4 Komplementärer Spannungsfolger

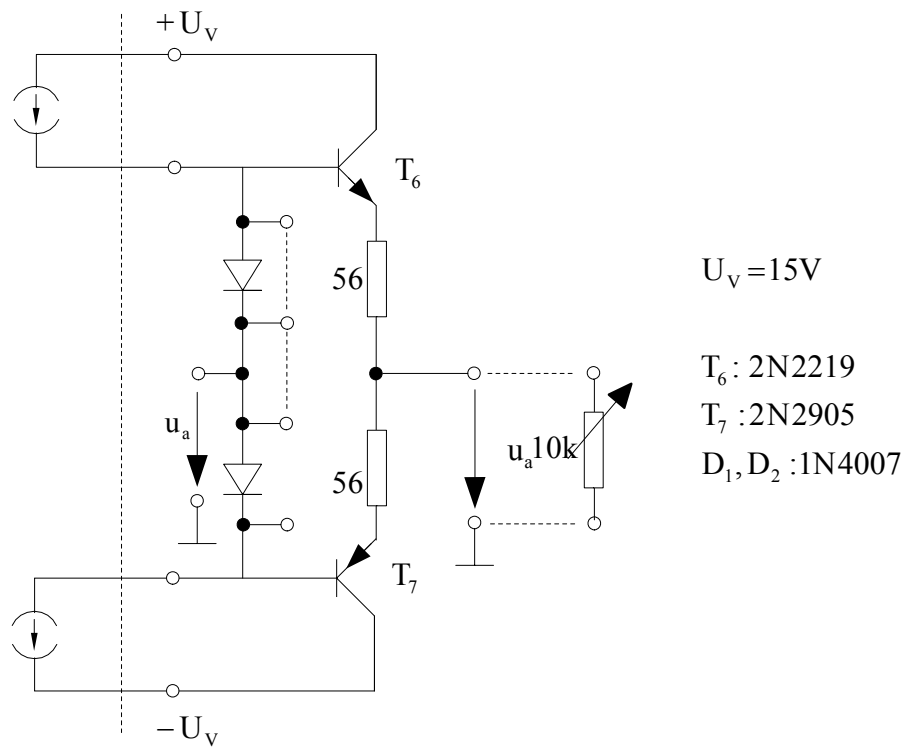


Bild 14

- Nehmen Sie die Schaltung nach Bild 14 in Betrieb. Verwenden Sie als Stromquellen die Transistorstufen mit T_4 und T_5 aus 3.3.
- Beobachten Sie das Übertragungsverhalten $u_a = f(u_e)$ mit und ohne Potentialverschiebung mit Hilfe der Dioden D_1 und D_2

3.5 Operationsverstärker

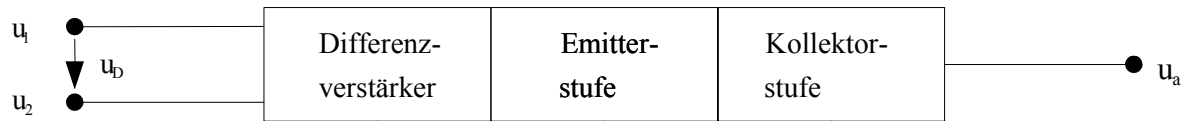


Bild15

- Stellen Sie die Teilschaltungen zum Operationsverstärker zusammen.
(direkte Kopplung $T_3 \rightarrow T_4$, P_3 von T_4 trennen!)
- Überprüfen Sie v_D und v_G !
Was hat sich gegenüber 3.2 (Differenzverstärker) geändert?
- Bestimmen Sie den Differenzeingangswiderstand R_e und den Ausgangswiderstand R_a !