

1. Klausur
Grundlagen der Elektrotechnik I-B
25. Mai 2004



Musterloesung

Name:

Vorname:

Matr.-Nr.:

Bearbeitungszeit: 135 Minuten

- Trennen Sie den Aufgabensatz **nicht** auf.
- Benutzen Sie für die Lösung der Aufgaben **nur** das mit diesem Deckblatt ausgeteilte Papier. **Lösungen, die auf anderem Papier geschrieben werden, können nicht gewertet werden.** Weiteres Papier kann bei den Tutoren angefordert werden.
- **Notieren Sie bei der Aufgabe einen Hinweis, wenn die Lösung auf einem Extrablatt fortgesetzt wird**
- **Schreiben Sie deutlich!** Doppelte, unleserliche oder mehrdeutige Lösungen können nicht gewertet werden.
- Schreiben Sie **nicht** mit Bleistift!
- Schreiben Sie nur in **blau** oder **schwarz!**

1. Aufgabe (5 Punkte): Fragen aus verschiedenen Gebieten

Beantworten Sie die folgenden Fragen:

1.1. Plattenkondensator (0,5 Punkte)

Nach welcher Formel errechnet sich die Kapazität eines Plattenkondensators?

Lösung:

$$C = \epsilon \frac{A}{d} \quad (1)$$

1.2. Energie im Kondensator (0,5 Punkte)

Nach welcher Formel errechnet sich die Energie, die in einem Kondensator der Kapazität C gespeichert ist, wenn er auf eine Spannung U aufgeladen ist?

Lösung:

$$W = \frac{1}{2} C U^2 \quad (2)$$

1.3. Differentieller Widerstand (0,5 Punkte)

Was ist ein differentieller Widerstand?

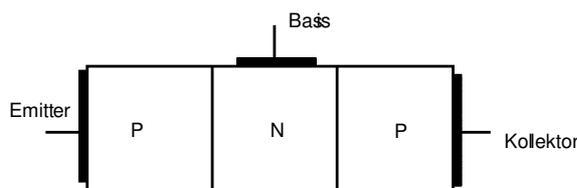
Lösung:

Der differentielle Eingangswiderstand ist der Widerstand der Schaltung, der wechsellspannungsmäßig wirksam ist. Er ist umgekehrt proportional zur Steigung einer $i = f(u)$ - Kennlinie im Arbeitspunkt. Seine Definition lautet

$$r_e = \left. \frac{\partial u_e}{\partial i_e} \right|_{\text{Arbeitspunkt}} \quad (3)$$

1.4. Schichtaufbau (1 Punkt)

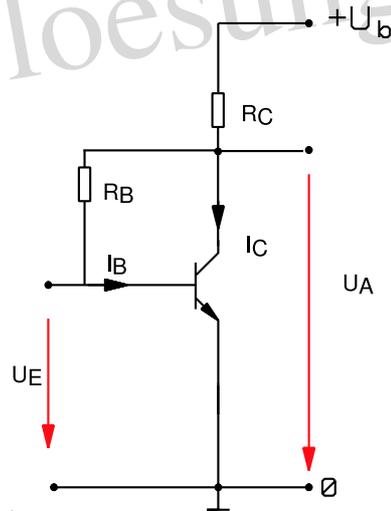
Skizzieren Sie den inneren Aufbau eines PNP-Transistors und kennzeichnen Sie die Anschlüsse von Basis, Kollektor und Emitter.



1.5. Transistorgrundsaltung (0,5 Punkte)

Skizzieren Sie einen npn-Transistor in Emitterschaltung mit Spannungsgegenkopplung. Machen Sie Ein- und Ausgangsspannungen sowie die Versorgungsspannung kenntlich.

Musterloesung



1.6. Stromverstärkung (0,5 Punkte)

Wie beschreibt man die Stromverstärkung eines bipolaren Transistors?

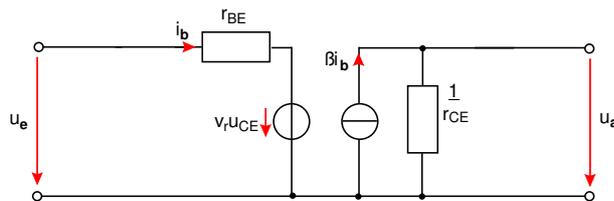
Lösung:

Die Stromverstärkung ist das Verhältnis von Kollektorstrom zu Basisstrom:

$$B = \frac{I_C}{I_B} \tag{4}$$

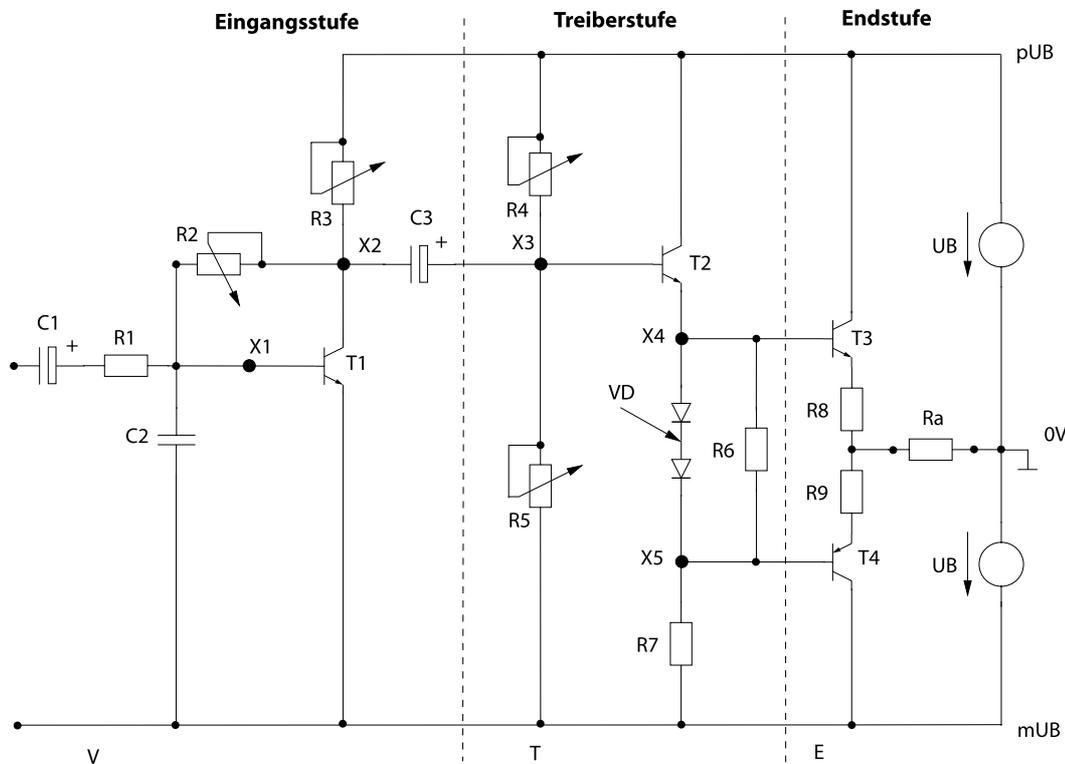
1.7. Ersatzschaltbild (0,5 Punkte)

Zeichnen Sie das Wechselspannungersatzschaltbild des Transistors (Kleinsignalverhalten).



1.8. Mehrstufiger Verstärker (1,5 Punkte)

Sie haben im Unterricht einen mehrstufigen Verstärker für Audiosignale kennen gelernt. Den Schaltplan des Verstärkers finden Sie in der folgenden Abbildung:



Beschreiben Sie die Aufgaben der einzelnen Stufen des Verstärkers:

- Eingangsstufe

Lösung:

Die Eingangsstufe realisiert eine *Signalanpassung an die Quelle*. Sie ist als *Emitterschaltung* ausgeführt. In dieser Stufe wird die *Spannungsverstärkung* realisiert.

- Treiberstufe

Lösung:

Die Treiberstufe stellt den *benötigten Basisstrom* für die Endstufentransistoren bereit. Die Treiberstufe ist als *Kollektorschaltung* mit einer *Spannungsverstärkung* von $V_U = 1$ realisiert.

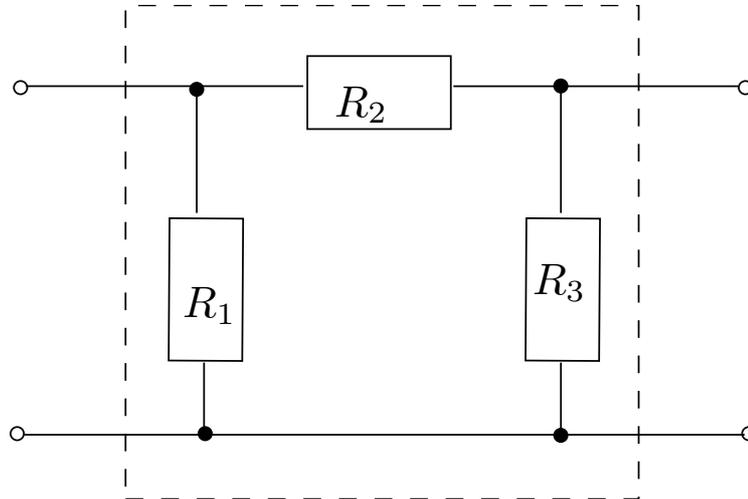
- Endstufe

Lösung:

Die Endstufe treibt den Strom durch den *Lastwiderstand*. Die Endstufentransistoren erledigen die *notwendige Stromverstärkung*, um die *abzugebende Leistung* bereitzustellen. Da dies mit der *Abgabe von reichlich Verlustleistung* verbunden ist, werden Sie *gekühlt*.

2. Aufgabe (5 Punkte): H-Parameter

Gegeben ist ein passiver Vierpol:

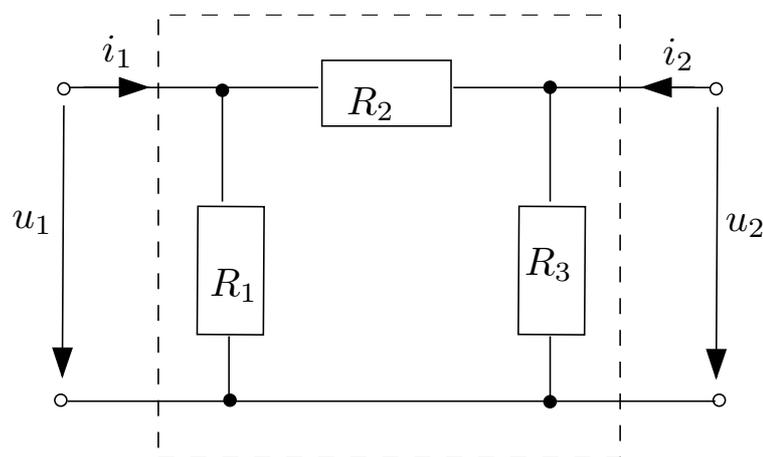


(5)

2.1. Strom- und Spannungspfeile, h-Parameter (1 Punkt)

Zeichnen Sie die Spannungs- und Strompfeile für $i_1, i_2, u_1,$ und u_2 gemäß der eingeführten Vierpoltheorie ein, und geben Sie die allgemeinen h-Parameter-Gleichungen für Vierpole mit den dazugehörigen Bedingungen an.

Lösung:



(6)

$$h_{11} = \frac{u_1}{i_1} \Big|_{u_2=0} \quad (7)$$

$$h_{12} = \frac{u_1}{u_2} \Big|_{i_1=0} \quad (8)$$

$$h_{21} = \frac{i_2}{i_1} \Big|_{u_2=0} \quad (9)$$

$$h_{22} = \frac{i_2}{u_2} \Big|_{i_1=0} \quad (10)$$

2.2. Netzwerk berechnen (4 Punkte)

Berechnen Sie die Werte der Widerstände R_1 , R_2 , R_3 und den h-Parameter h_{21} .

$$h_{11} = \frac{4}{3}\Omega, h_{12} = \frac{1}{3}, h_{22} = \frac{1}{3}\frac{1}{\Omega}$$

Lösung:

$$h_{11} = \frac{u_1}{i_1} \Big|_{u_2=0} = \frac{R_2 R_1}{R_2 + R_1} \Rightarrow \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = \frac{4}{3}\Omega \quad (11)$$

$$h_{12} = \frac{u_1}{u_2} \Big|_{i_1=0} = R_1 / (R_1 + R_2) \Rightarrow R_1 = \frac{1}{2}R_2 \quad (12)$$

$$h_{22} = \frac{i_2}{u_2} \Big|_{i_1=0} = \frac{R_3 + (R_1 + R_2)}{R_3(R_1 + R_2)} \Rightarrow R_3 = \frac{R_1 + R_2}{h_{22}(R_1 + R_2) - 1} \quad (13)$$

Gleichungssystem lösen:

$$(12) \text{ in } (11) \Rightarrow R_2 = 4\Omega, R_1 = 2\Omega$$

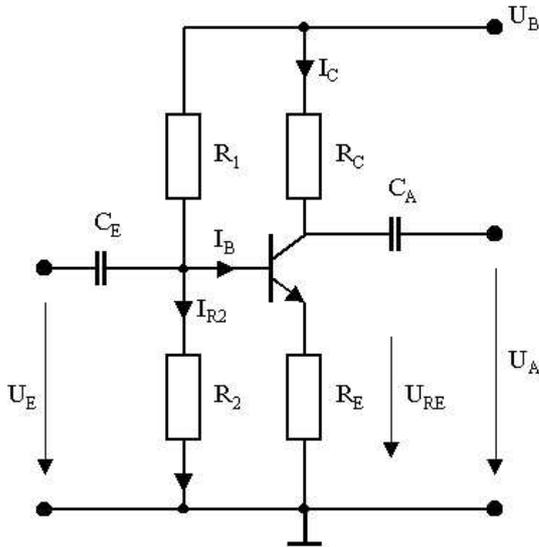
$$R_1 \text{ und } R_2 \text{ in } (13) \Rightarrow R_3 = 6\Omega.$$

Verbleibenden h-Parameter berechnen:

$$h_{21} = \frac{i_2}{i_1} \Big|_{u_2=0} = -R_1 / (R_1 + R_2) = -\frac{2\Omega}{(2 + 4)\Omega} = -\frac{1}{3} \quad (14)$$

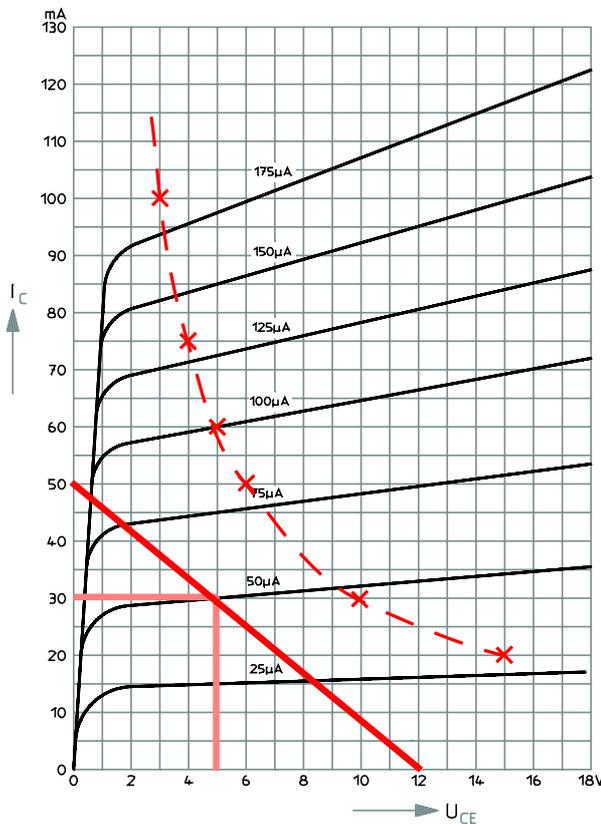
3. Aufgabe (5 Punkte): Transistorschaltung

Gegeben ist die folgende Verstärkerschaltung. Die dazugehörige Eingangskennlinie und das Ausgangskennlinienfeld des verwendeten Transistors sind unten angegeben.

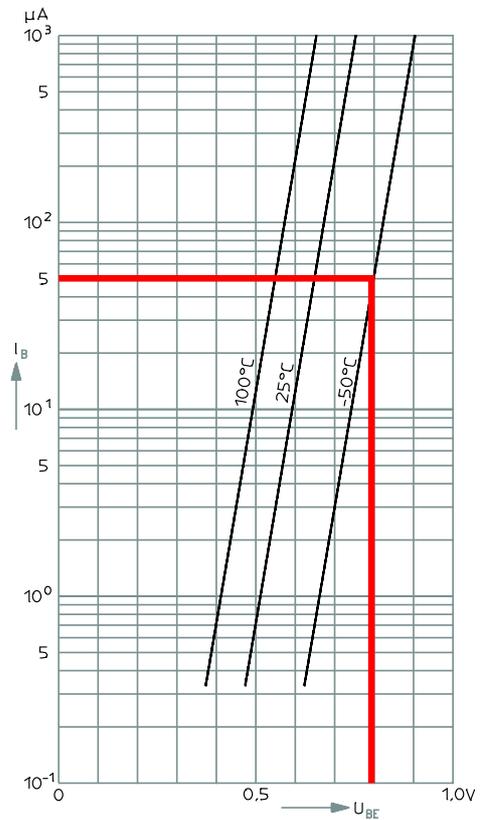


$I_C = 30 \text{ mA}$	$I_{R2} = 10 \cdot I_B$	$U_B = 12 \text{ V}$
$B = 600$	$P_{\text{tot}} = 300 \text{ mW}$	$U_{RE} = 1 \text{ V}$

Ausgangskennlinienfeld des BC239



Eingangskennlinien des BC239



Hinweis: Die Umgebungstemperatur beträgt -50°C .

3.1. Arbeitspunkt (1 Punkt)

Bestimmen Sie den Arbeitspunkt A_1 und tragen Sie diesen und die Arbeitsgerade in das vorgegebene Ausgangskennlinienfeld ein. Gemäß der Tabelle fließt im Arbeitspunkt ein Strom $I_C = 30 \text{ mA}$.

Lösung:

$$I_B = \frac{I_C}{\beta} = \frac{30 \text{ mA}}{600} = 50 \mu\text{A} \quad (15)$$

$$I_{CA1} = 30 \text{ mA} \quad \text{und} \quad (16)$$

$$U_{CEA} = 5 \text{ V} \quad (0.5 \text{ Punkte}) \quad (17)$$

Arbeitsgerade:

1. Punkt: $I_{C0} = 0 \text{ A}$, $U_{CE0} = U_B = 12 \text{ V}$

2. Punkt: $I_{CA} = 30 \text{ mA}$, $U_{CEA} = 5 \text{ V}$ (Arbeitspunkt)

3. Punkt: Verlängert $I_{CK} = 50 \text{ mA}$, ($U_{CEK} = 0 \text{ V}$) (0.5 Punkte)

3.2. Dimensionierung R_C und R_E (1 Punkt)

Berechnen Sie die Widerstände R_C und R_E für den Arbeitspunkt A_1 , wenn über den Widerstand R_E eine Spannung von 1V abfallen soll.

Lösung:

$$R_E = \frac{U_{RE}}{I_C + I_B} = \frac{1 \text{ V}}{30 \text{ mA} + 50 \mu\text{A}} = 33,28 \Omega \quad \text{oder} \quad R_E \approx \frac{U_{RE}}{I_C} = 33,3 \Omega \quad (0.5 \text{ Punkte}) \quad (18)$$

$$R_C + R_E = (\text{Steigung der Arbeitsgeraden})^{-1}$$

$$R_C = \frac{U_B - U_{CEA} - U_{RE}}{I_{CA}} = \frac{12 \text{ V} - 5 \text{ V} - 1 \text{ V}}{30 \text{ mA}} = 200 \Omega \quad (0.5 \text{ Punkte}) \quad (19)$$

3.3. Dimensionierung R_1 und R_2 (1 Punkt)

Dimensionieren Sie R_1 und R_2 so, dass die Bedingung $I_{R2} = 10 \cdot I_B$ erfüllt ist.

Lösung:

$$I_B = 50 \mu\text{A}, U_{BE} = 0,8 \text{ V} \quad (\text{abgelesen aus dem Eingangskennlinienfeld})$$

$$R_2 = \frac{U_{R2}}{10 \cdot I_B} = \frac{U_{BEA} + U_{RE}}{10 \cdot I_B} = \frac{0,8 \text{ V} + 1 \text{ V}}{10 \cdot 50 \mu\text{A}} = 3,6 \text{ k}\Omega \quad 0.5 \text{ Punkte} \quad (20)$$

$$R_1 = \frac{U_B - U_{R2}}{11 \cdot I_B} = \frac{U_B - U_{BEA} - U_{RE}}{11 \cdot I_B} = \frac{12 \text{ V} - 0,8 \text{ V} - 1 \text{ V}}{11 \cdot 50 \mu\text{A}} = 18,54 \text{ k}\Omega \quad (0.5 \text{ Punkte}) \quad (21)$$

3.4. Verlustleistung (2 Punkte)

Zeichnen Sie die Verlustleistungshyperbel in das Ausgangskennlinienfeld ein. Berechnen Sie dazu mindestens 4 Stützpunkte. Berechnen Sie die umgesetzte Leistung im Arbeitspunkt A_1 .

Lösung:

$$P_{tot} = U_{CE} \cdot I_C \Rightarrow I_C = \frac{P_{tot}}{U_{CE}} \quad (0.5 \text{ Punkte}) \quad (22)$$

1. Punkt: $U_{CE}=3V$ $I_C=100mA$

2. Punkt: $U_{CE}=4V$ $I_C=75mA$

3. Punkt: $U_{CE}=5V$ $I_C=60mA$

4. Punkt: $U_{CE}=6V$ $I_C=50mA$

5. Punkt: $U_{CE}=10V$ $I_C=30mA$

6. Punkt: $U_{CE}=15V$ $I_C=20mA$

Zeichnen der Hyperbel mit mindestens vier Stützpunkten (1 Punkt)

Leistung im Arbeitspunkt:

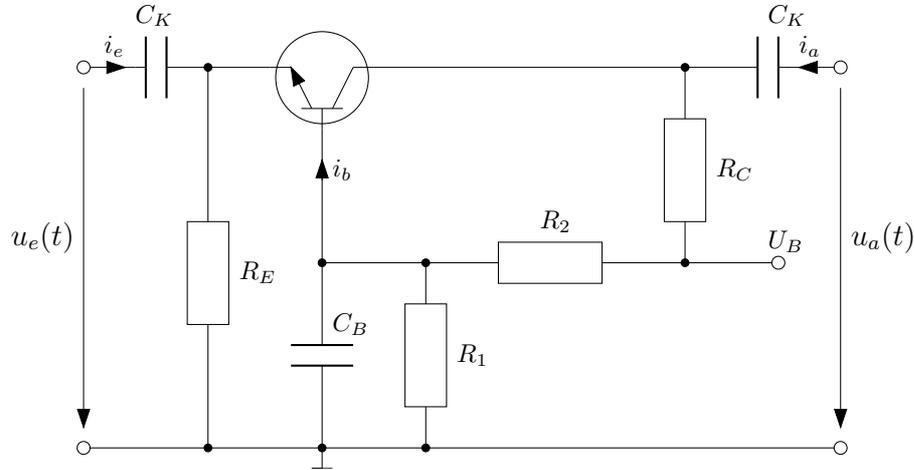
$$P_{V,CE} = U_{CEA} \cdot I_{CA} = 5 \text{ V} \cdot 30 \text{ mA} = 150 \text{ mW} \quad (0.5 \text{ Punkte}) \quad (23)$$

Wer es genau macht, der berücksichtigt auch noch die umgesetzte Leistung an der Basis-Emitter Diode

$$P_{V,BE} = U_{BEA} \cdot I_{BA} = 0,8 \text{ V} \cdot 50 \mu\text{A} = 0,4 \text{ mW} \quad (24)$$

4. Aufgabe (5 Punkte): Wechselstromersatzschaltbild

Gegeben ist die folgende Schaltung:



4.1. Schaltung erkennen (0,5 Punkte)

Um was für eine Transistorschaltung handelt es sich?

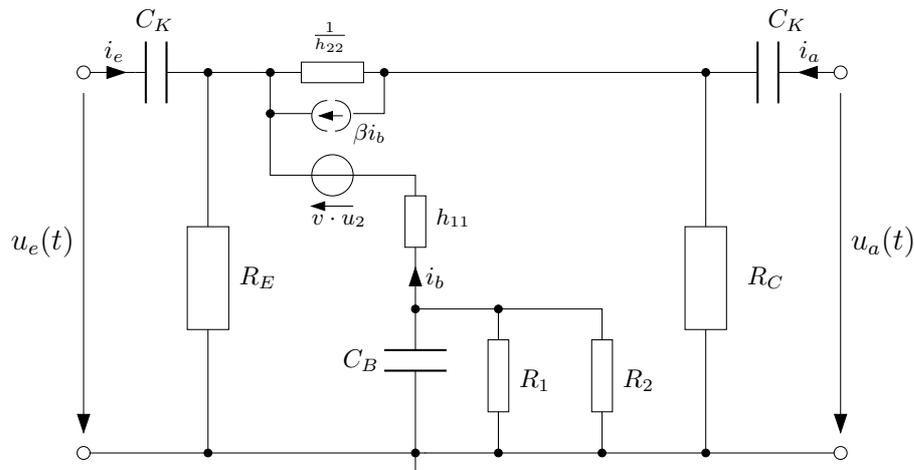
Lösung:

Es handelt sich um eine Basisschaltung.

4.2. Wechselstromersatzschaltbild (1,5 Punkte)

Zeichnen Sie das vollständige Wechselstromersatzschaltbild unter der Annahme $C_K = C_B \neq \infty$. Vergessen Sie nicht die Ströme und Spannungen einzuzeichnen, sowie die Elemente des Ersatzschaltbilds zu benennen.

Lösung:



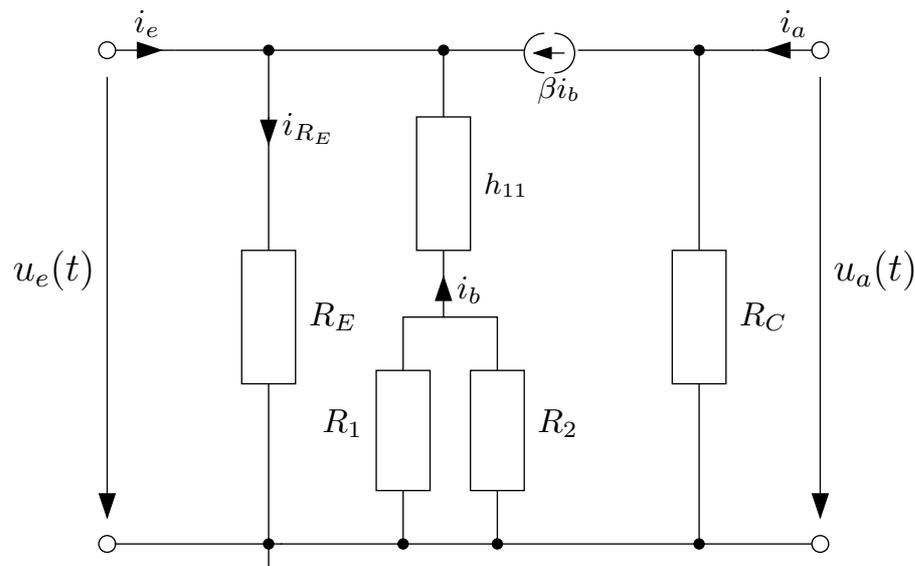
4.3. Vereinfachung des Wechselstromersatzschaltbilds (1 Punkt)

Vereinfachen Sie das in der vorherigen Teilaufgabe gewonnene Ersatzschaltbild unter der Voraussetzung, dass:

- $h_{12} = h_{22} = 0$
- $C_K \rightarrow \infty$
- $C_B \rightarrow 0$

und vergessen Sie nicht die Bauelemente zu benennen, sowie die Spannungen und Ströme einzuzeichnen.

Lösung:



4.4. Spannungs- und Stromgleichungen (1 Punkt)

Stellen Sie für das **vereinfachte** Wechselstromersatzschaltbild die Knotengleichung für den Eingangsstrom i_e , sowie die Maschengleichungen für die Ein- und Ausgangsspannung auf.

Lösung:

$$i_e = i_{R_E} - i_b - \beta i_b$$

$$u_e = i_{R_E} \cdot R_E = -i_b \cdot (h_{11} + R_1 \parallel R_2)$$

$$u_a = -\beta i_b \cdot R_C$$

4.5. Berechnungen (1 Punkt)

Berechnen Sie die Wechselspannungsverstärkung $v = \frac{u_a}{u_e}$ und den Eingangswiderstand $r_e = \frac{u_e}{i_e}$ für das **vereinfachte** Wechselstromersatzschaltbild.

Lösung:

Spannungsverstärkung:

$$v = \frac{u_a}{u_e} = \frac{-\beta i_b \cdot R_C}{-i_b \cdot (h_{11} + R_1 \parallel R_2)} = \frac{\beta R_C}{h_{11} + R_1 \parallel R_2}$$

Eingangswiderstand:

$$i_{R_E} = \frac{u_e}{R_E} \quad i_b = -\frac{u_e}{h_{11} + R_1 \parallel R_2}$$

Einsetzen in Knotengleichung ergibt:

$$i_e = \frac{u_e}{R_E} + u_e \frac{1 + \beta}{h_{11} + R_1 \parallel R_2}$$

Der Widerstand ergibt sich zu:

$$r_e = \frac{u_e}{i_e} = \left(\frac{1}{R_E} + \frac{1 + \beta}{h_{11} + R_1 \parallel R_2} \right)^{-1}$$

5. Aufgabe (5 Punkte): Konstantstromquelle

Eine Konstantstromquelle (siehe Abbildung 1) liefert einen Strom $I_L = 2 \text{ mA}$.
Gegeben sind:

- Transistor T_1 : $B = 200$, $U_{BE} = 0,7 \text{ V}$
- $U_E = 5 \text{ V}$
- $I_2 = I_L = 2 \text{ mA}$
- $U_B = 20 \text{ V}$

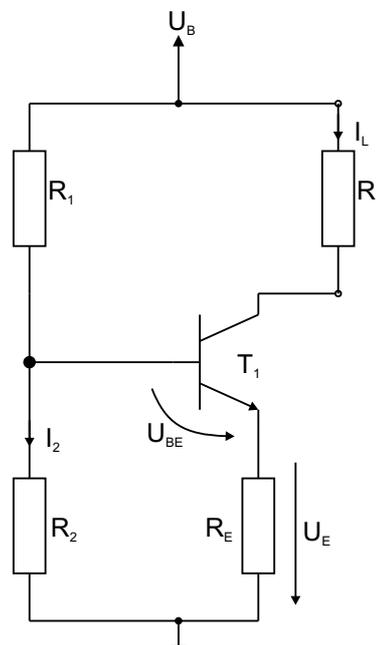


Abbildung 1: Schaltung Stromquelle

5.1. Widerstands-Berechnung (3 Punkte)

Berechnen Sie die Widerstandswerte für R_E , R_2 und R_1 .

Lösung:

$$R_E = \frac{U_E}{I_B + I_L} = \frac{U_E}{I_L \cdot \left(\frac{1}{B} + 1\right)} = \frac{5 \text{ V}}{2 \text{ mA} \cdot \left(\frac{1}{200} + 1\right)} = \frac{5 \text{ V}}{2,01 \text{ mA}} = \underline{2,49 \text{ k}\Omega} \quad (1\text{Punkt})$$

$$R_2 = \frac{U_2}{I_2} = \frac{U_{BE} + U_E}{I_2} = \frac{5 \text{ V} + 0,7 \text{ V}}{2 \text{ mA}} = \frac{5,7 \text{ V}}{2 \text{ mA}} = \underline{2,85 \text{ k}\Omega} \quad (1\text{Punkt})$$

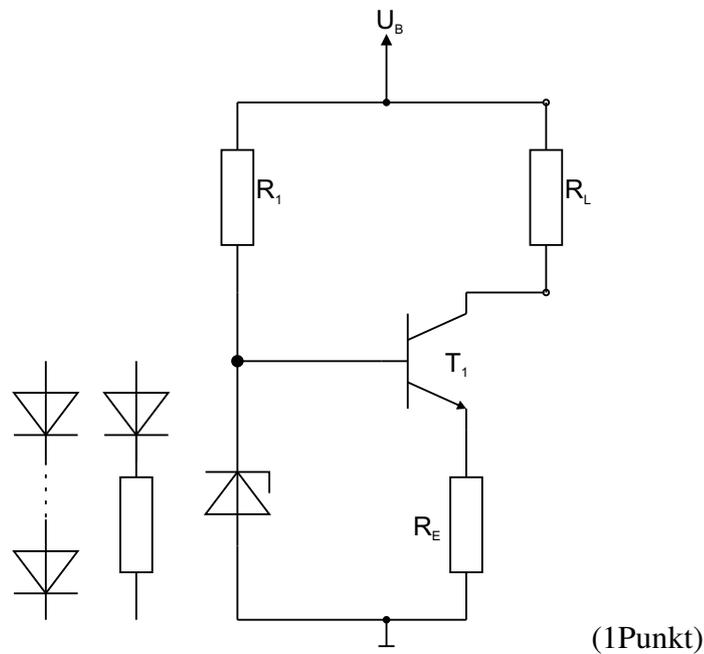
$$R_1 = \frac{U_1}{I_1} = \frac{U_B - U_2}{I_2 + I_B} = \frac{20 \text{ V} - 5,7 \text{ V}}{2 \text{ mA} + 10 \mu\text{A}} = \frac{14,3 \text{ V}}{2,01 \text{ mA}} = \underline{7,1 \text{ k}\Omega} \quad (1\text{Punkt})$$

5.2. Basisspannungsstabilisierung (2 Punkte)

- Durch welches Halbleiterbauelement sollte R_2 ersetzt werden, um das Basispotential ($= U_{BE} + U_E$) weitgehend unabhängig von Schwankungen der Betriebsspannung U_B zu machen?
- Zeichnen Sie die neue Schaltung.

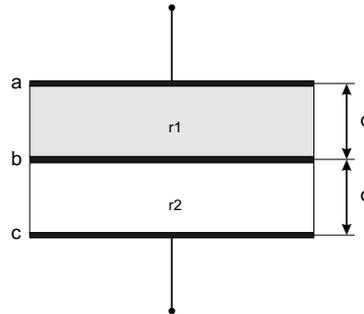
Lösung:

- - Z-Diode oder
- Reihenschaltung von x Dioden oder
- Widerstand in Reihe mit Diode
(1 Punkt)
- Schaltung



6. Aufgabe (5 Punkte): Berechnung einer Kapazität aus einer gegebenen Geometrie

Gegeben ist ein Parallelkondensator aus drei dünnen Metallplatten mit der Fläche $A = 60\text{cm}^2$. Dieser wird auf die Spannung $U = 800\text{V}$ aufgeladen und dann von der Spannungsquelle getrennt.



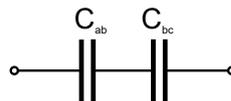
$$d = 10\text{mm}, \varepsilon_{r1} = 3, \varepsilon_{r2} = 1, \varepsilon_0 = 0,885 \cdot 10^{-13} \frac{\text{As}}{\text{Vcm}}$$

6.1. Ersatzschaltbild, Kapazität und Spannung (2 Punkte)

Geben Sie das Ersatzschaltbild für den Kondensator an, und bestimmen Sie die Gesamtkapazität und die Spannung U_{ab} zwischen den Platten a und b.

Hinweis: Die Ladung an den Platten bleibt erhalten !

Lösung:



$$\frac{1}{C_{ac}} = \frac{1}{C_{ab}} + \frac{1}{C_{bc}} \quad 0,5 \text{ Punkte} \quad (25)$$

$$C_{ac} = \frac{C_{ab} \cdot C_{bc}}{C_{ab} + C_{bc}} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_{r1} \cdot \frac{A}{d} \cdot \varepsilon_0 \varepsilon_{r2} \cdot \frac{A}{d}}{\varepsilon_0 \varepsilon_{r1} \cdot \frac{A}{d} + \varepsilon_0 \varepsilon_{r2} \cdot \frac{A}{d}}$$

$$= \varepsilon_0 \frac{A}{d} \cdot \frac{\varepsilon_{r1} \cdot \varepsilon_{r2}}{\varepsilon_{r1} + \varepsilon_{r2}} = \varepsilon_0 \frac{A}{d} \cdot \frac{3}{4} = 3,98\text{pF} \quad 0,5 \text{ Punkte} \quad (26)$$

$$U_{ac} = U_{ab} + U_{bc} \quad (27)$$

$D_{ab} = D_{bc} = D$ ist unabhängig von epsilon, also bleibt konstant

$$D = \varepsilon_{ab} E_{ab} = \varepsilon_{bc} E_{bc} = \varepsilon_{ab} \frac{U_{ab}}{d} = \varepsilon_{bc} \frac{U_{bc}}{d} \quad 0,5 \text{ Punkte} \quad (28)$$

$$\text{aus (5) folgt: } \frac{U_{ab}}{U_{bc}} = \frac{\varepsilon_{bc}}{\varepsilon_{ab}} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_{r2}}{\varepsilon_0 \varepsilon_{r1}} \rightarrow \frac{U_{ab}}{U_{bc}} = \frac{1}{3} \quad (29)$$

$$U_{ac} = U_{ab} + U_{bc} = U_{ab} + 3 \cdot U_{ab} = 4 \cdot U_{ab} \quad (30)$$

$$U_{ab} = \frac{U_{ac}}{4} = 200\text{V} \quad 0,5 \text{ Punkte} \quad (31)$$

6.2. Spannung am Kondensator (1,5 Punkte)

Der Abstand der Platten b und c wird durch Verschieben der Platte c auf 20mm vergrößert. (Zwischen den Platten b und c befindet sich Luft und das Dielektrikum ändert sich beim Verschieben nicht.) Wie groß sind die Spannungen U_{ab} und U_{bc} .

Lösung:

Die Spannung zwischen den Platten a und b bleibt konstant.

$$U_{ab} = 200V \quad 0,5 \text{ Punkte} \quad (32)$$

$$D = \varepsilon_{ab} E_{ab} = \varepsilon_{bc} E_{bcn} = \varepsilon_{ab} \frac{U_{ab}}{d} = \varepsilon_{bc} \frac{U_{bcn}}{2d} \quad 0,5 \text{ Punkte} \quad (33)$$

$$\varepsilon_{ab} \frac{U_{ab}}{d} = \varepsilon_{bc} \frac{U_{bcn}}{2d} \quad (34)$$

$$\text{aus (10) folgt: } \frac{U_{ab}}{U_{bcn}} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_{r2}}{\varepsilon_0 \varepsilon_{r1}} \cdot \frac{d}{2d} = \frac{1}{6} \quad (35)$$

$$U_{bcn} = 6 \cdot U_{ab} = 6 \cdot 200V = 1200V \quad 0,5 \text{ Punkte} \quad (36)$$

6.3. Relative Dielektrizitätskonstante (1,5 Punkte)

Eine dielektrische Platte mit der Dicke 10mm wird zwischen die Platten b und c hineingeschoben. Die Spannung U_{acneu} beträgt nun 920V. Wie gross ist die relative Dielektrizitätskonstante ε_{rx} des Dielektrikums?

Lösung:

Die Spannung zwischen den Platten a und b bleibt weiterhin konstant

Der Kondensator besteht nun aus 3 Kondensatoren

gleicher Dicke d und in Reihe: 2 Dielektrika und 1 aus Luft.

$$U_{acneu} = U_{acalt} + U_x \quad (37)$$

$$\rightarrow U_x = U_{acneu} - U_{acalt} = 920V - 800V = 120V \quad 0,5 \text{ Punkte} \quad (38)$$

$$U_x = E_x \cdot d = \frac{D}{\varepsilon_x} \cdot d = \frac{Q}{A} \cdot \frac{d}{\varepsilon_x} \quad 0,5 \text{ Punkte} \quad (39)$$

$$U_x = \frac{C_{acalt} \cdot U_{acalt} \cdot d}{A \cdot \varepsilon_0 \varepsilon_{rx}} = \frac{\varepsilon_0 \frac{A}{d} \cdot \frac{3}{4} \cdot U_{acalt} \cdot d}{A \cdot \varepsilon_0 \varepsilon_{rx}} = \frac{\frac{3}{4} \cdot U_{acalt}}{\varepsilon_{rx}} \quad (40)$$

$$\varepsilon_{rx} = \frac{3}{4} \cdot \frac{U_{acalt}}{U_x} = \frac{3}{4} \cdot \frac{800V}{120} = 5 \quad 0,5 \text{ Punkte} \quad (41)$$