

VORBEREITUNG: TRANSISTOR

FREYA GNAM, GRUPPE 26, DONNERSTAG

1. TRANSISTOR-KENNLINIEN

Ein Transistor ist ein elektronisches Halbleiterbauelement, das zum Schalten und zum Verstärken von elektrischen Strömen und Spannungen verwendet wird. Bipolare Transistoren werden durch Stromfluss angesteuert. Die Anschlüsse werden als Basis, Emitter und Kollektor bezeichnet. Ein kleiner Strom auf der Basis-Emitter-Strecke kann dabei einen großen Strom auf der Kollektor-Emitter-Strecke steuern. Der npn-Bipolartransistor besteht aus drei dotierten Halbleiterschichten. Polt man die BE-Diode in Durchlassrichtung, die BC-Diode hingegen in Sperrrichtung, so fließt dennoch ein Strom durch die BC-Diode. Das liegt daran, dass die p-Schicht sehr dünn ist: Die Elektronen, die vom Emitter E über die Basis B abfließen müssten, können die dünne p-Schicht mithilfe des E-Feldes der BC-Diode überwinden und zum Kollektoranschluss fließen. Der CE-Strom wird also durch den BC-Strom gesteuert.

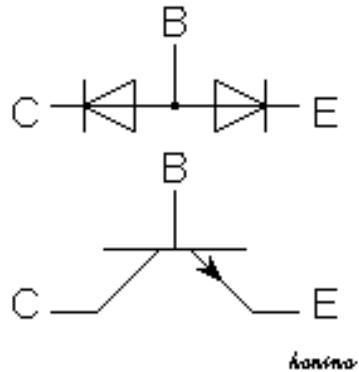


ABBILDUNG 1. Dioden-Ersatzschaltbild (oben) und Schaltzeichen eines npn-Transistors

1.1. Eingangskennlinien. Die Eingangskennlinie gibt beim Bipolartransistor den Basisstrom I_B in Abhängigkeit von der Basis-Emitter-Spannung U_{BE} an. Da U_{BE} über einem pn-Übergang abfällt, gleicht diese Kennlinie einer Diodenkennlinie: Bis zur Durchlassspannung verläuft sie nahe bei null, danach steigt sie steil an.

Wir messen die Basis-Emitterspannung U_{BE} in Abhängigkeit vom Basisstrom I_B .

Der Basisstrom I_B wird über einen Widerstand geregelt. Ein zweiter Widerstand begrenzt die maximale Verlustleistung und schützt den Transistor vor Überhitzung.

Der maximale Basisstrom $I_{B_{max}} = 100\mu A$ ist sehr gering. Die Messung von U_{BE} erfordert also hochohmiges Voltmeter, damit möglichst wenig Strom durch das Messgerät fließt.

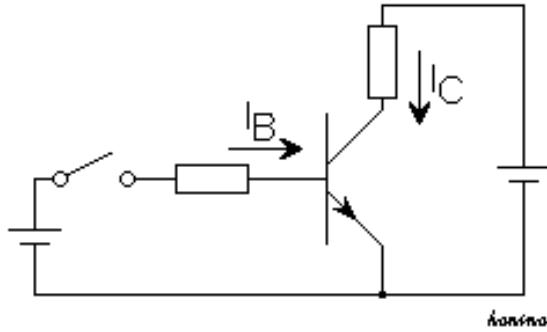


ABBILDUNG 2. Stromkreise beim Transistor

1.2. Ausgangskennlinien. Die Ausgangskennlinie gibt den Kollektorstrom I_C in Abhängigkeit von der Kollektor-Emitter-Spannung U_{CE} bei konstantem Basisstrom an. Die Ausgangskennlinien steigen zunächst steil an. Dort arbeitet der Transistor im linearen Bereich. Ab einem bestimmten Basisstrom bleiben sie in etwa konstant (die Steigung geht gegen Null; die Kennlinie wird praktisch waagerecht). Dort arbeitet der Transistor im Sättigungsbereich.

Wir messen I_C , bzw. die Spannung die am Widerstand R_E abfällt, und die Kollektor-Emitter-Spannung U_{CE} bzw. die Spannung $U_{CE} + U_{Re}$.

Vor der Messung überzeugen wir uns davon, dass die Spannung am Widerstand R_E klein im Vergleich zur Gesamtspannung am Transistor ist. Dann gilt: $U_{CE} \approx U_{CE} + U_{Re}$.

Die beiden Spannungen werden im X-Y-Betrieb des Oszilloskops übereinander dargestellt und in den ersten Quadranten des Vier-Quadranten-Kennliniefeldes eingetragen.

1.3. Steuerkennlinie. Die Steuerkennlinie gibt den Kollektorstrom in Abhängigkeit vom Basisstrom an. Für einen weiten Bereich verläuft sie linear. Dort gilt $I_C = BI_B$, wobei B der Stromverstärkungsfaktor ist. Mit Hilfe der in 1.1 und 1.2 gemessenen Werte, kann man die $\frac{I_C}{I_B}$ -Kennlinie in den 2. Quadranten des Vier-Quadranten-Kennliniefeldes einzeichnen.

2. ÜBERLAGERUNGSTHEOREM

Das Überlagerungstheorem besagt, dass in einer Schaltung mit linearen Bauelementen und mit mehreren Spannungsquellen die Spannung zwischen zwei beliebigen Punkten gleich derjenigen Spannung ist, die sich zwischen diesen Punkten einstellen würde, wenn nur eine der Quellen aktiv wäre. Entsprechendes gilt auch für Ströme in beliebigen Zweigen der Schaltung.

Wir überprüfen das Überlagerungstheorem, indem wir eine Schaltung nach Abbildung 15 aufgebauen und die Spannung U_{R3} über den Widerstand R_3 messen.

2.1. Exemplarische Rechnung. Mit dem Überlagerungstheorem ergibt sich:

Rechteckspannung U_{Re} durch Innenwiderstand $R_i = 50\Omega$ ersetzt.

$$\begin{aligned}
 R_{Ges} &= R_2 + \left(\frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_i + R_1} \right)^{-1} = 1751,1\Omega \\
 \rightarrow I &= \frac{U_{GL}}{R_{Ges}} = 6,853mA \\
 \rightarrow U_{R2} &= R_2 I = 10,28V \\
 \Rightarrow U_{R3} &= U_{GL} - U_{R2} = 1,72V
 \end{aligned}$$

Gleichspannung U_{GL} durch Innenwiderstand $R_i = 0\Omega$ ersetzt.

$$\begin{aligned} R_{Ges} &= R_1 + \left(\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right)^{-1} = 1270,5\Omega \\ \rightarrow I &= \frac{U_{Re}}{R_{Ges}} = \pm 6,297mA \\ \rightarrow U_{R1} &= R_1 I = \pm 6,297V \\ \Rightarrow U_{R3} &= U_{Re} - U_{R1} = \pm 1,703V \end{aligned}$$

In Summe ergibt sich eine Rechteckspannung mit den Scheitelwerten:

$$U_1 = 1,72V + 1,70V = 3,42V \quad U_2 = 1,72V - 1,70V = 0,02V$$

3. TRANSISTORSCHALTUNGEN

3.1. Transistor als Schalter. Liegt an einem Transistor keine Basis-Emitter-Spannung an, so fließt auch kein Basis-Kollektor-Strom, d.h. der Transistor sperrt. Legt man nun eine kleine Spannung zwischen Basis und Emitter an, so ist der Transistor auf Durchlass geschaltet.

Wählt man zwei Basiströme, deren Arbeitspunkte (Schnittpunkte Arbeitsgerade/Ausgangskennlienien) nahe bei $I_C = 0A$ liegen, so sperrt der Transistor.

Die Arbeitsgerade des Transistors wird durch die Arbeitspunkte vorgegeben. Sie hängt von der Betriebsspannung U ab und ist proportional zum Verbraucherwiderstand R_C :

$$U_{CE} = U - R_C I_C$$

Wählt man nun auf dieser Geraden einen Arbeitspunkt nahe bei $U_{CE} = 0V$ so fließt ein großer Strom.

Da der Basis-Emitter-Strom sehr viel kleiner als der Emitter-Kollektor-Strom ist ($I_C \gg I_B$) kann die Verlustleistung durch eine Hyperbel angenähert werden:

$$P = U_{CE} I_C$$

Die maximale Verlustleistung P_{max} beschreibt, wieviel Energie der Transistor in Wärme umsetzen kann, ohne durch Überhitzung Schaden zu nehmen. Die Arbeitsgerade sollte deswegen bei Dauerbetrieb immer unterhalb der Verlustleistungs-Hyperbel liegen.

Betreibt man den Transistor jedoch als Schalter, so besteht die Gefahr der Überhitzung nicht: Die Arbeitspunkte liegen unterhalb der Hyperbel (entweder I_C oder U_{CE} ist klein) und der kritische Bereich wird nur kurzfristig erreicht. Die Arbeitsgerade darf hier also die Verlustleistungs-Hyperbel schneiden.

Bestimmung der Verlustleistung des Transistors. Misst man den Emitter-Kollektor-Strom I_C und die Emitter-Kollektor-Spannung U_{CE} bei verschiedenen Basisvorwiderständen so lässt sich daraus die Verlustleistung des Transistors $P = U_{CE} I_C$ bestimmen.

Schließt man den Schalter S_1 bei offenem Schalter S_2 so liegt eine Spannung zwischen Basis und Emitter. Der Transistor ist auf Durchlass geschaltet und die Glühlampe leuchtet.

Öffnet man den Schalter S_1 und schließt S_2 , so liegen Basis und Emitter auf dem gleichen Potential. Der Transistor sperrt und die Glühlampe geht aus.

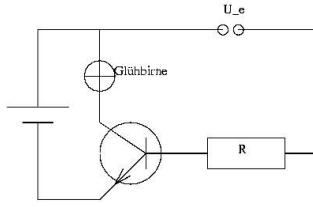


ABBILDUNG 3. Transistor als Schalter

3.2. Verstärker in Emitterschaltung. Schaltung nach Abbildung 2 des Aufgabenblatts. Der variable Widerstands R_V wird so eingestellt, dass die Hälfte der Betriebsspannung am Transistor und die andere Hälfte an R_C abfällt:

$$U_{CE} = U_{R_c} = 6V.$$

Damit ergibt sich für die Arbeitsgerade:

$$U_{CE} = U_0 - R_C I_C$$

Diese Arbeitsgerade und der Arbeitspunkt $U_{CE} = 6V$ werden in das Kennlinienfeld aus Aufgabenteil 1 eingetragen.

Kenngrößen des Transistors. Aus dem Kennlinienfeld lassen sich die Kenngrößen des Transistors entnehmen:

- Basis-Emitter-Widerstand r_B aus dem 3.Quadranten:

$$r_B = \frac{\Delta U_{BE}}{\Delta I_B}$$

- Kollektor-Emitter-Widerstand r_C aus dem 1.Quadranten:

$$r_C = \frac{\Delta U_{CE}}{\Delta I_C}$$

- Stromverstärkungsfaktor β aus dem 2.Quadranten:

$$\beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B}$$

Schaltungskenngrößen des Transistors. Aus den Transistorkenngrößen und den Widerständen lassen sich die dynamischen Schaltungskenngrößen berechnen:

- Eingangsimpedanz Z_e :

$$Z_e = r_B + R_B$$

- Ausgangsimpedanz Z_a :

$$Z_a = \left(\frac{1}{r_C} + \frac{1}{R_C} \right)^{-1} = \frac{r_C R_C}{r_C + R_C}$$

- Spannungsverstärkung v :

$$v = \frac{U_a}{U_e} = \beta \frac{Z_a}{Z_e}$$

r_C und β sind vom Betriebzustand fast unabhängig und können als konstant betrachtet werden.

Experimentelle Bestimmung der Schaltungskenngrößen. Die Spannungsverstärkung v lässt sich direkt mithilfe des Oszilloskops messen.

Um die Eingangsimpedanz Z_e zu bestimmen, schaltet man einen regelbaren Widerstand R in Reihe zwischen Spannungsquelle und Eingang und stellt ihn so ein, dass am Verstärker nur noch die halbe Quellenspannung anliegt. Dann gilt:

$$Z_e = R$$

Um Ausgangsimpedanz Z_a zu bestimmen, legt man einen regelbaren Widerstand R an den Verstärkerausgang und stellt ihn so ein, dass die Ausgangsspannung auf den halben Wert absinkt. Dann gilt:

$$Z_a = R$$

Glätten des Signals mit einem Kondensator. Man benutzt einen Kondensator um das Signal zu glätten und damit den Spannungsabfall zu mindern. Es gilt:

$$U_a \sim I_B = I_{B_0} e^{-\frac{t}{\tau}}$$

mit $\tau = r_B C_1$.

$f = 1kHz \rightarrow t_0 = \frac{1}{2000s}$. Die Spannung soll nur um 2% abfallen:

$$\begin{aligned} -\frac{t_0}{\tau} &> \ln(0,98) \\ \rightarrow \quad \tau = r_B C_1 &> -\frac{t_0}{\ln(0,98)} \\ \Rightarrow \quad C_1 &> \frac{0,02475s}{r_B} \end{aligned}$$

3.3. RC-Oszillator mit Transistorvorverstärkung in Emitterschaltung. Versuchsaufbau nach Abbildung 12 des Aufgabenblatts.

Der Verstärker verschiebt die Phase des Eingangssignals um π . Für bestimmte Frequenzen verschieben die drei in Reihe geschalteten RC-Glieder das Signal ebenfalls um π und schicken es dem Verstärker als Eingangssignal wieder zurück. Dann oszilliert die Schaltung. Die Verschiebung durch die RC-Glieder beträgt gerade π für die Oszillatorkreisfrequenz $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{6RC}} \approx 955Hz$.