

Übungen zur Elektrodynamik und Optik

Übung 1: Der Transistor

Oliver Neumann
Sebastian Wilken

3. Mai 2006

Zusammenfassung

In dieser Experimentalübung werden wir den Transistor als Spannungsverstärker für eine sinusförmige Wechselspannung untersuchen. Dazu verwenden wir eine so genannte Emitterschaltung mit Stromgegenkopplung, welche wir nach der Dimensionierung auf einer Experimentierplatte zusammenlöten. Wir wollen dann mit Hilfe eines Oszilloskops die erwartete Spannungsverstärkung messen.

Inhaltsverzeichnis

1 Die wichtigsten Transistoreigenschaften	2
2 Emitterschaltung mit Stromgegenkopplung	3
3 Dimensionierung der Schaltung	4
4 Versuchsdurchführung	6
5 Literatur	7

1 Die wichtigsten Transistoreigenschaften

Vgl. Aufgabe 1

Der Transistor ist ein Halbleiterbauelement, welches in der Lage ist, Ströme und Spannungen zu verstärken. Man kann sich den Transistor als eine Kombination zweier gegeneinander geschalteter Dioden vorstellen. Dieses Ersatzschaltbild und auch der Transistor selbst verfügen über drei Anschlüsse, welche als *Basis* (B), *Kollektor* (C) und *Emitter* (E) bezeichnet werden. Man unterscheidet je nach Orientierung der beiden Dioden zwischen npn- und pnp-Transistoren. Wir werden uns in dieser Übung auf npn-Transistoren beschränken. Einen Vergleich zwischen dem Ersatzschaltbild aus zwei Dioden und dem tatsächlichen Transistor liefert Abbildung 1.

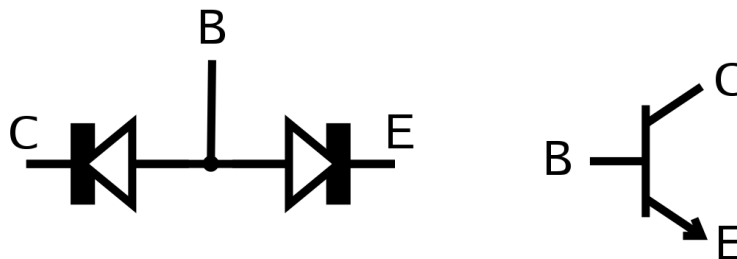


Abb. 1: Dioden-Ersatzschaltbild (links) und Schaltzeichen für einen npn-Transistor

Allerdings erhält man noch keinen funktionstüchtigen Transistor, wenn man zwei Dioden einzeln zusammenfügt. Das hängt damit zusammen, dass die beiden Dioden gemeinsame Basis ein Halbleiterelement sein muss, damit die Transistorwirkung erzielt wird.

Die Steuerung der Ströme geschieht im Transistor wie folgt: Der Transistor ist aus drei verschiedenen Halbleiterschichten aufgebaut. Wir wollen hier den npn-Aufbau betrachten, welcher über zwei negativ geladenen Schichten verfügt, die eine sehr dünne, positiv geladene Schicht einschließen. Wenn wir nun eine angemessen dosierte Spannung zwischen Emitter und Basis anlegen (bei Silizium-Transistoren üblicherweise 0,7 V), wird die positiv geladene Basis-Schicht mit Elektronen angereichert. Da diese aber sehr dünn ist, fließt nur ein geringer Teil zur Basis ab. Der weitaus größere Teil wandert zum Kollektor. Ohne einen angemessenen Basisstrom kann der Transistor also nicht arbeiten. Daher lässt sich die Funktion des Transistors mit Hilfe des Stroms an der Basis steuern. Es kommt nun zu einer Stromverstärkung, welche sich als Quotient aus Kollektor- und Basisstrom darstellt. Des Weiteren werden Kollektorstrom und Basisstrom zum Emitterstrom addiert.

Man unterscheidet drei Schaltungsvarianten für den Transistor. In der Praxis verfügt ein Transistor über je zwei Ein- und Ausgangsklemmen. Da er mit Basis, Emitter und Kollektor jedoch nur drei Anschlüsse besitzt, führen je nach Schaltung zwei Klemmen an einen Anschluss. Diese drei Möglichkeiten sehen

wie folgt aus:

- Die **Basisschaltung**. Hier ist die Basis des Transistors der gemeinsame Bezugspunkt von Ein- und Ausgangssignal. Die Basisschaltung ähnelt der Emitterschaltung, mit dem Unterschied, dass die Basis auf Masse (0 V) liegt. Die Spannungsverstärkung ist äquivalent zur Emitterschaltung, jedoch beträgt die Stromverstärkung etwa 1. Die Basisschaltung verfügt über einen sehr geringen Eingangswiderstand. Der Ausgangswiderstand hingegen ist verhältnismäßig groß. Die Basisschaltung wird zum Beispiel für die Verstärkung von Hochfrequenzsignalen eingesetzt.
- Die **Emitterschaltung**. Hier liegt der Emitter auf Masse und stellt den gemeinsamen Bezugspunkt von Ein- und Ausgangsspannung dar. Transistoren werden meist in dieser Schaltung verwendet, da sie eine universelle Spannungsverstärkung liefert, die nur vom Emitter- und Kollektorwiderstand und somit nicht vom temperaturanfälligen Transistor abhängt. Die Emitterschaltung bietet zudem eine zwischen zehnfachen und 50fachen Gleichstromverstärkung. Der Eingangswiderstand dieser Schaltung ist vergleichsweise gering. Die Emitterschaltung wird in allen Bereichen der Elektronik eingesetzt, in der eine Strom- oder Spannungsverstärkung erwünscht ist.
- Die **Kollektorschaltung**. Bei dieser Schaltung ist der Kollektor der Bezugspunkt von Ein- und Ausgangsspannung. Eine andere Bezeichnung für diese Schaltung ist *Kollektorfolger*. Die Kollektorschaltung verfügt über einen hohen Eingangswiderstand und ihre Spannungsverstärkung liegt bei 1. Der Ausgangswiderstand hingegen ist klein, daher verwendet man diese Schaltung auch als Impedanzwandler.

2 Emitterschaltung mit Stromgegenkopplung

Im Gegensatz zur Vorlesung verwenden wir in dieser Übung einer Emitterschaltung mit Stromgegenkopplung. Die entsprechende Schaltskizze zeigt Abbildung 2. Wir wollen mit der Schaltung eine Wechselspannungsverstärkung erzielen.

Die Schaltung besteht im Wesentlichen aus einem Spannungsteiler, welcher aus den ohmschen Widerständen R_1 und R_2 besteht. Dieser teilt die Betriebsspannung U_b in einem bestimmten Verhältnis und liefert die gewünschte Spannung an die Basis des Transistors. Der Emitter und der Kollektor des Transistors sind durch die Widerstände R_E und R_C gegen Überspannungen geschützt. Das vom Funktionsgenerator erzeugte Eingangssignal U_e - eine sinusförmige Wechselspannung - gelangt über den Kondensator C_e zur Basis des Transistors. Der Kondensator dient der galvanischen Trennung der Gleichspannungspotenziale zwischen dem Funktionsgenerator und der Basis. Das Ausgangssignal U_a stellen wir mit Hilfe des Oszilloskops grafisch dar.

Der Vorteil der Emitterschaltung mit Stromgegenkopplung ist, dass ihre Spannungsverstärkung nur durch die ohmschen Widerstände R_C und R_E festge-

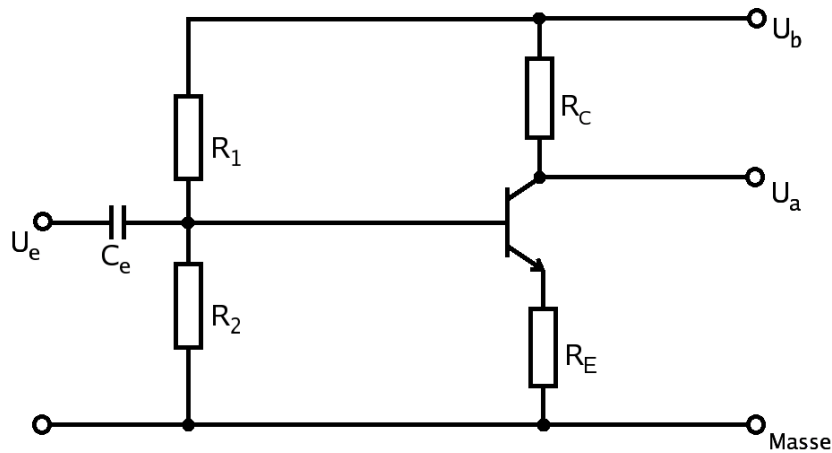


Abb. 2: *Emitterschaltung mit Stromgegenkopplung als Wechselspannungsverstärker*

legt wird. Ohmsche Widerstände weisen im Allgemeinen eine geringere Temperaturabhängigkeit als Transistoren auf. Daher zeichnet sich unsere Schaltung durch eine hohe Stabilität aus. Dies geht allerdings zu Lasten der Spannungsverstärkung, welcher bei einer herkömmlichen Emitterschaltung größer ist. Dort gilt nämlich:

$$v = \frac{\Delta U_a}{\Delta U_e} = \frac{\beta R_C}{r_{BE}} \quad (1)$$

Bei unserer Schaltung mit Stromgegenkopplung hingegen gilt für die Spannungsverstärkung:

$$v = \frac{\Delta U_a}{\Delta U_e} = -\frac{R_C}{R_E} \quad (2)$$

3 Dimensionierung der Schaltung

Vgl. Aufgabe 2

Nun gilt es die oben erläuterte Schaltung zu dimensionieren. Als Betriebsspannung U_b wählen wir am Netzgerät 10 V. Für den Kollektorstrom I_C wählen wir 1 mA, für die Emitterspannung $U_E = 2$ V und für die Kollektor-Emitter-Sättigungsspannung $U_{CE,sat} = 0,3$ V. Die Basis-Emitterspannung beträgt wie bei allen Silizium-Transistoren 0,7 V.

Nun kommen wir zur Berechnung der Widerstände: Durch R_1 fließt der Querstrom I_q und der Basisstrom I_B . Durch den Widerstand R_2 fließt nur der Querstrom I_q . Der Widerstand R_C wird vom Kollektorstrom I_C durchflossen. Durch

den Widerstand R_E fließt nicht nur I_C , sondern auch I_b . Da $I_B \ll I_C$ und $I_B \ll I_q$ kann man diesen Strom bei der Berechnung von R_1 und R_E vernachlässigen.

Berechnung von I_B :

$$I_C = I_b \cdot \beta \Leftrightarrow I_B = \frac{I_C}{\beta} = \frac{10^{-3} \text{ A}}{100} = 10 \mu\text{A} \quad (3)$$

Berechnung von I_q :

$$I_q = 10 \cdot I_b = 10 \cdot 10^{-5} \text{ A} = 10^{-4} \text{ A} \quad (4)$$

Über R_2 fällt die Spannung $U_2 = U_{BE} + U_E = 2,7 \text{ V}$ ab. Also gilt:

$$U_2 = R_2 \cdot I_q \Leftrightarrow R_2 = \frac{U_2}{I_q} = \frac{2,7 \text{ V}}{10^{-4} \text{ A}} = 27 \text{ k}\Omega \quad (5)$$

Über R_1 ist der Abfall der Spannung $U_1 = U_b - U_2 = 10 \text{ V} - 2,7 \text{ V} = 7,3 \text{ V}$. Dann gilt:

$$U_1 = R_1 \cdot I_q \Leftrightarrow R_1 = \frac{U_1}{I_q} = \frac{7,3 \text{ V}}{10^{-4} \text{ A}} = 73 \text{ k}\Omega \quad (6)$$

Die Widerstände R_E und R_C berechnen sich wie folgt:

$$R_E = \frac{U_E}{I_C} = \frac{2 \text{ V}}{10^{-3} \text{ A}} = 2 \text{ k}\Omega \quad (7)$$

$$R_C = \frac{U_B - U_{BE} - U_E - U_{CE,sat}}{2 \cdot I_C} \quad (8)$$

$$= \frac{10 \text{ V} - 0,7 \text{ V} - 2 \text{ V} - 0,3 \text{ V}}{2 \cdot 10^{-3} \text{ A}} = \frac{7 \text{ V}}{2 \cdot 10^{-3} \text{ A}} = 3,5 \text{ k}\Omega \quad (9)$$

Wir fassen zusammen:

- $R_1 = 73 \text{ k}\Omega$
- $R_2 = 27 \text{ k}\Omega$
- $R_E = 2 \text{ k}\Omega$
- $R_C = 3,5 \text{ k}\Omega$

Nun können wir die Spannungsverstärkung berechnen:

$$v = -\frac{R_C}{R_E} = -\frac{3,5 \text{ k}\Omega}{2 \text{ k}\Omega} = 1,75 \quad (10)$$

4 Versuchsdurchführung

Mit Hilfe der Farbcodierung suchen wir die geeigneten ohmschen Widerstände aus. Zur Sicherheit messen wir die Größe der Widerstände nochmals mit einem Ohmmeter aus. Für die Versuchsdurchführung haben wir folgende Widerstände gewählt:

- $R_1 = 72,7 \text{ k}\Omega$ (zusammengesetzt aus den in Reihe geschalteten Widerständen $R_{1a} = 68 \text{ k}\Omega$ und $R_{1b} = 4,7 \text{ k}\Omega$.)
- $R_2 = 27 \text{ k}\Omega$
- $R_C = 3,3 \text{ k}\Omega$
- $R_E = 1,8 \text{ k}\Omega$

Aufgrund der gewählten Widerstände erwarten wir folgende Spannungen:

- $U_E = R_E \cdot I_C = 1,8 \text{ V}$
- $U_2 = U_{BE} + U_E = 0,7 \text{ V} + 1,8 \text{ V} = 2,5 \text{ V}$
- $U_C = R_C \cdot 2 \cdot I_C = 3,3 \text{ k}\Omega \cdot 2 \cdot 10^{-3} \text{ A} = 6,6 \text{ V}$
- $U_1 = R_1 \cdot I_q = 72,7 \text{ k}\Omega \cdot 10^{-4} \text{ A} = 7,27 \text{ V}$

Für die Spannungsverstärkung unserer Schaltung erwarten wir:

$$v = -\frac{R_C}{R_E} = -\frac{3,3 \text{ k}\Omega}{1,8 \text{ k}\Omega} = 1,83 \quad (11)$$

Mittels eines Lötkolbens bauen wir die in Abb. 2 gezeigte Schaltung auf. Als Kondensator C_e verwenden wir ein Exemplar mit einer Kapazität von $C = 22 \text{ nF}$. Nun schließen wir das Netzgerät mit $U_b = 10 \text{ V}$ an. Mit Hilfe eines Oszilloskops überprüfen wir, ob die Gleichspannungspotenziale richtig vorliegen. Dabei haben wir folgende Spannungen gemessen:

- $U_2 = U_{BE} + U_E = 2,4 \text{ V}$
- $U_C = 6,4 \text{ V}$
- $U_E = 1,9 \text{ V}$

Im Rahmen der Messgenauigkeit stimmen die gemessenen Spannungen also mit den erwarteten Werten überein.

Nun schließen wir einen Funktionsgenerator (FG) an den Eingang der Schaltung an. Wir stellen am FG ein sinusförmiges Signal mit einer Frequenz von $f = 1 \text{ kHz}$ und einer Amplitude von $U_e = 0,5 \text{ V}$ ein. Am Ausgang der Schaltung haben wir dann mit Hilfe des Oszilloskops eine Amplitude von $U_a = 0,9 \text{ V}$ gemessen. Damit ergibt sich eine Spannungsverstärkung von:

$$v = -\frac{\Delta U_a}{\Delta U_e} = -\frac{0,9 \text{ V}}{0,5 \text{ V}} = 1,8 \quad (12)$$

Dieser Wert liegt ebenfalls in dem erwarteten Bereich.

Nun überprüfen wir durch Vergrößern von U_e die Aussteuerung. Unser Signal lag mittig im Aussteuerbereich, da es beim Minimum und beim Maximum beim Überschreiten von $U_b = 10 \text{ V}$ gleichmäßig abflachte.

5 Literatur

- <http://de.wikipedia.org/wiki/Bipolartransistor>
- <http://de.wikipedia.org/wiki/Transistorgrundschaltungen>
- <http://www.elektronik-kompodium.de/sites/slt/0205081.htm>
- <http://www.elektronik-kompodium.de/sites/slt/0204302.htm>
- <http://www.elektronik-kompodium.de/sites/slt/0204133.htm>