

Vorbereitung zum Versuch „Transistorschaltungen“

Armin Burgmeier (1347488) Gruppe 15

9. Dezember 2007

0 Grundlagen

0.1 Halbleiter

Halbleiter bestehen aus Silizium- oder Germanium-Gittern und haben im allgemeinen eine schlechte Leitfähigkeit. Durch Ersetzen einiger Gitteratome (Dotieren) mit fünfwertigen Atomen (Phosphor, Arsen) kann sie jedoch erheblich gesteigert werden. Die überschüssigen Elektronen fungieren dann als Ladungsträger, daher nennt man sie auch n-Halbleiter.

Dotiert man mit dreiwertigen Atomen (Bor, Indium) vergrößert sich die Leitfähigkeit ebenfalls. Elektrone anderer Atome können in die Elektronenlücke (Löcher) der dreiwertigen Atome eintreten. Dieses Wandern der Löcher kann man sich als freibewegliche positive Ladungsträger vorstellen (p-Halbleiter).

0.2 Halbleiterdiode

Grenzt ein n-Halbleiter an einen p-Halbleiter an, so findet ein Diffundierungsprozess statt. Freie Elektronen aus dem n-Halbleiter geraten in den p-Halbleiter und Löcher in den n-Halbleiter. Da die festen Ladungsträger ortsfest sind baut sich so eine Spannung auf, die ab einer bestimmten Größe die Diffusion kompensiert.

Legt man eine äußere Spannung mit dem Pluspol am n-Halbleiter an, so ist die Diode in Sperrrichtung geschaltet. Es werden weitere freie Elektronen vom n-Bereich in den p-Bereich übergehen und dort weitere Löcher kompensieren. Es fließt praktisch kein Strom.

Legt man die äußere Spannung aber anders herum an, so werden die Elektronen durch die Grenzschicht beschleunigt und es fließt ein Strom, dessen Stärke von der angelegten Spannung abhängt.

0.3 Transistor

Da im Versuch nur der npn-Transistor zum Einsatz kommt, wird hier auch nur dieser beschrieben. Er besteht aus jeweils einer Schicht aus n-, p- und n-Halbleiter, also zwei Grenzflächen. Liegt eine externe Spannung an den beiden

n-Schichten an, so ist einer der beiden Grenzflächen leitend und die andere nicht. Folglich wird also auch kein Strom fließen.

Legt man jedoch einen Strom an der Basis (p-Schicht) an, so fließt dieser wegen der leitenden Grenzfläche zwischen Basis und Kollektor. Da die p-Schicht sehr dünn ist diffundieren einige der Elektronen aus denen dieser Strom besteht aber in die Sperrschicht. Da nun Ladungsträger in der Sperrschicht vorhanden sind kann zwischen den n-Schichten plötzlich wegen der externen Spannung ein Strom fließen, der im allgemeinen sehr viel größer ist als der Basisstrom.

Auf diese Art und Weise können durch kleine Ströme an der Basis sehr viel größere zwischen Kollektor und Emitter gesteuert werden.

1 Kennlinien

1.1 Eingangskennlinie

In der nach Schaltung 13 in der Vorbereitungshilfe aufgebauten Schaltung messen wir verschiedene Wertepaare für den Basisstrom I_B und für die Spannung zwischen Basis und Emitter U_{BE} . Die sich ergebende Eingangskennlinie (U über I) wird in den dritten Quadranten eines Vier-Quadranten-Kennlinienfeldes eingetragen.

Das Spannungsmessgerät sollte möglichst hochohmig sein, da eine spannungsrichtige Messung vorgenommen wird und der gemessene Strom daher nicht stark von dem „echten“ Basisstrom abweichen soll.

1.2 Ausgangskennlinien

Die Ausgangskennlinie stellen wir an einem Oszilloskop im X/Y-Betrieb dar. Dazu wird die Schaltung wie in Bild 14 der Vorbereitungshilfe aufgebaut. Als Maß für die Stromstärke am Kollektor wird die abfallende Spannung U_Y an einem konstanten Widerstand $R = 2\Omega$ verwendet.

Aus technischen Gründen kann als X-Ablenkung nicht die Spannung U_{CE} zwischen Kollektor und Emitter verwendet werden, sondern es wird $U_{CE} + U_Y$ gemessen. Da der Widerstand R jedoch sehr klein ist, wird aber U_Y klein und somit vernachlässigbar gegenüber U_{CE} sein. Vor dem Experiment kann dies auch nochmal nachgemessen werden.

Da die Ausgangskennlinien abhängig vom Basisstrom sind, sollen mehrere Kennlinien bei unterschiedlichen Basisströmen aufgenommen werden. Der Basisstrom ist durch einen regelbaren Widerstand bestimmbar und wird so eingestellt, dass der Kollektorstrom I_C Werte von 10mA bis 50mA erreicht, in 10mA-Schritten. Die Kennlinien werden in den ersten Quadranten eingetragen.

1.3 Steuerkennlinie

Wir tragen I_C über I_B in den zweiten Quadranten des Kennlinienfeldes auf. Die nötigen Messwerte wurden bereits ermittelt.

2 Überlagerungstheorem

Das Überlagerungstheorem besagt dass in einer Schaltung mit mehreren Spannungsquellen die Spannung über zwei beliebigen Punkten die gleiche ist wie die Summe der Spannungen an diesen Punkten wenn jeweils nur eine der Spannungsquellen aktiviert ist. Dabei ist jeweils der Innenwiderstand nicht aktiver Spannungsquellen zu berücksichtigen.

In diesem Teil des Versuchs wollen wir das Überlagerungstheorem experimentell überprüfen. Dazu verwenden wir Schaltung 15 aus der Vorbereitungshilfe und messen die Spannung U_3 über $R_3 = 330\Omega$ mit einer, der anderen und zwei aktiven Spannungsquellen. Für die Spannung U_3^{Gl} , bei der nur die Gleichstromquelle aktiv ist, erwarten wir folgenden Wert:

Der Widerstand im gesamten Stromkreis ergibt sich aus einer Reihenschaltung von R_2 und einer Parallelschaltung von R_3 und R'_1 . Zu Beachten ist, dass zu dem Widerstand R_1 noch der Innenwiderstand R_i der deaktivierten Spannungsquelle hinzukommt: $R'_1 = R_1 + R_i$.

$$R_{ges}^{Gl} = \frac{1}{\frac{1}{R_1 + R_i} + \frac{1}{R_3}} + R_2 \quad (1)$$

Die verschiedenen Widerstandswerte sind gegeben.

Der Gesamtstrom im Stromkreis, welcher dem Strom durch den Widerstand R_2 entspricht, ergibt sich dann nach dem ohmschen Gesetz zu

$$I = \frac{U_{Gl}}{R_{ges}^{Gl}} \quad (2)$$

wobei U die an der Gleichstromquelle angelegte Spannung ist. Den Teil dieser Spannung, der am Widerstand R_2 abfällt lässt sich ebenfalls nach dem ohmschen Gesetz ermitteln

$$U_{R_2} = IR_2 = \frac{U_{Gl}}{R_{ges}^{Gl}} R_2 \quad (3)$$

und nach der Maschenregel findet man damit leicht die gesuchte, am Widerstand R_3 abfallende Spannung

$$U_{R_3}^{Gl} = U_{Gl} - U_{R_2} = U_{Gl} - \frac{U_{Gl}}{R_{ges}^{Gl}} R_2 \quad (4)$$

Nach dem gleichen Verfahren kann man die Spannung an R_3 für den umgekehrten Fall ermitteln, das heißt wenn die Gleichspannungsquelle abgeschaltet und die Rechteckspannung angelegt ist. Es ergibt sich

$$U_{R_3}^{Re} = U_{Re} - \frac{U_{Re}}{R_{ges}^{Re}} R_1 \quad (5)$$

mit

$$R_{ges}^{Re} = \frac{1}{\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}} + R_1 \quad (6)$$

Sind beide Spannungsquellen aktiviert müsste sich laut dem Überlagerungstheorem also ein Wert von $U_3 = U_{R_3}^{Re} + U_{R_3}^{Gl}$ ergeben. Setzt man die gegebenen Zahlenwerte und berücksichtigt, dass U_{Re} eine Rechtecksspannung, also sowohl negativ als auch positiv sein kann, so erhalten wir:

$$U_3 = 1,72V \pm 1,70V$$

3 Transistorschaltungen

3.1 Transistor als Schalter

3.1.1 Beschreibung des Transistors als Schalter

Will man den Transistor als Schalter benutzen, so nutzt man aus, dass er bei kleinen Basisströmen einen großen Kollektor/Emitter-Strom durchschaltet und bei gar keinem Basisstrom sperrt. Trägt man die sogenannte Arbeitsgerade

$$U_{CE} = U - I_C R_C \quad (7)$$

mit der Betriebsspannung U und dem Verbraucherwiderstand R_C in das Ausgangskennlinienfeld ein, so sind die Schnittpunkte mit den Kennlinien die Arbeitspunkte. Abbildung 3.1.1 zeigt für $U = 12V$ und $R_C = 25\Omega$ die Arbeitsgerade und zwei exemplarische Kennlinien für hohen und niedrigen Basisstrom.

Es ist deutlich zu sehen dass der Arbeitspunkt bei niedrigen Basisströmen nahe bei $I_C = 0A$ liegt, es fließt also nur sehr wenig Strom. Bei einem (relativ) hohen Basisstrom hingegen liegt er bei $I_C \approx \frac{U}{R_C}$.

Die Maximalleistung des Transistors beträgt $0,8W$, die elektrische Leistung am Transistor ist $U_{CE}I_C$. Auch diese Kurve ist im oben erwähnten Diagramm aufgetragen. Im Normalfall sollte die Arbeitsgerade die so entstehende Hyperbel nicht schneiden, da sonst bei ungünstig gewählten Arbeitspunkten eine größere elektrische Leistung entsteht als der Transistor verkraftet, was zu dessen Zerstörung führen kann. Da wir aber nur Arbeitspunkte nahe $I_C = 0$ und $U_{CE} = 0$ wählen geraten wir nicht oder nur sehr kurz in diesen kritischen Bereich.

3.1.2 Schaltung und Verlustleistung

Eine Spannungsquelle wird über einen Widerstand R_V an Kollektor und Basis des Transistors angeschlossen und bestimmt den Basisstrom. Der Verbraucher (eine Glühbirne) wird an eine zweite Spannungsquelle U und den Kollektor des Transistors in Reihe geschaltet (Schaltung 1 im Anhang).

Aus den gemessenen Werten von Strom I_C und Spannung U_{CE} können wir bei verschiedenen Basisvorwiderständen R_V die Verlustleistung des Transistors berechnen.

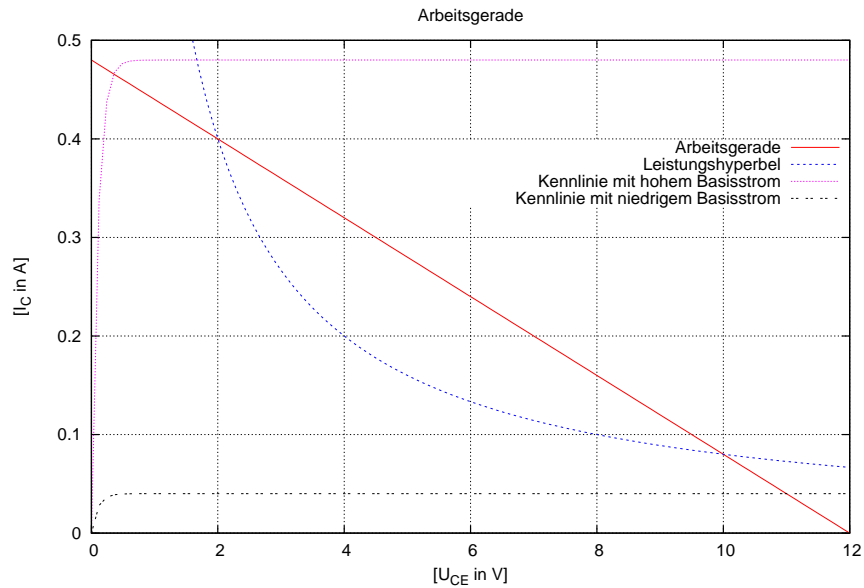


Abbildung 1: Arbeitsgerade und Leistungshyperbel

3.2 Verstärker in Emitterschaltung

3.2.1 Arbeitspunkt

Die Schaltung wird nach Bild 2 in der Vorbereitungshilfe aufgebaut. Durch Verändern des Basisvorwiderstands R_V kann der Arbeitspunkt verändert werden. Er soll so eingestellt werden, dass die Hälfte der Betriebsspannung $U = 6V$ am Transistor und die andere Hälfte am Kollektorwiderstand abfällt.

3.2.2 Arbeitsgerade und Transistorkenngrößen

Die Arbeitsgerade $U_{CE} = U - I_C R_C$ (bei einem Verbraucher mit Widerstand R_C) kann durch zwei bekannte Punkte (wie zum Beispiel bei $I_C = 0$ und $U_{CE} = 0$) direkt ins Kennlinienfeld eingetragen werden. Der Arbeitspunkt liegt bei $U_{CE} = 6V$ auf der Geraden. Die geforderten Transistorkenngrößen lassen sich wie folgt aus dem Kennlinienfeld am Arbeitspunkt entnehmen:

- Stromverstärkungsfaktor β

Der Stromverstärkungsfaktor $\beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B}$ wird dem zweiten Quadranten des Vier-Quadranten-Kennlinienfeldes entnommen.

- dynamischer Basis-Emitter-Widerstand r_B

Der dynamische Basis-Emitter-Widerstand $r_B = \frac{\Delta U_{BE}}{\Delta I_B}$ entspricht der Steigung der Eingangskennlinie im dritten Quadranten.

- dynamischer Kollektor-Emitter-Widerstand r_C

Der dynamische Kollektor-Emitter-Widerstand $r_C = \frac{\Delta U_{CE}}{\Delta I_C}$ entspricht der Steigung der Ausgangskennlinie im ersten Quadranten.

3.2.3 Berechnen der Schaltungskenngrößen

Die dynamischen Schaltungskenngrößen Spannungsverstärkung v , Eingangsimpedanz Z_e und Ausgangsimpedanz Z_a ergeben sich direkt aus den Transistor-kenngrößen und können durch Betrachtung von Ersatzschaltbildern wie in der Vorbereitungshilfe beschrieben ermittelt werden:

$$v = \frac{U_a}{U_e} = -\beta \frac{Z_a}{Z_e} \quad (8)$$

$$Z_e = R_B + r_B \quad (9)$$

$$Z_a = r_C + R_C \quad (10)$$

Die Werte sollen für zwei verschiedene Basisvorwiderstände $R_{B1} = 0\Omega$ und $R_{B2} = 680\Omega$ ermittelt werden. r_C und β sind nahezu konstant; aus demselben Grund aus dem wir auch nur eine Kennlinie dieser Größen aufgenommen haben: Sie sind vom Betriebszustand des Transistors unabhängig. r_B hängt allerdings stark vom Basisstrom ab. Daraus folgt direkt, dass die Änderung von $r_B + r_b$ der Änderung der Spannungsverstärkung v entspricht.

3.2.4 Messen der Schaltungskenngrößen

In der Emitterschaltung werden U_e und U_a an ein Oszilloskop angeschlossen. Im X/Y-Betrieb kann die Spannungsverstärkung $v = \frac{U_a}{U_e}$ dann direkt als Steigung abgelesen werden.

Um die Eingangsimpedanz zu bestimmen, messen wir die Spannung über einem regelbaren Widerstand R vor dem Verstärkereingang und stellen diesen anschließend so ein, dass genau die Hälfte der Ausgangsspannung daran abfällt. Dann muss die andere Hälfte am Eingang des Verstärkers abfallen und es gilt $Z_e = R$.

Die Ausgangsimpedanz kann man nach dem gleichen Verfahren bestimmen wobei der Widerstand aber an den Ausgang des Verstärkers angeschlossen ist.

3.2.5 Dachabfall am Koppelkondensator

Die Spannung am Kondensator beträgt

$$U(t) = U_0 e^{-\frac{t}{RC}} \quad (11)$$

und darf nach einer halben Periode des Rechtecksignals nicht unter 2% gesunken sein. Daraus ergibt sich die Bedingung

$$0,98U_0 = U_0 e^{-\frac{1}{2fRC}} \quad (12)$$

und daraus

$$C = -\frac{1}{\log(0,98) 2fR} \quad (13)$$

wobei $f = 1000\text{Hz}$ gegeben ist. R entspricht der Eingangsimpedanz und mit $R_B = 0$ (wie vorgegeben) gilt $R = R_B = 680\Omega$.

3.3 RC-Oszillator mit Transistorverstärkung in Emitterschaltung

Die Schaltung wird wie in Bild 12 der Vorbereitungshilfe aufgebaut. Am Oszilloskop lässt sich die Frequenz dann aus der Periodenlänge T bestimmen. Wie in der Vorbereitungshilfe beschrieben erwarten wir einen Wert von etwa $f \approx 950\text{Hz}$.