



Experimentelle Übungen für Fortgeschrittene

Transistor

März 2005

Transistoren gehören zu den grundlegenden Bauelementen der Halbleiterelektronik, die in analogen und digitalen Schaltungen als Verstärker oder Schalter genutzt werden. Sie kommen als stromgesteuerte bipolare und als spannungsgesteuerte unipolare (Feldeffekt) Transistoren vor. Neben Einzelbauelementen findet man Transistoren integriert in Operationsverstärkern und hoch integriert in den Chips moderner Computer.

Dieser Versuch behandelt die typischen Eigenschaften und einfache Anwendungen von Transistoren. Ausgehend von Strom-Spannungs-Kennlinien wird die Funktionsweise eines bipolaren Transistors in Emitterschaltung untersucht. Kennlinienfelder werden gemessen und die Wirkungsweise von Transistoren als Verstärker diskutiert. Auf einer Lochrasterplatte wird eine einfache Verstärkerschaltung zusammen gelötet und die Verstärkungskurven in Abhängigkeit von der Frequenz gemessen.

Kenntnisse

- Halbleiterphysik: Bändermodell, Akzeptoren, Donatoren, Fermienergie, pn-Übergang
- Eigenschaften und Kennlinie einer Diode
- Funktionsweise von bipolaren Transistoren
- Kennlinien von Transistoren, Kenngrößen
- Verstärker, Arbeitspunkteinstellung
- Hochpass, Tiefpass

Literatur

- [1] Hering, Bressler, Gutekunst: *Elektronik für Ingenieure*, Springer, 2001
- [2] Rohe: *Elektronik für Physiker*, Teubner Studienbücher, 1983
- [3] Tietze, Schenk: *Halbleiter-Schaltungstechnik*, Springer, 2002
- [4] Weddigen, Jüngst: *Elektronik*, Springer, 1993
- [5] <http://www.elektronik-kompodium.de/sites/bau/0201113.htm>
Das Elektronik-Kompodium: Halbleiterdioden
- [6] <http://www.elektronik-kompodium.de/sites/bau/0201291.htm>
Das Elektronik-Kompodium: Bipolarer Transistor

1 Grundlagen

1.1 Grundlagen der Halbleiterphysik

Dioden und Transistoren sind aus Halbleitern aufgebaut. Halbleiter weisen einen stark temperaturabhängigen spezifischen Widerstand auf: bei tiefen Temperaturen verhalten sie sich wie

Isolatoren und bei Raumtemperatur besitzen sie eine Materialabhängige spezifische Leitfähigkeit. Bekannte Elementhalbleiter sind Silizium und Germanium, zu den Verbindungshalbleitern gehören z. B. GaAs und InP. Die Leitfähigkeit in reinen Halbleitern beruht auf der Bewegung von Elektronen und Löchern (Eigenleitung), wobei die Konzentration von Elektronen und Löchern gleich ist ($n(T) = p(T)$). Durch den Einbau von Fremdatomen (Dotierung) kann die Leitfähigkeit erheblich beeinflusst werden (Störleitung). Man unterscheidet bei der Dotierung zwischen Donatoren (Elektronenspendern) und Akzeptoren (Elektronenfängern), die man als n- bzw. p-Halbleitern bezeichnet. Den Ladungstransport in Halbleitern veranschaulicht man sich am besten im sog. Bändermodell (siehe [1], Abb. 1.64).

1.1.1 Bändermodell

In Atomen wie z. B. Si können Elektronen nur diskrete Energieeigenzustände einnehmen, die einer quantenmechanischen Verteilungsfunktion für die Elektronen zugeordnet werden können. In einem Festkörper entstehen aus den Einzelniveaus (quasi) kontinuierliche Energiebänder, die durch eine Energielücke E_g getrennt sind. Es gibt (voll) besetzte und nicht voll besetzte bzw. leere Energiebänder. Das sog. Leitungsband ist bei tiefer Temperatur nicht besetzt, während das nächste tiefere Band, das Valenzband, bei tiefen Temperaturen voll besetzt ist. In Halbleitern können bei höheren Temperaturen Elektronen aus dem Valenzband in das Leitungsband angehoben werden, so dass mit steigender Temperatur die Leitfähigkeit ansteigt. Die Wahrscheinlichkeit für die Besetzung eines Energie-Niveaus ist gegeben durch die Fermi-Funktion. Die Fermienergie E_F gibt den Energiewert an, für den die Besetzungswahrscheinlichkeit für Elektronen $1/2$ ist. Bei Eigenleitung liegt E_F in der Mitte der Bandlücke. Bei Störleitung verschiebt sich die Fermi-Energie in der Nähe der Energieniveaus der Akzeptoren bzw. Donatoren.

1.1.2 p-n-Übergang

Wenn ein n- und ein p-dotierter Halbleiterbereich aneinandergrenzen, entsteht ein pn-Übergang (siehe [1], Kapitel 1.8.7). Elektronen diffundieren aus dem n-Bereich in den p-Bereich und Löcher diffundieren aus dem p-Bereich in den n-Bereich. Die n-Zone verarmt an beweglichen negativen und gleichzeitig verarmt die p-Zone an positiven Ladungsträgern, so dass der pn-Übergang hochohmig wird. Durch die Potentialdifferenz zwischen p- und n-Gebiet baut sich eine Diffusionsspannung U_d und damit ein elektrisches Feld auf. Dieses Feld wirkt der Diffusion der Ladungsträger entgegen und im Gleichgewicht fließt kein Strom mehr. Im Gleichgewicht gilt an jedem Ort $np = n_i = \text{const.}$ Im Bändermodell liegt das Fermi-Niveau überall auf gleicher Höhe und die Bandkante verschiebt sich zwischen dem p- und n-Gebiet um den Energiebetrag eU_d . Legt man eine Spannung in Sperrrichtung oder in Durchlassrichtung an den pn-Übergang an, wird das thermodynamische Gleichgewicht aufgehoben und die Bandkanten werden stärker oder schwächer verbogen. In Sperrrichtung (n-Seite positiv) gepolt verbreitert sich die Raumladungszone und die Leitfähigkeit nimmt weiter ab. In Durchlassrichtung gepolt verkleinert sich die Raumladungszone und ein Durchlass-Strom fließt.

1.2 Dioden

Dioden sind Halbleiterbauelemente mit asymmetrischer, nichtlinearer Strom-Spannungs-Kennlinie (Abb. 1). Im Idealfall hat die Diode in Durchlassrichtung einen unendlichen Leitwert und in Sperrrichtung einen unendlichen Widerstand. Eine Diode besteht im Allgemeinen aus einem pn-Übergang. Ausnahmen sind z. B. Schottky-Dioden mit einem Metall-Halbleiter-Übergang oder pin-Dioden mit einem zusätzlichen undotierten, eigenleitenden (intrinsic) Bereich. Bei Spezialdioden wie Z-Dioden oder Tunnelioden werden die Eigenschaften durch die Höhe der Dotierung festgelegt.

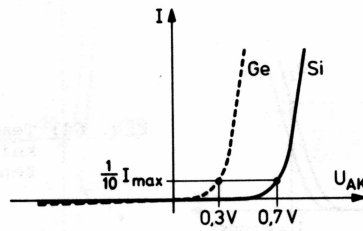


Abbildung 1: Diodenkennlinien

1.2.1 Kennlinie und Schaltverhalten

In Sperrichtung gepolt fließt durch die Diode nur ein kleiner Sperrstrom I_S ($10^{-9} \text{ A} - 10^{-6} \text{ A}$), weil bewegliche Ladungsträger aus der Verarmungsschicht angesaugt werden. In Durchlassrichtung zeigt die Diode einen exponentiellen Strom-Anstieg, der näherungsweise durch die Schokley-Gleichung beschrieben werden kann:

$$I = I_S \left(e^{eU/kT} - 1 \right), \quad (1)$$

mit der Elementarladung e , der Boltzmann-Konstanten k und der Temperatur T . Abweichungen treten im Durchlassbereich durch den Ohmschen Widerstand der Diode auf und im Sperrbereich knickt die Kennlinie bei der Durchbruchspannung U_D ab, weil die Elektronen stark beschleunigt werden und sich durch Stoßionisation vervielfachen (Lawinen- oder Avalanche-Effekt). Bei hochdotierten Z-Dioden ist die Sperrschicht schmal und durch die hohen Feldstärken werden Valenzelektronen herausgelöst. Dieser innere Feldemissionseffekt (Zenereffekt) führt zu niedrigen Durchbruchspannungen unterhalb von ca. 6 V. Der Umschaltvorgang einer Diode von der Durchlass- in die Sperrichtung benötigt eine endliche Zeit (Sperrerholzeit) abhängig von der Kapazität der Diode und der Beweglichkeit der Ladungsträger.

1.3 Transistoren

Transistoren sind Halbleiterbauelemente zum Verstärken und Schalten von Signalen. Man unterscheidet zwischen stromgesteuerten bipolaren Transistoren und spannungsgesteuerten unipolaren Transistoren sog. Feldeffekt-Transistoren (MOS-FET, JFET). Feldeffekt-Transistoren kann man als spannungssteuerbare Widerstände betrachten. In diesem Versuch werden ausschließlich bipolare Transistoren verwendet. Ein bipolarer Transistor besitzt drei Anschlüsse, die mit Basis (B), Emmitter (E) und Kollektor (C) bezeichnet werden. Ein Transistor besteht im einfachsten Fall aus drei Halbleiterschichten, die abwechselnd dotiert sind (n-p-n oder p-n-p).

Für den Betrieb wird die Basis-Emmitter-Diode in Durchlassrichtung und der Kollektor-Basis-Übergang in Sperrichtung betrieben (siehe Abb. 2). Es fließt ein Basis-Emmitter-Strom I_{BE} , der

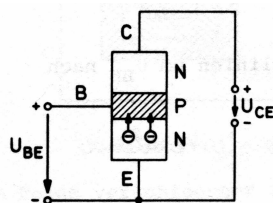


Abbildung 2: Transistor

wie bei jeder Diode exponentiell von der Spannung abhängt. Ein Teil der zur Basis fließenden

Elektronen diffundiert zum Kollektor, eine daran angelegte, gegenüber dem Emitter positive Spannung führt zu einem Stromfluss zum Kollektoranschluss. Mit einem Basisstrom kann man also einen Kollektorstrom steuern. Der Emitter ist höher dotiert als die Basis. Die Basis ist gering dotiert und schmal, während die Kollektorfläche größer ausgelegt ist. Für den sicheren Betrieb eines Transistors muss man bestimmte Grenzwerte beachten: den maximalen Kollektorstrom, die maximale Verlustleistung und die maximale Kollektor-Emitter-Spannung.

1.3.1 Kennlinien und Kenngrößen von Bipolar-Transistoren

Die verschiedenen Spannungen und Ströme am Transistor sind mehr oder weniger stark voneinander abhängig. Einen Überblick über die Eigenschaften eines Transistors erhält man, wenn man sich die Kennlinien verschiedener Größen in einem Vier-Quadranten-Kennlinienfeld grafisch aufträgt (Abb. 3).

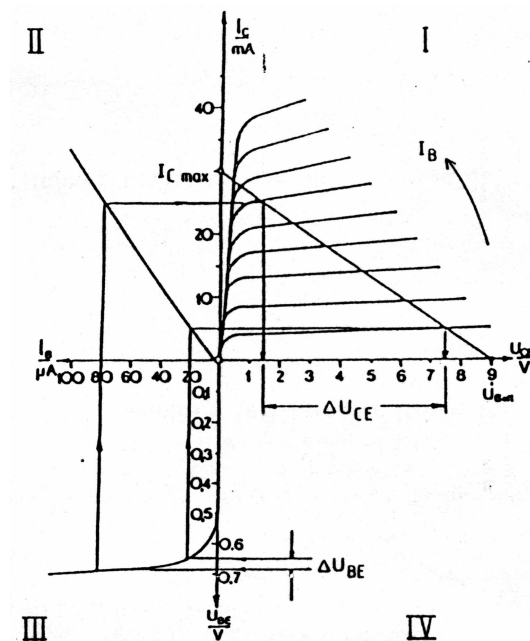


Abbildung 3: Kennlinienfelder eines Transistors.

Eingangskennlinie Abhängigkeit des Basisstroms von der Basis-Emitter-Spannung $I_B = I_B(U_{BE})$ bei $U_{CE} = \text{const.}$ (III. Quadrant). Die Eingangskennlinie ist eine typische Diodenkennlinie.

Ausgangskennlinie Abhängigkeit des Kollektorstroms von der Kollektor-Emitter-Spannung $I_C = I_C(U_{CE})$ bei $I_B = \text{const.}$ (I. Quadrant)

Stromverstärkungskennlinie/Übertragungskennlinie Abhängigkeit des Kollektorstroms vom Basisstrom $I_C = I_C(I_B)$ bei $U_{CE} = \text{const.}$ (II. Quadrant). Der Quotient $B = I_C/I_B$ heißt Stromverstärkungsfaktor und $\beta = \Delta I_C/\Delta I_B$ ist der differentielle oder dynamische Stromverstärkungsfaktor.

Rückwirkungskennlinie Abhängigkeit der Basis-Emitter-Spannung von der Kollektor-Emitter-Spannung $U_{BE} = U_{BE}(U_{CE})$ bei $I_B = \text{const.}$ (IV. Quadrant).

In der Praxis interessiert man sich im Wesentlichen für die Eingangs- und Ausgangskennlinie, da die Stromverstärkung im Arbeitsbereich linear ist und die Rückwirkungskennlinie für die Anwendung nur eine geringe Bedeutung hat. Das Ausgangskennlinienfeld ist normalerweise eine Schar von Kennlinien für verschiedene Basisströme.

1.4 Grundsaltungen mit einem Bipolar-Transistor

Man unterscheidet zwischen Emitter-, Basis- und Kollektorschaltung, je nachdem welche Elektrode als Bezugspotential dient, d. h. welche Elektrode sowohl für den Eingang als auch für den Ausgang als Bezugspunkt dient. Die Kollektorschaltung weist einen großen Eingangs- und einen kleinen Ausgangswiderstand auf, so dass sie sich als Impedanzwandler eignet. Die Basisschaltung wird zur HF-Spannungsverstärkung eingesetzt. Die häufig verwendete Emitterschaltung weist einen niedrigen Eingangs- und einen hohen Ausgangswiderstand auf. Ihre Spannungs- und Stromverstärkung ist groß, so dass sich die Emitterschaltung als Verstärker und Schalter eignet.

1.4.1 Emitter-Schaltung

In der Emitterschaltung (Abb. 4) wird ein Lastwiderstand R_C am Kollektor dadurch berücksichtigt, dass man in das Ausgangskennlinienfeld (Abb. 3) eine Widerstandsgerade einzeichnet, die durch $I_{RC} = (U_V - U_{CE})/R_C$ beschrieben wird. Darin ist U_V die feste Betriebsspannung.

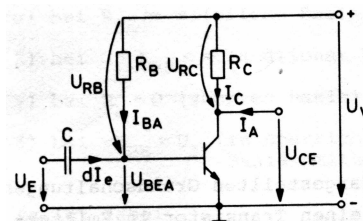


Abbildung 4: Transistor in Emitterschaltung

Die möglichen Betriebszustände sind dann durch $I_{RC} = I_C$ definiert, d. h. durch Schnittpunkte der Widerstandsgeraden mit einer der Ausgangskennlinien. Die Betriebszustände werden durch den Basisstrom bzw. die Basis-Emitter-Spannung eingestellt. Je nach Anwendung legt man den Arbeitspunkt z. B. in die Mitte des verfügbaren Bereiches, um eine gute lineare Aussteuerung in einer Verstärkerschaltung zu erzielen oder in den stromlosen bzw. maximal stromführenden Bereich zum Schalten von Signalen in Digitalanwendungen. Die dynamische Stromverstärkung der Emitterschaltung weicht etwas von β ab.

Der Eingangswiderstand R_{in} der Emitterschaltung ist durch den differentiellen-Widerstand $r_{BE} = \partial U_{BE} / \partial I_B$ zwischen Basis und Emitter gegeben, welcher näherungsweise durch $r_{BE} = kT / eI_B \approx 25 \text{ mV} / I_B$ beschrieben werden kann. Der Ausgangswiderstand R_{out} entspricht in der Emitterschaltung ungefähr dem Kollektor-Widerstand R_C .

Etwas robustere Verstärkerschaltungen bezüglich der Linearität und Stabilität erhält man durch eine Gegenkopplung. Bei der Gegenkopplung wird ein Teil des Ausgangssignals auf den Eingang zurückgekoppelt und von der Eingangsspannung abgezogen. Dadurch reduziert sich die Verstärkung, aber die Stabilität erhöht sich. Ein Beispiel ist die Emitterschaltung mit Stromgegenkopplung, bei der ein zusätzlicher Emitterwiderstand (siehe [1], Kapitel 3.2.1.1) eingebaut ist. Die Verstärkung $V = -R_C / R_E$ hängt dann nur noch von der äußeren Beschaltung ab und nicht mehr von den Transistorparametern.

1.5 Schaltungen mit zwei Bipolar-Transistoren

Differenzverstärker Als eine Kombination aus Kollektorschaltung und Basisschaltung kann man die unsymmetrische Differenzverstärkerschaltung ansehen. Es wird die Differenz der Spannungen, die am nichtinvertierenden und am invertierenden Eingang anliegen verstärkt. Der Differenzverstärker ist das Kernstück eines Operationsverstärkers. Die Differenzverstärkung sollte möglichst groß und die Gleichtaktverstärkung möglichst klein sein (Gleichtaktunterdrückung).

Kippschaltungen Als Kippschaltungen (Multivibratoren) bezeichnet man Schaltungen, die zwischen zwei Zuständen hin und her schalten können. In der Regel bestehen Kippschaltungen aus zwei Transistoren, von denen einer im leitenden, der andere im nichtleitenden Zustand ist. Es gibt somit drei Varianten: instabil–instabil (astabiler Multivibrator), stabil–stabil (bistabiler Multivibrator, Flip-Flop) und instabil–stabil (monostabiler Multivibrator).

1.6 Hoch- und Tiefpass

Hoch- und Tiefpass-Filter (siehe [2], Kapitel 1.1.3) sind Schaltungen, die nur hohe bzw. tiefe Frequenzen eines Eingangssignals zum Ausgang übertragen. Ein Tiefpass kann durch ein RC-Glied realisiert werden (siehe Abb. 5). Der Kondensator stellt einen Blindwiderstand mit der

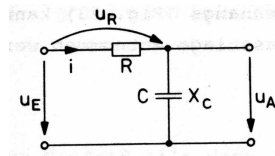


Abbildung 5: Tiefpass

Größe $X_C = 1/i\omega C$ dar. Für die Ausgangsspannung U_A gilt:

$$U_A = U_E \frac{X_C}{R + X_C} = U_E \frac{1}{1 + i\omega RC}. \quad (2)$$

Anhand des Betrages der Übertragungsfunktion

$$\frac{|U_A|}{|U_E|} = \frac{1}{\sqrt{1 + \omega^2 R^2 C^2}} \quad (3)$$

erkennt man das Frequenzverhalten des Tiefpass-Filters. Den Frequenzgang eines Filters oder Verstärkers stellt man meistens in Form eines Bode-Diagramms dar, wobei die Übertragungsfunktion bzw. die Verstärkung und die Frequenz logarithmisch gegeneinander aufgetragen werden. Der Logarithmus des Verhältnisses von Ausgangsleistung zur Eingangsleistung wird in der Einheit „Bel“ bzw. „dB“ angegeben:

$$\log \frac{|U_A|^2}{|U_E|^2} \text{ Bel} = 20 \log \frac{|U_A|}{|U_E|} \text{ dB}. \quad (4)$$

Bei der Grenzfrequenz $\nu_g = 1/2\pi RC$ wird gerade die Hälfte (3 dB) der Eingangsspannung durchgelassen.

1.7 Konzeption eines Verstärkers

Aufgabe eines Verstärkers ist es eine kleine Wechselspannung von einigen mV zu verstärken. Einen einfachen Verstärker kann man mit einem Transistor in Emitterschaltung realisieren (Abb. 6). Dabei legt R_C und eine zu verwendende Batteriespannung von etwa 8 V die Arbeitsgerade im I. Quadranten (siehe Abb. 3) zwischen den Punkten $(U_{CE}, I_C) = (U_{\text{Batt.}}, 0)$ und $(0, I_{C,\text{max}})$ fest. Für den Verstärkerbetrieb ist der Bereich interessant, in dem I_C wesentlich von I_B und nur wenig von U_{CE} abhängt. Der Arbeitspunkt der Schaltung wird durch R_B bestimmt (siehe [2], Kapitel 2.2.1). Der Eingangsstrom I_E teilt sich zwischen den parallel geschalteten Widerständen R_B und r_{BE} auf, womit I_B im Arbeitspunkt festgelegt ist. Die fest eingestellte Basisspannung liegt im Durchlassbereich der Basis-Emitter-Diode ($U_{BE} \approx 0.7 \text{ V}$). Mit dem Basisstrom ist dann auch die Ausgangskennlinie $I_C(I_B, U_{CE})$ festgelegt. Der Schnittpunkt dieser Kennlinie mit der

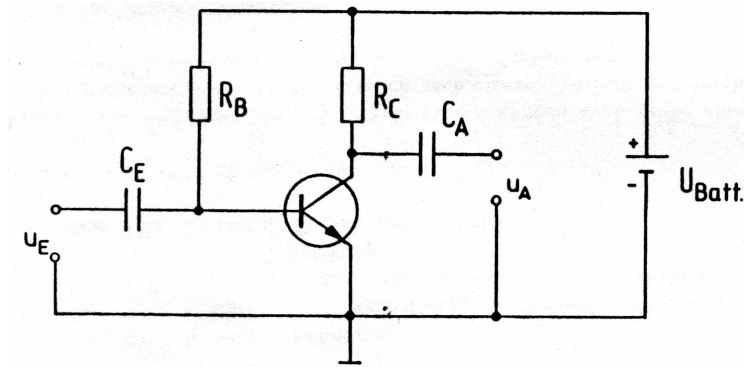


Abbildung 6: Verstärkerschaltung

Widerstandsgeraden ergibt die Ausgangsspannung U_{CE} und den Ausgangsstrom I_C . Wird der fest eingestellten Basisspannung eine kleine Wechselfspannung überlagert, so führt die Änderung ΔU_{BE} zu einer verstärkten Änderung der Kollektorspannung ΔU_{CE} . Die Kondensatoren C_E und C_A bewirken eine auf Gleichspannungen bezogene Entkopplung von U_E und U_A von U_{BE} bzw. U_{CE} und legen in weiten Bereichen den Frequenzgang des Verstärkers fest.

2 Geräte und Zubehör

- Computer zur Messwerterfassung
- A/D- und D/A-Wandler
- Oszilloskop Tektronix TDS 1002
- Multimeter
- Frequenzgenerator HP
- Bipolare Transistoren BC547C
- Widerstände, Kondensatoren, Kabel, ...
- Lötstation, Lochrasterplatine, Steckbrett

3 Aufgaben & Hinweise

- **Zur Vorbereitung:**
Leiten Sie sich einfache Gleichungen zur Dimensionierung, der für die Verstärkerschaltung benötigten Widerstände und Kapazitäten her. Nehmen Sie hierzu, unter Berücksichtigung der Kenngrößen des Transistor am Arbeitspunkt (r_{BE} , β , U_{BE} , I_B), die Spannungsverstärkung V_U ihres Verstärkers, sowie eine untere Grenzfrequenz ν_g als vorgegeben an. Beachten Sie, dass die Versorgungsspannung als konstant angenommen werden kann.
- **Transistor:**
Stellen Sie mit einem digitalen Multimeter fest, ob es sich bei dem Transistor um einen npn- oder um einen pnp-Transistor handelt. Bestimmen Sie die Anschlüsse Basis, Emitter und Kollektor.
- **Kennlinienfeld:**
Bauen Sie auf dem Steckbrett eine Emitterschaltung mit einem Basis- und einem Kollektorwiderstand auf. Verbinden Sie die Schaltung entsprechend den Vorgaben mit den Analog-Digital-Wandlern. Nehmen Sie mit dem Computer das Kennlinienfeld auf.

- Konzeption des Verstärkers:
Bestimmen Sie die Stromverstärkung β . Überlegen Sie sich anhand des Kennlinienfeldes einen sinnvollen Arbeitspunkt für den Verstärker. Dimensionieren Sie die Widerstände entsprechend. Mit den Kondensatoren wird der Frequenzgang festgelegt. Folgende Vorgaben könnten gemacht werden: Eingangsspannung $U_E \approx 3 \text{ mV}$, Verstärkung $V_U \approx 100$, untere Abschnidefrequenz $\nu_g \approx 1 \text{ kHz}$.
- Aufbau der Verstärkerschaltung:
Bauen Sie die Verstärkerschaltung auf dem Steckbrett auf und/oder nutzen Sie die Lochrasterplatine zum Löten.
- Messung der Verstärkung und des Frequenzganges:
 - Legen Sie an die Schaltung eine Versorgungsspannung von etwa 8 V an. Überprüfen Sie den Arbeitspunkt. Bestimmen Sie hierzu folgende Parameter des Verstärkers am Arbeitspunkt: U_{Batt} , U_{CE} , I_C , U_{BE} , I_B und r_{BE} .
 - Messen Sie den Frequenzgang des Verstärkers für eine feste Eingangsspannung von ca. $2\text{-}5 \text{ mV}$ und erstellen Sie ein Bode-Diagramm. Wo liegt die untere und wo die obere Abschnidefrequenz? Diskutieren Sie insbesondere mögliche Ursachen für die obere Abschnidefrequenz.
 - Messen Sie die Verstärkung einer kleinen Wechselfpannung für verschiedene Eingangsspannungen (ca. $2\text{-}1000 \text{ mV}$) bei zwei verschiedenen Frequenzen; einmal unterhalb und einmal oberhalb der unteren Abschnidefrequenz. Bestimmen Sie näherungsweise für beide Messpunkte die Phasendifferenz zwischen Eingangs- und Ausgangsspannung. Ab welcher Eingangsspannung beobachten Sie nichtlineare Verzerrungen des Ausgangssignals. Skizzieren Sie Ihre Beobachtungen und diskutieren Sie den sinnvollen Betriebsbereich ihres Verstärker.
 - Diskutieren Sie ihre Ergebnisse. Vergleichen Sie hierzu insbesondere die Konzeption ihres Verstärkers mit ihren experimentellen Resultaten und benennen Sie mögliche Ursachen für Abweichungen.
- Interessierte Studenten können zusätzlich eine Emitterschaltung mit Stromgegenkopplung aufbauen.

4 Fragen zur Vorbereitung

- Worin unterscheiden sich Halbleiter von Metallen und Isolatoren?
- Was versteht man unter Eigenleitung und Störleitung in einem Halbleiter?
- Wie sehen die Ladungsdichte, die elektrische Feldstärke und das Potential in einem pn-Übergang aus?
- Was passiert am pn-Übergang, wenn man eine Spannung in Durchlassrichtung oder in Sperrichtung anlegt? Wie sieht der pn-Übergang dann im Bändermodell aus?
- Wie ist ein bipolarer Transistor aufgebaut?
- Wie sehen die Eingangskennlinie, die Ausgangskennlinie und die Stromverstärkungskennlinie eines Transistors in Emitterschaltung aus?
- Wie legt man den Arbeitspunkt in einer Emitterschaltung fest?
- Wodurch wird das Frequenzverhalten des Verstärkers in Abbildung 6 beeinflusst? Handelt es sich am Eingang und am Ausgang der Emitterschaltung um einen Hochpass oder Tiefpass? Wie groß sind der Eingangswiderstand und der Ausgangswiderstand der Emitterschaltung?