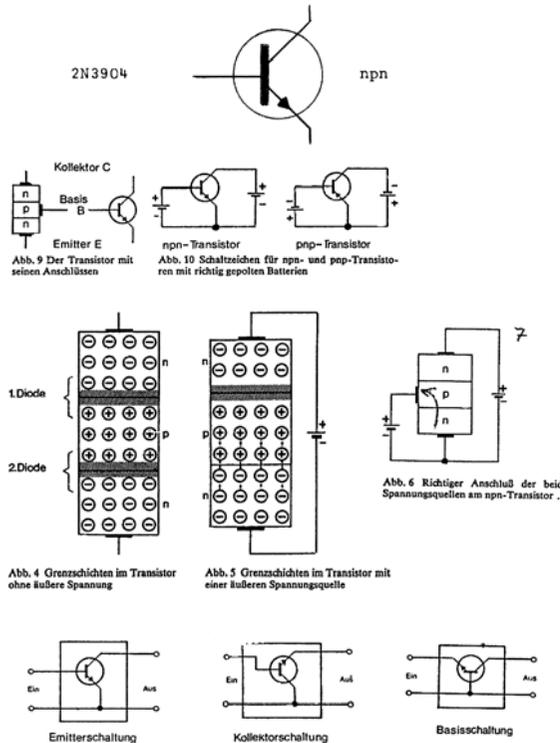


TRANSISTOR

GP II



Stichworte

Halbleiter; Bändermodell und Leitfähigkeit; p-n-Grenzschicht, Halbleiterdiode; Transistor; Verstärkerschaltungen.

Ziele des Versuchs

Einführung in Funktionsgrundlagen und elementare Schaltungstechniken.

Literatur

[1]: Kapitel 16.3.5, 16.4.1 mit 16.4.3

[3]: Kapitel 9.2.1, 9.2.2, 9.2.5, 9.3.1 mit 9.3.3

Skript *HALBLEITER* im allgemeinen Teil dieser Praktikumsanleitung

Aufgaben

1. Aufnahme und Konstruktion des (statischen) Kennlinienfeldes eines npn-Transistors (2N3904) für eine angenommene Betriebsspannung (Versorgungsspannung) von 12 V. Bestimmung der Stromverstärkung für den statischen Fall.

Aufbau einer Verstärkerstufe mit einer Parallel-Gegenkopplung zur Stabilisierung.

2.1 Dimensionierung der Schaltung: Abschätzung des Arbeitswiderstandes des Basis-Vorwiderstandes.

2.2 Experimentelle Überprüfung der Kollektor-Widerstandsgeraden durch Variation des Basis-Vorwiderstandes und Bestimmung der Stromverstärkung.

2.3 Verstärkung einer Eingangs-Wechselspannung als Signal. Messung der Spannungsverstärkung und Vergleich mit der theoretischen Erwartung.

Physikalische Grundlagen

Funktionsgrundlagen des Transistors

Siehe Darstellungen in der Literatur und im Skript *HALBLEITER* im allgemeinen Teil dieser Praktikumsanleitung.

Transistorschaltungen

Es gibt unterschiedliche Möglichkeiten einen Transistor zu betreiben. Je nachdem, ob Emitter (E), Basis (B) oder Kollektor (C) auf dem gemeinsamen Bezugspotential der Schaltung liegen (Masse, Erde), unterscheidet man zwischen einer *Emitter-, Basis- oder Kollektorschaltung*. Im Rahmen dieses Versuchs soll nur die Emitterschaltung behandelt werden.

Kenngrößen und Kennlinienfelder

Ein Transistor wird durch drei Ströme und drei Spannungen beschrieben: I_B , I_C , I_E und U_{EC} , U_{BC} und U_{EB} .

Die Summe der drei Ströme ist Null, wobei in den Transistor hineinfließende Ströme positiv, und herausfließende Ströme negativ gezählt werden:

$$(1) \quad I_B + I_C + I_E = 0$$

Entsprechend gilt für die Spannungen:

$$(2) \quad U_{EC} = U_{BC} + U_{EB}$$

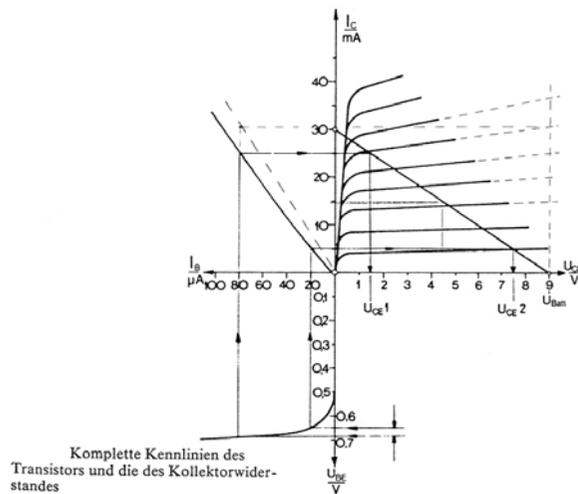
Von den sechs Variablen sind immer zwei nach (1) und (2) von den anderen vier abhängig und können durch sie ausgedrückt werden.

In der Emitterschaltung kann der Transistor zunächst als Stromverstärker aufgefasst werden, bei der eine kleine Basisstromänderung ΔI_B eine große Kollektorstromänderung ΔI_C verursacht. Der Stromverstärkungsfaktor und andere Kenngrößen des Transistors bzw. der Schaltung können dem sogenannten Vier-Quadranten-Kennlinienfeld entnommen werden, in dem die Abhängigkeiten der vier unabhängigen Variablen untereinander dargestellt sind.

Aus dem Kennlinienfeld lassen sich ablesen:

- Im ersten Quadranten der Ausgangswiderstand (U_{EC}/I_C),
- im zweiten Quadranten die Stromverstärkung (I_C/I_B),
- im dritten Quadranten der Eingangswiderstand (U_{EB}/I_B) und
- im vierten Quadranten die Spannungsrückwirkung (U_{EB}/U_{EC}).

(siehe Abbildung des Kennlinienfeldes auf der folgenden Seite).



Aus den Kennlinien des ersten Quadranten wird deutlich, dass die Größe des Kollektorstroms nur wenig von der Emitter-Kollektor-Spannung abhängt. Dies ist eine günstige Eigenschaft, da so ein Spannungsabfall am Verbraucher nur zu einer geringen "Gegensteuerung" der Verstärkung führt.

Der zweite Quadrant gibt die Stromverstärkung β wieder, die in weiten Bereichen praktisch konstant ist:

$$(3) \quad \beta = \frac{I_C}{I_B} \quad \text{bzw.} \quad = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B}$$

Der dritte Quadrant entspricht im Wesentlichen einer "normalen" Diodenkennlinie in Flussrichtung; hier der Emitter-Basis-Diode.

Der vierte Quadrant beschreibt, inwiefern eine Änderung der Emitter-Kollektor-Spannung auf die Basis-Spannung rückwirkt (Spannungsrückwirkung, *Durchgriff*).

Leistungshyperbel

Der Strom durch den Transistor führt in Verbindung mit dem nichtverschwindenden Eigenwiderstand zu einer Verlustleistung und Eigenerwärmung, die bei großen Werten zu einer Zerstörung führen kann. Die maximal zulässige Verlustleistung $U_{EC} \cdot I_C$ (unter Vernachlässi-

gung der Basisleistung) lässt sich im Ausgangskennlinienfeld (1. Quadrant) als *Leistungshyperbel* eintragen.

Arbeitswiderstand und Spannungsverstärkung

Bei gegebener Versorgungsspannung U_0 im Kollektorkreis lässt sich der Kollektorstrom durch einen Widerstand R_A (Arbeitswiderstand) begrenzen. An dem Widerstand fällt in Abhängigkeit vom Strom ein Teil der Versorgungsspannung ab, so dass auch die Kollektor-Spannung U_{CE} begrenzt wird. Da der Spannungsabfall vom Kollektorstrom abhängt, bildet diese Grenze im Ausgangs-Kennlinienfeld eine fallende Gerade (*Kollektor-Widerstandsgerade*), die durch die beiden Punkte $I_C = U_0/R_A$ für $U_{EC} = 0$ (Kurzschlussfall) und $U_{EC} = U_0$ für $I_C = 0$ (Sperrfall) festgelegt ist.

Der Arbeitswiderstand muss so gewählt werden, dass die Widerstandsgerade die Leistungshyperbel nicht schneidet.

Mit einem Arbeitswiderstand stellt die Emitterschaltung einen einfachen Spannungsverstärker dar. Durch den Arbeitswiderstand tritt am Kollektor eine Spannungsänderung auf, die der Stromänderung proportional ist. Das Verhältnis $\Delta U_{EB}/\Delta U_{EC}$ wird als *Spannungsverstärkung* v bezeichnet:

$$(4) \quad v = \frac{\Delta U_{EC}}{\Delta U_{EB}} = \frac{R_A \cdot \Delta I_C}{\Delta U_{EB}} \quad \left| \cdot \frac{\Delta I_B}{\Delta I_B} \right. = \frac{\beta \cdot R_A}{r_{EB}}$$

wobei r_{EB} der *differentielle Eingangswiderstand* $\Delta U_{EB}/\Delta I_B$ ist.

Ein solcher einfacher Verstärker arbeitet invertierend, d.h. eine Spannungs- bzw. Stromerhöhung am Eingang bewirkt wegen des ansteigenden Kollektorstroms und des größeren Spannungsabfalls am Arbeitswiderstand eine Spannungserniedrigung am Ausgang.

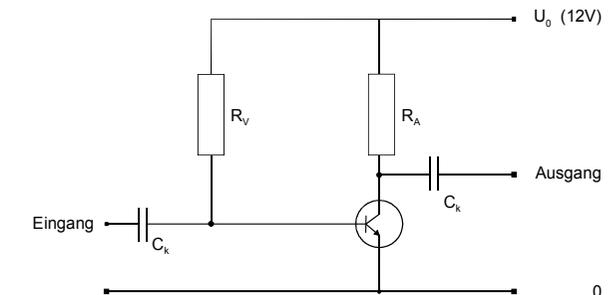
Arbeitspunkt

Ein Transistor verstärkt nur im Bereich positiver Emitter-Basis-Ströme. Damit Wechselstromsignale unverzerrt übertragen werden können, muss der Basis ein positiver Gleichstrom überlagert werden. Der zugehörige Punkt in den Kennlinienfeldern wird als *Arbeitspunkt* bezeichnet. Als Arbeitspunkte werden oft die halben maximal zulässigen Kollektorströme bzw. die

halben Versorgungsspannungen gewählt. Der Arbeitspunkt bzw. der zugehörige Basisruhestrom kann durch einen sogenannten Basisvorwiderstand oder einen Spannungsteiler zur Versorgungsspannung hin eingestellt werden.

In den Anwendungen in Verstärkerschaltungen hat die Einrichtung eines Arbeitspunktes den Nachteil, dass auch im Ruhebetrieb ohne Signal am Eingang der Schaltung relativ hohe Ströme mit Leistungsverlusten im Kollektorkreis fließen («Class-A-Verstärker» in der HiFi-Technik).

In der folgenden Abbildung ist eine einfache Verstärkungsstufe mit einem Basisvorwiderstand R_V , einem Arbeitswiderstand R_A und zwei Koppelkondensatoren C_K dargestellt:



Statische und dynamische Kennlinienfelder

Die oben beschriebenen Kennlinienfelder unter Annahme frei vorgegebener Variablen, z.B. der Kollektor-Emitter-Spannung U_{EC} , werden als *statische Kennlinien* bezeichnet. Durch das Einfügen eines Arbeitswiderstandes kommt es jedoch zu erheblichen Rückwirkungen der abhängigen Größe (hier des Kollektorstroms durch den Spannungsabfall am Arbeitswiderstand) auf die unabhängige Variable. Man erhält für diesen Fall sogenannte *dynamische Kennlinien*, die sich erheblich von den statischen unterscheiden können.

Stabilisierung

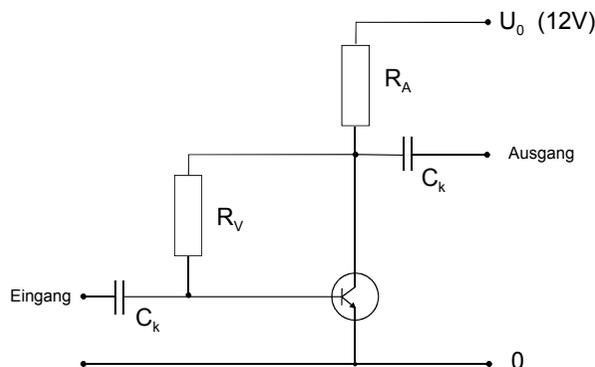
Da die Leitfähigkeit von Halbleitern stark von der Temperatur abhängig ist, muss man durch besondere Stabilisierungsmaßnahmen den Einfluss von Eigen- und Fremderwärmung auf die Eigenschaften einer

Schaltung gering halten. Die wichtigste Stabilisierungsart ist die *Gegenkopplung*. Gegenkopplung bedeutet, einen Teil des verstärkten Ausgangssignals invertiert auf den Eingang zurückzuführen, wodurch einer Veränderung des Verstärkungsverhältnisses entgegengewirkt wird. In Kauf genommen werden dabei muss eine Verringerung der Gesamtverstärkung.

Es gibt verschiedene Arten der Gegenkopplung. Welche geeignet ist, hängt vor allem vom Innenwiderstand der den Verstärker ansteuernden, vorhergehenden Stufe ab. Im vorliegenden Fall soll eine sogenannte *Parallelgegenkopplung* untersucht werden (siehe folgende Abbildung).

Nimmt die Verstärkung (bei unverändertem Eingangssignal), und damit der Kollektorstrom zu, so bewirkt dies wegen des Spannungsabfalls am Arbeitswiderstand ein Absinken des Kollektorpotentials. Da der Basisvorwiderstand R_V mit dem Emitter-Basis-Widerstand einen Spannungsteiler bildet, sinken somit auch das Basispotential und der Basisstrom, so dass der Kollektorstrom wieder herabgesetzt wird.

Das Maß der Stabilisierung wird insgesamt durch die Rückkoppelwirkung über den Basisvorwiderstand mit dem Rückkoppelverhältnis (Rückkoppelfaktor) $\alpha = \Delta U_{EB} / \Delta U_{EC}$ und die Spannungsverstärkung v beschrieben, die die "Vorwärts"-Wirkung einer Basispotentialänderung auf das Kollektorpotential bestimmt. Beide Daten werden dabei durch die Dimensionierung der Bauteile festgelegt.



Ist $\Delta U_{EC}'$ eine angenommene Kollektorpotentialänderung ohne Gegenkopplung, so verringert sie sich durch die Gegenkopplung auf:

$$(5) \quad \Delta U_{EC} = \Delta U_{EC}' - \alpha \Delta U_{EC} v$$

Aufgelöst nach der tatsächlichen Ausgangsspannungsänderung erhält man:

$$(6) \quad \Delta U_{EC} = \frac{\Delta U_{EC}'}{1 + \alpha v}$$

D.h., je größer der Rückkopplungsfaktor und je größer die Verstärkung, desto kleiner ist die tatsächliche Ausgangsspannungsschwankung.

Darstellung der physikalischen Grundlagen

(zur Vorbereitung als Teil des Berichts): Zusammenfassende Darstellung der Funktion des Transistors. Beschreibung und Diskussion des Kennlinienfeldes und der untersuchten Schaltungsbeispiele.

Apparatur und Geräte

Experimentierplatine (Steckbrett) mit Transistor und weiteren Bauelementen (Widerstände, Potentiometer).

Netzgerät 12 V; Batterie (1,5-V-Monozelle) für Basisstrom, verschiedene Multimeter.

Versuchsdurchführung und Auswertung

Allgemeine Hinweise

Der offene Aufbau der Schaltungen und die gleichzeitige hohe Auflösung der Digitalmultimeter haben eine gewisse Instabilität der Messwerte mit Zahlensalat zur Folge, was lästig, aber unvermeidlich ist. Im Rahmen der dabei möglichen Genauigkeit sollte nicht übermäßig penibel versucht werden, "glatte" Werte bei den Messvariablen einzustellen.

Die Grenzdaten des Transistors sind sorgfältig zu beachten (siehe Platzskript), um Überlastungen und eine Zerstörung des Transistors zu vermeiden.

Andererseits sind während der Messungen die Messdaten kritisch quantitativ zu beobachten (Größenord-

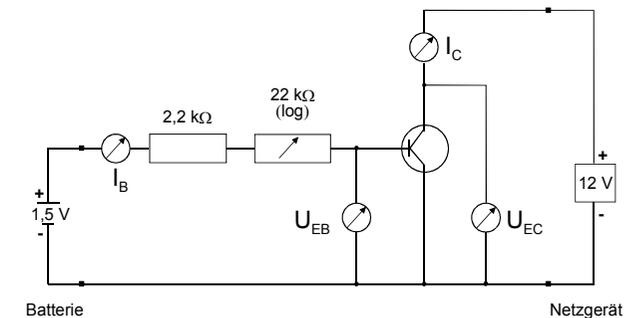
nung, qualitatives Verhalten, relative Stabilität), um rechtzeitig einen zerstörten Transistor zu erkennen.

Zu Aufgabe 1

Die Schaltung wird entsprechend der folgenden Abbildung aufgebaut. Achten Sie auf einen geeigneten Einsatz der zur Verfügung stehenden Messgeräte (Auflösung) und insbesondere auf spannungsrichtige Messungen im Basis- und im Kollektorkreis. Protokollieren Sie die Schaltung und den Einsatz der Messgeräte.

Kontrollieren Sie für jede Messeinstellung die Verlustleistung ($U_{EC} I_C$), um Überlastungen zu vermeiden.

Protokollieren Sie die Messdaten, und fertigen Sie zur Kontrolle eine messbegleitende grafische Darstellung an.



Es werden vier Datensätze (I_C und U_{EB} in Abhängigkeit von U_{EC}) mit $I_B = 30, 60, 90$ und $120 \mu A$ als Parameter aufgenommen. Der zweite und der dritte Quadrant des Kennlinienfeldes sollen für eine angenommene Versorgungsspannung von 12 V konstruiert werden. Aus dem zweiten Quadranten wird die statische Stromverstärkung I_C/I_B berechnet, und aus dem dritten Quadranten der differenzielle Eingangswiderstand r_{EB} . Die Bestimmung von r_{EB} kann dabei wegen der kleinen Spannungsdifferenzen und der Schwankung der Daten ungenau sein, und der Wert nur grob abgeschätzt werden.

Zu Aufgabe 2.1

Ein kleiner Arbeitswiderstand verursacht kleine Spannungsabfälle und ist ungeeignet zur Spannungsverstärkung. Ein zu großer Arbeitswiderstand könnte U_{EC} zu weit absinken lassen und damit strombegrenzend wirken. Eine geeignete *Ruhespannung* U_{EC} liegt bei der halben Versorgungsspannung der Schaltung (d.h. hier

6 V). Der Arbeitswiderstand R_A berechnet sich dabei aus dem erforderlichen Spannungsabfall am Arbeitswiderstand und dem Ruhestrom I_C am Arbeitspunkt, und der Basisvorwiderstand R_V aus U_{EC} abzüglich der Basis-Schwellspannung und dem Basis-Ruhestrom I_B am Arbeitspunkt.

Zu Aufgabe 2.2

Die Verstärkerschaltung wird gemäß der Schaltskizze auf Seite 3 mit den vorgehend ermittelten Werten für R_A und R_V aufgebaut, und für eine Versorgungsspannung von 12 V die Kollektor-Widerstandsgerade (U_{EC}/I_C) durch Variation des Basis-Vorwiderstandes gemessen. Dabei muss für die Auswertung der genaue Wert des Arbeitswiderstandes gemessen werden.

Tragen Sie die Messwerte (U_{EC}/I_C) zusammen mit der erwarteten Widerstandsgeraden in das Kennlinienfeld ein. Konstruieren Sie die dynamische I_B/I_C -Kennlinie und berechnen Sie daraus die dynamische Stromverstärkung.

Zu Aufgabe 2.3

Die Schaltung wird durch zwei 0,1- μ F-Koppelkondensatoren ergänzt (siehe Schaltskizze auf Seite 3), und auf den Eingang ein Sinus-Signal (etwa 1000 Hz) aufgeprägt (Funktionsgenerator *Voltcraft* 7202). Das Signal ist am Funktionsgenerator geeignet abzuschwächen (Abschwächer ATT-20-dB-Drucktaste /Attenuator/).

Der Eingangskreis mit dem Koppelkondensator und der Emitter-Basis-Widerstandsstrecke stellt bei dieser Schaltung einen R-C-Kreis, und damit einen frequenzabhängigen Spannungsteiler dar (Hochpass).

Beobachten Sie zunächst das Eingangssignal am Koppelkondensator und an der Basis des Transistors und das Ausgangssignal auf dem Oszilloskop (Span-

nungsverhältnis und Phasenlage in Abhängigkeit von der Frequenz). Protokollieren Sie die Beobachtungen. Wählen Sie versuchsweise einen größeren Basisvorwiderstand und vergrößern Sie das Eingangssignal.

Bestimmen Sie zum Schluss die Spannungsverstärkung durch Messung der Eingangs- und Ausgangsspannung mit dem HC-5050-DB-Multimeter.