

PS8

Halbleiter 2 - Transistor und Verstärkungsschaltungen

Version vom 11. April 2013

Inhaltsverzeichnis

1	Der Bipolartransistor	1
1.1	Grundlagen	1
1.1.1	Begriffe	1
1.1.2	Entwicklung des Bipolartransistors	1
1.1.3	Aufbau und Funktion eines Bipolartransistors	2
1.1.4	Transistor-Kennlinien	5
1.1.5	Elementare Anwendungen des Transistors	7
1.1.6	Verstärker-Grundsaltungen (Abb. 7)	8
1.1.7	Einstellung des Arbeitspunkts (Abb. 8)	9
1.1.8	Frequenzabhängigkeit der Verstärkung	12
1.2	Aufgabenstellung	12
1.3	Versuchsaufbau und Durchführung	13
2	Der Feldeffekt-Transistor	18
2.1	Grundlagen	18
2.1.1	Begriffe	18
2.1.2	Aufbau und Funktionsprinzip von FET	18
2.1.3	Verhalten eines J-FET (Junction-field-effect-transistor)	19
2.2	Aufgabenstellung	20
2.3	Versuchsaufbau und Durchführung	21

Lehr/Lernziele

- Besseres Verständnis für den Aufbau und die Funktionsweise eines Transistors sowie von Verstärkerschaltungen entwickeln.
- Physikalische Konzepte zur Funktionsweise eines Transistors verstehen.
- Aufbau und Funktionsweise verschiedener Verstärkerschaltungen (als technische Anwendungen von Transistoren) verstehen.

1 Der Bipolartransistor

1.1 Grundlagen

1.1.1 Begriffe

Energieband, Leitungsband, Valenzband, n- und p-Halbleiter, Diode, Transistor, Basis, Emitter, Kollektor, steuerbarer Widerstand, Kennlinien, Verstärker (Emitterschaltung, Basisschaltung, Kollektorschaltung), Strom- und Spannungsverstärkung, differentieller Widerstand, Gegenkopplung, Arbeitspunkt

1.1.2 Entwicklung des Bipolartransistors

Der Transistor ist zur Zeit wohl das am meisten verwendete Halbleiterbauelement. Er wurde im Jahre 1948 von William Shockley, John Bardeen und Walter H. Brattain erfunden (bipolarer Transistor, siehe Abb. 1). Der Transistor hat im Kleinsignalbereich und zunehmend auch im Leistungsbereich die Hochvakuumröhren seit den späten 1950er Jahren (fast) vollständig abgelöst und die Elektronik revolutioniert. Transistoren treten nicht nur als diskrete Bauelemente auf, sondern auch zu tausenden innerhalb von integrierten Schaltkreisen und Computerchips.

Das Wort Transistor entstand aus der Bezeichnung *transfer resistor* (übertragender Widerstand). Unter diesen Namen fallen zahlreiche verschiedene Transistortypen mit unterschiedlichem inneren Aufbau. Es sollen 2 wichtige Grundbauarten in der Folge angeführt werden: npn und pnp.

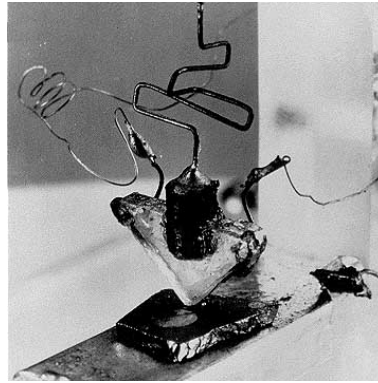


Abbildung 1: Erster Transistor: Erfindung von Shockley, Bardeen und Brattain

Wenn Sie PS7 noch nicht absolviert haben, sollten Sie nun den Aufbau und die Funktionsweise von Dioden in den Grundlagen zu PS7 studieren.

1.1.3 Aufbau und Funktion eines Bipolartransistors

Transistoren im üblichen Sprachgebrauch sind bipolare Transistoren. Bipolar, weil Elektronen und Löcher gemeinsam am Ladungstransport beteiligt sind. Der Strom im Transistor fließt abwechselnd über p- und n- dotierte Zonen. Die beiden Typen der bipolaren Transistoren werden gemäß ihres inneren Aufbaus auch *nnp-* bzw. *pnnp-* Transistoren genannt. Die drei Anschlüsse bezeichnet man als *Kollektor* (C), *Basis* (B) und *Emitter* (E). Abb. 2 (a) zeigt den schematischen Aufbau bipolarer Transistoren. Der Aufbau ist zwar prinzipiell symmetrisch, Kollektor und Emitter sind jedoch unterschiedlich stark dotiert.

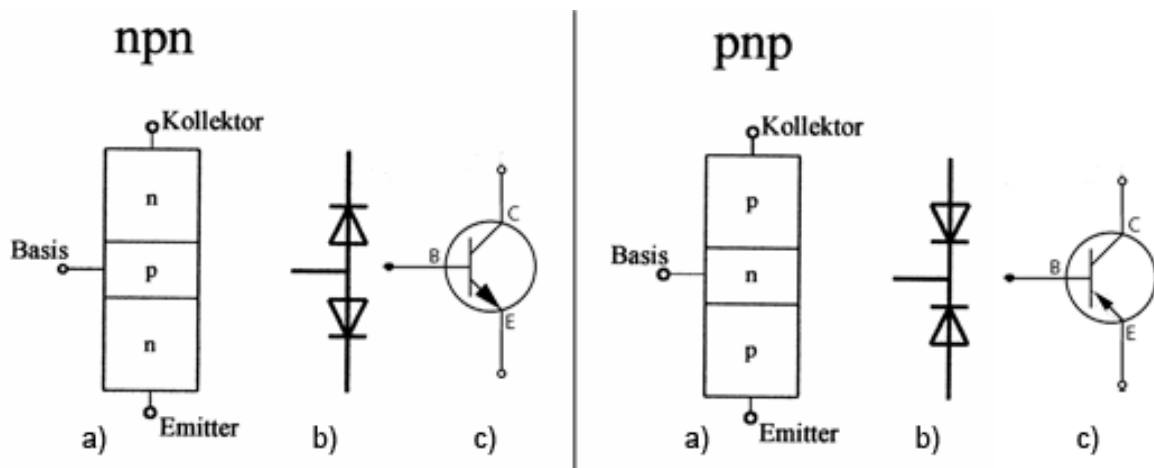


Abbildung 2: linke Seite: npn-Transistor, rechte Seite pnp-Transistor. Jeweils: a) schematischer Aufbau, b) innerer Aufbau (nur zur Vorstellungshilfe), c) Schaltzeichen

Die beiden pn-Übergänge könnte man ersatzweise als gegeneinandergeschaltete Dioden darstellen, wie in Abb. 2 (b) dargestellt ist. Das Bild mit getrennten Dioden hilft aber nur bei der Vorstellung über den Aufbau der Sperrschichten zwischen den dotierten Halbleitern und deren Sperr- bzw. Durchlassrichtung. Für die Funktion ist es jedoch wesentlich, dass die Basisschicht sehr dünn und beiden Dioden gemeinsam zugehörig ist. In Abb. 2 ist die Basisschicht unverhältnismäßig breit eingezeichnet. Abb. 2 (c) zeigt das Schaltzeichen. Anhand der Richtung des Pfeiles zwischen Basis und Emitter kann man den Transistor-Typus bestimmen, da er die Durchlassrichtung der BE-Diode zeigt.

Strom fließt vom höheren zum niedrigeren Potential (von Plus nach Minus), was als Stromrichtung¹ per Konvention definiert ist. Für die Bewegung von Ladungsträgern muss noch das Vorzeichen der Ladung berücksichtigt werden: Löcher (+) bewegen sich entlang der Stromrichtung, Elektronen (-) in entgegengesetzte Richtung. Für Elektronen gilt also, dass die Ladungsträgerflussrichtung entgegen der Stromrichtung erfolgt².

Für den npn-Transistor gilt also, bei einer (ausreichend hohen) positiven Potentialdifferenz zwischen Basis und Emitter, dass Löcher aus der Basis mit Elektronen aus dem Emitter rekombinieren können und überschüssige Elektronen an der Basis abgesaugt werden. Es kann also Strom von der Basis zum Emitter fließen bzw. Elektronen aus dem Emitter zur Basis. Die Basis-Kollektor-Strecke ist dagegen in Sperrichtung (vgl. Abb. 2, links, b), es fließt also nur der sehr kleine Sperrstrom und näherungsweise kann man sagen, dass kein Strom fließt.

Im Folgenden wird die Funktion des npn-Transistors erklärt (Abb. 3). Der pnp-Transistor funktioniert äquivalent, wenn man sich Elektronen durch Löcher ersetzt denkt und die Polarität der Spannungen umdreht. In Abb. 3 ist eine schematische Schaltung zur Erklärung des Funktionsprinzips dargestellt³. Als U_{BE} bezeichnet man die Spannung zwischen Basis und Emitter, mit U_{CE} jene zwischen Kollektor und Emitter und mit U_{CB} jene zwischen Kollektor und Basis.

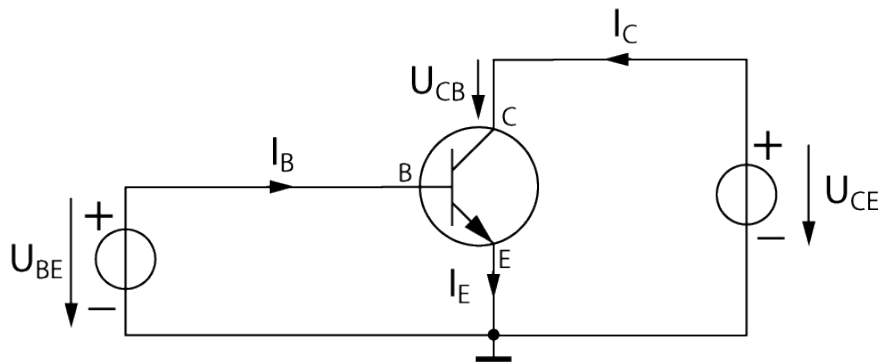


Abbildung 3: npn-Transistor in Emitterschaltung

Abb. 4 zeigt den npn-Transistor schematisch vergrößert. Im linken Bild ist die spannungs-

¹manchmal auch „technische“ Stromrichtung

²dieser Umstand wird im Schuljargon manchmal auch als „physikalische Stromrichtung“ bezeichnet

³Es fehlen die Vorwiderstände für beide Diodenstrecken zur Strombegrenzung.

freie Ausgangssituation dargestellt. Beide Sperrschichten sind ausgebildet, es gibt keinen Stromfluss. Die Basisschicht (zwischen den beiden Sperrschichten) ist wieder stark vergrößert dargestellt. Legt man eine positive Spannung U_{BE} von ca. 0,7 V an, so verschwindet

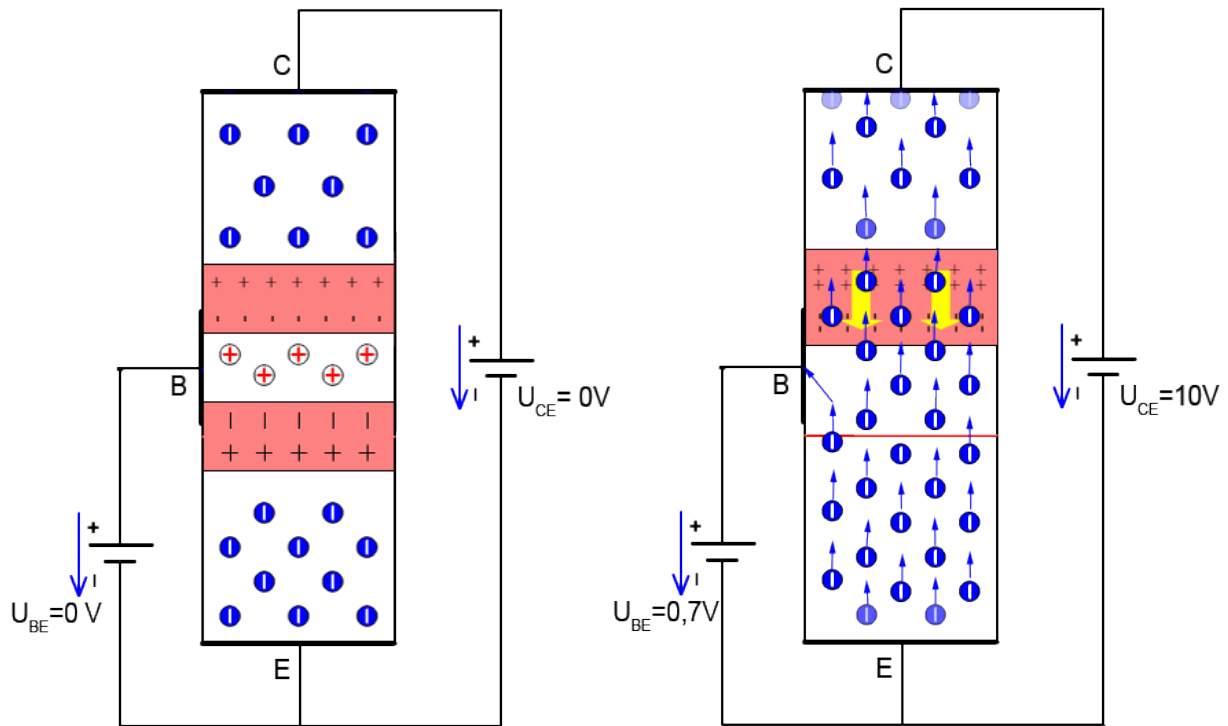


Abbildung 4: Funktionsprinzip eines npn-Transistors schematisch dargestellt. Raumladungszonen/Sperrschichten in oranger Farbe, Elektronen: blaue Kreise, Löcher: weiße Kreise, Elektrisches Feld: gelbe Pfeile

die Sperrschicht (Diode ist in Durchlassrichtung) und Elektronen gelangen in die Basis. Die Basiszone ist sehr dünn ($\approx 1\mu\text{m}$) und schwach dotiert. Daher haben die Elektronen wenig Gelegenheit mit Löchern aus der Basis zu rekombinieren. Weniger als 1% der Elektronen rekombinieren, diese ergeben den kleinen Basisstrom (wie bereits oben beschrieben). Die meisten Elektronen (mehr als 99%) diffundieren durch die dünne Basiszone über die Sperrschicht zwischen Basis und Kollektor (begünstigt durch die Richtung des elektrischen Feldes in dieser Sperrschicht) zum Kollektor und werden dort vom hohen Kollektorpotential abgesaugt. Vom Kollektor fließen sie weiter zum Pluspol der Spannungsquelle U_{CE} . Siehe hierzu Abb. 4, rechte Seite. Der Löcherstrom von Basis zu Emitter wurde aus Gründen der Übersichtlichkeit weggelassen. Aus den Kirchhoff'schen Gesetzen folgt daher $I_E \approx I_C$. So lassen sich mit kleinen Basisströmen große Kollektorströme steuern, oder anders gesprochen, mit geringen Spannungsunterschieden wird die Sperrschicht zwischen Basis und Emitter reguliert, was wie ein Ventil (bzw. ein steuerbarer Widerstand⁴ für den Strom zwischen Kollektor und Emitter wirkt.

⁴daher auch der Name „Transfer Resistor“

Zum besseren Verständnis der Vorgänge im Transistor empfehlen wir das Studium der auf der Seite PS8 verlinkten Animationen.

1.1.4 Transistor-Kennlinien

Jedes elektrische Bauteil liefert charakteristische (Strom-Spannungs-) Kennlinien, anhand derer sein Verhalten in Stromkreisen beschrieben werden kann. Bei einem Transistor, der 3 Anschlüsse besitzt, lassen sich mehrere Kennlinien (je nach Anschlusskombination) bestimmen.

- **Eingangskennlinie**

Als *Eingangskennlinie* bezeichnet man die Abhängigkeit des Basisstroms I_B von der Basis-Emitter-Spannung U_{BE} (vgl. Abb. 3). Die Basis-Emitter-Strecke wird als *Eingang* bezeichnet, an an ihr das (kleinere) Eingangssignal angelegt wird (welches verstärkt werden soll). Die Spannung U_{BE} liegt an einem pn-Übergang in Durchlassrichtung. Die Eingangskennlinie ist daher eine normale Diodenkennlinie, wie sie im Kurs PS7 bereits mehrfach bestimmt wurde. Im Normalbetrieb beträgt $U_{BE} \approx 0,5 - 0,7V$, abhängig von Temperatur und Basisstrom.

- **Stromsteuerkennlinie**

Die Stromsteuerkennlinie zeigt die Abhängigkeit des Kollektorstroms I_C vom Basisstrom I_B . Bei konstanter Spannung U_{CE} ist $\frac{I_C}{I_B}$ näherungsweise konstant. Das Verhältnis zwischen I_C und I_B nennt man Gleichstromverstärkung B .

$$B = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} \quad (1)$$

Wie bereits oben erläutert, können kleine Basisströme große Kollektorströme steuern. Die Größe der Gleichstromverstärkung B hängt von der Kollektor-Emitter-Spannung U_{CE} ab (vgl. Abb. 5), denn es können bei einem höheren Kollektorpotential mehr Elektronen aus der Basis in den Kollektor gelangen. Übliche Werte für B liegen zwischen 100 und 1000.

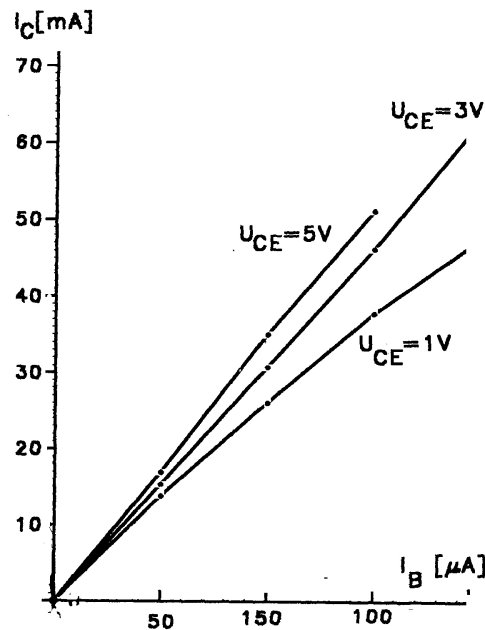


Abbildung 5: Stromsteuerkennlinie eines Transistors $I_C(I_B)$ bei unterschiedlichen U_{CE}

- **Ausgangskennlinienfeld**

Das Ausgangskennlinienfeld (siehe Abb. 6) stellt die Abhängigkeit des Kollektorstromes I_C von der Ausgangsspannung U_{CE} (mit der Basis-Emitter-Spannung U_{BE} als konstanten Parameter) dar. Dabei zeigt sich, dass der Kollektorstrom I_C oberhalb einer gewissen Spannung nur wenig von U_{CE} abhängt, sondern sein Wert defacto ausschließlich von der fest eingestellten Eingangsspannung U_{BE} abhängt. Hier sieht man deutlich, wie die Eingangsspannung als „Ventil“ wirkt und den Kollektorstrom trotz steigender Kollektorspannung (fast) konstant hält.

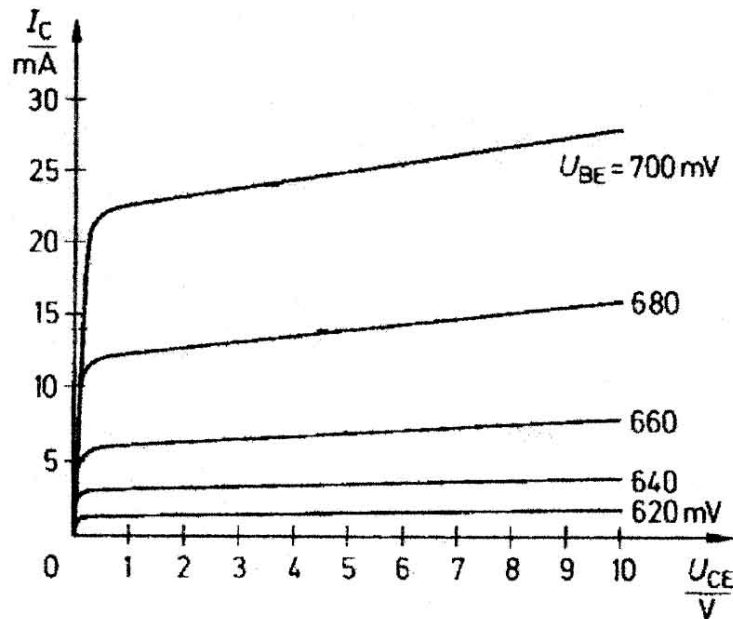


Abbildung 6: Ausgangskennlinienfeld eines Transistors $I_C(U_{CE})$ bei unterschiedlichen Eingangsspannungen U_{BE}

1.1.5 Elementare Anwendungen des Transistors

Transistoren können in Schaltungen zu verschiedenen Zwecken verwendet werden. In den meisten Fällen geht es darum, mittels kleiner Signale größere Signale zu steuern.

- **Transistor als Schalter**

Ein einfaches Beispiel für so eine Anwendung ist der Transistor als Schalter, wo man mittels einer kleinen Steuerspannung (U_{BE}) einen Stromkreis (zwischen Kollektor und Emitter) unterbrechen bzw. schließen möchte. Das realisiert man am einfachsten durch Variation der Eingangsspannung U_{BE} , die das elektronische Analogon zum mechanischen Schalter ist. In Abb. 6 ist deutlich erkennbar, dass bei $U_{BE} < 600\text{mV}$ praktisch kein Strom zwischen Kollektor und Emitter fließen kann, egal welche Spannung U_{CE} anliegt - der Schalter ist somit ausgeschaltet. Wird U_{BE} auf $\geq 700\text{mV}$ erhöht, fließt bereits bei geringer Spannung U_{CE} ein hoher Strom I_C - der Schalter ist eingeschaltet.

Auf dieses Prinzip gründet die gesamte digitale Schaltungstechnik bis hin zu Computerprozessoren.

- **Transistor als Verstärker** Eine weitere elementare Anwendung ist der **Transistor als Verstärker**. Wenn man von der Verstärkung eines elektrischen Signals spricht, bedeutet das ganz analog, dass ein kleines Eingangs- oder Steuersignal ein großes Ausgangssignal steuert. Das gewünschte leistungsstärkere Signal soll dabei möglichst ohne Verzerrungen, nur um einen Faktor V (Verstärkung) verstärkt, dem leistungsschwächeren Signal folgen.

Das Verhalten eines speziellen Transistortyps ist durch seine Kennlinien gegeben. Nicht alle Bereiche dieser Kennlinien sind für den Zweck der Verstärkung geeignet. Aus diesem Grund benötigt der Transistor eine Beschaltung, die den Arbeitspunkt und die Betriebsart festlegt. Die so entstehenden, verschiedenen Verstärkerschaltungen hängen nicht nur vom gewählten Transistortyp, sondern auch von der gewünschten Art der Verstärkung ab. Grundsätzlich sind vor allem Strom- und Spannungsverstärkung zu unterscheiden. Der Transistor ist von seiner prinzipiellen Funktionsweise her ein Stromverstärker. Spannungsverstärkungen werden durch spezielle Schaltungen erreicht.

Reine *Stromverstärkung* bedeutet, dass Ein- und Ausgangsspannung gleich sind, die Ausgangsspannung aber stabiler bei größerer Belastung (kleinerem Lastwiderstand) ist.

Reine *Spannungsverstärkung* bedeutet, dass eine Eingangsspannung um einen Faktor V zu einer Ausgangsspannung verstärkt wird. Die Strom-Belastbarkeit dieser Spannung (also die Stabilität in Abhängigkeit vom Lastwiderstand) wird dabei nicht verändert.

Es gibt für die verschiedenen Transistortypen verschiedene Grundschaltungen, die Spannungs- oder Stromverstärkung bzw. beides mit verschiedenen Vor- und Nachteilen zur Verfügung stellen. Ein praktisches Beispiel für Verstärkung ist ein HiFi-Verstärker. Hier möchte man eine kleine Eingangsspannung (zum Beispiel vom MP3-Player kommend) spannungs- und stromverstärken, um damit einen Lautsprecher betreiben zu können. Obwohl bei nichtprofessionellen Geräten meistens in einem Gehäuse untergebracht, werden dabei elektronisch immer zwei Stufen unterschieden. Die sogenannte *Vorstufe* ist der Bereich, wo spannungsverstärkende Schaltungen verwendet werden und auch die Regulierung der Spannungsverstärkung mittels des Lautstärkereglers realisiert wird. Die Endstufe stellt im wesentlichen nur mehr die Stromverstärkung zur Verfügung (weil die Lautsprecher niederohmige Bauteile sind).

1.1.6 Verstärker-Grundschaltungen (Abb. 7)

Wir haben schon gesehen, dass der eigentliche Verstärkungsvorgang beim Transistor zwischen Basis- und Kollektorstrom erfolgt (Der Transistor ist seiner Natur nach ein Stromverstärker, kein Spannungsverstärker). Jede Transistorverstärkerschaltung muss daher als Eingang immer die Basis-Emitter-Strecke aufweisen, während der Ausgang vom Kollektorstrom durchflossen werden muss. Unter dieser Voraussetzung ergeben sich drei Schaltvarianten: Emitterschaltung, Basisschaltung und Kollektorschaltung. Den Namen erhält die Schaltung von jener Elektrode, die für Eingangs- und Ausgangssignal Bezugselektrode ist.

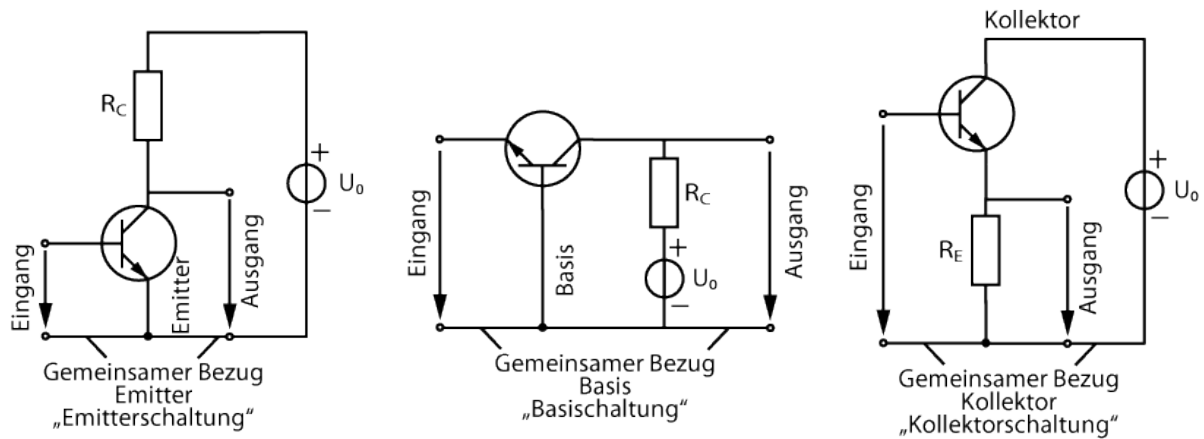


Abbildung 7: Transistorschaltungen: Emitter-, Basis- und Kollektorschaltung

Die konstante Gleichspannungsquelle U_0 hat nur Bedeutung für die Arbeitspunkteinstellung des Transistors. Auf das Signal, das verstärkt werden soll, wirkt lediglich ihr Innenwiderstand R_i . Kann dieser mit $R_i = 0$ angenommen werden, so wirkt die Gleichspannungsquelle auf das Signal wie ein Kurzschluss. Damit wird deutlich, dass bei der Kollektorschaltung die Kollektorelektrode für Eingang und Ausgang die Bezugselektrode ist. Um eine verstärkte Spannung abnehmen zu können, baut man am Ausgang einen Arbeitswiderstand (R_C bzw. R_E) ein und greift die daran abfallende Spannung $I_C \cdot R_C$ ab.

Im Folgenden werden wir uns nur mit der Emitterschaltung beschäftigen, da diese am universellsten verwendbar ist. Sie stellt sowohl eine Spannungs- als auch eine Stromverstärkung zur Verfügung. Die Kollektorschaltung kommt vor allem als Stromverstärker in Frage. Die Basischaltung eignet sich besonders für höhere Frequenzen (z.B. UKW-Empfänger oder Fernseh-Kanalwähler). Weiters werden wir in allen Schaltungen npn-Transistoren verwenden. Man kann aber in allen Schaltungen npn-Transistoren durch pnp-Transistoren ersetzen, wenn man gleichzeitig die Betriebsspannungen (und die Elektrolytkondensatoren) umpolt.

Anmerkung: In umfangreicheren Schaltungen verwendet man üblicherweise Ersatzschaltbilder für einfache Transistorschaltungen, indem man den Transistor durch eine Stromquelle (und 2 Widerstände) ersetzt, die den Strom $I_C = B \cdot I_B$ liefert.

1.1.7 Einstellung des Arbeitspunkts (Abb. 8)

Wenn man die Emitter-Grundsaltung genauer betrachtet, erkennt man, dass diese Schaltung noch ein Problem aufweist. Da das Eingangssignal in den allermeisten Fällen (Telekommunikation, Audio/HiFi) eine Wechselspannung ist, sperrt die Basis-Emitter-Strecke bei der negativen Halbwelle, diese würde also weggeschnitten werden. Wenn das Signal z.B. Musik darstellen soll, wird sie dann nicht mehr besonders gut klingen. Um das zu vermeiden, überlagert man der Eingangswechselspannung eine zusätzliche Gleichspannung, die

so groß sein muss, dass die größten negativen Spitzen des Eingangssignals noch nicht in den Sperrbereich fallen. Man stellt also durch die Gleichspannungen U_{BE} und U_{CE} einen Arbeitspunkt ein und lässt das eigentliche Signal relativ kleine Schwankungen um diesen Arbeitspunkt ausführen (siehe Abb. 8). Dies wird als *Kleinsignalverstärkung* bezeichnet (die Amplitude des Eingangssignals U_e ist klein gegenüber der Gleichspannung U_{BE}). Als Arbeitspunkt wählt man in der Regel ein Kollektorpotential von $U_C = \frac{1}{2} \cdot U_0$, damit der lineare Verstärkungsbereich durch die positive und negative Halbwelle des Ein- bzw. Ausgangssignals optimal genutzt werden kann.

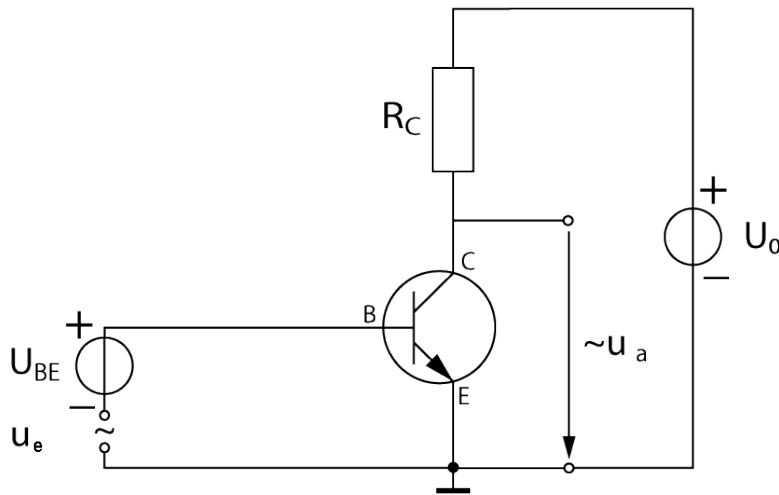


Abbildung 8: Transistorschaltung mit einstellbarem Arbeitspunkt

In der Praxis ist es unbequem, mit zwei getrennten Gleichspannungsquellen zu arbeiten. Deshalb erzeugt man die kleinere Gleichspannung U_{BE} mittels eines Spannungsteilers aus der größeren Spannung U_0 , wie in Abb. 9 (ohne rot hervorgehobene Bauteile) gezeigt.

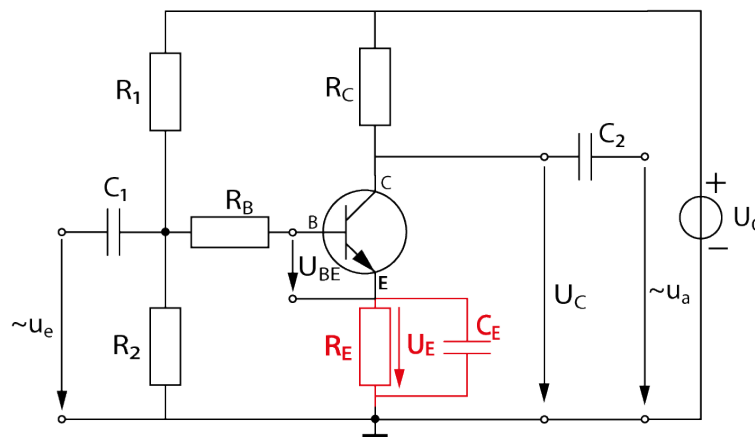


Abbildung 9: Verbesserte Schaltung mit einstellbarem Arbeitspunkt und nur einer Spannungsquelle

Die beiden Kondensatoren sind erforderlich, um die Gleichspannungen von der Signalspannungsquelle bzw. dem am Ausgang angeschlossenen Verbraucher fernzuhalten. Das ist notwendig, da jede Spannungsquelle einen sehr kleinen Innenwiderstand hat. Ohne Kondensator würde daher die Spannung U_{BE} durch die Signalspannungsquelle kurzgeschlossen werden. Ähnlich die Situation am Ausgang; auch hier wollen wir verhindern, dass die nachgeschaltete Stufe irgendwelche Auswirkungen auf den Arbeitspunkt hat.

Diese Kondensatoren haben einen Nachteil: sie bilden gemeinsam mit dem Innenwiderstand der Verstärkerstufe *Hochpassfilter*⁵. Man darf die Kondensatoren daher nicht zu klein wählen.

Leider ist diese Schaltung immer noch nicht brauchbar. Ihr größter Nachteil ist die extrem große Temperaturdrift. Die zu einem gegebenen Kollektorstrom gehörige Basis-Emitter-Spannung eines Transistors nimmt um ca. 2 mV je Grad Temperaturerhöhung ab. Diesen Sachverhalt kann man sich durch eine gedachte Spannungsquelle in der Basisleitung veranschaulichen, deren Spannung bei Zimmertemperatur Null ist und um 2 mV je Grad zunimmt. Diese Spannungsquelle liegt in Reihe mit der Signalspannung und wird daher wie diese verstärkt. Bei einer Verstärkung von 150 würde das bedeuten, dass die Kollektor-Emitter-Spannung bei einer Temperaturerhöhung um 20 Grad um ca. 6 V kleiner wird. Eine so große Abweichung vom gewünschten Arbeitspunkt ist im Allgemeinen untragbar.

Die beste Möglichkeit zur Einstellung eines stabilen Arbeitspunktes ist die *Stromgegenkopplung*, bei der man einen zusätzlichen Widerstand R_E am Emitteranschluss einfügt, wie in Abb. 9 (rot hervorgehobener Widerstand) gezeigt.

Wird die Basis-Emitter-Spannung um ΔU_{BE} größer, so wird der Basisstrom um ΔI_B und damit auch der Kollektorstrom um ΔI_C größer. Bei steigendem Kollektorstrom wird der

⁵Hochpass und Tiefpass werden behandelt im Rahmen von PW11, Praktikum I.

Spannungsabfall an R_E ebenfalls ansteigen ($\Delta U_E = \Delta I_C \cdot R_E$). Da aber die Summenspannung $U_E + U_{BE}$ durch den Spannungsteiler fest eingestellt ist, muss U_{BE} um den gleichen Betrag abnehmen wie U_E zunimmt ($\Delta U_{BE} = -\Delta U_E$). Der Ausgangsstrom bewirkt also eine Abnahme der effektiven Eingangsspannung und damit eine Stabilisierung des Systems. Einen solchen Effekt, bei dem der Ausgang eines Systems an den Eingang rückwirkt und dadurch das System stabilisiert, nennt man ganz allgemein *Gegenkopplung*; in diesem Fall spricht man von *Gleichstrom-Gegenkopplung*. Der Nachteil der Gleichstrom-Gegenkopplung ist, dass durch die Abnahme der effektiven Eingangsspannung auch die Gesamtverstärkung sinkt. Diese Herabsetzung der Verstärkung ist im Allgemeinen unerwünscht, kann aber leicht vermieden werden, indem man den Emitterwiderstand durch einen Kondensator überbrückt. Die Gegenkopplung ist dann nur für Gleichspannung voll wirksam, für die Signalwechselspannung stellt der Kondensator nahezu einen Kurzschluss von R_E dar. Der Kondensator bildet mit dem Innenwiderstand des Verstärkers wieder einen Hochpass, d.h. der Kondensator darf nicht zu klein sein.

1.1.8 Frequenzabhängigkeit der Verstärkung

Die Wechselspannungsverstärkung einer oben beschriebenen Schaltung (Emitterschaltung mit Stromgegenkopplung) ist frequenzabhängig. Verantwortlich dafür sind die verwendeten Kondensatoren, aber auch der Transistor selbst. Er wirkt als Kondensator mit variabler Kapazität je nach Dicke der Basisschicht. Außerdem verursacht jeder Transistor Phasenverschiebungen, da Diffusionsprozesse in der Basis zu zeitlichen Verzögerungen zwischen Ein- und Ausgangssignal führen. Diese Diffusionsprozesse laufen bei einer dünneren Basisschicht rascher ab, als bei einer dickeren. Daher kann ein Kollektorstrom bei dünnen Basisschichten rascher einer Basisstromänderung folgen. Solche Transistoren eignen sich für Hochfrequenzanwendungen.

Um oben beschriebene Verstärkerschaltungen effektiv einsetzen zu können, muss daher die optimale Frequenz ermittelt werden, bei der die Verstärkung maximal ist. Man spricht von *oberer* bzw. *unterer Grenzfrequenz*, wenn die Verstärkung auf die Hälfte des Maximalwertes gesunken ist (-3dB - Grenze).

1.2 Aufgabenstellung

1. Bestimmen Sie die Kennlinien der Basis-Emitter- und der Basis-Kollektor-Diode und damit ihre Durchlass- und Sperrrichtungen.
2. Bestimmen Sie die Stromsteuerkennlinie (Gleichstromverstärkung) in einer Emitterschaltung.
3. Bestimmen Sie das Ausgangskennlinienfeld I_C in Abhängigkeit von U_{CE} mit U_{BE} als Parameter für 4 verschiedene Werte von U_{BE} .

4. Messen Sie die Kleinsignalverstärkung (das Verhältnis von u_a zu u_e) und das Kollektorpotential U_C in einer Emitterschaltung ohne Stromgegenkopplung. Beobachten, dokumentieren und begründen Sie das Verhalten des Ausgangssignals u_a und des Kollektorpotentials U_C in dieser Schaltung bei Erwärmung.
5. Messen Sie die Kleinsignalverstärkung (das Verhältnis von u_a zu u_e) und das Kollektorpotential U_C in einer Emitterschaltung mit Stromgegenkopplung.
6. Bestimmen Sie die Abhängigkeit der Verstärkung und der Phasenlage (von Ein- und Ausgangsspannung) von der Frequenz mit dem Ziel, einerseits die Frequenz der maximalen Verstärkung zu finden und andererseits die untere Grenzfrequenz zu bestimmen.

1.3 Versuchsaufbau und Durchführung

Für sämtliche Messungen wird das Lehrsystem **rc2000** verwendet. Es ist ein kompaktes Modulsystem mit Goldkontakten und internen Sicherungen, die einerseits ein zuverlässiges und exaktes Arbeiten mit elektronischen Messungen garantiert und andererseits gegen die versehentliche Zerstörung von Komponenten absichert. Die Ausgabe und Verarbeitung der Ergebnisse erfolgt automatisiert in einer zugehörigen Software, sodass Sie sich als Anwender auf die physikalischen Zusammenhänge konzentrieren können. Es ist jedoch essentiell für das Verständnis, dass Sie sich zu jeder Messung auch über die Messmethode im Klaren sind!

Die Module und die Software des RC2000 Systems werden im Rahmen von PS7 vorgestellt und der Umgang mit ihnen erarbeitet. Sollten Sie PS7 noch nicht absolviert haben, so empfiehlt sich, die Kapitel „Das RC2000 Messsystem“ und „Erste Messungen mit dem RC2000 - Strom-Spannungs-Kennlinien“ zu lesen und evtl. das Einstiegsexperiment „Kennlinie eines ohmschen Widerstandes“ vorab durchzuführen.

Für den Fall, dass Sie mit dem Messsystem RC2000 vertraut sind, führen Sie Folgendes durch:

- **Einbau des Transistors**

Stecken Sie den Bipolartransistor „BC 548B“ in die dafür vorgesehenen Anschlussbuchsen am Modul „Transistor bipolar“.

- **Diodenkennlinien des Transistors**

Bauen Sie auf dem Modul „Transistor bipolar“ die Schaltung aus Abb. 10 auf. Vom ADDU-Modul legen Sie den analogen Ausgang (analog OUT) an die gesamte Mess-

schaltung an. Die Spannung U_{IB} dient der Messung des Stromes am bekannten Widerstand über das ohmsche Gesetz (Anschluss IN-B am ADDU-Modul), die Spannung U_{BC} wird am Anschluss IN-A des ADDU-Moduls gemessen.

In der Software wählen Sie das Programm „VA-Characteristics“. Geben Sie dem Programm den richtigen Messwiderstand („Sense R“) für die Strommessung bekannt und stellen Sie die linear steigende Output Ramp in einem passenden Bereich für die Diodenkennlinie ein (vgl. PS7). Wählen Sie einen kurzen Zeitraum (z.B. 25 ms) für das Abfahren der Output Ramp.

Für die Messung der Kennlinie zwischen Basis und Emmitter tauschen Sie die Anschlüsse der Spannungsmessung und des Analogausganges von der Kollektorseite zur Emmitterseite.

Ihre Ergebnisse können Sie ausdrucken, als Grafik und/oder als Datensatz speichern (vgl. PS7).

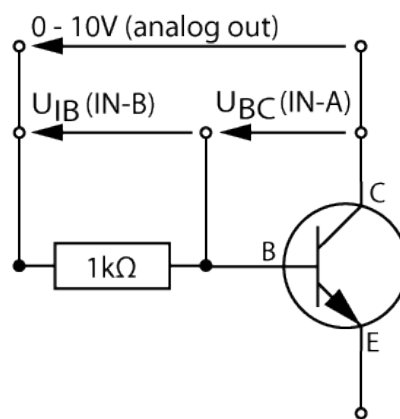


Abbildung 10: Messschaltung für die Kennlinie der BC-Diode

• Eingangskennlinienfeld - Gleichstromverstärkung

Bestimmen Sie mit der Messschaltung Abb. 11 das Verhältnis von Kollektor- und Basisstrom. Dazu gehen Sie analog wie im vorangegangenen Experiment vor. Einziger Unterschied: Die wählbare Output Ramp des analog OUT nutzen Sie um U_{BE} zu variieren. Dazu programmieren Sie den analogen Ausgang des ADDU-Moduls als „Output Ramp“ (linear ansteigend) von $U_{BE} = 0$ bis $1V$ über einen Zeitraum von 1 ms.

Für die konstante Betriebsspannung $U_0 = 10V$ verwenden Sie das Modul „Programmable DC Supply“. Um diese in Betrieb zu nehmen, verbinden Sie einfach die Eingänge GND und $+5V$ mit den gleichnamigen Fixspannungsausgängen auf der Versorgungsleiste unter dem ADDU-Modul. Die Bedienung der „Programmable DC Supply“ sollte selbsterklärend sein.

Um den Kollektorstrom I_C zu bestimmen, messen Sie die Spannung die am bekannten Last-Widerstand $R_L = 10k\Omega$ anliegt mit dem Analog-Eingang B am ADDU-Modul. Dieser Eingang dient (wie Sie vom Dioden-Experiment wissen) dazu, um unmittelbar den Strom durch den bekannten Widerstand vom Programm berechnen zu lassen. Also müssen Sie im Programm wieder den entsprechenden Messwiderstand wählen

(„Sense R“). Der Widerstand vor der Basis $R = 100k\Omega$ dient der Begrenzung des Basisstromes. Jener Strom, der durch ihn fließt, erreicht auch die Basis des Transistors. Messen Sie an ihm die Spannung mit dem Analog-Eingang A am ADDU-Modul. Da der Widerstand bekannt ist, können Sie später (z.B. in QTI-Plot) daraus den Basisstrom I_B berechnen.

Bestimmen Sie eine Eingangskennlinie und werten Sie diese quantitativ aus. Den Datensatz können Sie mit „Save“ als *.txt - Datei speichern und zur Weiterverarbeitung in QTI-Plot (oder ein anderes Programm) importieren. Jenen Daten-Bereich, in dem kein linearer Anstieg zu beobachten ist, müssen Sie aus der linearen Regression jedenfalls ausnehmen.

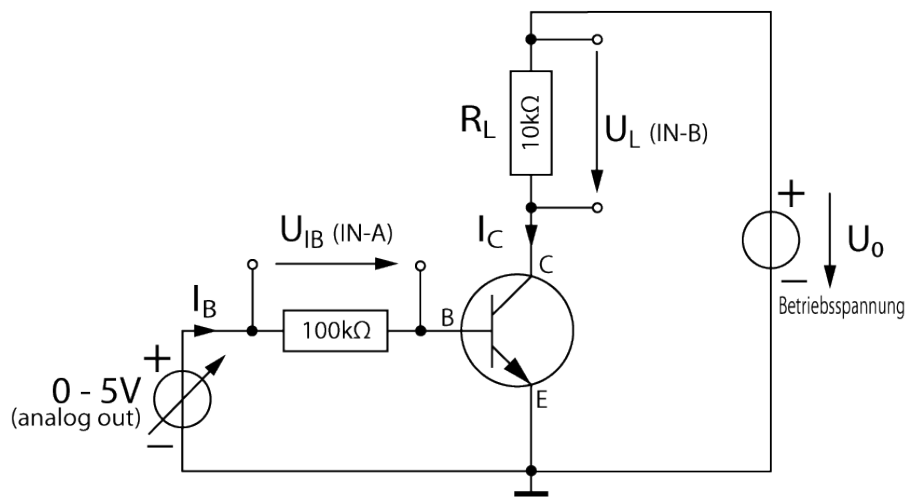


Abbildung 11: Messschaltung für die Gleichstromverstärkung

- **Ausgangskennlinienfeld**

Für die Aufnahme des Ausgangskennlinienfeldes (I_C in Abhängigkeit von U_{CE}) können Sie im Prinzip die Messschaltung und das Messprogramm des vorangegangenen Experiments heranziehen. Die Bestimmung des Kollektorstromes I_C (IN-B) bleibt gleich, die Spannungsmessung U_{CE} (IN-A) muss richtig geschaltet werden. Die wählbare Output Ramp des analog OUT nutzen Sie diesmal um U_0 von 0-10 V zu variieren. Die Programmable DC-Supply nutzen Sie um verschiedene feste Werte von U_{BE} zwischen 0,6 V und 0,7 V einzustellen.

Nehmen Sie für 4 verschiedene Werte von U_{BE} mit Hilfe der Messfunktion „Sequence“ ein Ausgangskennlinienfeld auf.

- **Kleinsignalverstärkung - Schaltung ohne Stromgegenkopplung**

Bauen Sie eine Emitterschaltung ohne Stromgegenkopplung auf wie in Abb. 12 dargestellt. Für die Betriebsspannung $U_0 = 10V$ verwenden Sie die Programmable DC-

Supply. Für die Eingangswechselspannung u_e verwenden Sie das Modul „Function Generator“ bei einer Frequenz von 10 kHz und einer Spannungsamplitude von 100 mV. Dem Signal-Ausgang des Moduls „Function Generator“ wird das Modul „Buffer“ als Stromverstärker nachgeschaltet. Die Spannungsverstärkung dieses Moduls ist nur 1, es ermöglicht systemintern jedoch einen höheren Stromfluss. Beide Module zusammen bilden die Signalquelle, die an den Eingang des eigentlichen Verstärkers die Eingangswechselspannung u_e liefert.

Für die Messung des Kollektorpotentials U_C verwenden Sie ein digitales Multimeter, das Sie mit den entsprechenden Adapterkabeln anschließen können.

Für die Messung von U_a und U_e öffnen Sie das Programm „Oscilloscope“ und legen die beiden Spannungen je an einen der beiden Eingänge am ADDU-Modul an (IN-A und IN-B).

Wie beim Oszilloskop müssen Sie die Skalierung von Zeitablenkung und Spannung optimieren, um die Verstärkung des Ausgangssignals messen zu können. Die Schaltung ist so optimiert, dass das Ausgangssignal möglichst wenig Verzerrungen aufweist, was Sie durch eine Harmonische Analyse (im Messprogramm als Fast Fourier Transformation umgesetzt) im Darstellungsmenüpunkt „Harmonic“ überprüfen können. Wenn Sie diese Darstellung wählen, werden die Signale in ihre Fourierterme zerlegt und Sie sehen ein Frequenzspektrum. Wenn nur eine Harmonische einem Signal zugeordnet ist, ist es perfekt sinusförmig.

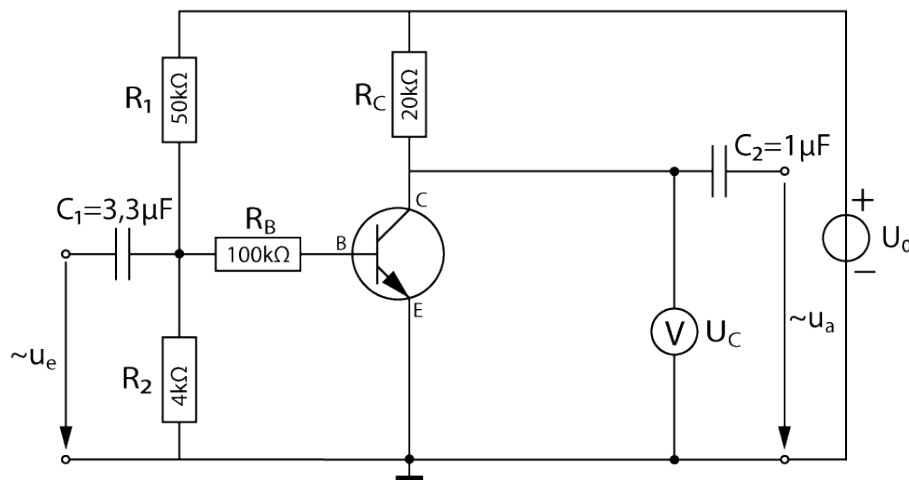


Abbildung 12: Messschaltung für eine Kleinsignalverstärkung in Emitterschaltung ohne Stromgegenkopplung

- **Kleinsignalverstärkung - Temperaturverhalten**

Wärmen Sie mit dem Fön den Transistor an und dokumentieren Sie das beobachtete Verhalten von Verstärkung und Kollektorpotential.

- **Kleinsignalverstärkung - Schaltung mit Stromgegenkopplung**

Für die Messung der Kleinsignalverstärkung und des Kollektorpotentials in der Schaltung mit Stromgegenkopplung bleibt der Messaufbau vom vorherigen Experiment gleich, mit Ausnahme des Einbaus der Stromgegenkopplung (Parallelschaltung von R_E und C_E am Emitter) und der Werte für R_2 und R_C . Siehe Abb. 13.

Auch hier können Sie die Temperaturabhängigkeit testen.

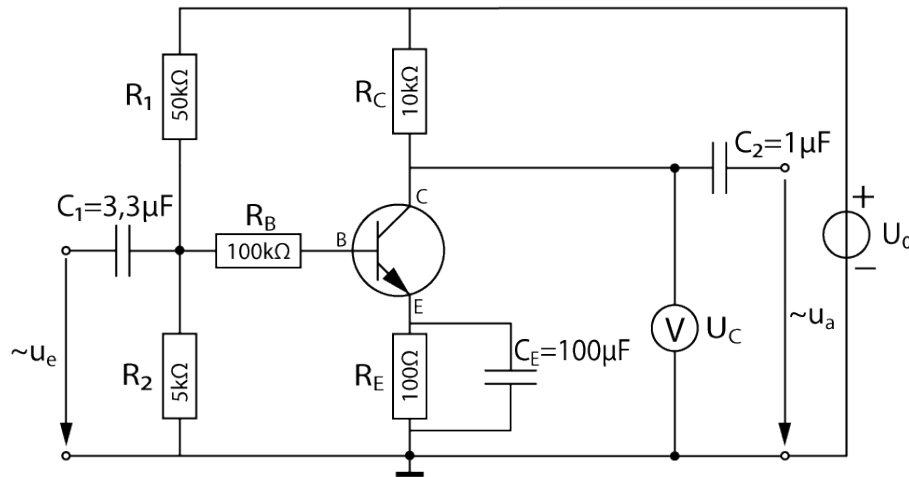


Abbildung 13: Messschaltung für eine Kleinsignalverstärkung in Emitterschaltung mit Stromgegenkopplung

- **Kleinsignalverstärkung - Frequenzabhängigkeit von Verstärkung und Phasenlage**

Für diese Messung verwenden Sie exakt die selbe Schaltung, die Sie im vorangegangenen Experiment aufgebaut haben. Mit dem Frequenzgenerator variieren Sie die Frequenz, um die Frequenz der maximalen Verstärkung zu finden und die untere Grenzfrequenz zu bestimmen. Beginnen Sie bei 10 kHz und bestimmen Sie in jeder Frequenz-Dekade bis 0,1 Hz jeweils 5 Messpunkte. Für Frequenzbereiche über 10 Hz jedoch kann die Software im Measurement „Single“, View „Harmonic“, Mode „Cursor“ die Phasenverschiebung sinusförmiger Signale automatisch berechnen. Für niedrigere Frequenzen können Sie die Phasenverschiebung mit Hilfe der Cursor „manuell“ bestimmen.

2 Der Feldeffekt-Transistor

2.1 Grundlagen

2.1.1 Begriffe

Drain, Source, Gate, Pinch-Off Spannung, Abschnürspannung, Abschnürbereich, J-FET, unipolarer Transistor

2.1.2 Aufbau und Funktionsprinzip von FET

So wie ein bipolarer Transistor ist auch ein Feldeffekt-Transistor (FET) ein steuerbarer Widerstand. Die physikalische Wirkungsweise der Steuerung ist bei beiden Transistorarten jedoch völlig verschieden. Beim bipolaren Transistor sind -wie schon der Name sagt- 2 verschiedene Ladungsträgerarten in die Funktionsweise involviert, nämlich Elektronen und Defektelektronen (Löcher). Die Steuerung des Kollektorstromes am Ausgang durch den Basisstrom am Eingang basiert auf Diffusionsprozessen in der dünnen Basisschicht.

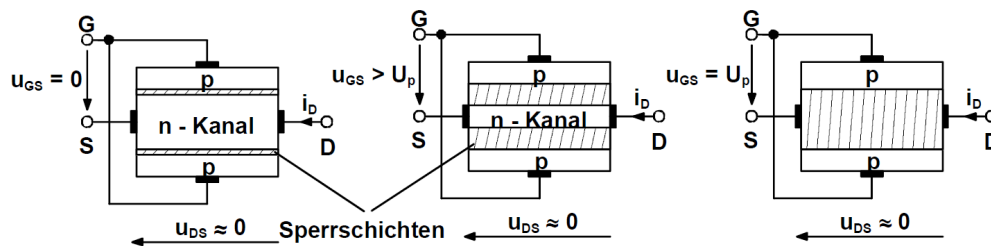


Abbildung 14: Sperrschicht-FET bei verschiedenen Spannungen U_{GS}

Beim FET, der auch den Namen *unipolarer Transistor* trägt, sorgt nur eine einzige Ladungsträgersorte für den Stromtransport in einem leitenden Kanal (wahlweise n-Typ oder p-Typ), dessen Anfang *Source* und dessen Ende *Drain* genannt wird, die im übrigen elektrisch aber völlig ident und gleichberechtigt sind (d.h. die Polarität der an der Source-Drain Strecke anliegenden Spannung ist beliebig).

Der elektrische Widerstand dieses Kanals wird durch ein transversales elektrisches Feld gesteuert (siehe Abb. 14), das über eine *Gate* genannte Elektrode aufgebaut wird. Das Gate ist mit dem Kanal nicht in leitender Verbindung, sondern von ihm je nach Bauart entweder durch eine dünne Metalloxidschicht getrennt (z.B. MOSFET, engl. für metal-oxide-semiconductor field-effect transistor), oder als ein in Sperrrichtung gepolter pn-Übergang ausgeführt (z.B. J-FET, engl. für junction-field-effect transistor, deutsch Sperrschicht-Feldeffekttransistor - dargestellt in Abb. 14 und Gegenstand der Experimente im Praktikum). Dementsprechend fließen keine oder nur vernachlässigbar kleine Ströme über das

Gate, sodass die Steuerung des FET keine Leistung benötigt.

Jenes, über das Gate angelegte elektrische Feld steuert die Breite der Sperrschichten am Rand des leitenden Kanals und kann benutzt werden, um diesen zu öffnen oder zu schließen. Abb. 14 veranschaulicht dieses Prinzip für den (einfachen) Fall, dass kein Drainstrom fließt ($U_{DS} = 0$ und $I_D = 0$). Im ganz linken Teilbild ist die transversale Spannung, die das elektrische Feld verursacht $U_{GS} = 0$, die beiden Sperrschichten sind dünn und nur entsprechend der dotierungsbedingten Diffusionsspannung ausgebildet. Im mittleren Teilbild ist der Betrag der Spannung U_{GS} leicht erhöht, aber noch nicht gleich groß wie U_P (Abschnürspannung bzw. „pinch-off voltage“)⁶. Für die beiden pn-Übergänge ist sie jeweils in Sperrrichtung angelegt, sodass sich die Sperrschichten vergrößern. Das hat zur Folge, dass der n-Kanal, in dem sich frei bewegliche Ladungsträger befinden verengt und sich der Widerstand vergrößert. Das rechte Teilbild zeigt den Zustand, in dem der n-Kanal vollständig geschlossen ist $U_{GS} = U_P$.

Man unterscheidet FET mit einem leitenden Source-Drain Kanal ohne Anlegen einer Gatespannung, so wie im vorliegenden Beispiel und FET, die selbstsperrend sind, d.h. ohne Anlegen einer Gatespannung ist der Kanal nicht leitend. Dieser wird erst durch Anlegen einer genügend hohen Gatespannung leitend.

Die genaue Funktionsweise und Vielfalt technischer Ausführungen von FET und MOSFET wird in der Grundlagenvertiefung zu PS8 erläutert.

2.1.3 Verhalten eines J-FET (Junction-field-effect-transistor)

Das Verhalten eines J-FET erklärt sich am einfachsten an Hand seiner Kennlinienfelder.

Eingangskennlinien eines J-FET

Die Eingangskennlinie zeigt die Abhängigkeit des Gatestroms I_G von der Gate-Source Spannung U_{GS} . J-FET, wie der im Praktikum untersuchte, haben einen pn-Übergang, der im Betrieb stets in Sperrrichtung gepolt ist, damit kein leistungsverbrauchender Steuerstrom fließt. Dementsprechend entspricht die Eingangskennlinie jener einer normalen Diode, wie in Abb. 15 zu sehen ist.

⁶Die Richtungskonvention gebietet, dass U_{GS} negativ sein muss, um den gewünschten Effekt zu erzielen, daher ist im mittleren Bild U_P zwar vom Betrag her größer, nicht aber vom Absolutwert (siehe Beschriftung in der Abbildung)!

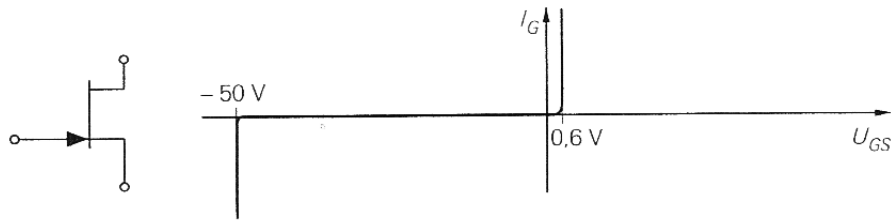


Abbildung 15: Links: Schaltzeichen eines J-FET; Rechts: J-FET-Eingangskennlinie - Abhängigkeit des Gatestroms I_G von der Gate-Source Spannung U_{GS} . 3. Quadrant: Sperrrichtung (Durchbruchspannung bei ca. -50 V); 1. Quadrant: Durchlassrichtung.

Ausgangskennlinien eines J-FET

Im einleitenden Kapitel wurde bereits das prinzipielle Verhalten der Sperrschichten im J-FET beschrieben für den Fall, dass kein Drainstrom fließt. Im technischen Einsatz von Transistoren ist jedoch das Gegenteil der Fall, da die Höhe des Drainstromes schließlich gesteuert werden soll.

Misst man den Drainstrom I_D in Abhängigkeit der Drain-Source Spannung U_{DS} bei verschiedenen Gate-Source Spannungen U_{GS} erhält man das in Abb. 16 gezeigte Ausgangskennlinienfeld. Man erkennt zwei unterschiedliche Bereiche in diesem Kennlinienfeld. Bei niedrigen Spannungen zwischen Drain und Source verhält sich der Kanal wie ein ohmscher Widerstand, wobei gilt I_D proportional U_{DS} und man nennt diesen Bereich daher auch *ohmschen Bereich*. Dieses Verhalten ist dem oben beschriebenen Verhalten (bei $U_{DS} = 0$ und $I_D = 0$) ähnlich. Die Sperrschicht des pn-Überganges wächst in diesem Bereich mit steigender U_{GS} in den Kanal hinein und verengt ihn, wodurch sein Widerstand sich vergrößert. Erhöht man die Gatespannung weiter, berühren einander die Sperrschichten bei einem bestimmten Spannungswert und der Kanal wird abgeschnürt, weshalb man auch von *Abschnürspannung* oder *pinch-off voltage* spricht. Der Spannungsbereich höherer U_{DS} heißt dementsprechend *Abschnürbereich*. Der Kanal wird jedoch nicht über seine gesamte Länge gleichförmig abgeschnürt. Wegen des Spannungsabfalls längs der Stromflussrichtung im Kanal nimmt die örtliche Sperrspannung am pn-Übergang zu und damit auch die Ausdehnung der Sperrschichten von Source nach Drain (wie in Abb. 17 zu sehen). Es fließt weiterhin Strom durch die Source-Drain Strecke, da die Ladungsträger den abgeschnürten Bereich entlang driften können, eine weitere Erhöhung von U_{DS} wirkt sich jedoch nur wenig auf den abgeschnürten Teil des Kanals aus und daher ändert sich I_D nur mehr gering. Das Ausgangskennlinienfeld ähnelt sehr jenem des Bipolartransistors. Auf Grund der geringen Änderung von I_D in Abhängigkeit von U_{DS} kann ein J-FET im Abschnürbereich (näherungsweise) als Konstantstromquelle dienen.

2.2 Aufgabenstellung

1. Bestimmen Sie die Eingangskennlinie I_G in Abhängigkeit der Gate-Drain- (bzw. Gate-Source-) Spannung $U_{GD} = U_{GS}$ eines J-FET.

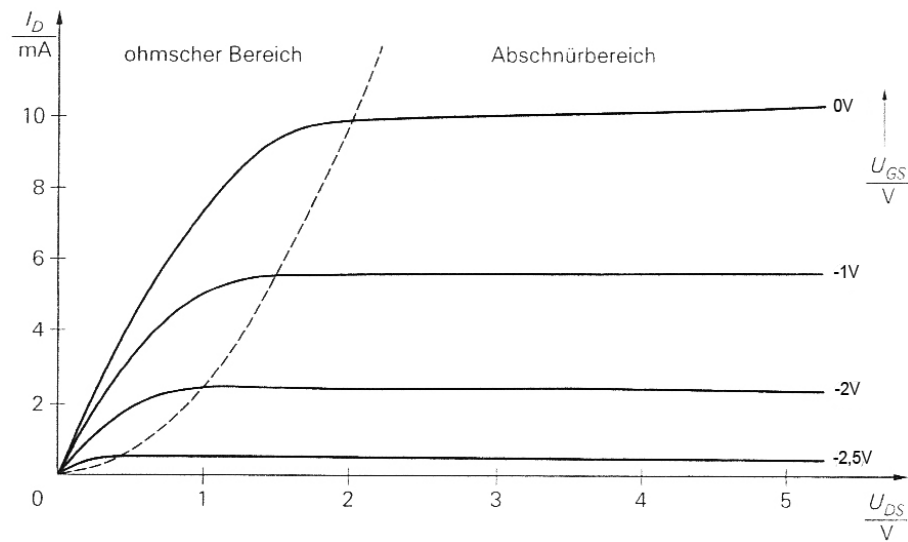


Abbildung 16: J-FET-Ausgangskennlinie: Abhängigkeit des Drainstroms I_D von der Drain-Source Spannung U_{DS} bei verschiedenen Gate-Source Spannungen U_{GS}

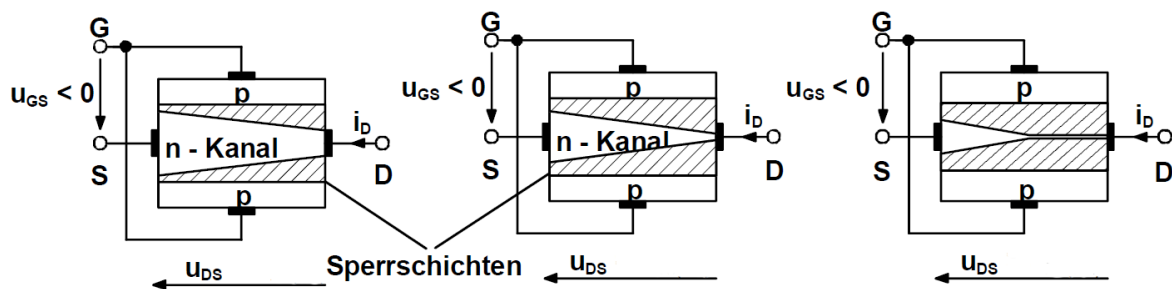


Abbildung 17: FET-Ausdehnung der Sperrschichten bei verschiedenen, von links nach rechts ansteigenden Spannungen U_{DS}

- Bestimmen Sie dessen Ausgangskennlinienfeld I_D in Abhängigkeit der Gate-Drain- (bzw. Gate-Source-) Spannung $U_{GD} = U_{GS}$ bei 4 verschiedenen Gate-Drain Spannungen U_{GD} , nämlich 0V, -1V, -2V und -2,5V.

2.3 Versuchsaufbau und Durchführung

- Einbau des Transistors**

Stecken Sie den J-FET „BF 245“ in die Anschlussbuchsen für den Transistor am Modul „Transistor bipolar“.

Die technischen Daten des J-FET aus dem gegenständlichen Experiment können Sie dem Datenblatt in den Zusatzinformationen zu PS8 entnehmen.

- **Eingangskennlinie des FET**

Benützen Sie zur Aufnahme der Eingangskennlinie die Schaltung wie in Abb. 18 dargestellt. Den Strom I_G bestimmen Sie mit Hilfe des ohmschen Gesetzes aus der Spannung U_{ID} , die an einem Vorwiderstand von $1\text{ k}\Omega$ abfällt und dem Kanal B des ADDU zugeführt wird. U_{GD} wird dem Kanal A zugeführt. Der Source-Anschluss ist bei diesem Versuch nicht beschaltet. In der Software wählen Sie das Programm „VA-Characteristics“. Geben Sie dem Programm den richtigen Messwiderstand („Sense R“) für die Strommessung bekannt und stellen Sie die linear steigende Output Ramp in einem passenden Bereich für die Diodenkennlinie ein (vgl. PS7) und wählen Sie einen kurzen Zeitraum (z.B. 25 ms) für das Abfahren der Output Ramp.

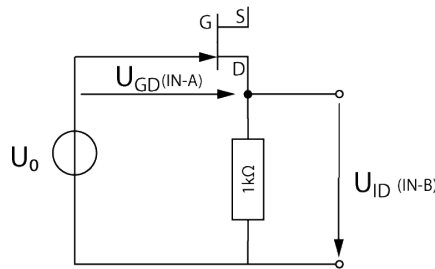


Abbildung 18: Schaltung zur Messung der Eingangskennlinie eines J-FET

- **Ausgangskennlinie des FET**

Bauen Sie auf dem Modul „Transistor bipolar“ die Schaltung aus Abb. 19 auf. Vom ADDU-Modul legen Sie den analogen Ausgang (analog OUT) an Source. Das DC-Supply wird an das Gate gelegt. Den Strom I_D bestimmen sie mit Hilfe des ohmschen Gesetzes aus der Spannung, die an einem Vorwiderstand von $1\text{ k}\Omega$ abfällt (Anschluss IN-B am ADDU-Modul). Die Spannung U_{DS} wird am Anschluss IN-A des ADDU-Moduls gemessen.

In der Software wählen Sie das Programm „VA-Characteristics“. Geben Sie dem Programm den richtigen Messwiderstand („Sense R“) für die Strommessung bekannt, stellen Sie die linear steigende Output Ramp in einem passenden Bereich für die Diodenkennlinie ein und wählen Sie einen kurzen Zeitraum (z.B. 25 ms) für das Abfahren der Output Ramp. Die Kennlinien werden im Modus „Sequence“ für die Werte 0V, -1V, -2V und -2,5V der Spannung U_{DS} aufgenommen.

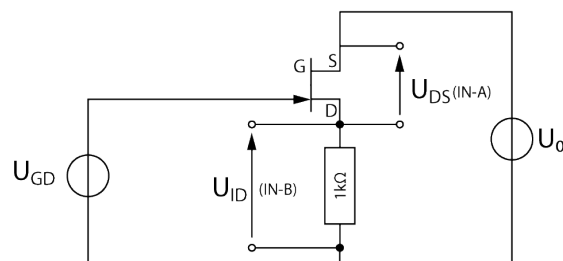


Abbildung 19: Schaltung zur Messung der Ausgangskennlinie eines FET