

Transistor (E18)

Ziel des Versuches

Es sollen Grundkenntnisse über den Transistor und seine Eigenschaften vermittelt werden. Die Kennlinien eines Transistors werden aufgenommen und es wird eine Verstärkerschaltung untersucht.¹

Allgemeine Grundlagen

Die (spezifische) Leitfähigkeit elektrischer Leiter, Halbleiter und Isolatoren unterscheidet sich um bis zu 25 Größenordnungen. Auch die Temperaturabhängigkeit ist bei Metallen und Halbleitern völlig verschieden. Eine Erklärung der Unterschiede liefert das *Energiebändermodell*.

Bändermodell

Einzelatome (z. B. in Gasen) besitzen scharfe, diskrete Energieniveaus, die jeweils von höchstens zwei Elektronen besetzt sein können (Pauli-Prinzip). In Festkörpern sind die Atome dagegen so dicht gepackt, dass die Atomkerne auch mit den Elektronen anderer, insbesondere benachbarter Atome, wechselwirken. Dies führt dazu, dass die diskreten Energieniveaus sich zu breiten *Energiebändern* aufweiten.

Die Elektronen besetzen zunächst die energieärmsten (also kernnächsten) Bänder, die energiereicheren Bänder bleiben leer. Das auf der Energieskala oberste besetzte Energieband (evtl. unvollständig besetzt) nennt man *Valenzband*, das darüberliegende, also das unterste leere Band, heißt *Leitungsband*. Die elektrischen Eigenschaften der Festkörper werden durch den relativen Abstand von Valenz- und Leitungsband bestimmt (Abb. 1).

Ein Festkörper ist leitfähig, wenn sich Elektronen innerhalb des Festkörpers frei bewegen können, d. h., sie müssen in der Lage sein, einen freien Energiezustand zu erreichen. Ohne Aufnahme zusätzlicher Energie ist dies nur möglich, wenn das Valenzband nur teilweise besetzt ist oder wenn die Oberkante des Valenzbands die Unterkante des Leitungsbands berührt oder gar überlappt. In diesem Fall spricht man von einem *elektrischen Leiter*.

Besteht eine Energielücke zwischen Valenz- und Leitungsband, kann elektrische Leitung nur stattfinden, wenn Elektronen durch die Aufnahme zusätzlicher (äußerer) Energie in die Lage versetzt werden, in das Leitungsband zu gelangen. Bei *Halbleitern* ist die Energielücke relativ gering, sodass bei Raumtemperatur ein signifikanter Anteil der Elektronen genügend thermische Energie besitzt, um in das Leitungsband zu gelangen.

¹ Der Versuch umfasst zwei Versuchstermine:

1. Termin: Aufnahme der Kennlinienfelder
2. Termin: Emitterschaltung und Differenzverstärker

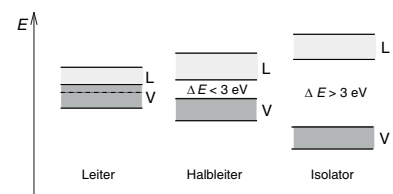


Abbildung 1: Energielücken bei Leitern, Halbleitern und Isolatoren.

Als *Isolatoren* bezeichnet man Materialien mit so großer Energielücke, dass die thermische Energie nicht ausreicht, um Elektronen ins Leitungsband anzuregen.

Dotierung von Halbleitern

Wird ein Elektron in einem Halbleiter durch thermische Energie in das Leitungsband angeregt, so kann es sich unter Einfluss eines elektrischen Feldes frei durch den Festkörper bewegen und elektrischen Strom leiten. Die elektrische Leitfähigkeit nimmt daher mit zunehmender Temperatur zu. Im Valenzband bleibt in diesem Fall ein leerer Platz, *Loch* oder *Defektelektron* genannt. Auf diesen Platz kann nun ein anderes Elektron des Valenzbands wechseln, auf dessen Platz dann wieder ein anderes Elektron gelangen kann. Dieser Platzwechselvorgang entspricht einer Wanderung des Loches im Kristall. Unter Einfluss eines elektrischen Feldes bewegen sich Elektronen und Löcher im Kristall in entgegengesetzte Richtungen. Man kann daher die Löcherbewegung formal durch die Bewegung von Ladungsträgern mit positiver Elementarladung beschreiben.

Elemente aus der vierten Gruppe des Periodensystems wie z. B. Ge und Si besitzen jeweils vier Valenzelektronen pro Atom (vierwertige Elemente). Im Kristallverband werden diese mit Elektronen der Nachbaratome gepaart, sodass das Valenzband vollständig aufgefüllt wird. Elektrische Leitung ist daher nur in der oben beschriebenen Weise durch thermische Anregung möglich. Sie wird *Eigenleitung* genannt und ist dadurch charakterisiert, dass die Konzentration der freien Elektronen im Leitungsband gleich der Konzentration der Löcher im Valenzband ist.

Werden nun in dem Kristallgitter eines vierwertigen Elementes einzelne Atome durch fünfwertige Atome, wie z. B. Sb, As oder P, ersetzt (*dotiert*), so bleibt bei der Bindung jeweils ein Elektron übrig. Die Energie dieses Elektrons liegt im Bänderschema nur geringfügig unterhalb des Leitungsbands (Abb. 2) und benötigt somit nur eine geringe thermische Energie, um ins Leitungsband zu gelangen. Da der frei werdende Platz an das Fremdatom gebunden, also ortsfest ist, trägt nur das Elektron zur elektrischen Leitung bei. Die Konzentration der Elektronen im Leitungsband ist in solchen Materialien viel größer als die Konzentration der Löcher im Valenzband, man nennt sie daher *n-Leiter*. Die Atome, die die zusätzlichen Elektronen liefern, heißen *Donatoren*.

Analog werden durch den Einbau dreiwertiger Atome Energiezustände knapp oberhalb des Valenzbands geschaffen, die durch eine geringe thermische Energiezufuhr von Elektronen des Valenzbands erreicht werden können. Dadurch steigt die Konzentration der Löcher im Valenzband stärker als die der Elektronen im Leitungsband, weshalb man diese Stoffe *p-Leiter* nennt. Die Atome, die die Elektronen aufnehmen, heißen *Akzeptoren*.

pn-Übergang, Halbleiterdiode

Eine *Halbleiterdiode* besteht aus einem p- und einem n-Leiter, die miteinander in direktem Kontakt stehen. An der Grenzfläche (pn-Übergang) entsteht dadurch ein starkes Konzentrationsgefälle der Elektronen- und Löcherdichte, sodass die freien Elektronen in den p-Leiter und die Löcher in den n-Leiter

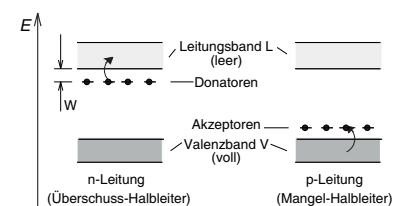


Abbildung 2: Termschemata dotierter Halbleiter.

hinein diffundieren und mit den dort vorhandenen Löchern bzw. Elektronen rekombinieren.

Dadurch bleiben in dem Grenzbereich nur die ortsfesten Ladungen übrig, sodass zwischen n- und p-Leiter ein elektrisches Feld entsteht (Abb. 3), das dem Diffusionsstrom entgegengerichtet ist und einen Rückfluss von Ladungen bewirkt (Feldstrom). Schließlich stellt sich ein Gleichgewicht zwischen Diffusions- und Feldstrom ein. Legt man eine Spannung an die Diode, sodass der positive Pol mit dem n-Leiter und der negative Pol mit dem p-Leiter verbunden wird, ist das angelegte elektrische Feld dem durch die Diffusion entstandenen Feld gleich gerichtet. Die Grenzschicht, in der die Rekombination der freien Ladungsträger stattfindet, wird verbreitert. Es fließt praktisch kein Strom durch den Stromkreis. Die Diode ist in *Sperrrichtung* geschaltet (Abb. 4). Bei umgekehrter Polung wird das innere, rücktreibende elektrische Feld geschwächt, wodurch Elektronen und Löcher in verstärktem Maß in Richtung ihres Konzentrationsgefälles über den pn-Übergang gelangen können. Ist das äußere Feld größer als das innere, kann ein starker Strom fließen. Diese Polung bezeichnet man als *Durchlassrichtung* der Diode (Abb. 4).

Transistor

Ein (Bipolar-)Transistor besteht aus drei aufeinanderfolgenden Zonen verschiedener Dotierung. Entsprechend der Zonenfolge unterscheidet man npn- und pnp-Transistoren. Ein Transistor weist also zwei pn-Übergänge auf, was stark vereinfacht einem System aus zwei gegeneinander geschalteten Dioden entspricht (Abb. 5). Von E nach C oder umgekehrt kann kein Strom fließen, weil eine Diode stets in Sperrrichtung gepolt ist (in Abb. 5 ist es Diode D_2). Wird nun an B ein gegenüber E positives Potential angelegt, so fließt durch die Diode D_1 ein Strom. Dieser erhöht die Elektronenkonzentration in der p-Schicht und schwächt das rücktreibende elektrische Feld des pn-Übergangs der Diode D_2 . Dadurch wird ermöglicht, dass Elektronen aus der p-Zone in die n-Zone der D_2 -Diode gelangen und ein Strom im Kreis von C nach E fließen kann. Die Wahrscheinlichkeit für diesen Vorgang wird sehr stark erhöht, wenn die p-Zone sehr dünn (d. h. kleiner als die mittlere freie Weglänge der Elektronen) ist und nur schwach dotiert wird. Es existieren dann in der p-Zone nur sehr wenige Löcher, mit denen die Elektronen rekombinieren könnten. Bei guten Transistoren gelangen unter diesen Umständen mehr als 99 % der Elektronen über die beiden pn-Übergänge.

Der über CE fließende Strom ist also eine Funktion der Elektronenkonzentration in der p-Zone, die wiederum von der an BE anliegenden Spannung abhängig ist. Also lässt sich der über CE fließende Strom mit der an BE liegenden Spannung steuern.

Von den drei Anschlüssen des Transistors, *Basis*, *Emitter* und *Kollektor*, ist immer ein Pol dem Eingangs- und Ausgangsschaltkreis gemeinsam. Es gibt daher drei Grundschaltungen mit unterschiedlichen Eigenschaften: die Basis-, Emitter-, und Kollektorschaltung. Die Benennung erfolgt dabei nach dem Pol, der sowohl für den Ein- als auch den Ausgang verwendet wird. Die Emitterschaltung wird typischerweise zur Spannungsverstärkung, die Kollektorschaltung in der Regel zur Stromverstärkung benutzt. Bei der Basischaltung werden Strom und Spannung in etwa gleichermaßen verstärkt.

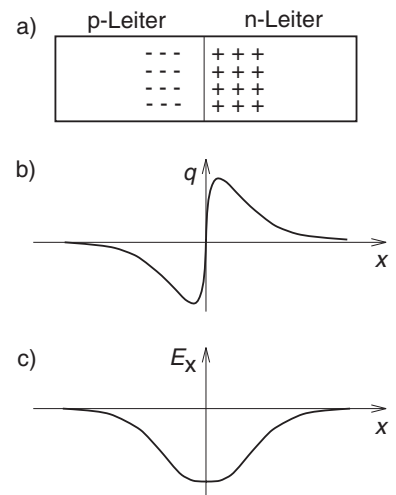


Abbildung 3: Schema eines pn-Übergangs ohne externe Spannung (a) und qualitativer Verlauf von Raumladungsdichte (b) und x -Komponente der Feldstärke (c) als Funktion der Ortskoordinate x .

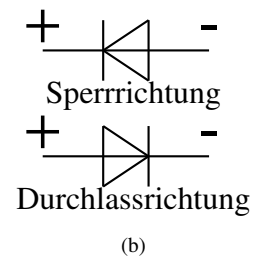
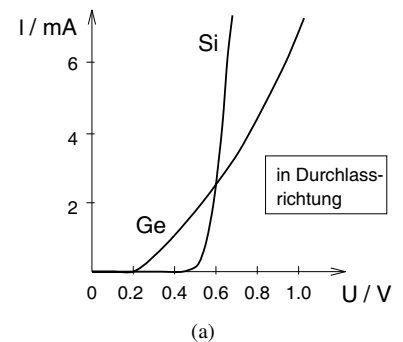


Abbildung 4: Strom-Spannungscharakteristik einer Diode und Bedeutung des Schaltsymbols.

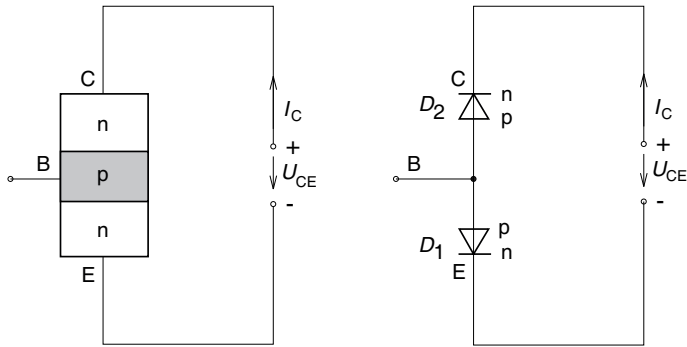


Abbildung 5: Transistor und ein einfaches Ersatzschaltbild.

Emitterschaltung

Gleich- und Wechselstromgrößen

Im Folgenden soll die wichtigste Grundschaltung, die Emitterschaltung, betrachtet werden, die in Abb. 6 gezeigt ist. Damit ein Transistor verstärken kann, muss er zuerst mit einer Betriebsspannung (Gleichspannung) versorgt und entsprechend beschaltet werden. Der beschaltete Transistor kann dann genutzt werden, um kleine Wechselspannungssignale (z. B. Tonfrequenzsignale) zu verstärken. Man muss daher grundsätzlich die Gleichstromgrößen (U , I), die zur Festlegung des sogenannten *Arbeitspunktes* dienen, und die Wechselstromgrößen (im Folgenden mit ΔU , ΔI bezeichnet) unterscheiden.

Die Wechselstromgrößen sind die zu verstärkenden Signale. Sie werden den Gleichstromgrößen aufgeprägt und modulieren diese am Arbeitspunkt. Da es sich um kleine Änderungen (ΔU , ΔI) handelt, spricht man von *Klein-signalverstärkung*. Der Koppelkondensator C_1 sorgt dafür, dass der Gleichstrom I_B (zur Festlegung des Arbeitspunktes) bei einer äußeren Beschaltung des Eingangs nicht abfließt und dass eine Einkopplung von Wechselspannungssignalen ΔU_{BE} möglich ist. Der Koppelkondensator C_2 sorgt dafür, dass am Ausgang keine Gleichspannung, sondern nur die Wechselspannung ΔU_{CE} anliegt.

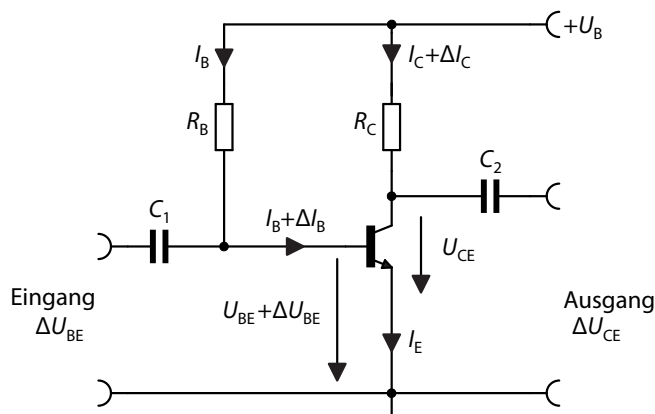


Abbildung 6: Emitterschaltung

Kennlinienfeld

Die Abhängigkeiten der vier wichtigen Transistorparameter Basis-Emitter Spannung U_{BE} , Basisstrom I_B , Kollektorstrom I_C und Kollektor-Emitter Span-

nung U_{CE} voneinander lassen sich grafisch als *Kennlinienfeld* darstellen. Ein Beispiel ist in Abb. 7 gezeigt. Es ist üblich, die Parameterpaare U_{BE}/I_C und U_{CE}/I_B jeweils durch gegenüberliegende Achsen darzustellen, sodass insgesamt vier Quadranten mit Kurvenscharen entstehen. So ist z. B. im rechten oberen Quadranten das Kennlinienfeld $I_C = f(U_{CE}, I_B)$ mit dem Scharparameter I_B dargestellt.

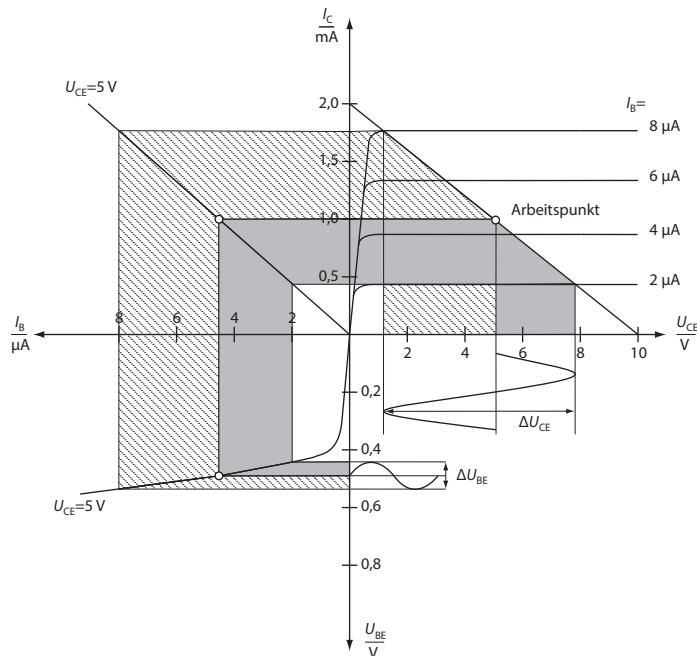


Abbildung 7: Kennlinienfeld

Von den insgesamt vier Parametern sind jedoch nur zwei voneinander unabhängig. Die gegenseitige Abhängigkeit kann man dem Kennlinienfeld entnehmen, wenn man zwei zusammengehörige Kennlinien in unterschiedlichen Quadranten gleichzeitig betrachtet. Variiert man z. B. U_{CE} bei einem festen Wert des Scharparameters I_B , so können die gleichzeitig auftretenden Änderungen von I_C (rechter oberer Quadrant) und von U_{BE} (rechter unterer Quadrant: $U_{BE} = f(U_{CE}, I_B)$ mit dem Scharparameter I_B , in Abb. 7 nicht dargestellt) abgelesen werden.

Ein kleines (Wechselspannungs-) Eingangssignal ΔU_{BE} (z. B. eine sinusförmige Spannung) erzeugt gemäß dem Vier-Quadranten-Kennlinienfeld eine Basisstrommodulation ΔI_B . Diese führt zu einer Kollektorstrommodulation ΔI_C und diese über die R_C -Widerstandsgerade (siehe weiter unten) zur gewünschten Modulation der Kollektor-Emitter Spannung ΔU_{CE} . Damit entsteht eine im Vergleich zur Eingangswchselspannung ΔU_{BE} wesentlich größere Ausgangswchselspannung ΔU_{CE} .

Festlegung des Arbeitspunktes und der Widerstandsgerade

Ein Transistor stellt einen Stromknoten dar, wobei $I_C + I_B = I_E$ gilt. Da jedoch $I_B \ll I_C$ ist, folgt $I_C \approx I_E$. Mit der Betriebsspannung U_B und dem Widerstand R_B wird ein konstanter Basisstrom I_B in die Basis eingespeist. Nach dem Maschensatz gilt: $U_B = U_{BE} + (R_B + r_{BE}) \cdot I_B$, wobei r_{BE} der differentielle Eingangswiderstand der Basis-Emitter-Strecke ist (siehe Vierpolparameter).

Für den Ausgangskreis gilt entsprechend dem Maschensatz: $U_B = U_{CE} + R_C I_C$. Damit ist die Widerstandsgerade mit dem Abzissenschnittpunkt ($U_B = U_{CE}$, $I_C = 0$) und dem Ordinatenschnittpunkt ($I_C = U_B / R_C$, $U_{CE} = 0$) festgelegt (siehe auch Versuch „Spannungsquelle (E7)“). Mit U_B , R_B und R_C sind also alle Gleichstrom- und Gleichspannungsgrößen (U_{BE} , I_B , U_{CE} , I_C) bestimmt, wodurch der *Arbeitspunkt des Transistors* in seinem Kennlinienfeld festliegt.

Vierpolparameter

Für seine Verstärkerfunktion wird der Transistor als aktiver Vierpol beschrieben. Die sogenannten h -Parameter verknüpfen dabei die dafür wichtigen Wechselstromgrößen. Von den insgesamt vier Eingangs- und Ausgangsgrößen sind jedoch nur zwei linear unabhängig, d. h., sobald zwei gegeben sind, können die anderen beiden berechnet werden. Da die Beschreibung linear ist, gilt sie nur in kleinen Bereichen um einen bestimmten Arbeitspunkt herum (Kleinsignalverstärkung!).

$$\begin{pmatrix} \Delta U_{BE} \\ \Delta I_C \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta I_B \\ \Delta U_{CE} \end{pmatrix} \quad (1)$$

Die Darstellung dieser Vierpolgleichung wird auch als Hybriddarstellung bezeichnet, da die Parameter h_{ij} verschiedene Einheiten besitzen.

Die einzelnen h -Parameter besitzen folgende Bedeutung:

$$\begin{aligned} h_{11} &= \left(\frac{\Delta U_{BE}}{\Delta I_B} \right)_{\Delta U_{CE}=0} && \text{Eingangswiderstand (in } \Omega \text{) bei dynamisch kurzgeschlossenem} \\ &&& \text{Ausgang} \\ h_{12} &= \left(\frac{\Delta U_{BE}}{\Delta U_{CE}} \right)_{\Delta I_B=0} && \text{Spannungsrückwirkung (dimensionslos) bei dynamisch offenem} \\ &&& \text{Eingang} \\ h_{21} &= \left(\frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} \right)_{\Delta U_{CE}=0} && \text{Stromverstärkung (dimensionslos) bei dynamisch kurzgeschlossenem} \\ &&& \text{Ausgang} \\ h_{22} &= \left(\frac{\Delta I_C}{\Delta U_{CE}} \right)_{\Delta I_B=0} && \text{Ausgangsleitwert (in } \Omega^{-1} = \text{S} = \text{Siemens) bei dynamisch offenem} \\ &&& \text{Eingang.} \end{aligned}$$

Die h -Parameter ergeben sich auch aus dem Kennlinienfeld als Anstiege der Steigungsdreiecke am Arbeitspunkt in den entsprechenden Quadranten.

Der differentielle Eingangswiderstand $r_{BE} = h_{11} = \left(\frac{\Delta U_{BE}}{\Delta I_B} \right)_{\Delta U_{CE}=0}$ beträgt lt. Kennlinienfeld $\approx 20 \text{ k}\Omega$.

Spannungsverstärkung

Das Verhältnis

$$V = \frac{\text{Änderung der Ausgangswechselspannung}}{\text{Änderung der Eingangswechselspannung}} = \frac{\Delta U_{CE}}{\Delta U_{BE}} \quad (2)$$

heißt *Spannungsverstärkung*. V ist jedoch nicht mit dem Kehrwert von h_{12} identisch, da ΔI_B ungleich Null ist. Der Faktor lässt sich jedoch aus den h -Parametern berechnen. Aus den Vierpolgleichungen folgt:

$$\Delta U_{BE} = h_{11} \Delta I_B + h_{12} \Delta U_{CE} = h_{11} \Delta I_B - R_C h_{12} \Delta I_C \quad (3)$$

$$\Delta I_C = h_{21} \Delta I_B + h_{22} \Delta U_{CE} = h_{21} \Delta I_B - R_C h_{22} \Delta I_C \quad .$$

Aus diesen beiden Gleichungen lässt sich ΔI_B eliminieren und man erhält

$$\begin{aligned} V &= \frac{\Delta U_{CE}}{\Delta U_{BE}} = \frac{-R_C \Delta I_C}{(h_{11}/h_{21})(1+R_C h_{22})\Delta I_C - R_C h_{12} \Delta I_C} \\ &= -\frac{R_C h_{21}}{h_{11} + R_C (h_{11} h_{22} - h_{12} h_{21})} \end{aligned} \quad (4)$$

Das Minuszeichen bedeutet eine Phasendrehung um $\pi \hat{=} 180^\circ$ zwischen Eingangs- und Ausgangswechselspannung.

Differenzverstärker

Wie in Abb. 8 gezeigt, besteht ein Differenzverstärker aus zwei Emitterschaltungen, die beide als Verstärker arbeiten, wenn die Arbeitspunkte (Gleichstromgrößen) richtig eingestellt sind. An den Kollektoren (Punkte A1 bzw. A2) können dann jeweils die verstärkten Wechselspannungseingangssignale, die an den Punkten E1 bzw. E2 in die jeweilige Basis eingespeist wurden, abgenommen werden. Die verstärkten Signale sind gegenüber den Eingangssignalen um 180° phasenverschoben (warum?). Die Spannung zwischen den Punkten A1 und A2 entspricht dann der Differenz der beiden verstärkten Signale. Mit dieser Grundschaltung lassen sich sehr empfindliche Messverstärker mit hohem Eingangswiderstand realisieren (siehe Versuch E20 Operationsverstärker).

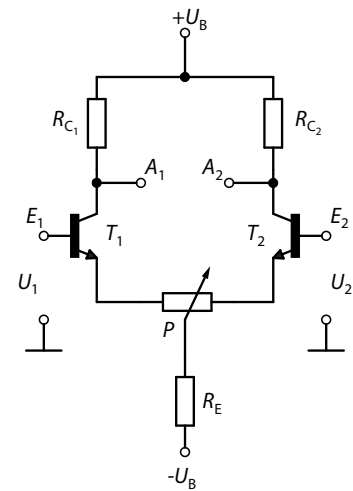


Abbildung 8: Differenzverstärker (Grundschaltung)

Versuchsaufbau und -durchführung

Zur *Kennlinienaufnahme* muss die in Abb. 9 dargestellte Schaltung aufgebaut werden. Der Kollektor-Emitter-Kreis wird von einer einstellbaren 15 V-Gleichspannungsquelle versorgt. Mit einer zweiten Gleichspannungsquelle und einem Potentiometer zur Feineinstellung wird die Spannung U_{BE} und damit auch der Basisstrom I_B bereitgestellt und geregelt. Spannungen und Ströme werden mit Vielfachmessgeräten gemessen. Der Transistor sollte vom Typ BC 107 o. ä. sein (universell verwendbarer NF-Transistor kleiner Leistung).

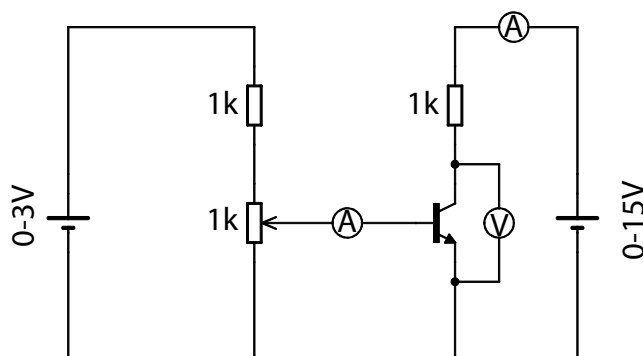


Abbildung 9: Versuchsaufbau zur Kennlinienaufnahme

Messen Sie zunächst I_C als Funktion von U_{CE} bei jeweils konstantem Basisstrom I_B . Messen Sie I_C bei $U_{CE} = 0,1; 0,2; 0,5; 1; 2; 5; 10$ V für die Basisströme $I_B = 10; 20; 30 \mu\text{A}$. Stellen Sie dabei die Messwerte schon während des Versuches in einem Vierquadranten-Kennlinienfeld dar, um die

Widerstandsgerade und den Arbeitspunkt A bestimmen zu können. Diesen müssen Sie später zur Messung der Spannungsverstärkung einstellen.

Dann messen Sie $I_C = I_C(I_B)$ mit $U_{CE} = \text{const}$ für $U_{CE} = 0,1; 1; 10 \text{ V}$; jeweils bei $I_B = 2; 5; 10; 15; 20; 30 \mu\text{A}$.

Für $I_B = I_B(U_{BE})$ bei $U_{CE} = \text{const}$ wählen Sie $U_{CE} = 0,1; 10 \text{ V}$. Diese Kennlinie entspricht der Diodenkennlinie des pn-Übergangs. Messtechnisch ist es hier günstiger, I_B einzustellen und U_{BE} zu messen. Wählen Sie $I_B = 1; 2; 4; 7; 10; 20; 30 \mu\text{A}$.

Für $U_{BE} = U_{BE}(U_{CE})$ bei $I_B = \text{const}$ wählen Sie $I_B = 10; 30 \mu\text{A}$; $U_{CE} = 0,1; 1; 5; 10 \text{ V}$.

Diese hier angegebenen Werte sollten Sie als Anhaltspunkte betrachten, von denen Sie abweichen können, wenn es Ihre Ergebnisse erfordern. Jedoch sollten Sie unbedingt darauf achten, dass die Grenzdaten des Transistors, insbesondere der maximale Kollektorstrom ($I_{C,\text{max}} = 200 \text{ mA}$), nicht überschritten werden.

Wenn Sie auf der Widerstandsgeraden im $I_C = f(U_{CE})$ -Quadranten nun einen Punkt als Arbeitspunkt festlegen, legen Sie damit automatisch den Basisstrom I_B – der dort der Scharparameter ist – fest. Nun können Sie auch im linken oberen Quadranten $I_C = f(I_B)$ sowie im linken unteren Quadranten den Arbeitspunkt einzeichnen.

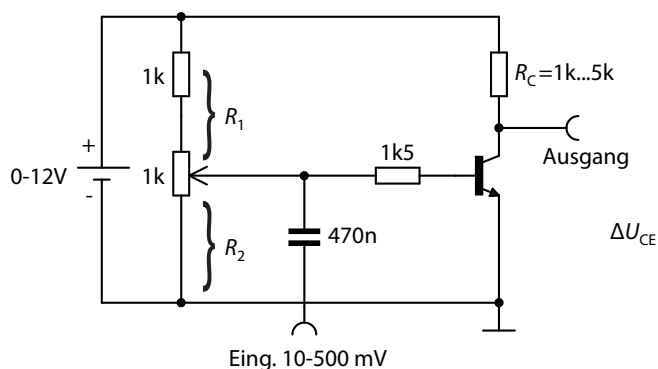


Abbildung 10: Versuchsaufbau Verstärkerschaltung

Zur Messung der Spannungsverstärkung muss die Verstärkerschaltung nach Abb. 10 aufgebaut werden. Eine Gleichspannungsquelle versorgt nun die gesamte Schaltung. Die Einstellung von U_B erfolgt mit dem Basisspannungsteiler R_1, R_2 . Die Einkopplung des zu verstärkenden Wechselspannungssignals erfolgt über einen Koppelkondensator. Für z. B. $U_{BE} \approx 0,5 \text{ V}$ muss wegen $U_{BE} \approx U_B \frac{R_2}{R_1 + R_2}$ das Verhältnis $R_2 : (R_1 + R_2) \approx 1 : 20$ sein. Eine Wechselspannungsquelle (Frequenzgenerator) liefert das zu verstärkende Signal. Die Eingangswchselspannung sollte im Bereich von 10 bis 500 mV liegen und eine Frequenz von etwa 5 kHz haben.

Gemäß dem Wechselspannungs-Ersatzschaltbild (Abb. 11) teilt sich die Eingangswchselspannung am Spannungsteiler, der vom Wechselstromwiderstand des Eingangskondensators ($\frac{1}{\omega C} \approx 60 \Omega$ bei 5 kHz) und den Widerständen $R_1 \parallel R_2 \parallel (1,5 \text{ k}\Omega + r_{BE})$ gebildet wird.

Tragen Sie in das Kennlinienfeld die Widerstandsgerade des Kollektorwiderstands R_C für $U_B = 10 \text{ V}$ ein. Denken Sie daran, dass wegen des Spannungsabfalls an R_C $U_{CE} < U_B$ ist. Wenn Sie die Spannungsverstärkung z. B. für einen Arbeitspunkt mit $I_C = 2 \text{ mA}$ messen wollen, regeln Sie mit

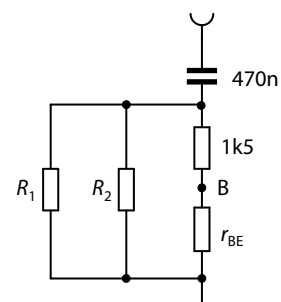


Abbildung 11: Wechselspannungs-Ersatzschaltbild des Eingangs (Die Spannungsquelle der Schaltung stellt aufgrund ihres Glättungskondensators einen Kurzschluss für Wechselspannungen dar). $r_{BE} \approx 20 \text{ k}\Omega$, $R_1 + R_2 \approx 0,9 \text{ k}\Omega$

dem Potentiometer den Basisstrom so, dass $I_C = 2 \text{ mA}$ wird. Markieren Sie den für Ihre Messung gewählten Arbeitspunkt auf der Widerstandsgeraden im Kennlinienfeld. Während der Durchführung des Versuches müssen Sie eventuell häufiger nachregeln, da die Schaltung stark auf Temperatur- und Stromschwankungen reagiert.

Messen Sie nun für die Eingangswechselspannungen 10; 20; 50; 100; 200; 500 mV jeweils die Spannung ΔU_{BE} (am Punkt B der Schaltung in Abb. 11) und die Ausgangsspannung ΔU_{CE} . Führen Sie diese Messungen mit einem Oszilloskop durch (AC-Modus).

Falls die Ausgangsspannung zu stark verzerrt ist, müssen Sie den gewählten Arbeitspunkt korrigieren.

Die Ausgangswechselspannung ΔU_a ist die negative Änderung der Spannung, die durch ΔI_C an R_C erzeugt wird:

$$\Delta U_a = -\Delta I_C \cdot R_C \quad .$$

Bei größerem R_C steigt prinzipiell ΔU_a , wodurch die Arbeitsgerade jedoch flacher wird.

Es ist also für R_C ein Optimum zu finden. Probieren Sie $R_C = 1 \text{ k}\Omega$ und $4,7 \text{ k}\Omega$, dabei ist der Basisspannungsteiler (Arbeitspunkt) so nachzustimmen, dass eine symmetrische Ausgangswechselspannung ΔU_a entsteht.

Die Schaltung des *Differenzverstärkers* ist nach Abb. 12 aufzubauen. Der jeweilige Kollektorwiderstand und der Basisspannungsteiler sind notwendig, um die Arbeitspunkte der Transistoren (gleichspannungsmäßig) richtig einzustellen. Mit dem 100 Ohm Poti am Emitter können Fertigungstoleranzen beider Transistoren ausgeglichen werden. Mit den Einkoppelkondensatoren werden die zu verstärkenden Wechselspannungssignale an der jeweiligen Basis eingespeist.

Um das Differenzsignal zwischen den Kollektoren beider Transistoren z. B. mit einem nicht massefreien Oszilloskop messen zu können, muss ein Übertrager² eingebaut werden (Ohne Übertrager wird beim Messen zwangsläufig einer der beiden Kollektoren auf Masse gelegt und damit kurzgeschlossen).

² Im Grunde nichts anderes als ein Transformator mit einem Spulenverhältnis von 1:1.

Aufgabenstellung

1. Termin

- Nehmen Sie die Kennlinienfelder eines npn-Transistors auf. Zeichnen Sie die Kennlinien $I_C(U_{CE})$ bereits begleitend zur Messung auf A3-Millimeterpapier (4-Quadranten Kennlinienfeld), um mit Hilfe der Widerstandsgerade den Arbeitspunkt festzulegen.³
- Bestimmen Sie für den von Ihnen gewählten Arbeitspunkt die h -Parameter aus Ihren Kennlinienfeldern mit Hilfe von Steigungsdreiecken (evtl. Tangente anlegen!). Berechnen Sie damit die Spannungsverstärkung V des Transistors.

³ Empfohlene Einteilung der Achsen: U_{CE} bis 15 V; I_C bis 15 mA; I_B bis 25 μ A; U_{BE} bis 1 V.

2. Termin

- Bestimmen Sie die Spannungsverstärkung des Transistors in einer Emitterschaltung (gemäß Abb. 10), indem Sie die Verstärkerschaltung am

Arbeitspunkt betreiben und das Verhältnis der Ausgangs- zur Eingangswechselfrequenz ermitteln. Achten Sie dabei auf die Form des verstärkten Signals in Beziehung zum Eingangssignal. Beschreiben Sie Ihre Beobachtungen. Vergleichen Sie die experimentell bestimmten Werte für V mit den berechneten.

- Differenzverstärker
 - Informieren Sie sich über die Funktionsweise eines Differenzverstärkers! Warum wird er in der Messtechnik verwendet?
 - Erproben Sie nach dem Aufbau der Gesamtschaltung einzeln jede der beiden Emitterschaltungen auf ihre Funktionsweise. Legen Sie dazu an die jeweilige Basis ein Eingangssinussignal (ca. 1000 Hz, 400 mVpp) und messen Sie mit dem Oszilloskop das entsprechende verstärkte Signal am Kollektor. Stellen Sie mit dem 10 kOhm Potentiometer den Arbeitspunkt so ein, dass Sie ein symmetrisches Ausgangssignal erhalten.
 - Einstellen der Symmetrie: Legen Sie jetzt an beide Eingänge dasselbe Signal aus demselben Sinusgenerator und justieren Sie mit Hilfe des 100 Ohm Potentiometers (Emitterwiderstand) die Symmetrie beider Emitterschaltungen so, dass das Ausgangssignal Null wird (Beobachtung mit dem Oszilloskop).
 - Messen Sie die Differenzsignale mit dem Oszilloskop, wenn Sie mit Hilfe von zwei Sinusgeneratoren Signale mit etwas unterschiedlichen Frequenzen (z. B. 1000 Hz und 1100 Hz) in den Differenzverstärker einspeisen. Messen Sie das Ausgangssignal des Differenzverstärkers mit dem Oszilloskop und dokumentieren und interpretieren Sie ihre Ergebnisse im Bericht.
 - Vergleichen Sie für drei Fälle die erwarteten und gemessenen Schwingungsfrequenzen.

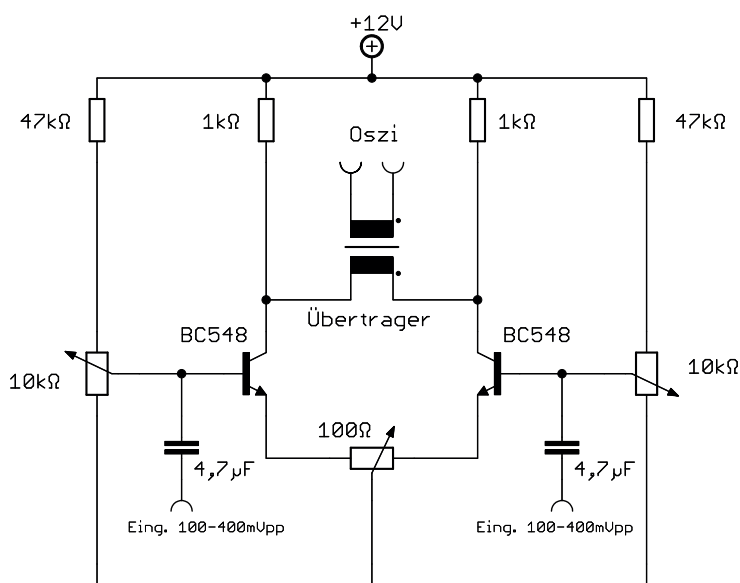


Abbildung 12: Differenzverstärker (Versuchsaufbau)

Ergänzung für Interessierte:

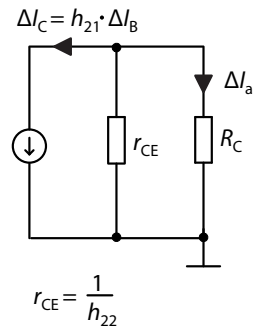


Abbildung 13: Wechselstrom-Ersatzschaltbild für den Ausgang eines Transistors

Für alle Ströme gilt:

$$\frac{\Delta U_a}{R_C} = -\Delta I_C + \frac{\Delta U_a}{r_{CE}} \quad h_{21} = \left. \frac{\frac{\Delta I_C}{\Delta U_{BE}}}{\frac{\Delta I_B}{\Delta U_{BE}}} \right|_{\Delta U_{CE}=0} = \frac{\Delta I_C}{\Delta U_{BE}}$$

$$\frac{\Delta U_a}{R_C} = -\frac{h_{21}}{h_{11}} \Delta U_{BE} + \frac{\Delta U_a}{r_{CE}}$$

$$V = \frac{\Delta U_a}{\Delta U_{BE}} = -\frac{h_{21}}{h_{11}} \left(\frac{r_{CE} R_C}{R_C + r_{CE}} \right) = -\frac{h_{21}}{h_{11}} (r_{CE} \parallel R_C)$$

Eine Herabsetzung der ΔU_a kann durch einen Lastwiderstand R_L (= Eingangswiderstand der folgenden Stufe) erfolgen:

$$\Delta U_a = -\frac{h_{21}}{h_{11}} (r_{CE} \parallel R_C \parallel R_L)$$

i. A. ist $r_{CE} \gg R_C$.

Technische Daten

Das „Werkbuch Elektronik“ von D. Nührmann gibt für den Transistor BC 107 folgende Daten an:

maximaler Kollektorstrom: $I_{C,max} = 200 \text{ mA}$

Gesamtverlustleistung bei $45^\circ\text{C} = 260 \text{ mW}$

Vierpol-Koeffizienten bei $U_{CE} = 5 \text{ V}$, $I_C = 2 \text{ mA}$, $\nu = 1 \text{ kHz}$:

	BC 107 A	BC 107 B
$h_{11} [\text{k}\Omega]$	= 2.7	4.5
h_{21}	= 220	
h_{12}	= $1.5 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$
$h_{22} [\mu\text{S}]$	= 18	30