

Dieser Versuch bietet eine Einführung in die Elektronik. Durch die Aufnahme des Kennlinienfeldes wird die grundlegende Arbeitsweise eines Transistors untersucht. Aufgrund der Grenzdaten wird ein einstufiger Transistorverstärker dimensioniert. Die Funktionsweisen eines Funktionsgenerators werden mit Hilfe eines Zweikanaloszilloskops charakterisiert.

1. Theoretische Grundlagen

1.1 Allgemeines

1.1.1 Das Bändermodell

In einem Atom können die Elektronen nur ganz bestimmte, diskrete Energien annehmen. Nähern sich zwei Atome einander, so spaltet sich jedes atomare Energieniveau in zwei Niveaus auf. Bei n -benachbarten Atomen erfolgt die Aufspaltung in n -Niveaus. In einem Festkörper ist die Zahl n der Atome so groß, dass die Aufspaltungsniveaus sich überlappen und damit jedem atomaren Energieniveau im Festkörper prinzipiell ein kontinuierliches Energieband entspricht.

Den Potentialverlauf einer linearen Kette von n -Atomen und die resultierenden Energiebänder zeigt **Bild 1**. Das gezeichnete Gesamtpotential ergibt sich dabei als Überlagerung der Coulomb-Potentiale jedes einzelnen Atoms.

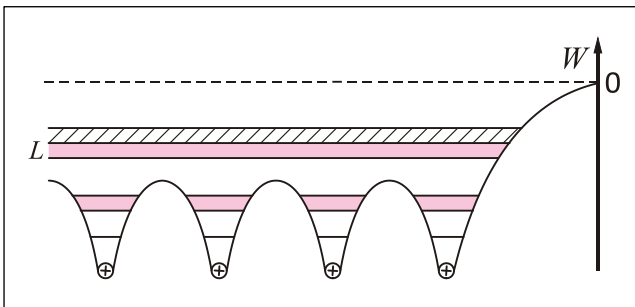


Bild 1: Schematische Darstellung der Energiebänder in einem Kristallgitter

Die Elektronen auf inneren Schalen sind sehr stark an einer Atomhülle gebunden, und für diese Elektronen machen sich die Nachbaratome nur sehr wenig bemerkbar. Deshalb ist die Aufspaltung tieferer Energieniveaus vernachlässigbar, die Energiewerte der inneren Elektronen beim Festkörper sind praktisch identisch mit denen im Atom.

Jedes Energieniveau kann nach dem Pauli-Prinzip höchstens zwei Elektronen mit unterschiedlichem Spin aufnehmen, in jedem Energieband können sich demnach höchstens $2n$ Elektronen befinden. Da die

energetisch niedrigsten Bänder zuerst mit Elektronen gefüllt werden, wird die elektrische Leitfähigkeit eines Festkörpers durch das oberste nicht leere Band bestimmt.

Ist dieses Band voll besetzt, so kann ein Elektron nur von einer Atomhülle zu einer anderen gelangen, wenn dafür ein anderes Elektron in die entgegengesetzte Richtung wandert. Die entgegengesetzte Bewegung zweier gleicher Ladungen kann jedoch nicht zur Stromleitung beitragen; der Kristall ist in diesem Fall ein Nichtleiter. Das oberste vollgefüllte Band wird dann als Valenzband, das nächst höhere (leere) Band als Leitungsband bezeichnet.

In einem nur teilweise gefüllten Band hingegen können sich die Elektronen nahezu frei durch den Kristall bewegen und machen ihn damit zum Leiter. Das teilweise gefüllte Band wird dann Leitungsband, das nächst tiefere Valenzband genannt. Ein Leiter zeichnet sich also durch ein nur teilweise gefülltes Leitungsband aus.

1.1.2 Stromleitung im Halbleiter

Während bei guten Isolatoren der Abstand zwischen Valenz- und Leitungsband einige eV beträgt, ist der Bandabstand bei dem Halbleiter Silizium nur 1,1 eV, bei Germanium 0,7 eV. Bei Temperaturen nahe des absoluten Nullpunktes von 0 K befinden sich praktisch alle Außenelektronen im Valenzband, der Kristall ist also ein Isolator. Mit steigender Temperatur bekommen immer mehr Elektronen aus dem gefüllten Valenzband genügend Energie, um in das unbesetzte Leitungsband zu springen. Sie hinterlassen dabei im Valenzband Löcher, die wiederum durch benachbarte Elektronen aufgefüllt werden können. Beim Anlegen einer elektrischen Spannung an einem Halbleiterkristall wandern die Elektronen in Richtung der Anode. Im Valenzband bedeutet dies, dass die jeweils freiwerdenden Löcher in entgegengesetzter Richtung, also zur Katode hinbewegt werden. Löcher können demnach aufgefasst werden als frei bewegliche positive Ladungsträger. Die Stromleitung im Halbleiter wird damit von zwei verschiedenen Arten von Ladungsträgern verursacht: von den im Leitungsband frei beweglichen Elektronen und von den im Valenzband frei beweglichen positiven Löchern.

1.1.3 Dotierung von Halbleitern

Die in **Abschnitt 1.2** beschriebenen elektrischen Eigenschaften treffen nur für Halbleiter zu, die frei von Fremdatomen sind. Schon Verunreinigungen im ppb-Bereich, d. h. 1 Fremdatom auf 10^9 Si-Atome, können diese Eigenschaften empfindlich verändern. Bei der Dotierung von Halbleitern werden diese Veränderungen gezielt herbeigeführt.

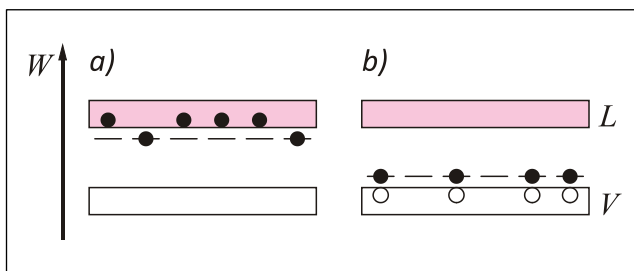


Bild 2: Bänderschema dotierter Halbleiter

a) n-Dotierung, **b)** p-Dotierung

In einem reinen Siliziumkristall trägt jedes Atom mit vier Elektronen zur Bindung mit den vier Nachbaratomen bei. Baut man nur einige wenige fünfwertige Atome (*Phosphor oder Arsen*) in das Kristallgitter ein, so sind diese überzähligen Elektronen relativ schwach an die jeweilige Atomhülle gebunden. Dies macht sich auch im Bänderschema des Halbleiters bemerkbar: im Abstand von einigen Zehntel eV unter dem Leitungsband liegen mit Elektronen besetzte diskrete, ortsfeste „*Verunreinigungsniveaus*“.

Bei Zimmertemperatur ist die mittlere thermische Energie etwa $(\frac{2}{3})k \cdot T = 0,075$ eV, so dass relativ viele Elektronen Energie besitzen, um das Leitungsband zu erreichen. Die Stromleitung in solchen Halbleitern wird also hauptsächlich von negativen Ladungsträgern verursacht, die durch thermische Anregung aus dem Verunreinigungsniveau in das Leitungsband gelangt sind. Man bezeichnet deshalb diesen Vorgang als n-Leitung und den Halbleiter als n-dotiert. Die fünfwertigen Atome heißen Donatoren.

Bei der p-Dotierung werden stattdessen dreiwertige Fremdatome (*Akzeptoren*) in den Kristall eingebaut (*Aluminium oder Bor*). Die Energieniveaus dieser ortsfesten Akzeptoren liegen einige Zehntel eV oberhalb des Valenzbandes. Thermisch angeregte Elektronen aus dem Valenzband können diese Akzeptor-Niveaus besetzen und hinterlassen dabei im Valenzband Löcher. Diese verhalten sich analog zum undotierten Halbleiter, nämlich wie freibewegliche positive Ladungen. Durch sie wird die Stromleitung im p-dotierten Halbleiter möglich.

1.4 Der pn -Übergang

Bringt man innerhalb eines Kristalls durch unterschiedliche Dotierungen die zwei Leitungstypen zusammen, so entsteht ein pn -Übergang (**Bild 3**). Durch die Wärmebewegung diffundieren Elektronen aus dem n -Bereich in den p -Bereich und rekombinieren dort mit Löchern.

Das gleiche geschieht mit den Löchern, die aus dem p -Bereich in den n -Bereich gelangen. Dadurch bildet sich im Grenzgebiet eine an Ladungsträgern verarmte Schicht, die als Isolator wirkt. Da die Atomrümpfe im Kristall ortsfest sind, entsteht durch die Diffusion im p -Bereich ein Gebiet mit negativer Raumladung, im n -Bereich ein Gebiet mit positiver Raumladung. Diese Diffusion setzt sich solange fort, bis die Energie der Ladungsträger nicht mehr ausreicht, um gegen das durch die Raumladung aufgebaute elektrische Feld anzulaufen. Die Spannung, die zwischen den beiden Raumladungsgebieten herrscht, heißt Antidiffusionsspannung U_a .

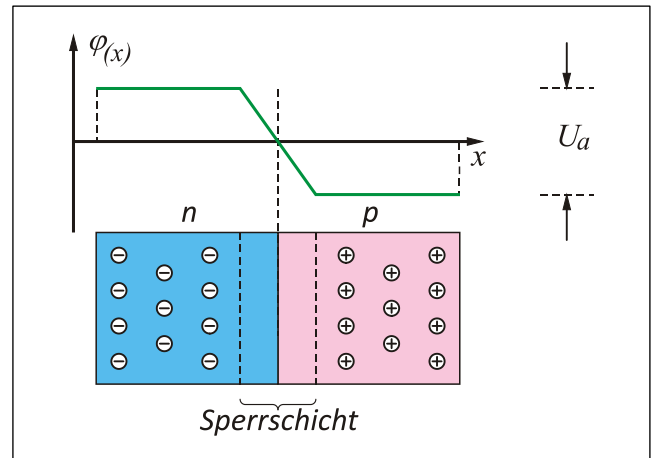


Bild 3: pn -Übergang ohne äußere Spannung

1.2 Der Transistor

1.2.1 Aufbau und Funktion des Transistors

Ein Transistor besteht aus 2 Dioden die gegenläufig übereinandergeschichtet wurden. Nach ihrer inneren Schichtfolge unterscheidet man zwischen pnp - und nnp -Transistoren. Beide Typen haben prinzipiell die gleiche Funktionsweise und alle Erklärungen für den einen Typ treffen auch auf den anderen zu,

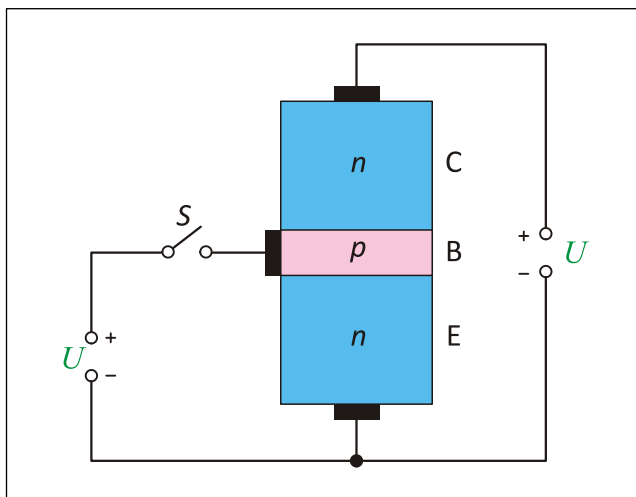


Bild 4: Spannungsquellen am nnp -Transistor

wenn die Polaritäten aller Spannungen vertauscht und statt Elektronen jeweils Löcher und umgekehrt betrachtet werden. Da aus technischen Gründen hauptsächlich nnp -Transistoren verwendet werden, wollen wir unsere Betrachtung auf diesen Typ beschränken.

Legt man die beiden n -Schichten an die Pole einer Gleichspannungsquelle (**Bild 4**), so sperrt (bei offenem Schalter S) der obere pn -Übergang, während der untere in Durchlassrichtung gepolt ist. Insgesamt fließt also nur ein vernachlässigbarer Sperrstrom durch den Transistor. Wird nun beim Schließen des Schalters die zweite Spannungsquelle an den unteren pn -Übergang gelegt, so ist dieser in

Durchlassrichtung gepolt, und im linken Stromkreis fließt ein Strom. Dabei gelangen Elektronen aus den unteren n -Schichten in die p -Schicht. Diese ist aber so dünn (typisch ca. $10\mu\text{m}$), dass die meisten Elektronen in den oberen pn -Übergang geraten. Damit existieren in diesem, nur freie Ladungsträger und es fließt auch im rechten Stromkreis ein Strom.

Die p -Schicht kann so hergestellt werden, dass rund 99% aller von der unteren n -Schicht ausgehenden Elektronen in die obere n -Schicht gelangen. Man bezeichnet gemäß ihrer Wirkungsweise die untere n -

Schicht als **Emitter**, die obere als **Kollektor** und die *p*-Schicht als **Basis**. Durch den Strom über die Basis kann also ein um rund 2 Größenordnungen höherer Kollektorstrom gesteuert werden.

1.2.2 Das Kennlinienfeld

Das Verhalten eines Transistors lässt sich nicht durch eine einzige Kennlinie beschreiben. Es müssen vielmehr die Zusammenhänge mehrerer Spannungen und Ströme graphisch dargestellt werden. Da die Polung der Spannungsquellen und die Stromrichtung laut **Bild 4** festgelegt sind, genügt für jede Kennlinie ein Quadrant. Wie man später noch sieht, ist es zweckmäßig, mehrere Kennlinien in einem Schaubild, dem Kennlinienfeld des Transistors, zu vereinigen.

Am Beispiel des bipolaren Transistors **BD 108** wird im **ersten Quadranten** des Kennlinienfeldes die Abhängigkeit des Kollektorstromes I_C von der Spannung U_{CE} zwischen Kollektor und Emitter dargestellt. Da I_C noch von der Basisstromstärke I_B abhängt, werden mehrere dieser Ausgangskennlinien mit I_B als Parameter eingetragen (siehe **Bild 5**).

Die Abhängigkeit des Kollektorstromes I_C vom Basisstrom I_B bei einer festen Spannung U_{CE} wird mit der Stromsteuerkennlinie im **zweiten Quadranten** dargestellt. Dazu wird der Basisstrom I_B auf der negativen *x*-Achse abgetragen. Man kann die Stromsteuerkennlinie unmittelbar aus den Ausgangskennlinien entnehmen, indem man für die verschiedenen Basisströme I_B den Kollektorstrom I_C bei fester Kollektor-Emitter-Spannung U_{CE} abliest. Im **Bild 5** wurde $U_{CE}=6\text{ V}$ vorausgesetzt. Aus der Stromsteuerkennlinie ergibt sich annähernd eine Gerade, deren Steigung die Stromverstärkung B angibt.

Im **dritten Quadranten** stellt man die Abhängigkeit des Basisstromes von der zwischen Basis und Emitter anliegenden Eingangsspannung U_{BE} dar. Diese so genannte Eingangskennlinie ist identisch mit der Kennlinie eines in Durchlassrichtung gepolten *pn*-Überganges.

1.2.3 Lastwiderstand des Transistors

Der Transistor soll in vielen Fällen den Strom I_C durch einen Lastwiderstand R_L im Kollektorkreis steuern. Er wirkt dann wie ein Vorwiderstand, dessen Wert vom Basisstrom I_B bzw. von der Spannung U_{BE} zwischen Basis und Emitter abhängt.

Im Kollektorkreis gilt:

$$U = U_{CE} + R_L \cdot I_C \quad U: \text{Betriebsspannung der Schaltung} \quad (1)$$

Der Lastwiderstand R_L muss dabei mindestens so groß gewählt werden, dass bei gegebener Betriebsspannung U und bei voll durchgeschaltetem Transistor ($U_{CE}=0\text{ V}$) der Kollektorstrom kleiner als $I_{C,max}$ ist.

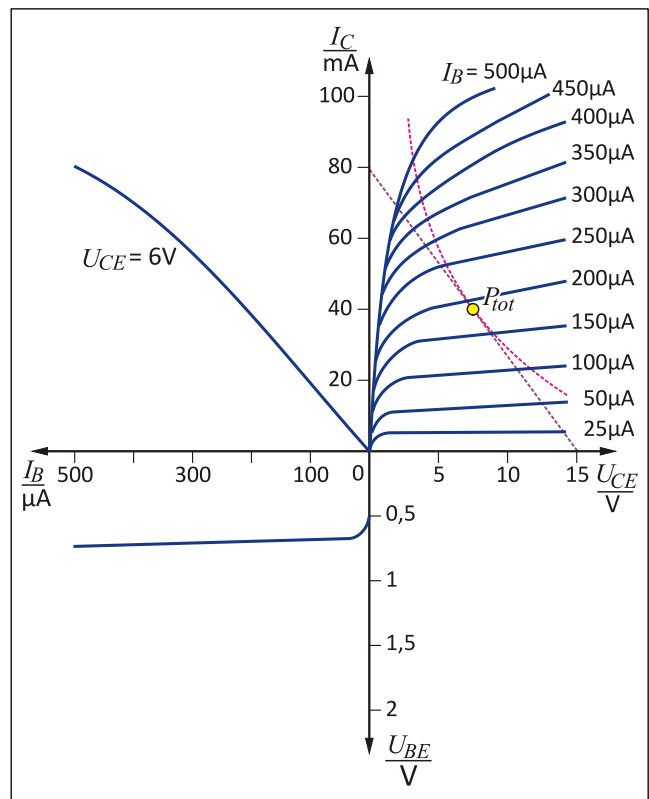


Bild 5: Kennlinienfeld des Transistors **BD 108**

Die Betriebszustände, bei denen die maximal erlaubte Verlustleistung erreicht wird, liegen im Ausgangskennlinienfeld auf einer Hyperbel mit

$$P_{tot} = U_{CE} \cdot I_C \quad (2)$$

Daraus ergibt sich für den Lastwiderstand R_L eine zweite Bedingung: sein Wert muss mindestens so groß gewählt werden, dass der Transistor nur unterhalb dieser Hyperbel betrieben wird.

Die Gleichung (1) beschreibt eine Gerade im Ausgangskennlinienfeld $I_C(U_{CE})$, deren negative Steigung der Kehrwert des Lastwiderstandes R_L ist. Bei dem minimal zulässigen Widerstand berührt die Gerade die Leistungshyperbel, für größere Widerstände verläuft sie unterhalb dieser Hyperbel.

Den Wert von R_L erhält man aus den Schnittpunkten der Geraden mit den Achsen. Physikalisch bedeutet dies, dass man einmal den Transistor in voll durchgesteuertem Zustand und einmal in voll gesperrtem Zustand betrachtet.

1.2.4 Der Transistor als Verstärker

Über einen Transistor können mit kleinen Gleichströmen im Basiskreis erheblich größere Gleichströme im Kollektorstromkreis gesteuert werden. Legt man zwischen Basis und Emitter eine Wechselspannung an, so arbeitet der Transistor während der positiven Halbperiode genau wie bei der Gleichspannung als Verstärker. Während der negativen Halbperiode hingegen wird der pn -Übergang zwischen Basis und Emitter gesperrt, der Kollektorstrom ist also während der gesamten Halbwelle nahezu Null.

Damit auch negative Halbwellen übertragen werden können, muss in die Basis zusätzlich zum Signalwechselstrom ein konstanter Gleichstrom eingespeist werden. Es ist meist zweckmäßig, diesen Gleichstrom so einzustellen, dass ohne Signalwechselstrom am Lastwiderstand im Kollektorkreis die halbe

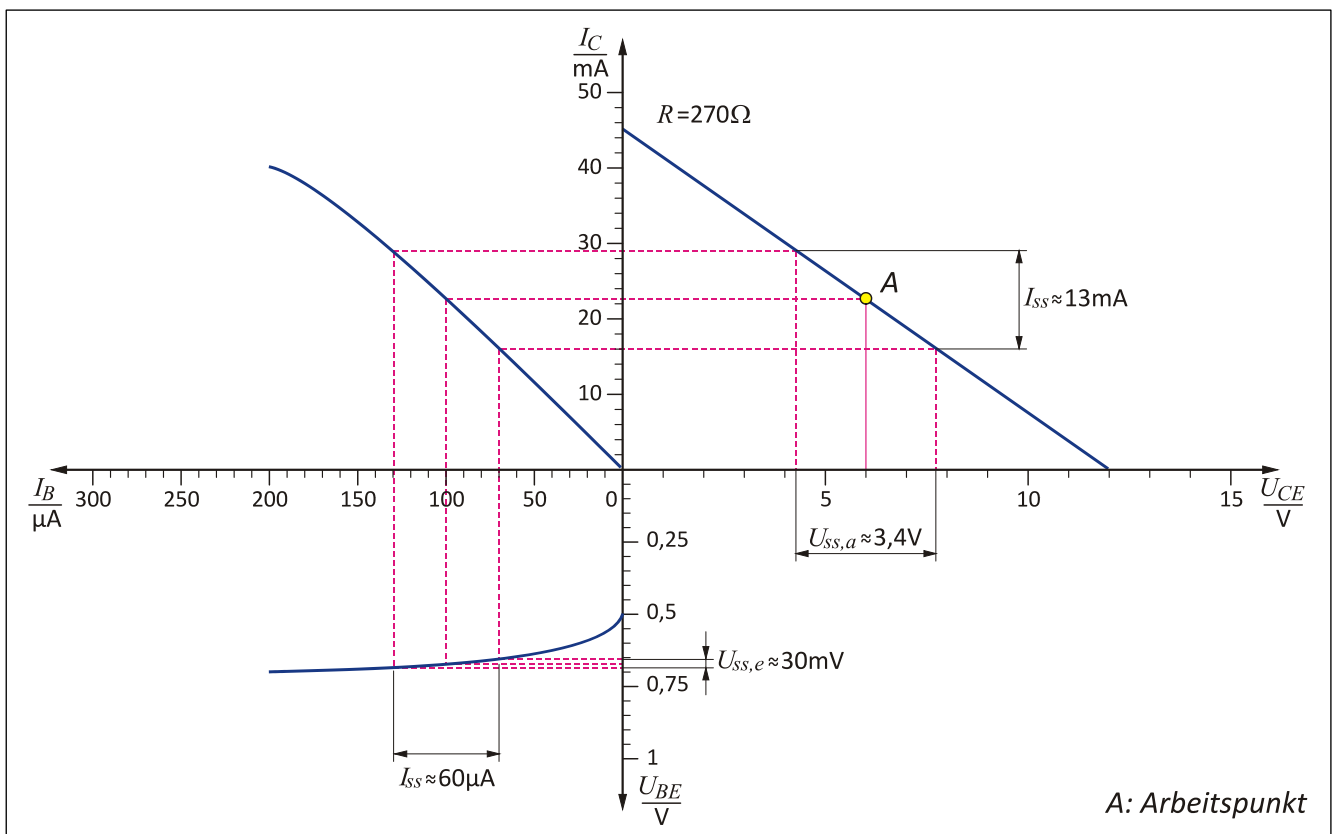


Bild 6: Spannungsverstärkung am Transistors

Betriebsspannung anliegt. Dieser so genannte Arbeitspunkt des Transistors liegt dann in der Mitte der Widerstandsgeraden. Der Wechselstrom bewirkt Stromänderungen in der Basis und damit um den Faktor B größere Stromänderungen im Kollektor. Am Lastwiderstand fällt also im Endeffekt eine durch Gleichspannung überlagerte Wechselspannung an. In **Bild 6** ist die Verstärkungswirkung am Kennlini-
 enfeld beispielhaft mit einem Arbeitswiderstand $R=270\ \Omega$ und einer Betriebsspannung $U=12\text{ V}$ dargestellt. Die Spannung U_{SS} ist jeweils die doppelte Amplitude der Eingangs- bzw. Ausgangs- Wechselspannung („Spitze-Spitze-Wert“).

1.2.5 Der Transistor als Schalter

Beim Einsatz als steuerbarer Schalter besitzt der Transistor zwei Arbeitspunkte, entweder er ist gesperrt oder durchgeschaltet. Die beiden Arbeitspunkte liegen also möglichst weit rechts bzw. links auf der Widerstandsgeraden. Wenn der Schaltvorgang schnell durchgeführt wird, darf die Widerstandsgerade die Leistungshyperbel schneiden. Nur die beiden Arbeitspunkte müssen unterhalb der Hyperbel liegen.

Transistoren als steuerbarer Schalter werden zum Beispiel in Funktionsgeneratoren eingesetzt. Diese Geräte dienen zur Erzeugung elektrischer Schwingungen unterschiedlicher zeitlicher Verläufe (*Funktionen*), insbesondere einer Rechteckschwingung. Die elektronische Grundschaltung ist dabei eine astabile Kippstufe (*Multivibrator*). Diese besteht im Wesentlichen aus zwei Transistoren, die wechselseitig gesperrt bzw. durchgeschaltet werden, so dass an der jeweiligen Kollektor-Emitter-Strecke **eine** bzw. **keine** Spannung abfällt. In der Schaltung ergeben sich so zwei Zustände, die eine Zeit lang stabil bleiben, bis die Schaltung wieder in den anderen Zustand springt. Die zeitliche Dauer dieser Zustände wird durch die verwendeten Widerstände und Kondensatoren bestimmt. So kann eine symmetrische oder asymmetrische Rechteckschwingung mit unterschiedlichen Schaltzeiten erzeugt werden.

Die Zustände werden in **Aufgabe 3** über Lampen angezeigt. Durch Variation der Widerstände und Kondensatoren wird deren Einfluss auf Schaltzeiten bzw. Schwingungsfrequenz beobachtet. Die Schaltzeiten (*Einschaltdauern*) werden mit Hilfe eines Oszilloskops bestimmt.

Die Schaltzeiten hängen von den Zeitkonstanten τ der entsprechenden RC-Glieder ab:

$$\tau = R \cdot C \quad (3)$$

Für die Einschaltdauer T_{ED} ergibt sich für eine Versorgungsspannung, die groß gegenüber der Durchlassspannung der Basis-Emitter-Strecke ist,

$$T_{ED} = \ln 2 \cdot \tau \quad (4)$$

Als relative Einschaltdauer oder Tastverhältnis der Rechteckschwingung am jeweiligen Transistor wird die Größe

$$S = \frac{T_{ED}}{T_S} \quad (5)$$

bezeichnet, wobei sich die Schwingungsdauer T_S aus der Summe der beiden Einschaltdauern ergibt.

2. Versuch

2.1 Vorbetrachtung

Aufgabe 1: In der **Aufgabe 1** der Versuchsdurchführung sollen Strecken eines NPN bzw. eines PNP-Transistors (*Basis-Emitter-Strecke* U_{BE} , I_B , *Basis-Kollektor-Strecke* U_{BC} , I_B , *Kollektor-Emitter-Strecke* U_{CE} , I_C) bestimmt werden.

- Skizzieren Sie für die jeweilige Strecke das Schaltbild und zeichnen Sie den jeweiligen Spannungs- bzw. Strommesser mit ein.

Aufgabe 2: In der **Aufgabe 2** der Versuchsdurchführung werden **a)** die Eingangs- (I_B , U_{BE}), **b)** die Steuer- (I_B , I_C) und **c)** die Ausgangskennlinie (I_C , U_{CE}) eines NPN-Transistors ermittelt.

- Zeichnen Sie in die jeweilige Schaltung den Spannungs- bzw. Strommesser ein.

2.2 Versuchsdurchführung

2.2.1 Verwendete Geräte

Netzteil, Oszilloskop, 3 Vielfachmessgeräte, unterschiedliche Widerstände und Kondensatoren, 2 Potentiometer (220 Ω , 1 k Ω), NPN-Transistor BD137, PNP-Transistor BD138, NPN-Transistor BC140, Dioden (1N4007), 2 LEDs

2.2.2 Versuchshinweise

Aufgabe 1: Untersuchung der Diodeneigenschaften von Transistorstrecken an einem NPN- bzw. einem PNP-Transistor

- Bauen Sie die Schaltung nach **Bild 7** zunächst mit dem **NPN-Transistor BD137** auf. Schließen Sie den Widerstand $R=100\ \Omega$ als Schutzwiderstand in Reihe vor die Basis.

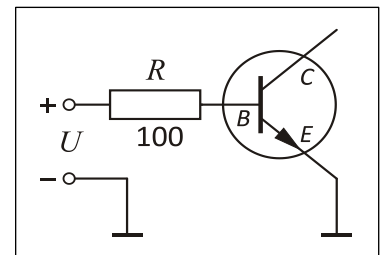


Bild 7: Versuchsaufbau Basis Emitter Strecke

a) Basis-Emitter-Strecke BE (Kollektor wird nicht beschaltet)

- Schließen Sie den Pluspol der Betriebsspannung an die **Basis** (vor den Widerstand) und den Minuspol der Betriebsspannung direkt an den **Emitter** des Transistors an.
- Schalten Sie die Multimeter so, dass Sie den Spannungsabfall U_{BE} und den Basisstrom I_B messen können (siehe **Aufgabe 1** Vorbetrachtung).
- Achten Sie sowohl auf die Messgrößen bzw. die Polaritäten an den Messgeräten.
- Erhöhen Sie vorsichtig die Betriebsspannung U . Beginnen Sie **bei $U=0\text{ V}$** bis zum Basisstrom **von $I_B=5\text{ mA}$** (Siehe Abschnitt 3.1). Lesen Sie nun die Spannung U_{BE} ab.
- Polen Sie die Betriebsspannung um.
- Erhöhen Sie vorsichtig die Betriebsspannung U . Beginnen Sie **bei $U=0\text{ V}$** bis zu der Basis-Emitter-Spannung **von $U_{BE}=2\text{ V}$** . Lesen Sie die Basis-Stromstärke **von I_B** ab.

b) Basis-Kollektor-Strecke BC (Emitter wird nicht beschalten)

- Schließen Sie den Pluspol der Betriebsspannung an die **Basis** (vor den Widerstand) und den Minuspol der Betriebsspannung direkt an den **Kollektor** des Transistors an.
- Schalten Sie die Multimeter so, dass Sie den Spannungsabfall U_{BC} und den Basisstrom I_B messen können (siehe **Aufgabe 1** Vorbetrachtung).
- Gehen Sie bei der Messung analog zur **Aufgabe 1a** vor.

c) Kollektor-Emitter-Strecke CE (Basis wird nicht beschalten)

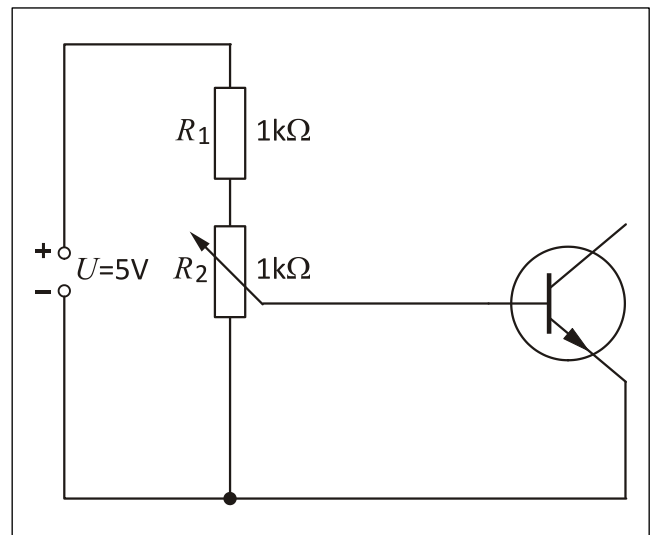
- Schließen Sie den Widerstand $R=100\ \Omega$ als Schutzwiderstand in Reihe vor den Kollektor.
- Schließen Sie den Pluspol der Betriebsspannung an den Vorwiderstand des Kollektors und den Minuspol der Betriebsspannung direkt an den **Emitter** des Transistors an.
- Schalten Sie die Multimeter so, dass Sie den Spannungsabfall U_{CE} und die Stromstärke I_C messen können (siehe **Aufgabe 1 Vorbetrachtung**).
- Achten Sie sowohl auf die Messgrößen bzw. die Polaritäten an den Messgeräten.
- Erhöhen Sie vorsichtig die Betriebsspannung U . Beginnen Sie **bei $U=0\text{ V}$** bis zu einer Kollektor-Emitter-Spannung **von $U_{CE}=2\text{ V}$** (Siehe Abschnitt 3.1). Lesen Sie nun die Stromstärke I_C ab.
- Polen Sie die Betriebsspannung um.
- Erhöhen Sie vorsichtig die Betriebsspannung U . Beginnen Sie **bei $U=0\text{ V}$** bis zu einer Kollektor-Emitter-Spannung **von $U_{CE}=2\text{ V}$** . Lesen Sie nun wieder die Stromstärke I_C ab.
- Notieren Sie alle Ergebnisse (**Aufgabe 1a bis 1c**) in die vorgefertigte Tabelle ein und wiederholen Sie den Versuch mit dem **PNP-Transistor BD138**.

Aufgabe 2: Aufzeichnung der charakteristischen Kennlinien eines NPN-Transistors

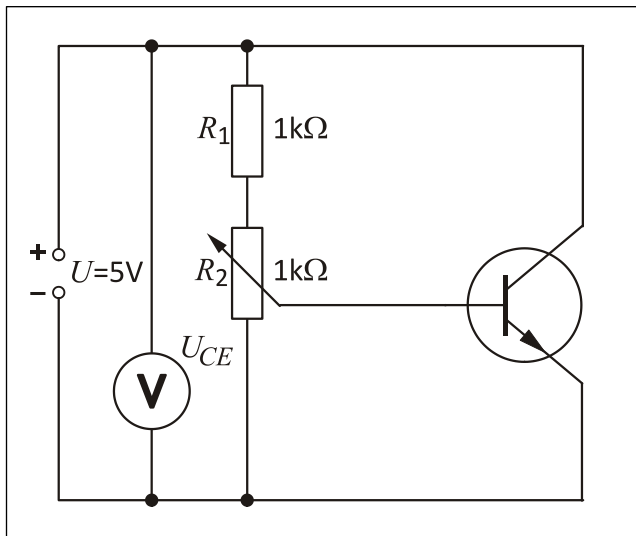
- Nehmen Sie die Eingangskennlinie $I_B = f(U_{BE})$, die Steuerkennlinie $I_C = f(I_B)$ und die Ausgangskennlinie $I_C = f(U_{CE})$ eines NPN-Transistors auf.
- Stellen Sie jeweils die Betriebsspannung **auf $U=5\text{ V}$** ein.

a) Eingangskennlinie (Messgrößen: I_B , U_{BE})

- Bauen Sie die Schaltung nach **Bild 8a** mit dem **NPN-Transistor BD137** auf.
- Schalten Sie die Multimeter so, dass Sie den Spannungsabfall U_{BE} und den Basisstrom I_B messen können (siehe **Aufgabe 2 Vorbetrachtung**). Beachten Sie Messgrößen und Polaritäten an den Messgeräten.
- Stellen Sie zunächst das Potentiometer R_2 so ein, dass die Basis-Emitter-Spannung $U_{BE}=0\text{ V}$ beträgt. Drehen Sie nun den Potentiometerstellknopf vorsichtig, so dass die Spannung U_{BE} steigt.
- Beobachten Sie den Spannungsabfall U_{BE} sowie den Basisstrom I_B .
- Erhöhen Sie U_{BE} in **0,1V-Schritten**.
- Wird $I_B > 0\text{ mA}$ erhöhen Sie I_B in **0,25mA-Schritten** und nehmen Sie U_{BE} auf.

**Bild 8a:** Versuchsaufbau Eingangskennlinie**Achtung:**

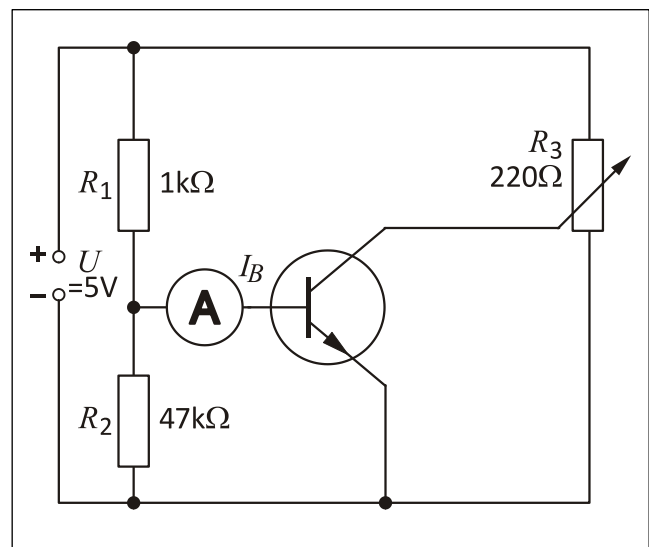
Die maximale Basis-Emitter-Spannung beträgt $U_{BE(max)}=0,7\text{ V}$

b) Steuerkennlinie (Messgrößen: I_C , I_B , bei konstanter Spannung U_{CE})**Bild 8b:** Versuchsaufbau Steuerkennlinie

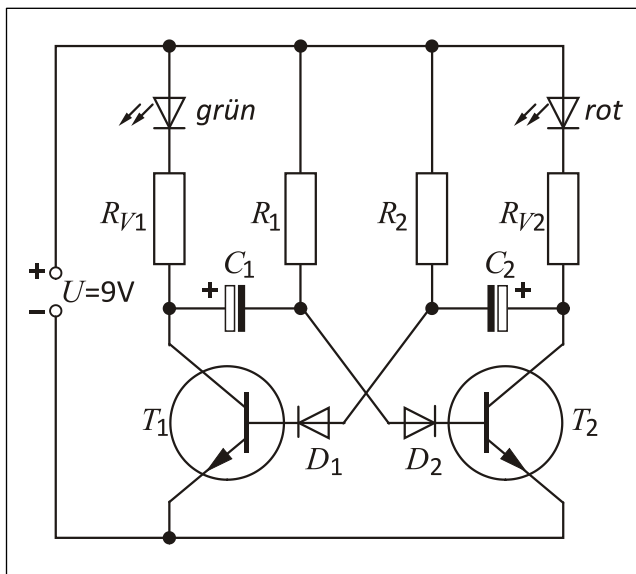
- Bauen Sie die Schaltung nach **Bild 8b** mit dem **NPN-Transistor BD137** auf.
- Schalten Sie die Multimeter so, dass Sie den Kollektorstrom I_C und den Basisstrom I_B messen können. Beachten Sie Messgrößen und Polaritäten an den Messgeräten.
- Stellen Sie die Spannung auf $U_{CE}=5\text{ V}$ ein.
- Stellen Sie das Potentiometer R_2 so ein, dass der Basisstrom I_B minimal ist. Drehen Sie nun den Potentiometerstellknopf vorsichtig, so dass die Stromstärke I_B langsam steigt.
- Beobachten Sie den Basisstrom I_B bzw. den Kollektorstrom I_C .
- Erhöhen Sie I_B von (0,1 ... 1,0) mA in 0,1mA-Schritten und von (1,0 ... 3,5) mA in 0,5mA-Schritten. Nehmen Sie dabei I_C auf.

c) Ausgangskennlinie (Messgrößen: I_C , U_{CE} , bei konstantem Strom I_B)

- Bauen Sie die Schaltung nach **Bild 8c** mit dem **NPN-Transistor BD137** auf.
- Schalten Sie die Multimeter so, dass Sie den Kollektorstrom I_C und den Spannungsabfall U_{CE} messen können. Beachten Sie Messgrößen und Polaritäten an den Messgeräten.
- Stellen Sie das Potentiometer R_3 so ein, dass die Kollektor-Emitter-Spannung U_{CE} minimal ist.
- Halten Sie den Basisstrom bei $I_B=4,6\text{ mA}$ konstant.
- Drehen Sie nun den Potentiometerstellknopf vorsichtig, so dass die Spannung U_{CE} steigt.
- Erhöhen Sie I_C in 50mA-Schritten. Nehmen Sie U_{CE} auf.
- Bei $U_{CE}>1\text{ V}$, erhöhen Sie U_{CE} in 1V-Schritten weiter. Nehmen Sie I_C auf.

**Bild 8c:** Versuchsaufbau Ausgangskennlinie**Achtung:**

Die maximale Kollektor-Emitter-Spannung beträgt $U_{CE(max)}=5\text{ V}$

Aufgabe 3: Transistor als Funktionsgenerator**Bild 9:** Astabiler Multivibrator

- Bauen Sie einen astabilen Multivibrator nach **Bild 9** auf.
- Stellen Sie die Betriebsspannung von $U=9\text{ V}$ ein.
- Zu verwendende Bauelemente:
 - T_1, T_2 (BC 140)
 - D_1, D_2 (1N4007)
 - R_{V1}, R_{V2} (470Ω)
 - LED1 (*grün*), LED2 (*rot*)
 - R_1, R_2 ($15\text{k}\Omega$)
 - C_1, C_2 ($100\mu\text{F}$)
- Die beiden Dioden D_1 und D_2 haben eine Schutzfunktion für die Transistoren T_1 und T_2 , da die an der Basis-Emitter-Strecke anliegende Spannung größer als die Sperrspannung sein kann.

a) Aufbau

- Beobachten Sie die grüne und die rote LED.

b) Veränderung der Widerstände R_1 und R_2

- Tauschen Sie nacheinander die Widerstände gemäß der Vorgabe aus und beobachten und vergleichen Sie die beiden LEDs.

c) Veränderung der Kondensatoren C_1 und C_2

- Tauschen Sie nacheinander die Kondensatoren gemäß der Vorgabe aus und beobachten und vergleichen Sie die beiden LEDs.

d) Untersuchung des Spannungsverlaufes

- Tauschen Sie die Widerstände bzw. Kondensatoren gemäß der Vorgabe aus und beobachten und vergleichen Sie die beiden LEDs.

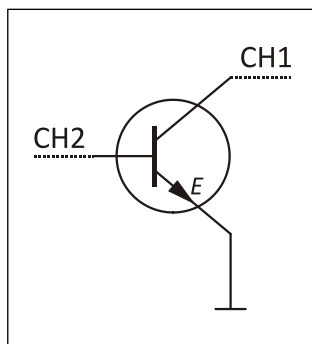
	R_1	C_1	R_2	C_2
1	$15\text{k}\Omega$	$100\mu\text{F}$	$15\text{k}\Omega$	$220\mu\text{F}$
2	$1,5\text{k}\Omega$	$100\mu\text{F}$	$15\text{k}\Omega$	$220\mu\text{F}$
3	$15\text{k}\Omega$	$100\mu\text{F}$	$1,5\text{k}\Omega$	$220\mu\text{F}$
4	$1,5\text{k}\Omega$	$100\mu\text{F}$	$1,5\text{k}\Omega$	$220\mu\text{F}$

Tabelle zu **Aufgabe 3b**

	R_1	C_1	R_2	C_2
1	$15\text{k}\Omega$	$10\mu\text{F}$	$15\text{k}\Omega$	$220\mu\text{F}$
2	$15\text{k}\Omega$	$100\mu\text{F}$	$15\text{k}\Omega$	$2,2\mu\text{F}$

Tabelle zu **Aufgabe 3c**

	R_1	C_1	R_2	C_2
1	$1,5\text{k}\Omega$	$10\mu\text{F}$	$1,5\text{k}\Omega$	$2,2\mu\text{F}$

Tabelle zu **Aufgabe 3d****Bild 10:** Anschlussbelegung für das Oszil-

- Messen Sie mit dem Oszilloskop die Spannungen ($U_{CE1}=\text{CH1}$ und $U_{CE2}=\text{CH2}$) an den Transistoren T_1 und T_2 und bestimmen Sie die Einschaltdauern T_{ED1} und T_{ED2} .
- Ermitteln Sie mit dem Oszilloskop die Spannungen ($U_{CE}=\text{CH1}$ und $U_{BE}=\text{CH2}$) an einem Transistor (z.B. T_1). Interpretieren Sie das Oszilloskopbild (siehe **Bild 10**).

2.3 Versuchsauswertung

Aufgabe 1: Untersuchung der Diodeneigenschaften von Transistorstrecken an einem NPN- bzw. einem PNP-Transistor

- Leiten Sie aus Ihren Erkenntnissen das Dioden-Ersatzschaltbild für den NPN- bzw. für den PNP-Transistor ab.
- Vergleichen und diskutieren Sie die Ergebnisse.

Aufgabe 2: Aufzeichnung der charakteristischen Kennlinien eines NPN-Transistors

- Zeichnen Sie in ein Diagramm in die entsprechenden Quadranten (*Siehe Bild 5*) die Eingangskennlinie $I_B = f(U_{BE})$, die Steuerkennlinie $I_C = f(I_B)$ und die Ausgangskennlinie $I_C = f(U_{CE})$ eines NPN-Transistors ein.
- Ermitteln Sie graphisch die Schwellenspannung der Eingangskennlinie durch Linearisierung des Anstieges (U_{BE} bei $I_B=0$).
- Bestimmen Sie den Stromverstärkungsfaktor B
 - a) durch Ermittlung der Einzelwerte von $B = I_C/I_B$ und den daraus resultierenden Mittelwert,
 - b) durch Ermittlung des Anstiegs unter Verwendung der linearen Regression ($B = \Delta I_C/\Delta I_B$).Vergleichen Sie beide mit einander und diskutieren Sie das Ergebnis.
- Berechnen Sie die Verlustleistung P und vergleichen Sie diese mit der maximalen Verlustleistung. Zeichnen Sie die Linearteile in die Ausgangskennlinie mit ein. Welche Aussagen können Sie treffen.

Hinweis: Die Verlustleistung wird im Wesentlichen an der Kollektor-Emitter-Strecke CE in einem Transistor umgesetzt:

$$P = U_{CE} \cdot I_C.$$

Für den **Transistor BD137** beträgt die maximale Verlustleistung 8 VA.

Aufgabe 3: Aufzeichnung der charakteristischen Kennlinien eines NPN-Transistors

- Berechnen Sie die Einschaltdauern T_{ED} nach Gl. (4) und das Tastverhältnis S nach Gl. (5), sowie das Tastverhältnis S aus den Oszilloskopdaten und vergleichen Sie beides miteinander.

3. Ergänzung

3.1 Messbeispiel – Diodeneigenschaften von Transistoren

NPN-Transistor BD137

Basis-Emitter-Strecke

Basis	Emitter	U_{BE}	I_B
+	-		5 mA
-	+	2 V	

Basis-Kollektor-Strecke

Basis	Kollektor	U_{BC}	I_B
+	-		5 mA
-	+	2 V	

Kollektor-Emitter-Strecke

Kollektor	Emitter	U_{CE}	I_C
+	-	2 V	
-	+	2 V	

PNP-Transistor BD138

Basis-Emitter-Strecke

Basis	Emitter	U_{BE}	I_B
+	-	2 V	
-	+		5 mA

Basis-Kollektor-Strecke

Basis	Kollektor	U_{BC}	I_B
+	-	2 V	
-	+		5 mA

Kollektor-Emitter-Strecke

Kollektor	Emitter	U_{CE}	I_C
+	-	2 V	
-	+	2 V	

3.2 Realisierung eines einstufigen Transistorverstärkers

Es gibt zwei Möglichkeiten, den Arbeitspunkt des Transistors einzustellen: entweder wird die Basis über einen passenden Vorwiderstand an den Pluspol angelegt oder aber es wird mit Hilfe eines Spannungsteilers die entsprechende Basisspannung erzeugt. Meist wird aus Stabilitätsgründen der zweiten Möglichkeit der Vorzug gegeben. Dabei sollte der Querstrom durch den Spannungsteiler 5- bis 10-mal größer als der Basisstrom sein.

Damit die Gleichstromverhältnisse durch die Signalspannungsquelle bzw. durch nachgeschaltete Verstärkerstufen nicht beeinflusst werden, schaltet man in den Ein- und Ausgang des Verstärkers je einen Kondensator, der den Gleichstrom abblockt, den Signalwechselstrom jedoch passieren lässt.

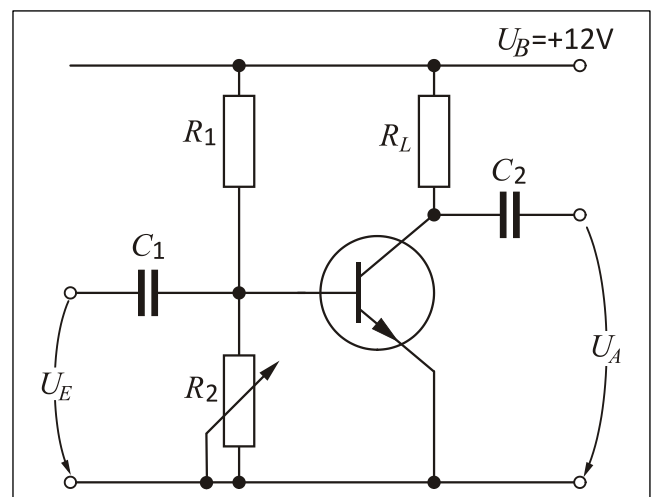


Bild 11: Schaltung eines einstufigen Transistorverstärkers