

Transistorkennlinien

Grolik Benno, Kopp Joachim

2. Januar 2003

1 Grundlagen des Versuchs

Die Eigenschaften von Halbleiterbauelementen erkennt man am besten an sogenannten Kennlinien, die bestimmte Spannungs- und Stromgrößen zueinander in Beziehung setzen. Im vorliegenden Versuch wurden mehrere derartige Kennlinien für einen pnp-Transistor gemessen und ausgewertet.

Im Einzelnen waren dies

- Die Ausgangskennlinie $I_C(U_{CE})$, die den Zusammenhang zwischen Basisstrom I_C und Kollektorspannung U_{CE} angibt.
- Die Eingangskennlinie $I_B(U_{BE})$, die Basisspannung und -strom zueinander in Beziehung setzt und im Wesentlichen mit der Kennlinie der Basis-Emitter-Diode übereinstimmt.
- Die Steuerkennlinie $I_C(U_{BE})$, die eine Beziehung zwischen der an der Basis anliegenden Spannung und dem Stromfluss am Kollektor herstellt.
- Die Kennlinie $I_B(U_{BE})$ der in Sperrrichtung gepolten Basis-Emitter-Diode.

2 Versuchsergebnisse und Fehlerquellen

2.1 Ausgangskennlinien

In Abbildung 1 sind die Ausgangskennlinien $I_C(U_{CE})$ für drei verschiedene Basisströme gezeigt. Man erkennt gut den zunächst steilen Anstieg von I_C , der aber bald in den Sättigungsbereich übergeht. Die Ursache hierfür ist, dass bei vorgegebenem Basisstrom nur eine begrenzte Anzahl Ladungsträger vom Emitter in die Basis gelangen, die dann einen Stromfluss zum Kollektor bewirken können. Erst bei höheren Basisströmen stehen mehr Ladungsträger zur Verfügung. Deshalb wird dort die Sättigungszone erst später erreicht.

Auffällig ist bei den Messergebnissen allerdings, dass die Kurve ab einer gewissen Spannung wieder abfällt. Da die Unsicherheiten der Messgeräte weit unterhalb der hier beobachteten Abweichungen liegen, handelt es sich hierbei mit Sicherheit um eine Eigenheit des Transistors, der bereits etwas älter war und an dem schon viele Experimente

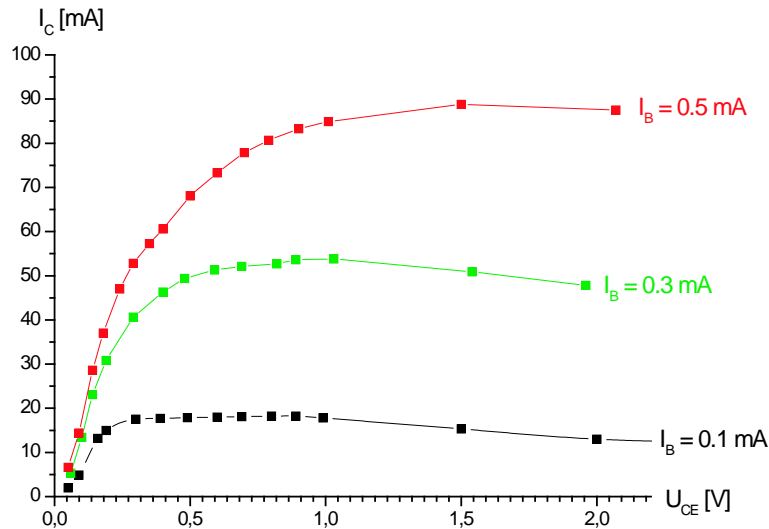


Abbildung 1: Ausgangskennlinien für verschiedene Basisströme

durchgeführt wurden. Insbesondere die wiederholte Bestimmung der Diodenkennlinie der in Sperrichtung gepolten Basis-Emitter-Strecke dürfte das Bauteil durch den dabei auftretenden Diodendurchbruch stark belastet haben.

Einen Ansatz zur Erklärung des ungewöhnlichen Spannungsabfalls liefert möglicherweise die Beobachtung, dass die Basisspannung U_{BE} in diesem Bereich stark heruntergeregelt werden musste um den Basisstrom konstant zu halten. Dies könnte dazu führen, dass insgesamt weniger Ladungsträger aus dem Emitter in die Basis fließen, obwohl genau so viele wie vorher an der Basis abgesaugt werden ($I_B = \text{const}$), so dass ein geringerer Prozentsatz für den Ladungstransport zum Kollektor zur Verfügung steht.

Schließlich mussten wir noch feststellen, dass es bei Kollektorspannungen über 2 V kaum mehr möglich war, den Basisstrom I_B konstant zu halten, da er oft unvermittelt komplett zusammenbrach. Deshalb wurden in dem genannten Bereich keine Messwerte aufgezeichnet. Auch für die Erklärung dieser Beobachtungen sei auf das Alter des verwendeten Bauelementes verwiesen.

2.2 Eingangskennlinie

Abbildung 2 zeigt die Eingangskennlinien $I_B(U_{BE})$ sowohl bei fehlender Kollektorspannung (d.h. Kollektor und Emitter sind kurzgeschlossen) als auch bei $U_{CE} = 3$ V.

Im ersten Fall erhält man einfach die Kennlinie der beiden parallel geschalteten Basis-Emitter- und Basis-Kollektor-Strecken, die bei dieser Schaltung als einfache Dioden wirken. Während bei niedrigen Spannungen noch kein Strom messbar ist, wächst er danach exponentiell an, in guter Übereinstimmung mit der Formel

$$I = I_S \cdot e^{\frac{eU}{kT}}$$

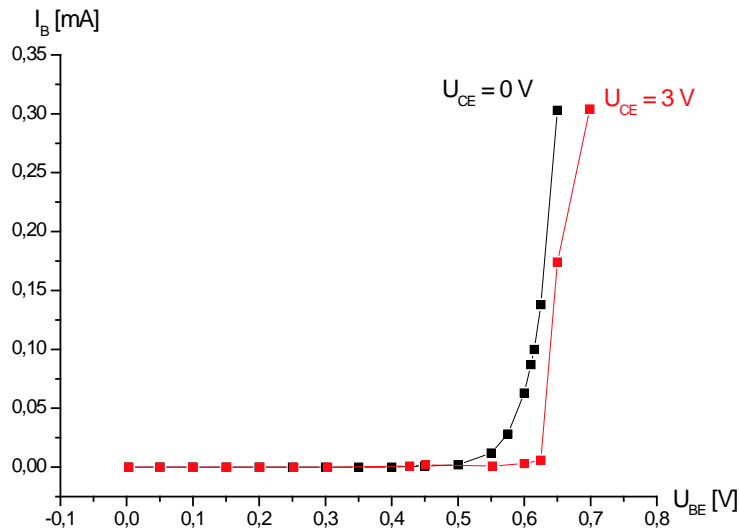


Abbildung 2: Eingangskennlinien für verschiedene Kollektorspannungen

die die Diodenkennlinie analytisch in Abhängigkeit von Temperatur und Sperrstrom der Diode beschreibt.

Bei anliegender Kollektorspannung von 3 V erhält man einen ähnlichen Verlauf. Allerdings ist der Anstieg der Kurve jetzt nicht mehr so regelmäßig wie bei kurzgeschlossenem Kollektor und Emitter, da nun die speziellen Eigenschaften des Transistors zum Tragen kommen, die von denen einer Diode abweichen. Insbesondere spielt nun auch die Steuerkennlinie eine Rolle, die in Abhängigkeit von U_B angibt, wie viel Strom auf der Kollektor-Emitter-Strecke fließt. Zuvor flossen alle Ladungsträger vom Emitter in die Basis.

Bei der zweiten Messung war es außerdem fast unmöglich die Ergebnisse zu reproduzieren, da im oberen Bereich der Basistrom oft unvermittelt auf 0 zurücksprang und da man vollkommen unterschiedliche Ergebnisse erhielt, je nachdem ob man sich einem bestimmten Messpunkt von oben oder von unten näherte. Zur Erklärung dieser Phänomene sei wieder auf das Alter des verwendeten Transistors verwiesen.

2.3 Steuerkennlinie

Die Steuerkennlinie Abbildung 3 stellt den Kollektorstrom I_C in Abhängigkeit von der an der Basis anliegenden Spannung dar. Hier zeigt sich besonders gut die Funktion des Transistors als elektronischer Schalter: Bei Überschreiten einer bestimmten (relativ geringen) Basisspannung kann ein großer Strom zwischen Kollektor und Emitter fließen.

Die Unregelmäßigkeiten im mittleren und oberen Bereich der Kurve sind wiederum nur durch die Eigenheiten des verwendeten Transistors zu erklären, der in diesem Bereich kaum reproduzierbare Ergebnisse lieferte. Beispielsweise stieg der gemess-

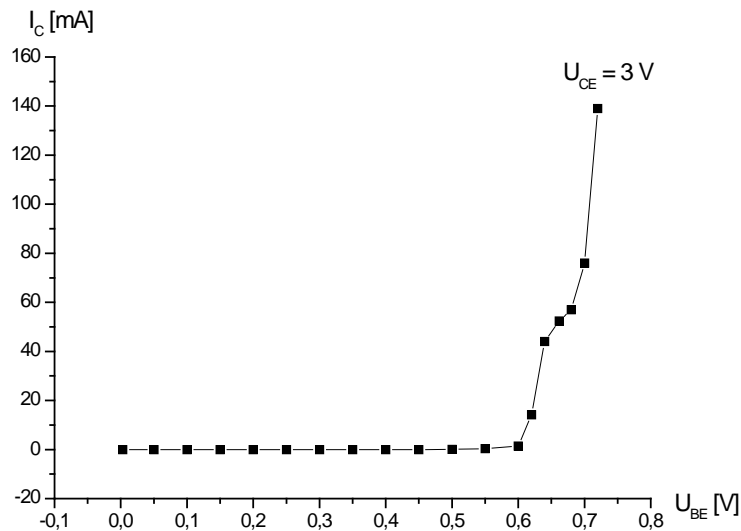


Abbildung 3: Steuerkennlinie des Transistors bei fester Kollektorspannung

sene Strom oft ohne erkennbare äußere Einflüsse an. Möglicherweise ist dafür die Erwärmung der Halbleiter durch die verhältnismäßig hohen Ströme verantwortlich, die zu einer erhöhten Leitfähigkeit des Materials führt.

2.4 Diodenkennlinie in Sperrrichtung

Im letzten Versuch dieses Praktikums wurden an der Basis-Emitter-Strecke des Transistors noch die Eigenschaften einer in Sperrrichtung gepolten Diode untersucht. Die Ergebnisse sind in Abbildung 4 dargestellt. Man erkennt in der Grafik, dass bei niedrigen Spannungen der Stromfluss so gering ist, dass er mit den vorhandenen Multimetern nicht nachgewiesen werden kann. Ab einer bestimmten Spannung jedoch wächst der Strom durch die Diode plötzlich sehr stark an — die Diode bricht durch. Dies ist mit einer starken Erhitzung des Transistors verbunden. Eine grobe Abschätzung ergab eine Temperatur von etlichen 100° am Gehäuse des Transistors sowie eine Brandblase am Daumen des Experimentators. Wie oben bereits erwähnt zerstört diese Erhitzung bei wiederholter Versuchsdurchführung das Bauteil mit Sicherheit dauerhaft. Es wäre darüber nachzudenken, für jeden Praktikumstag einen neuen Transistor zur Verfügung zu stellen.

3 Weitere Auswertung der Versuchsergebnisse

3.1 Die Stromverstärkung des Transistors

Die in Abschnitt 2.1 vorgestellte Ausgangskennlinie liefert die nötigen Daten um den Stromverstärkungsfaktor $B = I_C/I_B$ zu berechnen. Wie in 2.1 diskutiert erhielt man

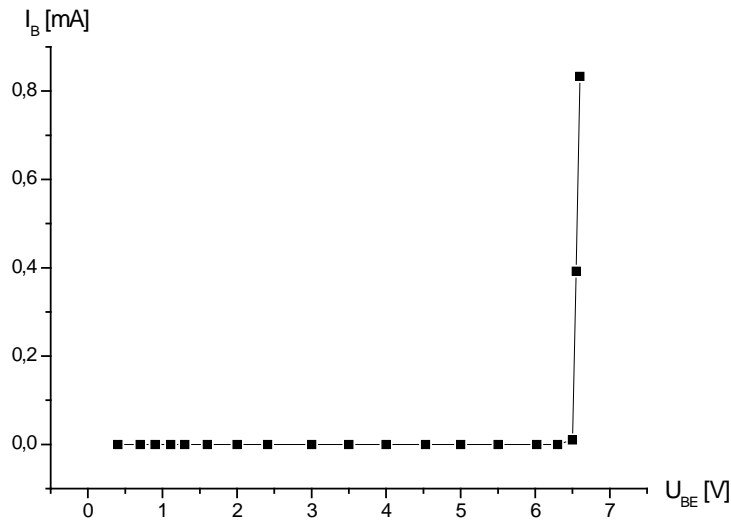


Abbildung 4: Charakteristika einer in Sperrichtung gepolten Diode

für Spannungen U_{CE} über 1 V keine sinnvollen Resultate mehr, da die Stromstärke plötzlich wieder abfiel. Wir wollen den Stromverstärkungsfaktor deshalb für $U_{CE} = 0.8$ V berechnen. Bei diesem Wert sind alle drei Kurven bereits im Sättigungsbereich angelangt. Man erhält aus den einzelnen Kurven folgende Werte:

$$B(0.1 \text{ mA}) = 182.0 \pm 6.46$$

$$B(0.3 \text{ mA}) = 175.5 \pm 4.43$$

$$B(0.5 \text{ mA}) = 161.4 \pm 3.75$$

Da es sich bei den angegebenen Fehlern um systematische Abweichungen handelt, die von den Toleranzen der Messgeräte herrühren, erhält man die angegebenen Fehler durch das lineare Fehlerfortpflanzungsgesetz

$$\Delta B = \Delta I_C \cdot \frac{\partial B}{\partial I_C} + \Delta I_B \cdot \frac{\partial B}{\partial I_B}$$

$$\Delta B = \Delta I_C \cdot \frac{1}{I_B} + \Delta I_B \cdot \frac{I_C}{I_B^2}$$

Schließlich ergibt sich der gemäß diesen Fehlern gewichtete Mittelwert zu

$$\bar{B} = 169.8 \pm 2.62$$

Natürlich sind die angegebenen Fehlergrenzen nicht sonderlich aussagekräftig, da nur drei Werte verwendet wurden und deren Fehlerbereiche sich nicht überlappen! Man erkennt daraus, dass sich der Stromverstärkungsfaktor des Transistors in Abhängigkeit vom Basisstrom offenbar ändert: Für größeres I_B wird B kleiner.

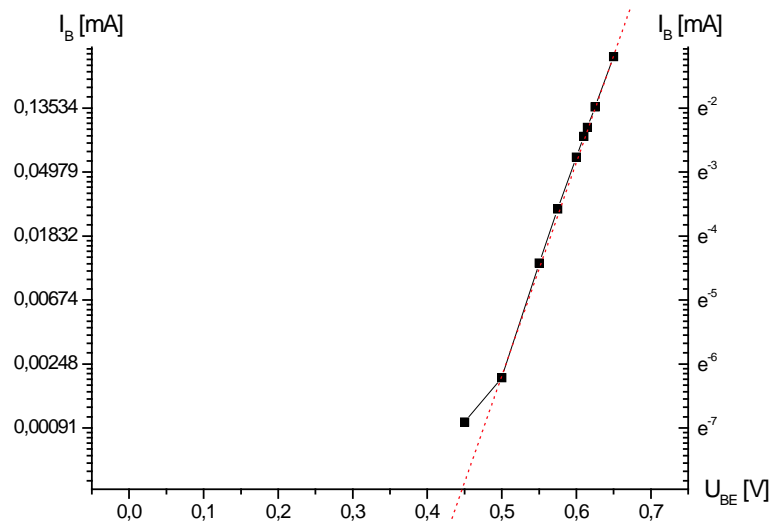


Abbildung 5: Die Diodenkennlinie der Basis-Emitter-Strecke in Durchlassrichtung im halblogarithmischen Maßstab

3.2 Halblogarithmische Darstellung einer Diodenkennlinie

Abbildung 5 zeigt die bereits aus Abschnitt 2.2 bekannte Diodenkennlinie der Basis-Emitter-Strecke (Eingangskennlinie für $U_{CE} = 0 \text{ V}$) im halblogarithmischen Maßstab. An der jetzt linearen Abhängigkeit erkennt man gut den exponentiellen Zusammenhang zwischen Strom und Spannung an der Diode

$$I = I_S \cdot e^{\frac{eU}{kT}}$$

$$\ln I = \ln I_S + \frac{e}{kT}U$$

Die Messpunkte liegen auf einer Geraden mit der Steigung 33.5. Man erhält also:

$$\frac{e}{kT} = 33.5$$

$$T = 347\text{K}$$

Das bedeutet, die Betriebstemperatur des Transistors betrug bei der Messung über 70° !

Ebenso kann man aus dem Achsenabschnitt der Ausgleichsgeraden in Abbildung 5 den Sperrstrom der Diode I_S ermitteln. Man erhält:

$$I_S = 0.11\text{nA}$$

4 Fragen

4.1 Definition des Halbleiters

Als Halbleiter bezeichnet man bestimmte Festkörper mit speziellen elektrischen Eigenschaften. Sie leiten den Strom schlechter als Metalle, sind aber keine vollständigen Isolatoren. Das liegt daran, dass im Gegensatz zu metallischen Leitern keine freien Elektronen existieren. Allerdings können mit relativ geringem Energieaufwand Elektronen aus den Schalen der Atome gelöst und ins sogenannte Leitungsband gehoben werden — ein Energieniveau, auf dem sie dann frei beweglich sind.

Eine weitere Besonderheit von Halbleitern ist die Abhängigkeit ihres spezifischen Widerstandes von der Temperatur: Während bei metallischen Leitern der Widerstand mit der Temperatur zunimmt, nimmt er bei Halbleitern ab. Der Grund liegt darin, dass bei höherer Temperatur mehr Elektronen genug kinetische Energie haben um ins Leitungsband zu gelangen.

4.2 Das Bändermodell

In bestimmten Energiebereichen liegen die quantenmechanisch zulässigen Energieniveaus der Valenzelektronen so eng beieinander, dass man von einem Kontinuum sprechen kann. Zwischen diesen Energiebereichen, den sogenannten Bändern, existieren aber verbotene Bereiche mit Energien, die ein Elektron nicht annehmen kann. Von Bedeutung sind insbesondere das Valenzband, in dem sich die Elektronen eines Atoms im Grundzustand befinden, und das Leitungsband, in dem sich angeregte Elektronen befinden können, die dann zur Leitfähigkeit des Materials beitragen.

4.3 Eigen- und Störstellenleitung

Unter Eigenleitung versteht man die Stromleitung in einem chemisch reinen Halbleiter, die nur durch Elektronen zustandekommt, die auf Grund ihrer thermischen Energie ins Leitungsband gehoben werden. Von technisch größerer Bedeutung ist die Störstellenleitung. Dotiert man einen Halbleiter mit Fremdatomen, die wegen ihrer Bindigkeit eigentlich nicht in das Kristallgefüge hineinpassen, weil sie entweder zuviel oder zuwenig Bindungselektronen besitzen, so können Ladungsträger leichter zu diesen Störstellen fließen, um die Valenzschalen dieser Atome in einen energetisch günstigeren Zustand zu bringen.

4.4 Der pn-Übergang

Der pn-Übergang wirkt als Diode. Im Übergangsbereich fließt aufgrund des Elektronenüberschusses im n-dotierten Material negative Ladungsträger in die p-dotierte Schicht, in der ein Elektronenmangel herrscht. Dieser Diffusionsstrom wird normalerweise genau durch einen entgegengesetzt gerichteten Driftstrom kompensiert, der durch das elektrische Feld entsteht, das der Diffusionsstrom verursacht.

Legt man an den p-Halbleiter eine positive Spannung gegenüber dem n-Halbleiter an, so werden die Raumladungszonen, in denen dieses elektrische Feld herrscht, ver-

kleinert. Der Driftstrom gewinnt die Oberhand und es fließt Strom. Bei Polung in Sperrichtung vergrößert die äußere Spannung die Raumladungszonen am pn-Übergang, so dass ein Stromfluss verhindert wird.

4.5 Bipolarer Transistor

Die Bezeichnung bipolarer Transistor besagt, dass am Ladungstransport sowohl positive als auch negative Ladungsträger beteiligt sind (im Gegensatz zum unipolaren Feldeffekttransistor, bei dem nur negative Ladungsträger am Stromfluss beteiligt sind).

Bei einem npn-Transistor stellt die Basis-Emitter-Strecke eine in Flussrichtung geschaltete Diode dar, in der ein Strom fließt. Dadurch gelangen negative Ladungsträger in die Basis. Aufgrund des so entstehenden Konzentrationsgefälles können diese in den Kollektor driften, so dass ein Strom zwischen Kollektor und Emitter fließt. Man beachte, dass die negativen Ladungsträger für die in Sperrichtung gepolte Basis-Kollektor-Diode Minoritätsladungsträger darstellen, die trotz der Sperrichtung einen Stromfluß verursachen können.

4.6 Die Grundsaltungen des Transistors

Es gibt drei Grundsaltungen des Transistors:

- Die *Emitterschaltung*. Hierbei wird der Kollektorstrom I_C über den Basisstrom I_B gesteuert. Man erhält eine Verstärkung von Spannung und Strom.
- Bei der *Basisschaltung* liegt die Basis auf dem Referenzpotential. Man erhält eine große Spannungsverstärkung, aber keinen nennenswerten Stromverstärkung.
- Die *Kollektorschaltung* erzielt im Gegensatz dazu eine Stromverstärkung in der gleichen Größenordnung wie die Emitterschaltung, dafür aber keine Spannungsverstärkung.

4.7 Leuchtdioden

Für Silizium und Germanium erhält man aus den Energielücken E_g zwischen Valenzband und Leitungsband folgende korrespondierenden Wellenlängen $\lambda = hc/E_g$:

	Si	Ge
E_g [eV]	1.12	0.67
λ [nm]	1108	1852

Diese Wellenlängen liegen beide im Infrarot-Bereich. Um eine Leuchtdiode im sichtbaren Bereich von 400 – 700 nm zu konstruieren benötigt man Halbleiter, deren Energielücke zwischen 1.8 und 3.1 eV liegt. In der Praxis verwendet man z.B. GaP (grün), GaAsP (rot, gelb) oder SiC (blau).