

Versuch: P1-51

# Transistorgrundschaltungen

- Anhang: Hintergrundinformationen -

Im Folgenden wird auf die Bauteile Leiter, Halbleiter, Diode und Transistor näher eingegangen.

## Inhaltsverzeichnis

1	Leiter	1
2	Halbleiter	2
3	Dioden	3
4	Transistor	4

## 1 Leiter

Ein elektrischer Leiter (oder Konduktor) ist ein Medium, welches frei bewegliche Ladungsträger besitzt, und somit zum Transport geladener Teilchen benutzt werden kann. Diesen Transport nennt man elektrischen Strom.

- Leiter 1. Klasse

Metalle sind Leiter 1. Klasse. Die Leitfähigkeit von Metallen beruht auf der Anzahl der Elektronen auf ihrer Außenschale. Metalle bilden eine Bindung in der die Elektronen nur schwach gebunden sind. Die Elektronen sind mehr oder weniger frei beweglich. Leiter haben die Eigenschaft des spezifischen Widerstands, einem Maß für die Leitfähigkeit. Der beste elektrische Leiter ist Silber. Als günstigere Alternative wird aber das ebenfalls gut leitende Kupfer verwendet. Die Leitfähigkeit hängt auch von der Temperatur ab. Ihre Leitfähigkeit bleibt innerhalb bestimmter Temperaturgrenzen konstant. Der spezifische Widerstand der meisten Leiter vergrößert sich bei Erwärmung.

Wenn man Metalle quantenmechanisch betrachtet, ergibt sich, dass die Elektronen nicht jede Energie annehmen können, sondern nur in bestimmten Energiebändern sein können - die Form dieser Bänder hängt vom Kristallgitter des Materials ab. Die Fermienergie (ist in etwa die Energie der energiereichsten Elektronen) ermöglicht eine Unterscheidung:

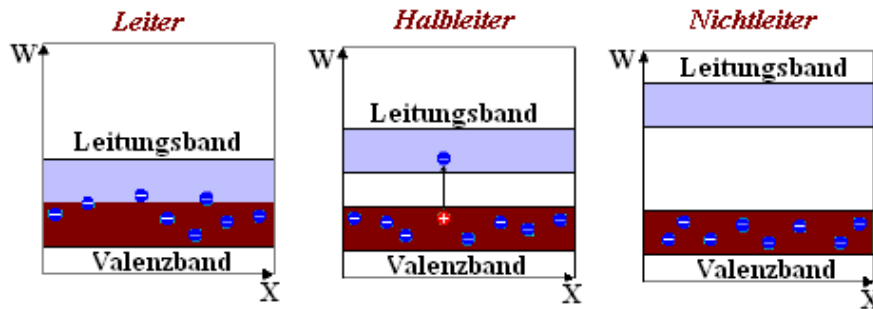
Wenn die Fermienergie in einem erlaubten Band (Leitungsband) liegt, spricht man von einem Leiter. Liegt die Fermienergie zwischen den erlaubten Bändern ist es ein ...

... Isolator wenn der energetische Abstand zwischen dem Valenzband und dem Leitungsband groß gegenüber der thermischen Energie ist.

... sonst ist es ein Halbleiter.

- Leiter 2. Klasse

So genannte Ionen-Leiter sind Leiter 2. Klasse. Als Beispiel für solche Leiter seien hier Salzlösungen genannt. Die Leitfähigkeit entsteht durch Dissoziation (Aufspaltung) der Bindung in Wasser. Die beiden Ionen trennen sich im Wasser und werden frei beweglich. Damit sind freie Ladungsträger als Voraussetzung für die Stromleitung vorhanden. Die Leitfähigkeit dieses Leiters kann sich im Laufe eines Versuchs verändern, wenn Teile der Ladungsträger andere chemische Bindungen eingehen. Dann kann man davon reden, dass der Leiter "verbraucht" wird. Diese Leiter werden auch Elektrolyten genannt.



## 2 Halbleiter

Unter einem Halbleiter versteht man einen Festkörper, dessen elektrische Leitfähigkeit stark temperaturabhängig ist und der von daher je nach Temperatur sowohl als Leiter als auch als Nichtleiter betrachtet werden kann. Die Leitfähigkeit eines Halbleiters nimmt mit steigender Temperatur zu. Die Leitfähigkeit lässt sich ferner durch das Einbringen von Fremdatomen aus einer anderen Hauptgruppe, das sogenannte Dotieren (s.u.), in weiten Grenzen steuern. Bedeutung für die Mikroelektronik erlangen Halbleiter aber insbesondere dadurch, dass ihre Leitfähigkeit auch durch Anlegen einer Steuer Spannung oder eines Steuerstroms (wie z. B. beim Transistor) verändert werden kann.

Die grundlegenden Eigenschaften von Halbleitern lassen sich anhand des Bändermodells erklären: Die Elektronen in Festkörpern wechselwirken über sehr viele Atomabstände hinweg miteinander. Dies führt faktisch zu einer Aufweitung der (im Einzelatom noch als diskrete Niveaus vorliegenden) möglichen Energiewerte zu ausgedehnten Energiebereichen, den so genannten Energiebändern. Zwischen den Bändern bestehen Energiebereiche, in der nach der Quantenmechanik keine erlaubten Zustände existieren, die Energie- oder Bandlücke. Solche Lücken können die Elektronen nicht besetzen.

Unbesetzte Bänder können mangels beweglicher Ladungsträger keinen elektrischen Strom leiten. In voll besetzten Bändern weisen die Ladungsträger ebenfalls keine Beweglichkeit auf, da sie mangels erreichbarer freier Zustände keine Energie aufnehmen können. Nur in teilbesetzten Bändern treten Elektronen mit einer hohen Beweglichkeit auf, wie es bei Metallen bei jeder Temperatur der Fall ist.

Aufgrund ihrer Kristallstruktur ist bei Halbleitern nahe des absoluten Nullpunktes der Temperaturskala das oberste Energieband (Valenzband) voll besetzt, das nächsthöhere Band (Leitungsband) hingegen leer. Das Fermi-niveau liegt also genau in der Bandlücke; die elektrische Leitfähigkeit ist null (wie bei einem Isolator). Halbleiter haben also einen mit der Temperatur abnehmenden elektrischen Widerstand. Der Unterschied gegenüber den Metallen besteht darin, dass bei diesen das Valenzband entweder nicht voll besetzt ist und/oder sich gar Valenzband und Leitungsband überlappen.

Wird ein Elektron in einem Halbleiter aus dem Valenzband in das Leitungsband angeregt, so hinterlässt es an seiner ursprünglichen Stelle ein Defektelektron, auch „Loch“ genannt. Gebundene Valenzelektronen in der Nachbarschaft solcher Löcher können durch Platzwechsel in ein Loch „springen“, hierbei wandert das Loch. Es kann daher als bewegliche positive Ladung aufgefasst werden.

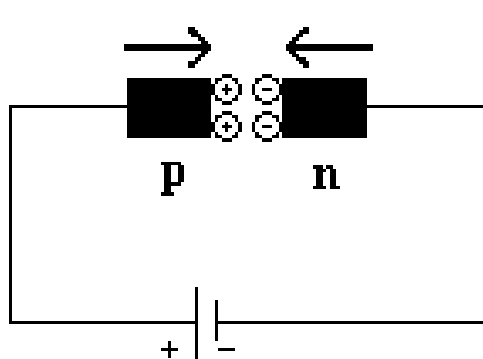
Sowohl die angeregten Elektronen, als auch die Defektelektronen tragen also zur elektrischen Leitung bei.

*Dotieren*: Durch gezielte Verunreinigung eines Halbleiters mit Fremdatomen, das so genannte Dotieren, kann ein Überschuss oder Mangel von Elektronen gezielt herbeigeführt werden: Werden Fremdatome, die ein Elektron mehr im Valenzband haben als der reine Halbleiter, in einen Halbleiter eingebracht,

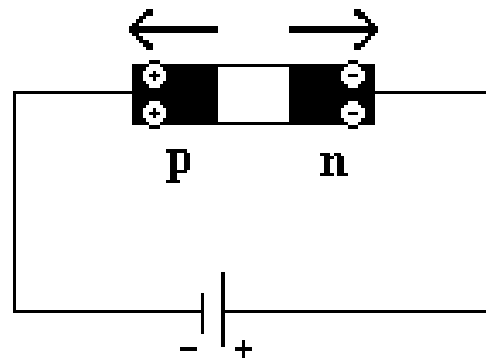
so bringt jedes dieser Fremdatome ein Elektron mit, das nicht für die Bindung benötigt wird und leicht abgelöst werden kann. Ein Fremdatom, das ein Elektron abgibt, wird Donator (lat. donare = geben) genannt. Im Bänderschema liegt ein solches Elektron nahe unter der Leitungsbandkante. Analog bringen Fremdatome, die ein Elektron weniger im Valenzband haben, ein zusätzliches Defektelektron (Loch) mit, welches leicht von Valenzbandelektronen besetzt werden kann. Im Bänderschema liegt ein solches Loch nahe über der Valenzbandkante.

### 3 Dioden

Die Halbleiterdiode besteht aus einem Germanium- oder Siliziumkristall, auf den eine feine Drahtspitze drückt. Sowohl Kristall als auch Drahtspitze stehen sich einander gegenüber und sind in einem Roehrchen aus Glas oder einem anderen Isolierstoff gehalten. Nach aussen sind die Anschlüsse des Kristalles und des Drahtes herausgeführt, das Roehrchen ist entweder luftleer gemacht oder luftdicht gegen die Aussenwelt abgeschlossen. Der soeben beschriebene Typ heisst wegen der spitzen Drahtfeder Spitzendiode. Es gibt auch sogenannte Flaechendioden, die aus zwei Halbleiterkristallen bestehen. Beide Kristalle sind auerordentlich eng miteinander verbunden und nur durch eine Sperrschicht getrennt. Sie unterscheiden sich in ihrer physikalischen bzw. chemischen Beschaffenheit voneinander; beide Kristalle sind unterschiedlich dotiert. Diese unterschiedliche Beschaffenheit verleiht der so zustande kommenden Flaechendiode, aber auch der Spitzendiode Gleichrichtereigenschaften (bei der Spitzendiode bildet sich durch einen Formierprozess zwischen dem Halbleiterkristall und der Spitze eine duenne Zone des Stoffes aus, der Akzeptoren enthaelt, wenn der Kristall ueber Donatoren verfuegt oder umgekehrt). Die Sperrschicht heisst pn-Verbindung. Die unterschiedlichen Eigenschaften der beiden Halbleiterzonen wirken sich nun folgendermassen aus: Legt man von aussen eine Spannung derart an die beiden Kristalle, da der mit Donatoren behaftete Stoff, der sogenannte n-Halbleiter, negativ gegenueber dem mit Akzeptoren behafteten Halbleiter ist (p-Halbleiter), so werden vom n-Halbleiter aus Elektronen, vom p-Halbleiter aus Defektelektronen, zur Sperrschicht getrieben. Beide Arten sind Ladungstraeger, deren Zusammentreffen zu einer Verminderung des Widerstandes der Sperrschicht fuehrt. Infolgedessen stellt eine Halbleiterdiode in einer solchen Polung einen nur kleinen Widerstand dar. Polt man die Anschluesse um, so vollzieht sich der umgekehrte Vorgang: die Ladungstraeger werden von der Grenzschicht fortgetrieben, diese verarmt an Ladungstraegern, und der Widerstand der Einrichtung ist sehr gross. Im ersten Fall spricht man von der Durchlassrichtung, im zweiten Fall von der Sperrichtung. Im ersten Fall fliesst schon bei sehr kleinen Spannungen ein grosser Strom, im zweiten Fall ist der Strom, der sogenannte Sperrstrom, auch bei groeeren Spannungen noch winzig klein. Er hat seine Ursache darin, da jeder p- bzw. n-Halbleiter neben den in grosser Zahl vorkommenden Defektelektronen bzw. Elektronen, den jeweiligen "Majoritaetstraegern", noch (in allerdings viel kleinerer Zahl) Ladungstraeger mit jeweils entgegengesetztem Vorzeichen enthaelt ("Minoritaetstraeger"). Fuer diese wirkt die jeweilige Sperrichtung als Durchlassrichtung.



angelegte Durchlassspannung



angelegte Sperrspannung

## 4 Transistor

Ein Transistor ist ein elektronisches Halbleiterbauelement, das zum Schalten und zum Verstärken von elektrischen Strömen und Spannungen verwendet wird. Die Bezeichnung ist eine Kurzform für die englische Bezeichnung Transfer Varistor, die den Transistor als einen durch Strom steuerbaren Widerstand beschreiben sollte.

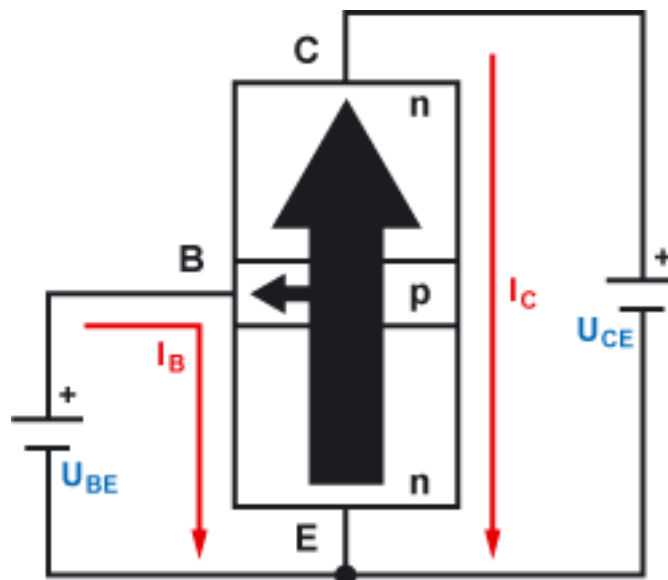
Unterschieden werden zwei Arten von Transistoren:

- Bipolare Transistoren werden durch Stromfluss angesteuert. Deren Anschlüsse werden mit Basis, Emitter, Kollektor bezeichnet. Ein kleiner Strom auf der Basis-Emitter-Strecke kann dabei einen großen Strom auf der Kollektor-Emitter-Strecke steuern.
- Bei unipolaren Feldeffekttransistoren (kurz: FET) werden die Anschlüsse als Gate (engl. Tor, Gatter), Drain (engl. Abfluss), Source (engl. Quelle) bezeichnet. Der Strom auf der Drain-Source-Strecke wird hier durch die Spannung zwischen Gate und Source gesteuert. Die Steuerung erfolgt (nahezu) stromlos.

Normale Transistoren haben eine npn- oder pnp-Schichtenfolge und werden bipolare Transistoren genannt. Bipolare Transistoren bestehen aus Silizium. Sie gibt es auch in Germanium (veraltet) oder aus Mischkristallen, die nicht sehr häufig verbreitet sind. Alle weiteren Ausführungen beziehen sich auf den Silizium-Transistor mit npn-Schichtenfolge. Jeder bipolare Transistor besteht aus drei dünnen Halbleiterschichten, die übereinander gelegt sind. Die mittlere Schicht ist sehr dünn im Vergleich zu den beiden anderen Schichten. Die Halbleiterschichten sind mit metallischen Anschlüssen versehen, die aus dem Gehäuse herausführen. Die Außenschichten des bipolaren Transistors werden Kollektor (C) und Emitter (E) genannt. Die mittlere Schicht hat die Bezeichnung Basis (B) und ist die Steuerelektrode oder auch der Steuereingang des Transistors.

### *Funktionsweise eines Transistors (NPN)*

Bei der Funktionsweise des Transistors muss man die Stromrichtung beachten. Will man das physikalische Prinzip erklären, dann spricht man vom Elektronenstrom oder der physikalischen Stromrichtung (von Minus nach Plus). Sie wird in der folgenden Ausführung verwendet. In Schaltungen und mathematischen Berechnungen wird dann die technische Stromrichtung (von Plus nach Minus) verwendet.



Durch das Anlegen einer Spannung  $U_{BE}$  von 0,7 V, ist die untere Diode (Prinzip) in Durchlassrichtung geschaltet. Die Elektronen gelangen in die p-Schicht und werden von dem Plus-Pol der Spannung  $U_{BE}$  angezogen. Da die p-Schicht sehr klein ist, wird nur ein geringer Teil der Elektronen angezogen. Der größte Teil der Elektronen bewegt sich weiter in die obere Grenzschicht. Dadurch wird diese leitend und der Plus-Pol der Spannung  $U_{CE}$  zieht die Elektronen an. Es fließt ein Kollektorstrom  $I_C$ . Bei üblichen

Transistoren rutschen etwa 99% der Elektronen von Emitter zum Kollektor durch. In der Basisschicht bleiben etwa 1% der Elektronen hängen und fließen dort ab.

#### *Eigenschaften des bipolaren NPN-Transistors*

- Der Kollektorstrom  $I_C$  fließt nur, wenn auch ein Basisstrom  $I_B$  fließt. Wird der Basisstrom  $I_B$  verändert, dann verändert sich auch der Kollektorstrom  $I_C$ . Innerhalb des Transistors wirkt die Basisstromänderung wie eine Widerstandsänderung. Der Transistor wirkt bei einer Basisstromänderung wie ein elektrisch gesteuerter Widerstand.
- Der Kollektorstrom  $I_C$  ist um ein vielfaches von 20 bis 10000 mal größer als der Basisstrom  $I_B$ . Dieser Größenunterschied kommt von der Aufteilung des Elektronenflusses von Kollektor (C) und Basis (B). Diesen Größenunterschied nennt man Stromverstärkung B. Er lässt sich aus dem Verhältnis  $I_C$  zu  $I_B$  berechnen.
- Der Basisstrom  $I_B$  fließt erst dann, wenn die Schwellspannung  $U_{BE}$  an der Basis-Emitter-Strecke erreicht ist. Der Schwellwert ist abhängig vom Halbleitermaterial. Üblicherweise nimmt man Silizium-Transistoren mit einem Schwellwert von 0,6 bis 0,7 V. Es gibt auch Germanium-Transistoren mit einem Schwellwert von 0,3 V. Mittels einer Hilfsspannung  $U_{BE}$  kann der Schwellwert vorab eingestellt werden. Dieses Vorgehen wird als Arbeitspunkteinstellung bezeichnet. Um diese eingestellte Spannung kann nun der Basisstrom den Kollektorstrom steuern.
- Wenn kein Basisstrom  $I_B$  fließt, dann sperrt der Transistor. Sein Widerstand in der Kollektor-Emitter-Strecke ist unendlich groß. Die Spannung am Kollektor-Emitter ist sehr groß. Fließt ein Basisstrom, dann wird der Transistor leitend. Sein Widerstand ist kleiner geworden. Dann ist auch die Spannung am Kollektor-Emitter kleiner. Genauer betrachtet führt eine Zunahme am Eingang (Basis) zu einer Abnahme am Ausgang (Kollektor-Emitter). Man nennt das auch invertierendes Verhalten. Diese Eigenschaft ist das Schaltverhalten des bipolaren Transistors und wird in der Elektronik sehr häufig angewendet.
- Wenn die Spannung  $U_{CE}$  kleiner ist, als die Spannung  $U_{BE}$ , dann befindet sich der bipolare Transistor in der Sättigung oder im Sättigungsbetrieb. Das passiert dann, wenn der Transistor durch den Basisstrom überflutet wird. Der Basisstrom ist dann so groß, dass die maximale Stromverstärkung schon längst erreicht ist und der Kollektorstrom nicht mehr weiter steigt. Generell hat das keine negativen Auswirkungen, solange der maximale Basisstrom nicht überschritten wird. Dabei wird der Transistor zerstört. Allerdings hat der Sättigungsbetrieb negative Auswirkungen auf das Schaltverhalten eines Transistors. Bei einem schnellen Schaltvorgang, wenn die Kollektor-Emitter-Spannung  $U_{CE}$  schnell wechseln muss. Dann muss der Transistor erst von der Ladungsträgerüberflutung freigeräumt werden. Das dauert länger, als bei wenn nur wenige Ladungsträger über die Basis abfließen. Diese Verzögerung macht sich bei hohen Schaltfrequenzen negativ bemerkbar. Dann sollte der Sättigungsbetrieb vermieden werden.
- Der bipolare Transistor vereint zwei Stromkreise in sich. Der Stromkreis mit der Spannung  $U_{BE}$  wird als Steuerstromkreis bezeichnet. Der Stromkreis mit der Spannung  $U_{CE}$  wird als Arbeits- oder Laststromkreis bezeichnet.