

Dioden

Dioden sind Bauelemente mit zwei Anschlüssen - wie beim Widerstand. Sie haben die besondere Eigenschaft, den Stromfluß nur in einer Richtung zuzulassen. In dieser Richtung ist die Diode leitend. In der anderen Richtung wird der Strom fast Null und die Diode ist praktisch nichtleitend.

Zur Einführung: Die Hochvakuum-Diode

Die ersten Dioden waren Hochvakuum-Dioden. Sie spielen heute kaum noch eine Rolle, aber an ihrem Beispiel läßt sich die Funktion sehr einleuchtend erklären.

Die eine Elektrode der Diode besteht aus einem geheizten Röhrrchen, dessen Oberfläche mit einem Stoff versehen ist, aus dem Elektronen relativ leicht in die Umgebung austreten können. Da es im Vakuum keine Gasmoleküle gibt, die den Elektronen "im Weg" sein könnten, fliegen sie je nach Geschwindigkeit einige Millimeter weit. Die Energie, die die Elektronen dazu benötigen, schöpfen sie aus der bei hohen Temperaturen kräftigen Molekularbewegung. Eine derartige Elektrode ist also ein **Elektronenspender** und wird **Kathode (k)** genannt.

Die andere Elektrode ist ein Metallzylinder, der das Kathodenröhrrchen in einem geringen Abstand umgibt. Diese Elektrode nennt man **Anode (a)**.

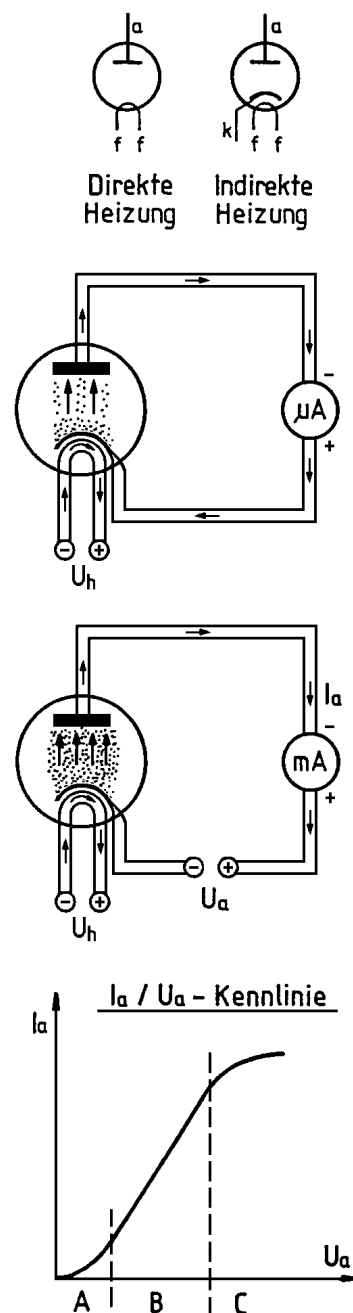
Einige der aus der Kathode austretenden Elektronen sind so schnell, daß sie den Weg bis zur Anode schaffen und dort ein negatives Potential aufbauen, das bald so groß ist, daß weitere Elektronen den Weg nicht mehr schaffen, denn gleiche Polaritäten stoßen sich ja bekanntlich ab! Diese **negative** Spannung der Anode (gegenüber der Kathode) nennt man **Anlaufspannung**. Verbindet man Anode und Kathode beispielsweise über einen Widerstand von $10\text{ M}\Omega$, dann fließt ein **Anlaufstrom** in der Größenordnung von $0,1\ \mu\text{A}$, was einer Spannungsdifferenz von 1 Volt entspricht.

Legt man aber eine Gleichspannungsquelle so an die Diode, daß der positive Pol an der Anode und der negative an der Kathode liegt, entsteht in der Diode ein elektrisches Feld, das so gerichtet ist, daß die Elektronen zur Anode hin gezogen werden. Entgegengesetzte Ladungen ziehen sich an! Der negative Pol der Spannungsquelle liefert der Kathode die abgeflossenen Elektronen nach und es fließt ein Strom, der um so größer ist, je höher die Spannung zwischen Anode und Kathode ist. Der Strom ist außerdem noch von der Temperatur abhängig, die aber in der Regel konstant ist. Die Umgebungstemperatur ist dagegen vergleichsweise niedrig und spielt keine Rolle. Das ist bei der Halbleiter-Diode anders.

Polt man die angelegte Spannung um - Minus an der Anode, Plus an der Kathode - gelangen praktisch keine Elektronen mehr zur Anode: Die Diode sperrt.

Halbleiter und Dotierung

DIE HOCHVAKUUMDIODE



- A: Gebiet des Anlaufstromes
- B: Gerader Teil der Kennlinie
- C: Sättigungsstromgebiet

Das Grundmaterial einer Halbleiter-Diode ist ein Material, das in extrem reinem Zustand nicht leitend ist. Anfänglich benutzte man **Germanium**. Heute werden die meisten Dioden auf **Silizium**-Basis hergestellt. Beiden Stoffen gemeinsam ist, daß sie Elemente der Gruppe IV sind, auf der äußeren Elektronenschale also vier Elektronen haben. Der Aufbau als fester Körper ist ein Kristall, bei dem die Atome in Form eines Tetraeders angeordnet sind.

Wegen des Bestrebens der Atome, ihre Elektronenschalen möglichst zu komplettieren, gibt jeweils ein Atom seine 4 Valenz-Elektronen an das Nachbaratom ab, so daß dieses die äussere Schale voll hat und das andere dann zwar eine Schale weniger besitzt, die aber ebenfalls vollständig ist. Nach außen ist der Kristallverbund natürlich elektrisch neutral und bei Raumtemperatur praktisch nicht leitend.

Wenn man in das Kristallgitter aber bewußt Atome mit 5 Valenz-Elektronen (Arsen, Antimon) einbaut, bleibt von jedem **Fremdatom** ein Elektron übrig, das sich im Kristall frei bewegen kann. Ein derart **dotiertes** Halbleitermaterial wird **n-leitend** genannt und stellt eine Elektronenquelle dar, was der Funktion der Kathode in der Hochvakuumröhre entspricht.

Nimmt man als **Dotiermaterial** Stoffe mit 3 Valenz-Elektronen (Gallium, Indium), treten ebenfalls Störstellen im Kristallgitter auf. In diesem Fall herrscht allerdings Elektronenmangel und die (**positiv** geladenen!) "Löcher" werden **Defektelektronen** genannt. Die Defektstellen werden mit Elektronen aus der Umgebung gefüllt, hinterlassen dann natürlich woanders ein "Loch" das wieder aufgefüllt werden will, usw. Von außen sieht das so aus, als ob die Löcher (Defektelektronen) sich durch den Kristall bewegen würden. Ein p-dotierter Kristall wird als **p-leitender Halbleiter** bezeichnet. Er ist eine Defektelektronenquelle oder eine Elektronensenke.

Der pn-Übergang

Wenn man einen p- und einen n-leitenden Halbleiter zusammenfügt oder in einen Halbleiter von einer Seite einen dreiwertigen Stoff und von der anderen einen fünfwertigen Stoff eindiffundiert, entsteht an der Grenzschicht ein pn-Übergang. Hier wandern die "überschüssigen" Elektronen aus der n-leitenden Seite zu den Löchern auf der p-leitenden Seite und "rekombinieren" dort mit den Löchern. Die Folge ist, daß auf **beiden** Seiten dieser Grenzschicht im Kristall nur noch volle Elektronenschalen vorkommen. Es gibt also in dieser **Verarmungszone** keine freien Elektronen oder Löcher mehr. Dieser Bereich wird dadurch fast nichtleitend. Man nennt ihn deshalb auch **Sperrschicht**.

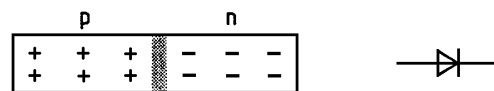
Im Zuge des Aufbaues der Sperrschicht hat das n-leitende Material Elektronen an die p-leitende Seite abgegeben, die sich dadurch negativ aufgeladen hat. Diese an der Sperrschicht wirksame Spannung nennt man **Diffusions- oder Schwellenspannung**. Sie beträgt bei **Germanium etwa 0,2 bis 0,4 Volt** und bei **Silizium etwa 0,6 bis 0,8 Volt**.

Der Vergleich mit der Hochvakuum-Diode läßt den Verdacht aufkommen, daß die n-leitende Seite der Kathode und die p-leitende Seite der Anode entspricht. Daß das wirklich so ist, kann man mit einem Gedankenexperiment überprüfen:

Legt man eine Gleichspannung so an den pn-Übergang, daß die positive Spannung an der p-leitenden Seite und die negative Spannung an der n-leitenden Seite liegt, werden der n-Seite (Elektronenquelle!) zusätzliche Elektronen zugeführt und der p-Seite Elektronen entzogen - also

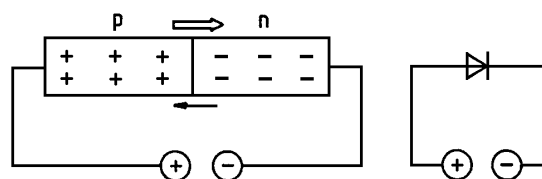
DIE HALBLEITERDIODE

pn-Schicht ohne angelegte Spannung

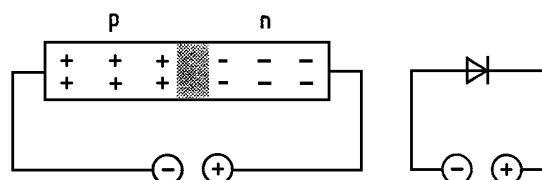


DURCHLASSRICHTUNG

⇒ Löcherleitung
← Elektronenleitung



SPERRICHTUNG



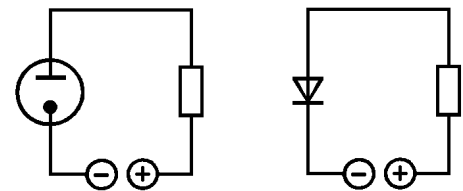
zusätzliche Löcher erzeugt. Dabei wird die Verarmungszone mit steigender Spannung immer dünner bis beim Erreichen der Diffusionsspannung die Sperrschicht ganz zusammen bricht und der Kristall leitet. Die an der Anode (p-leitende Seite) angelegte positive Spannung hat quasi die negative Diffusionsspannung aufgehoben.

Wenn man umgekehrt die positive Spannung an die Kathode (n-leitende Seite) anlegt, entzieht man dieser Seite jegliche freien Elektronen. Gleichzeitig füllt die negative Spannung an der Anode (p-leitende Seite) dort die Löcher auf. Die Verarmungszone (Bereich in dem es keine freien Ladungsträger mehr gibt) wird also sehr breit. Folge: es fließt praktisch kein Strom mehr.

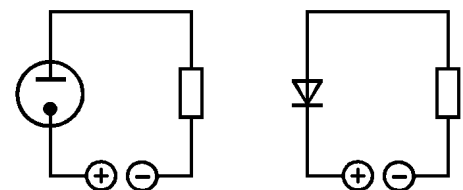
Der Sperrstrom beträgt bei Germanium einige Mikroampere und bei Silizium einige Nanoampere. Er kann durch den Grad der Dotierung beeinflusst werden und ist von der Kristalltemperatur abhängig. Eine höhere Temperatur bedeutet höhere Ladungsträgerbeweglichkeit und damit auch einen höheren Sperrstrom.

Im Übrigen ist auch die Diffusionsspannung von der Temperatur abhängig. Sie **verringert** sich bei Germanium und Silizium um rund **-2 mV / °C Temperaturerhöhung**. Während dies bei Dioden kaum eine Rolle spielt, muß man den Einfluß bei Transistoren durch schaltungstechnische Maßnahmen berücksichtigen. Kritisch ist auch die Temperatur in der Sperrschicht. Sie darf bei Germanium 70 Grad Celsius keinesfalls überschreiten. Bei Silizium liegt dieser Wert bei ca. 150 Grad Celsius.

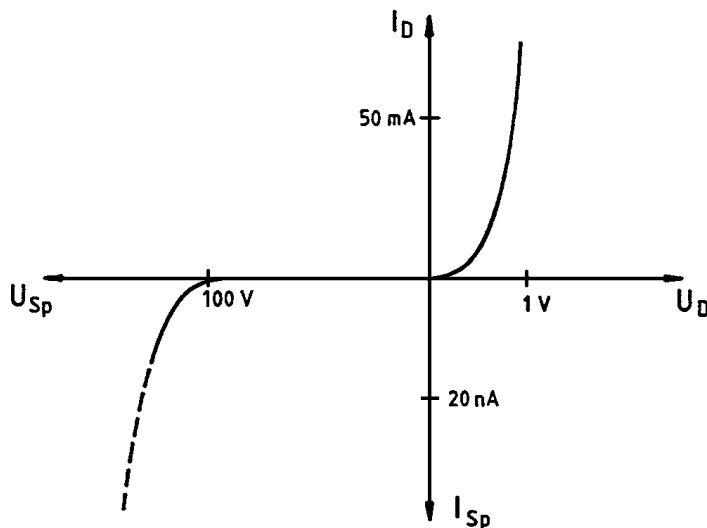
DURCHLASSRICHTUNG



SPERRICHTUNG



KENNLINIE EINER HALBLEITERDIODE



Zulässige Sperrspannung

Eine weitere Gefahr für den pn-Übergang liegt in einer zu hohen Sperrspannung. Schon bei geringfügiger Überschreitung der sogenannten Durchbruchspannung steigt der Sperrstrom kräftig an und der pn-Übergang wird zerstört, wenn dem nicht durch schaltungstechnische Maßnahmen entgegen gewirkt wurde.

Zulässig sind je nach Typ zwischen 20 und über 1000 Volt.

Die Z-Diode (Zener-Diode)

Bei einer speziellen Diodenart, den Z- oder Zener-Dioden, wird der Durchbruchseffekt bei relativ niedrigen Sperrspannungen bewußt erzeugt. Es gibt diese Dioden bevorzugt mit Zener-Spannungen aus der E24 Reihe zwischen 4,7 und 18 Volt. Bei geringeren Werten (3,9V, 3,3V, 2,7V) und bei Werten über 20 Volt sind die Kennlinien nicht mehr so steil wie insbesondere bei 5,6 bis 6,8 Volt.

Z-Dioden werden überwiegend zur Spannungsstabilisierung eingesetzt, da sich die Zenerspannung mit zunehmendem Strom kaum erhöht. Am steilsten ist die Kennlinie der ZF6,8. Die ZF5,6 hat einen Temperaturkoeffizienten von rund $+2 \text{ mV}/^\circ\text{C}$, so daß man mit einer in Serie geschalteten normalen Diode (oder einer ZF5,6 in Flußrichtung) eine temperaturkompensierte Z-Diode mit einem U_z von etwa 6,2 Volt bekommt. Derartige Dioden gibt es natürlich auch als fertiges Bauteil.

Fotodioden und Fotoelement

Bei Fotodioden kann Licht auf die Verarmungszone einwirken und dadurch weitere Ladungsträgerpaare erzeugen, die bei einer in **Sperrrichtung** betriebenen **Fotodiode** den Sperrstrom ansteigen lassen. Meist wird statt einer Diode ein **Fototransistor** eingesetzt, der gegenüber der Fotodiode eine wesentlich höhere Empfindlichkeit aufweist.

Wenn man die Fotodiode ohne Sperrspannung betreibt, macht sich der Fotoeffekt als Änderung der Diffusionsspannung bemerkbar. Eine derart betriebene Fotodiode wird als Fotoelement bezeichnet.

Solarzelle

Die Solarzelle ist eine großflächige Form des Fotoelementes, die auf höchsten Wirkungsgrad der Umwandlung von Licht in elektrische Energie gezüchtet ist. Sie bildet das Grundelement der Sonnenkollektoren (Solarpanels), die nicht nur Satelliten mit Strom versorgen, sondern auch Amateurfunkstationen auf Bergen, beim Fieldday oder im heimischen Shack einen umweltfreundlichen, netzunabhängigen Betrieb ermöglichen. Die Spannung einer Einzelzelle liegt bei etwa 0,5 Volt und der entnehmbare Strom hängt von der beleuchteten Fläche und der Beleuchtungsstärke ab. Größere Spannungen und Ströme erreicht man durch Serien- und Parallelschaltung.

Leuchtdioden (LED)

Leuchtdioden werden in Durchlaßrichtung betrieben und haben in der Regel sehr niedrige Sperrspannungen. Sie sind nicht auf Siliziumbasis hergestellt. Das verwendete Grundmaterial und die zum Dotieren benutzten Elemente bestimmen die Farbe des aus der Sperrschicht emittierten Lichtes. Die Durchlaßspannung liegt zwischen 1,5 und 3 Volt, der Arbeitspunkt bei 2 bis 20 mA und darüber.

Schaltzeichen wichtiger Dioden

Anode (oben) und Kathode (unten)

