

# Grundbauelemente der Elektrotechnik

## Teil 5

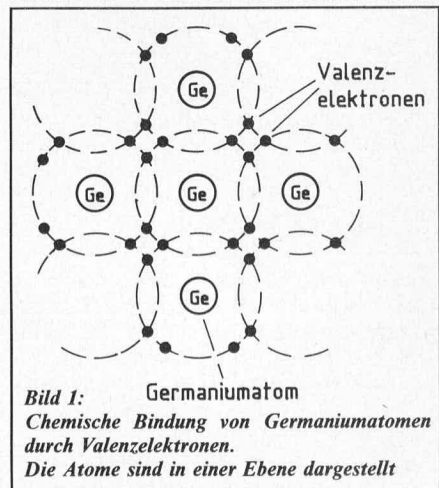
Ab dem hier vorliegenden Teil 5 wollen wir uns mit dem weiten Gebiet der Halbleiter befassen. Grundbestandteil aller Halbleiter, wie Dioden, Transistoren und Thyristoren, um nur einige zu nennen, ist ein Halbleiterwerkstoff.

### 3. Halbleiterbauelemente

#### 3.1 Das halbleitende Material

Halbleiter bestehen aus festen Stoffen, deren Atome bzw. Moleküle regelmäßig angeordnet sind. Der Aufbau ist kristallin. Bei Zimmertemperatur ist ihre elektrische Leitfähigkeit sehr gering. Der spezifische Widerstand liegt zwischen dem Widerstand von Metall und dem Widerstand von Isolierstoffen. Deshalb nennt man sie Halbleiter. Die gebräuchlichsten Halbleiter sind Germanium und Silizium. Nachstehend soll die Wirkungsweise der Halbleiter anhand des Werkstoffes Germanium näher erläutert werden. Beim Silizium sind die atomaren Vorgänge sehr ähnlich.

In der äußeren Schale des Germaniumatoms wie auch des Siliziumatoms sind vier Elektronen. Sie bewirken die chemische Bindung zwischen den Atomen. Diese Elektronen nennt man Valenzelektronen. Jedes Valenzelektron gehört zum eigenen Atom und zu einem benachbarten Atom.

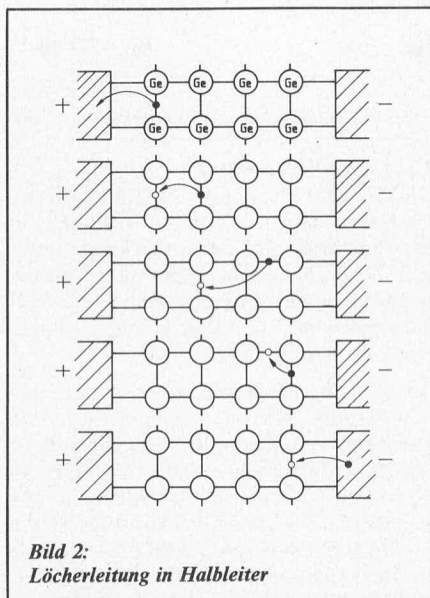


Dadurch sind die Atome untereinander verbunden. Ein Valenzelektron kann sich bei niedriger Temperatur nicht von seinem Platz entfernen. Der Kristall leitet bei dieser Temperatur nicht. Bei Zimmertemperatur jedoch sind die Halbleiteratome immer in Bewegung. Sie schwingen schnell um ihre Ruhelage hin und her. Dadurch entfernen sich einige Valenzelektronen von ihren Atomen und können sich frei im Kristallgitter bewegen. Legt man an einen solchen Kristall eine Spannung, so bewegen sich diese freigewordenen Elektronen vom Minuspol zum Pluspol der angelegten Spannung. Die freibeweglichen Elektronen nennt man auch Leitungselektronen.

Entfernt sich ein Elektron aus seiner Gitterbindung, dann hinterläßt es eine Lücke,

die auch als Loch bezeichnet wird. Die Löcher tragen ebenfalls zur Stromleitung bei, denn jedes Loch kann wieder ein Elektron aufnehmen. Liegt am Halbleiter eine Spannung, so springt ein benachbartes Valenzelektron in das Loch hinüber. Dabei hinterläßt dieses Valenzelektron ein neues Loch.

Durch dauernde Wiederholung dieses Vorganges wandert scheinbar das Loch durch den ganzen Kristall. Bei dieser „Löcherleitung“ wandern die Löcher in Richtung vom Pluspol zum Minuspol, wie positiv geladene Teilchen, entgegen den Elektronen.

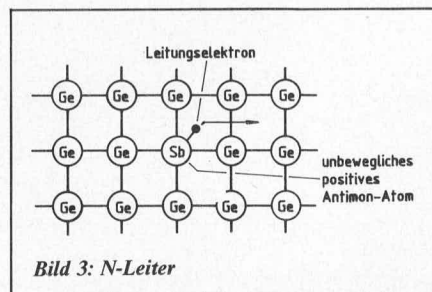


Bei höheren Temperaturen entstehen im Halbleiter mehr Leitungselektronen und entsprechend mehr Löcher. Der Widerstand von Halbleitern nimmt somit bei Temperaturerhöhung ab.

#### 3.1.1 N- und P-leitendes Material

Durch sehr geringe, exakt bemessene Einmischung von Fremdatomen, läßt sich die Leitfähigkeit von Germanium bzw. Silizium stark erhöhen. Fremdatome im Kristallgitter erzeugen zusätzliche Leitungselektronen bzw. Löcher. Diese Fremdatome müssen drei oder fünf Valenzelektronen besitzen, also entweder ein Valenzelektron mehr oder ein Valenzelektron weniger als die Atome des Grundmaterials.

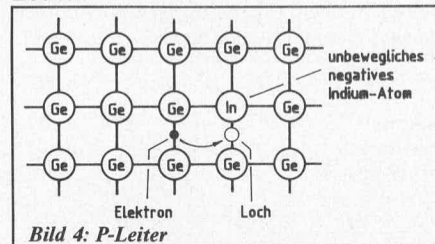
Das Einbringen der Fremdatome in das Kristallgitter nennt man „dotieren“. Baut



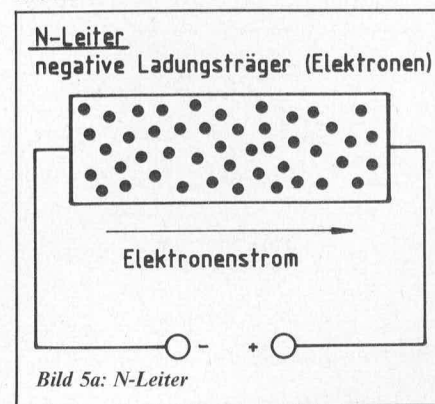
man in das Kristallgitter des Halbleiters Atome mit fünf Valenzelektronen ein, z. B. Antimon oder Phosphor, so erhält man einen N-Leiter.

Jedes Antimonatom hat in der äußeren Schale fünf Valenzelektronen. Bei seinem Einfügen in das Kristallgitter werden jedoch nur vier Elektronen zur Bindung gebraucht. Das überschüssige Elektron ist nun frei im Kristall beweglich; es bildet sich also ein Leitungselektron. Entfernt sich dieses von seinem Antimonatom, dann ist das vorher elektrisch neutrale Atom zu einem positiven Ion geworden. Durch den Einbau der Antimonatome im Halbleiterkristall entstehen also überschüssige Leitungselektronen und genau so viele Ionen, die aber im Unterschied zu den Leitungselektronen unbeweglich sind. Der Kristall wirkt nach außen elektrisch neutral.

Beim P-Leiter baut man in das Kristallgitter des Halbleiters Atome mit drei Valenzelektronen ein, z. B. Indium oder Aluminium. Dadurch entstehen überschüssige Löcher.



Jedes Indiumatom hat in seiner äußeren Schale drei Valenzelektronen. Bei seinem Einbau in das Kristallgitter werden jedoch vier Elektronen zur Bindung benötigt. Das fehlende Valenzelektron springt von einer benachbarten Atombindung herüber. Dadurch entsteht ein Loch. Das Indiumatom erhält dabei ein Valenzelektron mehr, als es vorher als elektrisch neutrales Atom hatte. Dabei ist es zu einem negativen Ion geworden. Durch den Einbau von Indiumatomen in den Halbleiterkristall entstehen also überschüssige Löcher und genau so viele negative Ionen, die aber im Unterschied zu den Löchern unbeweglich sind. Auch dieser Kristall wirkt nach außen elektrisch neutral.



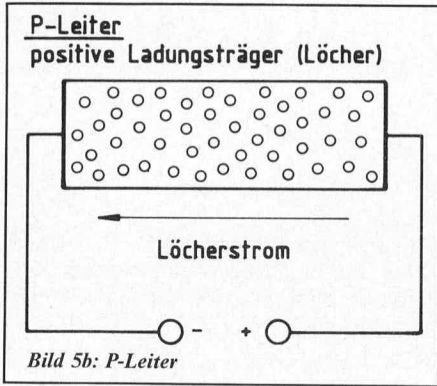
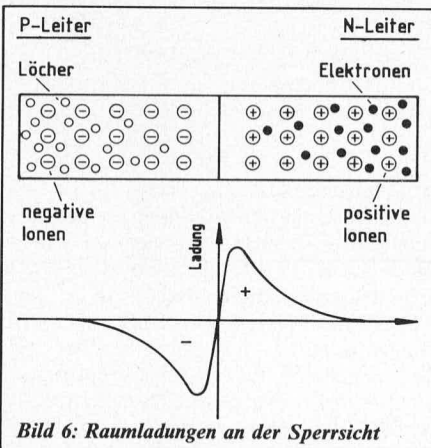


Bild 5b: P-Leiter

### 3.1.2 Der PN-Übergang

Stellt man einen Halbleiterkristall so her, daß er je zur Hälfte aus einem P-Leiter und einem N-Leiter besteht, die aneinander grenzen, so nennt man dieses einen PN-Übergang.

An der Grenze von P- und N-Leiter dringen durch die normale Wärmebewegung Leitungselektronen vom N-Leiter in den P-Leiter ein und Löcher von dem P-Leiter in den N-Leiter. Diesen Vorgang nennt man „Diffusion“. Jedes Elektron in der Nähe des PN-Überganges besetzt im P-Leiter ein Loch, jedes Loch wird im N-Leiter von einem Elektron besetzt. Dadurch verarmt das Gebiet in der Nähe des PN-Überganges an Ladungsträgern. Der an Ladungsträgern verarmte Bereich wirkt ohne angelegte Spannung wie ein Isolierstoff. Man nennt diesen Bereich „Sperrschicht“. Ihre Dicke beträgt weniger als ein Hundertstel mm.



Legt man den P-Leiter eines PN-Überganges an den Pluspol und an den N-Leiter den Minuspol einer Spannungsquelle, so treibt die angelegte Spannung die Leitungselektronen von der Seite des N-Leiters und die Löcher von der Seite des P-Leiters auf die Sperrschicht zu. Die Sperrschicht wird zunehmend abgebaut. Bei höheren Spannun-

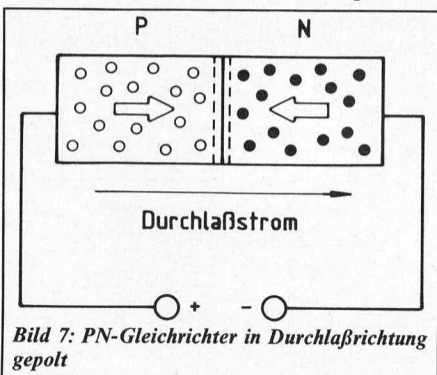


Bild 7: PN-Gleichrichter in Durchlaßrichtung gepolt

gen verschwindet die Sperrschicht ganz. Der PN-Übergang ist so in Durchlaßrichtung gepolt.

Liegen am P-Leiter der Minuspol und am N-Leiter der Pluspol, so wird die Sperrschicht verbreitert. Der Strom wird in dieser Richtung gesperrt. Erhöht man die Sperrspannung noch mehr, so wird die Sperrschicht immer breiter. Diese Spannung kann jetzt aber Valenzelektronen aus den Kristall-Gitterbindungen in der Sperrschicht losreißen, so daß neue Leitungselektronen und Löcher entstehen. Dadurch fließt ein Sperrstrom.

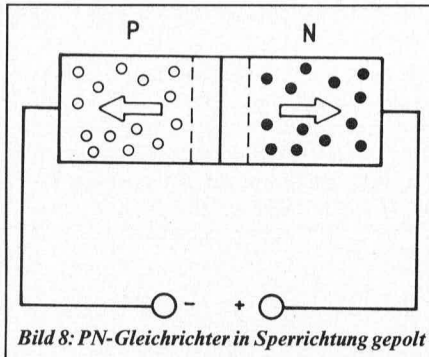


Bild 8: PN-Gleichrichter in Sperrichtung gepolt

### 3.2 Gleichrichterdioden

Die Gleichrichterdioden sind wohl die bekannteste Bauform des PN-Überganges. Hierbei unterscheidet man Germanium- und Siliziumdioden, wobei sich Germaniumdioden in ihrer physikalischen Wirkungsweise nur quantitativ von der Siliziumdiode unterscheiden.

Die Gleichrichterwirkung einer Diode beruht darauf, daß sie einer positiven und einer negativen Spannung unterschiedliche Widerstände entgegengesetzt. Wird z. B. an die beiden Pole einer Diode eine Spannung gemäß Bild 9 angelegt, so kann ein Strom fließen (siehe hierzu auch Bild 7), weil die Diode dieser Spannung kaum einen Widerstand entgegengesetzt. Die Diode ist in Durchlaßrichtung gepolt.

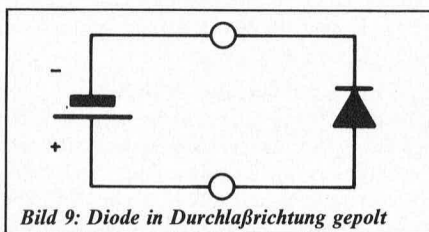


Bild 9: Diode in Durchlaßrichtung gepolt

Dreht man die Diode oder die Spannung jedoch um, so kann infolge des großen Sperrwiderstandes fast kein Strom fließen (siehe hierzu auch Bild 8).

Die Diode liegt nun in Sperrichtung.

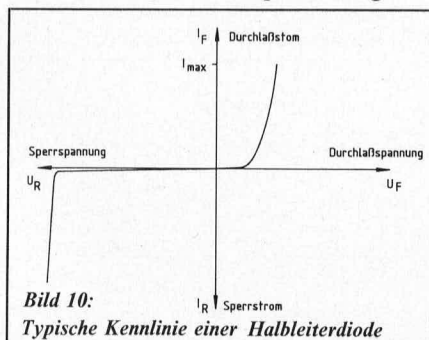


Bild 10: Typische Kennlinie einer Halbleiterdiode

Das Verhalten des Diodenstromes in Abhängigkeit der angelegten Spannung kann man in einer Kennlinie veranschaulichen. Ihr typischer Verlauf ist in Bild 10 dargestellt.

Man kann für jede angelegte Spannung die Größe des fließenden Stromes ablesen. Der Durchlaßstrom steigt bei kleinen positiven Spannungen auf hohe Werte an. Er darf einen bestimmten Maximalwert  $I_{max}$  nicht überschreiten, da die Diode sonst thermisch zerstört wird. Einen groben Anhaltspunkt über den Verlauf der Kennlinie erhält man aus der Angabe der Durchlaßspannung bei 10% des maximalen Stromes. Sie liegt bei Germaniumdioden im Bereich von 0,2 Volt bis 0,4 Volt, bei Siliziumdioden zwischen 0,5 Volt und 0,8 Volt. In Bild 10 erkennt man, daß der Sperrstrom bei hohen Sperrspannungen auf hohe Werte ansteigt. Normale Gleichrichterdioden dürfen in diesem Bereich nicht betrieben werden, weil sonst lokale Erwärmungen zur Zerstörung führen. Die maximale Sperrspannung der Dioden ist je nach Bauart verschieden. Der Sperrstrom ist im Vergleich zum Durchlaßstrom so klein, daß man ihn in Bild 10 kaum erkennen kann. Bild 11 zeigt seinen typischen Verlauf in einem größeren Maßstab. Die Sperrströme von Kleinleistungsdioden liegen bei Germanium im  $\mu A$ -Bereich ( $10^{-6}$  A), bei Silizium im nA-Bereich ( $10^{-9}$  A).

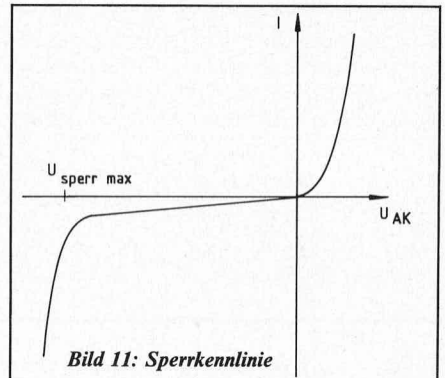


Bild 11: Sperrkennlinie

Die Durchlaßspannungen, die etwa 0,3 Volt bei Germanium und 0,7 Volt bei Silizium betragen, nehmen um 100 mV zu, wenn sich der Durchlaßstrom verzehnfacht.

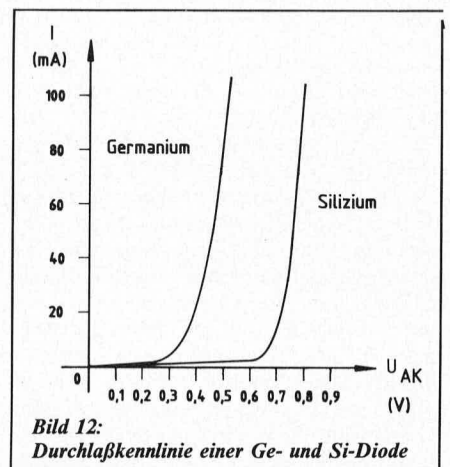


Bild 12: Durchlaßkennlinie einer Ge- und Si-Diode

Der Sperrstrom einer Diode steigt exponentiell mit der Temperatur an. Er verdoppelt sich bei 10 Grad Temperaturerhöhung. Bei 100 Grad steigt er demnach auf den tausendfachen Wert.