

# Elektronik

Karl-Wilhelm Baier

## Die Physik der Halbleiter

### Leitungsmechanismus

Die elektrische Leitfähigkeit eines Stoffes ist in erster Linie von der Anzahl der freien Ladungsträger abhängig. Bei Festkörpern findet im Gegensatz zu flüssigen und gasförmigen Stoffen praktisch keine Ionenleitung statt. Die Atome des Kristalls bleiben fest an ihren Gitterplätzen gebunden. Der elektrische Strom entsteht durch den Transport von freien Elektronen, deren Wanderung die Struktur des leitenden Stoffes nicht beeinflusst. Wie entstehen nun diese freien Ladungsträger?

Jedes Atom besitzt entsprechend seiner im Kern enthaltenen Protonenzahl eine positive Ladung, die durch die um den Kern kreisenden negativen Ladungen, die Elektronen, kompensiert wird. Die Proto-

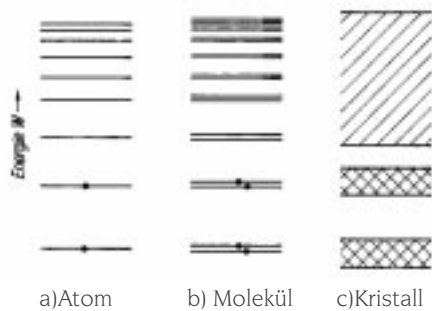


Abbildung 1: Energieschema

nenzahl ist gleich der Elektronenzahl. Für das chemische Verhalten des Elementes sind die sogenannten Valenzelektronen - das sind die den Kern in den größten Abständen umkreisenden Elektronen - verantwortlich. Sie stellen die Bindung zu den benachbarten Atomen im Kristall her („Valenzbindung“). Die Valenzelektronen sind äußeren Störungen, z. B. durch mechanische Einwirkungen oder elektrische Felder am ehesten zugänglich.

Jedes Elektron besitzt eine Energie, die mit dem Abstand vom Kern zunimmt. Für das Einzelatom kann man nach der Quantentheorie von Planck den Elektronen Energieschalen zuordnen. Im Gegensatz zu den diskreten Energiezuständen beim Einzelatom (Abbildung 1a) ergeben sich beim Molekül infolge der gegenseitigen Krafteinwirkung der Atome Doppelniveaus (Abbildung 1b), d.h. die auf gleichem Energieniveau liegenden Elektronen haben nicht exakt die gleiche Energie. Bei einer äquidistanten Kette von Atomen, wie es beispielsweise beim Atomverband eines Elementes der Fall ist, bilden

sich derart viele Einzelniveaus aus, daß sie nicht mehr voneinander zu unterscheiden sind. Man faßt sie zu Energiebändern zusammen (Abbildung 1c).

Es ist üblich, in der Darstellung nach **Abbildung 1c** alles Unwesentliche wegzulassen und entsprechend **Abbildung 2** nur die für die Betrachtung wichtige obere Bandkante des Valenzbandes mit der Energie  $W_V$ , die Bandlücke (verbotenes Band) und die untere Kante des Leitungsbandes mit der Energie  $W_L$  darzustellen.

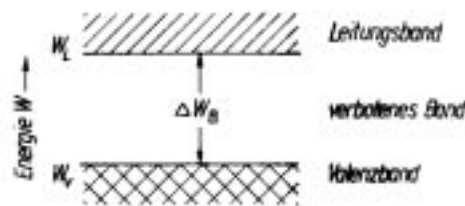


Abbildung 2: Energieschema

Im Valenzband ist die Gesamtheit der Energiezustände derjenigen Elektronen zusammengefaßt, die die Bindungen von Atom zu Atom im Kristallgitter bewirken. Diese Valenzelektronen sind fest in das Kristallgitter eingebaut; sie können sich nicht im elektrischen Feld bewegen. Der Zwischenbereich (verbotenes Band) ist stets unbesetzt, so daß die Elektronen diese Energiedifferenz in einem Sprung überwinden müssen, ähnlich wie sie im Atom von einer Elektronenschale zur nächsten hinauf- oder hinunterspringen, ohne sich im Zwischenbereich aufzuhalten. Das Leitungsband umfaßt die Energiezustände derjenigen Elektronen, die sich aufgrund ihrer höheren Energie aus dem Kristallgitter gelöst haben und sich frei im Kristall bewegen können. Die Elektronen des Leitungsbandes sind Träger des Stromes.

Solange Valenzband und Leitungsband aneinander anschließen oder sich überlappen, wie dies bei ein- und zweiwertigen Metallen der Fall ist, stehen für den Leitungsmechanismus Elektronen in sehr großer Anzahl zur Verfügung, weil geringste Energiebeträge genügen, um Elektronen aus dem Valenzband in das Leitungsband zu heben. Anders ist es bei den Halbleitern. Hier sind Valenzband und Leitungsband durch einen bestimmten Energieabstand voneinander getrennt. Um ein Valenzelektron in das Leitungsband zu überführen, muß ein Energiebetrag von einigen Zehntel eV aufgebracht werden. Der Mittelwert der statistisch verteilten Energie der Elektronen ist bei Zimmertemperatur

aber nur 0,04 eV. Die Wahrscheinlichkeit, daß Elektronen vorhanden sind, deren thermische Energie ausreicht, um diesen Energieabstand zu überwinden - er ist bei Germanium 0,72 eV und bei Silizium 1,1 eV - ist daher sehr gering. Dies ist der Grund, warum die Anzahl der leitfähigen Elektronen in einem Halbleiter so sehr viel kleiner ist als in einem metallischen Leiter. Je höher die Temperatur, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit, daß Elektronen aus dem Valenzband in das Leitungsband gelangen.

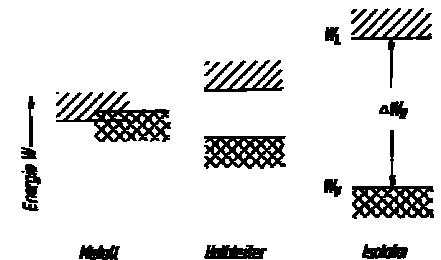


Abbildung 3: Energiebändermodell

Ein Vergleich zwischen den Energiebändermodellen von Metallen, Halbleitern und Isolatoren (Abbildung 3) zeigt, daß die isolierenden Eigenschaften eines Festkörpers ihren Grund in dem großen Energieabstand zwischen Leitungs- und Valenzband haben (z.B. Diamant 6 eV), welcher nur unter extremsten Bedingungen von einem Valenzelektron übersprungen werden kann. Der Unterschied zwischen Halbleiter und Isolator ist nur ein gradueller. Substanzen mit  $\Delta W_B > 3$  eV zählt man zu den Isolatoren.

### Eigenleitung

Ein reiner, homogener Kristall aus Germanium oder Silizium enthält, wenn er eine sehr niedrige Temperatur hat, nur wenige freie Elektronen. Alle vier Valenzelektronen dienen der Bindung im Kristallgitter. Wie **Abbildung 4** zeigt, ist in einem fehlerlosen Kristall jedes Atom in Tetraederanordnung von vier anderen Atomen umgeben, so daß alle vier Valenzelektronen gegenseitig abgesättigt und an ihren Atomverband gebunden sind. Aufgrund der Absättigung aller vier Valenzelektronen sollte man überhaupt keine Leitfähigkeit im Kristall erwarten, da diese frei bewegliche Ladungsträger voraussetzt. Tatsächlich ist reines Germanium bzw. Silizium ein Isolator, wenn es auf der Temperatur des absoluten Nullpunktes  $T = 0$  K gehalten wird; d. h. wenn die Atome im Gitterverband starr fixiert sind und keine Wär-

mebewegung die Regelmäßigkeit des Kristallgefüges verletzt.

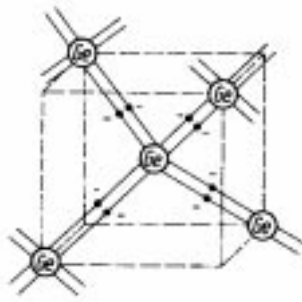


Abbildung 4 Atomgittermodell schematisch

Infolge der Wärmeenergie bei  $T > 0$  K schwingen jedoch die Gitteratome um ihre Ruhelage. Durch diese

thermische Bewegung werden einige der Elektronenpaarbindungen gelöst; es tritt **Paarbildung** auf. Ein Elektron löst sich aus seinem Gitterplatz und läßt an dieser Stelle einen Leerplatz zurück, der im Gegensatz zur negativen Ladung des Elektrons eine positive Ladung im Kristallgitter darstellt; er wird „Defektelektron“ oder „Loch“ genannt. Das aus der Bindung gelöste Elektron ist in das Leitungsband des Energiebändermodells übergegangen. Es kann sich im Kristall frei bewegen und wird, solange kein elektrisches Feld vorhanden ist, eine regellose Zickzackbewegung ausfahren. Auch die Defektelektronen sind beweglich. Das Loch, das durch das Ausbrechen eines Elektrons aus dem Atomverband zurückbleibt, kann durch Überwechseln eines Valenzelektrons aus einem benachbarten Atom ausgefüllt werden, während das Loch auf dieses Nachbaratom überspringt und von dort anschließend an andere Atome weitergegeben werden kann. Tatsächlich ist also die Bewegung von Defektelektronen eine Elektronenleitung, wenn es auch den Anschein hat, als ob eine positive Ladung in entgegengesetzter Richtung wandert.

Da die Ladungsträger in reinem Germanium bzw. Silizium immer paarweise entstehen, Paarbildung oder Generation genannt, ist die Elektronendichte  $n$  gleich der Löcherdichte  $p$ . Die durch Aufbrechen von Bindungen als Folge der thermischen Bewegung entstehende Dichte bezeichnet man als Intrinsic- oder Eigenleitfähigkeitsdichte  $n_i = F(T, \Delta W_B)$ .  $T$  ist die absolute Temperatur und  $\Delta W$ , der Energieabstand zwischen Valenz- und Leitungsband.

Den umgekehrten Vorgang der Paarbildung, d.h. die Vereinigung eines Elektrons mit einem Loch, nennt man Regeneration oder Rekombination.

Die Temperaturabhängigkeit der Intrinsic-Dichte - bei Dioden, Thyristoren und Transistoren eine unerwünschte Nebenerscheinung - erlaubt den Bau temperaturabhängiger Widerstände (Heißleiter), die

im Gegensatz zu metallischen Widerständen einen negativen Temperaturkoeffizienten aufweisen.

Außer durch Wärmeenergie kann ein Valenzelektron auch durch Zufuhr von Strahlungsenergie in das Leitungsband gehoben werden. Diese Erscheinung nennt man inneren fotoelektrischen Effekt und findet in Fotowiderständen, Fotodioden, Fotothyristoren und Fototransistoren vielfältige technische Anwendung.

Bei Zimmertemperatur treten also in einem reinen Halbleiter bereits im Leitungsband freie Elektronen auf, die sich bei vorhandener elektrischer Feldstärke in Richtung des positiven Potentials durch das Kristallgitter bewegen. Es entsteht ein Elektronenstrom mit der Beweglichkeit  $\mu_n$ . Die Beweglichkeit  $\mu$  gibt an, welchen Weg die Träger in einer Sekunde zurücklegen würden, wenn sie sich in einem elektrischen Feld der Stärke  $1 \text{ V/cm}$  befänden. Im Valenzband kann aus einer Nachbarbindung zum Loch ein Elektron herauspringen, hinterläßt dort ein Loch und regeneriert mit dem ursprünglichen Defektelektron. Tritt dieser Vorgang mehrfach hintereinander auf, natürlich ebenfalls in der Art, daß die Einzelelektronenbewegungen in Richtung des positiven Potentials gerichtet sind, dann springt zwar jedes an der Bewegung beteiligte Elektron nur einmal aus einer in eine andere Bindung; es scheint aber ein Loch in Richtung des negativen Potentials zu wandern: Es entsteht also auch ein **Löcherstrom**, und zwar mit einer Beweglichkeit  $\mu_p < \mu_n$  was aus dem angedeuteten Bewegungsmechanismus wohl einleuchtend hervorgeht.

Die Elektronenbeweglichkeit in Germanium ist fast 80mal größer als bei Kupfer. Das resultiert daraus, daß sich die Ladungsträger bei Kupfer, bedingt durch ihre hohe Dichte, in ihrer Beweglichkeit stark behindern.

### Störstellenleitung

Aus der Halbleitertechnik ist bekannt, daß Dioden, Transistoren, Thyristoren usw. relativ hohe Ströme führen können, z.B. Leistungsdioden und Thyristoren bis über 1000 A. Dazu muß der Halbleiter jedoch leitfähig sein, was er von Natur aus nicht ist.

Eine von mehreren Möglichkeiten, die Leitfähigkeit zu vergrößern, besteht in gewollten geringfügigen Verunreinigungen des Halbleiters mit Stoffen höherer oder niedrigerer Wertigkeit als die des Ausgangsmaterials. Man nennt diesen Vorgang Dotieren, wobei die Fremdatome dann Gitterplätze anstelle der Halbleiteratome einnehmen.

Ersetzt man einige Atome in einem reinen Germanium- bzw. Silizium-Kristall durch

Atome mit fünf Valenzelektronen (z. B. Arsen, Antimon), dann gehen vier Elektronen Valenzbindungen mit den benachbarten Halbleiteratomen ein, während das fünfte ungebunden und sehr leicht von seinem Atom abzutrennen ist (**Abbildung 5**). Dabei läßt es nicht ein be-

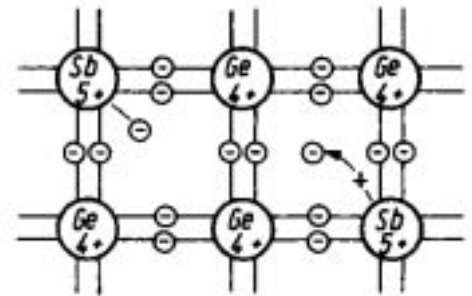


Abbildung 5: Mit Antimon Sb dotiertes Germanium, flächenmäßige Darstellung

wegliches positives Defektelektron, sondern ein unbewegliches positiv geladenes (ionisiertes) Atom zurück. Es wird im Gegensatz zur thermischen Ladungsträgerpaarzeugung nur ein Leitungselektron erzeugt. In einem mit fünfwertigen Atomen oder „Donatoren“ versetzten Germanium bzw. Silizium existieren daher neben den Leitungs- und Defektelektronen thermischen Ursprungs zusätzlich Leitungselektronen von Donatoren. Man spricht von einem N-Halbleiter, weil die Anzahl der negativen beweglichen Ladungsträger  $n$  größer ist als die der positiven beweglichen Ladungsträger  $p$ . Einige der von den Donatoren stammenden Leitungselektronen rekombinieren mit den thermisch erzeugten Löchern, d.h., wenn  $n$  steigt, sinkt  $p$ .

Baut man umgekehrt dreiwertige Atome oder „Akzeptoren“ (z.B. Gallium, Indium) in den Halbleiterkristall (**Abbildung 6**) ein, steigt die Zahl der Defektelektronen,

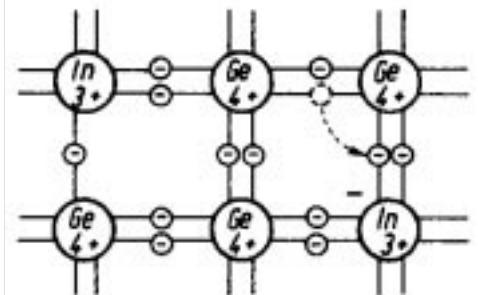


Abbildung 6: Mit Indium In dotiertes Germanium, flächenmäßige Darstellung

denn Atome dreiwertiger Elemente bringen ein Valenzelektron zu wenig mit, um die vier Valenzen der Nachbaratome abzusättigen. Sie ziehen daher Valenzelektronen aus ihrer Nachbarschaft an, die dann ein Loch in einem Ge- bzw. Si-Atom hinterlassen. Einen Halbleiter, in dem die positiven beweglichen Ladungsträger dominieren, nennt man P-Halbleiter.

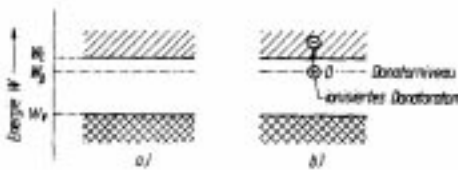
In der folgenden Tabelle ist die Herkunft der einzelnen Ladungsträger bei einem N- bzw. einem P-Halbleiter gegenübergestellt.

Die in der Praxis brauchbaren Fremdzusätze sind sehr gering: Auf  $10^4$  bis  $10^8$  Germanium bzw. Silizium-Atome kommt nur ein Fremdatom. Die Anforderungen an die Reinheit des Ausgangsmaterials sind dementsprechend hoch.

Tabelle : Ladungsträger bei einem N- und einem P-Halbleiter

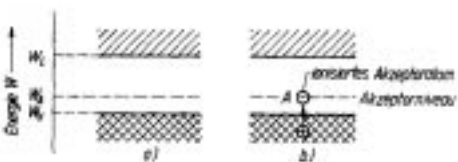
	Majoritätsträger	Minoritätsträger
N-Halbleiter	Leitungselektronen : a) von Donatoren b) thermischen Ursprungs	Defekt-elektronen : thermischen Ursprungs
P-Halbleiter	Defekt-elektronen : a) von Akzeptoren b) thermischen Ursprungs	Leitungselektronen : thermischen Ursprungs

Das Energieniveau  $W_D$  das dem überzähligen Valenzelektron eines Donatoratoms im Kristallverband zukommt, liegt knapp unterhalb des Leitungsbandes (**Abbildung 7**), da dieses Elektron mit ge-



**Abbildung 7:** N-Halbleiter a) Energiebändermodell eines N-Halbleiters, b) Ladungsträgererzeugung

ringstem Energieaufwand vom Donator abgetrennt und in das Leitungsband gehoben werden kann. Bei 300 K sind daher praktisch alle Donatoren ionisiert. In analoger Weise läßt sich auch ein Elektron, welches als viertes Valenzelektron eines Akzeptoratoms im Gitterverband fungiert, ein Energieniveau  $W_A$  zuordnen (**Abbildung 8**). Ein Germanium- bzw. Silizi-



**Abbildung 8:** P-Halbleiter a) Energiebändermodell eines P-Halbleiters, b) Ladungsträgererzeugung

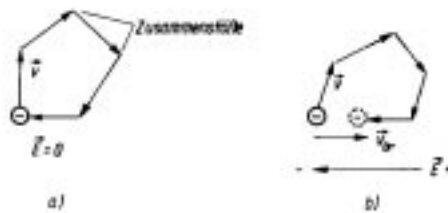
um-Valenzelektron kann mit geringem Energieaufwand das fehlende Valenzelektron im Akzeptoratom ersetzen und dabei ein Loch im Valenzband hinterlassen.  $W_A$  liegt deshalb knapp über dem Valenzband.

Bei Zimmertemperatur sind praktisch alle Akzeptoren ionisiert. Die Störstellenleitfähigkeit mit Fremdatomen durchsetzten Halbleiter liegt um Größenordnungen über der Eigenleitfähigkeit und erreicht Werte, die mit denen von Metallen vergleichbar sind.

**Elektronentheoretische Deutung des Stromes in Metallen und Halbleitern**

Die freien Elektronen im Leitungsband verhalten sich ähnlich wie Gasmoleküle, indem sie sich ungeordnet durch die Maschen des Gitters des Elementes bewegt. Sie führen eine thermische Schwirrbewegung aus. Da die Elektronen bei ihrer Bewegung auch untereinander zusammenstoßen und nach dem Stoß mit veränderter Geschwindigkeit und Richtung auseinanderfliegen, ändern die einzelnen Elektronen dauernd ihre Geschwindigkeit.

Es ist einzusehen, daß durch die Temperaturbewegung allein kein Strom entstehen kann, denn die Schwirrbewegungen der Elektronen sind, statistisch über eine bestimmte Zeit betrachtet, als Kreisprozeß anzusehen (**Abbildung 9a**).



**Abbildung 9:** thermische Bewegung a) ohne und b) mit Feldstärke E

Tritt nun im betrachteten Element zusätzlich eine elektrische Feldstärke E auf, so wird die Temperaturbewegung der Elektronen zum positiven Potential hin gerichtet sein. In **Abbildung 9b** ist angedeutet, daß entgegen der Feldrichtung eine Geschwindigkeit auftritt, die proportional der Feldstärke ist. Man nennt sie Driftgeschwindigkeit.

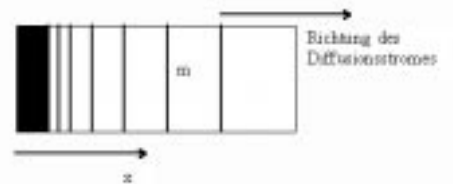
Der elektrische Strom ist also auf die Driftbewegung von freien Elektronen, welche unter der Wirkung eines elektrischen Feldes erfolgt, zurückzuführen.

Definitionsgemäß tritt bei einer Bewegung von Elektronen ein elektrischer Strom auf, der der Bewegungsrichtung der Elektronen entgegengesetzt ist. Anders ist es bei einem Defektelektron-Teilchenstrom, wie er in Halbleitern vorkommt. Unter dem Einfluß eines elektrischen Feldes fließen die Defektelektronen aufgrund der unterschiedlichen Ladung in Richtung des elektrischen Feldes, während die Elektronen ja entgegen der Feldrichtung fließen. In Halbleitern sind Elektronen und Defektelektronen gleichzeitig vorhanden. Die Strombeiträge der Elektronen und Defektelektronen addieren sich immer. Man nennt die beiden Ströme Feldströme, da

sie unter der Wirkung eines elektrischen Feldes zustande kommen.

In Halbleiterbauelementen tritt häufig ein Ladungsträger-Dichtegefälle auf. Es kann nun eine gerichtete Ladungsträgerbewegung, d. h. ein elektrischer Strom, dadurch entstehen, daß die Teilchen versuchen, das Dichtegefälle durch Diffusion auszugleichen.

In **Abbildung 10** ist ein Ladungsträger-Dichtegefälle in einem Halbleiter schematisch dargestellt. m bedeutet die Teilchendichte und x den Weg.

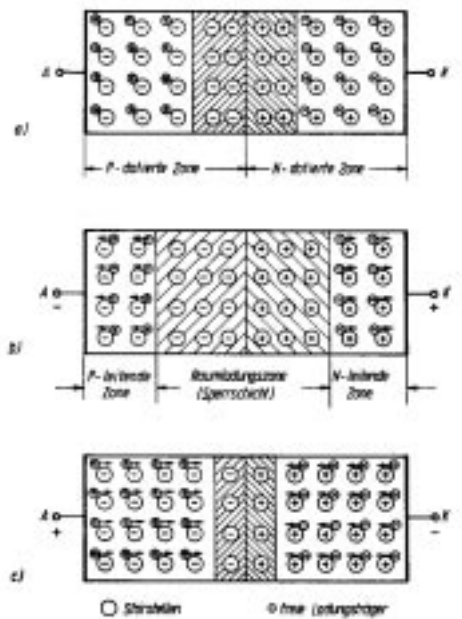


**Abbildung 10:** Ladungsträger-Dichtegefälle in einem Halbleiter

Der Teilchen-Diffusionsstrom ist dem Konzentrationsgefälle proportional.

Bei gleichgerichtetem Konzentrationsgefälle sind die elektrischen Stromanteile der Elektronen und Defektelektronen einander entgegengesetzt gerichtet.

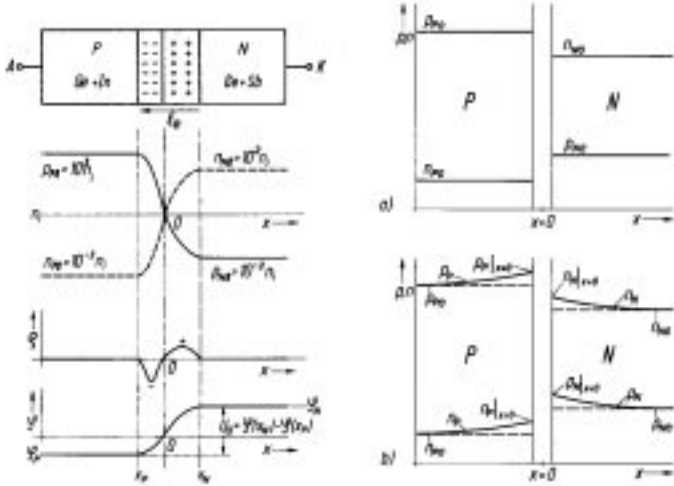
**PN-Übergang**



**Abbildung 11:** PN-Übergang a) spannungslos b) Sperrichtung c) Durchlaßrichtung

Die Halbleiterdiode besteht im Prinzip aus einem Halbleiterkristall, der auf der einen Seite P- und auf der anderen Seite N-dotiert ist. In **Abbildung 11** ist in ein aus einem Einkristall herausgeschnittenen Germaniumscheibchen von der linken Seite her Indium (Akzeptor) und von der rechten Seite her Antimon (Donator) eindiffundiert worden. Als Grenze zwischen den so entstandenen P- und N-dotierten Zonen bildet sich ein sogenannter PN-Übergang



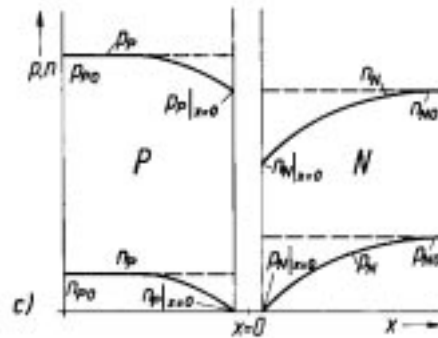


**Abbildung 12:** Verhältnisse am PN-Übergang im stromlosen Zustand A - Anode K - Kathode  $p_{p0}, n_{p0}, p_{n0}, n_{n0}$  - Ladungsträger-dichte  $n$  - Intrinsicdichte Potential  $\phi$  Raumladungsdichte; a) ohne äußere Spannung  $U=0$ , b) Spannung in Durchlaßrichtung  $U>0$  (Teil c) siehe bei Abbildung 13

**Ladungsträgerdichten**

In **Abbildung 13** sind die Ladungsträgerdichten in den beiden Halbleiterzonen für die Fälle  $U=0, U>0$  und  $U<0$  dargestellt.

erzeugte Potentialunterschied im wesentlichen gleich der angelegten Spannung



**Abbildung 13:** Ladungsträgerdichten  $p, n$  in den beiden Halbleiterzonen P, N c) Spannung in Sperrrichtung  $U>0$  [=rechte Seite von Abb.12]

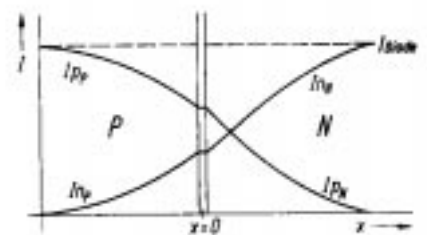
In der Durchlaßrichtung ( $U>0$ ) ist die Minoritäts- und Majoritätsladungsträgerdichte am Rand der Doppelschicht gegenüber dem Gleichgewichtszustand ( $U=0$ ) angehoben. Der in Durchlaßrichtung gepolte PN-Übergang injiziert Ladungsträger in das Kristallinnere.

Diese Injektion bildet die Grundlage des Transistoreffektes. In der Sperrichtung ( $U<0$ ) ist die Zahl der Ladungsträger am Rand der Doppelschicht gesenkt.

**Diodenkennlinie**

Der Strom, der beim Anlegen einer äußeren Spannung durch die Diode fließt, wird von Elektronen und Defektelektronen gebildet: Jeder Ladungsträger, der die P-Zone verläßt, wandert in die N-Zone ein und umgekehrt.

Den Knick nennt man **Schwellenspannung**. Er erklärt sich aus der Diffusionsspannung (**Abbildungen 11 und 12**)



**Abbildung 14:** Ströme in den beiden Halbleiterzonen in der Durchlaßrichtung

aus. Im P-dotierten Gebiet stehen freie positive Ladungsträger und im N-dotierten freie negative Ladungsträger für den elektrischen Strom zur Verfügung. In der Nähe der Grenzschicht diffundieren infolge des Konzentrationsunterschiedes P-leitende Löcher in das N-leitende Gebiet und genauso N-leitende Elektronen in das P-leitende Gebiet.

Während sich in der Grenzschicht die Majoritätsladungsträger weitgehend neutralisieren, bleiben die in das Kristallgitter eingebauten Störstellen, die ja unbewegliche Ladungsträger sind, zu beiden Seiten der Grenze zurück (**Abbildung 11a**). Aus der Trennfläche wird eine dünne elektrische Doppelschicht mit positiver Ladungsbelegung auf der N-Seite und negativer Ladungsbelegung auf der P-Seite. Das auf diese Weise am PN-Übergang entstehende elektrische Feld zieht alle beweglichen Ladungsträger aus der Trennfläche heraus und schafft hiermit eine Übergangsschicht stark reduzierter Leitfähigkeit. Die Feldstärke E, bzw. die Spannung U, zwischen P- und N-Halbleiter ist so gerichtet, daß sie den Übergang von weiteren Majoritätsladungsträgern erschwert. Sobald aber ein Minoritätsladungsträger in den Wirkungsbereich der Doppelschicht gerät, wird er vom elektrischen Feld erfaßt und auf die andere Seite gezogen. Im Gleichgewichtszustand wird daher der Diffusionsstrom kompensiert durch einen in entgegengesetzter Richtung fließenden Strom, der aus Minoritätsladungsträgern besteht (Feldstrom).

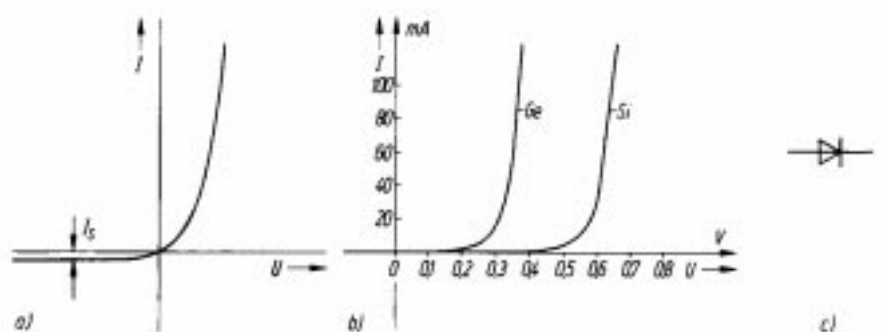
Wird nun von außen an das P-dotierte Gebiet eine gegenüber dem N-dotierten Gebiet negative Spannung angelegt (**Abbildung 11b**), so wird die Diffusionspannung unterstützt. Die beweglichen Ladungsträger werden daher aus dem Grenzgebiet herausgesaugt. Die Raumladungszonen dehnen sich aus, bis der durch sie

erzeugten Spannung ist. Da innerhalb der Raumladungszone praktisch keine beweglichen Ladungsträger

vorhanden sind, ist der Widerstand groß, und es kann kein Strom fließen: der PN-Übergang sperrt.

Bei umgekehrter Polarität der angelegten Spannung (**Abbildung 11c**) werden die beweglichen Ladungsträger durch das elektrische Feld in die Raumladungszone geschwemmt, wodurch die Trägerverarmung am PN-Übergang beseitigt wird. Hierbei diffundieren Löcher in das N-dotierte und Elektronen in das P-dotierte Gebiet. Durch Rekombination mit den Majoritätsladungsträgern nimmt ihre Konzentration mit zunehmender Entfernung von PN-Übergang ab. Da eine kleine Spannung große Ströme durch den PN-Übergang treiben kann, bezeichnet man diesen als durchlässig.

Der PN-Übergang zeigt die Eigenschaften eines elektrischen Ventils (Diode). Er ist in der Lage, in Sperrichtung eine hohe Spannung aufzunehmen und in Durchlaßrichtung einen hohen Strom zu führen.



**Abbildung 15:** Kennlinie und Schaltsymbol einer Halbleiterdiode a) qualitative Darstellung, b) quantitative Darstellung der Durchlaßkennlinie einer Ge- und Si-Diode, c) Schaltsymbol