

Lotter, Andreas

Physikalische Grundlagen des Transistors

(Facharbeit in Physik)

Schule: Gymnasium Kusel

Schuljahr: 1989/90

Kurs: MSS 12/P₂

Fach: Physik

1 Einleitung

1.1 Inhaltsübersicht

| | Seite |
|-----------|--|
| 1 | Einleitung 3 |
| 1.1 | Inhaltsübersicht 3 |
| 2 | Physikalische Grundlagen |
| | des Transistors 4 |
| 2.1 | Das Bändermodell 4 |
| 2.1.1 | Herleitung des Bändermodells 4 |
| 2.1.1.1 | Mechanisches Analogon 4 |
| 2.1.1.2 | Energiebänder 6 |
| 2.1.2 | Das Bändermodell und die Leit- fähigkeit 8 |
| 2.1.2.1 | Isolatoren 8 |
| 2.1.2.2 | Leiter 8 |
| 2.1.2.2.1 | Einwertige Metalle 9 |
| 2.1.2.2.2 | Zweiwertige Metalle 9 |
| 2.1.2.3 | Die Leitfähigkeit bei Halbleitern 10 |
| 2.2 | Halbleiter 11 |
| 2.2.1 | Die Eigenleitung 11 |
| 2.2.1.1 | Der Eigenleitungsmechanismus am Beispiel des Germaniums 11 |
| 2.2.1.1.1 | Der Aufbau des Germanium- kristalls 11 |
| 2.2.1.1.2 | Paarbildung 12 |
| 2.2.1.1.3 | Elektronen- und Löcherleitung 13 |
| 2.2.1.1.4 | Diffusion 14 |
| 2.2.1.1.5 | Rekombination 14 |
| 2.2.1.1.6 | Die Eigenleitfähigkeit des reinen Germaniums 15 |
| 2.2.2 | Die Fremdleitfähigkeit von Halbleitern 15 |
| 2.2.2.1 | Elektronen-Donatoren 15 |
| 2.2.2.2 | Der n-Halbleiter 17 |
| 2.2.2.3 | Elektronen-Akzeptoren 17 |
| 2.2.2.4 | Der p-Halbleiter 19 |
| 2.2.3 | Das Massenwirkungsgesetz 19 |
| 2.2.4 | Der pn-Übergang 20 |
| 2.2.5 | Die Halbleiterdiode 22 |
| 2.2.6 | Kennlinien 23 |
| 2.3 | Der Transistor 25 |
| 2.3.1 | Aufbau des Transistors 25 |
| 2.3.2 | Die Wirkungsweise des Transistors am Beispiel der Basisschaltung 25 |
| 2.3.3 | Leistungsverstärkung bei der Basisschaltung 27 |
| 2.3.4 | Stromverstärkung bei der Emitterschaltung 27 |
| 3 | Schlußwort 28 |
| 4 | Literaturverzeichnis 29 |
| | Erklärung 32 |

2 Physikalische Grundlagen des Transistors

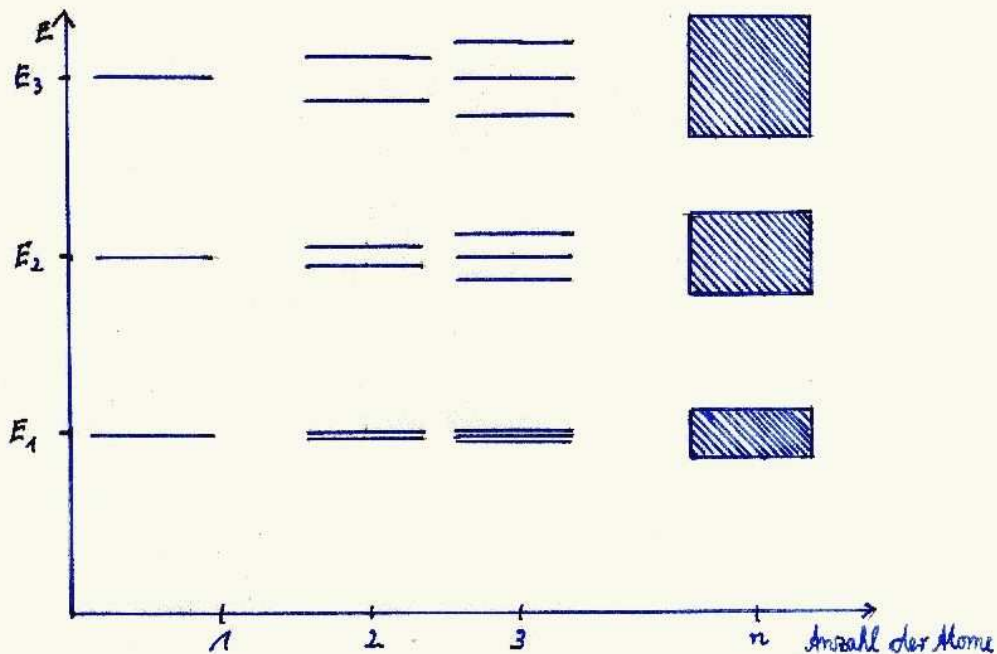
1 Das Bändermodell

Das Bändermodell ist eine Modellvorstellung, die zur Beschreibung der elektrischen Leitfähigkeit, insbesondere bei Halbleitern, dient. /1/

1.1 Herleitung des Bändermodells

Beim Bohrschen Atommodell nennt man die Energien E_n , die ein Elektron annehmen kann, Energieniveaus, d.h. das Energieniveauschema eines einzelnen Atoms besteht aus einzelnen scharf voneinander getrennten Linien.

Befinden sich viele gleichartige Atome innerhalb eines Kristallgitters, so treten zwischen den Atomen Wechselwirkungen auf, die jedes Energieniveau, ganz gleich, ob es von Elektronen besetzt ist oder nicht, in eine Vielzahl von Niveaus auffächern. /2/



Schematische Aufspaltung mehrerer Energiezustände eines Atoms durch Störung durch andere Atome

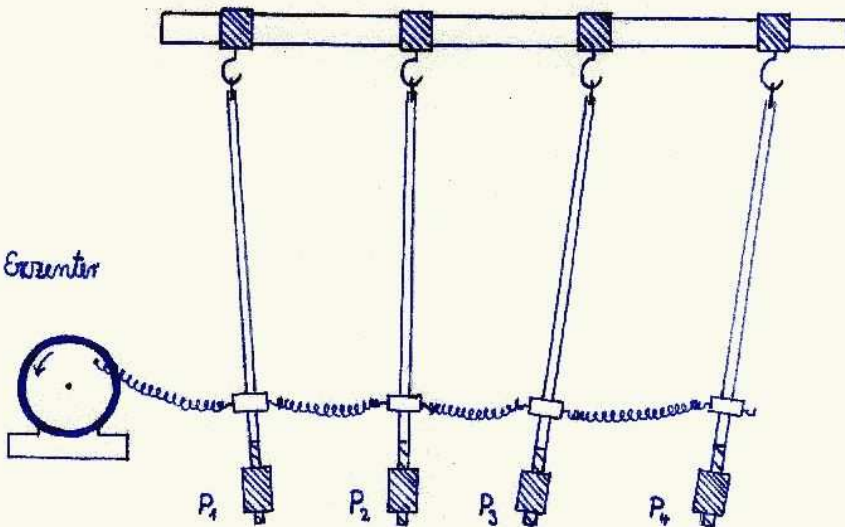
Skizze 1 /3/

1.1.1 Mechanisches Analogon

Werden n gleichartige Pendel miteinander gekoppelt und in Schwingung versetzt, so erhält man n unterschiedliche Resonanzfrequenzen. /4/

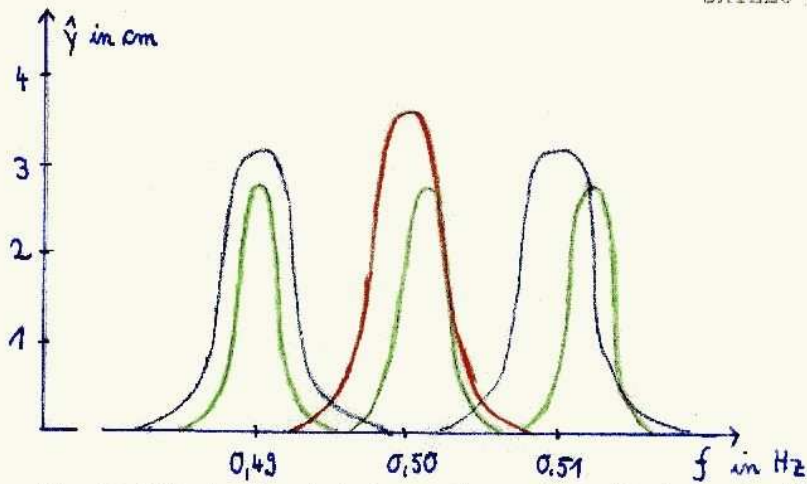
Besteht ein Kristall aus N Atomen, so zerfällt jedes Energieniveau in N dichtbenachbarte Teilniveaus, da alle Atome über Bindungskräfte miteinander gekoppelt sind. /5/

Motor mit Exzenter



Die Pendel sind durch Spiralfedern miteinander gekoppelt. P_1 wird durch einen Exzenter zu einer erzwungenen Schwingung angeregt.

Skizze 2 /6/



Die Amplitude des letzten gekoppelten Pendels in Abhängigkeit von der Frequenz des Erregers. Die braune Kurve gibt den Amplitudengang für ein gekoppeltes Pendel, die blaue den für zwei und die grüne den für drei gekoppelte Pendel wieder.

Skizze 3 /7/

1.1.2 Energiebänder

Wegen der großen Zahl von miteinander wechselwirkenden Atomen in einem Kristall (in einem cm^3 sind etwa $N = 10^{23}$ Atome enthalten) ergibt sich eine praktisch stetige Folge nicht mehr unterscheidbarer Einzelniveaus, ein sogenanntes *Energieband*.

Verbotene Zonen (Bandlücken), in denen keine erlaubten Elektronenniveaus existieren, trennen die Energiebänder.

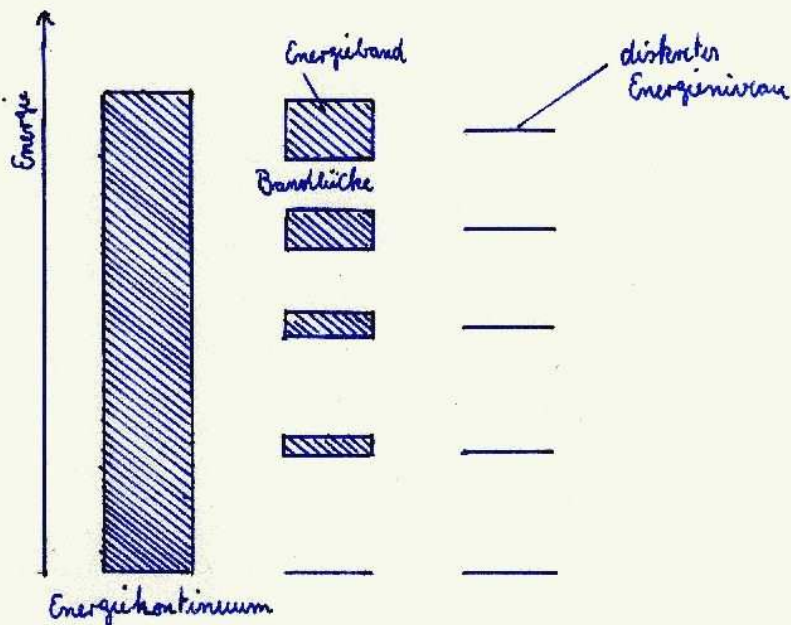
Wie breit ein Energieband ist, hängt von der Lage des Niveaus in der Atomhülle ab.

Die Elektronen der inneren Schalen sind durch ihre Kernnähe sehr stark gebunden, und ihre Wechselwirkung mit benachbarten Atomen ist relativ klein. Dadurch ergibt sich eine sehr geringe Niveauverbreiterung.

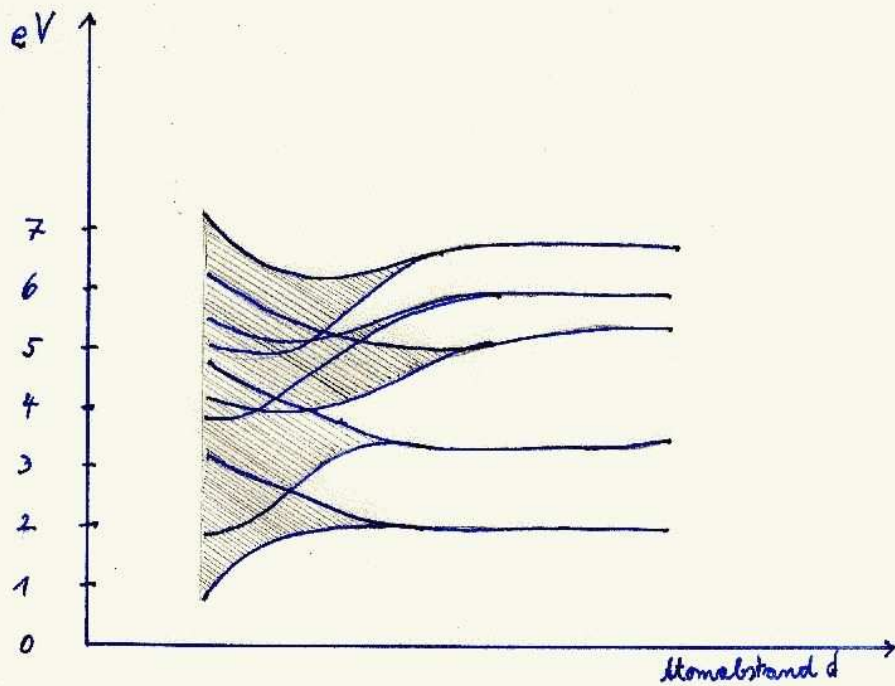
Eine starke Niveauverbreiterung findet bei den äußeren Valenzelektronen statt, da sie die Bindung von Atom zu Atom vermitteln und sehr eng miteinander gekoppelt sind. /8/

Die Größe der Aufspaltung, d.h. die Breite des aus den N Niveaus entstehenden Energiebandes hängt vom Grad der Kopplung, d.h. von der Austauschwahrscheinlichkeit der Elektronen ab. /9/

Die äußeren Valenzelektronen sind im gesamten Kristall quasifrei beweglich und lassen sich nicht mehr einem einzelnen Atom zuordnen. Ihre Bänder verlaufen durch den ganzen Kristall, die Elektronen gehören dem Kristall als Ganzem an. Energiebänder ihrerseits können auch zu einem Kontinuum zusammenwachsen. /10/ (Vgl. 1.2.2.2)

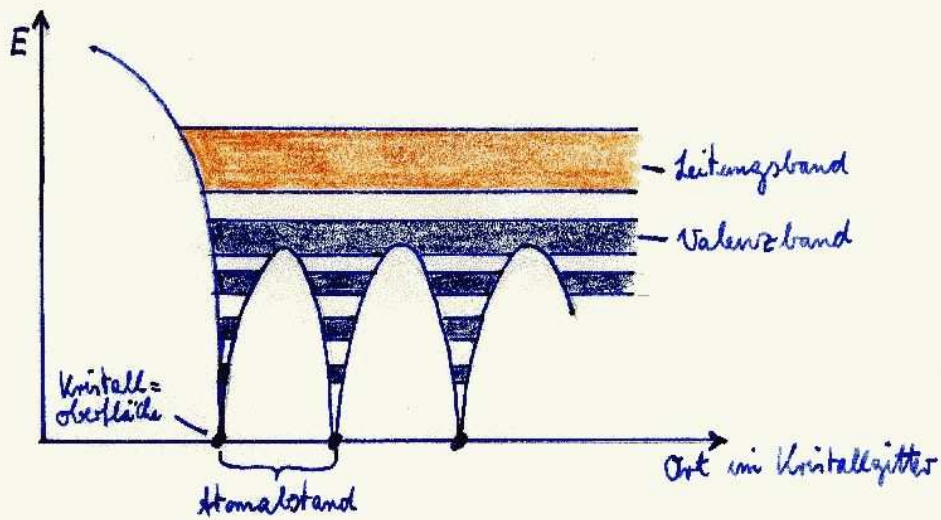


Skizze 4 /11/



Übergang der scharfen Energiezustände der Atome in zunehmend verbreiterte Energiebänder und schließlich in ein einheitliches Energiekontinuum infolge zunehmender Wechselwirkungen der Atome mit abnehmendem gegenseitigem Abstand

Skizze 5 /11/



Energiebänder im Kristallgitter

Skizze 5 /12/

1.2 Das Bändermodell und die Leitfähigkeit

Wird ein Kristall an eine Spannungsquelle angeschlossen, so wirken durch das elektrische Feld Kräfte auf die Elektronen und beschleunigen diese.

Dadurch nimmt die Energie der Elektronen zu, d.h. sie steigen in ihrem Energieband langsam nach oben.

Dies ist jedoch nur möglich, wenn das oberste mit Elektronen besetzte Energieband des Kristalls, das *Valenzband*, nicht voll besetzt ist. Jedes Energieniveau kann nämlich zwei Elektronen aufnehmen. Ist dies der Fall, dann bietet das gesamte Energieband keinen Platz für weitere Elektronen. Auch die bereits vorhandenen Elektronen haben dann keine Bewegungsfreiheit.

Energetisch oberhalb des Valenzbandes liegt das *Leitungsband*.

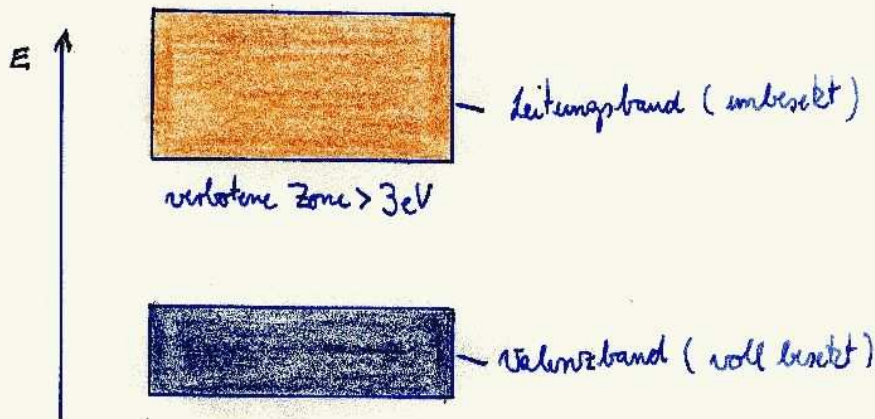
Es kann Elektronen aufnehmen und damit einen elektrischen Strom unterhalten.

Eine Bandlücke trennt Valenz- und Leitungsband. /13/

1.2.1 Isolatoren

Bei Isolatoren ist das Valenzband mit Elektronen voll besetzt. Diese Elektronen tragen daher nicht zur elektrischen Leitfähigkeit bei.

Die Elektronen können die Bandlücke vom Valenzband bis zum Leitungsband nicht überspringen. Die Breite der verbotenen Zone ist größer als 3 eV ($1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$). /14/



Ein Isolator im Bändermodell

Skizze 7 /15/

1.2.2 Leiter

1.2.2.1 Einwertige Metalle

In einwertigen Metallen ist das oberste besetzte Band nur zur Hälfte aufgefüllt. Die Elektronen können im elektrischen

Feld Energie aufnehmen und somit im freien Teil des Energiebandes durch ihre Bewegung einen elektrischen Strom darstellen. /16/

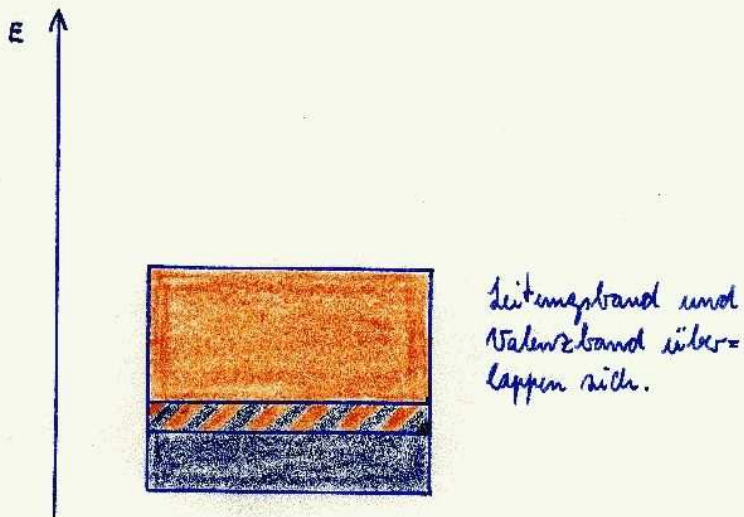


Einwertige Metalle im Bändermodell

Skizze 8 /17/

1.2.2.2 Zweiwertige Metalle

Bei zweiwertigen Metallen treten Überlappungen von Energiebändern auf. Infolge der Überlappung können sich die Elektronen in einem Raum bewegen, der überhaupt nicht von Elektronen belegt ist. /18/



Zweiwertige Metalle im Bändermodell

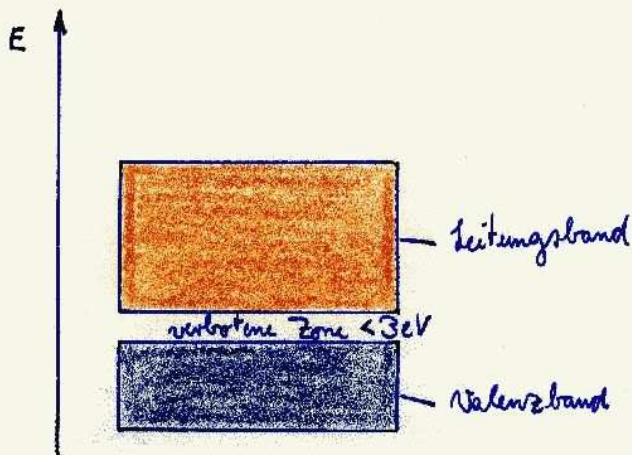
Skizze 9 /19/

1.2.3 Die Leitfähigkeit bei Halbleitern

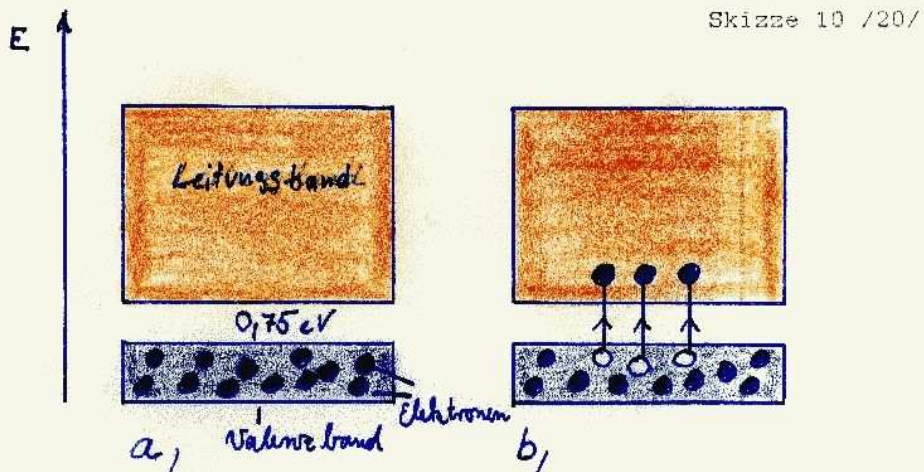
Während der Bandabstand beim Isolator so groß ist, daß es keinem Elektron gelingt, ihn zu überspringen, ist hier der Abstand sehr schmal ($< 3 \text{ eV}$).

Bei der Temperatur $T = 0 \text{ K}$ gibt es keine Elektronenleitung. Alle Energiezustände im Valenzband sind besetzt. Mit steigender Temperatur können immer mehr Elektronen infolge der zunehmenden Auflockerung des Gittergefüges die enge Bandlücke passieren und sich dann als Träger des elektrischen Stroms frei bewegen.

Die wichtigsten Halbleiter sind Germanium und Silizium. Der Energiezwischenraum beträgt bei Germanium $0,79 \text{ eV}$, bei Silizium $1,2 \text{ eV}$. /20/



Ein Halbleiter im Bändermodell



Bändermodell des Germaniumkristalls

a) beim absoluten Nullpunkt b) bei höheren Temperaturen
(im Zustand der Eigenleitung)

Skizze 11 /21/

2 Halbleiter

Definition:

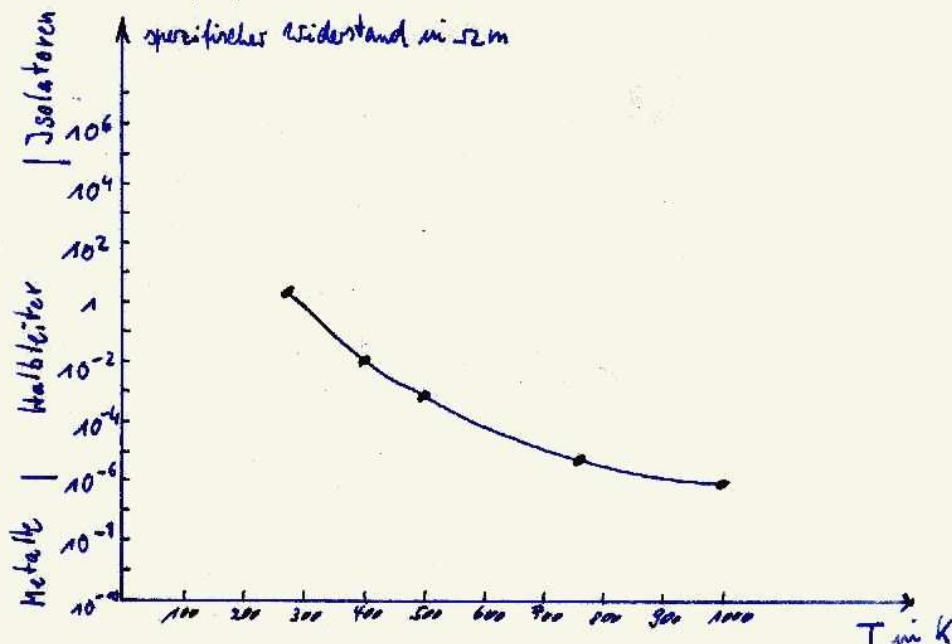
Ein elektronischer Halbleiter ist ein Kristall, der am absoluten Nullpunkt der Temperatur isoliert, bei höherer Temperatur dagegen eine zunächst schnell mit dieser zunehmende elektronische Leitfähigkeit besitzt. /22/

2.1 Die Eigenleitung

Die verbotene Zone zwischen Valenzband und Leitungsband ist beim elektronischen Halbleiter sehr schmal, so daß relativ geringe Anregungsenergien (z.B. Licht oder Wärme) ausreichen, um Elektronen in das Leitungsband zu heben. Ladungsträger müssen also durch thermische (oder optische) Energie aktiviert werden.

Der thermische Widerstand sinkt mit steigender Temperatur. Der Kristall wird zum Eigenleiter. /23/

Unter der Eigenleitung eines Halbleiters versteht man die geringe Leitfähigkeit des idealen Halbleiterkristalls ohne den Einfluß der Verunreinigung durch Fremdatome und Gitterfehler. /24/



Der spezifische Widerstand des Halbleiters Germanium als Funktion der Temperatur

Skizze 13 /25/

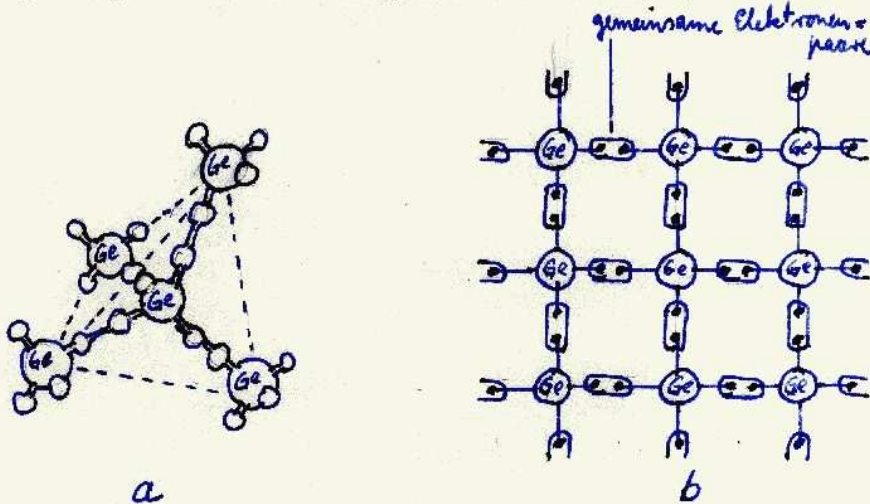
2.1.1 Der Eigenleitungsmechanismus am Beispiel des Germaniums

2.1.1.1 Der Aufbau des Germaniumkristalls

Germanium ist wie Silizium ein Element der vierten Haupt-

gruppe des Periodensystems. Es hat auf der äußersten Elektronenschale vier Valenzelektronen. Es bildet im Kristall eine sogenannte Vierer- oder Tetraederbindung. Zur Kristallbildung werden sämtliche Elektronen der Valenzschale benötigt. Es baut sich eine Achterschale, die gefüllt ist, auf.

Der Zusammenhalt der Atome kommt dadurch zustande, daß jeweils ein Valenzelektron des einen Atoms mit einem Valenzelektron des benachbarten Atoms ein Elektronenpaar bildet. Diese gemeinsamen Elektronenpaare bewirken, daß die beiden zugehörigen Atome zusammengehalten werden. /26/



Tetraederbindung eines ungestörten Kristalls aus Germanium
a) in räumlicher Darstellung b) in ebenflächiger Darstellung

Skizze 13 /27/

Bei der Temperatur $T = 0 \text{ K}$ stehen deshalb im vollkommenen Kristall keine Elektronen zur Stromleitung zur Verfügung. Der Kristall isoliert.

Wird der Kristall erwärmt, so kann durch die zugeführte Wärmeenergie ab und zu ein Elektron aus dem vollbesetzten Valenzband ins Leitungsband springen.

Die hierbei verbrauchte Energie ist zumindest gleich der Breite des verbotenen Bandes. Sie wird als Aktivierungsenergie der Eigenleitfähigkeit bezeichnet.

Bei Zimmertemperatur sind etwa $10^{-6} \%$ der Valenzelektronen des Germaniums durch Wärmebewegung aus ihrer Bindung herausgelöst. /28/

2.1.1.2 Paarbildung

Die so losgelösten Elektronen sind im Leitungsband frei beweglich. Gleichzeitig werden in dem vorher voll besetzten Valenzband Energieniveaus frei.

Die im Valenzband frei gewordenen Stellen bezeichnet man als

Löcher.

Da der Kristall vor Herauslösung des Elektrons an der betreffenden Stelle elektrisch neutral war, überwiegt nach der Herauslösung die positive Ladung des zugehörigen Atomkerns an dieser Stelle. Man spricht deshalb auch von einem an dieser Stelle befindlichen Defektelektron. /29/

Das gleichzeitige Erzeugen von freien Elektronen und Löchern nennt man Paarbildung. /30/

2.1.1.3 Elektronen- und Löcherleitung

Die Bewegung der sich im Valenzband befindlichen Elektronen im elektrischen Feld ist der Bewegung von Defektelektronen äquivalent, wobei die Defektelektronen oder Löcher bei angelegter Spannung zum negativen Pol wandern. Die Elektronen im Leitungsband wandern zum positiven Pol.

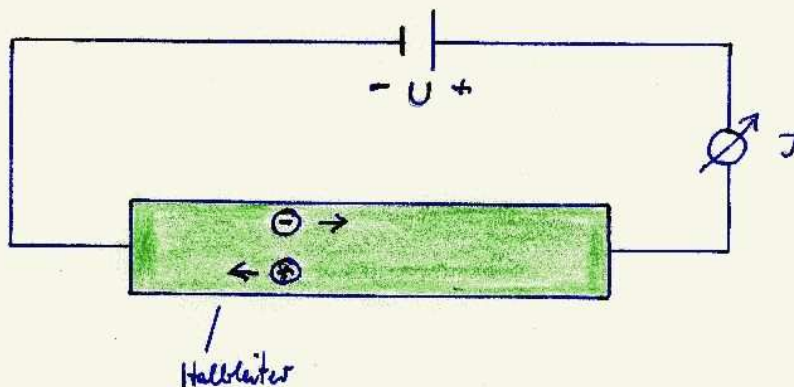
Im idealen Halbleiterkristall ist die Konzentration der freien beweglichen Elektronen und Löcher gleich groß.

Die Beweglichkeit ist in der Regel für Elektronen größer als für Löcher.

Die von Löchern verursachte Leitfähigkeit wird als *Löcherleitfähigkeit* oder *p-Leitung* bezeichnet.

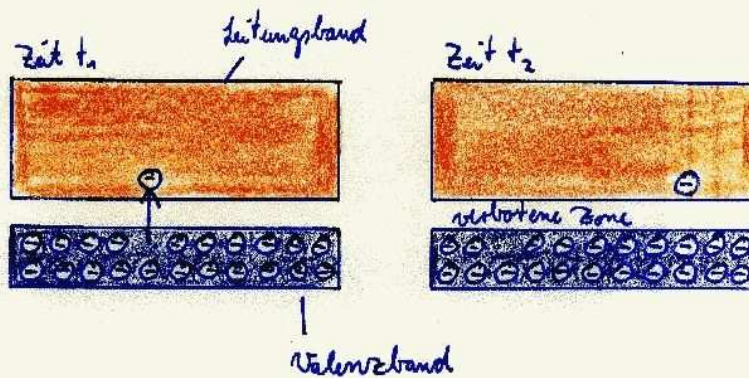
Die von den Elektronen verursachte Leitfähigkeit wird *Elektronenleitfähigkeit* oder *n-Leitung* bezeichnet. /31/

Die Elektrizitätsleitung in einem Halbleiter besteht aus einem zum positiven Pol gerichteten Elektronenstrom und einem zum negativen Pol gerichteten Löcherstrom. /32/



Bei angelegter Spannung wandern die Defektelektronen zum negativen Pol, die Elektronen zum positiven Pol.

Skizze 14 /33/



Der Eigenleitungsmechanismus beim reinen Halbleiter, veranschaulicht im Bändermodell. Das Loch im Valenzband bewegt sich wie eine positive Ladung, allerdings nicht so schnell wie das Elektron im Leitungsband.

Skizze 15 /34/

2.1.1.4 Diffusion

Infolge der Wärmebewegung üben die Atomrümpfe nur Schwingungen um ihre Ruhelage aus. Die Elektronen und Löcher hingegen wandern von einem Atom zum anderen.

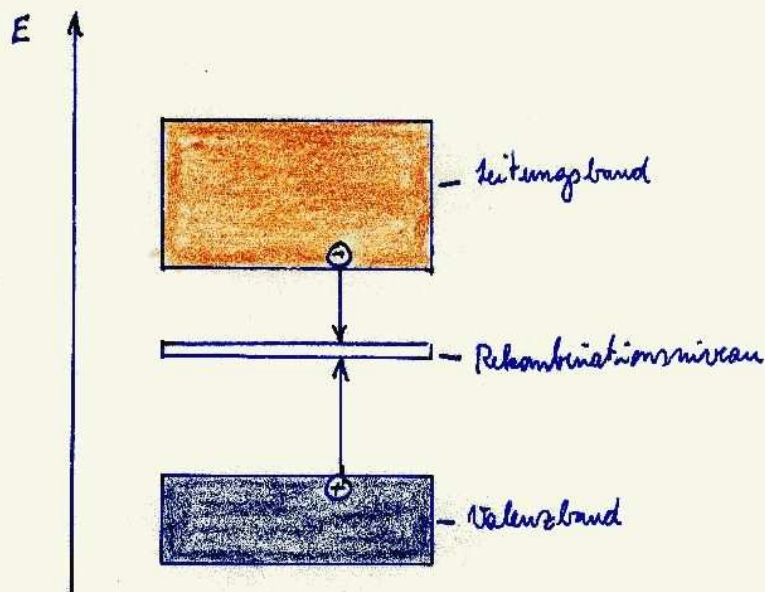
Bei einem von außen unbeeinflussten Kristall ist diese Bewegung ungeordnet. Die Elektronen und Löcher verteilen sich gleichmäßig über den Kristall. Man bezeichnet eine solche Bewegung als *Diffusion*.

Wird dagegen eine elektrische Spannung angelegt, entsteht eine geordnete Bewegung von Elektronen und Löchern, die man als elektrischen Strom bezeichnet. /35/

2.1.1.5 Rekombination

Elektronen können durch Stoß soviel Energie verlieren, daß sie in das Valenzband zurückfallen und mit Löchern rekombinieren. Durch diesen Vorgang wird der neutrale Zustand an der betreffenden Stelle wiederhergestellt.

Bei einer bestimmten Temperatur ist die Elektronen- und Löcherzahldichte, d.h. die Anzahl der freien Elektronen und Löcher je Volumeneinheit konstant. Es handelt sich dabei um einen Gleichgewichtszustand zwischen der Zahl der durch Rekombination verschwindenden Elektronen-Löcher-Paare und der Zahl der Neubildungen. /36/ (Vgl. 2.3)



Skizze 16 /37/

2.1.1.6 Die Eigenleitfähigkeit des reinen Germaniums

Die durch die Paarbildung bedingte Leitfähigkeit des reinen Halbleiterkristalls bezeichnet man als Eigenleitfähigkeit. Damit wird zum Ausdruck gebracht, daß die Ladungsträger aus dem Halbleiter stammen.

Die auf diese Weise entstehende Leitfähigkeit des reinen Germaniums ist relativ klein. Damit es zu einer nennenswerten Eigenleitung kommt, muß die Kristalltemperatur schon recht hoch sein.

Beim Germanium beträgt die breite der verbotenen Zone zwischen Valenz- und Leitungsband 0,79 eV. Die Raumtemperatur entspricht jedoch nur einer Energie von 0,02 eV. Erst oberhalb von 1000 K tritt eine merkbare Eigenleitung auf. /38/

2.2 Die Fremdleitfähigkeit von Halbleitern

Unter der Fremdleitfähigkeit eines Halbleiters versteht man jene elektrische Leitfähigkeit, die durch den Einbau von Fremdatomen in das Gitter oder durch das Vorhandensein von Störstellen verursacht wird.

Den Einbau geringster Mengen von Fremdatomen in das Gitter eines Festkörpers nennt man *Dotieren*.

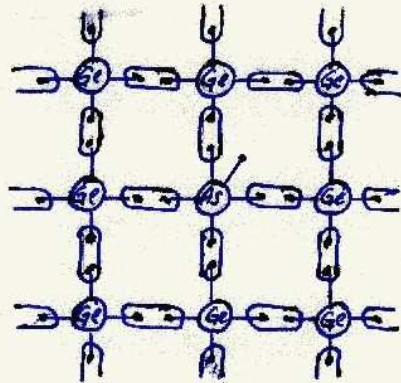
Bei dem in üblicher Weise dotierten Germanium sind etwa 10^{-5} % der Germaniumatome durch Fremdatome ersetzt. /39/

2.2.1 Elektronen-Donatoren

Donatoren sind (Fremd-)Atome mit fünf Valenzelektronen (z.B. Arsen (As), Antimon (Sb) oder Phosphor (P)), die im Halbleiterkristall leicht ein Elektron abgeben.

Tritt ein Arsenatom an die Stelle eines Germaniumatoms, so werden vier seiner Valenzelektronen für die Bindung an die

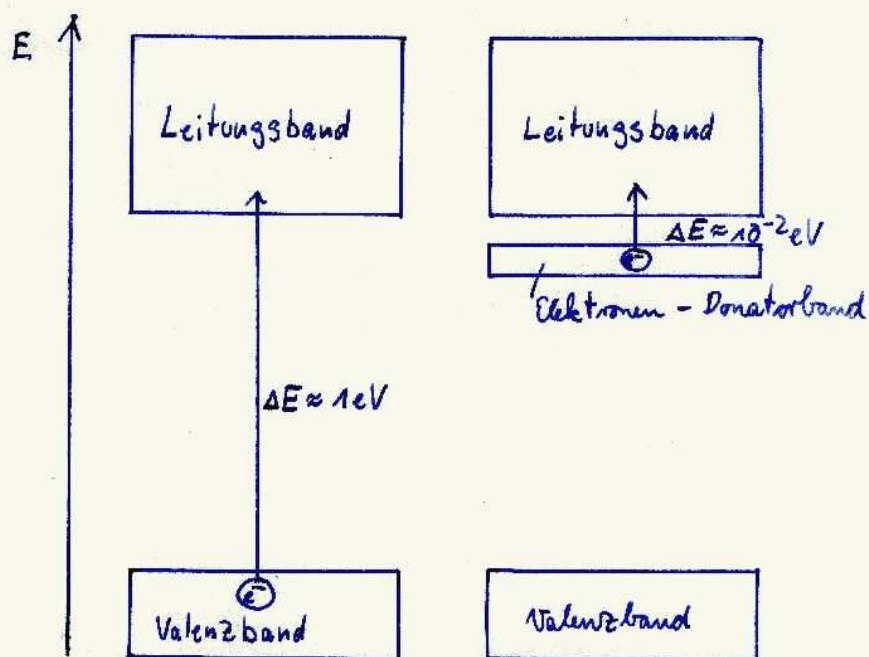
benachbarten Germaniumatome benötigt.
 Das fünfte Valenzelektron gehört zu keiner Elektronenpaar-
 bindung und ist daher nur lose gebunden, so daß es bereits
 bei einer niedrigen Temperatur zu einem Leitungselektron
 werden kann.



Ein Arsenatom als Donator im Germaniumkristall

Skizze 17 /40/

Zum Vergleich: Die geringsten Bindungsenergien regulärer
 Kristallelektronen betragen einige eV. Die thermisch Energie
 eines Elektrons beträgt etwa 0,02 eV.
 Das Energieniveau eines solchen Elektrons liegt dann etwas
 unterhalb des Leitungsbandes. Diese von Elektronen besetzten
 Niveaus werden als Donatorniveaus bezeichnet.
 Sie bilden das sogenannten Elektronen-Donatorband.
 Die relativ geringe Energie, die zugeführt werden muß, um
 ein Elektron vom Donatorband ins Leitungsband zu heben ist
 von der Größenordnung 10^{-2} eV.
 Ist das Elektron vom Donatorband ins Leitungsband gehoben,
 so bleibt ein Donator-Ion als eine praktisch ortsfeste posi-
 tive Punktladung zurück. /41/



reiner Kristall

n-dotierter Halbleiter

Skizze 16 /42/

2.2.2 Der n-Halbleiter

Durch die von dem Donator zur Verfügung gestellten Überschusselektronen wird die Leitfähigkeit des Germaniums erhöht. Da die elektronische Leitfähigkeit durch negative Ladungsträger (Elektronen) gesteigert wird, spricht man hier von n-Germanium oder allgemein von n-Halbleitern.

Im n-Halbleiter sind im überwiegenden Maße die Elektronen, im weit aus geringeren Maße die Löcher für die Elektrizitätsleitung verantwortlich.

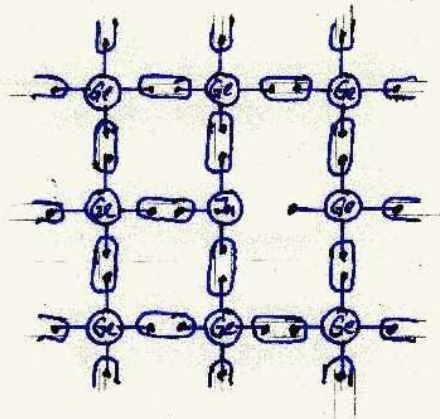
Im n-Halbleiter nennt man die Elektronen Majoritätsträger, die Löcher Minoritätsträger.

Im allgemeinen kann man die Minoritätsträger bei der Betrachtung vernachlässigen. /43/

2.2.3 Elektronen-Akzeptoren

Unter Elektronen-Akzeptoren versteht man Atome mit drei Valenzelektronen (z.B. Indium (In), Gallium (Ga), Bor B) oder Aluminium (Al)), die im Halbleiterkristall leicht Elektronen aufnehmen.

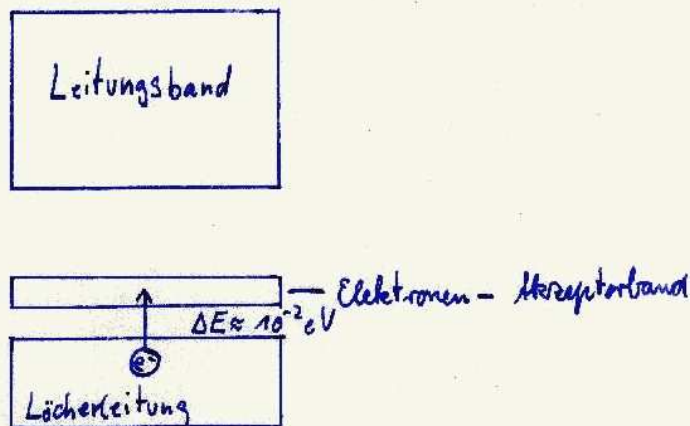
Wird ein Germaniumkristall mit Indiumatomen dotiert, so gehen die drei Valenzelektronen des Indiums mit den Elektronen von den drei benachbarten Germaniumatomen Elektronenpaarbindungen ein. Für das vierte benachbarte Germaniumatom ist kein Elektron zur Paarbildung mehr verfügbar.



Ein Indiumatom als Akzeptor im Germaniumkristall

Skizze 19 /44/

Das Elektronendefizit an der Störstelle wirkt als Elektronenfänger.
 Relativ geringe Anregungsenergien (in der Größenordnung von 10^{-2} eV) reichen aus, um ein Elektron aus einer Nachbarbindung herauszulösen und an die Stelle des Loches zu bewegen. Es findet also eine Wanderung von Löchern statt.
 Die freien Elektronenniveaus der Fremdatome werden als Auffänger- oder Akzeptorniveaus bezeichnet. Sie bilden das sogenannte Elektronen-Akzeptorband. Es liegt etwas oberhalb des Valenzbandes des Hauptkristalls.
 Der Abstand ist von der Größenordnung 10^{-2} eV.
 Hat ein Akzeptor ein Elektron eingefangen, so existiert an dieser Stelle eine praktisch ortsfeste negative Punktladung im Gitterverband. /45/



p-dotierter Halbleiter

Skizze 20 /46/

2.2.4 Der p-Halbleiter

Da die elektrische Leitfähigkeit hier durch positive Ladungsträger (Löcher) gesteigert wird, spricht man von p-Germanium oder allgemein von p-Halbleitern. Diese Art von Leitung bezeichnet man als p-Leitung, Löcherleitung oder Defektleitung. Im p-Halbleiter nennt man die Löcher Majoritätsträger, die Elektronen Minoritätsträger. /47/

2.3 Das Massenwirkungsgesetz

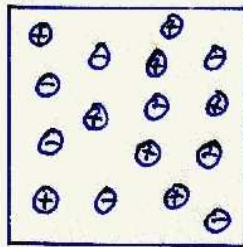
Die Anzahl der Elektronen-Loch-Paare nimmt nur solange zu, bis dieser Prozeß durch den gegenläufigen Prozeß der Rekombination kompensiert wird. Es bildet sich ein dynamisches Gleichgewicht. (Vgl. 2.1.1.5) Elektronenzahldichte n und Löcherzahldichte p hängen ab von Dotierung und Temperatur. Sie können sich um viele Größenordnungen unterscheiden. Das Produkt aus Elektronenzahldichte und Löcherzahldichte hängt nur vom Festkörper und seiner Temperatur ab, nicht von Grad der Dotierung. /48/ Dies ist auf das Massenwirkungsgesetz zurückzuführen. Es lautet in seiner einfachsten Form:

Im Gleichgewichtszustand ist das Produkt der Konzentrationen der je Zeiteinheit miteinander reagierenden Teilchenarten stets konstant. /49/

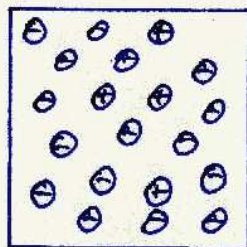
Die Anzahl der Rekombinationen ist proportional der Zahl der Elektronen, da für jedes Elektron die gleiche Wahrscheinlichkeit besteht, mit einem Loch zu rekombinieren. Sie hängt ebenso von der Zahl der vorhandenen Löcher ab. Die Anzahl der Rekombinationen ist sowohl der Anzahl der Elektronen als auch der Löcher proportional, d.h. die Anzahl der Rekombinationen ist dem Produkt $n \cdot p$ proportional. Das Produkt $n \cdot p$ muß konstant bleiben, da sich die Anzahl der Paarbildungen, egal bei welcher Dotierung, nicht ändert und somit auch die Anzahl der Rekombinationen konstant bleibt.

Beispiel:

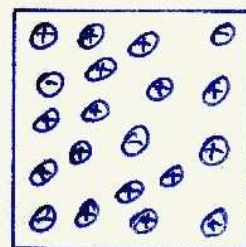
Für einen Germaniumkristall bei Raumtemperatur ist das Produkt $n \cdot p = 3 \cdot 10^{26} \text{ cm}^{-6}$. Ist der Kristall n-dotiert und die Elektronenzahldichte beträgt $n = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, so beträgt die Löcherzahldichte $p = 3 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$. /50/



Eigenleitung
($n \cdot p = 8 \cdot 8 = 64$)



n-Leitung
($n \cdot p = 16 \cdot 4 = 64$)



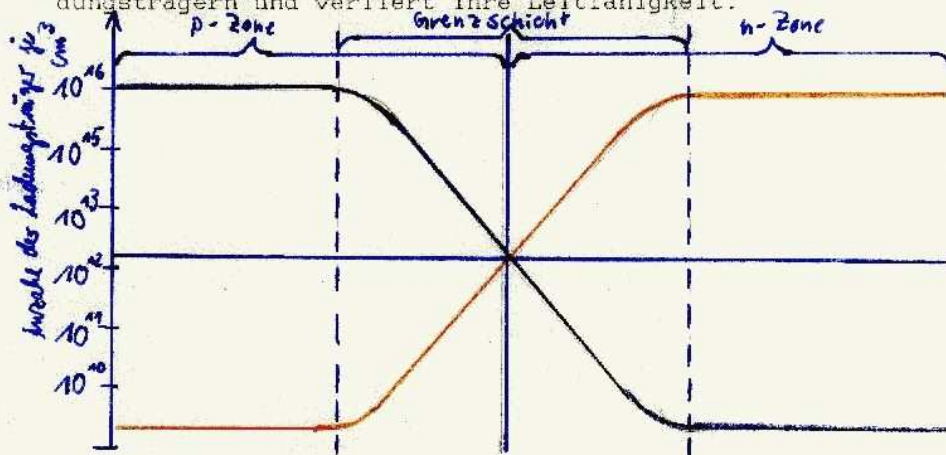
p-Leitung
($n \cdot p = 4 \cdot 16 = 64$)

Skizze 21 /51/

2.4 Der pn-Übergang

Wird ein p-Halbleiter mit einem n-Halbleiter so zusammengefügt, daß die Kristallstruktur an der Grenzfläche nicht unterbrochen ist, entsteht ein sogenannter *pn-Übergang*. Infolge der Wärmebewegung diffundieren Elektronen aus dem n-leitenden Kristallbereich, der n-Zone, wo eine hohe Konzentration freier negativer Ladungsträger besteht, in die p-Zone. Umgekehrt diffundieren Löcher aus der p-Zone in die n-Zone.

In der Grenzschicht rekombinieren freie Elektronen und Löcher. Die Grenzschicht verarmt an frei beweglichen Ladungsträgern und verliert ihre Leitfähigkeit.



Verlauf der Ladungsträgerkonzentrationen im pn-Übergang

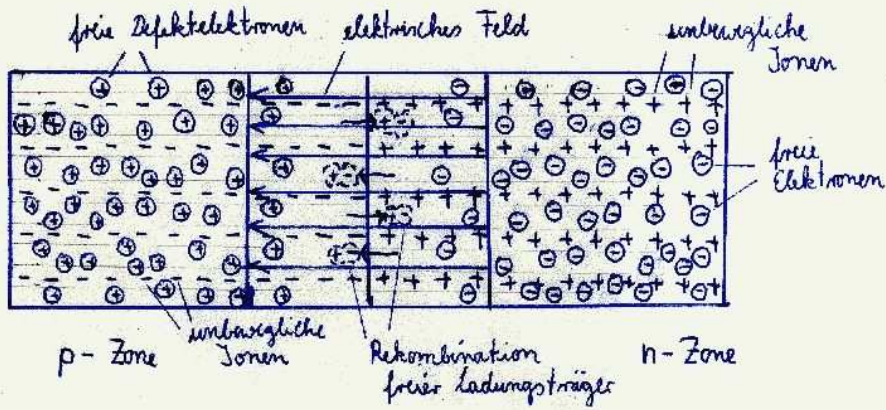
Skizze 22 /52/

Beim Abwandern von negativen Ladungsträgern aus der n-Zone bleiben unbewegliche positive Ladungen zurück. Umgekehrt bleiben in der p-Zone durch das Abwandern positiver Ladungsträger unbewegliche negative Ladungsträger zurück. Je mehr freie Ladungsträger in die jeweils andere Zone diffundieren, umso stärker wird das von den zurückbleibenden Ionen gebildete Feld.

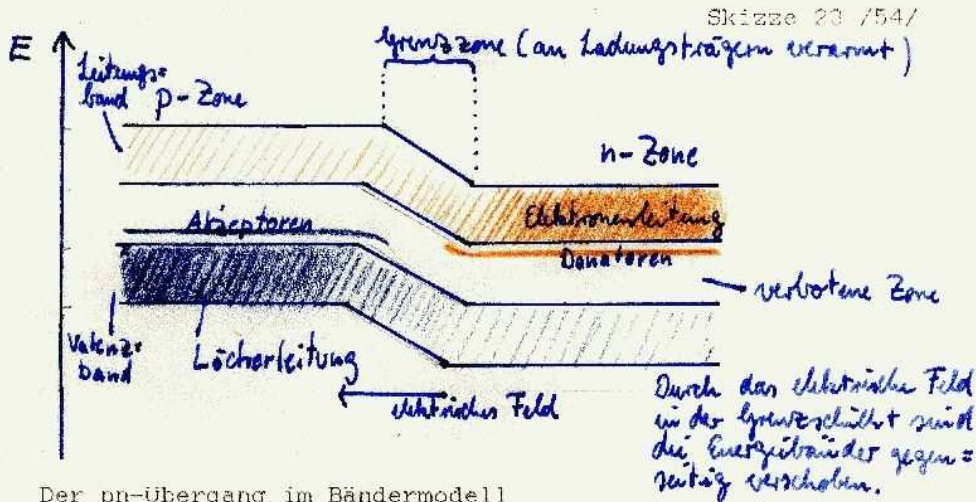
Es entsteht eine Spannung, die so lange anwächst, bis sie den Diffusionsstrom im Mittel auf Null reduziert hat, also die Diffusion freier Ladungsträger zum Stillstand gebracht hat.

Es bildet sich ein dynamisches Gleichgewicht aus.

Die Dichte der Grenzschicht beträgt etwa 10^{-6} m. /53/



Diffusion und Rekombination der freien Elektronen in der Grenzschicht und das elektrische Feld in der Grenzschicht



Der pn-Übergang im Bändermodell

Skizze 24 /55/

2.5 Die Halbleiterdiode

Der pn-Übergang hat Ventileigenschaften. Dieser Effekt wird bei der Halbleiterdiode angewandt.

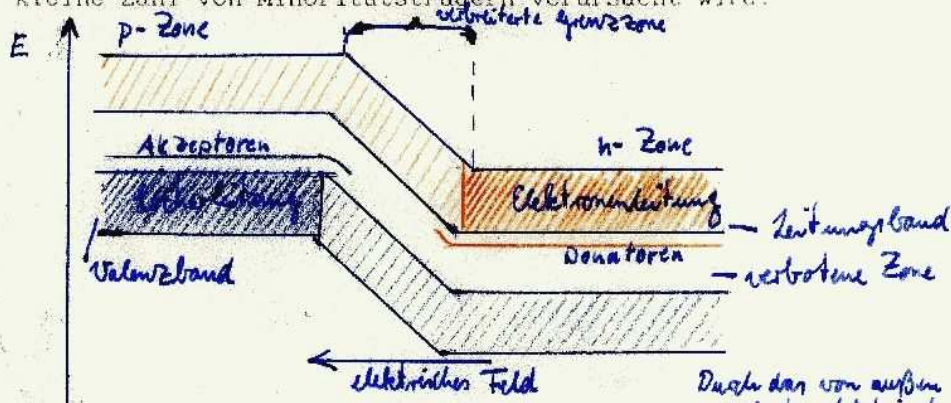


Schallsymbol der Halbleiterdiode

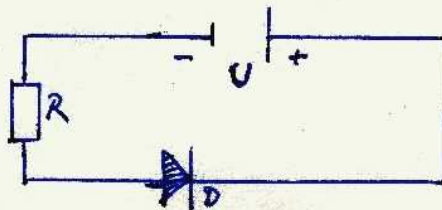
Skizze 25 /56/

Man unterscheidet zwei Fälle:

- 1) Der positive Pol einer angelegten Spannungsquelle liegt an der n-Zone und der negative Pol liegt an der p-Zone. Das äußere elektrische Feld hat dieselbe Richtung wie das Feld, das durch die Ionen in der Grenzschicht entsteht. Es wird somit verstärkt. Da die frei beweglichen Löcher der p-Zone vom negativen Pol und die frei beweglichen Elektronen in der n-Zone vom positiven Pol der Spannungsquelle angezogen werden, tritt eine weitere Verarmung an beweglichen Ladungsträgern in der Umgebung des pn-Übergangs auf. Es tritt eine Verbreiterung der der Grenzschicht ein. Der Widerstand des pn-Übergangs erhöht sich um ein Vielfaches. Man bezeichnet die Grenzschicht als Sperrschicht. Die Diode isoliert praktisch. Es fließt allerdings ein geringer Sperrstrom, der durch die kleine Zahl von Minoritätsträgern verursacht wird.



Durch das von außen angelegte elektrische Feld werden die Energiebänder noch weiter gegenseitig verschoben.

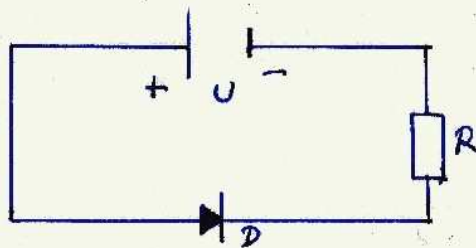
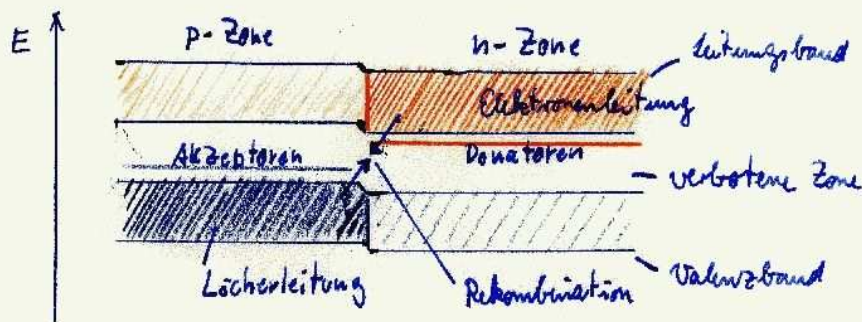


Eine in Sperrichtung geschaltete Diode

Skizze 26 /57/

2) Der positive Pol einer angelegten Spannungsquelle liegt an der p-Zone und der negative Pol liegt an der n-Zone. Das durch die Spannungsquelle erzeugte Feld ist dem Feld in der Grenzschicht entgegengesetzt und hebt es auf. Die frei beweglichen Löcher und Elektronen werden zur Grenzfläche hingedrängt. Die Grenzschicht wird abgebaut. An der Grenze zwischen n-Zone und p-Zone treffen ständig Elektronen und Löcher aufeinander und rekombinieren. Die verschwindenden Elektronen und Löcher werden durch die Spannungsquelle nachgeliefert. Der n-Zone fließen neue Elektronen zu, während aus der p-Zone unter Zurücklassung neuer Löcher Elektronen abfließen. Es fließt ein elektrischer Strom, dessen Stärke mit wachsender Spannung steigt. /58/

Auf die gleiche Art kommt bei einer auf Sperrrichtung geschalteten Diode der Sperrstrom durch die Minoritätsträger zustande.



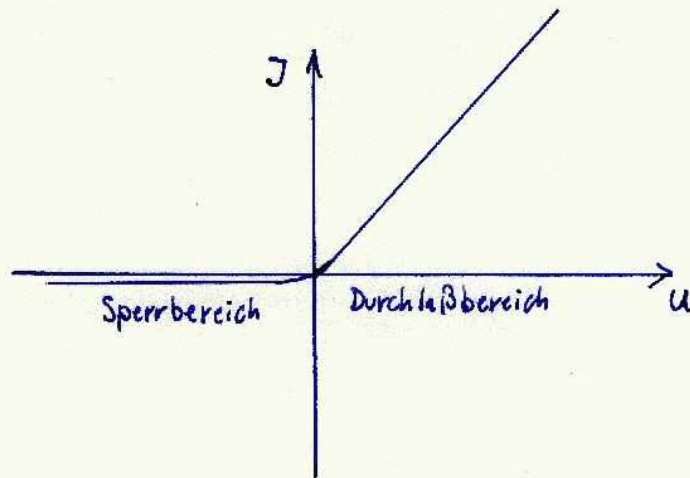
Das von außen angelegte elektrische Feld im pn-Übergang hebt das Feld im pn-Übergang auf und die Grenzschicht verschwindet.

Eine in Durchlaßrichtung geschaltete Diode

Skizze 27 /59/

2.6 Kennlinien

Kennlinien beschreiben die Betriebseigenschaften eines Halbleiters. /60/



Strom-Spannungs-Kennlinie einer Germaniumdiode
(Zenerdurchbruch nicht berücksichtigt)

Skizze 38 /61/

3 Der Transistor

3.1 Aufbau des Transistors

Ein Transistor besteht aus einem Halbleiterkristall mit drei scharf gegeneinander abgegrenzten Schichten, die p- bzw. n-dotiert sind.

Es existieren also zwei pn-Übergänge.

Zwei Möglichkeiten bestehen im Aufbau: npn-Transistor und pnp-Transistor.

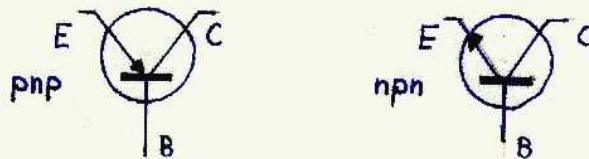
Der pnp-Transistor besteht aus zwei p-dotierten Zonen, die durch eine sehr dünne n-dotierte Zone getrennt sind.

Entsprechendes gilt für den npn-Transistor.

Für beide Arten gelten die gleichen physikalischen Zusammenhänge. Sie sind komplementär. Ihr einziger Unterschied besteht darin, daß die Wirkung des pnp-Transistors durch einen Löcherstrom, die des npn-Transistors durch einen Elektronenstrom zustande kommt. /62/

Die äußeren Zonen des Transistors heißen Emitter (E) und Kollektor (C), die mittlere Schicht heißt Basis. Sie ist außerordentlich dünn und ist am schwächsten dotiert.

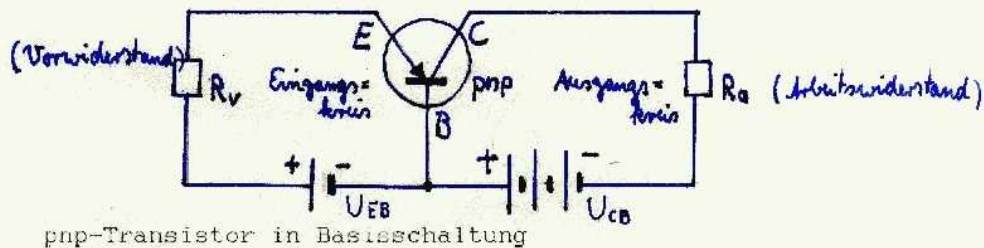
Der Kollektor hat eine starke Dotierung und der Emitter hat die höchste Dotierung. /63/



Schaltsymbol eines npn- und eines pnp-Transistors

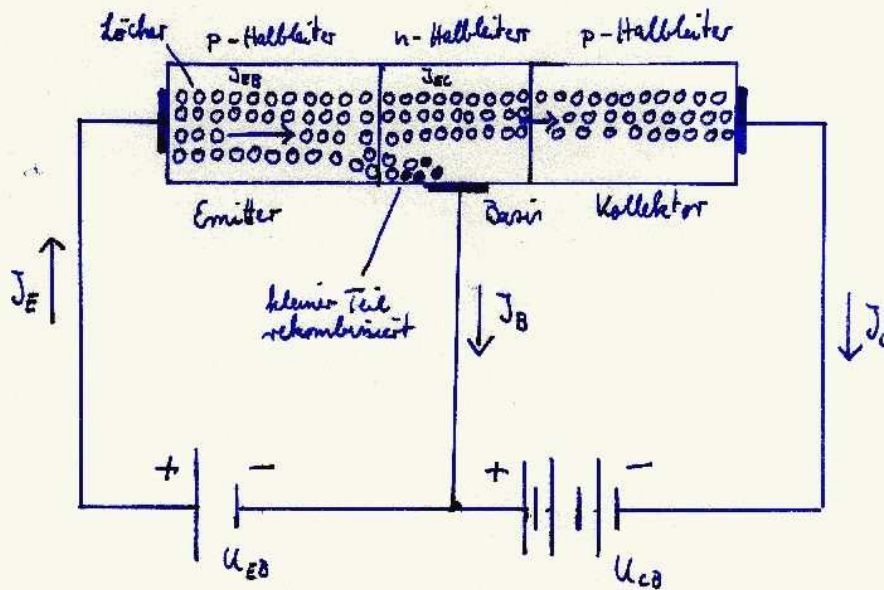
Skizze 29 /64/

3.2 Die Wirkweise des Transistors am Beispiel der Basisschaltung



pnp-Transistor in Basisschaltung

Skizze 30 /65/



Schematische Darstellung eines pnp-Transistoren in Basisschaltung

Skizze 31 /66/

Durch U_{EB} wird der Emitter-Basis-Übergang in Durchlaßrichtung vorgespannt. Durch U_{CB} wird der Kollektor-Basis-Übergang in Sperrichtung vorgespannt.

Da die Basis sehr schmal ist, diffundieren ca. 95 % der Löcher vom Emitter durch die Basis über den Kollektor Basis-Übergang in den Kollektor. Nur ein kleiner Teil der Löcher rekombiniert mit den Elektronen in der Basis.

Da die Spannungsquellen hintereinandergeschaltet sind, liegt zwischen Emitter und Kollektor die Spannung

$$U_{EC} = U_{EB} + U_{CB}$$

Die Löcher im Emitter werden durch das von der Spannung U_{EC} aufgebaute Feld in Richtung Kollektor beschleunigt.

Durch den ständigen Elektronenabfluß in Richtung der Spannungsquelle U_{EB} , werden im Emitter ständig neue Löcher gebildet. Der vom Emitter zum positiven Pol der Spannungsquelle fließende Elektronenstrom heißt Emitterstrom I_E .

In der Basis rekombiniert ein kleiner Teil der Löcher mit den Elektronen in der Basis. Von der Spannungsquelle U_{EB} werden ständig neue Elektronen nachgeliefert. Dieser in die Basis eintretende Elektronenstrom heißt Basisstrom I_B .

Die 95 % der Löcher, die in den Kollektor wandern, rekombinieren dort mit Elektronen, die aus der Spannungsquelle U_{CB} geliefert werden. Dieser in den Kollektor fließende Strom heißt Kollektorstrom I_C .

Die Schaltung heißt Basisschaltung, weil die Basis die gemeinsame Elektrode für Eingangs- und Ausgangstromkreis darstellt.

Bei der Emitter- und der Kollektorschaltung spielen sich die Vorgänge in ähnlicher Weise ab. /67/

3.3 Leistungsverstärkung bei der Basisschaltung

In der Basisschaltung kann der Kollektorstrom I_c durch den Emitterstrom I_E gesteuert werden. Eine Änderung der Stromstärke im Eingangskreis bedeutet eine Stromstärkeänderung im Ausgangskreis. In der Basisschaltung sind I_E und I_c fast gleich groß, da nur ein geringer Teil des Emitterstromes als Basisstrom I_B über die Basis abfließt.

Es liegt also keine Stromverstärkung vor.

Es ist jedoch eine Leistungsverstärkung möglich, da die Sperrspannung U_{CB} viel größer als die Spannung U_{BE} gewählt werden kann.

Die Ausgangsleistung $U_{CB} \cdot I_c$ kann wesentlich größer als die Eingangsleistung $U_{BE} \cdot I_E$.

3.4 Stromverstärkung bei der Emitterschaltung

In der Emitterschaltung wird der Kollektorstrom I_c durch den kleinen Basisstrom $I_B = I_E - I_c$ gesteuert.

In diesem Fall wirkt der Transistor als Stromverstärker.

/68/

3 Schlußwort

Der Transistor hat als ein der Halbleiterphysik entsprungenes Verstärkerelement in wenigen Jahren die Elektronik revolutioniert. 1956 erhielten die Erfinder Bardeen, Brattain und Shockley den gemeinsamen Nobelpreis für ihre Entdeckung.

Die Vorteile des Halbleiterbauelementes liegen auf der Hand: der Transistor ist klein, das bedeutet nicht nur Platzersparnis, sondern auch einen niedrigen Energieverbrauch. Aber auch ultraschnelle Schaltungen wurden so erst möglich.

Sie sind billig, zuverlässig und langlebig. /69/

4 Literaturverzeichnis

- 1) Vgl. hierzu O. Höfling, Mehr wissen über Physik, S. 38, Bändermodell
- 2) Vgl. hierzu J. Grehn, Metzler Physik, S. 399;
H. Breuer, dtv-Atlas zur Physik, Band 2, S. 337, Energiebänder und Bandlücken;
H. Lindner, Streifzug durch die moderne Physik, S. 163, Das Bändermodell
- 3) Vgl. hierzu J. Grehn, Metzler Physik, S. 441, Abb. 11-30
- 4) Vgl. hierzu J. Grehn, Metzler Physik, S. 439, Versuch 11/10
- 5) Vgl. hierzu H. Lindner, Streifzug durch die moderne Physik, S. 163, Das Bändermodell
- 6) Vgl. hierzu J. Grehn, Metzler Physik, S. 440, Abb. 11-27a
- 7) Vgl. hierzu J. Grehn, Metzler Physik, S. 440, Abb. 11-27b
- 8) Vgl. hierzu Brockhaus Naturwissenschaften und Technik, Band 1, S.109, Bändermodell;
H. Lindner, Streifzug durch die moderne Physik, S. 163, Das Bändermodell
- 9) W. Finklenburg, Einführung in die Atomphysik, S. 445
- 10) H. Breuer, dtv-Atlas zur Physik, Band 2, S. 337, Energiebänder und Bandlücken;
J. Grehn, Metzler Physik, S. 441
- 11) Vgl. hierzu W. Finklenburg, Einführung in die Atomphysik, S. 446, Abb. 244
- 12) Vgl. hierzu J. Grehn, Metzler Physik, S.441, Abb. 11-31;
W. Finklenburg, Einführung in die Atomphysik, S. 445, Abb. 243;
E. Lüscher, H. Jodl, Physik - Einmal anders Moderne Aspekte einer Wissenschaft, Band 1, S. 269, Abb. 220
- 13) Vgl. hierzu J. Grehn, Metzler Physik, S. 441, Das Bändermodell und die Leitfähigkeit
H. Lindner, Streifzug durch die moderne Physik, S. 164, Isolatoren und elektrische Leiter
- 14) Vgl. hierzu Brockhaus Naturwissenschaften und Technik, Band 1, S. 109, Bändermodell;
H. Lindner, Streifzug durch die moderne Physik, S. 164, Isolatoren und elektrische Leiter;
J. Grehn, Metzler Physik, S.442, Isolatoren
- 15) Vgl. hierzu J. Grehn, Metzler Physik, S. 442, Abb. 11-33d
- 16) Vgl. hierzu Brockhaus Naturwissenschaften und Technik, Band 1, S. 109, Bändermodell;
J. Grehn, Metzler Physik, S. 441, Leiter;
- 17) Vgl. hierzu J. Grehn, Metzler Physik, S. 442, Abb. 11-33a
- 18) Vgl. hierzu Brockhaus Naturwissenschaften und Technik, Band 1, S. 109, Bändermodell;
H. Lindner, Streifzug durch die moderne Physik, S. 164, Isolatoren und elektrische Leiter
- 19) Vgl. hierzu J. Grehn, Metzler Physik, S. 442.

- Abb. 11-33b
- 20) Vgl. hierzu H. Lindner, Streifzug durch die moderne Physik, S. 177, Der reine Halbleiter;
 - 21) Vgl. H. Lindner, Streifzug durch die moderne Physik, S. 177, Bild 79/2
 - 22) Vgl. W. Finklenburg, Einführung in die Atomphysik, S. 483, Halbleitertypen und ihre Ladungsträger
 - 23) Vgl. H. Breuer, dtv-Atlas zur Physik, Band 2, S. 337, Besetzung der Energiebänder; Schüler-Duden, Die Physik, S. 167, Halbleiter; B.M. Jaworski, A. A. Detlaf, Physik Griffbereit, S. 383, Die Eigenleitfähigkeit von Halbleitern
 - 24) Vgl. J. Grehn, Metzler Physik, S. 443, Die Eigenleitung von Halbleitern
 - 25) Vgl. J. Grehn, Metzler Physik, S. 445, Abb. 11-39
 - 26) Vgl. F. Voit, Physik, Lehr- und Arbeitsbuch für die Sekundarstufe II, S. 222, Halbleiter, Die Grundlagen
 - 27) Vgl. H. Lindner, Streifzug durch die moderne Physik, S. 176, Bild 79/1; O. Höfling, Physik, Lehrbuch für Unterricht und Selbststudium, S. 602, Abb. 602.2
 - 28) Vgl. F. Voit, Physik, Lehr- und Arbeitsbuch für die Sekundarstufe II, S. 223, Halbleiter, Die Grundlagen; B. M. Jaworski, A. A. Detlaf, Physik Griffbereit, S. 383, Die Eigenleitfähigkeit von Halbleitern; O. Höfling, Mehr Wissen über Physik, S. 188, Halbleiter
 - 29) Vgl. O. Höfling, Physik, Lehrbuch für Unterricht und Selbststudium, S. 602, Elektronen- und Löcherleitung
 - 30) Vgl. J. Grehn, Metzler Physik, S.445, Die Eigenleitung von Halbleitern
 - 31) Vgl. B. M. Jaworski, A. A. Detlaf, Physik Griffbereit, S. 384, Die Eigenleitfähigkeit von Halbleitern;
 - 32) O. Höfling, Physik, Lehrbuch für Unterricht und Selbststudium, S. 602, Elektronen- und Löcherleitung;
 - 33) Vgl. J. Grehn, Metzler Physik, S. 444, Abb. 11-37
 - 34) Vgl. J. Grehn, Metzler Physik, S. 444, Abb. 11-37
 - 35) Vgl. O. Höfling, Mehr wissen über Physik, S. 190, Halbleiter; O. Höfling, Physik, Lehrbuch für Unterricht und Selbststudium, S. 605
 - 36) Vgl. O. Höfling, Mehr wissen über Physik, S. 188, Halbleiter;
 - 37) Vgl. H. Breuer, dtv-Atlas zur Physik, S. 340, Erzeugung, Rekombination eines Elektronen-Loch-Paares
 - 38) Vgl. O. Höfling, Mehr wissen über Physik, S. 189; F. Voit, Physik, Lehr- und Arbeitsbuch für die Sekundarstufe II, S. 223; H. Breuer, dtv-Atlas zur Physik, S. 341, Reine elektronische Halbleiter
 - 39) Vgl. B. M. Jaworski, A. A. Detlaf, Physik Griffbereit, S. 384, Die Fremdleitfähigkeit von Halbleitern; H. Breuer, dtv-Atlas zur Physik, S. 343, Dotieren; O. Höfling, Mehr wissen über Physik, S. 190
 - 40) Vgl. O. Höfling, Physik, Lehrbuch für Unterricht und Selbststudium, S. 603, Abb. 603.2
 - 41) Vgl. O. Höfling, Mehr wissen über Physik, S. 189; H. Breuer, dtv-Atlas zur Physik, S. 343; B. M. Jaworski, A. A. Detlaf, Physik Griffbereit, S. 385;

- 42) Vgl. H. Breuer, dtv-Atlas zur Physik, S. 342, reine und gestörte elektronische Halbleiter
- 43) Vgl. O. Höfling, Mehr wissen über Physik, S. 190; Brockhaus Naturwissenschaften und Technik, Band 2, S. 244, Halbleiter;
- 44) Vgl. O. Höfling, Mehr wissen über Physik, S. 604, Abb. 604.1
- 45) Vgl. O. Höfling, Mehr wissen über Physik, S. 189; B. M. Jaworski, A. A. Detlaf, Physik Griffbereit, S. 385
- 46) Vgl. H. Breuer, dtv-Atlas zur Physik, S. 342
- 47) Vgl. O. Höfling, Mehr wissen über Physik, S. 190
- 48) Vgl. H. Lindner, Streifzug durch die moderne Physik, S. 179, Dotierte Halbleiter
- 49) Vgl. H. Lindner, Streifzug durch die moderne Physik, S. 180
- 50) Vgl. H. Lindner, Streifzug durch die moderne Physik, S. 180
- 51) Vgl. H. Lindner, Streifzug durch die moderne Physik, S. 180, Bild 80/2
- 52) Vgl. H. Lindner, Streifzug durch die moderne Physik, S. 182, Bild 81/3
- 53) Vgl. O. Höfling, Mehr wissen über Physik, S. 190, Halbleiterdiode
O. Höfling, Physik, Lehrbuch für Unterricht und Selbststudium, S. 605, Die Grenzschicht
W. Jung, Das Abiturwissen Physik, S. 147, pn-Übergang
H. Lindner, Streifzug durch die moderne Physik, S. 182, Halbleitergleichrichter
- 54) Vgl. J. Grehn, Metzler Physik, S. 448, Abb. 11-46b
- 55) Vgl. Harder Lexikon der Physik, S. 91; W. Finklenburg, Einführung in die Atomphysik, S. 497, Abb. 273
- 56) Vgl. O. Höfling, Physik, Lehrbuch für Unterricht und Selbststudium, S. 607, Abb. 602.1
- 57) Vgl. J. Grehn, Metzler Physik, S. 449, Abb. 11-47a
- 58) Vgl. W. Jung, das Abiturwissen Physik, S. 147; O. Höfling, Mehr wissen über Physik, S. 192
- 59) Vgl. Grehn, Metzler Physik, S. 449, Abb. 11-47b
- 60) Vgl. H. Breuer, dtv-Atlas zur Physik, S. 317, Kennlinien
- 61) Vgl. O. Höfling, Physik, Lehrbuch für Unterricht und Selbststudium, S. 607, Abb. 607.2
- 62) Vgl. O. Höfling, Physik, Lehrbuch für Unterricht und Selbststudium, S. 608
- 63) Vgl. dtv-Lexikon der Physik, Band 9, S.155
- 64) Vgl. dtv-Atlas zur Physik, Band 2, S. 318
- 65) Vgl. O. Höfling, Mehr wissen über Physik, S. 491; W. Jung, Das Abiturwissen, Physik, S. 149
- 66) Vgl. O. Höfling, Mehr wissen über Physik, S. 491
- 67) Vgl. O. Höfling, Mehr wissen über Physik, S. 491
- 68) Vgl. O. Höfling, Lehrbuch für Unterricht und Selbststudium, S. 609
- 69) Vgl. dtv-Lexikon der Physik, Band 9, S. 154; dtv-Atlas zur Physik, Band 2, S. 319 / S. 317