Halbleitertechnik

Wie man sich vom Namen schon vorstellen kann, liegen Halbleiter in ihren elektrischen Eigenschaften irgendwo zwischen Leitern und Nichtleitern (Isolatoren). Zwei der meist bekannten Halbleiterbauelemente sind die **Diode** und der **Transistor**. Auch diese Halbleiterbauelemente fallen unter die Bezeichnung Solid-State- Bauelemente. Diese Solid-State-Bauelemente sind nichts anderes als elektronische Bauelemente, deren Funktion auf die Elektronenbewegung in Halbleiterkristallen beruht.

Um zu verstehen, wie diese Halbleiterbauelemente funktionieren, müssen die Struktur und der Aufbau von den Halbleiterkristallen betrachtet werden. Die Kenntnis des Aufbaus von Atomen ist ebenfalls eine Grundvoraussetzung, um die Funktion von Solid-State- Bauelementen zu verstehen, die mehr und mehr als Module im modernen Radargeräten eingesetzt werden.

In der Ausbildung zum Radarmechanikermeister werden diese Themen vorausgesetzt und sind hier nur als Wiederholung des schulischen Physikunterrichts genannt.

Inhaltsverzeichnis:

Halbleitertechnik....1
Atomaufbau....2
Bändermodell....3
Atombindung....4
Vorgang der elektrischen Leitung....5
Dotierung....5
n- Leiter....5
p- Leiter....6
PN- Übergang (Dioden)....7
Raumladungszone....7
Durchlasspolung....8
Sperrpolung....8
Mechanischer Aufbau....9
Diodenanwendungen....10
Netzspannungsgleichrichter....10
Diodenschalter....11
Z- Dioden....11
Tunneldiode....13
Kapazitätsdiode....14
pin-Dioden....16
Gunn-Diode....17
Transistoren....17
Bipolare Transistoren....18
Unterteilung....18
Aufbau eines Transistors....18
Der npn- Transistor....19
Der pnp- Transistor....21
Junction- Feldeffekttransistoren....23
MOSFET....25

Atomaufbau

Ein Atom ist hauptsächlich aus Elektronen, Protonen und Neutronen aufgebaut. Die Elektronen, Protonen und Neutronen des eines Elementes sind identisch mit denen eines anderen Elementes. Der Unterschied zwischen den verschiedenen Elementen besteht nur in der unterschiedlichen Anzahl und der Anordnung von den Elektronen und Protonen.

Das Elektron hat eine kleine negative elektrische Ladung. Das Proton hat eine positive Ladung welche genauso groß wie die des Elektrons, aber von entgegengesetzter Polarität ist. Obwohl das Proton die gleiche Ladungsmenge wie das Elektron hat, beträgt seine Masse aber etwa das 1827-fache der Masse des Elektrons. In den meisten Atomen existieren auch noch elektrisch neutrale Bausteine, welche Neutronen genannt werden und deren Masse etwa der des Protons entspricht. Sie haben nur keinerlei elektrische Ladung.

Gemäß dem ***Bohrschen* Atom-Modell** sind diese Elektronen, Protonen und Neutronen so angeordnet, dass sie einem Sonnensystem in Miniaturform ähneln. Betrachten Sie das Heliumatom in dem Bild 1. Zwei Protonen und zwei Neutronen bilden einen harten Atomkern mit der positiven elektrischen Ladung beider Protonen, um den zwei sehr leichte negative Elektronen kreisen. Die Umlaufbahn dieser Elektronen ist aber nicht so genau bestimmt, wie das Bild erscheinen lässt. Sie befinden sich nur immer in einem bestimmten Abstand, **Orbitale** genannt, zu dem Atomkern und müssen sich mit genau der Geschwindigkeit bewegen, die eine Fliehkraft („Zentrifugalkraft”) erzeugt, welche die Anziehungskraft der Protonen („Zentripetalkraft”) kompensiert. Genau wie ein Raumschiff Energie benötigt, um auf eine andere Umlaufbahn zu gelangen, benötigt auch das Elektron zusätzliche Energie, um auf eine vom Atomkern entferntere Umlaufbahn zu kommen. Das Elektron muss also eine bestimmte kinetische Energie haben, um sich auf einer bestimmten Umlaufbahn um den Atomkern herum zu bewegen. Diese Energie wird **Energieniveau des Elektrons** genannt. Ein Elektron, welches sich von einer weiter entfernten Umlaufbahn auf eine dichter an dem Atomkern befindliche Umlaufbahn bewegt, muss also Energie abgeben. Umgekehrt dagegen muss das Elektron Energie aufnehmen, um sich vom Atomkern zu entfernen.

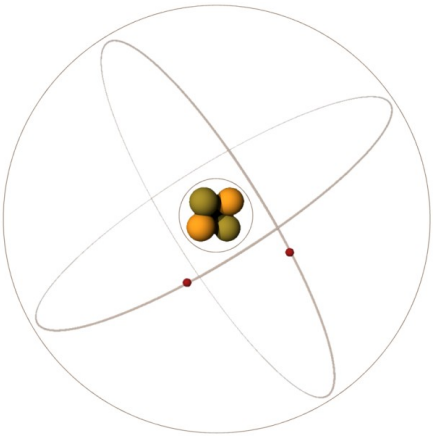

Bild 1. - Der Aufbau eines Heliumatomes gemäß *Bohrschem* Atommodell

Die den Atomkern umkreisenden Elektronen haben aber keinen zufälligen Abstand zum Atomkern, sondern dieser Abstand wird durch definierte Energieniveaus bestimmt. Vorstellen kann man sich diese verschiedenen Energieniveaus durch ineinander verschachtelte verschieden große Schalen um den Atomkern herum. Diese Schalen und die mögliche Anzahl von Elektronen in jeder dieser Schalen wird durch das *Pauli*- Prinzip bestimmt. Nach diesem Prinzip ergeben sich für die Energieniveaus folgende Besetzungszahlen für die Elektronenschalen:

Allgemein kann die Schale mit der Hauptquantenzahl n mit $2 \cdot n^2$ Elektronen besetzt werden. Zum Beispiel die 2. Schale, die L-Schale ist mit $2 \cdot 2^2$ also 8 Elektronen vollständig gefüllt. Mit Hilfe des ***Bohrschen* Atom-Modells** lässt sich das Periodensystem der Elemente, das man vorher lediglich als formales Ordnungssystem angesehen hatte, auch physikalisch erklären.

Bändermodell

Die in einer Atomhülle angeordneten Elektronen haben alle ein bestimmtes Energieniveau. Je weiter ein Elektron vom Atomkern entfernt ist, desto größer ist sein Energieniveau. Ein Elektron kann Energie in Form von elektrischen Feldern, durch Wärme oder durch Licht aufnehmen. Ist das Energieniveau des Elektrons so groß, dass die positive Ladung des Atomkerns dieses nicht mehr in einem Orbital festhalten kann, dann verlässt es das Atom und wird zu einem freien Leitungselektron. Diese Leitungselektronen haben also sehr viel mehr Energie als die Bindungselektronen (die sogenannten **Valenzelektronen**).

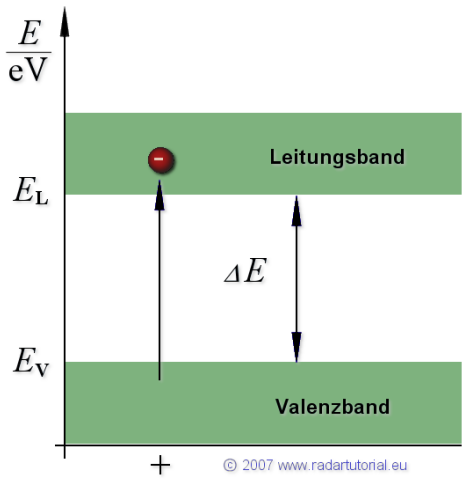

Bild 3. - Bändermodell eines Halbleiters (Eigenleitung)

Man kann die elektrischen Leitungsvorgänge übersichtlich darstellen, indem man die verschiedenen möglichen Energiezustände von Elektronen in einem Energieschema darstellt. Die Valenzelektronen werden energetisch im Valenzband, die Leitungselektronen im Leitungsband zusammengefasst. Die Energiedifferenz heißt Bandabstand.

Auf Grund der Existenz einer Mindestenergie, die zur Freisetzung von Valenzelektronen erforderlich ist, kann der Energiebereich ***E*** mit $E_V < E < E_L$ für bewegliche Ladungsträger, die aus einem regulären Gitter stammen, nicht eingenommen werden. Dieser Energiebereich heißt „verbotene Zone”. Die Beschreibung elektrischer Leitungsvorgänge mit Hilfe des Energieschemas von Leitungsband und Valenzband wird als **Bändermodell** bezeichnet.

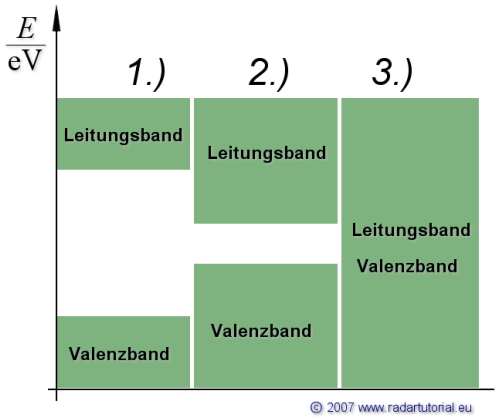

Bild 4. - Bändermodell von 1. Isolator, 2. Halbleiter und 3. Leiter

Die Energiedifferenz ***ΔE*** die das Valenzband vom Leitungsband trennt, ist eine wichtige Größe, mit Hilfe derer Isolatoren, Halbleiter und elektrische Leiter charakterisiert werden können. Die unterschiedliche Größe der verbotenen Zone wird für 1. Isolatoren, 2. Halbleiter und 3. elektrische Leiter im Bild 4 gezeigt.

Isolatoren haben einen sehr großen Bandabstand. Je größer der Bandabstand, desto mehr Energie ist notwendig, damit ein Valenzelektron ein freies Leitungselektron werden kann. Das heißt, je mehr Energie für auch sehr kleine Ströme benötigt wird, desto besser isoliert also der Isolator. Die verbotene Zone ist also sehr groß.

Bei einem Halbleiter ist diese verbotene Zone schon etwas schmaler. Schon die Zuführung von etwas mehr Wärmeenergie ermöglicht doch einen Stromfluss. Bei dem Halbleiter Germanium genügen z.B. schon etwa 50° Celsius, um einen merklichen Stromfluss zu ermöglichen.

Das letzte Diagramm zeigt, dass das Valenzband eines Leiters in das Leitungsband übergeht. Es ist praktisch keine verbotene Zone vorhanden. Nur wenig Energiezufuhr kann Valenzelektronen in freie Leitungselektronen umwandeln. Deshalb sind diese Elemente gute elektrische Leiter.

Atombindung

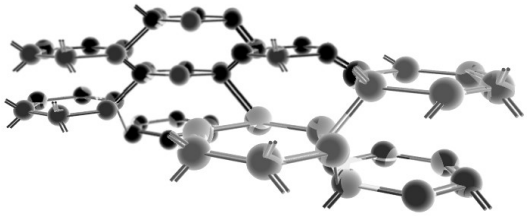

Bild 5. - eine Kristallstruktur.

Die chemische Aktivität eines jeden Atoms wird durch die Anzahl der Elektronen in der äußeren Schale bestimmt. Ist diese Schale voll belegt, dann ist das Atom sehr stabil und zeigt nur geringe Tendenzen sich mit anderen Atomen zu Kristallen zu verbinden. Atome, bei denen die äußere Schale mit acht Elektronen besetzt ist (Periodensystem der Elemente Hauptgruppe VIII = Edelgase) sind chemisch passiv. Wenn aber in dieser äußeren Schale weniger als acht Elektronen sind, dann steigt die chemische Aktivität des Atoms. Einige Atome bilden **Kristalle** mit für das Element typischen Strukturen. Kristall ist eine Bezeichnung eines homogenen Körpers, der aus einer dreidimensional und periodisch angeordneten Struktureinheit (das sogenannte Kristallgitter) aus Atomen oder Molekülen des gleichen Stoffes oder Elementes besteht. Bild 5 zeigt eine typische Kristallstruktur in welchem die Atome durch kleine Kugeln dargestellt sind. Die Stäbe zwischen den Kugeln symbolisieren die Bindung zwischen den Atomen.

Silizium und Germanium sind in der Elektronik die meist genutzten Halbleiterelemente. Beide Elemente sind sich in ihrem Atomaufbau und ihrer chemischen Affinität sehr ähnlich und haben in der äußeren Schale vier Valenzelektronen. Germanium-Atome (Ge- Atom) ordnen sich in einem Kristallgitter so an, dass sich um jedes Atom vier andere Ge- Atome gruppieren. Dabei bilden jeweils ein Bindungselektron eines Atoms mit einem Bindungselektron des Nachbaratoms ein *Elektronenpaar*. Diese Elektronenpaare bewirken eine feste Bindung zwischen den Ge- Atomen. (Siehe Bild 6: Eigentlich müsste die regelmäßige Anordnung der Ge- Atome räumlich gezeichnet werden. Da es bei der Darstellung der Bindung nur auf die Nachbarschaftsverhältnisse ankommt, genügt ein zweidimensionales Bild!) In dem Kristall werden also die Bindungselektronen gemeinsam genutzt, um die äußere Schale der Atome mit acht Elektronen zu füllen.

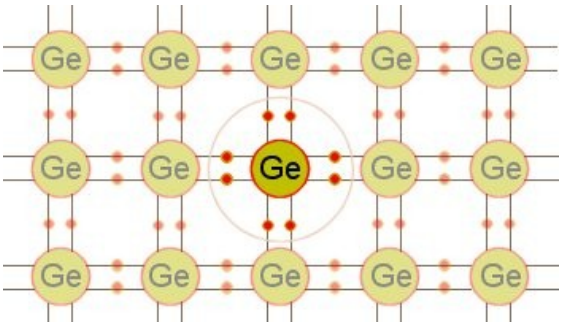

Bild 6: eine zweidimensionale Darstellung eines Germaniumkristalls.

Bild 6 zeigt einen Germaniumkristall in einem Grundzustand, dem keine Wärmeenergie zugeführt wurde. Es werden die Ge-Atome durch große Kreise dargestellt, die kleinen Kreise symbolisieren die Bindungselektronen. Da jedes Atom in diesem Kristall an vier andere Atome gebunden ist, sind keine freien Ladungsträger vorhanden. In diesem Zustand ist das Germanium also ein Isolator. Erst wenn eine bestimmte Mindestenergie (in Form von Wärme: bei reinem Germanium ist das etwa 50°C) zugeführt wird, dann werden einige Bindungselektronen aus dem Gitterverband befreit und stehen dann als Leitungselektronen zur Verfügung, die vorerst noch ziellos in dem Kristall umherwandern.

Vorgang der elektrischen Leitung

Im realen Germanium-Kristall können die Bindungselektronen dann ihre festen Plätze verlassen, wenn ihnen eine bestimmte Mindestenergie *ΔE* (z.B. Wärme: bei Germanium ab etwa 50°C) zugeführt worden ist. Sie stehen dann als freie Elektronen für den Ladungstransport zur Verfügung. Das freigewordene Elektron hinterlässt eine Elektronenlücke, die man einfach als *Loch* bezeichnet. Ein Loch stellt eine positive Elementarladung im Kristallgitter dar, da jetzt die positive Kernladung des Germaniumatoms überwiegt.

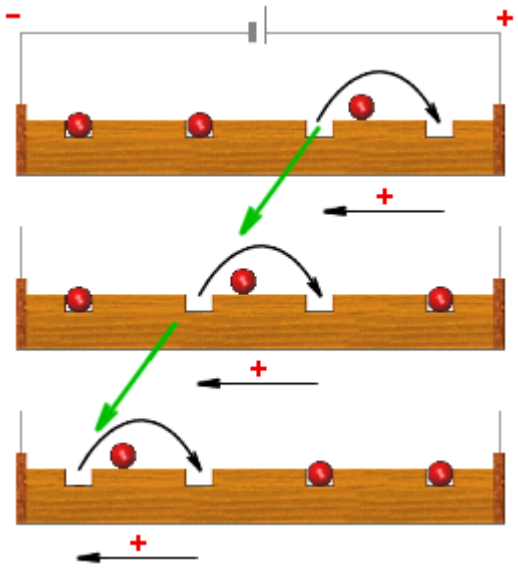

Bild 7: Löcherleitung im Modell

Eine Bindungslücke in einem Halbleiterkristall (also das Loch) kann von einem Elektron aus einer anderen Bindung wieder besetzt werden. Das Loch verschwindet jedoch nicht, sondern es ändert im Kristallgitter nur seinen Ort. Wird an den Kristall eine Spannung angelegt, so wandern die Elektronen zur positiven Elektrode. Gleichzeitig wandern die Löcher zur negativen Elektrode und verursachen damit eine Elektrizitätsleitung, die in der Wirkung der Bewegung positiver Ladungsträger gleichkommt.

Diese Löcherleitung kann man sich auch mit Hilfe einer Sitzreihe im Kino veranschaulichen, bei der sich in der Mitte ein freier Platz befindet. Durch das Nachrücken der Besucher wandert der freie Platz entgegengesetzt zur Bewegungsrichtung der einzelnen Besucher an den Rand der Sitzreihe.

Der Beitrag der Löcher zum Ladungstransport wird *P-Leitung* genannt; die Elektronenleitung bezeichnet man als *N-Leitung.* Die paarweise Erzeugung von freien Elektronen und Löchern heißt *Paarbildung.* Die Wiedervereinigung eines Loches mit einem Elektron nennt man *Rekombination.* Diese Art der Elektrizitätsleitung in einem Halbleiter, bei der gleich viele Elektronen und Löcher beteiligt sind, wird als *Eigenleitung* bezeichnet.

Dotierung

Ein reiner Halbleiter hat einen vergleichsweise hohen Widerstand, weil bei Zimmertemperatur nur sehr wenige freie Leitungselektronen zur Verfügung stehen. Man kann aber die Leitfähigkeit eines Halbleiters auch bei Zimmertemperatur erhöhen, indem man in das Kristallgitter eine kleine Menge eines fremden Stoffes einbaut. Es gibt dann Stellen im Kristallgitter, an denen ein Ge- Atom durch ein eingebautes Fremdatom ersetzt wird. Man nennt solche Stellen auch **Störstellen**, da hier der reguläre Gitteraufbau gestört ist. Den Einbau von Fremdatomen in einen Halbleiter nennt man **dotieren**.

n- Leiter

Werden als Fremdatome fünfwertige Atome wie z.B. Arsen (As), Antimon (Sb) oder Bismut (Bi) eingebaut, so werden für die Bindung nur vier der fünf Außenelektronen benötigt. Das fünfte Elektron findet keinen Elektronenpartner, mit dem es sich an der Bindung beteiligen könnte. Es ist daher nur schwach im Kristallgitter eingebunden und kann sich schon bei niedrigen Temperaturen vom den Fremdatom lösen. Bei der Ablösung des Elektrons wird das ursprünglich neutrale Fremdatom zu einem ortsfesten positiven Ion. Den daraus erhaltenen dotierten Halbleiter nennt man nach

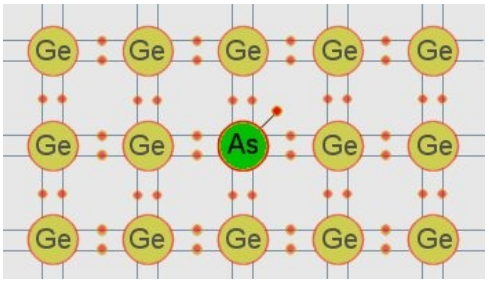

Bild 8: Arsen- Fremdatom in einem Germaniumkristall

dem Ladungsvorzeichen der mehrheitlich vorhandenen Ladungsträger (Majoritätsträger) *n Leiter.* (Dabei werden nur jene Ladungen betrachtet, welche in einem angelegten elektrischen Feld frei beweglich sind, also nicht an ihren Atomkern gebunden sind.)

Die eingebauten fünfwertigen Fremdatome werden auch Donatoren genannt, da sie Leitungselektronen „spenden”. Die Ablösung des fünften Außenelektrons vom As- Atom erfolgt bereits bei extrem niedrigen Temperaturen. Bei Zimmertemperatur sind daher bereits alle As- Atome ionisiert. Sie haben also ihr fünftes Außenelektron abgegeben, das nun als freies Leitungselektron zur Verfügung steht.

Der Vorgang der elektrischen Leitung ist in einem *n*- Halbleiter wie bei der Elektrizitätsleitung in Metallen wie z.B. Kupfer. Bei der Wärmeaufnahme schwingen die Ge- Atome stärker um ihre Ruhelage und behindern dabei die Elektronenbewegung, Da erst ab 50° C die Ladungsträgerdichte zunimmt, muss bis zu dieser Temperatur die Leitfähigkeit absinken. Der Widerstand steigt bis 50° C also mit zunehmender Temperatur des Leiters. Ab 50° C steigt die Leitfähigkeit und der Widerstand sinkt.

p- Leiter

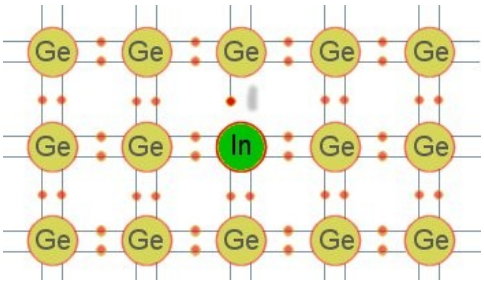

Bild 9: Indium- Fremdatom in einem Germaniumkristall.

Werden statt der fünfwertigen Atome dreiwertige Atome in das Ge- Gitter eingebaut, so bilden die Außenelektronen des Fremdatoms mit jeweils einem Bindungselektron des Ge- Atoms Elektronenpaare. Dreiwertige Fremdatome sind z.B. Indium (In), Gallium (Ga) oder Bor (B). Da diese Fremdatome zusätzlich Elektronen empfangen können, werden sie Akzeptoren genannt. Den daraus erhaltenen dotierten Halbleiter nennt man nach dem Ladungsvorzeichen der mehrheitlich vorhandenen Ladungsträger (Majoritätsträger) *p- Leiter.* Die Elektronenlöcher sind ebenfalls an der elektrischen Leitung beteiligt, sind aber in der Minderheit und heißen deshalb Minoritätsträger.

Beim Einbau von Indium in das Ge- Gitter findet das vierte Bindungselektron vom benachbarten Ge- Atoms keinen Elektronenpartner, so dass an der Störstelle ein Elektron fehlt. Diese Fehlstelle kann leicht durch ein Elektron aus einer benachbarten Elektronenbindung ausgefüllt werden. Dadurch wird die Anzahl der Löcher im Halbleiter erhöht, da Elektronen, die aus Paarbildungen stammen, gebunden werden. Das ursprünglich neutrale In- Atom wird durch den Einfang von einem Elektron zu einem negativen Ion.

Der Vorgang der elektrischen Leitung ist in einem *p*- Halbleiter überwiegend durch die bereits genannte Löcherleitung geprägt. Wird an den *p*- Leiter eine Spannung angelegt, so wandern die Elektronen zur positiven Elektrode. Gleichzeitig wandern die Löcher zur negativen Elektrode und verursachen damit eine Elektrizitätsleitung, die in der Wirkung der Bewegung positiver Ladungsträger gleichkommt.

Die bei der Dotierung angewendeten Verfahren sind sehr kompliziert. Erst deren Beherrschung ermöglichte den Fortschritt in der Halbleiter- Elektronik.

PN- Übergang (Dioden)

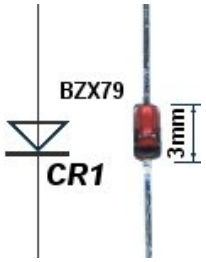

Bild 10: Schaltbild und diskretes Bauteil Diode

Wenn ein n-Leiter und ein gleichartiger p-Leiter zu einem Kristallverbund vereinigt werden, dann wird das Ergebnis als **pn-Übergang** bezeichnet. Bei einem pn-Übergang entsteht durch Diffusion und gleichzeitiger Rekombination der Ladungsträger im Grenzgebiet eine hochohmige Sperrzone. Die Breite dieser Sperrzone kann durch äußere Spannungen gesteuert werden. Das Bild 10 zeigt ein Schaltsymbol einer Halbleiterdiode, die hauptsächlich aus einem solchen **pn-Übergang** besteht. Das Symbol ist zu einer Zeit entstanden, als Metallspitzendioden noch eine weit verbreitete Form der Dioden darstellten. Der symbolische Pfeil ist die Anode (der p-Leiter) und der horizontale Balken ist die Kathode (der n-Leiter). Beachte: der Elektronenstrom bewegt sich entgegengesetzt der Pfeilrichtung! Die Bezeichnung CR1 ist ein alphanumerischer Code aus amerikanischen Schaltplänen und heißt „**C**rystal **R**ectifier number one”, Diode 1.

Raumladungszone

Um die physikalischen Vorgänge im pn-Übergang verstehen zu können, betrachten wir zunächst eine pn-Kombination, an der noch keine äußere Spannung anliegt (Bild 11a). Jeder der beiden Halbleiterblöcke ist elektrisch neutral, weil im n-Leiter genauso viele freie Elektronen wie ortsfeste positive Ladungen (Ionen) vorhanden sind. Entsprechendes gilt für den p-Leiter. Auf Grund des Konzentrationsgefälles zwischen den Elektronen und Löchern in den beiden Halbleitertypen können durch Diffusion Löcher in das n-Gebiet und Elektronen in das p-Gebiet eindringen.

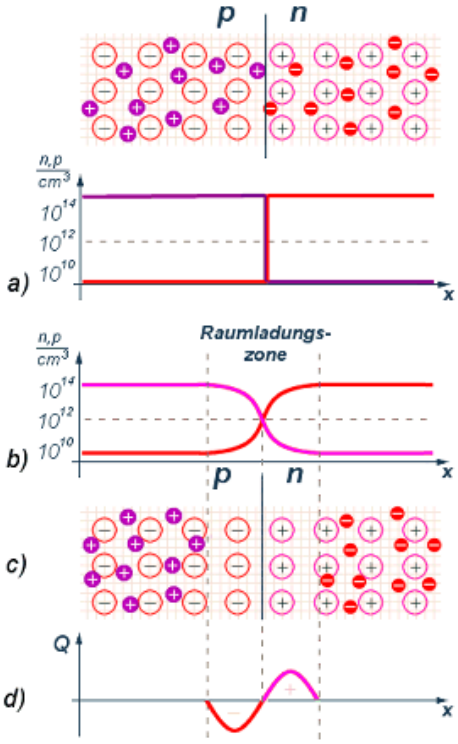

Bild 11: stromloser pn Übergang
a) Ladungsträgerkonzentration im p- und n-Material
vor der Diffusion
b) Konzentration in der Grenzschicht nach dem
Einsetzen des Diffusionsvorganges
c) trägerverarmte Raumladungszone
d) Ladungsverteilung in der Raumladungszone

Dieser Vorgang ist mit einer Rekombination der Ladungsträger verbunden. Es werden sich daher die Ladungsträgerdichten nach Bild 11b verändern.

Auf den ersten Blick könnte man meinen, dass es deswegen nach kurzer Zeit in beiden Halbleiterblöcken keine freien Elektronen und Löcher mehr gibt. Dieses wäre auch tatsächlich der Fall, wenn es keinen Prozess gäbe, der die Diffusion zum Stillstand bringt.

Die Rekombination der beweglichen Ladungsträger bewirkt, dass die ionisierten Stoßstellen nicht mehr neutralisiert werden und daher als Ladung in Erscheinung treten. Bild 11c zeigt, das im Grenzgebiet also eine Raumladung aufgebaut wird, so dass Rekombinationen nur in einer dünnen Grenzschicht stattfinden können. Denn wenn ein Elektron in den p-Leiter einwandert, wird es von der dort entstandenen negativen Raumladung abgestoßen. Es kann somit nicht weiter in das p-Material eindringen. Ebenso verhindert die positive Raumladung im n-Gebiet ein tieferes Eindringen der Löcher in den n-Leiter.

Elektronen und Löcher, die durch Paarbildung innerhalb der Raumladungszone entstehen, wirken dem *Diffusionsstrom* entgegen. Man bezeichnet den zur Diffusion entgegengesetzten Strom als *Feldstrom*. Diffusionsstrom und Feldstrom bilden ein dynamisches Gleichgewicht, wenn an der Diode keine Spannung anliegt.

Durchlasspolung

Wird eine Vorspannung in Durchlassrichtung an den pn-Übergang angelegt, so werden Elektronen und Löcher auf die Grenzzone zugetrieben. Die Sperrschicht wird mit Ladungsträgern überschwemmt und der Widerstand der Sperrzone verringert sich. Das Gleichgewicht zwischen Feldstrom und Diffusionsstrom ist zugunsten des Diffusionsstromes gestört.

Es werden also der Pluspol an den p-Leiter und der Minuspol an den n-Leiter der Batterie angeschlossen. Das positive Potenzial des Pluspols stößt die positiven Löcher ab und treibt sie in Richtung Materialinneres, wo sie Rekombinationen mit den negativen Ionen verursachen.

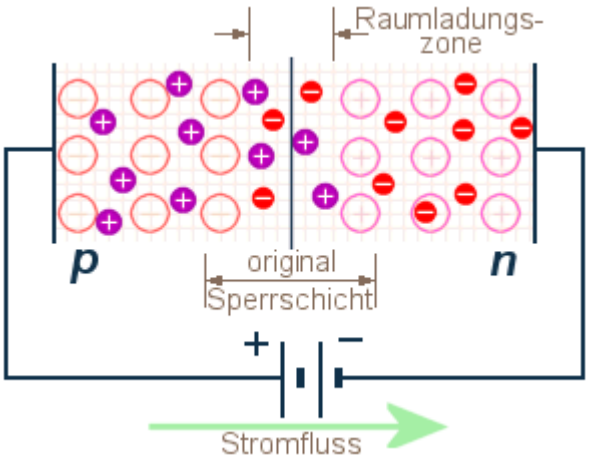

Bild 12: Durchlasspolung

Gleichzeitig stößt das negative Potenzial der Katode die Elektronen in das Materialinnere, die ebenfalls Rekombinationen mit den positiven Ionen des n-Materials verursachen. Da sich also auf beiden Seiten die Anzahl der Raumladungsträger verringert, wird die Dicke der Sperrzone stark verringert, so dass die Ladungsträger die Sperrzone passieren können. Es findet ein recht starker Stromfluss statt.

Bei einem *pn-Übergang* entsteht durch Diffusion und gleichzeitiger Rekombination der Ladungsträger im Grenzgebiet eine hochohmige Sperrzone. Die Breite dieser Sperrzone kann durch äußere Spannungen gesteuert werden. Bei *Durchlasspolung* (Pluspol am p-Leiter, Minuspol am n-Leiter) können Elektronen und Löcher den pn-Übergang passieren.

Es ist wichtig, sich daran zu erinnern, dass der Strom in Durchlassrichtung durch die Majoritätsträger (Löcher im p-Material und Elektronen im n-Material) erfolgt, die bei starkem Anstieg der Spannung und des Stromes eine Erhitzung des Halbleitermaterials bewirken. Wenn diese Temperatur ansteigt, dann werden zusätzliche Ladungsträger frei und der Strom steigt weiter an bis der Halbleiterkristall thermisch zerstört wird!

Sperrpolung

Bei Sperrpolung (Pluspol am n-Leiter, Minuspol am p-Leiter) fließt nur ein geringer Sperrstrom, der von der Temperatur abhängt. Der Sperrstrom wird durch die Eigenleitung des Halbleitermaterials bestimmt.

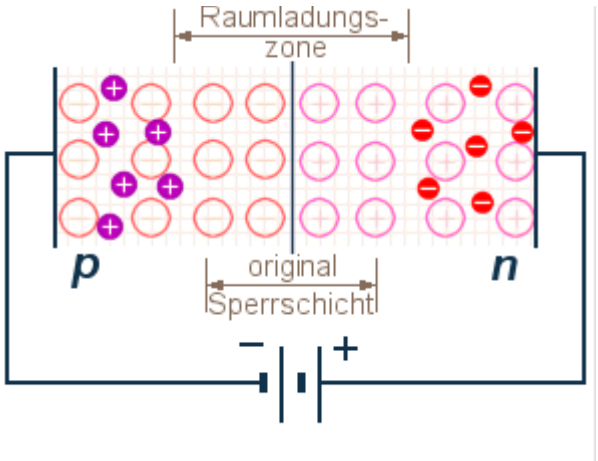

Bild 13: Sperrpolung an der Diode

Wird nun an den p-Leiter der Minuspol und an den n-Leiter der Pluspol der Batterie angeschlossen wie das Bild 13 zeigt, dann werden die Löcher zur negativen Elektrode (Katode) und die Elektronen zur positiven Elektrode (Anode) gezogen. Das hat zur Folge, dass die ladungsträgerverarmte Grenzschicht breiter und hochohmig wird. Der pn-Übergang ist gesperrt.

Der geringe Sperrstrom ist auf die thermische Paarbildung innerhalb der Sperrzone zurückzuführen. Das Gleichgewicht ist zugunsten des Feldstromes gestört. Bei höherer Temperatur nimmt die Paarbildung und damit der Sperrstrom zu.

Bild 14 zeigt die I/U-Kennlinie einer Germaniumdiode. Die Kennlinie zeigt, dass nur dann ein größerer Strom fließt, wenn der Pluspol an den p-Leiter und der Minuspol der Stromquelle an den n-Leiter angeschlossen ist.

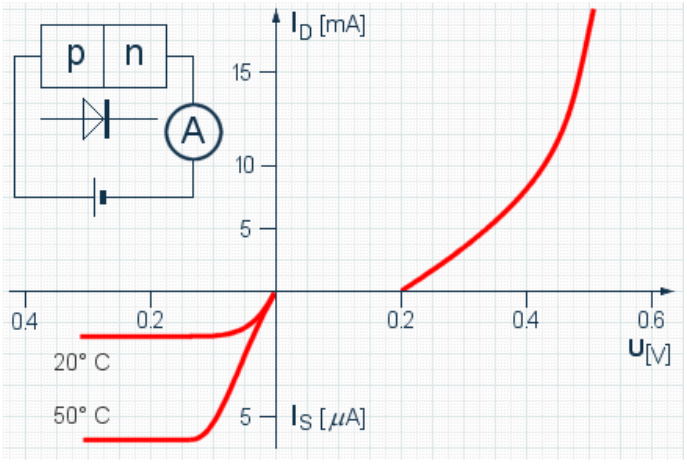

Bild 14: I/U-Kennlinie einer Germaniumdiode

Wir sehen jetzt, welche Bedeutung dem Einbau von Fremdatomen in das Halbleitermaterial zukommt. Ohne die ortsfesten Störstellen würde sich keine Sperrschicht zwischen den Halbleitern ausbilden. Die Eigenschaft des pn-Überganges, den Strom nur in einer Richtung zu leiten, ist für die gesamte Halbleiterelektronik von grundlegender Bedeutung. Der entscheidende Fortschritt bei dieser Technologie liegt darin, dass die elektrische Leitfähigkeit von Festkörpern durch äußere Spannungen sehr schnell verändert werden kann.

Mechanischer Aufbau

Eine Möglichkeit einen pn-Übergang zu erzeugen ist es, bei der Züchtung des Halbleiterkristalls ab einem bestimmten Zeitpunkt das flüssige Ausgangsmaterial zu wechseln. Der Kristall mit zum Beispiel dem n-Leiter wächst dann als p-Leiter weiter. Hier sind sehr großflächige einkristalline pn-Übergange möglich, wie sie beispielsweise bei der Herstellung von Solarzellen genutzt werden.

Eine weitere Möglichkeit ist, auf dem Basismaterial von n-dotiertem Germanium eine kleine Menge mit Indium gemischtes (n-dotiertes Germanium) aufzutragen. Diese kleine sogenannte „Indiumperle” wird mit genau dosierter Wärme eingeschmolzen und diffundiert teilweise in das Basismaterial ein. Dies ist die meist genutzte Form des pn-Übergangs für Halbleiterdioden.

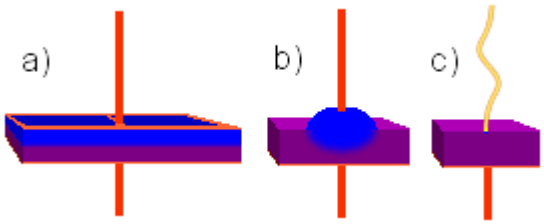

Bild 15: verschiedene pn-Übergänge
a) einkristallin
b) Indiumperle
c) Spitzendiode

Als **Spitzendioden** werden Dioden genannt, bei denen ein sehr dünner Metalldraht auf das n-dotierte Germanium geführt wird. Dieser dünne Draht wird mittels eines starken Stromimpulses im Germanium durch Anschmelzung des Basismaterials befestigt. Da dieser pn-Übergang eine extrem kleine Fläche einnimmt, ist diese Form der Dioden für Höchstfrequenzanwendungen geeignet.

Diodenanwendungen

Bisher wurde die Halbleiterdiode nur als Gleichrichter betrachtet, jedoch sind sehr viel mehr Anwendungsmöglichkeiten bekannt. Unterschiedliche Arten von Halbleiterbasismaterial, verschiedene Atome als Störstellen und abweichende Herstellungstechnologien haben eine Vielzahl von möglichen Diodenanwendungen hervorgebracht. Beispiele dafür sind:

- Netzspannungsgleichrichter,
- Signaldioden (Schaltdioden),
- Tunneldioden,
- Zenerdioden,
- Kapazitätsdioden,
- PIN- Dioden und viele andere.

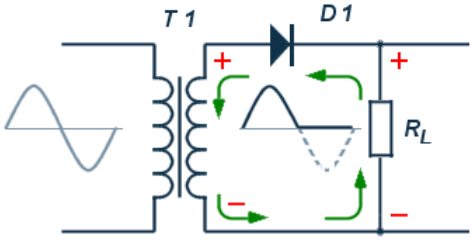

Bild 16: Einfache Halbwellengleichrichtung mit positiver Ausgangsspannung

Netzspannungsgleichrichter

Eine der Hauptanwendungen des PN- Überganges ist die Gleichrichterdiode. Der einfache PN- Übergang ist durch seine unterschiedlichen Innenwiderstände abhängig von der Polung der Spannung für diese Anwendung prädestiniert. Eingesetzt als Gleichrichter in einem Wechselstromkreis wird die Diode durch den Wechselstrom in schneller Folge abwechselnd in Durchlass- und Sperrrichtung betrieben. Da ein Stromfluss jedoch nur in Durchlassrichtung zustande kommen kann, wird der Wechselstrom gleichgerichtet. Die einfachste Gleichrichterschaltung besteht aus der Wechselstromquelle, einer Halbleiterdiode und einem Lastwiderstand, wie Bild 16 und 17 zeigt.

Der Transformator T_1 in der Schaltung arbeitet als Wechselstromquelle und transformiert die Netzeingangsspannung auf einen (hier) Niedervoltwert. Die Diode D_1 stellt die Gleichrichtung sicher und der Lastwiderstand erfüllt zwei Aufgaben, er begrenzt den Stromfluss durch die Diode und über den Stromfluss durch den Lastwiderstand ist die gleichgerichtete Spannung verfügbar.

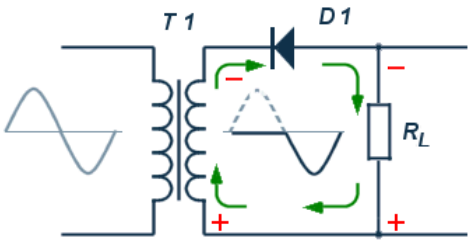

Bild 17: Einfache Halbwellengleichrichtung mit negativer Ausgangsspannung

Dabei kann dieser Lastwiderstand unterschiedlich realisiert werden. Last kann schließlich jedes Bauteil sein, über welches ein Strom fließt. Wenn hier also von einem Lastwiderstand gesprochen wird, so kann das sowohl ein ohmscher Widerstand, als auch eine mehr oder weniger komplizierte elektronische Schaltung sein.

Im Bild 16 liegt am oberen Ende der Sekundärwicklung des Transformators zum Zeitpunkt der positiven Halbwelle eine positive Spannung bezogen zum Massepotential an. Unter dieser Bedingung ist die Diode in Durchlassrichtung gepolt, ihre Raumladungszone ist somit sehr dünn und ihr Innenwiderstand ist gering. Somit fließt ein Strom durch Diode, Lastwiderstand und Transformatorwicklung. Die Spannung über dem Lastwiderstand wird hier als Ausgangsspannung bereitgestellt.

Wenn jedoch die negative Halbwelle der Wechselspannung anliegt, dann liegt am oberen Ende der Sekundärwicklung des Transformators eine negative Spannung bezogen zum Massepotential an und die Diode befindet sich in Sperrrichtung. Die Raumladungszone der Diode ist somit sehr dick, ihr Innenwiderstand ist sehr groß und es kann durch Diode, Lastwiderstand und Transformatorwicklung nur ein vernachlässigbar kleiner Sperrstrom fließen: praktisch liegt am Lastwiderstand keine Spannung an. Es wird also nur die positive Halbwelle durchgelassen. Mit den stilisierten Diagrammen in der Schaltung wird das „abschneiden” der negativen Halbwelle symbolisiert. Am Ausgang der Schaltung liegt also

eine pulsierende Gleichspannung an. Wenn die Eingangswechselspannung z.B. 50 Hz beträgt, dann besteht diese pulsierende Gleichspannung aus 50 Halbwellen (Impulsen) pro Sekunde.

Wenn die Diode wie im Bild 17 gezeigt anders herum eingebaut wird, dann läuft der eben geschilderte Vorgang mit umgekehrtem Vorzeichen ab und es liegt eine negative Ausgangsspannung an. Weil durch diese Schaltung immer nur entweder die positiven *oder* negativen Halbwellen durchgelassen wird, wird diese Schaltung auch *Halbwellengleichrichter* genannt.

Diodenschalter

Zusätzlich zu der Funktion als Gleichrichter können Halbleiterdioden auch in Schaltungen zur Signalmischung, zur Demodulation und einfach zur einer Signaladdition genutzt werden. Diese Dioden werden oft als Signaldioden zusammengefasst. Eine einfache Anwendung einer Schaltfunktion ist im Bild 18 gezeigt.

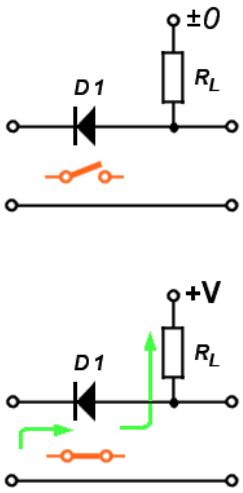

Bild 18: Diode als Schaltfunktion

Wenn der Eingangspegel an der Schaltung auf Nullpotential liegt und die Diode über R_L eine positive Vorspannung erhält, dann ist die Diode in Durchlassrichtung gepolt. Positive Eingangssignale verringern die Spannungsdifferenz über der Diode und das wirkt sich in der Größe des Durchlassstromes aus. Abhängig vom Strom wird vom Spannungsabfall am R_L die Form des Eingangssignals am Ausgang abgebildet. Jedes positive Signal, welches kleiner oder gleich der Vorspannung ist, kann also die Diode passieren. Die Diode wirkt in diesem Fall wie ein geschlossener Schalter.

Ist dagegen die Vorspannung auf Nullpotential, dann wird jedes positive Eingangssignal die Diode in Sperrrichtung betreiben und es kann somit kein Strom über die Diode fließen. Die Diode wirkt als offener Schalter. Mit der Wahl der Vorspannung kann eine Diode als sehr schneller elektronischer Schalter betrieben werden.

Z- Dioden

Das Schaltbildsymbol einer Z-Diode zeigt das Bild 19. Beachte, dass der *pn*- Übergang in Sperrrichtung geschaltet ist. Jede Z-Diode hat eine spezielle *Durchbruchsspannung*, ab der trotz Sperrrichtung ein starker Stromfluss erfolgt, der durch die Minoritätsträger verursacht wird.

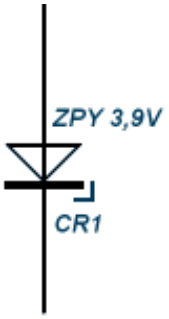

Bild 19: Schaltbildsymbol für eine Z-Diode.

Z- Dioden verschiedener Bauformen werden für viele Anwendungsmöglichkeiten hergestellt, meist werden sie jedoch zur Spannungsregulierung eingesetzt. Denn erst wenn die Durchbruchsspannung erreicht ist, fließt ein Strom, welcher dann durch den Spannungsabfall über einen Vorwiderstand dazu verwendet wird, die Ausgangspannung der Schaltung konstant zu halten.

Wenn ein *pn*- Übergang in Sperrrichtung betrieben wird, dann bewegen sich die Ladungsträger vom *pn*- Übergang weg und die Raumladungszone vergrößert sich. Das betrifft nicht nur die Majoritätsträger (Elektronen) als auch die Minoritätsträger (Löcher), wie im Bild 20 gezeigt wird. Ein Stromfluss durch die Majoritätsträger wird durch den sehr großen Widerstand der Raumladungszone verhindert. Ein Reststrom wird durch Minoritätsträger (Löcher) verursacht, der bis zur Durchbruchsspannung fast konstant bleibt. Wenn diese Durchbruchsspannung erreicht wird, dann steigt der Stromfluss lawinenartig an. Nicht jede Diode ist geeignet, diese Leistung, die durch diesen Stromfluss erreicht wird, zu überstehen. Z- Dioden sind jedoch für genau diesen Betriebsmodus konstruiert.

Früher wurden Z-Dioden „*Zener- Dioden*” genannt. Der „*Zener- Effekt*” wurde durch Dr. Carl Zener im Jahre 1934 erstmals beschrieben und als als „Quantenmechanische Tunnelung” bezeichnet. Jedoch kann der „Zener- Effekt” nur die Vorgänge in Z-Dioden mit einer Durchbruchsspannung unter 5 Volt beschreiben. Bei größeren Durchbruchsspannungen wird der sogenannte „Lawineneffekt” zur Erklärung der Funktion herangezogen. Trotzdem wird der Name „Zener- Diode” oft noch für beide Arten von Z- Dioden verwendet.

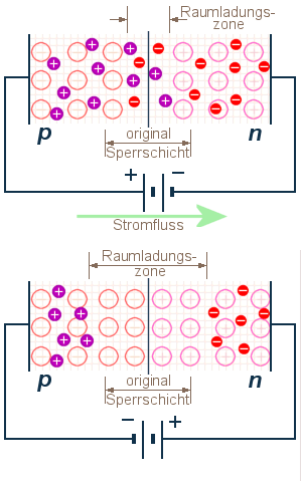

Bild 20: Größe der Raumladungszone

Der „*Zener- Effekt*” kann mit Hilfe der Energiebänder in der Atomhülle beschrieben werden, von denen hier aber nur die äußeren beiden, das *Leitungsband* und das *Valenzband* von Interesse sind.

Bild 21 zeigt die Energiebänder in einer Zenerdiode. Diese Energiebänder haben im *p*- und *n*- dotiertem Halbleitermaterial ein unterschiedliches Energieniveau. Das Leitungsband vom *n*- dotierten Halbleitermaterial und das Valenzband vom *p*- dotierten Halbleitermaterial überlappen sich bei einer Zenerdiode. Unter diesen Bedingungen kann ab einer bestimmten Spannung Bindungselektronen des *p*- dotierten Halbleitermaterials die extrem dünn konstruierte Sperrschicht überwinden und in das Leitungsband des *n*- dotierten Halbleitermaterials eindringen. Dieser Vorgang wird „Tunneleffekt” genannt und tritt bei Halbleitermaterial mit einer sehr großen Anzahl von Störatomen auf.

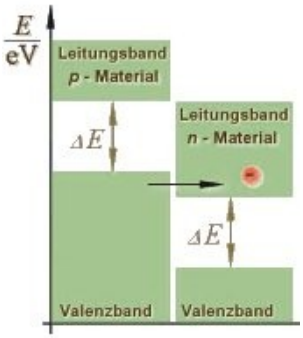

Bild 21: Energiebänder in einer Zenerdiode

Eine zweite Theorie zur Erklärung der Durchbruchsspannung ist der sogenannte „*Lawineneffekt*”, welcher bei Durchbruchsspannungen über 5 Volt auftritt. Diese Dioden habe eine dünnere Raumladungszone als normale Dioden, die aber etwas dicker ist, als bei Zenerdioden. Die Dicke der Raumladungszone wird vergrößert durch eine kleinere Anzahl von Störatomen im Halbleitermaterial als bei Zenerdioden. Die Durchbruchsspannung kann durch unterschiedliche Dotierung Werte von 2 bis 200 Volt annehmen.

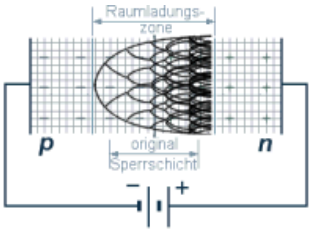

Bild 22: Lawineneffekt

Der Mechanismus des Lawinendurchbruchs unterscheidet sich von Zenereffekt. In der Raumladungszone des *pn*-Überganges befinden sich abhängig von der Kristalltemperatur einige freie Leitungselektronen und die dazugehörigen Elektronenlöcher. Der Sperrstrom wird durch die Bewegung der Minoritätsträger (hier Elektronen) in Richtung des elektrischen Feldes (positive Spannung) verursacht. Wird diese Spannung vergrößert, dann erreicht sie einen kritischen Wert, ab dem die freien Elektronen mit den Atomen im Kristallgitter kollidieren und somit Energie an Bindungselektronen abgeben und diese aus deren Bindung herausschlagen. Diese Elektronen werden dann zu freien Leitungselektronen und werden ebenfalls durch das starke elektrische Feld beschleunigt, bis ein lawinenartiger Durchbruch durch die Sperrschicht erfolgt. Bild 22 zeigt eine symbolische Darstellung des Lawinendurchbruchs.

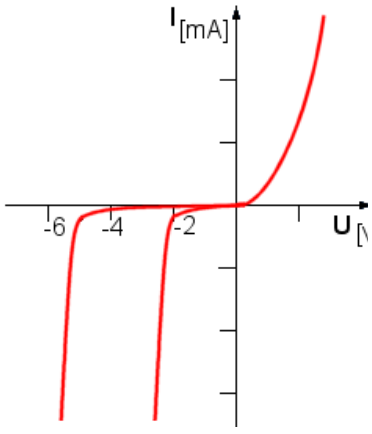

Bild 23: Kennlinie einer Z-Diode

Bei eine Sperrspannung etwas größer als die Durchbruchsspannung U_D werden also durch den Lawineneffekt eine unbegrenzte Anzahl von freien Leitungselektronen erzeugt, so dass die Diode einen sehr kleinen Innenwiderstand erhält. Der

Strom ist fast ein Kurzschlussstrom und wird nur durch die äußere Beschaltung mit Widerständen begrenzt. Diese müssen einen Wert haben, der ein thermische Überlastung der Z-Diode verhindert. Wird die Sperrspannung wieder auf einen Wert unterhalb der Durchbruchsspannung U_D abgesenkt, dann bricht der Strom zusammen und die Z-Diode ist wieder gesperrt.

Tunneldiode

Im Jahre 1958 entdeckte der japanische Wissenschaftler Leo Esaki, dass eine Halbleiterdiode aus stark dotierten Materialien einen negativen Innenwiderstand haben kann. Eine „normale” Halbleiterdiode besteht aus einem Kristall mit einem Störatom auf etwa 10 Millionen Atomen des Basiskristalls. Diese recht schwache Dotierung bewirkt eine breite Raumladungszone. Eine Leitfähigkeit wird nur erreicht, wenn die Spannung groß genug ist, dass die Valenzelektronen die verbotene Zone überwinden können.

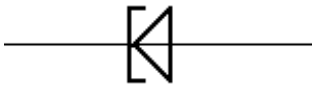

Bild 24: Schaltungssymbol einer Tunneldiode

Bei einer Tunneldiode beträgt die Dotierung sogar 1000 Störatome auf etwa 10 Millionen Atomen des Basiskristalls. Diese starke Dotierung bewirkt wie bei der Z- Diode eine extrem schmale Raumladungszone. Diese starke Dotierung hat eine außergewöhnliche Kennlinienform zur Folge, die sich von einer normalen Halbleiterdiode unterscheidet. Bild 25 zeigt diese Kennlinie einer Tunneldiode.

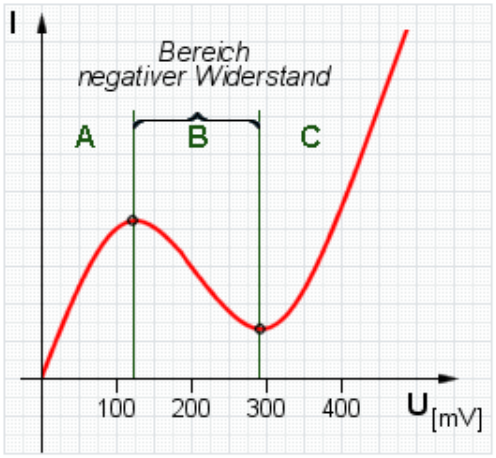

Bild 25: Kennlinie einer Tunneldiode

Diese Kennlinie kann in drei Teilabschnitte untergliedert werden:

A) Schon bei sehr kleinen Durchlassspannungen (bei denen eine normale Diode noch gesperrt ist) fließt ein zunehmender Strom bis zu einem Scheitelpunkt (I_P).

B) Bei einer weitern Erhöhung der Spannung sinkt der Strom wieder bis zu einem Minimum (I_V).

C) Danach steigt der Strom wieder proportional zur Vorspannung.

Der Abschnitt der Kennlinie zwischen I_P und I_V ist der Bereich, in dem die Tunneldiode Eigenschaften eines negativen Widerstandes aufweist. Eine Erklärung für dieses Phänomen kann wie beim Zenereffekt wieder mit Hilfe des Bändermodells gegeben werden.

Bei einer Tunneldiode ist die Dicke der Raumladungszone (also die verbotene Zone) extrem dünn und liegt im Bereich von etwa einem Mikrometer. Die Modellvorstellung des quantenmechanischen Tunneleffektes besagt, dass die Elektronen diese Energiebarriere, die sie auf Grund mangelnder Energie eigentlich nicht überwinden können, wie durch einen Tunnel durchqueren.

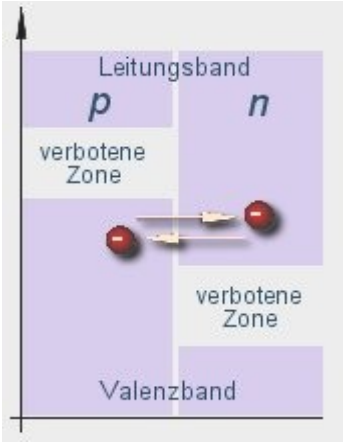

Bild 26: Bändermodell einer Tunneldiode ohne Vorspannung

Bild 26 zeigt das Bändermodell einer Tunneldiode, an der noch keine Vorspannung anliegt. Das Valenzband des *p*- Materials und das Leitungsband des *n*- Materials überlappen sich teilweise. Einige Ladungsträger können also vom Valenzband des *p*- Materials in das Leitungsband des *n*- Materials eindringen. Es fließ aber kein Strom, da sich die Majoritätsträger (Elektronen) und die Löcher in beide Richtungen bewegen.

Im Bild 27 wird das Bändermodell einer Tunneldiode gezeigt, bei der eine kleine Vorspannung (etwa 200 mV) anliegt. Durch diese Vorspannung bewegen sich die Elektronen Valenzband des *p*- Materials in das Leitungsband des *n*- Materials, haben aber nicht genug Energie, um die Raumladungszone (verbotene Zone) zu überwinden. Solange sich diese beiden Energieniveaus überlappen, kann aber trotzdem ein Stromfluss erfolgen. Jedoch: je höher die Vorspannung, desto geringer die Überlappung, aber desto kleiner auch die verbotene Zone.

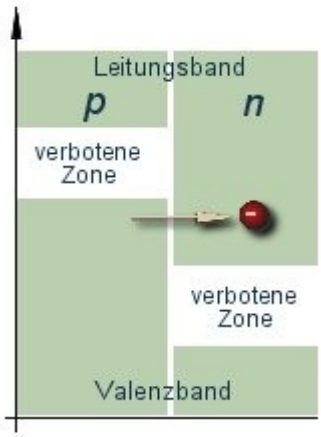

Bild 27: Bändermodell einer Tunneldiode mit einer Vorspannung von 200 Millivolt

Wenn die Vorspannung wie in Bild 28 gezeigt auf über 400 mV angestiegen ist, dann überlappen sich das Valenzband des *p*-Materials und das Leitungsband des *n*- Materials nicht mehr, der Tunneleffekt ist nicht mehr möglich. Vom Scheitelpunkt I_P bis zum Minimum I_V sinkt der Strom bei steigender Vorspannung, die Überlappungszone wird immer schmaler. Es können bei steigender Vorspannung immer weniger Elektronen in das Leitungsband des *n*- Materials eindringen. Das bedeutet, dass die Tunneldiode in diesem Bereich einen negativen Widerstand aufweist.

Bild 28: Bändermodell einer Tunneldiode mit einer Vorspannung von 400 Millivolt

Bei einem weiteren Anstieg der Vorspannung überlappen sich die Energiebänder nicht mehr. Dafür ist aber die Raumladungszone (verbotene Zone) so schmal geworden, dass die Elektronen sich wie bei einem normalen *pn*-Übergang verhalten.

Dieser Bereich des negativen Widerstandes ist die wichtigste und meist genutzte Eigenschaft einer Tunneldiode. Mit diesem negativen Widerstand kann die Tunneldiode Schwingkreise entdämpfen und somit als Oszillator oder Verstärker arbeiten. Da bei dem quantenmechanischen Tunneleffekt keinerlei Laufzeiten auftreten, ist die Tunneldiode für Anwendungen in der Höchstfrequenztechnik geeignet.

Kapazitätsdiode

Die Kapazitätsdiode erhielt ihren Namen wegen ihrer Eigenschaften, die es erlauben, mit ihr einen einstellbaren Kondensator ersetzen zu können. Die Raumladungszone (Sperrschicht) des *pn* Überganges wirkt als Dielektrikum und die Ladungsträger als Platten eines Kondensators. Die Größe der Sperrspannung verändert die Breite der Sperrschicht und somit die Kapazität. Bild 29 zeigt das Schaltsymbol einer Kapazitätsdiode. Kapazitätsdioden werden in Resonanzkreisen und in Verstärkern der Hochfrequenztechnik eingesetzt.

Bild 29: Schaltsymbol einer Kapazitätsdiode

Die Größe der Raumladungszone eines *pn*-Überganges ist abhängig von der angelegten Spannung. Eine Durchlasspolung verringert die Sperrschichtdicke und ab einer bestimmten Spannung (bei Silizium etwa 0,7 Volt) können die Elektronen die Sperrschicht überwinden, der Innenwiderstand sinkt und es beginnt ein Durchlassstrom zu fließen (siehe Bild 30). Wenn aber die Vorspannung des *pn* Überganges in Sperrrichtung gepolt ist, wie im Bild 31 gezeigt wird, dann vergrößert sich die Sperrzone, weil die Ladungsträger

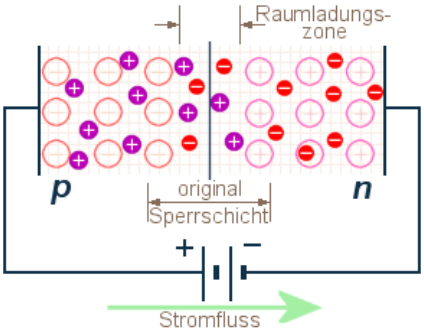

Bild 30: Durchlasspolung eines *pn*-Überganges.

durch das elektrische Feld von der Sperrschicht weg bewegt werden. Die Sperrschicht wird also noch ärmer an Ladungsträgern und verbreitert sich in Abhängigkeit von der Größe der Sperrspannung. Unter dieser Vorspannungsbedingung wird die Kapazitätsdiode betrieben, die also auch nichts weiter als ein spezieller *pn* Übergang ist.

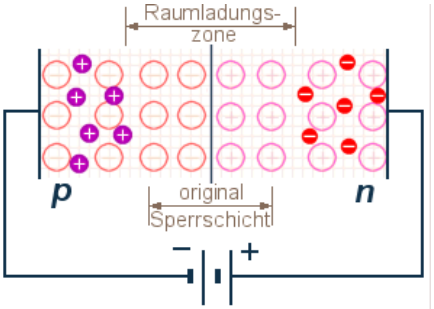

Bild 31: Sperrpolung eines *pn*-Überganges

Wie in den Grafiken gezeigt wird, ist die durch die in Sperrrichtung gepolte Vorspannung verursachte Dicke der isolierenden Sperrschicht zwischen den Ladungsträgern der Abstand zwischen zwei Kondensatorplatten. Wie bei einem Kondensator kann auch die Kapazität berechnet werden:

$$C = k \cdot \frac{A}{d}$$

A = Fläche der Kondensatorplatte
k = ein konstanter Faktor
d = Abstand zwischen den Kondensatorplatten

Als Abstand zwischen den Kondensatorplatten wird die Dicke der Sperrschicht eingesetzt. Die Fläche der Kondensatorplatten ist konstruktiv bedingt und ebenfalls als konstant anzunehmen. Somit ist nur der Abstand zwischen den Kondensatorplatten variabel und direkt von der Sperrspannung abhängig. Je größer die Spannung, desto größer der Abstand, desto kleiner die Kapazität. Die Kapazität ist also umgekehrt proportional zur Spannung.

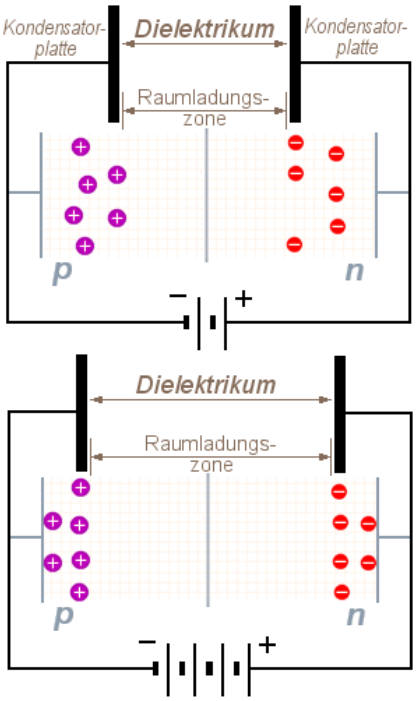

Bild 32: Zusammenhang Sperrspannung und Kapazität.

In einer Kapazitätsdiode kann das Verhältnis Spannungsänderung zur Kapazitätsänderung bis zu 10 zu 1 betragen. Bild 32 zeigt den Zusammenhang: In der oberen Schaltung mit vielleicht 3 Volt Sperrspannung wird eine Kapazität von z.B. 20 Pikofarad erreicht. In der unteren Schaltung wird die Spannung verdoppelt. Die angenommene Spannung ist also 6 Volt. Wenn die Kapazität nun z.B. nur noch 5 Pikofarad beträgt, dann verringert jedes Volt Sperrspannungserhöhung die Kapazität um 5 Pikofarad und das Verhältnis Spannungsänderung zur Kapazitätsänderung beträgt in diesem Fall 5 zu 1. Die mit Kapazitätsdioden erreichbaren Kapazitäten liegen übrigens alle nur im unteren Pikofaradbereich.

Kapazitätsdioden haben die früher üblichen Dreh- und Trimmkondensatoren ersetzt. Durch die Spannungssteuerung ist eine komfortable Fernsteuerung und sogar automatische Frequenzeinstellungen an Resonanzschaltungen möglich. Ein Beispiel für einen Einsatz einer Kapazitätsdiode in einem abstimmbaren Schwingkreis zeigt Bild 33.

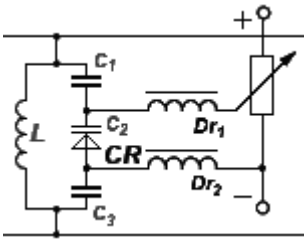

Bild 33: abstimmbarer Schwingkreis mit Kapazitätsdiode.

Im Bild 33 wird vom Schleifer eines Potentiometers eine variable Spannung abgegriffen. Die Drosseln Dr_1 und Dr_2 bieten dem Gleichstrom einen geringen Widerstand und die Spannung liegt als Sperrspannung an der Kapazitätsdiode an. Deren Kapazität C_2 ist in Serie mit den Kondensatoren C_1 und C_3 geschaltet. Somit bewirkt eine Änderung der Sperrspannung mit dem Potentiometer eine Kapazitätsänderung und somit eine Änderung der Resonanzfrequenz

des Schwingkreises. Die Drosseln Dr_1 und Dr_2 bieten der Resonanzfrequenz des Schwingkreises eine sehr hohen Widerstand, so dass der Widerstand des Potentiometers den Schwingkreis nicht belastet. Die in Serie geschalteten Kondensatoren C_1 und C_3 erfüllen zwei Aufgaben: einerseits trennen sie den Gleichstromkreis der Vorspannung vom Wechselstromkreis und zweitens wirken sie frequenzbestimmend im Schwingkreis mit und begrenzen hier den Regelbereich der Kapazitätsdiode.

Die Kapazitätsdiode (Varactordiode, Varicap) ist eine Diode, welche Eigenschaften eines Kondensators aufweist indem der Abstand zwischen den Ladungsträgern wie das Dielektrikum zwischen den Kondensatorplatten wirkt. Der Abstand zwischen den Ladungsträgern ist bei Anliegen einer Sperrspannung mit der Dicke eines isolierenden Dielektrikums vergleichbar. Die Formel zur Berechnung der Kapazität gilt also sowohl für die Kapazitätsdiode als auch für den Kondensator. Die Größe des Ladungsträgerabstandes ersetzt in der Formel den Abstand von den Kondensatorplatten. Bei einer Veränderung der Größe der Sperrspannung verändert sich auch der Abstand der Ladungsträger. Bei einer höheren Sperrspannung vergrößert sich der Abstand d und verkleinert somit die Kapazität C des pn-Überganges. Das heißt, die Kapazität C einer Kapazitätsdiode ist indirekt proportional der Höhe der Sperrspannung.

Das Verhältnis zwischen der Sperrspannung und der Kapazität kann bis zu 10 zu 1 betragen. Das Beispiel in der Grafik zeigt, dass im oben dargestellten Fall eine Sperrspannung von 3 V eine Kapazität von 20 pF bewirkt. Wenn die Sperrspannung auf 6 V erhöht wird, fällt die Kapazität auf einen Wert von 5 pF. Also jedes Volt Sperrspannungserhöhung bewirkt einen Abfall um 5 pF - das heißt, diese Kapazitätsdiode hat also ein Kapazitäts- Sperrspannungs-Verhältnis von 5 zu 1. Selbstverständlich ist dieser Vorgang auch umkehrbar, eine Sperrspannungsverringerung erhöht die Kapazität. Die erreichbaren Werte für die Kapazität liegen aber immer im Pikofaradbereich!

Kapazitätsdioden können also herkömmliche Trimmkondensatoren ersetzen und werden in den meisten Radargeräten verwendet. Ein großer Vorteil ist die durch die Gleichspannungsregelung mögliche Fernbedienung bzw. automatische Abstimmfunktion von hochfrequenten Schwingkreisen.

pin-Dioden

pin-Dioden sind als Dreischichtstruktur aufgebaut mit einer möglichst eigenleitenden i-Mittenzone zwischen hochdotierten *p*- bzw. *n*- Kontaktzonen. Für kurze Schaltzeiten beträgt die Weite der *i*-Zone 0,5...1µm. Wenn große Durchbruchspannungen verlangt werden, beträgt die Weite der *i*-Zone bis zu 100µm.

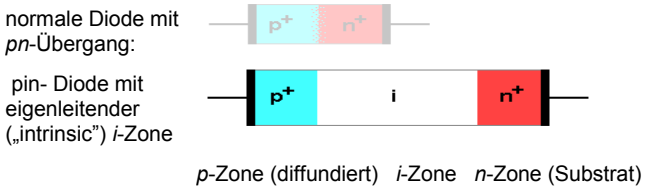

Bild 34: Aufbau einer *pin*-Diode

Die Anwendung der *pin*-Dioden in der HF-Technik beruhen auf folgende Eigenschaften:

- In Sperrrichtung werden die wenigen Ladungsträger der *i*-Zone schon bei kleinen Sperrspannungen ausgeräumt, die *pin*-Diode hat dann eine spannungsunabhängige Sperrschichtkapazität. Bei großen Weiten der *i*-Zone ist die Kapazität sehr klein, die *pin*-Diode bildet damit für HF-Schwingungen einen hohen Widerstand. Außerdem ist die Durchbruchspannung groß, so dass hohe Wechselspannungen anstehen können.
- Bei Betrieb in Flussrichtung wird die *i*-Zone durch injizierte Minoritätsträger überschwemmt. Die *pin*-Diode bildet dann einen vorstromabhängigen Widerstand, der sehr kleine Werte annehmen kann. Die *pin*-Diode bildet dann auch noch für HF-Schwingungen großer Amplitude einen linearen Widerstand.
- *pin*-Dioden können sehr schnell (etwa 1 ns) zwischen Sperrrichtung (nahezu Leerlauf) und Flussrichtung (nahezu Kurzschluss) umgeschaltet werden.

Gunn-Diode

Mikrowellen können u.a. mit einer Gunn-Diode erzeugt werden. Grundlage dieser Diode ist der **Gunn-Effekt**. Mr. J. B. Gunn entdeckte 1963 dass eine konstante, relativ hohe elektrische Spannung an einem n- dotierten Galliumarsenidkristall schnelle, statistische Stromschwankungen verursacht. Es zeigte sich, dass bei sehr kurzen Kristallen diese Stromfluktuationen in zusammenhängende Schwingungen übergehen, deren Frequenz durch die Länge der Kristalle festgelegt ist und im Mikrowellenbereich liegt.

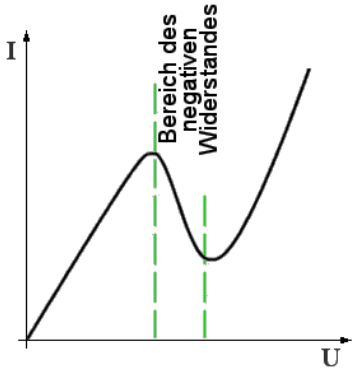

Bild 35: Kennlinie einer Gunn-Diode

Der Gunn-Effekt tritt allgemein in Halbleitern auf, deren Energiebänder relative Maxima und Minima in einem nicht großen energetischen Abstand haben, so dass gewisse („heiße”) Elektronen leicht in höherliegenden Bänder gelangen; haben sie dort eine kleinere Beweglichkeit, so gehört zur größeren Feldstärke eine kleinere Stromstärke, d.h. es liegt ein negativer Widerstand vor, der Voraussetzung für eine Schwingungserzeugung und Verstärkung ist.

Oszillatoren mit Gunn-Dioden erzeugen eine Mikrowellenleistung von etwa 65 mW und können bis etwa 200 Watt Spitzenleistung gepulst werden.

Transistoren

Als der erste Transistor von einem Team der Bell Telephone Laboratories im Jahre 1948 entwickelt wurde entstand sofort ein sehr starkes Interesse an der Forschung und Entwicklung dieser Halbleitertechnologie. Der Transistor, der Anfangs nur als Kuriosität Beachtung fand, wurde schnell zu einem Bauelement von höchster Wichtigkeit. Dabei wurde anfangs nur die theoretische Möglichkeit einer Spannungsverstärkung mit einem Halbleiterkristall demonstriert. Davor waren Verstärkerschaltungen nur mit Vakuumröhren bekannt. Die Transistortechnik hat schnell den Markt erobert. In den meisten Fällen war der Transistor der Röhre überlegen: er war sehr viel kleiner und robuster, benötigte keine Heizspannung und statt der üblichen Hochspannung nur eine sehr kleine Betriebsspannung. Die Entwicklung der Transistoren machte erst die Mikroelektronik möglich. Das Bild 36 zeigt eine kleine Auswahl an Bauformen von Transistoren.

Bild 36: Verschiedene Transistorbauformen

Als erstes Halbleiterbauelement haben wir die zweipolige Diode kennen gelernt. Das nächste Halbleiterbauelement ist ungleich vielfältiger in der Anwendung. Dabei hat es nur einen Anschluss mehr als die Diode, aber es kann sehr gut als aktiver Verstärker eingesetzt werden. Halbleiterbauelemente, die drei (oder mehr) Anschlüsse haben, werden Transistoren genannt. Der Begriff ist ein Kunstwort und entstammt den englischen Worten *Trans*fer und Res*istor*. Dieser Begriff wurde gewählt, weil er die Wirkungsweise des neuen Bauelementes am Besten beschreibt: Das Eingangssignal wird von einem niederohmigen Eingangskreis in einen Ausgangskreis mit einem hohen Widerstand übertragen. Generell ist der Transistor ein Halbleiterbauelement, welches einen Verstärkungseffekt durch die Steuerung des Ladungsträgerstromes in einem Halbleiterkristall bewirkt.

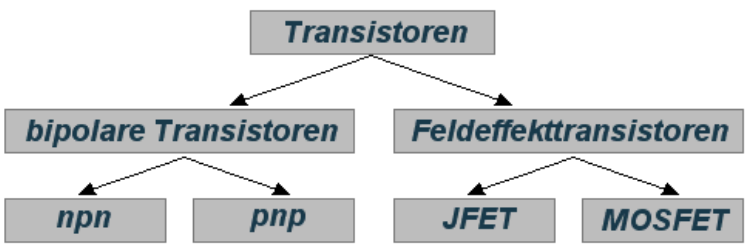

Bild 37: Einteilung von Transistortypen

Bipolare Transistoren

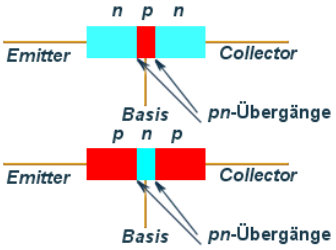

Bild 38: Anordnung des Halbleitermaterials in einem Transistor

Es wurden bisher sehr viele unterschiedliche bipolare Transistortypen entwickelt, doch das Grundprinzip ist bei allen das Gleiche. Grundsätzlich gilt die gleiche Theorie, wie sie schon bei der Halbleiterdiode mit nur einem *pn*-Übergang angewendet wurde. Ein Transistor hat jedoch zwei solcher *pn*- Übergänge und verwendet mindestens drei Anschlüsse, welche

- **Emitter**, der Anschluss, welcher die Ladungsträger aussendet
- **Basis**, der Anschluss, welcher den Ladungsträgerstrom steuert, und
- **Kollektor,** der Anschluss, der die Ladungsträger aufnimmt, genannt werden.

Unterteilung

Transistoren werden auf Grund ihrer Zonenfolge entweder in *npn* oder *pnp*- Transistoren eingeteilt. Der grundsätzliche Aufbau ist somit schon im Namen verankert. So ist der *npn*-Transistor eine Anordnung von einer dünnen *p*- Schicht eingebettet zwischen zwei *n*- Schichten. Analog dazu ist der *pnp*- Transistor eine Anordnung von einer dünnen *n*- Schicht eingebettet zwischen zwei *p*- Schichten. Diese Art Transistoren haben also zwei *pn* Übergänge wie im Bild 39 gezeigt wird. Der eine *pn* Übergang liegt zwischen Basis und Kollektor. Der zweite *pn* Übergang liegt zwischen Basis und Emitter. Beide *pn* Übergänge verbinden drei Halbleiterzonen mit unterschiedlicher Dotierung. Ein bipolarer Transistor besteht also aus drei Halbleiterzonen.

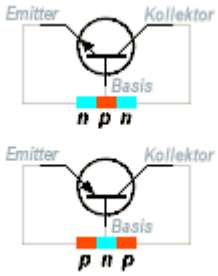

Bild 39: Schaltsymbole von Transistoren

Da Majoritäts- und Minoritätsträger im *n* und *p* dotierten Halbleitermaterial unterschiedlich sind, funktionieren beide Transistortypen auch unterschiedlich. Genauer wird das auf den nächsten Seiten beschrieben.

Bei der Betrachtung von Schaltbildern muss zwischen diesen beiden Typen von Transistoren unterschieden werden. Bild 39 zeigt die unterschiedlichen Symbole. Es gibt da eine Eselsbrücke, die aber in so schlechtem Deutsch formuliert ist, dass ich sie hier nur ungern wiedergebe: ***pnp*** heißt demnach soviel wie „**P**feil **n**ach **P**latte”.

Eine zweite Möglichkeit, sich die Symbole einzuprägen ist der Umstand, dass der Pfeil wie bei einer Halbleiterdiode immer in Bewegungsrichtung der Elektronenlöcher zeigt, also vom *p*-Material weg zum *n*- Material.

Aufbau eines Transistors

Die ersten Transistoren waren alle mit *pn* Übergängen ausgestattet, die wie eine Spitzendiode einem Metallspitzenkontakt konstruiert wurden. Im Unterschied zur Diode hatte der Transistor allerdings zwei solcher Spitzenkontakte wie das Bild 40, Ansicht A) zeigt. Jeder dieser Spitzenkontakte ist zu einem Anschluss herausgeführt und wird als Emitter und Kollektor bezeichnet.

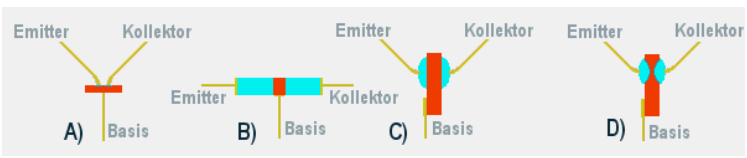

Bild 40: prinzipieller Aufbau von Transistoren

Diese Spitzenkontakttransistoren sind aber mittlerweile technisch veraltet. Sie werden durch Transistoren ersetzt, die in allen Beziehungen weitaus günstigere Eigenschaften haben und sich auch besser herstellen lassen. Monokristalline Transistoren haben ein sehr viel besseres Rauschverhalten, verarbeiten höhere Leistungen, haben höhere Stromverstärkungen und sind spannungsfester als die Spitzenkontakttransistoren. Die komplizierteste Technologie weist der Transistor aus einem gewachsenen Kristall (Ansicht B) auf, da hier die dünne Basisschicht durch zweimaligen Wechsel des flüssigen Halbleitermaterials wachsen muss. Wie bei einer Diode kann das unterschiedlich dotierte Halbleitermaterial aber auch angeschmolzen (Ansicht C) oder in das Basismaterial hineindiffundiert (Ansicht D) werden.

Bild 41: Das Innere eines Silizium-Planar-Transistors

Trotz der unterschiedlichen Herstellungstechnologien ist ein Faktor bei der Herstellung wesentlich: die Qualitätskontrolle. Bei der Herstellung von Transistoren ist die Ausschussrate immer noch extrem hoch. Selbst geringste Schwankungen z.B. in der Umgebungstemperatur hat bei der Herstellung von Transistoren einen wesentlichen Einfluss auf die elektrischen Eigenschaften des Produktes. Auch danach muss der Transistor vorsichtig behandelt werden, um eine lange Lebensdauer zu realisieren. Deshalb werden bei Transistoren:

- die Elektroden mit dünnen, meist goldenen Anschlussdrähten („Bond-Drähte”) an den Lötanschlüssen „verbondet”,
- der Kristall mit einem speziellen Gehäuse vor mechanischen Einflüssen geschützt und
- zum Schutz vor Verschmutzung versiegelt.

Der npn- Transistor

Der in Durchlassrichtung vorgespannte *pn*- Übergang befindet sich in einem niederohmigen Stromkreis: das heißt, schon bei kleinen Spannungen fließt ein recht großer Strom. Dagegen ist der in Sperrrichtung vorgespannte *pn*- Übergang Teil eines hochohmigen Stromkreises. Gemäß der Formel $P = I^2 \cdot R$ ist also bei konstantem Strom von einer höheren Leistung auszugehen. Wenn also ein Strom durch den in Durchlassrichtung vorgespannten *pn*- Übergang einen gleich großen Strom durch den in Sperrrichtung vorgespannten *pn*- Übergang verursacht, dann wird von diesem Kristall eine Leistungsverstärkung des Eingangssignals erwartet.

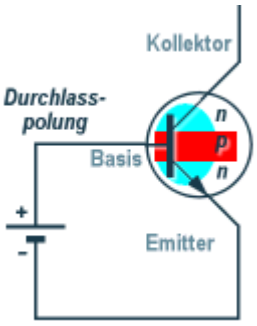

Bild 42: Der in Durchlassrichtung vorgespannte *pn*- Übergang eines *npn* Transistors

Das waren die Vorstellungen der Erfinder des Transistors im Jahre 1948 und in der Folge wurde der *npn* Transistor entwickelt. Diese Entwicklung wollen wir jetzt hier gedanklich nachvollziehen.

Wie bei dem *pn*- Übergang einer Diode haben die beiden *n*- dotierten Halbleiterschichten des Transistors eine Anzahl freier Elektronen als Ladungsträger. Die dünne *p*- dotierte Halbleiterschicht des Transistors hat dagegen als Ladungsträger die Elektronenlöcher. Physikalisch finden hier an jedem *pn*- Übergang die gleichen Vorgänge statt, wie sie schon bei der Halbleiterdiode beschrieben wurden. Es entsteht also durch Diffusion und gleichzeitiger Rekombination der Ladungsträger im Grenzgebiet eine Raumladungszone, also eine hochohmige Sperrzone, deren Widerstand durch verschiedene Vorspannungspolung verändert werden kann. Um den Transistor als Verstärkerbaustein nutzen zu können, muss die Größe der Raumladungszonen durch unterschiedliche Vorspannungen modifiziert werden. Der erste *pn*- Übergang (Basis-Emitter) wird in Durchlassrichtung (also niederohmig) betrieben, der zweite *pn*- Übergang (Basis-Kollektor) wird in Sperrrichtung (also hochohmig) betrieben. Die Buchstaben der Dotierung kann hier als Hilfe verwendet werden, um eine falsche Polung zu vermeiden:

Dabei werden die Anschlüsse des Transistors immer in der Reihenfolge „Emitter-Basis-Kollektor” betrachtet. Wie das Bild 43 zeigt, hat der Emitter, der durch den ersten Buchstaben der ***npn*** Zonenfolge gekennzeichnet ist, gegenüber der Basis ein **n**egativeres Potential. die Basis (zweiter Buchstabe) ist also **p**ositiver und der Kollektor wieder **n**egativer vorgespannt. (Da sich die Kollektorspannung aber mit der Basisspannung überlagert, muss für die geforderte Sperrpolung der Kollektor eine sehr viel größere positive Spannung bezogen zum Emitter haben.)

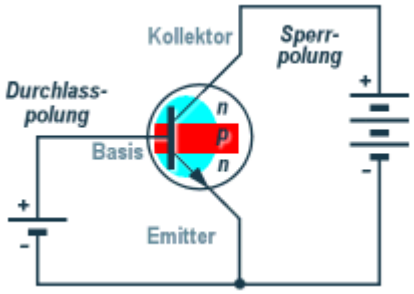

Bild 43: Die Spannungen am *npn* Transistor

pn- Übergang in Durchlasspolung

Bei der Betrachtung der Diode war es noch unwichtig, aber hier muss man für das Verständnis der Funktion wissen, dass das *n*- dotierte Halbleitermaterial sehr viel mehr Störstellen (also Fremdatome) hat als das *p*- dotierte Halbleitermaterial. Das ermöglicht im *n*- dotierten Halbleitermaterial einen größeren Strom durch die Majoritätsträger (hier die freien Elektronen), als die Majoritätsträger des *p*- dotierten Halbleitermaterials (hier die Elektronenlöcher) aufnehmen können. Die Basis wird also mit zusätzlichen freien Elektronen aus dem *n*- dotierten Halbleitermaterial des Emitters „überschwemmt”.

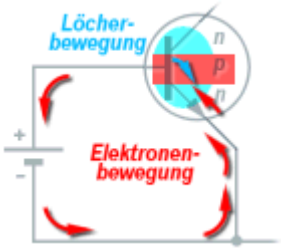

Bild 44: Strom durch den *pn*-Übergang in Durchlasspolung

Der Strom wird durch freie Elektronen aus dem Minus-Pol der Batterie hin zum *n*- dotierten Halbleitermaterial realisiert. Auch im *n*- dotierten Halbleitermaterial des Emitters erfolgt der Stromfluss durch die freien Elektronen. Jedes freie Elektron, welches in die *p*- dotierten Halbleiterzone der Basis eindringt, füllt dort ein Loch. Gleichzeitig verlässt am Basis-Anschluss ein Elektron das Halbleitermaterial und hinterlässt ein Elektronenloch. Diese Löcher sind positive Ladungsträger und bewegen sich (wie schon im Modell gezeigt) entgegengesetzt zum Elektronenstrom. Der Elektronenstrom verlässt den Transistor am Basisanschluss und fließt zurück zur Batterie.

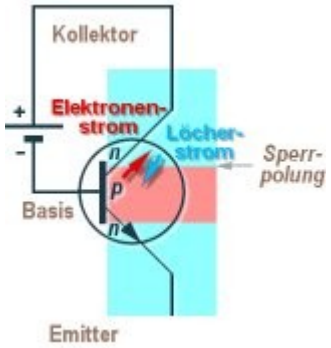

Bild 45: Der in Sperrrichtung vorgespannte *pn*- Übergang eines *npn* Transistors

pn- Übergang in Sperrpolung

Der zweite *pn*- Übergang befindet sich zwischen Basis und Kollektor (Bild 45) und ist in Sperrrichtung vorgespannt. Es können also außer dem sehr geringen Sperrstrom keine Elektronen den *pn*- Übergang passieren. Aber dieser Sperrstrom wird durch die Minoritätsträger verursacht. (Zur Erinnerung: Minoritätsträger sind im *n*- dotierten Halbleitermaterial die Elektronenlöcher und im *p*- dotierten Halbleitermaterial die Elektronen.) Und genau dieser Sperrstrom hat hier im Transistor eine entscheidende Bedeutung.

Wechselbeziehung zwischen den *pn*- Übergängen

Im Bild 46 erhalten die Batterien für die Vorspannung besondere Namen, die vor allem in Datenblättern eine Symbolwirkung erhalten. So ist V_{CC} die Kollektorspannung und V_{BB} die Basisvorspannung. V_{BB} ist übrigens immer sehr viel kleiner als V_{CC}. Die Kollektorspannung liegt meist um die 6 Volt.

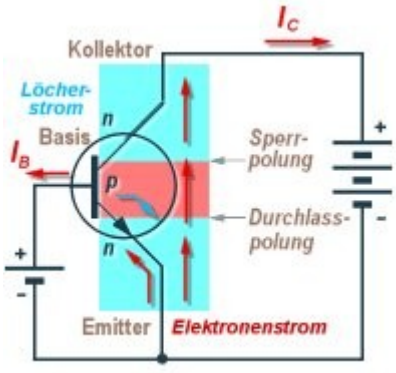

Bild 46: ein relativ kleiner Basisstrom bewirkt einen relativ großen Kollektorstrom

In der äußeren Beschaltung wird der Strom ausschließlich durch freie Elektronen realisiert. Aus beiden Stromkreisen fließt der Elektronenstrom von den Batterien zum Emitter

aus *n*- dotiertem Halbleitermaterial (I_E). Da auch hier die Elektronen die Majoritätsträger sind, ändert sich hier gegenüber dem Stromfluss im Leiter nichts. Erst nach dem *pn*- Übergang wird im *p*- dotiertem Halbleitermaterial der Strom durch die dortigen Majoritätsträger (also die Elektronenlöcher) übernommen.

Diejenigen Elektronen, die nun durch Rekombination die Löcher im *p*- dotierten Halbleitermaterial füllen, sind allerdings nun für einen Kollektorstrom verloren. Wir sprachen schon mal davon, dass die Basis mit zusätzlichen freien Elektronen aus dem *n*- dotierten Halbleitermaterial des Emitters „überschwemmt” wird. Da diese Halbleiterzone aber extrem dünn und vor allem schwach dotiert ist, werden nur wenige freie Elektronen aus dem *n*-dotierten Halbleitermaterial zur Rekombination benötigt. Die meisten Elektronen gelangen so unter den Einfluss des starken elektrischen Feldes der Kollektorspannung, überwinden somit die Sperrzone und erzeugen so den Kollektorstrom! Und wenn die Elektronen einmal im *n*-dotierten Halbleitermaterial des Kollektors angekommen sind, dann haben wir es wieder mit dem normalen Elektronenstrom zu tun und messen einen Kollektorstrom (I_C).

Zweckmäßigerweise ist die Kollektorzone sehr viel größer als die Basiszone. Das hat erstens den Vorteil, dass mehr Ladungsträger aufgenommen werden können und zweitens erhöht das auch die Wärmeleitfähigkeit des Kollektors, der somit mehr Strom aufnehmen kann, ohne gleich thermisch zerstört zu werden.

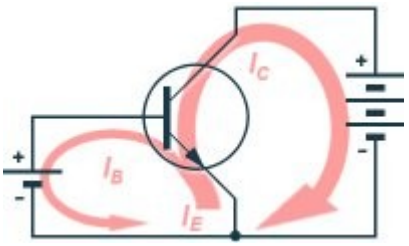

Bild 47: Ströme im *npn* Transistor

Zusammenfassend fließen alle Transistorströme durch den Emitteranschluss. Prozentual ist davon etwa 2 bis 5 % der Anteil des Basisstromes (I_B) und der Rest ist der Kollektorstrom (I_C). Es gilt:

$$\mathbf{I_E = I_B + I_C}$$

Der Emitterstrom teilt sich also in den Basisstrom und den Kollektorstrom. Der Basisstrom verursacht den Kollektorstrom. Kleine Änderungen des Basisstromes haben eine sehr viel größere Änderung des Kollektorstromes zur Folge.

Der pnp- Transistor

Prinzipiell arbeitet ein *pnp* Transistor genauso wie ein *npn* Transistor. Aber da die Zonenfolge anders ist, d.h. Emitter, Basis und Kollektor sind gegenüber dem *npn* Transistor entgegengesetzt dotiert, fließt der Strom also mittels anderer Ladungsträger! Die Majoritätsträger im *pnp* Transistor sind die Elektronenlöcher. Aber um diese Löcherleitung überhaupt zu ermöglichen, müssen auch die Vorspannungen umgepolt werden. Den Anschluss der Spannungen zeigt das Bild 48.

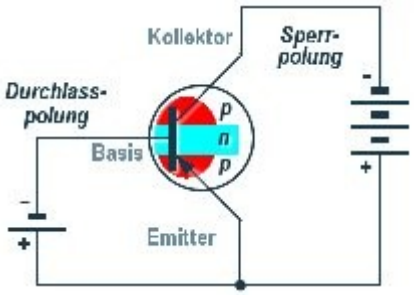

Bild 48: Ein *pnp* Transistor mit seinen Vorspannungen

Hier kann man auch genau das gleiche Verfahren anwenden, sich die richtige Anschlusspolung zu merken, wie beim *npn* Transistor. Wieder werden die Anschlüsse des Transistors in der Reihenfolge „Emitter-Basis-Kollektor” betrachtet. Wie das Bild 48 zeigt, hat der Emitter, der durch den ersten Buchstaben der ***p**np* Zonenfolge gekennzeichnet ist, gegenüber der Basis ein **p**ositiveres Potential. die Basis (zweiter Buchstabe) ist also **n**egativer und der Kollektor wieder **p**ositiver vorgespannt. (Da sich die Kollektorspannung wieder mit der Basisspannung überlagert, muss für die geforderte Sperrpolung der Kollektor eine sehr viel größere negative Spannung bezogen zum Emitter haben.) Innerhalb des *pnp* Transistorkristalls ist überwiegend die Löcherleitung für den Stromfluss verantwortlich. Außerhalb des Transistorkristalls liegt dagegen ein reiner Elektronenstrom vor.

pn Übergang in Durchlasspolung

Die positive Spannung am Emitter zieht die freien Elektronen aus der Basis an und die negative Spannung an der Basis stößt die Elektronen ab, die also in Richtung Emitter fließen. Kommt ein Elektron im *p*-dotierten Halbleitermaterial des Emitters an, so wird es dort sofort ein Elektronenloch besetzten, d.h. rekombinieren. Gleichzeitig verlässt ein Elektron am Anschluss des Emitters den Halbleiterkristall, fließt zur Batterie und erzeugt somit den Basisstrom (I_B).

pn Übergang in Sperrpolung

Bei dem in Sperrpolung betriebenen *pn* Übergang verhindert die gegenüber der Basis negativere Spannung des Kollektors einen Stromfluss durch die Majoritätsträger.

Jedoch bewirkt die gleiche negative Spannung einen geringen Sperrstrom durch die Minoritätsträger, hier in der Basis den Elektronenlöchern. Diese Ladungsträger überwinden den *pn* Übergang von der Basis zum Kollektor. Da diese Löcherleitung aber eben doch durch Elektronen bewirkt wird, die sich in entgegengesetzter Richtung bewegen, kommt ein messbarer Stromfluss zustande, der aber auf Grund der geringen Anzahl der Minoritätsträger nur im Mikroampere-Bereich liegt.

Zusammenwirken beider *pn* Übergänge

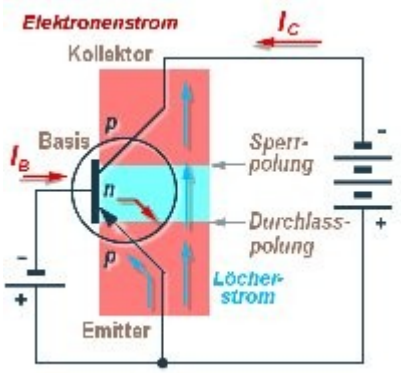

Bild 49: Funktion eines *pnp*-Transistors

Das Zusammenwirken der beiden *pn*- Übergänge ist ähnlich dem *npn*- Transistor, aber mit dem Unterschied, dass hier im *p*- dotierten Halbleitermaterial des Emitters und des Kollektors die Majoritätsträger eben die Elektronenlöcher sind. Deshalb verdrängt der positiv vorgepannte Emitter die Elektronenlöcher in Richtung Basis. Dort angekommen, rekombinieren die Elektronenlöcher mit den freien Elektronen der Basis. Aber da wie schon gesagt, diese Basis eine geometrisch sehr dünne Schicht ist, werden weit über 90% der Ladungsträger durch die sehr hohe negative Spannung (V_{CC}) des Kollektoranschlusses angezogen und erreichen somit nicht den Basisanschluss. Und für jedes Elektronenloch, was am Kollektoranschluss ankommt, wird ein Elektron aus der Batterie geliefert, welches im Endeffekt einen relativ großen Elektronenstrom vom Kollektor zum Emitter bewirkt.

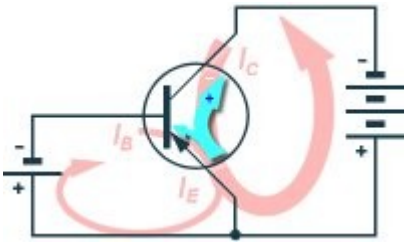

Bild 50: Ströme im *pnp*- Transistor

Trotzdem der Elektronenstrom außerhalb des Halbleiterkristalls eines *pnp* Transistors entgegengesetzt dem Elektronenstrom (ebenfalls außerhalb des Halbleiterkristalls) eines *npn* Transistors ist, fließen in beiden Transistortypen die Majoritätsträger immer vom Emitter zum Kollektor! Auch beim *pnp* Transistor addieren sich die Ströme des Basisstromkreises (I_B) und des Kollektorstromkreises (I_C) zum gemeinsamen Emitterstrom (I_E). Auch hier bewirkt ein relativ kleiner Basisstrom, dass sehr viel mehr Majoritätsträger den ersten *pn* Übergang überwinden können, dann zum Kollektor abwandern und somit einen sehr viel größeren Kollektorstrom verursachen, dessen Größe durch den kleineren Basisstrom geregelt wird.

Junction- Feldeffekttransistoren

Obwohl die bipolaren (*npn*/*pnp*) Transistoren die Entwicklung der Elektronik revolutioniert haben, so haben sie doch einen entscheidenden Nachteil. Die niederohmige Basis-Emitterstrecke bringt in der Verstärkertechnik Anpassungsprobleme mit sich, da sie z.B. hochohmige Schwingkreise stark belastet und so in ihrer Güte verschlechtert. Im Gegensatz zu dem bipolaren Transistor, dessen Verstärkung durch einen Basis*strom* geregelt wird, wird in einem **F**eld**E**ffekt**T**ransistor (**FET**) zur Steuerung des Drain-Source- Stroms ein elektrostatisches Feld, also eine Gate-Spannung verwendet.

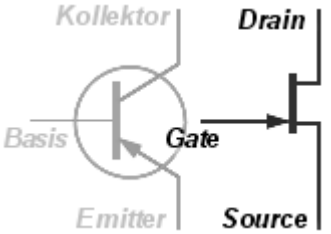

Bild 51: Vergleich der Schaltbildsymbole bipolarer Transistor und Feldeffekttransistor

Eine Art Feldeffekttransistor, den **J**unction **FET** (**JFET**) mit seinen Anschlüssen zeigt das Bild 51 im Vergleich zu einem bipolaren Transistor. Der „Gate”- Anschluss entspricht in seiner Funktion der Basis, die „Source” und der „Drain” dem Emitter und dem Kollektor des bipolaren Transistors.

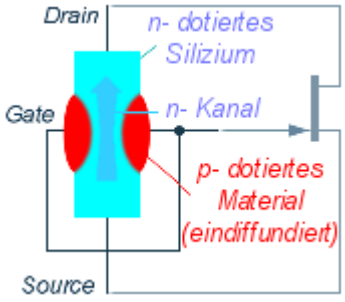

Bild 52: schematischer Aufbau eines JFET

Bild 52 zeigt den schematischen Aufbau eines JFET. Das Substrat besteht aus *n*- dotiertem oder *p*- dotiertem Halbleitermaterial (meist ein Siliziumplättchen). In diesen Träger werden beidseitig Perlen aus entgegengesetzt dotiertem Halbleitermaterial eindiffundiert. Beide Perlen werden elektrisch miteinander verbunden und bilden den „Gate”-Anschluss. Durch diese beiden Perlen wird der Querschnitt des Trägermaterials zu einem schmalen Kanal verkleinert. Im Bild 52 besteht dieser Kanal aus *n*- dotiertem Material, deswegen wird dieser JFET auch *n*- Kanal JFET genannt.

In einem *p*- Kanal JFET ist das Trägermaterial und somit der Kanal aus *p*- dotiertem Halbleitermaterial, während der „Gate”- Anschluss aus *n*- dotiertem Material besteht. Wie bei den bipolaren Transistoren unterscheiden sich beide Typen durch unterschiedliche Polarität der Spannungen, welches im Schaltbildsymbol durch die Pfeilrichtung (immer in Richtung des *n*- dotierten Materials!) ausgedrückt wird. Das heißt, bei einem *n*- Kanal JFET zeigt der Pfeil in Richtung des Drain- Source- Kanals und bei einem *p*- Kanal JFET zeigt der Pfeil davon weg in Richtung Gate- Anschluss.

Arbeitsweise

Das Schlüsselwort für die Funktion wurde oben schon genannt: der Drain- Source- Kanal, dessen Querschnitt durch die an dem Gate- Anschluss angelegte Spannung gesteuert wird, wie bei genauem Hinsehen in den Bildern 52 und 53 zu erkennen ist.

Im Bild 53 liegt der Gate- Anschluss und der Source- Anschluss auf gleichem Potential, hier auf Masse. Durch die Spannung zwischen Drain und Source fließt ein Strom durch den Halbleiterkristall. Unter diesen Spannungsbedingungen ist der typische Widerstand zwischen Drain und Source ungefähr 500 Ω. Das in diesen Stromkreis geschaltete Milliamperemeter zeigt hier also bei einer Drainspannung (V_{DD}) von 5 V einen Strom (I_D) von etwa 10 Milliampere an. Ohne Ansteuerung des Gate- Anschlusses ist der JFET also leitend.

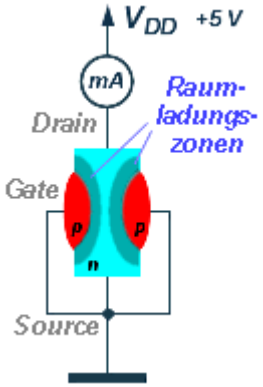

Bild 53: JFET ohne Gate-Vorspannung

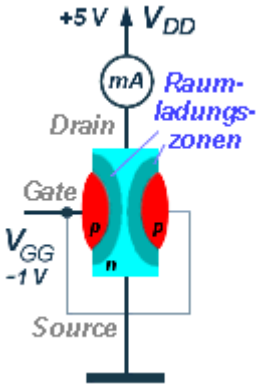

Bild 54: JFET mit in Sperrrichtung geschalteter Gate-Vorspannung

Im Bild 54 wird an den Gate- Anschluss eine in Sperrrichtung gepolte Vorspannung (V_{GG}) von hier einem Volt geschaltet. Durch diese Vorspannung werden die Raumladungszonen, also die Sperrschichten der *pn*- Übergänge beider Perlen wie schon bei der Kapazitätsdiode beschrieben, vergrößert, das heißt, der effektive Leitungsquerschnitt des *n*- Kanal verringert sich, weil weniger Ladungsträger zur Verfügung stehen. Dadurch wird auch der Widerstand des *n*- Kanals vergrößert und es fließt ein geringerer Strom.

Eine Vergrößerung der negativen Vorspannung wird diesen Effekt verstärken und es kann bei weiterer Vergrößerung der negativen Vorspannung sogar der Drain- Source- Strom völlig zum Erliegen kommen. Diese Spannung ist Typabhängig und wird „Pinch-off”- Spannung genannt. Die Vorspannung im Bild 54 von -1 Volt ist aber zu gering, es fließt also immer noch ein Strom. Der ist aber von den ursprünglich 10 mA auf etwa 5 mA gesunken. Der Innenwiderstand des JFET muss also von 500 Ω auf etwa 1 kΩ gestiegen sein.

Diese Messung zeigt, dass ein JFET ähnlich wie ein bipolarer Transistor arbeitet, auch wenn der Aufbau sich von diesem grundsätzlich unterscheidet. Aber wie schon gesagt, liegt der Vorteil eines Feldeffekttransistors in seiner hohen Eingangsimpedanz. Der *pn*- Übergang von Gate zur Source wird schließlich in Sperrrichtung betrieben: es fließt also ein Sperrstrom, der hier bei etwa 0,5 µA liegt. Nach dem Ohmschen Gesetz beträgt also der Eingangswiderstand (1 V / 0.5 µA) hier 2 MΩ. Im Gegensatz dazu würde bei ähnlichen Bedingungen im bipolaren Transistor ein Basisstrom von bis zu einem Milliampere fließen: der Innenwiderstand also bei etwa 1 kΩ liegen.

Die bisher am Beispiel eines *n*- Kanal JFET erläuterte Funktion gilt in ähnlicher Form auch für einen *p*- Kanal JFET. Da aber dessen Trägermaterial und die eindiffundierten Gate- Anschlüsse aus entgegengesetzt dotiertem Halbleitermaterial bestehen, müssen auch die Betriebsspannungen umgepolt werden. Der *p*- Kanal JFET benötigt also eine negative Drain- Spannung (V_{DD}) und eine positive Vorspannung an dem Gate- Anschluss. Der Strom fließt im *p*-Kanal JFET somit von Drain zur Source.

Anwendung eines JFET als Verstärker

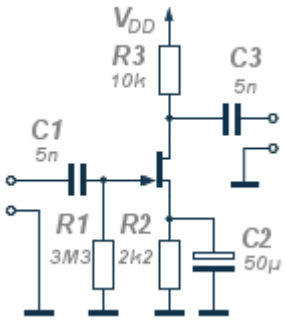

Bild 55: Verstärkerschaltung mit einem JFET

Im Bild 55 wird eine Standardschaltung für eine Verstärkerstufe mit einem *n*- Kanal JFET vom Typ BF245A gezeigt. Diese Verstärkerstufe zeichnet sich durch einen hohe Eingangsimpedanz und eine hohe Spannungsverstärkung aus. Die Funktion dieser Verstärkerstufe ist vergleichbar mit einem Röhrenverstärker mit einer Triode. C1 und C3 sind die Eingangs- und Ausgangskondensatoren zur gleichstrommäßigen Entkopplung. R1 ist der Gate- Ableitwiderstand. Er legt das gleichstrommäßige Potential des Einganges auf 0V (Masse) und verhindert eine zu große statische Eingangsspannung. Er gehört ebenfalls zum Entladestromkreis für den Eingangskondensator C1. Der Spannungsabfall über R2 mittels des Ruhestromes erzeugt die negative Vorspannung für das Gate, indem die Source auf ein positiveres Potential gelegt wird. C2 hat eine sehr große Kapazität und verhindert, dass die die schnellen Stromschwankungen während der Signalverstärkung sich auf die Vorspannung auswirken. (Fehlte er, würde R2 auch eine Stromgegenkopplung verursachen und der Verstärkungsfaktor würde stark verringert.) R3 ist der Arbeitswiderstand, der wie bei allen Verstärkerschaltungen den Ruhestrom und somit den Arbeitspunkt bestimmt.

Die Phasenänderung von 180° ist hier die gleiche, wie bei einer Emitter-Basis Stufe eines bipolaren Transistors. Der Grund für diese Phasenänderung ist sehr einfach: Bei einer Änderung des Eingangssignals in positive Richtung überlagert sich diese Spannung mit der negativen Vorspannung - die Vorspannung wird also kleiner. Somit verkleinert sich die Sperrschicht im JFET und somit dessen Innenwiderstand. Es fließt bei gleicher Drain- Spannung also ein größerer Strom als der Ruhestrom. Ein größerer Strom verursacht aber einen größeren Spannungsabfall über den Arbeitswiderstand R3 und das heißt, die Ausgangsspannung sinkt. Das bedeutet eine Phasenänderung von 180° zwischen Eingangs- und Ausgangssignal dieser Verstärkungsstufe.

MOSFET

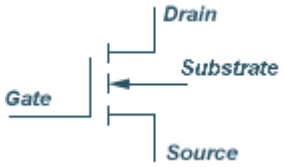

Bild 56: MOSFET Schaltsymbol

MOSFET ist die Abkürzung für **M**etal **O**xide **S**emiconductor (auch: **S**ilicon) **F**ield **E**ffect **T**ransistor . Um der Tatsache Rechnung zu tragen, dass in modernen Prozessen kein Oxyd mehr unter dem Gate verwendet wird, wird auch die neutrale Bezeichnung **IGFET** für **I**nsulated **G**ate **FET** verwendet. Der MOSFET ist ein weiterer Typ Feldeffekttransistor und hat gegenüber dem JFET einige Vorteile. Die Eingangsimpedanz des MOSFETs ist gegenüber dem JFET nochmals erhöht (10 bis 100 MΩ). Diese extrem hohe Eingangsimpedanz bildet keinerlei Belastung mehr für vorgeschaltete Bauteile und macht zusammen mit der hohen Spannungsverstärkung den MOSFET zu einem idealen HF-Verstärkerelement auch für Messgeräte und Laborschaltungen.

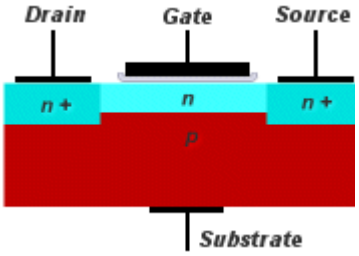

Bild 57: schematischer Aufbau eines *n*- Kanal MOSFETs

Wie auch beim Bipolartransistor gibt es zwei komplementäre Bauformen: *n-Kanal*-MOSFET und *p-Kanal*-MOSFET. Diese können jeweils noch in selbstsperrende (enhancement transistor, „Anreicherungstyp”) und selbstleitende (depletion transistor, „Verarmungstyp”) Bauformen unterschieden werden. Er besitzt mindestens drei Anschlüsse Elektroden: Gate, Drain, Source und bei einigen Bauformen wird der zusätzliche Anschluss Substrat (oder Bulk) nach Außen geführt.) Ein Schaltbildsymbol wird im Bild 56 gezeigt.

Ein MOSFET ist ein spannungsgesteuerter Transistor. Die Spannung zwischen Gate und Source steuert den Stromfluss zwischen Drain und Source. Durch das Gate fließt dabei praktisch kein Strom. Durch diesen Aufbau bilden Gateanschluss, Isolierschicht und Substratanschluss einen Kondensator, der beim Anlegen einer Spannung zwischen Gate und dem Substrat aufgeladen wird. Dabei wandern im Substrat die Minoritätsträger (bei *p*- Silizium- Elektronen) an die Grenzschicht und rekombinieren mit den Majoritätsträgern (bei *p*- Silizium Löcher). Dies wirkt sich wie eine Verdrängung der Majoritätsträger aus und wird „Verarmung” genannt. Ab einer bestimmten Spannung U_{th} (Threshold- Spannung, Schwellspannung) ist die Verdrängung der Majoritätsladungsträger so groß, dass sie nicht mehr für die Rekombination zur Verfügung stehen. Es kommt zu einer Ansammlung von Minoritätsträgern wodurch das eigentlich *p*- dotierte Substrat nahe an der Isolierschicht *n-Kanal*- leitend wird. Dieser Zustand wird starke „Inversion” genannt. Der entstandene dünne *n-Kanal*- leitende Kanal verbindet nun die beiden *n*- Gebiete Source und Drain, wodurch Ladungsträger (beinahe) ungehindert von Source nach Drain fließen können.

Anwendung eines MOSFET als Verstärker

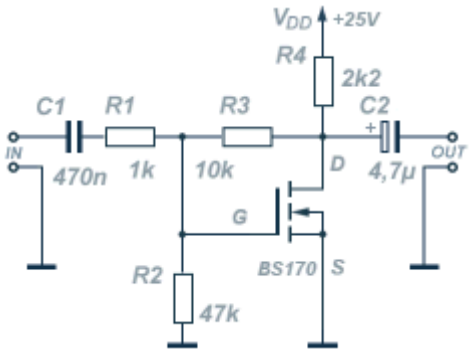

Bild 58: Verstärkerschaltung mit einem MOSFET

Im Bild 58 wird eine Standardschaltung für eine Verstärkerstufe mit einem selbstsperrenden *n*- Kanal MOSFET vom Typ BS170 gezeigt. Diese Verstärkerstufe zeichnet sich durch einen hohe Eingangsimpedanz und einen guten Frequenzgang aus und wird oft als Impedanzwandler eingesetzt. C1 und C2 sind die Eingangs- und Ausgangskondensatoren zur gleichstrommäßigen Entkopplung. R1 und R2 bilden einen Eingangsspannungsteiler und bestimmen den Verstärkungsfaktor. Die Vorspannung für das Gate wird hier durch R3 erreicht. Diese Form wird „dynamische Vorspannung” genannt und bewirkt gleichzeitig eine Spannungsgegenkopplung, die den Frequenzgang verbessert, aber die Verstärkung verringert. R4 ist der Arbeitswiderstand, der wie bei allen Verstärkerschaltungen den Ruhestrom und somit den Arbeitspunkt bestimmt. Auch diese Schaltung bewirkt eine Phasenänderung von 180°, wie schon beim JFET beschrieben.