

**Physik**  
**Elektrizitätslehre**

---

**Halbleiterstrukturen**

Datei Nummer 93252

**Ein Beitrag von  
Daniel Michael Mayer**

Oktober 2007

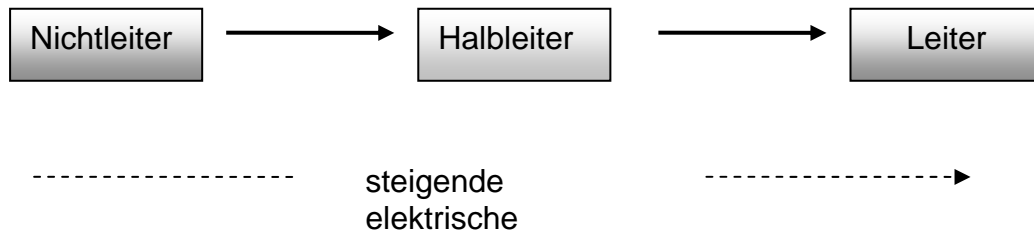
INTERNETBIBLIOTHEK FÜR SCHULMATHEMATIK

[www.mathe-cd.de](http://www.mathe-cd.de)

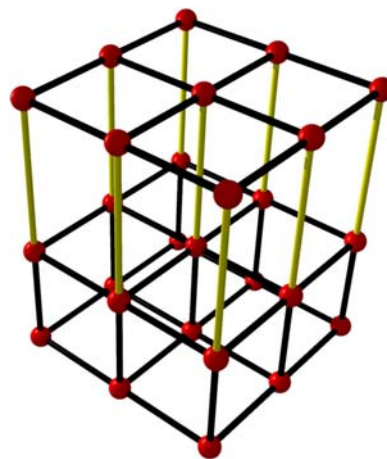
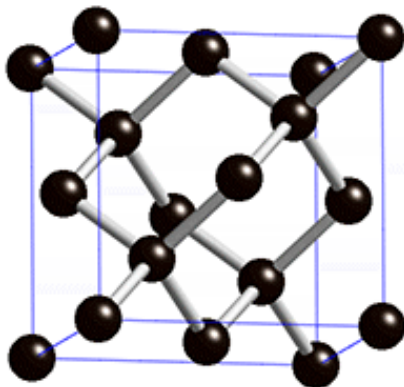
# Halbleiterstrukturen

## 1. Stoffliche Grundlagen

Halbleiter sind zunächst einmal Bauelemente, deren elektrische Leitfähigkeit zwischen denen der Leiter und denen der Nichtleiter liegt.



Der bekannteste Vertreter der Halbleiterstoffe ist **Silizium**. Er wird vor allem aus Quarzsand hergestellt. Weitere wichtige Halbleiterstoffe sind Germanium, Selen und Galliumarsenid. Sie haben alle einen **kristallinen Aufbau**, d.h. die Atome sind räumlich in einem bestimmten Schema angeordnet.



Der Gegensatz zur Kristallstruktur ist die *amorphe Struktur*. Hier haben die Atome keine bestimmten Plätze im Raumgitter, sie liegen ungeordnet vor. Besteht die Kristallstruktur aus verschiedenartigen Atomen (unterschiedlichen Stoffen), so spricht man von einem *Mischkristall*.

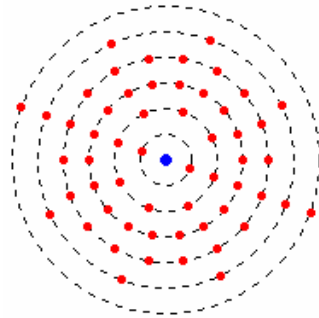
Die Eigenschaften von Stoffen hängen in hohem Maße von der räumlichen Anordnung ihrer Atome ab. So ist Kohlenstoff in amorpher Struktur Ruß und in Kristallstruktur Diamant!

Besteht die Kristallstruktur aus einer ungestörten Gesamtkristallstruktur, spricht man von einem *Einkristall*. Setzt sich der Kristall hingegen aus mehreren Kristallstrukturen zusammen, spricht man von einer *Polykristallstruktur*.

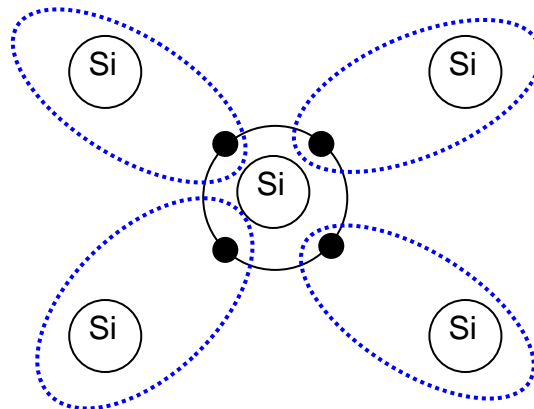
Wichtig zu wissen ist die Tatsache, dass Verunreinigungen des Stoffes mit Fremdatomen die Eigenschaften des Halbleiters stark verändern. Daher ist eine hohe stoffliche Reinheit gefragt, i.d.R. mindestens  $10^{10}:1$  bzgl. der Atome.

Um sich das zu veranschaulichen stelle man sich vor, eine Strecke von 10.000 km, ein Viertel des Erdumfangs, auf 1 mm genau messen zu wollen.

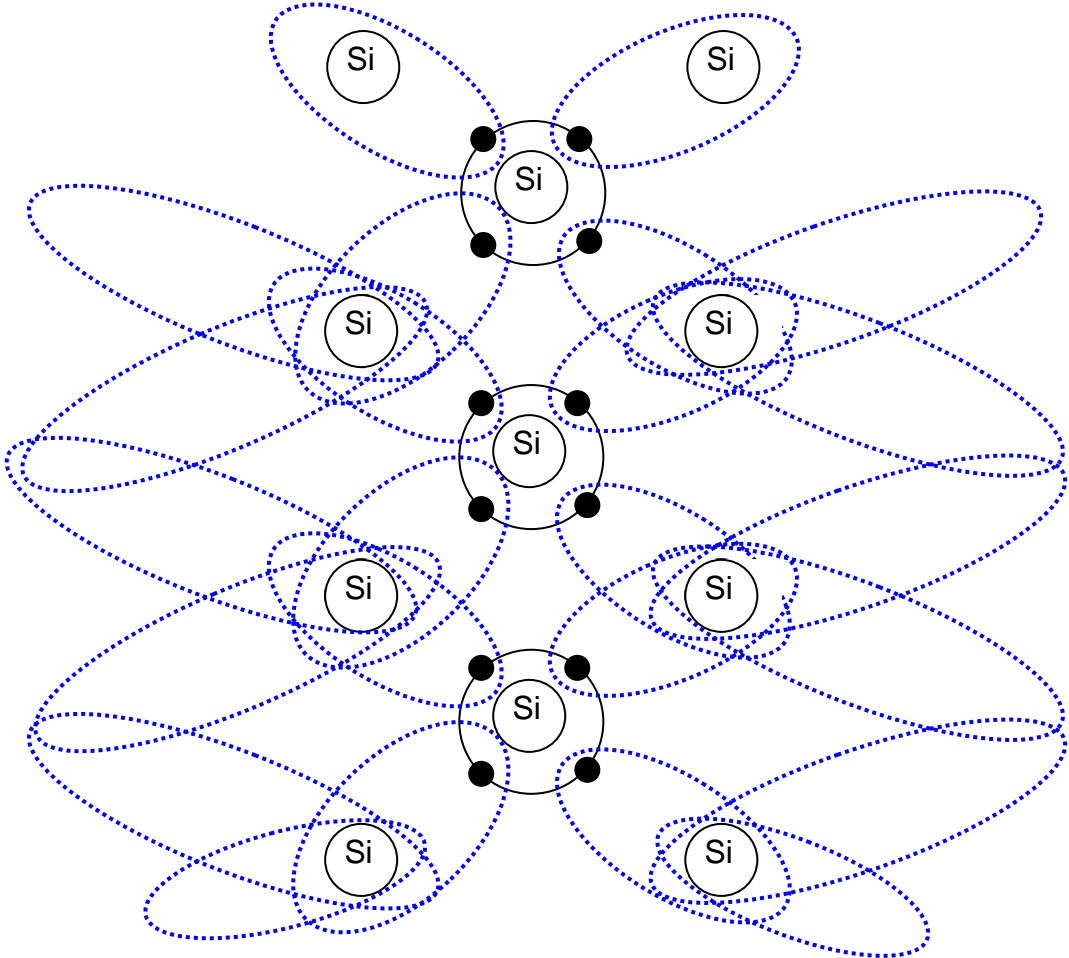
Um die Kristallstruktur von Halbleitern zu betrachten, benötigen wir wieder das uns schon bekannte Atommodell.



Silizium hat 4 Elektronen auf seiner äußersten Schale, die so genannten **Valenzelektronen**. Diese spielen bei der Betrachtung der Verbindungsstruktur zu anderen Atomen eine besonders wichtige Rolle und man ignoriert zumeist den „Rest des Atoms“ einfach ☺ Warum sind die Valenzelektronen so wichtig? Nun, erinnere dich an die Definition eines *Edelgases*. Das sind „gesättigte“ Gase, also solche, die keine Bindungen mehr eingehen, weil sie mit sich selbst völlig zufrieden sind. Und das wiederum sind sie nur, weil all ihre Schalen voll bestückt sind mit Elektronen! Also warum noch mühselig mit anderen Atomen reagieren, wenn man doch selbst nichts mehr davon haben kann? Anders das Silizium. Mit 4 Valenzelektronen ist da noch Platz für 4 weitere, denn 8 passen auf die äußerste Schale. Also geht Silizium Kontakt mit 4 anderen Si-Atomen ein, es hat sozusagen 4 *Bindestellen*. Entsprechend ergibt sich folgende *Bindungsstruktur in der Ebene*:



Und diese Struktur setzt sich natürlich für die obig am Rand stehenden Si-Atome fort. Sie selbst haben ja erst einen Bindungspartner gefunden, also ist ja noch Platz für 3 weitere. So ergibt sich die erwähnte Kristallgitterstruktur des Siliziums.



## 2. Dotierung

Nun fragt man sich sicherlich, was all diese schönen Materialeigenschaften für einen Nutzen in der Elektronik haben sollen. Das führt zum Begriff der **Dotierung**, der schließlich direkt zur Anwendung von Halbleitern, z.B. als Grundstoff für Transistoren, führt.

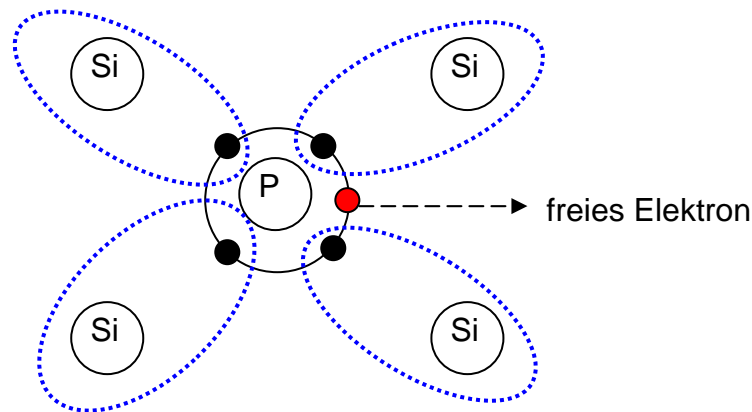
Was passiert bei einem 100% reinen Silizium bzgl. der elektrischen Leitfähigkeit?

Nun, gar nichts. Da alle Valenzelektronen mit Bindungspartner gebunden sind, gibt es keine freien Elektronen und damit keine elektrische Leitfähigkeit!

Nun ja, damit haben wir einen Isolator statt einen Halbleiter erhalten ☹ Auch was feines, doch nicht das was wir ursprünglich wollten. Es ist allerdings möglich, recht gezielt die Leitfähigkeit eines Halbleiters zu beeinflussen, indem wir eine bestimmte Menge *Fremdatome* einfügen. Sinnvoller Weise wählen wir dazu 5wertige oder 3wertige Atome aus, so dass nach den Bindungen mit benachbarten Si-Atomen ein freies Elektron auf der äußersten Schale übrig bleibt bzw. eines zu wenig vorhanden ist.

### 2.1 N-Dotierung

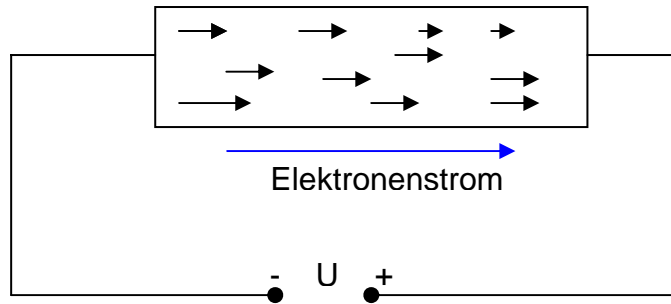
Ein oft verwendetes 5wertiges „Fremdatom“ bzw. **Dotierungsstoff** ist der Phosphor (P). Er besitzt 5 Valenzelektronen, von denen nach der Bindung mit 4 Si-Atomen demnach 1 Elektron ungebunden übrig bleibt. Da Elektronen eine negative Ladung haben spricht man von **n-Dotierung** für negative-Dotierung. Jedes Phosphoratom schenkt dem Halbleiter ein freies Elektron, sozusagen als „Spende“, lateinisch *donare*. **N-Dotierungsstoffe (5wertige Stoffe)** sind demnach **Donatoren**, Elektronenspender.



Aus dem

**Naturgesetz:** Entgegengesetzt geladene Ladungen ziehen sich an.

leitet sich sofort der Elektronenfluss eines n-Silizium-Kristalls ab.



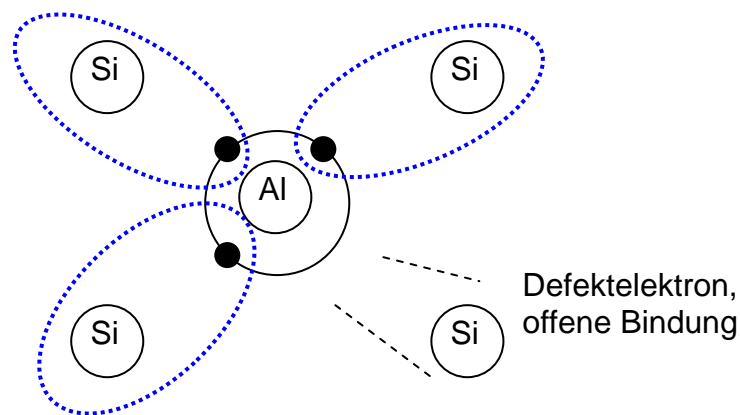
Das ist im Prinzip das Gleich wie bei Metallen.

Auch leicht vorstellbar dürfte die Tatsache sein, dass es mehr freie Elektronen gibt, je höher der Dotierungsgrad des Siliziums ist, je mehr Fremdatome, z.B. Phosphor, dem Si also hinzugefügt wurden. Und je mehr freie Elektronen es gibt, desto größer der Stromfluss. Also

**Je höher der Dotierungsgrad, desto niederohmiger ist das Kristall, desto besser seine Leitfähigkeit.**

## 2.2 P-Dotierung

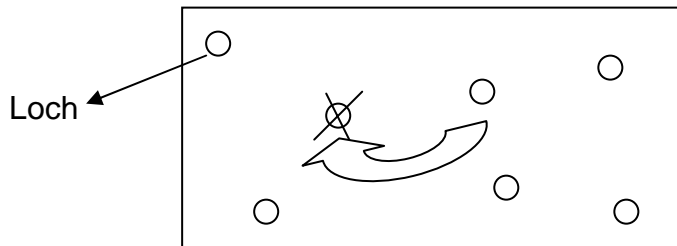
Verwendet man statt den 5wertigen Donaten 3wertige, z.B. Aluminium, Gallium oder Indium, so muss eine Kristallbindung offen bleiben. Es entsteht ein „Bindungsloch“, einfach **Loch** genannt. Da dieses Loch aber ein fehlendes Elektron ist, spricht man auch vom **Defektelektron**.



Stoffe, die ein fehlendes Elektron verursachen, heißen **Akzeptoren** bzw. **p-Donatoren**. Das „nicht gebundene Si-Atom“ ist ständig bereit ein Elektron zu binden, damit es seine Valenzschale voll bekommt. Es ist sozusagen ein „Elektronenloch“, da jedes vorbeikommende Elektron gerne gebunden wird. So wird der Begriff des Akzeptors und des Lochs plausibel.

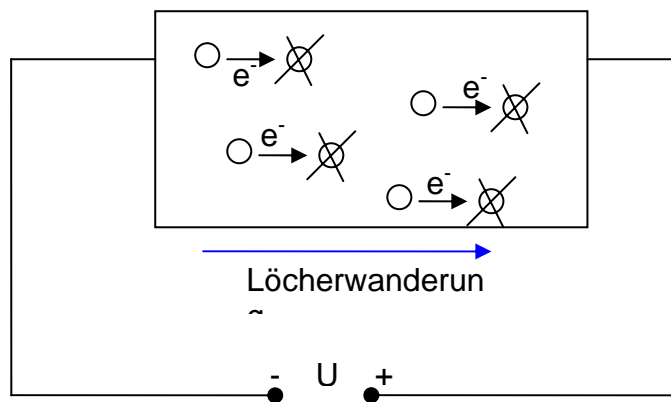
Die Elektronen die „vorbei kommen“ müssen ja anderswo fehlen und erzeugen dort ein neues Loch! So betrachtet haben wir es hier mit einer „Löcherwanderung“ zu tun. Verlässt jedoch ein Elektron sein Atom, so bleibt ein positiv geladenes Restatom zurück, denn – wir erinnern uns – es gilt ja

**Naturgesetz: Atome sind ohne externe Einflüsse nach außen elektrisch neutral.**

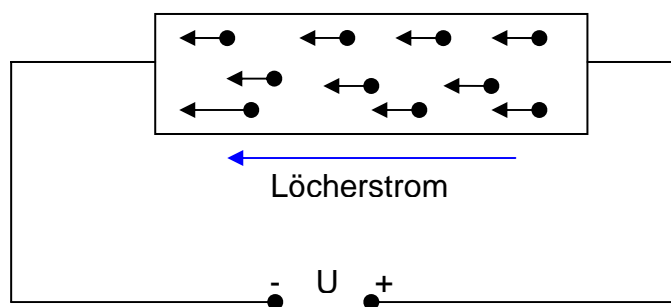


Ein Elektron eines Nachbaratoms wird in die offene Bindung (Loch) gezwungen. Dadurch entsteht ein Loch beim Nachbaratom.

Ist dieses „Wegstehlen“ ohne Spannung noch ungerichtet (Stichwort: Thermodynamik), so erfolgt die Löcherwanderung bei angelegter Spannung gerichtet. Die Elektronen wandern zum +-Pol, die „Wegstehbewegung“ läuft also zum +-Pol hin.



Die Elektronen wandern zum +-Pol, was eine Eliminierung der Löcher in Richtung +-Pol zur Folge hat. Schaut man sich jedoch statt der Elektronen nur die Löcher an, so werden ja in Richtung negativem Pol neue erzeugt, der „Löcherstrom“ läuft also zum Minus-Pol.



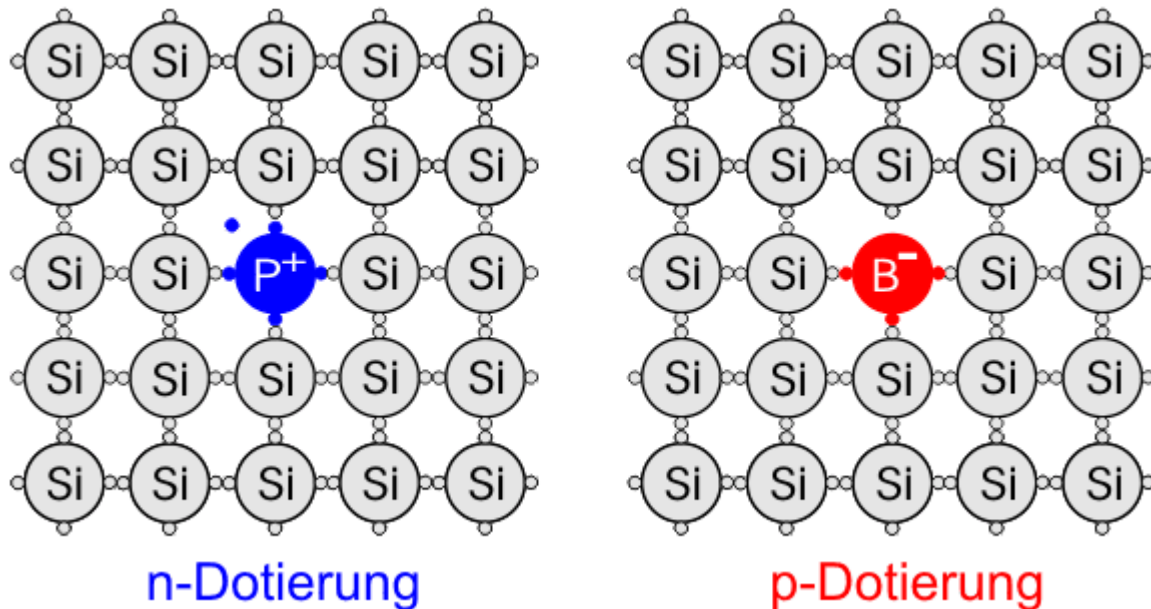
Die Löcher verhalten sich also – da sie ja zum Minus-Pol wandern – wie positive Ladungsträger. Daher:

**Löcher werden als freie positive Ladungsträger aufgefasst.**

Mit Akzeptordotatoren angereichertes Silizium enthält also „positive Ladungen“ und wird demnach **p-Silizium** genannt, mit p für positiv.

**Zusammenfassung:**

Die Ladungsträger, welche durch die Dotierung in den Halbleiter eingebracht werden, heißen **Majoritätsträger**. Das sind also in den n-dotierten Halbleitern die Elektronen und in den p-dotierten die Löcher.



Um es klar zu sagen:

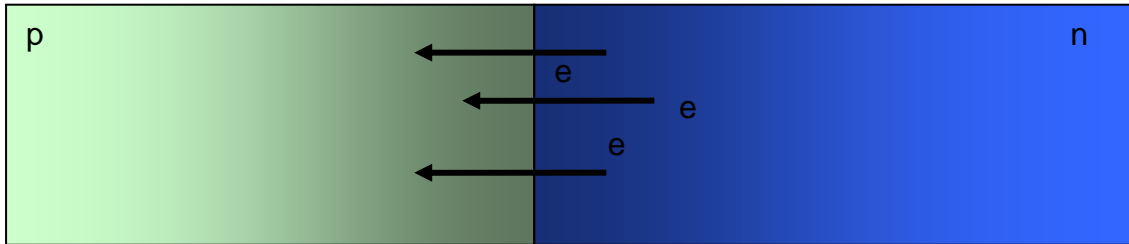
Freie Ladungsträger, egal ob nun Elektronen oder Löcher, sind im Kristall frei beweglich und verleihen ihm die Halbleitereigenschaften, jedoch ist das **Kristall als Ganzes** wiederum **elektrisch neutral!** Die Ladungen werden ja nur innerhalb des Kristalls hin und her geschoben!



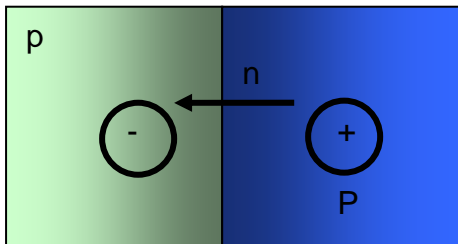
### 3. Grenzschicht

Wir wissen nun, dass man mit Hilfe der Dotierung gezielt die elektrische Leitfähigkeit eines Halbleiters beeinflussen kann. Nun ist man auf die Idee gekommen, doch einfach mal beide Dotierungsvarianten zusammen zu packen und kann überrascht sein, was dann alles passiert ... Das wollen wir uns im Folgenden mal genauer anschauen.

Da ja Ladungsunterschiede ausgeglichen werden (Naturgesetz!) wird die Donatorschicht der n-Zone ihre freien Elektronen in die Akzeptorschicht der p-Zone einspeisen.



So weit so gut. Doch schaut man von wenigen Ladungen auf eine große Zahl von Ladungen, wird man folgendes feststellen.

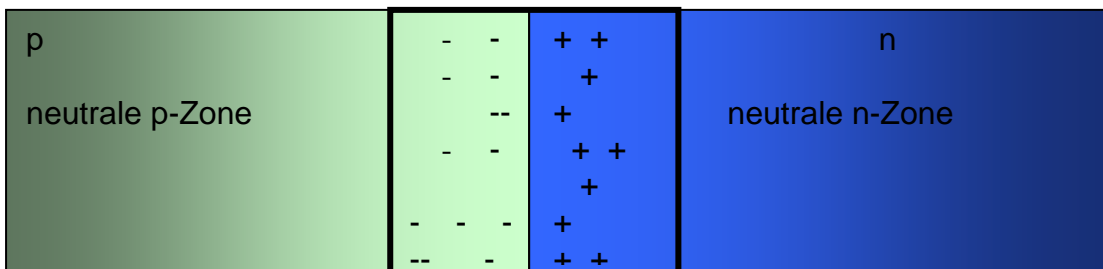


Das Phosphoratom (P) der n-Schicht hat sein überschüssiges Elektron an den Akzeptor in der p-Schicht abgegeben und ist damit positiv geladen. Der Akzeptor hat das Elektron aufgenommen, verfügt also über einen negativen Ladungsträger mehr als „normal“. Das führt zu einer elektrisch negativen Ladung.

Es sind zwei **Ionen** entstanden, ein positiv geladenes Ion und ein negativ geladenes Ion.

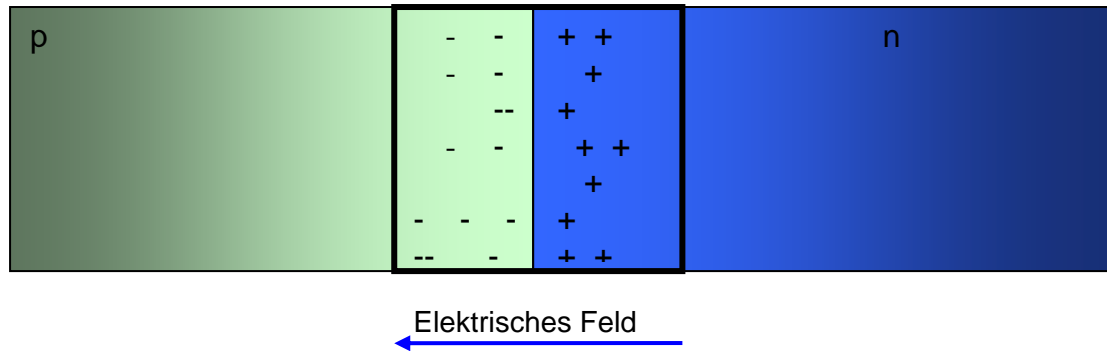
Dieser Prozess der *Ionenbildung* erfolgt am Grenzübergang für sehr viele Atome in kurzer Zeit. Man spricht von **Diffusion** (hindurch wandern).

Dadurch bilden sich zwei geladene Zonen aus, die in der Gesamtheit als **Raumladungszone** bezeichnet wird.



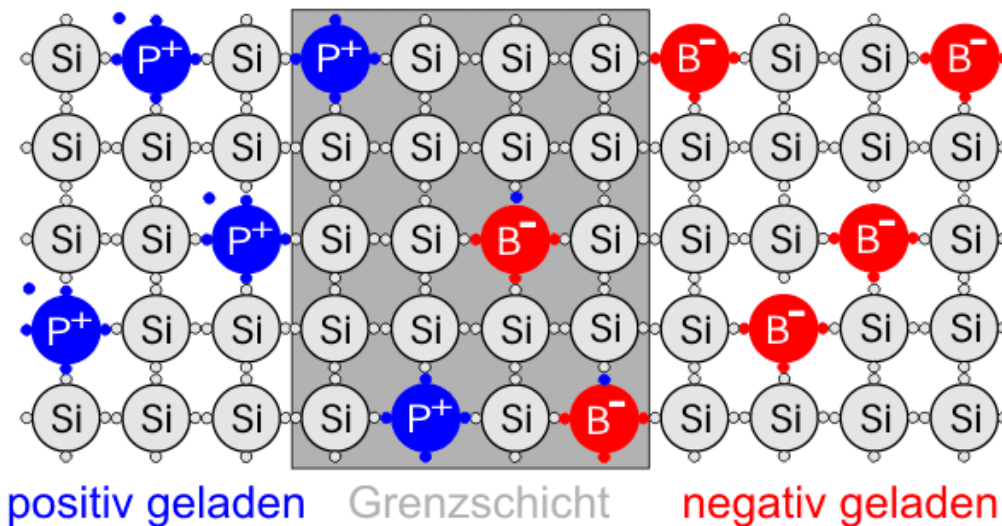
Raumladungszone

Was aber entsteht zwischen entgegengesetzt geladenen Ladungsträgern? Ein **elektrisches Feld**.



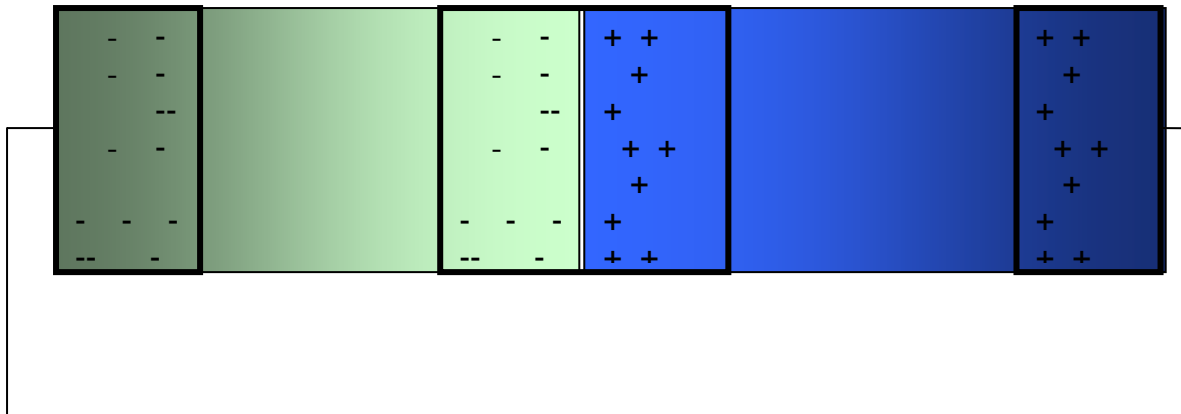
Das führt dazu, dass neu von der n-Zone in die Raumladungszone eintretende Elektronen durch das elektrische Feld abgebremst werden. Dadurch bildet sich mit der Zeit ein Gleichgewicht zwischen der Kraftwirkung des elektrischen Feldes und der Wärmeschwingung aus. Aus diesem Gleichgewichtszustand ergibt sich die Breite der Raumladungszone.

**Mit höheren Temperaturen wird die Raumladungszone breiter.**

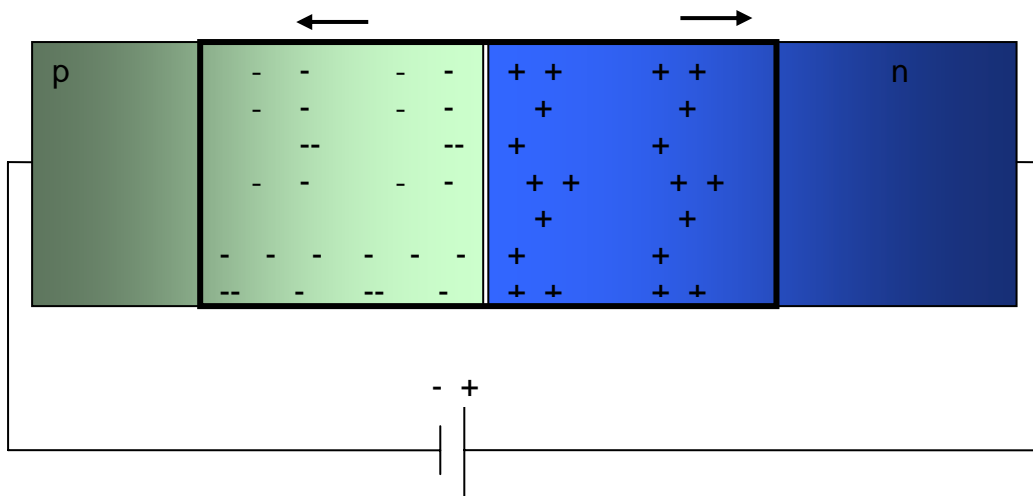


Zwischen Ladungsträgern unterschiedlicher Ladung besteht aber immer auch eine elektrische Spannung. So auch zwischen der positiven und der negativen Seite der Grenzschicht. Sie wird **Diffusionsspannung** genannt. Bei Silizium und Zimmertemperatur beträgt sie etwa 0,7 V, bei Germanium etwa 0,3 V.

Allerdings kann man diese Spannung nicht zur Stromerzeugung nutzen, denn verbindet man den Halbleiter an seinen Anschlüssen mit einer leitenden Verbindung, so baut sich nach den gleichen Prinzipien eine zweite Grenzschicht aus.



Was passiert wenn man eine externe Spannungsquelle anschließt? Schließen wir den negativen Pol an die p-Zone, so werden Elektronen von der Spannungsquelle in die Löcher der p-Zone hineingedrückt, was zu einer Vergrößerung der negativen Raumladungszone führt. Der Pluspol der Spannungsquelle saugt Elektronen aus der n-Zone ab. Diese Elektronen der Donatoren fehlen nun und hinterlassen ein positiv geladenes Ion. Dadurch wird auch der positive Teil der Raumladungszone verbreitert.



Da sich die Raumladungszone stabil ausbildet gelten folgende Aussagen:

**Je breiter die Raumladungszone, desto größer die zwischen den neutralen Kristallzonen herrschende Spannung.**

**Die Raumladungszone enthält keine beweglichen Ladungsträger.**

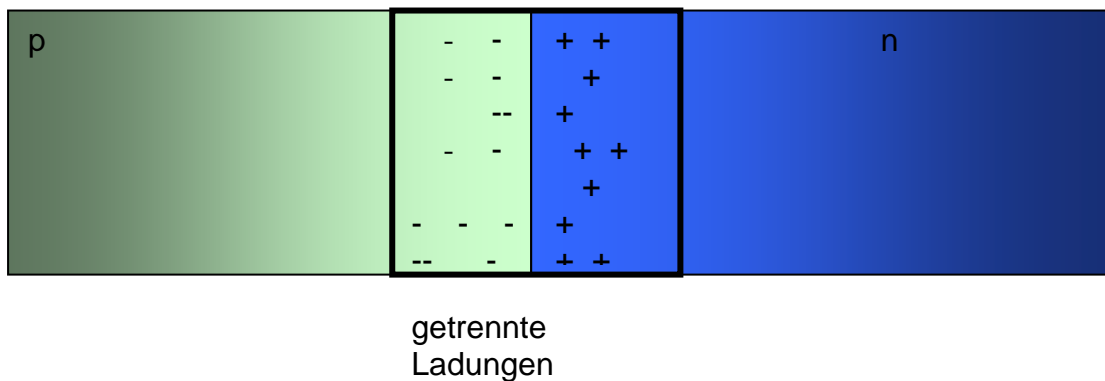
Versucht nun ein Elektron aus der n-Zone in die p-Zone zu gelangen, muss es erst die Raumladungszone überwinden. Dies gelingt ihm aber nicht mehr, die Raumladungszone sperrt die Ladungsträger, sie ist einfach zu breit, die Gegenkraft des elektrischen Feldes zu

stark. Daher spricht man von der Raumladungszone bei dieser Polungsrichtung auch von der **Sperrschicht**.

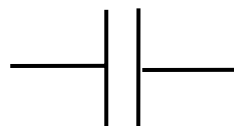
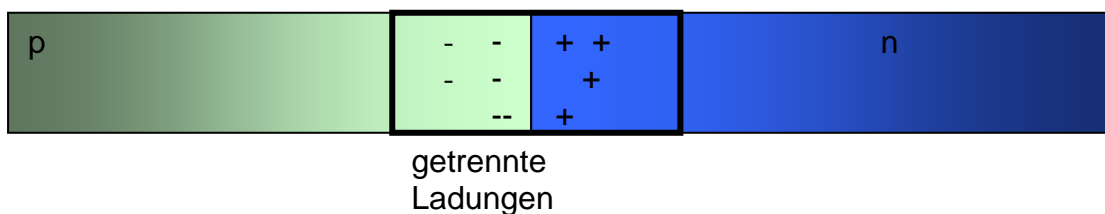
**Der pn-Übergang ist in Sperrichtung gepolt, wenn "Minus-an-p-Zone" liegt.**

Da es aber in jeder Zone noch die Minoritätsträger gibt, die sich ja immer paarweise bilden (wo ein Elektron abwandert entsteht genau ein Loch und umgekehrt), gelingt es diesen wenigen Ladungen die Sperrschicht – noch beschleunigt durch das jetzt in Krafrichtung beschleunigend wirkende elektrische Feld – zu passieren. Also fließt auch in Sperrichtung ein geringer Strom.

Werfen wir noch mal einen Blick auf die Sperrschicht.



Wir haben es mit getrennten Ladungen zu tun. Doch welches Bauteil kann genau das, nämlich "getrennte Ladungen" als wesentliche Eigenschaft aufweisen? Genau, der **Kondensator!**



Prinzip des  
Kondensators

**Eine Raumladung / Sperrschicht hat eine Kapazität.**

Was passiert nun, wenn wir die Spannungsquelle anders herum polen? Genau, die Sperrschicht baut sich ab, bis sie praktisch ganz weg ist, das Bauteil wird sehr niederohmig. Deshalb wird zur Begrenzung des Stromflusses auch ein *Vorwiderstand* mitbeschaltet.

## 4. Zusammenfassung

Wir haben nun also erkannt, dass ein dotierter Halbleiter eine Sperrschicht aufbaut. Schließt man selbigen an eine externe Spannungsquelle an, so wird sie entweder sehr hochohmig oder sehr niederohmig, je nach Polung. Sie sperrt also praktisch in die eine Richtung und leitet sehr gut in die andere Richtung. Dieses Prinzip ist so einfach wie mächtig und wird vielfältig genutzt. Man hat sich einen (mikro)elektronischen Schalter gebaut!