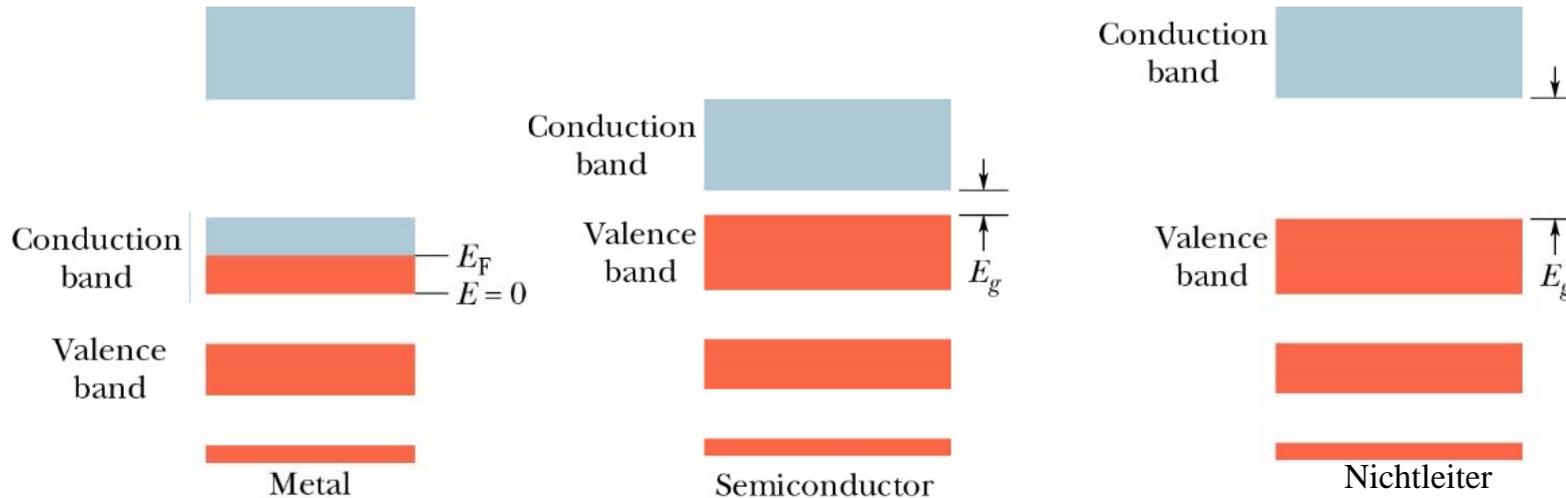


An welche Stichwörter von der letzten Vorlesung können Sie sich noch erinnern?



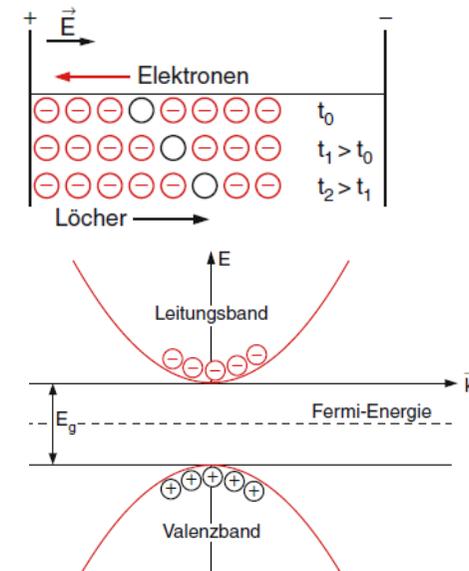
Elektronen und Löcher

$$n_e n_p = \left(\frac{2L^3}{\pi^2} \right)^2 \left(\frac{2mkT}{\hbar^2} \right)^3 \exp\left(-\frac{E_g}{k_B T} \right)$$

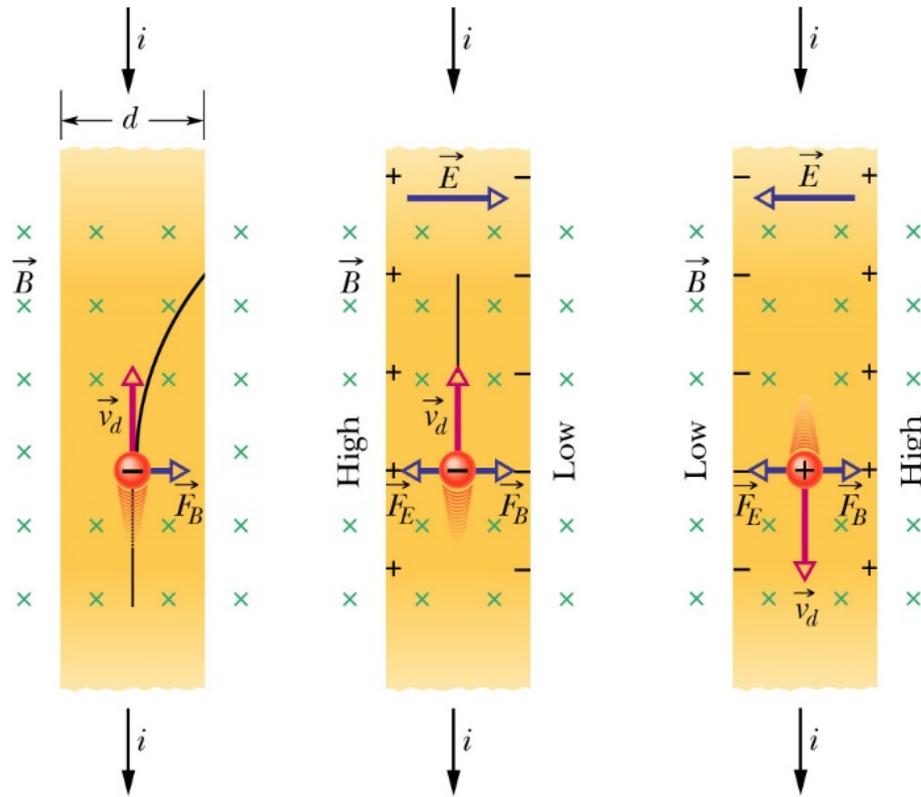
$$n_e = n_p = \frac{2L^3}{\pi^2} \left(\frac{2mkT}{\hbar^2} \right)^{3/2} \exp\left(-\frac{E_g}{2k_B T} \right)$$

Die Fermi-Energie liegt in der Mitte der verbotenen Zone zwischen dem Valenz- und Leitungsband.

$$\rho \propto \frac{m}{e^2 \tau T^{3/2}} \exp\left(\frac{E_g}{2k_B T} \right)$$



Physik II: Der Hall-Effekt



$$v_D = \frac{J}{nq} \Rightarrow V_H = \frac{J}{nq} Bd = \frac{i}{td} \frac{Bd}{nq} = \frac{iB}{nqt}$$

t ist die Dicke des Leiters

Die Leitungselektronen, die in einem Leiter driften, werden auch durch ein Magnetfeld abgelenkt - der Hall-Effekt (E.H. Hall, 1879).

Dieses Phänomen gestattet es zu entscheiden, ob die Ladungsträger in einem Leiter positiv (Löcher) oder negativ (*Elektronen*) geladen sind und die Ladungsträgerkonzentration in einem Leiter zu messen.

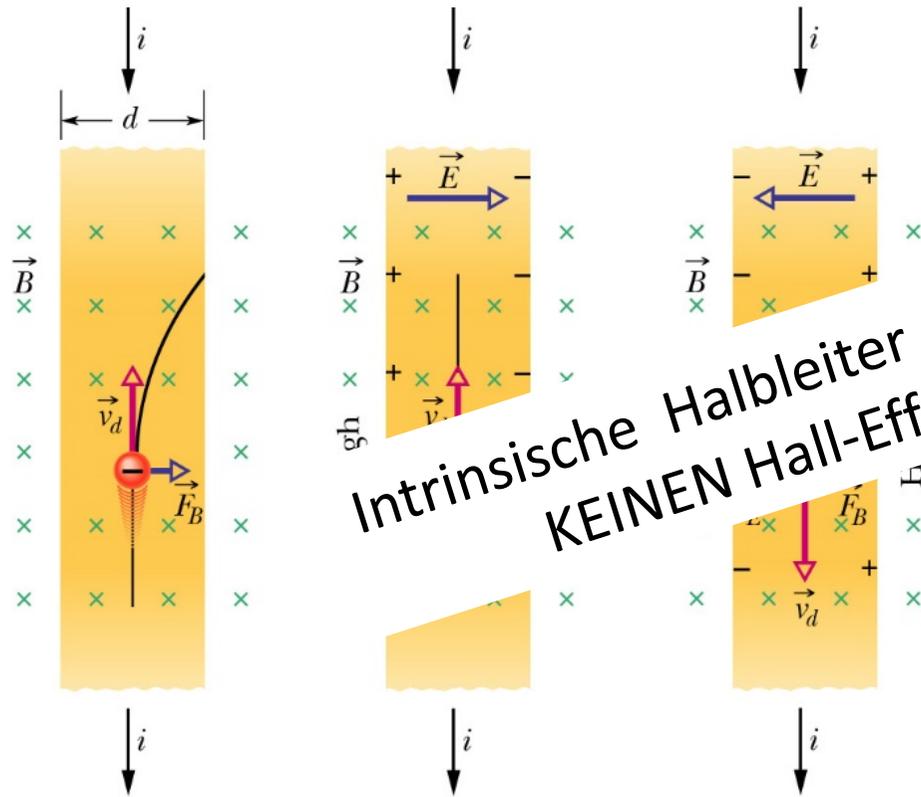
$$F_B \quad F_E \quad v_D B \quad E$$

Die Hall-Spannung $V_H = Ed = v_D B d$

$$\Rightarrow R_H = \frac{V_H}{i} = \frac{B}{nqt} \quad R_{Ohm} = \frac{m}{nq^2 \tau} \frac{ld}{t}$$

R_H ist der Hall-Widerstand

Physik II: Der Hall-Effekt



Intrinsische Halbleiter erzeugen KEINEN Hall-Effekt

Die Leitungselektronen, die in einem Leiter driften, werden auch durch ein Magnetfeld abgelenkt - der Hall-Effekt (E.H. Hall, 1879).

Dieses Phänomen gestattet es zu untersuchen, ob die Ladungsträger in einem Material positiv (Löcher) oder negativ (Elektronen) geladen sind und die Ladungsträgerkonzentration in einem Leiter zu messen.

$$F_B = F_E \quad v_D B = E$$

Die Hall-Spannung $V_H = Ed = v_D B d$

$$v_D = \frac{J}{nq} \Rightarrow V_H = \frac{J}{nq} B d = \frac{i}{t d} \frac{B d}{nq} = \frac{i B}{nq t} \Rightarrow \boxed{R_H = \frac{V_H}{i} = \frac{B}{nq t}} \quad R_{Ohm} = \frac{m}{nq^2 \tau} \frac{l}{t}$$

t ist die Dicke des Leiters

R_H ist der Hall-Widerstand

37.8 Dotierte Halbleiter

Die technologischen Anwendungsmöglichkeiten von Halbleitern lassen sich wesentlich erweitern, indem man in ihrem Gitter eine kleine Anzahl der Halbleiteratome durch geeignete Fremdatome („Verunreinigungen“) ersetzt. Diesen Prozess bezeichnet man als Dotierung. Germanium und Silizium sind einfach aufgebaute Halbleiter, die sich sehr präzise dotieren lassen. Typischerweise ist bei einem dotierten Halbleiter die Konzentration der Fremdatome 10^{-6} - 10^{-8} .

Man unterscheidet zwei Arten: n-dotiert und p-dotiert.

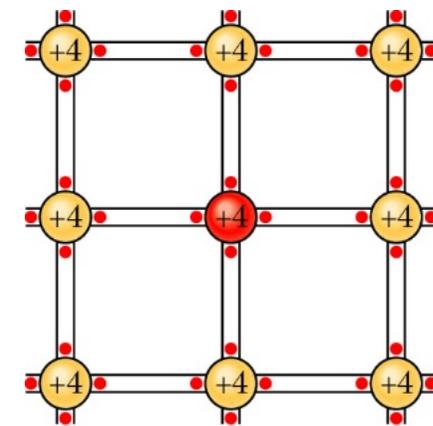
n-dotierte Halbleiter

Die elektronische Schema eines isolierten Siliziumatom: $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^2$

Die vier $3s^2 3p^2$ -Elektronen von Silizium bilden feste kovalente Elektronenpaarbindungen mit den vier nächsten Nachbarn.

Die Elektronen der Silizium-Silizium-Bindungen bilden das Valenzband eines Siliziumkristalls. Wird ein Elektron aus einer dieser Bindungen herausgerissen und kann es sich frei durch das Gitter bewegen, sagt man, das Elektron sei vom Valenzband in das Leitungsband angehoben worden. Die dazu notwendige minimale Energie ist die Energielücke E_g .

Reines Silizium



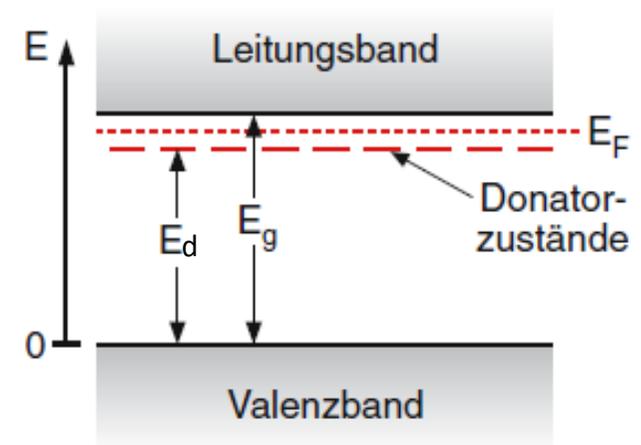
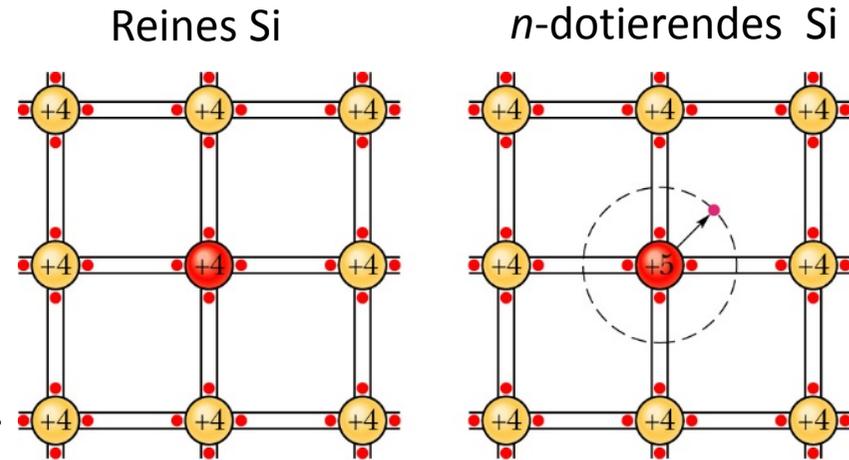
Da vier seiner Elektronen an der Bindung beteiligt sind, ist ein Siliziumatom im Kristallgitter eigentlich ein Ion mit einer Ladung von $+4e$ (14 Protonen +10 Elektronen $1s^2 2s^2 2p^6$)

Soll ein Siliziumion durch ein Phosphoratom (Wertigkeit = 5) ersetzt, werden vier der Valenzelektronen von Phosphor an den Bindungen mit den vier benachbarten Siliziumionen teilnehmen.

Das fünfte (zusätzliche) Elektron ist zwar an den Phosphorkern gebunden. Deshalb In einer Energiebänderdarstellung nimmt es einen lokalisierten Energiezustand ein, der innerhalb der Energielücke liegt.

Die Bindung ist aber relativ schwach (warum? H-Atom!), deshalb liegt der Zustand unmittelbar unterhalb des niedrigsten Leitungsbandniveaus: $E_g - E_d \ll E_g$.

D.h., die notwendige Energie, um Elektronen aus diesen Niveaus in das Leitungsband anzuheben, wesentlich kleiner als die Energie, die ein Valenzelektron des Siliziums zum Anheben in das Leitungsband benötigt:



$$n = n_D \exp\left(-\frac{E_g - E_d}{k_B T}\right) \quad E_g - E_d \approx 10 \text{ meV} \quad k_B T = 30 \text{ meV}$$

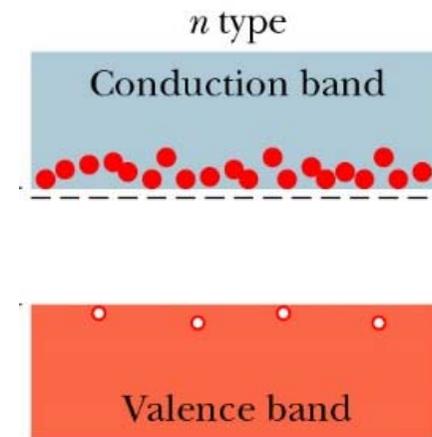
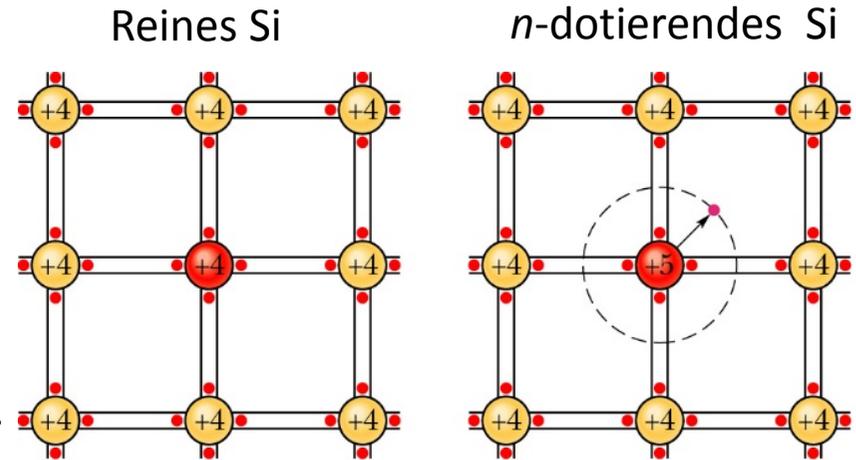
Da vier seiner Elektronen an der Bindung beteiligt sind, ist ein Siliziumatom im Kristallgitter eigentlich ein Ion mit einer Ladung von $+4e$ (14 Protonen +10 Elektronen $1s^2 2s^2 2p^6$)

Soll ein Siliziumion durch ein Phosphoratom (Wertigkeit = 5) ersetzt, werden vier der Valenzelektronen von Phosphor an den Bindungen mit den vier benachbarten Siliziumionen teilnehmen.

Das fünfte (zusätzliche) Elektron ist zwar an den Phosphorkern gebunden. Deshalb In einer Energiebänderdarstellung nimmt es einen lokalisierten Energiezustand ein, der innerhalb der Energielücke liegt.

Die Bindung ist aber relativ schwach (warum? H-Atom!), deshalb liegt der Zustand unmittelbar unterhalb des niedrigsten Leitungsbandniveaus: $E_g - E_d \ll E_g$.

D.h., die notwendige Energie, um Elektronen aus diesen Niveaus in das Leitungsband anzuheben, wesentlich kleiner als die Energie, die ein Valenzelektron des Siliziums zum Anheben in das Leitungsband benötigt:



$$n = n_D \exp\left(-\frac{E_g - E_d}{k_B T}\right) \quad \begin{matrix} E_g - E_d \approx 10 \text{ meV} \\ k_B T = 30 \text{ meV} \end{matrix}$$

Beispiel.

Betrachten einen HL mit der gesamten Atomendichte 10^{22} cm^{-3} und einem Bandabstand von 1 eV.

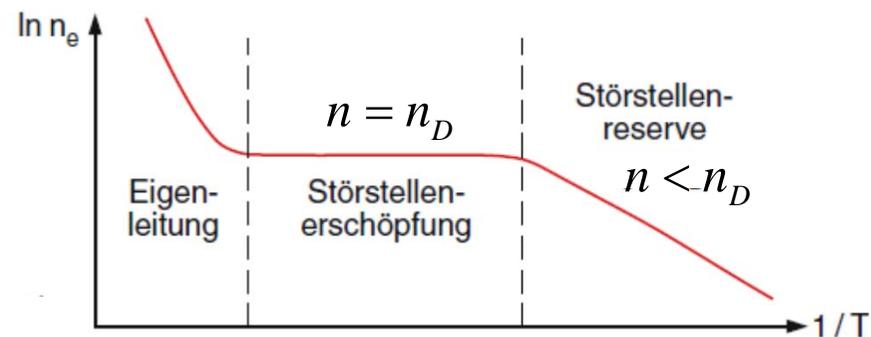
Bei Zimmertemperatur ($T = 300 \text{ K}$) wäre die intrinsische Elektronendichte

$$10^{10} \text{ cm}^{-3}. \quad \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right) !!!$$

Haben wir nur $n_D = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ Donatoratome und sind 20% aller Donatoratome ionisiert, dann bringen die Donatoratome $2 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ in das Leitungsband.

Man sieht daraus den großen Einfluss selbst einer geringen Dotierung auf die elektrische Leitfähigkeit. (was passiert mit den Löchern?)

Die n-Dotierung *reduziert* die Anzahl der Löcher!!!



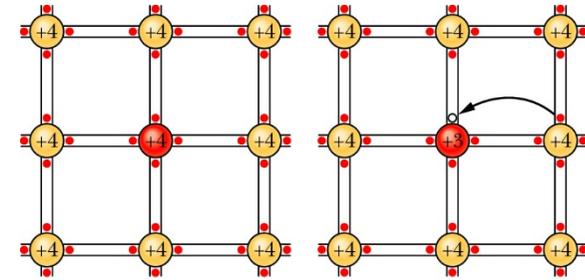
Das Phosphoratom ist Donator, weil es leicht ein Elektron an das Leitungsband abgibt.

Tatsächlich befinden sich bei Zimmertemperatur praktisch alle Elektronen der Donatoratome im Leitungsband. Durch die Zugabe von Donatoratomen lässt sich daher die Anzahl der Elektronen im Leitungsband erhöhen.

Mit Donatoratomen dotierte Halbleiter bezeichnet man auch als *n-dotierte* Halbleiter. Bei *n*-dotierten Halbleitern bezeichnet man die Elektronen als die Majoritätsträger und die Löcher als die Minoritätsträger.

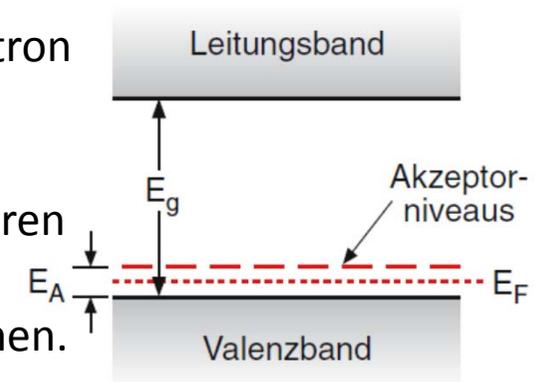
p-dotierte Halbleiter

Wenn ein Siliziumatom durch ein Aluminiumatom (Wertigkeit 3) ersetzt wurde, kann das Aluminiumatom nur mit drei der benachbarten Siliziumatome eine kovalente Elektronenpaarbindung eingehen.



Es fehlt ein Elektron in einer Aluminium-Silizium-Bindung. Diese fehlende Bindung kann ein Elektron aus einer benachbarten Silizium-Silizium-Bindung füllen, und zwar mit geringem Energieaufwand. Dadurch entsteht ein *Loch* an dieser benachbarten Bindung. Entsprechend kann ein Elektron von einer weiteren Bindung dieses Loch füllen, wodurch ein zweites Loch entsteht. Auf diese Weise kann das Loch durch das ganze Gitter wandern.

Das Aluminiumatom bezeichnet man als Akzeptor, weil es ein Elektron ein Elektron aus dem Valenzband von Silizium aufnimmt. Dieses Elektron ein lokalisiertes Akzeptorniveau, das innerhalb der Energielücke um ein mittleres Energieintervall E_a oberhalb der oberen Valenzbandkante liegt. Durch Zugabe von Akzeptoratomen ist es möglich, die Anzahl der Löcher im Valenzband wesentlich zu erhöhen.



Mit Akzeptoratomen dotierte Halbleiter bezeichnet man als *p*-dotierte Halbleiter. In einem *p*-dotierten Halbleiter sind die Löcher die *Majoritätsträger* und die Elektronen die *Minoritätsträger*.

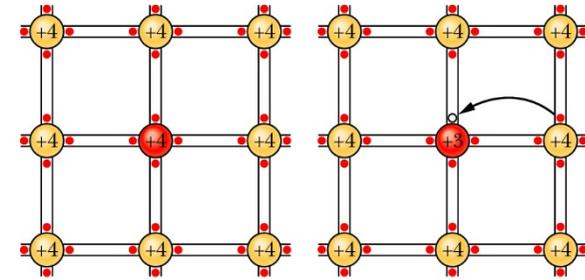
$$pn = c^2 T^3 \exp\left(-\frac{E_g}{k_B T}\right) \quad \text{Von } n_D \text{ und } n_A \text{ unabhängig}$$

$$p = n_A \exp\left(-\frac{E_a}{k_B T}\right)$$

$$E_a \approx 10 \text{ meV}$$

p-dotierte Halbleiter

Wenn ein Siliziumatom durch ein Aluminiumatom (Wertigkeit 3) ersetzt wurde, kann das Aluminiumatom nur mit drei der benachbarten Siliziumatome eine kovalente Elektronenpaarbindung eingehen.

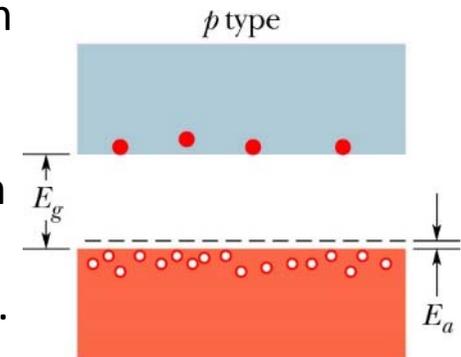


Es fehlt ein Elektron in einer Aluminium-Silizium-Bindung. Diese fehlende Bindung kann ein Elektron aus einer benachbarten Silizium-Silizium-Bindung füllen, und zwar mit geringem Energieaufwand. Dadurch entsteht ein *Loch* an dieser benachbarten Bindung. Entsprechend kann ein Elektron von einer weiteren Bindung dieses Loch füllen, wodurch ein zweites Loch entsteht. Auf diese Weise kann das Loch durch das ganze Gitter wandern.

Das Aluminiumatom bezeichnet man als Akzeptor, weil es ein Elektron ein Elektron aus dem Valenzband von Silizium aufnimmt. Dieses Elektron ein lokalisiertes Akzeptorniveau, das innerhalb der Energielücke um ein mittleres Energieintervall E_a oberhalb der oberen Valenzbandkante liegt. Durch Zugabe von Akzeptoratomen ist es möglich, die Anzahl der Löcher im Valenzband wesentlich zu erhöhen.

Mit Akzeptoratomen dotierte Halbleiter bezeichnet man als *p*-dotierte Halbleiter. In einem *p*-dotierten Halbleiter sind die Löcher die *Majoritätsträger* und die Elektronen die *Minoritätsträger*.

$$pn = c^2 T^3 \exp\left(-\frac{E_g}{k_B T}\right) \quad \text{Von } n_D \text{ und } n_A \text{ unabhängig}$$



$$p = n_A \exp\left(-\frac{E_a}{k_B T}\right)$$

$$E_a \approx 10 \text{ meV}$$

37.9 Der pn-Übergang

Auf der p-Seite des Übergangs sind Löcher – die Majoritätsträger. Da auf der n-Seite weniger Löcher vorhanden sind, werden die Löcher von der p-Seite in die n-Seite diffundieren. Dieser Fluss von Elektronen und Löchern bildet einen *Diffusionsstrom*.

Aus dem gleichen Grund diffundieren Elektronen von der n-Seite in die p-Seite. Obwohl die Löcher und die Elektronen in der Gegenrichtungen diffundieren, werden die beiden

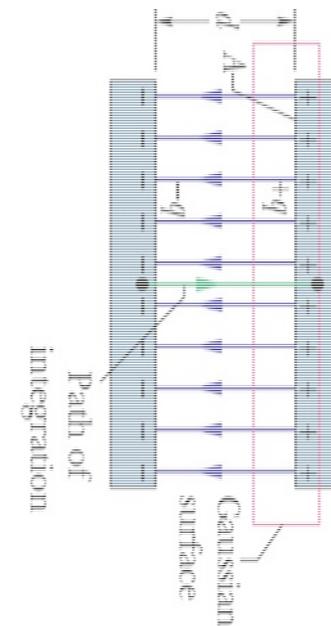
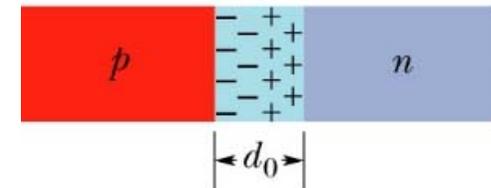
Diffusionsströme sich addieren: die n-Seite wird positiv (durch Donator-Atome) - und die p-Seite negativ (durch Akzeptor-Atome) – geladen. Eine *Raumladung* bildet sich auf beiden Seiten der Übergangsebene.

Physik II : Berechnung der Potenzialdifferenz

$$V_f - V_i = - \int_i^f \vec{E} d\vec{s} \quad V = \int_-^+ E ds$$

$$V = Ed = \frac{q}{\epsilon_0 A} d$$

Je größer ist die Flächenladung und der Abstand zwischen der der Potenzialdifferenz

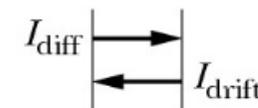
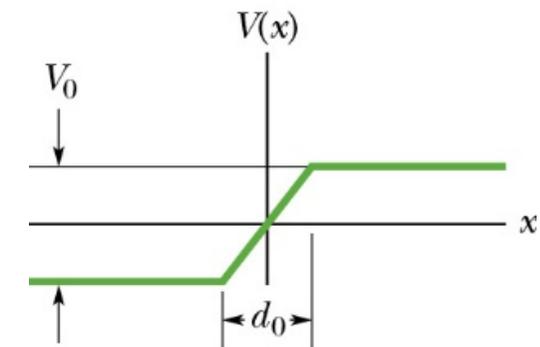
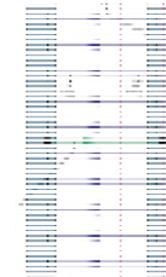
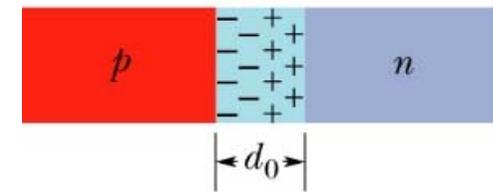


In dem Raum sind die Konzentrationen von beweglichen Ladungsträgern sehr klein – man bekommt eine *Sperrschicht* (depletion zone).

Durch die Raumladungen entsteht an der Raumladungszone eine Kontaktspannung V_0 . Diese Potenzialdifferenz verhindert (nicht ganz!) eine weitere Diffusion von Elektronen und Löchern durch die Übergangsebene. Der gebildete Potenzialunterschied V_0 ist für die Majoritätsträger eine Barriere. Er bewirkt aber Bewegung der Minoritätsträger, sowohl der Elektronen auf der p-Seite als auch der Löcher auf der n-Seite, I_{drift} .

Bei einem isolierten pn-Übergang befindet sich der Werkstoff daher im thermischen Gleichgewicht, wobei der Diffusionsstrom I_{diff} gerade durch den Feldstrom, I_{drift} in umgekehrter Richtung kompensiert wird.

Je nach dem *Vorzeichen* eines von außen angelegten Potentials fließt ein Strom durch den Übergang oder nicht.



Wird der positive Potenzial an der p-Seite (Flussrichtung) angelegt, wird der gebildete Potenzialunterschied *reduziert* – das ist günstig für die Majoritätsträger – ein *starke* Strom fließt:

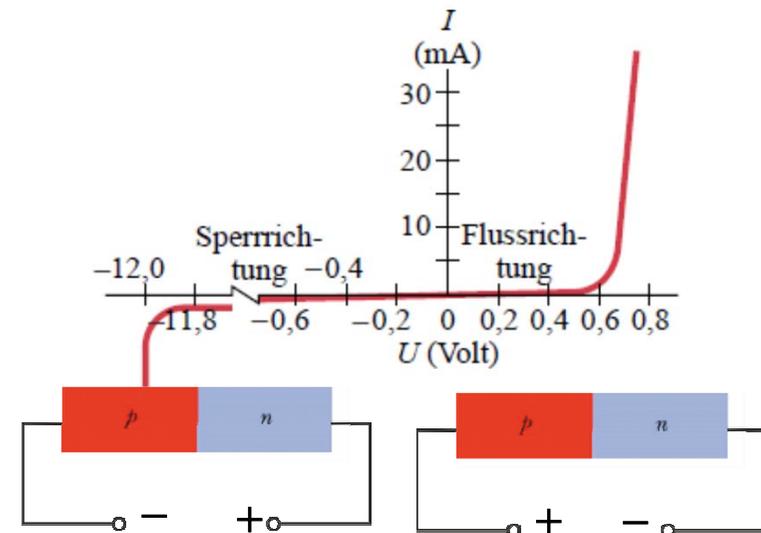
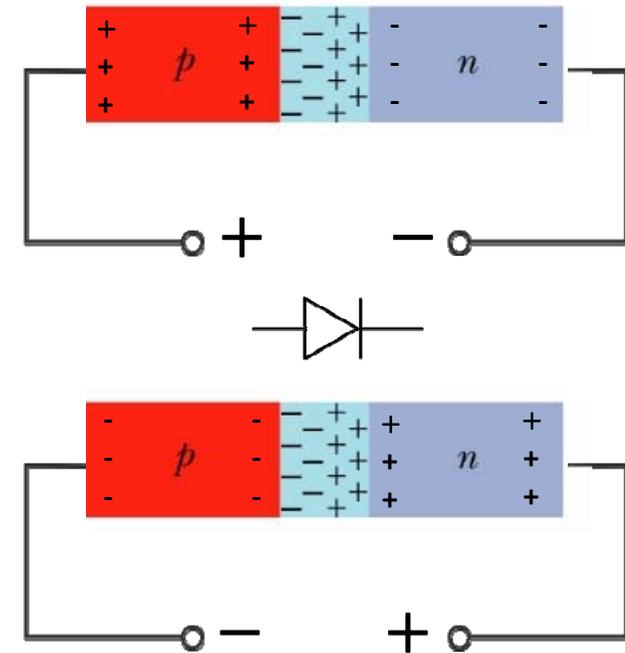
$$J = n_{Major} e v$$

Wird der positive Potenzial an der n-Seite (Sperrrichtung) angelegt, wird der gebildete Potenzialunterschied *erhöht* – das ist ungünstig für die Majoritätsträger - ein *schwache* Strom fließt lediglich dank den Minoritätsträgern:

$$J = n_{Minor} e v \ll n_{Major} e v$$

Durch diese asymmetrische Eigenschaften des pn-Übergangs nennt man dieses elektronisches Teil Diode.

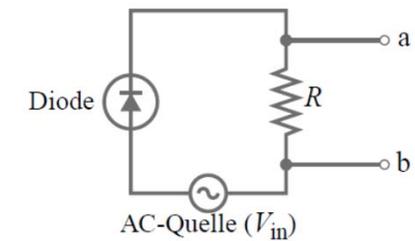
Wenn die an die Diode in Sperrrichtung angelegte Spannung stärker erhöht wird, kommt es bei einer bestimmten Spannung zum Durchschlag. Das elektrische Feld wird an der Grenzschicht so stark, dass es zur Ionisation von Atomen führt. Im Verlaufe des Durchschlags wird der Strom immer größer. Die Spannung bleibt über einem großen Strombereich konstant (Zener-Diode).



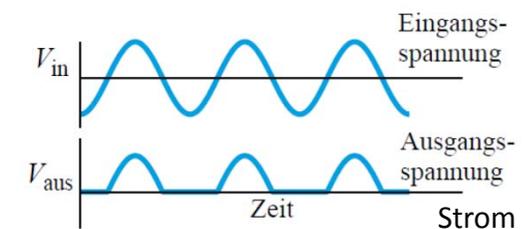
37.10 Der Halbleiter-Gleichrichter

Einweggleichrichter: Die Diode wirkt im Wesentlichen wie ein geschlossener Schalter (unendlicher Widerstand) für die eine Stromrichtung und wie ein geöffneter Schalter (Widerstand null) für die andere Stromrichtung.

Durch die Wechselspannungsquelle wird an die Diode abwechselnd eine positive und eine negative Spannung angelegt. Nur während einer halben Periode fließt Strom durch die Diode, so dass es nur dann einen Strom durch den Widerstand R gibt.

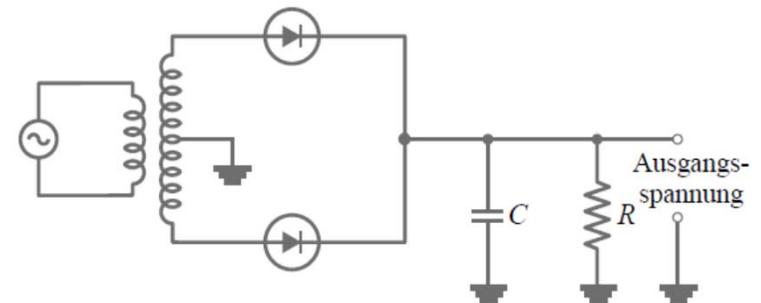


(a)

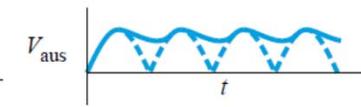


Zweiweggleichrichter: zwei Dioden werden benutzt. Zu jedem Zeitpunkt liefert die eine oder die andere Diode Strom.

Gleichrichterschaltkreise sind von Bedeutung, weil die Spannungsversorgung meist Wechselstrom liefert und viele elektronische Geräte für ihre Arbeit eine Gleichstromversorgung benötigen. Deshalb werden Dioden in nahezu allen elektronischen Geräten verwendet, wozu auch Fernsehapparate und Computer gehören.



(b) ohne Kondensator



(c) mit Kondensator