

10.4 Exkurs: Halbleiter als Voraussetzung für die moderne Elektronik

Wandernde Bindungselektronen

Die Elemente Silicium und Germanium, die zu den Halbmetallen gehören, sehen zwar metallisch glänzend aus, sind aber sehr hart und spröde und zeigen nur geringe elektrische Leitfähigkeit. Beide kristallisieren in der Diamantstruktur, in der jedes Atom durch Elektronenpaarbindungen mit vier anderen Atomen verbunden ist (Abschnitt 5.1). Weil aber die Atomrümpfe dieser beiden Elemente beträchtlich grösser sind als der Rumpf eines Kohlenstoff-Atoms, sind die Valenzelektronen bei ihnen weniger stark gebunden. Aufgrund der thermischen Bewegung der Teilchen können einzelne Elektronen ein Atom verlassen und sich dann einigermassen frei im Gitter bewegen. Positiv geladene Ionen bleiben im Gitter zurück, und es entstehen Störstellen im Kristall.

Die mehr oder weniger frei beweglichen Elektronen bewirken die Leitfähigkeit eines Silicium- oder Germanium-Kristalls. Sie ist jedoch viel geringer als bei den eigentlichen Metallen, da weniger «freie» Elektronen vorhanden sind (in Metallgittern steht pro Atom mindestens ein freies Elektron zur Verfügung!). Aus diesem Grund nennt man solche Stoffe Halbleiter. Im Gegensatz zu den Metallen nimmt ihre Leitfähigkeit beim Erwärmen zu, da die dadurch stärkere Wärmebewegung mehr Elektronen freisetzt. Einzelne Elektronen können aber nicht nur durch die Wärmebewegung, sondern auch durch Licht aus den Atomen herausgeschlagen werden. Die Zahl der freigesetzten Ladungsträger (Elektronen bzw. Elektronenleerstellen) hängt dann von der Intensität der Strahlung ab. Dieses Verhalten wird bei Fotozellen verwendet.

Die Leitfähigkeit von Germanium ist deutlich besser als die von Silicium, weil der Rumpf der Germanium-Atome grösser ist. Seine anziehenden Kräfte auf die bindenden Elektronen im Gitter sind schwächer als jene in Silicium-Atomen. Trotz der besseren Leitfähigkeit eignet sich Germanium nicht für die Elektronik, da schon leichtes Erhitzen zu einer unkontrollierbaren Verschiebung von Elektronen führen kann. Beim Silicium besteht diese Gefahr wegen der stärker gebundenen Valenzelektronen nicht. Das Element ist ideal für die Halbleiterindustrie und damit unverzichtbar für die Herstellung verschiedener elektronischer Geräte.

Die elektrische Leitfähigkeit von Halbleitern, die mit steigender Temperatur zunimmt, beruht auf der Wanderung von Elektronen, die sich aus den Elektronenpaarbindungen lösen können.

n- und p-Leiter

Die Zahl der freien Elektronen und der Elektronenleerstellen in einem Halbleiter ist bei Raumtemperatur gering. Man kann sie aber stark erhöhen, wenn man dem Silicium- oder Germanium-Kristall kleine Mengen von Fremdstoffen zusetzt, d. h., wenn der Halbleiter «dotiert» wird.

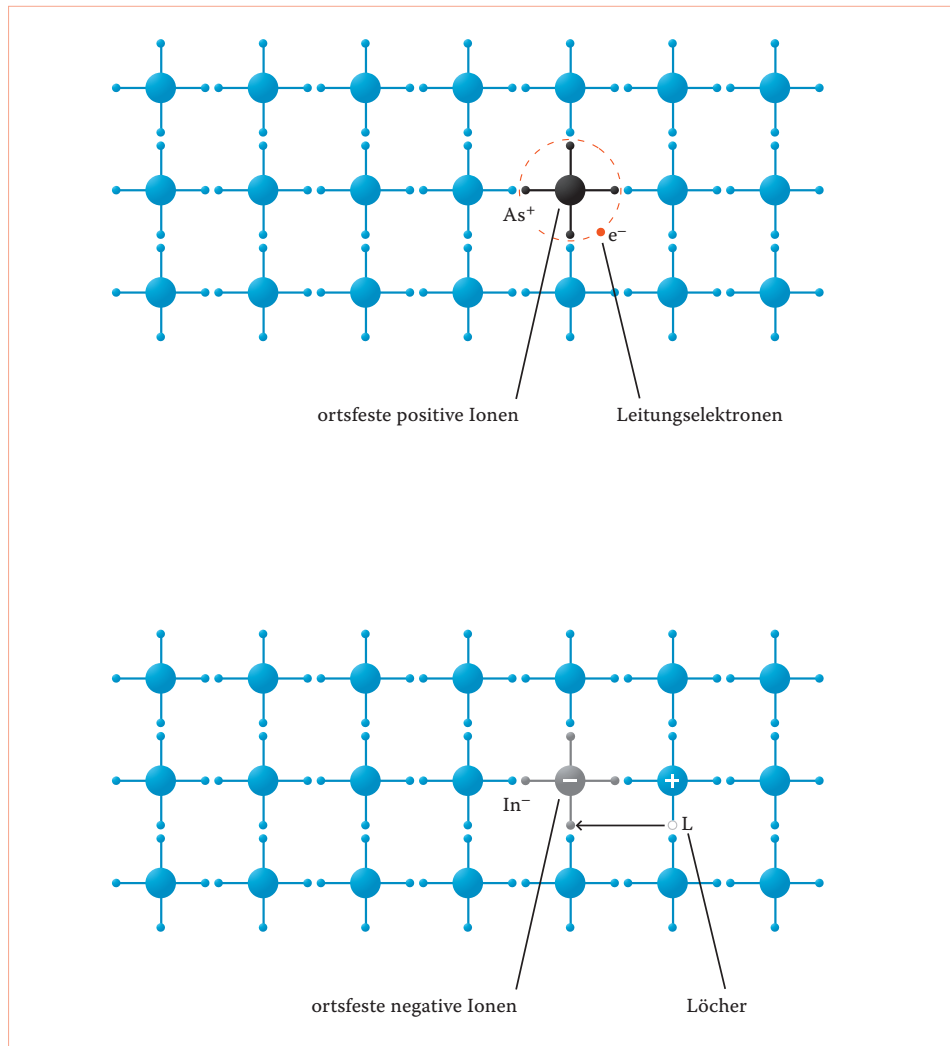
Versetzt man z. B. einen Germanium-Kristall mit etwas Arsen (As), so sind im Gitter überschüssige Elektronen vorhanden, weil Arsen-Atome fünf Valenzelektronen haben. Zur Ausbildung der Diamantstruktur sind jedoch von jedem

Atom nur vier Elektronen nötig. Das Arsen-Atom wird durch die Abgabe eines Elektrons positiv geladen und bleibt als Ion an seinem Gitterplatz. Die Stromleitung erfolgt in diesen Fällen vor allem anhand der überschüssigen Elektronen der Fremdatome. Man spricht deshalb von einem «Elektronenüberschussleiter» oder einem «n-Leiter» (**n**egative Dotierung; Abb. 10.12 oben). Die zusätzlichen Elektronen im n-Leiter sind energiereich.

Der Einbau von Aluminium- oder Indium-Atomen in das Gitter von Germanium hat einen anderen Effekt zur Folge: Diese Fremdatome besitzen nur drei Außenelektronen und müssen ein Elektron von einem benachbarten Germanium-Atom übernehmen, um vier Elektronenpaarbindungen bilden zu können. Dadurch entsteht aber um das Germanium-Atom eine Elektronenleerstelle. Diese erzeugt wiederum eine «positive Ladung», die durch ihre anziehenden Kräfte auf Elektronen die elektrische Leitfähigkeit bewirkt. Solche Halbleiter sind «Elektronenmangelleiter», sie werden auch als p-Leiter bezeichnet (**p**ositive Dotierung; Abb. 10.12 unten). Die beweglichen Elektronen sind energiearm, im Gegensatz zu denen im n-Leiter.

Abb. 10.12

n- (oben) und p-Leiter
(unten)



Die Kombination von Elektronenüberschuss- und Elektronenmangelleitern wirkt als Gleichrichter und kann auch zur Verstärkung schwacher Ströme verwendet werden (Transistoren). Entscheidend dabei ist, dass die energiereichen Elektronen des n-Leiters immer in Richtung des p-Leiters fließen (Abnahme der Energie, Prinzip vom Energieminimum). Transistoren dienen aber auch als elektrische Schalter und haben in der heutigen Elektronik unzählige Anwendungen gefunden. Bei «integrierten Schaltungen» sind Tausende solcher Elemente auf einem einzigen Silicium-Kristall oder einem Metalloxidkristall aufgebracht. Pro cm^2 Halbleiteroberfläche können viele Tausend Schaltelemente vorhanden sein. Ohne die Verwendung von Halbleitern wäre die heutige Elektronik (Computertechnik) nicht möglich.

LED-Leuchtmittel

LED-Leuchtmittel (engl. *light-emitting diode*) sind Halbleiter, die Licht emittieren (aussenden): Beim Übergang vom n- in den p-Leiter geben die Elektronen die dabei frei werdende Energie als Licht ab (n-p-Übergang).

-
- n-Leiter (Elektronenüberschussleiter) enthalten Fremdatome im Gitter eines Halbleiters, die die Anzahl der Valenzelektronen erhöhen, wie z. B. Arsen-Atome (fünf Valenzelektronen) in einem Germanium-Kristall (vier Valenzelektronen). Die zusätzlichen Elektronen im n-Leiter sind energiereich.
 - p-Leiter (Elektronenmangelleiter) enthalten Fremdatome im Gitter eines Halbleiters, die die Anzahl Valenzelektronen erniedrigen, wie z. B. Aluminium- oder Indium-Atome (drei Valenzelektronen) in einem Germanium-Kristall (vier Valenzelektronen). Die beweglichen Elektronen sind energiearm, im Gegensatz zu denen im n-Leiter.
 - In einer Diode, einem elektrischen Bauelement, fließt Strom nur in eine Richtung. Dies wird durch die Kombination von n- mit p-Leitern erreicht.
 - Bei LED-Leuchtmitteln wird die unterschiedliche Energie von n- und p-Leitern durch die Elektronen als Licht abgegeben.
-

Zentrale Begriffe zum Exkurs 10.4

- | | | |
|------------------------|------------------------------|--------------------|
| › Diamantstruktur | › Elektronenüberschussleiter | › Transistor |
| › Halbleiter | › n-Leiter | › LED-Leuchtmittel |
| › Elektronenleerstelle | › Elektronenmangelleiter | |
| › Fotozelle | › p-Leiter | |

Aufgaben zum Exkurs 10.4

- 10.10** Weshalb leiten die Halbmetalle Silicium und Germanium den Strom schlechter als die Metalle?
- 10.11** Weshalb zeigen metallische Einkristalle besonders gute elektrische Leitfähigkeit?
- 10.12** Erklären Sie, worauf die Leitfähigkeit von Halbleitern bzw. von dotierten Halbleitern beruht. Was versteht man unter p- und n-Leitern?
- 10.13** Beschreiben Sie, wie die Leitfähigkeit von Halbleitern erhöht werden kann.

Lösungen zum Exkurs 10.4

- 10.10** Beide Halbmetalle kristallisieren in der Diamantstruktur, in der jedes Atom durch Elektronenpaarbindungen mit vier anderen Atomen verbunden ist. Die Bindungen sind schwach, weil die Atomrümpfe dieser beiden Atome relativ gross sind. Aufgrund der thermischen Bewegung können einzelne Elektronen Bindungen verlassen und sich dann einigermassen frei im Gitter bewegen. Positiv geladene Ionen bleiben im Gitter zurück, und es entstehen Störstellen im Kristall, die eine geringe Leitfähigkeit ermöglichen.
- 10.11** Einkristalle zeigen gewöhnlich eine besonders hohe Leitfähigkeit für Elektrizität und Wärme, weil die Verschiebung von Elektronen nur innerhalb eines einzigen Kristalls erfolgt und nicht durch Korngrenzen (die Grenzen der Kriställchen) behindert wird.
- 10.12** Bei den Halbmetallen, den Halbleitern, können sich Elektronen aus den Bindungen lösen und dadurch Strom leiten. Die elektrische Leitfähigkeit, die nicht sehr ausgeprägt ist, nimmt mit steigender Temperatur zu.
- Für die elektrische Leitfähigkeit von dotierten Halbleitern sind Störstellen im Gitter verantwortlich, d. h. Stellen mit Elektronenüberschuss oder Elektronenleerstellen. Erfolgt die Stromleitung vor allem durch einen Elektronenüberschuss, so spricht man von einem Elektronenüberschussleiter (n-Leiter). Sind jedoch Elektronenleerstellen vorhanden, so bewirken diese die elektrische Leitfähigkeit. Solche Halbleiter sind Elektronenmangelleiter (p-Leiter).
- 10.13** Die Zahl der freien Elektronen und der Elektronenleerstellen in einem Halbleiter ist bei Raumtemperatur gering. Man kann sie aber stark erhöhen, wenn man einem Silicium- oder Germanium-Kristall kleine Mengen von Fremdstoffen zusetzt, d. h., wenn der Halbleiter dotiert wird.