

Nach dem Aufladen liefert der Bleiakku eine Spannung von 2 V. Bei der Stromentnahme läuft der Prozess umgekehrt, bis der Anfangszustand fast wieder hergestellt ist. Man erhält etwa 70-80 % der investierten Energie zurück. Eine typische Autobatterie mit 12 V bei 55 Ah (Amperestunde) kann eine Energie von

$$W = Q U = 12 \text{ V} \cdot 55 \text{ Ah} \cdot \frac{3600 \text{ s}}{1 \text{ h}} = 2,4 \cdot 10^6 \text{ VA s} = 2,4 \cdot 10^6 \text{ J}$$

speichern.

3.9 Leitung in Metallen

Wir wollen uns an dieser Stelle noch einmal etwas genauer mit den Leitungsmechanismen in Metallen beschäftigen. Für eine exakte Beschreibung ist allerdings die Kenntnis des atomaren Aufbaus und der Gitterstruktur im Festkörper, sowie der Quantentheorie, nötig, welche erst in den folgenden Semestern gelehrt werden. Deshalb wollen wir uns hier auf einige wesentliche Ergebnisse beschränken, die unter der Bezeichnung **Bändermodell** zusammengefasst sind. Das Bändermodell ermöglicht eine einheitliche Deutung der unterschiedlichen elektrischen Leitfähigkeit von Metallen, Halbleitern und Isolatoren.

Bereits in dem Abschnitt über die Temperaturabhängigkeit des Widerstands haben wir uns etwas mit dem Leitungsmechanismus in Metallen beschäftigt. Wir wissen, dass jedes Metallatom ein Valenzelektron als Leitungselektron abgibt. Diese Elektronen sind frei beweglich und werden auch **Elektronengas** genannt. Sie bewegen sich frei durch das Ionengitter, ähnlich den Gasatomen. Durch ihre Wärmebewegung verursachen sie keinen Strom. Erst wenn sich das Metall in einem elektrischen Feld befindet, wird diese Bewegung durch die Driftbewegung überlagert und es fließt ein Strom. (vgl. Seite 93) Die Valenzelektronen sind nicht an die einzelnen Gitterbausteine gebunden, sondern nur an den Kristall als Ganzen. Sie befinden sich in gebundenen Zuständen, die laut Quantentheorie nicht beliebige Energiewerte annehmen können. Die Valenzelektronen können sich nur in einer endlichen, allerdings sehr großen Anzahl von diskreten Zuständen aufhalten. Die Zustände sind nicht kontinuierlich über den Energiebereich verteilt, sondern es gibt Bereiche, sogenannte **Bänder**, erlaubter Energieniveaus, die durch die **verbotenen Zonen** getrennt sind (s. Abb. 3.28, entnommen aus [5]). In den verbotenen Zonen können sich aus energetischen Gründen keine Elektronen aufhalten. Die Bänder kann man als kontinuierliche Zonen erlaubter Energiewerte betrachten, denn die Abstände zwischen den einzelnen Zuständen des einzelnen Bandes sind so gering, dass die Elektronen aufgrund der Wärmebewegung praktisch ungehindert zwischen den einzelnen Zuständen wechseln können. Sie sind aber bestrebt, immer den tiefstmöglichen Zustand einzunehmen. Wegen des PAULI- Prinzips (siehe Vorlesung des 4. Semesters) kann jeder Zustand nur zweimal

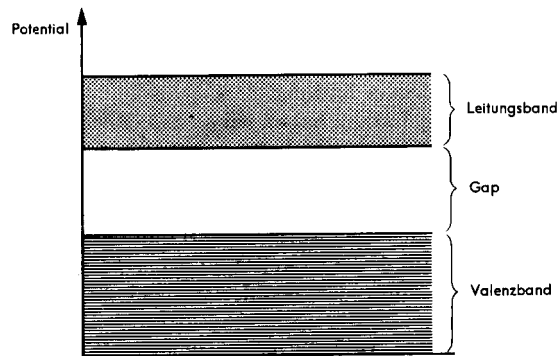


Abbildung 3.28: Prinzip des Bändermodells

besetzt werden. Daher können auch die einzelnen Bänder wegen der endlichen Zahl ihrer Zustände nur eine endliche Anzahl von Elektronen aufnehmen. Deshalb unterscheidet man zwischen vollständig, teilweise gefüllten und leeren Energiebändern.

Bei einer Besetzung des oberen Bandes von 10 - 90 % liegt ein metallischer Leiter vor. Legt man hier nun eine elektrische Spannung an, so bildet sich im Inneren ein elektrisches Feld E aus, und auf die Elektronen wirkt eine beschleunigende Kraft $F = -e E$. Dadurch erhalten die Elektronen mehr Bewegungsenergie und werden auf höhere Energiezustände angehoben. Ist das obere Band nur teilweise gefüllt, können die Elektronen leicht in einen höheren Energiezustand gelangen, da hier genügend freie Zustände zur Verfügung stehen. Da alle in dem obersten Band befindlichen Elektronen im Feld zusätzlich Energie aufnehmen und zur Leitung beitragen, nennt man dieses Band das **Leitungsband** und die Elektronen **Leitungselektronen**. Das darunter liegende Band heißt **Valenzband**. Wenn das oberste Band ganz gefüllt ist, können die Elektronen nicht mehr durch das

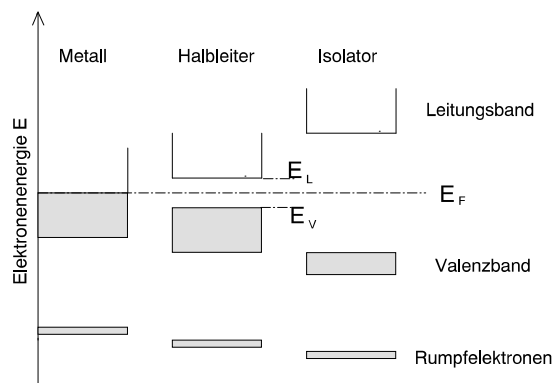


Abbildung 3.29: Bändermodell für Metalle, Halbleiter und Isolatoren

angelegte Feld beschleunigt werden, es liegt ein **Isolator** vor. Für jedes Elektron, dass aus einem niedrigeren Energiezustand des Bandes in einen höheren angehoben wird, muss umgekehrt ein Elektron aus diesem Zustand in das tiefere Niveau übergehen. Deshalb ist in einem vollbesetzten Zustand keine Stromleitung möglich.

Besteht zwischen dem obersten vollbesetzten Band und dem darüberliegenden nächsten leeren Band ein relativ geringer Abstand, dann ist der Stoff zwar bei niedrigen Temperaturen ein Isolator, aber bei Zimmertemperatur kann er jedoch eine wesentlich höhere elektrische Leitfähigkeit besitzen. Man spricht dann von einem **Halbleiter**. Seine Leitfähigkeit wird durch die thermische Anregung von Elektronen aus dem Valenzband in das darüberliegende Band verursacht. Die Wahrscheinlichkeit einer solchen Anregung nimmt exponentiell mit dem Bandabstand E_B ab und mit der Temperatur T zu. Halbleitende Eigenschaften zeigen sich erfahrungsgemäß bis zur Energielücke (gap) von etwa $E_B = 2,5\text{eV}$, während bei Isolatoren größere Werte zu finden sind. Beim Halbleiter tragen sowohl die in das Leitungsband gehobenen Elektronen als auch die im Valenzband zurückbleibenden Löcher zur Leitfähigkeit bei (Eigenleitung reiner Halbleiter). Eine Darstellung der beschriebenen Modelle findet man in Abb. 3.29.

3.10 Leitung in Halbleitern

3.10.1 p,n- Halbleiter

Wir wollen uns nun intensiver mit den Leitungsmechanismen in Halbleitern beschäftigen. Als typischen Vertreter der Halbleiter wollen wir uns mit dem Element Germanium aus der IV. Hauptgruppe des Periodensystems befassen. Alle der 4-wertigen Germaniumatome verbinden sich jeweils mit vier benachbarten Germaniumatomen, indem sich jedes der Valenzelektronen mit einem Valenzelektron der Nachbaratome zu einem Elektronenpaar verbindet (s. Abb. 3.30, aus [5]). In diesem Zustand sind alle Valenzelektronen gebunden und das Germanium verhält sich wie ein Isolator. Da die Bindungsenergie aber gering ist, sie beträgt nur $0,75\text{ eV}$, gilt dies nur bei tiefen Temperaturen. Je höher die Temperatur ist, desto stärker schwingen die Elektronen, bis sie eine Schwingungsenergie von mehr als $0,75\text{ eV}$ haben und die Bindungen aufbrechen. Dies ist schon bei Zimmertemperatur der Fall. An den Stellen, an denen ein Elektron freigesetzt worden ist, entsteht ein Elektronenfehlplatz, den man als **Defektelektron** oder **Loch** bezeichnet. Die freien Elektronen führen ähnlich wie in einem Metall Wärmebewegungen aus. Kommen sie dabei in die Nähe der Löcher, treten sie wieder in diese ein, sie **rekombinieren**. Die Wahrscheinlichkeit der Rekombination steigt mit der Dichte der freien Elektronen und Löcher. Es entsteht ein Gleichgewichtszustand, bei dem die Anzahl der pro Zeiteinheit entstehenden freien Elektronen und Löcher genauso groß ist, wie die durch Rekombination verschwindenden. Daraus ergibt sich eine konstante Dichte an freien Elektronen und Löchern, die umso größer ist, je höher die Temperatur ist.

Legt man an einen Halbleiterkristall eine Spannung an, so wandern die freien Elektronen