

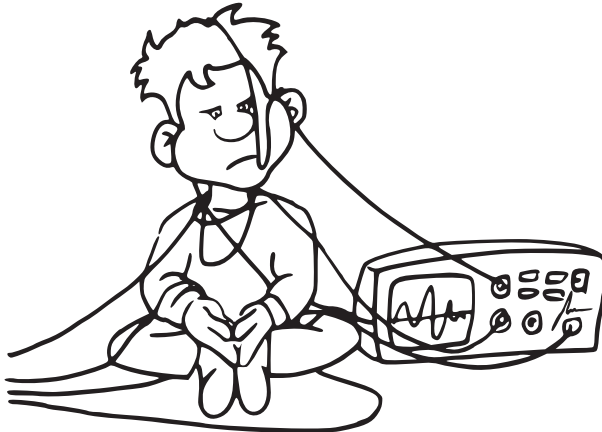
Grundlagen der Rechnertechnologie

Sommersemester 2010 – 5. Vorlesung

Dr.-Ing. Wolfgang Heenes



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT





1. Aufbau der Materie
2. Energiebändermodell
3. Kristallstruktur von Germanium und Silizium
4. pn-Übergang
5. Diodenkennlinie
6. Diodenmodelle
7. Zusammenfassung und Ausblick

- ▶ Halbleiter sind Stoffe, deren Leitfähigkeit in einem größeren Bereich zwischen den reinen Metallen und den Isolatoren liegt.
- ▶ Der Aufbau eines Atoms wird durch das *Bohrsche Atommodell* beschrieben.
 - ▶ Das Atom besteht aus einem Atomkern und
 - ▶ einer in Schalen aufgeteilten Atomhülle.
- ▶ In der Atomhülle bewegen sich (auf Bahnen) die *Elektronen*.
- ▶ Beispiel: Wasserstoffatom
 - ▶ ein Proton als Kern
 - ▶ ein Elektron in der Hülle
- ▶ Protonen sind Träger positiver Ladung, Elektronen Träger negativer Ladung
- ▶ Damit ein Atom nach außen elektrisch neutral wirken kann, muss die Anzahl der Protonen im Kern gleich der Anzahl der Elektronen in der Hülle sein.



- ▶ Die Elektronen können sich innerhalb der Atomhülle in verschiedenen Schalen bewegen, was gleichbedeutend mit verschiedenen *Energieniveaus* ist.
- ▶ Befindet sich ein Elektron auf der 1. Schale, die dem niedrigsten Energieniveau entspricht, dann sagt man das Atom befindet sich im Grundzustand.
- ▶ Wird dem Elektron Energie zugeführt, so wird es auf ein höheres Energieniveau gehoben.
- ▶ Die Energiedifferenz ΔW zwischen zwei Niveaus ist gequantelt; das bedeutet, das Elektron kann in der Atomhülle nur ganz bestimmte Bahnen einnehmen.
- ▶ Es kann sich also nur auf diskreten Energieniveaus befinden. Energieniveaus werden in Elektronenvolt eV angegeben.

- ▶ Grundzustand ($n = 1$)
- ▶ Das Energieniveau $n = \infty$ bedeutet, dass die Bahn des Elektrons so weit vom Atomkern entfernt ist, dass das Elektron nicht mehr an den Atomkern gebunden ist, sondern frei beweglich ist.
- ▶ Dem Atom fehlt dann ein Elektron und der Atomrest ist positiv geladen.
- ▶ Atomrest wird als Ion bezeichnet.
- ▶ Die Energie, die erforderlich ist, das Elektron vom Atomkern zu trennen wird als Ionisierungsenergie bezeichnet.

- ▶ Sind Atome in einem Material sehr dicht gepackt, dann wechselwirken gleichsam alle Atome miteinander.
- ▶ Nur die innersten Elektronen bleiben fest bei den zugehörigen Atomkernen auf diskreten Energieniveaus.
- ▶ Mit zunehmender Schalennummer n nimmt die Wechselwirkung mit den Nachbaratomen zu.
- ▶ Wie bei den diskreten Energieniveaus gibt es erlaubte und verbotene Energiebereiche.
- ▶ Die Einteilung der Festkörper in Nichtleiter (Isolatoren), Halbleiter und Leiter kann mit dem Energiebändermodell erklärt werden.

- ▶ Befinden sich Elektronen der Gitteratome im Grundzustand, d. h. am Temperaturnullpunkt, dann sind alle Energieniveaus der erlaubten Bänder besetzt.
- ▶ Im Grundzustand bewirken die Elektronen des obersten Energiebandes, die Elektronen der äußeren Schale, die Bindung im Gitter.
- ▶ Dieses Energieband wird als Valenzband bezeichnet.
- ▶ Für den Ladungstransport stehen keine Elektronen des Grundzustands zur Verfügung.
- ▶ Um in das erlaubte höhere Energieband, das sogenannte Leitungsband, gehoben zu werden, ist eine hohe Energie notwendig.

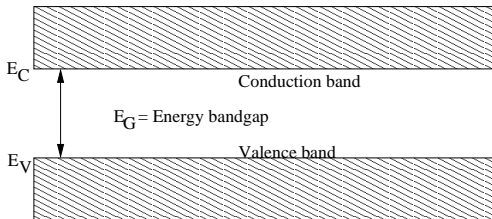
Energiebändermodell III

Leiter

- ▶ Schon im Grundzustand, d. h. beim Temperaturnullpunkt, befinden sich Elektronen im Leitungsband
- ▶ Das bedeutet, dass das Valenzband und das Leitungsband sich überlappen.

- ▶ Im Grundzustand, d. h. beim Temperaturnullpunkt ist das Valenzband voll besetzt.
- ▶ Das Leitungsband ist leer, wie beim Nichtleiter
- ▶ Die Energiedifferenz zwischen Valenzband und Leitungsband beträgt allerdings nur 1 eV
- ▶ Selbst bei Zimmertemperatur werden Elektronen aus dem Valenzband in das Leitungsband gehoben und stehen dann für den Ladungstransport zur Verfügung.
- ▶ Für die elektrische Leitfähigkeit eines Festkörpers sind die Elektronen im Valenzband und Leitungsband von Bedeutung.

- ▶ Energiedifferenzen von Halbleitern:
 - ▶ Germanium Ge, 0,72 eV
 - ▶ Silizium Si, 1,12 eV
- ▶ Unterschiedliche Energiedifferenzen werden bei Bauelementen mit Halbleitern unterschiedliche Eigenschaften haben.
- ▶ Verdeutlichung:

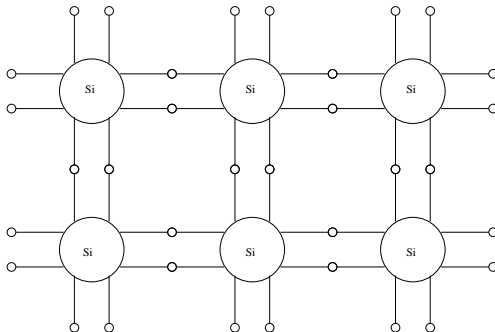




- ▶ Ge- und Si-Atome haben in der äußeren Schale vier Elektronen.
- ▶ Diese können mit den Elektronen anderer Atome eine Kovalenz- oder Elektronenpaarbindung eingehen.
- ▶ Die Anzahl der Bindungen, welche ein Atom eingehen kann, wird durch die Bindungszahl genannt.
- ▶ Wenn beim Übergang vom flüssigen in den festen Zustand mehrere Ge- oder Si-Atome aneinandergesetzt werden, entsteht ein regelmäßig geordnetes Atomgefüge.
- ▶ Diese Struktur heißt Kristallstruktur
- ▶ Jedes Valenzelektron eines Atoms geht dabei mit einem Valenzelektron eines anderen Atoms eine Bindung ein.



► Beispiel für Kristallstruktur

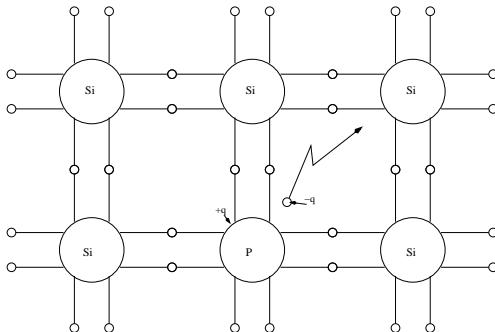




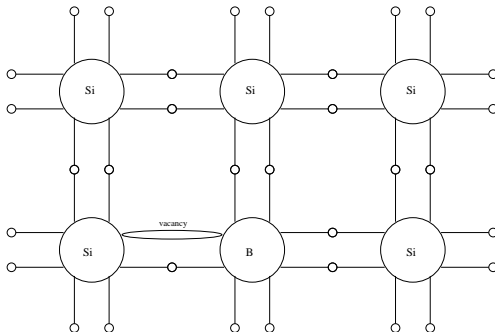
- ▶ Die Energiedifferenz zwischen Valenzband und Leitungsband beträgt beim Halbleiter ca. 1eV.
- ▶ Durch Aufnahme thermischer Energie aus der Umgebung werden Bindungen im Kristall aufgebrochen und Elektronen gelangen aus dem voll besetzten Valenzband in das leere Leitungsband.
- ▶ Dort stehen diese freien Elektronen als Ladungsträger zur Verfügung.
- ▶ Im Valenzband bleibt ein positives Ion bzw. Loch zurück.
- ▶ In das feste Loch im Valenzband kann ein Valenzelektron des Nachbaratoms wandern.
- ▶ Dabei entsteht ein neues Loch. Löcherbewegung kann als Transport positiver Ladung interpretiert werden.

- ▶ Die technische Bedeutung von Halbleitern kam erst, als es möglich war, die Leitfähigkeit durch gezielte Zusetzung von Fremdatomen zu erhöhen.
- ▶ Für die Halbleiterkristalle Si und Ge mit vier Valenzelektronen sind die Fremdatome Aluminium (Al), Bor (B) und Indium (In) mit drei Valenzelektronen oder die Fremdatome Arsen (As), Antimon (Sb) und Phosphor (P) mit fünf Valenzelektronen geeignet.
- ▶ Der Einbau von Fremdatomen wird *Dotieren* genannt.
- ▶ Unterscheidung
 - ▶ Donator (Spalte V)
 - ▶ Acceptor (Spalte III)

► Dotierung mit Phosphor (fünf Valenzelektronen)



► Dotierung mit Bor (drei Valenzelektronen)



- ▶ Die Funktion der meisten Halbleiterbauelemente beruht auf den Eigenschaften einer p-dotierten und n-dotierten Halbleiter-Grenzschicht.
- ▶ Diese Schicht wird auch als pn-Übergang bezeichnet.
- ▶ Da schon bei Raumtemperatur freie Elektronen und Löcher vorhanden sind, erfolgt an der Grenzschicht zwischen n und p ein Ausgleich durch Diffusion.
- ▶ Bewegte Ladungen bedeuten Strom: man nennt diesen Strom auch Diffusionsstrom
- ▶ Durch die Rekombination von Elektronen und Löchern verringert sich die Anzahl der freien Ladungsträger in der Grenzschicht.
- ▶ Die ladungsträgerfreie Grenzschicht wird damit zu einer Sperrschicht.



- ▶ Durch die Diffusion der Elektronen aus der n-Zone bleiben ortsfeste positive Ionen zurück.
- ▶ Durch Rekombination mit den Löchern entstehen negative Ionen.
- ▶ Zwischen den positiven Raumladungen der n-Zone und der negativen Raumladung in der p-Zone entsteht ein elektrisches Feld.
- ▶ Auf freie Ladungsträger innerhalb der Raumladungszone wirkt die Diffusion und in entgegengesetzter Richtung die elektrische Feldkraft.
- ▶ Durch die Rekombination von Elektronen und Löchern verringert sich die Anzahl der freien Ladungsträger in der Grenzschicht.
- ▶ Gleichgewicht, wenn Diffusionswirkung und Feldwirkung auf freie Ladungsträger gleich groß.
- ▶ sog. Diffusionsspannung U_D .
 - ▶ Germanium: $U_D = 0,37 \text{ Volt}$
 - ▶ Silizium: $U_D = 0,75 \text{ Volt}$

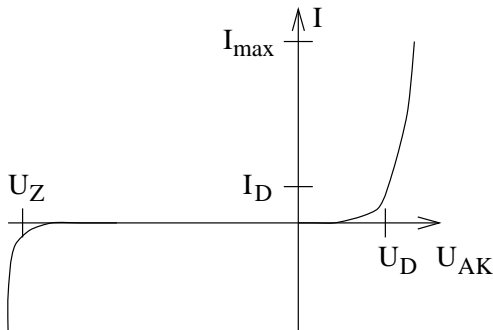


- ▶ Ein pn-Übergang wird zur Halbleiterdiode, wenn von außen eine Spannung angelegt wird.
- ▶ Je nach Polung der äußeren Spannung ist der pn-Übergang leitend oder gesperrt.
- ▶ Wird der Minuspol der Spannungsquelle an die p-Zone und der Pluspol an die n-Zone angeschlossen, steigt die Spannung über der Raumladungszone.
- ▶ Die ladungsträgerfreie Zone wird größer.
- ▶ Die Halbleiterdiode sperrt.
- ▶ Irgendwann bricht die Diode allerdings durch. Dann kommen Elektronen aus dem Valenzband in das Leitungsband.
- ▶ Zener-Effekt



- ▶ Wird der Minuspol der Spannungsquelle an die n-Zone angeschlossen und der Pluspol an die p-Zone, dann wird die Spannung über der Raumladungszone verringert.
- ▶ Die ladungsträgerfreie Zone wird abgebaut.
- ▶ der pn-Übergang ist leitend, die Diode in Durchlaßrichtung gepolt.

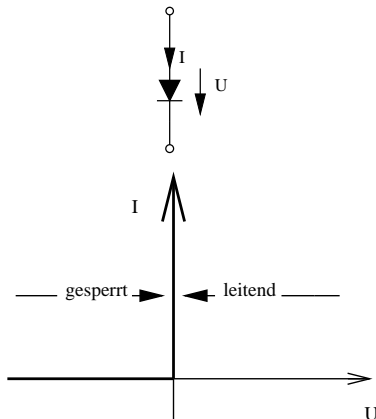
- Ist $U_{AK} > U_D$, so leitet die Diode. Die Durchlaßspannung U_D ist eine materialabhängige Konstante, die bei Si-Dioden etwa 0.7 V beträgt. Im Bereich $U_Z < U_{AK} < 0V$ sperrt die Diode, während sie für Spannungen $U_{AK} < U_Z$ wieder leitet.



Diodenmodelle

ideale Diode

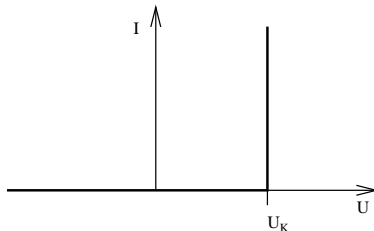
► Schaltbild und Kennlinie



Diodenmodelle

technisch ideale Diode

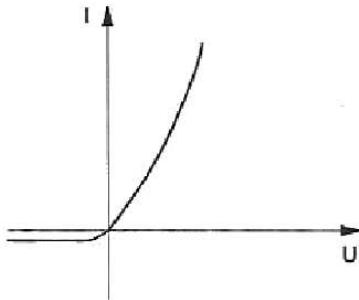
- U_K bezeichnet die sogenannte Knickspannung. Für $U > U_K$ ist der Strom beliebig groß. Die Knickspannung wird für Si-Dioden mit 0,7 V angenommen.



Diodenmodelle

Physikalisch ideale Diode

$$I = I_S \cdot \left(e^{\frac{U}{U_T}} - 1 \right)$$





- ▶ pn-Übergänge
- ▶ Dioden

Nächste Vorlesung behandelt

- ▶ Bipolartransistoren