

# Bandstrukturen - leicht gemacht

Eva Haas  
Stephanie Rožker

Juni 2009

Projekt Festkörperphysik



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Bandstrukturen</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Energiebänder</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>Brillouin-Zonen - eine Übersicht</b>	<b>7</b>
<b>4</b>	<b>Beispiele</b>	<b>8</b>
4.1	Aluminium – ein einfaches Metall . . . . .	8
4.2	Kupfer – ein Übergangsmetall . . . . .	9
4.3	Germanium – ein Halbleiter . . . . .	10
<b>5</b>	<b>Leitfaden</b>	<b>13</b>
<b>6</b>	<b>Quellennachweis</b>	<b>15</b>

# 1 Bandstrukturen

Die Bandstruktur ist die **Dispersionsrelation** der Elektronen, die unter Einfluss eines Festkörper-Gitterpotentials stehen.

Hierbei wird die Abhängigkeit der Energie  $E$  vom Wellenvektor  $k$  aufgetragen, wobei  $k$  meist als reduzierter Wellenvektor dargestellt wird, da für die Dispersionsrelation ja nur die Bereiche innerhalb der Brillouin-Zone relevant sind (Elektronen befinden sich in einem periodischen Potential). Die Energie der Zustände ist von der Richtung innerhalb der Brillouin-Zone abhängig, dies wird durch den reduzierten Wellenvektor berücksichtigt.

Von Punkt  $\Gamma$  - dort hat der Wellenvektor den Wert  $k = 0$ , entspricht dem Zentrum der ersten Brillouin-Zone - geht man in die Richtungen der kritischen Punkte (siehe Tabelle 1). Die  $[100]$ -,  $[110]$ - und  $[111]$ -Richtungen werden so garantiert untersucht.

Mit dem Bändermodell können Isolatoren, Metalle und Halbleiter beschrieben werden, siehe Abbildung 1. Hier ist die Lage der Fermienergie  $E_f$  der verschiedenen Typen interessant.

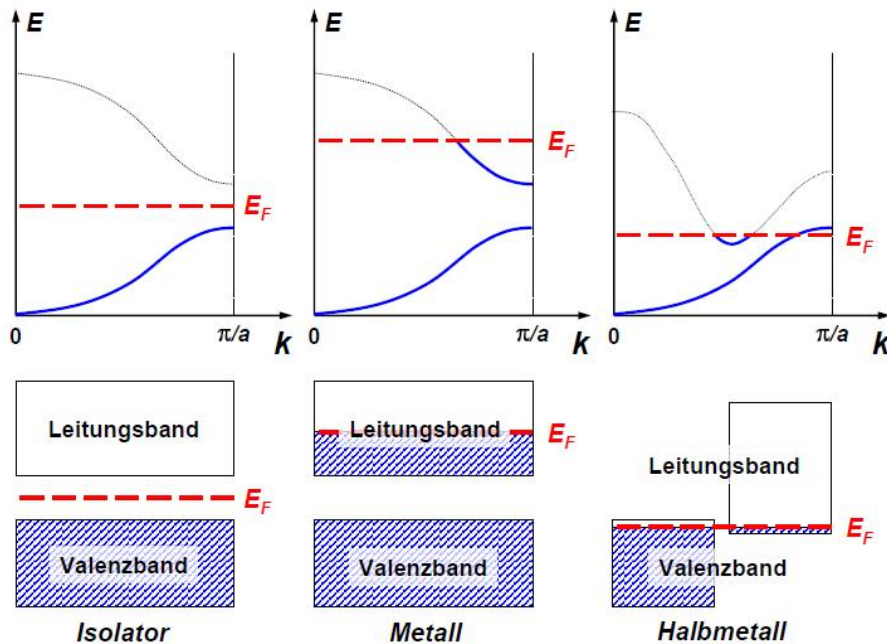


Abbildung 1: skizziertes Bandschema für Isolatoren, Leiter, Halbleiter

# 2 Energiebänder

Bei einem freien Elektronen hängt die Energie immer quadratisch (parabelförmig) vom Impuls ab ( $E = \frac{p^2}{2m} = \frac{\hbar^2 k^2}{2m}$ , mit  $p$  dem Impuls  $m$  der Masse des Elektrons,  $k$  dem Wellenvektor).

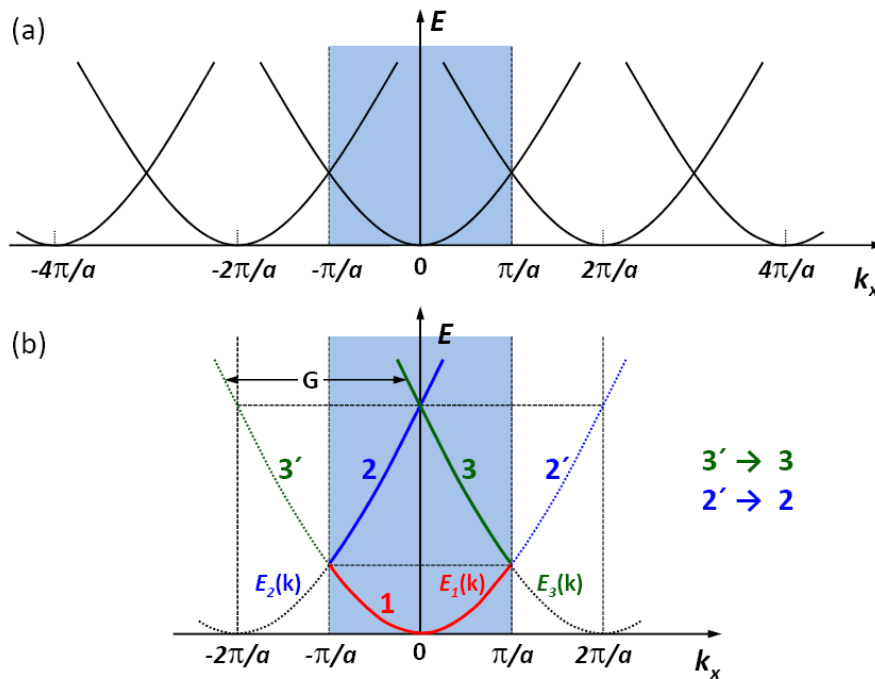


Abbildung 2: (a) Parabolische Energiebänder für ein freies Elektron in einer Dimension. Die Gitterperiode im realen Raum ist  $a$ . (b) Reduziertes Zonenschema. Die 1. Brillouin-Zone ist grau hinterlegt.

Bei bestimmten  $k$ -Werten kann dieser parabolische Zusammenhang jedoch nicht zutreffen, da hier Bragg-Reflexionen auftreten (bei  $k$ -Vektoren, die auf der Brillouin-Zonengrenze enden). Hier gehen die fortschreitenden in stehende Wellen über.

Man kann also sagen, dass die Wechselwirkung mit dem Gitter die Energieparabel des freien Elektrons in eine Serie von Energiebändern zerreißt (siehe Abbildung 3 und 4) und somit Energielücken (= Bandlücken) entstehen.

Die Energiebnderstruktur ist abhängig von der Kristallstruktur und der Ausbreitungsrichtung der Elektronenwelle.

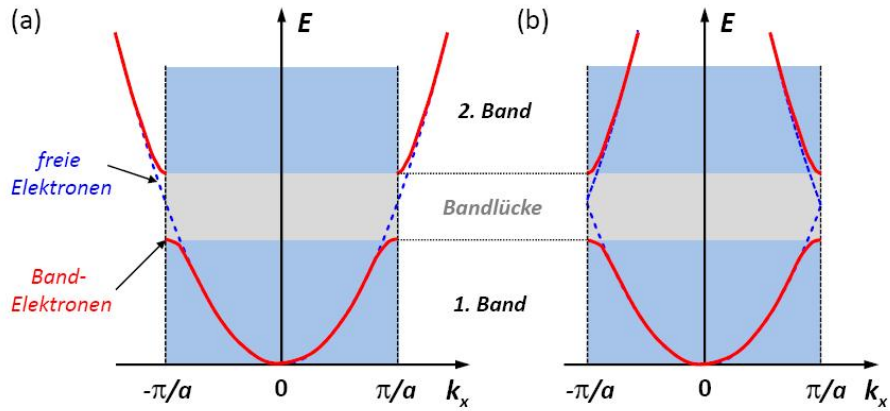


Abbildung 3: Zur Entstehung der Energielücke am Zonenrand durch stehende Elektronenwellen. Die erste Brillouin-Zone ist farbig hinterlegt. (a) ausgedehntes Zonenschema, (b) reduziertes Zonenschema. Die  $E(k)$ - Beziehung für freie Elektronen ist strichliert eingezeichnet.

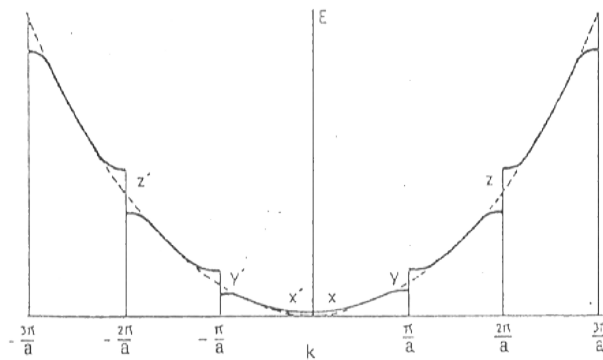


Abbildung 4: Die Energieparabel  $E(k)$  des freien Elektrons wird durch den Gittereinfluss "zerrissen".

## Experimentelle Bestimmung der Bandstruktur

Eine Möglichkeit die Bandstruktur eines Materials zu untersuchen, ist die u.a. Photoelektronenspektroskopie (PES). Hierbei wird der Festkörper mit Photonen mit der Energie  $E = \hbar\omega$  bestrahlt und somit Elektronen angeregt. Diese gelangen dadurch von den besetzten in unbesetzte (höherenergetische) Bänder. Wenn die Energie groß genug ist, können sie sogar das Material verlassen. Die kinetische Energie  $E_{kin}$  dieser ausgetretenen Elektronen wird bestimmt über die Formel  $E = \hbar\omega = \phi + E_{kin} + E_b$ , wobei  $\phi$  die Austrittsarbeit,  $E_b$  die Bindungsenergie der Elektronen im Festkörper ist. Bei Kenntnis von  $\phi$  kann mit Hilfe eines Analysators die kinetische Energie  $E_{kin}$  gemessen werden und so die Bindungsenergie  $E_b$  berechnet werden.

Die Verteilung der elektronischen Zustände im Festkörper lässt sich nun aus der Anzahl der detektierten Elektronen mit einer bestimmten kinetischen Energie ermitteln (Anzahl  $n$  in Abhängigkeit von  $E_{kin}$ ).

Bei der Bindungsenergie  $E_b = 0$ , was also der Fermienergie  $E_f$  entspricht, liegt die maximale kinetische Energie der Photoelektronen vor. Da - abgesehen von Verschmierungen durch die Fermifunktion - keine Zustände oberhalb von  $E_f$  besetzt sind, werden keine Photoelektronen mit größerer kinetischen Energie detektiert.

Zusätzlich zur Energieerhaltung nützt man, da die PES eine winkelauflösende Methode ist, auch die Erhaltung des Kristallimpulses aus.

Über ein kompliziertes Verfahren kann aus dieser Winkelabhängigkeit die Bandstruktur  $E(k)$  gewonnen werden.

Weitere Möglichkeiten zur experimentellen Bestimmung der Bandstruktur sind:

- *Energielücke von Halbleitern*
  - Messung des Hall-Effekts und der Temperaturabhängigkeit der elektrischen Leitfähigkeit
  - Messung der optischen Absorption
- *Bestimmung der effektiven Masse*
  - Messung der Temperaturabhängigkeit der spezifischen Wärme des Elektronensystems
- *Zustandsdichte des Fermi-Niveaus*
  - Messung der Temperaturabhängigkeit der spezifischen Wärme des Elektronensystems
- *Fermi-Fläche*
  - Messung des De-Haas-Van-Alphen-Effekts
  - Analyse der Magneto-Transporteigenschaften

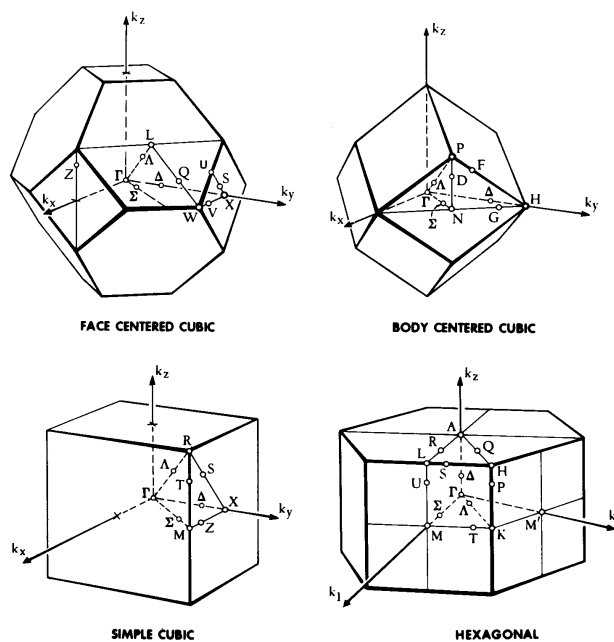


Abbildung 5: Brillouin-Zonen der wichtigsten Kristallstrukturen inklusive Beschriftung der kritischen Punkte.

### 3 Brillouin-Zonen - eine Übersicht

Tabelle 1. Benennung der kritischen Punkte in den Brillouin-Zonen (Vgl. Abbildung 5)

Symbol	Beschreibung
$\Gamma$	Mittelpunkt der 1.Brillouin Zone
<b>einfach kubisch - sc</b>	
M	Mittelpunkt einer Kante
R	Eckpunkt
X	Mittelpunkt einer Fläche
<b>kubisch flächenzentriert - fcc</b>	
K	Mittelpunkt einer Kante, die 2 hexagonale Flächen verbindet
L	Mittelpunkt einer hexagonalen Fläche
U	Mittelpunkt einer Kante, die 1 hexagonale und 1 quadratische Fläche verbindet
W	Eckpunkt
X	Mittelpunkt einer quadratischen Fläche
<b>kubisch raumzentriert - bcc</b>	
H	Eckpunkt, auf den 4 Kanten zusammenlaufen
N	Mittelpunkt einer Fläche
P	Eckpunkt, auf den 3 Kanten zusammenlaufen
<b>hexagonal</b>	
A	Mittelpunkt einer hexagonalen Fläche
H	Eckpunkt
K	Mittelpunkt einer Kante, die 2 rechteckige Flächen verbindet
L	Mittelpunkt einer Kante, die 1 hexagonale und 1 rechteckige Fläche verbindet
M	Mittelpunkt einer rechteckigen Fläche

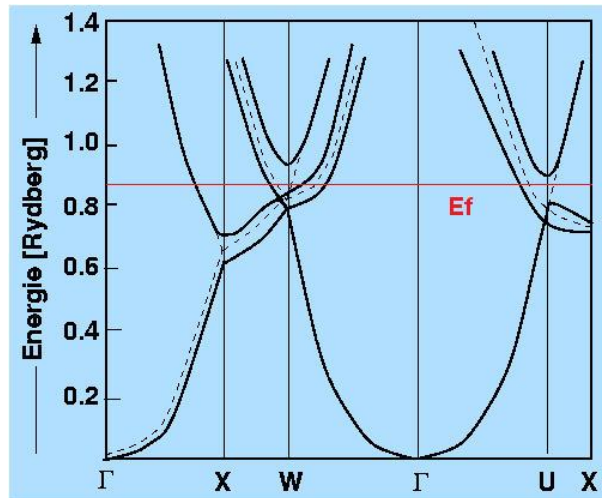


Abbildung 6: Die Bandstruktur  $E(k)$  von Aluminium, die Energie der Elektronen ohne Gittereinfluss ist strichliert eingezeichnet.  $E_f$  bezeichnet das Fermi-Niveau.

## 4 Beispiele

### 4.1 Aluminium – ein einfaches Metall

Aluminium befindet sich in der 3. Hauptgruppe des Periodensystems und besitzt die Elektronenkonfiguration  $[\text{Ne}]3s^23p^1$ .

Aluminium weist eine fcc-Struktur auf. Daher betrachten wir bei der Bandstruktur die Wege vom Mittelpunkt der Brillouin-Zone  $\Gamma$  zu Punkt  $X$ , dem Mittelpunkt einer quadratischen Fläche (entspricht der  $[100]$ -Richtung). Von  $X$  gehen wir zu  $W$ , einem Eckpunkt, und dann wieder zurück zu  $\Gamma$  (entspricht der  $[110]$ -Richtung). Außerdem betrachtet man noch den Weg von  $\Gamma$  weiter zu  $U$ , einem Mittelpunkt einer Kante, die eine hexagonale und eine quadratische Fläche verbindet.

Am Beispiel Aluminium kann man sehr gut die parabelförmige Abhängigkeit der Energie erkennen. Hier kommt die Bandstruktur eigentlich nur dadurch zustande, dass die Energieparabeln, die von außerhalb der 1. Brillouin-Zone in diese hineinragen, auch berücksichtigt werden. Die Aufspaltung der Bandstruktur aufgrund des Gitterpotentials (Bandlücke) an den Grenzen der Brillouin-Zone ist gering. In Abbildung 6 ist die Bandstruktur der s- und p-Elektronen ohne Gitterpotential strichliert eingezeichnet. Die Ähnlichkeiten zum freien Elektronengas sind charakteristisch für die einfachen Metalle (vor allem bei den Alkalimetallen Li, Na und K zu finden).

Dadurch, dass das Gitter einen so geringen Einfluss auf die Bandstruktur hat, folgt für die Zustandsdichte, der in etwa für freie Elektronen erwartete  $\sqrt{E}$ -Verlauf, siehe Abbildung 7.

In Abbildung 8 ist der ganze Sachverhalt (Bandstruktur, Zustandsdichte und 1. Brillouin-Zone) noch einmal übersichtlich dargestellt.

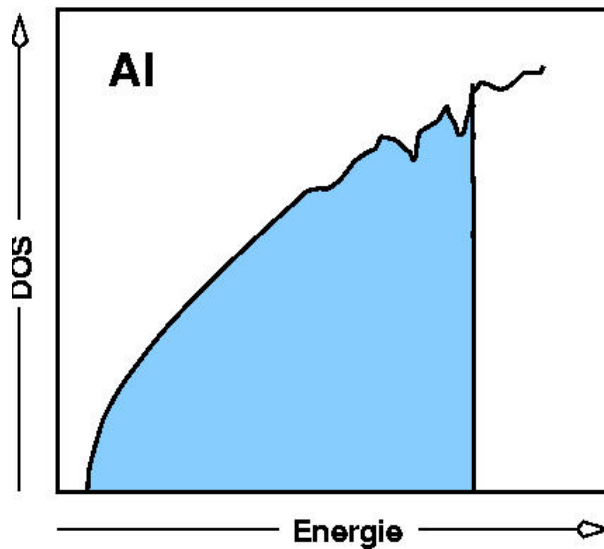


Abbildung 7: Die Zustandsdichte der Elektronen in Aluminium zeigt ca. einen  $\sqrt{E}$ -Verlauf.

Da die DOS (Density Of States = Zustandsdichte) kontinuierlich verläuft, zwar an den Brillouin-Zonengrenzen leichte Schwankungen auftreten, zählt Aluminium zu den leitfähigen Materialien.

Bis zur Fermienergie  $E_f$  wird die Bandstruktur aufgefüllt.

Es ist zu erkennen, dass die Fläche konstanter Energie (= Fermifläche), bis zu der die Bänder aufgefüllt sind,  $E(k) = E_f$ , mehrere Bänder schneidet. Bei Aluminium ist diese Fläche also keine zusammenhängende Fläche (bei den Alkalimetallen ist dies schon der Fall).

## 4.2 Kupfer – ein Übergangsmetall

Kupfer besitzt die Ordnungszahl 29 und ist ein Übergangsmetall mit der Elektronenkonfiguration  $[\text{Ar}]3d^{10}4s^1$ . Auch Kupfer weist eine fcc-Struktur auf.

Wie zuvor bei Aluminium, das ebenfalls eine fcc-Struktur aufweist, werden die Richtungen hoher Symmetrie (= kritische Punkte) untersucht. Im Gegensatz zu den einfachen Metallen sind die Bandstrukturen der Übergangsmetalle durch den Einfluss der d-Bändern wesentlich komplizierter. Es ergeben sich Bänder, die wieder den Parabeln eines freien Elektronengases gleichen (sie resultieren aus den s-Termen). Zusätzlich treten unterhalb der Fermi-Energie sehr flache Bänder mit geringer energetischer Breite (geringe Dispersion) auf, die sich darauf zurückführen lässt, dass die d-Elektronen relativ stark gebunden sind (siehe Abbildung 9).

Betrachtet man die Zustandsdichte (in Abbildung 9) näher, so kann man erkennen, dass die  $\sqrt{E}$ -Abhängigkeit, die von den s-Elektronen stammt, von den dichter besetzten Zuständen

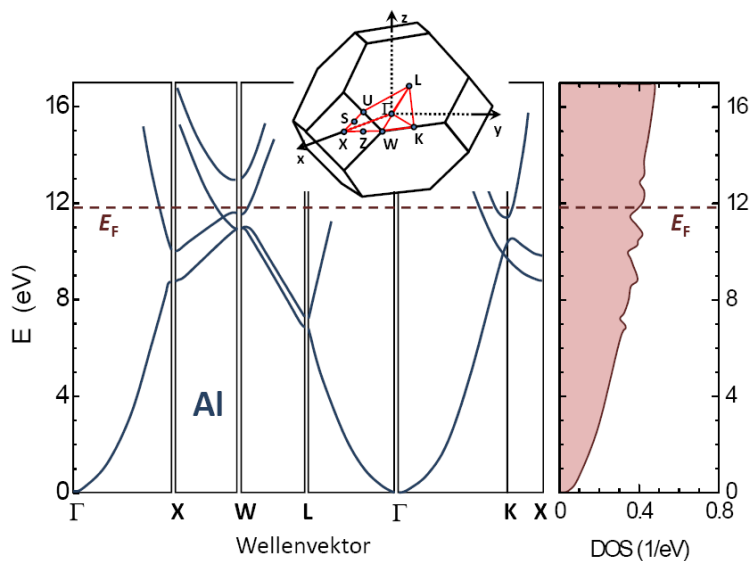


Abbildung 8: Die Elektronendispersionsrelation  $E(k)$ , die Elektronenzustandsdichte (DOS) und die Brillouin-Zone (fcc) von Aluminium.

der d-Elektronen überlagert wird. In den d-Bändern ist die Zustandsdichte sehr hoch, da in den schmalen d-Bändern viele Zustände innerhalb eines kleinen Energieniveaus untergebracht werden können.

Im Vergleich dazu liefert das breite s-Band eine kleine Zustandsdichte.

Das oberste, nahezu parabelförmige Band überschreitet die Fermi-Energie und ist somit nur halb gefüllt. Das 4s-Elektron wechselwirkt mit den 3d-Elektronen, daher ist der Fermifläche nicht kugelförmig.

### 4.3 Germanium – ein Halbleiter

Germanium befindet sich in der 4.Hauptgruppe des Periodensystems und besitzt die Elektronenkonfiguration  $[\text{Ar}]3d^{10}4s^24p^2$ . Germanium weist eine Diamant-Struktur auf.

Im Unterschied zu den zuvor erhaltenen Bandstrukturen tritt nun eine absolute Bandlücke auf, das bedeutet also, dass gewisse Energiezustände nie eingenommen werden, die Zustandsdichte ist an diesen Stellen also 0. Es liegt ein Halbleiter vor.

In der Mitte der Energielücke liegt bei  $T = 0K$  die Fermi-Energie. Die Breite der Energielücke  $E_g$  liegt bei Raumtemperatur bei Halbleitern prinzipiell in einem Bereich von ca. 0,3 bis 3 eV. Bei Germanium beträgt die Bandlücke bei  $\Gamma$  - also  $k = 0$  -  $E_g = 1,1eV$ , die kleinste tritt aber am L-Punkt bei  $E_g = 0,75eV$ . Die Elektronen wollen lieber an diesem Punkt vom Valenzband in das Leitungsband übertreten; den dafür nötigen Impuls holen sie sich u.a. von thermischen Gitterschwingungen (Phononen), Elektron-Elektron-

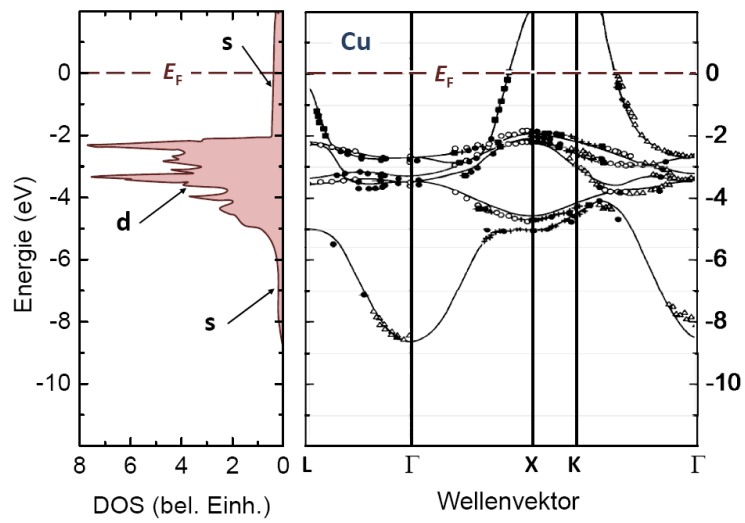


Abbildung 9: Die Elektronenzustandsdichte und die Elektronendispersionsrelation  $E(k)$  von Kupfer.

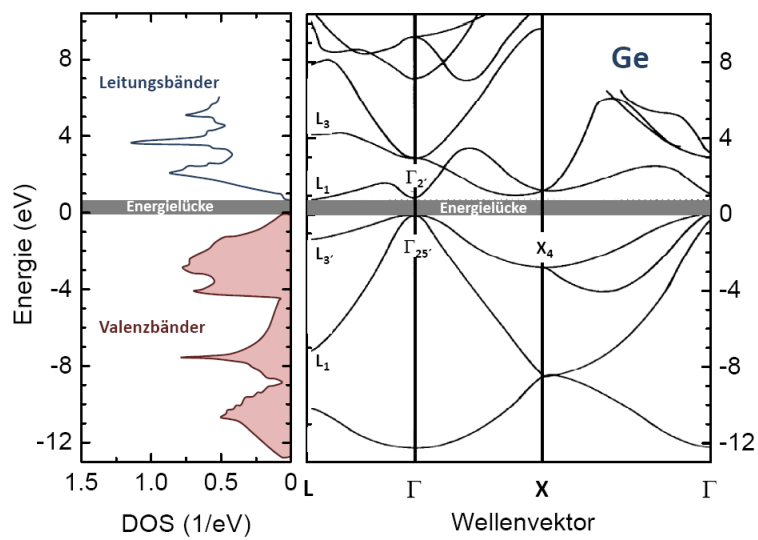


Abbildung 10: Die Elektronenzustandsdichte und die Elektronendispersionsrelation  $E(k)$  von Germanium.

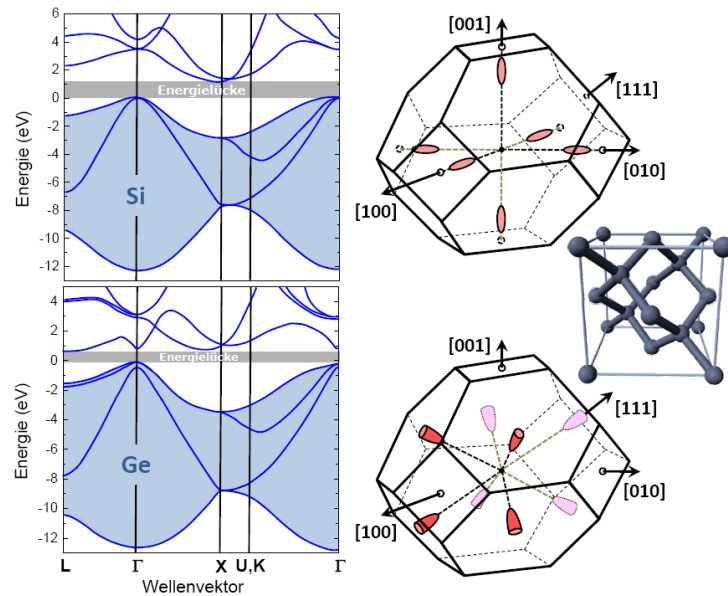


Abbildung 11: Berechnete Bandstruktur von Silizium und Germanium. Das kleinste Leitungsbandminimum in der Bandstruktur wird gesucht und seine Richtung bestimmt. In der rechten Abbildung sind die daraus resultierenden zigarrenförmigen Elektronenkonzentrationen (Leitungsbandminima) in allen Richtungen dargestellt.

Wechselwirkungen (Auger-Prozesse) oder elektromagnetischer Strahlung. Germanium ist also ein indirekter Halbleiter.

Die Richtung  $\Gamma$ -L stellt die  $[111]$ -Richtung dar, es gibt also insgesamt 8 Leitungsbandminima (siehe Abbildung 11). Man kann sich die dort vorherrschende Elektronenkonzentration als zigarrenförmig vorstellen.

Bei näherer Betrachtung des Valenzbands sieht man drei verschiedene parabelförmige Bänder mit Scheitel bei  $k = 0$ : Es ergeben sich zwei entartete Valenzbandmaxima bei  $k = 0$ , die kugelsymmetrisch mit verschiedenen effektiven Massen sind. Die effektive Masse lässt sich über die Krümmung der Bandstruktur  $E(k)$  bestimmen. Die Löcher des Valenzbandes mit geringerer Krümmung nennt man schwere Löcher („heavy holes“,  $m_{hh,Ge}^* = 0,34m_e$ ), jene mit größerer Krümmung nennt man leichte Löcher („light holes“,  $m_{lh,Ge}^* = 0,043m_e$ ). Es existiert aber noch ein weiteres Band, das bei  $k = 0$  um 0,29 eV tiefer liegt; es resultiert aus der Spin-Bahn-Wechselwirkung.

## 5 Leitfaden

Was lässt sich aus einer Bandstruktur nun mit den erhaltenen Kenntnissen über das Material, seine Struktur und Eigenschaften auslesen? Zum Beispiel könnte man folgendermaßen vorgehen:

### 1. Leiter oder Nicht-/Halbleiter?

Gibt es eine Bandlücke in der Bandstruktur? Wird die Zustandsdichte Null?

Leiter: Die Zustandsdichte verläuft kontinuierlich, alle Zustände bis zur Fermi-Energie sind besetzt.

Nichtleiter: Bandlücke ist unüberwindbar ( $E_g > 3 \text{ eV}$ )

Halbleiter: Bandlücke durch thermische Anregung überwindbar ( $E_g = 0,3 \dots 3 \text{ eV}$ )

### 2. Struktur?

Einen guten Anhaltspunkt liefern die Bezeichnungen der kritischen Punkte auf der x-Achse (Vgl. mit Tabelle 1).

Die wichtigsten Halbleiter (Si, Ge, GaAs) bilden Diamant-Strukturen. Die Gitterstrukturen der chemischen Elemente sind in Abbildung 12 zu sehen.

Li	Be																				B	C	N	O	F	Ne	
Na	Mg																					Al	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ga	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr										
Cs	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe										
Rb	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn										
Fr	Ra	Ac																									
			Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu											
			Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md		Lw											

<span style="display:inline-block; width:15px; height:15px; background-color: #e67e22; border: 1px solid black;"></span> bcc	<span style="display:inline-block; width:15px; height:15px; background-color: #92d050; border: 1px solid black;"></span> fcc	<span style="display:inline-block; width:15px; height:15px; background-color: #3498db; border: 1px solid black;"></span> hcp	<span style="display:inline-block; width:15px; height:15px; background-color: #f1c40f; border: 1px solid black;"></span> Diamant
		<span style="display:inline-block; width:15px; height:15px; background-color: #add8e6; border: 1px solid black;"></span> dhcp	

Abbildung 12: Gitterstrukturen der chemischen Elemente

**3. Halbleiter: direkt oder indirekt, wo liegen die Leitungsbandminima bzw. wieviele gibt es?**

Wo liegt das kleinste Leitungsbandminimum?

direkter Halbleiter: Leitungsbandminimum liegt bei  $k = 0$

indirekter Halbleiter: Leitungsbandminimum liegt nicht direkt über  $k = 0$

Im Fall eines indirekten Halbleiters kann die Richtung in der ein Leitungsbandminimum liegt, bestimmt werden und überlegt werden, wie oft diese Richtung im Kristall vorkommt ([100]: 6 mal, [110]: 12 mal, [111]: 8 mal).

**4. Leiter: einfaches Metall oder Übergangsmetall?**

Bei einem einfachen Metall gibt es keine großen Abweichungen von der Parabelform der Funktion  $E(k)$ . Die Zustandsdichte zeigt nahezu einen  $\sqrt{E}$  - Verlauf.

## 6 Quellennachweis

### Literatur

- [1] GROSS, R., MARX, A. *Festkörperphysik*. Kapitel 8 und 10. Vorlesungsskript zur Vorlesung im WS 2004/2005 und SS 2009. Lehrstuhl für Technische Physik, Garching.
- [2] GERTHSEN, C., KNESER, H., VOGEL, H. *Gerthsen Physik*. 14. Auflage, Springer Verlag 1982.
- [3] WEISSMANTEL, C., HAMANN, C. *Grundlagen der Festkörperphysik*. 1. Auflage, Springer Verlag 1979.
- [4] IBACH, H., LÜTH, H.. *Festkörperphysik: Einführung in die Grundlagen*. 4. Auflage, Springer Lehrbuch 1995.
- [5] *Brillouin zone*. Aus Wikipedia - the free encyclopedia. Aufgerufen am 28.6.2009, [http://en.wikipedia.org/wiki/Brillouin\\_zone](http://en.wikipedia.org/wiki/Brillouin_zone)

## Abbildungen

- Abbildung 1: aus [1], Abbildung 8.15, Seite 299
- Abbildung 2: aus [1], Abbildung 8.4, Seite 281
- Abbildung 3: aus [1], Abbildung 8.8, Seite 286
- Abbildung 4: abgerufen am 28.6.2009, [http://psi.phys.wits.ac.za/teaching/Connell/phys284/2005/lecture-07/lecture\\_07/img99.png](http://psi.phys.wits.ac.za/teaching/Connell/phys284/2005/lecture-07/lecture_07/img99.png)
- Abbildung 5: abgerufen am 28.6.2009, [https://wiki.fysik.dtu.dk/gpaw/\\_images/bz-all.png](https://wiki.fysik.dtu.dk/gpaw/_images/bz-all.png)
- Abbildung 6: abgerufen am 28.6.2009, [http://images.google.at/imgres?imgurl=http://ruby.chemie.uni-freiburg.de/Vorlesung/Gif\\_bilder/Intermetallische/fermi\\_2dim\\_al.jpg&imgrefurl=http://ruby.chemie.uni-freiburg.de/Vorlesung/intermetallische\\_2\\_3.html&usg=\\_\\_xBxIcSHpce7GTd44wej-zfR9uJ4=&h=476&w=478&sz=33&hl=de&start=17&um=1&tbnid=ccNUHbOPqsc91M:&tbnh=128&tbnw=129&prev=/images%3Fq%3Dbandstruktur%2Baluminium%2Be\(k\)%26hl%3Dde%26client%3Dfirefox-a%26rls%3Dorg.mozilla:de:official%26sa%3DG%26um%3D1](http://images.google.at/imgres?imgurl=http://ruby.chemie.uni-freiburg.de/Vorlesung/Gif_bilder/Intermetallische/fermi_2dim_al.jpg&imgrefurl=http://ruby.chemie.uni-freiburg.de/Vorlesung/intermetallische_2_3.html&usg=__xBxIcSHpce7GTd44wej-zfR9uJ4=&h=476&w=478&sz=33&hl=de&start=17&um=1&tbnid=ccNUHbOPqsc91M:&tbnh=128&tbnw=129&prev=/images%3Fq%3Dbandstruktur%2Baluminium%2Be(k)%26hl%3Dde%26client%3Dfirefox-a%26rls%3Dorg.mozilla:de:official%26sa%3DG%26um%3D1)
- Abbildung 7: abgerufen am 28.6.2009, [http://images.google.at/imgres?imgurl=http://ruby.chemie.uni-freiburg.de/Vorlesung/Gif\\_bilder/Intermetallische/fermi\\_2dim\\_al.jpg&imgrefurl=http://ruby.chemie.uni-freiburg.de/Vorlesung/intermetallische\\_2\\_3.html&usg=\\_\\_xBxIcSHpce7GTd44wej-zfR9uJ4=&h=476&w=478&sz=33&hl=de&start=17&um=1&tbnid=ccNUHbOPqsc91M:&tbnh=128&tbnw=129&prev=/images%3Fq%3Dbandstruktur%2Baluminium%2Be\(k\)%26hl%3Dde%26client%3Dfirefox-a%26rls%3Dorg.mozilla:de:official%26sa%3DG%26um%3D1](http://images.google.at/imgres?imgurl=http://ruby.chemie.uni-freiburg.de/Vorlesung/Gif_bilder/Intermetallische/fermi_2dim_al.jpg&imgrefurl=http://ruby.chemie.uni-freiburg.de/Vorlesung/intermetallische_2_3.html&usg=__xBxIcSHpce7GTd44wej-zfR9uJ4=&h=476&w=478&sz=33&hl=de&start=17&um=1&tbnid=ccNUHbOPqsc91M:&tbnh=128&tbnw=129&prev=/images%3Fq%3Dbandstruktur%2Baluminium%2Be(k)%26hl%3Dde%26client%3Dfirefox-a%26rls%3Dorg.mozilla:de:official%26sa%3DG%26um%3D1)
- Abbildung 8: aus [1], Abbildung 8.17, Seite 303
- Abbildung 9: aus [1], Abbildung 8.18, Seite 304
- Abbildung 10: aus [1], Abbildung 8.19, Seite 305
- Abbildung 11: aus [1], Abbildung 10.1, Seite 403
- Abbildung 12: aus [1], Abbildung 1.16, Seite 19