

LÖSUNGSVORSCHLAG ZUM ÜBUNGSBLATT NR.5

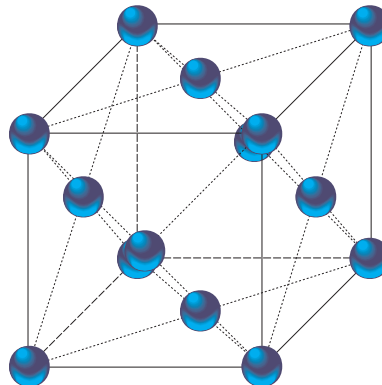
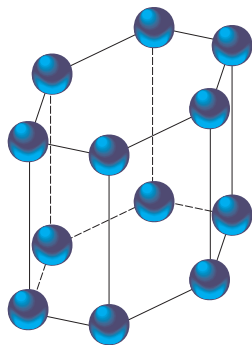
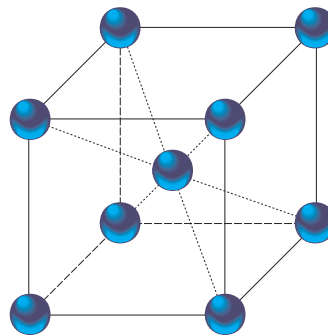
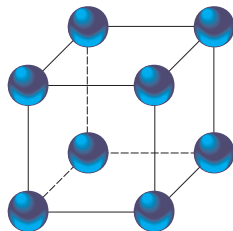
Aufgabe 31

a.)

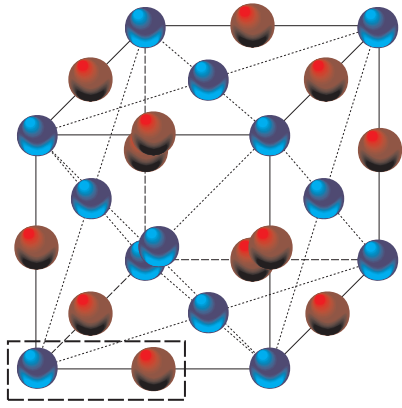
Ein Kristall ist ein Körper, der im Großen durch Ausbildung von ebenen Flächen und glatten Kanten gekennzeichnet ist.



Diese makroskopische Erscheinungsform spiegelt den mikroskopischen Aufbau wieder. Dieser besitzt eine hohe Symmetrie, da die Atome ganz regelmäßig auf einem Gitter angeordnet sind. Die Einheit mit dem kleinsten Volumen, aus der das Gitter durch Verschieben aufgebaut werden kann, bezeichnet man als primitive Einheitszelle. Es gibt viele unterschiedliche Arten von Gittern und damit auch von Einheitszellen; drei davon sind das kubisch primitive, das kubisch raumzentrierte und das kubisch flächenzentrierte Gitter:

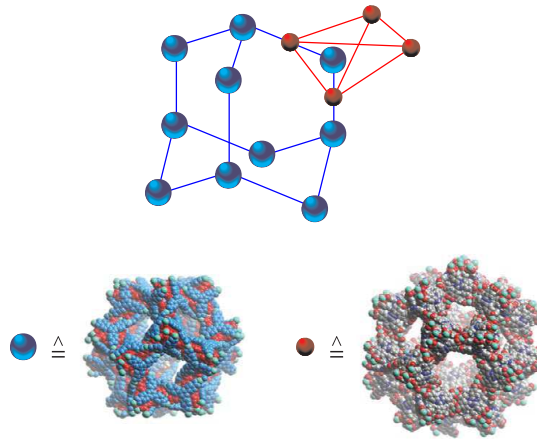


Die kleinste strukturelle Einheit, die man einer solchen primitiven Einheitszelle zuordnen kann, wird Basis genannt. Das Kristallgitter ist also durch Angabe der primitiven Einheitszelle und seiner Basis vollständig bestimmt.



Die Basis kann aus einem Atom bestehen, wie das in den obigen gezeigten Kristallgittern der Fall ist (beispielsweise bei Edelgasen unter dem Gefrierpunkt oder bei Metallen). Sie kann jedoch auch aus mehreren Atomen bestehen. Bei Kochsalz (Natriumchlorid NaCl) handelt es sich um eine zweiatomige Basis, nämlich einem Natriumion Na^+ und einem Chloridion Cl^- . Diese Ionen werden durch elektrostatische Anziehungskräfte (Coulombkräfte) aneinander gebunden.

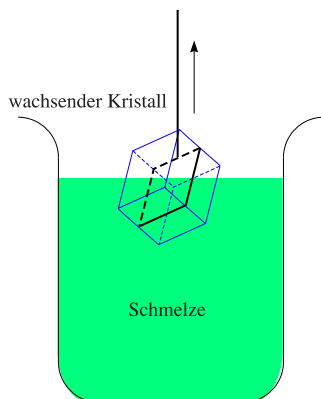
Die Basis kann sogar aus riesigen komplexen organischen Molekülen bestehen, wie bei folgendem Beispiel, bei dem man ein Gitter aus großen organischen Molekülen erzeugt hat, das aufgrund seiner Hohlräume besondere Eigenschaften hat:



b.)

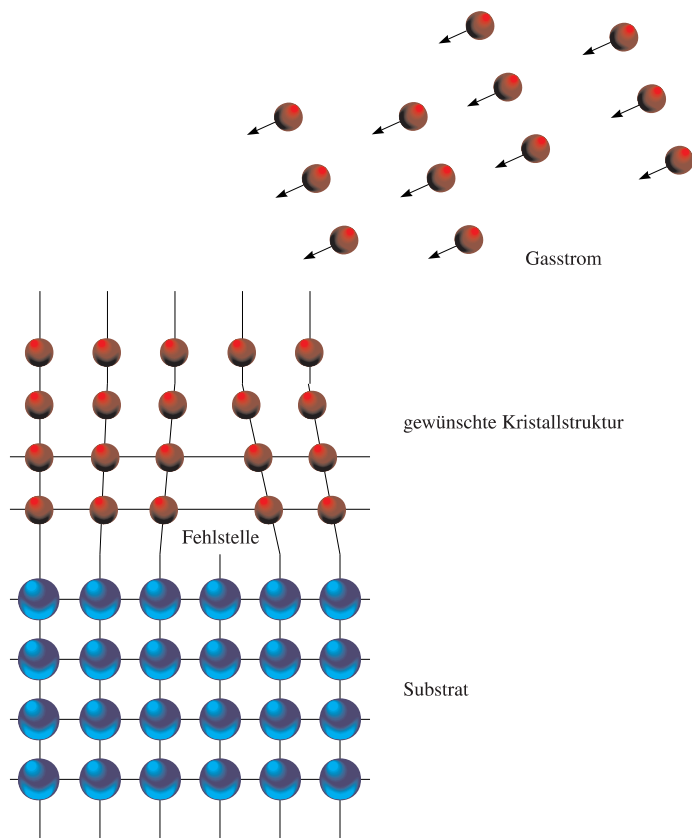
Es gibt im Grunde zwei Möglichkeiten, wie man künstlich einen Kristall herstellen kann:

1.) Kristallwachstum in einer Schmelze:

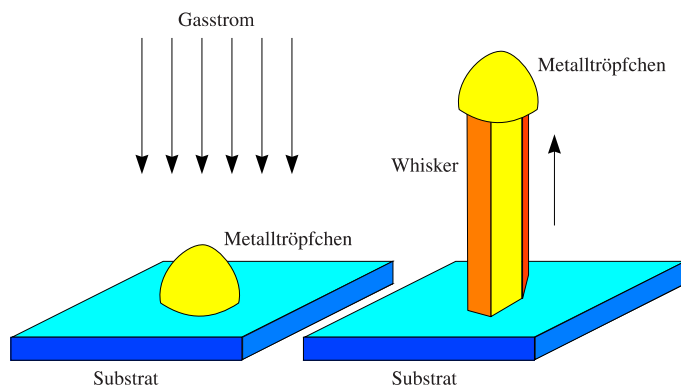


Hierbei wird eine Schmelze aus Atomen hergestellt, aus denen man den Kristall aufbauen möchte. Am Anfang wird ein fertiger Kristall in die Schmelze gehängt und nach oben gezogen, so dass sein unterer Teil von der Schmelze benetzt wird. Auf dieser Fläche setzen sich Atome aus der Schmelze fest und der Kristall vergrößert sich. Dieser kann nun langsam aus der Schmelze gezogen werden, aber so, dass er diese immer noch berührt. Auf diese Weise können der lange Kristalle erzeugt werden.

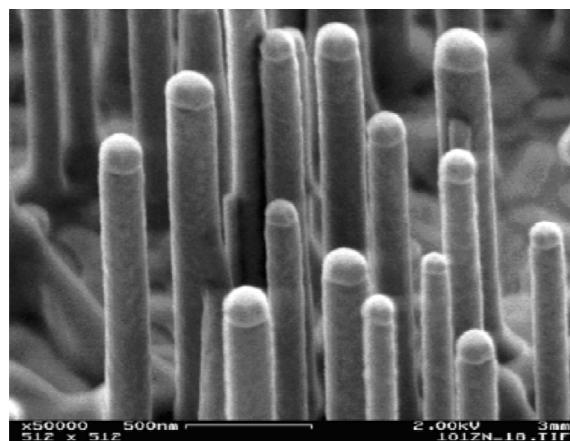
2.) Kristallwachstum durch Epitaxie:



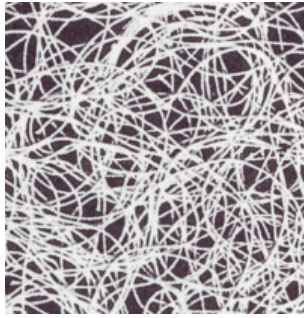
Bei dieser Methode wird eine Unterlage (Substrat) mit einem anderen Material in fester, flüssiger oder gasförmiger Phase in Kontakt gebracht. Die Atome dieses Materials können sich auf der Unterlage festsetzen und so bilden sich immer mehr Lagen des anderen Materials auf dem Substrat und so entsteht ein neues Kristallgitter. Der Nachteil des Verfahrens ist, dass die Kristallgitter des Materials und des Substrats gut übereinstimmen müssen, weil sonst anfangs Fehlstellen entstehen, die sich unter Umständen als Versatz durch den gesamten Kristall ziehen können.



Es ist auch so, dass ein Großteil der aufgedampften Atome nicht auf dem Substrat haften bleibt (Adsorption), sondern wieder an die Umgebung abgegeben wird (Desorption). Man bringt deshalb auf das Substrat kleine Metalltröpfchen (beispielsweise Gold). Treffen nun Atome aus dem Gasstrahl auf das Tröpfchen, bleiben sie daran haften und wandern nach unten in Richtung des Substrats, wo sie sich absetzen. Dadurch entsteht nach und nach ein dünner Draht (Whisker), wobei sich das Metalltröpfchen auf der Spitze des Drahts absetzt und mit diesem nach oben wandert. Der Durchmesser des Whiskers hängt von der Größe des Tropfens ab und variiert im Bereich zwischen einigen Nanometern und Mikrometern (Bildquelle unten: Sauer und Thonke, Ulm).



c.)



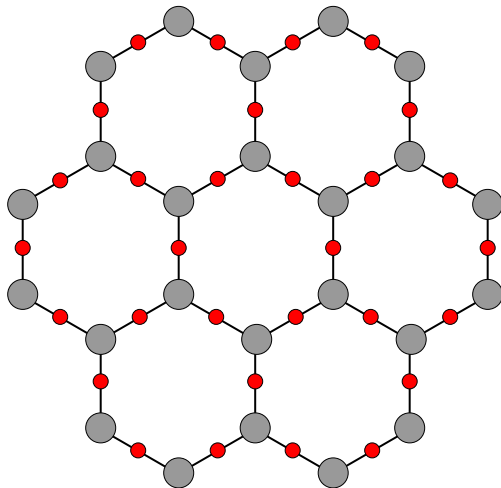
Man bezeichnet einen Festkörper als amorph, wenn dieser eine bestimmte Nahordnung, aber keinerlei Fernordnung besitzt. Beispielsweise sind in einem amorphen Kunststoff die langen Moleküle knäuelartig angeordnet; es ist hierbei jedoch keine Verschiebungssymmetrie wie bei einem Kristallgitter vorhanden.



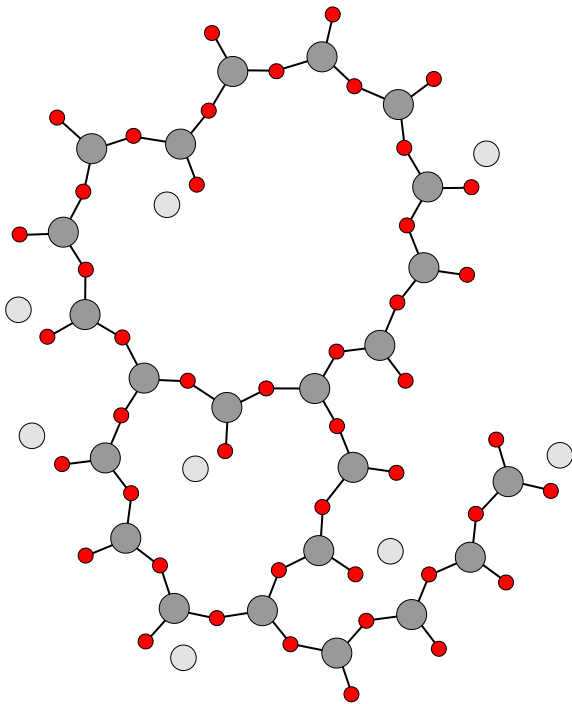
In polykristallinen Materialien gibt es bestimmte Bereiche, welche Symmetrien besitzen. Diese einzelnen Bereiche untereinander weisen jedoch keine Symmetrie auf. Als Beispiel betrachten wir polykristalline Kunststoffe; in diesen sind viele lange Moleküle teilweise parallel zueinander angeordnet. Die Linien entlang dieser Anordnung sind jedoch in willkürlichen Winkeln zueinander angeordnet und keineswegs auf einem regelmäßigen Gitter.

(Die Bilder stammen aus Elemente Chemie I, Klett-Verlag.)

d.)



Die charakteristischen Eigenschaften eines Kristalls können sehr stark von der Raumrichtung abhängen. Dies hat mit der regelmäßigen Anordnung der Atome auf dem Kristallgitter zu tun. Dadurch ist dieser nämlich nicht isotrop, also in alle Richtungen gleich beschaffen, sondern es sind bestimmte Richtungen im Raum ausgezeichnet. Es handelt sich darum um Eigenschaften, welche auch zum Bau von elektronischen Bauelementen sehr wichtig sind, wie beispielsweise die elektrische Leitfähigkeit. Diese kann also in bestimmten Raumrichtungen höhere Werte annehmen als in anderen.



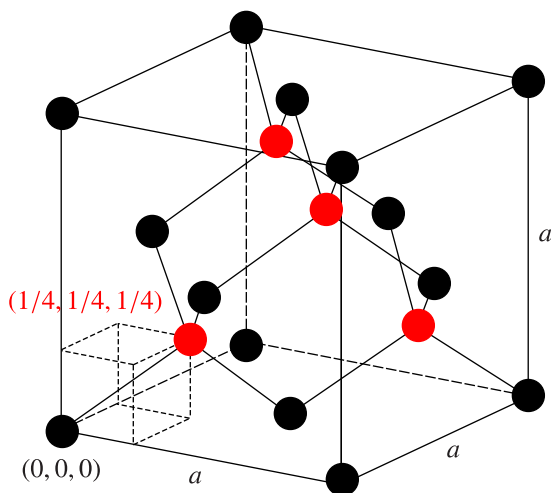
Amorphe Materialien wie beispielsweise Glas sind durch eine Nahordnung gekennzeichnet, besitzen jedoch keine Fernordnung, wie wir schon in Aufgabenteil (c) festgestellt haben. In diesen Materialien sind keine Raumrichtungen ausgezeichnet; auf großen Längenbereichen verhalten sich diese isotrop, also hängen auch deren Eigenschaften nicht von der Richtung im Material ab. Damit ist eine solche Kennzeichnung weder sinnvoll noch möglich.

Aufgabe 32

a.)

In der Aufgabe ist angegeben, dass Silizium ein fcc-Gitter mit einer zweiatomigen Basis besitzt. Daraus können wir folgende Informationen rauslesen:

- Die Abkürzung „fcc“ steht für „face centered cubic“, also für ein kubisch flächenzentriertes Gitter. Kubisch flächenzentriert bedeutet, dass auf jeder Ecke eines Würfels der Kantenlänge a und zusätzlich in der Mitte der Würfelflächen ein einzelnes Atom sitzt. Der Abstand zwischen den einzelnen Atomen in diesem Gitter beträgt $a/\sqrt{2}$.
- Neben jedem Siliziumatom sitzt ein zweites Atom, dessen Abstand kleiner als $a/\sqrt{2}$ ist.



Das Atom ganz unten links sitze im Ursprung $(0, 0, 0)$ des Koordinatensystems. Dieses zeichnen wir schwarz. Von diesem Atom ausgehend, können wir alle weiteren Atome einer kubisch flächenzentrierten Einheitszelle aufzeichnen. Jede dieser schwarzen Kugeln symbolisiert jeweils eines der zweiatomigen Basis. Das jeweils zweite zeichnen wir rot und dieses ist gegenüber des schwarzen um einen Vektor $(1/4, 1/4, 1/4)$ verschoben. (Diese Information wird nicht aus der Aufgabe ersichtlich, sondern wir müssen uns diese von woanders her beschaffen.) Insgesamt nur vier dieser roten Atome liegen in der dargestellten Einheitszelle; die anderen befinden sich in benachbarten Einheitszellen und sind in der Zeichnung nicht sichtbar. Diese atomare Struktur weist Silizium, Diamant, Zinkblende, Galliumarsenid usw. auf. Man spricht deshalb auch von der Diamant- oder Zinkblendestruktur.

b.)

Jeder kubischen Einheitszelle der Kantenlänge a lassen sich acht Siliziumatome zuordnen. (Jedes der acht Atome auf der Ecke des Würfels zählt $1/8$ und jedes der sechs auf den Würfelflächen zählt zur Hälfte. Es sind also vier schwarze Atome der Einheitszelle zuzuordnen. Außerdem kommen vier rote Atome hinzu und dies macht als Summe acht Atome.) Die Masse dieser acht Atome ist

$$m = 8 \cdot 28,1 \text{ u} = 224,8 \text{ u} = 224,8 \cdot 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \approx 3,73 \cdot 10^{-25} \text{ kg}. \quad (1)$$

Aus der Dichte können wir das Volumen ausrechnen, welche diese acht Atome beanspruchen. Es handelt sich dabei um das Volumen $V = a^3$ einer Einheitszelle. Um die Größe a der Einheitszelle zu erhalten, müssen wir dann noch die dritte Wurzel ziehen:

$$a = \sqrt[3]{\frac{m}{\rho}} = \sqrt[3]{\frac{3,73 \cdot 10^{-25} \text{ kg}}{2330 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}} \approx 5,43 \cdot 10^{-10} \text{ m} = \boxed{5,43 \text{ \AA}}. \quad (2)$$

Aufgabe 33

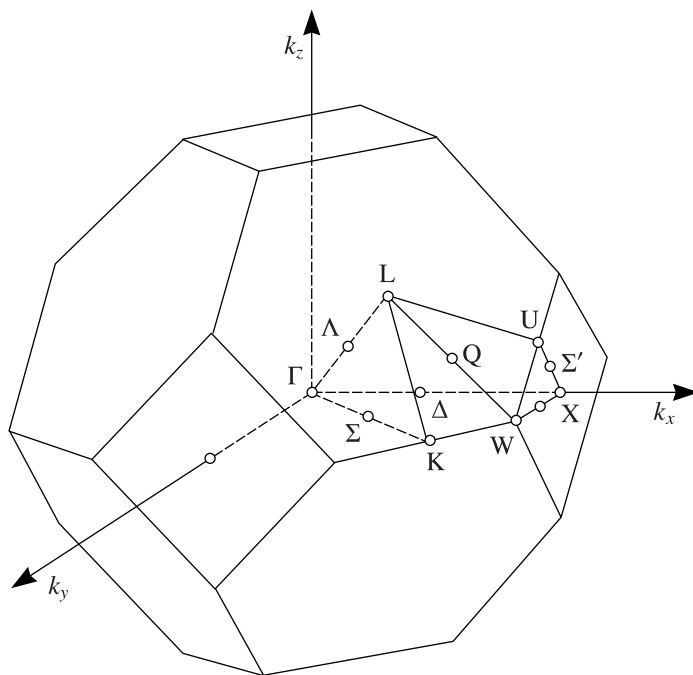
a.)

In der Festkörperphysik untersucht man oft Beugungsphänomene und diese lassen sich durch die Wellenlänge λ bzw. der Wellenzahl $k = 2\pi/\lambda$ besser beschreiben als in Abhängigkeit des Ortes x . Deshalb untersucht man theoretisch Kristalle oft nicht im Ortsraum in Abhängigkeit von $\mathbf{x}$ (also dem dreidimensionalen Raum, in dem sich der Kristall befindet und wo die Gitterpunkte bestimmte Ortskoordinaten haben), sondern im zunächst abstrakter anmutenden Impulsraum in Abhängigkeit von $\mathbf{k}$. In den Impulsraum gelangt man durch Fouriertransformation vom Ortsraum aus und es gibt ebenso wie im Ortsraum auch im Impulsraum eine primitive Einheitszelle. Man bezeichnet diese als Brillouinzone.

Das ist auch der Grund, weshalb man beim Betrachten von Bandstrukturen die Energie über der Wellenzahl k aufträgt. Dann weiß man nämlich, welche Energien für Ladungsträger mit einem bestimmten k möglich sind. Die Bandstruktur ist wesentlich, wenn es um die Diskussion der Leitfähigkeit (eine Rolle spielt die effektive Masse, siehe unten), Transparenzeigenschaften, Emissionseigenschaften von Licht usw. geht.

Manchmal ist auch die Energie über dem Ort aufgetragen; deshalb muss man genau aufpassen, was für ein Schaubild man betrachtet.

b.)



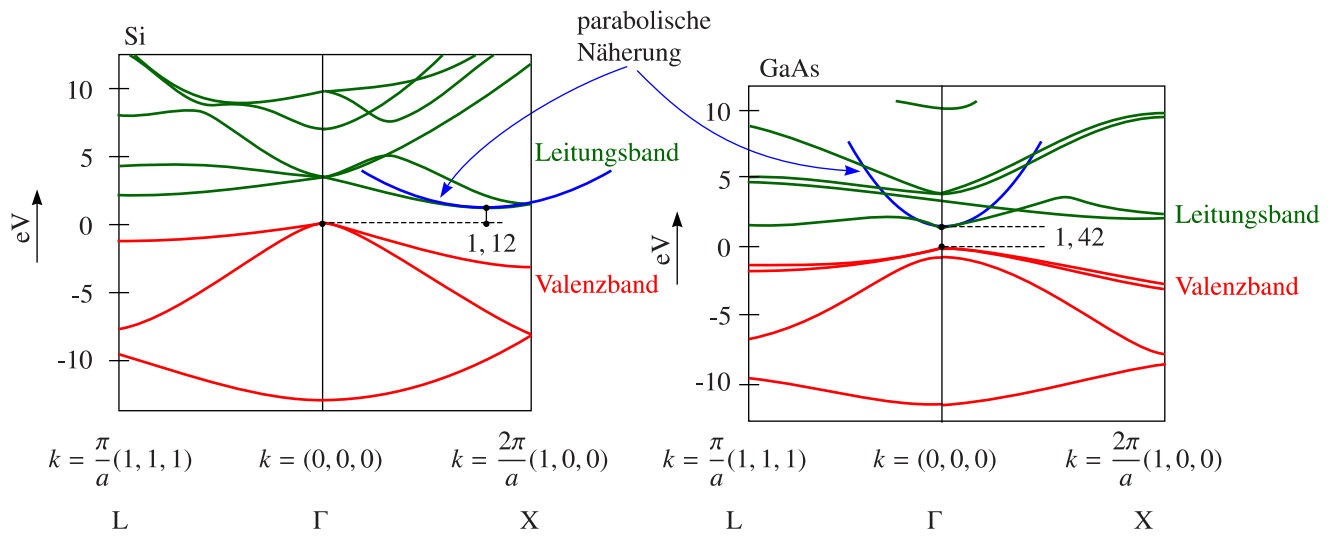
Wie wir schon in Aufgabe (?) bemerkt haben, sind die charakteristischen Eigenschaften in Kristallen nicht isotrop, sondern hängen von der Richtung ab, die man betrachtet. Die Dispersionsrelation $\varepsilon(\mathbf{k})$, welche in einem Banddiagramm dargestellt wird, ist im Allgemeinen eine Funktion des Vektors $\mathbf{k} = (k_x, k_y, k_z)$ und nicht einfach nur vom Betrag $|\mathbf{k}| = \sqrt{k_x^2 + k_y^2 + k_z^2}$. Es ist also wichtig, in welche Richtung innerhalb der Brillouinzone man die Dispersionsrelation betrachtet. Man ist jedoch nicht an allen möglichen Richtungen interessiert, sondern nur an bestimmten. Damit man weiß, welche Richtung das jeweilige Banddiagramm abdeckt, bezeichnet man bestimmte wichtige Punkte in der Brillouinzone mit Buchstaben. Punkte innerhalb der Zone werden mit griechischen Buchstaben gekennzeichnet. Der Γ -Punkt steht für den Ursprung mit Gittervektor $\mathbf{k} = (0, 0, 0)$.

Für Punkte an der Oberfläche der Zone verwendet man lateinische Großbuchstaben:

$$\text{X} : \mathbf{k} = \frac{2\pi}{a}(1, 0, 0), \quad \text{L} : \mathbf{k} = \frac{\pi}{a}(1, 1, 1). \quad (3)$$

In den Banddiagrammen in der Abbildung ist nach rechts die Bandstruktur aufgetragen, wenn man sich vom Punkt Γ zum Punkt X bewegt, also entlang der k_x -Achse von 0 bis $2\pi/a$. Nach links ist die Bandstruktur gezeichnet, wenn man vom Punkt Γ zum Punkt L gelangt. Dann werden alle drei Komponenten k_x , k_y und k_z gleichermaßen von 0 bis π/a variiert.

c.)



Das oberste Valenzband kann als das Band identifiziert werden, welches am Γ -Punkt näherungsweise durch $\mathbf{k} = (0, 0, 0)$ geht. Das Band, welches direkt über dem obersten Valenzband liegt, ist das unterste Leitungsband. Wie aus der Abbildung ersichtlich ist, handelt es sich bei Silizium um einen indirekten Halbleiter, weil das Minimum des Leitungsbandes nicht über dem Maximum des Valenzbandes liegt. Die Bandlücke für Silizium beträgt 1,12 eV. Im Gegensatz dazu ist Galliumarsenid ein direkter Halbleiter; Minimum des Leitungsbandes und Maximum des Valenzbandes liegen direkt übereinander und zwar am Γ -Punkt. Hier beträgt die Bandlücke 1,42 eV. Am Minimum des Leitungsbandes lässt sich dieses durch eine Parabel annähern; diese Parabeln sind in blau eingezeichnet.

d.)

Im Allgemeinen ist die effektive Masse der Elektronen definiert durch:

$$m_{\alpha\beta}^* = \hbar^2 \left(\frac{\partial^2 \varepsilon(\mathbf{k})}{\partial k_\alpha \partial k_\beta} \bigg|_{\mathbf{k}=\mathbf{k}_0} \right)^{-1}, \quad \alpha, \beta \in \{x, y, z\}. \quad (4)$$

Diese Definition ist vor allem in der Nähe des Minimums bei $\mathbf{k} = \mathbf{k}_0$ sinnvoll, wo sich die Bänder durch eine Parabel annähern lassen. Die effektive Masse hängt, wie alle charakteristischen Größen, von der Richtung in der Brillouinzone ab (wie wir schon ein paar mal bemerkt haben). Im Wesentlichen ist die effektive Masse das Inverse der zweiten Ableitung der Dispersionsrelation $\varepsilon(\mathbf{k})$ und die zweite Ableitung ist wiederum ein Maß für die Krümmung des Bandes. Ist die Krümmung also groß, dann ist die effektive Masse klein und umgekehrt. Aus der Abbildung ist erkennbar, dass die Krümmung des Leitungsbandes am Minimum bei Silizium viel kleiner ist als bei Galliumarsenid. Eine kleinere Krümmung bedeutet eine größere effektive Masse und eine größere effektive Masse sorgt wiederum für eine kleine Beweglichkeit der Elektronen durch den Halbleiterkristall. Wollen wir jedoch ein schnelles Bauelement bauen, so ist eine große Beweglichkeit von Elektronen wesentlich und infolgedessen wird man Galliumarsenid bevorzugen.

e.)

Die parabolische Näherung

$$W_L(k) = \frac{W_G}{2} + ak^2, \quad a = \frac{\hbar^2}{0,033m_0}, \quad (5)$$

hängt nur vom Betrag von $\mathbf{k}$ ab. Damit können wir die effektive Masse nach Aufgabenteil (d) berechnen zu:

$$m_{\text{eff}} = \hbar^2 \left(\frac{\partial^2 W}{\partial k^2} \bigg|_{k=k_0} \right)^{-1} = \frac{\hbar^2}{2a} = \boxed{0,0165m_0 \approx 1,50 \cdot 10^{-32} \text{ kg}}. \quad (6)$$

Die effektive Masse der Elektronen ist also viel kleiner als die Elektronenmasse m_0 im Vakuum, was zu einer hohen Beweglichkeit im Leitungsband führt.

f.)

Wir betrachten der Einfachheit halber ein eindimensionales Kristallgitter, in dem sich die einzelnen Atome im Abstand a zueinander befinden. Die äußeren Elektronen können als beinahe frei betrachtet werden, da die positive Ladung der Atomkerne durch die inneren Elektronen größtenteils abgeschirmt wird. Für die Wellenfunktion der äußeren Elektronen kann man damit näherungsweise ebene Wellen annehmen. Jedoch können die

Elektronen an Atomen streuen; dann kann eine ebene Welle $\exp(jkx)$ gestreut werden und es entsteht eine rücklaufende ebene Welle $\exp(-jkx)$. (Das negative Vorzeichen vor der Wellenzahl bedeutet, dass die Welle eine entgegengesetzte Geschwindigkeit hat, also zurückläuft.) Durch Überlagerung von beiden entstehen die Wellenfunktionen

$$\psi_{\pm} = A \exp(jkx) \pm B \exp(-jkx). \quad (7)$$

Interferenzerscheinungen treten vor allem dann auf, wenn Vielfache der halben de-Broglie-Wellenlänge der Elektronen dem Atomabstand a entsprechen:

$$n \frac{\lambda}{2} \approx a \Rightarrow k = \frac{2\pi}{\lambda} \approx \frac{n\pi}{a}. \quad (8)$$

Wird der gleiche Anteil der Welle reflektiert (ohne Phasensprung, $A = B$ oder mit Phasensprung von π , $A = -B$), so entstehen die Wellen

$$\psi_{\pm} = A \left\{ \exp\left(\frac{j\pi}{a}x\right) \pm \exp\left(-\frac{j\pi}{a}x\right) \right\}, \quad (9)$$

also

$$\psi_{+} = 2A \cos\left(\frac{\pi}{a}x\right), \quad \psi_{-} = 2Ai \sin\left(\frac{\pi}{a}x\right). \quad (10)$$

Dabei handelt es sich um stehende Wellen, da die vor- und rücklaufenden Anteile der Wellen gleich sind. Die Aufenthaltswahrscheinlichkeiten folgen durch Bildung des Betragsquadrats:

$$\boxed{|\psi_{+}|^2 = 4|A|^2 \cos^2\left(\frac{\pi}{a}x\right), \quad |\psi_{-}|^2 = 4|A|^2 \sin^2\left(\frac{\pi}{a}x\right).} \quad (11)$$

Die Aufenthaltswahrscheinlichkeit $|\psi_{+}|^2$ wird also in der Mitte von zwei Atomkernen hoch sein und im Gegensatz dazu die Aufenthaltswahrscheinlichkeit $|\psi_{-}|^2$ jedoch in der Nähe der Atomkerne. In der Nähe der Atome besitzen die Elektronen eine niedrigere Energie. (Man bedenke, dass beispielsweise die Energieniveaus im Bohrschen Atommodell proportional zu $-1/n^2$ sind, wobei die Elektronen mit kleinerer Hauptquantenzahl n und damit niedrigerer Energie weiter innen sitzen.) Es gibt also zwei Wellenfunktionen mit unterschiedlicher Energie, also muss sich zwischen diesen stehenden Wellen eine Energielücke (Bandlücke) ausbilden. Die Gruppengeschwindigkeit von stehenden Wellen verschwindet und deshalb können sich Elektronen dieser Energie

$$E = \frac{\hbar^2 k^2}{2m}, \quad k = \frac{\pi n}{a}, \quad n \in \mathbb{Z} \quad (12)$$

im Halbleiterkristall nicht ausbreiten.

Aufgabe 37

a.)

Definiert ist die Leitfähigkeit im einem Halbleiterkristall über

$$\sigma = e(\mu_e n_e + \mu_h n_h), \quad [\sigma] = \frac{1}{\Omega \text{m}}, \quad (13)$$

mit der Elementarladung e , den Beweglichkeiten $\mu_{e/h}$ und den Dichten $n_{e/h}$ für Elektronen bzw. Löcher. Zur Leitfähigkeit tragen also Elektronen und Löcher additiv bei. Die Dichte von Elektronen und Löchern kann durch Einbringen von Fremdatomen (sogenanntes Dotieren) geändert werden. Die Beweglichkeit ist eine Materialgröße und ist definiert als Proportionalitätskonstante zwischen der Driftgeschwindigkeit $\mathbf{v}_D$ von Ladungsträgern unter Einfluss eines äußeren elektrischen Feldes $\mathbf{E}$, also $\mathbf{v}_D = \mu \mathbf{E}$. Sie kann abgeschätzt werden durch die Formel

$$\mu = \frac{e\lambda(E_F, T)}{m^* v(E_F, T)}, \quad (14)$$

wobei m^* die effektive Masse, λ die mittlere freie Weglänge und v die thermische Geschwindigkeit der Ladungsträger ist. m^* hängt von der Bandstruktur ab, also auch davon, ob man Elektronen oder Löcher als Ladungsträger betrachtet. Die mittlere freie Weglänge und die thermische Geschwindigkeit sind Funktionen der Fermienergie E_F und der Temperatur T . Ladungsträger stoßen beispielsweise mit Störstellen oder Phononen; bei niedrigen Temperaturen wird die Streuung an Störstellen und bei hohen Temperaturen die Streuung an Phononen überwiegen. Da oft nur Ladungsträger in einem Bereich um die Fermienergie zur Leitfähigkeit beitragen, ist außerdem die Abhängigkeit von der Fermienergie zu berücksichtigen. Zusammenfassend lässt sich also Einfluss auf die Beweglichkeit nehmen durch die Reinheit des verwendeten Halbleitermaterials und durch die Temperatur.

b.)

Wenn Elektronen und Löcher den gleichen Wert für die Mobilität besitzen, werden sie sich auch gleich schnell im Halbleiter fortbewegen und zwar in unterschiedliche Richtungen. In der Mitte der Schicht, also bei $x = d/2$, werden sie rekombinieren. Wie wir schon gesehen haben, hängt die Driftgeschwindigkeit über $v_D = \mu E$ mit dem elektrischen Feld $E = U/d$ zusammen. Dann folgt für die Zeitdauer:

$$t = \frac{x}{v_D} = \frac{d}{2v_D} = \frac{d}{2\mu E} = \frac{d^2}{2\mu U} = \frac{(200 \cdot 10^{-7} \text{ cm})^2}{2 \cdot 10^{-3} \frac{\text{cm}^2}{\text{Vs}} \cdot 6 \text{ V}} \approx 3,3 \cdot 10^{-8} \text{ s} = \boxed{33 \text{ ns.}} \quad (15)$$

c.)

Da zum Ein- und Ausschalten der Diode jeweils 33 ns benötigt werden, lässt sich die Diode maximal $1,5 \cdot 10^7$ mal in der Sekunde ein- und ausschalten. Dies entspricht einer Schaltfrequenz von 15 MHz. Die Frequenz ist so schon Größenordnungen unterhalb von GHz und diese Abschätzung ist sogar noch optimistisch:

- 1.) In Polymeren (so wie sie bei organischen LEDs verwendet werden) gibt es viele Defekte und diese führen zur einer Verringerung der Beweglichkeit und damit zu einer Erhöhung der Schaltzeit.
- 2.) Injizierte Ladungen halten sich vermutlich länger im Material auf als angenommen, was zu einer weiteren Erhöhung der Schaltzeit führt.

d.)

Die Stromdichte J hängt mit der Leitfähigkeit σ zusammen über $J = \sigma E$. Die Leitfähigkeit haben wir bereits in Aufgabenteil (a) definiert. Da laut Aufgabenstellung die Löcherdichte gegenüber der Elektronendichte vernachlässigt werden kann, also $n_h \ll n_e$, gilt $\sigma = e\mu_e n_e$. Die Stromdichte soll in Silizium und dem organischen Halbleitermaterial PFO gleich groß sein:

$$J_{\text{Si}} = J_{\text{PFO}} \Rightarrow e\mu_{e,\text{Si}} n_{e,\text{Si}} \frac{U}{d} = e n_{e,\text{PFO}} \mu_{e,\text{PFO}} \frac{U}{d}, \quad (16)$$

also

$$n_{e,\text{PFO}} = \frac{\mu_{e,\text{Si}} n_{e,\text{Si}}}{\mu_0 \exp(\alpha \sqrt{\frac{U}{d}})} = \frac{1500 \frac{\text{cm}^2}{\text{Vs}} \cdot 10^{16} \frac{1}{\text{cm}^3}}{4,3 \cdot 10^{-5} \frac{1}{\text{Vs} \cdot \text{cm}} \exp\left(3,48 \cdot 10^{-3} \frac{1}{\sqrt{\text{V} \cdot \text{cm}}} \sqrt{\frac{5 \text{ V}}{100 \cdot 10^{-7} \text{ cm}}}\right)} \approx \boxed{2,98 \cdot 10^{22} \frac{1}{\text{cm}^3}}. \quad (17)$$

Die Ladungsträgerdichte im organischen Halbleitermaterial PFO muss damit um sechs Größenordnungen höher sein als im Silizium, um die gleiche Stromdichte zu erreichen! Bei solchen Dichten kommen noch weitere Effekte hinzu, welche zu einer Reduktion der Stromdichte führen.