

Physik der Kondensierten Materie

Examen zum Erhalt der Kreditpunkte der **Veranstaltung 10878**, gehalten durch C. Schönenberger, M. Calame und A. Baumgartner im Herbstsemester 2011.

Datum der Prüfung: 23. Dezember 2011, 10:15 bis 12:00

Total = 30 Punkte (pass: ≥ 15)

Bevor Sie beginnen, füllen Sie bitte Ihren Namen, Ihr Studienfach, Ihre Matrikelnummer und das (die) Semester (mit Jahrangabe) ein, in dem (denen) Sie die Veranstaltung Physik der Kondensierten Materie besuchten.

Name	
Studienfach	
Matrikelnummer	
Semester	
Wiederholung (ja/nein)	
KoMa in welchem Jahr besucht?	

Als Hilfsmittel können Sie folgendes verwenden: eine **eigene Zusammenfassung auf maximal fünf DIN A4 Seiten** (Vor- und Rückseiten) und ein nichtprogrammierbarer Taschenrechner. Nicht zugelassen sind andere elektronische Kommunikationsmittel, Notebooks, PC's, Palmtop, Handy,...

Sie können so viele Blätter wie erforderlich verwenden.

Bitte numerieren Sie ihre Blätter durch und versehen Sie jedes einzelne mit Ihrem Namen (sehr wichtig!).

Arbeiten Sie ruhig und konzentriert. Verzweifeln Sie nicht, wenn Sie bei einer Aufgabe nicht weiterkommen. Zum Erreichen der Maximalnote müssen nicht alle Aufgaben gelöst werden. Verschwenden Sie keine Zeit, sondern gehen Sie zur nächsten Aufgabe.

Bitte verwenden Sie dieses Blatt als Deckblatt. Die Aufgabenblätter ziehen wir nicht ein. Sie können diese behalten. Viel Erfolg!

Aufgabe	1 Struktur	2 Beugung	3 Phononen	4 Freie Elektronen	5 Material- Eigenschaften (einschliesslich Halbleiter)	6 Halbleiter	Σ
maximale Punktzahl	6	5	6	7	6	0	30
erreichte Punktzahl						=====	

Konstanten:

Protonenruhemasse m_p	$1.67 \cdot 10^{-27}$	kg und
Planckkonstante \hbar	$1.054 \cdot 10^{-34}$	Js
Planckkonstante h	$0.663 \cdot 10^{-33}$	Js
Boltzmann-Konstante k_B	$1.38 \cdot 10^{-23}$	J/K
Elementarladung e	$1.60 \cdot 10^{-19}$	As

1. STRUKTUR der MATERIE (6 Pkt)

1a) PUNKTE = $\frac{1}{2}$: \Rightarrow Die Raumgruppe eines Kristalls enthält Translationen, Rotationen und Spiegelungen. Es gibt noch zwei weitere Elemente. Wie heissen diese?

1b) PUNKTE = $\frac{1}{2}$: Für einen vorgegebenen Kristall: \Rightarrow was enthält mehr Symmetrieelemente: der Kristall oder das Gitter?

1c) PUNKTE = 1: \Rightarrow Zeichnen Sie eine Schicht von Graphene. Markieren Sie dabei die Position der Kohlenstoffatome deutlich. \Rightarrow Geben Sie nun 2 verschiedene Paare von primitiven Basis Vektoren an. Verwenden Sie zur deutlichen Unterscheidung zwei verschiedene Farben.

1d) PUNKTE = 1: \Rightarrow Gegeben ist ein gewöhnliches kartesisches Koordinatensystem. Wir verwenden dieses zur Beschreibung eines kubisch flächenzentriertes Gitter (Kubus mit Kantenlänge a). Geben Sie die drei Basisvektoren der primitiven Einheitszelle in Vektorschreibweise an.

1e) PUNKTE = 1: \Rightarrow Zeichnen Sie den 2-dimensionalen Kristall mit dichtester Kugelpackung. \Rightarrow Zeichnen Sie eine stereographische Projektion der dazugehörenden Symmetriegruppe.

1f) PUNKTE = 1: \Rightarrow Zeichnen Sie ein quadratisches Gitter in 2 Dimensionen und darin die $(\bar{1}, 2)$ Ebenen. Die Achsen sind wie üblich x in horizontaler und y in vertikaler Richtung.

1g) PUNKTE = 1: \Rightarrow Bestimmen sie den Abstand benachbarter $(\bar{1}, 2)$ Ebenen im quadratischen Gitter der vorhergehenden Aufgabe. Verwenden Sie dazu die Gleichung $d = 2\pi / |\vec{q}|$, wobei \vec{q} der reziproke Gittervektor zu den entsprechenden Miller'schen Indizes ist.

2. STREUUNG / BEUGUNG am KRISTALL (5 Pkt)

2a) PUNKTE = 1: \Rightarrow Erklären Sie die Bragg'sche Bedingung mittels einer Skizze.

2b) PUNKTE = 1: \Rightarrow Nennen Sie mindestens drei der vier Voraussetzungen, die der Bragg-Bedingung zugrunde liegen.

2c) PUNKTE = 1: \Rightarrow Was sind typische Energien der Röntgenstrahlen, mit denen die Kristallstruktur bestimmt wird? \Rightarrow Und werden die Streuwinkel mit zunehmender Energie grösser oder kleiner?

2e) PUNKTE = 1: \Rightarrow Schätzen Sie die Wellenlänge von He Atomen in einem idealen Gas ab, in dem sie dafür von der mittleren kinetischen Energie der Atome ausgehen, welche einer Temperatur von 200 K entsprechen soll.

2f) PUNKTE = $\frac{1}{2}$: \Rightarrow Was sind die Vorteile eines Synchrotrons als Röntgenquelle (nennen sie zwei) ?

2g) PUNKTE = $\frac{1}{2}$: Wir messen in einem Streuexperiment die Temperaturabhängigkeit der Reflexe, die zu den reziproken Gittervektoren (100) und (111) gehören. \Rightarrow Welcher der beiden Reflexe wird mit zunehmender Temperatur in der Intensität schneller abnehmen?

3. SCHWINGUNGEN im KRISTALL (6 Pkt)

3a) PUNKTE = 1: \Rightarrow Wie viele Bewegungsfreiheitsgrade und \Rightarrow wieviel Schwingungsfreiheitsgrade besitzt das Molekül C_6H_{14} ?

3b) PUNKTE = 1: Wir betrachten den Gitterschwingungsbeitrag an die spezifischen Wärme. \Rightarrow Welcher der beiden Materialien Blei oder Silizium liefert wohl einen grösseren Anteil bei Zimmertemperatur? \Rightarrow Begründen Sie ihre Aussage.

3c) PUNKTE = 1: Das Debye Modell zur spezifischen Wärme macht eine wichtige Annahme bezüglich der Dispersionsrelation. \Rightarrow Welche ist das? . \Rightarrow Welche Annahme steckt im Vergleich dazu im Einstein Modell?

3d) PUNKTE = 1: \Rightarrow Geben Sie die mittlere Energie eines quantisierten Schwingungszustands mit der Frequenz ω als Funktion der Temperatur T in einer Gleichung an. \Rightarrow Geben Sie zusätzlich die Grenzwerte für $kT \gg \hbar\omega$ und $kT \ll \hbar\omega$ an.

3e) PUNKTE = 1: \Rightarrow In einem Kristall mit optischen Gitterschwingungen kann Licht geeigneter Frequenz vollständig absorbiert werden. Man findet in diesem Zusammenhang auch die Aussage, dass der durch die

vollständige Absorption eines Photons durch Gitterschwingungen Uebergang *senkrecht* erfolge. Bitte erklären Sie, was es mit „senkrecht“ auf sich hat.

3f) PUNKTE = 1: \Rightarrow Bestimmen Sie die Zustandsdichte $\rho(\omega)$ für akustische langwellige Phononen (Schallwellen) in *einer Dimension*. \Rightarrow Wie hängt die Zustandsdichte von der Schallgeschwindigkeit ab?

4. FREIE ELEKTRONEN (7 Pkt)

4a) PUNKTE = 1: \Rightarrow Die Ursache für einen Diffusionsstrom ist ein Gradient in der Elektronenkonzentration. Formulieren Sie den Diffusionsstrom, in dem sie den Gradienten des chemischen Potentials verwenden?

4b) PUNKTE = $\frac{1}{2}$: \Rightarrow Wie hängt der (klassische) Hall Widerstand von der Dicke der Probe ab?

4c) PUNKTE = $\frac{1}{2}$: \Rightarrow Was ist die Voraussetzung, dass man den Quantenhal-Effekt überhaupt messen kann? Gesucht ist eine Bedingung, in der die Relaxationszeit τ und die Zyklotronfrequenz ω_c vorkommen.

4d) PUNKTE = 1: \Rightarrow Zeichnen Sie die Dielektrizitätskonstante ϵ eines idealen Elektronengases (ohne Dämpfung) als Funktion der elektromagnetischen Anregungsfrequenz ω auf? \Rightarrow Was passiert bei kleinen Frequenzen unterhalb der Plasmafrequenz?

4e) PUNKTE = 1: Wie hängt die Fermi-Wellenlänge eines idealen Fermigases von freien Elektronen (Dispersionsbeziehung $E = \vec{p}^2 / 2m_e$) in 2 Dimensionen von der Elektronendichte ab?

4f) PUNKTE = 1: \Rightarrow Sei $w(E)$ die Wahrscheinlichkeit, dass der Zustand zur Energie E im thermodynamischen Gleichgewicht NICHT besetzt ist. \Rightarrow Zeichnen Sie $w(E)$ als Funktion von E für 2 Temperaturen auf, für eine hohe und eine tiefe Temperatur.

4g) PUNKTE = 1: \Rightarrow Bestimmen Sie die Zustandsdichte $\rho(E)$ für ein Elektronengas in 2 *Dimension* mit linearer Dispersionsrelation $E(k) = \hbar v_F |k|$. Wie hängt die Zustandsdichte von der Energie ab?

4h) PUNKTE = 1: Formulieren Sie eine Gleichung zur selbstkonsistenten Bestimmung der Fermienergie E_F für ein Elektronensystem, welches aus zwei Energieeigenzuständen E_1, E_2 mit Entartungen N_1, N_2 besteht, wenn die Gesamtzahl der Elektronen N ist. Verwenden sie dazu die Fermi-Dirac Funktion.

5. MATERIALASPEKTE + „Periodische“ ELEKTRONEN + Halbleiter (6 Pkt)

5a) PUNKTE = $\frac{1}{2}$: Wieviele Eigenzustände gibt es in der ersten Brillouin-Zone und wieviele in der zweiten?

5b) PUNKTE = $\frac{1}{2}$: Wie hängt die magnetische Pauli-Suszeptibilität eines Elektronengases von der Temperatur T ab?

5c) PUNKTE = $\frac{1}{2}$: \Rightarrow Ist ein guter elektrischer Leiter auch immer ein guter Wärmeleiter? Begründung bitte?

5d) PUNKTE = $\frac{1}{2}$: \Rightarrow Was ist der qualitative Unterschied in der Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstands eines elektrischen Leiters und eines Isolators?

5e) PUNKTE = 1: Welches Material hat eine grösser Plasmafrequenz, Ag oder dotiertes Silizium? Woher kommt der Unterschied und was sind die Auswirkungen in Bezug auf die optischen Eigenschaften?

5f) PUNKTE = 1: Was gilt für die Grösse der Bandlücke eines Isolators, wenn der Isolator für Licht mit $\lambda > 600$ nm transparent ist. Bestimmen Sie einen expliziten Ausdruck als Gleichung und setzen Sie dann ein.

5g) PUNKTE = 1: Zeichnen Sie die ersten beiden Bänder für „freie“ Blochelektronen in einer Dimension. Wie ändert sich die Bandstruktur, wenn die Elektronen nicht mehr frei sind, sondern sich in einem schwachen periodischen Potential bewegen?

5h) PUNKTE = $\frac{1}{2}$: Warum ist die Elektron- und Lochdichte in einem intrinsischen Halbleiter identisch?

5i) PUNKTE = $\frac{1}{2}$: Was sind die Minoritätsladungsträger in einem dotierten p-Halbleiter?