MARTIN-LUTHER-UNIVERSITÄT
HALLE-WITTENBERG

Naturwissenschaftliche Fakultät II -
Chemie, Physik und Mathematik

Institut für Physik
Fachgruppe Oberflächen-
und Grenzflächenphysik

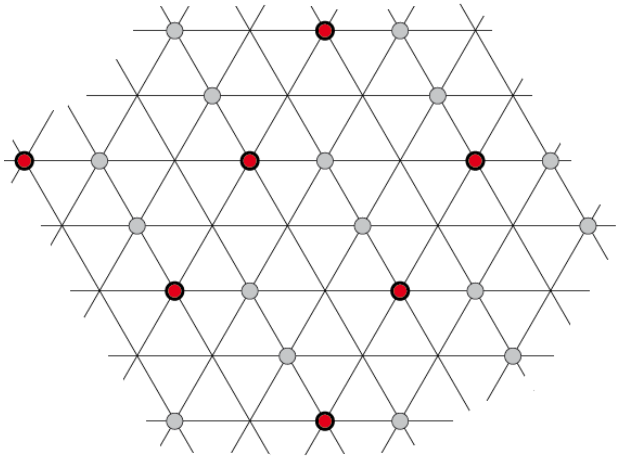
Prof. Dr. Wolf Widdra

# Übungs-Klausur zur Experimentalphysik C

Name:

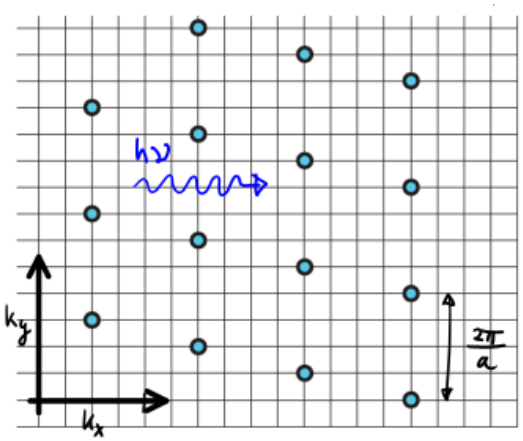
Matrikelnummer:

**1. Einheitszelle und reziprokes Gitter**



Die nebenstehende Grafik zeigt einen Ausschnitt eines zweidimensionalen Kristalls. Verschiedene Symbole kennzeichnen dabei verschiedene Atomsorten.
(a) Bestimmen Sie einen Satz von primitiven Translationsvektoren und markieren Sie die Fläche die zu einer primitiven Einheitszelle gehört (in der Skizze).
(b) Wie viele Atome hat die Basis? Geben Sie die Basis (durch relative Vektoren der Atome) an.
(c) Konstruieren Sie die erste und die zweite Brillouin-Zone im reziproken Raum.
(4 Punkte)

**2. Röntgenbeugung**




Geben sei ein zweidimensionaler Kristall mit dem nebenstehenden reziproken Gitter. Monochromatische Röntgenstrahlung mit einer Wellenlänge $\lambda$ fällt, wie in der Skizze angedeutet, entlang der [10]-Richtung auf den Kristall. Betrachten Sie die beiden Fälle: $\lambda = a$ und $\lambda = \frac{16}{17}a$. Wie viele Beugungsreflexe erwarten Sie und unter welchem Streuwinkel treten Sie auf (Verwenden Sie die Ewald-Konstruktion).
(4 Punkte)

**3. Kristallstruktur**

a) Viele Metalle kristallisieren in fcc- oder bcc-Strukturen. Erklären Sie qualitativ, wann eine fcc-Struktur und wann eine bcc-Struktur energetisch günstiger wird. Nennen Sie je ein Beispiel.
b) Bei Röntgenbeugung an einem bcc-Kristall sind einige Röntgenreflexe, die man bei einer einfach kubischen Kristallstruktur erwarten würde, verschwunden. Welche sind dies? Geben Sie eine Erklärung.
c) Wie wirkt sich die thermische Bewegung der Atome eines Festkörpers auf das Röntgen-Beugungsbild aus? Vergleiche Sie dabei den (2,0,0)- und den (6,0,0)-Reflex.
(3 Punkte)

**4. Phononen**

Eine wichtige Näherung zur Beschreibung des Phononenspektrums ist die Debye-Näherung.

a) Beschreiben Sie diese Näherung kurz; gehen Sie auf die Begriffe Schallgeschwindigkeit, Zustandsdichte bzw. Debye-Temperatur ein und skizzieren Sie die Dispersionsrelation.
b) Wie verhält sich die spezifische Wärmekapazität eines Kristalls bei tiefen Temperaturen, wenn Sie ihn in der Debye'schen Näherung beschreiben. Warum reicht diese Betrachtung zur Beschreibung des experimentellen Verhaltens von Metallen bei sehr tiefen Temperaturen nicht aus?
c) Welches alternative Modell wird insbesondere zur Beschreibung von optischen Phononen ver-

wendet (warum)? Unterscheidet sich der Hochtemperatur-Grenzfall der spezifischen Wärmekapazität in diesem Modell von dem der Debye-Näherung?
(3 Punkte als Übungsaufgabe)

**5. Elektronische Struktur**

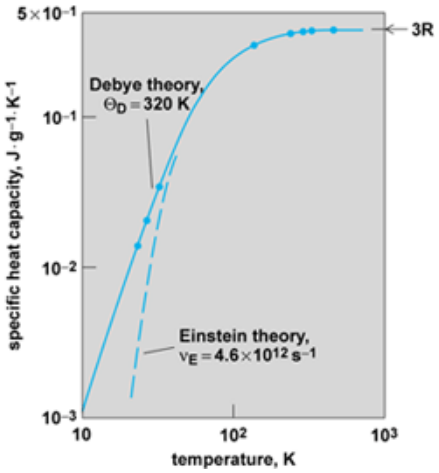
Die elektronische Struktur eines zweidimensionalen Festkörpers mit einem quadratischen Gitter (Gitterkonstante a) soll betrachtet werden:
(a) Verwenden sie zunächst die Näherung der freien Elektronen. Skizzieren Sie die Dispersionsrelation der Blochelektronen in [1,1]-Richtung bis in die zweite Brillouin-Zone. Markieren Sie dabei die Zonengrenze.
(b) Skizzieren Sie die elektronische Zustandsdichte bei Näherung freier Elektronen. Wie würde die Zustandsdichte aussehen, wenn es sich um einen dreidimensionalen Festkörper handeln würde?
(c) Die elektronischen Zustände seien gerade so weit aufgefüllt, dass das zweite Band gerade noch nicht besetzt ist. Skizzieren den Verlauf der Fermifläche (Linie) in der ersten Brillouinzone.
(d) Was ändert sich, wenn die elektronische Struktur in der Näherung der „fast-freien Elektronen" beschrieben wird?
(e) Handelt es sich bei der in Teilaufgabe (c) beschriebenen Bandfüllung (und Beschreibung im fast-freien-Elektronen-Modell) um ein Metall oder um einen Halbleiter?
(5 Punkte)

**5. Halbleiter**

Betrachten Sie einen undotierten, direkten Halbleiter mit einer Bandlücke von $E_g$ = 0,6 eV, einer effektiven Elektronenmasse im Leitungsbandminimum von $m_e = 0{,}8\ m_0$ und einer Masse des Lochs im Valenzbandmaximum von $m_h = 0.2\ m_0$.
(a) Wo liegt das Ferminiveau im Grenzfall tiefer Temperaturen ($kT << E_g$)?
(b) Erklären Sie, was man unter der effektive Masse von Elektronen und Löchern versteht.
(c) Warum und wie verschiebt sich das Ferminiveau mit wachsender Temperatur?
(d) Wie ändert sich das Ferminiveau bei einer Dotierung mit Akzeptoren temperaturabhängig?
(4 Punkte)

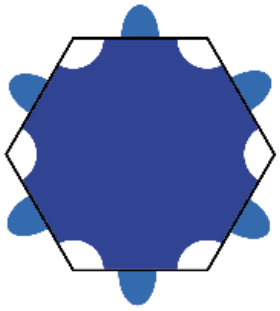
**6. Wärme**

Die nebenstehende Abbildung zeigt auf einer logarithmischen Skala die spezifische Wärmekapazität von Kupfer (Punkte) zusammen mit dem Debye-Modell (volle Linie).
(a) Wie kann man diesen experimentellen Verlauf bei hohen Temperaturen verstehen?
(b) Welche Annahmen macht man in diesem Modell? Was ist $\Theta_D$?
(c) Warum ist das Einstein-Modell (gestrichelt) bei tiefen Temperaturen eine schlechtere Beschreibung?
(d) Begründen Sie, welcher Verlauf der spezifischen Wärmekapazität bei einem rein klassischen Verhalten erwartet würde.
(4 Punkte)




**7. Magnetfeld und Elektronen**

Gegeben ist ein Festkörper, der durch ein zweidimensionales, hexagonales reziprokes Gitter angenähert werden kann. In der folgenden Abbildung ist die Fermifläche im ausgedehnten Zonenschema dargestellt (dunkel entspricht besetzten Zustände).

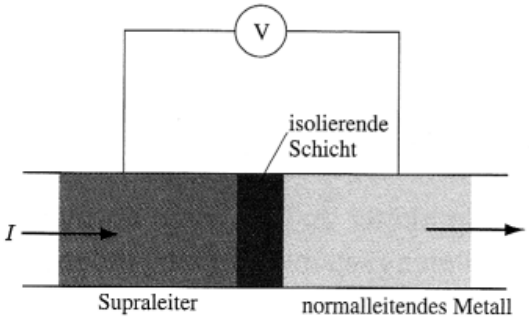


(a) Skizzieren Sie besetzte und unbesetzte Zustände im ersten und zweiten Band im periodischen Zonenschema.
(b) Es werde ein schwaches Magnetfeld angelegt, das aus der Zeichenebene heraus zeigt. Skizzieren Sie die Trajektorie im reziproken Raum,

die Elektronen der Energie $E_F$ beschreiben, wenn sie sich im ersten bzw. zweiten Band befinden. Was sind dies für Bahnen?
(c) Ein Ferromagnet besitzt ein spontanes makroskopisches magnetisches Moment unterhalb der Curie-Temperatur $T_C$. Geben Sie mindestens zwei unterschiedliche Mechanismen an, wie es zu der dafür notwendigen Kopplung der magnetischen Momente kommen kann. (3 Punkte)

**Konstanten** (zu benutzen oder auch nicht)
$\hbar = 1{,}05*10^{-34}$ Js = $6{,}58*10^{-16}$ eVs
$m_0 = 9{,}11*10^{-31}$ kg; $k_B = 1{,}38*10^{-23}$ J/K = $8{,}62*10^{-5}$ eV/K; $c = 3*10^8$ m/s
$e = 1{,}6*10^{-19}$ C

_____soweit die Übungsklausur _____

**8. Supraleitung und Magnetfeld**
Eine zentrale Beobachtung bei der Supraleitung ist der Meißner-Ochsenfeld-Effekt. Erklären Sie ihn. Nehmen Sie dazu Stellung, ob der Effekt mit dem verschwindenden Widerstand beim Übergang in die supraleitende Phase erklärt werden kann. (2 Punkte)

**9. Supraleitung und Tunnelstrom**
Die nebenstehende Abbildung zeigt schematisch einen Aufbau um den Tunnelstrom zwischen einem Supraleiter und einem Normalleiter zu messen. Skizzieren Sie die zu erwartenden I(U)-Kennlinie unterhalb und oberhalb der kritischen Temperatur. Welche Größe kann man mit diesem Experiment bestimmen und warum? (3 Punkte)