

## Kapitel 9: Dynamik von Kristallelektronen

1. Diskutieren Sie die wesentlichen Unterschiede zwischen dem Sommerfeld-Modell der freien Elektronen und dem Bloch-Modell der Kristallelektronen
  - a. Quantenzahlen
  - b. Energie
  - c. Geschwindigkeit
  - d. Wellenfunktion
2. Wie können Sie mehr oder weniger stark lokalisierte Elektronen im Wellenbild beschreiben?
  - a. Wellenpakete
  - b. Unschärferelation  $\rightarrow$  Ortsunschärfe des Wellenpakets
  - c. Gruppengeschwindigkeit eines Wellenpakets
3. Was verstehen wir unter dem semiklassischen Modell zur Beschreibung der Bewegung von Kristallelektronen unter der Wirkung äußerer Kräfte?
  - a. Quantenmechanik  $\rightarrow$  Bandstruktur, klassische Mechanik  $\rightarrow$  Bewegungsgleichungen
  - b. Für welche Frequenzen/Wellenlängen der äußeren Felder können wir das semiklassische Modell verwenden?
  - c. Bandindex
  - d. Bewegungsgleichungen
  - e. Effektive Masse
  - f. Besetzungsstatistik
4. Welchen Strombeitrag liefern voll besetzte Bänder?
5. Wie können wir Ströme in fast voll besetzten Bändern beschreiben?
6. Diskutieren Sie die grundlegenden Eigenschaften von Elektronen und Löchern.
  - a. Wellenzahl:  $k_h = -k_e$
  - b. Energie:  $E_h = -E_e$
  - c. Effektive Masse:  $m_h = -m_e$
  - d. Geschwindigkeit:  $v_h = v_e$
  - e. Bewegungsgleichung: Löcher bewegen sich wie Teilchen mit positiver Ladung
7. Wie bewegen sich Elektronen in einem homogenen Magnetfeld?
  - a. Was verstehen wir unter offenen und geschlossenen Bahnen?
  - b. Umlaufsinn der Bahnen?  $\rightarrow$  Elektronen- und Lochbahnen
8. Was verstehen wir unter der Zyklotronfrequenz?
  - a. Wovon hängt die Umlaufzeit T ab?
9. Wie bewegen sich Elektronen in gekreuzten elektrischen und magnetischen Feldern
  - a. Driftbewegung senkrecht zu E und B
  - b. Hall-Effekt
10. Aufgrund welcher Prozesse werden Ladungsträger in Festkörpern gestreut?
  - a. Abweichung von strenger Periodizität: Defekte, Phononen
  - b. Elektron-Elektron-Streuung
11. Wie können wir Streuprozesse von Bloch-Elektronen beschreiben?
12. Diskutieren Sie die Streuwahrscheinlichkeit für die Elektron-Elektron-Streuung, wann können wir Elektron-Elektron-Streuung im Experiment beobachten?

13. Wie hängt die mittlere freie Weglänge von Elektronen in Festkörpern mit dem Streuquerschnitt und der Dichte von Streuzentren zusammen?
  - a. Wie hängt der absolute Streuquerschnitt mit dem differentiellen Streuquerschnitt zusammen?
  - b. Streuung an geladenen Störstellen (Lindesche Regel, Streuung an geladenen Störstellen in HL)
  - c. Streuung an Phononen: Temperaturabhängigkeit von spezifischem Widerstand in Metallen bei hohen und tiefen Temperaturen (Bloch-Grüneisen-Gesetz).
14. Was versteht man unter der Matthiessen-Regel?
15. Wie können wir die Bewegung von LT in Festkörpern unter dem Einfluss äußerer Kräfte und Streuprozesse beschreiben?
  - a. Wir benötigen Geschwindigkeit der LT (folgt aus Bandstruktur) und Besetzungswahrscheinlichkeit (Boltzmann-Gleichung)
  - b. Änderung der Besetzungswahrscheinlichkeit:
    - (i) treibende äußere Kräfte, (ii) Diffusion durch Dichtegradienten, (iii) Streuprozesse
  - c. Wie können wir die zeitliche Änderung von  $f$  ausdrücken?
  - d. Stationärer Zustand: zeitliche Änderung von  $f$  aufgrund von (i) – (iii) verschwindet
  - e. Welche Näherungen werden zur Vereinfachung der Behandlung der Boltzmann-Gleichung verwendet?
  - f. Was verstehen wir unter der Relaxationszeit-Näherung?
16. Wieso müssen wir bei der Bewegung von Elektronen in einem statischen Magnetfeld Quantisierungseffekte beachten?
  - a. Bohr-Sommerfeld-Quantisierung
17. Wie lautet die Schrödinger-Gleichung für die Bewegung freier Elektronen in einem statischen Magnetfeld?
  - a. Welche Lösungen besitzt die Schrödinger-Gleichung, welche Energieeigenwerte erhalten wir? Durch welche charakteristische Größe werden die Energieeigenwerte bestimmt?
  - b. Wie wird die Verteilung der Zustände im  $k$ -Raum modifiziert? Wie sieht die Zustandsdichte für 3D und 2D-Systeme aus?
  - c. Wie hängen die Energieeigenwerte  $\varepsilon_n$  und ihre Entartung  $p$  vom Magnetfeld ab?
  - d. Wie hängt die Flächendifferenz benachbarter Landau-Zylinder von  $B$  ab?
  - e. Welche Feldänderungen führen zur gleichen Fläche benachbarter Landau-Zylinder, welche Konsequenz hat dies für Festkörpereigenschaften?
  - f. Welche Voraussetzungen braucht man für die experimentelle Beobachtung von Landau-Niveaus?
  - g. Kennen Sie experimentelle Methoden, die auf der Quantisierung der Elektronenbahnen beruhen, was misst man mit diesen Methoden?
18. Was ändert sich beim Übergang von freien Elektronen zu Kristallelektronen?

## Kapitel 10: Halbleiter

1. Was versteht man heute unter einem Halbleiter?
  - a. Isolatoren, die dotiert werden können und deren LT-Dichte damit über weiten Bereich variiert werden kann.
2. Wie können wir HL in verschiedene Unterklassen unterteilen?
  - a. kristallin vs. polykristallin/amorph, direkt vs. indirekt, intrinsisch vs. dotiert
  - b. Element-HL, binäre-HL, organische HL, oxidische HL, Schicht-HL, magnetische HL, ...
3. Beschreiben Sie qualitativ die Bandstruktur von Si und Ge? Wo liegt das Maximum des Valenzbandes und wo das Minimum des Leitungsbandes?
4. Wie groß ist in etwa die Bandlücke von Si und Ge? Ändert sie sich mit der Temperatur? Warum?
5. Muss das Maximum des LB immer am  $\Gamma$ -Punkt liegen?
6. Wie können wir die Bandstruktur an der VB-Oberkante und der LB-Unterkante näherungsweise beschreiben?
  - a. Effektive Massen
  - b. Zahl der Bänder
  - c. Spin-Bahn-Kopplung
7. Diskutieren Sie die optische Absorption in Halbleitern, welche Größe können wir damit bestimmen?
  - a. Absorptionskoeffizient
  - b. Energie- und Impulserhaltung
  - c. Kombinierte effektive Masse und Zustandsdichte
8. Wie können wir für intrinsische HL die Dichte der Elektronen im LB und die Dichte der Löcher im VB ausdrücken?
  - a. Welche effektive Masse geht in die Zustandsdichte ein?
  - b. Welcher Zusammenhang gilt zwischen  $n_c$  und  $p_v$
  - c. Wo liegt bei intrinsischen HL das chemische Potenzial?
9. Wie können wir HL dotieren?
10. Wie können wir die Bindungsenergie der überschüssigen Elektronen bzw. Löcher an die Donator- bzw. Akzeptor-Niveaus berechnen? Welche Bindungsenergien ergeben sich in etwa? Welche Bedeutung haben die Zahlenwerte für die Anwendung von HL?
11. Wie groß ist der Bohrsche Radius der gebundenen Elektronen bzw. Löcher?
12. Skizzieren Sie den Verlauf der Temperaturabhängigkeit der LT-Dichte in einem n-dotierten HL? Begründen Sie qualitativ den Verlauf.
13. Diskutieren Sie die elektrische Leitfähigkeit von HL.
14. Wie können wir die mittlere freie Weglänge berechnen? Wie hängt diese mit dem Streuquerschnitt für Streuprozesse zusammen?
15. Welche Streuprozesse dominieren in HL bei RT und tiefen Temperaturen? Welche Temperaturabhängigkeit der Beweglichkeit ergibt sich daraus?
16. Diskutieren Sie den Hall-Effekt eines n- und p-dotierten HL.
17. Skizzieren Sie den Bandverlauf an einem pn-Übergang. Welche physikalischen Prozesse sind relevant.
18. Wie können wir den Verlauf der Bandverbiegung berechnen?

19. Wodurch wird die Breite der Raumladungszone an einem pn-Übergang bestimmt? Wie können wir diese vermessen?
20. Wie können wir die Diffusionsspannung eines pn-Kontaktes bestimmen?
21. Wie sieht die Strom-Spannungs-Charakteristik eines pn-Übergangs aus? Wodurch wird der Sperrstrom gegeben? Was passiert bei großen Sperrspannungen?
22. Skizzieren Sie den Bandverlauf an einem Schottky-Kontakt.
23. Wie ist eine Si-Solarzelle aufgebaut? Welche Dotierung muss man wählen?
24. Wodurch wird der Kurzschlussstrom und die „Open Circuit“ Spannung bestimmt?
25. Wie legen wir den optimalen Arbeitspunkt einer Solarzelle fest?
26. Wir können wir die durch die Beleuchtung erzeugte Stromdichte  $J_L$  berechnen? Wie erhalten wir daraus die maximale von der Solarzelle abgegebene Leistung?
27. Wie ist der Wirkungsgrad einer Solarzelle definiert?
28. Beschreiben Sie die Funktionsweise eines bipolaren Transistors.
29. Welche Bedingung ist für eine leistungslose Steuerung des Eingangskreises (Emitter-Basis) eines bipolaren Transistors notwendig? Wie lässt sich diese Bedingung in der Praxis erfüllen?
30. Diskutieren Sie die Grenzfrequenz eines Dreitor-Bauelements. Können wir ein Dreitor-Bauelement mit Photonen realisieren?
31. Wie können wir niedrigdimensionale Elektronengase in Halbleitern erzeugen?
32. Was müssen wir beim Wachstum von Halbleiter-Heterostrukturen beachten?
33. Diskutieren sie die grundsätzlichen Typen von Banddiskontinuitäten in HL-Heterostrukturen?
34. Welche Materialparameter bestimmen den Bandverlauf in Halbleiter-Heterostrukturen?
35. Diskutieren Sie den Bandverlauf in isotypischen Heterostrukturen, Kompositionsübergittern und Dotierungsübergittern?
36. Welche Beweglichkeit erwarten sie für die Ladungsträger in einem 2DEG an der Grenzfläche einer isotypischen HL-Heterostruktur?
37. Wie sieht der Leitfähigkeitstensor eines zweidimensionalen Elektronengases aus? Wie erhalten wir daraus den Tensor des spezifischen Widerstands?
38. Welchen Ausdruck erhalten wir für den spezifischen Hall-Widerstand? Welcher Wert ergibt sich, wenn das chemische Potenzial gerade zwischen zwei Landau-Niveaus liegt?
39. Wieso erhält man bei der Messung des Hall-Widerstands Quanten-Hall-Plateaus mit einer endlichen Breite?

## Kapitel 11: Dielektrische Eigenschaften

1. Wie lässt sich der Zusammenhang zwischen elektrischem Feld (Störung) und der Polarisation (Antwort/Response) eines Festkörpers in linearer Näherung allgemein beschreiben?
  - a. Welchen Zusammenhang erhalten wir für die Fourier-Komponenten der Polarisation und des elektrischen Feldes?
  - b. Welcher Zusammenhang besteht zwischen der elektrischen Suszeptibilität und der dielektrischen Funktion? Wovon hängen diese Größen ab?
  - c. Wie ist die dielektrische Verschiebung definiert?
  - d. Wann müssen Beiträge jenseits der linearen Antwort berücksichtigt werden? Welche neuen Effekte treten auf?
2. Wie sind das elektrische Dipolmoment und die Polarisation definiert?
3. Wie sieht die dielektrische Funktion eines elektrisch leitenden Festkörpers aus?  $\rightarrow \tilde{\epsilon}(\omega) = \epsilon(\omega) + i\sigma/\epsilon_0\omega$
4. Welcher Zusammenhang besteht zwischen der dielektrischen Funktion und den optischen Eigenschaften eines Festkörpers (Brechungsindex und Extinktionskoeffizient)?
5. Welches elektrische Feld wirkt lokal an der Position eines Atoms in einem polarisierbaren Festkörper, der sich in einem homogenen äußeren elektrischen Feld befindet?
  - a. Welcher Zusammenhang besteht zwischen dem so genannten Lorentz-Feld und der Polarisation?
  - b. Welchen Ursprung haben Depolarisationsfelder und wie können wir sie am einfachsten beschreiben?
6. Wie können wir Festkörper hinsichtlich ihrer Reaktion auf äußere elektrische Felder klassifizieren?
7. Welche mikroskopischen Mechanismen dominieren in
  - a. dielektrischen Festkörpern?  
( $\rightarrow$  elektronische und ionische Polarisation, freie vs. gebundene Ladungsträger)
  - b. paraelektrischen Festkörpern
  - c. ferro- und antiferroelektrischen Festkörpern
8. Diskutieren sie die Grundlagen des Lorentzischen Oszillator-Modells zur Beschreibung der elektronischen Polarisation gebundener Elektronen
  - a. Skizzieren sie den Verlauf der dielektrischen Funktion
  - b. In welchem Frequenzbereich liegen die charakteristischen Frequenzen?
  - c. Wie ist die elektronische Polarisierbarkeit definiert, wie skaliert sie mit dem Atomradius?
9. Wie müssen wir das Lorentzsche Oszillator-Modell erweitern, um die dielektrische Funktion eines realen Isolators zu erhalten?
10. Welches Feld müssen wir beim Lorentzischen Oszillator-Modell verwenden? Was passiert, wenn wir ein System aus Atomen mit hoher Polarisierbarkeit und hoher Dichte vorliegen haben?  $\rightarrow$  Clausius-Mosotti-Beziehung
11. Woraus resultiert die ionische Polarisation von Festkörpern? In welchen Materialien tritt sie auf?
12. Wie ändert sich die Frequenz von transversalen und longitudinalen optischen Phononen (Eigenschwingungen) in Ionenkristallen, wenn wir eine endliche ionische Polarisierbarkeit berücksichtigen?
  - a. Begründen sie ihre Antwort unter Benutzung des lokalen elektrischen Feldes.

- b. Wodurch wird das Verhältnis der Schwingungsfrequenzen der longitudinalen und transversalen Gitterschwingungen bestimmt? → LST-Relation
  - c. Was versteht man unter weichen transversal-optischen Phononen? Welche Bedeutung haben diese für Ferroelektrika?
- 13. Wie sieht die Frequenzabhängigkeit der ionischen Polarisierung aus. Welche charakteristischen Frequenzen treten auf? Wie groß sind diese im Vergleich zu denjenigen, die bei der elektrischen Polarisierung auftreten?
- 14. Diskutieren sie erzwungene Schwingungen in Ionenkristallen für den Grenzfall  $q \rightarrow 0$ .
  - a. Können wir longitudinal-optische Schwingungen mit elektromagnetischen Wellen anregen?
  - b. Für welche Frequenzen können longitudinal-optische Schwingungsmoden existieren?
  - c. Wie sieht die Frequenzabhängigkeit der dielektrischen Funktion für erzwungene transversal-akustische Schwingungen aus?
  - d. In welchem Frequenzbereich tritt Totalreflexion auf? Können wir dies für Anwendungen ausnutzen?
- 15. Diskutieren sie die Dispersionsrelation von erzwungenen transversal-optischen Schwingungen für kleine aber endliche Wellenzahlen  $q$  (→ Polaritonen).
- 16. Was verstehen wir unter einem paraelektrischen Festkörper? Diskutieren sie sein Verhalten in einem statischen elektrischen Feld.
  - a. Welche mittlere Richtung nehmen die elektrischen Dipolmomente ein, wenn wir eine klassische Diskussion zugrunde legen?
  - b. Welche Suszeptibilität ergibt sich daraus?
  - c. Was würde sich ändern, wenn wir eine quantenmechanische Betrachtung machen würden?
- 17. Wie können wir die Frequenzabhängigkeit der dielektrischen Funktion eines paraelektrischen Festkörpers einfach beschreiben?
  - a. Welche charakteristischen Frequenzen/Zeiten treten auf?
- 18. Welches einfache Modell können wir verwenden, um die dielektrische Funktion von Metallen (freien Elektronen) abzuleiten?
  - a. Welcher wichtige Unterschied besteht zu gebundenen Elektronen? Welche Auswirkungen hat dies auf die Frequenzabhängigkeit der dielektrischen Funktion?
- 19. Skizzieren sie die Frequenzabhängigkeit der dielektrischen Funktion eines Metalls?
  - a. Welche charakteristischen Frequenzen treten auf?
  - b. Was versteht man unter der Plasmafrequenz? Wie können wir diese interpretieren? In welchem Frequenzbereich liegt sie für Metall und Halbleiter?
  - c. Wie können wir die Plasmafrequenz im Fall verschwindender Dämpfung einfach herleiten?
  - d. Wie können wir longitudinale Plasmaschwingungen in Metallen anregen?
- 20. Wie sieht die Dispersionsrelation von erzwungenen transversalen Plasmaschwingungen für kleine Wellenzahlen  $q$  aus?
- 21. Was passiert, wenn wir eine positive Testladung in ein Metall bringen?
  - a. Auf welcher Längenskala wird die Testladung abgeschirmt?
  - b. Wie können wir diese Längenskala einfach abschätzen?
  - c. Von welchen Materialeigenschaften wird die Abschirmlänge bestimmt? Welchen typischen Wert hat sie für Metalle?

- d. Wie sieht die  $q$ -Abhängigkeit der dielektrischen Funktion aus? Welche Schlüsse ziehen sie daraus für das Verhalten  $q \rightarrow 0$ ?
22. Skizzieren sie das abgeschirmte Coulomb-Potenzial.
23. Was verstehen wir unter ferroelektrischen, pyroelektrischen und piezoelektrischen Materialien?
24. Was ist eine polare Achse?
25. Wie können wir den Übergang von einem Para- zu einem Ferroelektrikum im Rahmen der Landau-Theorie der Phasenübergänge beschreiben.
26. Was verstehen wir unter einem Phasenübergang 1. und 2. Ordnung?
27. Wie können wir Ferroelektrika grob klassifizieren, was sind typische Vertreter der verschiedenen Materialklassen?

## Kapitel 12: Magnetismus

1. Wie lässt sich der Zusammenhang zwischen magnetischem Feld (Störung) und der Magnetisierung (Antwort/Response) eines Festkörpers in linearer Näherung allgemein beschreiben?
  - a. Welchen Zusammenhang erhalten wir für die Fourier-Komponenten der Magnetisierung und des magnetischen Feldes?
  - b. Welcher Zusammenhang besteht zwischen der magnetischen Suszeptibilität und der Permeabilität?
  - c. Was ist die zur Magnetisierung analoge elektrische Größe?
  - d. Wie ist die magnetische Flussdichte definiert, was ist die analoge elektrische Größe?
2. Wie sind das magnetische Moment und die Magnetisierung definiert? Was ist die typische Größenordnung eines atomaren magnetischen Moments?
3. Welcher Zusammenhang besteht zwischen der Magnetisierung bzw. der magnetischen Suszeptibilität und der freien Energie?
4. Welcher Zusammenhang besteht zwischen dem Gesamtdrehimpuls  $J$  der Hüllenelektronen eines Atoms und dem mit diesen Elektronen verbundenen magnetischen Moment  $\mu_J$ ? Was verstehen wir unter dem gyromagnetischen Verhältnis?
5. Aus welchen Komponenten setzt sich das lokale magnetische Feld zusammen?
6. Diskutieren sie die Größe des Lorentz-Feldes und des Entmagnetisierungsfeldes für dia- und paramagnetische Materialien.
7. Diskutieren Sie den Zusammenhang zwischen  $B$ ,  $H$  und  $M$ .
8. Diskutieren sie die Entmagnetisierungs- und Streufelder sowie die magnetische Flussdichte in einer dünnen ferromagnetischen Scheibe.
9. Was verstehen wir unter der magnetostatischen Selbstenergie?
10. Diskutieren sie grob die Merkmale von diamagnetischen, paramagnetischen sowie ferro-/ferri-/antiferromagnetischen Festkörpern. Welche Ursachen haben diese Phänomene in Isolatoren und Metallen?
11. Wie ändert sich die Energie des Elektronensystems eines Atoms, wenn wir dieses in ein Magnetfeld bringen?
  - a. Welche Beiträge treten auf und welche Größenordnung besitzen sie?
  - b. Unter welchen Umständen können wir welche Beiträge beobachten?
  - c. Was müssen wir tun, um freie Energie bei endlicher Temperatur abzuschätzen?
12. Diskutieren sie die Größenordnung des Larmor-Diamagnetismus von gebundenen Elektronen. Für welche Atome können wir diesen beobachten?
13. Für welche Atome liegen endliche magnetische Momente vor? Wie groß sind die magnetischen Momente? Was verstehen wir unter der effektiven Magnetonenzahl?
14. Diskutieren sie die Hundschen Regeln. Welche physikalischen Mechanismen führen zu diesen Regeln? Was verstehen wir unter der spektroskopischen Notation? Welchen Zustand erhalten wir z.B. für 6 Elektronen in der 4f-Schale ( $\text{Eu}^{3+}$ )?
15. Was müssen wir bei der Abschätzung des magnetischen Moments von Übergangsmetallionen (3d-Elemente) im Unterschied zu den Seltenen Erden (4f-Elemente) berücksichtigen?
16. Diskutieren sie den Paramagnetismus aufgrund der magnetischen Momente von gebundenen Elektronen.

- a. Welches Ergebnis erhalten wir bei einer klassischen und einer quantenmechanischen Betrachtung?
  - b. In welchem Grenzfall stimmen beide Ergebnisse überein?
  - c. Welche Suszeptibilität messen wir in Experimenten bei Raumtemperatur?
17. Wie funktioniert Kühlung durch adiabatische Entmagnetisierung?
18. Diskutieren sie die magnetische Suszeptibilität von (nicht-ferromagnetischen) Metallen?
- a. Wieso ist die mit den Metallelektronen verbundene paramagnetische Suszeptibilität wesentlich kleiner als diejenige, die mit gebundenen Elektronen in Isolatoren verbunden ist?
  - b. Wieso sind manche Metall diamagnetisch und manche paramagnetisch?
19. Welche Prozesse in Festkörpern führen zu einer endlichen Wechselwirkung von magnetischen Momenten und damit zu kooperativen magnetischen Phänomenen?
- a. Diskutieren sie die Größenordnung und Bedeutung der Dipol-Dipol-Wechselwirkung.
  - b. Auf welchen physikalischen Mechanismen beruht die Austausch-Wechselwirkung zwischen Kristallelektronen? Wieso können wir diese Wechselwirkung als eine effektive Spin-Spin-Wechselwirkung beschreiben? ( $J_A = E^s - E^a$ ,  $J_A > 0$ : ferromagnetische Kopplung,  $J_A < 0$ : antiferromagnetische Kopplung)
  - c. Diskutieren sie das Heisenberg-Modell. Welche Vereinfachungen können häufig vorgenommen werden?
20. Diskutieren sie qualitative einige wichtige Austauschwechselwirkungsarten.
21. Wodurch kommt die Spin-Bahn-Wechselwirkung zustande?
- a. Diskutieren sie die Größenordnung der Spin-Bahn-Wechselwirkung anhand einer klassischen Betrachtung.
  - b. Für welche Elemente ist die Spin-Bahn-WW besonders groß?
22. Diskutieren sie qualitativ, unter welchen Umständen Metalle ferromagnetisch werden können?
- a. Welche Energiebeiträge müssen wir hierbei berücksichtigen?
  - b. Was verstehen wir unter dem Stoner-Kriterium? Geben sie eine physikalische Interpretation dieses Kriteriums.
  - c. Welchen Einfluss hat ein endlicher Stoner-Faktor auf die Paulische Spin-Suszeptibilität?
23. Skizzieren sie die Anordnung der magnetischen Momente in typischen magnetischen Ordnungsstrukturen.
24. Was verstehen wir unter der Molekularfeld-Näherung bei der Diskussion des ferromagnetischen Zustands?
- a. Wie können wir die Curie-Temperatur eines Ferromagneten mit Hilfe dieser Näherung abschätzen?
  - b. Diskutieren sie die Größe und Bedeutung des Molekular- oder Austauschfeldes? Können wir dies direkt messen?
  - c. Welche Suszeptibilität erhalten wir für einen Ferromagneten oberhalb der Curie-Temperatur?
  - d. Welche T-Abhängigkeit erwarten wir für die Magnetisierung für  $T \ll T_C$  im Rahmen der Molekularfeldnäherung? Stimmt diese mit dem Experiment überein?
25. Diskutieren sie ferrimagnetische Ordnung anhand von Magnetit.
- a. Unter welchen Umständen kann eine ferrimagnetische Ordnung auftreten, obwohl alle Kopplungskonstanten zwischen den magnetischen Untergittern negativ (afm) sind?

- b. Welchen Ausdruck erhalten wir für die Neel-Temperatur? Vergleichen sie diesen mit demjenigen für die Curie-Temperatur eines Ferromagneten.
  - c. Welche Suszeptibilität erhalten wir für einen Antiferromagneten oberhalb der Neel-Temperatur? Vergleichen sie den Ausdruck mit der Suszeptibilität eines Ferromagneten.
  - d. Wieso ist die paramagnetische Neel-Temperatur höher als die Neel-Temperatur? Wann würden beide Temperaturen gleich werden?
26. Wie ist die magnetische Anisotropieenergie definiert?
27. Welche Ursachen gibt es für die magnetische Anisotropie? Beschreiben sie qualitativ die zugrundeliegende Physik.
28. Wie können wir die magnetokristalline Anisotropie phänomenologisch beschreiben?
29. Wieso bilden sie magnetische Domänen?
- a. Was müssten wir tun, um die magnetische Domänenstruktur zu berechnen?
  - b. Wie können wir magnetische Domänen abbilden?
  - c. Gibt es auch in Antiferromagneten Domänen?
30. Diskutieren sie die Eigenschaften von Domänenwänden.
- a. Welche Typen von Domänenwänden gibt es?
  - b. Wie können wir die Breite einer Domänenwand abschätzen?
31. Diskutieren sie die Form einer magnetischen Hystereseschleife.
- a. Welche Form wäre ideal für einen Transformator kern, welche für einen Haftmagneten?
32. Diskutieren sie die Bewegung des Magnetisierungsvektors in einer homogen magnetisierten Probe im Grenzfall großer Wellenlängen (homogene Mode).
- a. Wodurch wird die Magnetisierungsrichtung im Gleichgewicht bestimmt?
  - b. Wie können wir die Magnetisierung aus dieser Gleichgewichtsrichtung auslenken?
33. Was verstehen wir unter ferromagnetischer Resonanz?
34. Wie können wir die Magnetisierung eines Ferromagneten reduzieren?
- a. Vergleichen sie den Energieaufwand für das Umschlagen eines einzelnen magnetischen Moments und das kontinuierliche Drehen der Richtung der magnetischen Momente über viele Gitterplätze.
  - b. Was versteht man unter einer Stoner-Anregung in einem ferromagnetischen Metall?
35. Wie können wir die Bewegungsgleichung für Spin-Wellen ableiten?
- a. Welche Näherungen müssen wir machen, um eine einfache klassische Diskussion durchführen zu können?
  - b. Welche Dispersionsrelation erhalten wir in dieser einfachen Betrachtung für eine eindimensionale Spin-Kette?
36. Welche Temperaturabhängigkeit erwarten wir für die Magnetisierung eines Ferromagneten aufgrund der Anregung von Spin-Wellen?

## Kapitel 13: Supraleitung

1. Wann wurden die Supraleitung (perfekte Leitfähigkeit) und der Meißner-Ochsenfeld-Effekt entdeckt? Wann wurde die erste mikroskopische Theorie der Supraleitung entwickelt? Wann wurde die Fluss-Quantisierung gemessen, der Josephson-Effekt vorhergesagt, wann die Hochtemperatur-Supraleitung entdeckt?
2. Welche supraleitenden Materialklassen kennen sie?
3. Welche grundlegenden Phänomene zeigen Supraleiter? Beschreiben sie kurz diese Phänomene qualitativ.
4. Perfekte Leitfähigkeit: Wann wurde sie von wem entdeckt? Können wir in einem Experimente tatsächlich  $R = 0$  messen? Falls nein, wie können wir die untere Schranke möglichst klein machen?
5. Welche Aussage können wir mit Hilfe des Faradayschen Induktionsgesetzes über den Flussinhalt in einem Zylinder aus einem perfekt leitenden Material machen?
6. Erklären sie den Unterschied zwischen einem perfekten Leiter und einem Supraleiter? Welche Aussage können wir bezüglich des thermodynamischen Zustands eines perfekten Leiters und eines Supraleiters machen?
7. Begründen sie die Notwendigkeit der Existenz eines kritischen Feldes, bis zu dem ein Supraleiter die Feldverdrängung aufrechterhalten kann. Welche Information können wir aus der Messung des kritischen Feldes erhalten?
8. Welche empirische T-Abhängigkeit besitzt das kritische Feld? Skizzieren sie damit das Phasendiagramm eines Supraleiters.
9. Welche Unterschiede zeigen die Phasendiagramme von Typ-I und Typ-II-Supraleiter. Diskutieren sie die verschiedenen Bereiche des Phasendiagramms und die auftretenden kritischen Felder.
10. Wie wurden die Experimente zur Untersuchung der Fluss-Quantisierung durchgeführt? Was war das zentrale Ergebnis? Was konnte aus diesem Ergebnis geschlossen werden?
11. Diskutieren sie die thermodynamischen Eigenschaften eines Typ-I Supraleiters im externen Magnetfeld:
  - a. Wie groß ist die Differenz der freien Enthalpiedichten im normalleitenden und supraleitenden Zustand?
  - b. Skizzieren sie den T-Verlauf der freien Enthalpiedichten eines Metalls im normalleitenden und supraleitenden Zustand
  - c. Welche T-Abhängigkeit erhalten wir für die Differenz der Enthalpiedichten des normalleitenden und supraleitenden Zustands? Welche Schlussfolgerungen können sie daraus ziehen?
  - d. Welche T-Abhängigkeit erhalten wir für die Differenz der spezifischen Wärmen im normalleitenden und supraleitenden Zustand?
12. Wie könnte man in einfachster Weise die London-Gleichungen aus der Bewegungsgleichung von Ladungsträgern in einem Metall ableiten?
  - a. Welche wichtigen Schlussfolgerungen ergeben sich aus den London-Gleichungen?
  - b. Auf welcher charakteristischen Längenskala werden externe Magnetfelder in Supraleitern abgeschirmt?
  - c. Was können wir mit den London-Gleichungen zusammen mit den Maxwell-Gleichungen beschreiben?

- d. Warum ist die Herleitung der London-Gleichungen aus der Bewegungsgleichung für Ladungsträger problematisch?
13. Supraleitung als makroskopisches Quantenphänomen:
- a. Welche Grundhypothese wird für das makroskopische Quantenmodell verwendet?
  - b. Interpretieren sie die Bedeutung des Absolutquadrats der Wellenfunktion, wenn wir mit dieser Wellenfunktion ein mikroskopisches Teilchen und die Gesamtheit der „supraleitenden Elektronen“ beschreiben.
  - c. Welche grundlegenden Beziehungen erhalten wir durch Einsetzen der makroskopischen Wellenfunktion in die Schrödinger-Gleichung (Madelung-Transformation)?
  - d. Interpretieren sie diese grundlegenden Beziehungen. Können wir diese Beziehungen außer für Supraleiter auch noch für andere physikalische Systeme benutzen?
14. Folgerungen aus der mit dem makroskopischen Quantenmodell hergeleiteten Beziehungen (Strom-Phasen- und Energie-Phasen-Beziehung)
- a. Wie erhalten wir die beiden London-Gleichungen aus der Strom-Phasen-Beziehung?
  - b. Leiten sie aus der Strom-Phasen-Beziehung die Fluss-Quantisierung ab? Welcher Unterschied besteht zwischen Fluxoid- und Fluss-Quantisierung?
  - c. Ist das makroskopische Quantenmodell zur Beschreibung von Situationen mit räumlich variierender Dichte der supraleitenden Elektronen geeignet? Eignet es sich zur Beschreibung von zeitabhängigen Phänomenen?
15. Ginzburg-Landau-Theorie:
- a. Was ist der Ausgangspunkt der GL-Theorie für Supraleiter und welche grundlegenden Annahmen werden gemacht?
  - b. Wie können wir die freie Enthalpiedichte eines räumlich homogenen Supraleiters ohne externes Magnetfeld als Funktion des Ordnungsparameters ausdrücken?
  - c. Welche zusätzlichen Terme müssen wir berücksichtigen, wenn wir einen räumlich inhomogenen Supraleiter im externen Magnetfeld betrachten? Welche Bedeutung haben diese Terme?
  - d. Skizzieren sie qualitativ, wie man aus dem Ausdruck für die Enthalpiedichte die Ginzburg-Landau-Gleichungen erhält.
  - e. Vergleichen sie die beiden Ginzburg-Landau-Gleichungen mit der aus dem makroskopischen Quantenmodell erhaltene Strom-Phasen- und Energie-Phasen-Beziehung? Welche Analogien und Unterschiede bestehen?
  - f. Welche charakteristischen Längenskalen sind mit den beiden Ginzburg-Landau-Gleichungen verbunden? Welche Bedeutung hat die Ginzburg-Landau-Kohärenzlänge? Welche Größenordnung besitzt sie?
  - g. Wie ist der Ginzburg-Landau-Parameter definiert?
16. Diskutieren sie den Verlauf des Ordnungsparameters und der magnetischen Flussdichte an einer Supraleiter-Normalleiter-Grenzfläche
17. Diskutieren sie die mit einer Supraleiter-Normalleiter-Grenzfläche verbundene Grenzflächenenergie.
- a. Welches Vorzeichen hat die Grenzflächenenergie?
  - b. Wie können wir die Grenzflächenenergie dazu benutzen, um zwischen Typ-I und Typ-II Supraleitern zu unterscheiden?
18. Typ-I und Typ-II Supraleiter:

- a. Skizzieren sie die magnetische Flussdichte im inneren eines Typ-I und Typ-II Supraleiters und deren Magnetisierung als Funktion des von außen angelegten Magnetfeldes.
  - b. Was muss für das Integral der Magnetisierungskurve gelten, wenn wir einen Typ-I und Typ-II Supraleiter mit gleicher Kondensationsenergie vorliegen haben.
  - c. Diskutieren sie qualitativ die Größe des unteren und oberen kritischen Feldes eines Typ-II Supraleiters.
  - d. Wie sieht die Flussdichteverteilung im Mischzustand eines Typ-II Supraleiters aus?
19. Wie können wir die Wechselwirkung zwischen zwei Leitungselektronen allgemein mit einem Feynman-Diagramm beschreiben? Welche möglichen Austauschbosonen könnten in Festkörpern eine Rolle spielen?
20. Was versteht man unter dem Isotopen-Effekt? Welche Schlussfolgerungen konnten aus der Messung des Isotopen-Effekts (z.B. von Sn) gezogen werden?
21. Wie können wir die attraktive Wechselwirkung von zwei Leitungselektronen über den Austausch von virtuellen Phononen qualitativ beschreiben? Welche Grundvoraussetzungen müssen erfüllt sein, damit dieser Wechselwirkungsmechanismus zum Tragen kommt? Schätzen sie die Reichweite der Wechselwirkung ab?
22. Cooper-Paare:
- a. Begründen sie qualitativ, wieso die attraktive Wechselwirkung zwischen zwei Leitungselektronen über den Austausch von virtuellen Phononen optimal für entgegengesetzte Impulse der beteiligten Elektronen ist.
  - b. Welche Elektronen können an dem Wechselwirkungsprozess teilnehmen?
  - c. Wie können wir die Wechselwirkungsenergie abschätzen? Welche Grundannahmen werden üblicherweise gemacht, um das Problem einfach zu halten?
  - d. Welche Größenordnung hat die Wechselwirkungsenergie und von welchen charakteristischen Größen hängt sie in welcher Weise ab?
23. Diskutieren sie die Symmetrie der Paar-Wellenfunktion? Welche Kombinationen aus Spin- und Orbital-Wellenfunktionen sind möglich?
24. BCS-Grundzustand:
- a. Diskutieren sie qualitativ, wie wir einen kohärenten Vielteilchenzustand aus Bosonen und Fermionen aufbauen können? Welcher fundamentalen Unterschiede gibt es?
  - b. Welche Form hat der BCS-Grundzustand?
  - c. Skizzieren sie den Verlauf der so genannten Kohärenzfaktoren in der Nähe der Fermi-Energie für  $T = 0$ .
- 25.