

B4: Supraleitung

1. Übersicht zum Thema und Zusammenfassung der Ziele

Supraleitung ist ein typisches Tieftemperaturphänomen. Die Entdeckung, daß der elektrische Widerstand von bestimmten Metallen bei charakteristischen Temperaturen (Sprungtemperatur T_C) verschwindend klein wird, geht auf H.K. Onnes im Jahre 1911 zurück. Supraleiter unterscheiden sich von Normalleitern auch im Verhalten der spezifischen Wärme, der Wärmeleitfähigkeit sowie der magnetischen Eigenschaften. Diese zeigen, daß es sich beim Übergang vom normalleitenden (NL) in den supraleitenden (SL) Zustand um einen reversiblen Phasenübergang handelt, der für supraleitende Elemente (SL 1. Art) bei Temperaturen kleiner 10 K stattfindet. Neben Supraleitern 1. Art gibt es Supraleiter 2. Art (Legierungen, $T_C < 25$ K), die in der Technik, z.B. beim Bau von Hochfeldmagneten, Anwendung finden. Die Sprungtemperatur ist eine spezifische Größe für jedes Metall und ist mit der Debye-Temperatur korreliert. Es werden aber nicht alle Metalle - unter den zur Zeit gegebenen experimentellen Bedingungen - supraleitend. Ferromagnetismus schließt Supraleitung aus.

Ziel des Versuches ist es, die Sprungtemperatur für zwei Metalle (Indium und Zinn) zu bestimmen und den Einfluß von Magnetfeldern auf die Supraleitung zu untersuchen. Weiterhin sollen der Aufbau und der Umgang mit einer einfachen Tieftemperaturapparatur verstanden werden.

2. Theoretische Grundlagen

Für das Verständnis der Supraleitung ist zunächst die Theorie des freien Elektronengases* [1, S.16f.] wichtig. Die Zustandsdichte von Elektronen* in einem Normalleiter (NL) und die Fermi-Funktion* bestimmen das Verhalten an der Fermi-Kante. Beim Übergang in den supraleitenden (SL) Zustand ändern sich die Verhältnisse gerade an der Fermi-Kante [2, S.534 ff.] - warum und in welcher Weise, ist für das Verständnis der SL entscheidend.

Das Phänomen der Supraleitung wird durch die BCS-Theorie [1-5] erklärt, die etwa 50 Jahre nach der Entdeckung der Supraleitung aufgestellt wurde. Diese Theorie beschreibt die Wechselwirkung zweier Elektronen zu einem Cooper-Paar* [2, S.532 ff.] und erklärt den Isotopeneffekt*, das Auftreten einer Energielücke* an der Fermi-Kante und weitere Eigenschaften des Supraleiters. Eine anschauliche Erklärung, wie es zum SL-Zustand und zum widerstandslosen Stromtransport kommt, ist in [1, S.33 ff.] nachzulesen.

Zum Nachweis des Übergangs von der normalleitenden in die supraleitende Phase wird in dem Versuch der Meißner-Ochsenfeld-Effekt* [2, Kap.50.2] ausgenutzt. Für dessen Verständnis muß das Verhalten des SL in einem äußeren Magnetfeld, in dem der SL-Zustand zerstört werden kann, bekannt sein. Das sogenannte kritische Magnetfeld B_C , bei dem die SL-Phase zusammenbricht, ist eine Funktion der Temperatur*, Gleichung (4-16) in [1]. Für $B < B_C$ ist die Suszeptibilität der SL-Phase $\chi = -1$.

Für Temperaturen unterhalb der Sprungtemperatur* T_C ist ohne äußeres Magnetfeld die Entropiedifferenz der NL-Phase und der SL-Phase immer positiv, d.h. in der SL-Phase haben die Leitungselektronen einen höheren Ordnungsgrad als in der NL-Phase. Dieser

* Diese Themenkreise müssen zu Beginn des Versuches beherrscht und in den theoretischen Grundlagen des Protokolls diskutiert werden.

Sachverhalt läßt sich anhand von Gleichung (4-18) in [1, S.112] diskutieren. Diese thermodynamische Eigenschaft des Supraleiters muß auch eine mikroskopische Theorie wiedergeben [5].

3. Experimentelles

3.1 Tieftemperaturaufbau

Das Tieftemperatursystem besteht aus zwei ineinander gesteckten Badkryostaten für flüssiges Helium und für flüssigen Stickstoff, einer Hochvakuum-Pumpe zur Herstellung des Isoliervakuums des He-Kryostaten und einer Pumpe und dazugehörigem Manometer zur Temperaturregelung des Heliumbades. Die Kryostaten sind aus Glas hergestellt und nachträglich versilbert (warum?), aber so, daß ein Sichtschlitz verbleibt. Man kann daher sowohl den flüssigen Stickstoff (LN₂) im äußeren Dewar, als auch das flüssige Helium (LHe) im inneren Dewar sehen. Bei 2,17 K kann der Übergang des LHe in die superfluide Phase anhand des unterschiedlichen Siedeverhaltens beobachtet werden.

ACHTUNG!

- A** Alle mechanischen Verbindungen zum Glasdewar müssen kräftefrei angebracht werden. **Bruchgefahr!**
- B** Flüssiger Stickstoff und flüssiges Helium dürfen nur in Anwesenheit des Betreuers in den Kryostaten eingefüllt werden!
- C** Vor dem Einfüllen des flüssigen Stickstoffs muß sichergestellt sein, daß der Kryostat wasserfrei ist. **Bruchgefahr!**
- D** Vor dem Einfüllen des flüssigen Heliums muß sichergestellt sein, daß der Heliumkryostat und die Pumpleitungen keine Undichtigkeiten aufweisen.

3.2 Meßverfahren

Mit einem Induktionsverfahren [1, S.136] wird die Änderung der Suszeptibilität beim Übergang von der Normalleitung zur Supraleitung nachgewiesen. Die Probe mit Meßspule befindet sich in einem Helium-Badkryostaten. Durch Variation des Druckes im Kryostaten kann die Temperatur im Bereich zwischen 1,5 K und 4,2 K eingestellt werden. Das äußere Magnetfeld wird durch eine lange Spule erzeugt. Am Meßplatz liegt eine Eichkurve, die den Zusammenhang zwischen Stromstärke und erzeugtem Magnetfeld wiedergibt.

Das Meßprinzip beruht auf dem des Transformators (siehe Abb. 1). Die induzierte Sekundärspannung hängt von der Kopplung der beiden Spulen ab. Da diese von den magnetischen Eigenschaften des Materials abhängt, erhält man eine Änderung der Sekundärspannung bei Änderung der Permeabilität bzw. Suszeptibilität des Materials.

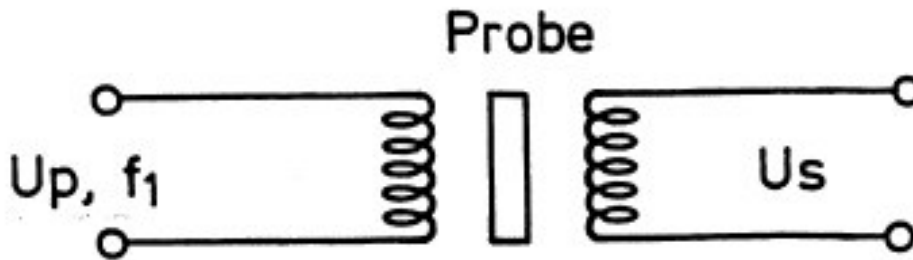


Abb.1: Transformatorschaltung zur Bestimmung der Änderung der Suszeptibilität einer Probe. U_p : Primärspannung mit Frequenz f_1 , U_s : Sekundärspannung.

Die Sekundärspannung wird als Funktion der Temperatur (zur Bestimmung der kritischen Temperatur T_C) oder als Funktion des äußeren Magnetfeldes (zur Bestimmung von B_C) registriert. Um die Empfindlichkeit zu erhöhen, werden zwei ähnliche Spulenpaare gegeneinander geschaltet (Differentialtransformator). In einem befindet sich die Probe, das andere bleibt leer. Die Änderung der Sekundärspannung im Probensystem wird mit einem Lock-In-Verstärker [6] frequenz- und phasenempfindlich nachgewiesen (s. Abb. 2).

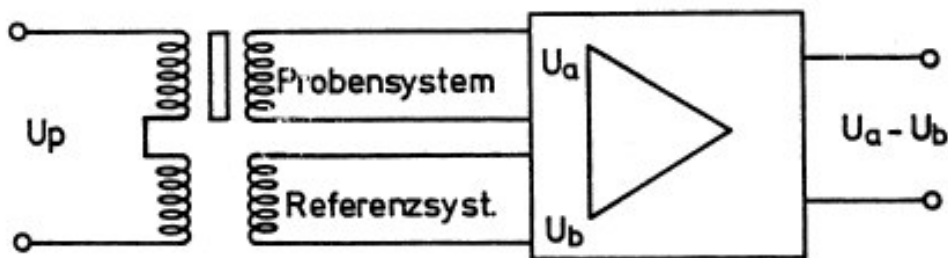


Abb. 2: Meßprinzip zur Bestimmung der Spannungsänderung im Probensystem ΔU_a mit Hilfe der Lock-In-Technik. Für $T > T_C$ ist $|U_a| \approx |U_b|$, für $T < T_C$ ist $|U_a| < |U_b|$.

Zur genauen Bestimmung der kritischen Temperatur T_C und des kritischen Feldes B_C bei verschiedenen Temperaturen wird der Übergang $NL \rightarrow SL$ punktweise ausgemessen. Aus der Auftragung $\Delta U_a(T)$ bzw. $\Delta U_a(B)$ werden nach dem Schema in Abb.3 T_C und B_C bestimmt. Der Bereich $2\delta T_C$ charakterisiert den Übergangsbereich zwischen den beiden Phasen.

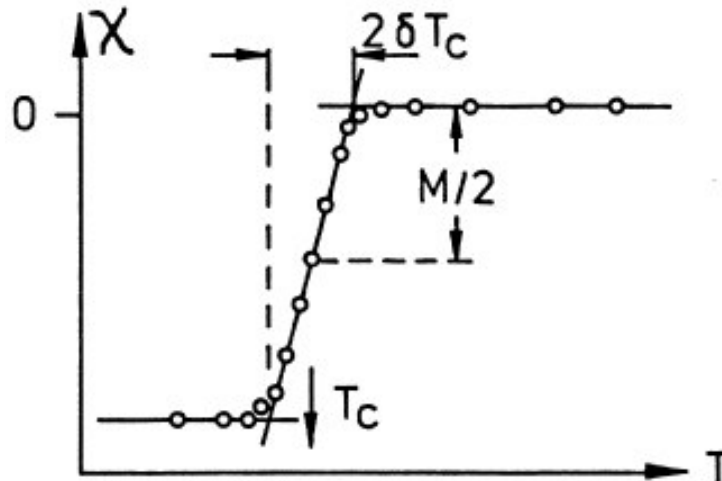


Abb.3: Übergang von der normalleitenden in die supraleitende Phase für die Suszeptibilität χ . Die Spannungsänderung ist proportional zu χ .

3.3 Geräteliste

- Kryostaten, zweistufige Vakuumpumpe, Ventile, Gasuhr, Absolutdruckmesser
- Lock-In-Verstärker mit Differenzeingang
- Oszillograf
- Magnetspule mit Netzgerät
- div. Multimeter

4. Aufgaben

4.1 Messungen und Auswertung

a) Bestimmen Sie für zwei verschiedene Metalle, Zinn (Sn) und Indium (In), die Übergangstemperatur $T_C(B=0)$. Wählen Sie die Temperaturschritte so, daß Sie die Breite des Übergangs bestimmen können. Welches sind die Ursachen für eine endliche Übergangsbreite? [2, Kap.51.2], [3, S.930]

b) Bestimmen Sie für beide Proben $B_C(T)$ bei vier konstanten Temperaturen (ca. 3K; 2,5K; 2,0K; 1,7K). Überprüfen Sie, ob das kritische Feld eine parabolische Funktion von T ist. Bestimmen Sie B_{C0} aus der linearisierten Auftragung $B_C(T)$, [3, S.930].

c) Berechnen Sie die thermodynamisch kritischen Felder B_{C0} von Indium und Zinn und vergleichen Sie sie mit Ihren experimentellen Werten [1, Gleichung (4-30)] ([7], S. E-79) :

Indium: Molgewicht: 114,8 g/mol, Dichte: 7,3 g/cm³, $\gamma = 1,69 \times 10^{-3}$ J/mol K²
 Zinn: Molgewicht: 118,7 g/mol, Dichte: 7,3 g/cm³, $\gamma = 1,78 \times 10^{-3}$ J/mol K²

d) Fertigen Sie eine Skizze des Tieftemperaturaufbaus an.

4.2 Zusätzliche Fragen

e) Statt der Änderung der Suszeptibilität könnte man auch das Verschwinden des elektrischen Widerstandes messen. Weshalb kann u.U. die Widerstandsmethode falsche Ergebnisse liefern? [1, S.136]

f) Leiten Sie aus der Entropiedifferenz $\Delta S = S_N - S_S$ die Differenz der spezifischen Wärmen der NL- und SL-Phase, $\Delta c = c_N - c_S$, ab. Diskutieren Sie Δc bei $T=T_C$ und verwenden Sie dabei den Zusammenhang $B_C(T) = B_{C0} (1 - T^2/T_C^2)$. [1, Kap. 4]

g) Nehmen Sie an, daß sich beim Übergang zur Supraleitung die Spannung an der Induktionsspule um ΔU_a ändert. Weshalb kann man ΔU_a mit dem angegebenen Kompensationsprinzip genauer messen als direkt?

5. Literatur

5.1 Monographien und Lehrbücher

[1] W. Buckel, "Supraleitung", VCH Verlag, 1994.

[2] K.H. Hellwege, "Einführung in die Festkörperphysik", Springer Verlag, 1988.

[3] N.W. Ashcroft, N.D. Mermin, "Festkörperphysik", Oldenbourg Verlag, 2001

[4] E.A. Lynton, "Superconductivity", JohnWiley&Sons Inc, 1964.

5.2 Originalarbeiten

[5] J. Bardeen, L.N. Cooper, I.R. Schrieffer, Phys. Rev. 108 (1957) 1175. ++

5.3 Experimentelles

[6] Anleitung zum Lock-In-Verstärker. +

[7] CRC Handbook of Chemistry and Physics, CRC Press, 1984.

+ siehe Versuchsordner B4 der Literatursammlung zum FP in der FB-Bibliothek.