

# Supraleitung (SU1)

Verantwortlicher: Sergey Granovsky  
Raum REC D 301

## Zusammenfassung

Supraleitung ist ein faszinierendes Phänomen der Festkörperphysik, unter bestimmten Bedingungen fällt der Widerstand eines Materials auf null. Meist muss das Material dafür sehr tiefen Temperaturen ausgesetzt werden, jedoch findet man sogenannte Hochtemperatur-Supraleiter heutzutage bereits in vielen Anwendung wieder. Ein entscheidender technischer Vorteil von Hochtemperatur-Supraleitern ist, dass eine Kühlung mit flüssigem Stickstoff ausreichend ist, um den Supraleitenden Zustand zu erzeugen. In diesem Versuch sollen elektrische sowie magnetische Eigenschaften eines solchen Supraleiters untersucht werden.

## 1 Einführung

### 1.1 Aufgabenstellung

1. Kennenlernen von AC-Messmethoden
2. Messung der magnetischen Suszeptibilität eines Hochtemperatursupraleiters im Temperaturbereich zwischen 80 K und 140 K über Induktivitätsmessung mithilfe einer Kupferspule
3. Messung des Widerstandes einer supraleitenden Probe
4. Berechnung der magnetischen Suszeptibilität des Supraleiters aus der gemessenen Induktivität
5. Überprüfung der Verwendbarkeit des Ohmschen Anteils der Kupferspule als Temperatursensor

### 1.2 Fragen und Aufgaben zur Vorbereitung

1. Was sind die wichtigsten elektrischen, magnetischen und thermischen Eigenschaften der Supraleiter? Was ist der Meißner-Ochsenfeld-Effekt?
2. Wie hängt die elektrische Leitfähigkeit von a) Metallen, b) Halbleitern, c) Supraleitern und d) magnetischen Metallen von der Temperatur ab?
3. Wodurch unterscheiden sich Supraleiter erster und zweiter Art?
4. Was sind die wichtigsten Annahmen der BCS-Theorie?
5. Wann und für welche Arbeiten auf dem Gebiet der Supraleitung gab es Nobelpreise?
6. Wo und warum werden in Forschung, Technik und Industrie Supraleiter eingesetzt?

### 1.3 Arbeiten mit kryogenen Flüssigkeiten

Der Umgang mit kryogenen Flüssigkeiten erfordert aufgrund ihrer besonderen Eigenschaften und potentiellen Gefahren besondere Sorgfalt. Beim Arbeiten mit kryogenen Flüssigkeiten gehen drei Hauptgefahren aus: Erstens, kryogene Flüssigkeiten sind extrem kalt und können **schwere Verbrennungen** verursachen bei direktem Kontakt mit der Haut oder den Augen. Deshalb ist es wichtig, immer geeignete Schutzausrüstung zu tragen, wie **Handschuhe und Schutzbrille**. Zweitens, beim Übergang von flüssiger zu gasförmiger Phase expandieren diese Substanzen stark, was zu hohem Druck und in Folge zu **Explosionen** führen kann. Behälter und Leitungen für kryogene Flüssigkeiten sollten daher immer mit einem Druckentlastungsmechanismus ausgestattet sein. Drittens, einige kryogene Flüssigkeiten - wie flüssiger Stickstoff - können bei Verdampfung den Sauerstoffanteil in der Luft verdrängen und so zu **Erstickungsgefahr** in schlecht belüfteten Räumen führen. **Achten Sie auf ausreichende Belüftung und verwenden Sie nie einen Aufzug in dem eine Kanne mit kryogener Flüssigkeit transportiert wird.** Verlassen Sie den Raum sofort, wenn große Mengen einer kryogenen Flüssigkeit verdampfen.

## 1.4 LCR Meter

Ein LCR-Messgerät ist ein elektronisches Messgerät, welches die drei fundamentalen Größen Induktivität, Kapazität und Widerstand quantitativ bestimmen kann. Das Messgerät funktioniert, indem es eine Wechselspannung an das zu messende Bauteil anlegt und die dadurch hervorgerufene Wechselstromantwort misst. Durch Auswerten der gemessenen Wechselstromamplitude und -phase im Verhältnis zur angelegten Spannung, können die Größen bestimmt werden. In diesem Versuch soll die serielle Induktivität ( $L_s$ ) und der Widerstand (ESR) ausgewertet werden.

## 1.5 PID-Regler

Ein PID-Regler (Proportional-Integral-Derivative-Regler) ist ein weit verbreiteter Kontrollalgorithmus in technischen und industriellen Anwendungen. Der Regler versucht, den Fehler zwischen einer gemessenen Prozessvariable und einem gewünschten Setpoint zu minimieren. Dabei werden drei verschiedene Arten von Aktionen ausgeführt: Proportional: Der Regler reagiert auf die gegenwärtige Größe des Fehlers. Je größer der Fehler, desto stärker fällt die Reaktion aus. Integral: Dieser Teil des Reglers reagiert auf die Summe der vorangegangenen Fehler (und damit die Dauer des vorliegenden Fehlers). Dies hilft, systematische Fehler zu korrigieren und den Restfehler auf null zu bringen. Derivative: Dieser Teil reagiert auf die Veränderungsrate des Fehlers. Er wirkt prädiktiv und versucht einzuschätzen, was der Fehler in nächster Zeit tun wird, um entsprechende Anpassungen vorzunehmen. Die Kombination dieser drei Handlungsarten erlaubt eine feinfühligere und genauere Kontrolle eines Systems. Der Regler hilft dabei, den Ist-Wert schnell und ohne bleibende Abweichung oder Überschwingen auf den Soll-Wert zu bringen. Der PID-Regler spielt eine entscheidende Rolle in vielen Bereichen der Physik und Ingenieurwissenschaften, z.B. in Temperaturregelkreisen, automatischen Lenksystemen und vielem mehr. In diesem Experiment wird die Temperatur mithilfe eines PID-Reglers gesteuert.

## 2 Experiment

Im Hohlraum eines Messing-Zylinders mit einem Platinthermometer befindet sich eine Cu-Spule, deren Induktivität mit Hilfe eines LCR Meters als Funktion der Temperatur gemessen werden kann. Aus der gemessenen Induktivität der Spule mit und ohne Supraleiter kann die Suszeptibilität berechnet werden. Mit einem manuellen Schalter am oberen Ende des Messstabes kann zwischen der Spule und einer Widerstandsprobe gewechselt werden. Der Messzylinder wird in ein mit flüssigem Stickstoff gefülltes Gefäß getaucht und anschließend in der Gasphase direkt oberhalb des flüssigen Stickstoffspiegels positioniert. Die Temperatur wird mit einem PID Regler mit einer konstanten Rate erhöht, gleichzeitig wird der Widerstand und die Induktivität der Messspule bzw. der Probe aufgenommen. Der Heizdraht ist auf der Außenwand der Messzelle angebracht um eine gleichmäßige Erwärmung der Proben zu erzeugen. Der Aufbau des Experiments ist in Abbildung 1 dargestellt. Ein detaillierter schematischer Aufbau der Messtechnik ist im Anhang abgebildet (Abbildung 3).

## 3 Versuchsvorbereitung

1. Die Messgeräte (Temperaturregler, LCR Meter) sowie der Messcomputer sind einzuschalten (User: Praktikum, Passwort: Praktikum). Folgende Geräteeinstellungen sind vorzunehmen:  
LCR Meter: Schalten Sie auf  $L_s$  und ESR  
Temperaturregler(Oxford ITC503): Stellen Sie auf die markierten Kanäle, indem Sie die Taste *SENSOR* am *Display* und am *Heater* drücken. Drücken Sie auch die Taste *PID Auto* (Oxford ITC4 kein PID).
2. Um den Messaufbau Abzukühlen wird **flüssiger Stickstoff** verwendet, dieser befindet sich in einer großen Kanne im Praktikumsraum. Um Stickstoff in den kleinen Behälter überzuheben, bringen Sie die Kannen in den Flur. Verwenden Sie zum Überheben Schutzhandschuhe und Brille! (siehe Arbeiten mit kryogenen Flüssigkeiten) Der kleine Stickstoffbehälter soll bis ca. 15 cm mit flüssigem Stickstoff befüllt werden. Zum Nachmessen tauchen Sie den schwarzen Plastikstab für einige Sekunden in den Behälter und beobachten nach dem Herausnehmen die Länge des mit Eis beschlagenen Teils.
3. Die **Geometrie** der supraleitenden Probe ist mit Hilfe eines Messschiebers zu bestimmen. Länge und Durchmesser der Spule entnehmen Sie der Abbildung 2. Vergleichen Sie die Geometrie der Probe mit supraleitenden Probe.

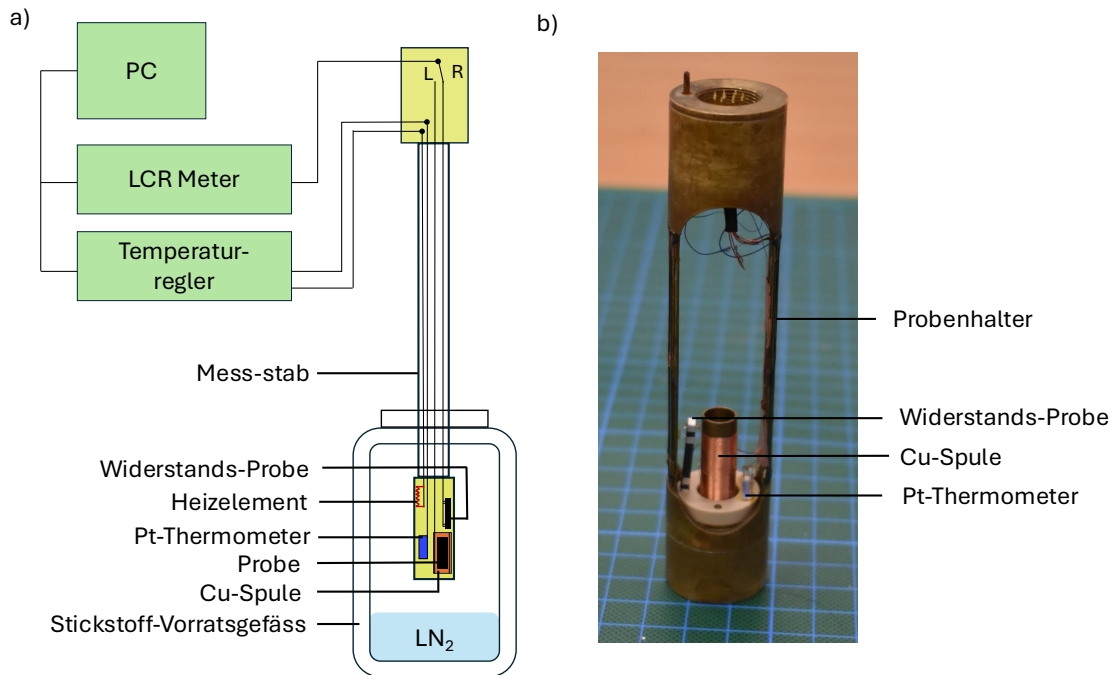


Abbildung 1: Experimenteller Aufbau. a) schematische Zeichnung des Messaufbaus b) Foto der Messzelle mit Kupferspule, Thermometer und Widerstandsprobe.

## 4 Versuchsdurchführung

1. Der Stickstoffbehälter wird unterhalb des Messaufbaus platziert und der Messstab vollständig in Stickstoff getaucht. Es dauert ca. 5-10 Minuten, bis die Spule Stickstofftemperatur (77 K) erreicht hat. Sobald die Spule auf  $< 80$  K ist, wird der Füllstand erneut gemessen und der Stab 2cm + Füllstand nach oben gezogen.
2. Ein Temperaturanstieg von ca. 2 K/min soll mit dem Temperaturcontroller realisiert werden. Dieser wird wie folgt programmiert:  
Halten Sie die RUN/PROGRAMM Taste gedrückt, bis auf dem Display *Pro* erscheint und das Gerät sich im Programmiermodus befindet. Nach dem Loslassen der Taste erscheint *P01* (erster Programmierschritt), durch RAISE and LOWER kann zwischen den Programmierschritten gewechselt werden. Für diesen Versuch wird nur der erste Programmierschritt verwendet. Halten Sie erneut RUN/PROGRAMM gedrückt, bis *Program* (untere Lampe von SWEEP) aufleuchtet. Mit RAISE and LOWER können Sie nun die erwünschte Endtemperatur von 140 K einstellen. Dabei muss die RUN/PROGRAMM Taste jeweils gehalten werden. Nacheinander können Sie nun auf diese Weise SWEEP (mittlere Lampe, Dauer des Temperaturanstiegs in Minuten) und HOLD (obere Lampe, Dauer, wie lange die Temperatur nach dem Sweep gehalten werden soll, in Minuten) einstellen. Sollte längere Zeit keine Programmeinstellung vorgenommen werden, verlässt das Gerät den Programmiermodus.
3. Vor dem Starten des Programmes halten Sie nun die SET Taste gedrückt und stellen Sie mit RAISE and LOWER die Starttemperatur (80 K) ein. Drücken Sie AUTO um den Heizer zu verbinden, starten Sie die Aufzeichnung am Computer indem Sie *record* drücken, sobald die Temperatur bei 80 K ist drücken Sie RUN.
4. Vergleichen Sie die Werte  $T$  und  $T_{\text{set}}$ . Falls der Messaufbau zu schnell/langsam aufwärmt, korrigieren Sie die Position des Stabes. Bei einer guten Positionierung, markieren Sie die Höhe am Messstab für Folgemessungen.
5. Bei 140 K, leuchtet HOLD, lassen Sie die Messung weiter laufen, bis sich die Temperatur stabilisiert hat. Drücken Sie dann MAN und ADJUST LOWER bis 0, um den Heizer auszuschalten. Um das Programm zu stoppen drücken Sie RUN/PROGRAMM bis *End* erscheint. Stellen Sie den Startpunkt dann wieder zurück auf 80 K (SET + ADJUST-LOWER). Durch erneutes Drücken der *record* Taste wird die Datenaufnahme gestoppt, mit *save* speichern Sie die aufgezeichneten Daten ab.

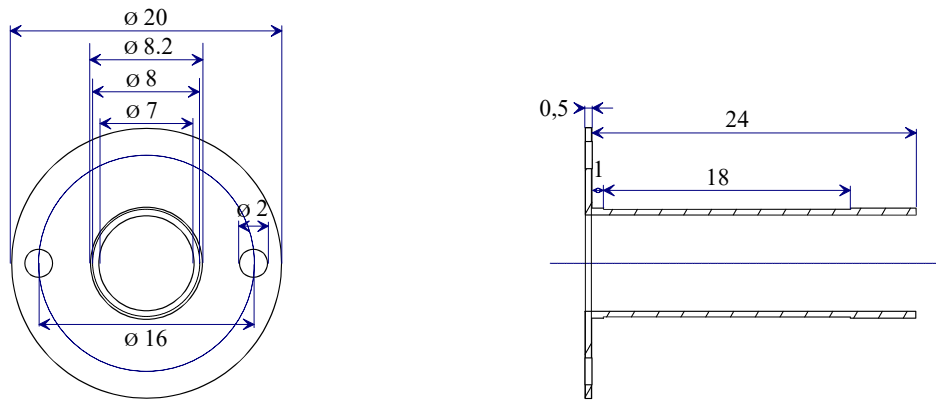


Abbildung 2: Schematische Zeichnung der Spule zur Bestimmung der Geometrie. Alle Angaben sind in mm.

6. Dieser Versuchsablauf wird insgesamt drei mal wiederholt. Dabei wird die Induktivität der Spule mit und ohne Probe gemessen, danach muss der manuelle Schalter am Probenstab auf Widerstand geschaltet werden. Im dritten Durchlauf wird dann die Widerstandsprobe gemessen.
7. Sollte während des Versuchs der Heizdraht durchbrennen, kann die Messung trotzdem durchgeführt werden. Dabei wird die Temperatur reguliert, indem der Messstab Schritt für Schritt nach oben gezogen wird. Die Rate von 2 K/min kann dabei nicht immer perfekt eingehalten werden.

## 5 Auswertung

1. Graphische Darstellung der gemessenen Induktivitäten  $L_0(T)$  und  $L_s(T)$
2. Die Messung mit leerer Kupferspule weist idealerweise keine physikalische Anomalie auf und zeigt einen monotonen Verlauf, passen Sie die Abhängigkeit  $L_0(T)$  durch eine lineare Fitfunktion an. Verwenden Sie dafür den Bereich von 105 K bis 140 K und extrapolieren Sie den Wert bis 80 K.
3. Graphische Darstellung des gemessenen Widerstands der Spule und der Probe
4. Leiten Sie aus den Grundbeziehungen der klassischen Elektrodynamik analytisch her, wie sich aus den gemessenen Induktivitäten  $L$  bzw.  $L_0$  der gefüllten bzw. leeren Kupferspule die Suszeptibilität  $\chi$  des Supraleiters ergibt. Es ist zu beachten, dass die supraleitende Probe die Spule nicht vollständig ausfüllt. Berechnen Sie dann die Suszeptibilität der gemessenen Probe in Abhängigkeit von der Temperatur und stellen Sie die Kurven  $\chi(T)$  grafisch dar.
5. Auswertung der Übergangstemperatur und der Breite des Übergangs: Aus den Kurven  $\chi(T)$  kann die kritische Temperatur (im Nullfeld)  $T_c^0$  des Phasenübergangs bestimmt werden. Da die magnetische Suszeptibilität eine Volumeneigenschaft ist, wird dafür oftmals der sogenannte „Onset“-Wert des Sprungs genutzt (90 % der Sprunghöhe). Außerdem ist die Breite des Übergangs  $\Delta T_c$  als Maß für die Qualität der Probe anzugeben (Temperaturdifferenz 10 % - 90 % der Sprungkurve). Welche Schlussfolgerungen können sich aus „Doppelsprüngen“ ergeben?
6. Schätzen Sie den Fehler von  $\chi$  und  $T_c^0$  ab und diskutieren Sie mögliche Fehlereinflüsse.
7. Diskutieren Sie ob der Widerstand der leeren Spule auch als Thermometer verwendet werden könnte. Beurteilen Sie auch die Streuung und Reproduzierbarkeit der Daten.

# Literatur

## 1. W. Buckel: Supraleitung

Einleitung

Kapitel 1 : Einige Grundtatsachen

Kapitel 2: Der supraleitende Zustand

Kapitel 3.1: Der Isotopeneffekt

Kapitel 4: Thermodynamik und thermische Eigenschaften des supraleitenden Zustandes

Kapitel 5: Supraleiter im Magnetfeld

Kapitel 9: Anwendung der Supraleitung

## 2. N.W. Ashcroft, N.D. Mermin: Festkörperphysik

Kapitel 34: Supraleitung S.925-964

# Anhang

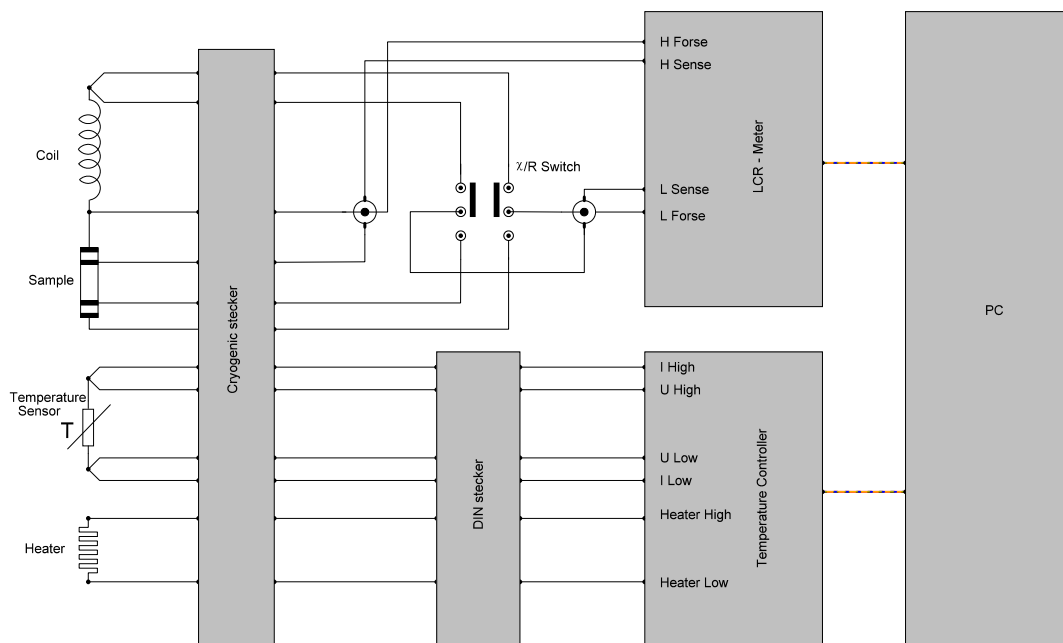


Abbildung 3: Detaillierter schematischer Aufbau der Verkabelung des Experiments.