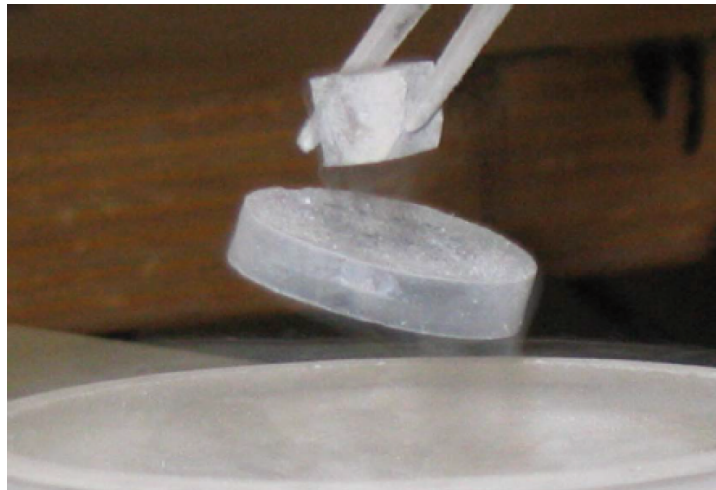


UNIVERSITÄT REGENSBURG

F-Praktikum

VERSUCH:
SUPRALEITUNG

Martin Obstbaum und Ina Schneider



02.01.2022

Inhaltsverzeichnis

1	Versuchsteil A: Tieftemperatur-Supraleitung	3
1.1	Fragen zur Vorbereitung	3
1.2	Messgeräte, Apparaturen und Messprogramm	6
1.3	Durchführung und Auswertung	9
1.3.1	Messungen am Bleifilm	9
1.3.2	Messungen am massiven Spulenkörper	10
2	Versuchsteil B: Hochtemperatur-Supraleitung	12
2.1	Fragen zur Vorbereitung	12
2.2	Messgeräte, Apparaturen und Messprogramm	12
2.3	Durchführung und Auswertung	14
3	Levitation	15
4	Anhang	16

1 Versuchsteil A: Tieftemperatur-Supraleitung

1.1 Fragen zur Vorbereitung

Die rund 50 Seiten zum Thema Supraleitung in S. Hunklinger *Festkörperphysik* bieten eine gute und solide Grundlage, um sich auf den Versuch vorzubereiten. Bei den hier aufgelisteten Fragen handelt sich um eine Hilfestellung zur Vorbereitung auf die Vorbesprechung zum Versuch. Das bedeutet **nicht**, dass all diese Fragen der Reihe nach im Protokoll abgearbeitet werden sollen. Vergessen sie nicht, sich auch mit den spezifischen Fragen im Teil *Messungen am massiven Spulenkörper* zu befassen.

1. Welche Wechselwirkung führt aufgrund der BCS-Theorie zur Supraleitung? Geben Sie ein anschauliches Bild dieser Wechselwirkung. Warum sind also gute Normalleiter wie Cu, Ag und Au keine Supraleiter? Wieso wird die Wechselwirkung nicht durch die Coulomb-Abstoßung zwischen den Elektronen zerstört?
2. Welche Rolle spielt die sog. Energielücke und welche einfachen experimentellen Methoden gibt es, diese nachzuweisen?
3. Was ist der Isotopie-Effekt? Warum werden die beobachteten Effekte für schwerere Atome schwächer?
4. Warum spricht man bei der Supraleitung von einem makroskopischen Quantenzustand?
5. Geben Sie darauf aufbauend ein Argument, warum im Supraleiter ein Strom ohne Ohm'sche Verluste fließen kann.
6. Welche weitere Eigenschaft zeichnet einen Supraleiter aus und unterscheidet ihn somit von einem idealen Leiter? Inwiefern zeigt sich ein Unterschied wenn man beide jeweils abkühlt und dann ein Feld anlegt bzw. man beide im Feld abkühlt?
Zeigen sie diesen Unterschied anhand folgender mathematischer Überlegung: Leiten Sie aus der London-Gleichung unter Verwendung der Maxwell-Gleichung eine Differentialgleichung für B her. Sie sehen, dass $B = \text{const.} \neq 0$ keine Lösung ist. Machen sie dasselbe für einen idealen Leiter, hier ist jedes beliebig zeitlich konstante Feld B eine Lösung. Ein idealer Leiter zeigt also keinen Meißner-Effekt.
7. Welchen Einfluss zeigen Magnetfelder auf die Eigenschaften von Supraleitern? Was versteht man unter dem kritischen Magnetfeld? Beschäftigen sie sich mit der Abhängigkeit des kritischen Feldes von der Temperatur.
8. Was ist der Unterschied zwischen einem Supraleiter 1. und 2. Art? Was ist ein Flussschlauch? Erklären sie, was man unter dem Abrikosov-Gitter versteht. Was ist Pinning und welche Rolle spielt es? Erklären sie den Begriff Magnetquench. Von welcher Art ist der im Versuchsaufbau verwendete Bleifilm bzw. der verwendete Bleizylinder?

9. Technische Anwendungen: Wie werden hohe Magnetfelder erzeugt? Wie sieht der Aufbau eines supraleitenden Drahtes aus? Wo werden solche Drähte eingesetzt?
10. Wie geschieht die Messung der Temperatur im Tieftemperaturteil? Welche Messmethode wird beim Bleifilm im TT-Teil verwendet und welche Vorteile bringt diese?
11. Machen sie sich für den TT-Teil klar, wie die Messung abläuft. Welche äußeren Größen werden auf welche Art und Weise variiert? Welche Größe wird dabei vom Messprogramm ausgelesen? Wie kann hiermit bei der Auswertung des Bleifilms die eigentlich relevante Größe, der elektrische Widerstand, berechnet werden?
12. Zuletzt lesen Sie gründlich die Warnhinweise für den Umgang mit kryogenen Flüssigkeiten auf der nächsten Seite!

WARNHINWEISE:

Wichtig beim Umgang mit kryogenen Flüssigkeiten!

Bei diesem Versuch wird mit Flüssigkeiten gearbeitet, deren Temperatur nur wenige Kelvin beträgt. Es ist jeder Kontakt mit der Haut bzw. mit der Kleidung zu vermeiden! Insbesondere ist auch der kalte Dampf von Stickstoff und besonders Helium gefährlich und man sollte auf keinen Fall in ihm stehen geschweige denn ihn einatmen, für den Fall, dass dieser an einem der Überdruckventile der Heliumkanne austreten sollte!

Die Heliumkanne auf keinen Fall heftig bewegen oder umkippen, da dabei riesige Mengen an Helium verdampfen (Volumenverhältnis flüssig-gasförmig etwa 1:800)! Im Versuch wird ein ca. 1,5 m langer Edelstahl-Probenstab etwa zur Hälfte in eine Kanne mit flüssigem Helium getaucht, so dass der untere Teil des Stabs, der von einem supra-leitenden Magneten umgeben ist und worin der Aufbau steckt, voll im Helium schwimmt.

Es besteht nun prinzipiell die Gefahr, dass flüssiges Helium durch ein Leck in den Probenstab gelangt und im Inneren verdampft. Dies könnte der Fall sein, wenn sich der obere Teil des Probenstabs außerhalb der Kanne kälter als normal metallkalt anfühlt. Dies kann zustande kommen, da die Kabel für die Magnetfeldspule im Inneren des Edelstahlrohres verlaufen und an Bohrungen nach außen gelangen. Diese Bohrungen wurden zwar versiegelt, allerdings kann mit der Zeit eine 100%ige Versiegelung nicht gewährleistet werden.

Es könnte also im Inneren ein hoher Druck entstehen und zugleich würde das Gas im Stabinneren einen großen Wärmetransport in die Kanne bedeuten, so dass aus dem Dewar eine Menge Helium abdampft. Da Helium eine sehr teure Flüssigkeit ist, wird das verdampfte Gas an eine Rückführleitung angeschlossen, um es wieder in den Verflüssiger zu führen. In der Rückführleitung ist eine Heliumuhr angebracht, die durch ein Zählwerk die Menge des verdampften Heliums angibt. Sollte diese Heliumuhr unverhältnismäßig schnell ticken, verdampft zu viel Helium auf einmal.

Sollte so etwas auftreten, sofort den Probenstab um ca. 40-50 cm in der Kanne nach oben ziehen und die Quetschverschraub-Bremse wieder gut festziehen, um kein weiteres flüssiges Helium in den Probenstab eindringen zu lassen. Eine vollständige Entnahme des Stabs erfolgt durch den Betreuer!

In jedem Fall gilt: Sollte auf irgendeine Art und Weise Gefahr bestehen, muss der Versuchsraum sofort verlassen werden, eventuell sich andere im Raum befindende Personen müssen sofort auf die Gefahr aufmerksam gemacht werden und müssen ebenfalls den Raum verlassen! Zudem müssen sofort Betreuer benachrichtigt werden!!

Telefonnummern:

Betreuer: 1620, 2601

He-Anlage: 2127, 4112

Leute vertraut im Umgang mit Helium: 1614, 1615, 1617, 1618, 1619

1.2 Messgeräte, Apparaturen und Messprogramm

Es stehen folgende Apparaturen zur Verfügung:

- Helium-Kanne mit 60 Litern flüssigen Heliums bei einer Temperatur von ca. 4,2 K
- Edelstahl-Probenstab mit dem gesamten Messaufbau, der zu Beginn des Versuches mit Hilfe des Betreuers in die Helium-Kanne gesenkt wird und dort abkühlen muss
- Gleichstromversorgungsgerät mit computergesteuerter variabler Rampe, mit der ein äußeres Magnetfeld mittels einer supraleitenden Spule erzeugt werden kann
- Stromversorgungsgerät für den Bleifilm (Batterie mit Potentiometer) für einen Strom von $8\ \mu\text{A}$
- Yokogawa Strom-Spannungs-Quelle zum Betreiben des Heizers, $I_{\text{max}} = 12\ \text{mA}$, um Beschädigungen am Heizer und dem Messaufbau zu vermeiden
- digitales Multimeter für die Widerstandsmessung des Cernox-Thermometers
- Voltmeter, das vom Computer ausgelesen wird
- Auswerteprogramm TT-Teil am PC, mit dem der B-Feld-Sweep gestartet wird

Die Helium-Kanne ist mit einem orangen Gummischlauch an die Rückführleitung angeschlossen. Dadurch wird das durch die nicht zu verhindernde Wärmezufuhr verdampfende Helium aufgefangen und kann erneut verflüssigt werden. Die Rückgewinnungsanlage steht unter leichtem Überdruck, um das Eindringen von Luft zu verhindern. Der Dewar besteht aus zwei ineinander gestellten Gefäßen (ähnlich den Ihnen bekannten Thermoskannen). Der innere Teil enthält das Helium, der äußere Teil ist durch Vakuum und mehrere Isolationsschichten davon abgetrennt, die Innenwände sind verspiegelt. Die Temperatur des Heliums beträgt bei Normaldruck etwa 4,2 K. Zum Schutz sind am oberen Teil der Kanne mehrere Überdruckventile angebracht, die bei großer Wärmezufuhr die sehr große Menge gasförmigen Heliums entweichen lassen, um Schäden durch den hohen Druck zu verhindern.

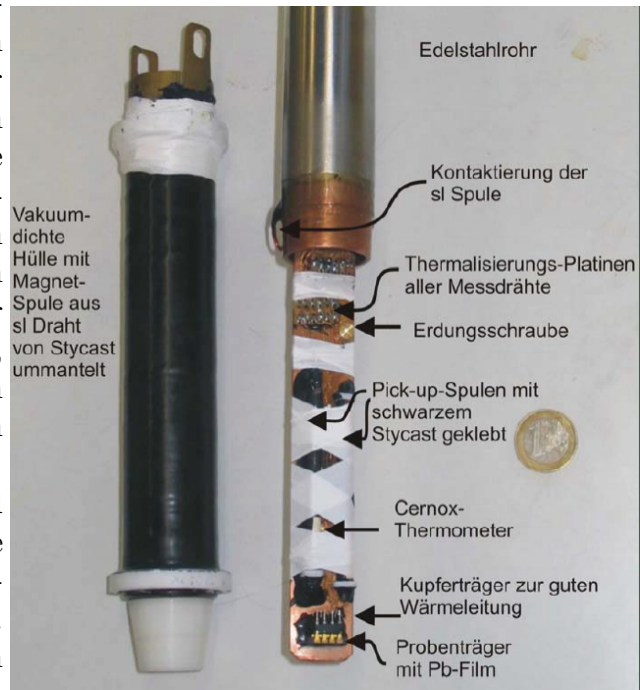


Austretendes He-Gas ist extrem kalt und sehr gefährlich!! Zudem besteht Ersticken-gefahr: Das Gas ist völlig geruchlos und wird beim Einatmen nicht bemerkt.

In diese Kanne wird der Probenstab eingesenkt und dort auf etwa 4,5 K abgekühlt. Mit Hilfe des am Probenstab angebrachten Heizwiderstands kann mit einem Strom von etwa 10 mA eine Temperatur von knapp 10 K erreicht werden.

Der untere Teil des Edelstahl-Probenstabes schwimmt im flüssigen Helium. Eben dort ist unser gesamter Messaufbau untergebracht, wie im Bild zu sehen ist. Die vakuumdichte Abdeckung ist mit einer supraleitenden Spule umwickelt, mittels der ein homogenes Magnetfeld im Probenraum erzeugt werden kann. Im Spulenkörper befinden sich zwei Proben: Ein Bleifilm, in einem Probenträger ganz am unteren Ende des Stabes montiert, und ein Blei-Spulenkörper.

An beiden Enden des Pb-Films sind je zwei Kontakte angebracht für die Stromversorgung und für die Spannungsmessung (Vier-Punkte Methode). Der Übergang von der normalleitenden in die supraleitende Phase lässt sich an



der Widerstandsänderung der Probe feststellen. Man schickt durch den Film einen konstanten Strom von $8 \mu\text{A}$ und beobachtet den Spannungsabfall in Abhängigkeit vom äußeren Magnetfeld. Das Voltmeter wird automatisch von einem LabView-Programm am PC ausgelesen.

Die zweite Probe ist der Bleizylinder mit ca. 4,1 mm Durchmesser und einer Länge von 60 mm. Er bildet den Kern einer Pickup-Spule, die aus 2900 Windungen Kupferdraht in mehreren Lagen besteht. Die zweite Pickup-Spule (Referenz-Spule) ist identisch zur Pickup-Spule mit dem Bleikern, nur auf einem Kupferkern gewickelt. Die Spulen sind hintereinander geschaltet, so dass sich die Induktionsspannungen, die an den beiden Spulen in einem zeitabhängigen äußeren Magnetfeld abfallen, stets addieren. Ein leichter Offset ist zwar auf Grund kleiner Unterschiede in den Spulen vorhanden, aber nicht relevant. Die Achsen der beiden Pickup-Spulen sind parallel zur Richtung des äußeren Magnetfeldes. Die induzierte Spannung wird mit dem Nullvoltmeter gegen Masse abgegriffen.

Das Nullvoltmeter ist ein sehr empfindliches (und auch teures) Gerät. Man sollte darum grundsätzlich darauf achten, dass es nicht überlastet wird. Beim Einschalten immer zuerst grobe Empfindlichkeit einstellen und dann erst Schritt für Schritt die Empfindlichkeit erhöhen! Am Anfang des Versuches soll sichergestellt sein, dass das Gerät auch abgeglichen ist!

Das äußere Magnetfeld, in dem sich der Bleifilm und die Pickup-Spulen befinden, wird von der supraleitenden Magnetspule erzeugt, die aus einem Stromversorgungsgerät gespeist wird. Der Maximalstrom der hierbei angefahren werden soll, wird im Messpro-

gramm eingetragen. Der Strom wird nach dem Start einer Messung automatisch vom Computerprogramm mit konstanter Rate innerhalb von acht Sekunden (Diese Zeit ergibt sich aus der Anzahl der Datenpunkte einer Messung sowie der zwischen zwei Datenpunkten verstreichenden Zeit. Im Messprogramm sind standardmäßig 800 Datenpunkte bei 20 ms Zeitabstand eingetragen was 16 Sekunden Gesamtzeit, d.h. 8 Sekunden für jede Richtung ergibt) von Null auf den entsprechenden Wert erhöht und ohne Unterbrechung sofort wieder mit gleicher Rate auf Null gefahren. Dabei wird die Spannung des Voltmeters eingelesen und kann in eine Datei abgespeichert werden. Die Magnetspule ist aus Niob-Titan-Draht gewickelt. Der supraleitende Kern des Drahtes ist von einer Kupferschicht umgeben. Der Kern wird supraleitend bei rund 18 K. Die Spule selbst hat eine Länge von 158 mm und einen Durchmesser von 20 mm. Die Windungszahl beträgt 6245 bei 8 Lagen. Diese Daten benötigen sie, um aus dem Strom durch die Magnetspule das entsprechende Magnetfeld berechnen zu können.

Alle Messungen werden am PC gestartet: Per Knopfdruck wird der B-Sweep gestartet und für die Zeit des Sweeps wird das Voltmeter ausgelesen.

Im Messprogramm wird auf der x-Achse der Strom durch die Magnetspule aufgezeichnet, welcher für die Auswertung mit der entsprechenden Formel (welche?) in das magnetische Feld umgerechnet werden soll. Die Skalierung der y-Achse geht von 0 bis 1, wobei 1 den jeweils am Voltmeter eingestellten maximalen Messbereich bedeutet. Dieser muss für die beiden zu untersuchenden Proben unterschiedlich eingestellt, und **für die Auswertung vermerkt werden**.

Wichtig: Sowohl die Pickup-Spulen-Messungen, als auch die Messungen am Bleifilm erfolgen direkt nacheinander bei einer eingestellten Temperatur. Man kann zwar jederzeit den Stab wieder abkühlen lassen, das bedeutet allerdings einfach eine Zeitverzögerung. Zum Hin- und Herspringen zwischen den beiden Messungen muss nur ein Schalter vor dem Multimeter und der Messbereich des Voltmeters verändert werden. Auf diese Art und Weise muss nur ein Mal die Temperatur erhöht werden.

Temperaturänderungen werden über Einstellung des Stroms durch die Heizspule zwischen 0..12 mA am Yokogawa durchgeführt. Anhand des Graphen und der Kalibrations-tabelle des Cernox weiter hinten sollte der gewünschte Widerstand des Cernox über genaues Einstellen des Heizstroms innerhalb ca. 1 min erreicht werden können. Warten sie nach dem Einregeln nochmal etwa 1 min um eine Thermalisierung der Probe sicherzustellen.

1.3 Durchführung und Auswertung

1.3.1 Messungen am Bleifilm

Am Bleifilm wird der Spannungsabfall bei konstantem Strom, also dessen Widerstand, in Abhängigkeit vom äußeren Magnetfeld für jeweils eine fest eingestellte Temperatur gemessen. Unterhalb T_c benötigen wir etwa 12-15 Messungen, um $B_c(0\text{ K})$ vernünftig fitten zu können. Um T_c herum sollten Sie versuchen, die Temperatur in kleinsten Schritten sehr fein zu ändern. In diesem Bereich sollten Sie ca. 3-6 Punkte aufnehmen, um die $R(T)$ -Kurve in diesem interessanten Bereich gut nachvollziehen zu können und T_c gut aus den Daten extrahieren zu können. Oberhalb von T_c sollten Sie noch in ca. 0,5 K-Schritten die Temperaturabhängigkeit des Widerstands beobachten, in etwa bis 9 K.

Wie schon gesagt wird eine Messung einfach durch Knopfdruck im Programm TT-Teil gestartet. Der Knopfdruck startet den B-Feld-Sweep, wie auch schon angesprochen, und das Voltmeter wird ausgelesen. Der maximale Strom durch die Magnetspule der dabei angefahren wird, ist im Messprogramm einzutragen.

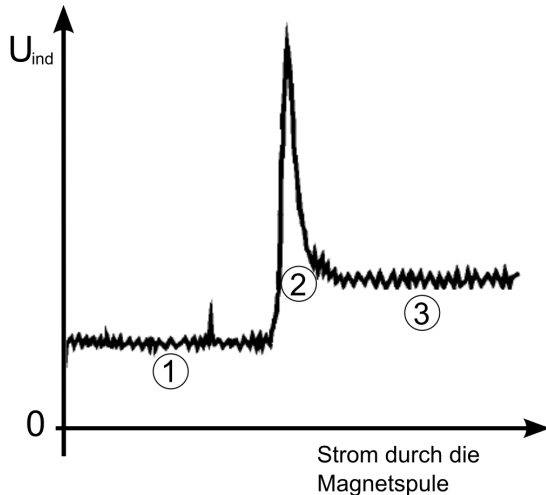
Machen Sie sich schon zur Vorbesprechung anhand von Skizzen klar, wie der Spannungsabfall am Pb-Film für den zeitlichen Verlauf des äußeren B-Felds aussehen sollte, je nachdem ob die Temperatur im Bereich kleiner oder größer als T_c eingestellt ist.

Zur Auswertung:

- Die aufgenommenen Kurven, die den Spannungsabfall am Film in Abhängigkeit des Stroms durch die Magnetspule zeigen, können mit den entsprechenden Zusammenhängen in $R(B)$ -Kurven umgerechnet werden. Denken sie hierbei auch an die richtige Skalierung der y- bzw. Spannungsachsen (Erinnerung: 1 entspricht dem Vollausschlag des Voltmeters)! Nehmen sie diese $R(B)$ -Kurven in den **Anhang des Protokolls** auf. Anhand eines solchen **Beispielplots** kann im Auswertungsteil erläutert werden, wie anschließend die verschiedenen Werte aus den $R(B)$ -Kurven extrahiert werden.
- Entnehmen sie den gemessenen $R(B)$ -Kurven für die verschiedenen Temperaturen jeweils den Widerstandswert bei $B = 0$ und fertigen damit einen $R(T)$ -Graph bei Nullfeld an. Aus diesem Graph soll nun **T_c entnommen werden**.
- Entnehmen sie in einem zweiten Schritt den gemessenen $R(B)$ -Kurven für die verschiedenen Temperaturen jeweils den Wert des kritischen Feldes B_c und **plotten damit $B_c(T)$** . Dieser Graph soll nun mittels eines geeigneten Datenanalyse-Programms (Origin, qti-plot...) **mit der in der Vorbereitung besprochenen Abhängigkeit des kritischen Feldes von der Temperatur gefittet werden**. Aus dem Ergebnis des Fits (Fitparameter) erhalten sie auf diese Weise ebenfalls nochmal **T_c** sowie das kritische Feld **$B_c(0\text{ K})$** .

1.3.2 Messungen am massiven Spulenkörper

Um die Messungen über den idealen Diamagnetismus durchführen zu können, muss die Temperatur unter der Sprungtemperatur liegen. Oberhalb T_c sind diese Spulenmessungen nicht mehr möglich. Die computergesteuerte Rampe liefert einen zeitabhängigen Magnetspulenstrom. Durch das t-abhängige Magnetfeld wird in den Pickup-Spulen Spannung induziert. Man wird dabei in etwa folgenden Spannungsverlauf messen:



Machen Sie sich diesen Sachverhalt klar: Bei (1) schalten Sie die Rampe ein, es wird von der Magnetspule ein zeitlich veränderliches Magnetfeld erzeugt, welches im Pickup-System eine Spannung (U_{ind}) induziert. Die induzierte Spannung zwischen (1) und (2) ist zeitlich konstant. Bei (2) springt die Bleiprobe in den normalleitenden Zustand: die Probe verliert ihre idealen diamagnetischen Eigenschaften. Bei (3) ist sie schon normalleitend.

Zur Vorbesprechung klären Sie bitte folgende Fragen:

- Warum wird eine Spannung an den Enden der Spulen induziert? Wie lautet generell die Formel für die induzierte Spannung in einer Spule?
- Wodurch wird der Spannungsstoß bei (2) bewirkt? Inwiefern beobachten Sie hierbei den Meißner-Effekt?
- Führt man das Magnetfeld wieder auf Null zurück, so erhält man das umgekehrte Vorzeichen bei der Induktionsspannung. Warum?
- Diskutieren Sie den in der Abbildung skizzierten Spannungsverlauf. Fertigen Sie dazu grobe Skizzen für die theoretisch erwarteten U_{ind} -Kurven an, und zwar je von den Spulen mit Kupfer- und mit Bleikern alleine, sowie von der erwarteten Induktionsspannung die damit über beiden Spulen abfällt.
- Aus dem Wert der Differenz zwischen den bei (1) und bei (3) in der Abbildung induzierten Spannungen und der zeitlichen Änderung des Magnetfeldes lässt sich eine Beziehung für die Suszeptibilität herleiten. Geben Sie diese an!

Nehmen Sie auch hier wieder rund 12-15 Messpunkte auf. Dieses Mal beobachten Sie also nicht eine Widerstandsänderung beim Übergang normalleitend-supraleitend, sondern die Änderung der diamagnetischen Eigenschaften einer massiven Probe.

Zur Auswertung:

Idealer Diamagnetismus - Meißner-Ochsenfeld-Effekt

- Aus den aufgenommenen Graphen, die die Induktionsspannung (Achten sie wieder auf die richtige Skalierung der y-Achse. 1 bedeutet wieder den eingestellten maximalen Messbereich am Voltmeter, welcher hier anders eingestellt ist als beim Bleifilm!) in Abhängigkeit des Magnetspulenstroms zeigen berechnen sie die $U_{ind}(\mathbf{B})$ -Kurven. Stellen sie diese Graphen in den **Anhang ihres Protokolls**. Erläutern sie anhand eines solchen **Beispielgraphens** den Verlauf der gemessenen Kurven.
- Erläutern sie, wie sie aus diesen Graphen nun die jeweiligen Werte für B_c extrahieren können und tragen sie diese in einem $B_c(T)$ -Graphen auf.
- **Fitten sie diesen Graphen**, so wie im Teil zum Bleifilm, wieder mit dem entsprechenden Zusammenhang für $B_c(T)$. Die Fitparameter liefern ihnen dabei wieder $B_c(0\text{ K})$ sowie T_c .

Idealer Diamagnetismus - Suszeptibilitätsbestimmung

- Wie oben bereits erwähnt, lässt sich aus dem Wert der Differenz zwischen den bei (1) und bei (3) in der Abbildung induzierten Spannungen und der zeitlichen Änderung des Magnetfeldes eine Beziehung für die Suszeptibilität herleiten. Verdeutlichen sie im Beispielgraphen, wie sie die beiden Werte für die Induktionsspannung entnehmen.
- Um die Differenz der beiden Induktionsspannungen zu erhalten, entnehmen sie aus sämtlichen Messgraphen diese Differenz und mitteln anschließend über diese. Die Messdaten sind zwar verrauscht, schwanken jedoch im Bereich (1) und (3) jeweils um einen konstanten Wert der Induktionsspannung. Zu weit abseits liegende Punkte, zum Beispiel zu Beginn der Messung, sollten sie dabei vernachlässigen.
- Setzen sie den so gemittelten Wert für ΔU in die hergeleitete Formel für die Suszeptibilität χ ein.
- Vergleichen sie ihren Wert für χ mit dem theoretisch erwarteten und geben sie Fehlerquellen an.
- Variieren Sie in wenigen Rechnungen den Durchmesser des Pb-Spulenkörpers um wenige Zehntel mm (Warum ist das ok?) und diskutieren Sie die Genauigkeit der Messung.

2 Versuchsteil B: Hochtemperatur-Supraleitung

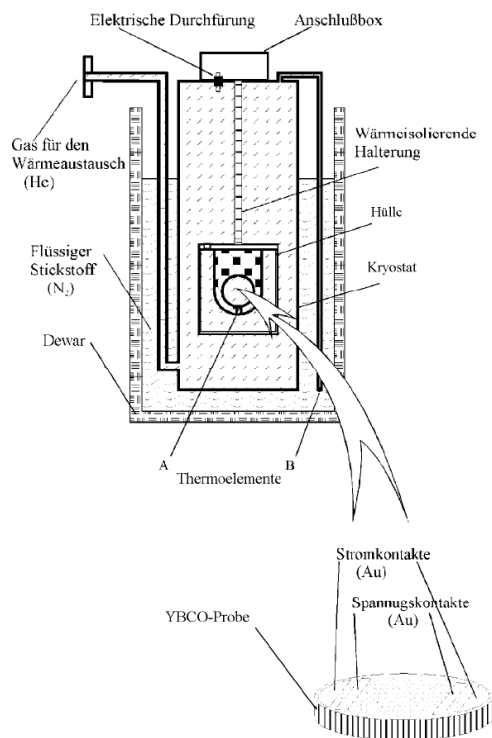
Die Erforschung der 1986 entdeckten Hochtemperatur-Supraleitung (HTSL) ist gegenwärtig weltweit in vielen Labors Schwerpunkt der Untersuchungen. Anwendungsgebiete bei der Erzeugung hoher Magnetfelder, beim Elektrizitätstransport, auf dem Computersektor und in der Hochfrequenzelektronik erscheinen möglich. HTSL sind anisotrope Verbindungskristalle. Sie haben eine Übergangstemperatur um 100 K und sind deshalb Kandidaten für supraleitende Anwendungen, die mit Flüssigstickstoffkühlung auskommen. Im Versuch stehen Flachzylinder aus schmelztexturiertem $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ (Yttrium-Barium-Kupfer-Oxid) mit der kristallinen c-Achse als Zylinderachse zur Verfügung. Neben qualitativen Versuchen zur Levitation soll der Temperaturverlauf des elektrischen Widerstandes in a-b- und in c-Richtung quantitativ verfolgt werden.

2.1 Fragen zur Vorbereitung

1. Wie ist ein YBCO-Kristall aufgebaut? Warum unterscheidet sich die Leitfähigkeit in c- und a-b-Richtung? Diskutieren Sie die Temperaturabhängigkeit der Leitfähigkeit im Vergleich mit typischen Leitern und Halbleitern.
2. Wie funktioniert ein Lock-in-Verstärker? Welche Vorteile bietet die Messung mit einem Lock-in-Verstärker gegenüber einer dc-Messung?
3. Im HT-Teil wird ein sogenanntes Thermoelement als Temperaturmesser verwendet. Wie funktioniert ein solches Thermoelement? Aufgrund welchen physikalischen Phänomens dient ein Thermoelement als Thermometer?

2.2 Messgeräte, Apparaturen und Messprogramm

Apparative Ausstattung: Kryostat mit Helium-Wärmeaustauschgas, Stickstoff-Dewar, Thermoelement-Messverstärker (Faktor 1000 Spannungsverstärkung, der im Computerprogramm HT-Teil wieder wegskaliert wird), Lock-In-Verstärker, Multimeter zur Kontrolle des am Lock-In-Verstärkers eingestellten Stromes, Messprogramm HT-Teil am PC, Fön zum Aufheizen des Aufbaus zwischen den beiden Durchläufen (Betrieb nur mit Kaltluft, um Schäden am Aufbau zu verhindern!).



Die Probe ist in einer Hülle am Ende eines wärmeisolierenden Rohres untergebracht (siehe Abbildung). Das Rohr ist in einem Edelstahl-Kryostat montiert, der mit Helium als Wärmeaustauschgas unter Normaldruck gefüllt ist. Die Temperaturmessung erfolgt mit Hilfe der zwei Lötstellen des Kupfer-Konstantan-Thermoelementes. Eine Lötstelle ist an den Rand der Probe gedrückt und hat deshalb die Temperatur der Probe. Die andere ist am Ende eines dünnen Edelstahl-Rohres montiert und wird während des Versuches bei der Temperatur flüssigen Stickstoffs gehalten. Nach Absenken dieser Anordnung in einen teilweise mit flüssigem Stickstoff gefüllten Dewar sinkt die Proben­temperatur langsam von 300 K auf 77 K. Die Thermospannung zwischen den Elementen A und B stellt ein Maß für die Proben­temperatur dar. Kontakte auf Keramikmaterial sind problematisch. Es treten Übergangswiderstände und Thermospannungen auf. Erstere werden durch die sog. Vierpunktmethode, letztere durch

Verwendung von Wechselströmen eliminiert. Bei sehr kleinen Materialwiderständen (Supraleitung) beherrschen die Übergangswiderstände die Messung. Deshalb muss auch unter T_c mit einem Spannungssignal gerechnet werden, das durch Übersprechen in den Leitungen und auf der Probenoberfläche entsteht. Es ist proportional zum Strom aber praktisch unabhängig von der Temperatur. Die Kontaktierung der Probe erfolgt mittels acht Gold-Kontaktbahnen die auf beiden Seiten (jeweils vier) gewachsen wurden. Der Spannungsabfall über den beiden inneren Probenkontakten wird mit dem Lock-in-Verstärker gemessen.

a-b-Leitfähigkeit: Strom IA, IB , Spannung aus UA-UB
c-Leitfähigkeit: Strom in IA-IA*, Spannung aus UA-UA*

Die Messungen für die beiden Richtungen werden am Computer gestartet. Auf der x-Achse wird die Thermospannung aufgezeichnet, die später zur Berechnung der Temperatur dient. Der fest eingestellte Verstärkungsfaktor 1000 des Thermoelement-Messverstärkers wird direkt im Programm wieder herauskaliert. Auf der y-Achse wird die vom Lock-In-Verstärker detektierte, d.h. an der Probe abfallende Spannung gemessen. Auch hier kann direkt im Messprogramm der entsprechende Verstärkungsfaktor, der am Lock-In jeweils eingestellt ist, wieder herauskaliert werden. Der Verstärkungsfaktor des Lock-Ins ergibt sich als Produkt der beiden als gain eingestellten Werte. Im Messprogramm kann zudem die Zeit eingestellt werden, die zwischen zwei Messpunkten vergehen sollt. Hierbei

sind 5000 ms ein sinnvoller Wert, um eine unnötige Größe der Datei zu vermeiden. Die Messung beendet sich von selbst, nachdem die im Programm eingestellte Zeit vergangen ist.

2.3 Durchführung und Auswertung

Es sollen 2 Kurven des el. Widerstandes (genauer des Spannungsabfalls) für die jeweiligen Kristallrichtungen der YBCO-Tablette in Abhängigkeit von der Temperatur aufgenommen werden.

Wechselstrom wird mit dem Lock-In-Verstärker und dem in Reihe geschalteten Vorwiderstand erzeugt, der Wechselstrom wird über ein Multimeter ausgelesen und sollte zumindest beim Start der beiden Messungen jeweils notiert werden. Der Wert ist nötig, um daraus zusammen mit der gemessenen Spannung den Widerstand der Probe berechnen zu können. **Vergessen sie daher nicht, diesen Wert zu notieren!** Das Abkühlen des Kryostaten erfolgt in ca. 30 min im LN₂, die Thermospannung gemessen zwischen Kontakten im Stickstoff und an der Probe wird direkt in den PC eingelesen und kann mit der Fitfunktion weiter unten direkt in die Temperatur umgewandelt werden. Ebenso wird die Spannung an der Tablette in den PC eingelesen und muss in den Widerstand umgerechnet werden. Mit dem Kryostaten auf Zimmertemperatur stellen Sie die elektrischen Verbindungen und optimalen Einstellungen am Lock-In-Verstärker her. Beginnen Sie mit der a-b-Messung. Füllen Sie das Dewar-Gefäß bis ca. 10 cm unter den Rand mit flüssigem Stickstoff. Benutzen sie dazu unbedingt Schutzhandschuhe und Schutzbrille. Vorsicht bei der Hantierung!

1. Senken Sie den Kryostaten vorsichtig und langsam in das Dewar. Es soll dabei kein flüssiger Stickstoff herausspritzen, deshalb v.a. bei der ersten Berührung des Metalls mit dem LN₂ besonders vorsichtig sein!
2. Sie haben jetzt ca. 20 Minuten Zeit bis zum Erreichen der Übergangstemperatur. Starten Sie die Messung im Programm HT-Teil, wobei Sie darauf achten sollen, die Skalierungsfaktoren für die x-Achse auf 1/1000 zu haben und den für die y-Achse so einzustellen, dass der Skalierungsfaktor dem Kehrwert der am Lock-In eingestellten beiden Verstärkungsfaktoren entspricht. Die Messpunkte sollen in einem Abstand von 5 s aufgenommen werden.
3. Passen Sie gut auf, ob das Messprogramm die Messung schon selbständig beendet hat. Bei versehentlicher Betätigung des ON/OFF-Buttons im Programm werden bei einem ungewollten Neustart der Messung alle aufgenommenen Punkte unwiederbringlich gelöscht!
4. Speichern sie ihre Messung ab.
5. Nach der Messung nehmen Sie den Kryo aus dem Stickstoff und wärmen ihn mit dem Fön 5-10 min auf Kaltluft auf etwa Zimmertemperatur auf, um die nächste Messung durchlaufen zu können.

6. Wiederholen sie die gesamte Messung mit den Anschlüssen IA-IA* und UA-UA*, d.h. für c-Achsen-Leitfähigkeit. Kontrollieren sie vorher am Oszi ob mit dem Signal alles in Ordnung ist. Achten sie vor dem Start der Messung wieder darauf, dass alle Skalierfaktoren im Messprogramm richtig eingetragen sind. Kontrollieren sie auch nochmals am Multimeter den Strom und notieren sie sich diesen wieder. Evtl. kann auch am Lock-In nachreguliert werden. Speichern sie die Messung anschließend wieder ab.

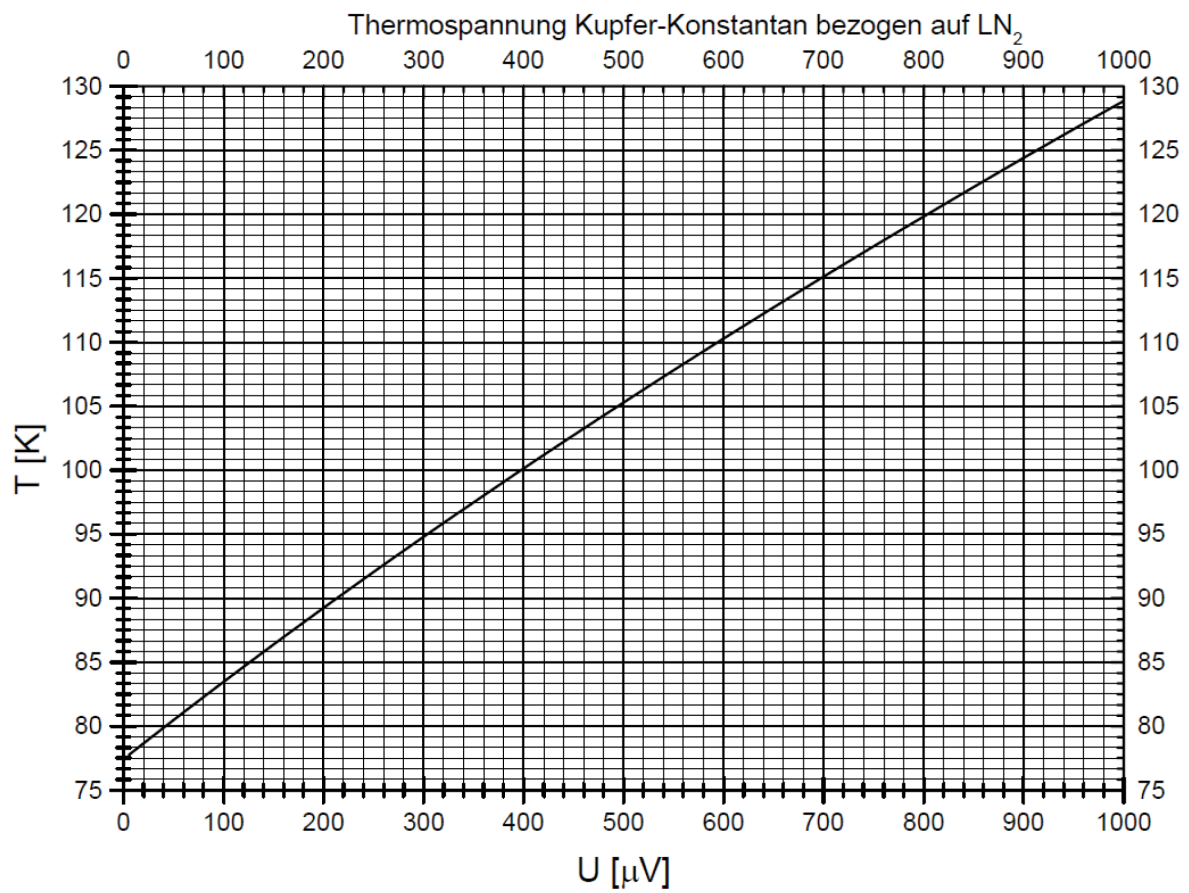
Zur Auswertung:

- Rechnen sie die Thermospannung für beide Messungen in die Temperatur um. Die auf der y-Achse gemessene Spannung muss mit dem notierten Stromwert in den Widerstand der Probe umgerechnet werden.
- Stellen Sie anschließend die $R(T)$ -Kurve für a-b und für c-Leitung unter Beachtung des y-Achsen-Offsets dar. Bestimmen Sie die Übergangstemperatur T_c für beide Richtungen.
- Diskutieren sie anschließend eventuelle Unterschiede im normalleitenden Bereich für die beiden Richtungen.

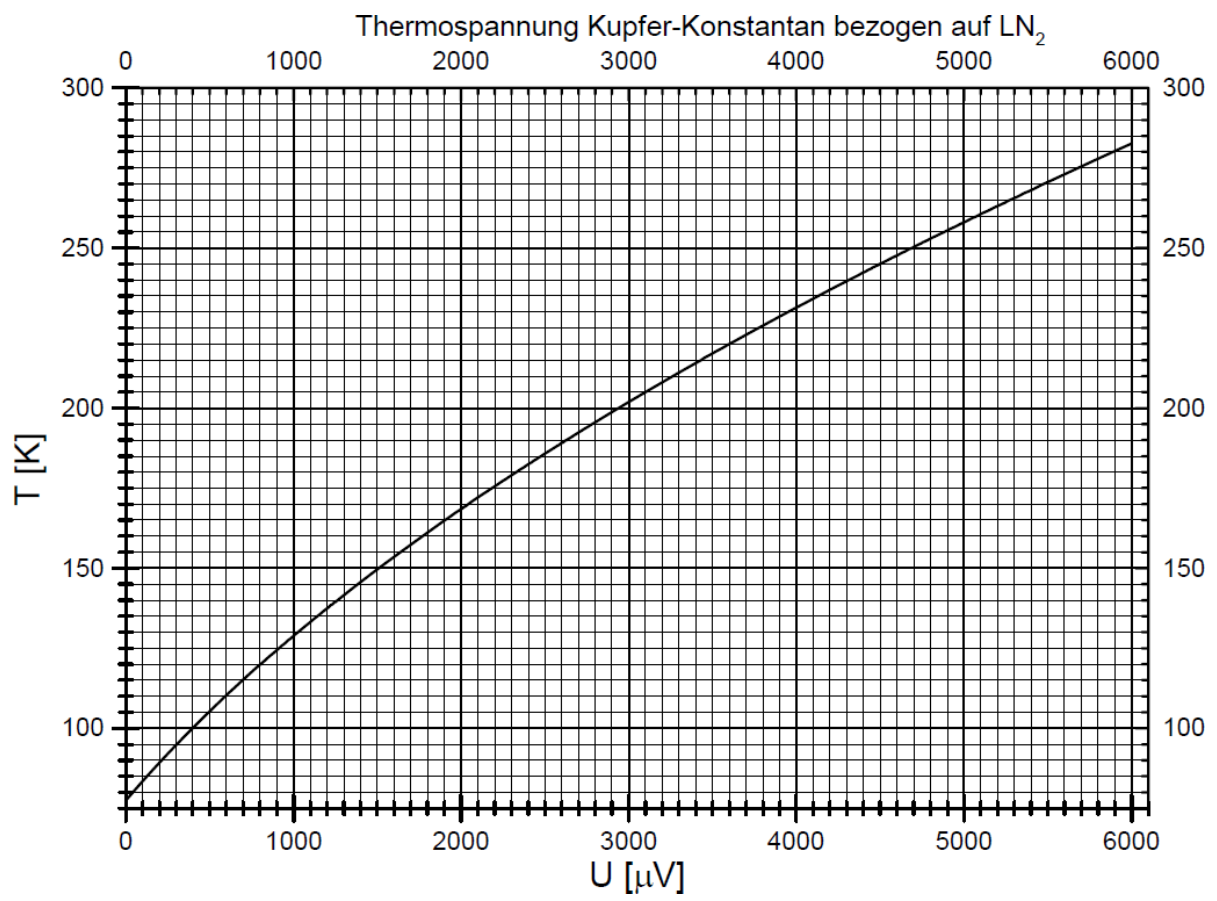
3 Levitation

Eine YBCO-Tablette wird in einer flachen Schale mit Hilfe von flüssigem Stickstoff unter ihre Sprungtemperatur abgekühlt. Bringt man nun darüber einen Permanentmagneten in unmittelbare Nähe des YBCO-Kristalls, so bemerkt man eine Abstoßung zwischen YBCO und Permanentmagnet. Ein Schwebezustand ist jedoch nicht möglich. Nachdem das ganze wieder aufgewärmt ist, wird nun getrennt durch einen kleinen Abstandshalter, der Permanentmagnet über dem YBCO positioniert und anschließend der YBCO wieder unter seine Sprungtemperatur abgekühlt. Man kann nun einen Schwebezustand beobachten, sobald man den Abstandshalter entfernt. Beschreiben die den Ablauf dieses Versuchs und diskutieren sie diese Beobachtungen sowie insbesondere den Einfluss des Flusspinnings.

4 Anhang



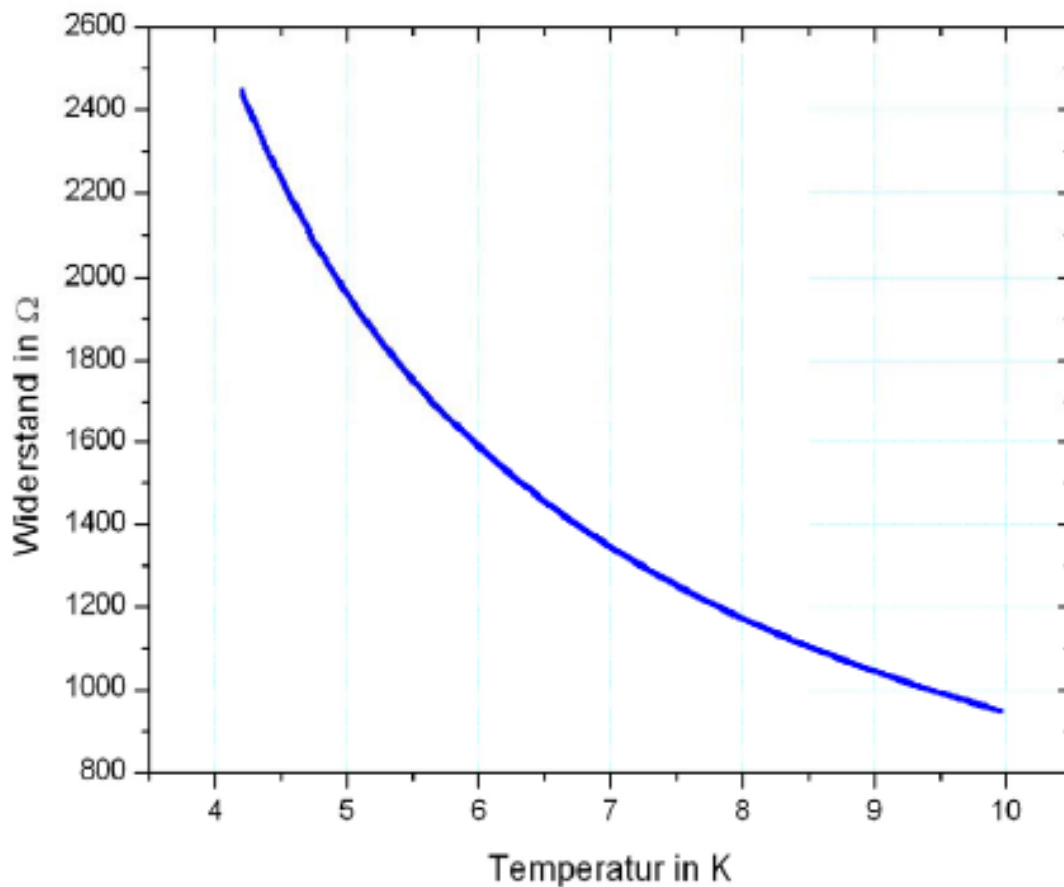
Fitfunktion für diesen Bereich: $T \approx \sqrt{\frac{U(\mu\text{V})}{0.0637}} + 16111 - 49,5 \text{ K}$



Gemessener Widerstand des Cernox an geeichtem Thermometer

Temperatur (K)	Widerstand (Ω)	Temperatur (K)	Widerstand (Ω)
4,209	2441,24374	6,98815	1346,94299
4,2669	2394,23335	7,04605	1335,70393
4,3248	2353,53328	7,10395	1323,86972
4,3827	2309,63651	7,16185	1313,37908
4,4406	2273,14386	7,21975	1302,57982
4,49849	2235,75496	7,27765	1291,61513
4,55639	2198,76099	7,33555	1281,12317
4,61429	2165,48386	7,39344	1269,82613
4,67219	2131,80485	7,45134	1259,69222
4,73009	2098,93758	7,50924	1250,47541
4,78799	2066,39102	7,56714	1240,14864
4,84589	2038,18442	7,62504	1230,56048
4,90379	2008,58098	7,68294	1221,0329
4,96169	1980,19209	7,74084	1211,5052
5,01959	1952,73129	7,79874	1202,0329
5,07748	1925,68239	7,85664	1192,5052
5,13538	1899,55982	7,91454	1183,0329
5,19328	1875,66659	7,97243	1173,5052
5,25118	1851,06515	8,03033	1164,0329
5,30908	1826,40929	8,08823	1154,5052
5,36698	1803,4243	8,14613	1145,0329
5,42488	1781,02262	8,20403	1135,5052
5,48278	1760,3998	8,26193	1126,0329
5,54068	1738,25915	8,31983	1116,5052
5,59858	1716,88119	8,37773	1107,0329
5,65647	1697,21625	8,43563	1097,5052
5,71437	1677,90874	8,49353	1088,0329
5,77227	1658,87005	8,55142	1078,5052
5,83017	1641,12684	8,60932	1069,0329
5,88807	1623,05793	8,66722	1059,5052
5,94597	1605,36856	8,72512	1050,0329
6,00387	1588,20718	8,78302	1040,5052
6,06177	1570,34672	8,84092	1031,0329
6,11967	1554,22598	8,89882	1021,5052
6,17757	1537,6857	8,95672	1012,0329
6,23546	1521,79737	9,01462	1002,5052
6,29336	1507,56306	9,07252	993,0329
6,35126	1492,94885	9,13041	983,5052
6,40916	1477,48788	9,18831	974,0329
6,46706	1462,79757	9,24621	964,5052
6,52496	1448,13786	9,30411	955,0329
6,58286	1434,91137	9,36201	945,5052
6,64076	1422,436	9,41991	936,0329
6,69866	1409,29508	9,47781	926,5052
6,75656	1395,99255	9,53571	917,0329
6,81445	1382,7213	9,59361	907,5052
6,87235	1371,48143	9,65151	898,0329
6,93025	1359,01999	9,7094	888,5052
		9,7673	879,0329
		9,8252	869,5052
		9,8831	860,0329
		9,941	850,5052

Widerstand des Cernox-Thermometers in Abhängigkeit von der Temperatur



Weitere wichtige Daten:

Äußere Magnetspule $l = 15.8 \text{ cm}$

$$N = 6245$$

Pickup Spulen: $l = 6.0 \text{ cm}$

$$N = 2900$$

$$d_{\text{innen}} = 4 \text{ mm}$$

$d_{\text{außen}} = 4.3 \text{ mm}$, zur Auswertung von χ Wert dazwischen verwenden

$$\text{Suszeptibilität: } \chi_{\text{Blei}} = -1.8 \cdot 10^{-6}$$

Sweepzeit: $t = \frac{800 \cdot 20 \text{ ms}}{2} = 8 \text{ s}$ von 0 bis I_{max}

$$t = \frac{800 \cdot 20 \text{ ms}}{2} = 8 \text{ s} \text{ von } I_{\text{max}} \text{ bis } 0$$

Bleifilm: Dicke: 100 nm , Länge: $490 \mu\text{m}$, Breite: $60 \mu\text{m}$

Schutz: 10 nm Germanium + ca. 200 nm PMMA-Lack (=Plexiglas)

Kontakte: 4 Finger aus Gold mit $I_{\text{max}} = 10 \mu\text{A}$

Heizspule: $R = 600 \Omega$ bei Zimmertemperatur

$$I = 0..12 \text{ mA}$$