



DEUTSCHE
GESELLSCHAFT FÜR
ZERSTÖRUNGSFREIE
PRÜFUNG E.V.

ZfP-Sonderpreis der DGZfP beim Regionalwettbewerb Jugend forscht

MÜNSTER



Messung des elektrischen Widerstandes eines Supraleiters nahe der Sprungtemperatur

Tim Meyer

Schule:

Gymnasium Wolbeck
Von-Holte-Straße 56
48167 Münster

2013

Messung des elektrischen Widerstandes eines Supraleiters nahe der Sprungtemperatur

Eine Arbeit von Tim Meyer

Projektbetreuer: Claudia Winkel und Andre
Liemann

Alter: 16 Jahre

Bundesland: Nordrhein-Westfalen

Schule: Gymnasium Wolbeck

Fachgebiet: Physik

Sparte: Jugend Forscht



Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. Einleitung	2
2. Ziel der Arbeit	2
3. Vorversuche	3-4
4. Messtechnik	5-7
5. Wie funktioniert ein Supraleiter?	8-9
6. Ermittlung der Sprungtemperatur	10-11
7. Fazit	12
8. Danksagung	13
9. Literaturverzeichnis	13

1. Einleitung

Unser Energiebedarf steigt momentan stark an und dies wird auch in Zukunft weiter der Fall sein.

Diese Tatsache bringt einige Probleme mit sich, da ein erhöhter Strombedarf das Stromnetz wachsender Städte stark beansprucht. Es stellt sich daher die Frage, ob das aktuelle Stromnetz wirklich effizient arbeitet, was z.B. die Verlustrate des übertragenen Stroms angeht.

Jedoch gibt es ein Material, welches große Mengen an Strom über weite Strecken verlustfrei und auf kleinstem Raum übertragen kann – den Supraleiter. Dieser wird auf eine bestimmte Temperatur heruntergekühlt, um die beschriebenen Eigenschaften zu erlangen.

Die Stadt Essen macht dies mit einem Pilotprojekt vor, da dort auf einer Strecke von einem Kilometer eine alte Kupferleitung durch eine Supraleitung ersetzt wird, um die vorher genannten Probleme zu minimieren.

Die Idee für meine Arbeit war es daher, die Eigenschaften von Supraleitern zu untersuchen und die typischen Effekte von Supraleitern unter extrem niedrigen Temperaturen nachzuweisen, also den Elektrischen Widerstand der nahe null geht und die daraus folgende verlustfreie Übertragung von Strom.

2. Ziel der Arbeit

Mein Ziel der Arbeit bestand darin, Supraleiter auf ihre Eigenschaften zu untersuchen und somit ein geeignetes Verfahren für dieses Vorhaben zu finden.

Auch war es mir wichtig, andere Materialien mit dem gleichen Verfahren zu untersuchen, um Vergleiche ziehen zu können.

3. Vorversuche

Induktionsversuche:

Da das angewandte Messverfahren das Phänomen der Induktion nutzt, habe ich zuerst einige Versuche zu diesem Bereich gemacht.

Da ich dieses Thema noch nicht im Unterricht hatte, musste ich mir daher einiges zur Induktion angucken.

Die Vermutung war, dass ein gut leitendes Material für Magnetfelder „undurchlässiger“ ist, als ein schlecht leitendes Material.

Um das zu belegen und zu wissen, dass ich das Messverfahren verwenden kann, wurde der Versuch, der in Bild 1 zu sehen ist, durchgeführt.

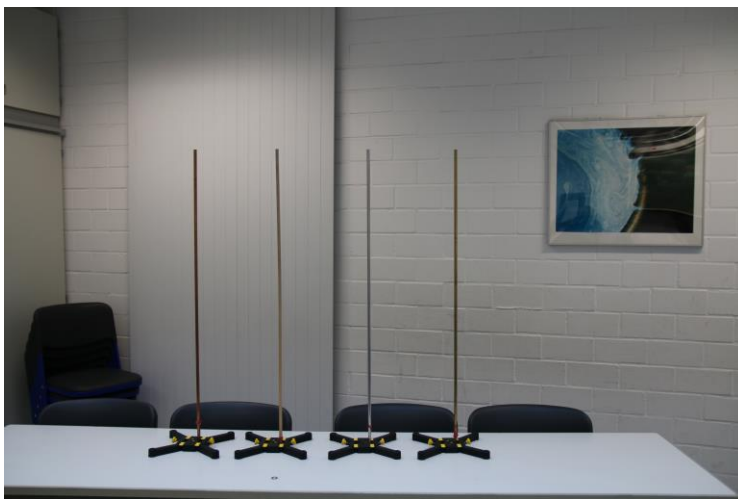


Bild 1

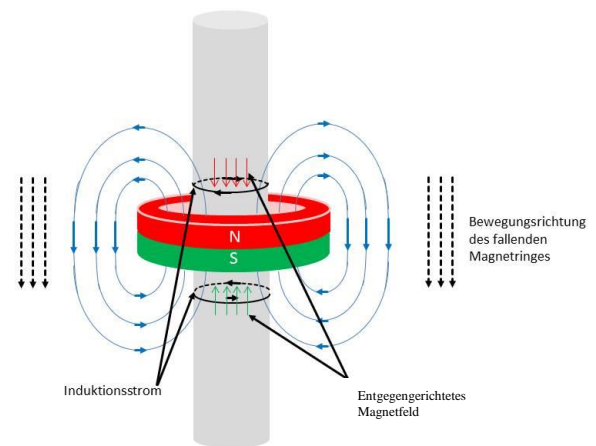


Bild 2

Ich habe Stäbe aus verschiedenen Materialien nebeneinander aufgestellt und einen Ringmagneten an diesen, durch das innere Loch, herunterfallen lassen.

Theoretisch müsste der Magnet an den verschiedenen Stäben unterschiedlich schnell fallen, da der Magnet das Material mit seinem Magnetfeld schneidet und somit Induktionsströme entstehen, was sich auch bestätigt hat, da der Magnet am Holzstab am schnellsten herunterfiel, am Aluminiumstab am zweit schnellsten, am Messingstab am dritt schnellsten und am Kupferstab am langsamsten.

Diese Induktionsströme fließen im Kreis und heißen daher auch Ringströme.

Es entsteht nun ein Magnetfeld im Material, welches sich nach dem Gesetz von Lenz dem des Magneten entgegenrichtet.

Auf Bild 2 ist die Ausrichtung der Magnetfelder zu sehen und die daraus folgende gegenseitige Abstoßung.

3. Vorversuche

Thermoelement:

Damit die Temperatur der Probe gemessen werden kann, musste ich ein Eisen-Konstantan-Thermoelement kalibrieren, was ich in einem Temperaturbereich von 0 °C bis 100 °C getan habe.

Das Ziel war es, die Spannungen des Thermoelements einer Temperatur zuweisen zu können.

Die Kalibrierung habe ich mehrmals vollzogen, um am Ende einen Mittelwert aus allen Messungen ziehen zu können.

Da ich wusste, dass solche Thermoelemente einen linearen Temperaturverlauf haben, konnte ich somit auch die Temperaturen im Minusbereich nachweisen.

Alle Werte habe ich mit dem Programm Excel ausgewertet und in ein Diagramm eingetragen. Excel kann nun aus dem Diagramm eine Formel berechnen, die wie folgt lautet: $19,531x + 18,029$.

Diese ermöglicht es mir durch eintragen des X-Wertes, in der Einheit mV, eine Temperatur in °C zu erhalten.

Meißner-Ochsenfeld-Effekt:

Der letzte Versuch war der Schwebetest, der jedoch nur mit flüssigem Stickstoff funktioniert. Dennoch haben wir diesen Versuch durchgeführt, um zu wissen, ob der Supraleiter funktioniert und ich ihn für die Widerstandsmessung verwenden kann.

4. Messtechnik

Die Messung des Widerstandes führe ich, wie vorher bereits beschrieben, mit Hilfe des Prinzips der Induktion durch, indem ich den Widerstand indirekt messe, da dieser gegen 0 geht, wenn die Sprungtemperatur erreicht wird.

Den Widerstand könnte man zwar auch „regulär“ mit der Formel $R = U/I$ ermitteln, jedoch müssten so Kupferkabel auf die Probe, also den Supraleiter, gelötet werden, die aber selbst einen kleinen Widerstand haben, was sich negativ auf die Messergebnisse auswirken könnte und somit ein Problem wäre.

Somit verwendete ich eine Sekundär- und eine Primär-spule.

Durch die Primärspule floss eine Wechselspannung, welche ein Magnetfeld erzeugte und die dadurch induzierte Spannung in der Sekundärspule ließ sich auf einem Oszilloskop ablesen. Nach dem Induktionsgesetz, wird in einem leitenden Material durch Änderung des Magnetfeldes eine Spannung induziert.

Da die Natur versucht den Ausgangszustand wiederherzustellen, entstehen durch diese Spannung Wirbelströme. Um diese kreisförmigen Wirbelströme entsteht nun ein Magnetfeld, das dem Magnetfeld der Primärspule entgegengesetzt ist, um dies aufzuheben.

Die Ausbreitung der Wirbelströme im Material hängt von der Leitfähigkeit ab, was bedeutet, dass ein Supraleiter durch seine Eigenschaften eine perfekte Abschirmwirkung haben müsste, da die Wirbelströme sich ideal entwickeln könnten.

Die folgenden Bilder zeigen die Messapparatur mit ihren beiden Spulen, zwischen die verschiedene Materialien gehalten werden, um die Änderungen der Induktionsspannung in der Sekundärspule zu zeigen.

Bild 3 zeigt eine bestmögliche Induktion in der Sekundärspule, da das erzeugte Magnetfeld der ersten Spule diese optimal schneidet.

In Bild 4 wird eine Plastikscheibe als Widerstand zwischen die beiden Spulen gehalten. Es ist eine geringfügig kleinere Induktionsspannung zu beobachten, was daran liegt, dass die beiden Spulen nun ca. 2mm voneinander entfernt sind und so das erzeugte Magnetfeld die Sekundärspule bereits abgeschwächt erreicht.

Da Plastik nicht leitend ist, kann keine Spannung in der Scheibe induziert werden und es entstehen somit keine Wirbelströme, die sich dem Magnetfeld der Primärspule entgegenrichten.

In Bild 5 wird Kupfer zwischen die beiden Spulen gehalten, was sich direkt stark auf die Induktionsspannung auswirkt, da wieder ein gewisser Abstand zwischen den beiden Spulen herrscht und Kupfer ein leitendes Material ist.

Dadurch kann im Kupfer eine Spannung induziert werden, was somit Wirbelströme auslöst, die sich dem Magnetfeld der ersten Spule entgegenrichten.

4. Messtechnik

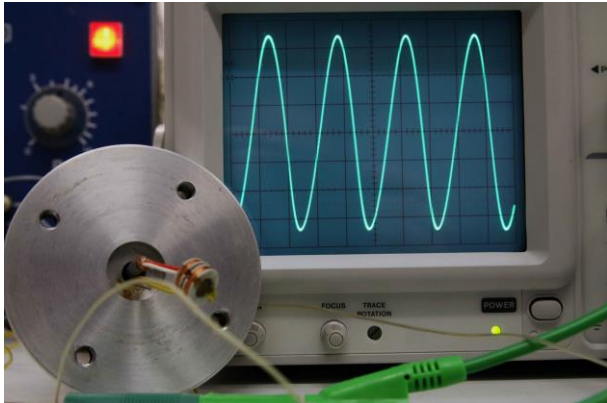


Bild 3

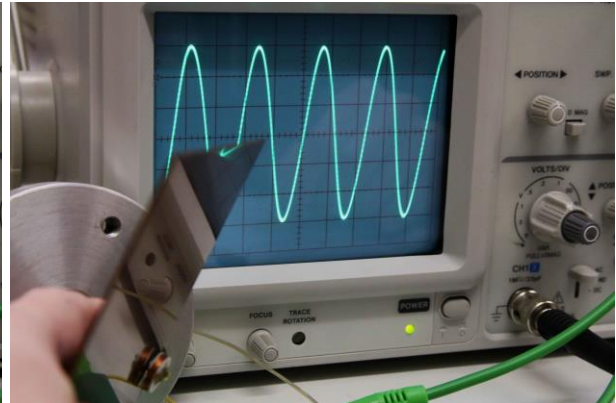


Bild 4

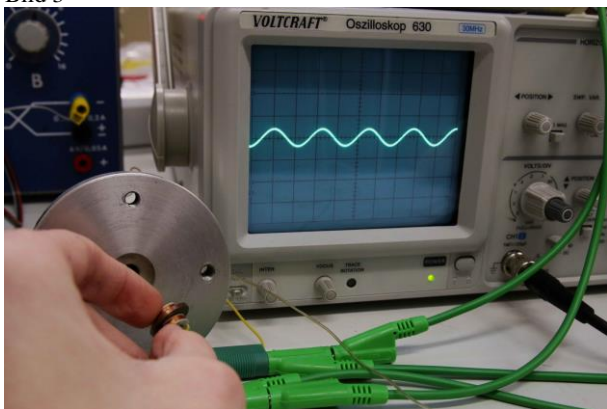


Bild 5

Folglich wirkt Kupfer als Abschirmung besser, als z.B. Plastik und die Vermutung, dass ein Supraleiter eine perfekte Abschirmung haben müsste hat sich bestätigt.

4. Messtechnik

Auf die oben beschriebene Kalibrierung des Thermoelements gehe ich nun genauer ein und erkläre, wie das Prinzip funktioniert.

Damit die Sprungtemperatur möglichst genau gemessen werden konnte, wurde ein Eisen-Konstantan-Thermoelement verwendet, das direkt neben der Probe platziert wurde, um eine genaue Messung der Temperatur zu gewährleisten.

Ein Thermoelement besteht aus zwei Metallen, welche in unserem Fall Eisen und Nickel waren, die am Ende zusammengebunden werden.

Wenn die Verbindungsstelle der beiden Metalle erhitzt bzw. abgekühlt wird, ist eine Spannung zu messen.

Dies passiert, da die Wendigkeit der Elektronen in Metallen von der Temperatur, aber auch vom Material abhängt. Da die beiden Metalle miteinander verbunden sind, treten durch die Thermospannung Elektronen vom einen ins andere Metall über.

Da die Elektronen sich in beiden Metallen unterschiedlich bewegen, ist dies an der Übergangsstelle ebenfalls so.

In der Zeichnung (Bild 6) sieht man die beiden Metalle, sowie den Übergangspunkt. Wenn sich die Elektronen in Metall 1 schneller bewegen als in Metall 2, dann treten sie somit häufiger in Metall 2 über.

Das gleiche gilt umgekehrt, wenn sich die Elektronen in Metall 2 langsamer als in Metall 1 bewegen.

Dann treten die Elektronen aus Metall 2 weniger häufig in das Metall 1 über.

Somit kommt es in Metall 1 zu einem Elektronenmangel und in Metall 2 zu einem Elektronenüberschuss und es entsteht eine Spannung.

Metall 1



Metall 2

Bild 6

Damit die unterschiedlichen Spannungen einer Temperatur zugeordnet werden können, muss das Thermoelement, wie bereits in den Vorversuchen kurz beschrieben kalibriert werden.

Da ich bereits herausgefunden habe, dass der Temperaturverlauf linear verläuft, ist anzunehmen, dass dies auch im Minusgradbereich der Fall sein wird.

Um sicher zu sein, dass die Kalibrierung auch nach einer gewissen Zeit noch genau ist, habe ich diese nach 4 Wochen nochmal vorgenommen und exakt die gleichen Werte erhalten.

Somit ist die Kalibrierung abgeschlossen.

5. Wie funktioniert ein Supraleiter?

Supraleiter sind Stoffe, die beim Abkühlen unter eine bestimmte Temperatur, der Sprungtemperatur, in einen supraleitenden Zustand übergehen.

In diesem supraleitenden Zustand ist kein elektrischer Widerstand mehr messbar.

Der Supraleiter wurde 1911 von Heike Kamerlingh Omnes entdeckt, da er mit Quecksilber nahe des absoluten Nullpunkts experimentierte. So entdeckte er den Widerstand der gegen 0 geht.

Diesen Effekt fand er auch bei anderen Metallen und nannte ihn „Supraleitung“.

Metallische Leiter besitzen ein Kristallgitter, welches für Elektronen gut durchlässig ist und somit für die elektrische Leitfähigkeit verantwortlich ist. Durch Störungen in diesem Gitter werden die Elektronen beeinflusst, was bedeutet, dass diese „gestreut“ werden und somit das Gitter geschnitten wird. Durch diese Kollision entsteht der elektrische Widerstand, der auch messbar ist.

Im supraleitenden Zustand muss also etwas passieren, damit die Elektronen dieses Kristall- bzw. Ionen-gitter noch besser durchdringen bzw. nicht mehr mit ihm kollidieren.

Die Elektronen müssen also einen Zustand erlangen, indem sie die Störungen vermeiden.

Dies erreichen sie, wenn sich zwei Elektronen verbinden, was dann Cooper-Paarung genannt wird.

Da Elektronen die gleiche Ladung besitzen, stoßen sie sich voneinander ab. Diese abstoßende Kraft wird Coulomb-Kraft genannt.

Damit diese Coulomb-Kraft nicht mehr wirken kann, muss diese somit durch eine stärkere Kraft überwunden werden.

Um dies zu erklären, hat sich die Theorie der Wechselwirkung des Ionengitters mit den Elektronen durchgesetzt.

Die Elektronen ziehen in ihrer nahen Umgebung die positiv geladenen Ionen leicht an und folglich verschiebt sich das Ionengitter an dieser Stelle.

Durch diese Verschiebung werden zwei Elektronen miteinander gebunden – das Cooper-Paar ist entstanden.

Da diese Verkopplung auf quantenmechanischer Ebene abläuft, müssen alle Cooper-Paare die gleichen Eigenschaften besitzen, was bedeutet, dass alle Cooper-Paare den gleichen Spin besitzen, der gleich 0 ist.

Damit der Spin gleich 0 ist, müssen die gebundenen Elektronen einen entgegengesetzten Spin haben, was in Bild 7 deutlich wird.

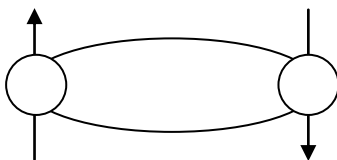


Bild 7

5. Wie funktioniert ein Supraleiter?

Wenn nun an den Supraleiter eine Ladung angelegt wird, werden alle Cooper-Paare gleich beschleunigt, da ein Paar alleine, aufgrund der vorher beschriebenen Quantenmechanik, nicht mit dem Gitter wechselwirken kann, da es sonst kein Cooper-Paar mehr ist. Somit kann kein Cooper-Paar aus seiner Verbindung heraus, da für eine Trennung eine höhere Energie als die der Bindung nötig ist. In diesem Moment ist das Material supraleitend.

Die Energie um die Trennung zu brechen, kann jedoch nur auf 2 Arten entstehen. Es könnte eine Spannung angelegt werden, die die vertragbare Spannung des Supraleiters übersteigt, oder durch Erwärmung eine höhere Energie erzeugt werden, was die Cooper-Paare dazu bewegt aufzubrechen.

Der letzte Punkt ist bei Supraleitern der normale Fall, da meistens keine durchgehende Kühlung gewährleistet ist.

6. Ermittlung der Sprungtemperatur

Durch die vorher beschriebenen Messverfahren ließ sich nun indirekt der Widerstand messen und somit auch die Sprungtemperatur ermitteln.

Bild 8 zeigt den kompletten Aufbau ohne flüssigen Stickstoff. In Bild 9 ist die Messapparatur, also der Kryostat, zu sehen, welches sich in flüssigem Stickstoff befindet um die Sprungtemperatur zu erreichen.

Ein Kryostat dient also als eine Art Kühlgerät, da es die Probe kühlen soll, wenn es sich im flüssigen Stickstoff befindet.

Im Kryostat befinden sich die beiden Spulen zwischen denen der Supraleiter ist, sowie das Thermoelement. Bild 10 zeigt die genaue Anordnung.

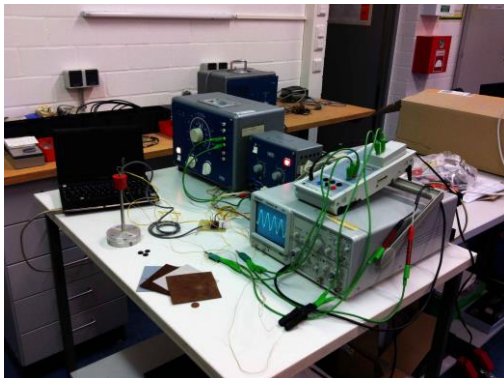


Bild 8

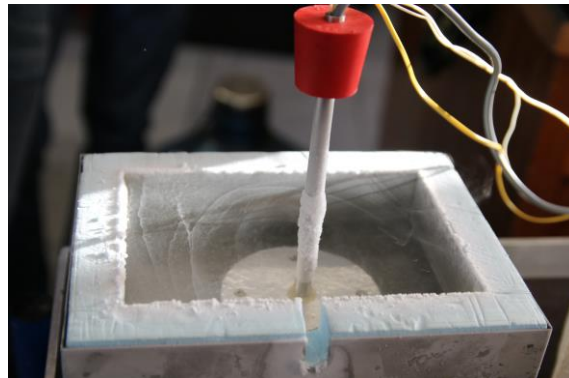


Bild 9

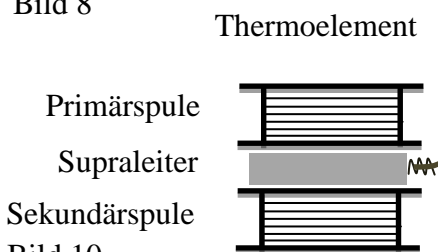


Bild 10

Die ausgegebene Induktionsspannung wurde nun zusätzlich zum Oszilloskop noch an ein Cassy-Lab Interface angeschlossen. Das gleiche geschah mit dem Thermoelement, das vorher noch an einem Messgerät angeschlossen war.

Cassy-Lab sollte nun die Werte der Induktionsspule und des Thermoelements aufnehmen und in ein Temperatur-/Widerstands-diagramm einfügen. Somit befand sich auf der X-Achse die Temperatur und auf der Y-Achse der Widerstand.

Die Temperatur wurde mit der Formel aus den Vorversuchen ermittelt und umgerechnet. Bei dem Widerstand musste ein anderer Weg genommen werden, da dieser nur indirekt gemessen wurde, was bedeutet, dass ich keine für einen Widerstand typischen Ohm-Werte bekommen konnte.

Da jedoch klar war, dass die Sprungtemperatur ruckartig eintreten würde, also in einem kleinen Temperaturintervall, konnte man am Anfang der Messungen einen Fix-Wert festlegen, der den Widerstand gegen unendlich beschreibt.

Wenn die Sprungtemperatur eintritt, ist dieser standardisierte Wert nicht mehr gegeben und Cassy-Lab bemerkt den Umsprung und trägt diesen in das Diagramm ein.

6. Ermittlung der Sprungtemperatur

Des Weiteren war die Sprungtemperatur auch deutlich auf dem Oszilloskop zu sehen, da die angezeigte Sinus-Kurve fast gar keine Amplitude mehr hatte, sobald der Supraleiter unter die kritische Temperatur abgekühlt war. Somit hatten sich auch die Vermutungen der perfekten Abschirmung eines Supraleiters bestätigt.

Um möglichst präzise Ergebnisse zu bekommen, wurde die Messung mehrmals durchgeführt. Am Ende wurden dann alle Werte gemittelt.

Die gemessene Sprungtemperatur betrug 89K. Bild 11 zeigt das Original Cassy-Lab Fenster, nachdem die Werte gerade aufgenommen wurden. Hier ist die Temperatur jedoch noch in °C angegeben.

Bild 12 zeigt die gemittelten Werte aus mehreren Messungen. Hier ist die Sprungtemperatur deutlich bei 89 Kelvin zu sehen,

Die ermittelten Werte sind für den $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ -Supraleiter durchaus realistisch und stimmen mit den Vermutungen von ca. 92K ziemlich gut überein, die ich aus verschiedenen Literaturen habe.

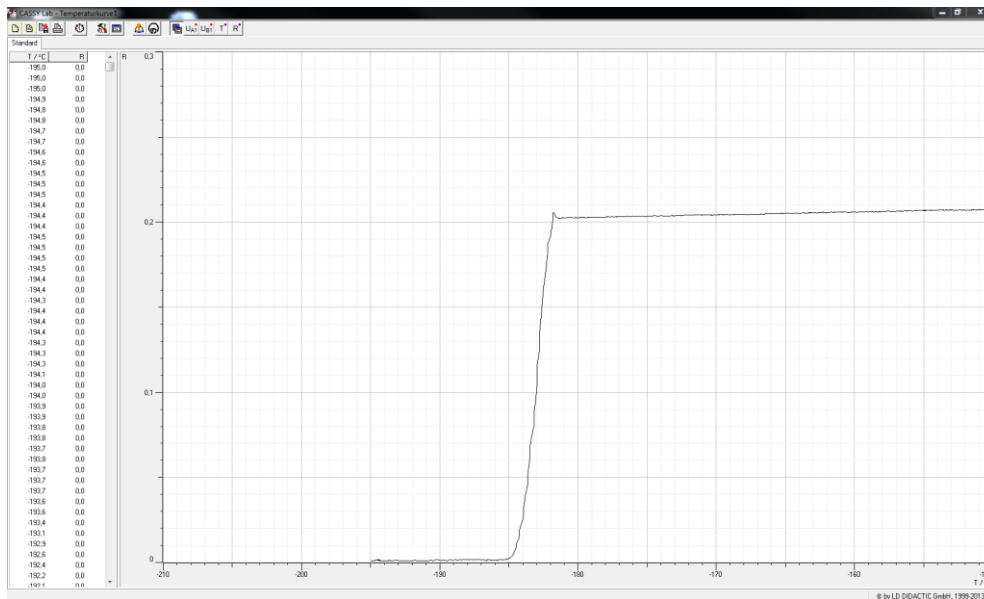


Bild 11

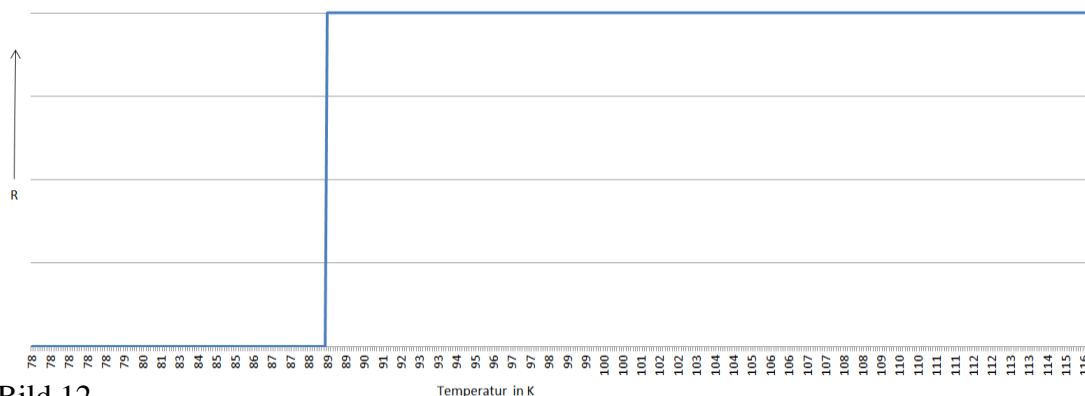


Bild 12

7. Fazit

Als abschließendes Fazit lässt sich sagen, dass ich den Supraleiter und dessen Eigenschaften verstanden habe. Dies gilt ebenfalls für die angewandte Messtechnik.

Somit konnte ich die Sprungtemperatur des Supraleiters nachweisen. Die von mir ermittelten Werte stimmen mit Literaturangaben ziemlich gut überein, was sich aber nicht ganz genau sagen lässt, da die Proben selber hergestellt wurden und somit möglicherweise nicht die perfekte chemische Zusammensetzung haben könnten.

Mögliche Grenzen bietet die Messtechnik, da das Thermoelement bei tiefen Temperaturen Schwankungen in der Linearität aufweisen könnte, was ich bei den Messungen jedoch nicht feststellen konnte.

Auch korrigiert die Schaltung einige Fehlerströme der Spulen, was sich anscheinend ebenfalls nicht auf die Messungen ausgewirkt hat.

Diese Probleme müssen aber vorher berücksichtigt werden, um die möglichen Fehlerquellen zu finden.

8. Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich gerne bei den folgenden Personen bedanken die dieses Projekt unterstützt haben:

Jonas Bünz vom Institut für Materialphysik der Universität Münster für die Bereitstellung der Laboreinrichtungen, sowie des flüssigen Stickstoffes.

Heinz Werner Oberholz für die verwendeten Supraleiter und die Messtechnik.

Claudia Winkel und Andre Liemann für die konsequente Unterstützung während des gesamten Verlaufs des Projektes.

9. Literaturverzeichnis

<http://www.leifiphysik.de/themenbereiche/elektromagnetische-induktion/versuche#Fallende%20Magnete%20in%20Rohren>

http://de.wikipedia.org/wiki/Coulombsches_Gesetz

<http://de.wikipedia.org/wiki/Quantenverschr%C3%A4nkung>

<http://www.physik.fh-aachen.de/startseite/physik-fuer-informatik/praktikum/supraleiter00/1/>

<http://www.wissenschaft-online.de/abo/lexikon/physik/907>

http://www.mmch.uni-kiel.de/Supraleiter/supra_folien_2.htm

[http://www.pit.physik.uni-tuebingen.de/PIT-II/teaching/ExPhys-V_WS03-04/Exp-V\(3\)-Kap6-Supraleitung5.pdf](http://www.pit.physik.uni-tuebingen.de/PIT-II/teaching/ExPhys-V_WS03-04/Exp-V(3)-Kap6-Supraleitung5.pdf)

<http://www.supermagnete.de/magnetismus/supraleiter>

http://www.ted.com/talks/boaz_almog_levitates_a_superconductor.html

<http://www.chemie.de/lexikon/Mei%C3%9Fner-Ochsenfeld-Effekt.html>