

Protokoll Supraleitung

Clemens Anschütz
Markus Pawellek

5. Januar 2016

Inhaltsverzeichnis

1 Aufgaben	2
2 Grundlagen	3
2.1 Temperaturmessung am Nullpunkt	3
2.2 Supraleitung und BCS-Theorie	4
2.3 Sprungtemperatur und kritischer Strom	5
2.4 Josephson-Kontakte	5
3 Aufbau und Durchführung	7
3.1 He-Kanne und Füllstandmessung	7
3.2 Aufbau des Messstabes	8
3.3 Stromversorgung, Versuchsplatz und Aufzeichnung	8
3.4 Josephson-Kontakte	9
4 Messwerte und Auswertung	10
4.1 Temperaturverteilung	10
4.2 Supraleitung von Tantal	10
4.3 Gleichstrom Josephson-Kontakt	11
4.4 SQUID-Magnetfeldmessung	13
5 Zusammenfassung	15
6 Quellen	16

1 Aufgaben

- Messen Sie den Füllstand des Stickstoffs- und des Heliumtanks.
- Bestimmen Sie die Temperaturverteilung innerhalb der Heliumkanne.
- Messen Sie qualitativ den Widerstand einer Tantalspule in Abhängigkeit der Temperatur.
- Zeigen Sie, dass sich die Sprungtemperatur ändert, wenn Sie ein B-Feld an den Leiter anlegen.
- Untersuchen Sie den Gleichstrom-Josephson-Effekt und halten Sie in grafisch fest.
- Messen Sie kleine Magnetfeldänderung mit Hilfe eines SQUIDs und schätzen Sie dessen dessen Fläche ab.

2 Grundlagen

2.1 Temperaturmessung am Nullpunkt

Zur Messung sehr tiefer Temperaturen kann die Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstandes ausgenutzt werden. Gute metallische Leiter wie Kupfer oder Platin zeigen einen in guter Näherung linearen Anstieg des Widerstandes mit der Temperatur. Bei wenigen Kelvin geht diese Linearität jedoch in einen abflachenden Restwiderstand über, der umso kleiner ist, je reiner das Metall. Die verschwindende Ableitung dR/dT macht in diesen Bereich die Temperaturmessung also ungenau. Besser eignen sich hier Halbleiter wie beispielsweise Dioden. Hier werden die zum Stromfluss notwendigen freien Ladungsträger erst durch thermische Anregung erzeugt, weshalb der Widerstand bei tiefen Temperaturen stark ansteigt. Die Zusammenhänge sind in den Abbildungen 1 und 2 dargestellt:

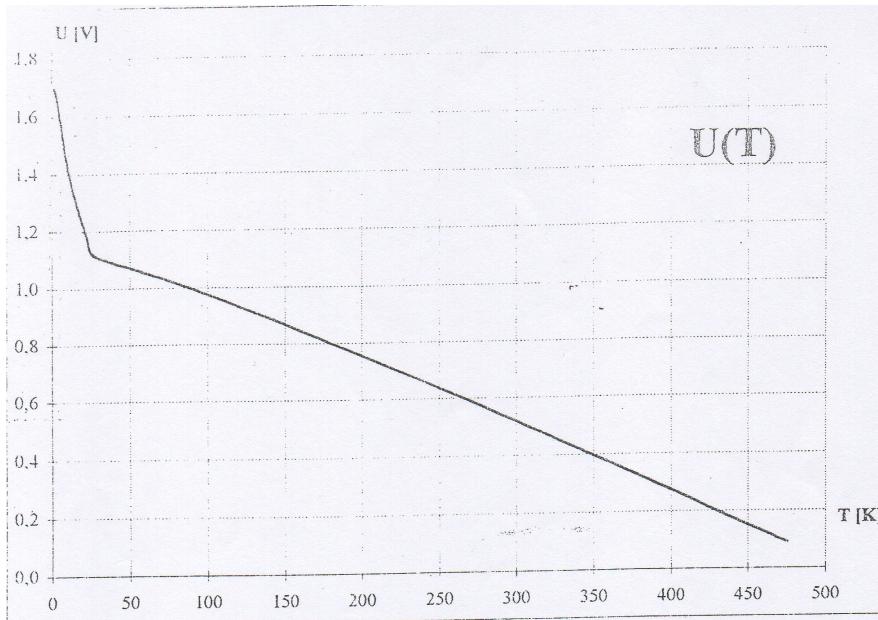


Abbildung 1: U - I -Kennlinie einer Diode

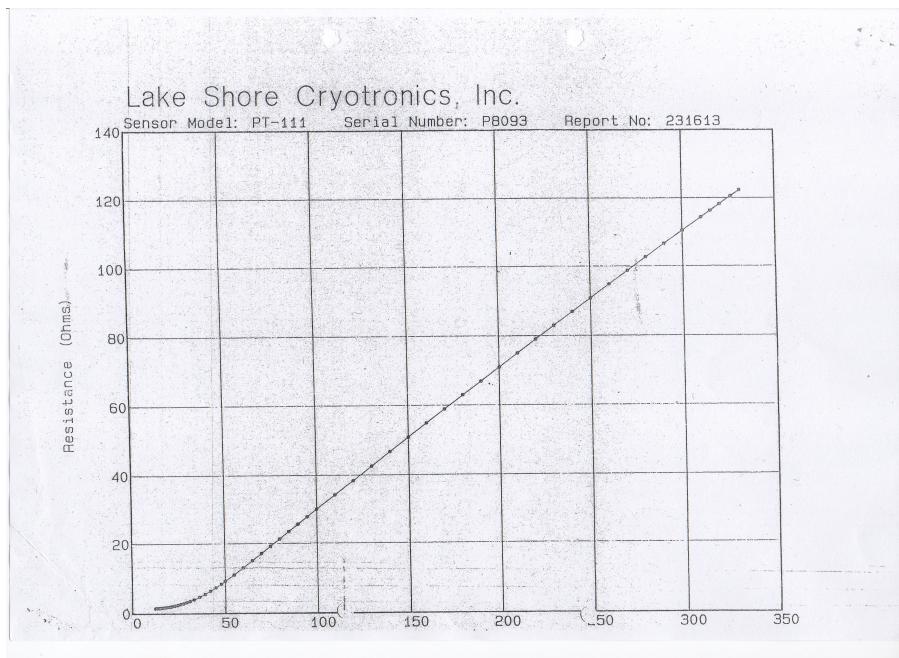


Abbildung 2: Kennlinie des Pt1000

2.2 Supraleitung und BCS-Theorie

1913 untersuchte Kamerlingh-Onnes das Verhalten des elektrischen Widerstandes von Quecksilber bei tiefen Temperaturen und fand heraus, dass der Widerstand bei 4.2 K sprunghaft um mehrere Größenordnungen viel. Das Experiment hatte einen neuen Zustand der Materie aufgedeckt. Heute lässt sich dieses Verhalten mit Hilfe der BCS-Theorie (nach ihren Begründern Bardeen, Cooper und Schrieffer) erklären. Sie erkannten, dass beim Übergang in den supraleitenden Zustand die Elektronen paarweise in einen Zustand kondensieren, in dem sie nach den Gesetzen der Quantenmechanik eine kohärente Materiewelle mit wohldefinierter Phase bilden. Die Elektronen wechselwirken hierbei über die Phononen, die Schwingungen des Kristallgitters. Je 2 Elektronen unterschiedlichen Spins bilden ein Cooper-Paar, wodurch sich der Gesamtspin demnach zu Null ergibt. Somit sind die Ladungsträger nicht länger Fermionen sondern Bosonen. Diese haben nun alle den gleichen Impuls und können nicht mehr mit dem Gitter wechselwirken, wodurch ein widerstandsloser Ladungstransport möglich wird.

2.3 Sprungtemperatur und kritischer Strom

Oberhalb einer bestimmten Temperatur zerbrechen die Cooper-Paare wieder in einzelne Elektronen und das ohmsche Verhalten setzt wieder ein. Die Sprungtemperaturen für verschiedene Metalle sind in Abbildung 3 ersichtlich:

Material	Sprungtemperatur in K	Sprungtemperatur in °C
Wolfram	0,012	-273,14
Gallium	1,09	-272,06
Aluminium	1,14	-272,01
Quecksilber	4,15	-268,99
Tantal	4,48	-268,66
Blei	7,19	-265,96

Abbildung 3: Tabelle der Sprungtemperaturen verschiedener Metalle
(Quelle: www.itwissen.info)

Supraleiter vom Typ I verdrängen alle äußeren Magnetfelder durch Oberflächenströme aus dem Inneren (auch Meißner-Ochsenfeld-Effekt). Ein von außen angelegtes Magnetfeld verringert somit die Sprungtemperatur zusätzlich, wobei sich der Zusammenhang annähernd quadratisch darstellt. Da auch fließende Ströme ein Magnetfeld verursachen ist die Sprungtemperatur auch von der Stromstärke im Supraleiter abhängig. Oberhalb eines bestimmten kritischen Stromes geht das Verhalten des Leiters ebenfalls wieder in den ohmschen Zustand über.

2.4 Josephson-Kontakte

Ein Josephson-Kontakt kann mit Hilfe zweier Supraleiter, die durch eine dünne Isolierschicht (z.B. Oxidschicht) getrennt sind erzeugt werden. Bei einem angelegten Strom können nun Cooper-Paare durch die Oxid-Barriere tunneln und ermöglichen so ebenfalls einen verlustfreien Ladungstransport. Genauer ist durch die unterschiedliche Phase der beiden Materiewellen in den Leitern schon ein Gleichstrom beim bloßen Berühren der Supraleiter möglich, welcher jedoch schwer zu messen ist. Bei einem angelegten Wechselstrom beobachtet man nun innerhalb eines kleinen Bereiches um 0 A das supraleitende Verhalten, oberhalb des kritischen Stromes (nur der Betrag ist entscheidend) fällt aber wieder Spannung über dem Kontakt ab. Bei angelegter Spannung hingegen ändert sich die Phase in den Leitern und somit auch ihre Differenz mit der Zeit. Das Resultat ist ein hochfrequenter Wechselstrom,

dessen Frequenz sehr rasch mit der Spannung zunimmt und über folgenden Zusammenhang beschrieben wird.

$$f = \frac{2eU}{h}$$

Mit Hilfe eines Ringes aus zwei Supraleitern, die durch zwei gleiche Isolatoren getrennt sind, kann ein SQUID (Superconducting Quantum Interference Device) realisiert werden. Mit dessen Hilfe lassen sich sehr kleine Magnetfelder nachweisen.

Die Funktionsweise eines SQUID basiert auf dem Effekt der Flussquantisierung in supraleitenden Ringen und dem Josephson-Effekt. Aus quantenmechanischen Gründen kann durch einen supraleitenden Ring nur ein magnetischer Fluss fließen, dessen Größe ein ganzzahliges Vielfaches des magnetischen Flussquants $\Phi_0 = 2.07 \cdot 10^{-15}$ Vs beträgt. Ändert sich das äußere Magnetfeld, so wird im Ring ein elektrischer Kreisstrom angeregt, der gerade groß genug ist, um den magnetischen Fluss im supraleitenden Ring auf das nächstgelegene Vielfache des Flussquants zu erhöhen oder zu verringern. Durch Messung der Strom- oder Spannungsänderung im Ring kann nun das durchströmende Magnetfeld sehr genau bestimmt werden.

3 Aufbau und Durchführung

3.1 He-Kanne und Füllstandsmessung

Der prinzipielle Aufbau der He-Kanne ist in Abbildung 4 zu sehen. Der isolierte und abgeschirmte Heliumbehälter befindet sich unterhalb einer zusätzlichen Stickstoffkühlung, die die unmittelbare Umgebung des He auf ca. 80 K abkühlt bevor der äußere Mantel der Kanne kommt.

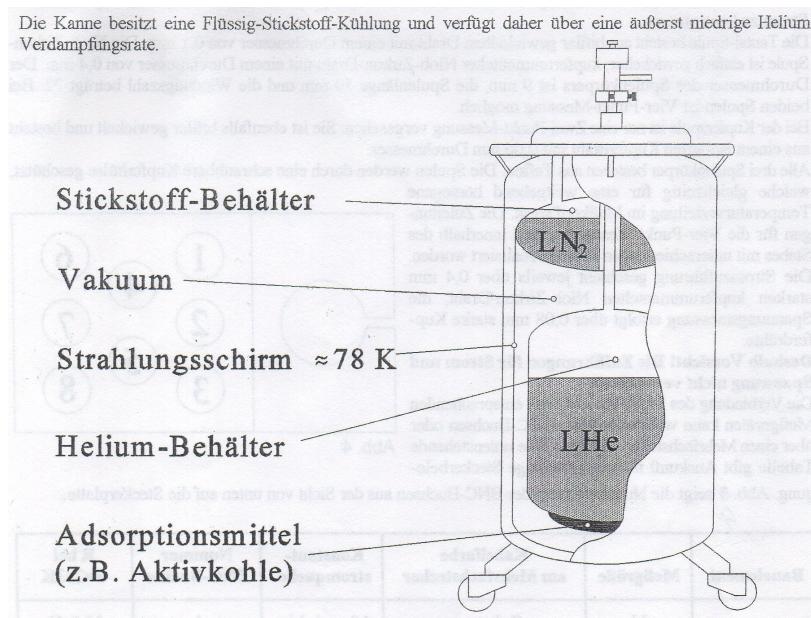


Abbildung 4: Aufbau der verwendeten Helium-Kanne (nach Versuchsunterlagen)

Zur Füllstandsmessung des flüssigen Stickstoffs wird ein kleiner Kunststoffstab in das Reservoir getaucht und nach kurzer Zeit wieder zügig entfernt. Die am kalten Stab ausfrierende Luftfeuchtigkeit zeigt dann den N_2 an. Um die Pegelhöhe des He abzuschätzen wird ein dünnes Metallrohr, das mit einer Gummimembran abgeschlossen ist in der Kanne versenkt. Ein Gummipropfen am Rohr schließt dabei die Kanne luftdicht ab. Im Rohr entstehen nun durch die unterschiedlichen Druck und Temperaturverhältnisse thermoakustische Schwingungen, deren Frequenz schlagartig und hörbar tiefer wird, sobald der Stab die Oberfläche des flüssigen Heliums erreicht.

3.2 Aufbau des Messstabes

Alle Geräte und Materialien, die direkt mit dem flüssigen He in Kontakt kommen sollen, befinden sich am Ende des Messstabes. Dieser besteht neben dem Messkopf und Zuleitungsrohr aus einer aufschraubbaren Niob-Hülse, die bei tiefen Temperaturen ebenfalls supraleitet und äußere Magnetfelder abschirmt. Im Messkopf befinden sich Pt1000-Widerstand, Diode, bifilare Kupfer- und Tantal-Spule sowie eine einfach gewickelte Niob-Zirkon-Spule zur Erzeugung definierter Magnetfelder. Alle Elemente sind über BNC-Buchsen am oberen Stabende anzusteuern. Die erforderliche Vierdrahtmessung ist so bereits im Stab integriert. Der Aufbau des Messkopfes ist in Abbildung 5 zu sehen:

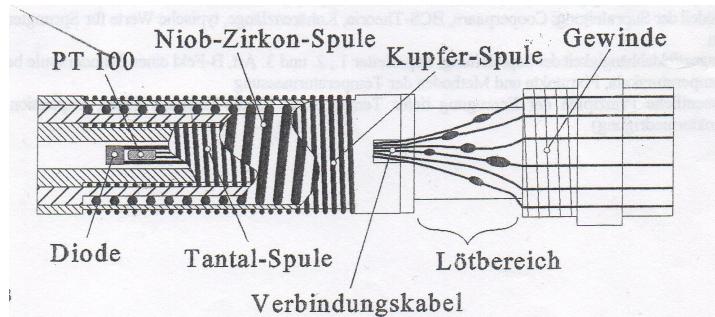


Abbildung 5: Aufbau des verwendeten Messkopfes (nach den Versuchsunterlagen)

3.3 Stromversorgung, Versuchsort und Aufzeichnung

Die Elemente werden über eine Konstantstromquelle versorgt. Verwendet wurde hierzu die Vierfachumpolkonstantstromquellenfortgeschrittenenpraktikumsgeräteeinheit. Um Störungen durch den Netzwechselstrom zu vermeiden sind die meisten Geräte batteriebetrieben. Zusätzliche Vor- und Parallelwiderstände können (über eine vietnamesische Weichblechdose) zugeschaltet werden um während der Montage die Geräte vor unbeabsichtigten Spannungs- oder Stromspitzen zu schützen. Die Aufzeichnung der Messwerte kann über einen Analog-Digital-Wandler und einen LabView-XY-Schreiber erfolgen. Ein Foto vom Versuchsort ist in Abbildung 6 beigelegt.

3 AUFBAU UND DURCHFÜHRUNG



Abbildung 6: Versuchsort mit fast allen verwendeten Geräten

3.4 Josephson-Kontakte

Die Josephson-Kontakte befinden ebenfalls am Ende des Messstabes. Beim Gleichstrom-Josephson-Effekt werden über einen Bautenzug zwei Niob-Drahtspitzen aneinander gedrückt. Da sich auf ihrer Oberfläche wie bei den meisten Metallen eine Oxidschicht befindet, ist die isolierende Barrièreschicht bereits vorhanden. Durch leichte Bewegung des Bautenzugs kann mit etwas Geschick der gewünschte Kontakt erzeugt werden. Die Einkopplung der Mikrowellen des 8mm-Klystrons erfolgt am oberen Ende des Stabes.

Der für die Magnetfeldmessung benötigte SQUID-Ring wird mit Hilfe der Methode der gekreuzten Drähte erzeugt. Naja, zumindest haben wir es auf diese Weise versucht. Dabei werden 2 gekreuzte, mit Oxidschicht überzogene Niob-Drähte wieder mittels eines Bautenzugs in leichten Kontakt gebracht. Mit etwas Glück und Geschick (in etwa so viel, dass man 3 rohe Eier senkrecht übereinander stapeln könnte) berühren sich die Drähte dann nur in zwei Punkten, die die beiden SIS (Supraleiter-Isolator-Supraleiter) Kontakte darstellen. Falls mehrere Kontaktstellen auftreten (und das tun sie), sind die auftretenden Stromminima weniger tief. Das angelegte Magnetfeld wurde mit Hilfe zweier Helmholtzspulen erzeugt und über eine Konstantstromversorgung mit eingeschalteter Dekadenreihe als Stromteiler konnten Strom- und Feldstärke sehr genau eingestellt werden.

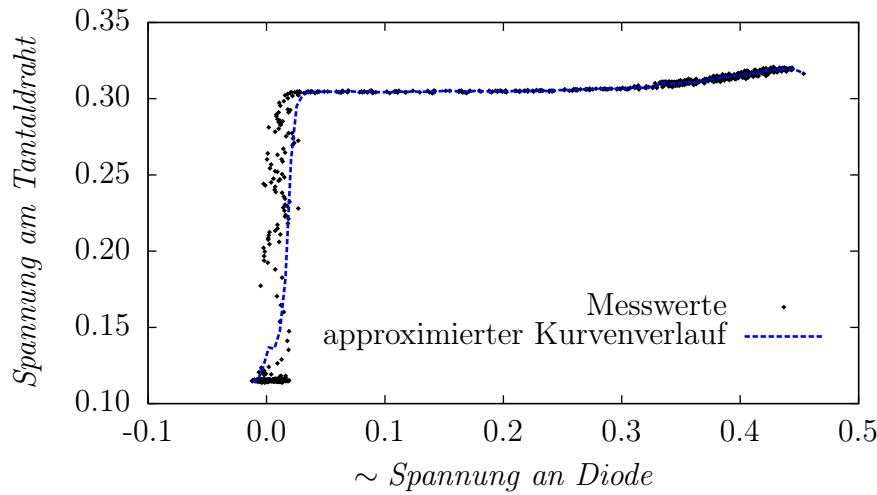


Abbildung 7: Spannungsverlauf des Tantal-Drahtes in Abhängigkeit der Temperatur (dargestellt durch Diodenspannung bei konstantem Diodenstrom von $10 \mu\text{A}$)
(aufgezeichnet durch LabView)

4 Messwerte und Auswertung

4.1 Temperaturverteilung

Um eine Vorstellung des genauen Temperaturverlaufs innerhalb der Kühlkanne zu bekommen, wurde die Temperatur an einigen markanten Stellen über Widerstandsmessung des Pt1000 Drahts sowie über die Diode bestimmt. Wie erwartet lief der metallische Widerstand auf einen konstanten Restwiderstand hinaus. Dadurch konnte die Temperatur unterhalb von 20 K nur noch sehr unzuverlässig bestimmt werden.

4.2 Supraleitung von Tantal

Mit Hilfe der Werte aus Abschnitt 4.1 konnte nun ein Tantal-Draht an die richtige Position und Temperatur gebracht werden, dass der Effekt der Supraleitung gezeigt wurde. Abbildung 7 zeigt eindeutig den schlagartigen Abfall des Restwiderstands bei einem gewissen Widerstandswert der Diode. Die Diodenspannung wurde invertiert und mit einem Offset versehen, um den qualitativen Temperaturverlauf besser darzustellen.

Im Folgenden wurde die Abhängigkeit der Sprungtemperatur vom

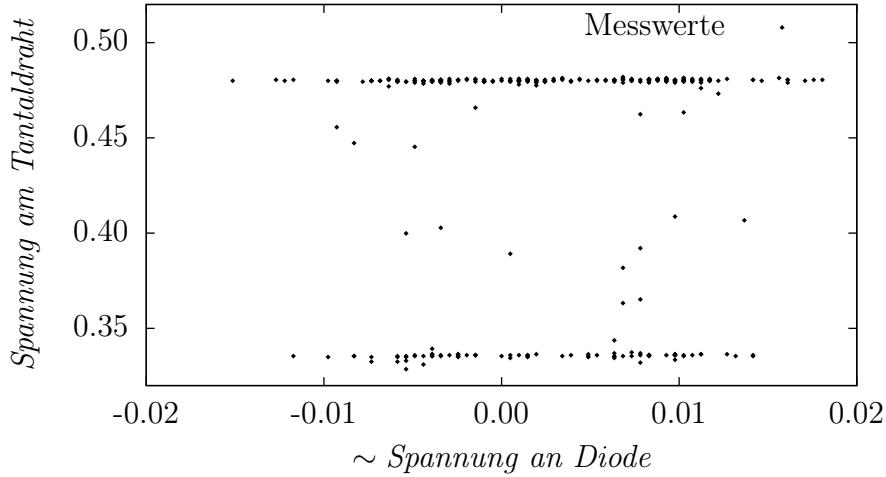


Abbildung 8: Spannung des Tantal-Drahtes für ein- und ausgeschaltetes B -Feld.
(aufgezeichnet durch LabView)

äußeren Magnetfeld untersucht. Wie in Abbildung 8 zu sehen, stieg der Widerstand am Tantal-Draht je nach ein- oder ausgeschalteten Magnetfeld sprunghaft um 0.15 V an. Dies deutet auf eine Überschreitung der durch das Magnetfeld verringerten Sprungtemperatur hin.

4.3 Gleichstrom Josephson-Kontakt

Der SIS-Kontakt wurde wie in Abschnitt 3 beschrieben hergestellt. Der rein supraleitende Fall ist in Abbildung 9 zu sehen. Wie erwartet fällt keine Spannung über dem Kontakt ab, da die Cooper-Paare widerstandslos durch die Leiter gehen und über die Isolatorschicht tunnellen. Bei größerem Wechselstrom konnte das vorhergesagte Verhalten mit Wechsel zwischen ohmschem und supraleitendem Zustand (siehe Abbildung 10) beobachtet werden. Oberhalb des positiven und unterhalb des negativen kritischen Stromes fällt wieder eine Spannung proportional zur durchfließenden Stromstärke ab. Durch Einkoppeln des Mikrowellenstrahlers wurde zwar eine Annäherung an die erwartete monoton steigende gewellte Gerade erreicht, allerdings reichte der Effekt nicht aus, um eindeutige Stufen wie in der Theorie prognostiziert zu sehen. Ein Beispielbild ist in Abbildung 11 zu sehen: Um den Effekt deutlicher darzustellen, wären wohl stabilere Kontakte und bessere Kopplungen erforderlich gewesen. Auch die Leistung des Strahlers

4 MESSWERTE UND AUSWERTUNG

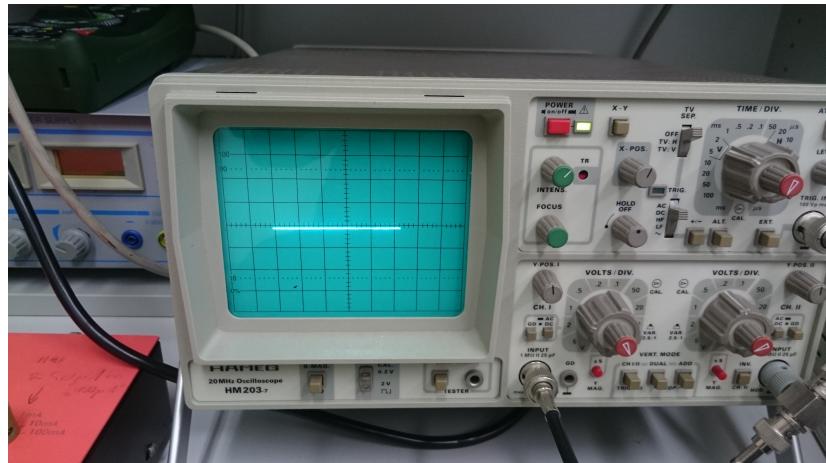


Abbildung 9: Tantalspannung über Strom am Oszilloskop

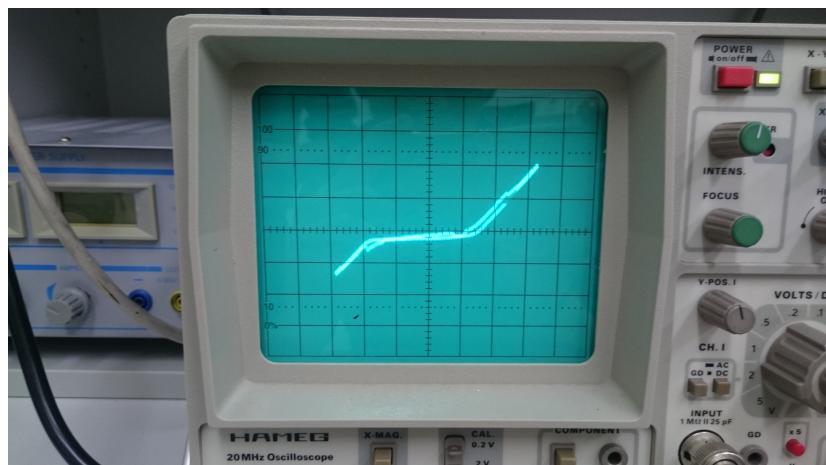


Abbildung 10: Tantalspannung über Strom am Oszilloskop bei größerem Betrag des Wechselstromes

4 MESSWERTE UND AUSWERTUNG

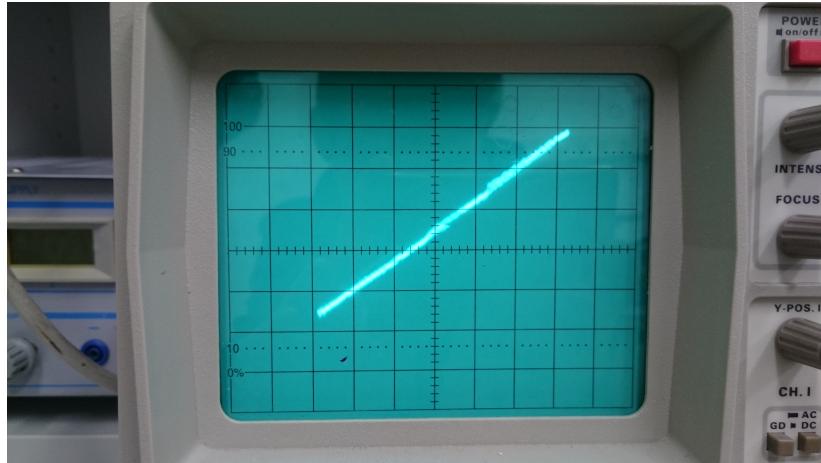


Abbildung 11: Tantalspannung über Strom bei größerem Betrag des Wechselstromes mit eingekoppelten Mikrowellen

könnte erhöht werden. Des Weiteren bleibt zu bemerken, dass durch den sehr provisorisch erstellten Josephson-Kontakt eine Reproduzierbarkeit der Ergebnisse unmöglich war, da selbst kleinste Schwankungen und kurze Zeiträume den Kontakt und somit die Messung stark Verändern konnten.

4.4 SQUID-Magnetfeldmessung

Wie in der Durchführung beschrieben wurde der SQUID durch die Methode der gekreuzten Drähte bewerkstelligt. Das Magnetfeld wurde durch zwei Helmholtz-Spulen erzeugt und mit Hilfe eines Stromteilers bestehend aus einer Dekadenreihe konnte der Strom und somit auch das Feld sehr genau eingestellt werden. Nach langem Suchen des richtigen Kontaktes, der richtigen Temperatur, der korrekten Ausrichtung der Spulen und vorteilhaften Anzeige des Oszilloskops, konnte eine Einstellung gefunden werden, die die erwarteten periodischen Stromminima aufwies. Diese lagen bei:

$$0.33 \text{ A}, \quad 0.6 \text{ A}, \quad 0.9 \text{ A}, \quad 1.2 \text{ A}, \quad 1.48 \text{ A}, \quad 1.8 \text{ A}$$

Daraus lässt sich eine gemittelte Periode von circa 0.3 A errechnen. Aus der Elektrodynamik ist dann bekannt, dass sich das B -Feld im Mittelpunkt exakt durch folgende Gleichung berechnen lässt (äquiva-

lent zur Bestimmung des B -Feldes einer Leiterschleife):

$$B = \mu_0 I N \frac{R^2}{\left[R^2 + \left(\frac{l}{2} \right)^2 \right]^{\frac{3}{2}}}$$

Es ergibt sich nun mit $R = 25$ cm, $l = 54$ cm und $N = 40$ folgendes:

$$\Delta B = 1.9 \cdot 10^{-5} \text{ T}$$

Die Fläche des betrachteten SQUIDs folgt nun aus Grundlagen durch

$$A = \frac{\Phi_0}{\Delta B} = 1.1 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2$$

Dies entspricht der zu erwartenden Größenordnung.

5 Zusammenfassung

Im Experiment wurde das Verhalten von supraleitenden Materialien unter den verschiedenen Einflüssen untersucht. Typische Eigenschaften wie die schlagartige Widerstandsabnahme bei Unterschreitung der Sprungtemperatur oder weitere Verringerung der selben durch äußere Magnetfelder konnten beobachtet und dokumentiert werden. Auch der Übergang zum ohmschen Verhalten bei Überschreitung des kritischen Stromes war beim SIS-Josephson-Kontakt zu sehen. Der invertierte Josephson-Effekt beim Einkoppeln von Mikrowellen war auf Grund des zu labilen Versuchsaufbaus leider nicht vollständig zu sehen. Hier würden sich wie auch beim letzten Versuchsteil, der SQUID-Messung, vorgefertigte, definierte und widerstandsfähigere Kontakte eignen. Dennoch konnte mit Hilfe der gereuzten Drähte ein SQUID erstellt werden und seine Reaktion auf das Magnetfeld entsprach den Vorhersagen. Die über Magnetfeld und Spannungsverlauf abgeschätzte SQUID-Größe liegt von der Größenordnung gut im erwarteten Bereich. Zusammenfassend kann man sagen, dass das Phänomen der Supraleitung viele interessante und unerwartete Effekte mit sich bringt, die in jüngster Vergangenheit und wohl auch in Zukunft zu großen Innovationen führen und führen werden. Ungeahnte Messgenauigkeit, verlustfreie Energieübertragung, Magnetschwebebahnen und ultra schnelle Prozessoren sind nur einige der Möglichkeiten, die die Supraleitungs-technologie ermöglichen könnte.

6 Quellen

- Thürk, Reichmann und Flegel, Supraleitung-Versuchsunterlagen
- www.itwissen.info
- Werner Buckel, Reinhold Kleiner, Supraleitung
- www.elektronik-kompendium.de
- Gerthsen, Physik