



Windthorst-Gymnasium
Gymnasialstraße 3
49716 Meppen

Jahrgangsstufe 11
Abiturjahrgang 2011

Seminararbeit

im Seminarfach

Moderne Physik

zum Thema

Physikalische Grundlagen und Anwendung eines SQUID

Verfasser: Kolja Esders, Henning Kruse
Kursleiter: Herr Dr. Pientka
Abgabetermin: 09.03.2010

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Supraleiter Allgemein	2
2.1	Supraleiter Historik	2
2.2	Meißner-Ochsenfeld-Effekt	4
2.2.1	Londonsche Eindringtiefe	5
2.2.2	Diamagnetismus	6
2.3	BCS-Theorie	7
2.4	Arten von Supraleitern	9
2.4.1	Supraleiter 1. Art	9
2.4.2	Supraleiter 2. Art	10
2.5	Hochtemperatur Supraleiter	11
2.6	Kritische Temperatur	11
2.7	Kritische Feldstärke	12
2.8	Kritische Stromdichte	13
3	SQUID	14
3.1	Aufbau	14
3.2	Josephson-Effekt	14
3.3	Anwendungen	16
4	Aussicht	17
	Literaturverzeichnis	18

1 Einleitung

Diese Seminararbeit über die Verwendung der Supraleitung in einem Superconducting Quantum Inteference Device (SQUID) soll einen Einblick in die phänomenologischen Erklärungen eines widerstandslosen Stromtransportes gewähren. Hierbei setzen die Inhalte der Arbeit nur grundlegende mathematische und einige physikalische Kenntnisse voraus, um einen Einblick in die hoch-komplizierten Theorien zur Beschreibung der quantenmechanischen Vorgänge innerhalb eines Supraleiters zu gewährleisten. Da die Technologien eines SQUID auf den Eigenschaften eines Supraleiters aufbauen wird in dem ersten Kapitel ausführlich auf besagte Eigenschaften eingegangen, um ein Verständnis für den Aufbau eines SQUID zu ermöglichen. Genauer beleuchtet werden hierbei die historischen Entdeckungen innerhalb des Themenfeldes Supraleitung wie z.B der Meißner-Ochsenfeld-Effekt oder die BCS-Theorie. Außerdem wird auf die Unterteilung der Supraleiter in 2 verschiedene Typen eingegangen und es wird berücksichtigt welche Umständen gegeben sein müssen, um einen supraleitenden Zustand eines Elementes/Stoffes zu ermöglichen. Mit dem erlangten Vorwissen werden nun in dem zweiten Kapitel die Funktionsweise und die Anwendungsmöglichkeiten eines SQUID erläutert. Es sollen dem Leser die Bedeutung und die neuen Möglichkeiten eines widerstandslosen Stromtransportes aufgezeigt werden und in dem Schlusswort wird hierzu eine Prognose gestellt.

2 Supraleiter Allgemein

2.1 Supraleiter Historik

Der erste supraleitende Zustand konnte 1911 von dem niederländischen Physiker Heike Kamerlingh Onnes^{[1][2]} (1853 - 1926) bei Quecksilber mit einer Temperatur von 4.2 Kelvin (-268,9 Grad Celsius) diagnostiziert werden. Dem vorausgegangen waren seine Arbeiten 3 Jahre zuvor zur Untersuchung des Verhaltens von realen Gasen bei extremen Bedingungen, welche das Ziel hatten, die *van der Waalsschen Theorien* zu überprüfen. Hierbei gelang es ihm erstmals Helium zu verflüssigen, welches in diesem Aggregatzustand ein sehr gutes, wenn auch ineffizientes¹, Kühlmedium für andere Stoffe bei 1.7 Kelvin² darstellt. Nachdem er genügend flüssiges Helium hergestellt hatte kühlte er verschiedene Elemente, um deren Verhalten bei Temperaturen nahe dem absoluten Nullpunkt (0 Kelvin) beobachten zu können. Hierbei bemerkte er den abrupten Abfall des elektrischen Widerstandes des Quecksilbers unter einen messbaren Wert und taufte das Phänomen auf den Namen „superconductive state“. Bereits 1913 erhielt er „für seine Untersuchungen der Eigenschaften von Materie bei tiefen Temperaturen, die unter anderem zur Herstellung von flüssigem Helium führten“ den Nobelpreis der Physik.

Schon um 1900 existierten Vorstellungen darüber, wie sich der elektrische Widerstand bei Temperaturen nahe dem absoluten Nullpunkt verhalten würde. Mit Gewissheit konnte man lediglich sagen, dass der Widerstand bei sinkender Temperatur linear abnimmt. Für sehr geringe Temperaturen gab es 3 gängige Vorstellungen:

- Lord Kelvin of Largs (1824 - 1907) glaubte, dass der Widerstand gegen

¹Aufgrund des enormen Aufwands und der hohen Kosten bei der Herstellung gilt Helium als ineffizientes, wenn auch gutes, Kühlmedium. Helium II besitzt zudem ein Kriechverhalten (siehe Suprafluidität) und läuft selbst bei kleinsten Öffnungen aus.

²Obwohl Helium eine Siedetemperatur von 4.22 Kelvin besitzt, konnte Onnes mithilfe einer Verminderung des Drucks eine Temperatur von 1.7^[3] Kelvin für das flüssige Helium erzielen. Dies war für damaligen Verhältnisse extrem nahe an dem absoluten Nullpunkt.

unendlich streben müsste, da die Elektronen bei solchen Temperaturen einen gefrorenen Zustand erreichen würden.

- Heinrich Friedrich Ludwig Matthiessen (1830 - 1906) war der Meinung, dass der Widerstand einen festen Grenzwert (Restwiderstand) erreichen würde.
- James Dewar (1842 - 1923) vermutete, der Widerstand würde weiter abnehmen und erst bei 0 Kelvin gänzlich verschwinden.

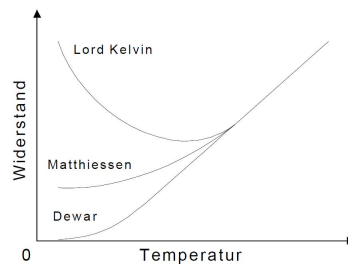


Abbildung 2.1: Vorstellungen des elektrischen Widerstandes bei tiefen Temperaturen um 1900.[3]

Nachdem 1911 durch Onnes der Werdegang der Supraleitung eingeläutet wurde, kam es zu fortwährenden Entdeckungen:

- 1938** Entdeckung der Suprafluidität durch Pjotr L. Kapiz (1894 - 1984). Nobelpreis 1978.
- 1950** Ginzburg-Landau-Theorie zur Beschreibung der makroskopischen Eigenschaften von Supraleitern. Nobelpreis 1962 (Landau) und 2003 (Ginzburg).
- 1957** Vorhersage von magnetischen Flussschläuchen in Supraleitern durch Alexei A. Abrikossow. Nobelpreis 2003.
- 1957** BCS-Theorie zur Beschreibung der mikroskopischen Eigenschaften von Supraleitern durch John Bardeen, Leon N. Cooper und John R. Schrieffer. Nobelpreis 1972.
- 1962** Entdeckung des „Josephson-Effektes“ durch Brian D. Josephson. Nobelpreis 2003.
- 1972** Theorie für die Suprafluidität in 3He von Anthony J. Leggett. Nobelpreis 2003.
- 1986** Johannes G. Bednorz und Karl A. Müller entdecken im April den ersten Hochtemperatur Supraleiter (HTSL). Es ist Lanthan-Barium-Kupferoxid mit einer Sprungtemperatur T_c von 35 Kelvin. Nobelpreis 1987.

Besonders hervorzuheben ist hierbei der 1972 vergebene Nobelpreis der Physik für die Begründer der BCS-Theorie, die 1957 von Bardeen, Cooper und Schrieffer aufgestellt wurde. Es war der erste für den Themenbereich der Supraleitung vergebene Nobelpreis. Im August 2005 wurde der weltweit erste Generator mit Hochtemperatur-Supraleitung im Systemprüfhaus für Großantriebe der Siemens AG in Nürnberg in Betrieb genommen. Der Generator leistet bei 3600 U/min ungefähr 4 MW.

Der aktuelle Rekord bei den HTSL liegt bei 135 Kelvin[4], also lediglich -135,15 Grad Celsius. Der Vorteil von Supraleitern mit solch hohen Sprungtemperaturen besteht darin, dass sie mit dem kostengünstigen Stickstoff gekühlt werden können. Dies hat zur Folge, dass Supraleiter in Zukunft eine zentrale Rolle innerhalb der Wirtschaft einnehmen werden. Dem stand bisher nur entgegen, dass sich HTSL aufgrund ihrer Porosität nicht zu verwendbaren Kabeln pressen ließen. Nach diversen Forschungen konnte die US-Firma American Superconductor Corporation allerdings verlauten lassen, dass sie in der Lage wären ein marktreifes Kabel herzustellen. Aufgrund dieser Meldung prognostizierte Experten bei einem Treffen zur Abschätzung des künftigen Marktvolumens einen Absatz der Hochtemperatur-Supraleiter von 150 bis 280 Milliarden Dollar im Jahr 2020.[5]

2.2 Meißner-Ochsenfeld-Effekt

Der Meißner-Ochsenfeld-Effekt (auch Meissner-Effekt) wurde 1933 von Walther Meißner (1882 - 1974) und Robert Ochsenfeld (1901 - 1993) vorgestellt und beschreibt die Eigenschaft eines Supraleiters beim Übergang in den supraleitenden Zustand (Meißner-Phase) die Feldlinien der magnetischen Induktion B eines äußeren Magnetfeldes aus seinem Inneren zu verdrängen:

Wie der obigen Abbildung zu entnehmen ist, kann das Magnetfeld den Supraleiter oberhalb der Sprungtemperatur T_c vollständig durchdringen. Ist die Temperatur gering genug, so wird das äußere Magnetfeld von dem Supraleiter bis auf eine dünne Schicht an der Oberfläche vollständig kompensiert. Innerhalb dieser dünnen Schicht (charakteristisch sind 10 - 100 nm) nimmt das Magnetfeld exponentiell ab. Sie wird auch als Londonsche Eindringtiefe bezeichnet und geht aus den London-Gleichungen hervor, die eine makroskopisch theoretische Erklärung für dieses Phänomen liefern, da es sich mit der Klassischen Physik nicht erklären lässt.

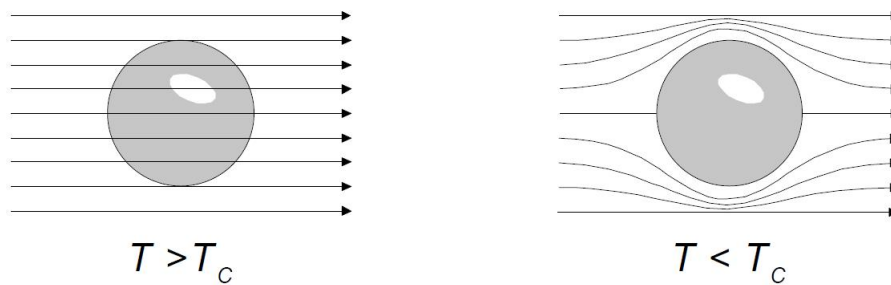


Abbildung 2.2: Unterhalb der Sprungtemperatur verdrängt eine supraleitende Probe die magnetischen Feldlinien aus seinem Inneren.[3]

2.2.1 Londonsche Eindringtiefe

Diese 1935 von den Brüdern Fritz (1900 - 1954) und Heinz London (1907 - 1970) entdeckte Eindringtiefe Λ ist dafür verantwortlich, dass das äußere Magnetfeld B_1 bis zu einer kritischen magnetischen Feldstärke H_c kompensiert wird. Sobald ein solches externes Magnetfeld an den, in der Meißner-Phase befindlichen, Supraleiter angelegt wird, so werden aufgrund des zunehmenden Magnetfeldes nach dem Faradayschen Induktionsgesetz Wirbelströme angeworfen. Diese wirken nach der Lenzschen Regel dem Erzeuger-Feld entgegen und sind aufgrund des fehlenden elektrischen Widerstandes Dauerströme, die auch als Abschirmströme bezeichnet werden. Diese Ströme induzieren erneut ein Magnetfeld B_2 , welches als Folge der Lenzschen Regel der Ursache entgegengerichtet ist und genauso stark wie B_1 ist. Dadurch, dass sich die beiden Magnetfelder nun ausgleichen lassen sich weitere Effekte feststellen:

Der Supraleiter ist vor einem Eindringen des vom Permanentmagneten ausgehenden Magnetfeldes geschützt, wenn dessen magnetische Feldstärke gering genug ist und dementsprechend $H < H_c$ gilt. Sobald man nun einen geeigneten Permanentmagnet in die Nähe des Supraleiters bewegt wird er aufgrund des „Feldliniepolders“ in einen stabilen Schwebezustand versetzt.

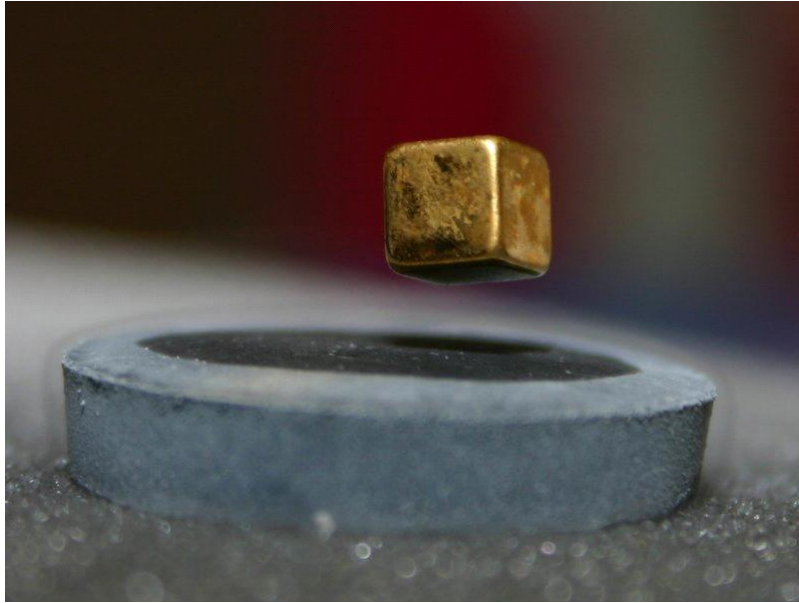


Abbildung 2.3: Ein Permanentmagnet levitiert³ über einem mit flüssigem Stickstoff gekühlten HTSL.

2.2.2 Diamagnetismus

Den bei dem Meißner-Ochsenfeld-Effekt auftretenden Zustand des Supraleiters, ein äußerlich angelegtes Magnetfeld beinahe vollständig aus seinem Inneren zu verdrängen (siehe Abb. 2.4), bezeichnet man als diamagnetisch. Ein solcher Zustand ist laut Definition gegeben, wenn die Dichte der Feldlinien eines angelegten Magnetfeldes in der Probe abnimmt. Unter Normalbedingungen ist das stärkste diamagnetische Element Bismut. Im Gegensatz zu diesem Element sind, in der Meißner-Phase befindliche, Supraleiter ideale Diamagneten. Das bedeutet es liegt eine magnetische Suszeptibilität⁴ von -1 vor. Zu diesem Schluss gelangt man, indem zuerst der allgemeine Sachverhalt mathematisch modelliert wird. Für das innere Feld B_i eines kompakten homogenen Supraleiters gilt hierbei:

$$B_i = \mu_0(M + H) \quad (2.1)$$

In der Meißner-Phase lässt sich nun beobachten, dass $B_i = 0$ gilt. Das bedeutet für die oben beschriebene Gleichung

$$M = -H \quad (2.2)$$

³Levitation (lat. levitas = Leichtigkeit) bezeichnet das freie Schweben eines Objektes. Dadurch, dass der Supraleiter in der Meißner-Phase ein idealer Diamagnet ist lässt sich eine stabile Gleichgewichtsposition des schwebenden Objekts aufbauen.

⁴Die magnetische Suszeptibilität (v. lat. susceptibilitas: „Übernahmefähigkeit“) gibt die Magnetisierbarkeit von Materie in einem von außen angelegten Magnetfeld an.

,da μ_0 die magnetische Feldkonstante ist und in seiner Funktion als Verhältnis der magnetischen Flussdichte zur magnetischen Feldstärke im Vakuum folglich nicht den Wert 0 annehmen kann. Für den Zusammenhang zwischen der einheitenlosen Verhältnisgröße χ (magnetische Suszeptibilität) und der magnetischen Feldstärke H gilt:

$$M = \chi H \quad (2.3)$$

Durch Einfügen von (2.3) in (2.1) ergibt sich

$$B_i = \mu_0 H (\chi + 1) \quad (2.4)$$

und dementsprechend $\chi = -1$.

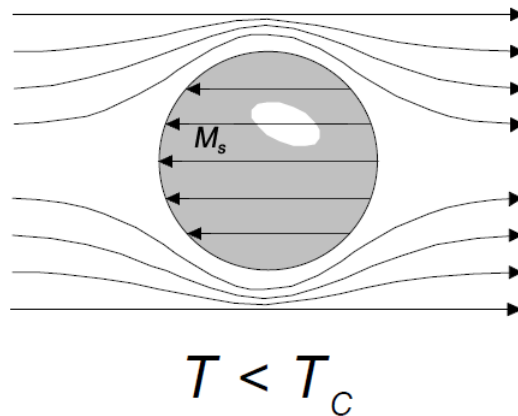


Abbildung 2.4: Im supraleitenden Zustand baut sich eine dem externen Magnetfeld entgegenwirkende Magnetisierung auf, die das äußere Magnetfeld im Inneren kompensiert[3].

2.3 BCS-Theorie

Die nach ihren Erfindern benannte BCS-Theorie ist eine Vielteilchentheorie⁵ und dient zur mikroskopischen Erklärung der Supraleitung innerhalb von Metallen. Bardeen, Cooper und Schrieffer erhielt für ihre Arbeiten 1972 den Nobelpreis der Physik.

Der Grundgedanke der BCS-Theorie basiert auf der Existenz von sogenannten Cooper-Paaren. Bewegt sich ein Leitungselektron mit dem Spin $s_e = \frac{1}{2}$ innerhalb eines metallischen Leiters so kommt es aufgrund der Coulombwechselwirkung mit den Ionenrümpfen des Metallgitters zu einer De-

⁵Eine quantenmechanische Beschreibung für das Verhalten eines Systems von mikroskopischen Teilchen[6].

formation des Gitters (ein solches System wird auch als Polaron bezeichnet). Als Folge wird lokal die positive Raumladungsdichte inkrementiert[7]. Da die Atomrümpfe in ihrer Bewegung im Gegensatz zu einem Elektron sehr träge sind kommt es bei entsprechend niedrigen Temperaturen ($T < T_c$) dazu, dass ein Elektron mit dem Spin $-\frac{1}{2}$ die positive Raumladungsdichte „bemerkt“ und in diese Furche einlenkt. Es kommt zu einem gebundenen Zustand: Ein Cooper-Paar ist entstanden.

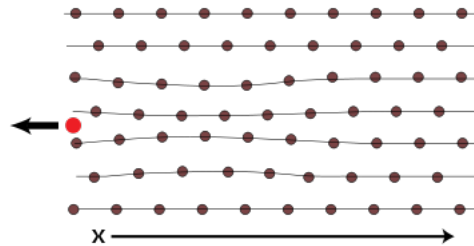


Abbildung 2.5: Das als roter Punkt dargestellte Elektron deformiert das Metall-Gitter[8].

Im Gegensatz zu einem Elektron, welches aufgrund eines halbzahligen Spins ein Fermion ist und deshalb dem Pauli-Prinzip unterliegt, besitzt ein Cooper-Paar einen ganzzahligen Spin und ist deshalb ein Boson, welches sich durch die Bose-Einstein Wellenfunktion beschreiben lässt. Der entscheidende Unterschied besteht hierbei darin, dass Bosonen am gleichen Ort alle den gleichen quantenmechanischen Zustand einnehmen können. Da ein gewisser Energieanteil der beiden Elektronen durch die Bindungsenergie zwischen ihnen „verloren“ geht, werden diese auf ein niedrigeres potentielles Energieniveau gebracht, als zwei ungebundene Valenzelektronen (dies lässt sich auch durch den Austausch eines virtuellen Phonons [Quanten der Gitterschwingungen] beschreiben). Dieser Grundzustand ist energetisch am günstigsten und wird von allen Cooper-Paaren eingenommen, deshalb lassen sich die Paare auch durch eine einzige Bose-Einstein Wellenfunktion beschreiben. Diese Wellenfunktion kann durch lokale Wechselwirkung mit dem Gitter nicht mehr beeinflusst werden, ohne dass es zu einer Veränderung des Quantenzustands kommt und als Resultat wird der widerstandslose Stromtransport ermöglicht.[9]

Tabelle 2.1: Vergleich der Eigenschaften von Elektron und Cooper-Paar.

	Elektron	Cooper-Paar
Teilchen Typ	Fermion	Boson
Spin	$\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}$	0
Masse	$m_e = 9,1094 * 10^{-31}$ kg	$2m_e$
Bindungsenergie	-	10^{-3} eV

2.4 Arten von Supraleitern

Obwohl sich bei allen bisher bekannten Supraleitern der Meißner-Ochsenfeld-Effekt nachweisen lässt und auch in dem Mechanismus der Supraleitung keine Unterschiede vorhanden sind, kann man bei ihnen aufgrund ihrer unterschiedlichen charakteristischen Magnetisierungskurven während des Meißner-Ochsenfeld-Effekts eine Typisierung vornehmen. Hierbei wird eine Unterteilung in Supraleiter 1. und 2. Art vorgenommen.

2.4.1 Supraleiter 1. Art

Die Magnetisierung nimmt bei diesem Typ mit wachsender Feldstärke zu, bis die temperaturabhängige, kritische Feldstärke H_c überschritten wird und schlagartig wieder der normalleitende Zustand eintritt[10]. Der Supraleiter ist nun nicht mehr magnetisierbar.

In den bisherigen Kapiteln wurden (ohne es explizit zu erwähnen) die Eigenschaften eines Supraleiters 1. Art beschrieben.

Abbildung 2.6 veranschaulicht diesen Sachverhalt[10]:

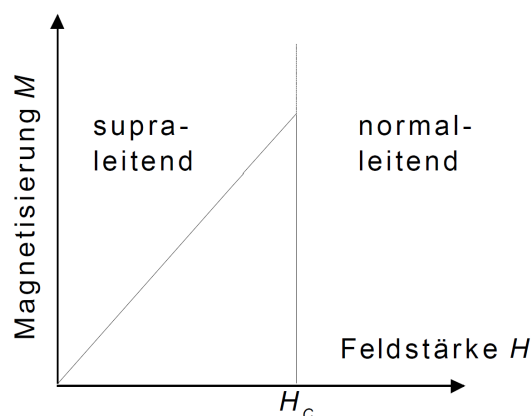


Abbildung 2.6: Im supraleitenden Zustand baut sich eine dem externen Magnetfeld entgegenwirkende Magnetisierung auf, die das äußere Magnetfeld im Inneren kompensiert.[3]

2.4.2 Supraleiter 2. Art

Supraleiter 2. Art unterscheiden sich in sofern von denen 1. Art, als sie nicht direkt bei einer kritischen Feldstärke H_c normalleitend werden und das Feld eindringen kann[3]. Hier verhält es sich so, dass bei einem Magnetfeld H_{c1} bereits das Feld nicht mehr komplett aus dem Supraleiter gedrängt wird, trotzdem aber noch ein Supraleitender Strom fließen kann(Shubnikov-Phase[3]). Erst wenn das Magnetfeld weiter auf einen kri-

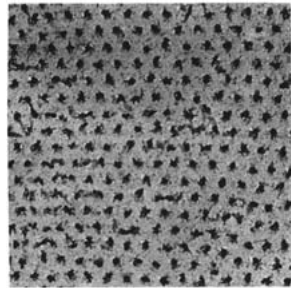


Abbildung 2.7: Markierung von Flussschläuchen auf einem Supraleiter durch ferromagnetische Partikel[7].

tischen Wert H_{c2} angehoben wird, bricht der Effekt der Supraleitung zusammen und das Magnetfeld kann vollständig eindringen. Zwischen diesen Feldstärken H_{c1} und H_{c2} treten sogenannte Flussschläuche auf. Durch diese dringt das Magnetfeld durch den Supraleiter. Dies kann man sich wie normalleitende Löcher im Supraleiter vorstellen, durch die sich die Feldlinien hindurchzwängen, die aber den supraleitenden Strom noch nicht verhindern. Die Flussschläuche werden durch die Induktion an der Oberfläche von einem Kreisstrom durch Cooper-Paare umgeben[3]. Diese Kreisströme können sich mit einem durch den Supraleiter geleiteten Strom überlagern. In den Tieftemperatur-Supraleitern jedoch hat dies keine Auswirkung. Bei Hochtemperatur-Supraleitern hingegen sind die Flussschläuche beweglich, wodurch sie sich bei einer Überlagerung verschieben. Diese Verschiebung benötigt Energie, die also verloren geht und einen Widerstand verursacht[3]. Nun besteht die Möglichkeit die Flussschläuche anzuheften[3], wobei die Supraleiter dotiert⁶ werden. Dies ermöglicht eine höhere Stromdichte im Supraleiter. Diese dotierten nennt man auch Supraleiter 3. Art[3].

⁶Verändern von Eigenschaften und des Kristallgitters durch das Einbringen von Fremdatomen

2.5 Hochtemperatur Supraleiter

Da die Kühlung mit flüssigem Helium sehr aufwendig und teuer ist, wurde nach neuen Stoffen geforscht. Um die Kühlung zu erleichtern und Kosten zu sparen, sollten die gesuchten Supraleiter möglichst oberhalb der Siedetemperatur von Stickstoff, die bei 77K liegt, bereits supraleitend werden. Der erste gefundene Hochtemperatursupraleiter hatte jedoch nur eine Sprungtemperatur von 35K. Trotzdem war die Entdeckung bedeutend und ermutigte zur Forschung nach weiteren Stoffen, die dann auch entdeckt wurden. Diese hohen Sprungtemperaturen wurden aber nicht bei Metallen, sondern bei Keramiken[11] gefunden, die also über ihrer kritischen Temperatur den elektrischen Strom überhaupt nicht leiten. In diesen Keramiken werden beim Übergang in den Supraleitenden Zustand genau wie bei metallischen Tieftemperatursupraleitern von den Elektronen Cooper-Paare gebildet. Trotz dieser Erkenntnis gilt der genaue Mechanismus als noch nicht erklärt.[3]

2.6 Kritische Temperatur

Ein Stoff wird erst ab einer kritischen Temperatur, die auch Sprungtemperatur genannt wird, supraleitend. Diese Temperatur variiert bei unterschiedlichen Stoffen und ist der Grund, weshalb nach neuen Supraleitern geforscht wird, die bei einer höheren Sprungtemperatur als die bisher bekannten Stoffe supraleitend werden. Der elektrische Widerstand nimmt beim Abkühlen zunächst zusammen mit der Temperatur ab, bis die Sprungtemperatur erreicht wird[11]. Bei dieser Temperatur „springt“ der Widerstand schlagartig auf einen unmessbar geringen Wert, was den Gedankengang widerlegt, der Widerstand würde langsam, vielleicht gleichmäßig abnehmen, bis er diesen Wert erreicht hätte. Zum Beispiel muss Quecksilber mit Helium auf unter 4,2K (-268,95°C) gekühlt werden, damit die Sprungtemperatur erreicht wird und der supraleitende Effekt eintritt. Für alle aktuell bekannten Supraleiter sind tiefe Temperaturen erforderlich. So benötigen alle Elemente des Periodensystems tiefe Temperaturen und somit Helium-Kühlung oder werden gar nicht supraleitend. Elemente wie Kupfer, welches in normalen Stromleitungen verwendet wird, als ein edleres Metall genau wie Gold und Silber, sowie Ferromagnete wie Eisen und Nickel werden nicht supraleitend, sondern behalten selbst bei sehr geringen Temperaturen einen Widerstand[11]. Wohingegen sogenannte Hochtemperatur-

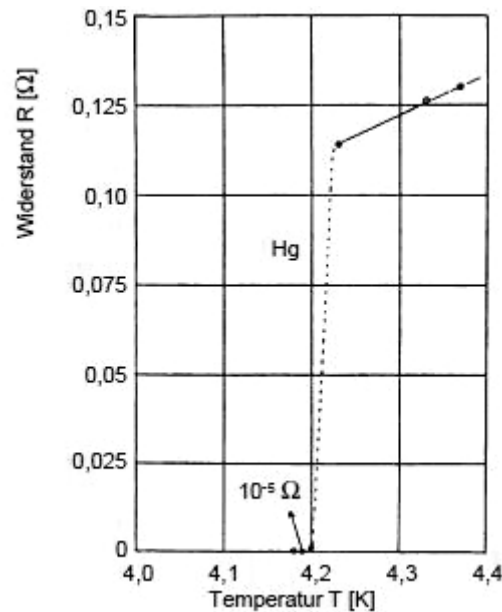


Abbildung 2.8: Sprungtemperatur von Quecksilber[12]

Supraleiter nur eine Kühlung mit flüssigem Stickstoff benötigen und der Effekt also über 77K eintritt. Der Temperaturrekord für diese liegt bei einer $Hg_xBa_xCa_xCu_xO_x$ -Verbindung mit 135K[4]. Jedoch gibt es bereits Forschungen zu Sprungtemperaturen über 200K, die aber bisher von keiner anderen Forschungsgruppe wiederholt wurde. Dieser Effekt tritt nur bei bestimmten Stoffverbindungen, nämlich Keramiken auf, die leider wegen ihrer Porosität schwer zu handhaben und nicht wie normale Kabel zu benutzen sind.

2.7 Kritische Feldstärke

Wird ein unter seine kritische Temperatur gekühlter Supraleiter einem Magnetfeld ausgesetzt, so werden im inneren sogenannte Abschirmströme angeworfen, die mit der Lenzschen Regel zu erklären sind: Die Ströme sind so gepolt, dass sie ein Magnetfeld erzeugen, das seiner Ursache entgegenwirkt.[13] Durch die supraleitende Eigenschaft fließen diese Ströme dauerhaft und schirmen den Supraleiter gegen das zugeführte Magnetfeld ab. Ab einer bestimmten Stärke des Magnetfelds bricht die Supraleitung schlagartig zusammen, also wird der Supraleiter wieder normalleitend mit einem Widerstand. Darum klingen die Abschirmströme ab und das Magnetfeld kann in den Leiter eindringen. Hierbei ist es egal, ob das kritische Magnetfeld H_c von außen zugeführt, oder durch den Supraleiter erzeugt wird. Daher begrenzt das Magnetfeld auch den Strom, der durch

den Supraleiter verlustfrei fließen kann, da durch einen Stromfluss ein Magnetfeld entsteht, das den supraleitenden Effekt wieder zerstören kann. [3] Wie stark das Magnetfeld sein muss, bis die Supraleitung zusammenbricht hängt vom Material, aus dem der Supraleiter besteht und von seiner Temperatur ab. Hier gilt folgender funktionaler Zusammenhang[3]:

$$H_c(T) = H_c(0) * [1 - (\frac{T}{T_c})^2] \quad (2.5)$$

Je tiefer die Temperatur unter der Sprungtemperatur liegt, desto stärker kann das abgeschirmte Magnetfeld sein. Die kritische Feldstärke $H_c(0)$ muss experimentell untersucht werden, da sie sich nicht über andere Faktoren berechnen lässt. Hochtemperatur-Supraleiter haben eine wesentlich höhere kritische Feldstärke H_c als Tieftemperatur-Supraleiter, die teilweise schon bei sehr geringen Magnetfeldern zusammenbrechen.

2.8 Kritische Stromdichte

Die kritische Stromdichte hängt sowohl mit der Temperatur als auch mit dem äußeren Magnetfeld zusammen. Ohne ein äußeres Magnetfeld und einer Temperatur nahe dem absoluten Nullpunkt von 0K kann der höchste Strom durch einen Supraleiter fließen. Zu beachten ist, dass der Stromfluss im Supraleiter seinerseits ein Magnetfeld erzeugt, das gegebenenfalls zu einem bestehenden äußeren Magnetfeld hinzugerechnet werden muss, denn beide Magnetfelder beeinflussen die maximale Stromdichte negativ. [3]

3 SQUID

Das Superconducting Quantum Inteference Device (kurz SQUID) ist ein Sensor für extrem kleine Magnetfelder, der auf den Effekten der Supraleitung basiert. Mit Hilfe eines SQUID können, unter Abschirmung des Erdmagnetfelds, Magnetfelder von wenigen Femotesla gemessen werden.

Zum Vergleich: Das Erdmagnetfeld hat eine Stärke von $30 - 60 \mu T$, was $10^{-6} T$ entspricht. Ein Femotesla hingegen sind $10^{-15} T$, was also um ein vielfaches kleiner ist als das Magnetfeld der Erde.

3.1 Aufbau

Das SQUID besteht aus einem ringförmigen Supraleiter, welcher je nach Bauweise für Gleichstrom von einem, für Wechselstrom von zwei Josephson-Kontakten unterbrochen ist. Es gibt sowohl Tieftemperatur-, als auch Hochtemperatur-SQUIDs, also können verschiedene Materialien zur Herstellung verwendet werden. Häufig findet man Niob als Material für Tieftemperatur-SQUIDs, welches bei einer Temperatur von $9,5 K$ supraleitend wird, weshalb eine Kühlung mit flüssigem Helium erforderlich ist.

3.2 Josephson-Effekt

Die Josephson-Kontakte sind sehr dünne Unterbrechungen des ringförmigen Supraleiters, aus dem das SQUID besteht. Diese Kontakte sind normalleitend, oder sogar elektrisch isolierend, können jedoch wegen ihrer Dicke von wenigen Nanometern, von den Cooper-Paaren im Supraleiter „durchtunnelt“ werden. Diese Kontakte werden von einem Strom durchflossen. Die von den Elektronen gebildeten Cooper-Paare lassen sich mit der Wellenfunktion beschreiben. An den Josephson-Kontakten sind diese Wellenfunktionen trotz der Unterbrechung schwach miteinander gekoppelt. Hierdurch wird ermöglicht, dass der Ring weiterhin supraleitend bleibt. In einem

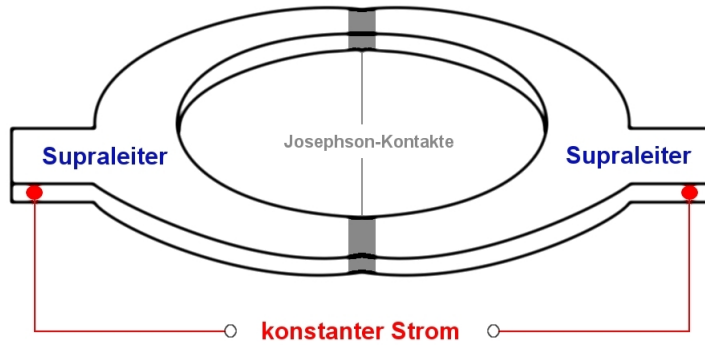


Abbildung 3.1: Wechselstrom-SQUID mit zwei Josephson-Kontakten

Supraleiter ist jedoch wegen des nicht messbaren Widerstands auch keine Spannung messbar. Wird der Strom am Kontakt nun aber über einen kritischen Wert erhöht brechen einige Cooper-Paare auf und der Strom fließt teilweise über Einzelelektronen, wie in einem normalen Leiter. Bei diesem Strom über Einzelelektronen herrscht jedoch ein Widerstand, was bewirkt, dass eine Spannung am Kontakt messbar ist, wenn der kritische Wert des Stroms überschritten wird. Dieser Strom wird durch ein äußeres Magnetfeld beeinflusst, da hierdurch im Supraleiter zusätzlich zu dem angelegten, konstanten Strom Abschirmströme entstehen.

Solange der Strom unter dem kritischen Wert I_c bleibt, lässt sich der supraleitende Strom I_s mit der ersten Josephson-Gleichung beschreiben:

$$I_s = I_c \sin(\Delta\varphi) \quad (3.1)$$

$\Delta\varphi$ ist hier die Phasendifferenz der beiden Wellenfunktionen der Cooper-Paare links und rechts vom Josephson-Kontakt. Ohne einen Strom an den Kontakten würden die Elektronenpaare in beide Richtungen durch den Kontakt fließen, sodass es zu einem Ausgleich kommt und der Strom letztendlich gleich null ist. Der Strom am Kontakt verursacht also eine Wellenverschiebung. Ist dieser Strom nun größer als I_c fällt durch das Aufbrechen der Cooper-Paare eine Spannung U ab, die in der zweiten Josephson-Gleichung eine Rolle spielt:

$$\frac{\partial \Delta\varphi}{\partial t} = \frac{2\pi}{\Phi_0} U \quad (3.2)$$

Φ_0 ist das magnetische Flussquantum, dass sich aus einer Naturkonstante, nämlich dem Plankschen Wirkungsquantum h , und der Elementarladung e mit $\Phi_0 = \frac{h}{2e}$ zusammensetzt. Die sich ständig ändernde Phasendifferenz φ

ist nun Abhängig von der Zeit. Kombiniert man nun diese zwei Gleichungen erhält man die Frequenz der Änderung, die Josephson-Frequenz f_J :

$$f_J = \frac{2eU}{h} \quad (3.3)$$

Da sich die Frequenz bis auf die Spannung nur aus Konstanten zusammensetzt, kann man nun jeder Spannung eine Frequenz zuordnen. Diese Frequenz ist bei der minimalen Spannung von nur $1\mu V$ bereits $483,6 MHz$ [14]

3.3 Anwendungen

SQUIDs können vielfach angewandt werden um extrem kleine Magnetfelder zu messen. Die Erfindung der Hochtemperatur-Supraleiter begünstigt die Anwendung noch, da mit einer Stickstoffkühlung Kosten gespart werden können. So können SQUIDs beispielsweise in der Medizin genutzt werden, um Herz-, Nerven-, und Gehirnaktivitäten zu messen[3]. Hierbei sind SQUIDs nicht nur genauer, sondern auch leichter zu handhaben als das bekannte EKG¹. Das SQUID lässt sich nicht durch verschiedene Gewebeararten und deren Leitfähigkeit im Körper beeinflussen, da er zum Messen der Herzströme einfach wenige Centimeter über dem bekleideten Brustkorb angebracht wird. Lediglich das Problem von Störmagnetfeldern ergibt sich, da für eine genaue Messung wie diese sogar das Erdmagnetfeld abgeschirmt werden muss und metallische Gegenstände vom Körper entfernt werden müssen.

Weiterhin ist es mit einem SQUID möglich, sehr präzise Fehler in verschiedenen Werkstoffen wie Metallen, Keramiken und beschichteten Gläsern[15]. So werden nicht nur kleine Risse, sondern auch Inhomogenitäten² entdeckt. Diese extrem genauen Prüfungen sind für Flugzeuge, Kraftwerke[3], oder auch spezieller: Teilchenbeschleuniger[15] notwendig.

¹Elektrokardiographie: Messverfahren zur Herzaktivität, bei dem über Elektroden elektrische Impulse gemessen werden

²Inhomogen bezeichnet eine Ungleichheit. Diese tritt auf, wenn Eigenschaften, wie die Masse, in Stoffen ungleich verteilt sind.

4 Aussicht

Mit Hilfe von SQUID-Sensoren hat die Messtechnik ein neues Maß an Präzision und Geschwindigkeit erreicht, was in vielen Bereichen einen enormen Fortschritt darstellt. Außerdem wurde mit der Entwicklung der Hochtemperatur-Supraleiter und SQUIDs schon einiges an Verbesserung der Technik getan. Die Anwendung der SQUIDs wird somit immer simpler und günstiger, sodass die Technik in der Zukunft immer mehr Beachtung findet, weiter erforscht und auf neuen Gebieten verwendet wird. Die Tatsache, dass für die Entdeckungen rund um die Supraleitung bereits einige Nobelpreise der Physik vergeben wurden, zeigt ebenso die Bedeutung dieses Bereichs. So wäre es fantastisch eine Möglichkeit zu haben, elektrische Energie ohne Verluste transportieren zu können, denn selbst bei heutigen Stromleitungen geht eine beachtliche Menge an Energie auf dem Weg vom Kraftwerk zu den Haushalten verloren. So gibt es bereits Pilotprojekte, in denen Supraleiter verwendet werden um ein Gebäude mit Energie zu versorgen.

Dies alles ist ein Zeichen dafür, dass auf Supraleitern basierende Techniken in der Zukunft immer größere Aufmerksamkeit finden werden. Die neu eröffneten Möglichkeiten werden immer effizienter genutzt und weiterentwickelt.

Trotzdem darf man die noch bestehenden Probleme nicht vergessen, die überwunden werden müssen. Zum Beispiel benötigt man für die Kühlung durch flüssigen Stickstoff ein gutes, effizientes System, obwohl der Schritt von Helium zu Stickstoff schon einen gewaltigen Fortschritt darstellt.

Alles in allem wird die Forschung auf diesem Gebiet weitergehen und versuchen neue Möglichkeiten zu schaffen und bestehende Probleme zu überwinden. In nächster Zukunft ist es allerdings unwahrscheinlich alle Aspekte klären zu können und Supraleiter für den „Hausgebrauch“ tauglich zu machen.

Literaturverzeichnis

- [1] Sabine Nick, Christian Näther, Patrick Hollmann, Lars Büll, Astrid Lengert, Gerda Ledwig: *Geschichte der Supraleitung*. http://www.mmch.uni-kiel.de/Supraleiter/Folien/Geschichte/geschichte_von_supraleitern.pdf (2007).
- [2] Nobel Lectures, Physics 1901-1921: *Heike Kamerlingh Onnes - The Nobel Prize in Physics 1913: Biography* . http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1913/onnes-bio.html, 1967.
- [3] Michael Kathke : *Supraleitung*. <http://theory.gsi.de/~vanhees/faq-pdf/supraleitung.pdf> (7.6.1999).
- [4] Welt der Physik - Deutsche Physikalische Gesellschaft e.V.: *Hochtemperatursupraleiter*. <http://www.weltderphysik.de/de/1437.php> (16.03.2002).
- [5] Der Spiegel: *Supraleiter - Frostige Rekorde*. <http://www.spiegel.de/spiegel/print/d-13692604.html> (25.10.1993).
- [6] Andrej Postnikov : *Vielteilchentheorie* . <http://www.home.uni-osnabrueck.de/apostnik/Lectures/VielTT.pdf> (11.03.2005).
- [7] Dr. Manfred Deicher, Dr. Patrick Huber : *Physikalisches Grundpraktikum für Physiker/innen Teil III - Supraleitung* . <http://grundpraktikum.physik.uni-saarland.de/scripts/supraleitung.pdf> (10.05.2001).
- [8] ComputerBase : *BCS-Theorie* . <http://www.computerbase.de/lexikon/BCS-Theorie> (30.09.2009).
- [9] Prof. Dr. Rüdiger Erbrecht, Mathias Felsch, Dr. Hubert König, Dr. Wolfgang Kricke, Karlheinz Martin, Wolfgang Pfeil, Dr. Rolf Winter, Willi Wörstenfeld : *Das große Tafelwerk - interaktiv* . Cornelsen Verlag, Berlin, 2008.
- [10] Prof. Dr. M. Grunze, Prof. (apl.) Dr. R. Dahint: *Physikalisch-Chemisches Fortgeschrittenenpraktikum*. http://www.pci.uni-heidelberg.de/apc/pcf/PCF_V12.pdf (03.02.2010).

- [11] Christian Enss, Siegfried Hunklinger: *Tieftemperaturphysik*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1. Auflage, 2000.
- [12] Institute of Product Engineering: *Metallkunde und Metallphysik - Kapitel 8 - Physikalische Eigenschaften*. http://www.uni-due.de/imperia/md/content/werkstofftechnik/sk_metphys_08_ss09.pdf (29.1.2010).
- [13] Prof. Dr. H. Kinder : *Skriptum zur Vorlesung Supraleitung und Tieftemperaturphysik*. <http://www.physik.tu-muenchen.de/lehrstuehle/E10/Dateien/skript/111199.pdf> (11.11.1999). <http://einrichtungen.physik.tu-muenchen.de/E10/Dateien/skript.html>.
- [14] Benjamin Seeber, Thierry Fredrich : *SQUID - Superconducting Quantum Inteference Device*. <http://www.physik.uni-freiburg.de/~holyg/fp/squid.pdf> (4.3.2009).
- [15] wsk Mess- und Datentechnik GmbH: *Produktinformation SQUID*. <http://www.wsk.de/squid/download/ProduktinformationSQUID.pdf>.