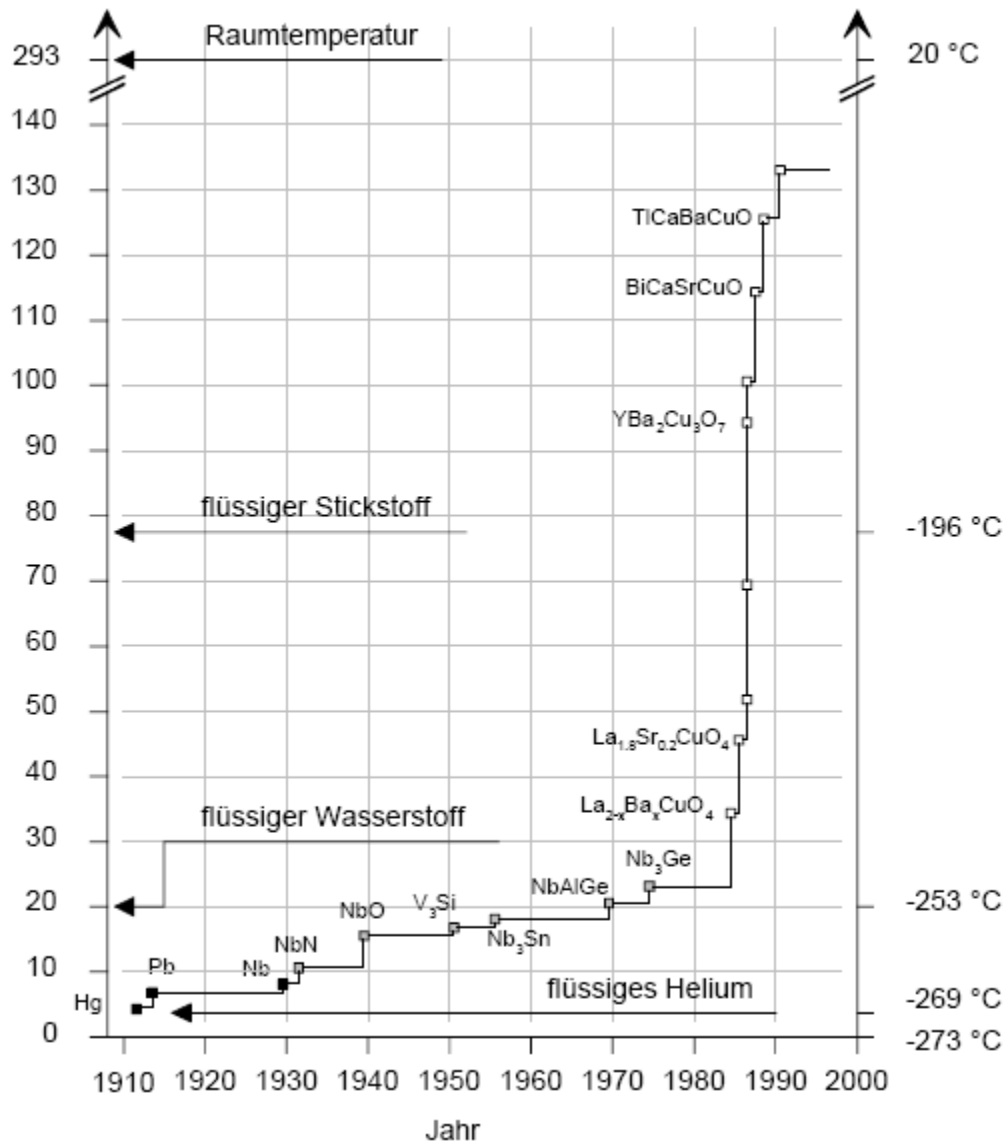


Julian Riedelsheimer

# Facharbeit

## Supraleitung

### Praktischer Teil: Messung der Sprungtemperatur eines High Tc



## Facharbeit

aus dem Fach

Physik

Thema: Supraleitung und Messung der Sprungtemperatur eines  
Hochtemperatursupraleiters

Verfasser: Julian Riedelsheimer

Leistungskurs: Physik Nr. 1

Kursleiter: Herr Halla

Abgabetermin: 25. Januar 2008

Erzielte Note:..... in Worten:.....

Erzielte Punkte:..... in Worten:.....

(einfache Wertung)

Abgabe bei Kollegstufenbetreuer am

2008

.....

(Unterschrift des Kursleiters)

# Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung.....	3
2 Stromfluss im Leiter.....	3
2.1 Erste Überlegung zur Erklärung der Leitfähigkeit von Festkörpern.....	3
2.2 Die quantenmechanische Betrachtung.....	5
3 Supraleitung.....	8
3.1 Geschichte.....	8
3.2 Verschwindender Widerstand.....	9
3.3 Erste Modelle.....	10
3.4 BCS-Theorie.....	11
3.5 Meißner-Ochsenfeld-Effekt.....	14
3.6 Verschiedene Arten von Supraleitern.....	15
3.6.1 Supraleiter 1. Art.....	15
3.6.2 Supraleiter 2. Art.....	15
3.6.3 Supraleiter 3. Art.....	16
3.6.4 Hochtemperatur-Supraleiter(High-Tcs).....	17
4 Versuch: Messung der Sprungtemperatur eines Hochtemperatursupraleiters.....	18
4.1 Versuchsaufbau.....	18
4.1.1 Supraleiter und Pt100 Widerstand.....	20
4.1.2 4-Punkt Messung.....	21
4.1.3 LabVIEW.....	21
4.1.4 Sonstiges.....	22
4.2 Durchführung des Versuchs.....	23
4.3 Auswertung und Interpretation.....	24
5 Verwendungsmöglichkeiten von Supraleitern in der Industrie.....	25
5.1 Widerstandsloser Stromtransport.....	25
5.2 Erzeugung starker Magnetfelder.....	26
5.3 Motoren und Generatoren.....	26
5.4 Selbst stabilisierende Magnetlager.....	27
5.5 SQUIDS.....	27
6 Schlusswort.....	27

7 Literaturverzeichnis.....	29
7.1 Quellenverzeichnis.....	29
7.2 Sekundärliteratur.....	30
7.3 Abbildungsverzeichnis.....	30
8 Anhang.....	31
9 Anlagen.....	31
10 Erklärung des Verfassers.....	38

# 1 Einleitung

In dieser Facharbeit werden zunächst die theoretischen Grundlagen gelegt, um das Phänomen der Supraleitung zu verstehen. Des Weiteren wird ein Versuch zur Messung der Sprungtemperatur eines Hochtemperatursupraleiters durchgeführt und eine Temperatur-Widerstand-Kurve (T-R-Kurve) aufgezeichnet.

Zuerst wird erklärt, wie man sich den Stromfluss in Leitern allgemein vorstellt, um dann auf die Supraleiter einzugehen. Es wird eine Theorie erläutert, die das Phänomen erklärt, und daraufhin werden verschiedene Arten von Supraleitern beschrieben. Nachdem die Grundlagen erläutert sind, wird der Versuch beschrieben und durchgeführt. Am Ende wird noch ein kurzer Ausblick über die heutigen Verwendungsmöglichkeiten von Supraleitern gegeben.

## 2 Stromfluss im Leiter

### 2.1 Erste Überlegung zur Erklärung der Leitfähigkeit von Festkörpern

Nach der Entdeckung des Elektrons durch J. J. Thomsons (1879) entwickelte Drude ein Modell, welches das Verhalten von Elektronen in Metallen vereinfacht beschreibt. Hierfür nahm er die Vorstellung eines idealen Gases als Basis, welches bis dahin bereits zur Erklärung vieler thermodynamischer Vorgänge benutzt wurde.

Jedes Atom besitzt fest an den Rumpf gebundene, und damit lokalisierte Elektronen und einige Valenzelektronen, meist ein bis drei. Diese werden zu Leitungselektronen. Sie sind im Metall frei beweglich und damit für die elektrische Leitfähigkeit, aber auch für die Wärmeleitfähigkeit und den Glanz der metallischen Oberflächen, sprich die charakteristischen Eigenschaften des Metalls verantwortlich.

Dieses Drude Modell ist stark vereinfacht, da hierbei die Wechselwirkungen der Elektronen untereinander und die Wechselwirkungen der Elektronen mit den Atomrümpfen vernachlässigt werden, jedoch erklärt es einige Zustände der Metalle. Hinzu kommt, dass sich

die Elektronen wie ungeladene freie Gasteilchen verhalten. Sie bewegen sich also zwischen den Stößen unabhängig. Ein Maß für den zurückgelegten Weg zwischen den Stößen ist die „mittlere freie Weglänge“, auch Relaxationszeit genannt. Die Stöße erfolgen in unendlich kurzer Zeit, sind voll elastisch, und das Elektron bewegt sich mit einer kinetischen Energie weiter, die der thermischen Energie am Ort des Stoßes entspricht. Die Stöße sind also von der Temperatur des Kristalls abhängig. Außerdem sind Stöße unter den Elektronen extrem selten und finden meist mit den Ionenrümpfen statt.

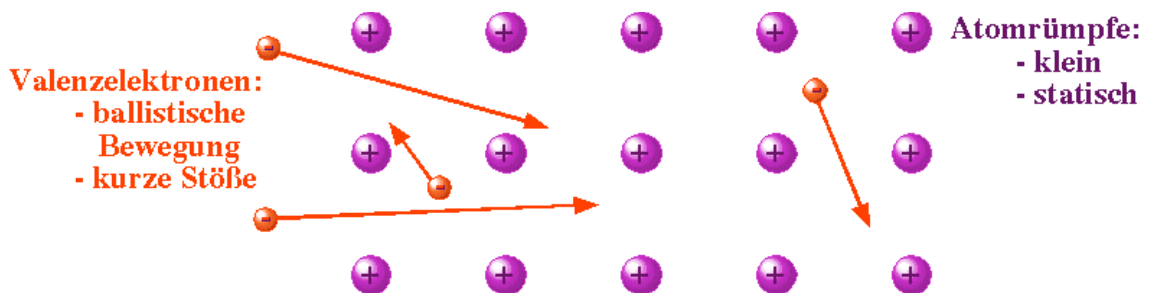


Abbildung 1: Freie Elektronen im Atomgitter

Mit diesem Modell konnte Drude Sachverhalte wie das Ohmsche Gesetz und den Zusammenhang zwischen elektrischer und thermischer Leitfähigkeit beschreiben.

Durch ein angelegtes elektrisches Feld erfahren diese eine Kraft, die sie in eine Richtung beschleunigt. Nach kurzer Zeit stellt sich jedoch ein Gleichgewicht ein. Die Elektronen werden durch die Stöße mit den Rumpf-Ionen abgelenkt und damit abgebremst. Bei steigender Temperatur des Kristalls sinkt die Relaxationszeit, da sich die Atome des Kristalls stärker bewegen und die Wahrscheinlichkeit eines Zusammenstoßes somit erhöhen und damit auch die elektrische Leitfähigkeit des Kristalls senken.

Das Drude Modell bereitet jedoch auch einige Probleme, da es nicht alle experimentell beobachteten Tatsachen beschreiben kann. Nach Drudes Modell würde man eine relativ große Anzahl von Stößen mit den Gitteratomen erwarten. Je nach Wahl des Kristalls und der Temperatur kommt es jedoch sogar vor, dass die mittlere freie Weglänge und die Relaxationszeit größer als die Kristalldimension werden. In Experimenten wurden Kristalle mit bis zu einem Zentimeter mittlerer Weglänge gefunden. Die Elektronen bewegen sich in diesem Falls also durch  $10^8$  Atomschichten ohne gestreut zu werden.

## 2.2 Die quantenmechanische Betrachtung

Wenn man dieses Modell nun quantenmechanisch betrachtet und den Elektronen Wellencharakter zuspricht, ergibt sich, dass die Elektronen nicht jede Energie annehmen können, sondern nur diskrete Energiezustände.

Elektronen sind nach dem Sommerfeld Modell Fermionen, Teilchen mit halbzahligem Spin - Teilchen mit ganzzahligem Spin werden Bosonen genannt - und werden nach dem Prinzip, das von Wolfgang Pauli (1924) formuliert worden ist, dem Pauli Prinzip, aufgefüllt. Das Pauli Prinzip besagt, dass Fermionen in nicht allen Quantenzahlen übereinstimmen dürfen. Hierbei sind die relevanten Quantenzahlen der Elektronen beim Atom die Haupt- und Nebenquantenzahl, welche die Haupt- und Unterschale des Elektrons angeben, die Spinquantenzahl, welche die Spinrichtung angibt und die magnetische Quantenzahl.

Die Hauptschalen werden von unten nach oben durchnummeriert von 1 an beginnend jeweils mit steigender Energie. Auf diesen Energiestufen gibt es dann Orbitale die sich von ihrer Wahrscheinlichkeitswelle unterscheiden und auch in geringem Maße von ihrer Energie. Diese werden mit der Nebenquantenzahlen s, p, d und f benannt. Die erste Energiestufe mit  $n=1$  besteht zum Beispiel aus einem s-Orbital (Nebenquantenzahl: s) und beherbergt zwei Elektronen, jeweils mit unterschiedlichem Spin. Nach dem Pauli Prinzip werden die Energiezustände nun von unten nach oben (vom energieärmsten bis zur Fermieenergie  $E_F$ ) aufgefüllt. Anregungen können nur mit den obersten Elektronen passieren. Damit ist die Anzahl der Elektronen, die an der elektrischen Leitung beteiligt sind, viel geringer.

Stellt man sich einen Kristall vor, dann überlappen sich dort N-Atomorbitale und bilden N-Molekülorbitale, die sich über den ganzen Kristall erstrecken. Dabei entstehen energiearme, bindende Molekülorbitale und energiereiche, anti-bindende und damit auch weiter entfernte Molekülorbitale. Hierbei können sich nur Atomorbitale gleicher Energieniveaus überlappen. Diese bilden genauso viele Molekülorbitale, jedoch mit geringfügigem Energieunterschied. Diese Gesamtheit der Molekülorbitale eines Energieniveaus nennt man ein Energieband. Das oberste aufgefüllte Energieband nennt man Valenzband. Die obersten nicht komplett aufgefüllten Energieniveaus werden Leitungsband genannt. Valenzband und Leitungsband können auch das selbe Band sein. Durch die Wanderung der Elektronen in andere Energieniveaus (Energiebänder) wird ermöglicht, dass Strom fließt.

Dies soll am Beispiel zweier Li-Atome erläutert werden. Dort bilden die zwei energiearmen 1s Orbitale, zwei Molekülorbitale gleicher Energie, da sie sich aufgrund ihrer Größe nicht überlappen. Sie bilden ein Energieband. Die beiden 2s-Orbitale (Orbital der zweiten

Energieniveaus) bilden zwei Molekülorbitale, ein energieärmeres -also bindendes- mit zwei Elektronen besetztes s-Orbital und ein energiereicheres, anti bindendes, leeres s\*-Orbital. Nimmt man nun ein drittes Li-Atom dazu, bilden sich drei Energieniveaus, ein energiereiches anti bindendes, ein nicht bindendes mit gleich bleibender Energie und ein energieärmeres bindendes Molekülorbital. Je mehr Atome man nun hinzu fügt, desto mehr immer näher beieinander liegende Molekülorbitale erhält man. Diese bilden ebenfalls ein Energieband.

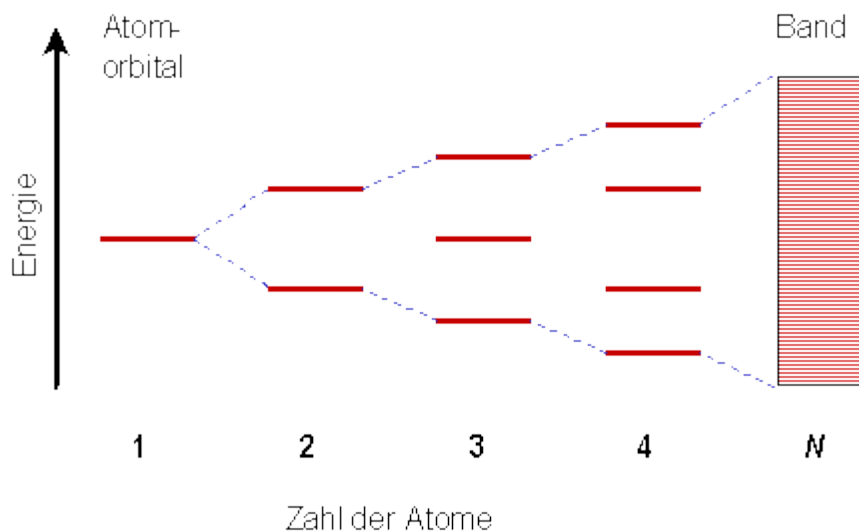


Abbildung 2: Energiebandmodell

Ein Leiter wird dadurch gekennzeichnet, dass die Fermieenergie in ein erlaubtes Energieband (Leitungsband) fällt, was bedeutet, dass dieses Band nur teilweise aufgefüllt wird. Es ist ebenfalls ein Leiter, falls die Fermieenergie ein erlaubtes Band vollständig auffüllt, das Leitungsband jedoch mit dem vollen Valenzband überlappt, so dass die Elektronen immer noch andere Energieniveaus annehmen können.

Dies ist zum Beispiel beim Beryllium der Fall. Die vier Elektronen der beiden 2s-Orbitale besetzen nicht nur das energetisch günstigere s-Orbital sondern ebenfalls das energiereichere anti bindende s\*-Orbital. Die Molekülorbitale des Valenzbandes sind demnach voll besetzt und somit könnte Beryllium nicht leiten. Beryllium besitzt jedoch auch noch das energetisch höhere 2-p Orbital, welches ebenfalls Molekülorbitale bildet. Diese bilden wiederum ein Band (Leitungsband), welches sich mit dem 2s-Band(Valenzband) überlappt. Nun ist es den Elektronen möglich, aufgrund von Energiezufuhr in ein anderes Energieband zu springen und somit Strom zu leiten.



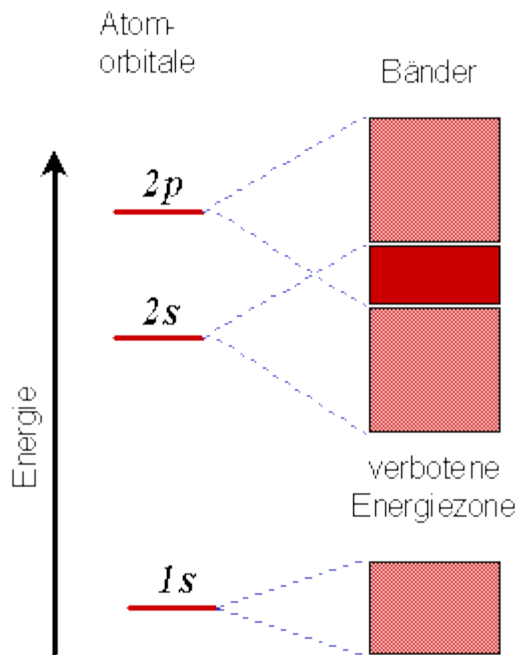


Abbildung 3: Bändermodell am Beispiel Beryllium

Ein Kristall ist dann ein Isolator, wenn die Fermieenergie zwischen den erlaubten Bändern liegt, also ein Band komplett füllt und die Lücke zwischen dem Valenzband und dem Leitungsband zu groß ist, um durch thermische Energie überwunden zu werden.

Kann diese Lücke jedoch von thermischen Anregungen überwunden werden ist der Kristall ein Halbleiter. Dadurch entstehen so genannte Löcher im Valenzband. Diese Löcher verhalten sich wie positive Elektronen und tragen zusätzlich dazu bei, dass nun andere Elektronen des Valenzbandes springen können, sprich ihre Energie ändern können. Durch höhere Temperaturen und den daraus folgenden höheren thermischen Anregungen wird der Sprung der Elektronen ins Leitungsband bevorzugt und somit die Leitungsfähigkeit des Kristalls erhöht. Dies erklärt, warum Halbleiter bei höheren Temperaturen besser leiten.

Die Entstehung des Widerstands lässt sich mit diesem Modell ebenfalls erklären. Durch Wechselwirkungen mit den Atomrümpfen werden die Elektronen gestreut. Dies geschieht jedoch nicht mehr über Stöße an den Gitteratomen wie beim klassischen Modell, da die Elektronen diskrete Energien haben und sich somit nicht mehr frei durch das Kristallgitter bewegen können. Die Elektronen bilden stattdessen mit den positiven Atomrümpfen ein Potenzial. Je weiter außen die Elektronen liegen, desto größer ist ihr Potenzial. Zwischen den Atomrümpfen ist es ebenfalls größer als bei den Atomrümpfen. Durch thermische Störungen, Fehler im Gitteraufbau oder Fremdatome werden diese Potenziale gestört und die Elektronen gestreut. Dies erklärt auch die Temperaturabhängigkeit des Widerstands.

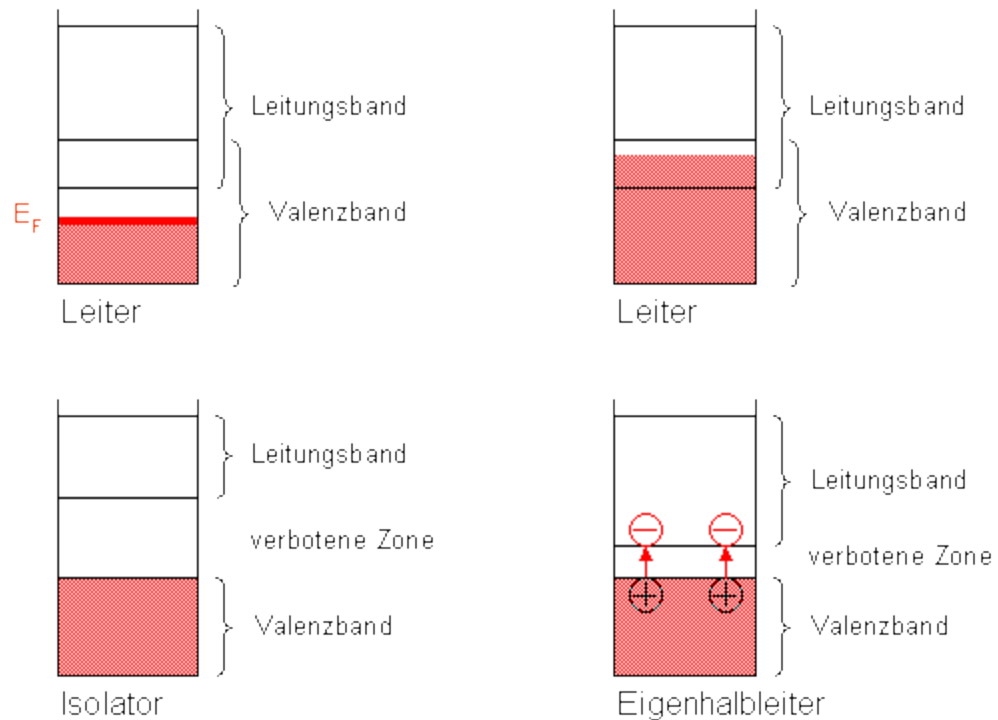


Abbildung 4: Erläuterung Leiter, Isolator und Halbleiter

Damit wurden alle Wechselwirkungen bis auf die der Elektronen untereinander berücksichtigt. Diese stoßen sich aber bekanntlicher weise ab. Eine unendlich hohe elektrische Leitfähigkeit ist mit diesem Modell undenkbar, da man aufgrund der thermischen Anregung nie einen vollends reinen Kristall bekommen kann, einen Kristall ohne jegliche Störungen, außer bei  $T = 0$  K. Und dann würde man immer noch einen Restwiderstand messen, der auf Kristallfehler zurückzuführen ist.

### 3 Supraleitung

#### 3.1 Geschichte

1911 entdeckte Kamerlingh Onnes, dass bei der Abkühlung von Quecksilber unter 4,2 K der Widerstand unmessbar kleine Werte annimmt. Diese Erscheinung, welche beim Abkühlen einiger Materialien unter einer bestimmten Temperatur  $T_c$  auftritt, trägt den Namen Supraleitung. Es dauerte auch noch einige Zeit, bis erste theoretische Modelle ansatzweise das Phänomen der Supraleitung erklärten.

Zunächst wurde versucht, durch die Erweiterung der Maxwell'schen und thermodynamischen Theorien die Supraleitung zu erklären. 1935 gab es dann den ersten standfesten Ansatz von Fritz und Heinz London. Zwei russischen Physikern gelang es dann 1949 alle grundlegenden Erscheinungen ansatzweise zu erläutern. Auf dieser Theorie basierend entwickelten 1957 Bardeen, Cooper und Schrieffer die nach ihnen benannte BCS-Theorie, welche später genauer geschildert wird, um das Phänomen Supraleitung quantenmechanisch zu erklären. Zuletzt gelang es 1960 dann Ginzburg, Landau, Abrikosow und Gorkow, die Gesetzmäßigkeiten der Supraleiter 2. Art in der GLAG Theorie herzuleiten.



Abbildung 5: Heike Kamerlingh Onnes

### 3.2 Verschwindender Widerstand

Schon relativ bald stellte sich die Frage, wie groß die Widerstandsabnahme tatsächlich beträgt und ob man wirklich von einem Verschwinden des Widerstands reden kann. Zur Messung des Widerstands der Supraleitung wurde nach traditioneller Methode bei einem festen Stromfluss durch den Kristall der Spannungsabfall gemessen. Dabei konnte man jedoch nur feststellen, dass der Widerstand unmessbar klein wurde. Damit kann nur gesagt werden, dass der Widerstand unter die Empfindlichkeitsgrenze der Messung ging und damit nicht mehr angezeigt werden konnte. Von einem Verschwinden des Widerstands konnte man deshalb noch nicht ausgehen.

Aus diesem Grund verwendete man eine Messanordnung, um das Abklingen des Stroms zu messen. Dies ist die beste Methode, um möglichst kleine Widerstände wahrzunehmen. Falls ein Widerstand vorhanden ist, wird durch den Energieabfall am Widerstand Joulesche Wärme frei und der Stromfluss klingt langsam aus. Diese Methode wurde auch schon 1911 von Kamerlingh Onnes verwendet und ist um einige Zehnerpotenzen empfindlicher als die übliche Strom-Spannungsmessung.

Für das Experiment wird ein Ring aus supraleitendem Material von einem Magnetfeld durchsetzt. Dann wird der Ring unter die Temperatur  $T_c$  abgekühlt, für die der Ring nun

supraleitend ist. Durch die Änderung(Entfernung) des Magnetfelds wird eine Induktionsspannung induziert, die einen Induktionsstrom im Ring verursacht. Die Stärke des entstandenen Dauerstroms wird dabei zum Beispiel mit einer Magnetnadel beobachtet. Dabei wird einfach die Auslenkung der Magnetnadel durch den Dauerstrom gemessen. Sollte nun der Widerstand bei einer Supraleitung tatsächlich verschwinden, dann sollte der Stromfluss im Ring unverändert fließen, sofern die Temperatur des Ringes gleich bleibt. Es entsteht ein so genannter „Dauerstrom“. Sollte dies jedoch nicht der Fall sein, dann müsste der Strom nach dem Exponentialgesetz  $I(t) = I_0 \cdot e^{-(R/L) \cdot t}$  abklingen.  $I_0$  ist dabei der Stromfluss zur Startzeit der Messung,  $R$  der Widerstand des Rings und  $L$  die Induktivität.

Bei einem Drahtling von 1 mm Dicke und 5 cm Durchmesser und einem Abklingen des Dauerstromes innerhalb einer Stunde um weniger als 1 Prozent muss der Widerstand kleiner sein als  $4 \cdot 10^{-13} \Omega$ . Das wiederum bedeutet eine Widerstandsänderung beim Übergang zur Supraleitung von mehr als 8 Zehnerpotenzen. Mittlerweile wurde durch empfindlichere supraleitende Magnetfeldmesser gezeigt, dass der Widerstand bei Unterschreiten der Temperatur  $T_c$  um mindestens 14 Zehnerpotenzen kleiner wird. Dieser Sprung ist mindestens so groß wie der Sprung von Kupfer zu gängigen Isolatoren. Damit kann man nun sagen, dass der elektrische Widerstand bei Eintritt zur Supraleitung verschwindet.

### 3.3 Erste Modelle

Aufgrund der auffallenden Änderung der elektrischen Leitfähigkeit und der magnetischen Eigenschaften kam man sehr bald darauf, dass es sich um einen Vorgang mit den Leitungselektronen handeln muss. Die Elektronen besitzen aufgrund des Pauli-Prinzips auch bei niedrigen Temperaturen hohe Energien von bis zu einigen eV, wobei ein eV schon einer mittleren thermischen Energie von 11 000 Kelvin entspricht. Die Supraleitung muss also durch Wechselwirkungen zustande kommen, die ungeachtet der hohen Energien wirken.

1947 dachte Heisenberg, dass durch die Coulombwechselwirkungen der Elektronen untereinander es zu einer räumlichen Anordnung dieser im Gitter kommt. 1927 kam Welker auf die Idee, dass auch eine magnetische Wechselwirkung denkbar wäre. Da Elektronen nahe der Fermieenergie eine Geschwindigkeit von bis zu einem Prozent der Lichtgeschwindigkeit erreichen können, könnten diese durch die entstehenden Ströme und dem damit entstehenden Magnetfeld wechselwirken. Doch all diese Modelle ergaben keine befriedigenden Antworten. Erst als Fröhlich 1950 eine Wechselwirkung der Elektronen durch die Gitterschwingungen

beobachtete, führte das später zu einem grundsätzlichen Verständnis der Supraleitung. Parallel und vollkommen unabhängig entwickelte Bardeen die gleiche Theorie. Der Umstand, dass bei Experimenten der Supraleitung von verschiedenen Isotopen ein Zusammenhang zwischen der Temperatur und der Atommasse gefunden wurde, festigte diese Überlegung nur. Diese Theorie diente als Basis der 1957 von Bardeen, Cooper und Schrieffer entwickelten BCS-Theorie, die die Supraleitung durch die Bindung zweier Elektronen zu Cooper-Paaren beschrieb.

### 3.4 BCS-Theorie

Um sich die Wechselwirkungen der Elektronen besser vorstellen zu können, schauen wir uns das klassische Modell an. Durch die negativ geladenen Leitungselektronen, die sich wie ein Fermie-Gas durch das Gitter bewegen, werden die positiven Ionenrümpfe in der Nähe der Elektronen durch Coulombkräfte angezogen. Dies löst eine lokale Polarisation aus. Ein solches System wird Polaron genannt. Ein zweites Elektron kann diese Polarisation des ersten Elektrons spüren und wird zu der polarisierten Stelle hingezogen, es erfährt also eine Anziehung zur Stelle des ersten Elektrons. Es herrscht also eine anziehende Wechselwirkung zwischen den zwei Elektronen.

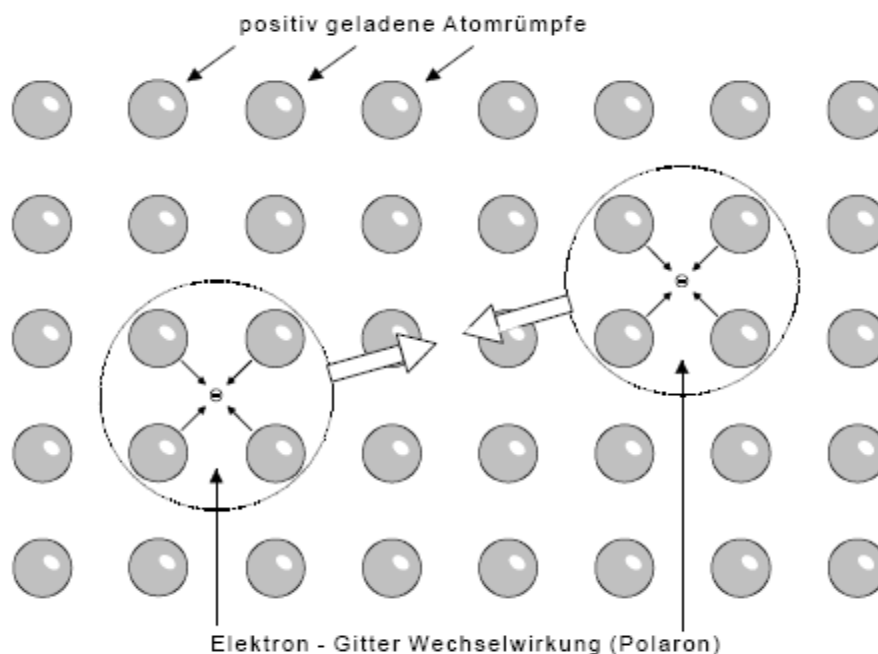


Abbildung 6: Polarisation des Gitters

Man kann sich aber auch eine elastische Membran statt dem Atomgitter vorstellen, auf die

man zwei Kügelchen legt. Durch ihr Eigengewicht, deformieren sie die Membran. Wenn man jetzt beide Kugeln zueinander in eine Mulde legt, wird die potenzielle Energie weiter abgesenkt als wenn sie separat liegen. Durch dieses Modell haben wir einen Zustand gefunden, der energetisch günstiger ist, indem sich die zwei Kügelchen binden. Dies greift schon mal auf die Cooper-Paarung vorweg. Dazu später mehr.

Die Elektronen bewegen sich mit relativ großen Geschwindigkeiten und polarisieren das Gitter nicht statisch, sondern ziehen vielmehr eine Polarisationsspur hinter sich her, welche von der Masse der Atome abhängt. Wenn sich nun ein Elektron schneller bewegt als die Atomrümpfe in ihre Ruhelage zurück schwingen können, dann agiert die Polarisation wie eine positive Ladung. Ein weiteres Elektron wird also durch die Trägheit des Gitters angezogen. Es folgt der Spur des anderen Elektrons. Sowohl der Impuls  $p$  und Spin  $s$  des zweiten Elektrons müssen entgegen gerichtet als auch der Abstand nicht zu klein sein, damit die Coulombabstoßung der beiden Elektronen überwunden wird. Die Bandstruktur und die effektiven Wechselwirkungen weisen dabei eine s-Symmetrie auf. Dieses Elektronenpaar wird Cooper-Paar genannt und ihr maximaler Abstand heißt Kohärenzlänge. Sie ist von der mittleren freien Weglänge der Elektronen abhängig. Normalerweise liegt sie zwischen zehn und einigen hundert Nanometer, was eine Distanz von bis zu 100 Atomen des Kristallgitters ausmacht.

Die dynamische Polarisierung kann ebenfalls durch den Austausch von virtuellen Phononen, Teilchen der Gitterschwingung erklärt werden. Hierbei kommt eine Wechselwirkung der Elektronen des Cooper-Paares durch die kurzzeitige Erzeugung einer Gitterschwingung, also durch den Austausch eines Phonons zustande. Aufgrund ihres kurzen Auftretens während der Korrelationszeit der beiden Elektronen und ihrem Verschwinden danach, werden die Phononen virtuell genannt.

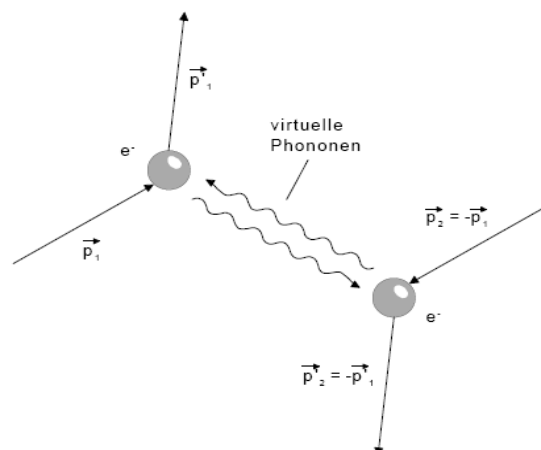


Abbildung 7: Virtuelle Phononen

Die konkrete Ursache für das Verschwinden des Widerstands ist jedoch, dass die beiden Elektronen mit halbzahligem Spin nun als Cooper-Paar einen ganzzahligen Spin haben. Durch die unterschiedliche Spinrichtung ergeben sie als Gesamtspin Null. Somit gehören Cooper-Paare zu den Bosonen und unterliegen damit nicht mehr dem Pauli-Prinzip. Sie können somit alle den selben einen quantenmechanischen Energiezustand annehmen, eine Bose-Einstein-Kondensation. Die Cooper-Paare unterliegen somit auch der Bose-Einstein-Statistik wechselwirkungsfreier Teilchen, welche nicht durch das Atomgitter gestreut werden. Dies kann man jedoch nur auf quantenmechanischer Ebene verstehen. Die Gesamtheit der Cooper-Paare lässt sich als eine Wellenfunktion beschreiben. Da bei der Kopplung ein Teil der kinetischen Energie in Bindungsenergie umgewandelt wird, liegen alle Cooper-Paare in einem tieferen Energieniveau. Diese Energie, welche zur Spaltung der Cooper-Paare benötigt wird, ist größer als die durch thermische oder Fremdatome zustande kommende Streuungsenergie. Somit entsteht eine Energielücke der Breite  $E_g$  um die Fermieenergie. Statt Elektronen oder Cooper-Paare durch Fremdatome, Gitterdefekte oder thermische Störungen auf ein höheres Energieniveau anzuheben und zu streuen muss nun viel mehr ein ganzes Kontinuum angehoben werden. Es ist ein wesentlich größerer Energieaufwand dafür nötig und deshalb geht keine Energie durch "Stöße" verloren. Ein widerstandsloser Stromfluss ist somit möglich.

Da Cooper-Paare ständig gebildet werden und wieder zerfallen, spricht man von einem dynamischem Gleichgewicht. Die Bildung von Cooper-Paaren kann jedoch nur stattfinden, wenn die thermischen Störungen des Gitters klein gegenüber der Bindungsenergie sind. Je tiefer die Temperatur unter der Sprungtemperatur liegt, desto mehr Cooper-Paare werden aus den Leitungselektronen gebildet, bis schließlich alle Leitungselektronen zu Cooper-Paaren geworden sind. Dies ist bei  $T = 0$  K der Fall. Bei Temperaturen nur knapp unterhalb der Sprungtemperatur  $T_c$  existiert nur ein kleiner Bruchteil von Cooper-Paaren.

Ab einer Sprungtemperatur von 40 K und mehr ist die thermische Energie der Gitterschwingung zu groß gegenüber der Bindungsenergie und somit müsste die Bildung von Cooper-Paaren behindert werden. Es wurde jedoch bewiesen, dass auch bei High- $T_c$ s (Hochtemperatursupraleitern) Cooper-Paare gebildet werden. Die BCS-Theorie liefert dafür keine Erklärung mehr. Heutzutage ist auch immer noch nicht genau klar, wie sich die Cooper-Paare bilden können. (Siehe 3.6.4 Hochtemperatursupraleiter)

### 3.5 Meißner-Ochsenfeld-Effekt

Zuerst glaubte man, dass das Verschwinden des Widerstands bei Eintritt in den Supraleitungszustand die einzige charakteristische Eigenschaft war. Fritz Walther Meißner und Robert Ochsenfeld fanden jedoch heraus, dass ein Supraleiter ein idealer Diamagnet ist, der das Magnetfeld aus seinem Inneren komplett verdrängt. Diamagnetismus tritt bei allen Materialien in irgendeiner Form als Antwort auf ein äußeres Magnetfeld auf. Dieser Effekt ist jedoch normalerweise recht schwach und verdrängt das Magnetfeld nicht komplett.

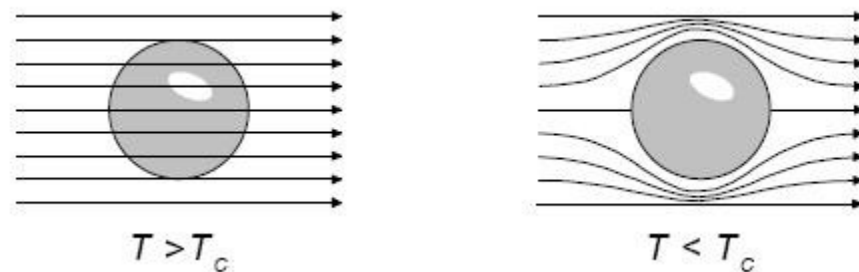


Abbildung 8: Meißner-Ochsenfeld-Effekt

Kühlen wir einen idealen Leiter unter  $T_c$  ab und legen ihn auf einen Magneten, dann entstehen durch die Veränderung des Magnetfelds und der damit verbundenen induzierten Spannung Wirbelströme im Leiter. Diese Wirbelströme wirken nach der Lenzschen Regel ihrer Ursache entgegen und lassen ein Magnetfeld

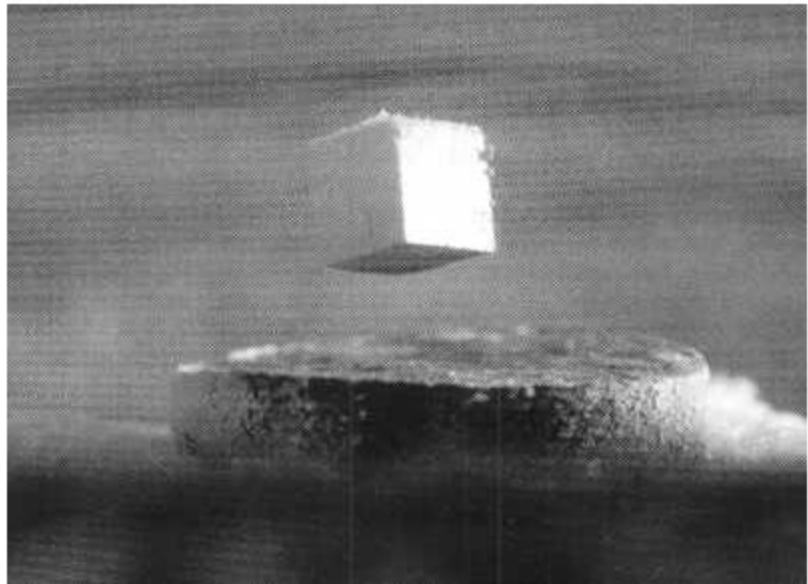


Abbildung 9: schwebender Supraleiter auf einem Magneten

entstehen, das genau entgegen gerichtet ist. Der ideale Leiter schwebt nun also über dem Magnetfeld solange er unter der Sprungtemperatur  $T_c$  liegt. Wird nun solange gewartet, bis der Leiter sich durch die Außentemperatur über  $T_c$  erwärmt hat, dann fällt dort durch den nun existenten Widerstand Energie ab und der ideale Leiter hört auf zu schweben.



Wird der Leiter nun wieder unter  $T_c$  abgekühlt würde man erwarten, dass der Leiter einfach liegen bleibt, da keine Änderung des Magnetfelds geschieht. Der Leiter beginnt jedoch zu schweben, wie er es davor getan hat. Dieses Phänomen erklärten Meißner und Ochsenfeld 1933 durch das Verdrängen des Magnetfeldes innerhalb des Supraleiters.

## **3.6 Verschiedene Arten von Supraleitern**

### **3.6.1 Supraleiter 1. Art**

Supraleiter 1. Art verdrängen das Magnetfeld komplett bis auf eine dünne Schicht an der Oberfläche und bis zu einer Maximalfeldstärke  $H_c$  aus dem Leiter. Über der kritischen Feldstärke  $H_c$  wird der Supraleiter normal leitend und das Material ist dann schlagartig nicht mehr magnetisierbar. Da bei Supraleitern 1. Art die Londonsche Eindringtiefe, die Eindringtiefe des äußeren Magnetfeldes, welches zu einem supraleitendem Stromfluss führt, der das äußere Magnetfeld kompensiert kleiner als der maximale Abstand der Elektronen der Cooper-Paare ist, genügt bereits ein relativ schwaches Magnetfeld um die kritische Feldstärke zu erreichen. Somit sind Supraleiter 1. Art nicht günstig für Spulen in technischen Anwendungen. Beispiele für Typ 1 Supraleiter sind Quecksilber oder sehr reines Blei.

### **3.6.2 Supraleiter 2. Art**

Der Mechanismus der Supraleiter ist bei beiden Arten der gleiche. Sie zeigen ebenfalls ähnliche thermische Eigenschaften, nur der Meißner-Ochsenfeld-Effekt ist komplett verschieden. Bei Supraleitern 2. Art gibt es zwei kritische Feldstärken, die untere und die obere. Für Magnetfelder kleiner als die untere kritische Feldstärke  $H_{c1}$  zeigt der Supraleiter den idealen Diamagnetismus und verdrängt das Magnetfeld komplett aus dem Inneren. Für Magnetfelder größer als die obere kritische Feldstärke  $H_{c2}$  wird der Supraleiter wie bei Supraleiter Typ 1 normal leitend. Zwischen beiden Feldstärken wird das Magnetfeld nur teilweise verdrängt, der Leiter bleibt jedoch supraleitend. Dieser Zustand wird die Shubiknov-Phase genannt.

Während der Shubiknov-Phase dringt das Magnetfeld nur teilweise ein. Es bildet sich ein

System von magnetischen Flussschläuchen, auch Abrikosov-Flusswirbel genannt, welche an der Oberfläche durch das Magnetfeld induzierten Kreisstrom aus Cooper-Paaren umgeben.

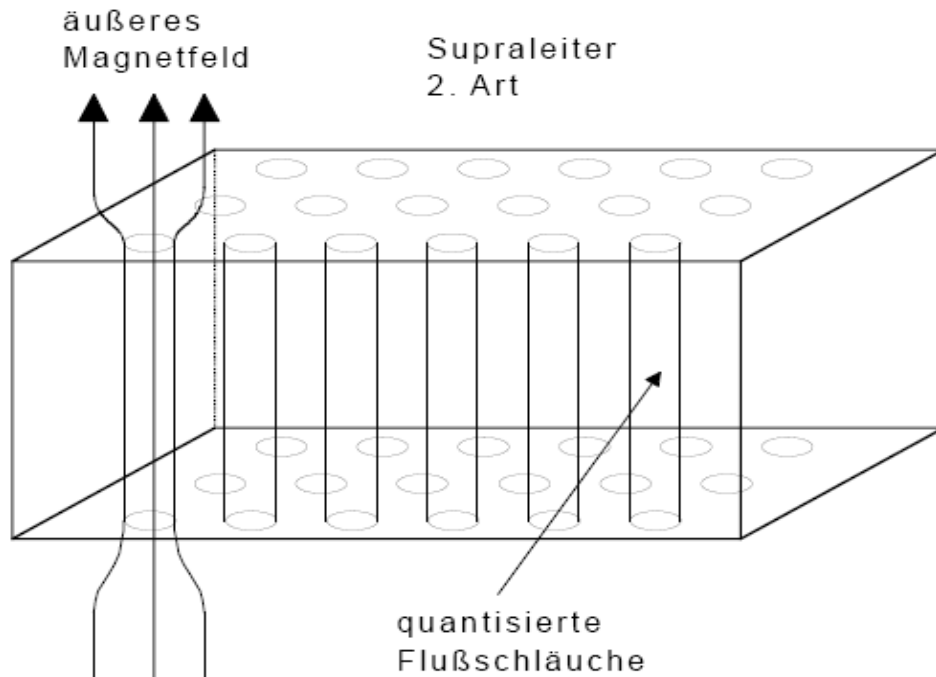


Abbildung 10: quantisierte Flussschläuche

Fließt durch den Supraleiter ein Strom, der sich mit den induzierten Kreisströmen überlagert, so wird auf die Flussschläuche eine Kraft ausgeübt. Bei gewöhnlichen Supraleitern bleiben die Flussschläuche fest verankert, bei High- $T_c$ s bewegen diese sich jedoch wie in einer Flüssigkeit. Dadurch werden die Flussschläuche durch die Kraft verschoben und Energie wird verbraucht, was zu einem elektrischen Widerstand führt. Durch spezielle Pinnung dieser Flussschläuche erreicht man, dass sie relativ große Stromdichten tragen können. Dies führt zu Supraleitern 3. Art.

### 3.6.3 Supraleiter 3. Art

Supraleiter 3. Art werden auch Hochfeld-Supraleiter genannt, da sie Supraleiter 2. Art sind, jedoch eine wesentlich größere kritische Feldstärke  $H_{c2}$  besitzen und sich somit starke Magnetfelder erzeugen lassen. Viele Legierungen und High- $T_c$ s zeigen dieses Verhalten. Diese haben kritische Feldstärken  $H_{c2}$  von bis zu 100 Tesla.

### 3.6.4 Hochtemperatur-Supraleiter(High-T<sub>c</sub>s)

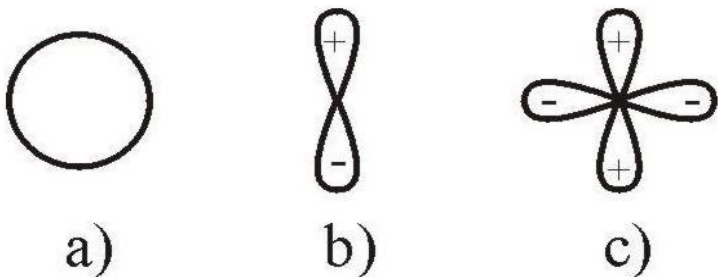
1986 fanden Johannes Georg Bednorz und Karl Alexander Müller zum ersten mal einen Supraleiter,  $\text{La}_{1,85}\text{Ba}_{0,15}\text{CuO}_4$  mit einer Sprungtemperatur von über 30 Kelvin. Diese Grenze wurde im Laufe der Zeit auf 135 Kelvin angehoben.

Mit der BCS-Theorie lassen sich jedoch nur Sprungtemperaturen von bis zu 40 Kelvin erklären, und noch dazu war die verwendete Probe kein metallischer Leiter sondern Keramik, welche bekanntlich gut isoliert. Bis heute lässt sich dieses Phänomen nicht genau erklären und fest steht nur, dass Cooper-Paarbindungen trotzdem stattfinden.

Einige Forscher glauben, dass es aufgrund magnetischer Fluktuationen zur Paarung kommt. Experimente zeigten, dass sich der Spin bei High-T<sub>c</sub>s anders verhält als bei normalen Supraleitern. Mit einer Momentaufnahme wurde gezeigt, dass der Spin jedes zweiten Elektrons eine andere Richtung hat. Hierbei spielen die Cu und O-Atome eine Rolle. Durch Dotierungen kann man Löcher in die p-Orbitale des Sauerstoffs einbauen. Ist die Anzahl der Löcher gering sind die Spins der Cu-Orbitale langreichweitig immer gegensätzlich angeordnet und somit antiferromagnetisch. Bei großer Löcherzahl verschwindet die langreichweitige Ordnung und es bleibt eine antiferromagnetische Nahordnung übrig.

Die Löcher polarisieren nun mit ihren Spin die Kupferspins, was eine Anziehung der Elektronen begünstigt und führt somit zur Paarbindung. Dies ist ähnlich der Polarisation des Gitters bei konventionellen Supraleitern. Diese Anziehung muss außerdem stärker sein als Phononen Wechselwirkungen, da sie auch bei höheren Temperaturen zur Paarbildung führt.

Wohingegen bei konventionellen Supraleitern der räumliche Zustand bei der Cooper-Paar Bildung völlig isotrop und homogen ist (a) - kein konkreter Ort oder Richtung - weisen Hochtemperatursupraleiter



eine Symmetrie höheren *Abbildung 11: Orbital-Charakter der Cooper-Paare*

Drehimpulses auf wie bei den p (b) oder d-Orbitalen (c) der Atome. Dies bedingt auch, dass die Elektronen nie am gleichen Ort sein können und außerdem die Elektronenpaare nicht so eng gebunden sind. Dies reduziert die elektrische Abstoßung und vereinfacht die Paarbildung. Bei High-T<sub>c</sub>s genügt es meistens mit flüssigem Stickstoff zu kühlen, da dieser die Probe bis auf 80 Kelvin abkühlt. Diese Supraleiter können somit günstige und transportable

Anwendungen finden. Ob man jemals Supraleiter bei Raumtemperatur beobachten kann bleibt fraglich.

## **4 Versuch: Messung der Sprungtemperatur eines Hochtemperatursupraleiters**

Im folgenden Versuch geht es um die Messung der T-Abhängigkeit und Sprungtemperatur des High-T<sub>c</sub> SmBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>6</sub>. Dies soll mit Hilfe einer automatischen Datenerfassung erfolgen. Dabei wird die supraleitende Probe mit Hilfe von flüssigem Stickstoff unter die kritische Temperatur T<sub>c</sub> herunter gekühlt und währenddessen mit Hilfe eines selbst geschriebenen Programms in LabVIEW aufgezeichnet. Zur Bestimmung der Temperatur wird hierbei ein Pt100 Widerstand verwendet.

Der Aufbau soll außerdem für einen Schulversuch geeignet sein, damit Schüler ihn bei Kursen des TUM Labs wiederholen können. Er muss also möglichst sicher gestaltet sein und einfach zu bedienen.

### **4.1 Versuchsaufbau**

Der Versuchsaufbau besteht aus einem Styroporgefäß (10), worin später der flüssige Stickstoff (11) zur Abkühlung sein wird. Es steht auf einer Grundplatte aus Metall (1) und ist zwischen zwei langen Gewindeschrauben (2), die auf der Metallplatte befestigt sind, angebracht. Auf den zwei Gewindeschrauben ist mit Hilfe von jeweils 2 Muttern (9) eine Metallplatte (3) fixiert. Die Muttern und die Gewindeschraube sind von der Metallplatte isoliert, damit die Kälte nicht so gut übertragen wird und nicht alles gefriert, um es noch anfassen zu können. Die Metallplatte (3) hat ein Loch mit einem Rohr und einer Flügelschraube (4) in der Mitte. Durch dieses Rohr kann der Greifarm (5) mit der Probe über die Flügelschraube in der Höhe verstellt und gehalten werden. Der Greifarm besteht aus einem etwas dünneren Rohr, damit dieses auch hindurch passt. Am unteren Ende wurde das Rohr dann in ein rechteckiges Kupferstück mit einem Loch in der Mitte (6) gepresst und hart gelötet. Ein Kühler (8) und ein zweites Kupferstück mit einer runden Vertiefung (7) hängen mittels einer Schraube am oberen Kupferstück fest. Zwischen den zwei Kupferscheiben sind die supraleitende Probe und ein Pt100 Widerstand angebracht.

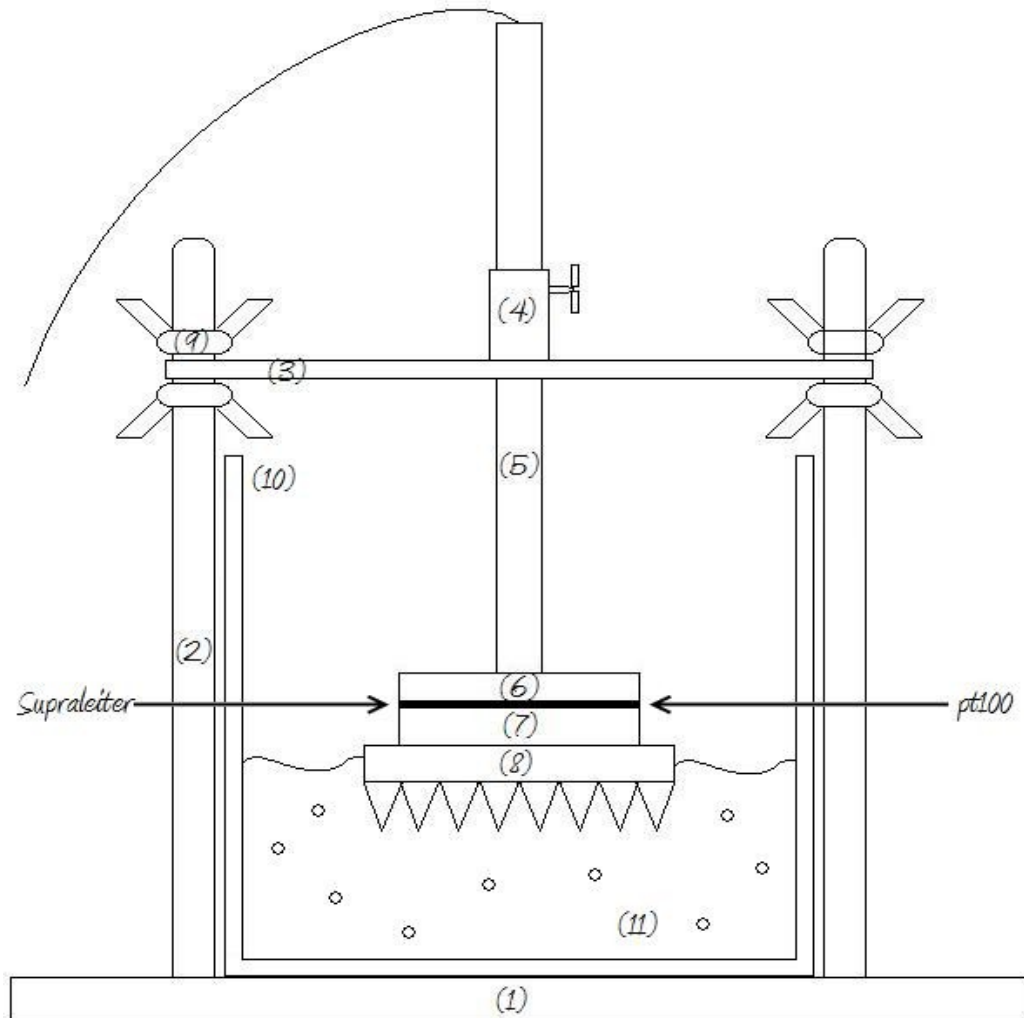


Abbildung 12: Versuchsaufbau

Der Pt100 Widerstand ist mittels eines Klebers (7031 Vanish von General Electrics) am Kupfer befestigt, um zu vermeiden, dass der Pt100 in der Luft schwebt und somit nicht mehr gut mit dem wärmeleitenden Kupfer verbunden ist und dadurch besser abgekühlt wird. Hinzu kommt, dass der Kleber besser als Luft leitet.

Der Supraleiter ist über ein Synthetik Silikon Fett, ein gutes wärmeleitendes Material, mit dem Kupfer verbunden. Zuerst wurde der selbe Kleber wie beim Pt100 verwendet, doch dieser zerstörte den Supraleiter und es musste ein neuer verwendet werden. Durch das Fett kann es passieren, dass der Supraleiter ein wenig weiter vom Kupfer entfernt ist als der Widerstand und damit nicht so gut gekühlt wird, was zu einer leichten Ungenauigkeit bei der Messung führen kann.

Der Supraleiter und der Pt100 Widerstand sind über eine Vier-Punkt-Messung angeschlossen.

Dabei dient der Pt100 Widerstand zur Bestimmung der Temperatur. Was dies bedeutet wird später genauer erläutert. Die Leitungen des Supraleiters und des Pt100 Widerstands gehen über das Rohr des Greifarms hinaus. Die Leitungen für die Stromzufuhr sind an einer Konstantstromquelle (Burster Gernsbach Präzisionsmesstechnik Digistant Typ 6426) angeschlossen. Die anderen vier Kabel sind an einem Interface (NI USB-6008 von National Instruments) zur Messung der Spannung angeschlossen. Hierbei wird die Spannungsmessung des Supraleiters noch über einen Messverstärker (Keithley 160B Digital Multimeter) verstärkt. Dies ist notwendig, denn bei diesen geringen Strömen die fließen ist der Spannungsabfalls ebenfalls minimal und geht unter die Messgenauigkeit des Interfaces von 1 mV und man kann somit kein Verschwinden des Widerstands beobachten. Bei der Widerstandsmessung des Pt100 wäre dies ebenfalls

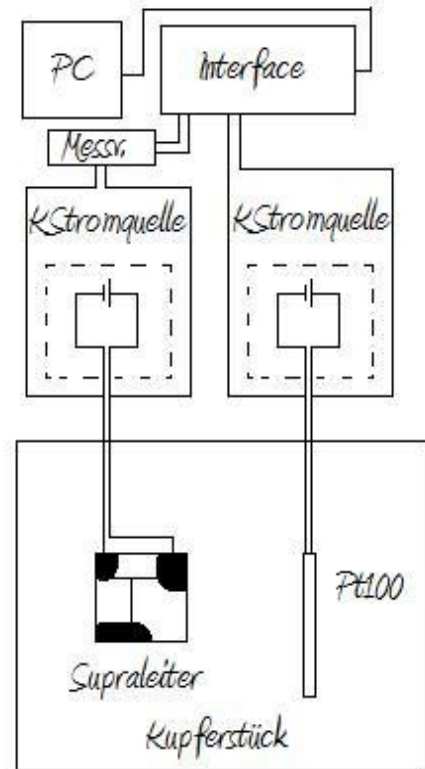


Abbildung 13: Schaltskizze

nützlich, ist jedoch nicht zwingend nötig, da die Spannung hier in einem Bereich von mindestens 200 mV liegt und somit nur eine kleine Messungenauigkeit vorliegt. Das Interface ist an einem Computer über ein USB-Kabel angeschlossen und über LabVIEW wird der Spannungsverlauf gemessen und daraus der Widerstand mit  $R = U/I$  berechnet. Um das Verständnis zu verbessern, sind die Bilder des Versuchsaufbaus im Anhang einzusehen.

#### 4.1.1 Supraleiter und Pt100 Widerstand

Auf einem dünnen Edelstahlblech, das mit Magnesiumoxid beschichtet ist, wird der Supraleiter  $\text{SmBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_6$  bei einer Temperatur von circa 650 Grad aufgedampft. Es gibt dabei 3 Verbindungsstellen. In dem Versuch werden jedoch nur zwei benützt. Von je einer der zwei Verbindungsstellen geht ein Kabel zur Konstantstromquelle. Weitere zwei Kabel von je einer der Verbindungsstellen sind zur Spannungsmessung gedacht und am Interface angeschlossen. Die Sprungtemperatur von  $\text{SmBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_6$  liegt bei circa 95 Kelvin und soll experimentell überprüft werden.

Der Pt100 Widerstand ist ein geeichter Widerstand, der bei Null Grad Celsius 100 Ohm

beträgt. Es gibt Eichungstabellen und Annäherungsformeln für ihn. Somit kann er gut zur Temperaturbestimmung verwendet werden.

### **4.1.2 4-Punkt Messung**

Während des ganzen Versuchs wurde eine 4-Punkt Messung jeweils beim Pt100 und beim Supraleiter verwendet. Diese wird benutzt, um den Widerstand möglichst genau zu messen und dabei auch keine Verfälschungen durch Spannungsabfälle an den Leitungen zu haben.

Das Prinzip der 4-Punkt Messung besteht darin, dass man einen konstanten Strom durch den Widerstand fließen lässt, was man mit einer Konstantstromquelle erreicht. Während des konstanten Stromflusses wird nun direkt der Spannungsabfall am Widerstand gemessen.

Dieses Messprinzip bedingt vier Kabel für jede Messung. Je zwei Kabel vom Supraleiter und Widerstand sind an den zwei Konstantstromquellen angeschlossen. Von den anderen vier Kabeln sind jeweils zwei für die Spannungsmessung verantwortlich (Siehe Schaltskizze oben). Bei der Messung muss die Konstantstromquelle einen möglichst geringen Strom liefern, damit der Supraleiter und der Widerstand nicht zu stark erhitzt werden. Ansonsten würden die Messergebnisse verfälscht.

Für die Messung des Pt100 Widerstandes könnte man jedoch auch ein Messgerät nehmen, das bereits eine integrierte 4-Punkt Messung besitzt. Somit könnte auf eine zweite Konstantstromquelle verzichtet werden. Hierbei lässt das Messgerät einen bestimmten Konstantstrom durch die Probe fließen, der jedoch nicht variiert werden kann und somit nicht für die Spannungsmessung des Supraleiters geeignet ist.

### **4.1.3 LabVIEW**

Die ganzen Informationen und Spannungsabfälle werden über die graphische Programmiersprache LabVIEW von National Instruments ausgewertet. Das Programm zur Auswertung wurde komplett selbst geschrieben.

Erst einmal muss der konstante Stromwert im Programm eingegeben werden, da die Messgeräte nicht am Computer angeschlossen sind und das Programm den Stromfluss nicht auslesen kann. Des Weiteren liest LabVIEW die Spannungsabfälle am Supraleiter und am Widerstand über das angeschlossene Interface ab und errechnet sich dann die jeweiligen

Widerstände. Hierbei wird die Messverstärkung beim Supraleiter wieder heraus kalkuliert, wobei der Faktor angegeben werden muss. Er sollte mindestens 100 betragen und ist standardmäßig so eingestellt.

Es werden außerdem noch mehrere Messungen zusammengefasst und der Mittelwert daraus gebildet, um die Messungenauigkeiten zu verringern. Die Anzahl der Messungen kann im Programm angegeben werden und ist standardmäßig auf 200 eingestellt.

Der Widerstand des Pt100 ist repräsentativ für die Temperatur. Über eine Annäherungsformel kann somit ziemlich genau die Temperatur berechnet werden. Je nach Größe des Temperaturbereichs muss eine andere Annäherungsformel verwendet werden.

Für Temperaturen unter Null Grad oder Widerstände unter 100 Ohm wird folgende Formel verwendet:

$$T = \frac{1,597}{10^{10}} * R^5 - \frac{2,951}{10^8} * R^4 - \frac{4,784}{10^6} * R^3 + \frac{2,613}{10^3} * R^2 + 2,219 * R - 214,9$$

Für Temperaturen über Null Grad oder über 100 Ohm wird diese verwendet:

$$T = \frac{(3,90802 * 10^5)}{(2 * 5,802 * 10^1)} - \sqrt[2]{\frac{(3,90802^2 * 10^{10})}{(4 * 5,802^2 * 10^2)} - \frac{(R - 100) * 10^5}{(5,802)}}$$

Die Temperaturen sind in Celsius und werden noch in Kelvin umgerechnet. Anschließend wird in einem X-Y-Graphen der Widerstand des Supraleiters in Abhängigkeit der Temperatur gezeichnet. Der bildliche Programmcode und das Frontpanel sind im Anhang einzusehen.

#### **4.1.4 Sonstiges**

Alle Teile für den Versuch wurden in der TU München Werkstatt des Lehrstuhls für Fördertechnik Materialfluss Logistik der Fakultät für Maschinenwesen hergestellt. Dort wurden mit Hilfe eines Auszubildenden die Teile verarbeitet und zusammengebaut. Konstantstromquellen, Messverstärker, Interface und Widerstand stammen ebenfalls aus der TU.

Um die Programmiersprache LabVIEW zu erlernen, besuchte ich in den Pfingstferien einen Kurs am TUMLab - ein Labor der TU München, in dem Robotic Kurse und ähnliches für Gruppen angeboten werden - im Deutschen Museum, in dem die Grundlagen der Programmiersprache vermittelt wurden.



## 4.2 Durchführung des Versuchs

Der Versuch wurde im Physik Department der TU München in Garching durchgeführt. Dort ist auch die Kühlmittelversorgung mit flüssigem Stickstoff sicher gestellt. Das TUMLab war hierfür nicht geeignet da es keinen flüssigen Stickstoff besitzt.

Die Temperatur wird hierbei beim Abkühlen und Aufwärmen gemessen, somit ist eine Temperaturregelung nicht notwendig. Die ganze Versuchsanordnung, der Widerstand und der Supraleiter werden angeschlossen und das Programm gestartet. In die Styroporbox wird nun flüssiger Stickstoff gefüllt, der vom TUMLab besorgt wurde. Die Box wird ca. halb voll geschüttet. Dann wird der Greifarm so weit abgesenkt, dass der Kühler fast komplett im Stickstoff eintaucht, und mit der Schraube befestigt. Das Kupferstück darf jedoch nicht den Stickstoff berühren, da aufgrund der guten Wärmeleitfähigkeit von Kupfer der Supraleiter sonst zu schnell abgekühlt wird und somit die Sprungtemperatur nicht mehr so gut und fein gemessen werden kann. Man stellt an den beiden Konstantstromquellen nun einen festen Strom von circa 10 mA ein und gibt diesen dann noch im Programm ein. Der Stromfluss muss wie vorher schon erwähnt niedrig sein, um den Supraleiter nicht zu stark zu erhitzen. Nun muss noch der Faktor der Messverstärkung bestimmt werden und aufs Programm übertragen werden. Schließlich lässt man das Programm die T-R-Kurve aufzeichnen. Dabei muss darauf geachtet werden, dass durch den verdampfenden flüssigen Stickstoff der Kühler im Stickstoff bleibt. Der Styroporbehälter muss somit nach und nach wieder befüllt werden, oder aber man muss den Greifarm immer wieder absenken.

Nachdem die Sprungtemperatur gemessen und aufgezeichnet wurde, kann der Supraleiter wieder aus dem Stickstoff genommen werden. Hierbei wärmt sich der Supraleiter auf und die T-R-Kurve kann erneut gemessen werden. Der Vorgang kann durch einen Föhn beschleunigt werden. Dabei kann sich Kondenswasser zwischen den zwei Kupferscheiben bilden, und auf Dauer zerstört dies den Supraleiter und den Pt100 Widerstand. Dies ist jedoch nur relevant, wenn dieser Versuch etliche male durchgeführt wird, und spielt somit im aktuellen Versuch keine Rolle. Das Problem könnte durch eine Dichtung verbessert werden. Elastomerdichtungen wie z.B. ein Gummi Ring, sind jedoch nicht geeignet, da sie bei diesen tiefen Temperaturen spröde werden. Man könnte stattdessen eine Indiumdichtung nehmen. Sie verformt sich bei den Temperaturen zwar, ist jedoch weich und passt sich deshalb dem Kupfer an. Indium ist jedoch giftig.

### 4.3 Auswertung und Interpretation

Folgende T-R-Kurve wurde beim abkühlen gemessen

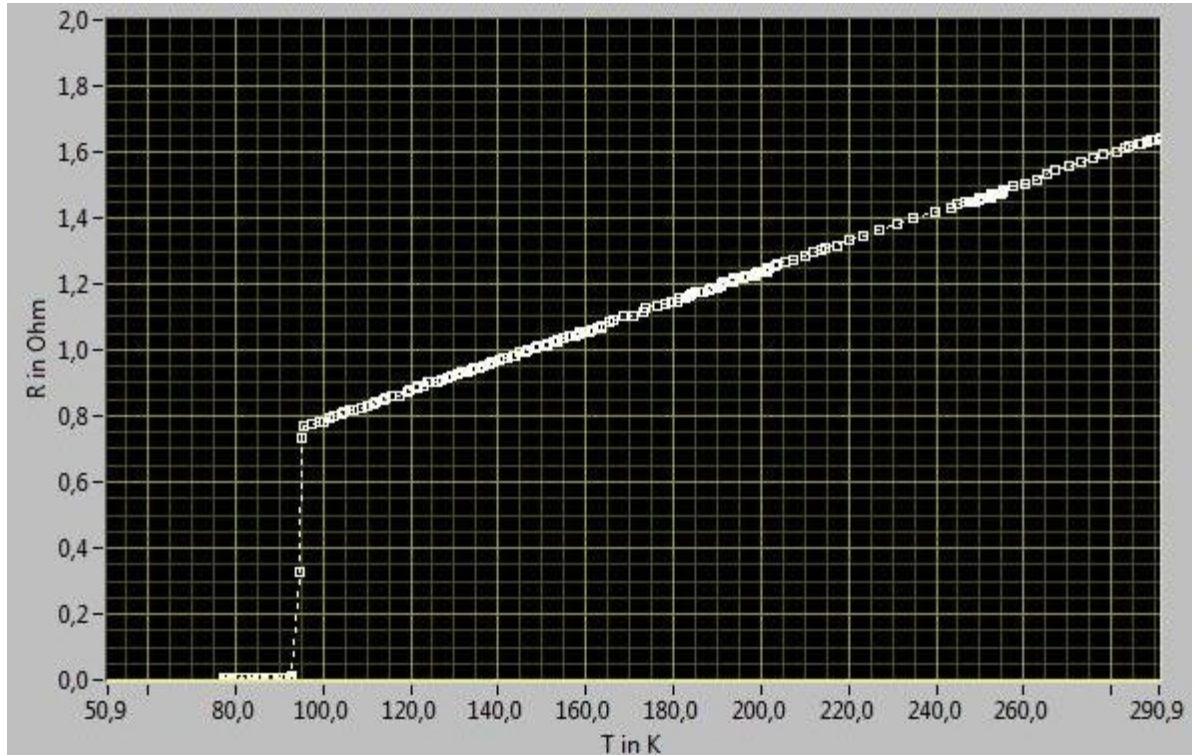


Abbildung 14: T-R-Kurve von  $\text{SmBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_6$  beim abkühlen

Folgende T-R-Kurve wurde beim wieder aufwärmen gemessen und bestätigt die Ergebnisse:

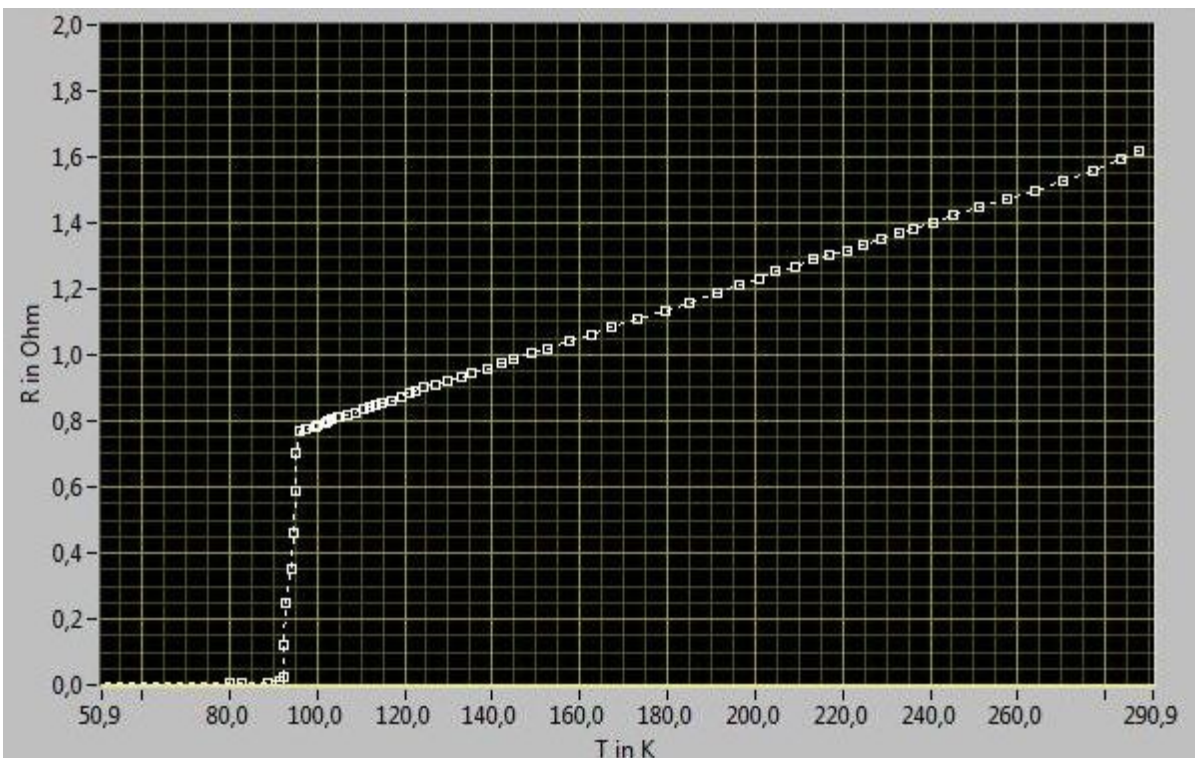


Abbildung 15: T-R-Kurve von  $\text{SmBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_6$  beim aufwärmen

Hierbei kann man erkennen, dass der Widerstand  $R$  des Supraleiters unterhalb der Sprungtemperatur  $T_c$  „Null“ wird. Die Sprungtemperatur kann aus dem Graphen entnommen werden und beträgt hier circa 93 Kelvin. Bei Temperaturen oberhalb der Sprungtemperatur steigt der Widerstand erst schlagartig und dann linear an, da der Supraleiter normalleitend wird.

## **5 Verwendungsmöglichkeiten von Supraleitern in der Industrie**

### **5.1 Widerstandsloser Stromtransport**

Wichtige Komponenten in der Energieverteilung von Kraftwerken zum Verbraucher sind Kabel, Transformatoren und Strombegrenzer. Besonders nahe liegend scheint der Einsatz von supraleitenden Kabeln, da dabei die elektrischen Verluste gering sind. Bei Flächennetzen wäre die Wirtschaftlichkeit, Betriebssicherheit und Wartungsfreundlichkeit jedoch nicht rentabel, erst bei Großstädten, wo auf relativ kurzen Wegstrecken große Leistungen transportiert werden, würde es sich lohnen. Ein weiterer Vorteil wäre, dass im Falle eines Lecks nur Stickstoff ausströmt und nicht umweltverschmutzende Öle, die zur Kühlung jetziger normal leitender Hochleistungskabel verwendet werden.

Der erste Vorschlag für solch ein Kabel kam 1962 von McFee. Bis 1980 wurde noch viel an supraleitenden Gleichstrom- und Wechselstromkabeln untersucht. Es kam jedoch nie zum kommerziellen Einsatz aufgrund der anspruchsvollen Kühltechniken mit flüssigem Helium und der daraus resultierenden wirtschaftlichen Unrentabilität. Nach 1986 wurde dann hauptsächlich auf Basis von High- $T_c$ s entwickelt, da es hierbei genügte, die Leiter mit flüssigem Stickstoff zu kühlen. Ein erstes Pilotprojekt soll vom wichtigsten New Yorker Stromanbieter Con Ed in Manhattan 2010 anlaufen. Dieses so genannte „Projekt HYDRA“, in welches 39 Millionen Dollar investiert werden, verbindet zwei Transformatorstationen und soll für den Fall dienen, dass eine Station ausfällt.

In der Bundesrepublik Deutschland könnte man in etwa 5% Energie sparen, da von den 363010 GWh etwa 16499 GWh (5%) Leistungsverluste sind. Man müsste es jedoch dann schaffen, Supraleiter bei Raumtemperatur herzustellen, da sonst die gesparte Energie zur Kühlung verwendet würde.

## 5.2 Erzeugung starker Magnetfelder

Supraleiter werden ebenfalls zur Erzeugung sehr starker Magnetfelder verwendet. Hierbei eignen sich besonders Supraleiter 3. Art, die wegen der mechanischen Behandlung viele Haftstellen für magnetische Flusslinien haben, und damit ein große obere Feldstärke. Dies ermöglicht die Herstellung von Magnetfeldern größer als 10 Tesla.

Solche Magnetfelder werden heutzutage bereits bei Kernspin-Tomographen, Teilchenbeschleunigern, Fusionsreaktoren und Magnetenergiespeicherringen (SMES) verwendet.

Das Anwendungsgebiet, insbesondere für große supraleitende Magnete, liegt im Bereich der Hochenergiephysik. Dort werden Teilchen bis in den TeV Bereich beschleunigt. Um dies zu erreichen, müssen die Teilchen durch geeignete Magnetfelder auf ihren Bahnen gehalten werden. Je stärker die verfügbaren Magnete sind, desto leichter geht dies, da bei konstanter Energie die Durchmesser der Kreisbeschleuniger kleiner gemacht werden können, da die Teilchen ja stärker abgelenkt werden.

Außerdem werden im Bereich der Kernfusion, der Verschmelzung von zwei Wasserstoffkernen zu einem Heliumkern, starke Magnetfelder benötigt. Da hierfür eine große Energiemenge von Nöten ist, muss das Wasserstoffgas auf Temperaturen von mindestens einigen 10 Millionen Grad erhitzt werden. Dieses so genannte Plasma kann man in keinem materiellen Gefäß zusammenhalten. Hierfür sind extrem große Magnetfelder von Nöten um es in einem Reaktionsraum zu halten. Wirtschaftlich ist dies nur mit supraleitenden Magneten möglich.

Supraleiter werden außerdem zur Energiespeicherung verwendet. Supraleitende Magnetfelder werden meistens dafür benutzt, mittelgroße oder kleinere Energien im Bereich von 1 MJ bis 100 MJ sehr effektiv zu speichern und auch schnell wieder freizugeben. Dies wird zum Beispiel bei Fusionsreaktoren angewandt, da diese große Energien in kürzester Zeit brauchen.

## 5.3 Motoren und Generatoren

Supraleitende Motoren und Generatoren sind vom Prinzip genauso aufgebaut wie konventionelle Maschinen, nur dass die Konstruktion eisenlos ist, da der Sättigungsbereich von Eisen bei 2 T liegt und bei supraleitenden Magnetfeldern jedoch mit 10 T gearbeitet wird.

Durch den Verzicht auf Eisen gibt es auch noch eine Gewichtsreduzierung um bis zu 50%. Dabei sind die supraleitenden Maschinen bei gleicher Leistung sehr viel kleiner und können somit für manche Anwendungen von speziellem Vorteil sein.

## **5.4 Selbst stabilisierende Magnetlager**

Wo es bei konventionellen Lagern Probleme wie z.B. Reibung gibt, existieren solche Probleme bei Magnetlagern nicht, da bei diesen sich die bewegenden Teile nicht berühren. Bei normalen Magnetlagern muss eine Lagerung in Verbindung mit einem Regelkreis verwendet werden, der einen Freiheitsgrad regelt. Dieses aktive Magnetlager besteht aus einer Kombination von Permanentmagneten, Weicheisen und Spulen, sowie einer umfangreichen Regelelektronik und ist hauptsächlich auf Spezialanwendungen beschränkt. Bei supraleitenden magnetischen Lagern ist der Magnet in allen drei Raumrichtungen stabil und lässt sich nahezu ohne Verluste rotieren. Da diese Lager ohne jegliche Regelungen auskommen, werden sie selbst stabilisierende Magnetlager genannt.

## **5.5 SQUIDS**

SQUIDS sind die empfindlichsten magnetischen Detektoren heutzutage. Die empfindlichsten können Magnetfelder von 10-15 Femtotesla messen, wodurch sie in vielen Gebieten Anwendung finden. Durch High- $T_c$ s sind SQUID Systeme kostengünstig und transportabel.

## **6 Schlusswort**

Seit der Entdeckung der Supraleitung vor fast 100 Jahren durch Kamerlingh Onnes ist die Forschung weit voran geschritten. Während am Anfang aufgrund der niedrigen Sprungtemperaturen technische Anwendungen noch schwer realisierbar waren und außerdem wirtschaftlich unrentabel, gibt es mittlerweile viele Anwendungen für die Supraleitung. Vor allem High- $T_c$ s ermöglichen es Supraleiter in der Medizin und Technik zu verwenden, da man nun mit flüssigem Stickstoff kühlen kann. In der Forschung werden sie bereits überall

eingesetzt und auch in kommerziellen Stromnetzen werden sie bald Marktreife erlangen.

Die Forschung ist zwar bis jetzt weit voran geschritten, ist jedoch noch lange nicht abgeschlossen. Das Zustandekommen von Cooper-Paaren bei konventionellen Supraleitern ist heutzutage geklärt, doch ist es noch immer nicht genau klar wie es zur Cooper-Paarbildung bei High- $T_c$ s kommt. Stromleitungen mit High- $T_c$ s sind ebenfalls noch zu spröde und nicht lang genug. Es stellt sich noch die große Frage, ob jemals Supraleiter bei Raumtemperatur beobachtet werden können. Denn damit würde die Technik und der Stromtransport revolutioniert werden.

## 7 Literaturverzeichnis

### 7.1 Quellenverzeichnis

- (1) [BUWE] Buckel, Werner; Kleiner, Reinhold, Supraleitung Grundlagen und Anwendungen, 6.Auflage 2004
- (2) [EJOU] Elektronikjournal, Widerstand ist (bald) zwecklos, <http://www.elektronikjournal.com/ireds-30922.html>, 1.4.2002
- (3) [IBHA] Ibach, Harald; Lüth, Hans, Festkörperphysik: Einführung in die Grundlagen, 5. Auflage 1999
- (4) [KAMI] Kathke, Michael, Supraleitung, <http://theory.gsi.de/~vanhees/faq-pdf/supraleitung.pdf>
- (5) [MEBI] Metallbindung, <http://www.pctheory.uni-ulm.de/didactics/elekleit/html/02-04.html>
- (6) [OTOL] Otto Oliver, Untersuchungen an Supraleitern, [http://www.erg.slf.th.schule.de/projekte/1997/0897ph\\_1.jpg](http://www.erg.slf.th.schule.de/projekte/1997/0897ph_1.jpg)
- (7) [HKIN] Prof. Dr. H. Kinder, Supraleitung und Tieftemperaturenphysik I und II, <http://www.physik.tu-muenchen.de/lehrstuehle/E10/Dateien/skript.html>, WS 99/00
- (8) [SUDI] Prof. Suter Dieter, Festkörperphysik, 5. Freie Elektronen, [http://e3.physik.uni-dortmund.de/~suter/Vorlesung/Festkoerperphysik\\_WS05\\_06/5\\_Freie\\_Elektronen.pdf](http://e3.physik.uni-dortmund.de/~suter/Vorlesung/Festkoerperphysik_WS05_06/5_Freie_Elektronen.pdf), 5. Januar 2006
- (9) [SUJO] Schulz Joachim, Joachims Quantenwelt, Fermigas, <http://www.quantenwelt.de/quantenmechanik/vielteilchen/fermigas.html>
- (10)[SUJO] Schulz Joachim, Joachims Quantenwelt, Metallische Atombindungen, <http://www.quantenwelt.de/atomphysik/modelle/bindungen/metallisch.html>
- (11)[SUJO] Schulz Joachim, Joachims Quantenwelt, Spin, <http://www.quantenwelt.de/quantenmechanik/eigenschaften/spin.html>
- (12)[SCOR] Science Orf.at, Der verlustfreien Stromleitung ein Stück näher, <http://science.orf.at/science/news/41205>, am 28.1.2008
- (13)[TADA] Talbot David, Technology Review, Ein robusteres Stromnetz für Manhattan, <http://www.heise.de/tr/artikel/90683>, 7.6.2007
- (14)[UNIS] Uni Saarland, <http://www.uni-saarland.de/fak7/hartmann/cfn/Bilder/Supra5.jpg>, am 28.1.2008

- (15)[WdP] Welt der Physik, Der neue supraleitende Zustand,  
<http://www.weltderphysik.de/de/1435.php>, am 28.1.2008
- (16)[WIK] Wikipedia, <http://de.wikipedia.org/wiki/Pauli-Prinzip>, am 28.1.2008
- (17)[WIK] Wikipedia, <http://de.wikipedia.org/wiki/Drude-Theorie>, am 28.1.2008
- (18)[WIK] Wikipedia, <http://de.wikipedia.org/wiki/Diamagnet>, am 28.1.2008
- (19)[ÖCRA] Öchsner Ralf, Versuche zur Hochtemperatur-Supraleitung ,  
[http://ulkoavaruus.de/downloads/Facharbeit\\_Versuche\\_zur\\_Hochtemperatur-Supraleitung.pdf](http://ulkoavaruus.de/downloads/Facharbeit_Versuche_zur_Hochtemperatur-Supraleitung.pdf), 26.01.2007

## 7.2 Sekundärliteratur

- (1) [EipK] Elektronen im periodischen Kristallpotenzial, <http://pages.unibas.ch/phys-meso/Education/Teaching/KOMA/KOMA-6.pdf>
- (2) [WdP] Welt der Physik, Viele Mechanismen dienen der Erklärung der Supraleitung,  
<http://www.weltderphysik.de/de/1433.php>
- (3) [WIK] Wikipedia, [http://de.wikipedia.org/wiki/Ideales\\_Gas](http://de.wikipedia.org/wiki/Ideales_Gas)
- (4) [WIK] Wikipedia, <http://de.wikipedia.org/wiki/Supraleiter>

## 7.3 Abbildungsverzeichnis

Abbildung cover: Sprungtemperaturen.....	[KAMI]
Abbildung 1: Freie Elektronen im Atomgitter.....	[SUDI]
Abbildung 2: Energiebandmodell.....	[MEBI]
Abbildung 3: Bändermodell am Beispiel Beryllium.....	[MEBI]
Abbildung 4: Erläuterung Leiter, Isolator und Halbleiter.....	[MEBI]
Abbildung 5: Heike Kamerlingh Onnes.....	[ÖCRA]
Abbildung 6: Polarisierung des Gitters.....	[KAMI]
Abbildung 7: Virtuelle Phononen.....	[KAMI]
Abbildung 8: Meißner-Ochsenfeld-Effekt.....	[KAMI]
Abbildung 9: schwebender Supraleiter auf einem Magneten.....	[OTOL]
Abbildung 10: quantisierte Flussschläuche.....	[KAMI]



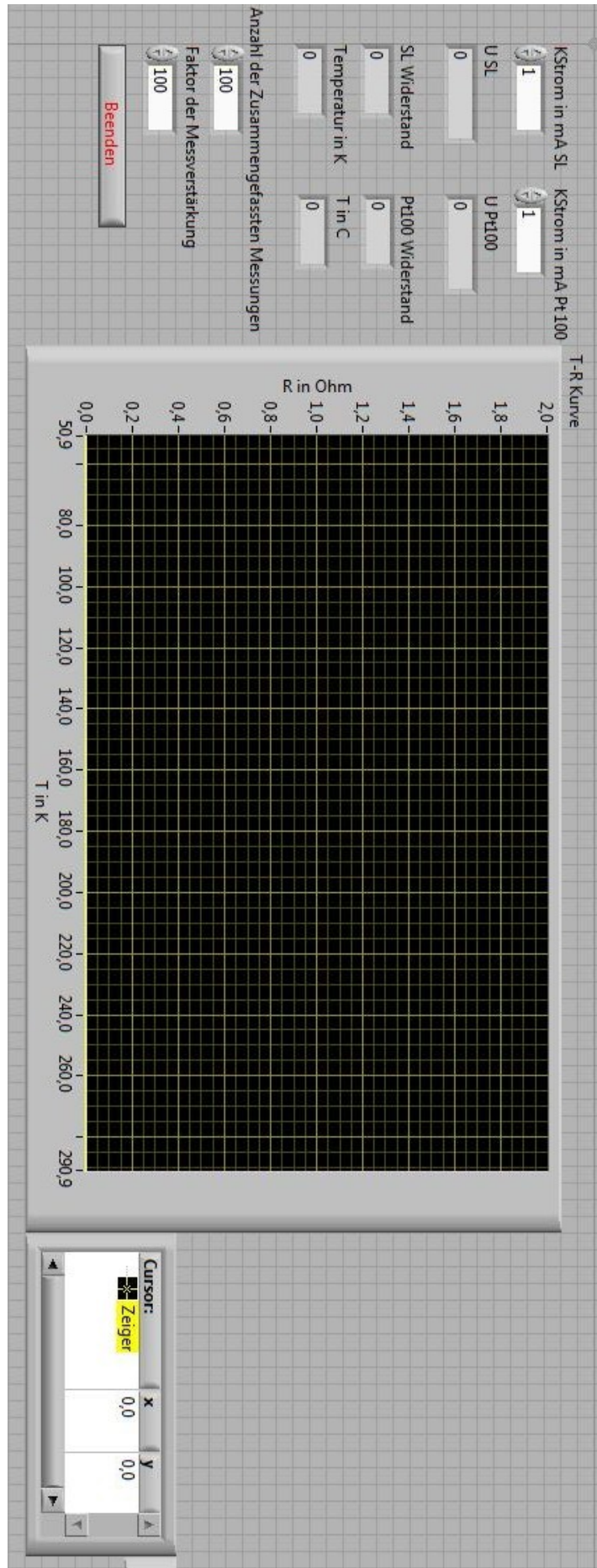
Abbildung 11: Orbital-Charakter der Cooper-Paare.....[HKIN]  
Abbildung 12: Versuchsaufbau.....selbst erstellt  
Abbildung 13: Schaltskizze.....selbst erstellt  
Abbildung 14: T-R-Kurve von  $\text{SmBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_6$  beim abkühlen.....selbst erstellt  
Abbildung 15: T-R-Kurve von  $\text{SmBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_6$  beim aufwärmen.....selbst erstellt

## 8 Anhang

- Programmcode und Frontpanel von LabVIEW
- Bilder des Versuchs

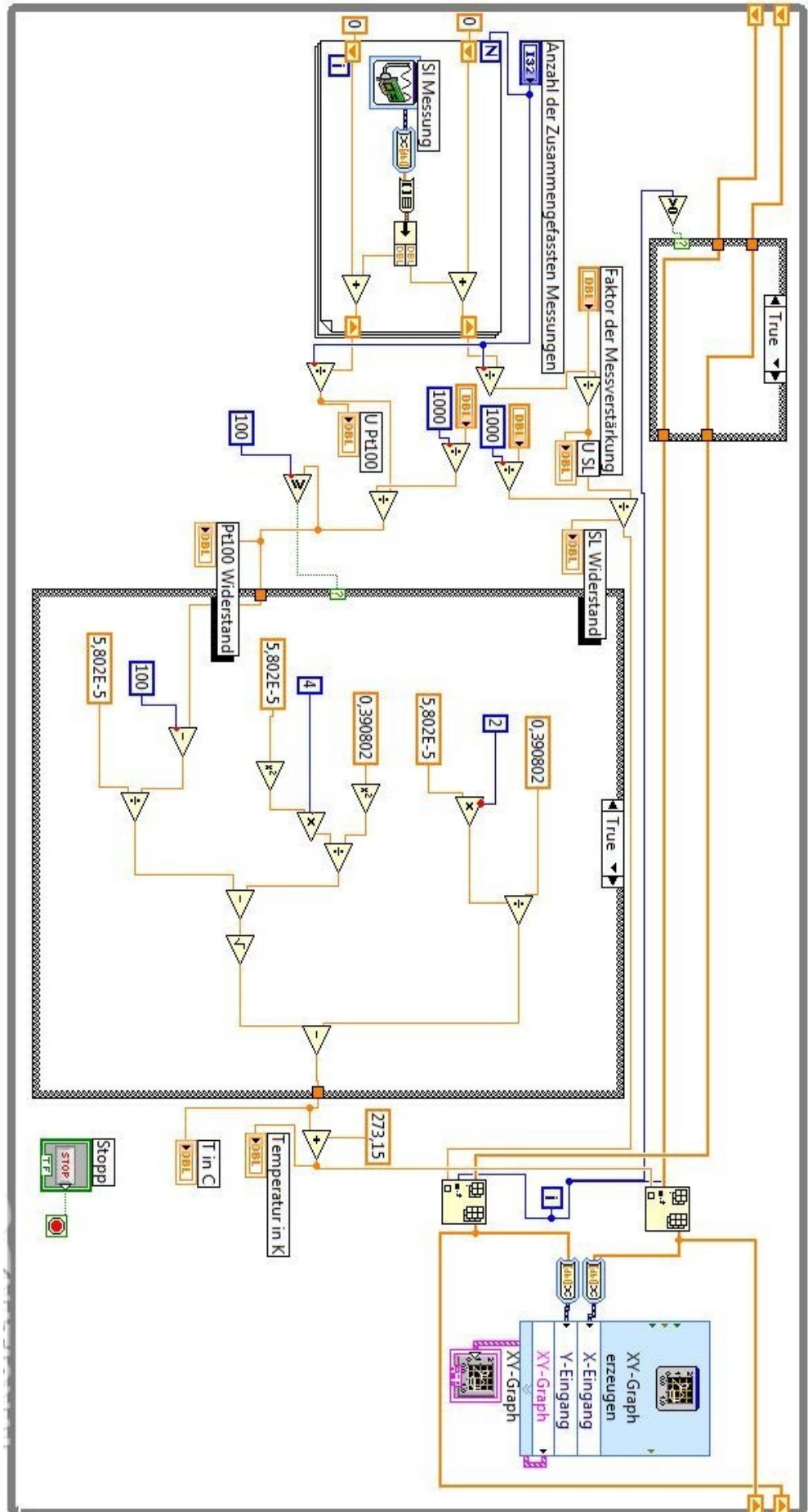
## 9 Anlagen

- Internetquellen auf CD
- weitere Bilder des Versuchs

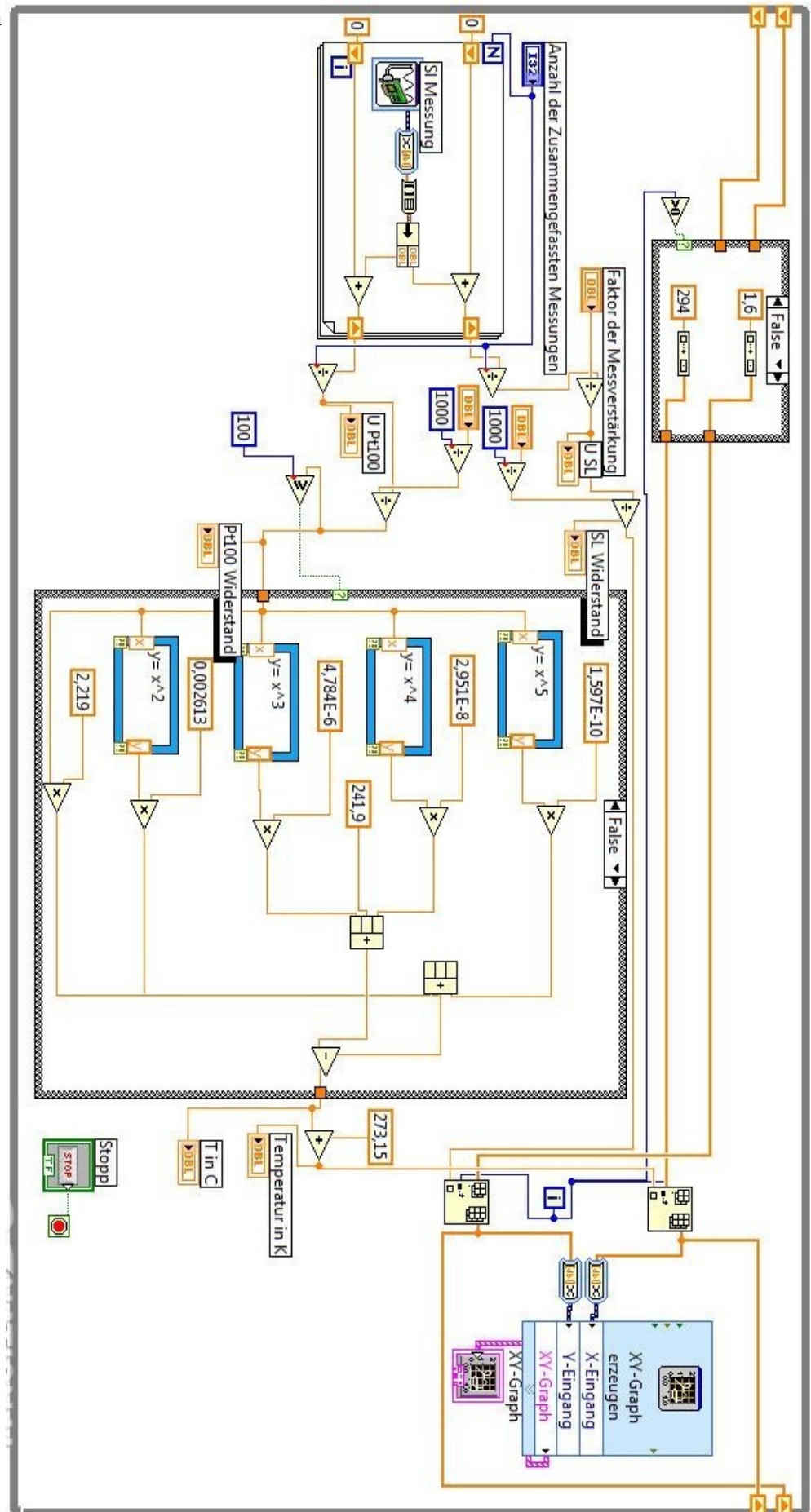


Frontpanel  
von LabVIEW:

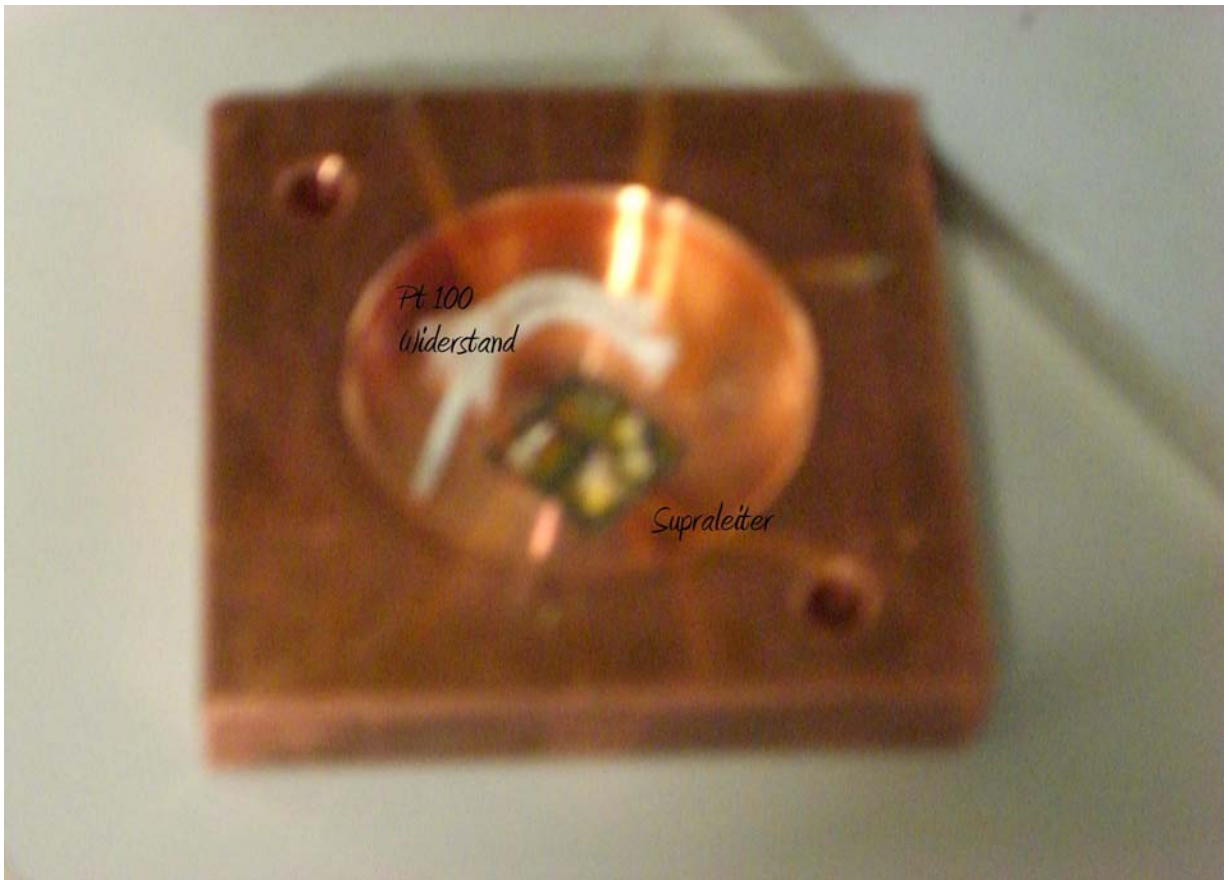
Blockdiagramm  
mit beiden  
Schleifen auf  
True:



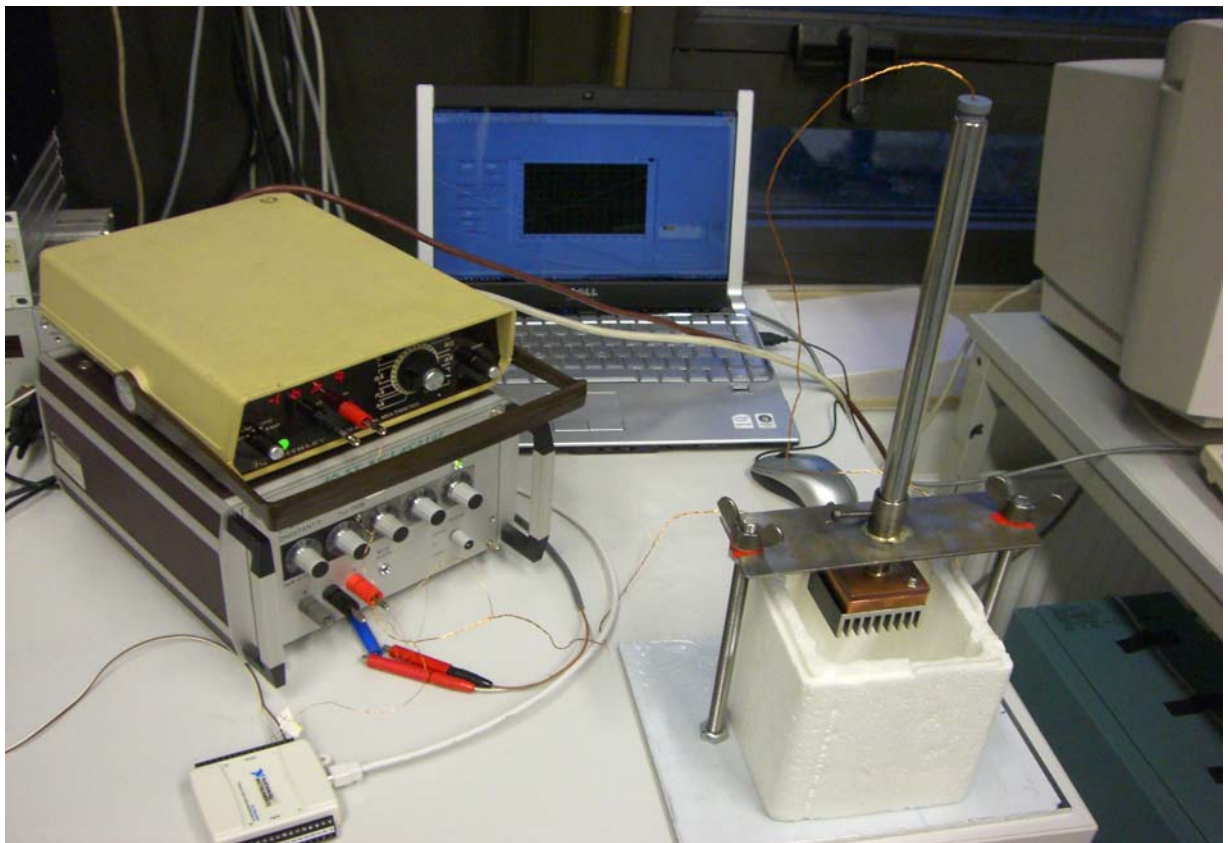
Blockdiagramm  
mit beiden  
Schleifen auf  
False:



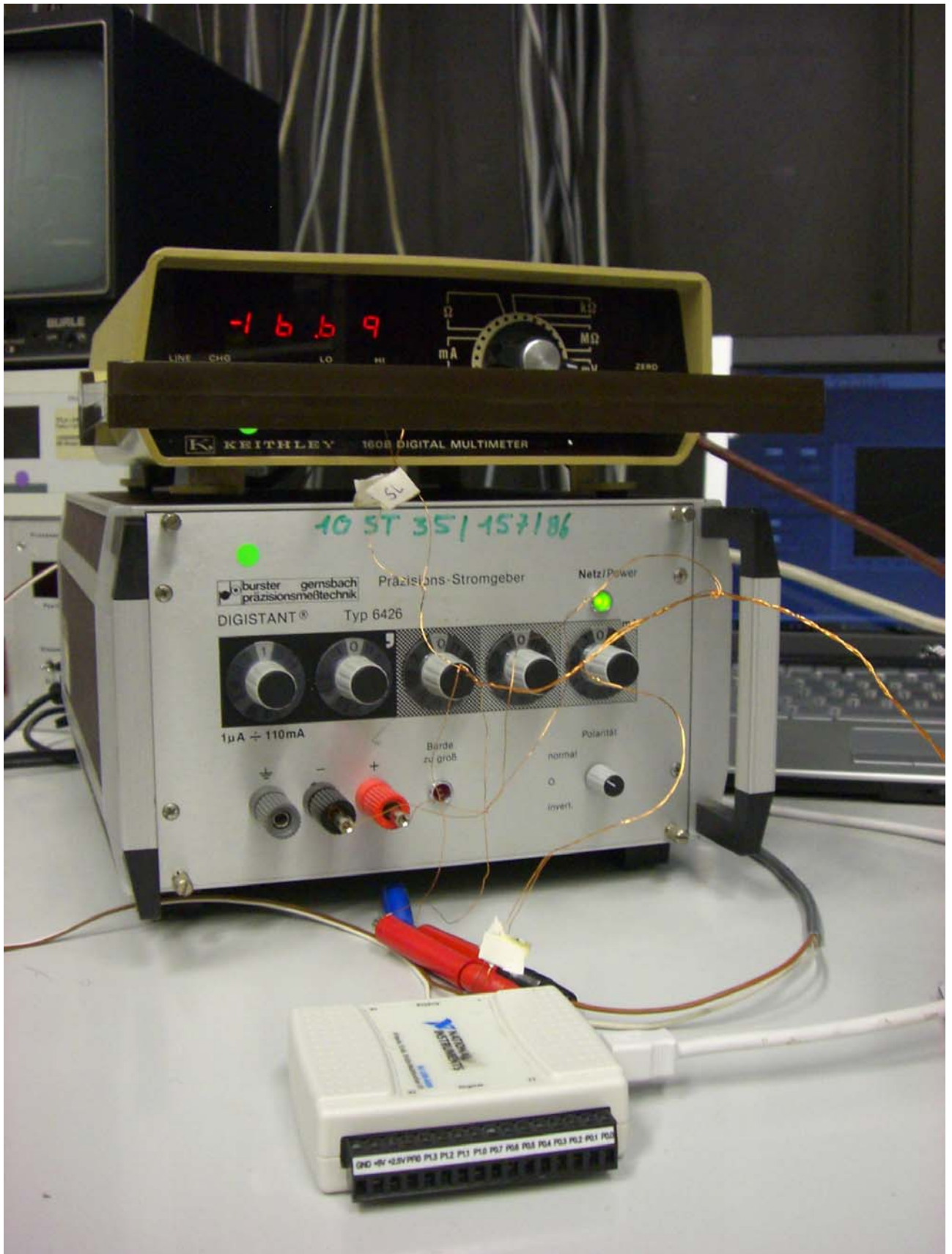
Kupferstück mit Supraleiter und Pt100 Widerstand:



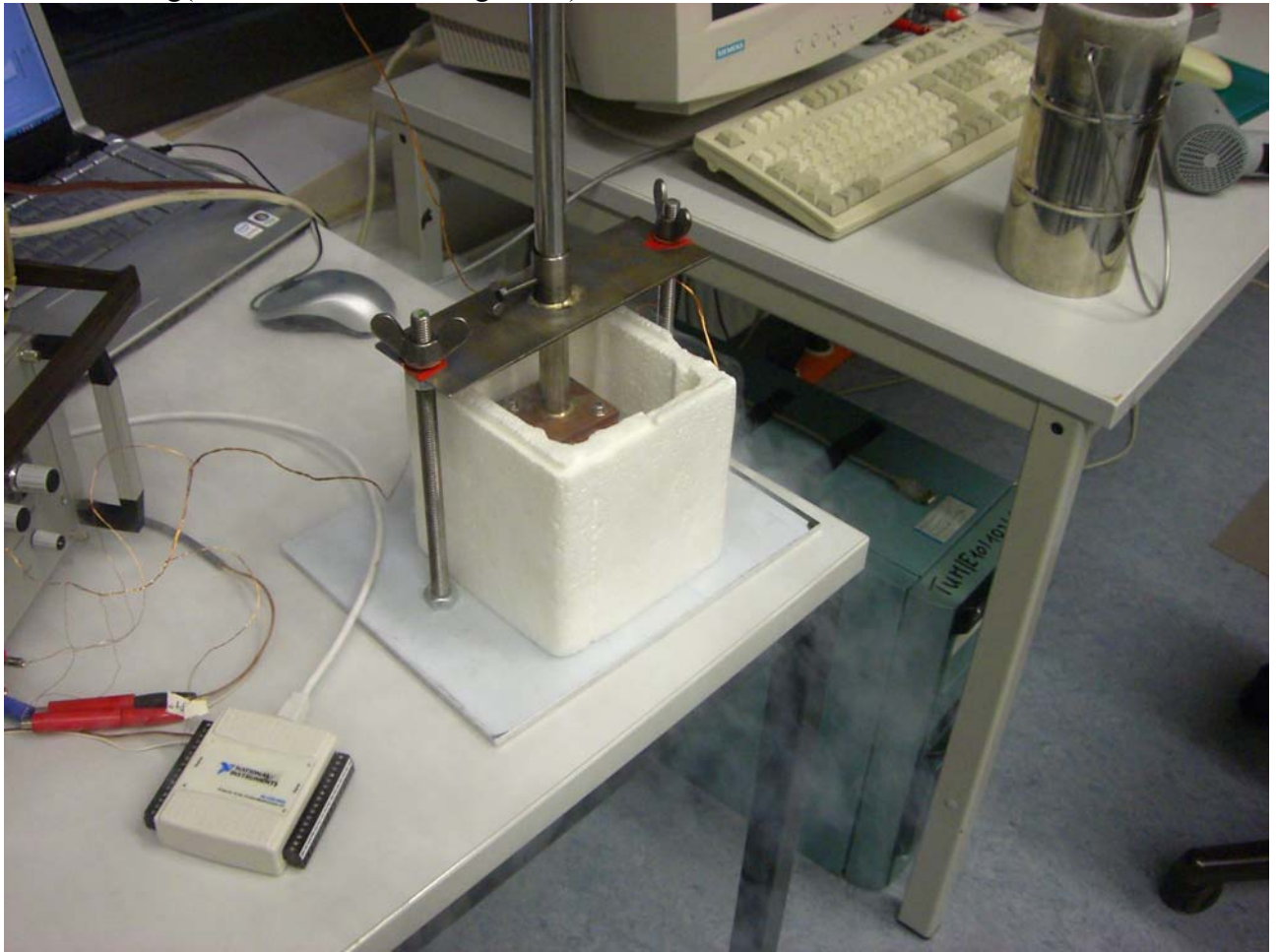
Versuchsanordnung (Greifarm mit Styroporbox und restlichen Geräte):



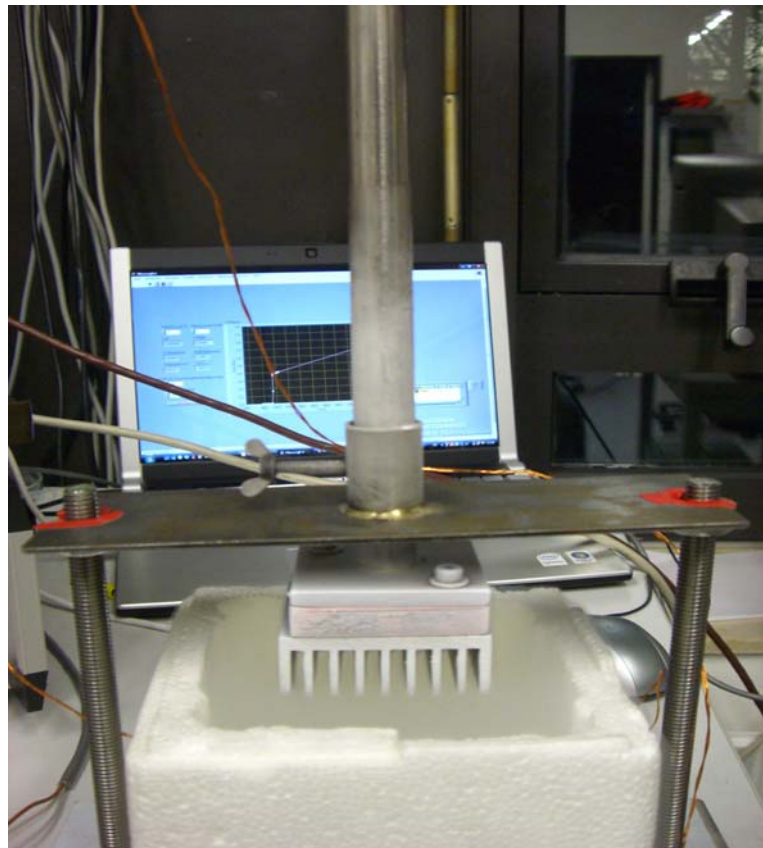
Interface, Konstantstromquelle und Messverstärker (von unten nach oben):



Durchführung(Pt100 und SL werden gekühlt):



Nochmaliges Messen  
beim aufwärmen:



## 10 Erklärung des Verfassers

Ich erkläre, dass ich die Facharbeit ohne fremde Hilfe angefertigt und nur die im Literaturverzeichnis angeführten Quellen und Hilfsmittel benützt habe.

....., .....

.....

Unterschrift des Schülers