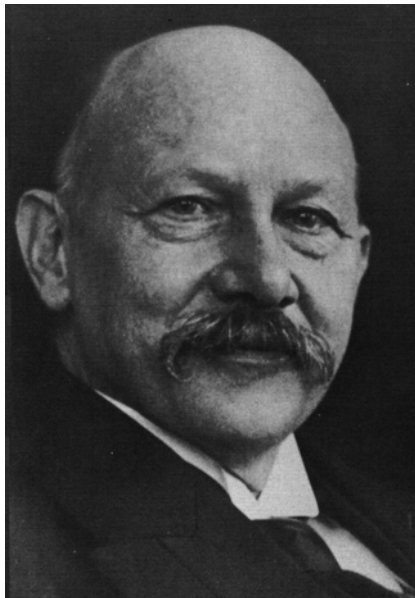


# **Versuchsprotokoll PG-III**

## **Supraleitung**



Der Versuch wurde aufgebaut und durchgeführt in Zusammenarbeit von  
**Fabian Fleischer, Matthias Sturm, René Könnecke, Ramin Torabi,**  
**Heinrich Südmeyer und Diana Bednarczyk,**  
der Gruppe **268-III**  
mit **Cornelia Sing** als Tutorin.

Protokollant war: **Diana Bednarczyk**

# INHALTSVERZEICHNIS

<b>Inhalt</b>	<b>Seitenzahl</b>
<hr/>	
<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>2</b>
<b>Abstract</b>	<b>2</b>
<b>Einleitung</b>	<b>3</b>
<b>Theorie</b>	<b>4</b>
Leitung auf atomarer Ebene	4
Supraleitung quantenmechanisch	5
Verhalten von Supraleitern	6
Der Meißner-Ochsenfeld-Effekt	7
Arten von Supraleitern:	8
Typ I	8
Typ II	9
<b>Versuchsaufbau</b>	<b>9</b>
Meißner - Ochsenfeld - Effekt	9
Bestimmung von $T_c$	10
<b>Durchführung</b>	<b>12</b>
Meißner - Ochsenfeld - Effekt	12
Bestimmung von $T_c$	12
<b>Beobachtung</b>	<b>12</b>
Meißner - Ochsenfeld - Effekt	12
Bestimmung von $T_c$	12
<b>Auswertung</b>	<b>13</b>
Meißner - Ochsenfeld - Effekt	13
Bestimmung von $T_c$	13
1.Messung	13
2.Messung	14
<b>Fehlerbetrachtung</b>	<b>14</b>
<b>Resümee &amp; Tips</b>	<b>15</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>15</b>
<b>Anhang</b> (Photos)	

## ABSTRACT

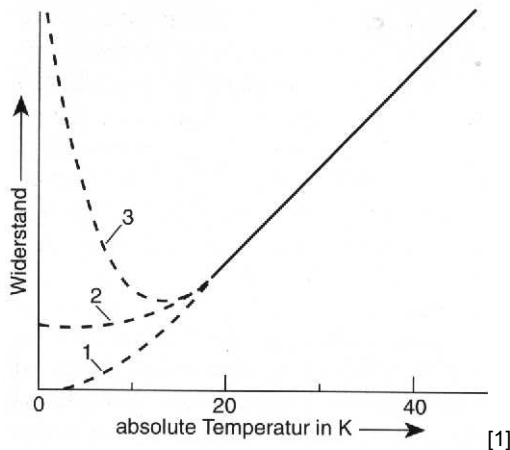
Bei einigen heute bekannten Feststoffen wie z.B. Halbleiter, Legierungen und Keramiken sinkt der Eigenwiderstand bei bestimmten tiefgradigen Temperaturen abrupt so gut wie auf Null. Dieser Zustand wird als Supraleitung bezeichnet und die zugehörige Temperatur als kritische oder Sprungtemperatur  $T_c$ . Sie wurde hier bei einer  $YBa_2Cu_3O_7$  - Keramik (Hochtemperatursupraleiter) mit einer angegebenen  $T_c = 95K$  (etwas knapp) zu  $89K \pm 6K$  bestimmt.

## EINLEITUNG

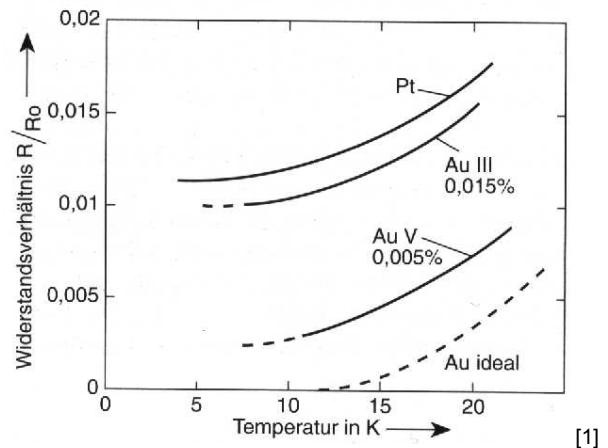
Schon damals, zu Onnes Zeiten (um 1900), wurde vermutet, daß Elektronen für den Ladungstransport verantwortlich sind. Bekannt war allerdings, daß der Widerstand elektrischer Leiter linear mit der Temperatur abnimmt.

Die Temperatur konnte jedoch nicht beliebig weit herunterschraubt werden, so daß sehr geringe Temperaturen um den absoluten Nullpunkt unerreichbar waren. Also konnte nur vermutet werden, was mit dem Widerstand in diesem Grenzbereich geschieht. Die drei gängigsten Vorstellungen waren [Abb.1] :

**Abb.1:**



**Abb.2:**



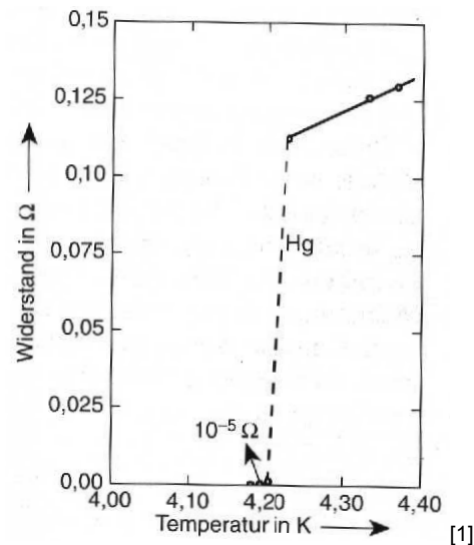
- ◆ Der Widerstand hätte mit sinkender Temperatur stetig weiter gegen Null streben (Kurve 1),
- ◆ einen festen Grenzwert (Restwiderstand) annehmen (Kurve 2) oder
- ◆ ein Minimum durchlaufen und für sehr tiefe Temperaturen gegen unendlich gehen können (Kurve 3),

wobei gerade die dritte Möglichkeit der Vorstellung entsprach, daß bei sehr tiefen Temperaturen die Elektronen an die Atome gebunden sein müßten und damit ihre Beweglichkeit verschwinden sollte.

1908 schließlich gelang es Heike Karmalingh Onnes (21.09.1853 - 21.02.1926) unter ungeheuren Energiezuwendungen Helium mit einer Siedetemperatur von ca. 4,2K zu verflüssigen. Damit war auch dieser Temperaturbereich erschlossen und Onnes begann mit Untersuchungen des elektrischen Widerstandes von Metallen, wie Platin und Gold, die damals schon sehr rein herzustellen waren. Sie zeigten das Verhalten von Kurve zwei, ihr Widerstand näherte sich also stetig einem Grenzwert an [Abb.2].

Aber als er dann später Quecksilber untersuchte, das durch Destillation in einem noch höheren Reinheitsgrad gewonnen werden konnte, entdeckte er, daß hier die Widerstandsabnahme (bei Temperaturen um 4K) eher einem Sprung glich, da der Widerstand in einem Intervall von nur wenigen Hundertstel Grad unmeßbar klein wurde [Abb.3]. Onnes nannte diesen Zustand bei einer Veröffentlichung seiner Forschungsergebnisse "superconductive state", also grob übersetzt Supraleitung.

**Abb.3:**



Er bekam 1913 den Nobelpreis für Physik als Anerkennung für seine Tieftemperaturforschungen und gründete das Kälteinstitut Leiden. Allerdings ist zu erwähnen, daß alle Experimente zur Supraleitung nicht von ihm selbst, sondern von einem seiner Mitarbeiter, Gilles Holst durchgeführt wurden.

Ungefähr 75 Jahre blieb das Tieftemperaturphänomen Supraleitung unerklärt, bis zur Entdeckung der sogenannten Hochtemperatursupraleiter (HTSL) von Bednorz und Müller, die schon bei weitaus höheren Gradzahlen (um 100K) in den supraleitenden Zustand übergehen und somit besser zu untersuchen sind.

## THEORIE

Wie auch schon beim Zeeman-Effekt ist hier wieder einmal ein Quantenphänomen makroskopisch zu zeigen.

### Leitung auf atomarer Ebene

Aus der Schule sollte bereits das Atomgittermodell der Festkörper bekannt sein. Es beschreibt die Atomrümpfe als relativ fest gebunden in einem Gittersystem. Je nach Wärmezufuhr schwingen diese, bei geringerer Wärme weniger und bei steigender Temperatur um so mehr. In einem Leiter bewegen sich einzelne Elektronen (Ladungsträger) aus den Atomen frei, quasi als "Elektronengas" zwischen den Rümpfen, wird eine Spannung angelegt, können diese als Strom gemessen werden. Nun liegt die Vorstellung nahe, daß je niedriger die Temperatur ist, desto weniger die Rümpfe schwingen, also nicht so viel Platz einnehmen, und damit die Wahrscheinlichkeit, daß Elektronen mit ihnen kollidieren abnimmt, sich also der Eigenwiderstand verkleinert. Die Elektronen bekommen also mit sinkender Temperatur eine größere freie Weglänge und mit steigender Wärme gerade eine kleinere. Allerdings würde selbst im absoluten Nullpunkt der Widerstand nicht Null, da die Atomrümpfe zwar nicht mehr schwingen, jedoch immer noch vorhanden wären, und damit die Wahrscheinlichkeit, daß Elektronen mit ihnen kollidieren nicht Null würde. (Der absolute Nullpunkt ist nicht erreichbar!)

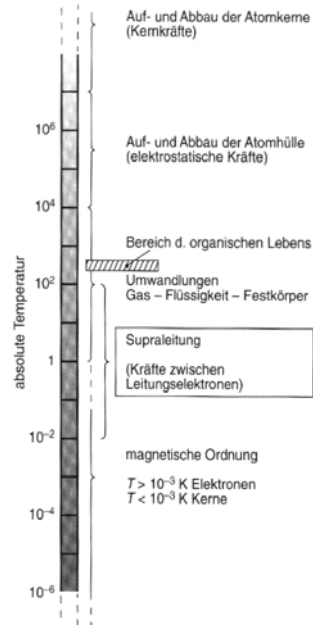
Diese Vorstellung erklärt, warum Metalle bei Kälte besser leiten als bei großer Hitze, das Phänomen Supraleitung ist jedoch noch quantenmechanisch zu betrachten.

### Supraleitung quantenmechanisch:

Um die Supraleitung phänomenologisch zu beschreiben, wurde das Zweiflüssigkeiten-Modell von C. J. Gorter, H. B. G. Casimir und F. und H. London herangezogen.

Es beschreibt zwei Arten von Leitungselektronen, die normalleitenden ( $n$ ) - und die supraleitenden ( $s$ ) - Elektronen, die bei Ladungstransport zusammen fließen. Die Gesamtstomdichte ergibt sich also aus der Summe dieser beiden Anteile:  $n = n_s + n_n$ . Sie sind stark temperaturabhängig, so daß  $n_s$  gegen  $n$  geht, je näher die Temperatur dem absoluten Nullpunkt entgegenstrebt, aber nähert sie sich der kritischen Temperatur  $T_c$ , so geht  $n_s$  gegen Null.

Nun können supraleitender und Normalstrom als zwei Flüssigkeiten angesehen werden, die in einem Gemisch zusammen fließen, analog zum zwei Flüssigkeiten Modell zur Beschreibung flüssigen Heliums, eines Superfluids.



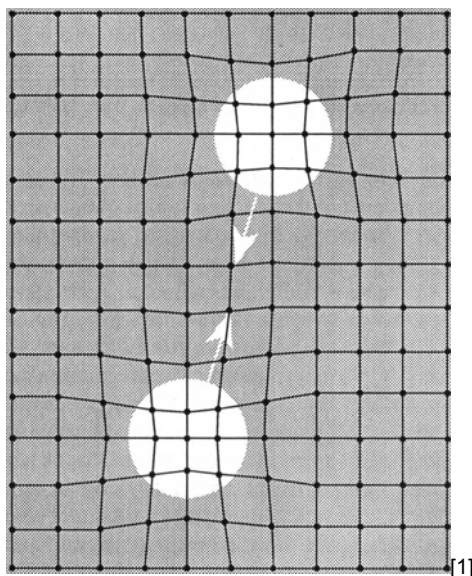
Allerdings ist das Helium mit Spin Null ein Boson und kann somit über die Quantenstatistik des Bose-Einstein-Kondensates erklärt werden, anders als das Fermion Elektron mit dem Spin  $\frac{1}{2}$ . Hierfür gibt es kein passendes Kondensat, aber da es Elektronen sowohl mit Spin  $\frac{1}{2}$ , als auch die negative Variante (Spin  $-\frac{1}{2}$ ) gibt, wurde doch eine Erklärung gefunden: Das Cooper-Paar, es hat Spin Null und gehorcht somit der Bose-Statistik.

J. Bardeen (B), L.N. Cooper (C) und J. R. Schrieffer (S) stellten 1957 die BCS Theorie auf. Dazu ist zu erwähnen, daß je niedriger die Temperatur wird, desto mehr und immer schwächere Kräfte Wirkung zeigen (Siehe Skala).

Es kann sich vorgestellt werden: wenn ein Elektron durch das Gitter von Atomrümpfen "fliegt" so zieht es die positiven Rümpfe kurzzeitig an. Ein anderes Elektron kann dies "bemerken" und in die bereits vorbeschriebene Furche einlenken, wodurch es auf ein niedrigeres potentielles Energieniveau gebracht wird.

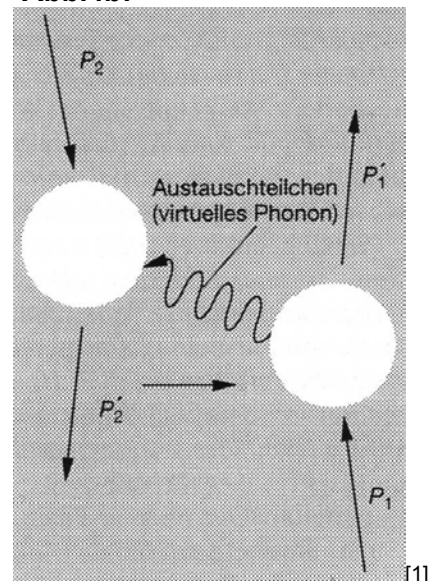
Die Schwingungen des Kristallgitters werden in Energiequanten, die Phononen, eingeteilt. Diese vermitteln bei ausreichend tiefen Temperaturen eine anziehende Wirkung zwischen Leitungselektronen mit entgegengesetztem Spin und Impuls, die jedoch örtlich nicht nah beieinander sein müssen (Elektron-Elektron-Wechselwirkung via Phononen; typischer mittlerer Abstand: 0,1 - 1  $\mu\text{m}$ ).

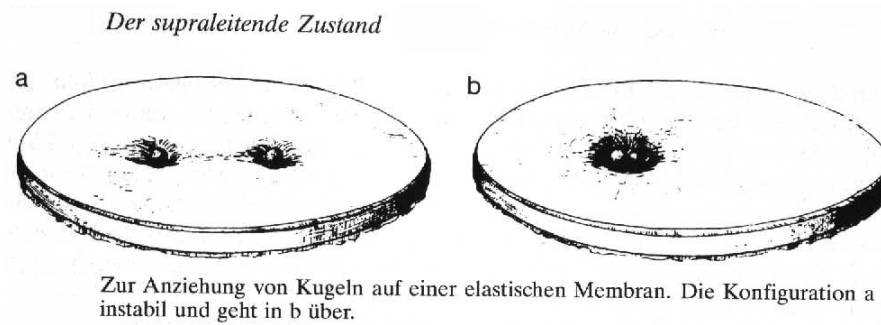
**Abb.4a:**



**Abb.4c:**

**Abb.4b:**

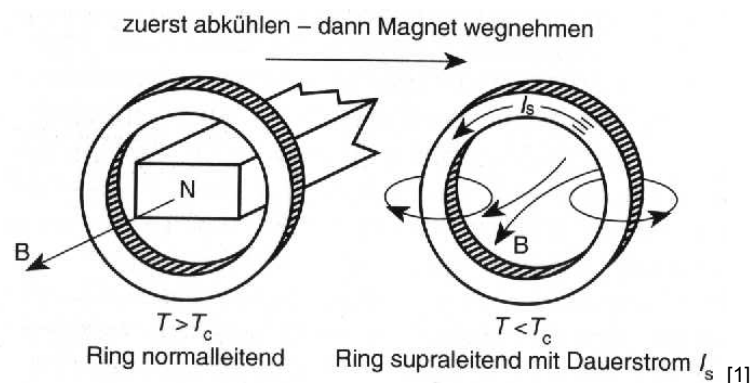




Sind die Elektronen "gebunden" werden sie zu oben erwähnten Cooper-Paaren, die nicht länger dem Pauli-Prinzip genügen, das besagt, daß sich Elektronen mindestens in einer Quantenzahl unterscheiden müssen, da Cooper-Paare sich nun wie Bosonen verhalten. Somit können unbegrenzt viele dieser Paare auf den Grundzustand gelangen und trotzdem am Ladungstransport teilnehmen. Sie interferieren in diesem Zustand nicht mit Phononen, leiten also keine Entropie, so kommt es, daß der elektrische Widerstand und die Thermokraft nahezu Null werden.

(Auch Supraleiter haben einen Widerstand, der indirekt gemessen werden kann: In einem ringförmigen Supraleiter im supraleitenden Zustand wird durch Änderung eines Magnetfeldes ein Strom induziert und dieser gemessen. Nach einigen Monaten hat er sich dann so weit verändert, daß eine quantitative Aussage über eine obere Grenze des Widerstandes des Supraleiters gegen Null getroffen werden kann. [Abb. 5])

**Abb.5**



Der Übergang von Normal- zu Supraleitung wird auch paarweise Kondensation des Elektronengases genannt (Bose-Kondensation im Impulsraum).

Der oben erwähnte Grundzustand ist von dem ersten angeregten, also dem "normalen" Zustand durch eine wenige meV betragende Energielücke, die sogenannte "verbotene Zone" getrennt, die nahe bei  $T_c$  steil auf Null abfällt.

Oberhalb von  $T_c$  brechen die selben Phononen, die für das Koppeln des Cooper-Paares verantwortlich waren, diese Verbindung wieder auf.

Dieses Modell schließt Supraleitung bei Flüssigkeiten, Gasen, Halbleitern, Isolatoren und Ferromagneten (da diese auf Wechselwirkungen von Elektronen paralleler Spins beruhen) aus.

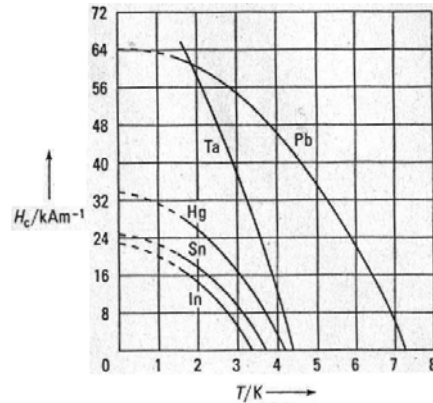
### Verhalten von Supraleitern:

Supraleiter sind sehr stark temperaturabhängig, so ist der supraleitende Zustand erst ab einer kritischen Temperatur erreicht, der sich dann allerdings in seinen Merkmalen nicht mehr verändert. Diese Temperatur ist im allgemeinen sehr niedrig, die höchste wird etwa bei 135K angesiedelt (HTSL).

Doch nicht nur die Temperatur ist entscheidend, Supraleiter reagieren auch sehr empfindlich auf äußere Magnetfelder. Übersteigt eine wirkende H-Feldstärke einen gewissen Grenzwert  $H_c$  (kritische Feldstärke oder Schwellwert) bricht der Supraleitende Zustand zusammen und das Material wird wieder normalleitend.

Es gilt bei den meisten Element-Supraleitern: Bei  $T_c$  ist  $H_c$  gleich Null, bei  $T=0$  ist  $H_c$  maximal und je kleiner  $T_c$  desto kleiner ist auch  $H_c$  für  $T$  gegen Null [Abb.6].

**Abb.6:**



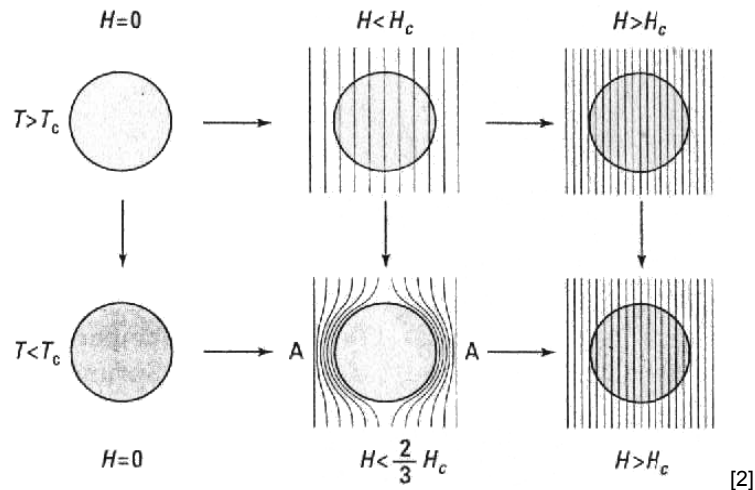
Kritische Feldstärke als Funktion der Temperatur. [2]

Es ist außerdem bekannt, daß Stromfluß ein Magnetfeld induziert, so ist es auch bei Supraleitern. Folglich gibt es eine kritische Stromstärke  $I_c$ , deren begleitendes Magnetfeld an der Oberfläche des Supraleiters gerade den Wert  $H_c$  annimmt, und daraus folgt wieder der Zusammenbruch des supraleitenden Zustandes.

Der Zusammenhang ist also:  $I_c = O \cdot H_c$ , wobei  $O$  die Oberfläche des Supraleiters ist. Supraleiter verhalten sich ideal diamagnetisch.

### Der Meißner-Ochsenfeld-Effekt:

**Abb.7:**

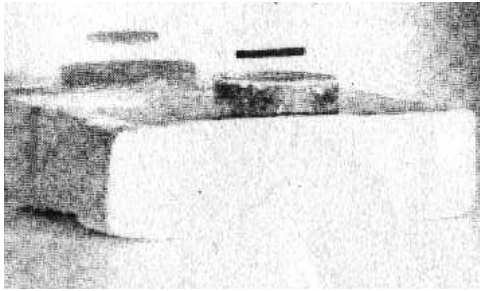


Ein Supraleiter zeichnet sich aber nicht nur durch seinen fast fehlenden Widerstand, sondern auch durch das Fehlen der magnetischen Feldstärke in seinem Inneren aus. Ein Supraleiter unterhalb der Sprungtemperatur  $T_c$  und  $H_c$  ist, wie oben erwähnt, ideal diamagnetisch. Ein äußeres Magnetfeld, das kleiner als  $H_c$  ist, kann also nicht oder nur sehr wenig (wie später noch erklärt wird) in dem Supraleiter eindringen, bzw. wird ausgetrieben, sobald der supraleitende Zustand einsetzt (entdeckt 1933 von W. Meißner und R. Ochsenfeld) [Abb.7].

Ein Magnet, der dem Supraleiter angenähert wird, induziert dort einen Strom, der durch den fehlenden Widerstand vollständig proportional zum Magnetfeld des Magneten selbst ist. Dieser Strom induziert wiederum ein gleichwertiges Magnetfeld an der Oberfläche des Supraleiters, das dem des Magneten genau entgegenwirkt.

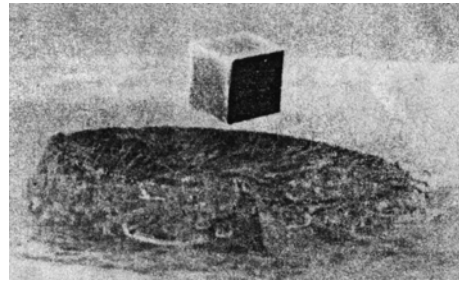
Dadurch liegt der Magnet praktisch auf seinen eigenen Feldlinien in einer Gleichgewichtslage, denn jede Änderung seiner Position parallel zum Feld wird sofort kompensiert. Schließlich sieht es so aus, als würde der Magnet schweben.

**Abb.8a:**



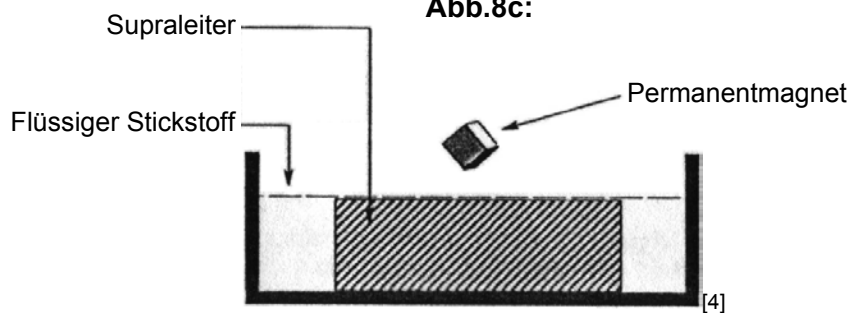
[2]

**Abb.8b:**



[4]

**Abb.8c:**



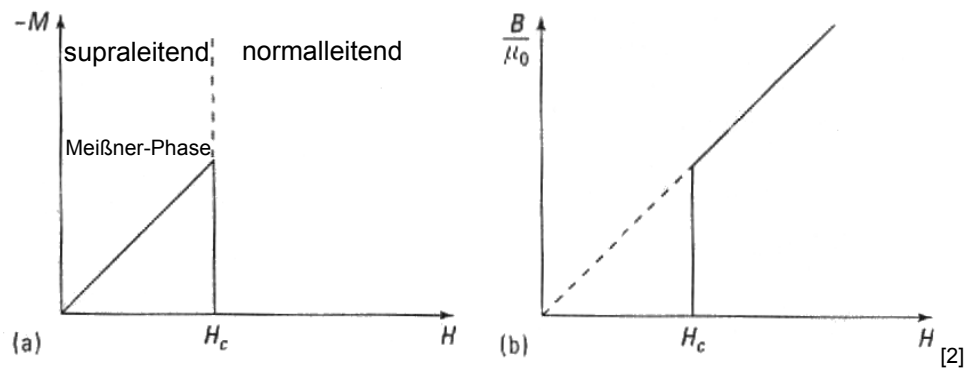
[4]

### Arten von Supraleitern:

Es gibt zwei verschiedene "Sorten" von Supraleitern die Typ I und Typ II Supraleiter.

#### Typ I Supraleiter:

**Abb.9a:**



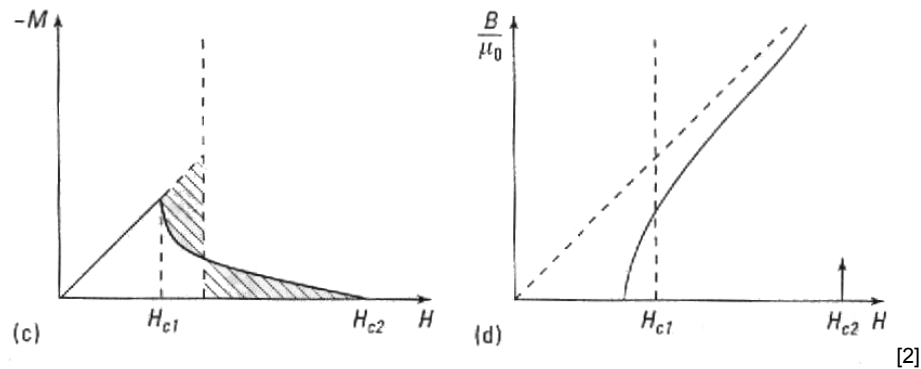
Die beiden oberen Kurven zeigen den erwarteten, idealen Graphen der Magnetisierung  $M$  des Supraleiters über dem anliegenden  $H$ -Feld.

Tatsächlich aber verhalten sich nur einige wenige sehr reine Supraleiter so. Sie zeichnen sich durch eine große mittlere freie Weglänge der Leitungselektronen, sowie geringe mechanische Härte aus und werden Typ I Supraleiter genannt.



### Typ II Supraleiter:

**Abb.9b:**



Diese beiden Graphen zeigen allerdings das Magnetisierungsverhalten der weitaus meisten Supraleiter, der Typ II Supraleiter mit kurzer freier Weglänge der Leitungselektronen. Bis zu einem bestimmten kritischen Magnetfeld  $H_{c1}$  verhält sich dieser Supraleiter wie Typ I, aber oberhalb von  $H_{c1}$  dringt der Magnetfluß doch etwas in den Supraleiter ein. Die Eindringtiefe  $\lambda$  hängt dabei stark vom Material und der Temperatur ab.

(Eine geringe, auch bei  $H < H_{c1}$  vorhandene, Durchdringung der Oberfläche,  $\lambda_{\text{typ.}} = 30$  bis  $60\text{nm}$ , bewirkt die Induktion der feldkompensierenden stationären Ströme im Meißner-Ochsenfeld-Effekt.)

Die meßbare Durchdringung des Typ II Supraleiters mit dem Magnetfeld liegt begründet in der Bildung normalleitenden Bereiche in diesem. Solange diese die supraleitenden Bereiche nicht auseinanderreißen, ist der elektrische Widerstand des Supraleiters weiterhin Null, aber je mehr und größer die normalleitenden Bezirke werden, desto größer wird auch die Magnetisierung des gesamten Supraleiters. Diese "gerade noch Supraleitung" wird gemischter Zustand genannt.

Wird nun ein weiteres kritische Magnetfeld  $H_{c2}$  überschritten, sind die supraleitenden Bereiche nicht mehr zusammenhängend und der normalleitende Zustand tritt ein.

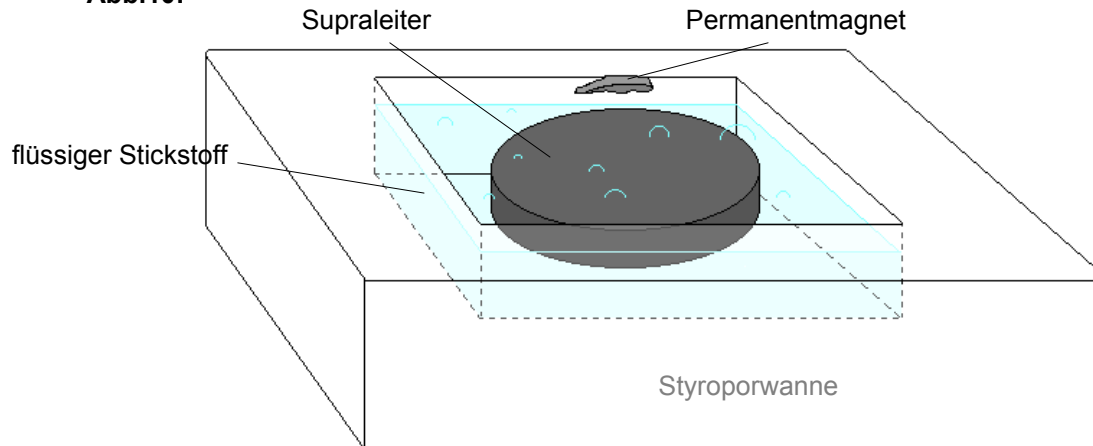
## VERSUCHSAUFBAU

### **Meißner - Ochsenfeld - Effekt:**

*Hierzu wurde folgende Ausrüstung benötigt:*

Supraleiter	(Exsikkator
YBa <sub>2</sub> Cu <sub>3</sub> O <sub>7</sub> (HTSL)	im Assizimmer),
Permanentmagnet	(241),
flüssiger Stickstoff	(Keller),
Styroporwanne	(AssiZimmer),
(Aus Meißner - Ochsenfeld - Set)	
Fotoapparat	(100),
Heißluftpistole	(Werkstatt),

**Abb.10:**

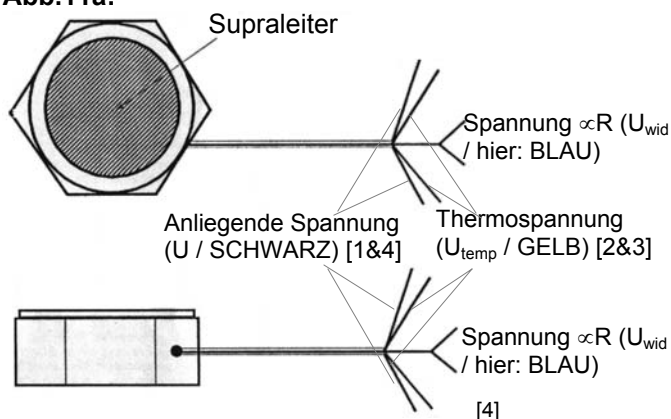


### Bestimmung von $T_c$ :

Hierzu wurde folgende Ausrüstung benötigt:

Supraleiter	(Exsikkator),
$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ (HTSL)	
(Colorado Superconductor Inc.)	
3 Multimeter	(034b),
Netzgerät	(015b),
(30V/10A, EA 7030-100)	
Meßverstärker (NEVA)	(044b),
flüssiger Stickstoff	(Keller),
Tasse	(Küche),
(als Styroporwannenersatz)	
Heißluftpistole	(Werkstatt),
[ Widerstandsdekade (235), ]	
[ PC ]	

**Abb.11a:**



**Abb.11b:**

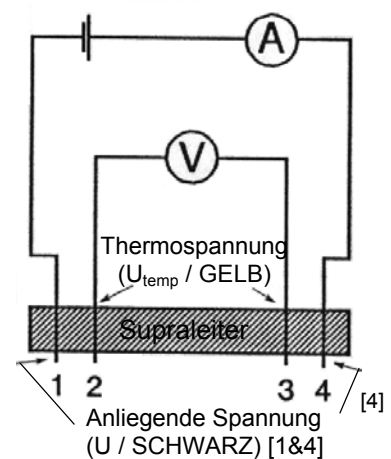


Abb.12a:

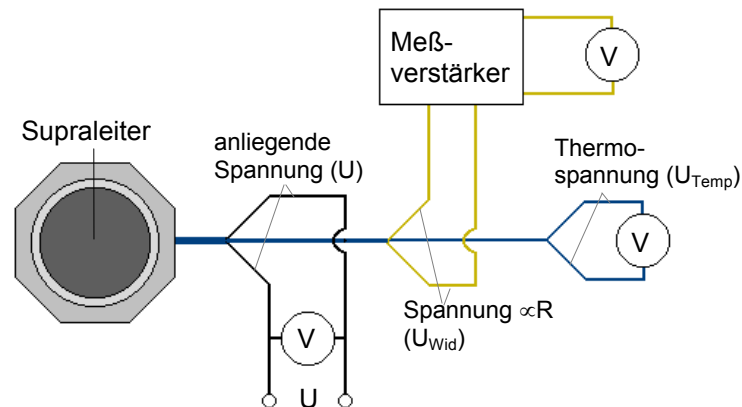
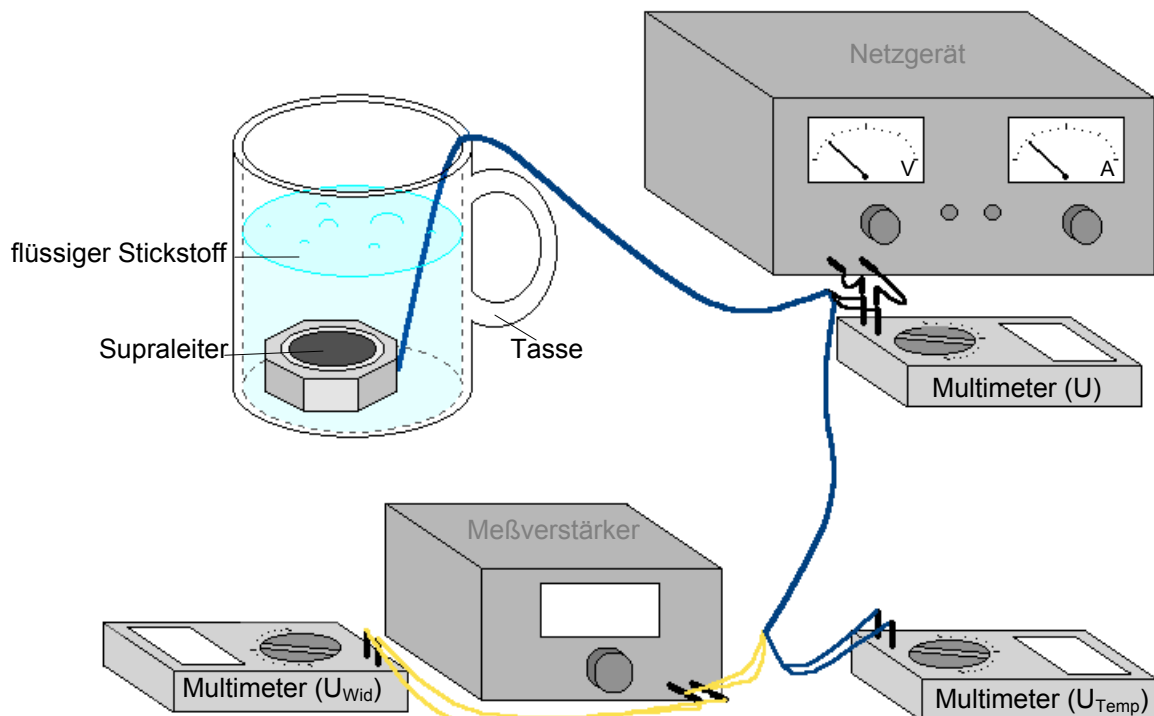


Abb.12b:



Der Supraleiter wurde in eine Tasse gegeben, wobei die sechs angebrachten Kabel heraus hingen. Nun wurden die zwei schwarzen Kabel an die Spannungsquelle (Netzgerät), die beiden gelben Kabel (zum Widerstand proportionale Spannung) über einen Meßverstärker an ein Multimeter und die übrigen zwei Kabel (zur Temperatur proportionale Spannung) an ein weiteres Multimeter angeschlossen, selbstverständlich wurde auch die Spannung an der Stromversorgung abgenommen.

Zwischendurch wurden noch ein Widerstand von  $30\ \Omega$  vor den Supraleiter geschaltet, aber dies blieb ohne Erfolg. Er wurde bei den brauchbaren Messungen nicht benötigt.

Es wurde auch versucht, die Spannung des integrierten Thermoelementes zu verstärken, da der zweite Meßverstärker jedoch defekt war, wurde auch dies verworfen.

## DURCHFÜHRUNG

### **Meißner - Ochsenfeld - Effekt:**

Der HTSL wurde in eine extra dafür vorgesehene (Im Assistentenzimmer befindet sich ein richtiges Set für den Meißner - Ochsenfeld - Effekt) Styroporwanne gelegt und vollständig mit flüssigem Stickstoff übergossen, so daß dieser komplett bedeckt war.

Als der Supraleiter auf 77K (Siedetemperatur von Stickstoff) herunter gekühlt war (es dauert einen Moment, bis sich der Siedevorgang beruhigt, er endet jedoch natürlich nicht vollständig) wurde ihm ein sehr kleines Stück Permanentmagnet mit Hilfe einer Kunststoffpinzette angenähert und "frei" gelassen.

Das Bild das dabei entstand wurde mit dem Fotoapparat festgehalten.

Die Heißluftpistole diente lediglich zum schnellen Trocknen des HTSL, da dieser keine großartige Luftfeuchtigkeit ziehen darf und sich beim Erwärmungsprozeß Eiskristalle auf dem Supraleiter bilden, die später zu Kondenswasser schmelzen.

### **Bestimmung von $T_c$ :**

Der Supraleiter wurde leicht unter Strom gesetzt (0,2 - 0,5A) und mit flüssigen Stickstoff unter die kritische Temperatur gekühlt. Die am Thermoelement abgenommene Spannung kann aus einer Tabelle aus dem Manual zum Supraleiter direkt auf Kelvin übertragen werden (siehe Auswertung: Tabelle). Danach wurde der Supraleiter langsam erwärmt (Zimmertemperatur ist vollkommen ausreichend) und die zum Widerstand proportionale Spannung solange beobachtet, bis sie einen anderen Wert als Null oder eine nullwertige (der Meßverstärker brachte eine ziemlich große Ungenauigkeit mit sich, siehe Auswertung) Spannung anzeigte. Die diesem Zeitpunkt des Umsprungs entsprechende Temperatur wurde notiert und entsprach  $T_c$ , der kritischen Temperatur.

Anschließend, nach jedem Versuch, wurde der Supraleiter mit der Heißluftpistole getrocknet.

## BEOBACHTUNG

### **Meißner - Ochsenfeld - Effekt:**

Der Meißner - Ochsenfeld - Effekt war erst nach mehreren Versuchen, Austauschen des Supraleiters (alle waren zerbrochen) und langem Probieren sichtbar. Doch er war selbst mit dem kleinsten Bruchstück des Permanentmagneten (ca. 0,5mm Durchmesser und 2mm Länge) so gering, daß ihn die Fotos leider nicht sehr gut zu fassen bekamen, da es eine ziemlich plane Sicht bei sehr geringen Abstand gebraucht hätte, um ihn vernünftig zu fotografieren (die nicht zu konstruieren war).

### **Bestimmung von $T_c$ :**

Auch hier gab der Supraleiter, obwohl er sehr sorgfältig gepflegt war, da extra im Exsikkator aufbewahrt, schnell seinen Geist auf, weshalb hier nur zwei gelungene Meßreihen zur  $T_c$  - Bestimmung aufgenommen werden konnten. Diese beiden sind allerdings unter den gegebenen Umständen gar nicht so übel.

Es sollte gleich zu Beginn auch ein Computer angeschlossen werden, da aber das alleinige Koppeln der Meßapparatur mit dem PC das Messen (durch Verfälschung der Werte) unmöglich machte, mußte sich auf die Aufnahme von Wertepaaren beschränkt werden.

## AUSWERTUNG

### Meißner - Ochsenfeld - Effekt:

Leider ist der Meißner - Ochsenfeld - Effekt auf den abgebildeten Aufnahmen nur sehr schwer erkennbar (obwohl hier nur die besten gezeigt werden).

Auf Bild a ist schon sehr viel Phantasie notwendig, um ein Schweben des kleinen schwarzen Punktes zu erkennen, der den Permanentmagneten darstellt. Allerdings ist dies das schärfste Bild und somit hier vertreten.

Bild c hingegen stellt wohl den besten graphischen Beweis des Meißner - Ochsenfeld - Effektes dieser Gruppe dar (zu beachten ist hier der kleine Schatten, den der Magnet auf den Supraleiter wirft; Schatten und Magnet berühren sich nicht!). Er wurde einem durch Zufall in der Dunkelkammer gefundenen Bild d einer anderen (leider unbekannten) Gruppe gegenübergestellt, auf dem leicht zu erkennen ist, wie dieser Effekt auch selbst aufgebaut aussehen kann.

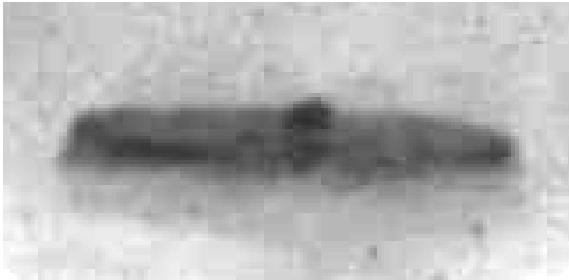
**a**



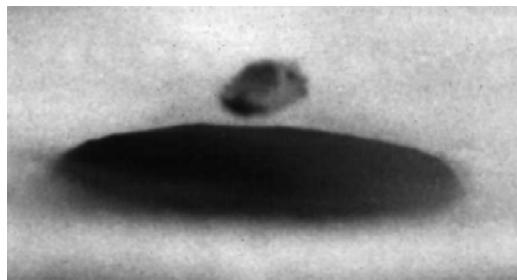
**b**



**c**



**d**



### Bestimmung von $T_c$ :

Die Sprungtemperatur  $T_c$  entspricht in den beiden Meßtabellen jeweils dem Wert, bei dem sich  $U_R$  zum ersten mal von Null unterscheidet.

### Meßreihen:

#### 1. Messung

$U_{temp}$ [ mV ]	$\Delta U_{temp}$ [ mV ]	Temperatur [ K ]	$\Delta$ Temperatur [ K ]	$U_R$ [ mV ]	$\Delta U_R$ [ mV ]
6,1	$\pm 0,1$	84	$\pm 3$	0,0	$\pm 0,1$
5,9	$\pm 0,1$	90	$\pm 3$	0,2	$\pm 0,1$
5,5	$\pm 0,1$	100	$\pm 3$	0,4	$\pm 0,1$
5,0	$\pm 0,1$	114	$\pm 3$	0,5	$\pm 0,1$
3,8	$\pm 0,1$	148	$\pm 3$	0,9	$\pm 0,1$

Hier ist  $T_c$  zu ungefähr  $90K \pm 6K$  bestimmt.

Bei dieser Messung (2) wurde vor die zum Widerstand proportionale Spannung ein Meßverstärker geschaltet. Dieser brachte eine Verschiebung des Nullwertes um ca. -10,5 und weitere Ungenauigkeiten mit sich, die sich allerdings zum Glück nicht auf die Messung von  $T_c$  niederschlagen, da der Wert dieser Spannung außer an besagtem Umschlagspunkt irrelevant ist.

## 2. Messung

$U_{\text{temp}}$ [mV]	$\Delta U_{\text{temp}}$ [mV]	Temperatur [K]	$\Delta$ Temperatur [K]	$U_R$ [mV]	$\Delta U_R$ [mV]
6,4	$\pm 0,1$	77	$\pm 3$	-10,5	$\pm 0,4$
6,0	$\pm 0,1$	87	$\pm 3$	-160	$\pm 150$

Hier ist  $T_c$  sofort zu 87K zu erkennen, da in dieser Meßreihe nur zwei Werte eingetragen sind.

**Tabelle:** Umrechnung von mV in Kelvin

$^{\circ}\text{K}$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	$^{\circ}\text{K}$
60	7.60	7.53	7.46	7.40	7.33	7.26	7.19	7.12	7.05	6.99	6.92	60
70	6.92	6.85	6.78	6.71	6.64	6.56	6.49	6.42	6.37	6.33	6.29	70
80	6.29	6.25	6.21	6.17	6.13	6.09	6.05	6.01	5.97	5.93	5.90	80
90	5.90	5.86	5.83	5.79	5.75	5.72	5.68	5.64	5.60	5.56	5.52	90
100	5.52	5.48	5.44	5.41	5.37	5.34	5.30	5.27	5.23	5.20	5.16	100
110	5.16	5.13	5.09	5.06	5.02	4.99	4.95	4.91	4.88	4.84	4.81	110
120	4.81	4.77	4.74	4.70	4.67	4.63	4.60	4.56	4.53	4.49	4.46	120
130	4.46	4.42	4.39	4.35	4.32	4.28	4.25	4.21	4.18	4.14	4.11	130
140	4.11	4.07	4.04	4.00	3.97	3.93	3.90	3.86	3.83	3.79	3.76	140
150	3.76	3.73	3.69	3.66	3.63	3.60	3.56	3.53	3.50	3.47	3.43	150
160	3.43	3.40	3.37	3.34	3.30	3.27	3.24	3.21	3.18	3.15	3.12	160
170	3.12	3.09	3.06	3.03	3.00	2.97	2.94	2.91	2.88	2.85	2.82	170
180	2.82	2.79	2.76	2.73	2.70	2.67	2.64	2.61	2.58	2.53	2.52	180
190	2.52	2.49	2.46	2.43	2.40	2.37	2.34	2.31	2.29	2.26	2.23	190
200	2.23	2.20	2.17	2.14	2.11	2.08	2.05	2.02	1.99	1.96	1.93	200
210	1.93	1.90	1.87	1.84	1.81	1.78	1.75	1.72	1.69	1.66	1.64	210
220	1.64	1.61	1.59	1.56	1.54	1.51	1.49	1.46	1.44	1.41	1.39	220
230	1.39	1.36	1.34	1.31	1.29	1.26	1.24	1.21	1.19	1.16	1.14	230
240	1.14	1.11	1.09	1.07	1.04	1.02	0.99	0.97	0.94	0.92	0.89	240
250	0.89	0.87	0.84	0.82	0.79	0.77	0.74	0.72	0.69	0.67	0.65	250
260	0.65	0.62	0.60	0.58	0.55	0.53	0.50	0.48	0.45	0.42	0.40	260
270	0.40	0.38	0.36	0.34	0.32	0.30	0.28	0.26	0.24	0.22	0.20	270
280	0.20	0.18	0.16	0.14	0.12	0.10	0.08	0.06	0.04	0.02	0.00	280
290	0.00	-0.02	-0.04	-0.06	-0.08	-0.10	-0.12	-0.14	-0.16	-0.18	-0.20	290
300	-0.20	-0.22	-0.24	-0.26	-0.28	-0.30	-0.32	-0.34	-0.36	-0.38	-0.40	300

## FEHLERBETRACHTUNG

In der Tabelle ist zu erkennen, daß Sprünge von 0,02 bis 0,04mV ca. einem Kelvin entsprechen.

Der Fehler, der sich durch die Ungenauigkeit des Multimeters ergibt, da dieses lediglich eine Nachkommastelle anzeigt (das Multimeter rundet nicht), beträgt im Mittel  $\Delta U_{\text{temp}} \triangleq \Delta \text{Temperatur} = \pm 3\text{K}$ , wie auch in den Meßtabellen angegeben.

Der oben ebenfalls angegebene Fehler für die gemessene Thermospannung (Schwankung der angezeigten Spannung beim Versuch) beträgt  $\Delta U_R = \pm 0,1\text{mV}$ , das entspricht jedoch auch rund 3K.

Da hier lediglich der Mittelwert zwischen zwei Werten gebildet wurde, ist es "legal" die beiden entsprechenden Fehler einfach zu addieren; daraus ergibt sich dann ein Gesamtfehler von  $\Delta U_{\text{ges}} = \Delta U_{\text{temp}} + \Delta U_R = \pm 6\text{K}$  (bereits in Kelvin umgerechnet), womit der gerundete Mittelwert der beiden Meßwerte, von  $T_c = 89\text{K}$ , noch knapp in der Fehlertoleranz liegt.

## RESÜMEE

Obwohl beide Aufbauten sehr einfach waren, lag doch die Tücke im Detail. Daß hier doch noch einigermaßen auswertbare Ergebnisse entstanden, ist wohl mehr einem glücklichen Zufall als der Zuverlässigkeit der Meßgeräte oder gar dem Hauptakteur Supraleiter zu verdanken. Dennoch soll hier nicht vor diesem Versuch abgeschreckt werden, denn allein das Spielen mit flüssigem Stickstoff und der Meißner - Ochsensfeld - Effekt (der übrigens immer gelingt) machen ihn zu einem Erlebnis besonderer Art. Es sei jedoch darauf zu achten, daß besonders bei diesem Versuch gute, genaue und vor allen Dingen funktionstüchtige Geräte bereitstehen und der verfügbare Supraleiter schon im Vornherein genauer betrachtet wurde. Nicht, daß sich erst nach dem Aufbau jemand fragt: "Wofür sind denn die letzten beiden Anschlüsse da?" und erstmal die englische Beschreibung des Supraleiters durchwühlt wird, um sich zurecht zu finden, so wie das bei uns der Fall war.

### **TIPS:**

*Noch drei wichtige Tips zum Abschluß:*

- ◆ *Bevor der erste Supraleiter mit flüssigen Stickstoff übergossen wird, sollten die an ihm befestigten Kabel schon mit geringen Strom durchflossen sein, da sich sonst die Kontakte durch die Kälte vom Supraleiter lösen, und eine Messung unmöglich wird (dies gilt natürlich nur für die  $T_c$  - Bestimmung).*
- ◆ *Der Supraleiter reagiert sehr empfindlich auf Feuchtigkeit. Er sollte deshalb jedesmal nach Entnahme aus dem Stickstoff mit einem Fön oder hier der Heißluftpistole sofort getrocknet werden, aber ACHTUNG: Die Heißluftpistole ist sehr heiß und wie es der Teufel will ist der Supraleiter auch sehr hitzeempfindlich, er darf auf keinen Fall über 110°F das entspricht ca. 40-45°C erhitzt werden. Also Achtung !!!*
- ◆ *Es sollten bei diesem Versuch übrigens auf keinen Fall zu viele Leute direkt beteiligt sein, da mehr als zwei oder drei Leute eher stören, als zu helfen. Er sollte als Nebenversuch genommen werden, dies hat auch zum Vorteil, daß, sollte er nicht funktionieren, die Ehre durch einen Parallelversuch noch zu retten ist. ☺*

## LITERATURVERZEICHNIS

- 1.: Werner Buckel: Supraleitung / Grundlagen und Anwendungen; 5.Auflage  
(Entnommene Abbildungen: **Portrait; 1; 2; 3; 4a, 4b, 4c; 5; Skala**)
- 2.: Bergmann Schäfer: Band II: Elektrizität und Magnetismus; 8.Auflage;  
de Gruyter-Verlag (1999)  
(Entnommene Abbildungen: **6; 7; 8a; 9a, 9b**)
- 3.: Altes Protokoll: PG 260-II / SS99 (Seiten: 141 - 150)
- 4.: Manual zum Supraleiter:: Experiment Guide For Superconductor Demonstrations;  
Fort Collins, Colorado Superconductor Inc. (1994)  
(Entnommene Abbildungen: **8b, 8c; 11a, 11b; Tabelle**)