

Supraleitung

Manuel Kress

Sören Link

Betreuer: A. Privalov

Versuchsdatum: 3. Februar 2014



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Physikalisches Praktikum
für Fortgeschrittene
Versuch 3.16-B



Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	2
2	Grundlagen	3
2.1	Supraleitung	3
2.1.1	Temperaturabhängigkeit des Widerstandes	3
2.1.2	Eigenschaften von Supraleitern	3
2.1.3	Arten von Supraleitern	3
2.2	Kühlung	4
2.3	Messverfahren	4
2.3.1	Vierpol-Widerstands-Messmethode	4
2.3.2	Mutual Induction Bridge (MIB)	4
2.3.3	Fitten linearer funktionen an Messdaten	4
3	Durchführung	6
3.1	Übergangstemperatur von $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$	6
3.2	Übergangstemperatur und Magnetfeldabhängigkeit von Niob	6
4	Auswertung	8
4.1	Ermittlung der Übergangstemperatur von $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$	8
4.2	Ermittlung der Übergangstemperatur von Niob und Vergleich mit der Theorie	9
5	Fazit	14
	Literaturverzeichnis	15
	Abbildungsverzeichnis	16

1 Einleitung

In diesem Versuch werden Festkörper bei tiefen Temperaturen untersucht. Speziell wird dabei der Effekt der Supraleitung untersucht und behandelt. Dazu analysieren wir die Temperaturabhängigkeit des Widerstandes (und somit die Sprungtemperatur) von $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ und Niob sowie die Veränderung der Sprungtemperatur von Niob in Abhängigkeit eines äußeren Magnetfeldes.

2 Grundlagen

2.1 Supraleitung

Viele Metalle und auch andere Festkörper zeigen unterhalb einer bestimmten Temperatur den Effekt, dass ihr elektrischer Widerstand auf Null fällt. Diesen Effekt nennt man **Supraleitung**. Der Widerstand springt dann beim Unterschreiten der sogenannten **Sprungtemperatur** entgegen der klassischen Erwartung plötzlich auf unmessbare Werte. In diesem Zustand können supraleitende Medien dauerhaft Ströme über mehrere Jahre ohne Verlust aufrecht erhalten.

2.1.1 Temperaturabhängigkeit des Widerstandes

Normalerweise ist es so, dass der spezifische elektrische Widerstand eines Materials oberhalb seiner Sprungtemperatur stark von dessen Temperatur abhängt. Je nach Art und Aufbau des Materials ist diese Abhängigkeit stark unterschiedlich und kann sich z.B. bei Phasensprüngen sogar sprunghaft verändern. Bei Leitern steigt im allgemeinen der spezifische Widerstand $\rho = \frac{RA}{L}$ mit der Temperatur an und kann in einem begrenzten Temperaturbereich folgendermaßen annähernd linear beschrieben werden:

$$\rho(T) = \rho(T_0) \cdot (1 + \alpha \cdot (T - T_0))$$

$\rho(T_0)$ ist dabei der spezifische Widerstand des Materials bei der Temperatur T_0 und α der materialabhängige Temperaturkoeffizient.

Bei Halbleitern ist der Zusammenhang zwischen Widerstand und Temperatur abhängig von der Dotierung. Er kann davon abhängig also bei steigender Temperatur stark fallen oder auch leicht steigen.

Alle supraleitenden Materialien haben gemeinsam, dass deren elektrischer Widerstand beim unterschreiten der Sprungtemperatur deren elektrischer Widerstand auf Null sinkt und beim überschreiten wieder auf den normalen Wert springt.

2.1.2 Eigenschaften von Supraleitern

Neben der Eigenschaft, dass Supraleiter (bei unterschreiten der Sprungtemperatur) eine perfekte elektrische Leitfähigkeit besitzen, zeigen sie außerdem das Phänomen, ein äußeres Magnetfeld $H < H_C$ aus ihrem inneren zu verdrängen (Meißner-Ochsenfeld-Effekt, nur bei Supraleitern I. Art). H_C ist dabei eine kritische magnetische Feldstärke, ab der die Supraleitung zusammenbricht. Dies rührt daher, dass Supraleiter in der supraleitenden Phase auch ideale Diamagnete sind.

2.1.3 Arten von Supraleitern

Supraleiter werden je nach deren Verhalten im äußeren Magnetfeld in zwei Gruppen kategorisiert. Supraleiter erster Art besitzen ein kritisches Magnetfeld, H_C bei dessen Überschreitung das Material praktisch sofort seine supraleitenden Eigenschaften verliert. Dagegen gibt es bei Supraleitern zweiter Art zwei kritische Magnetfelder $H_{C1} < H_{C2}$. Nach Überschreitung des ersten Wertes H_{C1} sinkt der auf der Oberfläche induzierter Strom und somit die Magnetisierung des Supraleiters zuerst schnell, danach jedoch zunehmend langsamer ab. Gleichzeitig bilden sich magnetische Flussschläuche durch das Material. Erst nach Überschreitung des zweiten kritischen Wertes H_{C2} , welcher deutlich über dem ersten liegen kann, verschwinden die supraleitenden Eigenschaften des Materials.

2.2 Kühlung

Die Sprungtemperaturen von allen supraleitenden Materialien liegen sehr weit unter Zimmertemperatur und meist nahe am absoluten Nullpunkt. So hat Quecksilber eine Sprungtemperatur von $T_C = 4,153 \text{ K}$ und die des keramischen Hochtemperatursupraleiters $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ liegt bei $T_C = 93 \text{ K}$.

Um im Experiment solche Temperaturen zu erreichen, verwendet man spezielle Kühlvorrichtungen. In diesem Versuch wird dazu ein Verdampferkryostat verwendet. Ein Kryostat ist prinzipiell ein Kühlgerät, mit welchem sehr tiefe Temperaturen erreicht und gehalten werden können. Im Verdampferkryostat wird dazu flüssiges Gas verdampft. Im Versuch wird ^4He verwendet, dessen Siedetemperatur bei $T = 4,15 \text{ K}$ liegt, weshalb damit Materialien bis zu dieser Temperatur abgekühlt werden können.

2.3 Messverfahren

2.3.1 Vierpol-Widerstands-Messmethode

Die Vierpol-Widerstands-Messmethode wird zur Messung von Widerständen benutzt, die so gering sind, dass der Widerstand der Kabel nicht mehr vernachlässigt werden kann. Hierbei wird direkt am zu messenden Widerstand R_t parallel zur Stromquelle ein hochohmiges Voltmeter angeschlossen, wodurch sowohl am Voltmeter als auch am Widerstand die gleiche Spannung abfallen muss. Durch den sehr hohen Innenwiderstand des Voltmeters (typischerweise im Bereich von $10^6 \Omega$ bis $10^9 \Omega$) ist der Widerstand in den zum Voltmeter führenden Kabeln vernachlässigbar und R_t kann exakt über den Zusammenhang $R = U \cdot I$ bestimmt werden.

2.3.2 Mutual Induction Bridge (MIB)

Bei der **MIB** handelt es sich um 2 Sekundärspulen, welche gegensätzlich gewickelt und in einer Primärspule eingebettet sind. Wird die Primärspule nun an eine Wechselspannungsquelle angeschlossen, werden in den Sekundärströmen entgegengesetzte Ströme induziert welche in der Summe 0 ergeben. Wird nun ein Para- oder Diamagnetischer Stoff in eine der beiden Sekundärspulen gegeben, verändert sich die Induktivität dieser Spule und man erhält bei Addition beider Ströme einen Wert, der von 0 verschieden ist.

Der Vorteil gegenüber einer Anordnung mit nur einer Sekundärspule ist, dass der resultierende Strom ohne Probe in der Spule genullt wird und so bereits kleine Veränderungen durch die Probe leicht zu erkennen sind. Außerdem werden Störeinflüsse aus der Umwelt wie das Erdmagnetfeld oder Erschütterungen des Versuchsaufbaus weitgehend eliminiert, was den systematischen Fehler der Anordnung verringert.

2.3.3 Fitten linearer Funktionen an Messdaten

Liegen für einen linearen Zusammenhang mehr als zwei Messpunkte vor, empfiehlt sich das Fitten einer linearen Funktion an alle Messpunkte im zu beachtenden Intervall.

Gesucht ist also eine lineare Funktion der Form:

$$f(x) = A + B \cdot x \quad (2.3.3.1)$$

welche möglichst gut auf alle gemessenen Punkte passt und den Gesamtfehler

$$\chi = \sum_{i=1}^N \left(\frac{y_i - f(x_i)}{\sigma_i} \right)^2 \quad (2.3.3.2)$$

minimiert

Die Parameter A und B sind dann gegeben durch

$$A = \frac{\sum_i \frac{y_i}{\sigma_i^2} \cdot \sum_i \frac{x_i^2}{\sigma_i^2} - \sum_i \frac{x_i}{\sigma_i^2} \cdot \sum_i \frac{x_i y_i}{\sigma_i^2}}{\Delta} \quad (2.3.3.3)$$

$$B = \frac{\sum_i \frac{1}{\sigma_i^2} \cdot \sum_i \frac{x_i y_i}{\sigma_i^2} - \sum_i \frac{y_i}{\sigma_i^2} \cdot \sum_i \frac{x_i}{\sigma_i^2}}{\Delta} \quad (2.3.3.4)$$

mit

$$\Delta = \sum_i \frac{1}{\sigma_i^2} \sum_i x_i^2 / \sigma_i^2 - \left(\sum_i \frac{x_i}{\sigma_i^2} \right)^2 \quad (2.3.3.5)$$

die Fehler für A und B berechnen sich aus

$$\sigma_A^2 = \frac{1}{\Delta} \sum_i \frac{x_i^2}{\sigma_i^2} \quad (2.3.3.6)$$

$$\sigma_B^2 = \frac{1}{\Delta} \sum_i \frac{1}{\sigma_i^2} \quad (2.3.3.7)$$

3 Durchführung

3.1 Übergangstemperatur von $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$

Bei der ersten Messung soll die Übergangstemperatur von $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$, einen Hochtemperatur-Supraleiter, gemessen werden. Zur Ermittlung dieser, wird bei diesem Teil die MIB-Messung verwendet. Die Probe befindet sich hierbei innerhalb der Referenzspule der MIB, welche sich wiederum im gekühlten Kryostat befindet. Wir messen also indirekt die Magnetisierung der Probe, indem wir die Spannung der MIB gegenüber der Temperatur aufnehmen. Die Kühlung erfolgt in diesem Bereich durch Helium-Gas, die Temperaturmessung erfolgt mit einem PT-100-Thermoelement bei einem Messstrom von $I_{PT} = 10 \text{ mA}$. Zu erwarten ist ein steiler Anstieg oder Abfall der Spannung beim Erreichen der Sprungtemperatur. Folgende Messdaten wurden aufgenommen:

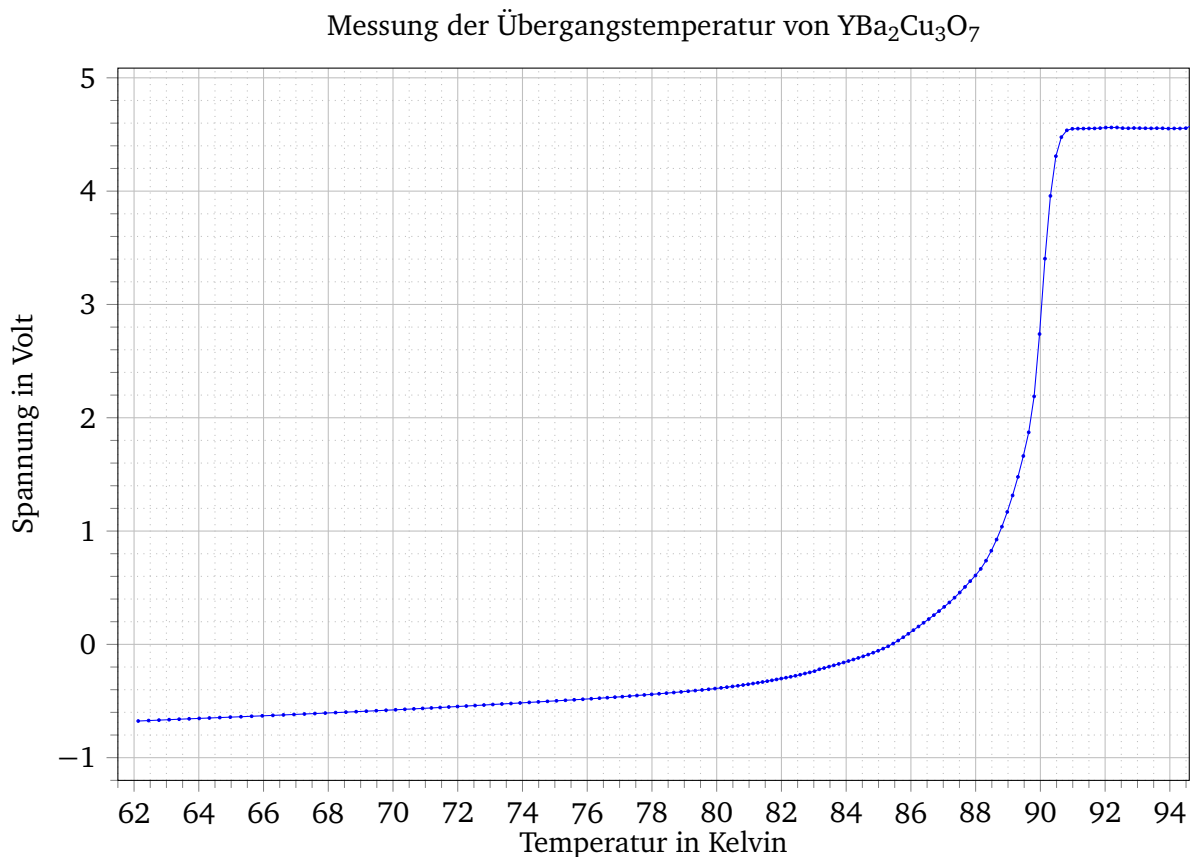


Abbildung 3.1: Magnetisierung der Probe in Abhängigkeit der Temperatur.

3.2 Übergangstemperatur und Magnetfeldabhängigkeit von Niob

Bei der zweiten Messung soll die Sprungtemperatur von Niob in Abhängigkeit eines äußeren Magnetfeldes bestimmt werden. Hierzu wurde nach der Messung an $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ der Kryostat zuerst mit kalten

Heliumgas und dann mit flüssigem Helium auf etwa 8 Kelvin abgekühlt. Anschließend wurde mit Hilfe einer Heizwicklung die Temperatur langsam auf etwa 11 Kelvin angehoben. Während diesem Vorgang wurde mit der 4-Pol Messmethode die Spannung, die am Niob abfällt gemessen. Dabei ist anzumerken, dass einer der Messkontakte für die 4-Pol Messung mit Lötzinn verunreinigt ist. Dies führt dazu, dass der am Niob gemessene Widerstand bei Erreichen der Sprungtemperatur nicht wie erwartet auf 0 abfällt, sondern nur einen kleinen Sprung nach unten macht, um dann langsam weiter zu fallen, während Teile des Lötzinns bei noch weiter sinkender Temperatur nach und nach ebenfalls supraleitend werden.

Anschließend wurde mit dem selben Messverfahren die Messung noch 5 mal mit einem am Niob anliegendem Magnetfeld von 0,02 T, 0,04 T, 0,06 T, 0,08 T und 0,10 T wiederholt. Folgende Messdaten wurden aufgenommen:

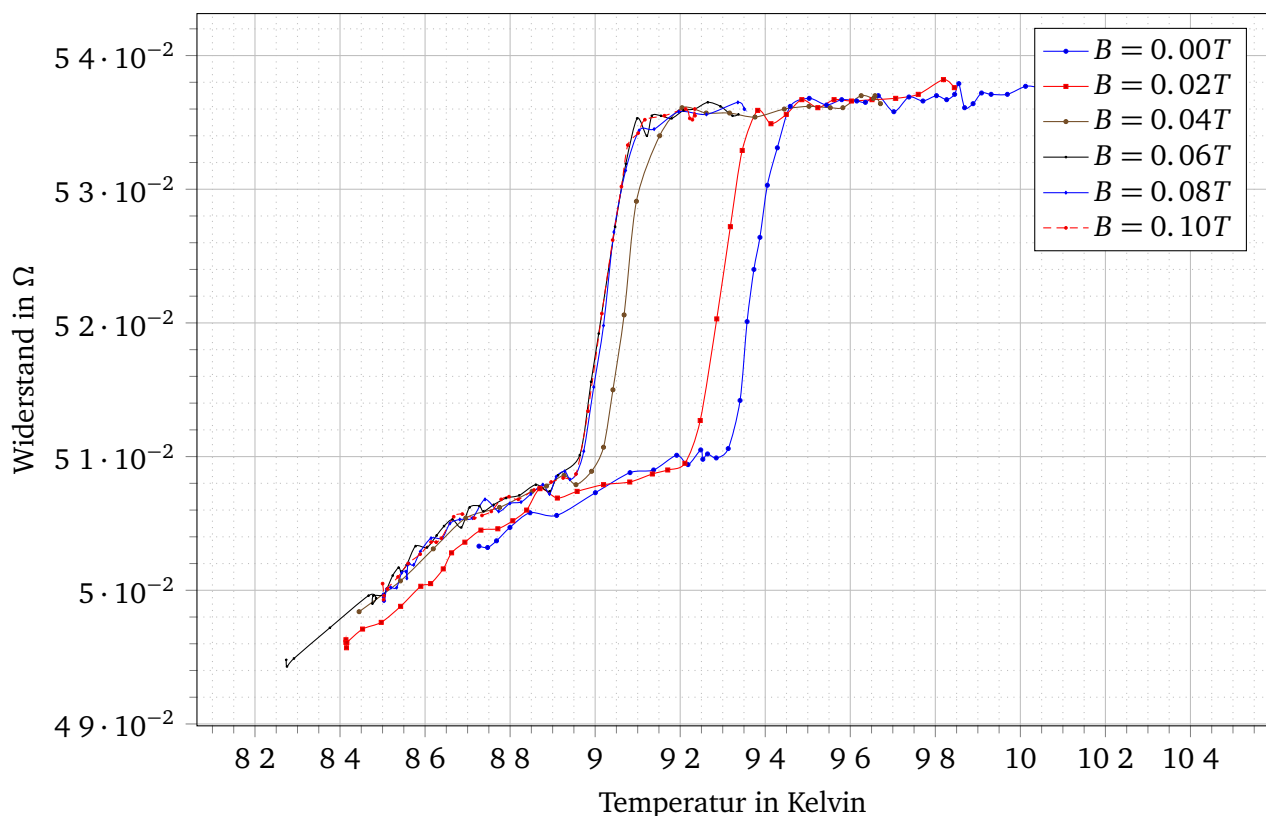


Abbildung 3.2: Verlauf des Widerstandes des Niob-Elements in Abhängigkeit von der Temperatur und äußeren Magnetfeldern.

Bemerkenswert ist, dass die Verläufe für äußere Magnetfelder von 0,06 T, 0,08 T, 0,10 T sich gegenseitig überlappen. Dies liegt vermutlich an einem Fehler in der Versuchsdurchführung.

4 Auswertung

4.1 Ermittlung der Übergangstemperatur von $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$

Zur Ermittlung der Übergangstemperatur und -Breite des Hochtemperatursupraleiters werden zwei Geraden auf die aufgenommenen Messpunkte gefittet. Eine auf den Plateaubereich über der Sprungtemperatur und eine auf den Sprungbereich selbst.

Der Schnittpunkt zwischen Sprunggerade und Plateaugerade markiert den Beginn des Phasenübergangs und damit T_C , während der Schnittpunkt zwischen Sprunggerade und unterer Plateaugerade das Ende des Phasenübergangs markiert.

Die Geraden werden wie in 2.3.3 beschrieben gefittet. Die Fehlergeraden markieren ein Konfidenzintervall von 95%.

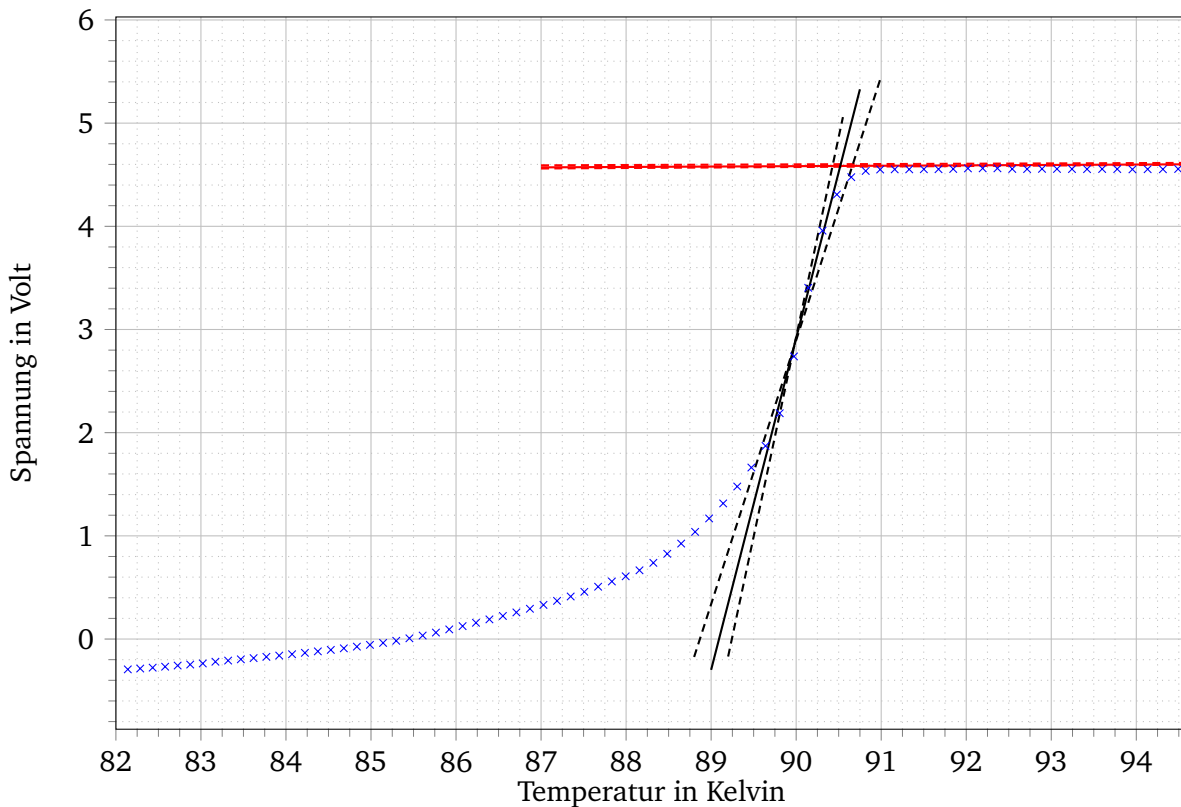


Abbildung 4.1: Verlauf der Spannung (prop. zu Magnetisierung) in Abh. von der Temperatur

Wie zu sehen ist, ist der Fehler der Plateaugeraden vernachlässigbar gegenüber dem Fehler der gefitteten Gerade im abfallenden Bereich. Tatsächlich ist der numerische Fehler für die Plateaugerade um den Faktor 20 geringer. Es ergibt sich durch Berechnung der Schnittpunkte von Plateaugerade und Sprunggerade eine kritische Temperatur T_C von

$$T_C = 90,5189^{+0,2329}_{-0,0912} \text{ K} \quad (4.1.0.1)$$

4.2 Ermittlung der Übergangstemperatur von Niob und Vergleich mit der Theorie

Die Ermittlung der Sprungtemperatur T_C für Niob in Abhängigkeit eines äußeren Magnetfeldes H_0 funktioniert genauso wie oben. Sie wird jeweils getrennt für die verschiedenen Werte der Magnetfelder durchgeführt. Die Bestimmung der Übergangsbreite war aufgrund der oben angesprochenen Verfälschung der Messung durch den Lötzinn nicht möglich.

Als weiteren Schritt werden die ermittelten Sprungtemperaturen mit dem Zwei-Flüssigkeiten-Modell verglichen. Dieses Beschreibt die Abhängigkeit des kritischen Magnetfeldes eines Supraleiters in Abhängigkeit der Temperatur wie folgt:

$$H_C(T) = H_C(0) \cdot \left[1 - \left(\frac{T}{T_c} \right)^2 \right] \quad (4.2.0.2)$$

$H_C(0)$ beschreibt dabei das kritische Magnetfeld des Supraleiters bei $T = 0$ K und T_C die kritische Temperatur bei einem verschwindenden äußeren Magnetfeld $B_0 = 0$ T. Die in der Messung eingestellten Magnetfelder werden dann jeweils als das kritische Magnetfeld bei der gemessenen Sprungtemperatur interpretiert.

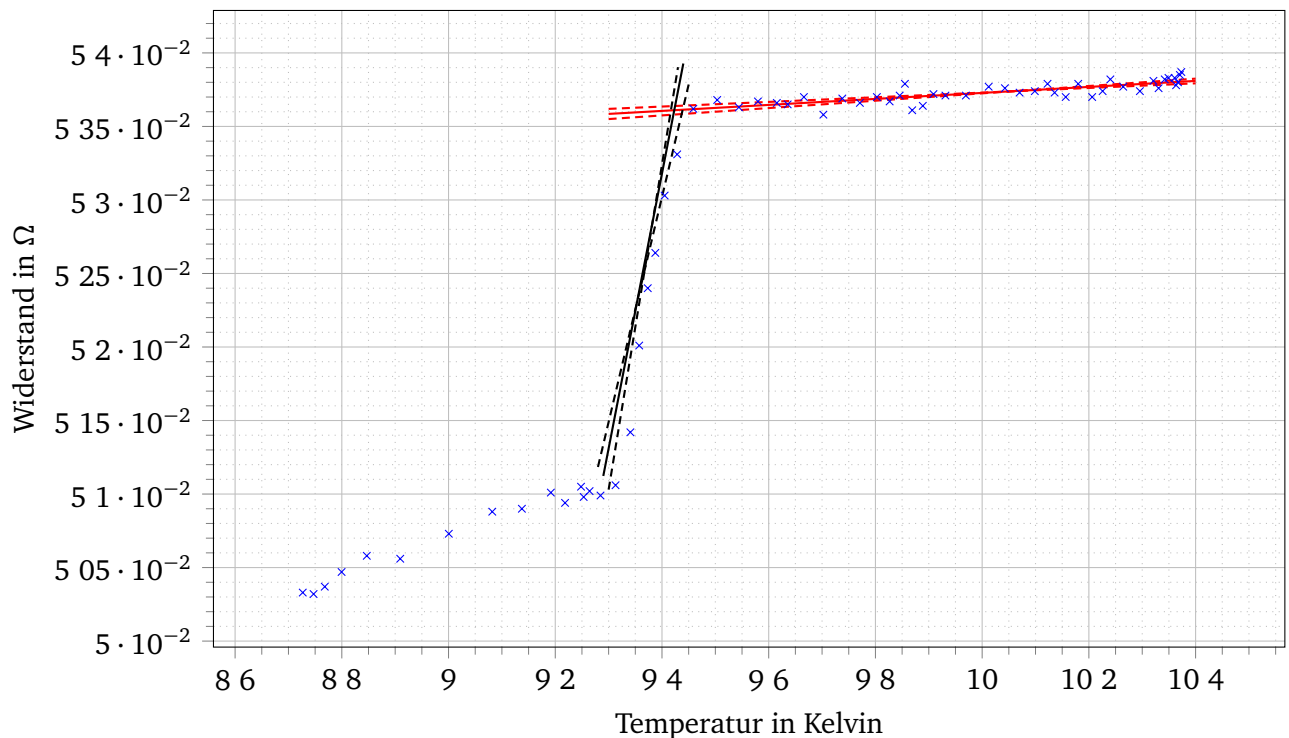


Abbildung 4.2: Verlauf des Widerstandes der Niob-Probe in abh. der Temperatur ohne externes Magnetfeld.

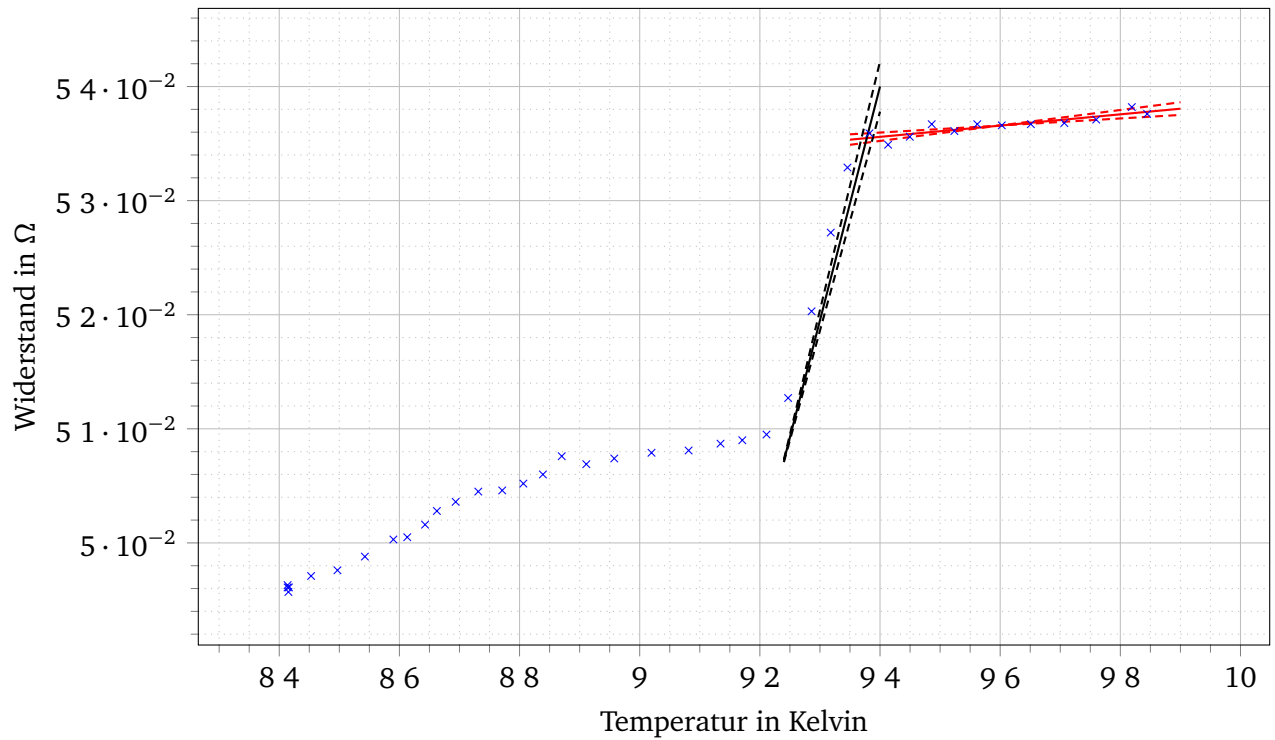


Abbildung 4.3: Verlauf des Widerstandes der Niob-Probe in abh. der Temperatur bei einem externen Magnetfeld von $B=0.04T$.

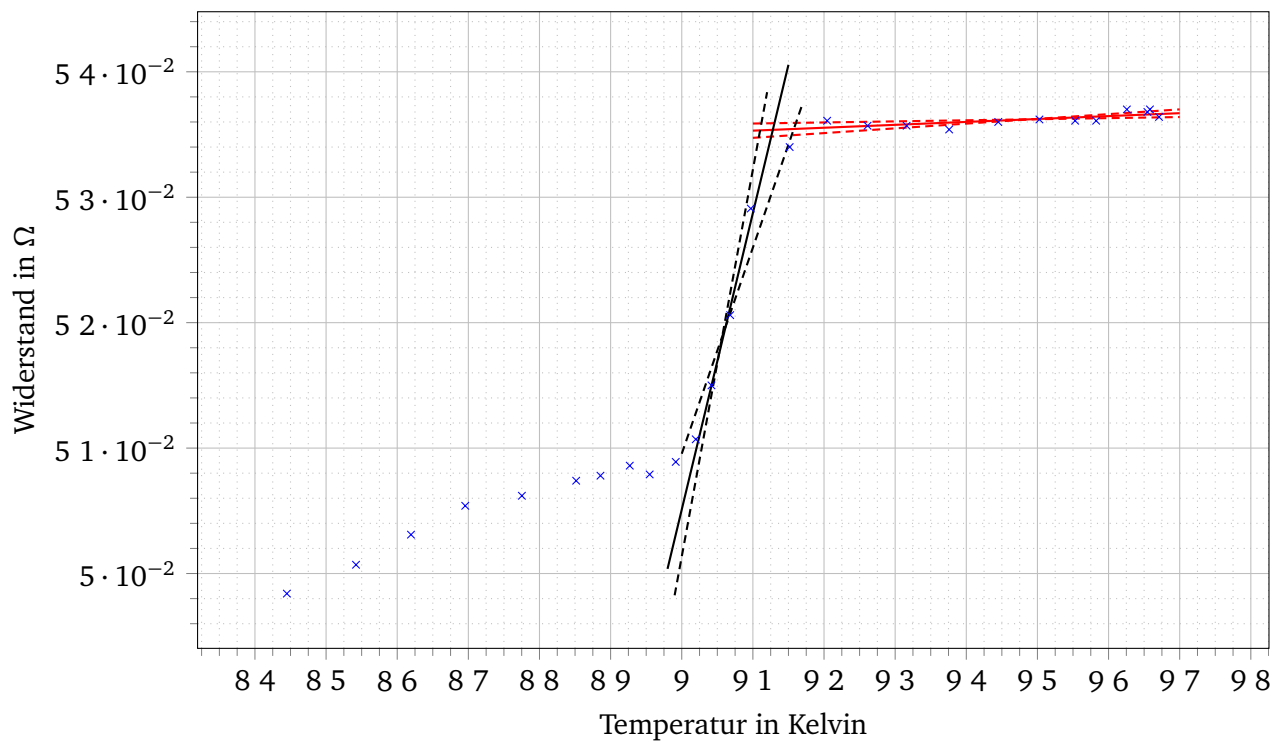


Abbildung 4.4: Verlauf des Widerstandes der Niob-Probe in abh. der Temperatur bei einem externen Magnetfeld von $B=0.04T$.

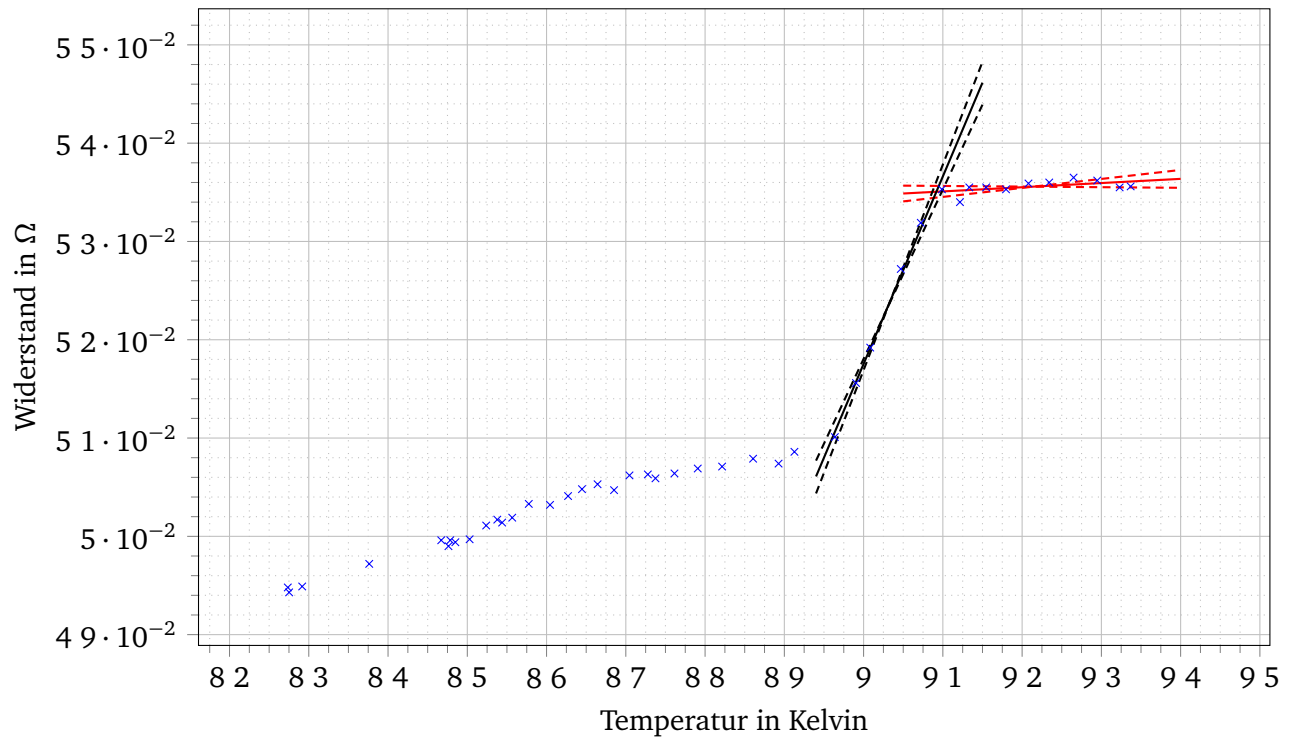


Abbildung 4.5: Verlauf des Widerstandes der Niob-Probe in abh. der Temperatur bei einem externen Magnetfeld von $B=0.06\text{T}$.

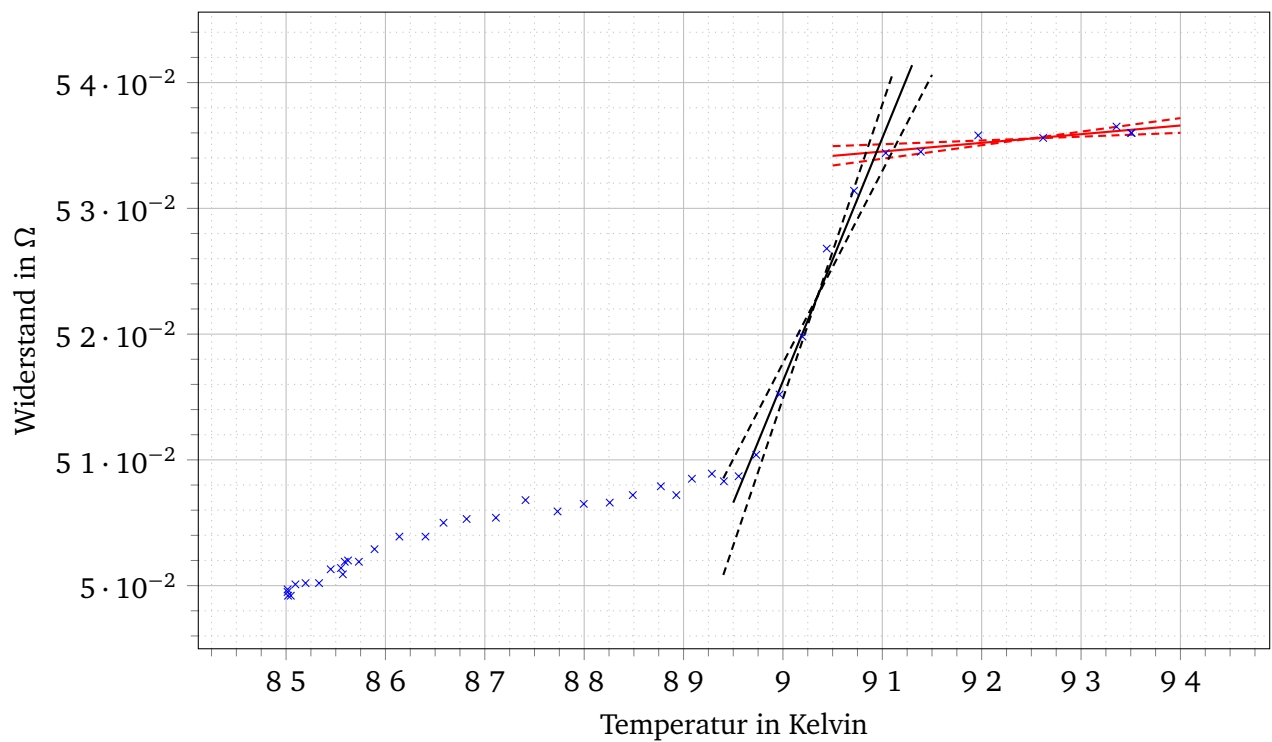


Abbildung 4.6: Verlauf des Widerstandes der Niob-Probe in abh. der Temperatur bei einem externen Magnetfeld von $B=0.08\text{T}$.

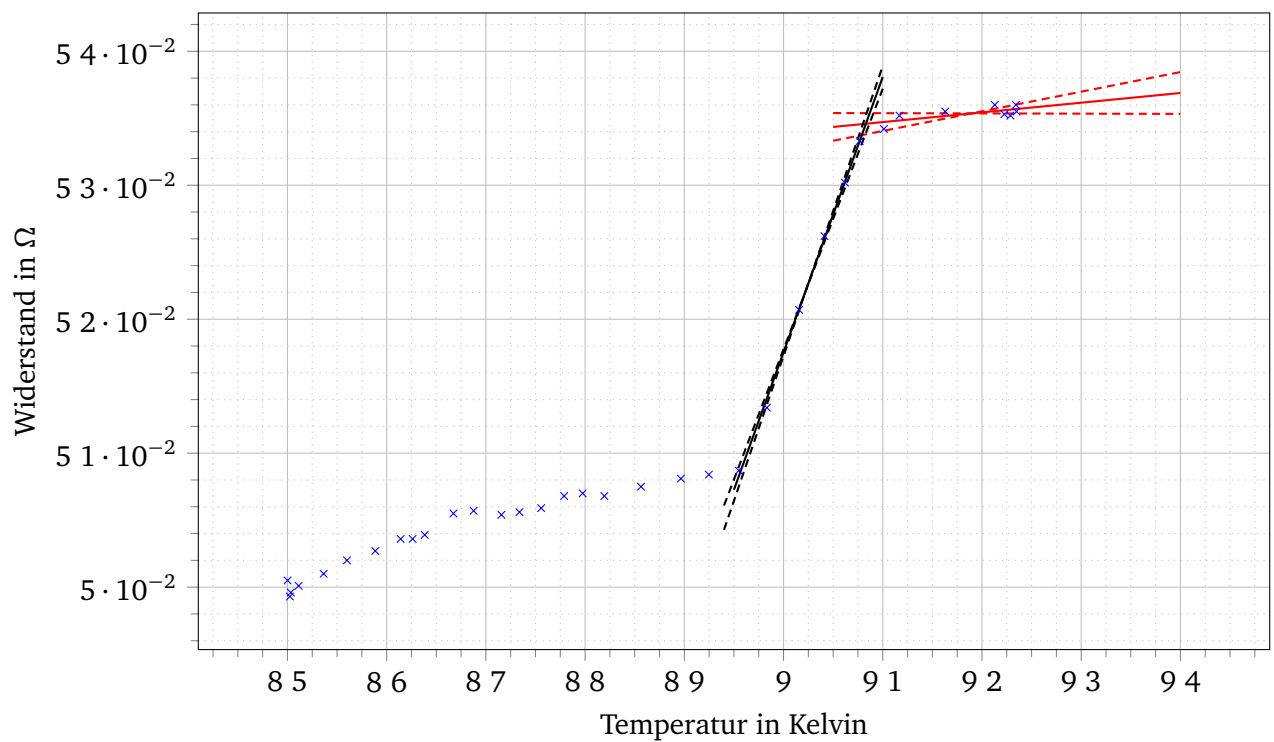


Abbildung 4.7: Verlauf des Widerstandes der Niob-Probe in abh. der Temperatur bei einem externen Magnetfeld von $B=0.10\text{T}$.

Zusammengefasst erhalten wir folgende Werte als Sprungtemperatur T_C von Niob in Abhängigkeit eines äußeren Magnetfeldes B_0 :

B_0 in T	T_C in K
0	$9,4230^{+0,0176}_{-0,0076}$
0,02	$9,3780^{+0,0120}_{-0,0110}$
0,04	$9,1281^{+0,0325}_{-0,0198}$
0,06	$9,0918^{+0,0102}_{-0,0083}$
0,08	$9,0943^{+0,0199}_{-0,0136}$
0,10	$9,0830^{+0,0076}_{-0,0030}$

Tabelle 4.1: Sprungtemperatur in Abh. von einem äußeren Magnetfeld

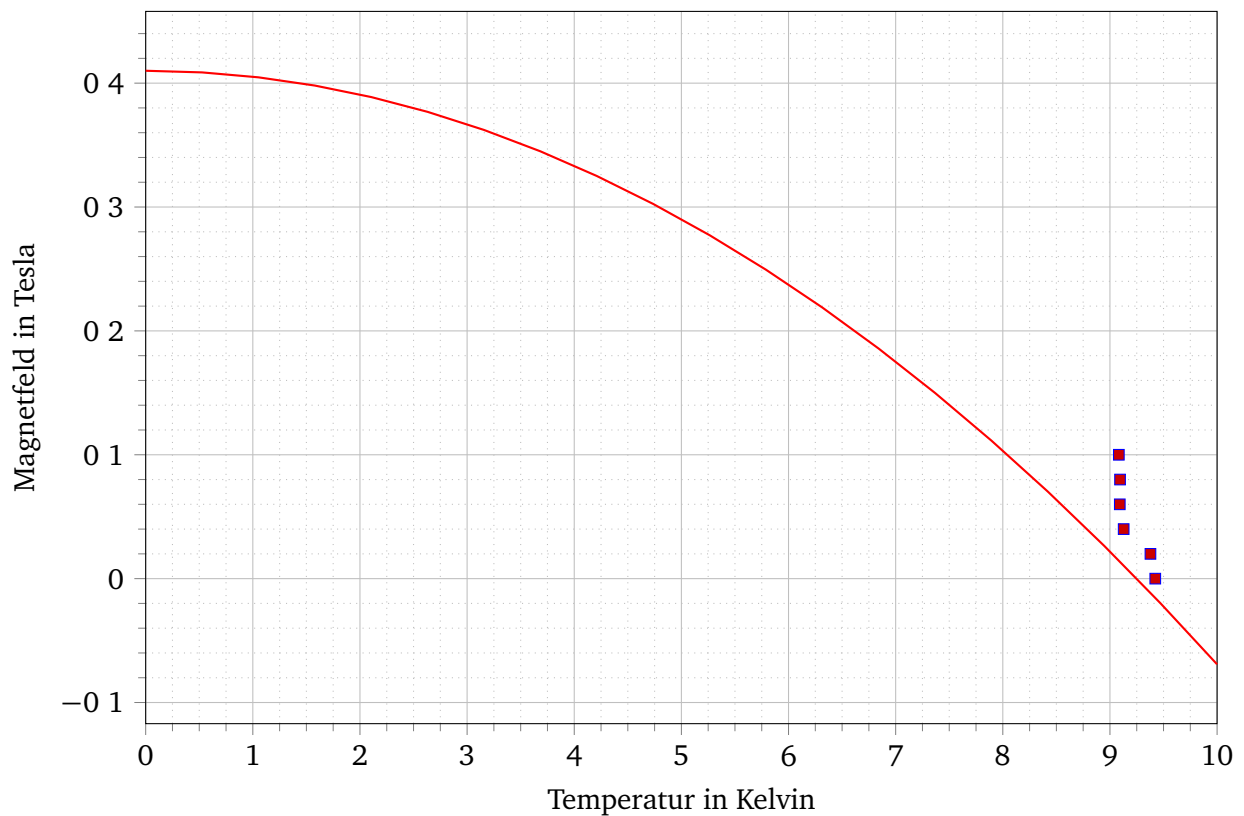


Abbildung 4.8: Gemessene Werte für das kritische Magnetfeld und theoretischer Verlauf. Die Fehlerbalken der gemessenen Werte sind zu klein um dargestellt zu werden.

5 Fazit

Literaturverzeichnis

Abbildungsverzeichnis

3.1	Magnetisierung der Probe in Abhängigkeit der Temperatur.	6
3.2	Verlauf des Widerstandes des Niob-Elements in Abhängigkeit von der Temperatur und äußeren Magnetfeldern.	7
4.1	Verlauf der Spannung (prop. zu Magnetisierung) in Abh. von der Temperatur	8
4.2	Verlauf des Widerstandes der Niob-Probe in abh. der Temperatur ohne externes Magnetfeld.	9
4.3	Verlauf des Widerstandes der Niob-Probe in abh. der Temperatur bei einem externen Magnetfeld von $B=0.04T$	10
4.4	Verlauf des Widerstandes der Niob-Probe in abh. der Temperatur bei einem externen Magnetfeld von $B=0.04T$	10
4.5	Verlauf des Widerstandes der Niob-Probe in abh. der Temperatur bei einem externen Magnetfeld von $B=0.06T$	11
4.6	Verlauf des Widerstandes der Niob-Probe in abh. der Temperatur bei einem externen Magnetfeld von $B=0.08T$	12
4.7	Verlauf des Widerstandes der Niob-Probe in abh. der Temperatur bei einem externen Magnetfeld von $B=0.10T$	12
4.8	Gemessene Werte für das kritische Magnetfeld und theoretischer Verlauf. Die Fehlerbalken der gemessenen Werte sind zu klein um dargestellt zu werden.	13