
Supraleitung

Ilja Homm und Thorsten Bitsch
Betreuer: Dr. Alexei Privalov
21.11.2011



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Fortgeschrittenen-Praktikum
Abteilung B

Inhalt

1 Einführung	2
1.1 Ziel des Versuchs	2
1.2 Supraleitung	2
1.3 Mutual Inductance Bridge	3
1.4 4-Punkt-Messung	3
1.5 Kryostat	3
2 Versuchsaufbau	4
3 Versuchsdurchführung	4
4 Auswertung	5
4.1 induktive Messung von $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$	5
4.2 resistive Messung von Niob	6

1 Einführung

1.1 Ziel des Versuchs

Ziel des Versuchs ist die Untersuchung der Eigenschaften von Supraleitern. Dazu gehört das Messen elektrischer und magnetischer Eigenschaften bei tiefen Temperaturen ($< 100K$). Außerdem soll das Zwei-Flüssigkeiten-Modell von Casimir und Gorter untersucht werden, welches folgenden Zusammenhang zwischen Sprungtemperatur eines Supraleiters und einem äußeren Magnetfeld vorhersagt:

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

1.2 Supraleitung

Supraleiter sind Materialien, die neben Halbleitern und Leitern eine eigene Materialgruppe bilden. Für Supraleiter ist charakteristisch, dass sie eine kritische Temperatur besitzen, an denen ein Phasenübergang von supraleitend zu normalleitend stattfindet. Unterhalb dieser Temperatur besitzt ein Supraleiter praktisch keinen elektrischen Widerstand. Eine theoretische Grundlage für dieses Phänomen liefert die BCS-Theorie. Als Ladungsträger wirken im Supraleiter sog. Cooper-Paare, die aus zwei gekoppelten Elektronen bestehen. Die halbzahligen Spins der Elektronen koppeln zu einem Spin von 0, sodass sie ein neues quantenmechanisches Objekt bilden. Auf Grund des ganzzahligen Spins sind Cooper-Paare Bosonen, welche nicht der Fermi-Dirac-Statistik unterliegen. Auf diese Weise wechselwirken Cooper-Paare nicht mit den Atomrümpfen des Materials und es existiert somit kein elektrischer Widerstand. Die Elektronen eines Cooper-Paares haben dabei Abstände von ca. 10^4 \AA .

Auch charakteristisch für Supraleiter ist der Meißner-Ochsenfeld-Effekt. Durch ein äußeres Magnetfeld entstehen auf Grund der Lenzschen Regel im Supraleiter Wirbelströme, die dem äußeren Magnetfeld entgegenwirken. Dadurch wird das Magnetfeld aus dem Supraleiter verdrängt, wie das bei einem perfekten Diamagneten der Fall ist. Es wird zwischen Typ-I und Typ-II Supraleitern unterschieden. Bei Typ-I Supraleitern bricht der supraleitende Zustand oberhalb eines kritischen äußeren Feldes schlagartig zusammen. Bei Typ-II Supraleitern dringt das Feld in den Supraleiter lokal durch sogenannte Flussschläuche ein, sodass in einem bestimmten Bereich (Shubnikov-Phase) sowohl leitende, als auch supraleitende Eigenschaften existieren.

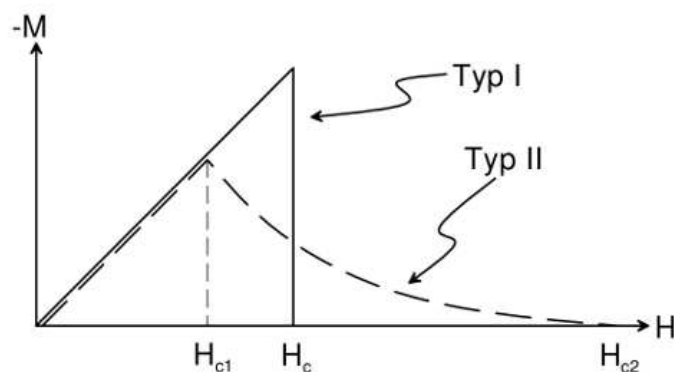


Abbildung 1: Vergleich der Magnetisierung von Typ-I, Typ-II Supraleitern
Quelle: Versuchsanleitung 3.16b

1.3 Mutual Inductance Bridge

Die Mutual Inductance Bridge (kurz MIB) ist ein Aufbau, der zur Bestimmung von Probenssuszeptibilität verwendet wird. Eine Spule erzeugt dabei ein Magnetfeld, welches in zwei weiteren Spulen eine Spannung induziert. Durch gegenläufige Wicklung addiert sich die gesamte induzierte Spannung zu null. Ändert sich die Induktivität einer der Spulen, so bleibt eine messbare Gesamtspannung übrig. Auf diese Weise kann gemessen werden wie stark eine Probe das Magnetfeld verändert.

1.4 4-Punkt-Messung

Die 4-Punkt-Messung ist eine häufig eingesetzte Messmethode, die zur Bestimmung des elektrischen Widerstands dient. Sie hat den Vorteil, dass Kontaktwiderstände nicht berücksichtigt werden müssen. Da ein Voltmeter einen großen Vorwiderstand besitzt, sind die Spannungsabfälle an den Kontaktwiderständen des Messgeräts praktisch vernachlässigbar klein. Mit Hilfe des ohmschen Gesetzes kann so der Widerstand berechnet werden.

1.5 Kryostat

Ein Kryostat ist eine Vorrichtung, die das Kühlen mit flüssigem Helium und Stickstoff ermöglicht. Durch verschiedene Kammern, die evakuiert, thermisch isoliert oder mit Kühlmittel gefüllt sind, können tiefe Temperaturen erreicht und konstant gehalten werden. Die Probe befindet sich in einem Kupferblock, der mit einer Heizspirale verbunden ist, sodass die Temperatur variiert werden kann.

2 Versuchsaufbau

Die gesamte Messung findet im Innern des Kryostaten statt. Dort befinden sich mehrere Messproben und Messvorrichtungen:

- MIB mit $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ -Probe zur Messung der Suszeptibilität
- 4-Punkt-Messaufbau mit Niob-Probe zur Widerstandsmessung
- GaAlAs-Probe zur Messung des Quanten-Hall-Effekts

Im Kryostat befinden sich auf unterschiedlichen Höhen zwei Temperaturfühler, um den Füllstand kontrollieren zu können. Die äußere Kammer des Kryostaten ist mit flüssigem Stickstoff gefüllt, die innere mit flüssigem Helium. Mit Hilfe eines Lock-In-Verstärkers wird das Signalrauschen verringert.

3 Versuchsdurchführung

Bevor die eigentliche Durchführung begann, wurden die Kammern des Kryostaten zunächst mit flüssigem Stickstoff befüllt. Für die resistive Messung musste in die innere Kammer flüssiges Helium eingefüllt werden, um Temperaturen unterhalb der 70 Kelvin zu bekommen.

1. Zuerst wurde eine induktive Messung gestartet, die der Bestimmung der Suszeptibilität der $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ -Probe dienen soll.
2. Im zweiten Schritt wurden äußere Magnetfelder zugeschaltet und die Veränderung der Sprungtemperatur bei Niob untersucht.

4 Auswertung

4.1 induktive Messung von $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$

Zunächst wurde der Datensatz so normiert, dass bei supraleitendem Zustand die Suszeptibilität $\chi = -1$ ist. Um die Sprungtemperatur zu ermitteln, wird eine Gerade an den Datensatz des normalleitenden Plateaus, sowie an den Datensatz im Bereich des Phasenübergangs gefittet. Der Schnittpunkt beider Geraden wird als Sprungtemperatur definiert. Die folgende Grafik zeigt die Veränderung der magnetischen Suszeptibilität einer $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ -Probe bei veränderlicher Temperatur. Die roten Geraden sind Fehlergeraden.

Für die Übergangsgerade $\chi(T) = m \cdot T + n$ ergeben sich durch fitten folgende Parameter:

$$m = (1,2779 \pm 0,3109) \frac{\text{Skt}}{\text{K}}$$
$$n = (-112,361 \pm 27,495) \text{Skt}$$

Die Fehler der Plateau-Geraden sind so minimal, dass sie für das Ergebnis irrelevant sind.

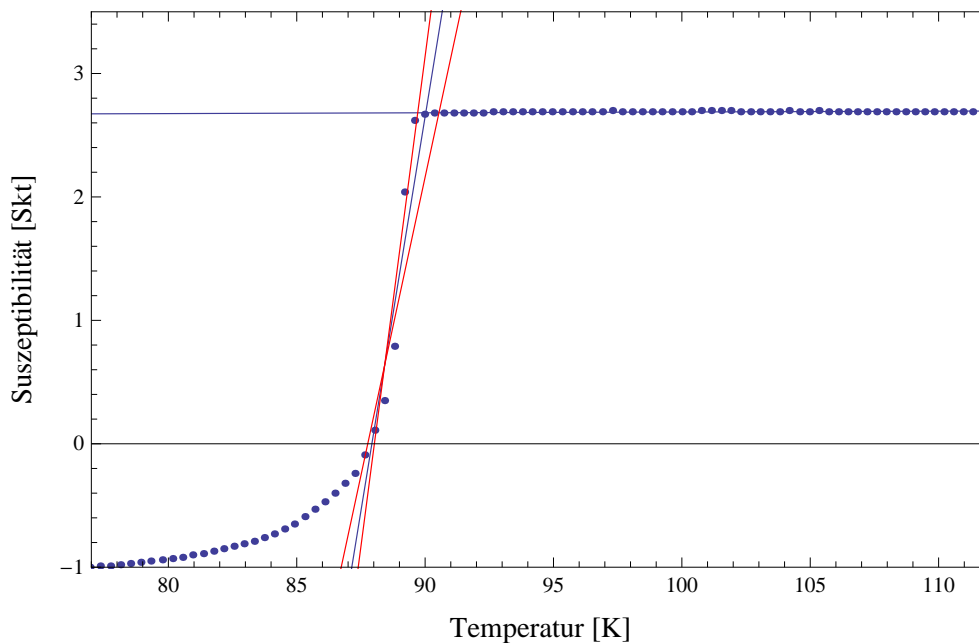


Abbildung 2: Veränderung der Suszeptibilität einer $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ -Schicht bei veränderlicher Temperatur

Für die Schnittpunkte und der damit verbundenen Sprungtemperatur ergibt sich:

$$T_c = \left(90,025 \begin{Bmatrix} +0,515 \\ -0,313 \end{Bmatrix} \right) \text{Kelvin} \quad (2)$$

Dieser Fehlerbereich beinhaltet den Literaturwert für die Sprungtemperatur von $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ (90 K). Es fällt auf, dass die Suszeptibilität nicht sofort auf -1 fällt. Dies bestätigt die Tatsache, dass es sich bei $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ um einen Typ-II Supraleiter handelt, jedoch sollten weitere Fehlerquellen bemerkt werden. Eine mögliche Fehlerursache ist das Alter der Probe. $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ ist eine Keramik, in die nach der Herstellung durch sehr niedrigen Sauerstoff-Partialdruck Leerstellen eindotiert werden. Erst danach besitzt das Material supraleitende Eigenschaften. Da die

Probe zur Zeit des Versuchs ca. acht Jahre alt war, ist es möglich, dass die Vakanzen wieder ausgefüllt wurden oder zusätzliche Defekte in der Probe entstanden sind. Das würde auch die Breite des Phasenübergangs erklären, da die Probe zum Teil dann keine supraleitenden Eigenschaften mehr besäße. Eine weitere mögliche, jedoch unwahrscheinliche Erklärung wäre die fehlerhafte Eichung der verwendeten Software.

4.2 resistive Messung von Niob

Die folgende Grafik zeigt die Veränderung der Sprungtemperatur von Niob bei verschiedenen äußeren Magnetfeldern.

B-Feld [T]	Farbe.
0	rot
0.02	blau
0.05	gelb
0.07	schwarz
0.1	grün

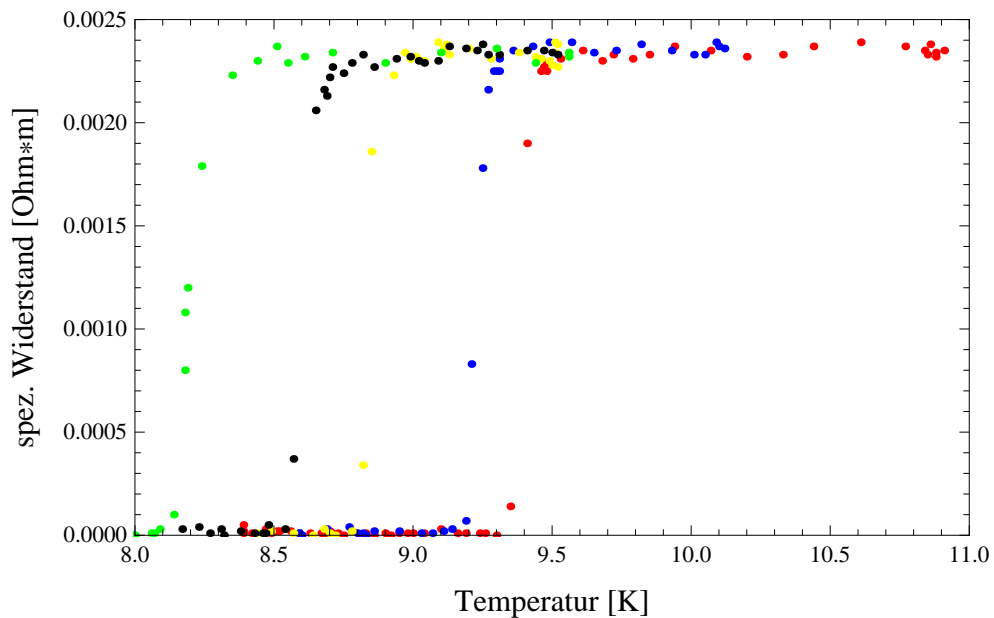


Abbildung 3: Veränderung des spezifischen Widerstands bei äußerem B-Feld

Die Veränderung der Sprungtemperatur wird deutlicher, wenn die Punkte durch Linien verbunden werden.

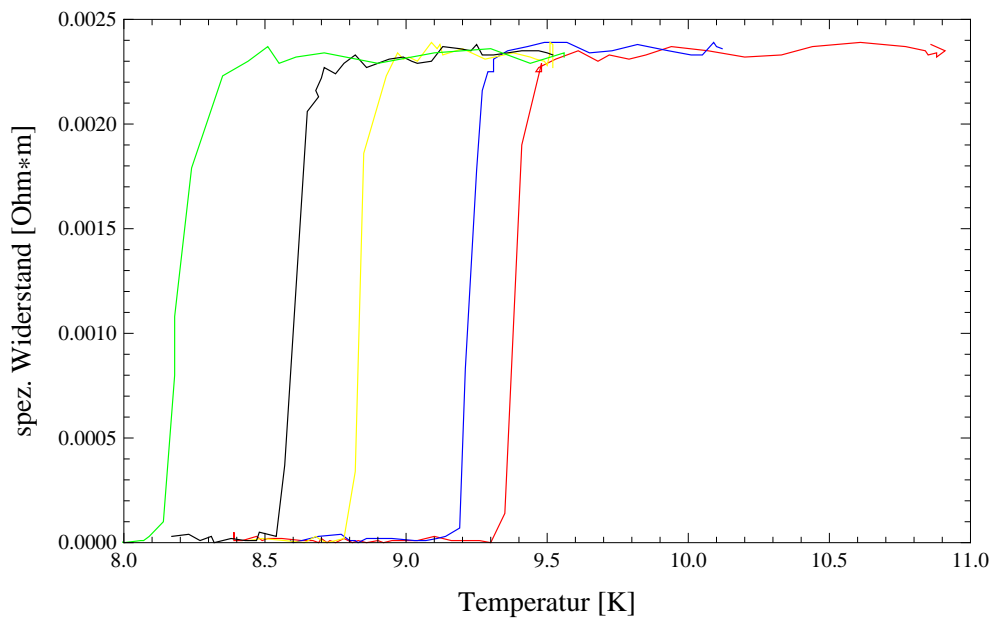


Abbildung 4: Veränderung des spezifischen Widerstands bei äußerem B-Feld mit verbundenen Punkten

Zur Bestimmung der Sprungtemperatur T_c werden zwei Geraden in den Punkteverlauf gefittet. Der Schnittpunkt beider Geraden wird als Sprungtemperatur angenommen (siehe folgende Grafik).

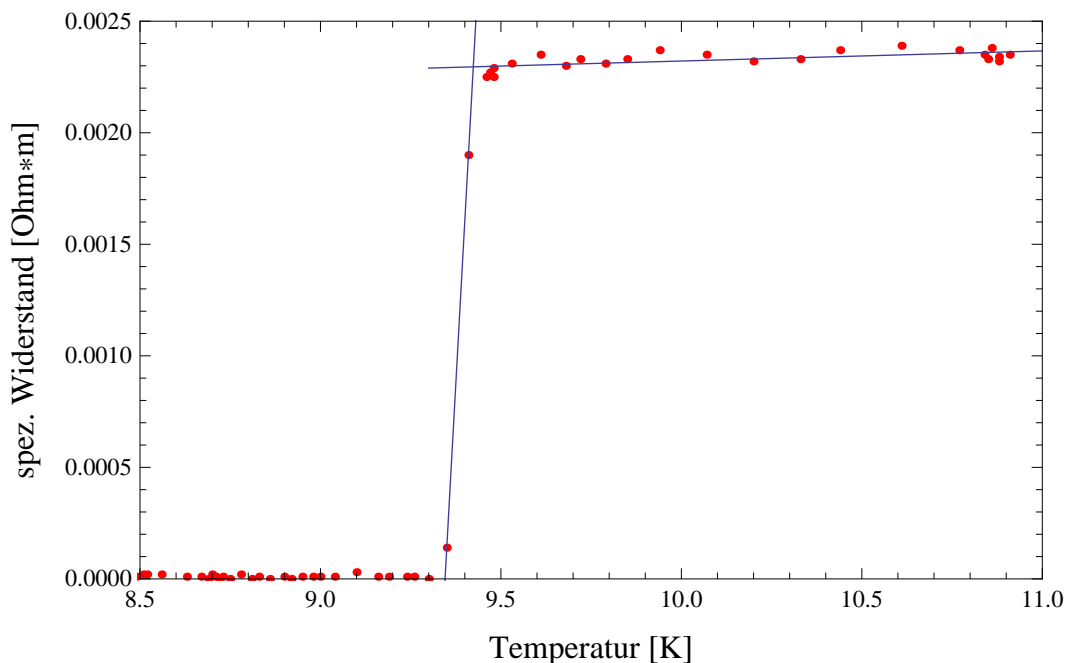


Abbildung 5: spezifischer Widerstand von Niob ohne äußeres B-Feld

Auf diese Weise ergeben sich folgende Sprungtemperaturen mit jeweils einem Ablesefehler von $\Delta T = 0.1$ K. Um das Zwei-Flüssigkeiten-Modell von Gorter und Casimir, welches ein bestimmtes Verhalten von Supraleitern bei bestimmten Temperaturen und B-Feldern vorhersagt, zu überprüfen, werden die Messwerte genauer untersucht.

B-Feld [T]	T_c [K]
0	9.42348 ± 0.1
0.02	9.27667 ± 0.1
0.05	8.91946 ± 0.1
0.07	8.85845 ± 0.1
0.1	8.26398 ± 0.1

Ein Funktionenfit der Form

$$B_c(T) = B_c(0) \cdot \left[1 - \left(\frac{T}{T_c} \right)^2 \right] \quad (3)$$

liefert für

$$B_c(0) = 0.439067 \text{ T}$$

$$T_c = (9.49128 \pm 0.1) \text{ K}$$

Ein Vergleich mit dem Literaturwert ($T_c = 9,2 \text{ K}$) zeigt, dass dieser außerhalb der Fehlergrenzen des gemessenen Wertes liegt. Evtl. wurde der Fehler zu klein geschätzt oder die Messinstrumente sind nicht exakt geeicht. Außerdem wurden zusätzliche Einflüsse wie das Erdmagnetfeld usw. nicht beachtet.

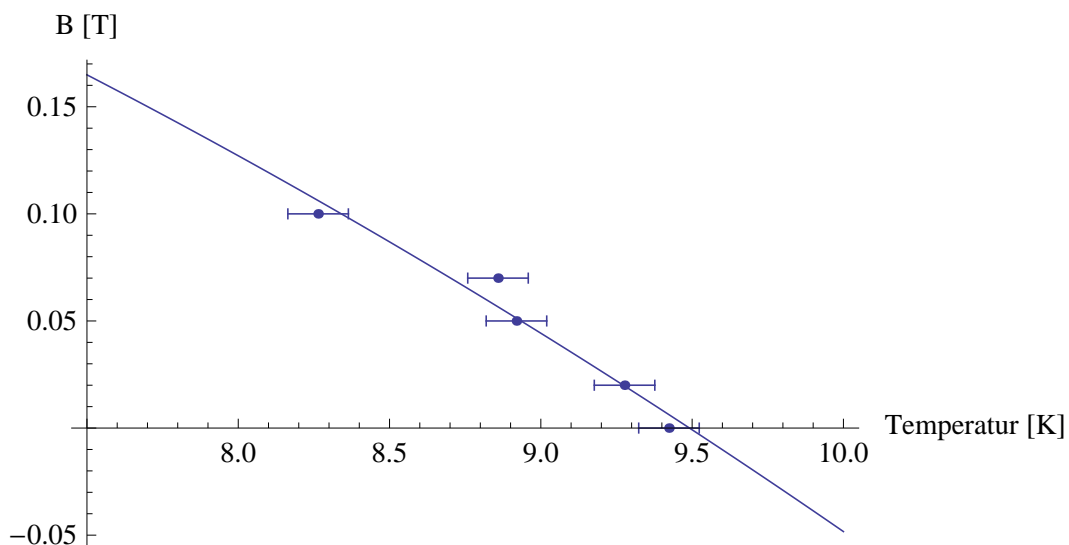


Abbildung 6: Die Sprungtemperatur gegen das äußere Magnetfeld aufgetragen

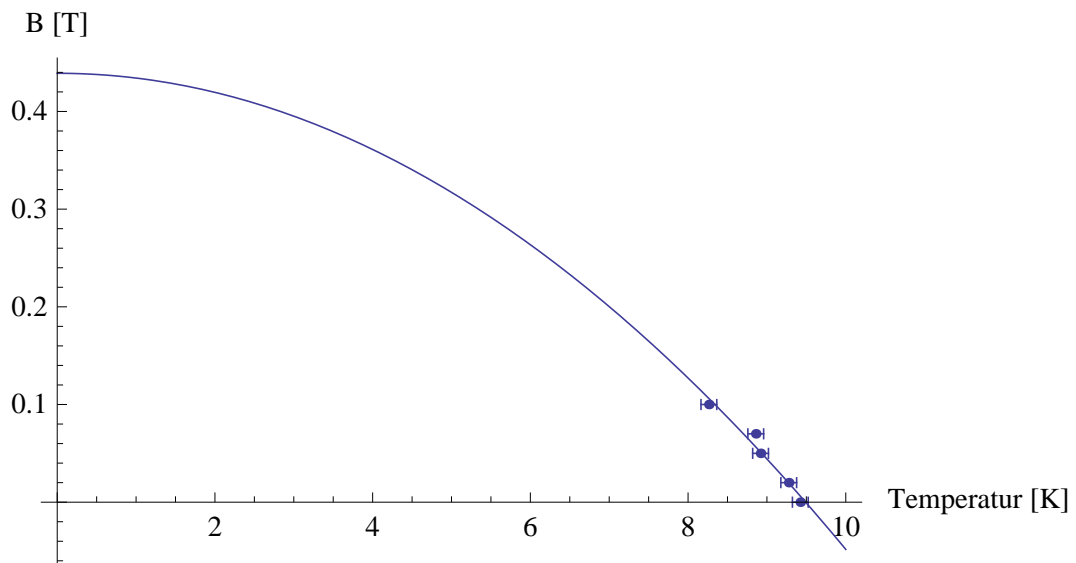


Abbildung 7: Die Sprungtemperatur gegen das äußere Magnetfeld aufgetragen

Der Plot zeigt, dass das Zwei-Flüssigkeiten-Modell von Gorter und Casimir durchaus sinnvoll ist. Es ist ratsam den Versuch mit größeren Magnetfeldern und kleineren Schritten zu wiederholen, um dieses Ergebnis zu bestätigen.