

Hochtemperatur-Supraleitung

## **Praktikum - Festkörperphysik**

Julia Jacob	Mario Alex Hollberg
julia.jacob@udo.edu	mario-alex.hollberg@udo.edu

3. November 2020

TU Dortmund – Fakultät Physik

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Ziel</b>	<b>3</b>
<b>2 Theorie</b>	<b>3</b>
2.1 Geschichtlicher Einstieg . . . . .	3
2.2 Physikalische Hintergründe . . . . .	3
<b>3 Durchführung</b>	<b>7</b>
3.1 Aufbau . . . . .	7
3.2 Experiment . . . . .	7
<b>4 Auswertung</b>	<b>9</b>
4.1 Phänomenologische Beobachtungen des Supraleiters . . . . .	9
4.2 Bestimmung der kritischen Temperatur $T_c$ via Meißner-Ochsenfeld-Effekt	10
4.3 Bestimmung der kritischen Temperatur $T_c$ via 4-Punkt-Messung . . . . .	11
4.3.1 Ohne Magnet . . . . .	12
4.3.2 Mit Magnet . . . . .	13
4.4 Abschätzung der kritischen Stromstärke $I_c$ . . . . .	15
4.4.1 Ohne Magnet . . . . .	16
4.4.2 Mit Magnet . . . . .	17
4.5 Abschätzung des induzierten Stroms $I_{\text{ind}}$ . . . . .	18
<b>5 Diskussion</b>	<b>19</b>
<b>Literatur</b>	<b>21</b>
<b>6 Anhang</b>	<b>22</b>
6.1 Bestimmung der kritischen Stromstärke $I_c$ . . . . .	22

# 1 Ziel

In diesem Versuch soll das Phänomen des Supraleiters unter die Lupe genommen werden. Hierfür werden mit vier unterschiedlichen Hochtemperatur-Supraleitern Messungen durchgeführt. Bei allen Versuchen werden die Supraleiter mit flüssigem Stickstoff gekühlt und finden somit bei 77 K statt. Im Verlauf des Versuches sollen einige wichtige elektrische und magnetische Eigenschaften der Supraleiter bestimmt werden. Diese werden im Folgenden zuerst theoretisch beschrieben.

# 2 Theorie

## 2.1 Geschichtlicher Einstieg

In der Physik basieren die aller meisten Phänomene auf Wechselwirkungen. Wechselwirkungen zwischen einer ungeordneten Bewegung und einer geordneten Kraft. Phasenübergänge basieren in der Physik dann darauf, dass beispielsweise die ungeordnete Bewegungsenergie durch hinzugeführte Energie, meist thermische Energie, im Vergleich zur geordneten Kraft genügend groß wird. Ist dieser Punkt erreicht, bricht der geordnete Zustand zusammen. So gehorchen auch Phasenübergänge vom gasförmigen zum flüssigen Zustand dieser Gesetzmäßigkeit. Um nun neue Eigenschaften zu entdecken, müssen Materialien meist unter extremen Bedingungen betrachtet werden. So wurde auch die Supraleitung erst entdeckt, nachdem es möglich war, Gase wie Stickstoff zu verflüssigen und damit Experimente zu kühlen.

Seit 1908 ist es möglich sogar mit flüssigem Helium zu kühlen. Hiermit wurde ein neuer Temperaturbereich und auch eine extreme Bedingung für Experimente geschaffen. Fünf Jahre später wurde dann für die Entdeckung des Supraleiters der Nobelpreis an Kamerlingh-Onnes verliehen. Bis heute werden immer mehr Metalle und Legierungen mit den neuartigen Eigenschaften gefunden und auch das Verständnis der physikalischen Hintergründe hat sich im Laufe der Jahre immer weiter verbessert. Im nächsten Abschnitt wird näher auf die physikalischen Beschreibungen eingegangen.

In dem letzten Jahrhundert Forschung wurden nicht nur neue Materialien entdeckt, sondern auch die kritische Temperatur, bei dem die Materialien in den Supraleiter-Zustand übergehen, konnte immer weiter erhöht werden. Mittlerweile bieten Supraleiter viele interessante Anwendungsmöglichkeiten. Und Forscher hoffen, einen Supraleiter bei Zimmertemperatur zu finden.

## 2.2 Physikalische Hintergründe

**Elektrischer Widerstand** Bei normal leitenden Metallen lässt sich der elektrische Widerstand wie folgt bestimmen:

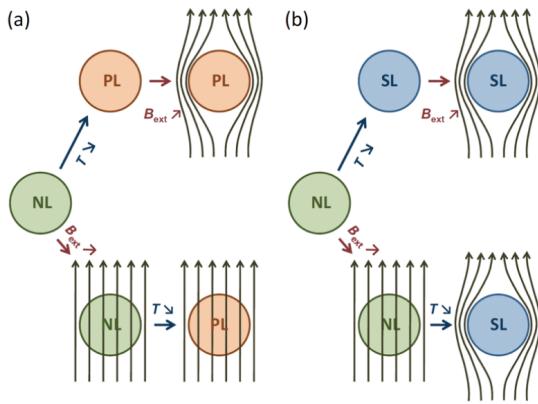
$$R(T) = R_0 + aT^2 + bT^5$$

Hierbei bezeichnet  $R_0$  die Störstellenkonzentration, der zweite Summand mit der  $T^2$ -Abhängigkeit beschreibt den Anteil der Elektron-Elektron-Wechselwirkung und der letzte

Summand gibt den Beitrag der Elektron-Phonon-Streuung wieder.

Für Supraleiter wird der elektrische Widerstand  $R(T)$  unterhalb einer materialabhängigen kritischen Temperatur  $T_C$  Null.

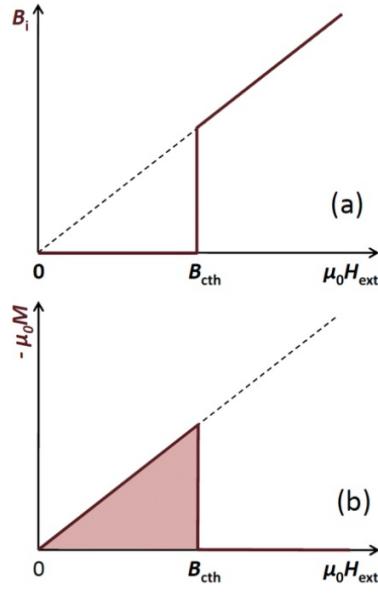
**Meißner-Ochsenfeld-Effekt** Der Meißner-Ochsenfeld-Effekt beschreibt das Verdrängen eines externen Magnetfeldes im Supraleiterzustand. Wenn ein Supraleiter auf  $T < T_C$  gekühlt wird, werden die Magnetfeldlinien eines von außen angelegten Magnetfeldes im Inneren des Supraleiters bis auf eine dünne Randschicht verdrängt. Die London'sche Eindringtiefe  $\lambda_L$  gibt an, wie weit das Magnetfeld trotz allem in den Supraleiter eindringt. Sie ist demnach ein Maß für die Dicke der übrigbleibenden Randschicht. In Abbildung (1b) ist der Meißner-Ochsenfeld-Effekt schematisch dargestellt. Hierbei wird die London'sche Eindringtiefe vernachlässigt. Die Abbildung (1) zeigt zudem den Unterschied zwischen einem perfekten Leiter (PL) und einem Supraleiter (SL). Bei einem Supraleiter ist es gleich, ob erst gekühlt oder erst das externe B-Feld angelegt wird. In beiden Fällen tritt der Meißner-Ochsenfeld-Effekt ein. Supraleiter verhalten sich demnach wie perfekte Diamagneten. Zu beachten ist, dass aus einem perfekten Diamagnetismus eine unendlich hohe Leitfähigkeit resultiert, jedoch gilt dieser Zusammenhang nicht andersherum. So werden Supraleiter auch oft als Supradiamagneten bezeichnet.



**Abbildung 1:** Dargestellt ist hier der Unterschied zwischen (a) einem Normalleiter (NL) und (b) einem Supraleiter (SL). Jeweils wird der Leiter unter die kritische Temperatur herunter gekühlt, bevor ein externes Magnetfeld  $B_{ext}$  angelegt und nachdem  $B_{ext}$  eingeschaltet wird. [3]

**Kritisches Magnetfeld** Wenn der, im letzten Abschnitt beschriebene Meißner-Ochsenfeld-Effekt (M.O.-Effekt) irreversibel wäre, dann müsste der Supraleiter eine unendlich hohe Magnetfeldverdrängungsarbeit leisten können. Da dies nicht der Fall ist, muss der M.O.-Effekt reversibel sein. Das ist genau dann gegeben, wenn die Supraleitung durch ein externes B-Feld beziehungsweise durch ein kritisches B-Feld,  $B_C$ , zerstört wird. Dies bedeutet im Einzelnen, dass die magnetische Flussdichte im Inneren des Supraleiters  $B_I$  so lange gleich Null ist, wie  $\mu_0 H_{ext} \leq B_C(T)$  gilt. Wie in Abbildung (2a) zu sehen ist, nimmt  $B_I$  proportional zum extern angelegten B-Feld zu, sobald  $\mu_0 H_{ext}$  den kritischen Wert von  $B_C$  überschritten hat. Der Verlauf der Magnetisierung des Supraleiters ist in Abbildung (2b) schematisch dargestellt. Im ersten Bereich (schraffierte Fläche) steigt die Magnetisierung linear nach der Gesetzmäßigkeit  $-\mu_0 M = \mu_0 H_{ext} - B$  mit  $B = 0$ .

Überschreitet das angelegte Magnetfeld den kritischen Wert des Supraleiters, nimmt  $B = \mu_0 H_{ext}$  an und die Magnetisierung bricht zusammen. Das hier beschriebene Verhalten



**Abbildung 2:** In (a) ist die magnetische Flussdichte im Inneren eines Supraleiters dargestellt und in (b) ist die Magnetisierung eines Supraleiters als Funktion des externen Magnetfelds zu sehen. Hier bezeichnet  $B_{cth}$  das kritische Magnetfeld. [3]

bezieht sich auf einen Supraleiter des Typs-I. Und das kritische Magnetfeld ist zudem noch temperaturabhängig:  $B_C = B_C(T)$ . Diese Abhängigkeit lässt sich wie folgt ausdrücken:

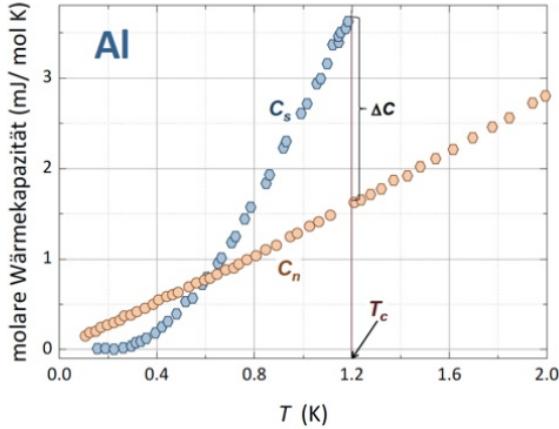
$$B_C(T) = B_C(0) \left[ 1 - \left( \frac{T}{T_C} \right)^2 \right]$$

$B_C(0)$  nimmt bei Supraleitern einige 10 mT an.

**Typ 2-Supraleiter** Bisher wurde nur der Typ I-Supraleiter vorgestellt. Bei einem Supraleiter des Typs-II gibt es noch einen Übergangsbereich zwischen der normalleitenden Phase und dem homogenen Supraleiter. Somit gibt es auch zwei kritische Magnetfelder mit  $B_{c,1} < B_{c,2}$ . Ist das angelegte Magnetfeld größer als  $B_{c,2}$  befindet sich der Supraleiter in der normalleitenden Phase. Und unterhalb  $B_{c,1}$  herrscht auf Grund des Meißner-Ochsenfeld-Effekts eine vollständige Abschirmung des Magnetfeldes. Es liegt ein homogener Supraleiter vor. Für den Fall, dass das angelegte Magnetfeld sich genau zwischen den beiden kritischen Magnetfeldern befindet, ist folgende Bedingung erfüllt:  $B_{c,1} < B < B_{c,2}$ , so liegt eine gemischte Phase vor. In diesem Bereich bilden sich zunächst zylinderförmige Flussschlüsse aus. Diese werden immer größer, bis sie das ganze Volumen des Leiters einnehmen.

**Entropie und spezifische Wärme** In Abbildung (3) ist der Temperaturverlauf der spezifischen Wärme grafisch dargestellt. In gelb der Verlauf eines normalleitenden Metalls, dieser steigt linear mit der Temperatur. Im Gegensatz dazu verhält sich  $C_s$ , in Abbildung

(3) in blau dargestellt, für tiefe Temperaturen exponentiell. Dieses Verhalten gibt einen eindeutigen Hinweis darauf, das im Anregungsspektrum eine Energielücke vorhanden sein muss. Im Bereich der kritischen Temperatur gilt vor allem  $C_n(T_C) < C_s(T_C)$ .



**Abbildung 3:** Vergleich der Temperaturverläufe der spezifischen Wärme von normalleitendem und supraleitendem Aluminium. [3]

**Die BCS-Theorie** Ein Versuch, die theoretischen Hintergründe eines Supraleiters zu verstehen, bietet die BCS-Theorie. Zur heutigen Zeit ist es sicher, dass die Supraleitung durch die effektive Wechselwirkung der Elektronen untereinander verursacht wird. Durch die effektive Coulomb-Anziehung der Elektronen wird der Fermi-See irgendwann instabil. So stellt sich ein neuer, energetisch günstigerer Grundzustand ein. Das Ganze lässt sich anhand von zwei Elektronen beispielhaft vorstellen. Diese zwei Elektronen gehen auf Grund der anziehenden Wechselwirkung einen gebundenen Zustand ein, welcher als Cooper-Paar bezeichnet wird. Dabei ist der mikroskopische Mechanismus bislang nur für konventionelle Supraleiter durch die BSC-Theorie beschrieben. Und für die neu gefundenen Hochtemperatursupraleiter sind diese Mechanismen bisher noch unklar. In der BSC-Theorie wird die effektive anziehende Wechselwirkung durch die Elektronen-Phonon-Wechselwirkung beschrieben. Wobei diese jedoch im Bereich von 30 – 40 K liegt. Weshalb damit zwar die Niedertemperatur-Supraleitung erklärt werden kann, jedoch nicht ganz die Hochtemperatur-Supraleitung. Damit nun die zwei gedachten Elektronen ein Cooper-Paar bilden können, müssen sich diese Elektronen an der Fermikante aufhalten. Zudem müssen die beiden Elektronen einen umgekehrten Spin und einen entgegengesetzten Impuls besitzen. Somit ist der Spin und der Impuls eines Cooper-Paares gleich Null. Dies bedeutet, dass es sich bei Cooper-Paaren um Bosonen handelt, weshalb sie bei hinreichend tiefen Temperaturen kondensieren können. Außerdem besitzen Bosonen eine große räumliche Ausdehnung. Das Phonon in der Elektronen-Phonon-Wechselwirkung wird von dem einen Elektron erzeugt und innerhalb der Unschärfe direkt wieder von dem zweiten Elektron des Cooper-Paares absorbiert.

### 3 Durchführung

#### 3.1 Aufbau

Für die durchzuführenden Versuche stehen vier verschiedene Supraleiter-Proben und drei Seltene-Erden-Permanentmagnete zur Verfügung. In den aufgeführten Tabellen (1) und (2) sind einige wichtige Kenndaten der Supraleiter-Proben und Magnete aufgelistet.

**Tabelle 1:** Die Supraleiter-Proben.

SL	Material	Form	Bemerkung
#1	$Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_{10}$	Stab	mit Silberkontakteflächen
#2	$YBa_2Cu_3O_7$	dünne Scheibe	polykristallin; geringe kritische Stromstärken
#3	YBCO-Einkristall	dicke Scheibe	hohe kritische Stromstärken
#4	$Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_{10}$	Ring	

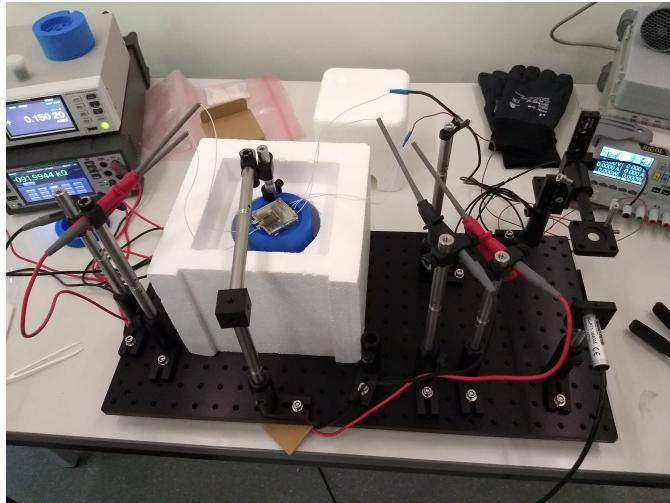
**Tabelle 2:** Die Seltene-Erden-Permanentmagnete.

Kennzeichen	Material	(Durchmesser $\times$ Höhe) / mm
#M1	NdFeB	4 $\times$ 1,5
#M2	NdFeB	15 $\times$ 5
#M3	NdFeB	12,6 $\times$ 12,6

In Abbildung (4) ist beispielhaft der Versuchsaufbau für den dritten Versuchsteil zu sehen. Mittig befindet sich ein großer Styroporbehälter (weiß), in welchem sich der flüssige Stickstoff befindet, womit die Proben gekühlt werden. In dem kleineren Styroporbehälter (blau) wird der Supraleiter platziert. Zum Aufbau gehören außerdem eine Stromquelle (Rigol DP821A), ein Nanovoltmeter (Hioki DM7275-01), verschiedene Temperatursensoren und eine transversale USB-Hall-Sonde. Die Stromquelle kann einen variablen Strom von einigen mA bis hin zu 1 A durch SL #1 fließen lassen. Die abfallende Spannung kann mittels dem Nanovoltmeter bestimmt werden. Mit Hilfe eines Multimeters werden die Temperatursensoren ausgelesen. Zusätzlich befindet sich auch ein Heißluftfön neben dem Versuchsaufbau. Dieser wird benötigt um die feuchtigkeitsempfindlichen Supraleiter-Proben nach jeder Messung wieder zu trocknen.

#### 3.2 Experiment

Bevor es mit den eigentlichen Messungen losgeht, wird sich mit den Supraleiter vertraut gemacht. Hierbei liegt der Schwerpunkt auf der Beobachtung und Beschreibung des Meißner-Ochsenfeld-Effekts. Dafür wird #M1 auf den abgekühlten SL #2 platziert. Für Rotations- und Suspensionsexperimente wird die Konstruktion von SL #3, einem Abstandsplättchen und #M3 zusammen in einem Styroporbehältnis mit Flüssigstickstoff gekühlt.



**Abbildung 4:** Zu sehen ist hier ein Versuchsaufbau für die dritte Messreihe. In dem blauen Styroporbehälter befindet sich der SL #1, welcher über mehrere Kabel mit der Stromquelle verbunden ist.

In den ersten zwei Messreihen wird die kritische Temperatur  $T_C$  einmal mit Hilfe des Meißner-Ochsenfeld-Effekts und ein zweites Mal mittels einer 4-Punkt-Messung bestimmt. Für die erstere Messreihe wird der zeitliche Verlauf der Spannung  $U(t)$  und der Temperatur  $T(t)$  aufgenommen. Dieser Versuch wird mit SL #2 und #M1 durchgeführt. Die 4-Punkt-Messung wird an SL #1 vorgenommen. Der Aufbau für diese Messreihe ist in Abbildung (4) dargestellt. Die Stromstärke wird hinfür auf 0,6 A eingestellt. Gemessen wird der Widerstand  $R$  des Platin-Temperatursensors und die Spannung  $U_{SL}$  am SL #1. Sobald der Widerstand  $R$  einen Wert von ca. 50  $\Omega$  annimmt, wird die Messung beendet. Untersucht wird das Ganze mit und ohne Einfluss eines externen Magnetfeldes. Als Quelle für ein externes Magnetfeld wird #M3 verwendet.

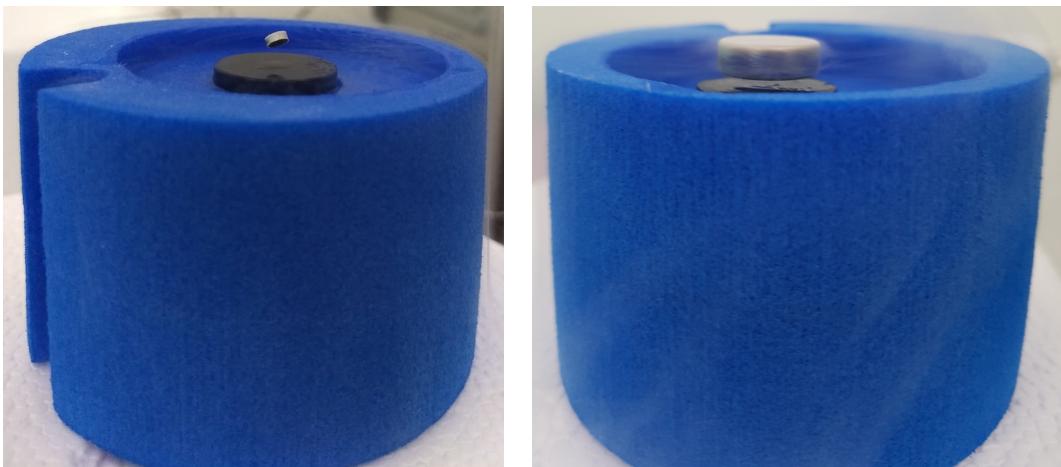
In einer weiteren Messreihe wird die kritischen Stromstärke  $I_C$  vom SL #1 abgeschätzt. Die  $R_{SL}(T)$  Abhängigkeit wird für fünf verschiedene Stromstärken aufgenommen. Die fünf Messungen werden jeweils mit und ohne Magnetfeld durchgeführt.

Als letztes wird der induzierte Strom  $I_{ind}$  an dem supraleitenden Ring SL #4 abgeschätzt. Der SL #4 wird in einem Styroporbehälter, welcher mit flüssigem Stickstoff gefüllt ist, abgekühlt. Mittels des Permanentmagneten #M3 wird ein Strom in dem Ring induziert. Um ein möglichst genaues Messergebnis zu erhalten, wird der Ring schnell aus dem Behälter entfernt und das Magnetfeld gemessen.

## 4 Auswertung

### 4.1 Phänomenologische Beobachtungen des Supraleiters

Zu Beginn des Versuches werden die gemachten Beobachtungen der verschiedenen Magnet-Supraleiter-Anordnungen geschildert. In den drei folgenden Abbildungen 5a, 5b und 6a ist gut zu erkennen, wie der Magnet, bedingt durch den Meißner-Ochsenfeld-Effekt, eigenstabil über dem Supraleiter schwebt. Dabei rotiert in Abbildung 5a ein kleiner Magnet #M1 in einer schrägen Position über dem SL #2 Supraleiter um seine Achse hin und zurück. Hingegen schwebt der größere Magnet #M2 in Abbildung 5b parallel zum SL #3 Supraleiter und ändert dabei nach einigen Rotationen seine Rotationsrichtung.



(a) Der SL #2 Supraleiter zusammen mit dem #M1 Permanentmagneten auf einem Styroporbehältnis mit Flüssigstickstoff.

(b) Der SL #3 Supraleiter zusammen mit dem #M2 Permanentmagneten auf einem Styroporbehältnis mit Flüssigstickstoff.

Besonders attraktiv sind diese Eigenschaft in der Technik, da so eine berührungslose Kraftübertragung realisiert werden kann. So lassen sich beispielsweise supraleitende Magnetlager wie in Abbildung 6a realisieren. In Abbildung 6a ist dazu ein Pinning-Stab zusammen mit dem #M2 Permanentmagneten zu sehen. Diese Konfiguration schwebt über dem SL # 3 Supraleiter. Wird auf den Pinning-Stab samt #M2 Magnet ein Impuls übertragen, so rotiert die Konfiguration stabil über dem SL #3 Supraleiter. Wird die Anordnung aus Abbildung 6a nun am Pinning-Stab angehoben, so bleibt die Konstellation bestehen. Der SL # 3 Supraleiter schwebt nun unter dem Magneten, dieser Effekt wird der Suspension zugeschrieben. Sind die Pinning-Kräfte stark genug, so lassen sich einfache Rotationsbewegungen des Supraleiters in sämtliche Raumrichtungen ermöglichen (siehe Abbildung 6b).



(a) Magnetlager aus dem SL #3 Supraleiter zusammen mit einem #M2 Permanentmagneten und einem Pinning-Stab auf einem Styroporbehältnis mit Flüssigstickstoff.

(b) Magnetlager aus dem SL #3 Supraleiter zusammen mit einem #M2 Permanentmagneten und einem Pinning-Stab in einer Schräglage angehoben.

## 4.2 Bestimmung der kritischen Temperatur $T_c$ via Meißner-Ochsenfeld-Effekt

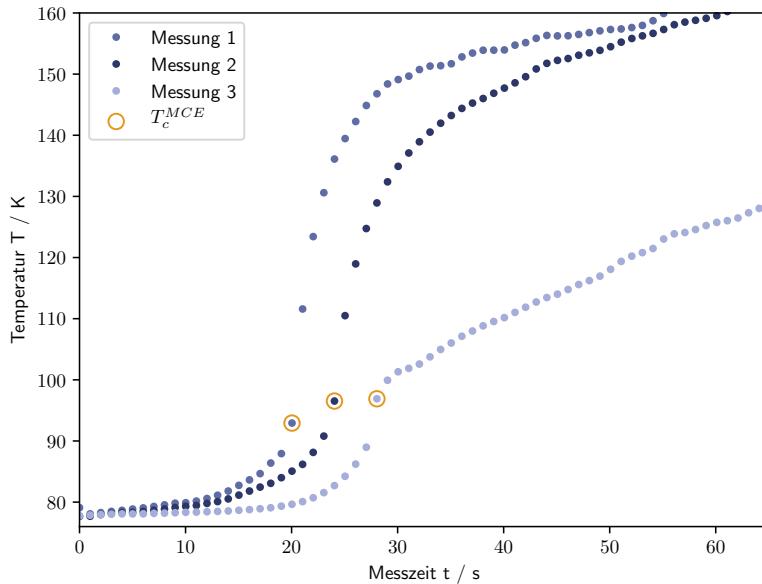
Um die Spannung  $U_{TS,Si}$  am Silizium-Temperatursensor in Temperatur  $T$  umzurechnen, wird ein Polynom vierten Grades genutzt:

$$T(U_{TS,Si}) = a_0 + a_1 \cdot U_{TS,Si} + a_2 \cdot U_{TS,Si}^2 + a_3 \cdot U_{TS,Si}^3 + a_4 \cdot U_{TS,Si}^4,$$

dabei sind die Kalibrierungsdaten  $a_i$  mit  $i \in 0,..,4$  dem Datenblatt zu entnehmen. Das dabei resultierende Verhältnis zwischen Temperatur  $T$  und der Messzeit  $t$  ist in Abbildung 7 dargestellt. Dabei wird die anfängliche Messzeit abgeschnitten, bei der keine Temperaturänderung stattfindet und ein neuer zeitlicher Nullpunkt gesetzt. So lässt sich das Verhalten bei der Temperaturerhöhung besser untersuchen. Der Zeitpunkt an dem der #M1 Magnet wieder auf dem Supraleiter aufliegt, ist jeweils mit einem gelben Kreis gekennzeichnet. Alle drei Messungen zeigen anfangs einen starken Temperaturanstieg. Etwa 4 s nachdem die jeweilige kritische Temperatur  $T_c^{MCE}$  erreicht ist, zeigen Messung 1 und 2 einen schwächer werdenden Temperaturanstieg, bis dieser sich nach weiteren 5 s annähernd linear verhält. Messung 3 hingegen zeigt sofort, nachdem die kritische Temperatur  $T_c^{MCE}$  erreicht ist, ein linearen Zuwachs der Temperatur.

Die sich dabei ergebende kritische Temperatur  $T_c^{MCE}$  der einzelnen Messungen ist in Tabelle 3 aufgelistet. Die Abschätzung des systematischen Fehlers von 5 K ergibt sich teils daraus, dass das Absenken des #M1 Magnets nicht abrupt passiert, sondern in einem gewissen Messbereich. Auch spielt die Position des Temperatursensors eine Rolle. Denn dieser liegt möglicherweise nicht optimal auf dem SL #2 Supraleiter auf. Ein Temperaturgradient am SL #2 Supraleiter, welcher die Messung verfälschen würde, ist ebenfalls nicht auszuschließen. Da der Temperatursensor im Werk kalibriert wurde, wird der Fehler beim

Messen eher als gering eingeschätzt. Durch Mittelung der kritischen Temperaturen  $T_c^{\text{MCE}}$  der einzelnen Messungen ergibt sich  $\bar{T}_c^{\text{MCE}}$ , mit dem Fehler  $\Delta\bar{T}_c^{\text{MCE}} = \Delta T_c^{\text{MCE}}/\sqrt{3}$ .



**Abbildung 7:** Bestimmung der kritischen Temperatur anhand von drei Messungen mittels des Meißner-Ochsenfeld-Effekts. Die gelben Kreise kennzeichnen den Zeitpunkt, an dem der #M1 Magnet wieder auf dem SL #2 Supraleiter aufliegt. Es wird allen Messwerten ein systematischer Fehler von  $\pm 5$  K zugeschrieben.

**Tabelle 3:** Kritische Temperatur  $T_c^{\text{MCE}}$  für drei Messungen.

Messung 1	Messung 2	Messung 3	$T_c^{\text{MCE}} / \text{K}$	$\bar{T}_c^{\text{MCE}} / \text{K}$
			Mittel	
92,9 $\pm$ 5	96,5 $\pm$ 5	96,9 $\pm$ 5	95,5 $\pm$ 2,9	

### 4.3 Bestimmung der kritischen Temperatur $T_c$ via 4-Punkt-Messung

Im Folgenden wird im Unterkapitel 4.3.1 der SL #1 Supraleiter ohne Störung eines Magnetteldes untersucht und damit die kritische Temperatur  $T_c^{\text{4PM}}$  bestimmt. Dann wird im Unterkapitel 4.3.2 die Messung mit dem #M3 Magneten für zwei verschiedene Abstände wiederholt.

Der Platin-Sensor erlaubt es die Temperatur am SL #1 Supraleiter zu bestimmen. Dazu wird der gemessene Widerstand  $R_{\text{TS},\text{Pt}}$  durch ein Polynom dritten Grades,

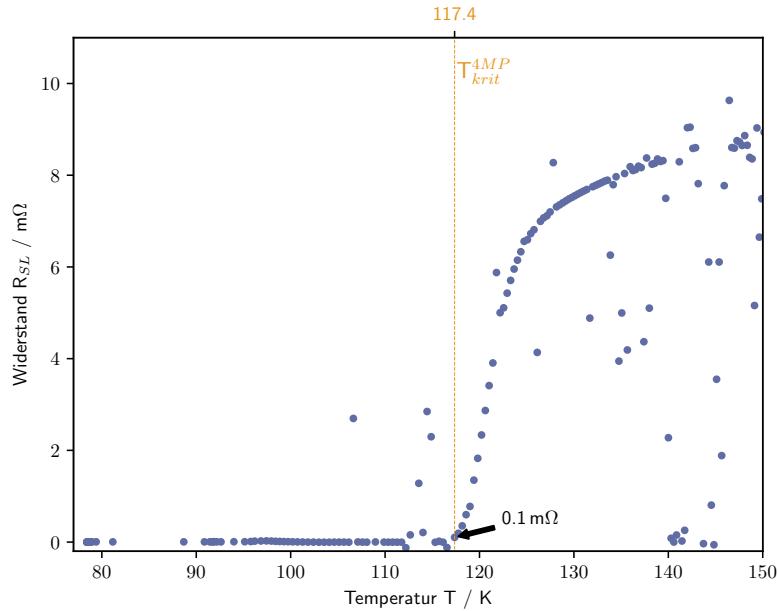
$$T(R_{\text{TS,Pt}}) = a_0 + a_1 \cdot R_{\text{TS,Pt}} + a_2 \cdot R_{\text{TS,Pt}}^2 + a_3 \cdot R_{\text{TS,Pt}}^3$$

in die Temperatur  $T$  umgerechnet, wobei  $a_i$  mit  $i \in 0,..,3$  dem Datenblatt des Platin-Sensors entnommen wird. Der SL #1 Supraleiter sowie der Platin-Sensor befinden sich in einem geschlossenen Plexiglasgehäuse, was die Messung vor äußeren Einflüssen schützt. Allerdings kann sich beim Auftauen so besser Flüssigkeit ansammeln, welche das Messergebnis verfälschen kann. Der Platin-Sensor ist vom Werk aus kalibriert und arbeitet damit sehr genau. Ein Temperaturgradient am Supraleiter zum Platin-Sensor ist auch hier nicht auszuschließen. Der systematische Fehler wird damit auf  $\pm 2\text{ K}$  geschätzt. Zusätzlich wird ein Ablesefehler bei der Bestimmung der kritischen Temperatur  $T_c^{4\text{PM}}$  dazugeschätzt. Dieser bildet sich durch die Mittelung von vier Temperaturänderungen  $\Delta T_{i,i-1}^{4\text{PM}} = |T_i^{4\text{PM}} - T_{i-1}^{4\text{PM}}|$  um die kritische Temperatur  $T_c^{4\text{PM}}$ :

$$\Delta \bar{T}_c^{4\text{PM}} = \frac{\Delta T_{c-1,c-2}^{4\text{PM}} + \Delta T_{c,c-1}^{4\text{PM}} + \Delta T_{c+1,c}^{4\text{PM}} + \Delta T_{c+2,c+1}^{4\text{PM}}}{4}$$

#### 4.3.1 Ohne Magnet

Das temperaturabhängige Verhalten des SL #1 Supraleiter-Widerstandes  $R_{\text{SL}}$ , ohne Störung durch einen Magnetfeld, bei einem Durchlaufstrom  $I$  von  $0,6\text{ A}$  ist in Abbildung 8 dargestellt. Der SL #1 ist zwischen  $(76 \pm 2)\text{ K}$  und etwa  $(117 \pm 2)\text{ K}$  supraleitend, denn hier zeigt sich ein Widerstandswert von Null. Fehlerhaft gemessene negative Widerstands-werte sind größtenteils aus dem Ausschnitt skaliert, weshalb Lücken, wie z.B. zwischen  $(80 \pm 2)\text{ K}$  und  $(90 \pm 2)\text{ K}$ , entstehen. Diese und weitere Sprungwerte (beispielsweise zwischen  $(115 \pm 2)\text{ K}$  und etwa  $(116 \pm 2)\text{ K}$ ) sind Messfehler, welche sich größtenteils nicht im interessanten Bereich aufhalten. Der interessante Bereich ist der, an dem der Widerstand  $R_{\text{SL}}$  eine stetige Zunahme erfährt. Bei einer Temperatur von etwa  $(117,4 \pm 2,6)\text{ K}$  zeigt sich der erste Widerstandsanstieg von  $0,1\text{ m}\Omega$ . Danach ist der Widerstandszuwachs sehr stark, bis dieser sich bei etwa  $(125 \pm 2)\text{ K}$  annähernd linear verhält.



**Abbildung 8:** Bestimmung der kritischen Temperatur des SL #1 Supraleiters ohne Magneten anhand einer 4-Punkt-Messung. Die Temperatur  $T$  wird mit einem Platin-Sensor ermittelt, wobei der Widerstand  $R_{SL}$  bei einem Strom  $I$  von 0,6 A gemessen wird. Die gelbe Markierung kennzeichnet die kritische Temperatur  $T_c^{4PM}$ . Es wird allen Messwerten ein systematischer Fehler von  $\pm 2$  K zugeschrieben.

#### 4.3.2 Mit Magnet

Die Messung für einen Magnetabstand von 10 mm ist in Abbildung 9 und die in einem Abstand von 16 mm ist in Abbildung 10 dargestellt. In beiden Fällen ist der Supraleiter von  $(78 \pm 2)$  K bis zur kritischen Temperatur  $T_c^{4PM}$  supraleitend. Zuerst werden die beiden Abbildungen 9 und 10 miteinander verglichen. Beide Messungen zeigen nach der kritischen Temperatur  $T_c^{4PM}$  einen ähnlich starken Widerstandsanstieg. Werden beide Messungen (mit Magnet) mit der Messung aus Abbildung 8 (ohne Magnet) verglichen, fällt auf, dass der Widerstandsanstieg weniger stark ist. Weiter fällt auf, dass die Messung aus Abbildung 9 deutlich mehr Sprungwerte aufweist, als die Messung aus Abbildung 10. Einige Sprungwerte sind in Abbildung 9 leider genau dort, wo der Widerstandsanstieg anfängt. Um die kritische Temperatur aus beiden Messungen bei einem äquivalenten Widerstand von 0,05 mΩ bestimmen zu können, wird bei der Messung bei 10 mm Abstand eine Interpolation durchgeführt.

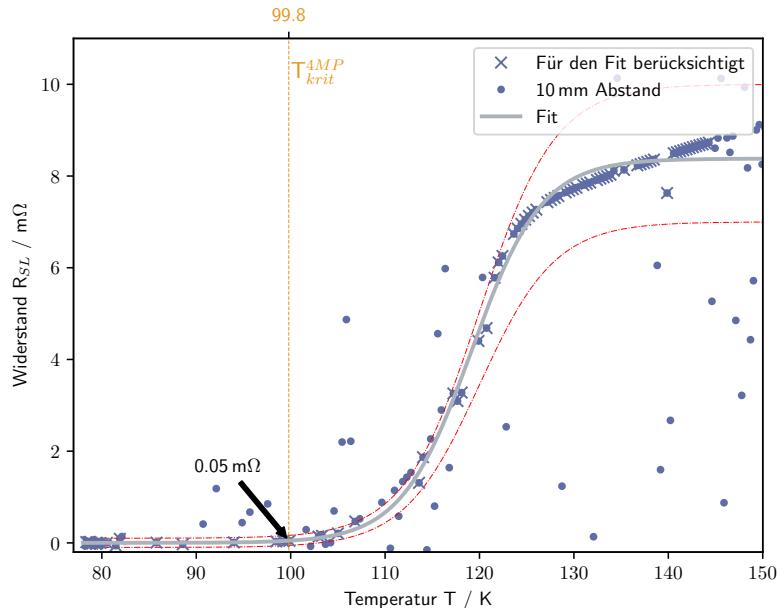
Dabei werden nur die Messwerte, welche in Abbildung 9 mit einem Kreuz markiert sind, für folgende Fit-Funktion

$$R_{\text{SL}}(T) = \frac{A_1 - A_2}{1 + \exp\left(\frac{T-T_0}{dT}\right)} + A_2$$

berücksichtigt. Nach der ersten Regression mittels *Python 3.7.6* ergibt sich ein *Offset* von  $A_1 = -0,022 \text{ m}\Omega$ , weswegen alle Messwerte um diesen Wert angehoben werden, sodass sich im supraleitenden Zustand ( $T < T_c^{\text{4PM}}$ ) ein Widerstand von Null ergibt. Eine zweite Regression ergibt dann folgende Fit-Parameter

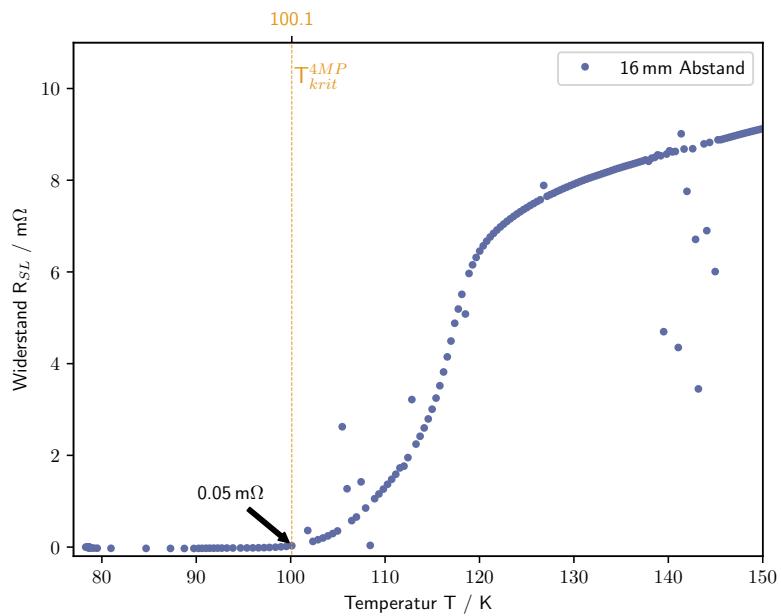
$$A_1 = (0,0 \pm 0,3) \text{ m}\Omega \quad A_2 = (8,4 \pm 0,4) \text{ m}\Omega \quad T_0 = (3,7 \pm 0,1) \text{ K} \quad dT = (119,2 \pm 0,1) \text{ K}.$$

In Tabelle 4 sind die jeweilige kritischen Temperaturen  $T_c^{\text{4PM}}$  und die gemessene Magnetfeldstärke  $B_{\text{ex}}$  aufgelistet.



**Abbildung 9:** Bestimmung der kritischen Temperatur des SL #1 Supraleiters mit dem #M3 Magneten im Abstand von 10 mm anhand einer 4-Punkt-Messung. Die Temperatur  $T$  wird mit einem Platin-Sensor ermittelt, wobei der Widerstand  $R_{\text{SL}}$  bei einem Strom  $I$  von 0,6 A gemessen wird. Aufgrund des sprunghaften Verhaltens, wird eine Interpolation durch die Funktion  $R_{\text{SL}}(T) = \frac{A_1 - A_2}{1 + \exp\left(\frac{T-T_0}{dT}\right)} + A_2$  durchgeführt. Dabei

werden nun die Messwerte berücksichtigt, die mit einem Kreuz markiert sind und damit in dem rot gestrichelten Schlauch liegen. Die gelbe Markierung kennzeichnet die kritische Temperatur  $T_c^{\text{4PM}}$ . Es wird allen Messwerten ein systematischer Fehler von  $\pm 2 \text{ K}$  zugeschrieben.



**Abbildung 10:** Bestimmung der kritischen Temperatur des SL #1 Supraleiters mit dem #M3 Magneten im Abstand von 16 mm anhand einer 4-Punkt-Messung. Die Temperatur  $T$  wird mit einem Platin-Sensor ermittelt, wobei der Widerstand  $R_{\text{SL}}$  bei einem Strom  $I$  von 0,6 A gemessen wird. Die gelbe Markierung kennzeichnet die kritische Temperatur  $T_c^{\text{4PM}}$ . Es wird allen Messwerten ein systematischer Fehler von  $\pm 2 \text{ K}$  zugeschrieben.

**Tabelle 4:** Kritische Temperatur  $T_c^{\text{MCE}}$  für zwei unterschiedliche Magnetabstände.

Magnetabstand $d / \text{mm}$	kritische Temperatur $T_c^{\text{MCE}} / \text{K}$	Magnetfeldstärke $B_{\text{ex}} / \text{mT}$
10	$99,8 \pm 2$	142,7
16	$100,1 \pm 2,9$	23,5

#### 4.4 Abschätzung der kritischen Stromstärke $I_c$

Im folgenden Unterkapitel 4.4.1 wird die kritische Temperatur  $T_c^{\text{MCE}}$  bei einer 4-Punkt-Messung in Abhängigkeit von der Durchlaufstromstärke  $I$  untersucht. Die dabei entstehenden Fehler werden analog zum Unterkapitel 4.3 abgeschätzt. Im zweiten Unterkapitel 4.4.2 wird die Messung mit Magnetfeld durchgeführt.

#### 4.4.1 Ohne Magnet

Eine 4-Punkt-Messung ohne Magnetfeld wird für jeweils fünf unterschiedliche Stromstärken ( $I = 0,2 \text{ A}; 0,4 \text{ A}; 0,6 \text{ A}; 0,8 \text{ A}; 1,0 \text{ A}$ ) durchgeführt. Die kritische Temperatur  $T_c^{\text{MCE}}$  wird möglichst bei einem Widerstandsanstieg auf  $0,5 \text{ A}$  abgelesen (siehe Anhang 6.1) und in Tabelle 5 aufgelistet. Mit Ausnahme der kritischen Temperatur  $T_c^{\text{MCE}}$  bei einer Stromstärke von  $0,6 \text{ A}$ , ist die Tendenz, dass die kritische Temperatur  $T_c^{\text{MCE}}$  mit der Stromstärke  $I$  abnimmt. Ein Blick in die Messung bei einer Stromstärke von  $0,6 \text{ A}$  (Abbildung 15 im Anhang) zeigt eine Lücke genau im interessanten Bereich des Widerstandanstiegs und damit, im Vergleich zu den anderen Messungen, einen doppelt so großen Widerstand  $R_{\text{SL}}$  von  $0,1 \text{ m}\Omega$ . Aus diesem Grund wird dieser Wert in der folgenden Auswertung nicht mehr berücksichtigt.

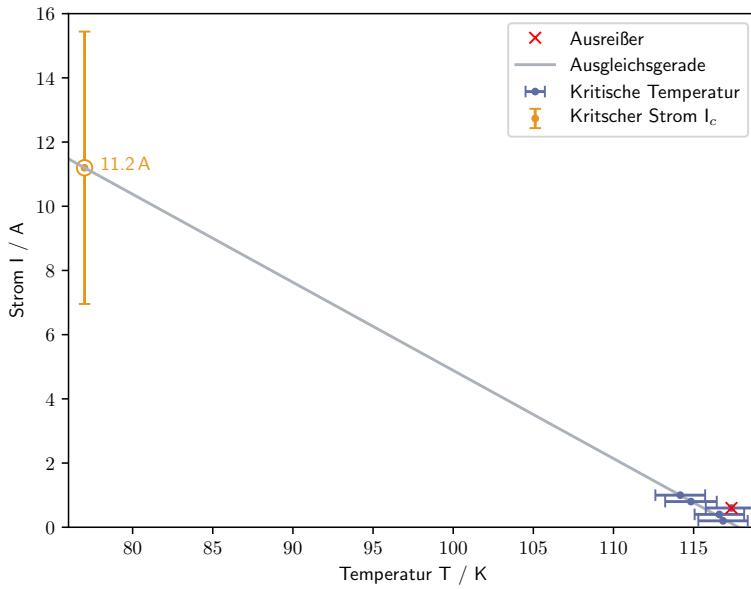
**Tabelle 5:** Kritische Temperatur  $T_c^{\text{MCE}}$  für fünf unterschiedliche Durchlaufstromstärken.

Stromstärke $I / \text{A}$	kritische Temperatur $T_c^{\text{MCE}} / \text{K}$
0,2	$116,83 \pm 2,54$
0,4	$116,61 \pm 2,55$
0,6	$117,36 \pm 2,60$
0,8	$114,83 \pm 2,61$
1,0	$114,17 \pm 2,55$

Um nun die kritische Stromstärke  $I_c$  bestimmen zu können, wird mittels *Python 3.7.6* eine lineare Extrapolation bis  $77 \text{ K}$  gemacht, welche in Abbildung 11 zu sehen ist. Für die Ausgleichsgerade  $I(T) = m \cdot T + b$  ergeben sich folgende Parameter

$$m = (-0,27 \pm 0,03) \frac{\text{A}}{\text{K}} \quad b = (32,34 \pm 3,53) \text{ A}$$

und damit eine Abschätzung für den kritischer Strom  $I_c$  von  $(11 \pm 4) \text{ A}$ . Der Fehler ergibt sich hierbei nach der Gaußschen Fehlerfortpflanzung:  $\Delta I(T) = \sqrt{(T \cdot \Delta m)^2 + (\Delta b)^2}$



**Abbildung 11:** Bestimmung der kritischen Stromstärke  $I_c$  des SL #1 Supraleiters ohne Magnet anhand einer 4-Punkt-Messung. Die kritischen Temperaturen  $T_c^{\text{MCE}}$  bei der dazugehörigen Stromstärke  $I$  sind der Tabelle 5 zu entnehmen. Die gelbe Markierung kennzeichnet die Abschätzung des kritischen Stroms  $I_c$  und die rote Markierung kennzeichnet den aus der Auswertung unberücksichtigten Wert.

#### 4.4.2 Mit Magnet

Nun erfährt der SL #1 Supraleiter eine Störung durch das starke Magnetfeld des #M3 Magneten. Wegen Messproblemen wird der kritische Strom  $I_c$  nur für zwei Durchlaufstromstärken von 0,6 A und 0,8 A untersucht. Dazu wird von jeder Messung die kritische Temperatur  $T_c^{\text{MCE}}$  bei einem Widerstand von etwa 0,5-0,6 A abgelesen (siehe Anhang 6.1) und der jeweilige Wert in Tabelle 6 eingetragen.

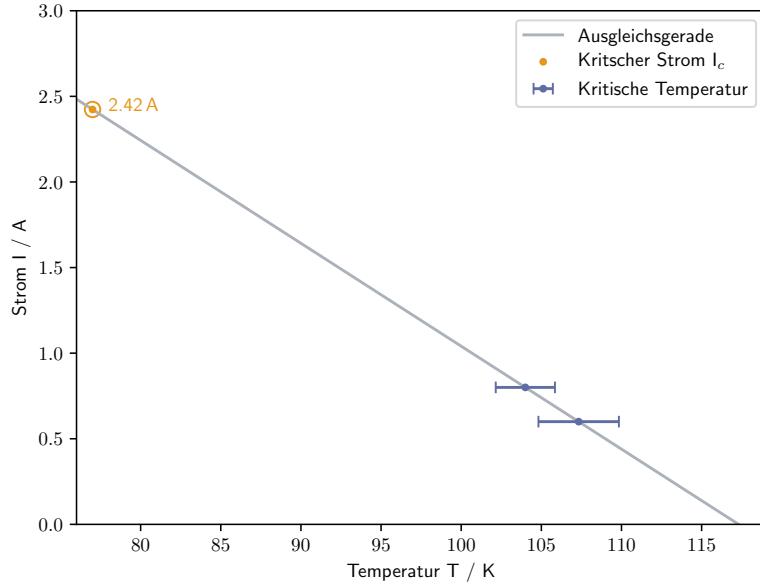
**Tabelle 6:** Kritische Temperatur  $T_c^{\text{MCE}}$  für fünf unterschiedliche Durchlaufstromstärken mit Magnetfeld des #M3 Magneten.

Stromstärke $I / \text{A}$	kritische Temperatur $T_c^{\text{MCE}} / \text{K}$
0,6	$107,33 \pm 3,51$
0,8	$104,00 \pm 2,85$

Die kritische Stromstärke  $I_c$  ergibt sich erneut durch eine Extrapolation bis 77 K mittels *Python 3.7.6*, welche in Abbildung 12 dargestellt ist. Die Parameter der Ausgleichsgeraden  $I(T) = m \cdot T + b$  haben dabei folgende Werte

$$m = -0,06 \frac{\text{A}}{\text{K}} \quad b = 7,05 \text{ A}$$

und der kritische Strom  $I_c$  damit einen Schätzwert von 2,4 A.



**Abbildung 12:** Bestimmung der kritischen Stromstärke  $I_c$  des SL #1 Supraleiters mit Störung durch den #M3 Magnet anhand einer 4-Punkt-Messung. Die kritischen Temperaturen  $T_c^{\text{MCE}}$  bei der dazugehörigen Stromstärke  $I$  sind der Tabelle 5 zu entnehmen. Die gelbe Markierung kennzeichnet die Abschätzung des kritischen Stroms  $I_c$ .

#### 4.5 Abschätzung des induzierten Stroms $I_{\text{ind}}$

Zuletzt wird der mit dem #M3 Magneten induzierte Strom  $I_{\text{ind}}$  am SL #4 Supraleiter-Ring abgeschätzt. Dazu misst die Hall-Sonde in einem Abstand von  $z = 0$  zum Mittelpunkt des Rings ein induziertes Magnetfeld  $B_{\text{ind}}$  von 1,59 mT. Das Biot-Savart-Gesetz für kreisförmige Stromschleifen:

$$I_{\text{ind}}(z, R, B_{\text{ind}}) = \frac{2B_{\text{ind}}(z^2 + R^2)^{3/2}}{\mu_0 R^2}$$

erlaubt es nun, den induzierten Strom  $I_{\text{ind}}$  abschätzen, wobei der Radius  $R$  des SL #4 Supraleiter-Rings 7,5 mm beträgt. Der induzierte Strom lässt sich damit auf einen Wert von  $(18,98 \pm 0,51)$  A abschätzen. Wegen einer möglichen nicht idealen Messposition in  $z$ -Richtung, wird dem  $I_{\text{ind}}$ -Wert ein Fehler, welcher sich aus dem absoluten Fehler  $|I_{\text{ind}}(z = 0, R, B_{\text{ind}}) - I_{\text{ind}}(z = \pm 0,1 \text{ mm}, R, B_{\text{ind}})|$  ergibt, zugeschrieben.

## 5 Diskussion

Im ersten Unterkapitel 4.1 sind phänomenologische Beobachtungen des Supraleiters bei normaler Atmosphäre und bei Raumtemperatur beschrieben. Dabei wird klar, dass der supraleitende Zustand schnell wieder vergeht, wenn keine Arbeit in Form von Kühlung an ihm verrichtet wird. So arbeitet beispielsweise ein supraleitendes Magnetlager reibungsfrei, braucht dagegen aber viel Energie zur Kühlung, um den Zustand beizubehalten. Die Rotationsbewegungen des Magneten in Abbildung 5a und 5b resultieren aus dem Temperaturgradienten der umgebenden Luft und aus der Inhomogenität des Permanentmagneten.

Im Folgenden wird der temperaturabhängige supraleitende Zustand durch zwei unterschiedliche Messverfahren genauer untersucht. Als erstes wird im Unterkapitel 4.2 mit dem bloßen Auge beobachtet, bei welcher Temperatur der supraleitende Zustand des YBCO-Supraleiters vergeht. In Abbildung 7 zeigen die ersten beiden Messungen 1 und 2 einen ähnlichen Verlauf, allerdings eine um etwa 4 K unterschiedliche kritische Temperatur  $T_c^{\text{MCE}}$ . Das liegt vermutlich an der Messauflösung (eine Temperaturmessung pro Sekunde), die dem großen Temperaturausschlag nach der kritischen Temperatur nicht mehr genügt. Messung 3 zeigt besonders nach Erreichen der kritischen Temperatur  $T_c^{\text{MCE}}$  ein anderes Verhalten als die beiden anderen Messungen. Der Temperaturanstieg ist dort wesentlich geringer. Möglicherweise ist der Magnet, welcher noch eine geringe Temperatur haben könnte, als der Supraleiter selbst, in die Nähe des Temperatursensor gefallen und hemmt damit den raschen Temperaturanstieg. Aber auch ein Eingriff nach dem Magnetabsenken in das Messsystem könnte den Verlauf dort verfälscht haben. Hier wäre es hilfreich, einen weiteren Temperatursensor mit einzubinden. So ließe sich der systematische Fehler bei fehlerhafter Position des Sensors und der Verfälschung durch einen Temperaturgradienten am Supraleiter minimieren. Schließlich ergibt sich, nach Mittelung über drei Messungen, eine kritische Temperatur von  $\bar{T}_c^{\text{MCE}} = (95,45 \pm 2,89)$  K. Dieser Wert liegt dem theoretischen Wert von maximal 93 K [1, S. 62] sehr nah.

Beim zweiten Messverfahren im Unterkapitel 4.3 wird ein Bi2223-Supraleiter in einem möglichst geschlossenen Messsystem mittels einer 4-Punkt-Messung auf seine kritische Temperatur  $T_c^{\text{4PM}}$  untersucht. Dabei wird geschaut, bei welcher Temperatur der Widerstand von Null verschieden wird. In Abbildung 8 zeigt sich, dass die Messauflösung bei diesem Verfahren gut genug ist. Die kritische Temperatur  $T_c^{\text{4PM}}$  von  $(117,4 \pm 2,0)$  K wird bei einem Widerstandsanstieg von Null auf  $0,1 \text{ m}\Omega$  abgelesen. Die theoretische kritische Temperatur liegt bei 110 K [1, S. 64] und damit um  $(7,4 \pm 2,0)$  K daneben. Eine Mittelung über mehrere Messungen würde vermutlich ein genaueres Ergebnis liefern.

Des Weiteren wird im Unterkapitel 4.3.2 der Einfluss eines extern angelegten Magnetfeldes auf die kritische Temperatur  $T_c^{\text{4PM}}$  untersucht. Wie eben gezeigt, liegt die kritische Temperatur  $T_c^{\text{4PM}}$  ohne Magnetfeld bei  $(117,4 \pm 2,0)$  K. Deshalb wird erwartet, dass sich die kritische Temperatur  $T_c^{\text{4PM}}$  mit größer werdendem Magnetabstand  $d$  diesem Wert annähert. Wie im Unterkapitel 2.2 beschrieben, bilden sich im Typ 2-Supraleiter normaleitende magnetische Flussschläuche aus. Diese Flussschläuche spüren durch den im Supraleiter durchfließenden Strom  $I$  eine Lorentzkraft  $F_L$ . In Hochtemperatursupraleitern, wie dieser hier, können sich diese Flussschläuche wie in einer Flüssigkeit bewegen. Diese

Feldbewegung hat eine weitere Lorentzkraft  $F_C$  zu Folge, welche nach der Lenzschen Regel dem Durchlaufstrom  $I$  entgegenwirkt und damit einen elektrischen Widerstand im Supraleiter verursacht. Je stärker nun das äußere Magnetfeld  $B_{\text{ex}}$ , desto größer werden diese Flussschläuche und damit die Lorentzkraft  $F_C$  bzw. der elektrische Widerstand. In Tabelle 4 zeigt die kritische Temperatur  $T_c^{4\text{PM}}$  eine Änderung mit größer werdenden Abstand von 0,3 K. Leider lässt sich aus dieser zu geringen Änderung keine Aussage treffen, da der systematische Fehler aller Messwerte bereits bei  $\pm 2$  K liegt. Um das Verhalten der kritischen Temperatur in Abhängigkeit zur Magnetfeldstärke genauer untersuchen zu können, sollte die kritische Temperatur für viele verschiedene Magnetfeldstärken bestimmt werden.

Im Weiteren konnte gezeigt werden, dass nicht nur die Temperatur eine entscheidende Rolle für den supraleitenden Zustand spielt. Wird ein Supraleiter als Leiter verwendet, stellt man fest, dass keine beliebig große Stromstärke durchfließen kann. Ab einer kritischen Stromstärke  $I_c$ , welche im Unterkapitel 4.4 für den Bi2223-Supraleiter abgeschätzt wird, verliert der Supraleiter seine supraleitenden Eigenschaften. Dafür werden fünf Messungen, ohne die Störung durch ein externes Magnetfeld, bei unterschiedlichen Durchflussstromstärken  $I$  gemacht und mittels einer linearen Extrapolation bis 77 K der kritische Strom  $I_c$  abgeschätzt (siehe Abbildung 11), wobei eine der fünf Messungen aus der Auswertung entnommen wurde. Der Grund dafür ist im Unterkapitel 4.4.1 zu finden. Der Schätzwert für die kritische Temperatur  $I_c$  liegt bei  $(11 \pm 4)$  A. Für Bi2223 können kritische Stromdichten  $j_c$  von etwa  $1,2 \cdot 10^7$  A/m<sup>2</sup> bei 5 K [2, S. 345] beobachtet werden. Leider sind die Maße des Bi2223-Supraleiterstabs nicht bekannt. Aber angenommen dieser hätte einen kreisförmigen Querschnitt, so ergebe sich mit

$$\pi R_{\text{Bi2223-Stab}}^2 = \frac{I_c}{j_c} \iff R_{\text{Bi2223-Stab}} = \sqrt{\frac{I_c}{j_c \pi}}$$

ein minimaler Radius  $R_{\text{Bi2223-Stab}}$  von 0,5 mm. Der Stabradius wird größer gewesen sein, weshalb ein kritischer Stromwert  $I_c$  von etwa  $(11 \pm 4)$  A bei 77 K durchaus realistisch ist. Als letzte 4-Punkt-Messung wird im Unterkapitel 4.4.2 das Verhalten des kritischen Stroms in Abhängigkeit eines externen Magnetfeldes untersucht. Aufgrund von Schwierigkeiten beim Messen, auf die im Folgenden noch eingegangen wird, werden hier nur Messungen für zwei unterschiedlich starke Durchlaufstromstärken  $I$  untersucht. Unter diesen Umständen ergibt sich durch Extrapolation bis 77 K (siehe Abbildung 12) ein kritischer Strom  $I_c$  von 2,42 A. Wie im Unterkapitel 2.2 beschrieben, befinden sich im Supraleiter zweiter Art normalleitende Bereiche. Durch das von Außen angelegte Magnetfeld  $B_{\text{ex}}$  wird der normalleitende Bereich vergrößert, sodass die kritische Stromstärke  $I_c$  circa 78 % kleiner als ohne Magnetfeld ist.

Besonders bei den letzten Messungen kam es wegen Feuchtigkeitsbildung durch das Auf- und Abtauen des geschlossenen Messsystems zu Schwierigkeiten. Mit einem Heißluftfön wurde probiert, dem entgegenzuwirken. Allerdings hat sich zum Ende hin so viel Feuchtigkeit gesammelt, dass nur noch langes Warten bzw. Fönen genügt hätte. Dies wird dem geschlossenen System zum Nachteil und erzeugt Sprungwerte wie z.B. in Abbildung 8. Um diese vermeiden zu können, sollte zwischen den Messungen genug Zeit abgewartet

bzw. genügend gefönt werden.

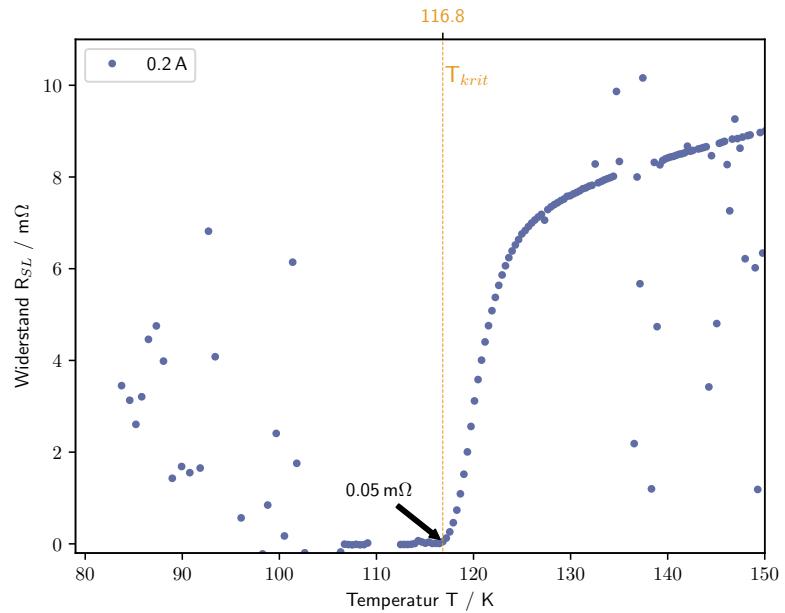
Im letzten Unterkapitel 4.5 wird der induzierte Strom am Bi2223-Supraleiter-Ring untersucht. Mit dem Biot-Savart-Gesetz für kreisförmige Leiterschleifen ergibt sich dabei ein Induktionsstrom von  $(18,98 \pm 0,51)$  A. Der Bi2223-Supraleiter-Ring hat eine Wanddicke  $d$  von 1,5 mm und damit schätzungsweise einen Querschnitt von  $A \approx \pi \frac{d^2}{4} = 1,77 \cdot 10^{-6}$  m<sup>2</sup>. Wie oben erwähnt, ist die kritische Stromdichte  $j_c$  für einen Bi2223-Supraleiter etwa  $1,2 \cdot 10^7$  A/m<sup>2</sup> bei 5 K. Demnach ergibt sich ein kritischer Strom  $I_c$  für den Bi2223-Supraleiter-Ring von 21,24 A. Ein Induktionsstrom von  $(18,98 \pm 0,51)$  A wäre damit durchaus realistisch.

## Literatur

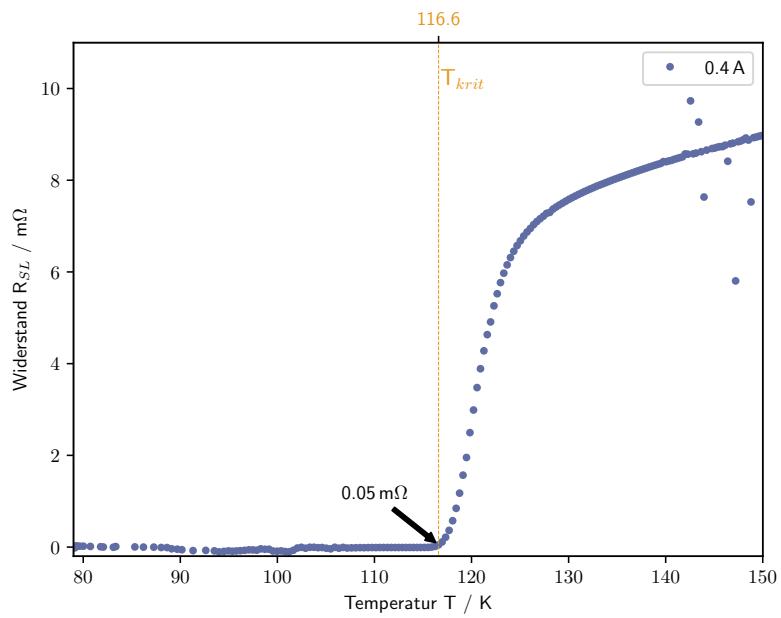
- [1] Prof. Dr. Ulrich Hohenester. *Die Entdeckung der Supraleitung*. URL: <https://physik.uni-graz.at/~uxh/teaching/supraleitung/SL.pdf> (besucht am 28.08.2020).
- [2] M.S.Shalaby u.a. „Higher critical current density achieved in Bi-2223 High-Tc superconductors“. In: *Journal of Radiation Research and Applied Sciences* 9 (3 2016), S. 345–351.
- [3] TU Dortmund. *Hochtemperatur-Supraleitung*. 2020.

## 6 Anhang

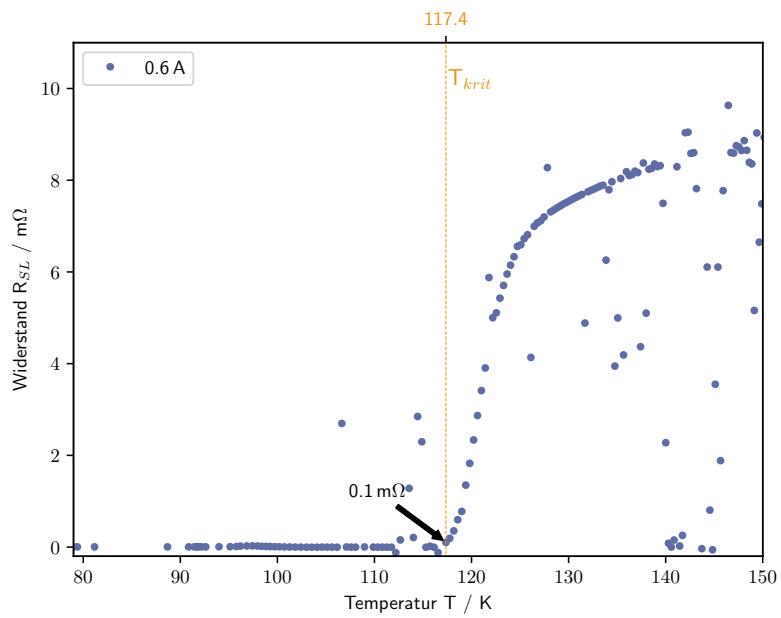
### 6.1 Bestimmung der kritischen Stromstärke $I_c$



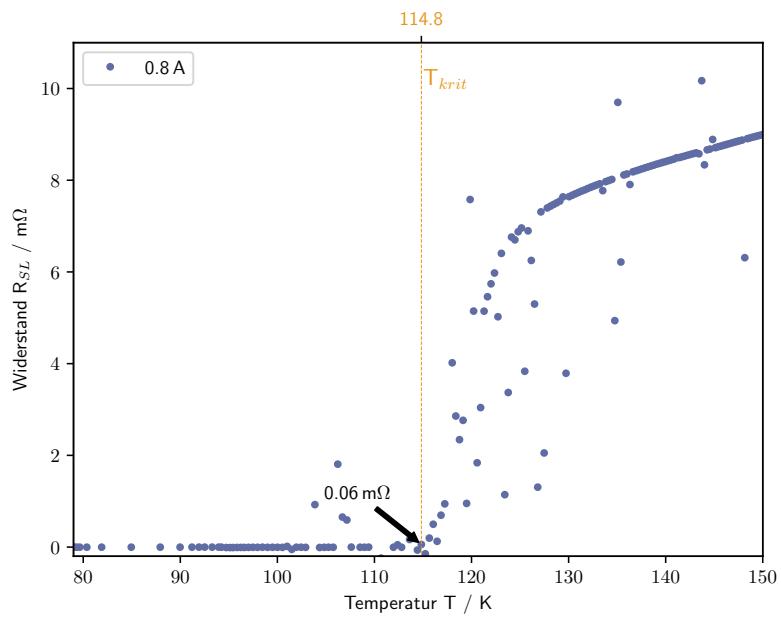
**Abbildung 13:** Bestimmung der kritischen Temperatur des SL #1 Supraleiters ohne Magnet anhand einer 4-Punkt-Messung. Die Temperatur  $T$  wird mit einem Platin-Sensor ermittelt, wobei der Widerstand  $R_{SL}$  bei einem Strom  $I$  von 0,2 A gemessen wird. Die gelbe Markierung kennzeichnet die kritische Temperatur  $T_c^{4PM}$ . Es wird allen Messwerten ein systematischer Fehler von  $\pm 2$  K zugeschrieben.



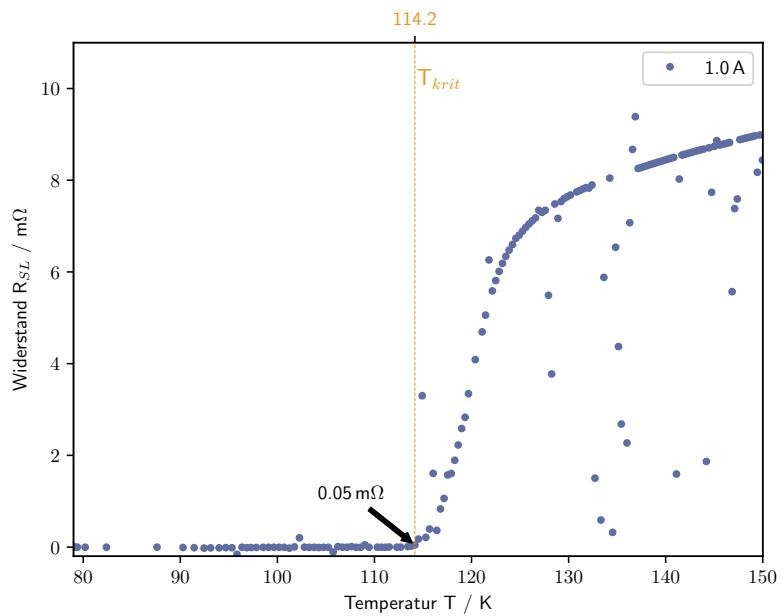
**Abbildung 14:** Bestimmung der kritischen Temperatur des SL #1 Supraleiters ohne Magnet anhand einer 4-Punkt-Messung. Die Temperatur  $T$  wird mit einem Platin-Sensor ermittelt, wobei der Widerstand  $R_{SL}$  bei einem Strom  $I$  von 0,4 A gemessen wird. Die gelbe Markierung kennzeichnet die kritische Temperatur  $T_c^{4PM}$ . Es wird allen Messwerten ein systematischer Fehler von  $\pm 2$  K zugeschrieben.



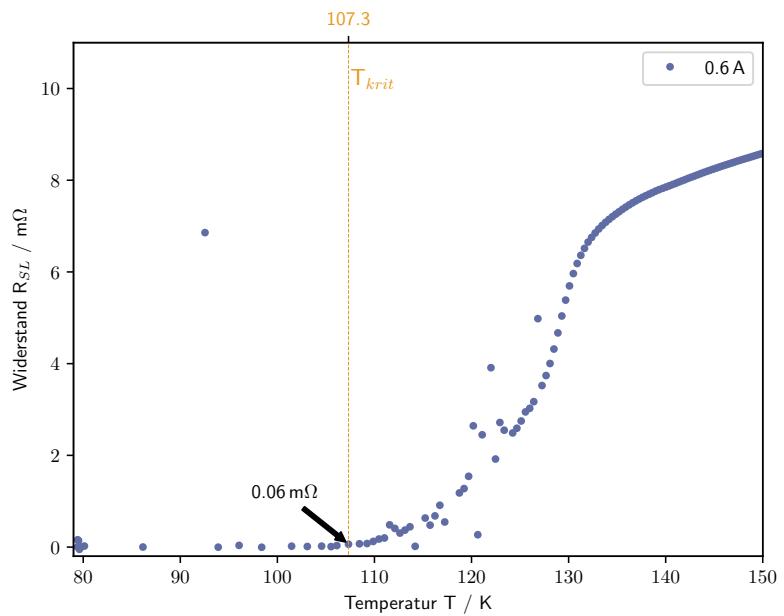
**Abbildung 15:** Bestimmung der kritischen Temperatur des SL #1 Supraleiters ohne Magnet anhand einer 4-Punkt-Messung. Die Temperatur  $T$  wird mit einem Platin-Sensor ermittelt, wobei der Widerstand  $R_{SL}$  bei einem Strom  $I$  von 0,6 A gemessen wird. Die gelbe Markierung kennzeichnet die kritische Temperatur  $T_c^{4PM}$ . Es wird allen Messwerten ein systematischer Fehler von  $\pm 2$  K zugeschrieben.



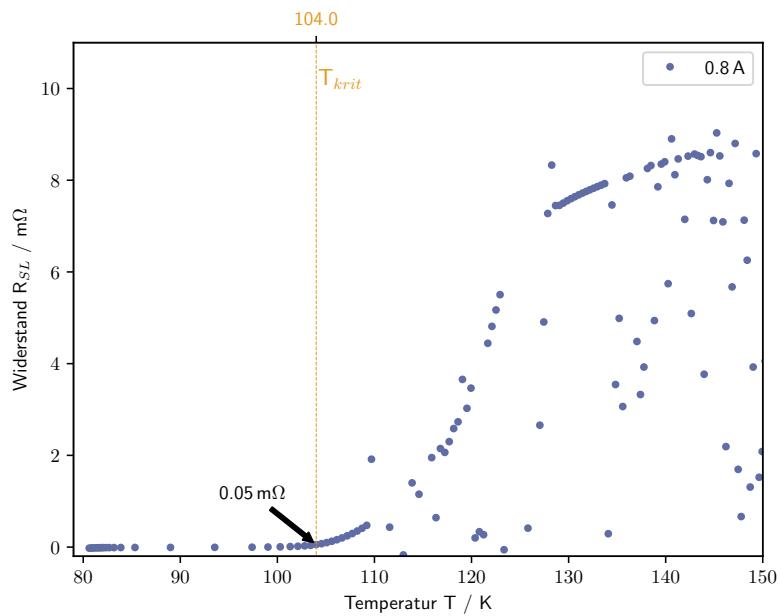
**Abbildung 16:** Bestimmung der kritischen Temperatur des SL #1 Supraleiters ohne Magnet anhand einer 4-Punkt-Messung. Die Temperatur  $T$  wird mit einem Platin-Sensor ermittelt, wobei der Widerstand  $R_{SL}$  bei einem Strom  $I$  von  $0,8\text{ A}$  gemessen wird. Die gelbe Markierung kennzeichnet die kritische Temperatur  $T_c^{4\text{PM}}$ . Es wird allen Messwerten ein systematischer Fehler von  $\pm 2\text{ K}$  zugeschrieben.



**Abbildung 17:** Bestimmung der kritischen Temperatur des SL #1 Supraleiters ohne Magnet anhand einer 4-Punkt-Messung. Die Temperatur  $T$  wird mit einem Platin-Sensor ermittelt, wobei der Widerstand  $R_{SL}$  bei einem Strom  $I$  von 1,0 A gemessen wird. Die gelbe Markierung kennzeichnet die kritische Temperatur  $T_c^{4PM}$ . Es wird allen Messwerten ein systematischer Fehler von  $\pm 2$  K zugeschrieben.



**Abbildung 18:** Bestimmung der kritischen Temperatur des SL #1 Supraleiters mit Störung des #M3 Magnets anhand einer 4-Punkt-Messung. Die Temperatur  $T$  wird mit einem Platin-Sensor ermittelt, wobei der Widerstand  $R_{SL}$  bei einem Strom  $I$  von 0,6 A gemessen wird. Die gelbe Markierung kennzeichnet die kritische Temperatur  $T_c^{4PM}$ . Es wird allen Messwerten ein systematischer Fehler von  $\pm 2$  K zugeschrieben.



**Abbildung 19:** Bestimmung der kritischen Temperatur des SL #1 Supraleiters mit Störung des #M3 Magnets anhand einer 4-Punkt-Messung. Die Temperatur  $T$  wird mit einem Platin-Sensor ermittelt, wobei der Widerstand  $R_{SL}$  bei einem Strom  $I$  von 0,8 A gemessen wird. Die gelbe Markierung kennzeichnet die kritische Temperatur  $T_c^{4PM}$ . Es wird allen Messwerten ein systematischer Fehler von  $\pm 2\text{ K}$  zugeschrieben.