

Hochtemperatur-Supraleitung

Praktikum - Festkörperphysik

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

3. September 2020

TU Dortmund – Fakultät Physik

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|-----------|
| 1 Ziel | 3 |
| 2 Theorie | 3 |
| 3 Durchführung | 3 |
| 4 Auswertung | 3 |
| 4.1 Phänomenologische Beobachtungen des Supraleiters | 3 |
| 4.2 Bestimmung der kritischen Temperatur T_c via Meißner-Ochsenfeld-Effekt . | 4 |
| 4.3 Bestimmung der kritischen Temperatur T_c via 4-Punkt-Messung | 5 |
| 4.3.1 Ohne Magnet | 6 |
| 4.3.2 Mit Magnet | 7 |
| 4.4 Abschätzung der kritischen Stromstärke I_c | 9 |
| 4.4.1 Ohne Magnet | 10 |
| 4.4.2 Mit Magnet | 11 |
| 4.5 Abschätzung des induzierten Stroms I_{ind} | 12 |
| 5 Diskussion | 13 |
| 6 Anhang | 13 |
| 6.1 Bestimmung der kritischen Stromstärke I_c | 13 |

1 Ziel

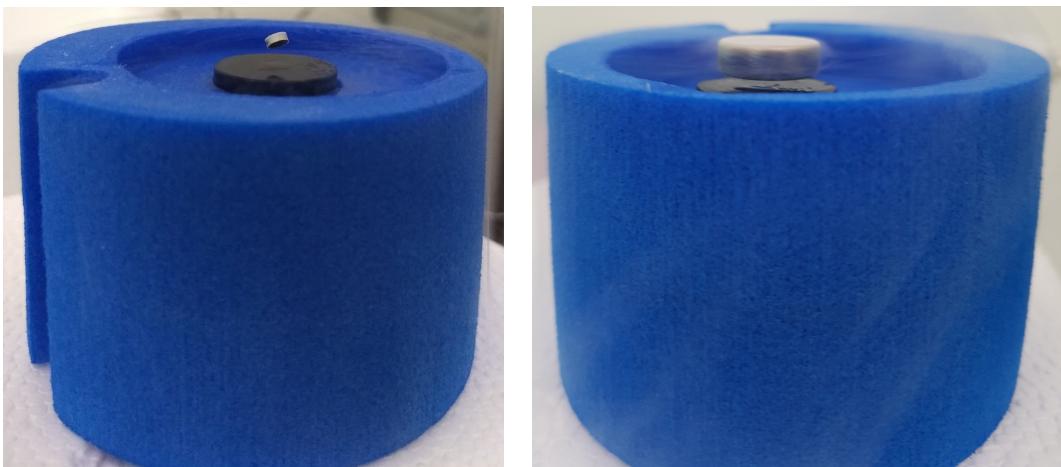
2 Theorie

3 Durchführung

4 Auswertung

4.1 Phänomenologische Beobachtungen des Supraleiters

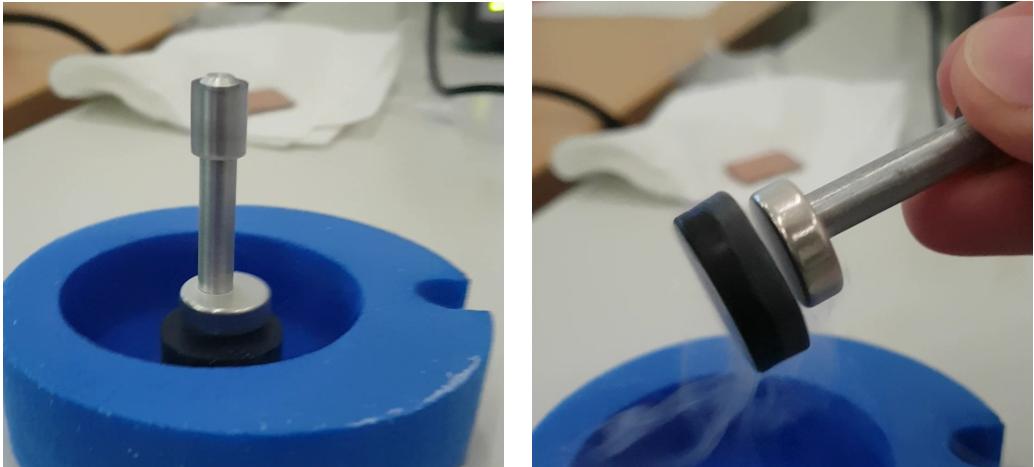
Zu Beginn des Versuches werden die gemachten Beobachtungen der verschiedenen Magnet-Supraleiter-Anordnungen geschildert. In den drei folgenden Abbildungen 1a, 1b und 2a ist gut zu erkennen, wie der Magnet, bedingt durch den Meißner-Ochsenfeld-Effekt, eigenstabil über dem Supraleiter schwebt. Dabei rotiert in Abbildung 1a ein kleiner Magnet #M1 in einer schrägen Position über dem SL #2 Supraleiter um seine Achse hin und zurück. Hingegen rotiert der größere Magnet #M2 in Abbildung 1b, relativ zu seiner Achse, parallel zum SL #3 Supraleiter hin und zurück.



(a) Der SL #2 Supraleiter zusammen mit einem #M1 Permanentmagnet auf einem Styroporbehältnis mit flüssigem Stickstoff.
(b) Der SL #3 Supraleiter zusammen mit dem #M2 Permanentmagnet auf einem Styroporbehältnis mit flüssigem Stickstoff.

Besonders attraktiv sei diese Eigenschaft in der Technik, da so eine berührungslose Kraftübertragung realisiert werden kann. So lassen sich beispielsweise supraleitende Magnetlager wie in Abbildung 2a realisieren. In Abbildung 2a ist dazu ein Pinning-Stab zusammen mit dem #M2 Permanentmagneten zu sehen. Diese Konfiguration schwebt über dem SL #3 Supraleiter. Wird dem Pinning-Stab samt #M2 Magnet ein Impuls übertragen, so rotiert die Konfiguration stabil über dem SL #3 Supraleiter. Wird die Anordnung aus Abbildung 2a 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 Rotationsbewegungen in sämtliche Raumrichtungen ermöglichen (siehe Abbildung 2b).



- (a) Magnetlager aus dem SL #3 Supraleiter zusammen mit einem #M2 Permanentmagnet und einem Pinning-Stab auf einem Styroporbehältnis mit flüssigem Stickstoff.
- (b) Magnetlager aus dem SL #3 Supraleiter zusammen mit einem #M2 Permanentmagnet 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 3 dargestellt. Dabei wird die anfängliche Messzeit abgeschnitten, bei der keine Temperaturänderung statt findet 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 second nachdem die jeweilige kritische Temperatur T_c^{MCE} erreicht ist, zeigen Messung 1 und 2 ein 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 1 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^{MCE} der einzelnen Messungen ergibt sich \bar{T}_c^{MCE} , mit dem Fehler $\Delta\bar{T}_c^{\text{MCE}} = \Delta T_c^{\text{MCE}}/\sqrt{3}$.

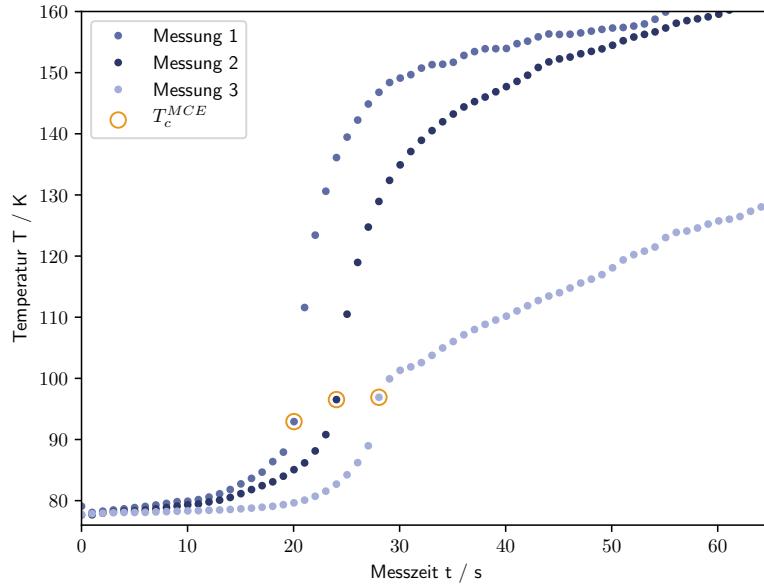


Abbildung 3: Bestimmung der kritischen Temperatur anhand von drei Messungen mittels des Meißner-Ochsenfeld-Effekts. Die gelben Kreise kennzeichnen den Zeitpunkt, an dem der #M1 Magnet wieder auf dem SL #2 Supraleiter aufliegt. Es werden allen Messwerten einen systematischen Fehler von ± 5 K zugeschrieben.

Tabelle 1: Kritische Temperatur T_c^{MCE} für drei Messungen.

| Messung 1 | $T_c^{\text{MCE}} / \text{K}$ | Messung 2 | $T_c^{\text{MCE}} / \text{K}$ | $\bar{T}_c^{\text{MCE}} / \text{K}$ | Mittel |
|-----------|-------------------------------|---------------|-------------------------------|-------------------------------------|--------|
| | | | | | |
| | $92,93 \pm 5$ | $96,53 \pm 5$ | $96,90 \pm 5$ | $95,45 \pm 2,89$ | |

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

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

Abstände wiederholt.

Der Platin-Sensor erlaubt es die Temperatur am SL #1 Supraleiter zu bestimmen. Dazu wird der gemessene Widerstand $R_{\text{TS,Pt}}$ 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 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 geschlossenem Plexiglasgehäuse, was die Messung vor äußeren Einflüssen schützt. Allerdings kann sich beim auftauen so besser Flüssigkeit ansammeln, welche das Messergebnis verfälschen können. 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 $T_c^{4\text{PM}}$:

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

4.3.1 Ohne Magnet

Das temperaturabhängige Verhalten des SL #1 Supraleiter-Widerstandes R_{SL} , ohne Störung durch einen Magnetfeld, bei einem Durchlaufstrom I von $0,6 \text{ A}$ ist in Abbildung 4 dargestellt. Der SL #1 ist zwischen $(76 \pm 2) \text{ K}$ und etwa $(117 \pm 2) \text{ K}$ supraleitend, denn hier zeigt sich ein Widerstandswerte von Null. Fehlerhaft gemessene negative Widerstandswerte 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 interessante Bereich aufhalten. Der interessante Bereich ist der, an dem der Widerstand R_{SL} eine stetige Zunahme erfährt. Bei einer Temperatur von etwa $(117,36 \pm 2,60) \text{ K}$ 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.

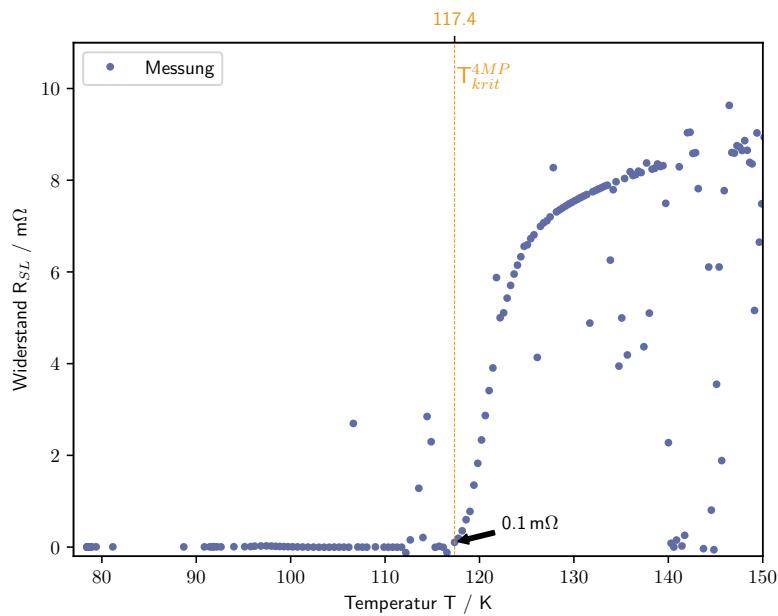


Abbildung 4: Bestimmung der kritischen Temperatur des SL #1 Supraleiter ohne Magneten anhand einer 4-Punkt-Messung. Die Temperatur T wird mit einem Platin-Sensor ermittelt, wobei der Widerstand R_{SL} bei einem Strom I von 0,6 A gemessen wird. Die gelbe Markierung kennzeichnet die kritische Temperatur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

4.3.2 Mit Magnet

Die Messung für einen Magnetabstand von 10 mm ist in Abbildung 5, und die in einem Abstand von 16 mm ist in Abbildung 6 dargestellt. Beide sind ab (78 ± 2) K bis zu kritischer Temperatur T_c^{4PM} zunächst supraleitend. Zuerst werden die beiden Abbildungen 5 und 6 miteinander verglichen. Es fällt auf, dass die Messung aus Abbildung 5 deutlich mehr Sprungwerte gemessen hat, als die Messung aus Abbildung 6. Damit ist in Abbildung 6 ein stetigerer Widerstandsanstieg zu erkennen. Einige Sprungwerte sind in Abbildung 5 leider genau dort, wo der Widerstandsanstieg anfängt. Dadurch lässt sich der anfängliche Widerstandszuwachs erst bei $0,31\text{ m}\Omega$ bestimmen. Beide Messungen zeigen nach der kritischen Temperatur T_c^{4PM} einen ähnlich starken Widerstandsanstieg. Werden beide Messungen (mit Magnet) mit der Messung aus Abbildung 4 (ohne Magnet) verglichen, fällt auf, dass der Widerstandsanstieg weniger stark ist. In Tabelle 2 sind die jeweilige kritische Temperaturen T_c^{4PM} und die gemessene Magnetfeldstärke B_{ex} aufgelistet. Gegen aller Erwartung, nimmt die T_c^{4PM} bei einer größeren Magnetfeldstärke zu.

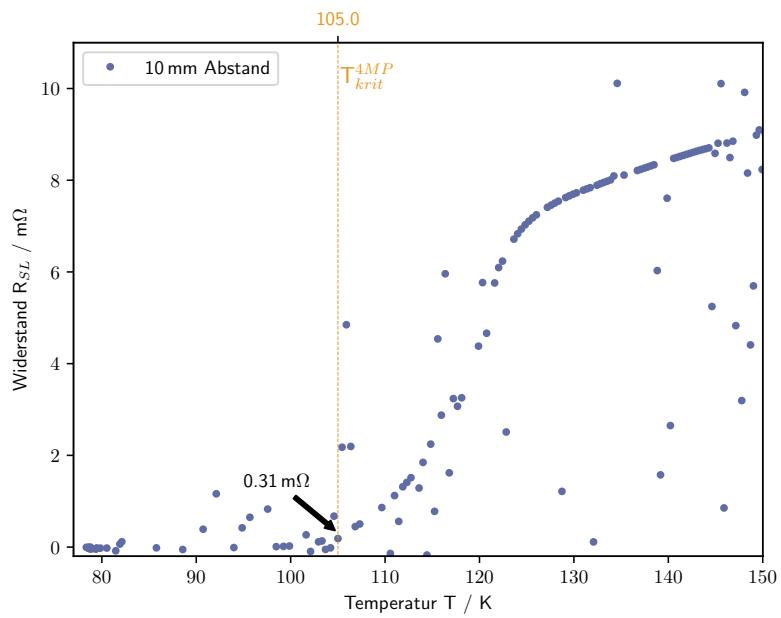


Abbildung 5: Bestimmung der kritischen Temperatur des SL #1 Supraleiter mit dem #M3 Magneten im Abstand von 10 mm anhand einer 4-Punkt-Messung. Die Temperatur T wird mit einem Platin-Sensor ermittelt, wobei der Widerstand R_{SL} bei einem Strom I von 0,6 A gemessen wird. Die gelbe Markierung kennzeichnet die kritische Temperatur T_c^{4PM} . Es werden allen Messwerten einen systematischen Fehler von ± 2 K zugeschrieben.

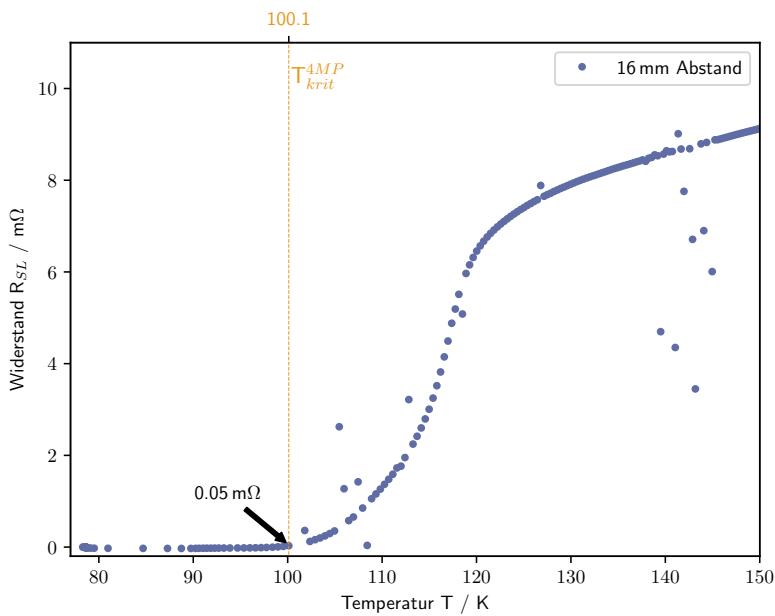


Abbildung 6: Bestimmung der kritischen Temperatur des SL #1 Supraleiter mit dem #M3 Magneten im Abstand von 16 mm anhand einer 4-Punkt-Messung. Die Temperatur T wird mit einem Platin-Sensor ermittelt, wobei der Widerstand R_{SL} bei einem Strom I von 0,6 A gemessen wird. Die gelbe Markierung kennzeichnet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

Tabelle 2: Kritische Temperatur T_c^{MCE} für zwei unterschiedliche Magnetabstände.

| Magnetabstand d / mm | kritische Temperatur $T_c^{\text{MCE}} / \text{K}$ | Magnetfeldstärke $B_{\text{ex}} / \text{mT}$ |
|----------------------------------|---|---|
| 10 | $105,01 \pm 2,98$ | 142,7 |
| 16 | $100,12 \pm 2,64$ | 23,5 |

4.4 Abschätzung der kritischen Stromstärke I_c

Im folgendem Unterkapitel 4.4.1 wird die kritische Temperatur T_c^{MCE} bei einer 4-Punkt-Messung in Abhängigkeit von der Durchlaufstromstärken 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 unterschiedlichen 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^{MCE} wird möglichst bei einem Widerstandsanstieg auf $0,5 \text{ A}$ abgelesen (siehe Anhang 6.1) und in Tabelle 3 aufgelistet. Mit Ausnahme der kritischen Temperatur T_c^{MCE} bei einer Stromstärke von $0,6 \text{ A}$, ist die Tendenz, dass die kritische Temperatur T_c^{MCE} mit der Stromstärke I abnimmt. Ein Blick in die Messung bei einer Stromstärke von $0,6 \text{ A}$ (Anhang 11) zeigt eine Lücke genau im interessanten Bereich des Widerstandanstiegs und damit, im Vergleich zu den anderen Messungen, einen doppelt so großen Widerstand R_{SL} von $0,1 \text{ m}\Omega$. Aus diesem Grund, wird dieser Wert in der folgenden Auswertung nicht mehr berücksichtigt.

Tabelle 3: Kritische Temperatur T_c^{MCE} für fünf unterschiedliche Durchlaufstromstärken.

| Stromstärke I / 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 K gemacht, welche in Abbildung 7 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 $(11,20 \pm 4,24) \text{ A}$. Der Fehler ergibt sich hierbei nach der gaußsche Fehlerfortpflanzung: $\Delta I(T) = \sqrt{(T \cdot \Delta m)^2 + (\Delta b)^2}$

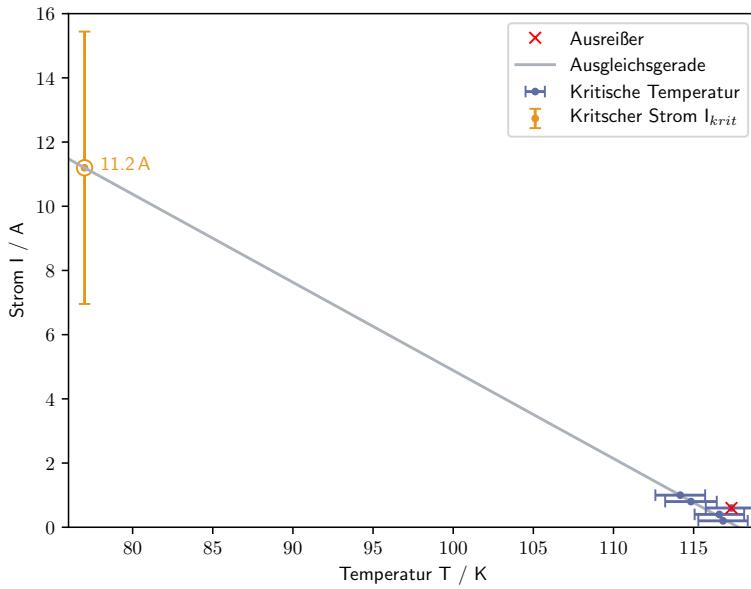


Abbildung 7: Bestimmung der kritischen Stromstärke I_c des SL #1 Supraleiter ohne Magnet anhand einer 4-Punkt-Messung. Die kritischen Temperaturen T_c^{MCE} bei der dazugehörigen Stromstärke I sind der Tabelle 3 zu entnehmen. Die gelbe Markierung kennzeichnet die Abschätzung des kritischen Stroms I_c 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 Magnets. 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^{MCE} bei einem Widerstand von etwa 0,5-0,6 A abgelesen (siehe Anhang 6.1) und der jeweilige Wert in Tabelle 4 eingetragen.

Tabelle 4: Kritische Temperatur T_c^{MCE} für fünf unterschiedliche Durchlaufstromstärken mit Magnetfeld des #M3 Magnets.

| Stromstärke I / 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 Strom I_c ergibt sich erneut durch eine Extrapolation bis 77K mittels *Python 3.7.6*, welche in Abbildung 8 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 2,42 A.

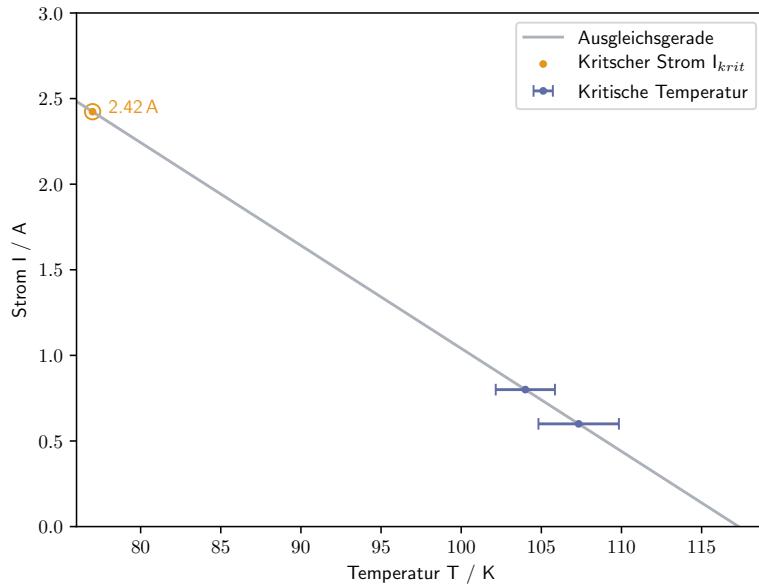


Abbildung 8: Bestimmung der kritischen Stromstärke I_c des SL #1 Supraleiter mit Störung durch den #M3 Magnet anhand einer 4-Punkt-Messung. Die kritischen Temperaturen T_c^{MCE} bei der dazugehörigen Stromstärke I sind der Tabelle 3 zu entnehmen. Die gelbe Markierung kennzeichnet die Abschätzung des kritischen Stroms I_c .

4.5 Abschätzung des induzierten Stroms I_{ind}

Zuletzt wird der mit dem #M3 Magneten induzierte Strom I_{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_{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_{ind} abschätzen, wobei der Radius R des SL #4 Supraleiter-Ring 6,3 mm beträgt. Der induzierte Strom lässt sich damit auf einen Wert von $(15,94 \pm 0,61)$ A abschätzen. Wegen einer möglichen nicht idealen Messposition in z -Richtung, wird dem I_{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

T_c : MCE

-Die Temperatur wird jede Sekunde gemessen, Auflösung sollte damit gut genug sein.
-linear Anstieg: eventuell ist der Magnet nahe des Sensors gefallen und hemmt die rasche Erwärmung, da er selbst langsam abkühlt.

T_c : Tc4punkt - Messfehler/Sprünge wegen Feuchtigkeit \rightarrow Nachteil des Gehäuses
-Reihenfolge beim messen?! - mit Magnet ist der Anstieg des Widerstandes viel größer
-Verlauf des Anstiegs zeigt bei 10mm eine T_c von etwa 104K

6 Anhang

6.1 Bestimmung der kritischen Stromstärke I_c

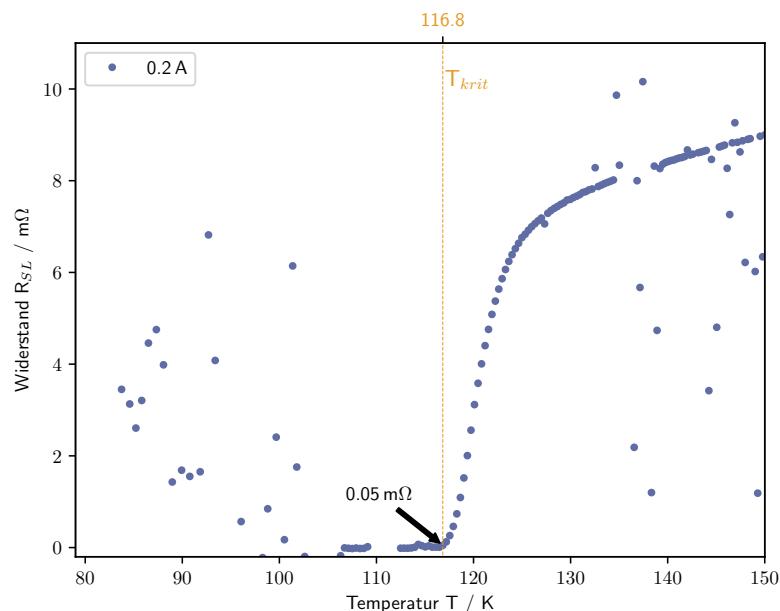


Abbildung 9: Bestimmung der kritischen Temperatur des SL #1 Supraleiter ohne Magnet anhand einer 4-Punkt-Messung. Die Temperatur T wird mit einem Platin-Sensor ermittelt, wobei der Widerstand R_{SL} bei einem Strom I von 0,2 A gemessen wird. Die gelbe Markierung kennzeichnet die kritische Temperatur T_c^{4PM} . Es werden allen Messwerten einen systematischen Fehler von ± 2 K zugeschrieben.

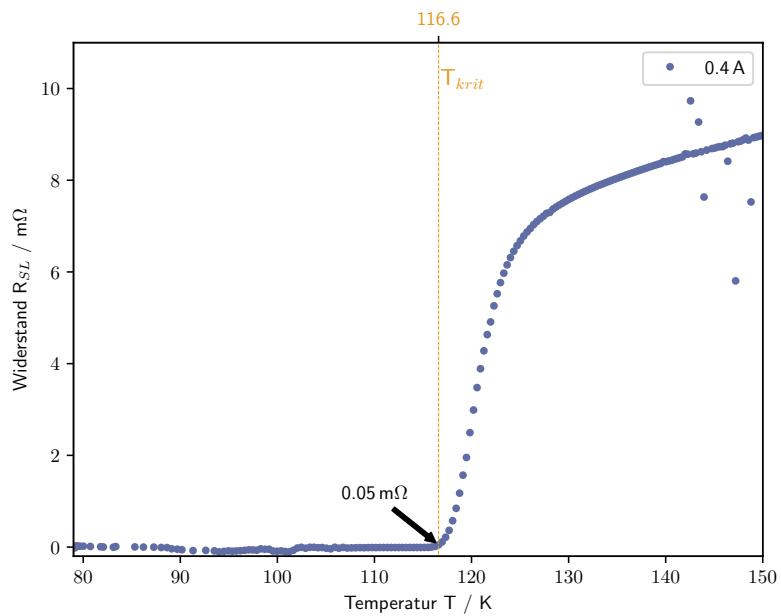


Abbildung 10: Bestimmung der kritischen Temperatur des SL #1 Supraleiter ohne Magnet anhand einer 4-Punkt-Messung. Die Temperatur T wird mit einem Platin-Sensor ermittelt, wobei der Widerstand R_{SL} bei einem Strom I von 0,4 A gemessen wird. Die gelbe Markierung kennzeichnet die kritische Temperatur T_c^{4PM} . Es werden allen Messwerten einen systematischen Fehler von ± 2 K zugeschrieben.

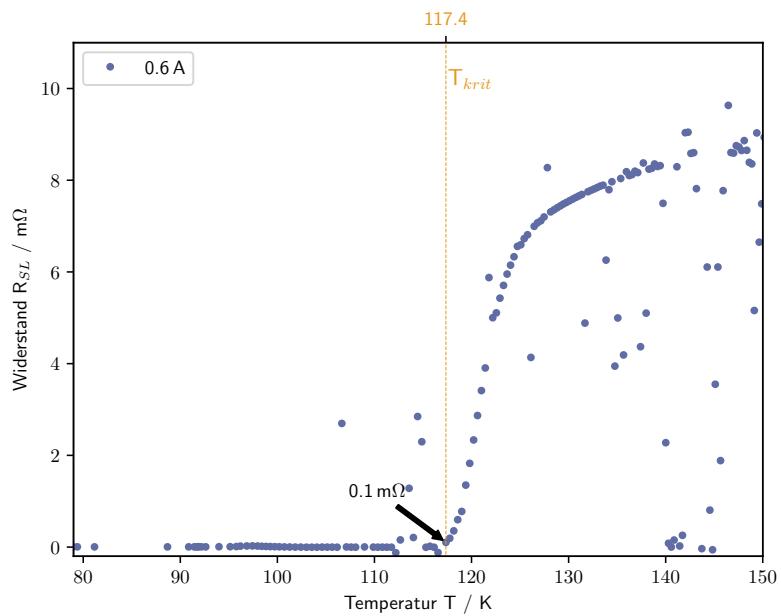


Abbildung 11: Bestimmung der kritischen Temperatur des SL #1 Supraleiter ohne Magnet anhand einer 4-Punkt-Messung. Die Temperatur T wird mit einem Platin-Sensor ermittelt, wobei der Widerstand R_{SL} bei einem Strom I von 0,6 A gemessen wird. Die gelbe Markierung kennzeichnet die kritische Temperatur T_c^{4PM} . Es werden allen Messwerten einen systematischen Fehler von ± 2 K zugeschrieben.

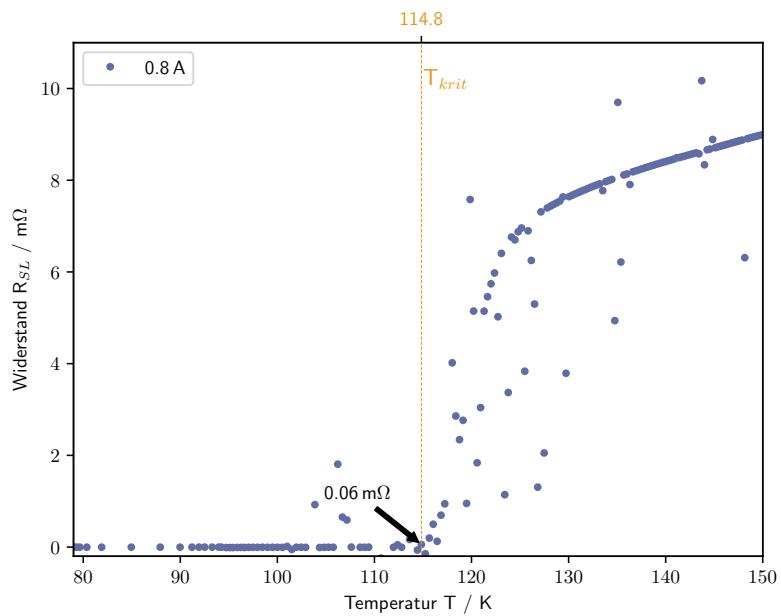


Abbildung 12: Bestimmung der kritischen Temperatur des SL #1 Supraleiter ohne Magnet anhand einer 4-Punkt-Messung. Die Temperatur T wird mit einem Platin-Sensor ermittelt, wobei der Widerstand R_{SL} bei einem Strom I von 0,8 A gemessen wird. Die gelbe Markierung kennzeichnet die kritische Temperatur $T_c^{4\text{PM}}$. Es werden allen Messwerten einen systematischen Fehler von ± 2 K zugeschrieben.

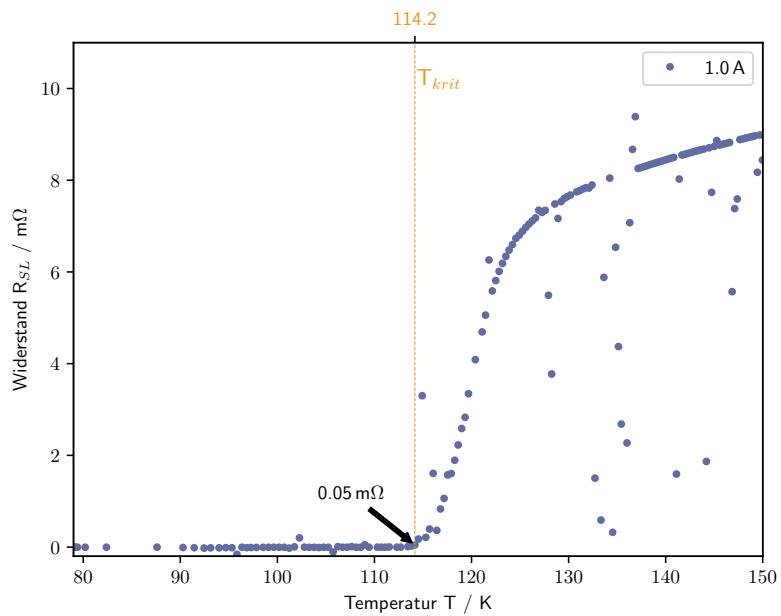


Abbildung 13: Bestimmung der kritischen Temperatur des SL #1 Supraleiter ohne Magnet anhand einer 4-Punkt-Messung. Die Temperatur T wird mit einem Platin-Sensor ermittelt, wobei der Widerstand R_{SL} bei einem Strom I von 1,0 A gemessen wird. Die gelbe Markierung kennzeichnet die kritische Temperatur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

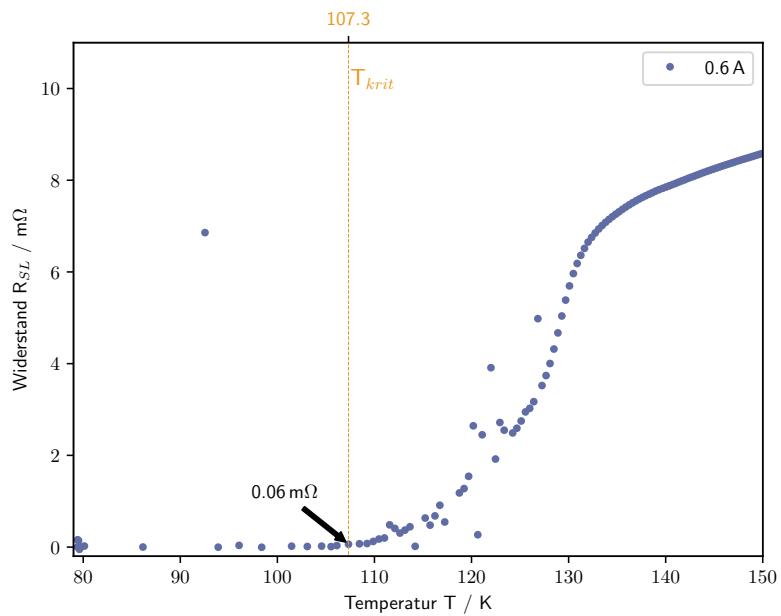


Abbildung 14: Bestimmung der kritischen Temperatur des SL #1 Supraleiter mit Störung des #M3 Magnets anhand einer 4-Punkt-Messung. Die Temperatur T wird mit einem Platin-Sensor ermittelt, wobei der Widerstand R_{SL} bei einem Strom I von 0,6 A gemessen wird. Die gelbe Markierung kennzeichnet die kritische Temperatur T_c^{4PM} . Es werden allen Messwerten einen systematischen Fehler von ± 2 K zugeschrieben.

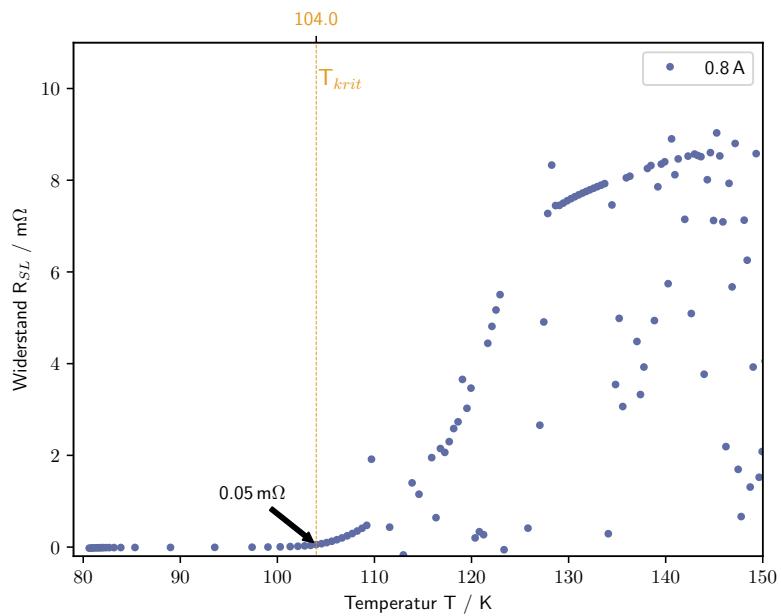


Abbildung 15: Bestimmung der kritischen Temperatur des SL #1 Supraleiter mit Störung des #M3 Magnets anhand einer 4-Punkt-Messung. Die Temperatur T wird mit einem Platin-Sensor ermittelt, wobei der Widerstand R_{SL} bei einem Strom I von 0,8 A gemessen wird. Die gelbe Markierung kennzeichnet die kritische Temperatur T_c^{4PM} . Es werden allen Messwerten einen systematischen Fehler von ± 2 K zugeschrieben.