

Anleitung zum Versuch FP13 SQUID

Vorläufige Versuchsbeschreibung! Letzte Änderung 10.06.13. Verbesserungsvorschläge sind willkommen!

ACHTUNG: Sollte der Versuch nicht in den Semesterferien durchgeführt werden, ist es sinnvoll ihn erst mittags zu beginnen, um Störungen bei den letzten beiden Versuchsteilen zu vermeiden. Dies ist mit dem Betreuer abzuklären. Ansonsten beginnt der Versuch zur gewohnten Zeit.

Für das Protokoll: ALLE in dieser Versuchsdurchführung gestellten Fragen und Aufgaben müssen bearbeitet werden!

1. Einleitung und Zielsetzung des Versuchs

Mit Hilfe eines SQUIDs ist es möglich, sehr kleine magnetische Felder zu messen. Es können magnetische Flussdichten bis in den Bereich von 10^{-15} T nachgewiesen werden (vgl. Erdmagnetfeld, Mitteleuropa: 50 μ T). SQUIDs stellen aktuell das sensibelste Messinstrument für Magnetfelder dar.

Ein SQUID besteht im Wesentlichen aus einer supraleitenden Schleife mit einer (rf-SQUID) oder zwei (dc-SQUID) eingebauten Schwachstellen, einem Flusstransformator sowie geeigneter Ausleseelektronik. Die spezifischen Eigenschaften der Supraleitung sowie die Dimensionierung des SQUID bestimmen dabei das Verhalten.

Im Rahmen dieses Praktikums sollen die nötigen Grundlagen der Supraleitung erarbeitet und die Funktionsweise eines rf-SQUIDs verstanden werden. Dies bildet die Grundlage für die dann folgenden Messungen von verschiedenen magnetischen Feldern. Zudem erhält man einen Einblick in die Grundlagen der elektromagnetischen Abschirmung.

Zunächst wird das SQUID durch Abkühlen in Flüssigstickstoff (LN2) und eine anschließende Justage in Betrieb genommen. Dann soll die Empfindlichkeit des SQUIDs mit Hilfe einer stromdurchflossenen Leiterschleife abgeschätzt werden. Im Anschluss soll das SQUID mithilfe eines wohldefinierten Magnetfelds geeicht werden. Dies ermöglicht es das Magnetfeld eines fahrenden Aufzugs im Universitätsgebäude zu vermessen. Abschließend soll die Curie-Temperatur von Gadolinium (Gd) bestimmt werden, indem die Magnetisierung eines Gd-Würfels in Abhängigkeit von der Temperatur aufgenommen wird.

2. Vorkenntnisse

- Grundlagen Supraleitung (SL): elementare SL und oxidische Hochtemperatur-SL (HTSL) (im Versuch verwendet: $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$), Cooper-Paare, Diamagnetismus, Meißner-Ochsenfeld-Effekt, kritische Ströme/Magnetfelder, Typ I und II SL, Flussschläuche, Flussquantisierung im supraleitenden Ring, Josephson-Effekte
- rf-SQUID: Aufbau, Ansteuerung/Auslese, RCSJ-Modell, Entstehung des Messsignals ($U(I)$ - und $U(\Phi)$ -Kurve, Arbeitspunkt, detailliert!)
- Magnetismus: Magnetfeld einer kreisförmigen Leiterschleife und eines Dipols, Magnetismus von Festkörpern (Ursache, verschiedene Typen), Magnetisierungskurve, Remanenz, Temperaturverlauf der Magnetisierung, Curie-Temperatur, magnetische Eigenschaften von Gadolinium

Die Grundlagen der Supraleitung sowie die Funktionsweise des rf-SQUID werden im Handbuch [1] des verwendeten rf-SQUID erklärt. **Dieses sollte einige Tage vor dem Versuch beim Betreuer abgeholt werden und bei Abgabe des Protokolls wieder**

zurückgegeben werden. Weitere Details zur Flussquantisierung sind in [2], [3] und [4] sowie weiter unten zu finden. [2], [3] und [4] sind ebenso für ein tieferes Verständnis der Supraleitung zu empfehlen. Der Temperaturverlauf der Magnetisierung sowie die Curie-Temperatur werden in [3] in Kapitel 33 sowie in [4] in Kapitel 8.5 für den Versuch geeignet erklärt. In [5] wird das Magnetfeld einer Leiterschleife hergeleitet. Für ein detaillierteres Verständnis ist [6] zu empfehlen.

2.1 Literatur

Grundlegend:

[1] Das JSG-Tutorial für Benutzer von rf-SQUIDS, Jülicher SQUID GmbH

[2] Supraleitung, W. Buckel und R. Kleiner, Uni-Bibliothek: 91 UDF 186

Magnetismus:

[3] Festkörperphysik, N. W. Ashcroft, N. D. Mermin, Uni-Bibliothek: 91 UIM 540
oder

[4] Festkörperphysik, Ibach, Lüth, Uni-Bibliothek: 91 UIM 434

Leiterschleife:

[5] Berkeley Physik Kurs 2 – Elektrizität und Magnetismus, E. Purcell, Uni-Bibliothek: 91 UAP 221

Optional:

[6] Elektromagnetische Schirmung, H. A. Wolfspurger, Uni Bibliothek: Online verfügbar

2.2 Magnetische Größen

An dieser Stelle sollen kurz einige magnetische Größen und Zusammenhänge wiederholt werden:

Ein SQUID misst den **magnetischen Fluss** Φ , indem es ganzzahlige Vielfache des **magnetischen Flussquants** $\Phi_0 = h/2e$ in seinem Inneren einschließt. Dabei ist h das plancksche Wirkungsquantum und e die Elementarladung. Der magnetische Fluss durch den Ring ergibt sich aus der den Ring durchtretenden eingeschlossenen **magnetischen Flussdichte** $\vec{B}$ über $\Phi = \oint \vec{B} \cdot d\vec{A}$. Abweichungen von ganzzahligen Flussquanten werden durch einen Suprastrom im Ring kompensiert. Die magnetische Flussdichte wiederum ergibt sich aus der im Ring herrschenden **magnetischen Feldstärke** $\vec{H}$ über $\vec{B} = \mu \vec{H}$, mit der **magnetischen Permeabilität** μ .

Die **Magnetisierung** $\vec{M} = d\vec{m}/dV$ der Gd-Probe ist temperaturabhängig. Sie gibt sich aus dem **magnetischen Moment** $\vec{m}$ (erzeugt durch Spinausrichtung oder Stromfluss) pro Volumen V der Probe. Legt man an die Probe ein ausreichend starkes magnetisches Feld an, steigt die Magnetisierung bis zur **Sättigungsmagnetisierung** $\vec{M}_S$. Nach Entfernen des magnetischen Feldes, sinkt die Magnetisierung bis zur **Remanenz** $\vec{M}_R$. Steigt die Temperatur der Probe über die **Curie-Temperatur** T_C , ist die Probe nur noch paramagnetisch.

Über $\vec{B} = \mu(\vec{H} + \vec{M})$ ist die magnetische Flussdichte in einem Körper mit der (eigenen) Magnetisierung und der (äußeren) magnetischen Feldstärke verknüpft.

2.3 Flussquantisierung

Da die Cooper-Paare ganzzahligen Spin besitzen, unterliegen sie der Bose-Einstein-Statistik, was ihnen ermöglicht, in einen gemeinsamen Grundzustand zu kondensieren. In diesem Zustand wird die Gesamtheit der Cooper-Paare durch eine einzige Wellenfunktion beschrieben. Diese Wellenfunktion darf beim Umlauf um einen Ring ihre Phase lediglich um ganzzahlige Vielfache von 2π ändern, da sie sonst durch Interferenz nach wenigen Umläufen verschwunden wäre.

Mit Hilfe der Ginsburg-Landau Theorie (1950), die neben der BCS-Theorie (J. Bardeen, L. N. Cooper, J. R. Schrieffer, 1957) die gebräuchlichste zur Beschreibung supraleitender Phänomene ist, lässt sich ein Zwei-Teilchen-Zustand konstruieren, welcher sich verhält wie ein einziges Gesamtsystem. Mit dem üblichen Ansatz für die Wahrscheinlichkeitsstromdichte $\vec{j}$ einer Wellenfunktion ψ

$$\vec{j} = \frac{i\hbar}{2m} (\psi \nabla \psi^* - \psi^* \nabla \psi) = \frac{1}{m} \text{Re}(\psi^* p \psi)$$

und dem Impulsoperator $p = \frac{\hbar}{i} \nabla - \frac{q}{c} \vec{A}$ in Anwesenheit eines Vektorfeldes $\vec{A}$ und einer Ladung q der Ladungsträger, kann ein Ausdruck für den Zwei-Teilchen-Strom bestimmt werden:

$$\vec{j} = -\frac{e}{2m} \left[\psi^* \left(\frac{\hbar}{i} \nabla + \frac{q}{c} \vec{A} \right) \psi + \left(\left(\frac{\hbar}{i} \nabla + \frac{q}{c} \vec{A} \right) \psi \right)^* \psi \right] = \dots = -\frac{e}{m} \left(\hbar \nabla \Theta + \frac{2e}{c} \vec{A} \right) |\psi|^2$$

Im letzten Schritt wurde die Ladung der Cooper-Paare von $2e$ für q eingesetzt. Die Formel ist gültig, wenn die Zahl der Cooper-Paare weit unterhalb der Sprungtemperatur konstant ist und damit die Wellenfunktion $\psi(t) = |\psi_0| e^{i\Theta}$ mit der Zeit nicht ihren Betrag, sondern nur die Phase Θ ändert.

Mit $\oint \vec{j} d\vec{l} = 0$ (Kreisstrom) lässt sich damit die Flussquantisierung herleiten, wenn man berücksichtigt, dass das geschlossene Integral über das Vektorfeld $\vec{A}$ den eingeschlossenen Fluss Φ_B durch den Ring ergibt und die Phase der Wellenfunktion nur um $n \cdot 2\pi$ bei einem Umlauf variieren darf:

$$\oint \vec{A} d\vec{l} = \Phi_B \quad \text{und} \quad \oint \nabla \Theta d\vec{l} = \Delta \Theta = n \cdot 2\pi.$$

Es ergibt sich:

$$|\Phi_B| = n \frac{\hbar c}{2e} = n \Phi_0.$$

Die Flussquantisierung ist also eine Folge daraus, dass die Cooper-Paare innerhalb eines geschlossenen Rings einen stabilen quantenmechanischen Zustand mit einer gemeinsamen Wellenfunktion bilden und damit eingeschlossene Magnetfelder widerstandslos abgeschirmt werden können. Sie ist keine Eigenschaft des externen Magnetfelds.

2.4 Elektromagnetische Abschirmung

Die Tatsache, dass ein SQUID ein sehr empfindliches Gerät zur Magnetfeldmessung ist, macht eine elektromagnetische Abschirmung gegen Wechselfelder notwendig. Statische Magnetfelder erzeugen zwar einen magnetischen Fluss durch das SQUID, stören jedoch den Betrieb nicht, da nur Änderungen des Magnetfeldes registriert werden können. Elektrostatische Felder haben ebenfalls keinen Einfluss auf den Betrieb des SQUID. Dennoch könnten magneto- und elektrostatische Felder bei zu hoher Feldstärke die Elektronik beeinflussen. Derart starke Felder sollten aber bei diesem Versuch nicht auftreten.

Problematisch dagegen sind elektrische und magnetische Wechselfelder. Elektrische Wechselfelder werden, genau wie statische elektrische Felder, nach dem Prinzip des Faraday-Käfigs abgeschirmt. Aufgrund seiner guten elektrischen Leitfähigkeit werden alle Potentialunterschiede ausgeglichen, so dass der Innenraum stets feldfrei ist. Statt eines geschlossenen Gehäuses kann hier auch ein Käfig verwendet werden, wenn die Maschenweite geringer als ein Zehntel der Wellenlänge ist.

Die Abschirmung magnetischer Wechselfelder erfordert ebenfalls ein geschlossenes elektrisch leitendes Gehäuse. Hierin können Wirbelströme ein Magnetfeld erzeugen, welches ebenfalls seiner Ursache entgegen wirkt.

Da Metalle nur eine endliche Leitfähigkeit besitzen, funktionieren die beschriebenen Schirmmethoden nicht ideal. Elektromagnetische Wechselfelder können in die Gehäusewand eindringen. Die Skin-Tiefe δ gibt die Tiefe an, bei der die Amplitude der Welle auf $1/e$ ihres Eintrittswertes abgefallen ist. Es gilt

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{\pi \sigma \mu f}},$$

mit der elektrischen Leitfähigkeit σ , der Permeabilität μ des Schirmmaterials und der Strahlungsfrequenz f . Niederfrequente Wellen können also tiefer eindringen als hochfrequente (Netzspannung: $\delta_{Cu, 50Hz} = 9,4 \text{ mm}$, Radiowellen: $\delta_{Cu, 100MHz} = 6,6 \text{ }\mu\text{m}$). Daher wird zur Abschirmung niederfrequenter und statischer Magnetfelder häufig sog. μ -Metall verwendet, welches ferromagnetisch ist und eine große magnetische Permeabilität besitzt. Wie funktioniert μ -Metall?

Auch SL können zur Abschirmung verwendet werden. In diesem Falle gilt obige Formel für die Eindringtiefe nicht mehr. Letztere wird dann als London-Eindringtiefe bezeichnet, welche im Bereich einiger Nanometer liegt.

Löcher und Spalten in der Abschirmung sind problematisch, da diese einerseits die Leitfähigkeit lokal unterbrechen (Wirbelströme können nicht mehr um das Gehäuse fließen) und andererseits eine Eintrittsstelle für Felder darstellen. Ebenso ist auf die Ausmaße des Gehäuses zu achten, da es zu einer resonanten Anregung kommen kann, wenn die Wellenlänge im Bereich der Gehäusegröße liegt. Dies ist ebenfalls für die Länge von Spalten kritisch.

Aufgesetzte Gehäuseteile, wie beispielsweise der Deckel des in diesem Versuch verwendeten Gehäuses, müssen lückenlos elektrisch leitend verbunden werden. Bei Kabeldurchführungen ist ebenso auf eine lückenlose Schirmung zu achten. Die Abschirmung eines Koaxialkabels, welches in das Gehäuse führt, muss elektrisch leitend mit dem Gehäuse verbunden werden, da sonst keine Abschirmung des Innenleiters erfolgt. Zudem könnte das durchgeführte Kabel sonst als Antenne im Inneren des Gehäuses abstrahlen.

Bei allen Messungen ist daher darauf zu achten, dass die Abschirmung dicht verschlossen ist.

3. Versuchsaufbau

Fotos der verwendeten Bauteile und Geräte sind in den Abbildungen 1 bis 6 gezeigt. Das SQUID (Abbildung 1) wird in den Dewar (Abbildung 2), welcher mit LN₂ gefüllt wird und zur thermischen Isolation dient, eingesetzt. Der Dewar wiederum wird in das Abschirmgehäuse (Abbildung 3) eingebracht. Dieses besteht aus zwei Aluminiumzylindern sowie einem Zylinder aus μ -Metall. Das Innere des Gehäuses zeigt Abbildung 4. Die in Abbildung 3 am oberen Bildrand zusehende blaue Tonne wird zuletzt als zusätzliche Abschirmung über den Aufbau gestülpt.

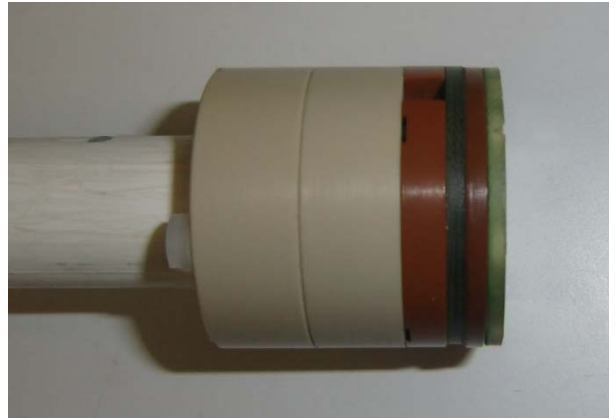


Abbildung 1: SQUID



Abbildung 2: Dewar



Abbildung 3:
Abschirmgehäuse



Abbildung 4: Inneres des Abschirmgehäuses mit Aluminium- und μ -Metallzylinder.

Auf dem Boden des Abschirmgehäuses befindet sich ein Schlitten der herausgezogen werden kann. Er ist in Abbildung 5 zu sehen. Es ist dort eine gelbliche Leiterschleife zu erkennen, welche zusammen mit einer Präzisionsstromquelle (Abbildung 6) zur Erzeugung eines Magnetfelds genutzt werden kann. Des Weiteren befindet sich für den letzten Versuchsteil im Abschirmgehäuse eine Gd-Probe, die auf einem Cu-Probenhalter zusammen mit einem Pt1000-Element befestigt ist (vgl. Abb. 8 in Abschnitt 5.5).

Abbildung 6 zeigt die Steuerelektronik für den Versuch. Der zugehörige schematische

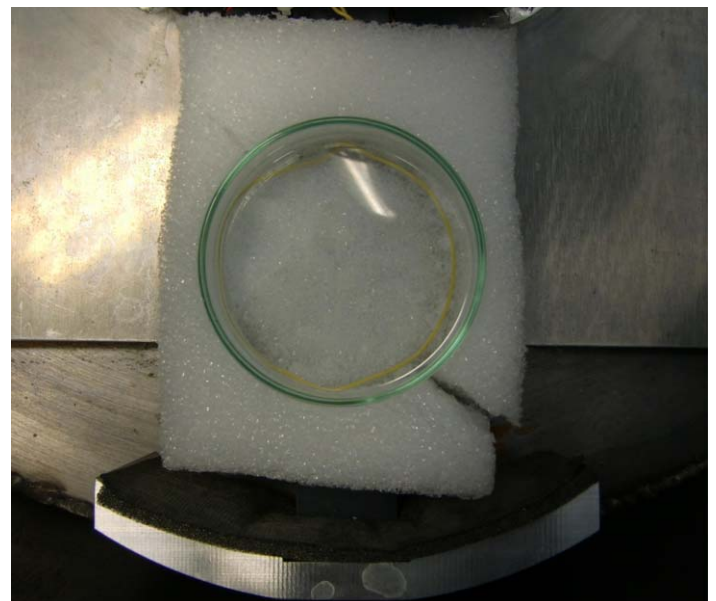


Abbildung 5: Schlitten am Boden der Abschirmgehäuses mit gelber Leiterschleife.

Aufbau befindet sich in Abbildung 7. Die USB-Messbox dient als Schnittstelle zwischen PC und SQUID sowie als A/D-Wandler für die Temperaturmessung im letzten Versuchsteil.

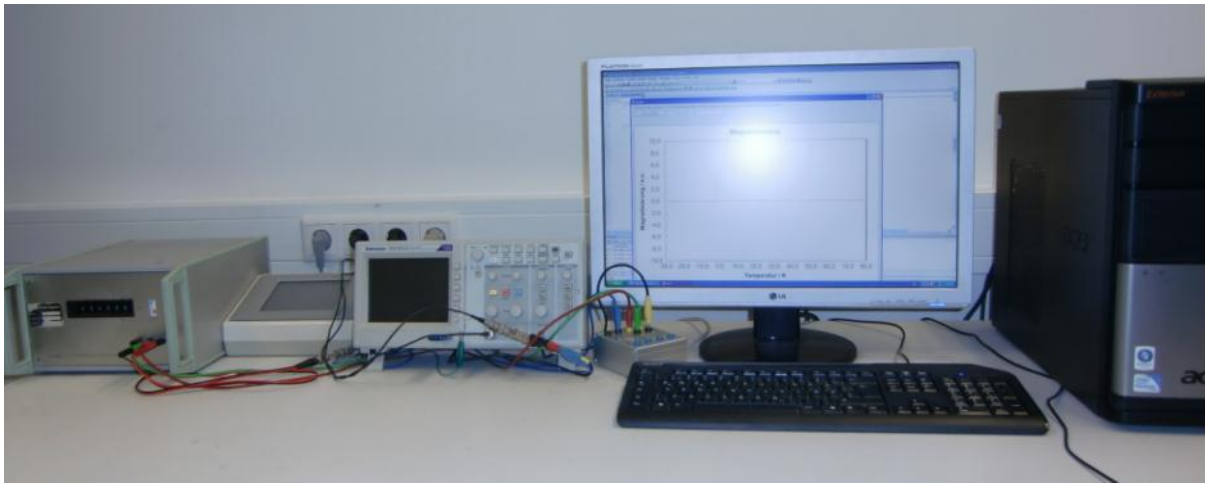


Abbildung 6: Präzisionsstromquelle, SQUID-Bedienfeld, Oszilloskop, USB-Messbox und Messrechner (von l. nach r.).

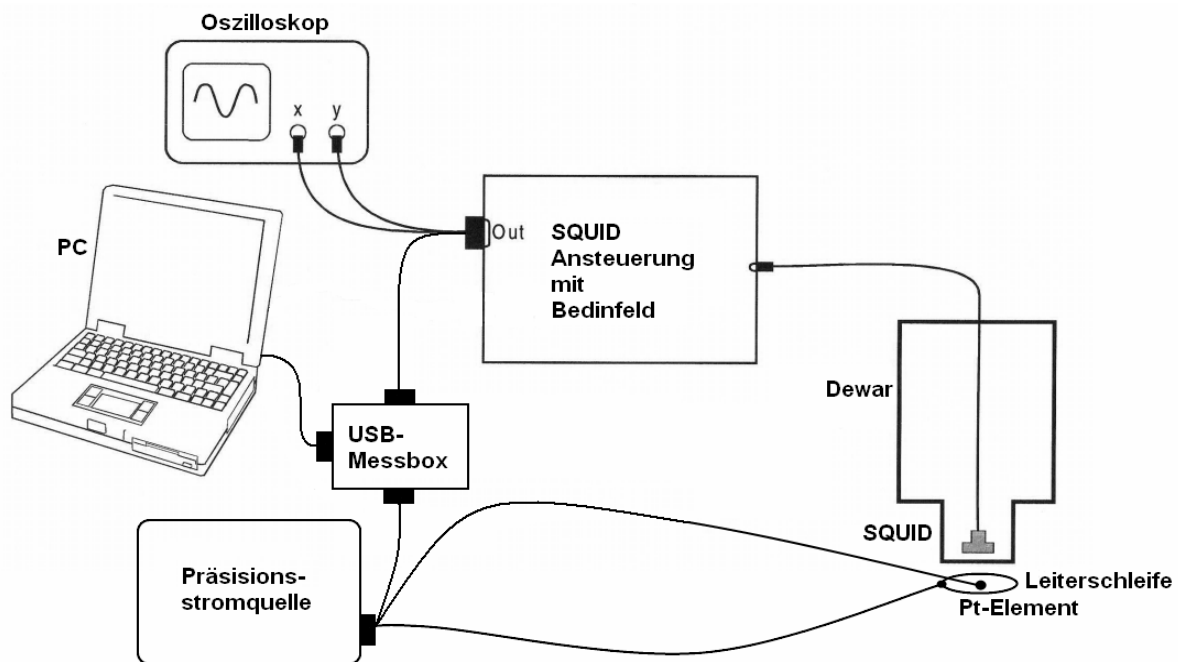


Abbildung 7: Schematischer Aufbau des SQUID-Versuchs

Die Elektronik des SQUIDs kann prinzipiell über das Touchpanel oder den PC gesteuert werden. Jedoch nur die erste Möglichkeit ist realisiert. Es stehen zwei Betriebsmodi zur Verfügung. Im Testmodus (TEST) wird die Spannungs-Fluss-Kurve $U(\Phi)$ ausgegeben. Hier können mit eingeschaltetem Generator (GEN) Magnetfeldänderungen im Bereich von einem Flussquant oder darunter auf dem Oszilloskop (**x-y-Modus, x- und y-Kanal auf AC-Kopplung stellen**) verfolgt werden. Im Messmodus (MESS) wird die Feldkompensationsregelung eingeschaltet. Hier können zeitliche Magnetfeldänderungen verfolgt werden (**y-t-Modus, y-Kanal auf DC-Kopplung stellen**). Durch Betätigen der MODE-Taste kann

zwischen Test- und Messmodus umgeschaltet werden. Die richtige Einstellung der Kopplung (AC/DC) ist für eine korrekte Anzeige der Signale unerlässlich!

In diesem Versuch wird ein rf-SQUID als Magnetometer betrieben. Als solches kann es nur Änderungen der magnetischen Flussdichte $\Delta \vec{B}$ messen. Dies hat den Vorteil, dass alle statischen Hintergrundfelder ausgeblendet werden. Mit zwei örtlich getrennten SQUIDs als Gradiometer könnte auch der Gradient der magnetischen Flussdichte $\nabla \vec{B}$ gemessen werden.

4. Hinweise zum Umgang mit flüssigem Stickstoff

Um das SQUID zu betreiben, ist eine Kühlung mit LN2 notwendig. Ebenso wird dieser zum Kühlen der Gd-Probe verwendet. LN2 hat eine Siedetemperatur von 77 K (-196 °C). Bei Kontakt kann es zu Kaltverbrennungen oder Erfrierungen kommen. Daher sind beim Umgang stets geeignete Sicherheitshandschuhe sowie eine Schutzbrille zu tragen (siehe auch Sicherheitsdatenblatt im Anhang).

5. Versuchsdurchführung

5.1 Inbetriebnahme

Das SQUID muss sich während des gesamten Versuchs in einem LN2-Bad befinden. Ein Auftauchen würde einerseits die Supraleitung unterbrechen und andererseits dazu führen, dass Feuchtigkeit an den Sensor gelangt, was ihn zerstören würde. Der Dewar wird daher zu Beginn des Versuchs mit ausreichend LN2 befüllt. Anschließend wird das SQUID an seinem Halter in dem Bad versenkt, das Abschirmgehäuse mit dem Deckel verschlossen und die SQUID-Elektronik eingeschaltet. Es dauert etwa 20 Minuten, bis sich das SQUID abgekühlt und die Steuerelektronik sich aufgewärmt hat, sodass eine Justage erfolgen kann.

Zunächst werden nacheinander die Amplitude I_{rf} (VCA, voltage controlled attenuator) und die Auslesefrequenz (VCO, voltage controlled oscillator) des rf-Signals so eingestellt, dass ein maximales Signal-zu-Rausch-Verhältnis von $U(\Phi)$ erreicht wird. Danach wird der Arbeitspunkt durch geeignete Wahl des Offsets (OFF) festgelegt. Jetzt lässt sich die Feldkompensationsregelung einschalten und Magnetfeldänderungen können verfolgt werden. Alle Einstellungen sollten hier sorgfältig gewählt werden, da sonst eine spätere Nachjustage nötig wird. Ebenso ist dies nötig, wenn die Elektronik vor der Justage nicht ausreichend aufgewärmt ist.

Bringen Sie das SQUID in den Testmodus.

VCA: Das SQUID wird im Testmodus mit eingeschaltetem Generator betrieben. Stellen Sie einen Wert von etwa 900 ein.

VCO: Der VCO-Wert wird zwischen beiden Grenzen (0...4095) variiert. Bei einigen Werten sollte sich das Dreieckssignal der Spannungs-Fluss-Kurve zeigen. Es wird der Wert gewählt, bei dem das Dreieckssignal am deutlichsten zu erkennen ist.

Optimieren Sie das Signal, indem Sie noch einmal die Amplitude über den VCA-Wert variieren. Hierbei sollte der komplette einstellbare Bereich betrachtet werden, um eine optimale Einstellung zu finden.

Auf dem Oszilloskop sollte nun das $U(\Phi)$ -Dreieckssignal deutlich zu erkennen sein. Speichern Sie mit Hilfe des Oszilloskops ein Bild dieses Signals für die Versuchsauswertung und protokollieren Sie die eingestellten Werte für VCA und VCO.

Im Messmodus wird jede Änderung des äußeren magnetischen Felds durch das SQUID detektiert und über eine Rückkoppelspule am SQUID selbst wieder kompensiert. Dadurch arbeitet das SQUID als Nulldetektor. Die Eigenschaften der Flussregelschleife lassen sich über eine Integratorkapazität (330 pF, ... , 100 nF) und einen Rückkoppelwiderstand (1 k Ω , ... , 20 k Ω) variieren. Die Integratorkapazität bestimmt dabei die Zeitauflösung, der Widerstand die Messgenauigkeit für Magnetfelder und den zugehörigen Dynamikbereich. Je höher die Kapazität, desto schlechter ist die Zeitaufösung. Bei einem großen Widerstand ist die Messgenauigkeit für Magnetfelder gut aber der Dynamikbereich gering. Da keine zeitkritischen Phänomene untersucht werden, sollte für alle Versuchsteile (ausgenommen der Rauschanalyse) die größte Kapazität gewählt werden, auch um das Rauschen bestmöglich zu unterdrücken. Der Widerstand dagegen wird variiert.

OFF: Zur Einstellung des Offsets wird das SQUID in den Messmodus gebracht. Auf dem Oszilloskop wird nun eine Messspannung ausgegeben, die über die Gegenkoppelspule proportional zu externen Feldänderungen ist. Wählen Sie zur Justage die höchste Empfindlichkeit, also der 20 k Ω Widerstand über das Controlpanel. Damit sind dann auch alle weiteren Bereiche abgedeckt.

In der Regel sind nun Spikes auf dem Signal zu sehen. Dies stellt den Versuch der Elektronik dar, die Regelschleife zu schließen. Je nachdem, ob der Offset zu hoch oder zu niedrig gewählt ist, driftet das Signal innerhalb weniger ms nach oben oder unten (zu hoher Offset: Drift nach oben). Der Offset kann, ebenso wie VCA und VCO, nur im Testmodus verändert werden. Daher ist hier ein mehrfaches Umschalten zwischen Mess- und Testmodus nötig, bis der korrekte Wert gefunden wurde.

Der Offset wird nun so lange optimiert, bis die Regelung stabil funktioniert. Dabei nimmt die zeitliche Länge der Spikes kontinuierlich zu. Eine stabile Regelung ist dann erreicht, wenn kein Drift mehr auftritt. Auf dem Signal ist ein 50 Hz Untergrund zu erkennen. Eine Änderung des Magnetfelds im Raum wird nun vom SQUID detektiert und durch die Spule kompensiert. Die Messspannung, die der Magnetfeldänderung proportional ist, gibt diese Änderung wieder.

Speichern Sie für das Protokoll jeweils ein Bild auf dem Spikes und das 50 Hz-Rauschen zu erkennen sind. Protokollieren Sie ebenfalls den letztendlich eingestellten Wert von OFF.

Das SQUID ist jetzt fertig justiert und kann verwendet werden. Sollte im Verlauf des Versuchs erneut ein Drift im Messmodus zu sehen sein, muss der Offset erneut korrigiert werden.

Können Sie neben dem 50 Hz Signal weitere Störfrequenzen finden? Bestimmen Sie diese, in dem Sie eine Fourier-Analyse des Messsignals durchführen. Woher könnten die Störungen jeweils stammen? Warum sind niederfrequente Störquellen stärker vertreten als Störungen hoher Frequenz? Schalten Sie hierbei für Ihre Untersuchungen in den Messbereich mit der höchsten Sensitivität.

5.2 Empfindlichkeit des SQUID

Die Empfindlichkeit des SQUID kann im Messmodus veranschaulicht und gemessen werden. Machen Sie sich die Empfindlichkeit des SQUID durch Bewegen magnetischer Gegenstände im Raum deutlich. Verschieben oder rotieren Sie den vorhandenen Dauermagneten in verschiedenen Abständen vom SQUID. Protokollieren Sie Ihre Beobachtungen. Bei ausreichender Abschirmung äußerer Felder könnten sogar die durch Herz- oder Hirnströme erzeugten Magnetfelder detektiert werden.

Wenn vorhanden, schalten Sie Ihr Handy aus und wieder ein oder bauen Sie eine Verbindung auf. Die dadurch hervorgerufene Störung ist so groß, dass eventuell die Regelung nicht mehr ordnungsgemäß funktioniert.

Schätzen Sie die Empfindlichkeit des SQUIDs im Messmodus ab. Dazu verwenden Sie die unterhalb des SQUIDs angebrachte Leiterschleife. Messen Sie die von der Leiterschleife eingenommene Fläche sowie den Abstand des Leiterschleifenmittelpunkts zum SQUID. Letzteres muss nach dem Aufwärmen des SQUIDs durch den Assistenten d.h. nach Durchführung der anderen Versuchsteile geschehen. **Nehmen Sie niemals ohne Anwesenheit des Assistenten das SQUID aus dem LN₂-Bad. Dies könnte den Sensor zerstören!** Zusammen mit der Stromquelle lassen sich Magnetfelder erzeugen, deren Stärke berechnet werden kann. Bestimmen Sie den magnetischen Fluss, der mindestens benötigt wird, um eine Änderung mit dem SQUID detektieren zu können (Fläche des Lochs im supraleitenden Ring $A = 0,2 \text{ mm}^2$). Hier sollte natürlich der empfindlichste Messmodus verwendet werden.

Schalten Sie das SQUID in den Testmodus und versuchen Sie experimentell auch hier die mindestens benötigte Magnetfeldänderung zu bestimmen, die nötig ist um eine Änderung des Signals zu erzeugen. An der Position des Dreiecksignals auf dem Oszilloskop kann eine Änderung des magnetischen Flusses am SQUID von weniger als einem ganzen Flussquant abgelesen werden. Bei einer Änderung um ein ganzes Flussquant verschiebt sich das Signal genau um ein Dreieck.

Anmerkung: Da unterhalb der Leiterschleife eine Stahlplatte zur e/m-Abschirmung angebracht ist, wird das erzeugte Magnetfeld etwas verändert, so dass der theoretisch erzeugte Wert nicht exakt am SQUID erreicht wird. Für obige Abschätzung und die folgende Eichung soll dies jedoch vernachlässigt werden.

5.3 Eichung

Verwenden Sie das SQUID im Messmodus, um mit Hilfe von Leiterschleife und Stromquelle eine Eichung des Messsignals vorzunehmen. Führen Sie dies für verschiedene Rückkoppelwiderstände durch und überzeugen Sie sich von der Linearität zwischen Widerstand und Empfindlichkeit.

5.4 Aufzug

In den empfindlichsten Messmodi ist es möglich die Bewegung der benachbarten Aufzüge in Gebäude D anhand ihrer Magnetfelder zu verfolgen. Dies ist möglich, da der Aufzug oder sein Gegengewicht eine natürliche Magnetisierung aufweist, sodass sich ein magnetischer Dipol ergibt. Stellen Sie dazu das Oszilloskop so ein, dass auch eine Fahrt von Ebene 6 auf 13

(oder umgekehrt) komplett auf dem Display verfolgt werden kann. Sollte sich einer der beiden Aufzüge bewegen, lässt sich dies mit Hilfe des Oszilloskops beobachten. Überzeugen Sie sich, dass das Signal, das Sie sehen von den Aufzügen stammt, indem ein Versuchspartner die Bewegung und der andere das Messsignal verfolgt. Benutzen Sie für Ihre Messungen den **rechten Aufzug** (von außen betrachtet).

Zeichnen Sie eine Fahrt von Ebene 6 auf Ebene 13 auf und beschreiben Sie die Messkurve und erklären Sie Ihren Verlauf. Schätzen Sie aus der Messung die z-Komponente des magnetischen Dipolmoments des Aufzugs ab (nehmen Sie dazu einen Abstand von 12 m zwischen SQUID und Aufzugschacht sowie eine Etagenhöhe von 4 m an).

Nehmen Sie nun eine Messung mit dem **linken Aufzug** (von außen betrachtet) auf. Können Sie qualitativ einen Unterschied der Magnetfelder beider Aufzüge feststellen? Erklären Sie diese!

5.5 Magnetisierungskurve von Gadolinium, Curie-Temperatur

Nun soll die Magnetisierungskurve von Gd gemessen und daraus dessen Curie-Temperatur T_C bestimmt werden. Dazu wird die Gd-Probe unter T_C abgekühlt, im kalten Zustand magnetisiert, in die Messposition gebracht und während des Aufwärmens die Magnetisierung mit dem SQUID gemessen. Die Temperaturmessung geschieht mit dem bereits erwähnten Pt1000-Element.

Da sich die Probe nach dem Abkühlen schnell wieder erwärmt, müssen die Messvorbereitungen zügig erfolgen. Lesen Sie sich deshalb zuerst die Anweisungen durch, damit die Vorbereitungen schnell anschließend schnell erfolgen können.

Zum Kühlen der Probe wird LN2 verwendet. Falls, abgesehen von dem im SQUID-Dewar, kein LN2 vorhanden ist, muss der Praktikumsbetreuer kontaktiert werden.

Entfernen Sie die Abschirmtonne und ziehen Sie den Schlitten am Boden des Abschirmgehäuses heraus. Achten Sie darauf, dass die angebrachten Drähte nicht abreißen! Entfernen Sie die Leiterschleife zusammen mit der Petrischale und der Schaumstoffisolierung vom Schlitten und ersetzen Sie diese durch den rechteckigen roten Kunststoffbehälter. Gd-Probe und Kunststoffbehälter auf dem Schlitten sind in Abbildung 8 zusehen. Tauchen Sie die Gd-Probe mitsamt Probenhalter einige Zeit in LN2, um ihn abzukühlen.

ACHTUNG: Hierbei ist es zwingend notwendig eine Schutzbrille und die vorgesehenen Schutzhandschuhe zu tragen! Benutzen Sie für den Flüssigstickstoff den bereitliegenden Styroporbehälter.

Positionieren Sie die Probe im Kunststoffbehälter, sodass sich dieselbe bei hereingeschobenem Schlitten mittig unter dem SQUID befindet. Diese Position ist durch ein quadra-

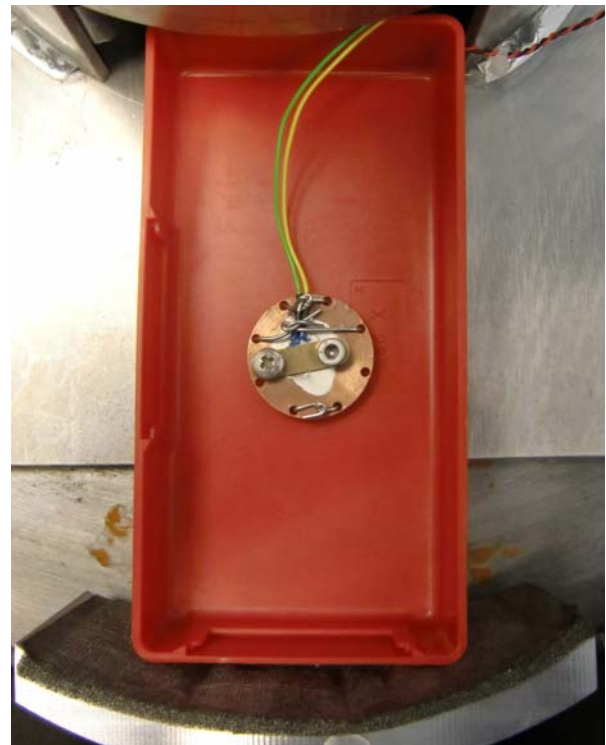


Abbildung 8: Schlitten am Boden des Abschirmgehäuses mit Gd-Probe und Pt1000-Element auf Cu-Probenhalter.

tisches Loch im Schlittenboden markiert. Gießen Sie vorsichtig noch etwas (!) Stickstoff darüber, sodass der Boden des Behälters gerade eben bedeckt ist. Halten Sie dann kurz den Dauermagneten von oben auf die Gd-Probe. Eine ausreichende Magnetisierung ist damit erfolgt. Schieben Sie den Schlitten wieder hinein und führen Sie das Rohr mit dem aufgesetzten Trichter durch die dafür vorgesehenen, blau markierten Löcher ein, sodass der Kunststoffbehälter bei aufgesetzter Abschirmtonne mit Flüssigkeit befüllt werden kann. Stülpen Sie die Abschirmtonne wieder über den Aufbau.

Verbinden Sie die Präzisionsstromquelle mit dem Pt1000-Element und stellen Sie einen Strom von 500 μA ein. Wozu dient dieser Strom?

Starten Sie die B(T)-Messung am PC.

Die Probe heizt sich nun durch die wärmere Umgebung langsam auf. Um T_C sauber bestimmen zu können, muss die Gd-Probe auf über 20°C aufgeheizt werden. Schütten Sie siedendes Wasser, welches Sie mit dem Wasserkocher erwärmt haben, durch den Trichter auf die Probe. Achten Sie darauf, nicht zu viel Wasser hinzuzugeben, da der Kunststoffbehälter maximal 175 ml fasst. **Auch hierbei sind zwingend Schutzbrille und Schutzhandschuhe zu tragen!** Hier ist es essentiell Störsignale zu vermeiden. Insbesondere Verschieben der Stühle, Bewegungen der Aufzüge oder auch des Trichterrohrs verursachen Verfälschungen der Messkurve.

Interpretieren Sie in ihrem Protokoll die gemessene Magnetisierungskurve und bestimmen Sie anschließend die Curie-Temperatur. Tragen Sie dazu die Messwerte mit einer geeigneten Software die Messwerte B(T) auf und fitten Sie die Messkurve in einem sinnvollen Bereich unterhalb der Curie-Temperatur mit dem theoretischen Verlauf in diesem Bereich an (Magnetisierung $\sim (1-T/T_C)^{0,35}$). Extrapolieren Sie daraus T_C . Vergleichen Sie den bestimmten Wert mit der Literatur und gehen Sie auf mögliche Fehlerquellen ein. Wie groß ist der magnetische Fluss am SQUID bei 0,5 und 0,8 und 0,95 T_C jeweils? Welcher magnetischen Feldstärke entspricht dies in der Probe? Beachten Sie bei Ihren Auswertungen, dass die Temperaturabhängigkeit des Widerstands des Pt1000-Elements durch eine lineare Näherung bestimmt wurde. Außerdem besitzt es die Genauigkeitsklasse B. Informieren Sie sich in der Literatur, wie groß der dadurch verursachte Fehler ist und berücksichtigen Sie dies in Ihrer Fehlerbetrachtung.

5.6 Aufwärmen des SQUID

Nach Beenden des Versuchs muss das SQUID aus dem LN2-Bad genommen, aufgewärmt und dabei getrocknet werden. Dazu muss der Betreuer kontaktiert werden, da eine unsachgemäße Behandlung das Gerät zerstören würde.

6. Anhang

Sicherheitsdatenblätter zu LN2 und Gadoliniumoxid (Gd_2O_3).