

SQUID

vorläufige Version, letzte Änderung: 25.2.2011, Benjamin Bornmann
Verbesserungsvorschläge sind willkommen.

ACHTUNG: Versuchsteil 5.5 funktioniert im Moment leider nicht und entfällt daher!

1. 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^{-9} T nachgewiesen werden (vgl. Erdmagnetfeld, Mitteleuropa: 50 μ T). Damit ist es das sensibelste magnetische Messinstrument, das aktuell existiert.

Ein SQUID besteht im Wesentlichen aus einer supraleitenden Schleife mit - je nach Bauweise - 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 flüssigem Stickstoff in Betrieb genommen. Dann soll die Empfindlichkeit des SQUIDs mit Hilfe einer stromdurchflossenen Leiterschleife abgeschätzt werden. Anschließend soll die Curie-Temperatur von Gadolinium bestimmt werden. Hierzu wird das SQUID zunächst kalibriert. Danach wird eine gekühlte Gd-Probe in den Messbereich gebracht und die Magnetisierung bei steigender Temperatur gemessen.

2. Vorkenntnisse

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

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.** 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] Anleitung JSQ rf SQUID, 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. Wolfspenger, 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** , in dem es ganzzahlige Vielfache des **magnetischen Flussquants $\Phi_0 = h/2e$** in seinem Inneren einschließt. Der magnetische Fluss durch den Ring ergibt sich aus der den Ring durchtretenden eingeschlossenen **magnetischen Flussdichte \mathbf{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 \mathbf{H}** über $\mathbf{B} = \mu\mathbf{H}$, mit der magnetischen Permeabilität μ .

Die Gd-Probe weist eine temperaturabhängige **Magnetisierung $\mathbf{M} = d\mu/dV$** auf. Sie gibt sich aus dem **magnetischen Moment μ** (erzeugt durch Spinausrichtung oder Stromfluss; nicht zu verwechseln mit der magnetischen Permeabilität) pro Volumen der Probe. Legt man an die Probe ein ausreichend hohes magnetisches Feld an, steigt die Magnetisierung bis zur **Sättigungsmagnetisierung \mathbf{M}_S** . Nach Entfernen des magnetischen Feldes, sinkt die Magnetisierung bis zur **Remanenz \mathbf{M}_R** . Steigt die Temperatur der Probe über die **Curie-Temperatur T_C** , wird die Probe paramagnetisch.

Über $\mathbf{B} = \mu(\mathbf{H} + \mathbf{M})$ 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 den 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 einer Wellenfunktion ψ

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

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

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

Dies ist gültig, wenn die Zahl der Cooper-Paare weit unterhalb der Sprungtemperatur konstant ist und damit die Wellenfunktion $\psi(t) = |\psi_0| e^{i\omega t} = |\psi_0| e^{i\Theta}$ mit der Zeit nicht ihren Betrag, sondern nur die Phase 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:

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

Der Nenner deutet darauf hin, dass die die Supraleitung bildenden Ladungsträger die Ladung $2e$ tragen.

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

Da das SQUID ein sehr empfindliches Gerät zur Magnetfeldmessung ist, ist 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 keinen Einfluss auf den Betrieb des SQUIDs, könnten jedoch bei zu hoher Feldstärke die Elektronik beeinflussen. Dies ist hier nicht der Fall. 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.

Magnetische Wechselfelder erfordern ebenfalls ein geschlossenes, rundum elektrisch leitendes Gehäuse. Hierin können Wirbelströme ein Magnetfeld erzeugen, welches ebenfalls seiner Ursache genau 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 gibt die Tiefe an, bei der die Amplitude der Welle auf 1/e ihres Eintrittswertes abgefallen ist:

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

mit der elektrischen Leitfähigkeit σ , der Permeabilität μ des Schirmmaterials und der Strahlungsfrequenz f . Niederfrequente Wellen können also tiefer eindringen als hochfrequente (Netzspannung: $\delta_{\text{Cu}, 50\text{Hz}} = 9,4 \text{ mm}$, Radiowellen: $\delta_{\text{Cu}, 100\text{MHz}} = 6,6 \mu\text{m}$). Wäre der Schirm rundum supraleitend, würde die Skin-Tiefe auf die London-Eindringtiefe absinken, die 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

Foto von Aufbau mit Beschriftung der Geräte (folgt):

SQUID, Controlpanel, Dewar mit flüssigem Stickstoff, Abschirmgehäuse gegen elektromagnetische Wechselfelder, Oszilloskop, Stromquelle, Spule und Gd-Probe mit Temperatursensor auf Probenschiene, PC mit Messsoftware

Schaltbild (folgt, siehe hierzu auch Abb. 21 im SQUID-Handbuch)

In diesem Versuch wird ein rf-SQUID als Magnetometer betrieben. Als solches kann es nur Änderungen der magnetischen Flussdichte ΔB 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.

Im Abschirmgehäuse ist unter dem Dewar die Gd-Probe auf einem beweglichen Schlitten angebracht. Die Probe befindet sich in Messposition, wenn der Schlitten bis zum Anschlag in das Gehäuse geschoben wird (Abstand Gd-Probe-SQUID $d_z = x \text{ mm}$). Zum Abkühlen und

Magnetisieren der Probe sollte der Schlitten aus dem Gehäuse gezogen werden. Die Temperatur der Probe wird über einen direkt an der Gd-Probe angebrachten Pt100-Sensor gemessen und die Temperatur am PC ausgegeben.

Die Elektronik des SQUIDs kann wahlweise über das Touchpanel oder den PC gesteuert werden. 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: AC-Kopplung) verfolgt werden. Im Messmodus (MESS) wird die Feldkompensationsregelung eingeschaltet. Hier können zeitliche Magnetfeldänderungen verfolgt werden (y-t-Modus, y-Kanal: DC-Kopplung). 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!

4. Hinweise zum Umgang mit flüssigem Stickstoff

Um das SQUID zu betreiben, ist eine Kühlung mit flüssigem Stickstoff notwendig. Ebenso wird dieser zum Kühlen der Gd-Probe verwendet. Flüssiger Stickstoff 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 Flüssigstickstoffbad 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 flüssigem Stickstoff 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 sie sich soweit aufgewärmt hat, dass 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 diese 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.

Auf dem Oszilloskop sollte nun das $U(\Phi)$ -Dreieckssignal deutlich zu erkennen sein.

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 also Nulldetektor. Die Eigenschaften der Flussregelschleife lassen sich über eine Integrator-Kapazität (330 pF, ... , 100 nF) und einen Rückkoppelwiderstand (1 kOhm, ... , 20 kOhm) variieren. Die Integrator-Kapazität bestimmt dabei die Geschwindigkeit, der Widerstand den Dynamikbereich. Je höher die Kapazität, desto geringer die Geschwindigkeit und je höher der Widerstand, desto höher die Auflösung und geringer der Dynamikbereich. 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. Zur Inbetriebnahme sollte die höchste Empfindlichkeit, also der 20 kOhm Widerstand über das Controlpanel gewählt werden. Damit sind dann auch alle weiteren Bereiche abgedeckt.

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.

Es sollten nun periodisch auftretende Sägezahnsignale zu sehen sein. Sind sie nicht zu sehen, wird der Offset solange variiert, bis sie auftreten. 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.

Das Sägezahnsignal 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 jedoch innerhalb weniger ms nach oben oder unten (zu hoher Offset: Drift nach oben). Der Offset wird nun so lange optimiert, bis die Regelung stabil funktioniert. Dabei nimmt die Länge des Sägezahnsignals kontinuierlich zu. Eine stabile Regelung ist dann erreicht, wenn kein Drift mehr auftritt. Auf dem Signal ist dann in der Regel 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.

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

Können Sie neben dem 50 Hz Signal weitere Störfrequenzen finden? Woher könnten diese jeweils stammen? Schalten Sie dazu in den Messbereich mit der höchsten Sensitivität. Welche Faktoren beeinflussen die Intensität der Störsignale?

5.2 Empfindlichkeit des SQUID

Die Empfindlichkeit des SQUID kann am besten im Testmodus veranschaulicht und gemessen werden. 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.

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. Bei ausreichender Abschirmung äußerer Felder könnten sogar die durch Herz- oder Hirnströme erzeugten Magnetfelder detektiert werden, was hier jedoch leider nicht gegeben ist.

Wenn vorhanden, schalten Sie Ihr Handy aus und wieder ein oder bauen Sie eine Verbindung auf. Im Testmodus sollte durch diese Störung kein eindeutiges Signal mehr zu erkennen sein. Auch im Messmodus ist die Störung zu groß, so dass die Regelung nicht mehr funktioniert.

Schätzen Sie die Empfindlichkeit des SQUIDs ab. Dazu verwenden Sie die unterhalb des SQUIDs angebrachte Leiterschleife (65 mm Durchmesser, 94 mm Abstand zum SQUID, eine Windung). Mit Hilfe der Stromquelle lassen sich ausreichend kleine Magnetfelder erzeugen. Bestimmen Sie den magnetischen Fluss, der mindestens benötigt wird, um eine Änderung mit dem SQUID detektieren zu können (Fläche des Lochs im supraleitenden Ring $A = 0,2 \text{ mm}^2$). Schalten Sie das SQUID in den Messmodus und bestimmen Sie auch hier grob die mindestens benötigte Magnetfeldänderung um eine Änderung des Signals zu erzeugen. Worin liegt ein eventueller Empfindlichkeitsunterschied zum Testmodus begründet?

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

Im empfindlichsten Messmodus ist es möglich die Bewegung der benachbarten Aufzüge in Gebäude D anhand ihrer Magnetfelder zu verfolgen. 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, sehen Sie eine lineare Änderung des Magnetfelds am SQUID. Überzeugen Sie sich, dass das Signal, das Sie sehen von den Aufzügen stammt, indem ein Versuchspartner die Bewegung und der andere das Messsignal verfolgt.

Zeichnen Sie eine Fahrt von Ebene 6 auf Ebene 13 auf und schätzen Sie daraus das Magnetfeld des Aufzugs ab (nehmen Sie dazu einen Abstand von 12 m zwischen SQUID und Aufzugschacht an). Erklären Sie den (näherungsweise?) linearen Verlauf des Messsignals. Können Sie einen Unterschied der Magnetfelder beider Aufzüge aufgrund des leicht unterschiedlichen Abstands messen?

5.5 Magnetisierungskurve von Gadolinium, Curie-Temperatur (entfällt vorerst)

Es soll die Magnetisierungskurve von Gadolinium gemessen werden und daraus dessen Curie-Temperatur bestimmt werden. Dazu wird die Gd-Probe unter die Curie-Temperatur abgekühlt, im kalten Zustand magnetisiert, in die Messposition gebracht und während des Aufwärmens die Magnetisierung mit dem SQUID gemessen.

Zum Kühlen der Probe wird flüssiger Stickstoff verwendet. Ziehen Sie die Probenschiene etwas aus dem Abschirmgehäuse heraus. Achten Sie darauf, dass die angebrachten Drähte nicht abreißen! Gießen Sie langsam den flüssigen Stickstoff aus dem dafür vorgesehenen Dewar über die Gd-Probe (nicht aus dem SQUID-Dewar). Benutzen Sie Handschuhe und Schutzbrille und achten Sie darauf, dass Sie nur die Gd-Probe und nicht sich selbst begießen! Halten Sie dann kurz den Dauermagneten mit der roten Fläche von oben auf die Gd-Probe. Eine ausreichende Magnetisierung ist damit erfolgt (es ist an dieser Stelle nicht sinnvoll die Probe bis in Sättigung zu magnetisieren, da die spätere Änderung des Magnetfelds dann zu groß für den Messbereich des SQUID wäre). Bringen Sie die Probenschiene wieder in Messposition (Achtung: kalt, Handschuhe benutzen), Schließen Sie das Abschirmgehäuse und Starten Sie die $B(T)$ -Messung am PC.

Die Probe heizt sich nun durch die wärmere Umgebung langsam auf. Um die Curie-Temperatur sauber bestimmen zu können, muss die Gd-Probe auf über 20°C aufgeheizt werden, was im Bereich unter dem SQUID jedoch nicht erreicht würde. Schalten Sie daher die unter dem Abschirmgehäuse angebrachte Heizung ein. Starten Sie erst jetzt die Magnetisierungsmessung am PC. Es ist wichtig, dass die Messung erst dann gestartet wird, wenn alle anderen benötigten elektrischen Geräte eingeschaltet sind, da sonst durch den einsetzenden Stromfluss eine Magnetfeldänderung am SQUID auftreten würde. Warten Sie, bis die Temperatur auf über 20°C angestiegen ist. Stoppen Sie dann die Messung.

Um die Curie-Temperatur aus den aufgenommenen Daten zu bestimmen, tragen Sie mit einem geeigneten Programm 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 ($M \sim (1-T/T_C)^{0,35}$). 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?

5.6 Aufwärmen des SQUID

Nach Beenden des Versuchs muss das SQUID aus dem Stickstoffbad genommen, aufgewärmt und dabei getrocknet werden. Dies ist dem Versuchsbetreuer zu überlassen. Dieser sollte daher zu gegebenem Zeitpunkt kontaktiert werden.

6. Anhang

Sicherheitsdatenblatt LN2 und Gadolinium (Gd_2O_3).