

DC-SQUID: Messungen zur supraleitenden Quanteninterferenz

1. Hintergrund und Zielsetzung des Versuchs

SQUIDs (Superconducting Quantum Interference Device) werden in Forschung und Industrie als hochempfindliche Magnetometer eingesetzt. In der Geologie dienen sie zur Erkundung der tiefen Bodenbeschaffenheit und zur Messung der Magnetisierung von Gesteinsproben. In der Medizin werden sie zur Abbildung biomagnetischer Signale von Gehirn- und Herzströmen eingesetzt. In der zerstörungsfreien Prüfung dienen sie zur Untersuchung von Flugzeugteilen und statischen Bauelementen in Gebäuden und Brücken. Weitere Anwendungen betreffen die Präzisionsmeßtechnik wie etwa pV-Meßgeräte oder Suszeptometer. Bis 1986 war zum Betrieb von SQUIDs Kühlung mit flüssigem Helium erforderlich, um die supraleitenden Materialien unter ihre Sprungtemperatur T_c von typisch 10 K abzukühlen. Seit der Entdeckung der Kuprat-supraleiter mit einem T_c von fast 100 K, die 1987 mit einem Nobelpreis ausgezeichnet wurde, genügt die technisch sehr viel einfachere Kühlung mit flüssigem Stickstoff.

In diesem Versuch soll die Funktionsweise eines mit Gleichstrom betriebenen SQUID (DC-SQUID) aus $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ erarbeitet werden. Die Grundlagen zum Verständnis der Funktionsweise eines SQUIDs sind die Josephson-Effekte in supraleitenden Kontakten sowie die Quantisierung von magnetischem Fluß in supraleitenden Schleifen. Die Versuchsdurchführung beinhaltet darüberhinaus qualitative magnetische Tests, die die hohe Nachweisempfindlichkeit von SQUIDs dokumentieren.

2. Vorkenntnisse

2.1 Zur Supraleitung

Charakteristische Merkmale des supraleitenden Zustandes, thermodynamisches Phasendiagramm von Supraleitern, Flußquantisierung, Josephsoneffekte, Shapiro-Stufen, Hochtemperatursupraleiter.

2.2 Zum Betrieb von SQUIDs

Funktionsweise und Anwendungsmöglichkeiten von DC-SQUIDs, Funktionsweise von RF-SQUIDs, Magnetometer- und Gradiometer-Schaltung, "flux-locked loop"-Schaltungen, Größenordnungen natürlicher Magnetfelder.

2.3 Zur Tieftemperaturtechnik

Erzeugung und Messung tiefer Temperaturen, Wärmetransport in Festkörpern und Gasen: Strahlung, Leitung und Konvektion.

3. Literatur

3.1 W. Buckel: "Supraleitung" (Bibliotheks-Signatur 72 UDW 100)

3.2 T. P. Sheahen: "Introduction to High-Temperature Superconductivity" (73 UDW 2470)

3.3 T. vanDuzer and C. W. Turner: "Principles of Superconducting Devices and Circuits" (73 UDW 1589)

3.4 C. A. Bailey: "Heat transfer and thermal insulation" in A. C. Bailey: "Advanced Cryogenics" (73 UDW 1678)

3.5 A. C. Rose-Innes: "Low Temperature Laboratory Techniques" (73 UDW 1296)

3.6 G. K. White: "Experimental Techniques in Low Temperature Physics" (91 UDF 1673, 73 UDW 1115)

3.7 J. Clarke: "SQUIDs, brains and gravity waves", Physics Today, March 1986, 36-44

3.8 R. C. Jaklevic, J. Lambe, A. H. Silver, and J. E. Mercereau: "Quantum Interference Effects in Josephson Tunneling", Phys. Rev. Lett. **12**, 159 (1964)

3.9 Spezifikationen und User's Guide für Mr. SQUID der Fa. STAR Cryoelectronics (ursprünglich Conductus).

4. Versuchsaufbau

4.1 Verwendete Geräte

Das Kernstück dieses Versuchs ist ein gekapseltes DC-SQUID mit Auslese-Elektronik. Das Instrument enthält Dewar, Probenstab mit SQUID-Chip und *Pt-100-Thermometer* sowie Elektronikbox. Desweiteren stehen Oszilloskop, Verschaltungselemente, Digitalmultimeter und Konstantstromquelle zur Verfügung. Die Details der für die verschiedenen Meßaufgaben benötigten Schaltungen gehen aus der *Versuchsanleitung* hervor. Weitere Angaben finden Sie auf der Homepage der Herstellerfirma *Star Cryoelectronics*.

4.2 Vorbereitungen

Füllen Sie das Dewar etwa bis zur Hälfte mit flüssigem Stickstoff. **ACHTUNG! Seien Sie vorsichtig im Umgang mit flüssigem Stickstoff.** Er kann wegen seiner niedrigen Siedetemperatur von 77 K (−196 °C) bei direktem Kontakt Verbrennungen auf der Haut und in den Augen hervorrufen. Tragen Sie deshalb Schutzhandschuhe und –brille. Achten Sie darauf, daß das Dewar einen sicheren Stand hat. Führen Sie den Probenstab LANGSAM in den Stickstoff ein und dichten Sie das Dewar mit dem Schaumstoffdeckel ab. Sie sollten darauf achten, daß das Dewar sich innerhalb des Faraday'schen Käfigs befindet und daß die SQUID-Elektronik zunächst noch nicht angeschlossen ist. WARUM? Warten Sie einige Minuten, bis das SQUID abgekühlt ist (dies läßt sich an dem abnehmenden Sieden des flüssigen Stickstoffs erkennen). Vergewissern Sie sich über das erforderliche Blockschaltbild und schließen Sie dann die SQUID-Elektronik und das Oszilloskop an.

5. Meßprogramm

5.1 Strom-Spannungs-Kennlinien

Stellen Sie eine Strom-Spannungs-Kennlinie (IV-Kennlinie) am Oszilloskop dar und zeichnen Sie die typischen Merkmale ab. Vergleichen Sie die Kennlinie z. B. mit der einer Halbleiterdiode und diskutieren Sie die Unterschiede. Optimieren Sie den Kennlinienverlauf und ermitteln dann den kritischen Strom I_c der Josephsonkontakte im SQUID. Berechnen Sie das $I_c R_n$ -Produkt der Kontakte und diskutieren Sie dessen Bedeutung.

5.2 Spannungs-Fluß-Kennlinien

Die Spannungs-Fluß-Kennlinie ($V-\Phi$) stellt das wesentliche Merkmal eines SQUID als empfindliches Magnetometer dar, da es die Transformation des zu messenden magnetischen Signals in eine elektrische Größe beschreibt. Skizzieren Sie das zur $V-\Phi$ -Messung erforderliche Blockschaltbild, stellen Sie die Spannungs-Fluß-Kennlinie am Oszilloskop dar, skizzieren und diskutieren Sie den Kurvenverlauf. Bestimmen Sie die Modulationstiefe ΔV . Berechnen Sie aus der Modulationstiefe die relative Induktivität β_L und erläutern die Bedeutung dieses Parameters. β_L läßt sich auch aus der Schleifeninduktivität des SQUIDs berechnen. Nehmen Sie dafür ideale Kopplung zwischen der Modulationsspule und dem SQUID an. Vergleichen Sie beide Werte und diskutieren Sie mögliche Unterschiede.

5.3 Qualitative Experimente

a. Bringen Sie einen Permanentmagneten in die Nähe des Dewars. Beschreiben und erläutern Sie ihre Beobachtung. Können Sie durch den "flux control"-Knopf das Geschehene wieder rückgängig machen? Warum/warum nicht?

b. Holen Sie den Probenstab aus dem Dewar und lassen Sie ihn aufwärmen. Entfernen Sie das schwarze Schutzschild. **VORSICHT! Warten Sie bis es wirklich warm ist. Es besteht Verbrennungsgefahr. Gehen Sie SORGFÄLTIG mit dem Chip um!** Kühlen Sie das ungeschirmte SQUID unter Beachtung von Punkt 4.2 wieder ab. Versuchen Sie, wieder eine IV-Kennlinie darzustellen. Was fällt Ihnen auf? Falls es Ihnen gelingt, bringen Sie metallische Gegenstände in die Nähe des Dewars. Beobachten und diskutieren Sie deren Auswirkungen.

5.4 R(T)-Messung

Wärmen Sie das SQUID wie in Punkt 5.3b beschrieben nochmals auf. Schließen Sie die Temperaturmessung und die SQUID-Elektronik an. Kühlen Sie den Probenstab nun sehr langsam ab, indem Sie ihn mit Hilfe der Kabelklemmen Stück für Stück in das Dewar einlassen. Messen Sie den elektrischen Widerstand des SQUIDs als Funktion der Temperatur und ermitteln Sie daraus die kritische Temperatur T_c des verwendeten Supraleiters. *Daten* sowie ein *Diagramm* der Widerstandskennlinie für Standard-Pt100-Thermometer stehen Ihnen für die Umrechnung von Spannungs- in Temperaturwerte zur Verfügung.

5.5 Messung mit Flußregelschleife

Stellen Sie eine Flußregelschleife ("flux-locked loop") her und verbinden Sie diese mit der SQUID-Box. Testen Sie die Schaltung wie in der Versuchsanleitung angegeben. Verbinden Sie dann die Schaltung mit dem "ext. coil"-Eingang. Was bewirkt diese Schaltung? Dokumentieren Sie Ihre Beobachtungen, wenn Sie einen Magneten in die Nähe des SQUID bringen, im Vergleich zur vorherigen Meßmethode (Punkt 5.3a). Wie könnte der Schaltkreis noch verbessert werden?