

SQUID-Magnetometer für TEM und CSAMT: Stand der Entwicklung

U. Kalberkamp (TU Berlin), M. Bick (FZ Jülich)

Einführung

Breitbandige, kompakte 3-Komponenten Magnetometer lassen sich mit SQUIDs aus Hochtemperatursupraleitern (HTSL) wie Yttrium-Barium-Kupferoxid (YBCO) realisieren. In unserer neuen Generation von SQUID-Magnetometern werden rf-SQUIDs mit 900 MHz Schwingkreis und koplanarem Resonator nach einem Entwurf von Zhang (1997) verwendet. Ein Kanal eines solchen Systems besteht aus einer *Sandwich*-Anordnung von SQUID, koplanarem Resonator und Koppelpule sowie der Rückkopplungselektronik. Im jetzigen System ist die Elektronik aus Gründen der Schnelligkeit (*slew rate*) vollkommen analog aufgebaut. Der Frequenzbereich des Systems ist praktisch begrenzt nach oben durch die Schnelligkeit und Bandbreite der Rückkopplungselektronik sowie durch die immer notwendige Abschirmung der SQUIDs gegen hochfrequente Störungen, nach unten durch die mit $1/f$ ansteigende Rauschdichte (Abb. 1). Das aktuelle System ist mit einer 20 μm Aluminiumfolie gegen hochfrequente Einstreuungen geschirmt und erreicht ein weißes Rauschen von ca. 40 $\text{fT}/\sqrt{\text{Hz}}$ im realen Geländeeinsatz. Es läßt sich daher bislang nur für die aktiven Verfahren wie TEM und CSAMT einsetzen. Die Rückkopplungselektronik arbeitet so stabil, daß das gesamte System ohne zusätzliche Schirmung auch in stark gestörter Laborumgebung sicher Daten liefert.

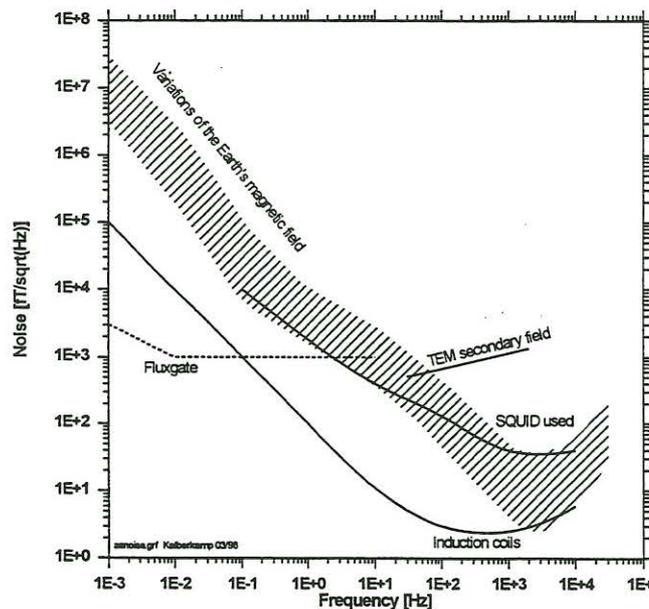


Abb. 1: Vergleich der Rauschspektren von SQUID, Induktionsspule (MFS05, Metronix) und Fluxgate

Magnetfeldsensoren, wie SQUIDs sie darstellen, bieten sich speziell für das TEM Verfahren an, denn dann wird die Erkundungstiefe weitgehend unabhängig von der Leitfähigkeit. Dies ist besonders in gut leitfähiger Umgebung von Bedeutung. (Spies, 1989). Allgemein ist die Kompaktheit ein Vorteil, der den Nachteil des zusätzlichen 'Verbrauchsmaterials' flüssiger Stickstoff aufwiegt. Insbesondere für Bohrlochensoren bieten SQUID Systeme eine vielversprechende Perspektive.

Die drei SQUIDs sind mit den Koppelpulen in einem Kopf orthogonal eingebaut. Unter den Koppelpulen befinden sich zunächst der koplanare Resonator und dann der SQUID selbst. Zum Betrieb wird der Meßkopf in einen mit 7 Liter Stickstoff befüllten GFK-Dewar eingesetzt (ca 70 cm × 30 cm Ø). Externe HF-Einstreuungen werden durch eine auf dem Dewar angebrachte Aluminiumschirmung von 20µm Dicke gedämpft.

Verbesserungen gegenüber Burg Ludwigstein (1996)

Es konnte vor allem eine erhebliche Verbesserung der Systemstabilität bei gleichzeitiger Verringerung des weißen Rauschens auf den angestrebten Wert von 40 fT/√Hz erzielt werden. Die Parameter *slew-rate* und Bandbreite konnten sogar übertroffen werden. Dazu haben vor allem die optimierte analoge Elektronik und die Entwicklung des koplanaren SQUIDs beigetragen. Für das 3-Achssystem wurde ein automatischer Parameterabgleich vorgesehen, so daß das zeitaufwendige manuelle Justieren der Elektronik entfällt.

Die Erhöhung des Rauschens durch Transport des Systems während der Supraleitung konnte mit Hilfe einer Heizung, die lokal die SQUID-Junction für wenige Sekunden über die Sprungtemperatur erwärmt, eliminiert werden (Abb. 2).

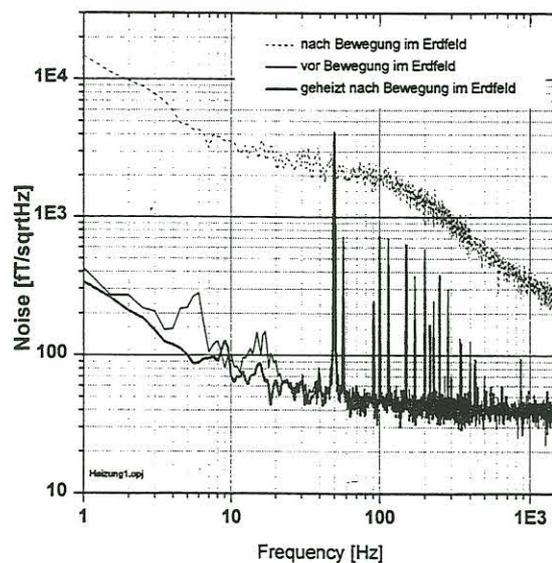


Abb. 2: Reduzierung eingefangenen Rauschens durch kurzzeitiges Aufheizen

Probleme

Etwas verschlechtert hat sich das für MT wichtige Verhalten bei langen Perioden: Das auf TEM optimierte System hat ein höheres und bereits bei 200 Hz einsetzendes 1/f-Rauschen (Abb. 3). Der Einsatz des 1/f Rauschens bei Frequenzen < 0,1 Hz scheint schwierig realisierbar zu sein. Durch Einbezug von dc-SQUIDs und angepaßter Elektronik erhoffen wir uns auf diesem Bereich aber zumindest deutliche Verbesserungen.

Die Elektronik ist zwar sehr stabil, jedoch dauert es mehrere Stunden, bis dieser Zustand erreicht ist. Ein verbesserter Temperatenausgleich innerhalb der Elektronik kann hier Abhilfe schaffen. Ein weiteres Problem stellt der exakte Nullpunktgleich für verschwindendes Primärfeld dar. Dies führt z.B. bei TEM Messungen zur Verringerung der Auflösung.

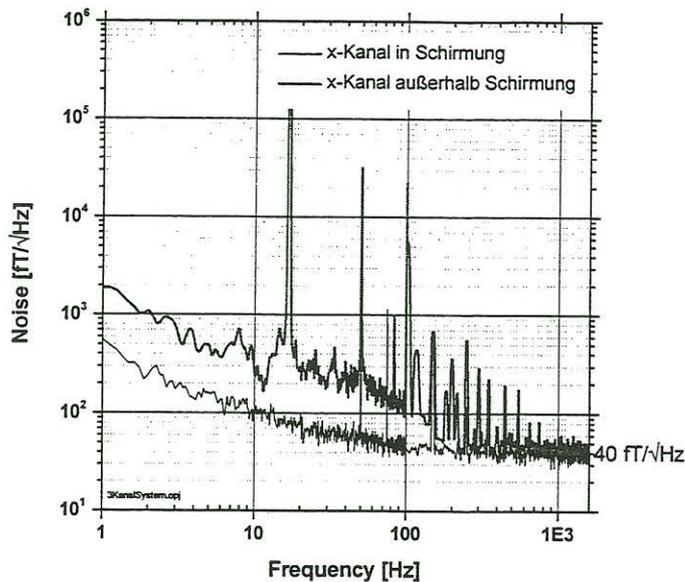


Abb. 3: Anstieg des Systemrauschens durch Präsenz des Erdmagnetfeldes

Beispiel einer TEM Messung (Martinsbüttel)

In Abb. 4 ist ein Vergleich von SQUID und Spulen TEM Messungen gezeigt. Als Empfangsspule wurde eine 100m x 100m große mit der Senderspule koinzidente Leiterschleife verwendet. Das SQUID befand sich im Zentrum der Leiterschleife (in loop Anordnung). Obwohl die Messungen sehr gut reproduzierbar waren, stimmen sie nur für Zeiten > 1 ms überein. Zu früheren Zeiten bewirkt die für den stabilen Betrieb des SQUID notwendige magnetische Schirmung eine Verfälschung des Transienten.

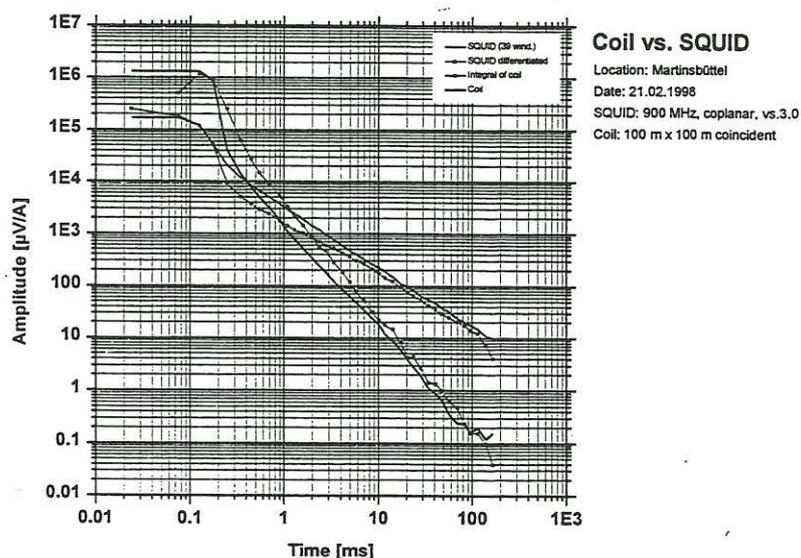


Abb. 4: Vergleichende TEM Messung mit koplanarem SQUID System und koinzidenter Leiterschleife

Beispiel einer CSAMT Messung (Martinsbüttel)

Die in Abb. 5 gezeigten CSAMT Kurven zeigen in den schmalbandigen Bändern ein ähnlich gutes Ergebnis mit SQUID Sensoren wie mit Induktionsspulen. Bei größer werdender Bandbreite werden die Fehlerbalken in den SQUID-Kurven sprunghaft größer. In diesem Bereich oberhalb 200 Hz sind die Induktionsspulen deutlich besser. Die Phasenwerte der SQUID Messung sind schlechter und z.T. inkonsistent. Die Ursache hierfür ist ebenfalls in dem nach wie vor zu hohen Rauschen des SQUID Systems zu suchen.

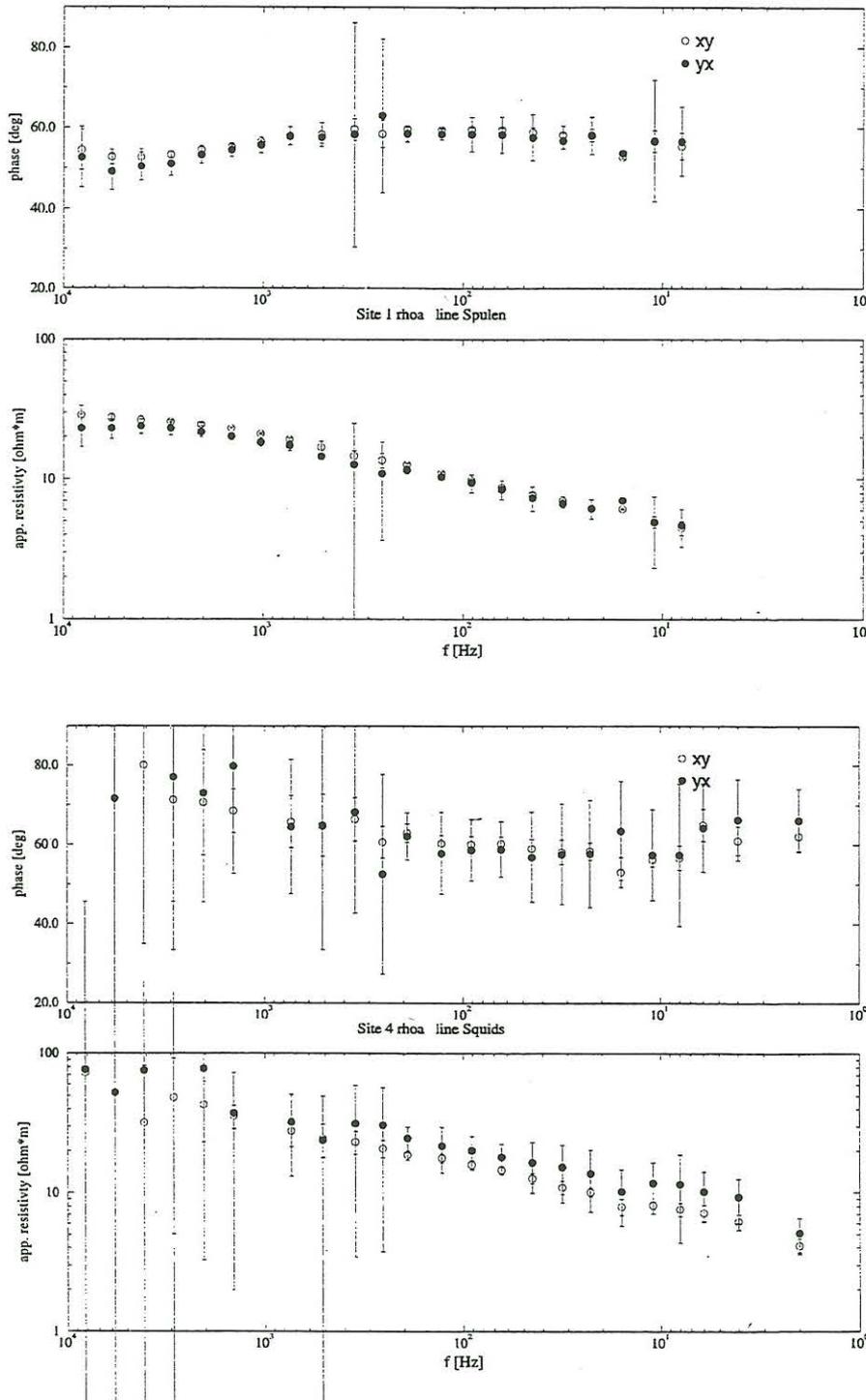


Abb. 5: Oberes Paar: Phase und Rhoa mit Induktionsspule. Unteres Paar: Mit SQUID

Ausblick

Die Lösung des Hauptproblems 1/f-Rauschen wird mit dem Einsatz von dc-SQUIDs versucht. Dieser Typ hat beim Einsatz in ungeschirmten medizinischen Anwendungen ein besseres 1/f-Verhalten als die von uns bislang verwendeten rf-SQUIDs. Optimierte Entwürfe (Koch et al., Dantsker et al.) zeigen ebenfalls für diesen Typ ein Entwicklungspotential, um unserem Ziel nahe zu kommen, ein Breitbandsystem zu erhalten, das bis in den MT-Bereich einsetzbar ist. Weitere Schwerpunkte liegen in der weiteren Verringerung des Rauschens und der thermischen Isolation der Elektronik. Besonders aussichtsreiche Anwendungen liegen auf dem Feld der Bohrlochsonden, da dort SQUIDs ihren Raumvorteil ohne Einbuße an Empfindlichkeit einbringen können. Im Rahmen eines Folgeprojekts ist daher an die Entwicklung einer TEM Bohrlochsonde gedacht.

Danksagung

Dieses Projekt ist eine Kooperation zwischen mehreren Partnern. Speziell die SQUID-Sensoren und die daran angepaßten Steuerungselektroniken für die hier vorgestellten Messungen stammen vom Forschungszentrum Jülich (FZJ). Weitere Partner sind das Institut für Physikalische Hochtechnologie (IPHT), Jena, die dc SQUIDs und dazu passende Elektroniken mit optimierten Rauschwerten für längere Perioden entwickeln sowie die Metronix GmbH, Braunschweig, die Geräte und Logistik für CSAMT beisteuern. Dieses Projekt wird finanziert durch das BMBF unter den Nm. 13N6446, 13N6527, 13N6519 und 13N6459.

Literatur

- Dantsker, E., Tanaka, S., Nilsson, P.-A., Kleiner, R., Clarke, J. 1996. *Reduction of 1/f noise in high T_c dc superconducting quantum interference devices cooled in an ambient magnetic field*. Appl. Phys. Lett., 69, 4099-4101.
- Kalberkamp, U., Rath, V. 1996. HTSL SQUID-Magnetometer für MT, CSAMT und TEM. In: Bahr, K., Junge, A. (Hg.), *Protokoll Elektromagnetische Tiefenforschung Burg Ludwigstein 1996*, 204-209.
- Koch, R.H., Sun, J.Z., Foglietta, V., Gallagher, W.J. 1995. *Flux dam, a method to reduce extra low frequency noise when a superconducting magnetometer is exposed to a magnetic field*. Appl. Phys. Lett., 67, 709-711.
- Spies, B. R. 1989. *Depth of investigation in electromagnetic sounding methods*. Geophysics, 54, 872-888.
- Zhang, Y., Zeng, X. H., Schubert, J., Zander, W., Rueders, F., Soltner, H., Banzet, M., Braginski, A. I. 1997. *Washer rf SQUID Magnetometers with Coplanar Resonators at 77 K*. ISEC'97 Berlin, Extd. Abstracts, Vol.1: Plenary Contributions, 51-53.