

# HTSL SQUID-Magnetometer für MT, CSAMT und TEM

U. Kalberkamp, V. Rath (TU Berlin)

## Motivation

SQUIDs (*Superconducting Quantum Interference Devices*) sind hochempfindliche Magnetfeld Sensoren, die spezielle Quanteneffekte bei Supraleitung (*Josephson Effekte*) ausnutzen. Gegenüber herkömmlichen Magnetfeldsensoren vereinen SQUIDs Rauscharmut ( $< 200 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$ ), Breitbandigkeit (DC - 10 kHz) und kompakte Abmessungen ( $70 \text{ cm} \times 30 \text{ cm } \varnothing$ ). Sie eignen sich daher besonders für hochauflösende Arrayanordnungen, wie sie für mehrdimensionale Auswertemethoden wünschenswert sind.

SQUIDs wurden seit Mitte der 60er Jahre aus den klassischen Tieftemperatur Supraleitern (z.B. Niobverbindungen) hergestellt, benötigten zur Kühlung daher flüssiges Helium (4,2 K), das aufgrund seiner niedrigen Verdampfungswärme nur mit großem Aufwand in flüssigem Zustand gehalten werden kann. Insgesamt haben die mit der Heliumkühlung verbundenen Komplikationen die Verwendung von solchen SQUID-Systemen für Geländemessungen (bis auf vereinzelte Ausnahmen) verhindert. Einen zusammenfassenden Überblick der bis 1980 mit solchen Systemen durchgeführten Anwendungen, findet man in Weinstock und Overton (1981). Mit den neuen Hochtemperatursupraleitern (HTSL; z.B. Yttrium-Barium-Kupferoxid, YBCO) genügt die Kühlung mit flüssigem Stickstoff (77 K), wodurch die Handhabung erheblich vereinfacht und ungefährlich geworden ist.

Ziel des laufenden Projekts ist die Entwicklung und Erprobung eines HTSL-SQUID-Systems für MT, CSAMT und TEM mit folgenden Kenndaten:

- kompaktes triaxiales System
- Frequenzbereich DC - 10 kHz mit einem Sensor
- weißes Eigenrauschen  $< 40 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$
- *slew rate*  $> 2 \cdot 10^5 \text{ nT/s}$
- Dynamikbereich  $> 100 \text{ dB}$

## Grundkonzept

Wir verwenden HF-SQUIDs (Abb. 1) aus YBCO Material mit der dazu notwendigen Modulations- und Rückkopplungselektronik. Vorteile dieser Bauart gegenüber der anderen möglichen Bauform, den DC-SQUIDs, sind

- es wird nur ein Josephson Kontakt benötigt, d.h. die Herstellung ist einfacher
- induktive Ankopplung des SQUIDs an die Elektronik (kein galvanischer Kontakt nötig)

Ein Nachteil der HF-SQUIDs ist die HF-Modulation (300 MHz) des SQUID Stromes. Sie beschränkt u.a. die Schnelligkeit der Rückkopplung.

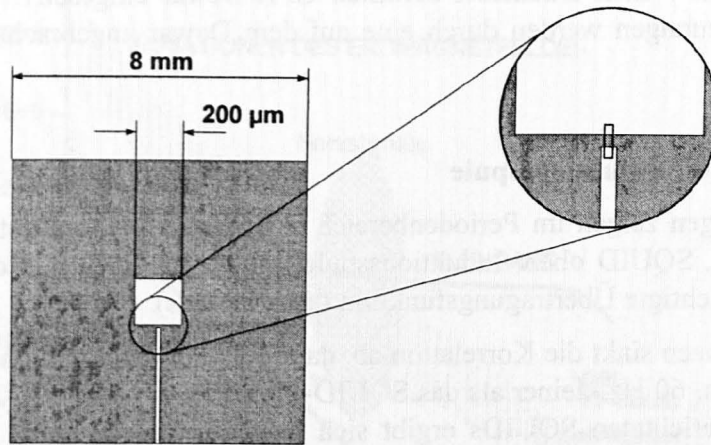


Abb. 1: Schematische Darstellung der verwendeten HF-SQUIDs.

Die Aufgabe der Elektronik (Abb. 2) besteht einerseits darin, das SQUID mit Energie zu versorgen (durch die HF-Modulation) so daß sich der sog. Josephson-Wechselstrom-Effekt einstellt und nach der Demodulation eine in Abhängigkeit vom magnetischen Fluß periodische Ausgangsspannung meßbar ist. Da die Spannungswerte periodisch wiederkehren wenn sich der Fluß um mehr als ein sog. Flußquantum  $\Phi_0$  (das entspricht bei der verwendeten SQUID Geometrie etwa 1,9 nT) ändert, muß andererseits durch eine geeignete Rückkopplung ein Gegenfeld im SQUID erzeugt werden, das einen einmal festgelegten Arbeitspunkt auf der Kurve festhält. Die dafür notwendige Regelspannung stellt das Maß für den magnetischen Fluß durch den SQUID dar. Die Regelung wird in unserem System digital realisiert, womit durch einen Flußquantenzähler und -rücksetzer eine Dynamik von über 190 dB erreicht wird. Die Regelparameter können bestimmten Signalformen (z.B. TEM) einfach angepasst werden. Nachteilig ist die niedrige obere Grenzfrequenz, die durch die Geschwindigkeit der digitalen Regler auf 1 kHz beschränkt ist. Für die weiter unten gezeigten TEM Messungen wurde daher eine auf Regelschnelligkeit optimierte Analogelektronik verwendet.

## Digitale Rückkopplungselektronik

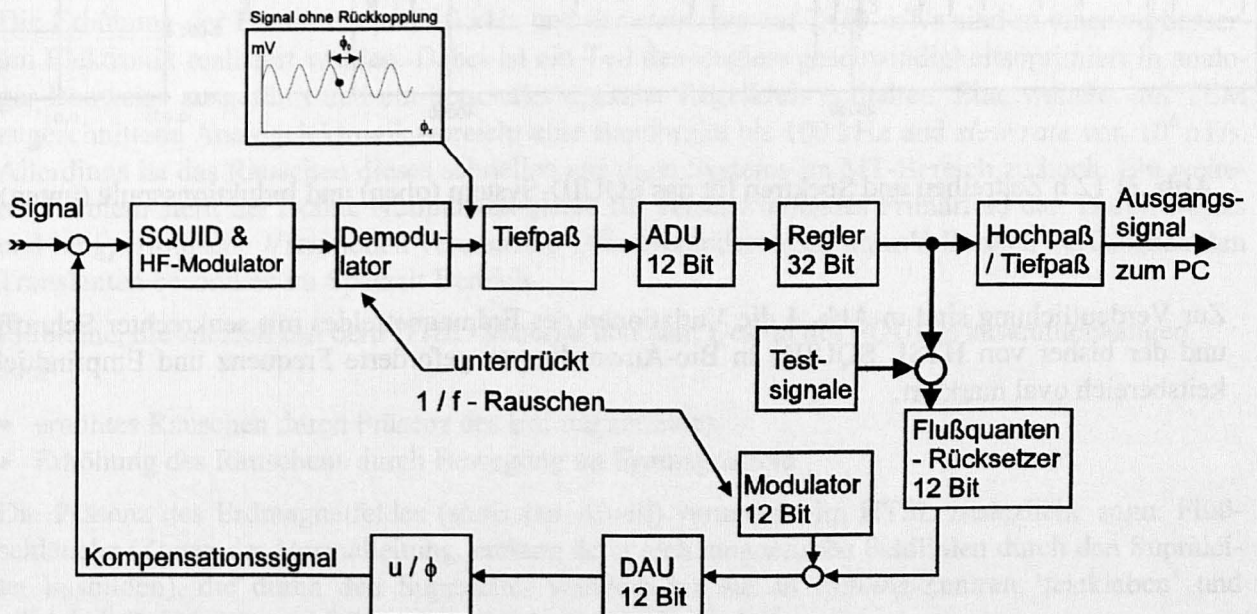


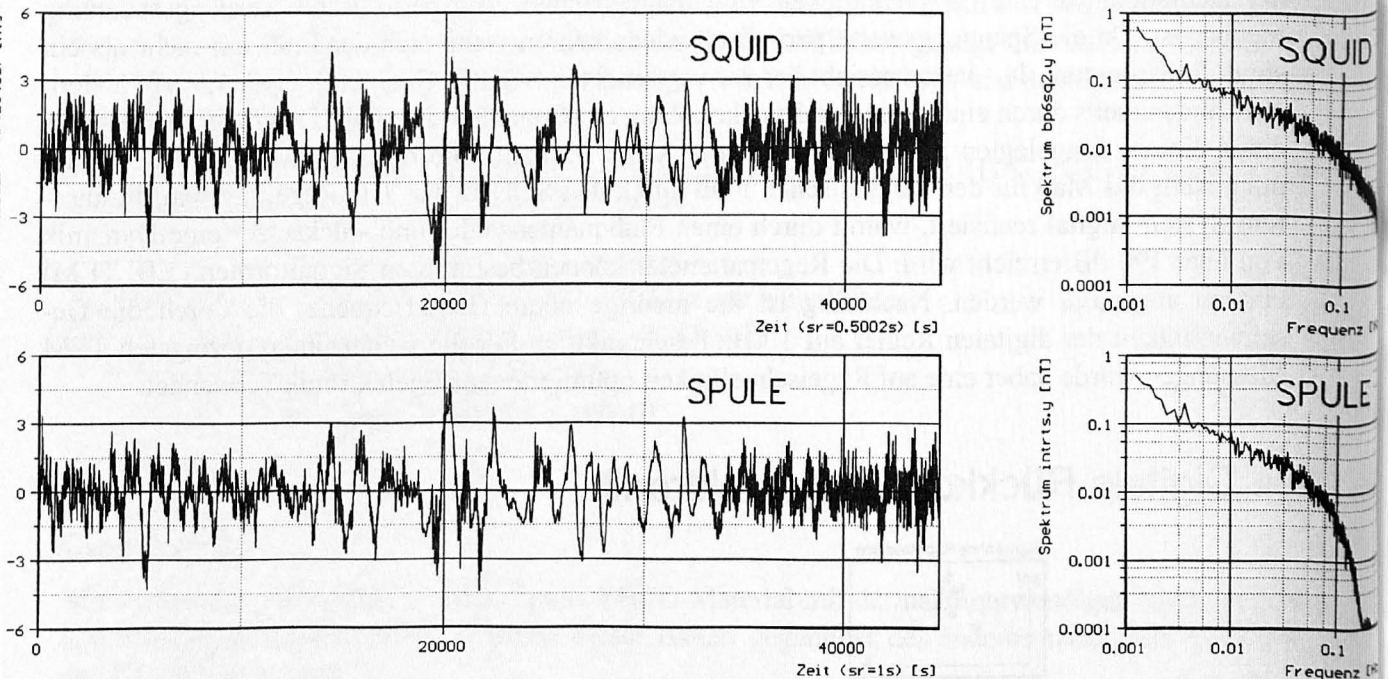
Abb. 2: Blockbild der digitalen SQUID Elektronik.

Die drei SQUIDs sind mit den Koppelspulen in einem Kopf orthogonal eingebaut und werden zum Betrieb 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 gedämpft.

### Vergleich SQUID vs. Induktionsspule

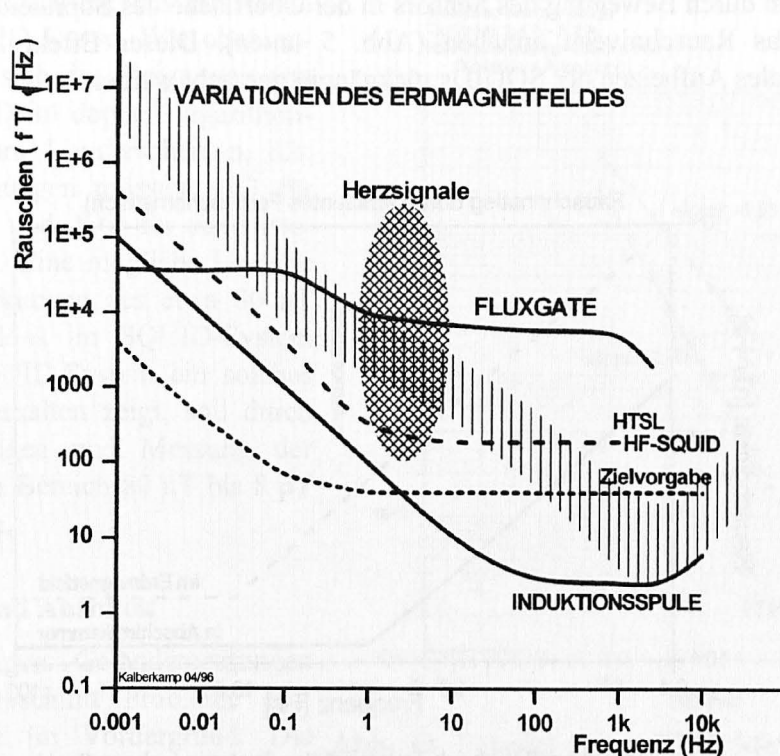
Parallelregistrierungen zeigen im Periodenbereich von 1000 s bis ½ s gute Übereinstimmung der Zeitreihen (Abb. 3, SQUID oben, Induktionsspule unten). Im Spektrum der Spule zeigt sich die noch nicht berücksichtigte Übertragungsfunktion (ab etwa 10 s).

Für höhere Frequenzen sinkt die Korrelation ab, da die Stärke der natürlichen Feldvariationen stark abnimmt und bei ca. 60 Hz kleiner als das SQUID-Rauschen ist. Aus der Kohärenzauswertung von zwei parallel ausgerichteten SQUIDs ergibt sich insgesamt der in Abb. 4 gezeigte Verlauf der Rauschdichte im Vergleich mit Fluxgate (Bartington) und Induktionsspule (MFS 05, Metronix).



**Abb. 3:** 12 h Zeitreihen und Spektren für das SQUID-System (oben) und Induktionsspule (unten).

Zur Verdeutlichung sind in Abb. 4 die Variationen des Erdmagnetfeldes mit senkrechter Schraffur und der bisher von HTSL SQUIDs in Bio-Anwendungen geforderte Frequenz und Empfindlichkeitsbereich oval markiert.



**Abb. 4:** Vergleich der Rauschspektren von SQUID, Induktionsspule (MFS05, Metronix) und Fluxgate (Bartington).

### Probleme

Wie aus der Rauschkurve Abb. 4 ersichtlich ist, können mit dem derzeitigen HTSL-HF-SQUID-System ab etwa 60 Hz nur aktive Methoden (CSAMT, TEM) durchgeführt werden. Die Senkung des weißen Rauschens auf  $40 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$  und der Einsatz des  $1/f$  Rauschens bei Frequenzen  $< 0,1 \text{ Hz}$  sind angestrebte realistische Zielwerte, die durch ein an die geophysikalischen Bedingungen angepaßtes SQUID Design gelöst werden sollen.

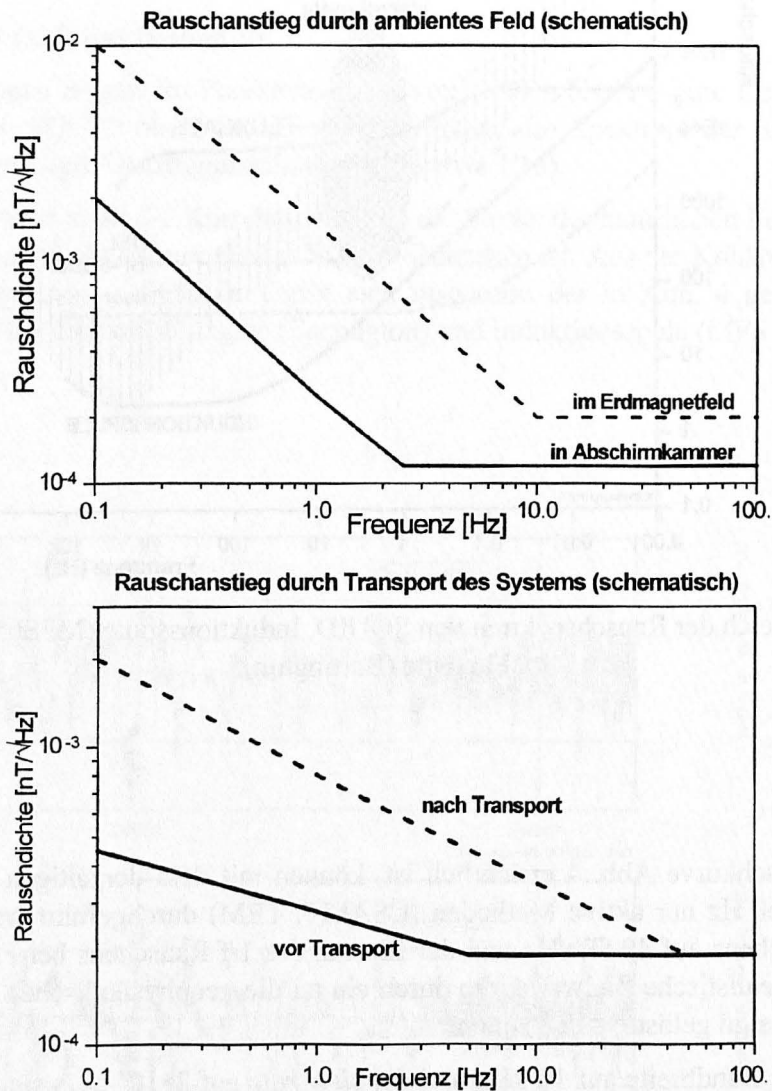
Die Erhöhung der Bandbreite auf 10 kHz und der *slew rate* auf  $2 \cdot 10^5 \text{ nT/s}$  sind in einer verbesserten Elektronik realisiert worden. Dabei ist ein Teil des Reglers geschwindigkeitsoptimiert in analoger Bauweise ausgeführt und ein optionaler digitaler Regelkreis enthalten. Eine weitere, auf TEM zugeschnittene Analogelektronik, erreicht eine Bandbreite bis 100 kHz und *slew rate* von  $10^6 \text{ nT/s}$ . Allerdings ist das Rauschen dieses schnellen analogen Systems im MT-Bereich zu hoch. Ein weiteres Problem stellt der exakte Nullpunktgleich für verschwindendes Primärfeld dar. Durch Resets und langperiodische Variationen verursachte Offsetveränderungen im mV-Bereich verfälschen den Transienten besonders im Spätzeit Bereich.

Probleme, die speziell mit dem HTSL-Material und dem Design des SQUIDs zusammenhängen, sind

- erhöhtes Rauschen durch Präsenz des Erdmagnetfeldes
- Erhöhung des Rauschens durch Bewegung im Erdmagnetfeld

Die Präsenz des Erdmagnetfeldes (statischer Anteil) verursacht im HTSL zusätzliche sog. Flußschläuche (Zonen der Normalleitung, entlang derer sich magnetische Feldlinien durch den Supraleiter ausbilden), die durch den Supraleiter wandern bis sie an *Pinning*-Zentren 'festkleben' und vibrieren. Beides trägt zum Rauschanstieg bei (Abb. 5 oben).

Weiterhin werden durch Bewegung des Sensors in der Oberfläche des Supraleiters Abschirmströme induziert, die das Rauschniveau anheben (Abb. 5 unten). Dieser Effekt kann partiell durch kurzzeitiges, lokales Aufheizen der SQUIDs rückgängig gemacht werden.



**Abb. 5:** Anstieg des SQUID-Rauschens durch statisches Feld (oben) und Bewegung des Systems im Erdmagnetfeld (unten).

### Beispiel einer TEM Messung

TEM-Messungen erfordern im Vergleich zu CSAMT eine größere Bandbreite und *slew rate* des Systems. Die oben erwähnte analoge Elektronik erreicht Werte, mit der TEM Messungen im Zeitbereich von 300  $\mu$ s an und mit einem 100 x 100 m<sup>2</sup>, 5 A Sender möglich sind. Da mit SQUIDs  $B$  und nicht  $\partial B/\partial t$  gemessen wird und das  $B$ -Feld langsamer (mit  $t^{-3/2}$ ) abklingt als die zeitliche Ableitung (mit  $t^{-5/2}$ ), bedeutet die Verwendung von  $B$ -Feld Sensoren in der TEM einen Gewinn an Erkundungstiefe und senkt den Dynamikumfang des Transienten. In der in Abb. 6 gezeigten Messung kann dies jedoch nicht ausgenutzt werden, da das Rauschen des SQUID-Systems den prinzipiellen Vorteil aufzehrt. Im Vergleich zeigt sich deutlich, daß mit der koinzidenten Empfangsspule selbst bei geringen Sendeströmen von 2,4 A auch im späten Zeitbereich sehr gut reproduzierbare Ergebnisse erzielbar sind (Abb. 6 untere Kurve), während die mit dem SQUID-System aufgezeichneten Werte auch bei 5,8 A im Spätzeitbereich streuen.

Unklar ist eine Erklärung des zu steilen Abfalls der SQUID Kurve. Wie oben angegeben, sollten sich die Steigungen von Spule und SQUID im doppelt logarithmischen Maßstab um 1 unterscheiden, d.h. die SQUID-Steigungen müssten  $-1,3$  für den früheren Teil und  $-0,61$  für den späteren Teil betragen. Eine mögliche Ursache könnten Nachwirkungen des etwa  $80 \text{ nT}$  starken Primärfeldes im SQUID-System sein. Ob das SQUID-System ein solches nicht lineares Verhalten zeigt, soll durch Klirrfaktormessungen und Messung der Sprungantwort im Bereich  $80 \text{ nT}$  bis  $8 \text{ pT}$  untersucht werden.

### Anwendungen und Ausblick

Bei den bisherigen Geländemessungen standen die im Abschnitt 'Probleme' aufgeführten Punkte im Vordergrund. Die damit verbundenen Verbesserungen des SQUID-Systems verursachen auch Veränderungen der Übertragungsfunktion, die aus Zeitgründen nur exemplarisch und in einem eingeschränkten Frequenzbereich bestimmt wurde. Es liegen daher keine kalibrierten MT- bzw. CSAMT-Registrierungen vor. Für zukünftige SQUID-Systeme suchen wir deshalb eine geeignete Kalibriereinrichtung (z.B. Helmholtzspulensystem) in elektromagnetisch ruhiger Umgebung. Auch für die oben erwähnten Messungen der Linearität suchen wir einen ausreichend ruhigen Ort an dem wir Laborgeräte zeitweilig installieren können. Glatte Kurvenverläufe von MT und CSAMT Messungen in eingeschränkten Frequenzbereichen zeigen jedoch die Eignung für diese Verfahren, wobei für MT die Langzeitstabilität über mehrere Tage noch zu untersuchen ist. Die Standzeit des Systems beträgt z.Z. 4 Tage, läßt sich aber durch Wärmetauscher ('Kühlkörper') an den Zuführungsleitungen mindestens verdoppeln. Für AMT liegt das Grundrauschen der SQUIDs zu hoch.

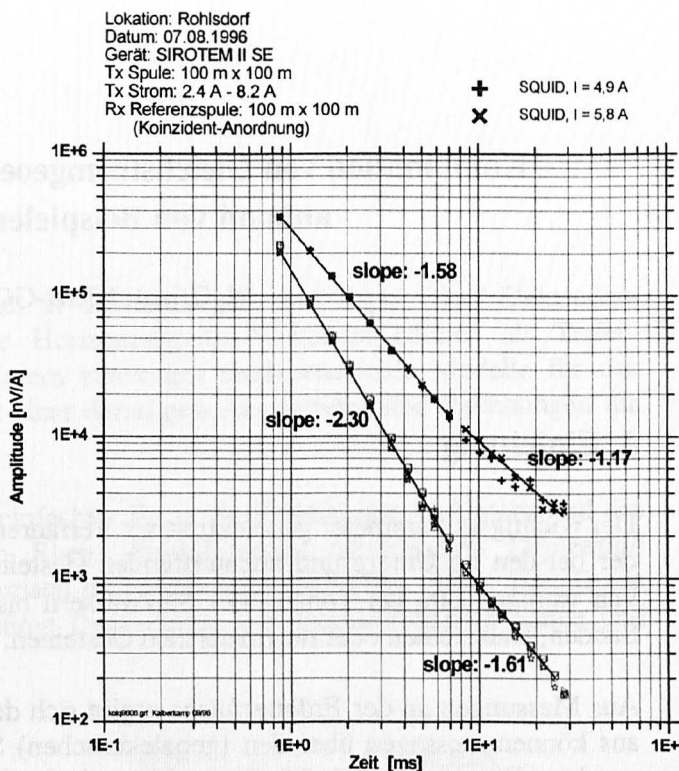
Aus der Kompaktheit eines triaxialen SQUID-Systems ergeben sich logistische Vorteile, die erweiterte Anwendungsbereiche bei Array- und Bohrlochmessungen erschließen.

### Danksagung

Dieses Projekt ist eine Kooperation zwischen mehreren Partnern. Speziell die SQUID-Sensoren und die daran angepaßten Steuerungselektroniken stammen vom Forschungszentrum (KFA) Jülich. Weitere Partner sind das Institut für Physikalische Hochtechnologie (IPHT), Jena und die Metronix GmbH, Braunschweig, die Geräte und Logistik für CSAMT und MT beisteuern. Besonderer Dank gilt S. Greinwald, G. Schaumann und G. Sandmann von der BGR, Hannover für ihre Unterstützung bei den TEM Messungen. Dieses Projekt wird finanziert durch das BMBF unter der Nr. 13N6446.

### Literatur

Weinstock, H., Overton, W.C. (Hg.) 1981. SQUID Applications to Geophysics. SEG, Tulsa.



**Abb. 6:** Beispiel einer TEM Messung. Symbole = Meßwerte aus jeweils 1024 Stapelungen, Linien = stückweise Ausgleichsgeraden mit Angabe der Steigung. Untere Werte: Referenzspule, 8 Messungen übereinandergezeichnet ( $I = 2,8 \text{ A}$  bis  $8,2 \text{ A}$ ). Obere Werte: SQUID-System, 2 Messungen übereinandergezeichnet ( $I = 4,9 \text{ A}$  und  $5,8 \text{ A}$ ).