

# Einsatz von HTS-DC-SQUIDS in der TEM

Andreas Chwala, IPHT Jena, PF 100239, 07702 Jena, chwala@ipht-jena.de  
Dr. Bernhard Friedrichs, metronix, Kocherstrasse 3, 38120 Braunschweig

## Abstract

Wir stellen ein SQUID-Magnetometer-System auf der Basis von Hochtemperatur-Supraleitern vor, das speziell für die Anwendung in der Transienten Elektromagnetik (TEM) entwickelt wurde. Es wird gezeigt, daß Messungen mit SQUID-Magnetometern insbesondere im späten Zeitbereich deutliche Vorteile gegenüber konventionellen Spulen bieten: Spulen messen  $dB/dt$ , die zeitliche Ableitung des magnetischen Feldes, welche mit zunehmender Zeit verschwindet; das SQUID misst hingegen  $B$  direkt und kann den Transienten solange verfolgen, bis er in dem natürlichen Feldrauschen untergeht. Dadurch kann im Explorationsgeschäft eine erhebliche Kostenersparnis verbunden werden, da mit SQUIDS bei gleicher Signalqualität viel weniger Mittelungen als mit Spulen nötig sind. Andererseits wird mit SQUIDS eine erweiterte Explorationstiefe möglich.

## Einleitung

Magnetfeldsensoren auf der Basis von SQUID-Magnetometern sind die empfindlichsten Sensoren für magnetische Felder. Trotzdem ist ihr Einsatz in der Geophysik noch immer sehr eingeschränkt. Hauptgründe dafür sind die Komplexität eines SQUID-Systems und die Notwendigkeit der Kühlung [1]. Durch die Entwicklung von Hochtemperatur-Supraleitern wurde der Einsatz von SQUIDS außerhalb des Labors wieder interessant, da die Kühltechnik für 77 K (flüssiger Stickstoff) wesentlich einfacher zu realisieren und zu handhaben ist als für 4,2 K (flüssiges Helium). Unser Bestreben war es daher, ein SQUID-System zu entwickeln, das möglichst einfach zu bedienen ist und trotzdem alle Vorteile der SQUID-Sensoren für den Anwender zugänglich macht.

## Was sind SQUIDS?

SQUID steht als Abkürzung für "Superconducting Quantum Interference Device". Ein supraleitender Ring wird durch zwei Schwachstellen (Josephson junctions) unterbrochen (Abbildung 1). Bei geeigneter Stromspeisung fällt über den Kontakten eine Spannung ab, die abhängig ist vom magnetischen Fluß, der den supraleitenden Ring durchsetzt (Abbildung 2). Die SQUID-Spannung weist eine Periode auf, die genau einem magnetischen Flußquant ( $1\Phi_0=2,07\times 10^{-15}\text{Vs}$ ) entspricht. Maximale Empfindlichkeit gegenüber dem eingekoppelten Fluß besitzt der SQUID an der Stelle des maximalen Anstiegs, die in der Abbildung mit "Arbeitspunkt" gekennzeichnet ist.

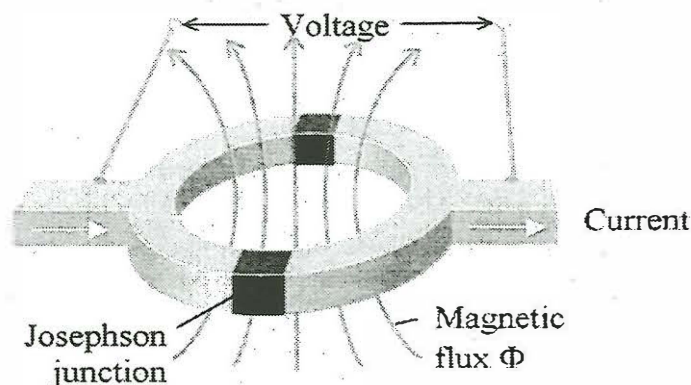


Abbildung 1: Prinzipskizze eines dc SQUIDS.

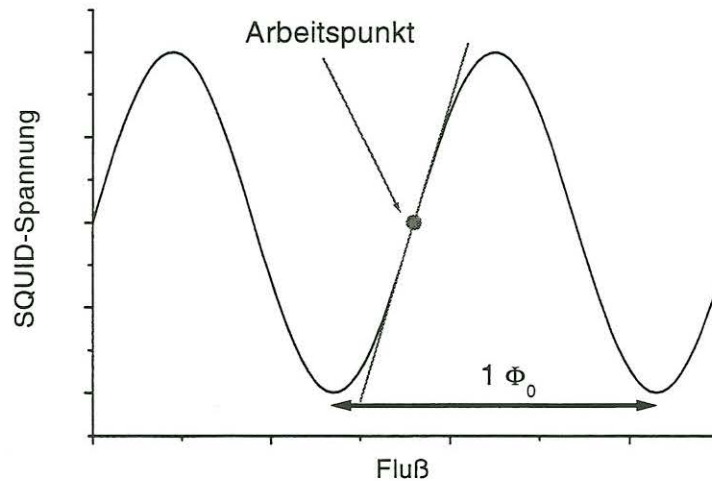


Abbildung 2: Fluß-Spannungskennlinie eines SQUIDs.

Um diese Spannung meßtechnisch nutzbar zu machen, wird eine Flußregelschleife (Flux Locked Loop) verwendet: mit einer Rückkoppelelektronik (auch FLL-Elektronik genannt) wird ein Strom generiert, der über eine Rückkoppelspule den externen magnetischen Fluß kompensiert und den Fluß im SQUID im Arbeitspunkt konstant hält (Abbildung 3). Die Ausgangsspannung des Systems ist die Spannung der Flußkoppelschleife und damit proportional zum externen Magnetfeld.

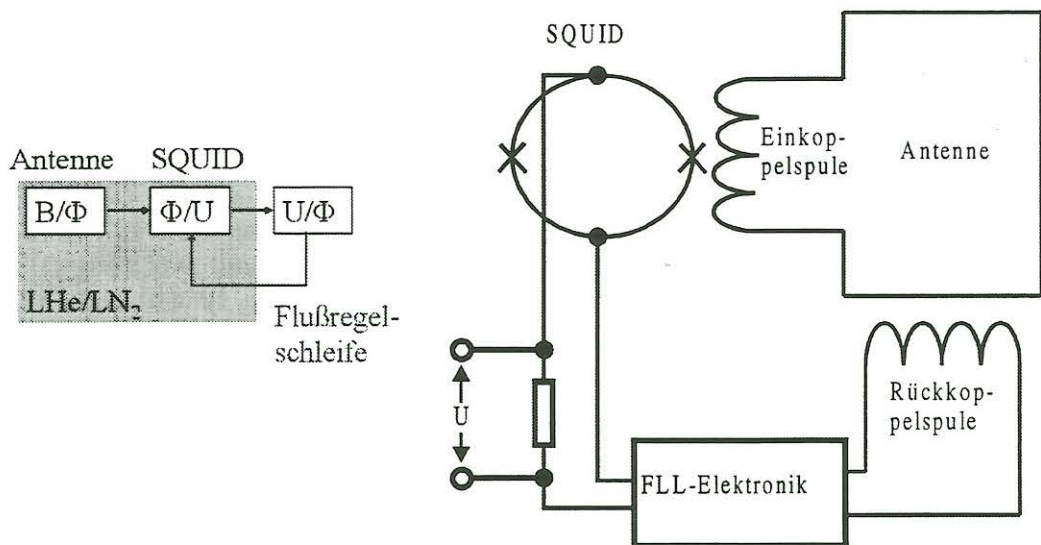


Abbildung 3: Prinzipskizze der Flußregelschleife zur Linearisierung der SQUID-Kennlinie.

Damit der SQUID-Sensor empfindlich wird für magnetische Felder, muß möglichst viel magnetischer Fluß in den SQUID-Ring eingekoppelt werden. Der SQUID-Ring selber kann nicht beliebig groß gemacht werden, da sonst der nutzbare Spannungshub zusammenbricht. Daher muß über eine zusätzliche Antenne mit großer Fläche magnetischer Fluß in den SQUID gekoppelt werden. In den in unserem System verwendeten Magnetometern wird eine flip-chip-Konfiguration benutzt: Eine  $8 \times 8 \text{ mm}^2$  große Antenne wird induktiv über eine planare Spule mit 15 Windungen an den SQUID-Washer (Washer: supraleitende Fläche mit Schlitz oder Loch zur Flußfokussierung) gekoppelt [2]. Antenne und SQUID werden mit den Beschichtungsseiten zueinander positioniert (Abbildung 4).

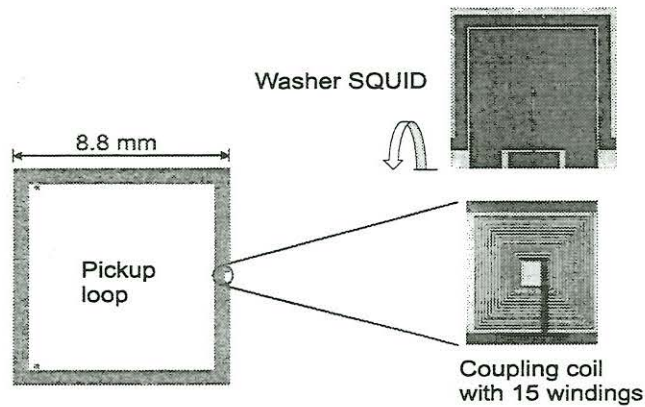


Abbildung 4: Flip chip Konfiguration des dc SQUIDs; Aufsicht auf die Beschichtungsseiten der Substrate.

## Systemaufbau

Das am IPHT entwickelte und aufgebaute SQUID-Magnetometer wurde auf die speziellen Anforderungen in der Geophysik abgestimmt. Die Bedienung des Systems wurde so weit vereinfacht, daß es auch durch ungeschultes Personal leicht in Betrieb genommen werden kann [3].

Durch die Verwendung eines kleinen, flachen Kryostaten ist es bei diesem System nun nicht mehr nötig, den Kryostaten zum Schutz gegen Bewegungen im Wind einzugraben. Der SQUID ist am Boden des Kryostaten montiert, was seine Empfindlichkeit gegenüber Bewegung minimiert.

Kryostat und Spannungsversorgung sind so dimensioniert, daß das System einen 14stündigen Arbeitstag lang betrieben werden kann. Im Kryostaten ist desweiteren eine nichtmagnetische Füllstandsanzeige integriert. An der Kontrolleinheit kann jederzeit die Versorgungsspannung kontrolliert werden; Warn-LEDs verkünden, wenn der Betrieb kritisch wird.

Ein wichtiger Punkt beim Systemaufbau ist die SQUID-Elektronik, da sie letztendlich über die nutzbaren SQUID-Parameter wie Bandbreite und slew rate entscheidet. Wir verwenden eine direkt gekoppelte Elektronik [4], die eine Bandbreite von ca. 1 MHz hat.

Ein symmetrischer Linetreiber-Ausgang kann zum Anschluß beliebiger Receiver auch über längere Entfernungen genutzt werden; getestet wurde dies an Zonge GDP32 und GDP16, PROTEM und LAPTEM.

Tabelle 1 faßt alle wichtigen Parameter des Systems zusammen, Abbildung 5 zeigt das gesamte System.

Tabelle I  
Parameter des DC SQUID Systems

Parameter	DC SQUID TEM System
Bandbreite	dc bis 10 kHz (begrenzt durch HF-Schirmung)
Weißes Rauschen	30 fT/ $\sqrt{\text{Hz}}$ @ 10kHz
Niederfrequentes Rauschen	1 pT/ $\sqrt{\text{Hz}}$ @ 1Hz (im Labor) 2 pT/ $\sqrt{\text{Hz}}$ @ 1Hz (im Feld)
Slew rate	3 mT/s
Stromverbrauch	< 1 W
Haltezeit flüssiger Stickstoff	> 1 Tag
Gewicht	13 kg (inkl. flüssigem Stickstoff)



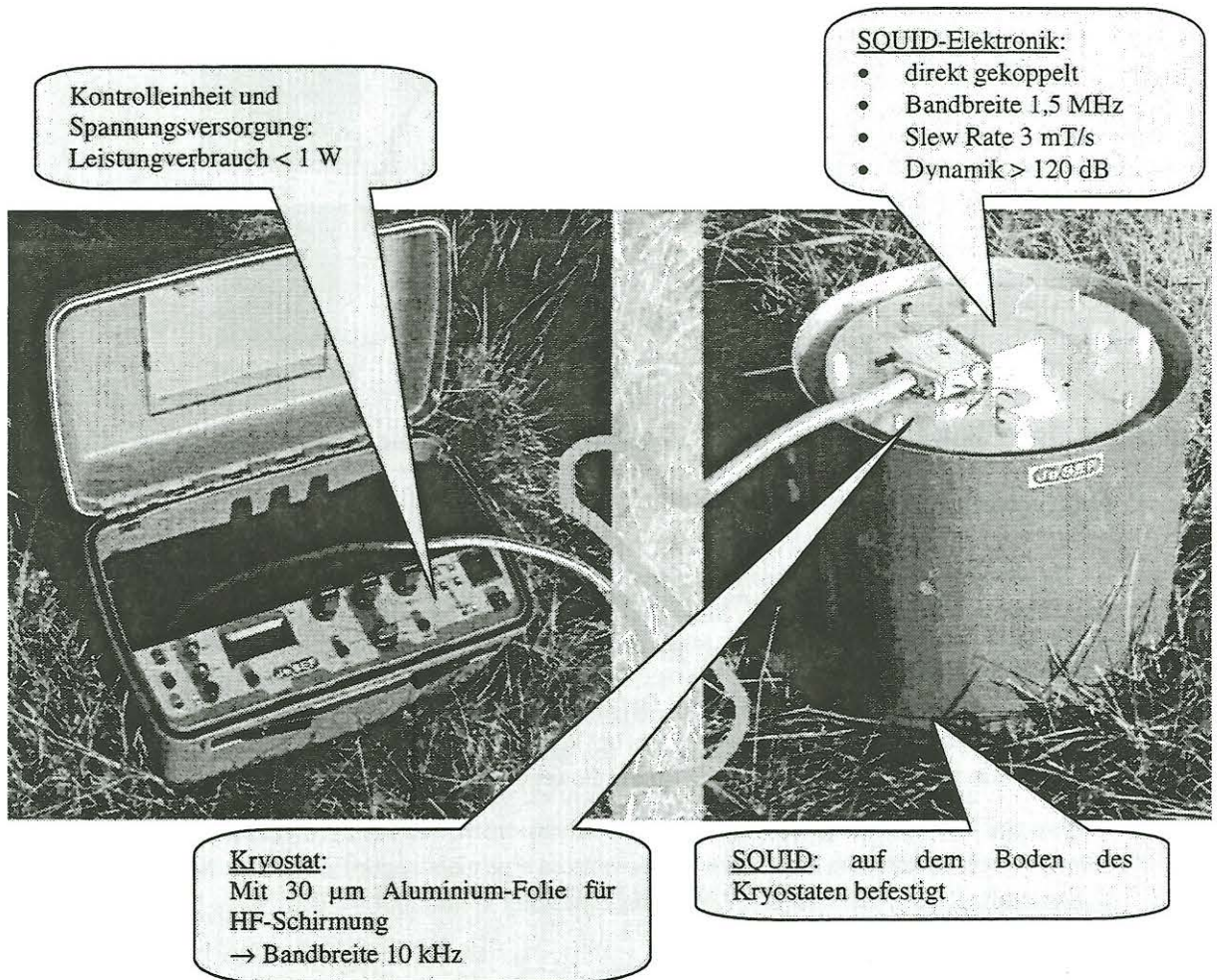


Abbildung 5: Das komplette SQUID-System im Feldeinsatz.

## TEM-Messungen mit dem SQUID-System

In Feldexperimenten in Deutschland, China, Australien, Spanien und Südafrika wurde das SQUID-System in verschiedenen Ausbaustufen erfolgreich getestet. In allen Fällen wurde zum Vergleich auch mit einer konventionellen Induktionsspule gemessen.

Abbildung 6 zeigt exemplarisch Transienten von konventioneller Spule und SQUID-Magnetometer, gemessen in Südspanien nahe Sevilla. Die Sendespule 100m×100m wurde durch einen Transmitter Zonge GGT-3 gespeist, als Transienten-Recorder kam eine Zonge GDP32 zum Einsatz.

Wie man sieht, ist der Transient im Magnetfeld wesentlich flacher als in der induzierten Spannung; zum Vergleich wurde auch der aus dem SQUID-Signal auf induzierte Spannung rückgerechnete Transient mit dargestellt. Es ist ersichtlich, daß das SQUID bis mindestens 200ms noch aussagekräftige Werte liefert; das Spulen-Signal ist ab 30ms verrauscht.

Unterhalb von 2ms war der Eingangverstärker des Receivers für die Spule noch übersteuert; ein weiterer Vorteil der direkten Magnetfeldmessung ist also auch der geringere notwendige Dynamikumfang.

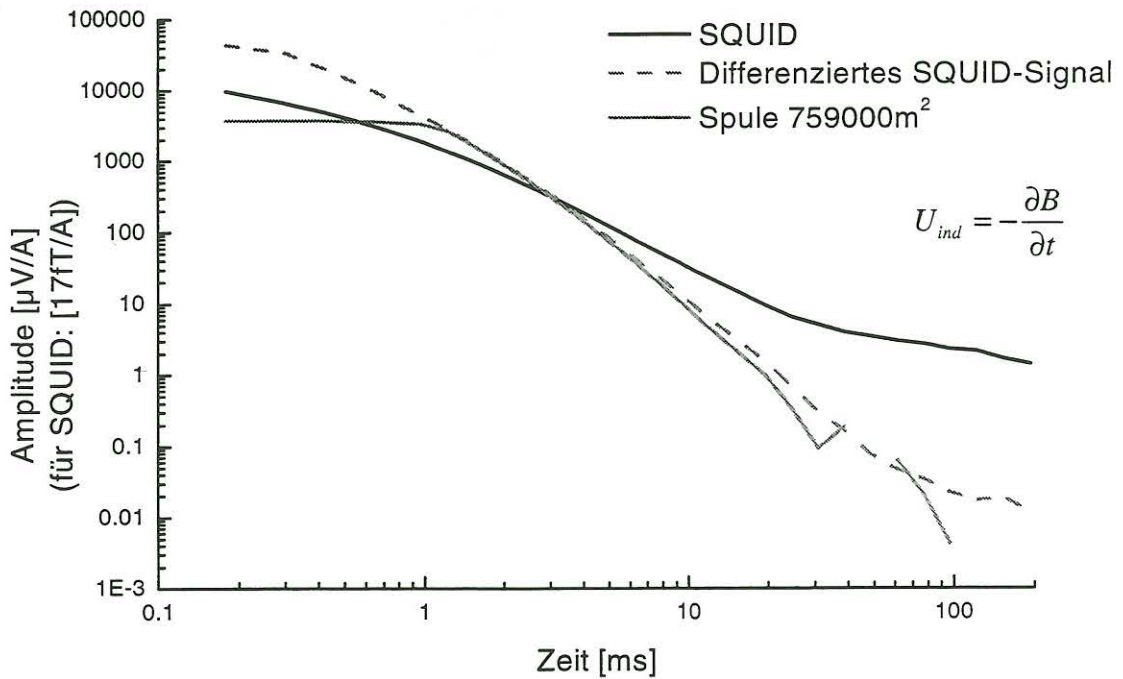


Abbildung 6: Transienten von Luftspule und SQUID-Magnetometer im Spulenzentrum.

Messungen in Australien, die gemeinsam mit Geotrex und BHP durchgeführt wurden, zeigten an allen Stationen des Profils einen zu späten Zeiten ins Negative fallenden Transienten, was bisher nur wenig verstanden wurde (Abbildung 7). Auf dem diesjährigen EMTF-Kolloquium zeigte sich allerdings, daß dieser Effekt durchaus meßtechnisch oder geophysikalisch zu erklären ist (vgl.[5], [6]). Weitere Untersuchungen werden in naher Zukunft hoffentlich zeigen, wie auch solche ungewöhnlichen Transienten ausgewertet werden können.

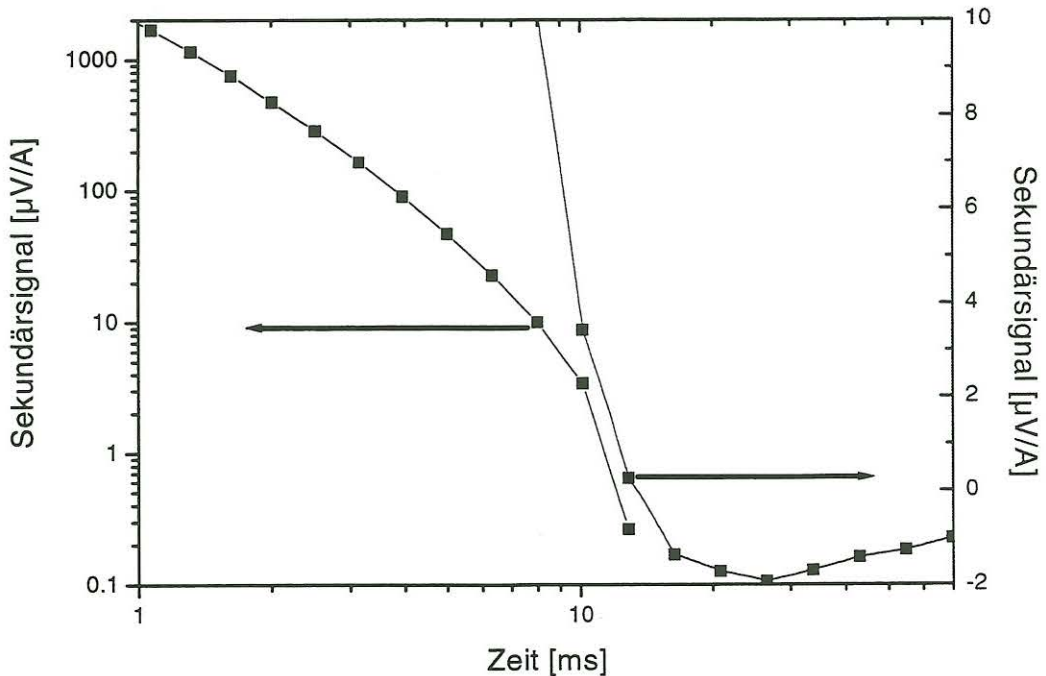


Abbildung 7: Typischer Transient aus dem Profil der Meßkampagne in Australien (1998), [7]. Die rechte Kurve ist dabei linear skaliert, um den bei logarithmischer Darstellung nicht sichtbaren negativen Teil des Transienten darzustellen (Pfeile zeigen auf die korrespondierenden Achsen).

Abschließend sei noch ein in Südafrika gemeinsam mit AAC gemessenes Profil gezeigt: Abbildung 8. Hier wurde mit einer Transmitterpule von 500m×500m gearbeitet, als Transienten-Recorder kam eine GDP-16 von Zonge zum Einsatz. Während die Transmitterpule liegen blieb, wurde das Profil simultan mit Empfängerspule TEM/3 und SQUID quer über die Sendespule gemessen; die äußeren Punkte liegen außerhalb der Sendespule.



Während der gesamten Meßkampagne lieferte die Spule verwertbare Signalqualität bis ca. 2 ms (300-400 Averages), wohingegen die SQUID-Daten mit gleicher Anzahl von Averages bis 200 ms ungestört sind.

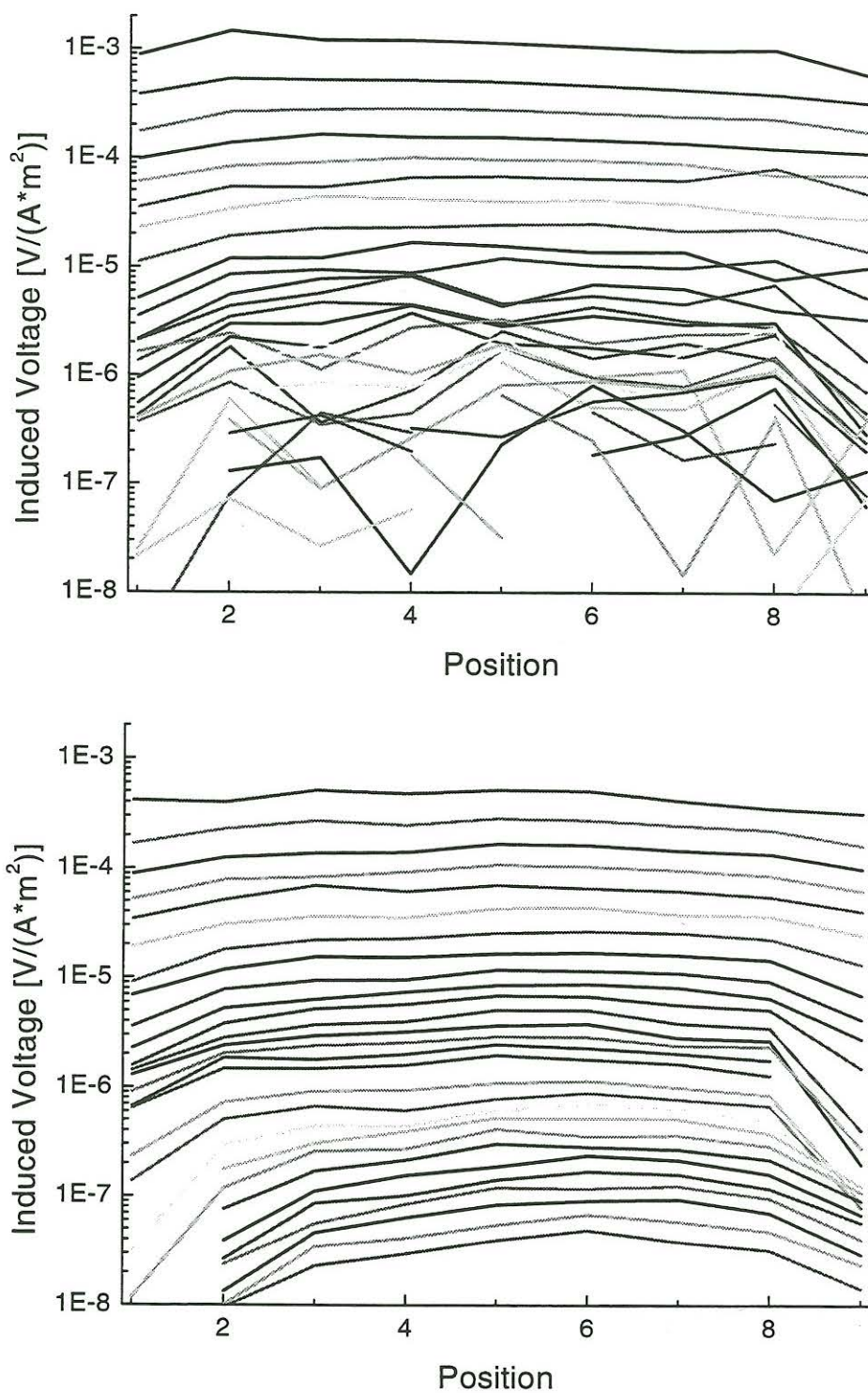


Abbildung 8: TEM-Profil gemessen mit konventioneller Induktionsspule (TEM/3, oberes Profil) und SQUID-Magnetometer vom IPHT Jena (unten). Zu Vergleichszwecken wurden die SQUID-Daten in induzierte Spannung umgerechnet. Die Transienten entsprechen Zeiten von 240µs bis 195ms (Spule) bzw. 360µs bis 155ms (SQUID, erster und letzter Transient fallen wegen Differenzierung weg).

## Zusammenfassung

Die Entwicklung von SQUID-Systemen ist am IPHT mittlerweile so weit gediehen, daß sie für einen Einsatz im sogenannten *production mode* im geophysikalischen Alltag geeignet sind. HTS-SQUIDs haben ihre Überlegenheit gegenüber konventionellen Sensoren in der TEM und LOTEM gezeigt. So konnten in verschiedenen Experimenten um den Faktor 6 bis 100 längere Transienten aufgenommen werden, was einer Vergrößerung der Explorationstiefe um den Faktor 2,5 bis 10 entspricht. Eine Spule bräuchte typischerweise für die Erzielung einer vergleichbaren Datenqualität eine um den Faktor 100 längere Meßzeit (bei stochastischer Rauschquelle). Allerdings steigt mit verlängerter Meßzeit auch die Wahrscheinlichkeit von einzelnen starken magnetischen Störereignissen (z.B. sferics oder vorbeifahrende Fahrzeuge).

Auch andere aktive Methoden sollten von den Vorteilen der HTS-SQUIDs profitieren können. Für einen Einsatz in der passiven Elektromagnetik (AMT, MT) ist die Empfindlichkeit der verfügbaren HTS-SQUID-Sensoren noch nicht ausreichend. Allerdings ist der Einsatz von Tieftemperatur-SQUIDs hier vielleicht ein Ausweg, denn sie bieten eine unschlagbare Magnetfeldempfindlichkeit, die eventuell den größeren Aufwand in der Kryotechnik rechtfertigt.

## Literatur

- [1] A.I. Braginski,, "Superconducting electronics coming to market," *IEEE Trans. Appl. Supercond.* vol. 9, pp. 2825-2836, Apr. 1999.
- [2] J. Ramos, R. IJsselsteijn, R. Stolz, V. Zakosarenko, V. Schultze, A. Chwala, H.-G. Meyer, and H. E. Hoenig, "Key components for the fabrication of YBaCuO flip-chip SQUID magnetometers and current sensors," *Supercond. Science & Technol.*, vol. 11, pp. 887-890, 1998.
- [3] A. Chwala, V. Schultze, R. Stolz, J. Ramos, R. IJsselsteijn, D. Kretzschmar, and H.-G. Meyer, "An HTS dc SQUID system in competition with induction coils for TEM applications", to be published in *Physica C*.
- [4] D. Drung, "Advanced SQUID read-out electronics," in: *SQUID Sensors: Fundamentals, Fabrication and Applications*, NATO ASI Series, Ed. H. Weinstock, Kluwer Academic Publishers, pp. 63-116, 1996.
- [5] G.Panaitov, M. Bick, Y. Zhang, „Peculiarities of the HTS SQUID Magnetometer Application in Geophysical TEM Measurements“, to be published in *IEEE Trans. Appl. Supercond.* (Poster zur ASC 2000: 4EC09)
- [6] G. Schaumann, Vortrag auf der EMTF 2000 und persönliche Mitteilungen
- [7] A. Chwala, R. Stolz, J. Ramos, V. Schultze, H.-G. Meyer, and D. Kretzschmar, "An HTS dc SQUID system for geomagnetic prospection", *Supercond. Science & Technol.*, vol. 12, pp. 1036-1038, 1999.