

Das Radiomagnetische Sondierungsverfahren (RMS) - Allererster Feldtest

Einleitung

Die Kenntnis der Verteilung des spezifischen elektrischen Widerstandes im oberflächennahen Untergrund (Meter bis wenige 10 Meter) erlaubt wichtige Aussagen zu Fragestellungen aus den Bereichen Baugrund- und Umwelterkundung sowie Hydrologie. Ein Vergleich der geoelektrischen Verfahren, die zur Sondierung in diesem Tiefenbereich geeignet sind, läßt die passiven elektromagnetischen (EM-) Verfahren im Hinblick auf einen hohen Meßfortschritt am günstigsten erscheinen. Für Lockersedimente in gemäßigten Klimaten liegen typische Widerstandswerte zwischen 10 und einige 100 Ω m. Die geeigneten Frequenzen liegen dann zwischen einigen kHz und wenigen MHz. Oberhalb von etwa 10 kHz können in Mitteleuropa zahlreiche leistungsstarke Sender, u.a. des VLF-, LW- und MW-Bereichs, genutzt werden. Es ist daher überraschend, daß seit Jahren nur für das VLF-R Kartierungsverfahren kommerzielle Meßgeräte zur Verfügung stehen. Messungen mit einer Eigenentwicklung von I. MÜLLER (Neuchâtel) zeigen, daß gute Ergebnisse bis etwa 240 kHz erzielt werden können. Allerdings scheint die Messung des elektrischen Feldes bei noch höheren Frequenzen zunehmend schwieriger zu werden.

Ein völlig anderes Meßkonzept liegt dem Radiomagnetischen Sondierungsverfahren (RMS) zugrunde. Die Impedanz Z wird hier aus horizontalen magnetischen Feldkomponenten berechnet:

$$Z_{xy} = - \frac{1}{\mu_0 \sigma} \frac{(\text{rot } \vec{B})_x}{B_y} = - \frac{1}{\mu_0 \sigma \Delta z} \frac{B_y(z) - B_y(z + \Delta z)}{B_y(z)} \quad (1)$$

Hierbei ist $(\sigma \Delta z)$ die integrierte Leitfähigkeit der zwischen den beiden Magnetometern liegenden Schichten. Die mathematischen Grundlagen und die technischen Anforderungen an ein Meßgerät finden sich in einem früheren EMT-Beitrag (RADIC, 1994). Methodische Besonderheiten, die von der unkonventionellen Sensorik herrühren, werden von RATH et al. (1995) mit Hilfe von 3D-Modellrechnungen untersucht.

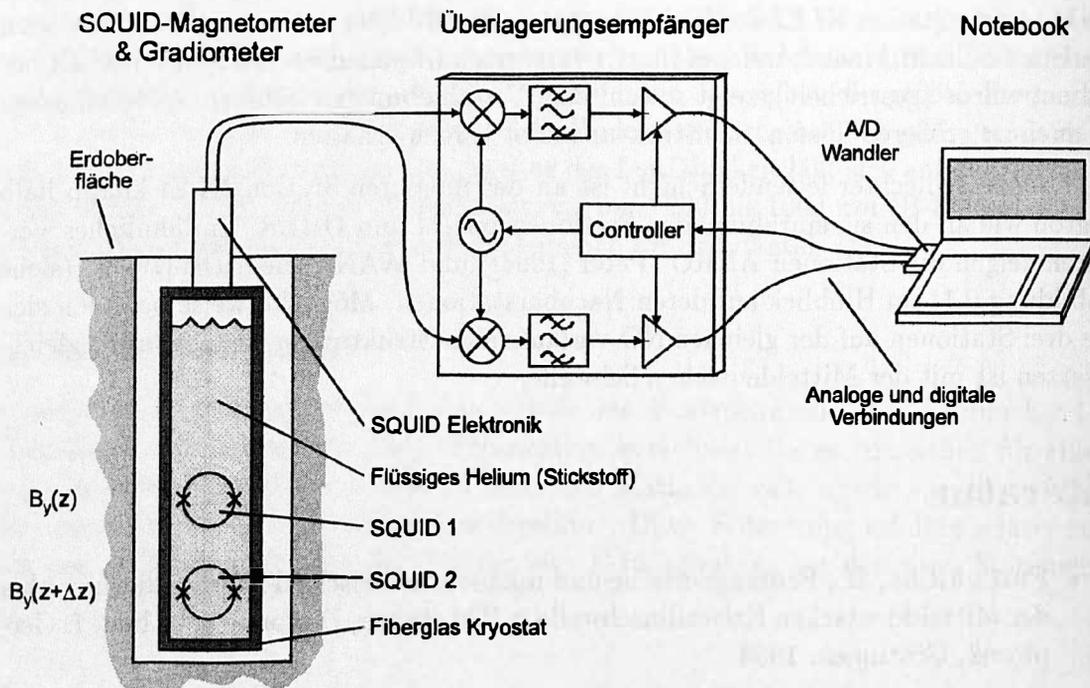


Abb.1: Blockbild der neu entwickelten RMS-Apparatur. Zur Messung des magnetischen Gradienten werden SQUID-Magnetometer in ein Meßloch geringer Tiefe (< 1 m) eingebracht.

Im Rahmen eines BMBF-geförderten Vorhabens sollte im Verbund von TU Berlin, Physikalisch-Technischer Bundesanstalt (PTB) und Metronix (Braunschweig) anhand eines Demonstrators geklärt werden, ob ein für den routinemäßigen Feldeinsatz geeignetes RMS-Meßgerät entwickelt werden kann und welche Aussagekraft die hiermit gewonnenen Daten besitzen würden. Besondere Bedeutung hatte dabei der Umstand, daß bisher nur supraleitende SQUID-Magnetometer den spezifischen Anforderungen der Methode gerecht werden.

Der RMS-Demonstrator

Die jetzt fertiggestellte RMS-Apparatur läßt sich in drei Einheiten gliedern (Abb. 1):

1. SQUID-Magnetometer/-Gradiometer

Zur Messung der Feldkomponenten B_y und ΔB_y werden zwei zeitgleich arbeitende und für den Frequenzbereich bis 2 MHz geeignete Magnetometer benötigt. Das Gradientensignal wird auf elektronischem Weg aus der Differenz der Magnetometersignale gebildet. Die hierfür verwendeten, bei der Temperatur siedenden Heliums (4.2 Kelvin) arbeitenden, SQUIDs wurden an der PTB speziell für die Belange der RMS-Methode optimiert. Üblicherweise werden SQUIDs in vom Außenfeld geschirmten Kammern zur Messung niederfrequenter Signale (< 1 kHz) eingesetzt. Das Erdfeld übertrifft die hier benötigte Signalaufösung um das 10^{10} -fache. Ein Einsatz bei hohen Frequenzen wird vor allem durch die Nichtlinearität der SQUID-Kennlinie behindert. Eine zum Magnetfeld proportionale Spannung kann durch Flußrückkopplung generiert werden. Die hierzu notwendige elektronische Regelungsschleife ist jedoch nicht beliebig schnell, so daß das SQUID gegenüber Frequenzen oberhalb des Meßbereichs (z.B. UKW) unbedingt geschirmt werden muß. Ein Kryostat zur Aufnahme des flüssigen Heliums sichert eine hinreichende Betriebszeit der Sensoren. Die isolierende Wirkung eines Vakuums in den Wandungen wird zusätzlich noch mit der eines Strahlungschirms kombiniert. Leider werden in diesem bisher noch unverzichtbaren Schirm durch das zu messende Feld Wirbelströme induziert, die es dämpfen und einen störenden magnetischen Gradienten an den SQUIDs verursachen. Hier liegt ein Zielkonflikt zwischen hinreichender Betriebszeit und Meßgenauigkeit vor.

2. Überlagerungsempfänger

Die Signale der beiden Magnetometer haben eine Bandbreite von 2 MHz. Das zunächst diskutierte Konzept einer direkten Digitalisierung mittels sehr schneller Analog/Digital-Wandler wurde wieder verworfen, da die zum damaligen Zeitpunkt verfügbaren Wandler nicht den hohen Dynamikanforderungen der Methode genügten. Stattdessen wurde ein zweikanaliger Überlagerungsempfänger entwickelt, der aus dem Frequenzbereich 10 kHz bis 2000 kHz ein drei kHz breites Frequenzfenster herausfiltert und in den Audio-Bereich abbildet (Mittenfrequenz 4 kHz). Sämtliche Funktionen des Überlagerungsempfängers (Verstärkungen, Frequenz, Eichsignal) sind vom Meßrechner digital steuerbar, so daß ein automatischer Meßablauf erfolgen kann.

3. Meßrechner (Notebook)

Die vom Überlagerungsempfänger vorverarbeiteten Signalspannungen werden von einem 12-Bit A/D-Wandler digitalisiert. Hierzu wird ein PCMCIA-Slot des Notebooks belegt. Die höchste zu erwartende Meßfrequenz beträgt 5.5 kHz. Eine Abtastung mit 16 kHz je Kanal ist daher ausreichend und kann wenn nötig über längere Zeiträume unterbrechungsfrei erfolgen. Das Notebook verfügt über einen 486DX4 (75 MHz) Prozessor, 16 MB RAM und 500 MB Festplatte. Das 9,6" TFT-Farbdisplay erlaubt auch im Feldeinsatz eine problemlose Bedienung und Ablesung.

Berechnung der Übertragungsfunktion des Untergrundes

Die Aufgabe besteht in der Bestimmung der frequenzabhängigen linearen Übertragungsfunktion a (Betrag und Phase) zwischen den gemessenen Magnetfeldkomponenten ΔB_y und B_y . Das Datenmaterial besteht aus N (typisch 16) Fourierkoeffizientenpaaren $(\Delta B_{y_i}, B_{y_i})$ für jede Frequenz. Im Folgenden wird ein u.a. in der Magnetotellurik vielfach erprobter linearer Ansatz gemacht:

$$\Delta B_{y_i} = a B_{y_i} + \delta_i \quad i \in \{1, N\} \quad (2)$$

Nach der Methode der kleinsten Quadrate werden die Residuen minimiert $\sum \delta_i^2 \rightarrow \text{Minimum}$ und die Übertragungsfunktion a , die Kohärenz γ und die Vertrauensintervalle Δa und $\Delta \varphi$ bestimmt:

$$a = \frac{\langle \Delta B_y, B_y^* \rangle}{\langle B_y, B_y^* \rangle} = \gamma \sqrt{\frac{\langle \Delta B_y, \Delta B_y^* \rangle}{\langle B_y, B_y^* \rangle}} \quad (3a)$$

$$\Delta a^2 = \frac{2}{N-2} F(2, 2N-2, 0,95) (1-\gamma^2) \frac{\langle \Delta B_y, \Delta B_y^* \rangle}{\langle B_y, B_y^* \rangle} \quad (3b)$$

$$\Delta \varphi = \sin^{-1} \left(\frac{\Delta a}{|a|} \right) \quad (3c)$$

Die mittleren quadratischen Amplituden des mit dem Magnetfeld korrelierenden Gradientensignalanteils S^2 und die des nicht korrelierenden Anteils R^2 (Rauschen) lassen sich aus der mit der Kohärenz gewichteten Autokorrelation des Gradientensignals berechnen. Eine wichtige Größe ist das Signal- zu Rauschverhältnis (S/R), da es unabhängig von N die Güte des Meßsystems beschreibt:

$$\frac{S^2}{R^2} = \frac{\gamma^2 \langle \Delta B_y, \Delta B_y^* \rangle}{(1-\gamma^2) \langle \Delta B_y, \Delta B_y^* \rangle} = \frac{\gamma^2}{1-\gamma^2} \quad (4)$$

Registrierbeispiel

Zur praktischen Erprobung des Meßsystems wurde auf dem Gelände der PTB-Außenstelle Berlin (wenige Kilometer vom Berliner Stadtzentrum entfernt gelegen) ein Meßloch mit 1.20 m Tiefe und 32 cm Durchmesser ausgehoben.

Abb. 2 zeigt einen 60 ms langen Registrierabschnitt beider Feldkomponenten (ΔB_y , B_y). Deutlich ist die Modulation der Amplitude des ausgewählten Mittelwellensenders (990 kHz) zu erkennen. Beide Zeitreihen korrelieren bereits visuell sehr gut. Im Mittelwellenbereich ist der Abstand der Sender größer als die Bandbreite des Überlagerungsempfängers, ein einzelner Sender erscheint daher sehr monofrequent.

Die Amplitudenspektren (Abb. 3) der in Abbildung 2 wiedergegebenen Zeitreihen zeigen deutlich den Träger (200 pT) und die modulationsbedingten Seitenbänder des Senders. Beide Spektren lassen sich gut korrelieren. Die erzielte Frequenzauflösung ist umgekehrt proportional zur Dauer der Registrierung, für 125 ms sind das 8 Hz.

Auf der Basis der Kohärenzanalyse kann das Gradientensignal in einen mit dem induzierenden Magnetfeld korrelierten S und einem nicht korrelierten Anteil R zerlegt werden (Gl. 4). Abbildung 4 stellt beide Signalanteile gemeinsam dar. Das S/R -Verhältnis beträgt bei der Trägerfrequenz 216:1. Das Rauschen ist im betrachteten Frequenzintervall frequenzunabhängig (weißes Rauschen). Dies ist nicht zwingend so, existiert beispielsweise neben einer entfernten Quelle eine weitere im Nahfeld, und überlagern sich beide Energien in einem bestimmten Frequenzbereich, so würden zwei unterschiedliche Übertragungsfunktionen nebeneinander existieren. Die effektive Übertragungsfunktion wäre demnach sehr wahrscheinlich auch während einer nur Sekunden dauernden Messung nicht stabil. Das Ergebnis wäre ein erhöhotes Rauschen

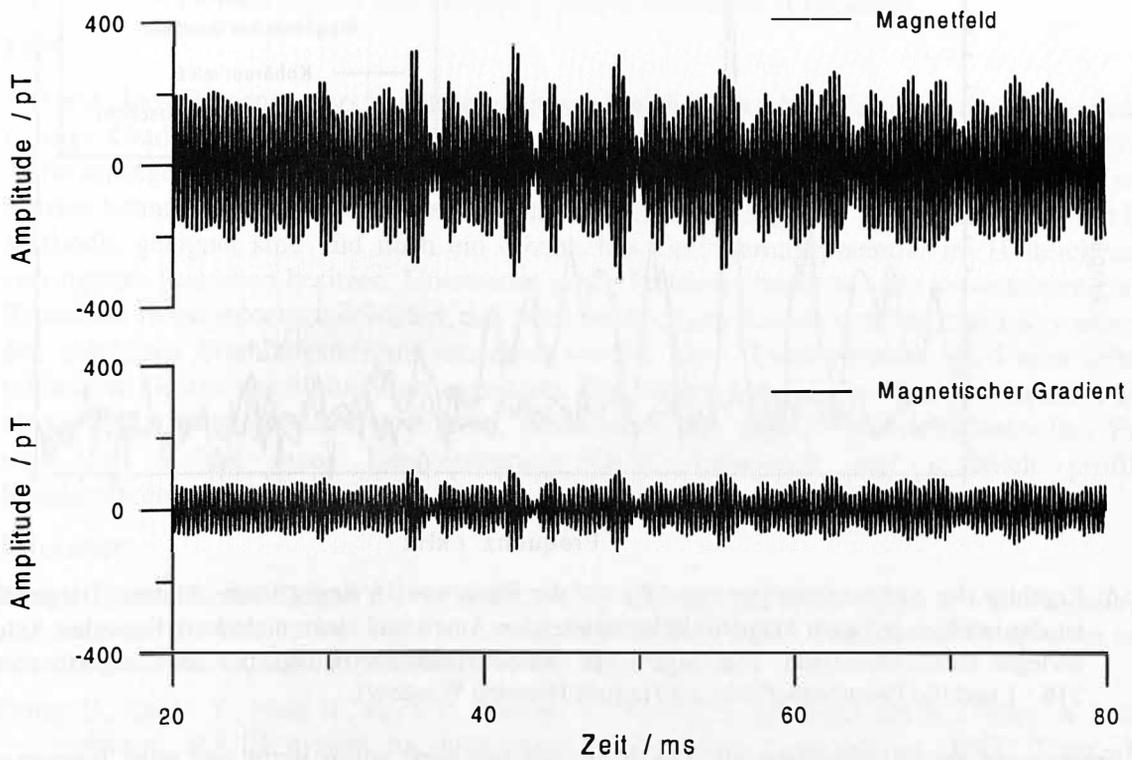


Abb.2: In 60 cm Tiefe gemessene zeitliche Variation der Horizontalkomponente des Magnetfeldes und deren Vertikalgradienten eines Mittelwellensenders (990 kHz).

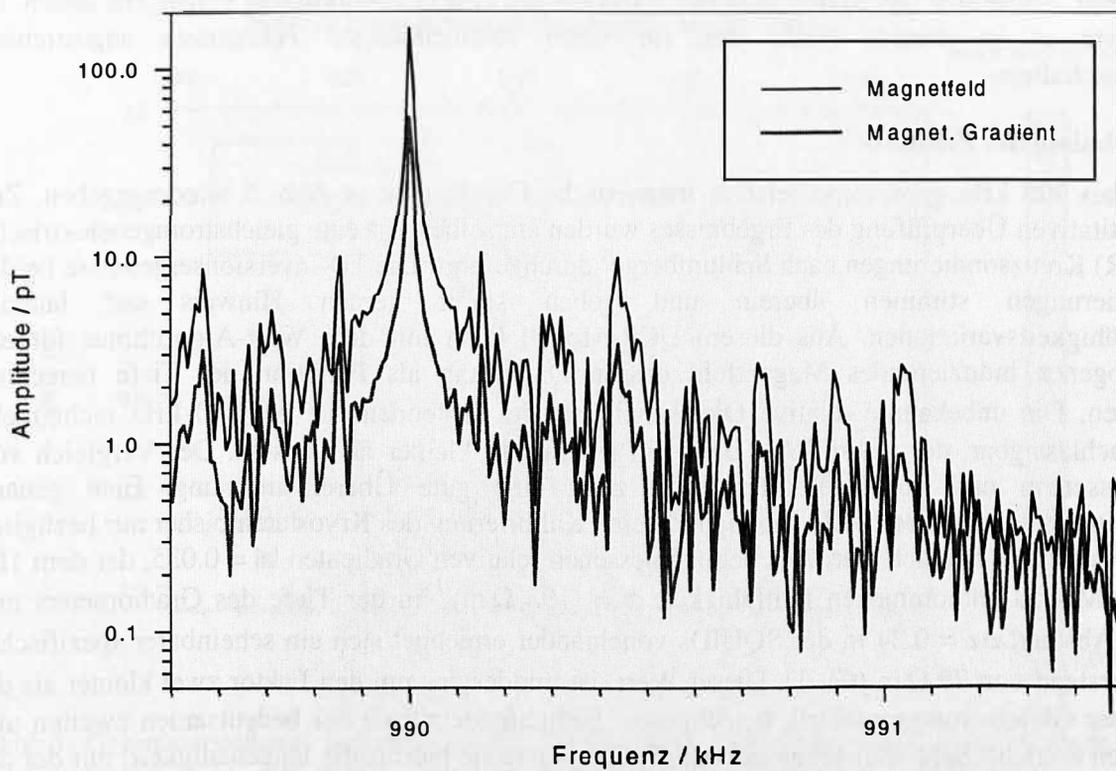


Abb.3: Amplitudenspektrum der in Abb.2 wiedergegebenen Variationen des Magnetfeldes und dessen Gradienten. Die Frequenzauflösung beträgt 8 Hz.

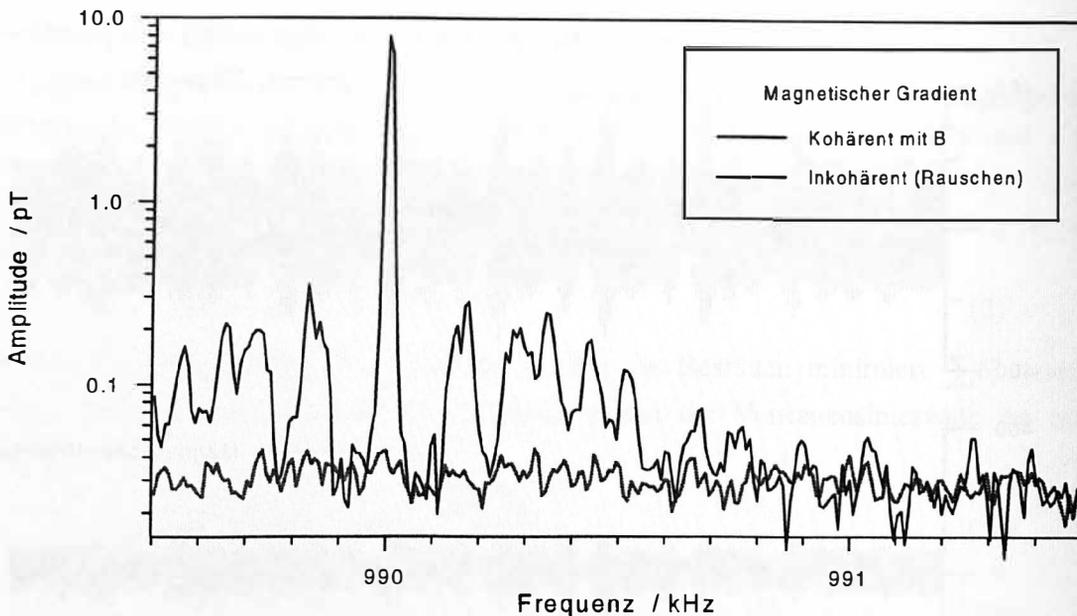


Abb.4: Ergebnis der Kohärenzanalyse von ΔB_y auf der Basis von 16 Registrierabschnitten. Dargestellt ist das in einen mit dem Magnetfeld korrelierenden Anteil und einen nicht korrelierenden Anteil zerlegte Gradientensignal. Das Signal- zu Rauschverhältnis beträgt bei der Trägerfrequenz 216 : 1 und die Frequenzauflösung 8 Hz (mit Hanning Window).

bei Frequenzen im Überlappbereich. Die Rauschdichte wird somit nicht nur vom Instrument selbst bestimmt sondern auch von der Stabilität der Übertragungsfunktion und ist daher ein eher konservatives Kriterium zur Abschätzung des Systemrauschens. Berücksichtigt man die Frequenzauflösung der Messung von 8 Hz, so beträgt die Rauschdichte der Messung $25fT / \sqrt{\text{Hz}}$. Derzeit wird ein SQUID-Gradiometer erprobt, das eine Rauschdichte von nur noch $2,5fT / \sqrt{\text{Hz}}$ aufweist. Sollte sich das Systemrauschen ebenfalls um eine Größenordnung verringern lassen, so genügte es in diesem Punkt den für einen routinemäßigen Feldeinsatz angestrebten Eigenschaften.

Ergebnisse des Feldtests

Der bei 990 kHz gemessene relative magnetische Gradient ist in Abb. 5 wiedergegeben. Zur quantitativen Überprüfung des Ergebnisses wurden am selben Ort eine gleichstromgeoelektrische (DCR) Kreuzsondierungen nach Schlumberger durchgeführt. Die 1D-Inversionsergebnisse beider Sondierungen stimmen überein und geben somit keinen Hinweis auf laterale Leitfähigkeitsvariationen. Aus diesem DCR-Modell kann mit dem Wait-Algorithmus für ein homogenes induzierendes Magnetfeld dessen Dämpfung als Funktion der Tiefe berechnet werden. Die unbekannte relative Dielektrizität ϵ_r des Erdbodens ist bei 990 kHz nicht mehr vernachlässigbar, der wahre Wert dürfte in jedem Fall kleiner als 20 sein. Der Vergleich von gemessenem und vorhergesagtem Wert zeigt eine gute Übereinstimmung. Eine genaue Phasenmessung ist noch nicht möglich, da eine Kalibrierung des Kryostaten bisher nur bezüglich der Amplitude möglich war. Aus dem gemessenen relativen Gradienten $|\alpha| = 0.035$, der dem 1D-DCR-Modell entnommenen Leitfähigkeit $\sigma = (193 \Omega \text{ m})^{-1}$ in der Tiefe des Gradiometers und dem Abstand $\Delta z = 0.24 \text{ m}$ der SQUIDs voneinander errechnet sich ein scheinbarer spezifischer Widerstand von $79 \Omega \text{ m}$ (Gl. 1). Dieser Wert ist mindestens um den Faktor zwei kleiner als die aus der Gleichstromgeoelektrik berechneten Schichtwiderstände der bedeutsamen zweiten und vierten Schicht. Sehr wahrscheinlich ist die Hauptursache hierfür die Ungenauigkeit, mit der der Widerstand der zweiten Schicht bestimmt wurde. Betrüge dieser statt $193 \Omega \text{ m}$ z.B. $300 \Omega \text{ m}$ (bei gleichzeitig entsprechend dem Äquivalenzprinzip verringerter Schichtmächtigkeit) dann würde sich ein realistischerer Scheinwiderstand von $190 \Omega \text{ m}$ ergeben ohne daß die Anpassung der

DCR-Messungen hierdurch wesentlich verschlechtert wäre. Zur Bestimmung der Leitfähigkeit σ im Umfeld des Gradiometers sind zukünftig andere Methoden vorgesehen.

Fazit

Anhand eines Demonstrators konnte gezeigt werden, daß das RMS-Verfahren im Feld quantitativ richtige Gradienten mißt. Die entwickelte Signalverarbeitungshardware/-Software genügt allen Anforderungen für eine genaue Messung der Übertragungsfunktion des Bodens. Nachgewiesen werden konnte auch, daß die eingesetzten heliumgekühlten SQUIDs grundsätzlich für die RMS-Methodik geeignet sind und noch ein erhebliches Optimierungspotential im Hinblick auf ein verringertes Rauschen besitzen. Unerwartet große Probleme bereiteten die verwendeten Helium-Kryostate. Es ist jedoch zu erwarten, daß beim zukünftigen Einsatz von Stickstoff-Kryostaten auf den störenden Strahlungsschirm verzichtet werden kann. Darüberhinaus wird eine sehr viel schlankere Gestalt des Meßmoduls angestrebt. Die für den Einsatz von Hochtemperatur-SQUIDs notwendigen Konzepte wurden erprobt. Gemeinsam mit einem weiteren industriellen Partner sind der Aufbau eines Hochtemperatur-SQUID-Meßmoduls und natürlich profilhafte Sondierungen geplant.

Literatur:

- Rath V., Radic T., and Krause Y. (1995): The use of 3D-modeling in the design of a new measurement technique for near-surface surveys. Oristaglio and Spieß (eds.): International Symposium on 3-D electromagnetics, 4.-6.10.95, 601-610, Ridgefield, CT, USA.
- Drung D., Radic, T., Matz H., Koch H., Knappe S., Menkel S, and Burkhardt H. (1996): A 2-channel wideband SQUID system for high-frequency geophysical applications, IEEE Trans. Magn. (eingereicht).
- Radic T. (1994): Konzept einer RMS-Apparatur zur Messung des oberflächennahen spezifischen Widerstandes unter Anwendung des magnetischen Gradientenverfahrens im LW- und MW-Frequenzbereich. In: Bahr K. und Junge A. (Hrsg.) Protokoll über das 15. Kolloquium „Elektromagnetischen Tiefenforschung“, Höchst im Odenwald, GFZ Potsdam.

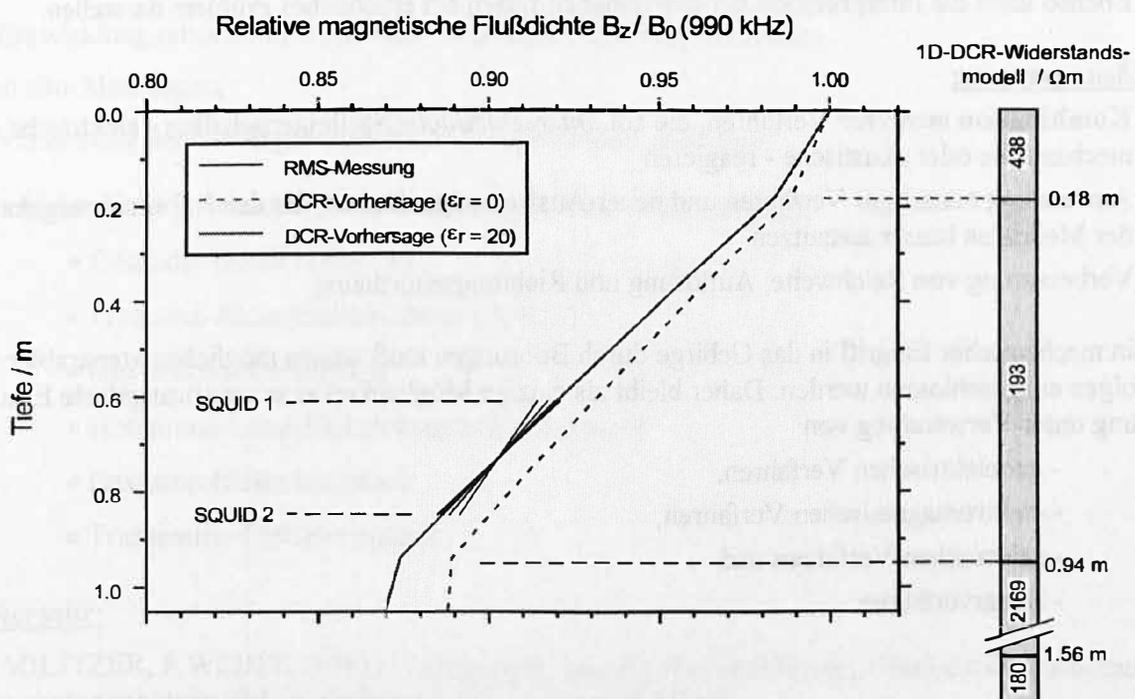


Abb.5: Gegenüberstellung von gemessenem (5 Wiederholungen) und aus dem 1D-DCR-Modell vorhergesagtem Gradienten. Bei einer Meßfrequenz von 990 kHz beeinflusst die Dielektrizität ϵ geringfügig den magnetischen Gradienten. Da ϵ_r unbekannt ist, wurden für die Vorhersage zwei Grenzfälle angenommen: $\epsilon_r = 0$ (Einfluß wird ignoriert), $\epsilon_r = 20$ (Grundwasser). Wiedergegeben ist auch die Position der beiden SQUID-Magnetometer.