

Prozessing stark gestörter MT-Daten aus dem sächsischen Granulitgebirge mit der Two-Source-Methode

Einleitung

In Europa wird es durch das stetige Entstehen neuer von Menschenhand geschaffener elektromagnetischer Störquellen wie Industrieanlagen oder elektrifizierte Eisenbahnlinien zunehmend schwerer, aus den an der Erdoberfläche gemessenen Variationen des elektrischen und magnetischen Feldes unverzerrte magnetotellurische Übertragungsfunktionen zu gewinnen. Die im Jahr 1995 entlang eines Profils über das sächsische Granulitgebirge registrierten magnetotellurischen Zeitreihen sind von starken Störsignalen und unkorreliertem Rauschen überlagert. Die mit dem *Single-Site*-Verfahren berechneten robusten Schätzungen der MT-Übertragungsfunktionen ergaben falsche Ergebnisse. In diesem Bericht wird am Beispiel der Station WIN in Zentrum des Granulitgebirges gezeigt, wie mit Hilfe eines *Two-Source*-Processings, bei dem gleichzeitig Übertragungsfunktionen für das MT-Nutzsignal und das Störsignal berechnet werden, eine Separation von Nutzsignal und Störsignal erfolgen kann. Hierzu ist eine Referenz-Station notwendig, an der gleichzeitig möglichst rauscharme Magnetfeldvariationen registriert werden.

Die Two-Source-Methode

Die *Two-Source*-Methode und die Vorgehensweise bei der Realisierung der einzelnen Schritte des robusten, iterativen Verfahrens in einem Computerprogramm wird ausführlich in LARSEN ET AL. (1996) beschrieben. Hier werden nur die wesentlichen Schritte zum Verständnis der *Two-Source*-Methode dargestellt. Für die Fourier-Transformierten $E^{MT}(\omega)$ und $B^{MT}(\omega)$ der natürlich erzeugten zeitlichen Variationen des elektrischen und magnetischen Feldes an der Erdoberfläche gilt die Beziehung $E^{MT}(\omega) = Z^{MT}(\omega)B^{MT}(\omega)$ mit der komplexen, frequenzabhängigen Übertragungsfunktion $Z^{MT}(\omega)$. Wenn die gemessenen elektrischen Feldvariationen nur unkorreliertes Rauschen enthalten und die magnetischen Feldvariationen fehlerfrei sind, kann man die magnetotellurische Übertragungsfunktion $Z^{MT}(\omega)$ mit dem Fehlerausgleichsverfahren nach der Methode der kleinsten Quadrate (siehe z.B. SIMS ET AL. (1971)) aus folgender Gleichung bestimmen:

$$E(\omega) = \sum_k Z_k^{MT}(\omega) B_k^{MT}(\omega) + R(\omega)$$

($k = 1$ bzw. 2 für die beiden horizontalen Komponenten). Das Residuum $R(\omega)$ steht für das unkorrelierte Rauschen.

Enthält auch das Magnetfeld unkorrelierte Rauschanteile, so ergibt sich ein systematischer Fehler (*Bias*) durch die Vergrößerung der Powerspektren in der Bestimmungsgleichung von $Z(\omega)$. Diesen systematischen Fehler kann man mit dem *Remote-Reference*-Verfahren (GAMBLE ET AL. (1979)) vermeiden. Bei der *Remote-Reference*-Auswertung werden keine Powerspektren berechnet, sondern Kreuzspektren von lokalen Feldern mit

zeitgleich registrierten Feldern an einem entfernt liegenden Ort. Man erhält dabei auch dann unverzerrte Übertragungsfunktionen, wenn die magnetischen Feldvariationen an Meß- und Referenz-Lokation unkorreliertes Rauschen enthalten.

Als Störsignale werden hier kohärente Signale in den magnetischen und elektrischen Feldvariationen bezeichnet, die von Menschenhand (z.B. durch industrielle Anlagen) in der Nähe des Meßortes erzeugt werden und nicht das Kriterium einer einfallenden ebenen Welle erfüllen. Störsignale können bei der *Remote-Reference*-Auswertung durch die Verwendung robuster Verfahren eliminiert werden (z.B. RITTER ET AL. (1998)), wenn diese Störsignale nur in wenigen Zeitreihenabschnitten vorhanden sind. Treten die Störsignale allerdings häufig oder ununterbrochen auf, so erhält man eine falsche Schätzung der MT-Übertragungsfunktion. Dann empfiehlt sich unter der Voraussetzung, daß die Störsignale im wesentlichen von einer Störquelle mit zeitlich konstanter Übertragungsfunktion stammen, die Berechnung einer separaten Übertragungsfunktion $Z^C(\omega)$ für das Störsignal (*Two-Source*-Methode). Die Bestimmungsgleichung muß nun um den Term $E^C(\omega) = Z^C(\omega)B^C(\omega)$ erweitert werden:

$$E(\omega) = \sum_k Z_k^{MT}(\omega)B_k^{MT}(\omega) + \sum_k Z_k^C(\omega)B_k^C(\omega) + R(\omega)$$

Aus dieser Gleichung kann man $Z^{MT}(\omega)$ und gleichzeitig $Z^C(\omega)$ mit der Methode der kleinsten Quadrate abschätzen. Vorher muß man allerdings $B_k^{MT}(\omega)$ und $B_k^C(\omega)$ bestimmen. Hierzu benötigt man Magnetfeldregistrierungen an einer entfernten Referenz-Station, die das Störsignal nicht enthalten und möglichst auch kein unkorreliertes Rauschen aufweisen. Man bestimmt zunächst die magnetische Übertragungsfunktion $T(\omega)$ zwischen dem lokalen Magnetfeld $B^{MT}(\omega)$ und dem Referenz-Magnetfeld $B^R(\omega)$ mit der Methode der kleinsten Quadrate aus folgender Gleichung:

$$B_k(\omega) = \sum_m T_{km}(\omega)B_m^R(\omega) + B_k^C(\omega)$$

($m = 1$ bzw. 2 für die beiden horizontalen Komponenten). Dabei kann $B_k^C(\omega)$ minimiert werden, weil das Störsignal im Referenz-Magnetfeld nicht enthalten ist. Das magnetische Nutzsignal und Störsignal ergibt sich nun aus $B^{MT}(\omega) = T(\omega)B^R(\omega)$ bzw. $B^C(\omega) = B(\omega) - B^{MT}(\omega)$.

Separation von Störsignalen bei der Station WIN

Als Beispiel für die Signal-Trennung mit Hilfe der *Two-Source*-Methode wurde die Station WIN im Zentrum des Granulitgebirges ausgewählt. Als magnetische Referenzstation stand die Station GAN von einer gleichzeitigen MT-Meßkampagne der Universität Köln (MICHEL (1997)) zur Verfügung. Die Station GAN liegt im 350 km entfernten Odenwald und hat einen vergleichsweise geringen Rausch-Pegel.

In Abbildung 1 sind Schätzungen der Übertragungsfunktion an der Station WIN für die *Single-Source*-Methode, die *Remote-Reference*-Methode und die *Two-Source*-Methode in der üblichen Form als scheinbarer spezifischer Widerstand und Phase dargestellt, Δ für die xy-Komponente (elektrisches Feld in NS Richtung), \bullet für die yx-Komponente (E-Feld in EW Richtung). Die Werte für die kurzen Perioden kleiner als 3s wurden aus

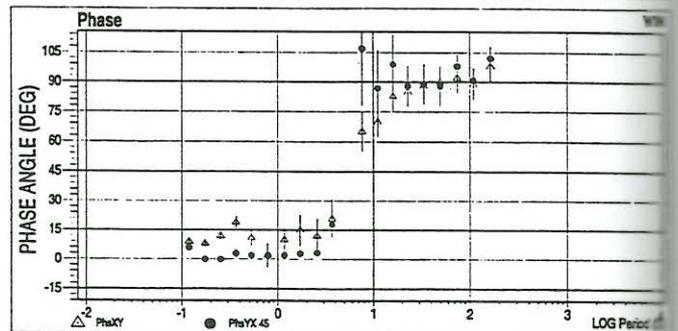
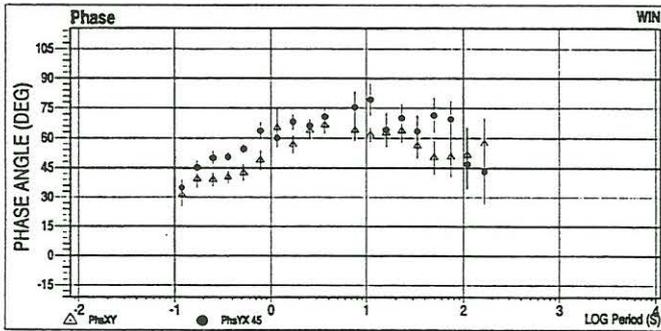
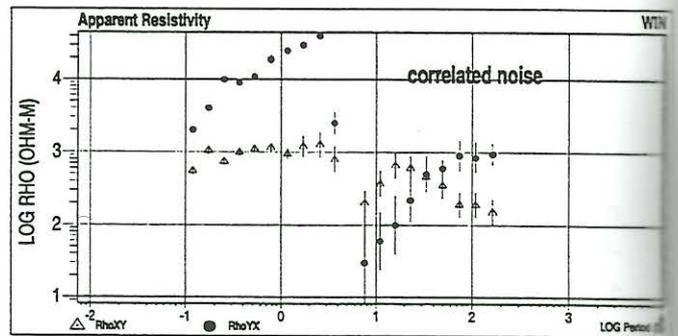
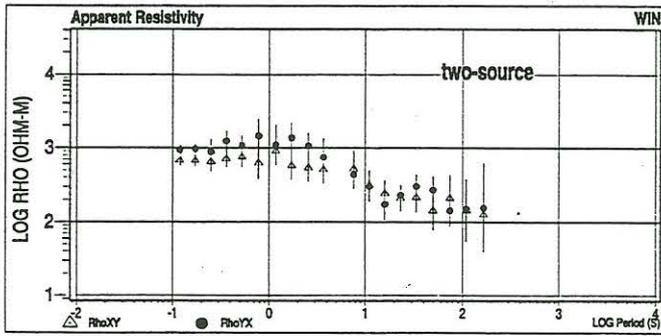
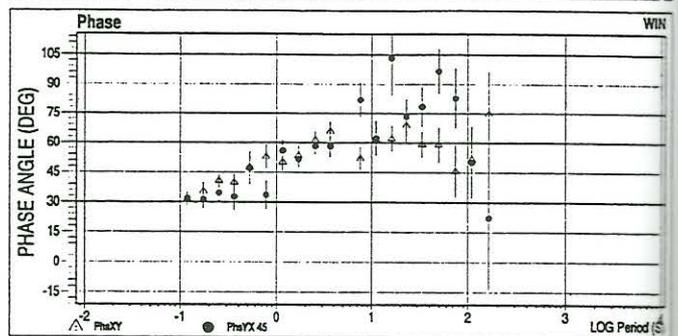
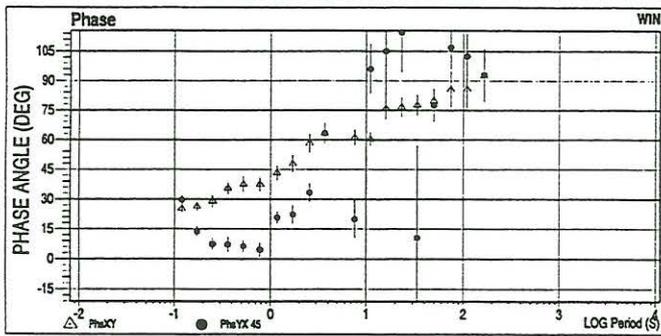
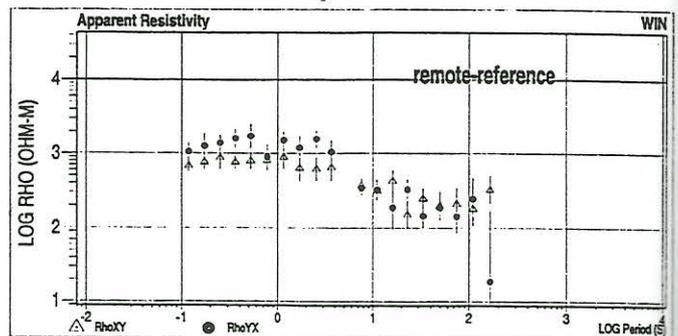
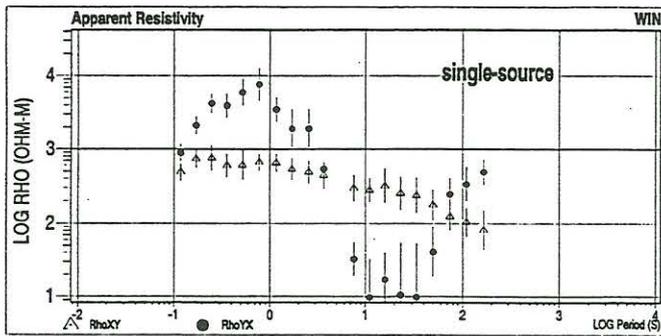


Abbildung 1: Schätzungen der MT-Übertragungsfunktion (dargestellt als Werte für den scheinbaren spezifischen Widerstand und die Phase) an der Station WIN, oben links: berechnet mit der *Single-Source*-Methode, oben rechts: berechnet mit der *Remote-Reference*-Methode, unten links: berechnet mit der *Two-Source*-Methode, und Schätzung der Übertragungsfunktion für das Störsignal an der Station WIN (unten rechts). Weitere Erläuterungen siehe im Text.

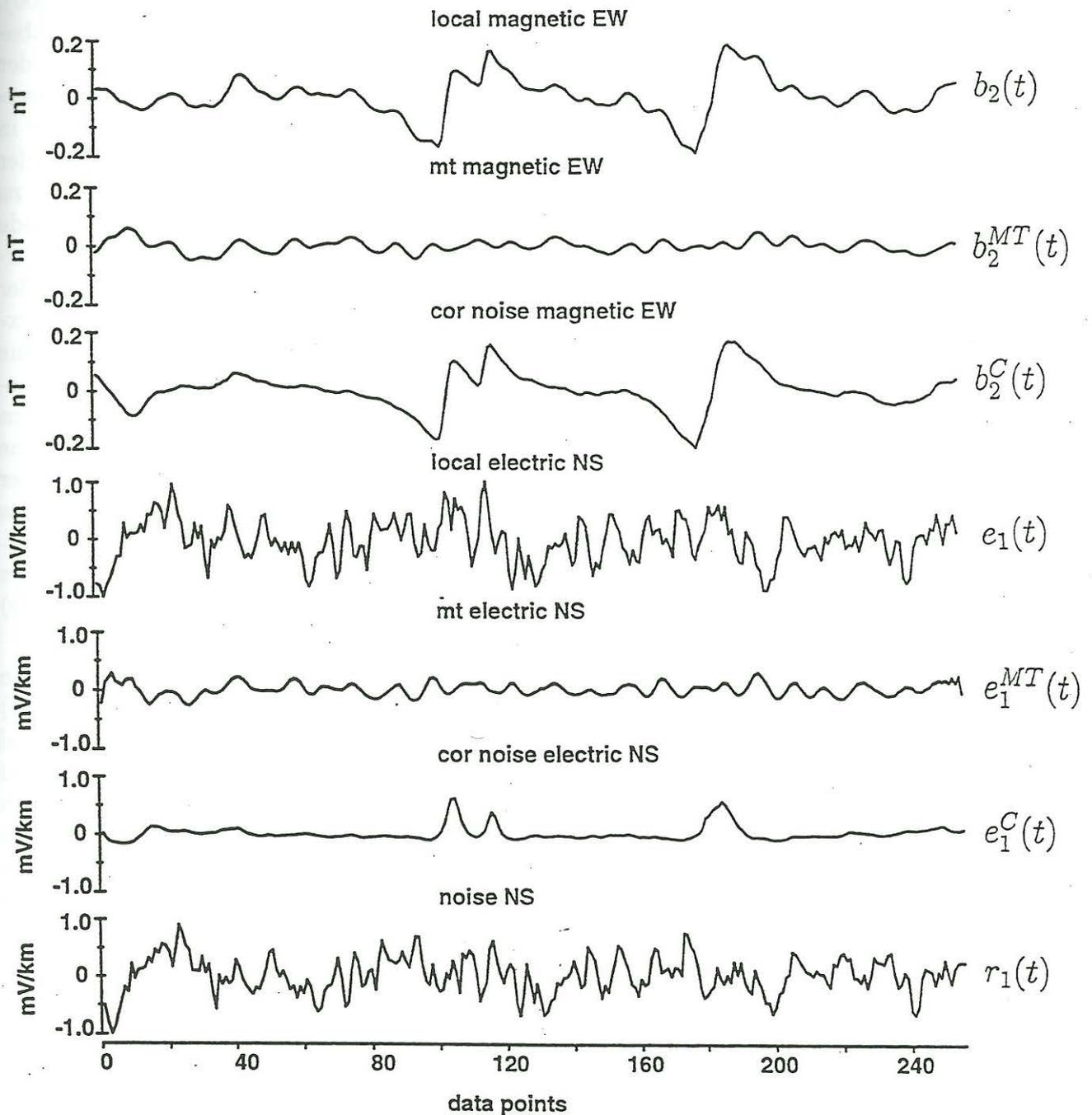


Abbildung 2: Signal-Trennung mit der *Two-Source*-Methode im Zeitbereich am Beispiel von Zeitreihen der Station WIN vom 13. Oktober 17h04 bis ca. 17h17. Dargestellt sind (von oben nach unten) die gemessenen magnetischen Variationen $b_2(t)$ in EW Richtung, die zum Nutzsignal gehörenden magnetischen Variationen $b_2^{MT}(t)$, das magnetische Störsignal $b_2^C(t)$, die gemessenen elektrischen Variationen $e_1(t)$ in NS Richtung, die zum Nutzsignal gehörenden elektrischen Variationen $e_1^{MT}(t)$ in NS Richtung, das elektrische Störsignal $e_1^C(t)$ und das Residuum $r_1(t)$. Weitere Erläuterungen im Text.

198 Datenabschnitten (je 256 Meßpunkte) mit der Abtastrate 20Hz berechnet (Startzeitpunkt 18. Oktober 22h00). Die Werte für die langen Perioden wurden aus 101 Datenabschnitten mit der Abtastrate von 3.2s berechnet (Startzeitpunkt 18. Oktober 14h00). Die *Single-Source*-Methode ergibt nur für kleine Perioden der xy-Komponente brauchbare Schätzwerte für die MT-Übertragungsfunktion. Die restlichen Werte streuen entweder sehr stark oder lassen wegen Inkonsistenzen zwischen Widerstandswerten und Phasenwerten eine systematische Verzerrung vermuten. Die *Remote-Reference*-Methode ergibt in sich konsistente Widerstands- und Phasenkurven. Allerdings streuen die Phasenwerte der yx-Komponente bei den langen Perioden zu stark, um einen Kurvenverlauf erkennen zu lassen. Die Schätzwerte für die MT-Übertragungsfunktion mit der *Two-Source*-Methode bestätigen das Ergebnis der *Remote-Reference*-Auswertung, ergeben jedoch glattere Kurven und konsistente Widerstands- und Phasenkurven auch für die langen Perioden der yx-Komponente. Die Übertragungsfunktion für das Störsignal ist für die xy- und yx-Komponente unterschiedlich. Für kurze Perioden ergibt sich für die yx-Komponente eine Phase Null bei linear ansteigenden Widerstandswerten, und für die xy-Komponente ergeben sich kleine Phasenwerte unter 20° bei konstantem Widerstand. Bei langen Perioden erhält man Phasenwerte von etwa 90° . Offensichtlich ist bei den längeren Perioden eine andere Störquelle dominant. Die *Single-Source*-Schätzwerte sind eine Kombination der beiden mit der *Two-Source*-Methode abgeleiteten Schätzwerte für das Nutzsignal und das Störsignal. Insbesondere die yx-Komponente wird von Störsignalen dominiert. Als Störsignalquellen kommen landwirtschaftliche Anlagen auf Gehöften im näheren Umkreis des Meßortes, Industrieanlagen in der Kleinstadt Rochlitz (5 km nordöstlich des Meßortes) und eine NS verlaufende, elektrifizierte Eisenbahnlinie in 7 km Entfernung in Frage.

Abbildung 2 zeigt ein Beispiel für die Signal-Trennung mit der *Two-Source*-Methode im Zeitbereich. Die zum Nutzsignal gehörenden zeitlichen magnetischen Variationen $b_k^{MT}(t)$ erhält man durch inverse Fourier-Transformation von $B_k^{MT}(\omega)$, und die zum Störsignal gehörenden Variationen $b_k^C(t)$ sind die Differenz zwischen den gemessenen Zeitreihen und $b_k^{MT}(t)$. Die zeitlichen Variationen des elektrischen Feldes werden auf analoge Weise in drei Anteile zerlegt: $e_k^{MT}(t)$, $e_k^C(t)$ und das Residuum $r_k(t)$. In der Abbildung 2 sind die Zeitreihen der Station WIN vom 13. Oktober ab 17h04 für die xy-Komponente (elektrisches Feld in NS Richtung) dargestellt. Die Abtastrate beträgt 3.2s (256 Datenpunkte = 819.2 s). Das Störsignal im magnetischen Feld ist zu einigen Zeitpunkten viel größer als die natürlichen magnetischen Variationen. Wie man an den unterschiedlichen Erscheinungsbildern des Störsignals in den elektrischen und magnetischen Feldvariationen erkennt, ist die Übertragungsfunktion des Störsignals im hier relevanten Periodenbereich keine Konstante mit der Phase Null. Obwohl der Anteil des Störsignals in den Variationen des elektrischen Feldes wesentlich kleiner ist als der Anteil des unkorrelierten Rauschens, ist der Einfluß des Störsignals auf die mit der *Single-Source*-Methode berechneten Schätzwerte der Übertragungsfunktion relevant.

Der Erfolg der *Two-Source*-Methode hängt entscheidend von der Qualität der Registrierung an der Referenz-Station ab. Bei der Verwendung der magnetischen Registrierung an einer einzigen Referenz-Station erhält man bei der *Two-Source*-Methode nur unverzerrte Schätzungen der Übertragungsfunktionen, wenn die Referenz-Felder rauschfrei sind. Bei unkorreliertem Rauschen in den Referenz-Magnetfeldern erhält man durch die Einbeziehung weiterer Referenzfelder ($B^{R2}(\omega)$ oder auch $E^R(\omega)$) unverzerrte Schätzungen der

Übertragungsfunktionen (*Remote-Reference Two-Source-Methode*). Bei dieser Methode werden alle Schätzwerte der Übertragungsfunktionen mit dem *Remote-Reference*-Verfahren berechnet. Zum Test dieses Verfahrens wurden die Magnetfeldregistrierungen an der Station FAH im Odenwald mit hinzugezogen, die ähnlich wie die Station GAN einen geringen Rausch-Pegel aufweist. Es konnte jedoch keine weitere Verbesserung der MT-Übertragungsfunktion an der Station WIN erreicht werden. Das bestätigt, das mit der Station GAN eine ideale Referenz-Station mit ausreichend geringen Rausch-Pegel gefunden wurde.

Fazit

Die Schätzung von MT-Übertragungsfunktionen mit der *Two-Source-Methode* ergibt an Meßorten mit häufig auftretenden Störsignalen in den magnetischen und elektrischen Feldvariationen bessere Ergebnisse als die Auswertung mit der *Remote-Reference-Technik*. Voraussetzung ist, daß die Störsignale im wesentlichen von einer einzigen Störquelle mit zeitlich konstanter Übertragungsfunktion stammen. Mit dem *Single-Source-Verfahren* erhält man an solchen Meßorten (auch bei Verwendung robuster Verfahren) eine Übertragungsfunktion, die eine Kombination aus den Übertragungsfunktionen der Nutzsignale und der Störsignale darstellt und somit unbrauchbar ist. Die *Two-Source-Methode* eröffnet durch die darin enthaltene Bestimmung der Übertragungsfunktion für die Störsignale die Möglichkeit, die Form und die Übertragungseigenschaften der Störsignale zu studieren. Bei der Station WIN im Zentrum des sächsischen Granulitgebirges sind die Störsignale stark richtungsabhängig. Die zugehörige Übertragungsfunktion weist für Perioden kleiner als 3s die für viele Störsignale typischen Phasenwerte nahe Null Grad auf. Bei längeren Perioden ist offensichtlich eine andere Störquelle wirksam und es werden für die Störsignale Phasenwerte von 90° beobachtet.

Literatur

- T. D. Gamble, W. M. Goubeau, & J. Clarke. Magnetotellurics with remote magnetic reference. *Geophysics*, 44(1): 53–68, 1979.
- J. C. Larsen, R. L. Mackie, A. Manzella, A. Fiordelisi, & S. Rieven. Robust Smooth Magnetotelluric Transfer Functions. *Geophys. J. Int.*, 124: 801–819, 1996.
- J. Michel. Datenverarbeitung einer Magnetotellurik-Messung im Odenwald. Diplomarbeit, Institut für Geophysik und Meteorologie der Universität zu Köln, 1997.
- O. Ritter, A. Junge, & G. J. K. Dawes. New equipment and processing for magnetotelluric remote reference observations. *Geophys. J. Int.*, 132: 535–548, 1998.
- W. E. Sims, F. X. Bostick Jr., & H. W. Smith. The estimation of magnetotelluric impedance tensor elements from measured data. *Geophysics*, 36: 938–942, 1971.