

Jochen Theißing

Ein Verfahren zur Trennung von Signal- und Störanteilen in magnetotellurischen Zeitreihen

Magnetotellurische Messungen finden immer wieder in Gebieten statt, in denen aufgrund technischer Einrichtungen oder Besiedlungen mit Störungen in den Daten zu rechnen ist. Vorrangiges Ziel von Bearbeitungsmethoden ist es, den Einfluß der Störungen zu reduzieren. Um Störungen selbst untersuchen zu können, ist es zunächst nötig, den Störanteil sicher in den Daten zu erkennen. Oftmals können aber Störungen in den Daten nur mit großer Erfahrung oder durch Vergleiche mit zeitgleichen Referenz-Daten erkannt werden. Im folgenden soll ein Verfahren vorgestellt werden, mit dem es unter bestimmten Voraussetzungen möglich ist, den Stör- und Signalanteil einer Registrierung getrennt im Zeitbereich darzustellen.

Setzt man als vereinfachten Ausgangsfall das magnetische Feld B als fehlerfrei und das elektrische Feld E als fehlerbehaftet voraus, kann man zunächst im Frequenzbereich ein fehlerfreies E -Feld E_p (predicted), also den Signalanteil im elektrischen Feld für jede Registrierung vorhersagen, wenn der wahre Übertragungstensor \hat{Z} bekannt ist:

$$E_p = \hat{Z} B. \quad (1)$$

Diesen berechneten Signalanteil des elektrischen Feldes kann man in den Zeitbereich zurücktransformieren und vom gemessenen Feld $E(t)$ subtrahieren:

$$E(t) - E_p(t) = E_N(t). \quad (2)$$

Man erhält so den Störanteil $E_N(t)$. Die Voraussetzung eines fehlerfreien magnetischen Feldes ist an vielen magnetotellurischen Stationen weitgehend zumindest in dem Sinn erfüllt, daß die Störungen in E diejenigen in B bei weitem überwiegen. Als zweite Voraussetzung geht in Gleichung (1) der wahre Übertragungstensor \hat{Z} ein. Durch den Fehlerausgleich in E nach der Methode der kleinsten Quadrate sollte der so bestimmte Übertragungstensor Z^E unter der Voraussetzung eines fehlerfreien Magnetfeldes dem wahren Übertragungstensor sehr nahe sein, wenn hinreichend viele Daten verwendet wurden.

Als Test dieser Vorgehensweise dienen Daten der Station HULS (Lage etwa 10 km nordwestlich von Münster). Die Station HULS wird seit ca. drei Jahren von der Arbeitsgruppe Magnetotellurik Münster als Referenz-Station benutzt. Die Datenqualität der Station ist, von seltenen Ausnahmen abgesehen, sehr hoch. Zwei Registrierbeispiele sind in Abb. 1 zusammen mit vorhergesagten E -Feldkomponenten dargestellt.

Abb. 1 a zeigt nacheinander folgende Komponenten: \hat{B}_x (gemessen), B_x (integriert), E_y (gemessen), $E_{y,p}$ (gemäß (1) vorhergesagt). Die mit 'Diff' bezeichnete Spur stellt $E_{y,N}$ gemäß (2) dar. Da der Untergrund von HULS als weitgehend eindimensional betrachtet werden kann (VOLBERS, 1986), reicht diese Zusammenstellung zur Charakterisierung der Station aus. Die vorhergesagte Komponente $E_{y,p}$ ist allerdings aus beiden magnetischen Feldkomponenten berechnet worden. In Abb. 1 a ist deutlich zu sehen, daß die vorhergesagte Spur $E_{y,p}$ nahezu identisch mit der gemessenen E_y -Spur ist. Selbst die kürzesten Perioden, in denen häufig künstliche Störungen auftreten, finden sich in Abb. 1 a fast vollständig als Signalanteil in der vorhergesagten elektrischen Spur wieder. Die Differenzspur ist demgemäß über dem gesamten Intervall nahezu Null.

Abb. 1 b demonstriert an dem zweiten Beispiel der Station HULS, daß mit diesem Verfahren Störungen erkannt werden können, die ohne weiteres kaum sichtbar sind. Die gemessene elektrische Komponente E_y weist wieder dem Augenschein nach eine hohe Korrelation mit dem magnetischen Feld B_x auf. Nur an einigen Stellen (etwa bei den Datenpunkten 400 oder 540) kann man bei genauer Betrachtung ein nichtkorreliertes Verhalten feststellen. Selbst im Vergleich von E_y mit dem vorhergesagten elektrischen Feld $E_{y,p}$ kann man den 'wahren' Störanteil nicht genau erkennen. Erst in der Differenzspur, in der der isolierte Störanteil vorliegt, wird das Auftreten einer markanten periodischen Störung deutlich. Die gesamte Zeitreihe ist von einer Störung überlagert, die sich ca. alle 140 s wiederholt. Unter den genannten Voraussetzungen (fehlerfreies B-Feld, \hat{Z} ausreichend bestimmt) lassen sich also mit dieser Vorgehensweise Stör- von Signalanteilen im Zeitbereich trennen.

Bisher ist von der Voraussetzung ausgegangen worden, daß das magnetische Feld vollständig fehlerfrei ist. Nun wird angenommen, daß dieses in einem kleinen Anteil der Daten nicht mehr erfüllt ist, die B-Störungen aber nicht so groß sind, daß Z^E merklich verfälscht wird. Die Gleichung (1) bzw. (2) wird um die entsprechenden Störanteile B_N des B-Feldes erweitert (B_s soll den Signalanteil bezeichnen). Man erhält:

$$E_p = Z^E B_s + Z^E B_N \quad (3)$$

bzw.

$$E(t) - E_p(t) = E_N(t) + FT^{-1}(Z^E B_N), \quad (4)$$

wobei FT^{-1} die inverse Fouriertransformation bedeutet. Sofern das elektrische Feld fehlerfrei und somit $E_N(t)$ gleich Null ist, können einzelne markante Störungen im magnetischen Feld an einer negativen Korrelation des vorhergesagten E-Feldes E_p mit der Differenzspur erkannt werden. Am Beispiel einer Zeitreihe der Station DAVE (Lage etwa 20 km südlich

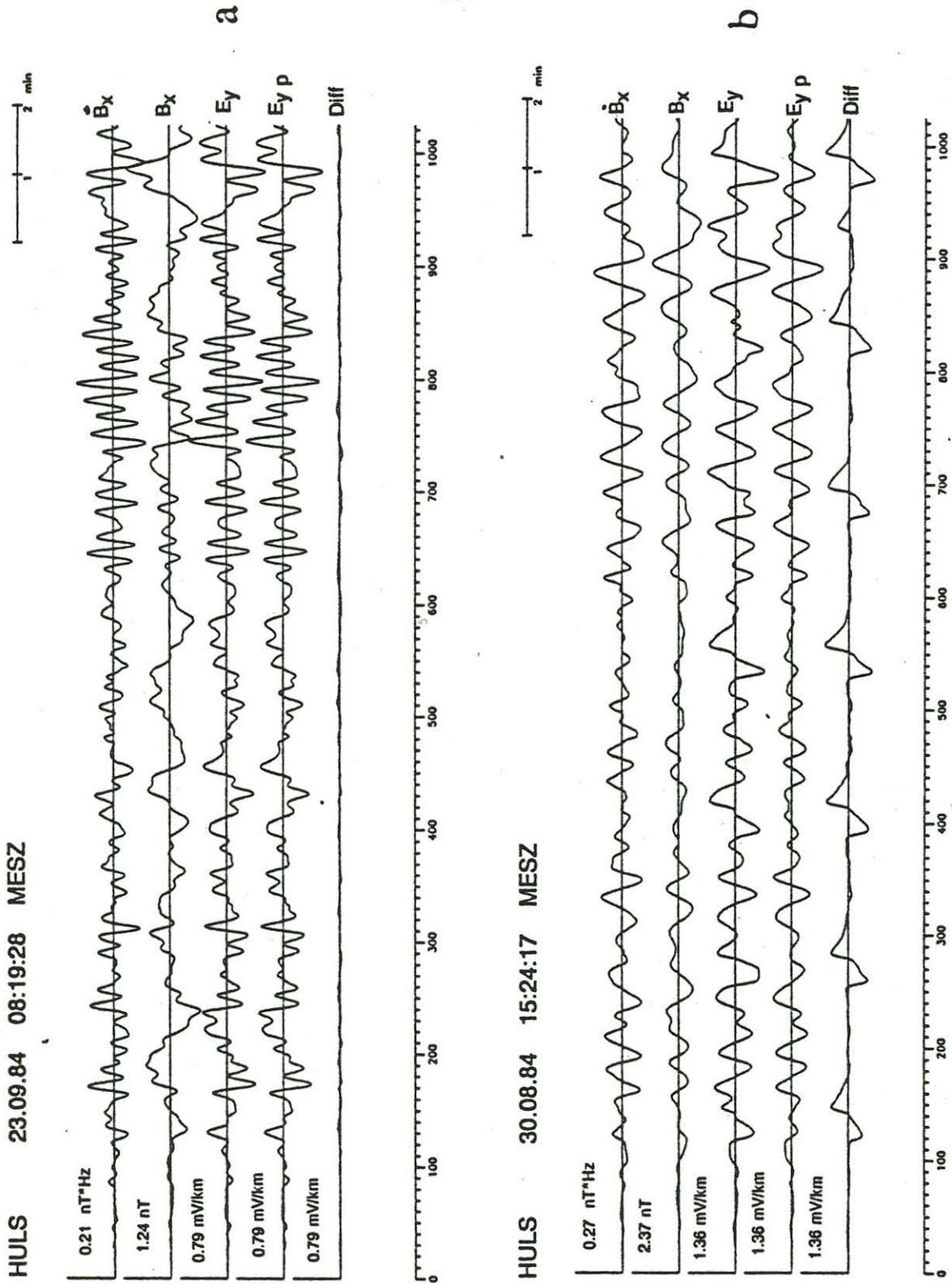


Abb. 1. Vergleich von gemessenen und vorhergesagten Feldkomponenten für die Station HULS. Dargestellt sind \dot{B}_x -, B_x -, E_y - als gemessene sowie die vorhergesagte $E_{y,p}$ -Spur. Die mit "Diff" bezeichnete Differenz gibt $E_y(t) - E_{y,p}(t)$ wieder. In Abb. 1 b ist eine markante periodische Störung erst durch die Trennung in Signal- und Störanteil sichtbar.

von Münster) soll dies für B_y und E_x veranschaulicht werden. In Abb. 2 ist, gemessen am Gesamtverlauf der Zeitspuren, bei der Stelle 1320 eine deutliche Störung im magnetischen Feld zu erkennen. Das gemessene elektrische Feld ist bei diesem Punkt relativ ungestört, daher tritt die Störung des magnetischen Feldes deutlich in der Differenzspur auf. Sie ist an der negativen Korrelation zwischen der berechneten elektrischen Spur $E_{x,p}$ und der Differenzspur und der gleichzeitigen positiven Korrelation zwischen $E_{x,p}$ und der magnetischen Spur zu erkennen. Im Fall der Komponenten B_x und E_y wäre die Korrelation zwischen $E_{y,p}$ und magnetischer Spur ebenfalls negativ. Wichtig ist aber, daß die Korrelation zwischen E_p und Differenzspur immer negativ unter den genannten Voraussetzungen ist. In Abb. 2 können mit diesem Kriterium zwei große Variationen in B_y bei den Datenpunkten 1560 und 1820 als Störungen des magnetischen und nicht des elektrischen Feldes angesehen werden.

Bei häufigen Störungen des magnetischen Feldes sind die bisher getroffenen Annahmen nicht mehr gültig. Aufgrund der Fehler im B-Feld ist die Lösung Z^S verzerrt und stellt keine gute Näherung an den Übertragungstensor \hat{Z} dar. Das oben beschriebene Verfahren muß deshalb erweitert werden. Hier kann die Remote-Reference-Technik genutzt werden, deren Lösung Z^R der Remote-Reference-Technik den Vorteil hat, daß sie eine unverzerrte Lösung auch bei korrelierten Störungen darstellt (GAMBLE et al., 1979). Für eine korrekte Vorhersage des Signalanteils des elektrischen Feldes ist es dann noch nötig, ein fehlerfreies B-Feld zu verwenden.

Um auf den anfangs vorausgesetzten Fall "störungsfreie Eingänge, gestörter Ausgang" zurückzukommen, wird zunächst ein magnetisches Feld B_p mit Hilfe der Remote-Reference-Technik vorhergesagt. Benutzt wird dazu der lineare magnetische Übertragungstensor \hat{K} zwischen Basis- und Referenz-Station (KRÖGER, 1981) und das zeitgleich registrierte, fehlerfrei angenommene Referenz-Feld B_r :

$$B_p = \hat{K} B_r . \quad (5)$$

Mit diesem B_p kann jetzt ein weitgehend fehlerfreies elektrisches Feld vorhergesagt werden, das im folgenden, da es aus einem vorhergesagten B-Feld entstammt, mit E_{pp} bezeichnet wird:

$$E_{pp} = Z^R B_p . \quad (6)$$

Die Forderung nach einem möglichst fehlerfreien B_r -Feld läßt sich weitgehend durch eine gute Wahl der Referenz-Station realisieren.

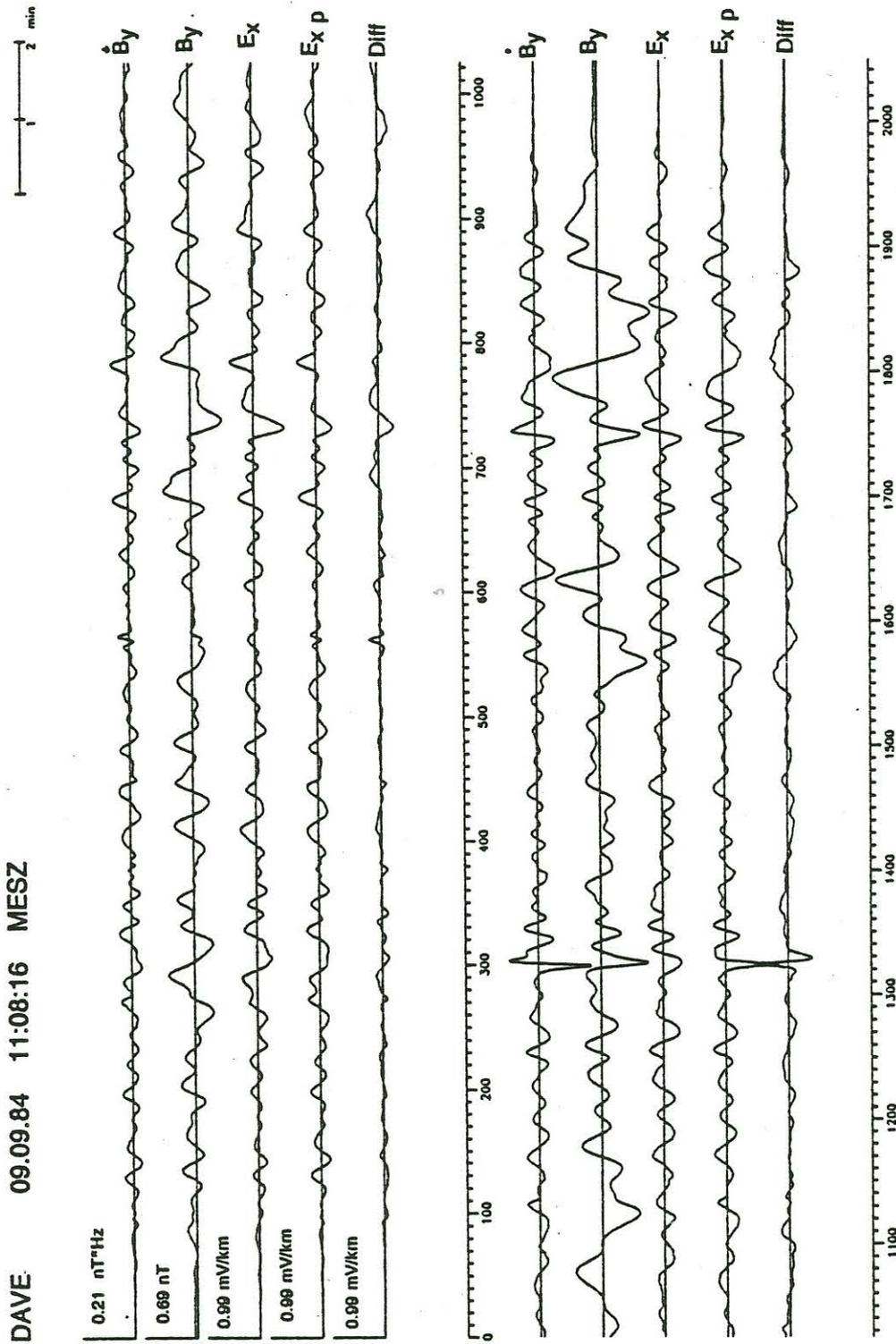


Abb. 2. Feldkomponenten \dot{B}_y , B_y , E_x , $E_x p$, sowie die Differenzspur für die Station DAVE. Bei Datenpunkt 1320 eine unkorrelierte Störung im B-Feld zu sehen.

Dieses erweiterte Verfahren wird zunächst für die Station ENNI (Lage etwa 30 km südöstlich von Münster) in Abb. 3 veranschaulicht. Dargestellt ist das Ergebnis für das Komponentenpaar \dot{B}_x und E_y . Nacheinander werden drei magnetische Spuren, dann drei elektrische Spuren gezeigt. In der ersten Spur ist die gemessene Komponente \dot{B}_x , darunter die mit Hilfe des Referenz-Feldes B , der Station HULS vorhergesagte Komponente \dot{B}_x , zu sehen. Danach folgt die Differenz dieser beiden magnetischen Spuren, die mit $\text{Diff-}\dot{B}$ bezeichnet ist. In dieser Spur zeichnen sich deutlich scharfe Impulse als Störanteile des gemessenen Magnetfeldes ab (vgl. z.B. Datenpunkt 570). Allerdings sind nicht alle Impulse, die in der Differenzspur zu sehen sind, Störanteile des Magnetfeldes in ENNI. Zum Beispiel ist bei Datenpunkt 380 ein kleiner Impuls in der Differenzspur zu sehen, der eindeutig von einer Störung des aus HULS vorhergesagten Feldes verursacht wird. Umgekehrt ist der Fall einer Störung am Datenpunkt 415, die offenbar in ENNI erzeugt ist. Allgemein belegt der unruhige Verlauf der Differenzspur, wie groß das magnetische Rauschen von ENNI ist.

Im nächsten Schritt ist mit dem vorhergesagten Feld B , das elektrische Feld E_{pp} vorhergesagt worden, dessen $E_{y,pp}$ -Komponente als fünfte Spur in Abb. 3 nach der gemessenen E_y -Komponente (4. Spur) zu sehen ist. Als letzte Spur ist die Differenz dieser beiden elektrischen Spuren abgebildet. Sie wurde mit Diff-E bezeichnet. Kleine Störungen des vorhergesagten Magnetfeldes, wie die bei Datenpunkt 380 in der Spur $\text{Diff-}\dot{B}$, sind zwar in \dot{B}_x , und auch ganz schwach in $E_{y,pp}$ noch zu sehen, werden aber in der Spur Diff-E von den übrigen Störanteilen des elektrischen Feldes fast völlig überlagert. Die vielen impulsförmigen Variationen in den magnetischen und elektrischen Original-Registrierungen können spätestens jetzt eindeutig als korrelierte Störungen identifiziert werden, da sie zeitgleich in den Spuren $\text{Diff-}\dot{B}$ und Diff-E auftreten. Die berechnete Spur Diff-E enthält durch die Erweiterung des Verfahrens trotz Störungen im magnetischen Feld wieder im wesentlichen die Störungen des lokalen E-Feldes. Somit kann auch bei korrelierten Störungen eine Trennung von Stör- und Signalanteilen im Zeitbereich erfolgen.

Abschließend wird an zeitgleichen Registrierungen der Stationen GILL (Lage etwa 20 km nördlich von Aachen) und KONZ (Lage etwa 20 km südöstlich von Aachen) gezeigt, daß korrelierte Störungen auch regionale Verbreitung haben können. In Abb. 4 sind, wie in Abb. 3, die Zeitspuren in der Reihenfolge \dot{B}_x , \dot{B}_x , und $\text{Diff-}\dot{B}$, sowie E_y , $E_{y,pp}$ und Diff-E dargestellt. Referenz-Station war die Station RISA (Lage etwa 20 km nordwestlich von Münster). In Abb. 4 a sind die Zeitspuren der Station GILL, in Abb. 4 b die Zeitspuren der Station KONZ abgebildet. Besonders soll hier auf die impulsartigen Störungen zwischen den Datenpunkten 1630 und 1880, die gleichzeitig an beiden Stationen korreliert im E- und B-Feld auftreten, hingewiesen werden. Zum besseren Vergleich wurden für beide Abbildungen je-

ENNI 16.10.84 18:28:16 MEZ

1 2 min

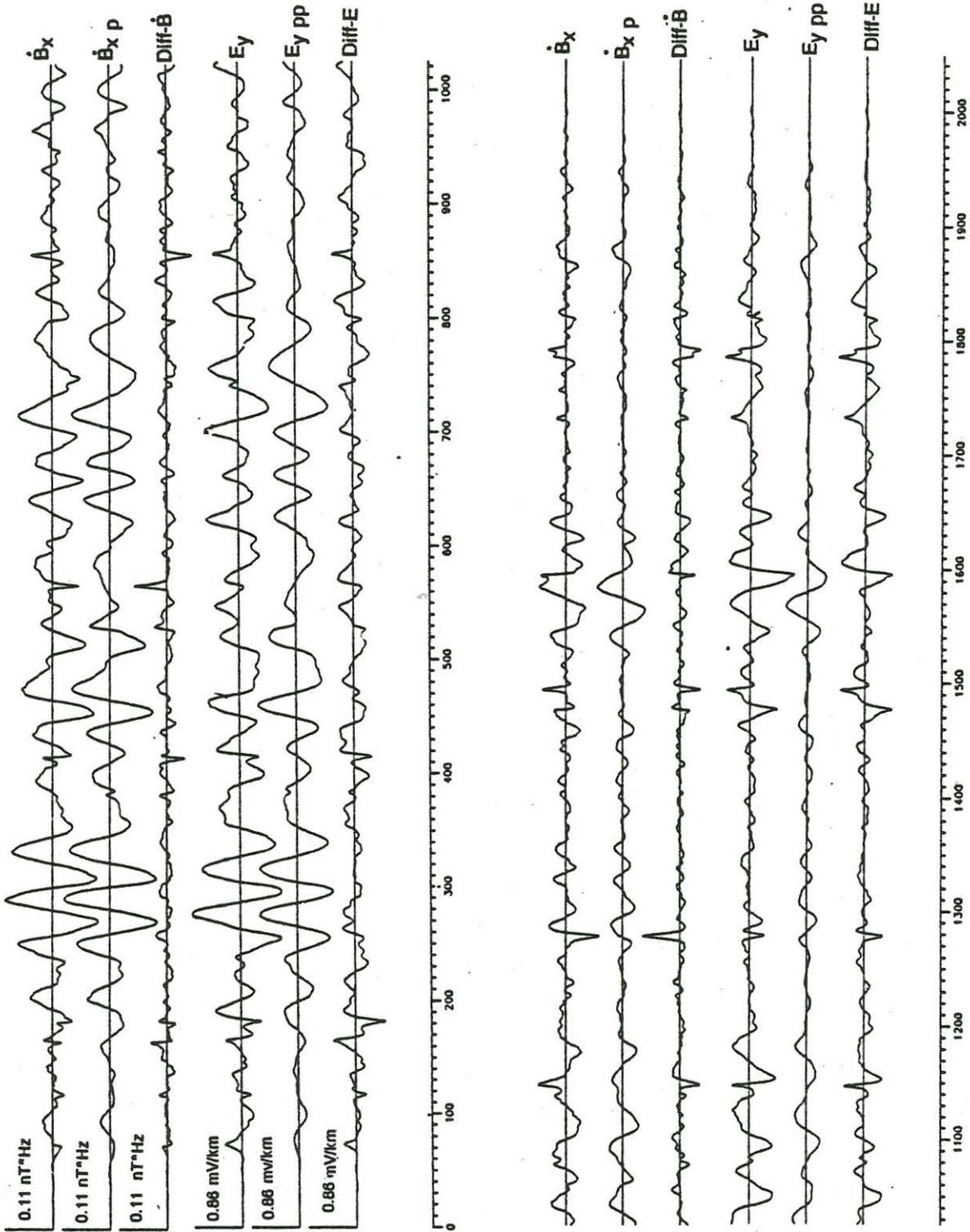


Abb. 3. Vergleich von gemessenen und vorhergesagten Feldkomponenten für die Station ENNI. Dargestellt sind \dot{B}_x -, $\dot{B}_{x,p}$ -Spur (Referenz-Station war HULS) sowie die mit 'Diff-B' bezeichnete Differenz dieser beiden magnetischen Spuren. Elektrische Spuren in der Reihenfolge E_y , $E_{y,pp}$, sowie die mit 'Diff-E' bezeichnete Differenz der beiden elektrischen Spuren. Die scharfen Impulse in E und B können durch die jeweilige Trennung als korrelierte Störungen erkannt werden.

weils gleiche Skalenwerte gewählt. Die maximalen Störampplituden an der Station GILL sind um fast ein Drittel größer als die bei der Station KONZ. Aufgrund ihrer Form und ihrer Gleichzeitigkeit läßt sich feststellen, daß die Störungen gleichen Ursprungs sind. Sie haben somit eine Verbreitung von ca. 40 km.

Eine Anwendung dieses Verfahrens mit dem Ziel, Übertragungstensoren zu verbessern, bietet sich für den Fall an, daß für eine Bearbeitung insgesamt nur wenig Datenmaterial zur Verfügung steht, in dem isolierte Einzelstörungen auftreten (vgl. Abb. 4).

Durch Berechnung der Differenzspur zwischen dem vorhergesagten und dem gemessenen Feld (elektrisch oder magnetisch) können recht genau der Beginn und das Ende einer größeren Störung in den Zeitreihen festgestellt werden. Ersetzt man gestörte Abschnitte des gemessenen E-Feldes durch die entsprechenden Abschnitte des vorhergesagten E-Feldes E_p (vgl. Gleichung (1)) bzw. E_{pp} (vgl. Gleichung (6)), verringert sich zwar die statistische Unabhängigkeit der neu berechneten Spektren, aber der Signalinhalt aus dem verbleibenden Teil der unveränderten Zeitreihe wird nutzbar gemacht. Das Signal-Rausch-Verhältnis der Spektren dieser Zeitreihe wird erhöht. Das Ersetzen von gemessenen B-Feldern durch B_p -Felder stellt im Gegensatz dazu keinen Informationsverlust dar, die Auswertung mit dem Formalismus einer Einzelstation erhält dann den Charakter einer Bearbeitung mit der Remote-Reference-Technik.

Auf diese Weise vorbearbeitete Daten können dann zum Beispiel mit der Methode der statistischen Frequenzanalyse ausgewertet werden, um die jetzt weniger verfälschte verbleibende Information möglichst vollständig zu nutzen. Eine erste Anwendung dieser Vorgehensweise auf Daten der Station DAVE zeigte, daß unter den genannten Voraussetzungen eine Verbesserung der bisherigen Ergebnisse möglich ist (THEISSING, 1988).

Zusammenfassend läßt sich folgendes sagen: Unter den genannten Voraussetzungen ist es mit dem beschriebenen Verfahren möglich, Signal- und Störanteile in magnetotellurischen Zeitreihen zu trennen. Dadurch werden auch solche Störungen sichtbar, die sonst selbst mit großer Erfahrung kaum hätten erkannt werden können. Die Möglichkeit, isolierte Störungen nicht nur zu erkennen, sondern auch genau einzugrenzen, kann genutzt werden, um Übertragungstensoren zu verbessern.

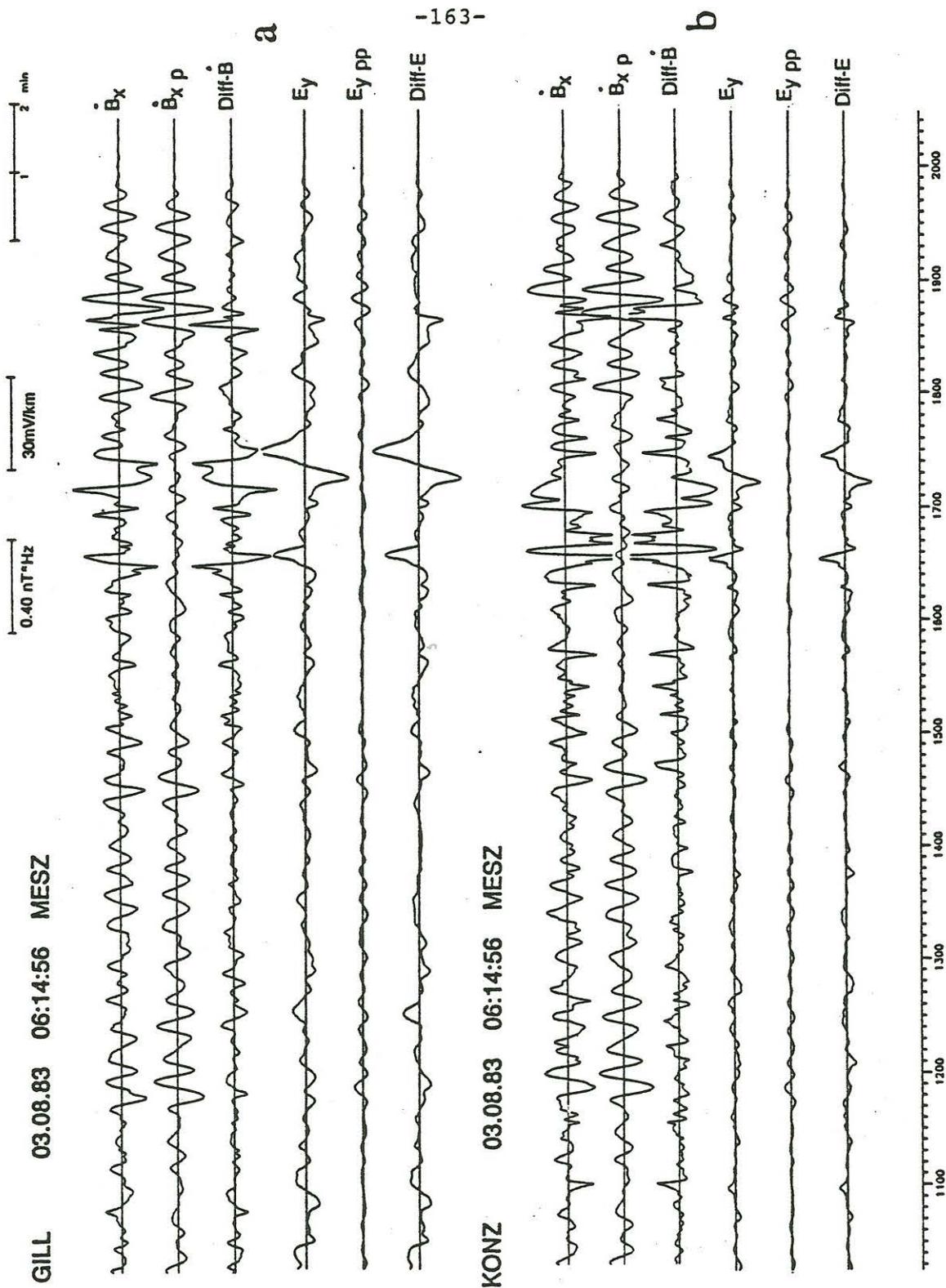


Abb. 4. Vergleich von gleichzeitig an den beiden Stationen GILL und KONZ gemessenen und vorhergesagten Feldkomponenten. Darstellung der Registrierungen wie in Abb. 3, (Referenz-Station war RISA). Deutlich ist zwischen den Datenpunkten 1630 und 1880 an beiden Stationen eine in E und B jeweils korrelierte Störung zu sehen, die zudem regional verbreitet ist (Abstand der Stationen ca. 40 km).

Literatur

Gamble, T.D., Goubau, W.M., Clarke, J.: Magnetotellurics with a Remote Magnetic Reference, Geophysics 44: p.53 - 68, 1979

Kröger, P.: Der Magnetotellurik - Impedanztensor bei lokal gestörten Meßgrößen, Diss. Fak. Maschinenbau u. Elektrotechnik, Technische Universität Braunschweig, 1981

Theißing, J.: Eine Methode zur Trennung von Signal- und Störanteilen in magnetotellurischen Zeitreihen, Diplomarbeit, Institut für Geophysik, Westfälische Wilhelms-Universität, Münster, 1988

Volbers, R.: Einzeleffektauswertung, Statistische Frequenzanalyse und Remote- Reference- Technik: Ein Vergleich an verschieden stark gestörten Daten eines Profils vom Münsterland zum Ostsauerland, Diplomarbeit, Institut für Geophysik, Westfälische Wilhelms-Universität, Münster, 1986