

R. Volbers

Zum Einsatz verschiedener Auswerteverfahren bei verschiedenartig gestörten MT-Daten

Magnetotellurische Messungen in industrialisierten Gebieten stellen wegen künstlicher Störungen bekanntlich besondere Anforderungen an die Auswertetechniken. Im folgenden soll gezeigt werden, wie durch den Einsatz verschiedener Verfahren verschiedenartig gestörte MT-Daten ausgewertet werden können. Angewendet auf ein Profil vom Münsterland zum Ostsauerland wurden hierzu Verfahren der Einzeleffektauswertung (EEA) (Jödicke, 1978) und der Statistischen Frequenzanalyse (SFA) (Schmucker, 1978; Bahr, 1985). Neben der Auswertung von Daten einer einzelnen Station (Single-Site-Auswertung) wurde zusätzlich die Remote-Reference-Technik (Gamble et al., 1978), die sich durch die Hinzunahme von möglichst ungestörten Daten einer Bezugsstation als wirkungsvolle Methode zur Bias-Reduzierung erwiesen hat, als Erweiterung der EEA und SFA eingesetzt.

Die EEA und die SFA unterscheiden sich im wesentlichen dadurch, daß bei der EEA aus dem gesamten Datenmaterial sehr gezielt solche Abschnitte (sog. Einzeleffekte) herausgesucht werden, die sich durch ein erhöhtes Signal-/Rauschverhältnis auszeichnen. Diese Einzeleffekte machen im allgemeinen nur 10-20% des gesamten Datenmaterials aus.

Bei der SFA wird hingegen das gesamte Datenmaterial (nachdem offensichtliche Datenfehler, wie z.B. der Ausfall eines Registrierkanals, eliminiert wurden) nach Aufteilung in Abschnitte der Länge $\Delta t \cdot 2^n$ (z.B. $n=11$) bearbeitet. Einer zeitlich aufwendigen Handauswahl von Einzeleffekten mit großem Signal-/Rauschverhältnis bei verhältnismäßig geringer Anzahl von Freiheitsgraden steht also eine automatische Verarbeitung großer Datenmengen mit geringerem Signal-/Rauschverhältnis, jedoch mit großer Anzahl von Freiheitsgraden gegenüber.

Abb.1 stellt die einzelnen Schritte der Datenbearbeitung mit EEA und SFA in Form eines Flußdiagramms gegenüber. Ausgangsmaterial beider Verfahren sind die Zeitreihen, bestehend aus den Komponenten des magnetischen ('B') und des elektrischen Feldes ('E') einer Basis-Station, und, falls erforder-

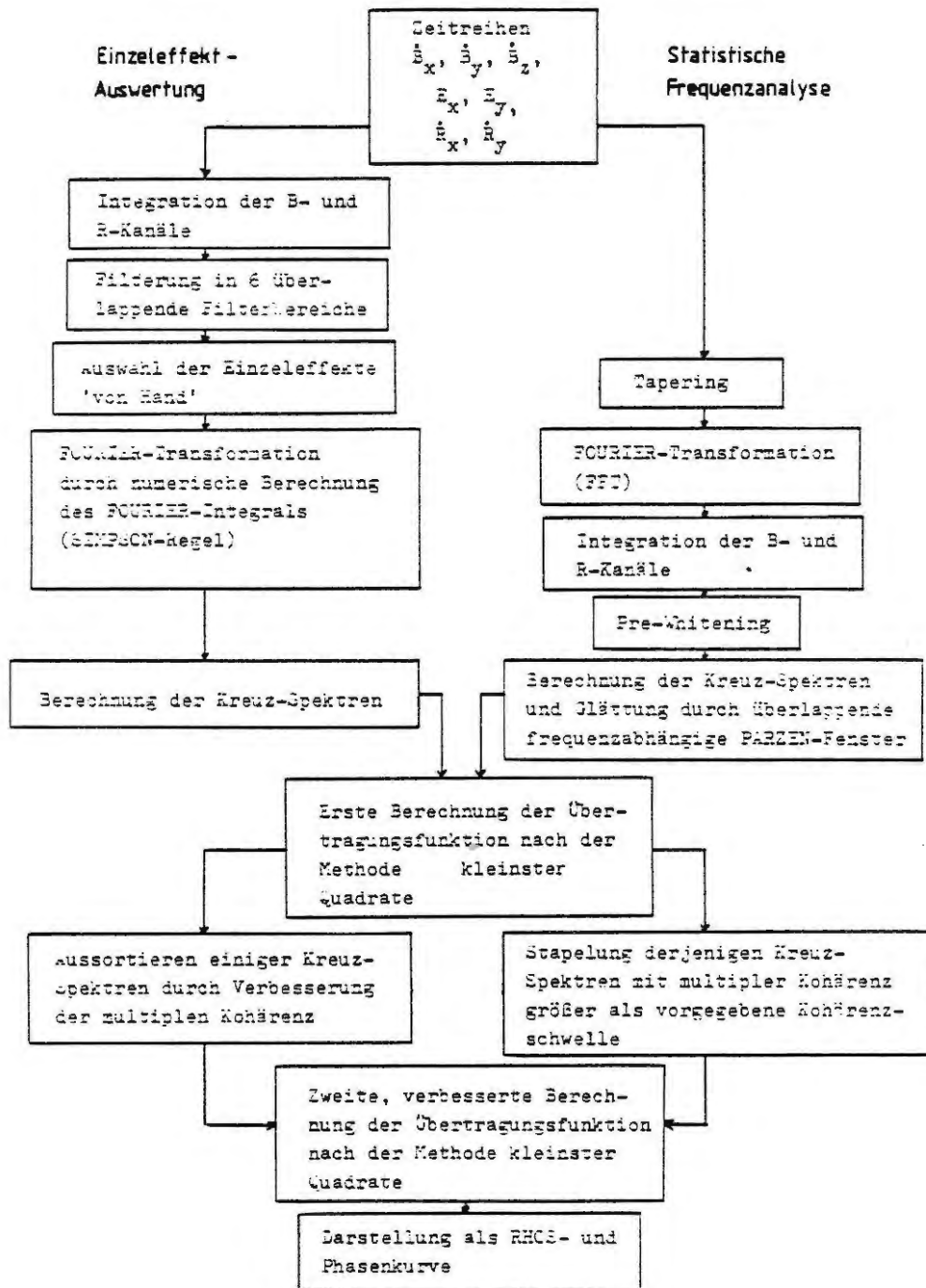


Abb.1: Flußdiagramm zur Datenbearbeitung mit EEA und SFA

lich, die für die Anwendung der Remote-Reference-Technik benötigten zeitgleichen Komponenten des magnetischen Feldes ('R') einer Remote-Station. Als Basis-Station wird die Station bezeichnet, die unter Hinzunahme der Remote-Station ausgewertet werden soll.

Der Vergleich beider Verfahren zeigt, daß die Berechnung der Übertragungsfunktionen (z.B. Z_{xx} , Z_{xy}) bei beiden Verfahren identisch ist, unterschiedlich ist nur der Weg, auf dem die erforderlichen Spektren gewonnen werden:

In den ersten Rechengang zur Berechnung der Übertragungsfunktionen gehen zunächst alle Einzeleffekte bzw. Zeitreihen ein. Die im logarithmischen Maßstab äquidistanten Werte der Übertragungsfunktionen der EEA sind dabei im Gegensatz zu denen der SFA ungeglättet und annähernd unabhängig voneinander. Je nach Breite der frequenzabhängigen, überlappenden Parzen-Fenster sind die entsprechenden Werte der SFA mehr oder weniger stark geglättet. Wegen der normalerweise im Datenmaterial enthaltenen Störungen in E und B liefert die erste Berechnung der Übertragungsfunktionen erfahrungsgemäß nur einen durch Bias mehr oder weniger stark verzerrten Schätzwert. Durch die Berücksichtigung der multiplen Kohärenz zwischen zwei Eingängen (zum Beispiel den Horizontalkomponenten des magnetischen Feldes) und einem Ausgang (zum Beispiel der Nord-Süd-Komponente des elektrischen Feldes) als Gütekriterium kann ein verbesserter Schätzwert bestimmt werden. Bei der Single-Site-Auswertung kann durch ein solches Kohärenzkriterium nur der Einfluß unkorrelierten Rauschens minimiert werden (vgl. z.B. Jödicke & Grinat, 1985). Der Einfluß korrelierten Rauschens kann unter Hinzunahme einer Remote-Station verringert werden, sofern die Störungen zwischen Basis- und Remote-Station nicht miteinander korreliert sind. Auch im Fall der Remote-Reference-Technik kann eine Verbesserung durch Anwendung des Kohärenzkriteriums erreicht werden (Volbers, 1986). Notwendigerweise wird in diesem Fall die Kohärenz nicht zwischen dem lokalen E und B der Basis-Station, sondern zwischen dem vorhergesagten $B'=K \cdot R$ und dem lokalen E berechnet. Hierbei ist K die Übertragungsfunktion zwischen B und R, zu deren Berechnung zusätzlich ein Kohärenzkriterium angewendet werden kann.

Um von den ersten Schätzwerten der Übertragungsfunktionen über das Gütekriterium zu einem zweiten, verbesserten Schätzwert zu gelangen, wird bei EEA und SFA unterschiedlich vorgegangen (vgl. Abb.1). Bei der EEA werden aus allen Spektren durch einfaches Nacheinanderausrechnen diejenigen Sätze von Fourier-Koeffizienten ermittelt, die durch ihr Weglassen die multiple Kohärenz am meisten verbessern. Die Anzahl der auszusortierenden Sätze von Fourier-Koeffizienten wird vorgegeben, erfahrungsgemäß wird durch eine Reduzierung von 10-20% pro Filterbereich eine deutliche Verbesserung erreicht. Bei dem Kohärenzkriterium der SFA wird getrennt für jede Zeitreihe und jeden Periodenwert überprüft, ob die mit dem Parzen-Fenster geglätteten Spektren eine vorgegebene Kohärenzschwelle (erfahrungsgemäß 0.6-0.8) überschreiten. Nur diejenigen Spektren, deren multiple Kohärenz den vorgegebenen Schwellwert überschreiten, werden aufsummiert und zur Berechnung des verbesserten Schätzwertes herangezogen (vgl. Bahr, 1985).

Im Gegensatz zum Nacheinanderausrechnen bei der EEA stellt das Stapeln nach Überschreiten einer Kohärenzschwelle eine weniger rechenzeitaufwendige Vorgehensweise dar. Eine zu hoch angesetzte Kohärenzschwelle kann aber dazu führen, daß für einige Periodenwerte die Spektren keiner Zeitreihe (der Länge $\Delta t \cdot 2048$) die Kohärenzschwelle überschreiten und damit die Übertragungsfunktionen für diese Periodenwerte unbestimmt bleiben. Eine geeignete Kohärenzschwelle muß also gegebenenfalls für jeden Periodenwert neu ermittelt werden.

Die Wirkung des Kohärenzkriteriums soll am Beispiel der ρ_{psyx} - und ϕ_{yx} -Werte des relativ schwach gestörten MT-Meßpunktes TINN, ca. 12km SW von Münster, für die EEA (Abb.2) und die SFA (Abb.3) demonstriert werden. Fehlerbalken sind zur besseren Übersichtlichkeit weggelassen. Das Symbol 'x' markiert das Ergebnis 'Minimaler Fehler in E', das Symbol '⊗' das Ergebnis 'Minimaler Fehler in H_x '. Die Lösung 'Minimaler Fehler in H_y ' wird hier nicht betrachtet, da sie wegen angenäherter Eindimensionalität des Untergrundes instabil ist. Die durchgezogene Linie stellt das Ergebnis einer mit den Fehlern der Einzellösungen gewichteten Mittelung aus 'x' und '⊗' dar. Die gewichtete Mittelung ist ein Versuch, aus den

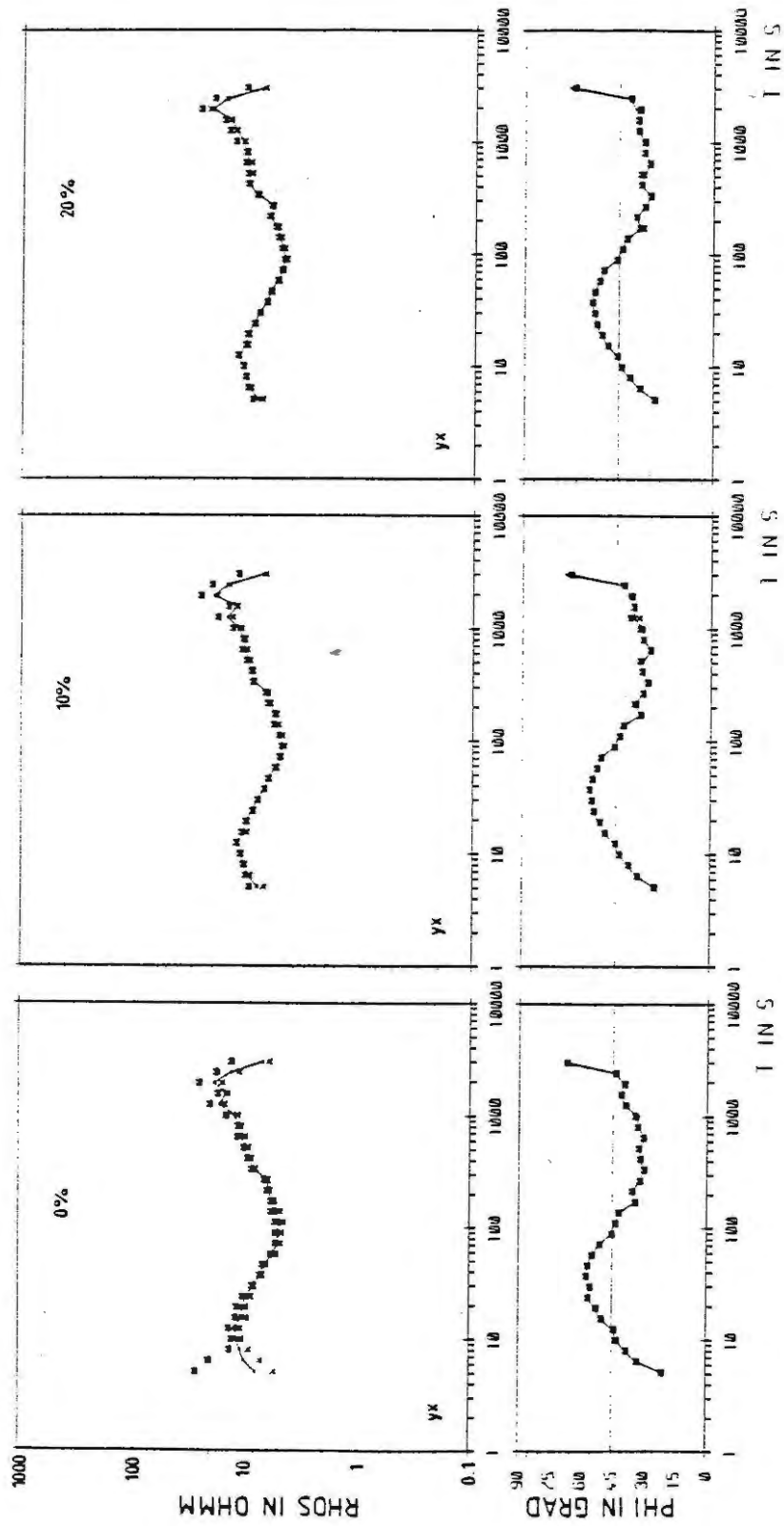


Abb.2: Wirkung des Kohärenzkriteriums der EEA (Meßpunkt TINN)
 Signatur: x \triangle Minimaler Fehler in E; \boxtimes \triangle Minimaler Fehler in H_x ; durchgez. Linie \triangle gewichtete Mittelung

beiden gegensinnig verzerrten Einzellösungen ein möglichst unverzerrtes Ergebnis zu erzielen (vgl. Gundel, 1977).

Deutlich ist in Abb.2 und 3 bei 0% bzw. Schwelle 0.0 (d.h. alle Sätze von Fourier-Koeffizienten bzw. alle Zeitreihen berücksichtigt) die Wirkung unkorrelierten Rauschens auf die ρ_S -Kurve zu erkennen: Das Vorhandensein von Rauschen in den jeweils als fehlerfrei angenommenen Eingängen wirkt sich für den 'Minimalen Fehler in E' in zu kleinen, für den 'Minimalen Fehler in H_X ' in zu großen Werten der Übertragungsfunktionen aus (vgl. Schmucker, 1984). Besonders deutlich ist dies bei den kürzesten und längsten Perioden zu erkennen. Dabei ist der Bias bei der EEA etwas geringer als bei der SFA. Offensichtlich wirkt sich das durch die Auswahl der Einzeleffekte von Hand erhöhte Signal-/Rauschverhältnis bias-reduzierend aus.

Werden 'schlechte' Sätze von Fourier-Koeffizienten aussortiert (10% oder 20% in Abb.2) oder nur Spektren mit einer genügend großen Kohärenz zur Auswertung herangezogen (0.4 oder 0.8 in Abb.3), wird die angestrebte Verringerung des Bias tatsächlich auch erreicht, was der geringer werdende Abstand zwischen den beiden Kurven belegt.

Auffällig ist, daß der Verlauf der mit Fehlern gewichteten ρ_S -Kurve (durchgezogene Linie in Abb.2 und 3) nahezu unabhängig von der Anwendung der Kohärenzkriterien bleibt. Dies bedeutet, daß durch die gewichtete Mittelwertbildung auch ohne Anwendung von Kohärenzkriterien bei dieser relativ ungestörten Station eine gute Näherung für die bias-freie Lösung erreicht werden kann, wie insbesondere der Vergleich mit 20% Datenreduktion (Abb.2) oder der Kohärenzschwelle 0.8 (Abb.3) zeigt.

Im Gegensatz zu den ρ_S -Werten sind die Phasen vom 'Minimalen Fehler in E' und 'Minimalen Fehler in H_X ' identisch, d.h. bias-frei, wie in Abb.2 (0%) und Abb.3 (0.0) zu erkennen ist. Nach Anwendung der Kohärenzkriterien treten kleine Abweichungen der Phasenwerte voneinander auf. Hier handelt es sich offensichtlich um Streuungen als Folge statistischer, nicht systematischer Fehler. Insgesamt ändern sich die Phasenwerte aber nur wenig. Dies ist ein wichtiges Ergebnis, denn nach Anwendung des Kohärenzkriteriums sind die Datensätze für 'Minimalen Fehler in E' und 'Minimalen Fehler in H_X ' nicht

mehr identisch, da zum Teil unterschiedliche Sätze von Fourier-Koeffizienten bzw. Spektren aussortiert werden. Vergleicht man die ρ_s - und Phasenkurven der EEA (Abb.2) mit denen der SFA (Abb.3), so kann man eine gute Übereinstimmung feststellen. Dabei zeigen die Ergebnisse der SFA einen glatteren Verlauf als die der EEA, was vermutlich auf die größere Anzahl der Freiheitsgrade durch eine bessere Ausschöpfung des Datenmaterials und zum Teil auf die Glättung aufgrund der Verwendung überlappender Parzen-Fenster zurückzuführen ist. Die Gesamtanzahl der Freiheitsgrade liegt bei der EEA zwischen ca. 1200(0%) und 960(20%), bei der SFA zwischen 180000(0.0) und 45000(0.8) !

Nach diesem ersten Beispiel einer relativ schwach gestörten Station sollen in einem zweiten Beispiel die Ergebnisse der relativ stark gestörten Station DAVE (20km südlich von Münster) aus EEA, SFA und dazu jeweils das Ergebnis mit Anwendung der Remote-Reference-Technik gegenübergestellt werden. 'Kurzperiodisch' ($\Delta t=1s$) und 'langperiodisch' ($\Delta t=32s$) (Betriebsmoden der verwendeten Metronix-Apparatur) registrierte Zeitreihen von DAVE sind in Abb.4 und 5 zusammen mit den zeitgleichen Zeitreihen der als Remote-Station verwendeten Station HULS dargestellt. Der Abstand HULS - DAVE beträgt etwa 20km.

In der kurzperiodischen Zeitreihe von DAVE (Abb.4) sind in den E- und B-Kanälen starke, den Signalen überlagerte korrelierte Störungen zu erkennen, daneben aber auch relativ schwach gestörte Abschnitte. Das gleiche Bild zeigt sich in der langperiodischen Zeitreihe (Abb.5). Besonders auffällig sind die zwischen den als Markierung eingezeichneten Pfeilen auftretenden Störungen in allen fünf Kanälen. Die Zeitreihen der Station HULS sind praktisch störungsfrei. Betrachtet man die Signalanteile, so kann man eine gute Korrelation zwischen HULS und DAVE feststellen.

In Abb.6 sind die Ergebnisse aus EEA, SFA und Remote-Reference-Technik zusammen dargestellt. Aufgebaut ist Abb.6 nach folgendem Schema: In jedem einzelnen Bild ist die Signatur für die EEA ein 'x', für die SFA ein '⊗'. Die obere Bildreihe enthält die Ergebnisse ρ_{sxy} und ϕ_{xy} von links nach rechts in der Reihenfolge 'Minimaler Fehler in E_x ', 'Minimaler Fehler

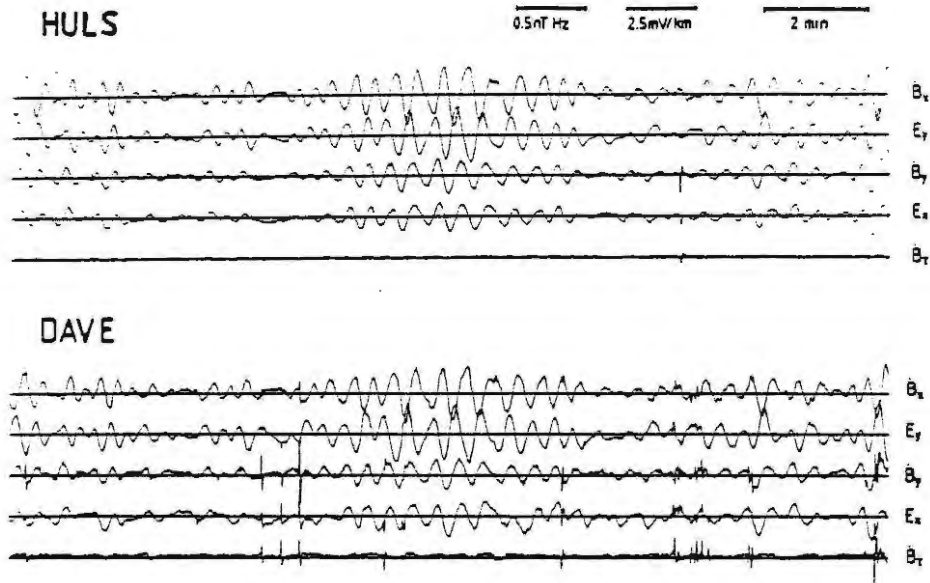


Abb.4: Zeitgleiche kurzperiodische Registrierung der Meßpunkte HULS und DAVE vom 21.09.84, Beginn 10:57:04 MEZ

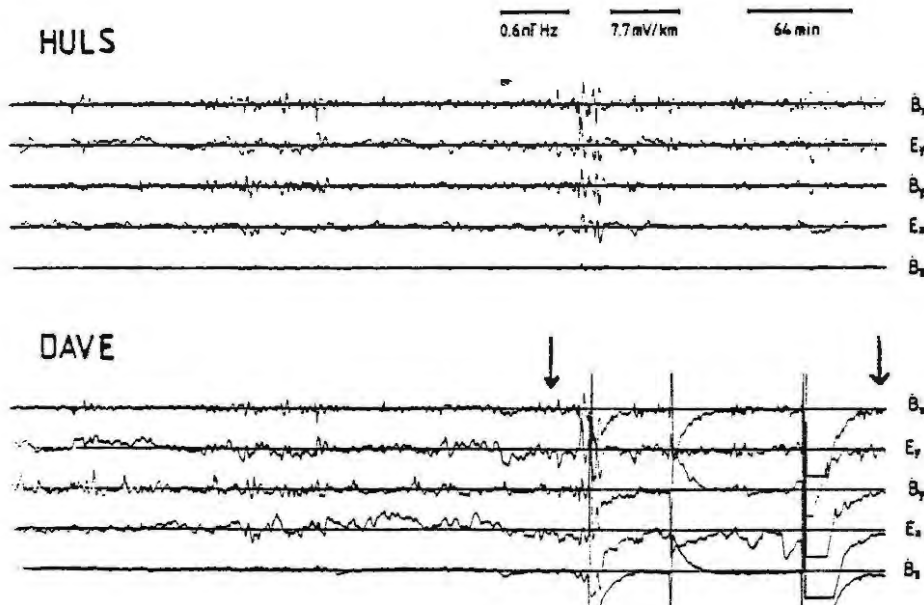


Abb.5: Zeitgleiche langperiodische Registrierung der Meßpunkte HULS und DAVE vom 13.09.84, Beginn 21:00:32 MEZ

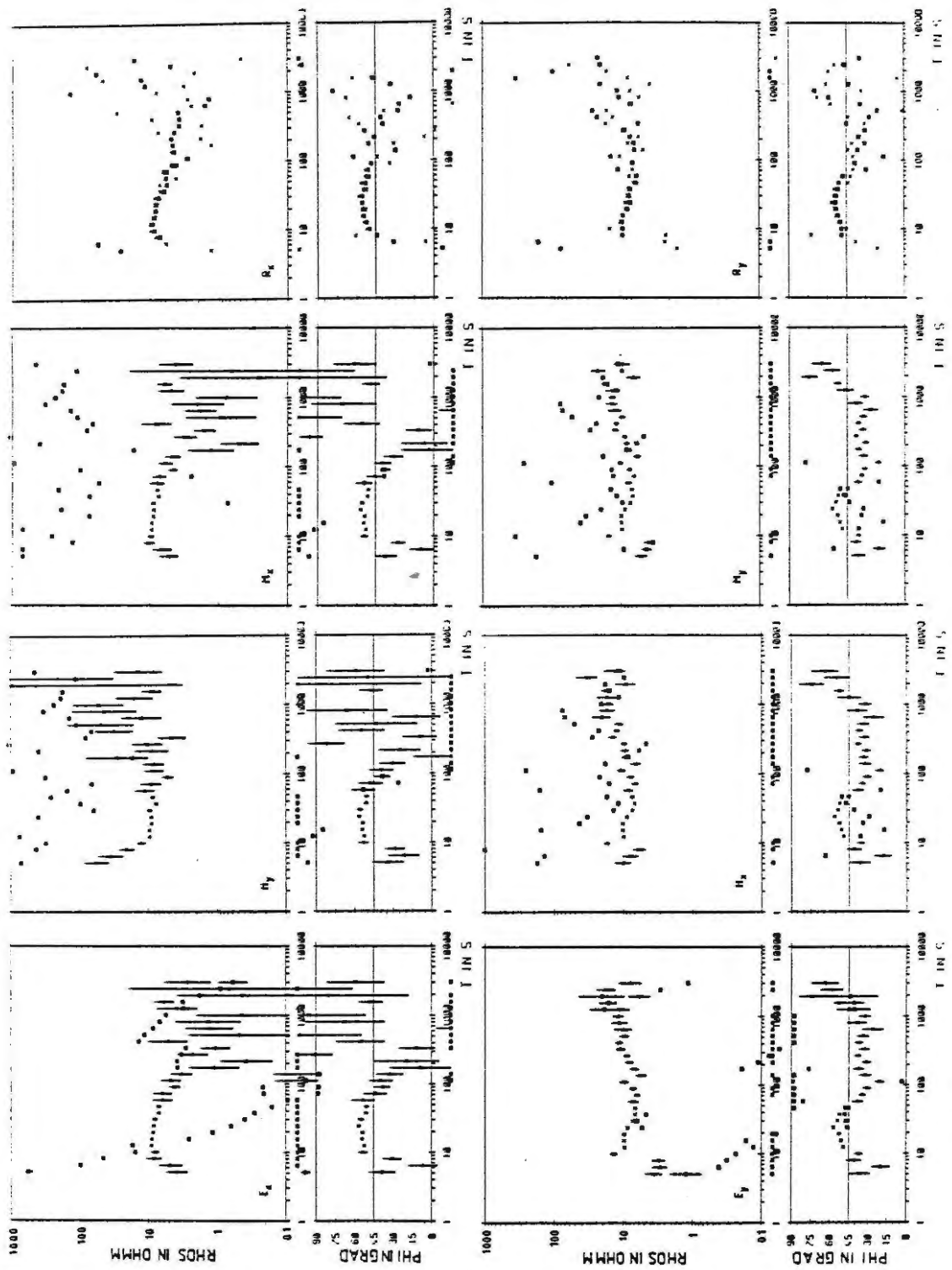


Abb.6: Ergebnisse der EEA, SFA und Remote-Reference-Technik für DAVE Signatur: x ⊠ EEA; ⊠ ⊠ SFA; weitere Bezeichnungen vgl. Text

in H_y' , die mit Fehlern gewichtete Mittelung (M_x) und die Anwendung der Remote-Reference-Technik (R_x). Analog dargestellt sind in der unteren Bildreihe die Ergebnisse ρ_{syx} und ϕ_{yx} in der Reihenfolge 'Minimaler Fehler in E_y ', 'Minimaler Fehler in H_x ', der Mittelwert aus beiden (M_y) und Remote-Reference-Technik (R_y). Eine Verbesserung durch Anwendung des Kohärenzkriteriums ist bereits durchgeführt, und zwar wurden bei der EEA 20% der Sätze von Fourier-Koeffizienten aussortiert, bei der SFA und der SFA mit Remote-Reference wurden nur Spektren mit einer multiplen Kohärenz größer 0.6 zugelassen. Bei der EEA mit Remote-Reference wurde das Kohärenzkriterium bislang noch nicht angewendet.

Mit der EEA wird in der xy-Komponente in allen Lösungen von 10-140s, in der yx-Komponente von 10-3000s (außer R_y) ein einigermaßen glattes Ergebnis erzielt. Dagegen versagt die SFA in den Lösungen 'Minimaler Fehler in E', 'Minimaler Fehler in H' und damit auch in der gewichteten Mittelung fast völlig. Einzelne ρ_s - und Phasenwerte (z.B. in E_y bei 20-40s oder zwischen 1000-2000s) stimmen zwar mit denen der EEA überein, ein z. B. mit Modellrechnung auswertbares Ergebnis wird aber nicht erreicht. Dieses sehr schlechte Ergebnis der SFA im gesamten Periodenbereich kann damit begründet werden, daß die starken Störungen ein sehr breitbandiges Spektrum aufweisen. Außerdem sind sie in E und B korreliert, so daß sie durch das verwendete Kohärenzkriterium nicht als Störung erkannt werden. Erst die Anwendung von Remote-Reference gibt für die SFA ein überzeugend verbessertes Ergebnis.

Vergleicht man die theoretisch bias-freien Remote-Reference-Ergebnisse mit den Ergebnissen der gewichteten Mittelung der EEA, so zeigt die gute Übereinstimmung im Bereich von 10-100s, daß auch bei dieser sehr stark gestörten Station die mit Fehlern gewichtete Mittelung bei der EEA eine gute Näherung an ein bias-freies Ergebnis darstellt.

Vergleichende Untersuchungen der vorausgegangenen Art wurden auf einem längeren Profil mit verschiedenen stark gestörten Stationen durchgeführt (Volbers, 1986). Zusammenfassend kann dabei folgendes festgehalten werden:

Die EEA erweist sich gegenüber der SFA als bedeutend flexibleres Auswerteverfahren. Die gezielte Auswahl von Abschnitten

mit erhöhtem Signal-/Rauschverhältnis aus dem gesamten Datenmaterial ist zwar mit einem größeren Arbeitsaufwand verbunden, ist aber in Einzelfällen sicherlich gerechtfertigt. Relativ ungestörte Meßpunkte lassen sich durch die SFA mit geringem Aufwand auswerten. In diesen (seltenen) Fällen ist eine EEA nicht angemessen und führt dann zum Teil zu schlechteren Ergebnissen.

Die Anwendung der Remote-Reference-Technik ist ebenfalls mit einem erhöhten Arbeitsaufwand verbunden, da zu einer Basis-Station eine zweite Station zeitgleich betrieben werden muß. Aber erst durch diese Remote-Station sind korrelierte Störungen im Datenmaterial der Basis-Station als solche zu erkennen. Ist die Anwendung der Remote-Reference-Technik nicht möglich, kann durch die Verwendung einer mit Fehlern gewichteten Mittelung in vielen Fällen eine brauchbare Näherung für ein bias-freies Ergebnis erzielt werden.

Literatur:

- Bahr, K.: Magnetotellurische Messungen des elektrischen Widerstandes der Erdkruste und des oberen Mantels in Gebieten mit lokalen und regionalen Leitfähigkeitsanomalien, Diss. Math.-Naturw. Fak., Universität Göttingen, 1985
- Gamble, T.D., Goubau, W.M., Clarke, J.: Magnetotellurics with a remote magnetic reference, *Geophysics* 44: p.53 - 68, 1978
- Gundel, A.: Erdmagnetische Induktion einer dreidimensionalen Salzstruktur, Diss. Math.-Naturwiss. Fak., Universität Göttingen, 1977
- Jödicke, H.: Auswerteverfahren Münster, Protokoll über das Kolloquium 'Elektromagnetische Tiefenforschung', Neustadt/W., 1978
- Jödicke, H., Grinat, M.: Magnetotelluric measurements at the SE flank of the Stavelot-Venn anticline using the remote-reference-technique, *N. Jb. Geol. Paläont. Abh.* 171: p.425 - 440, 1985