

H. Brasse, A. Junge

Bemerkungen zur Anregungsmode im AMT-Frequenzbereich

Einleitung

Natürliche elektromagnetische Felder zur Untersuchung der elektrischen Leitfähigkeit des Untergrundes lassen sich sowohl nach dem Frequenzbereich als auch hinsichtlich der Lage ihrer Quellen in zwei Klassen einteilen:

- (a) Für Perioden  $T > 1$  s (Pulsationen und Variationen) beruhen sie im wesentlichen auf zeitlich und räumlich variierenden Stromsystemen in der Ionosphäre und Magnetosphäre, wobei an der Erdoberfläche die Wirkung der parallel zur Erdoberfläche fließenden Ströme beobachtet wird. Für eine nur von der Tiefe abhängigen Leitfähigkeitsverteilung im Untergrund (1D-Fall) werden demnach nur zur Erdoberfläche tangential elektrische Felder (TE-Mode) gemessen.
- (b) Für Perioden  $T < 1$  s (Atmosferics, Schumann-Resonanzen) werden die Felder hauptsächlich durch Blitzentladungen angeregt. In einem idealen Wellenleiter Ionosphäre/Erde breitet sich dabei – mit der Annahme einer mittleren Ionosphärenhöhe von 100 km – unterhalb von 1.5 kHz nur die TM-Mode aus (Galejs 1972 [3]). In einem realen Wellenleiter (d.h. endliche Leitfähigkeiten von Erde/Ionosphäre) ist auch die TE-Mode – in allerdings stark gedämpfter Form – ausbreitungsfähig. An der anisotropen Ionosphäre kann eine TM/TE-Modenumwandlung auftreten.

Während in der Atmosphärenphysik die TE-Mode gegenüber der TM-Mode häufig vernachlässigt wird (siehe z.B. Sentman 1987 [7]), wird in der Magnetotellurik oft die entgegengesetzte Annahme gemacht (vgl. Rokityansky 1982 [6]).

Dieser Beitrag beschreibt ein Experiment, in dem der Frage nach dem Anregungsmodus nachgegangen wird.

Theoretische Überlegungen

Die Komponenten des elektromagnetischen Feldes werden im Frequenz-Wellenzahl-Bereich mit dem harmonischen Ansatz  $\underline{E}, \underline{B} \sim \exp\{i(\omega t + k_x x + k_y y)\}$  mit  $\omega$  als Kreisfrequenz und  $k_x, k_y$  als horizontalen Wellenzahlen dargestellt. Die positive z-Richtung des kartesischen Koordinatensystems zeigt senkrecht nach unten. Die Leitfähigkeitsverteilung des Untergrundes sei als eindimensional angenommen.

Die Induktionsgleichung lautet dann für Bereiche mit isotroper und konstanter Dielektrizität  $\epsilon$ , Suszeptibilität  $\mu$  und Leitfähigkeit  $\sigma$

$$\partial_{zz}^2 \underline{E} - (i\omega\mu\mu_0\alpha + k_x^2 + k_y^2)\underline{E} = 0 \quad (1)$$

mit  $\alpha = \sigma + i\omega\epsilon\epsilon_0$ . Die Lösung  $\underline{E} = \underline{E}_0 e^{-z/C}$  enthält die induktive Skalenlänge  $C = (i\omega\mu_0\alpha + k_x^2 + k_y^2)^{-1/2}$ , wobei in der Erde wie in der Luft  $\mu \approx 1$  gesetzt wurde.

Mit  $\nabla \cdot \underline{B} = 0$  und der Annahme  $\nabla \cdot \underline{E} = 0$  (homogene, raumladungsfreie Bereiche) läßt sich das elektromagnetische Feld in die TE- und die TM-Mode trennen. Die Beziehungen zwischen den Feldkomponenten lauten dann für die beiden Moden:

$$B_y^{\text{TM}} = \mu_0 \alpha C^{\text{TM}} E_x^{\text{TM}} \quad (2a) \quad E_z^{\text{TM}} = iC^{\text{TM}}(k_x E_x^{\text{TM}} + k_y E_y^{\text{TM}}) \quad (2b)$$

$$E_x^{\text{TE}} = i\omega C^{\text{TE}} B_y^{\text{TE}} \quad (3a) \quad B_z^{\text{TE}} = iC^{\text{TE}}(k_x B_x^{\text{TE}} + k_y B_y^{\text{TE}}) \quad (3b)$$

Für  $E_y$  und  $B_x$  gelten (2a) und (3a) entsprechend mit negativem Vorzeichen auf jeweils der rechten Seite.

Für quasihomogene Felder – d.h.  $|\omega\mu_0\alpha|^2 \gg |k_x^2 + k_y^2|$  – sind die magnetotellurischen Impedanzen für beide Moden gleich und spalten erst auf, wenn diese Bedingung nicht mehr erfüllt ist (siehe auch Rokityansky 1982, S.48 [6]).

An der Leitfähigkeitsgrenze Luft(1)/Boden(b) ist das elektrische Vertikalfeld unstetig und springt um den Betrag:

$$\frac{|E_z^1|}{|E_z^b|} \approx \frac{\sigma^b}{\epsilon^1 \epsilon_0 \omega} \quad , \quad (4)$$

wenn der Verschiebungsstrom in der Erde und der Leitungsstrom in der Luft vernachlässigt werden, wie es für den Frequenzbereich der AMT zulässig ist. Für eine Extremalabschätzung mit  $\sigma^b \approx 10^{-3} \text{S/m}$ ,  $\epsilon^1 \approx 1$ ,  $\omega \approx 10^4 \text{s}^{-1}$  folgt  $|E_z^1|/|E_z^b| \approx 10^4$ . Da die Messung des bodenelektrischen Vertikalfeldes nur an Sonden mit geringem Abstand voneinander erfolgen kann (und die gemessenen Spannungen somit entsprechend klein sind), ist der Nachweis der TM-Mode nur durch Aufzeichnung des vertikalen luftelektrischen Feldes möglich.

### Messungen

Abb.1 zeigt die Aufsicht und den Querschnitt der Sonden- und Antennenanordnung. Es wurden die Filloux'schen Ag/AgCl-Elektroden (Filloux 1987 [2]) in der Göttinger Sondenausführung (Junge 1990 [5], jedoch nur untere Kammer) mit 50 m Nord-Süd- und Ost-West-Auslage in ca. 1 m Tiefe vergraben. Über der Ost- und West-Sonde

wurde zusätzlich direkt unter der Oberfläche jeweils eine zweite Sonde eingebracht, so daß der Abstand zwischen den Fritten der beiden Sonden etwa 80 cm betrug. Die an den übereinanderliegenden Sonden abgegriffene Spannung ist dann proportional zum vertikalen erdelektrischen Feld  $E_z^b$  an der Oberfläche.

Zur Messung des luftelektrischen Feldes wurde in einer Entfernung von ungefähr 5 m von der Ost-Sonde eine 1.8 m lange Kupferstabantenne über einer ca. 2 m<sup>2</sup> großen, geerdeten Metallplatte angebracht. Das vertikale luftelektrische Feld  $E_z^l$  berechnet sich dann aus dem Quotienten der gemessenen Spannung  $U$  zwischen Erdung und Antenne und der effektiven Antennenhöhe  $h_{\text{eff}}$ , wobei  $h_{\text{eff}} \approx h/2$  für  $h \ll \lambda$  (Hecydt 1982 [4]).

Die Messung der magnetischen Feldkomponenten erfolgte mit Induktionsspulen vom Typ CM 216 E (ECA), die etwa in der Mitte des Sondenkreuzes vergraben wurden. Als Aufzeichnungseinheit dienten zwei zeitgleich getriggerte Datenlogger (Brasse 1992 [1]), die mit einer Taktrate von 2 kHz arbeiteten. Für die Aufzeichnung der vertikalen E-Felder wurden die Tellurik-Verstärkereingänge benützt, deren Eingangswiderstand mit 1 M $\Omega$  für die Messung der luftelektrischen Felder zu niedrig ist. Durch die Fehlanpassung sind die gemessenen Spannungen bzw. das daraus abgeleitete luftelektrische Feld mit großer Wahrscheinlichkeit unterschätzt worden.

Die Messungen wurden an zwei Stationen durchgeführt. Die erste (BRA) lag im Bramwald bei Göttingen in einem Hochwald, die Antenne befand sich in einer Lichtung. Möglicherweise ist durch die Bäume das luftelektrische Feld etwas abgeschirmt worden. Der Vorverstärker wurde direkt neben die Antenne plazierte, um die kapazitive Ankopplung der luftelektrischen Felder an die Zuleitungskabel zu unterdrücken. Die meteorologischen Bedingungen waren mit völliger Windstille und beständiger Hochdruckwetterlage während der Messung optimal.

Der Bramwald besteht im wesentlichen aus annähernd horizontal gelagerten Buntsandsteinschichten. Geoelektrische Messungen (Timmer 1991 [8]) im Umfeld der Meßstation bestätigten deren eindimensionalen Charakter, der sich in den Impedanzsensoren für den hochfrequenten Bereich ab 10 Hz zeigte.

Abb.2 stellt einen Ausschnitt von 512 ms der Zeitreihen aller beobachteten Komponenten vor. Es dominieren die 16 2/3 und 50 Hz Störfrequenzen; etwa in der Mitte des Intervalls ist ein typischer Sferic in allen Kanälen außer  $B_z$  (1D-Untergrund!) zu erkennen. Etwa 50 ms danach tritt ein schwacher Sferic in  $B_x$ ,  $E_y$  und den beiden vertikalen E-Feldern auf. Der Rauschpegel von  $E_z^l$  und  $E_z^b$  ist hoch im Vergleich zu

den anderen Komponenten, vermutlich bedingt durch den hohen Verstärkungsfaktor (25000) der Eingangsverstärker.

Eine erste Abschätzung der Amplitudenverhältnisse läßt sich im Zeitbereich für den starken Sferic durchführen:

Mit  $f \approx 100$  Hz,  $B_h$  (horizontales B - Feld)  $\approx 10^{-1}$  nT,  $E_h$  (horizontales E - Feld)  $\approx 2 \cdot 10^{-5}$  V/m,  $B_z \approx 10^{-3}$  nT,  $E_z^b \approx 10^{-5}$  V/m und  $E_z^l \approx 10^{-4}$  V/m ergibt sich als induktive Skalenlänge  $C \approx 100$  m und  $\sigma \approx 10^{-2}$  S/m.

Ohne Bedenken kann  $k < 10^{-6}$  m $^{-1}$  (Fernfeld) angesetzt werden. Es bestätigt sich damit, daß nach (3b)  $B_z < 10^{-5}$  nT selbst bei ausschließlicher TE-Anregung nicht meßbar wäre!

Unter der Annahme einer Anregung nur durch die TM-Mode ergibt sich nach (2b)  $E_z^b < 10^{-9}$  V/m und nach (4)  $E_z^l < 10^{-2}$  V/m. Während  $E_z^l$  und  $E_x$  bzw.  $E_y$  aus den Messungen miteinander verträglich sind, kann der für  $E_z^b$  gemessene Effekt nicht erklärt werden.

Die zweite Station (MAG8) befand sich im Es Safya-Becken im NW-Sudan (Brasse 1992 [1]). Für die hohen Frequenzen waren die Unterschiede zwischen den Übertragungsfunktionen beider Polarisationsrichtungen minimal (Anisotropie  $< 1.2$ , Skew  $< 0.1$ ), so daß für die vorliegenden Betrachtungen näherungsweise von eindimensionalen Leitfähigkeitsverhältnissen ausgegangen werden kann. Der instrumentelle Aufbau der Station entsprach dem an der Station BRA. Abb.3 zeigt einen Registrerausschnitt gleicher Länge wie in Abb.2. Zusätzlich sind die Hodogramme der horizontalen E- und B-Felder dargestellt.

Es fehlen die künstlichen Störungen, die Aktivität ist höher, da die Station viel näher zu den tropischen Gewitterzentren liegt. Die vier größten Sferics sind nummeriert, um die korrespondierenden Polarisationsrichtungen im Hodogramm zu markieren. Es fällt auf, daß die Effekte 1 und 2 im Gegensatz zu 3 und 4 im vertikalen Feld nicht auftreten. Die Größenordnung der vertikalen Felder in 3 und 4 entspricht der des Effektes in BRA (Abb.2), insbesondere ist das vertikale bodenelektrische Feld der Effekte 3 und 4 sogar noch größer als das der horizontalen Komponenten.

Das Hodogramm verdeutlicht, daß die Quellen der Effekte 1 und 2 in südlicher Richtung, die von 3 und 4 in südöstlicher Richtung liegen. Offenbar hängen die unterschiedlichen Richtungen mit unterschiedlichen Modenstrukturen des anregenden Feldes zusammen.

## Schlußfolgerungen

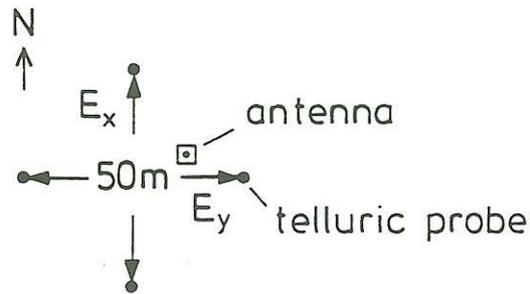
Die durchgeführten Messungen sind im Hinblick auf absolute Größenbestimmungen des vertikalen luftelektrischen Feldes noch unzureichend. In diesem Stadium kann jedoch aus den Beobachtungen geschlossen werden, daß das induzierende Feld im AMT-Frequenzbereich TM-Anteile enthält. Für die Interpretation der MT-Übertragungsfunktionen ist dies nebensächlich, solange man sich im Fernfeld der Quelle befindet. Nicht zu erklären sind die gemessenen vertikalen bodenelektrischen Felder, die in der Größenordnung der horizontalen tellurischen Felder liegen und nicht der Sprungbedingung nach Gl.(4) genügen. Weitere Untersuchungen mit verbesserter Meßtechnik erscheinen daher angebracht. Dabei sollten auch der Einfluß von Leitfähigkeitsanomalien z.B. durch geoelektrische Kartierungen kontrolliert und das luftelektrische Feld an verschiedenen Stellen gleichzeitig aufgezeichnet werden.

## Literatur

- [1] H. BRASSE, *Audiomagnetotellurische Tiefensondierungen in Nordost-Afrika*. Diss. TU Berlin, 1992.
- [2] J. FILLoux, *Instrumentation and experimental methods for oceanic studies*, in Geomagnetism Vol. I, J. Jacobs, ed., Academic Press, London, 1987.
- [3] J. GALEJS, *Terrestrial Propagation of Long Electromagnetic Waves*, Pergamon Press, Elmsford, New York, 1972.
- [4] G. HEYDT, *Instrumentation*, in CRC Handbook of Atmospherics, H. Volland, ed., vol. II, CRC Press, Boca Raton, Florida, 1982, pp. 203-256.
- [5] A. JUNGE, *A new telluric KCL probe using Filloux's AgAgCl electrode*, PA-GEOPH, 134 (1990), pp. 589-598.
- [6] I. ROKITYANSKY, *Geoelectromagnetic Investigation of the Earth's Crust and Mantle*, Springer-Verlag, Berlin, 1982.
- [7] D. SENTMAN, *Magnetic elliptical polarization of Schumann resonances*, Radio Science, 22 (1987), pp. 595-606.
- [8] J. TIMMER, *Bau einer Geoelektrik-Gleichstrom-Apparatur zur Messung nach Schlumberger*. Dipl.Arb. Inst. f. Geoph. Univ. Göttingen, 1991.

## Experimental configuration

Top view



Cross Section

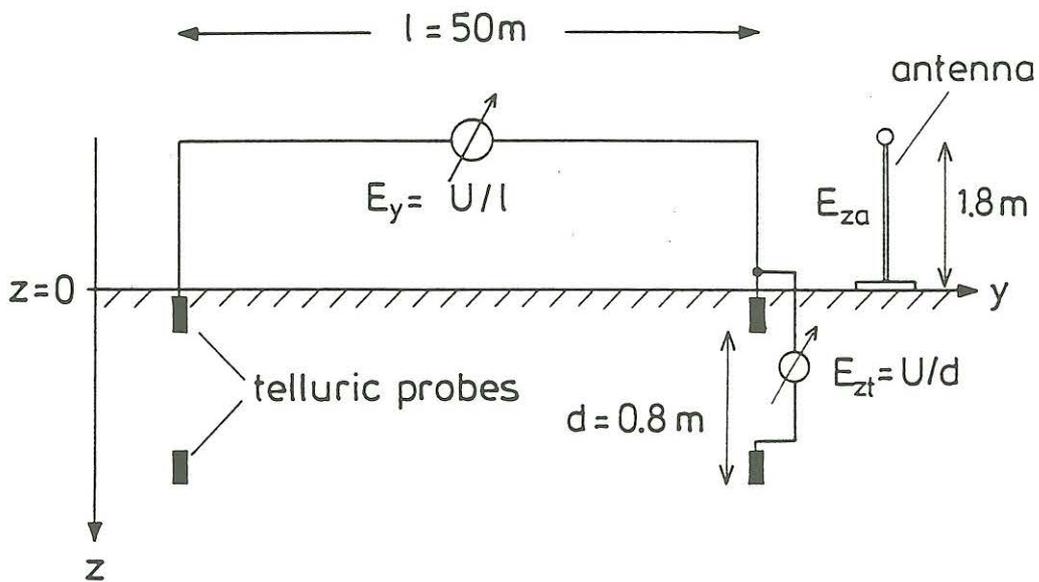


Abbildung 1: Aufsicht und Querschnitt der Sonden- und Antennenanordnung im Gelände

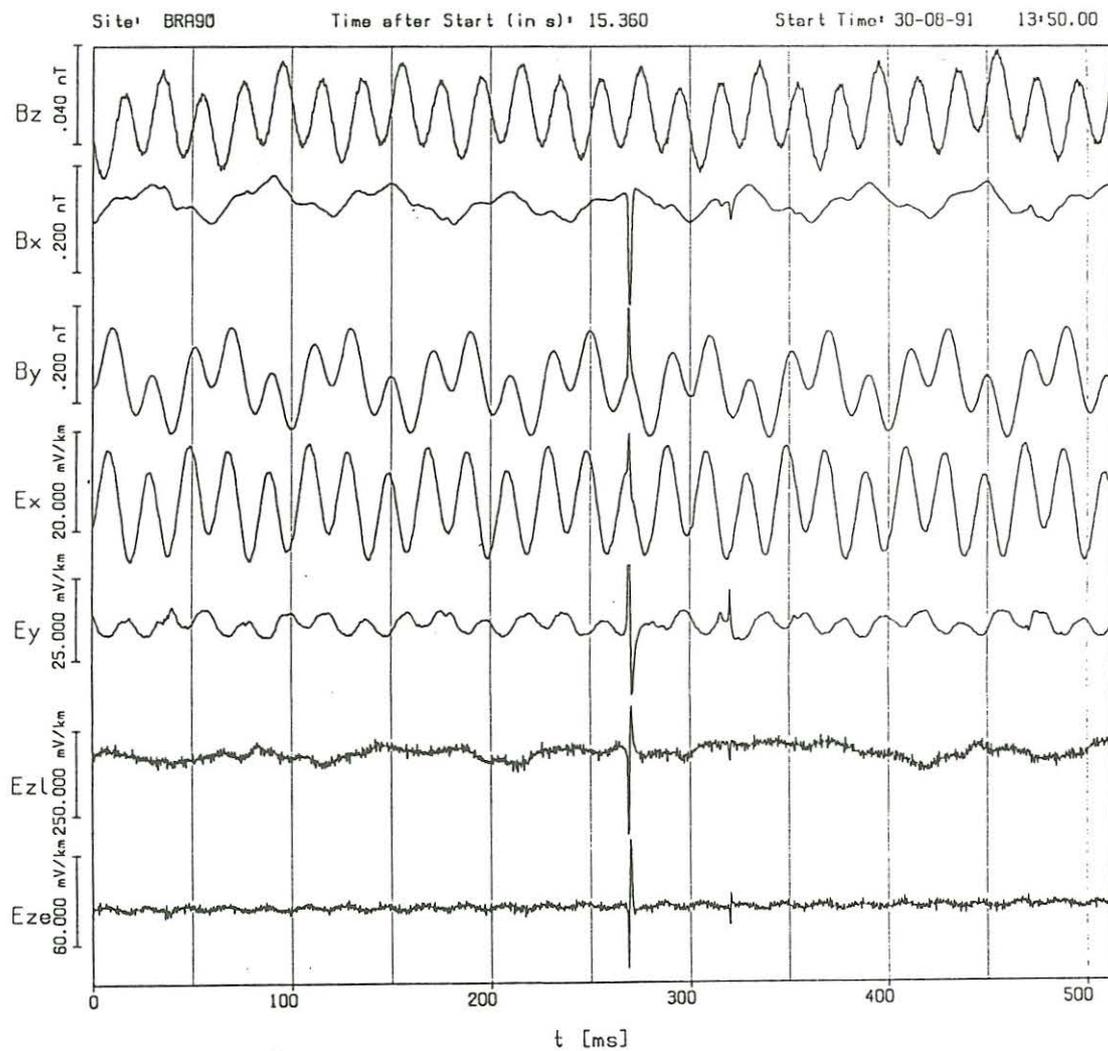


Abbildung 2: Ausschnitt von 512 ms der Aufzeichnung an der Station BRA (Bramwald).

Die Zeitreihen stellen (von oben nach unten) die magnetotellurischen Komponenten  $B_z$ ,  $B_x$ ,  $B_y$ ,  $E_x$ ,  $E_y$  sowie die beiden vertikalen elektrischen Felder  $E_z^l$  (Luft) und  $E_z^b$  (Boden) dar. Es dominieren die  $16 \frac{2}{3}$  und 50 Hz Störsignale. Etwa in der Mitte ist ein Sferic außer in  $B_z$  in allen Komponenten zu erkennen.

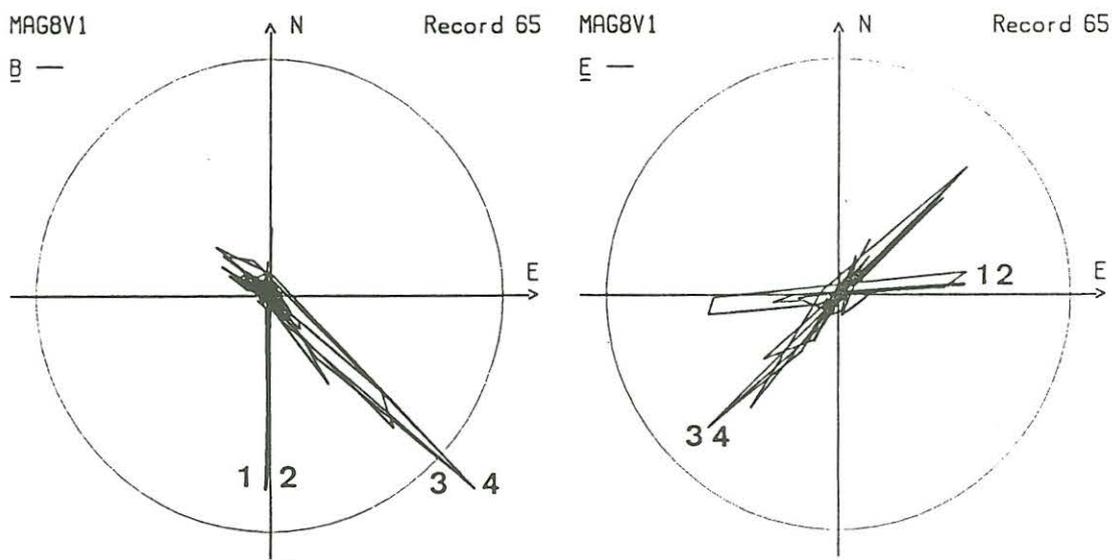
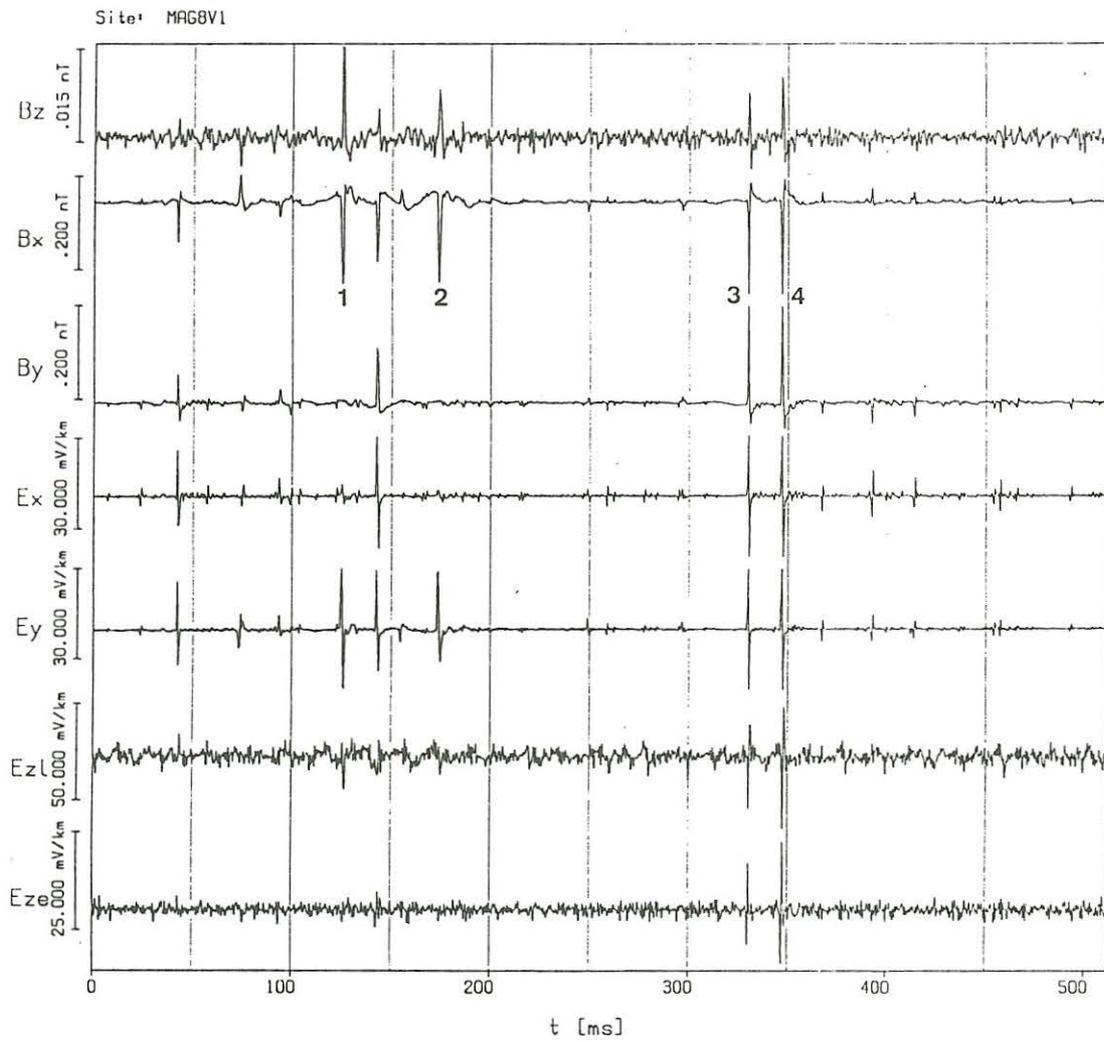


Abbildung 3: Audiomagnetotellurische Variationen zusammen mit vertikalen luft- und bodenelektrischen Feldern an der Station MAG8 im NW-Sudan (oben). Unten sind die zum obigen Ausschnitt gehörenden Hodogramme der magnetischen (links) und elektrischen (rechts) Horizontalfelder abgebildet.