

Gunter Schreier

Anmerkungen über die Quellen magneto-tellurischer Signale
im Audio-Frequenz-Bereich

Im Anschluß an den Artikel über die Entwicklung einer mobilen AMT-Apparatur (Liebig, 1983; Schreier, 1983) sollen im Nachfolgenden einige Bemerkungen zu der Signalcharakteristik im AMT-Bereich gemacht werden. Untersuchungen zur Signalstatistik werden einen wesentlichen Teil des AMT-Messprogrammes darstellen.

Quellen des Audio-Signals

Der Spektralbereich, in dem man audio-magneto-tellurische Messungen durchführt, erstreckt sich von einigen Sekunden bis einige kHz. Fig. 1 gibt einen Überblick über das elektromagnetische Spektrum in diesem Peridenbereich. Drei Bereiche sind in diesem Spektrum hervorzuheben.

- Im langperiodischen ULF-Bereich die Pulsationen, bei AMT-Messungen besonders wichtig die p_{cl} und p_{il}-Pulsationen.
- Bis ca. 100 Hz ein Ansteigen der Energie mit Hohlraumresonanzen (Schuman-Resonanzen).
- Bis 3 kHz der ELF-"slow tail" der Atmosphericics.

Bei den Pulsationen mit ihren zeit- und frequenzabhängigen Charakteristiken sei an dieser Stelle auf entsprechende Literatur verwiesen. Interessant sind die Amplitudenmaxima im Spektrum bis einige Hertz. Diese Spitzen rühren von elektromagnetischen Resonanzschwingungen des kugelförmigen Hohlleiters Erde-Ionosphäre her. Ihr Grundmodus läßt sich leicht abschätzen:

$$\text{Grundfrequenz} = \text{Lichtgeschwindigkeit/Erdumfang} = \text{ca. } 7.5 \text{ Hz}$$

Der tatsächliche Grundmodus dieser elektromagnetischen Eigenresonanzen wird bei 7.8 Hz beobachtet. Bedingt durch die kugelförmige Gestalt des Hohlleiters errechnen sich die weiteren Moden zu:

$$f_n = f_1 \sqrt{n(n+1)/2} \cdot \sqrt{(Q-1)/Q}$$

(Pierce, 1977)

Wobei Q eine Dämpfungskonstante darstellt, die im wesentlichen durch die endliche Leitfähigkeit der Erde und der Ionosphäre bestimmt ist. Gut zu beobachten sind die ersten 5 Schuman-Moden. Alle weiteren Moden gehen im kontinuierlichen Spektrum der ULF-Anteile der Atmosphericics unter (Balser et al. 1960).

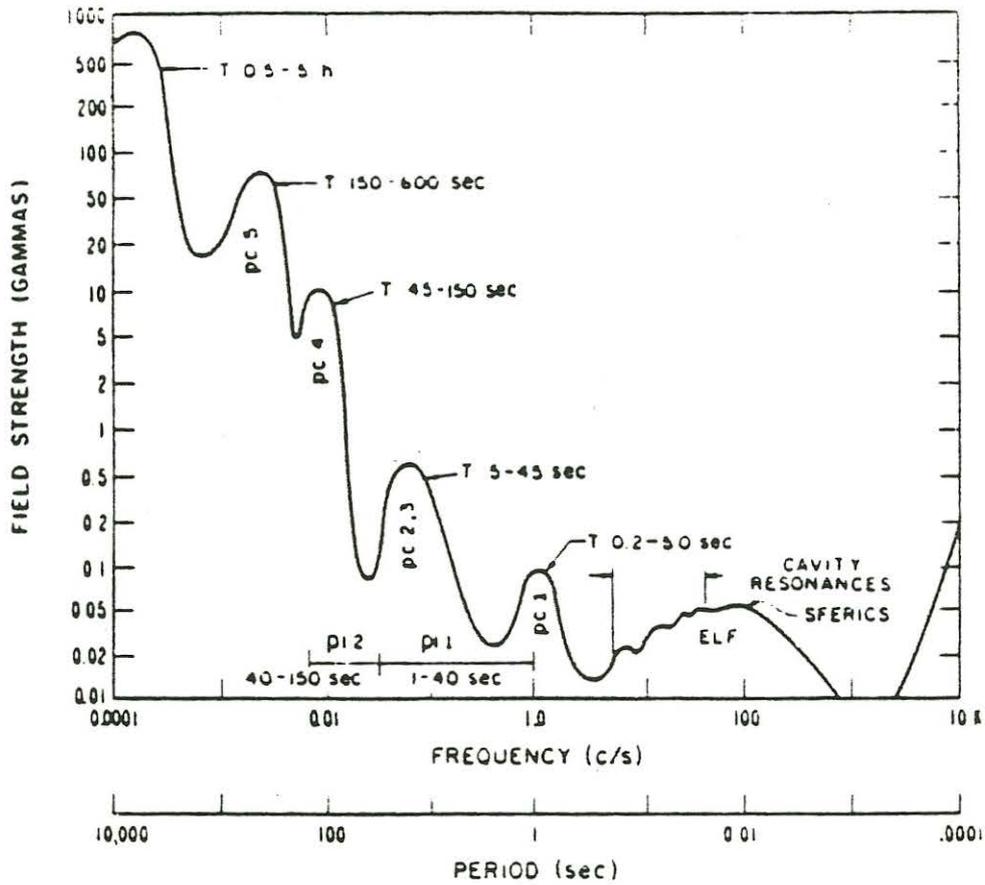


Fig. 1: Spektrum geomagnetischer Schwankungen (Campbell, 1966)

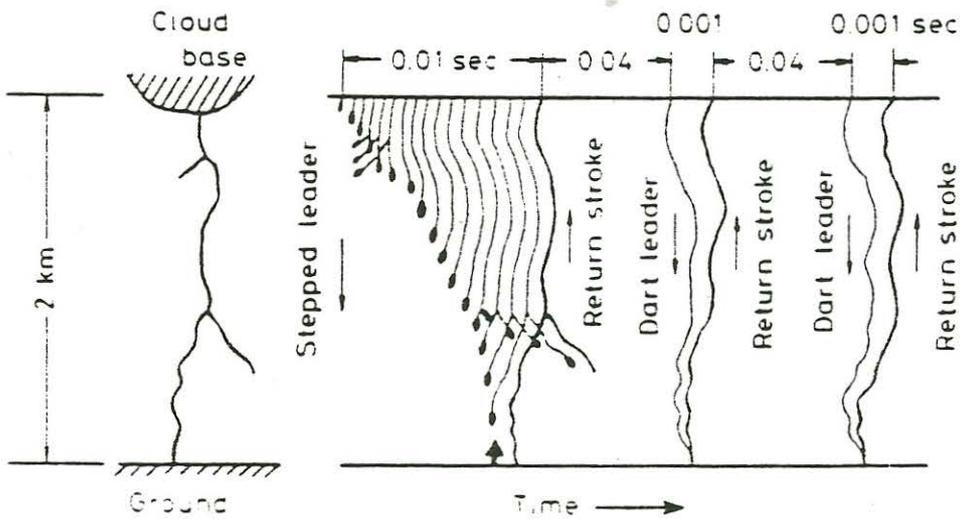


Fig. 2: Entladung eines Erdblitzes. Links: feststehende Kamera, rechts: bewegter Film (Magono, 1980)

Die wichtigste Quelle elektromagnetischer Energie im Bereich 10 Hz - 10 kHz stellen die Atmosphericics dar.

Die Charakteristik des Spektrums in diesem Bereich läßt sich verstehen, wenn man die zeitliche Abfolge einer atmosphärischen Entladung betrachtet (Fig. 2). Als Beispiel sei ein Wolke-Erde-Blitz gewählt.

Wird bei einer atmosphärischen Potentialdifferenz die Durchbruchfeldstärke überschritten, so bildet sich zuerst eine schrittweise Vorentladung aus ("stepped leader"). Jede dieser Vorentladungen schreitet mit ca. 1/3 der Lichtgeschwindigkeit voran und kommt nach ca. 30-100 m zum Stillstand. Nach ca. 0.0001 sec erfolgt eine weitere Vorentladung, die sich im alten Entladungskanal ausbreitet und daraufhin diesen Kanal ein weiteres Stück verlängert. Erst die letzte Vorentladung erreicht mit einer Stromstärke von 1000 A den Boden.

Nun erfolgt die Hauptentladung ("return stroke"). Sie breitet sich 10 mal schneller als die Vorentladung aus und ist durch 10fach größere Ströme als diese gekennzeichnet. Mit ihr ist auch die sichtbare Leuchterscheinung des Blitzes verbunden.

Ist durch diese Hauptentladung noch kein vollständiger Ladungsausgleich zwischen Wolke und Erde hergestellt, so kann sich der Entladungsvorgang wiederholen. Da ein Ionisierungskanal aber schon vorhanden ist, tritt anstatt der schrittweisen Vorentladung eine kontinuierliche Entladung ("dart leader") auf. Bei typischen Blitzen sind 3-4 Nachentladungen zu beobachten.

Entsprechend der Dauer und der Verteilung der Energie bei den einzelnen Stufen der Blitzentladung ist die Abstrahlung elektromagnetischer Energie bei Blitzen zu verstehen. Vereinfacht läßt sich ein Blitz als vertikale elektrische Dipol-Antenne deuten (Volland, 1968). Nach dem Fouriertheorem ist die abgestrahlte Energie eines Blitzdipols über ein unendliches Frequenzband verschmiert. Die Frequenz, bei der am meisten Energie abgestrahlt wird ergibt sich :

$$f_{\max} = 1/T$$

Wobei T die Impulsdauer der Blitzentladung ist.

Die mittlere Dauer dieser Vorentladung beträgt 10^{-6} sec. Elektromagnetische Energie wird deshalb vor allem im Bereich um 1 MHz abgestrahlt.

Die längere Hauptentladung hingegen strahlt im Bereich von 5 kHz Energie ab (Pierce, 1977). Da bei der Hauptentladung 10fach höhere Ströme fließen, ist der Betrag der abgestrahlten Energie auch 10fach größer als bei der Vorentladung.

Berücksichtigen muß man auch den Unterschied zwischen Wolke-Erde-Blitzen - wie oben beschrieben - und Wolke-Wolke-Blitzen. Letztere sind gekennzeichnet durch das Fehlen einer ausgeprägten Hauptentladung. Das Verhältnis der Häufigkeit von Wolke-Wolke-Blitzen zu Wolke-Erde-Blitzen beträgt 1.5 für gemäßigte Regionen und 6-9 für tropische Regionen (Prentice, 1977).

Die stärkste Einzelquelle elektromagnetischer Strahlung ist menschlichen Ursprungs: Eine thermonukleare Explosion in der hohen Atmosphäre. Der ausgesandte elektromagnetische Puls (EMP) besitzt im Fernfeld eine ähnliche Frequenzcharakteristik wie die Abstrahlung einer Hauptentladung (Kahalas, 1965; Price, 1977).

Die Ausbreitung elektromagnetischer Wellen im Hohlleiter Erde - Ionosphäre kann durch zwei Modelle beschrieben werden. Beim "Moden"-Modell werden einzelne Glieder einer Reihe berechnet, die den Hertzschen Vektor der elektromagnetischen Welle beschreibt. Das "Moden"-Modell gilt vor allem für Frequenzen kleiner als 30 kHz und für Abstände vom Sender größer als 1000 km (Volland, 1968). Für höhere Frequenzen ist das strahlenoptische Modell vorzuziehen (Pierce, 1977). Hier werden die strahlengeometrischen Wege eines Wellenstrahls vom Sender zum Empfänger verfolgt.

Für die zeitliche Variation der Ausbreitung besonders langer Wellen im ULF-Bereich ist das Verhalten der Ionosphärenschichten verantwortlich. Wellen mit Frequenzen kleiner als 80 Hz werden fast vollständig von der nur auf der Tagseite der Erde existierenden D-Schicht in ca. 60 km Höhe reflektiert.

Frequenzen im KW-Bereich werden von dieser Schicht stark abgeschwächt. Nachts bildet sich wegen fehlender solarer Strahlung keine D-Schicht. Kurz-Wellen können sich nun ungehindert ausbreiten - wie auch Lang- und Längst-Wellen - und werden von höheren Ionosphärenschichten reflektiert.

Eine starke Zunahme der Lang- und Längstwellenaktivität ist bei einem Ausbruch solarer Röntgenstrahlung zu beobachten. Bei diesem "Mögel-Dellinger-Effekt" wird die Ladungsträgerdichte in der D-Schicht kurzzeitig erhöht; diese reflektiert dann Wellen im VLF- und LF-Bereich besser als unter normalen Bedingungen.

Die Ausbreitung der Atmospherics ist ein frequenzabhängiger Vorgang. Dabei werden vor allem niedrige Frequenzen bei ihrem Weg durch die Atmosphäre stark spektral verschmiert. Dispersion und Absorption der elektromagnetischen Wellen sind für unterschiedliche Moden des "Moden"-Modells verschieden. An der Grenze zwischen der nullten Mode (0.3 Hz - 3 kHz) und der ersten Mode (3 - 30 kHz) ist ein starkes Absorptionsband vorhanden (siehe auch Fig. 1).

Die Phasengeschwindigkeit in der ersten Mode ist größer als die Lichtgeschwindigkeit und steigt leicht mit abnehmender Frequenz an. In der nullten Mode fällt die Phasengeschwindigkeit stark mit abnehmender Frequenz. Beides hat zur Folge, daß die ELF-Komponente der VLF-Komponente zeitlich nachhinkt. In der angelsächsischen Literatur wird vom "ELF-slow tail" gesprochen (Campbell, 1967).

Die zeitliche und geographische Verteilung der Quellen der Atmospherics

Fig. 3 zeigt die mittlere jährliche Anzahl der Tage mit Gewittern in ihrer geographischen Verteilung. Deutlich sind in den tropischen Bereichen drei große Gewitteraktivitätszentren zu erkennen:

- Mittelamerika und der Regenwald Südamerikas
- Afrikanischer Regenwald
- Ostasiatischer Regenwald und Java



Fig. 3: Isolinien der mittleren jährlichen Anzahl der Tage mit Gewitter. Schraffiert sind die Gebiete mit über 100 Tagen Gewitter im Jahr. (Keller, Frischknecht, 1966)

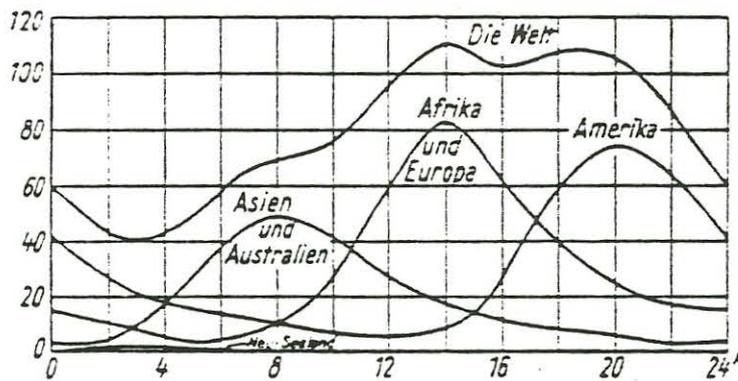


Fig. 4: Tagesgang der Gewitter-"Erwartung" für die einzelnen Kontinente und das gesamte Festland. Aufgetragen ist die Größe der zum betreffenden Zeitpunkt von Gewittern bedeckten Fläche in 10 km, geordnet nach GMT. (Israel, 1961)

Zusätzlich sind tropische Gewitter auch mit einer größeren Anzahl von Blitzen verbunden als Gewitter in gemäßigten Zonen. Für ein Gewitter mittleren Ausmaßes in den Tropen sind durchschnittlich 200 Blitze pro Stunde zu erwarten; 85% davon sind Wolke-Wolke-Blitze (Prentice, 1977). Insgesamt wird mit 100 Blitzen pro Sekunde auf der gesamten Erde gerechnet (Volland, 1968).

für AMT-Messungen kommen vor allen Signale aus den Aktivitätszentren der tropischen Regionen zum Tragen (Keller, Frischknecht, 1966).

Die zeitliche Variation der Gewitter in den Tropen und subtropischen Gebieten ist für die tageszeitliche Änderung der Signalstärke elektromagnetischer Wellen im Audio-Frequenz-Bereich in den mittleren Breiten bestimmend.

In den tropischen Gebieten ist mit einem Maximum der Blitzaktivität um ca. 15-16 Uhr Ortszeit zu rechnen. Dementsprechend stellt sich der Tagesgang der Weltgewittererwartung in Fig. 4, aufgespalten in kontinentale Anteile, dar. Die drei Maxima in Fig. 4 lassen sich gut mit den drei großen Aktivitätszentren in Fig. 3 korrelieren.

Messungen von Atmosphericics, sowohl in ihrer Häufigkeit pro Zeit als auch bezüglich ihrer Einfallrichtungen wurden von verschiedenen Autoren vorgenommen (Volland, 1968; Israel, 1961; Pierce, 1977).

Ward et al. (1966) beobachtete eine tägliche Variation der Einfallrichtung elektromagnetischer Wellen im Bereich 150-510 Hz von bis zu 90 Grad. Auch zeigte sich, daß das Signal im Frühling um ca. 20dB stärker war als im Winter. Ward et al. führen dies zurück auf die Wanderung der tropischen Gewitterzentren während des Nordwinters und damit auf die größere Entfernung dieser Aktivitätszentren vom Messgebiet in Kalifornien.

Auch für die Schuman-Resonanzen sind Vergleiche zwischen der Einfallrichtung des Signals und der Weltgewitterstatistik gemacht worden (Balser et al., 1962; Galejs, 1965; Rycroft, 1965).

Durch das Fehlen der D-Schicht auf der Nachtseite der Erde sind die Amplituden der Schuman-Moden nachts kleiner als tagsüber.

Die drei Maxima in Fig. 4 sind von Balser et al. auch bei den Amplituden der Schuman-Resonanzen, entsprechend der Weltgewittererwartung, beobachtet worden. Rycroft postulierte aus Messungen der Schuman-Resonanzen wegen der kugelförmigen Symmetrie des Hohlleiters eine Darstellung der Moden mittels Kugelfunktionsentwicklung. Eine azimutale Feinstruktur im Spektrum wurde ebenfalls von ihm beobachtet!

Für AMT-Messungen wurden am Institut für Allgemeine und Angewandte Geophysik der Universität München von Dittus (1983) erste Untersuchungen über die Streuung des Azimuts bei elektromagnetischen Wellen bis in den Bereich 1 kHz durchgeführt.

Da nur wenige Stationen unter diesem Gesichtspunkt ausgewertet wurden, und keine Langzeitstatistik durchgeführt wurde, waren keine eindeutigen Korrelationen mit der Weltgewitterstatistik zu beobachten. Dennoch ist auch bei Kurzzeitmessungen eine Anhäufung der Einfallrichtungen für verschiedene Frequenzen um einen Richtungsazimut festgestellt worden.

Mit der neuen AMT-Apparatur soll schon im Gelände eine erste Auswertung der Streuung der Einfallrichtungen des elektromagnetischen Signals versucht werden. Bei der weiteren Arbeit mit der AMT-Apparatur soll eine gründliche Analyse des Signals, verbunden mit einer Langzeitstatistik, die für die magnetotellurischen Messungen wichtige Frage nach dem Verhalten des anregenden Signals klären helfen.

LITERATUR :

- Balser, M.; Wagner, C. A. : Observations of earth - ionosphere cavity resonances, Nature, Vol. 188, S. 638-641, 1960
- Balser, M.; Wagner, C. A. : Diurnal Power Variations of the Earth-Ionosphere Cavity - Modes and their Relationship to Worldwide Thunderstorm Activity, J. Geophys. Res., Vol. 67, No. 2, S. 619-625, 1962
- Dittus, H.-J. : Magnetotellurik in Südostbayern, Dipl.-Arbeit, Inst. f. Geophys. Univ. München, 1983
- Galejs, J. : Schuman Resonances, Journ. of. Res. Nat. Bureau of Standards, Vol. 69D, No. 8, 1965
- Israel, H. : Atmosphärische Elektrizität, Teil II, Leipzig 1961
- Kahalas, S. L. : Excitation of ELF-Electromagnetic Waves in the Earth - Ionosphere Cavity by High - Altitude Nuclear Detonation. J. Geophys. Res., Vol. 70, No. 15, S. 3587-3595, 1965
- Keller, G. V.; Frischknecht, F. C. : Electrical Methods in Geophysical Prospecting, Oxford, 1966
- Liebig, V. : Entwicklung und Aufbau einer Audio-Magnetotellurik Messapparatur mit Mikroprozessorsteuerung, Dipl.-Arbeit, Inst. f. Geophys. Univ. München, 1984
- Magono, C. : Thunderstorms, Elsevier, Amsterdam, 1980
- Pierce, E. T. : Atmospherics and Radio Noise, in: Lightning, Herausgeber: Gold, R. K. , Bd. I, Academic Press, London, 1977
- Prentice, S. A. : Frequency of Lightning discharges, in: Lightning, Herausgeber: Gold, R. K. , Bd. I, Academic Press, London, 1977
- Rycroft, M. J. : Resonances of the Earth - Ionosphere Cavity Observed at Cambridge, England, Jour. of Res. Nat. Bureau of Standards, Vol. 69D, No. 8, 1965
- Schreier, G. : Entwicklung eines Programm-Systems zur digitalen Verarbeitung audio-magneto-tellurischer Signale im Gelände, Dipl.-Arbeit , Inst. f. Geophys. Univ. München, 1984
- Volland, H. : Die Ausbreitung langer Wellen, Braunschweig, 1968
- Ward, S. H.; AFMAG - Applications and Limitations, Geophysics, Vol. 45 No. 11, S. 1659-1666, 1980