

Untersuchung der Polarisation in den Schumannresonanzen

Daniel Labendz, Göttingen

1 Einleitung

Der kugelschalenförmige Erde-Ionosphären-Wellenleiter kann als Hohlraumresonator angesehen werden, in dem sich stehende, elektromagnetische Wellen ausbilden können. Voraussetzung hierfür ist, daß die Wellenlängen Dimensionen besitzen, die im Bereich des Ausbreitungsraumes liegen, d.h. $\lambda \approx 40000$ km. Geht man von einem sphärischen Modell mit perfekt leitender Erdoberfläche und endlicher Leitfähigkeit in der unteren Ionosphäre aus, so ergeben sich die Resonanzfrequenzen zu $f_n = 8, 14, 21, \dots$ Hz. Damit liegen sie im Frequenzband des ELF (Extremely-Low-Frequency)-Bereichs, der durch die Grenzen 3 Hz–3 kHz charakterisiert ist.

Die Eigenschwingungen des Hohlraums wurden zuerst von SCHUMANN (1952) theoretisch vorhergesagt und konnten wenige Jahre später in allen elektromagnetischen Feldkomponenten nachgewiesen werden. Ihre Anregung verdanken die *Schumannresonanzen* der globalen Gewitteraktivität, in der starke Entladungsvorgänge (100 Blitze/sek.) die Quellen der elektromagnetischen Wellen darstellen.

Am Institut für Geophysik ist ein Meßgerät entwickelt worden, welches die Aufgabe hatte die zeitliche Änderung des Übergangsbereichs, also von 1-20 Hz zu untersuchen (WEHMEIER, 1992). Im April 1995 wurde mit einer einjährigen Messung aller drei magnetischen Komponenten sowie der beiden horizontalen elektrischen Feldkomponenten begonnen. In bestimmten zeitlichen Abständen wurde zusätzlich die luftelektrische Vertikalkomponente in die Messung aufgenommen. Um anthropogene Störungen zu minimieren erfolgte die Meßkampagne auf dem Testgelände der Universität Göttingen in Silberborn/Solling (30 km nord-westlich von Göttingen gelegen).

2 Die Energiespektren

Um die aufgezeichneten Meßdaten einer ersten Prüfung zu unterziehen, wurden zunächst Energiespektren gebildet, um sicherzustellen, daß die Schumannresonanzen auch tatsächlich beobachtet werden können.

In Abb. 1–4 sind stellvertretend für die Meßreihe die gemittelten Stundenspektren des 19. Juni 1995 für alle registrierten Komponenten dargestellt. Einzige Ausnahme bilden hierbei die beiden, durch starke Störungen geprägten, vertikalen Komponenten, die nur als Stundenspektrum vorliegen. Abgesehen von der B_z -Komponente sind in der logarithmischen Auftragung die ersten beiden Schumannresonanzen bei 8 und 14 Hz deutlich zu erkennen. Hierbei ist vor allen Dingen zu beachten, daß die Ost-West-Komponenten in beiden Fällen einen niedrigeren Energieanteil aufweisen als die Nord-Süd-Komponenten. Dieser Umstand läßt sich durch die Tatsache erklären, daß in den Sommermonaten eine geringere Entfernung zu den vorherrschenden Quellen existiert, welche für die angesprochene Amplitudenabschwächung verantwortlich ist (WEHMEIER, LABENDZ 1996).

Zu bemerken ist, daß die größte Amplitude bei 16.67 Hz mit dem Liniennetz der Deutschen Bundesbahn in Verbindung zu bringen sind, während die spektrale Spitzen bei 6.25, 10.0 und 12.5 Hz als Subharmonische des Versorgungsnetzes gedeutet werden können.

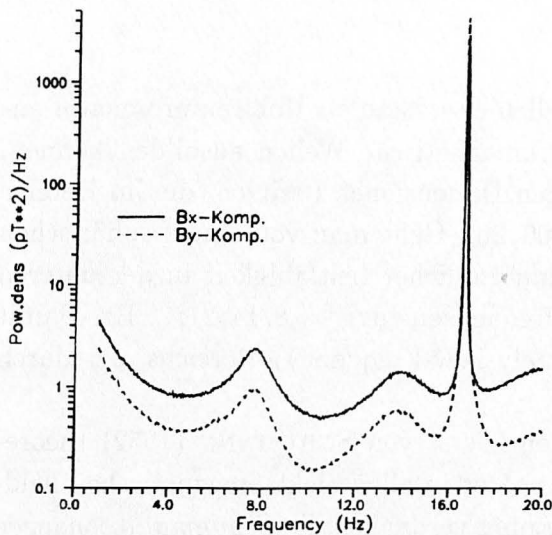


Abbildung 1: Darstellung der gemittelten Stundenspektren der magnetischen Horizontalkomponenten.

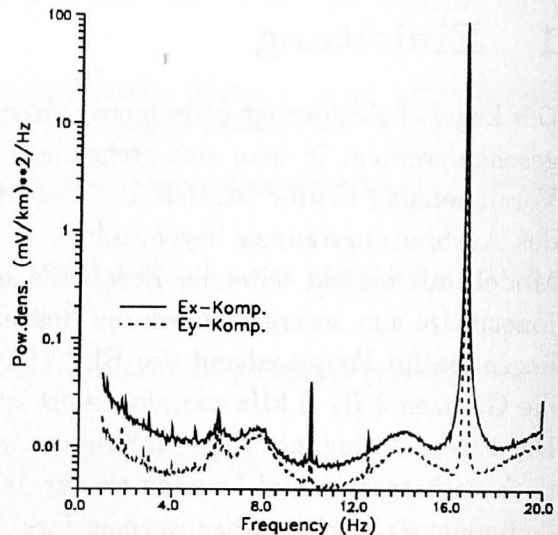


Abbildung 2: Darstellung der gemittelten Stundenspektren der elektrischen Horizontalkomponenten.

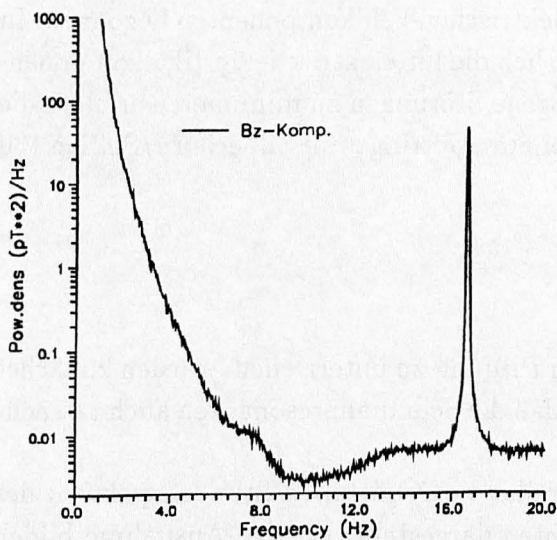


Abbildung 3: Darstellung eines Stundenspektrums der magnetischen Vertikalkomponente.

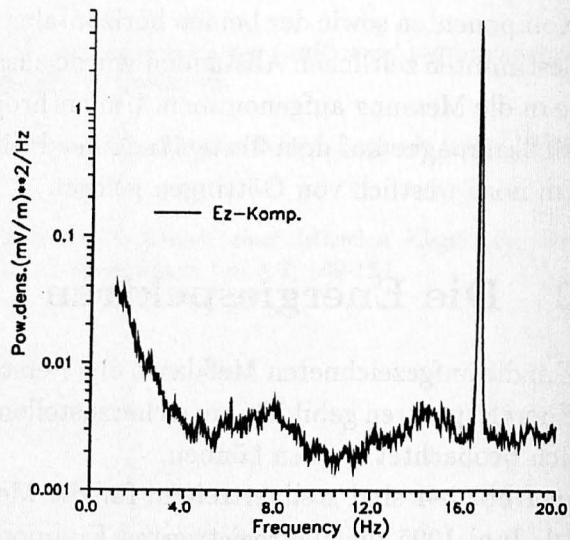


Abbildung 4: Darstellung eines Stundenspektrums der elektrischen Vertikalkomponente.

3 Die Feinstruktur der Schumannresonanzen

Aufgrund der inhomogenen Leitfähigkeitsstruktur der unteren Ionosphäre auf der Tag- und Nachtseite und im Bereich der Polkappen sowie durch die globale Anisotropie des Erdmagnetfeldes sollte davon ausgegangen werden können, daß die Schumannresonanzen eine zusätzliche Feinstruktur besitzen. Diese kann dadurch erklärt werden, daß die Ausbreitungsgeschwindigkeiten der elektromagnetischen Wellen durch die oben genannten Faktoren eine Beeinträchtigung erfahren, wodurch die Degeneration aufgehoben wird und eine Aufspaltung der ersten Eigenfrequenz in ein Triplett erfolgen sollte (BLIOKH et al., 1980). Ein statistisch signifikanter Nachweis dieses *Frequenzsplittings*, vergleichbar mit dem Zeeman-Effekt in der Atomphysik, ist bisher jedoch nie gelungen. Hauptsächlichste Ursache dafür sind die relativ schlechten Güten der beobachtbaren Spektren, die nur in Einzelfällen eine Triplettstruktur aufweisen, deren zeitliche Konsistenz jedoch nicht stabil bleibt. Erschwerend kommt hinzu, daß die Resonanzfrequenz einer tageszeitlichen Variation unterliegt (BALSER UND WAGNER, 1962; MADDEN UND THOMPSON, 1965), die bei längeren Analysezeiträumen zu einem Verschmieren der Werte führt.

SENTMAN (1987, 1989) entwickelte eine Vorstellung, das Frequenz- oder Mode-Splitting der Schumannresonanzen unter Hinzunahme der Polarisationscharakteristika zu untersuchen. Dabei ging er von einem sphärischen Modell aus, dessen Anregung bei $\theta = 0^\circ$ erfolgen sollte. Das die Helmholtz-Wellengleichung lösende Potential entsprach vereinfacht dargestellt dem Produkt eines radialen Anteils und den Kugelfunktionen. In einem sphärischen Polarkoordinatensystem wird die transversal-magnetische Mode nur durch die radiale Komponente beschrieben. Somit ergibt sich

$$\underline{\Psi}(\theta, \phi) = \hat{r} \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=-n}^n A_{nm} P_n^m(\theta, \phi).$$

Die A_{nm} stellen Ausdehnungskoeffizienten dar und werden durch die Eigenschaften der Grenzflächen und der Anregung bestimmt. Durch Rotation des Vektorpotentials erhält man das Magnetfeld

$$B(\theta, \phi)_n^m = \nabla \times (\hat{r} P_n^m) = \hat{\theta} \frac{im}{\sin \theta} P_n^m - \hat{\phi} \frac{\partial}{\partial \theta} P_n^m.$$

$(\hat{r}, \hat{\theta}, \hat{\phi})$ ist das rechtsgerichtete Dreibein der Einheitsvektoren für sphärische Koordinaten. Durch Einsetzen der Kugelfunktion vom Grade $n = 1$ und durch Hinzufügen einer Zeitabhängigkeit erhält man z.B. für die Magnetfeldkomponenten folgende Ausdrücke

$$\begin{aligned} B_{1(\theta)}^1 &\propto -i e^{i(\omega t + \phi)} & B_{1(\phi)}^1 &\propto \cos \theta e^{i(\omega t + \phi)} \\ B_{1(\theta)}^0 &\propto 0 & B_{1(\phi)}^0 &\propto \sin \theta e^{i\omega t} \\ B_{1(\theta)}^{-1} &\propto -i e^{i(\omega t - \phi)} & B_{1(\phi)}^{-1} &\propto -\cos \theta e^{i(\omega t - \phi)}. \end{aligned}$$

Hierbei stellen die west- bzw. ostwärts wandernden Wellen die Seitenmultipletts $m = \pm 1$ dar, wohingegen $m = 0$ die zentrale Submode der stehenden Wellen repräsentiert. Die charakteristischen Größen, die die Art der Polarisation beschreiben, sind einerseits das Verhältnis der großen Halbachsen zueinander, welches als *Elliptizität* bezeichnet

wird und andererseits der Umlaufsinn der zugehörigen Ellipse. Hierbei wollen wir uns auf die in der Optik übliche Definition festlegen, daß bei einem Umlaufsinn entgegen der Uhrzeigerrichtung linksgerichtete Polarisation (LHP=Left-Hand-Polarization) vorliegt, während im entgegengesetzten Fall rechtsgerichtete Polarisation (RHP=Right-Hand-Polarization) beobachtet wird. SENTMAN regte an, daß ein Nachweis der Feinstruktur der Schumannresonanzen über die angeführten Parameter, die als eine Art Indikatoren fungieren sollten, möglich wäre.

4 Die Ergebnisse

Mittels eines entwickelten Triggers, der die Erkennung von Einzeleffekten (d.h. starken Entladungsvorgängen) im Zeitbereich zur Grundlage hat, ist es möglich aus den hieraus resultierenden Hodogrammen auf sämtliche Polarisationsparameter zu schließen. Zur anschaulichen Illustration ist in Abb. 5 als Beispiel die Detektion sowohl einer elliptisch polarisierten ($\epsilon \approx 0.25$) als auch einer linear polarisierten Eigenschwingung ($\epsilon = 0$) dargestellt.

Im folgenden soll auf die Parameter Amplitude, Elliptizität sowie das Verhältnis von Elliptizität und Frequenz eingegangen werden, deren Untersuchung auf den Analysezeitraum des 19. – 23. Juni 1995 beschränkt bleibt.

4.1 Die Amplitude

Die zeitliche Variation der Amplitude der verschiedenen Komponenten sind bereits häufig Gegenstand der Forschung gewesen (u.a. FÜLLEKRUG, 1994). Hierbei stellte sich stets eine prägnante Korrelation des tageszeitlichen Ganges mit der globalen Gewitteraktivität ein. Eine erneute Betrachtung dieser Parameter ist in diesem Zusammenhang nur insofern interessant, da in den früheren Untersuchungen die verwendeten Daten den gesamten Zeitbereich zur Grundlage hatten. In dem hier untersuchten Fall handelt es sich jedoch um Einzeleffekte, die die Quantität der Daten um ein vielfaches herabsetzt.

Mit Abb. 6 sind die Viertelstundenmittelwerte der magnetischen Horizontalkomponenten für den besagten Analysezeitraum gegeben, sowie eine aus synoptischen Beobachtungen gewonnene Weltgewitterkurve dargestellt (Abb. 7). Neben der tageszeitlichen Konsistenz der Maxima und Minima in beiden Komponenten, erkennt man zusätzlich die bereits erwähnte Korrelation mit der globalen Gewitteraktivität. So kann u.a. gefolgert werden, daß die B_x -Komponente den asiatischen und nordamerikanischen Raum repräsentiert, während sich in der B_y -Komponente hauptsächlich die Aktivitäten des afrikanischen Kontinents widerspiegeln. Die hiermit verbundene Hoffnung einer exakten Richtungsbestimmung von Einzeleffekten hat sich jedoch nicht erfüllt (LABENDZ, 1996). Die Unregelmäßigkeiten des dritten Tages sind mit lokalen Störungen zu erklären. Somit ist gezeigt worden, daß sich einschränkende Kriterien, wie sie durch die alleinige Untersuchung von Einzeleffekten gegeben ist, in keinsten Weise auf den erwarteten Amplitudenverlauf auswirken.

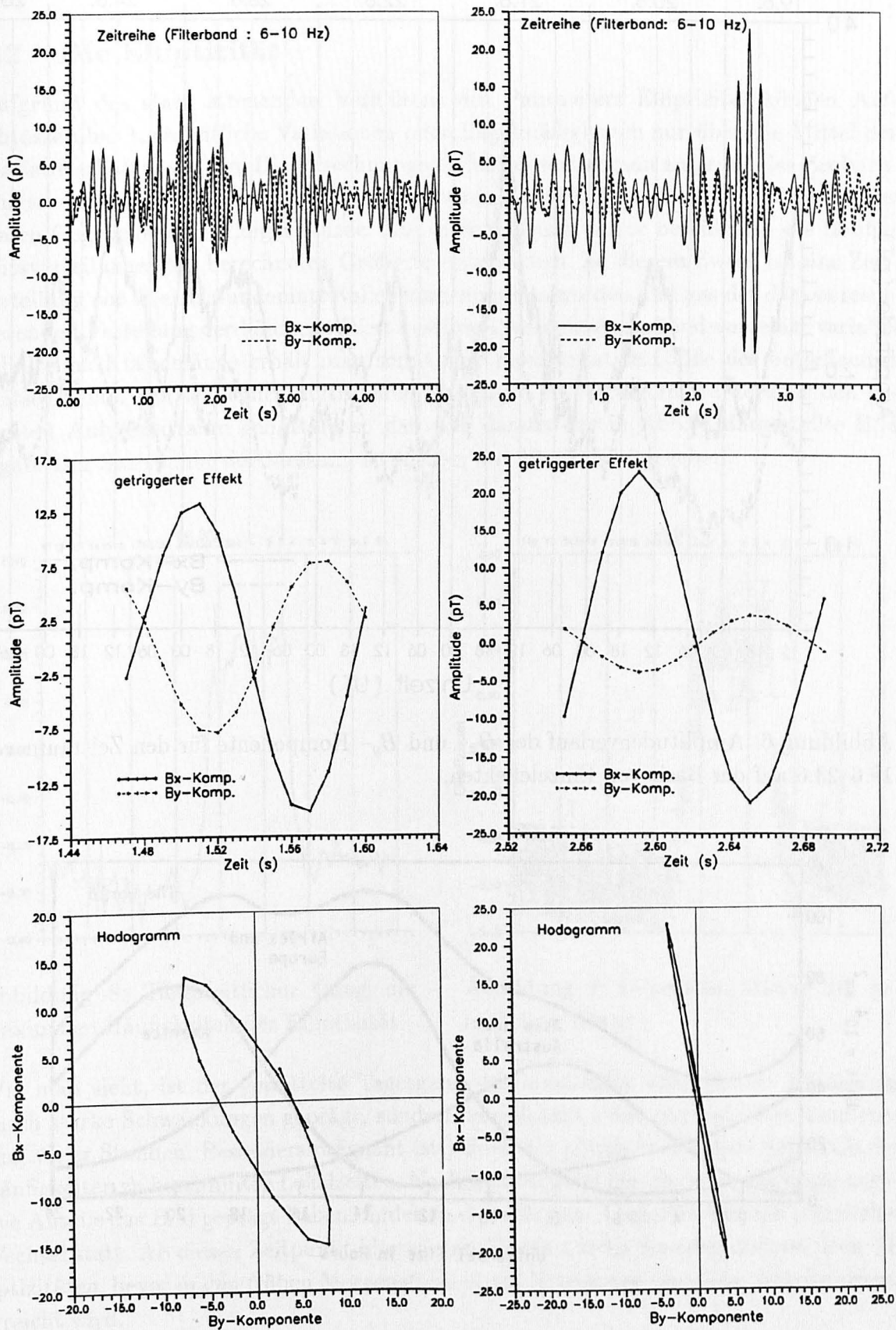


Abbildung 5: Erkennen eines elliptisch polarisierten (linke Spalte) und eines linear polarisierten Effektes (rechte Spalte).

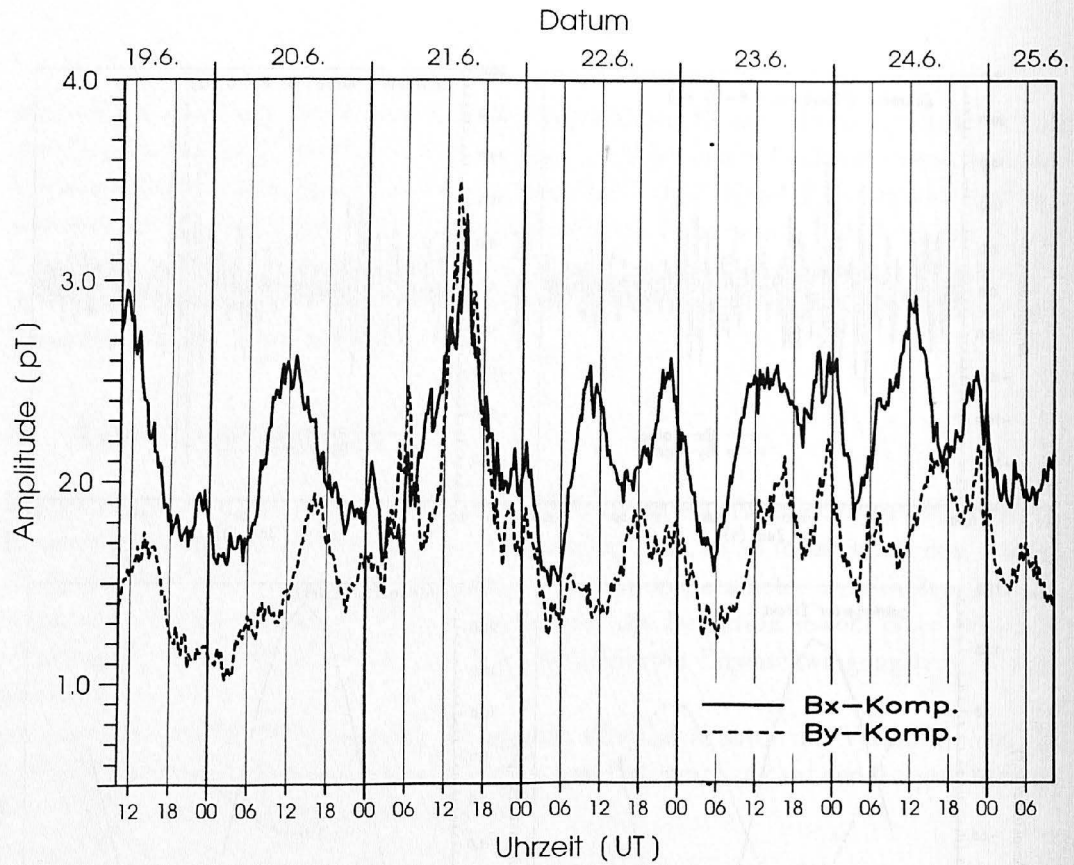


Abbildung 6: Amplitudenverlauf der B_x - und B_y -Komponente für den Zeitraum vom 19.6.–23.6. auf der Basis von Einzeleffekten.

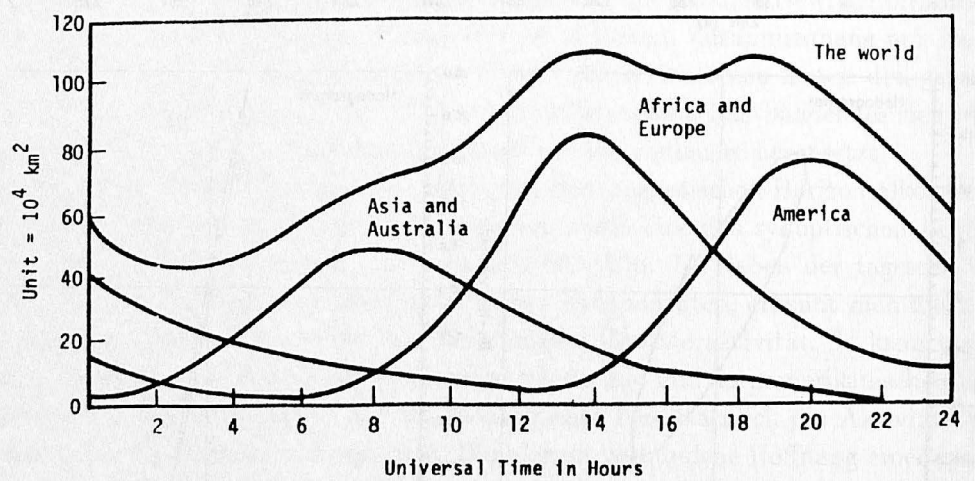


Abbildung 7: Darstellung einer aus synoptischen Beobachtungen gewonnenen Weltwetterkurve (Israël, 1961)

4.2 Die Elliptizität

Aufgrund des stark streuenden Verhaltens des Parameters Elliptizität können Aufschlüsse über tageszeitliche Variationen oder Regelmäßigkeiten nur über die Mittel der Statistik erhalten werden. Die Berechnung von Mittelwerten kann aufgrund des Beobachtungsraumes von $-1 < \epsilon < 1$ nicht verfolgt werden, weil hierdurch eine Verfälschung der realen Gegebenheiten erfolgen würde. Aus diesem Grund wurde beschlossen die Häufigkeitsverteilungen der berechneten Größe zu untersuchen. Zu diesem Zweck ist eine Zeiteinteilung von Viertelstundenintervallen vorgenommen worden und aus der daraus resultierenden Verteilung der häufigste Wert bestimmt worden. Ausgehend von einer variabel gehaltenen Klassenlänge erhält man somit eine repräsentative Größe des betreffenden Zeitsegments. Um schließlich auftretende Störungen zu verringern wurde über den gesamten Analysezeitraum gemittelt, so daß sich daraus das in Abb. 8 dargestellte Bild ergab. Der Startpunkt der Messung ist hierbei mit 10:15 (UT) gegeben.

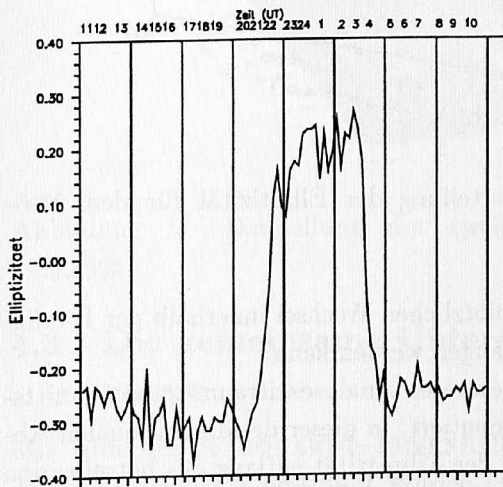


Abbildung 8: Tageszeitlicher Gang der maximalen Häufigkeiten der Elliptizität

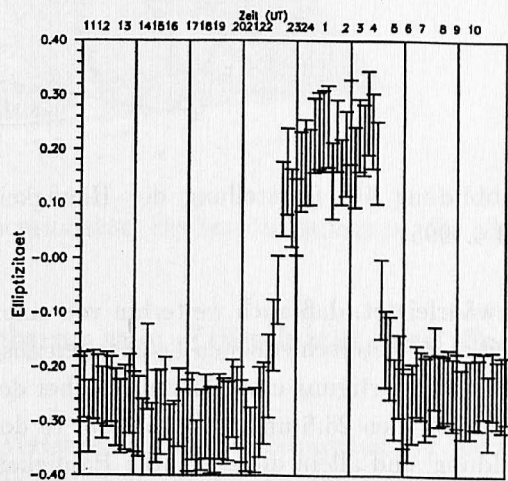


Abbildung 9: Fehlerabschätzung der gemittelten Werte

Wie man sieht, ist der gemittelte Tagesgang der maximalen Häufigkeiten keineswegs durch starke Schwankungen geprägt, sondern verzeichnet einen recht stabilen Lauf entlang vieler Stunden. Besonders prägnant ist jedoch der plötzliche Wechsel innerhalb der Häufigkeiten zu bestimmten Lokalzeiten. Nachdem während des Tages durchgängig negative Anteile das Bild geprägt haben, findet zu den späteren Abendstunden ein plötzlicher Wechsel statt. Ab diesen Zeitpunkt überwiegen für etwa sechs Stunden die positiven Elliptizitäten, bevor in den frühen Morgenstunden das Niveau der negativen Anteile erneut erreicht wird.

Die Darstellung der Fehlerbalken für den Tagesgang der Elliptizität ist mit Abb. 9 gegeben. Wie zu sehen ist, treten zum Teil recht große Fehler auf, wobei man jedoch beachten sollte, daß diese den aktuellen Quadranten so gut wie nie verlassen. Das heißt, daß die beschriebenen Ergebnisse im Rahmen der Fehlerrechnung weiter Bestand haben. Somit ist

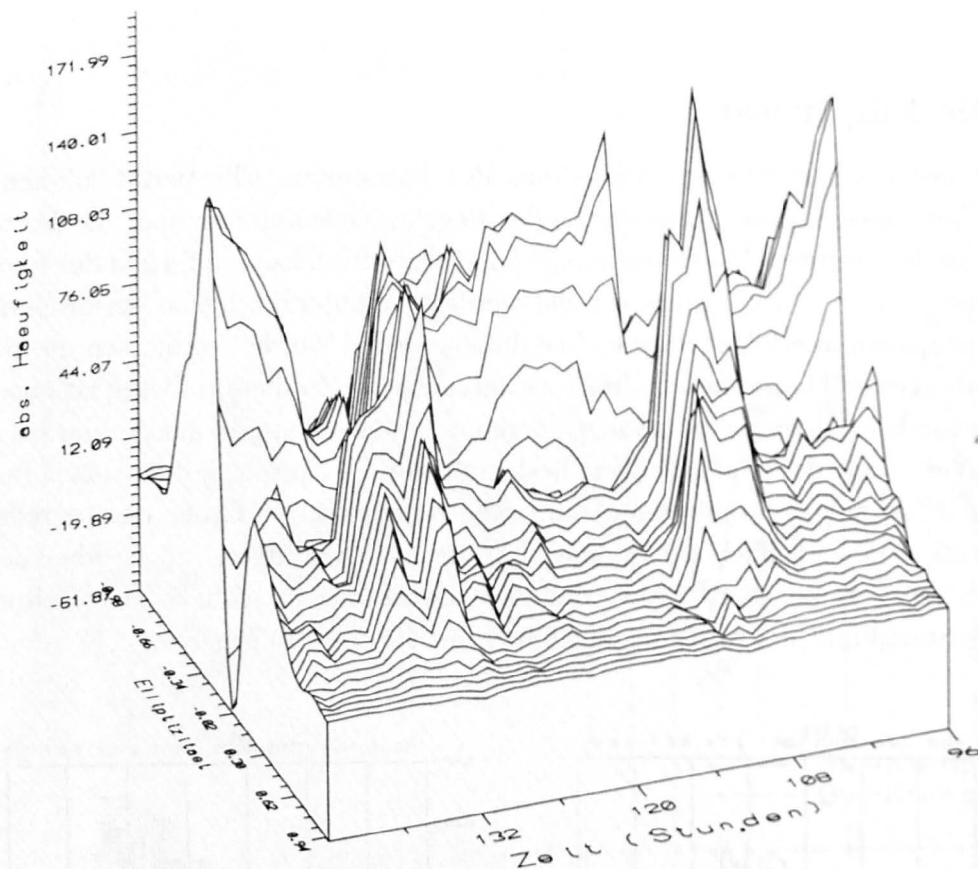


Abbildung 10: Darstellung der Häufigkeitsverteilung der Elliptizität für den 23.6–24.6.1995.

gewährleistet, daß auch weiterhin von einem plötzlichen Wechsel innerhalb der Häufigkeiten zu unterschiedlichen Lokalzeiten ausgegangen werden kann.

Die Rechtfertigung einer Mittelung über den gesamten Analysezeitraum ist ausschnittsweise für den 23.6 und 24.6. in Abb. 10 dokumentiert. In dieser dreidimensionalen Abbildung sind allein die absoluten Häufigkeiten der Elliptizität entlang des betreffenden Zeitabschnitts dargestellt. Die Situation entspricht der aus dem zweidimensionalen Bild. Deutlich ist die Dominanz des positiven Anteils während der Nachtstunden zu erkennen, sowie das Umschlagen in den negativen Bereich. Auffallend ist dabei die zeitliche Konsistenz des Verlaufs entlang des 48-stündigen Intervalls, die die Annahme eines Tagesganges zusätzlich unterstützt.

Es ist gezeigt worden, daß die Häufigkeitsverteilung des als Indikator eingeführten Parameters Elliptizität einen Tagesgang besitzt, der durch den Wechsel des Umlaufsinn zu bestimmten Lokalzeiten charakterisiert ist. Unser eigentliches Ziel ist es jedoch gewesen mit Hilfe dieses Indikators die beschriebene Modenaufspaltung nachzuweisen. Inwieweit dieses Vorhaben gelungen ist, soll in dem nun folgenden Abschnitt zur Diskussion stehen.

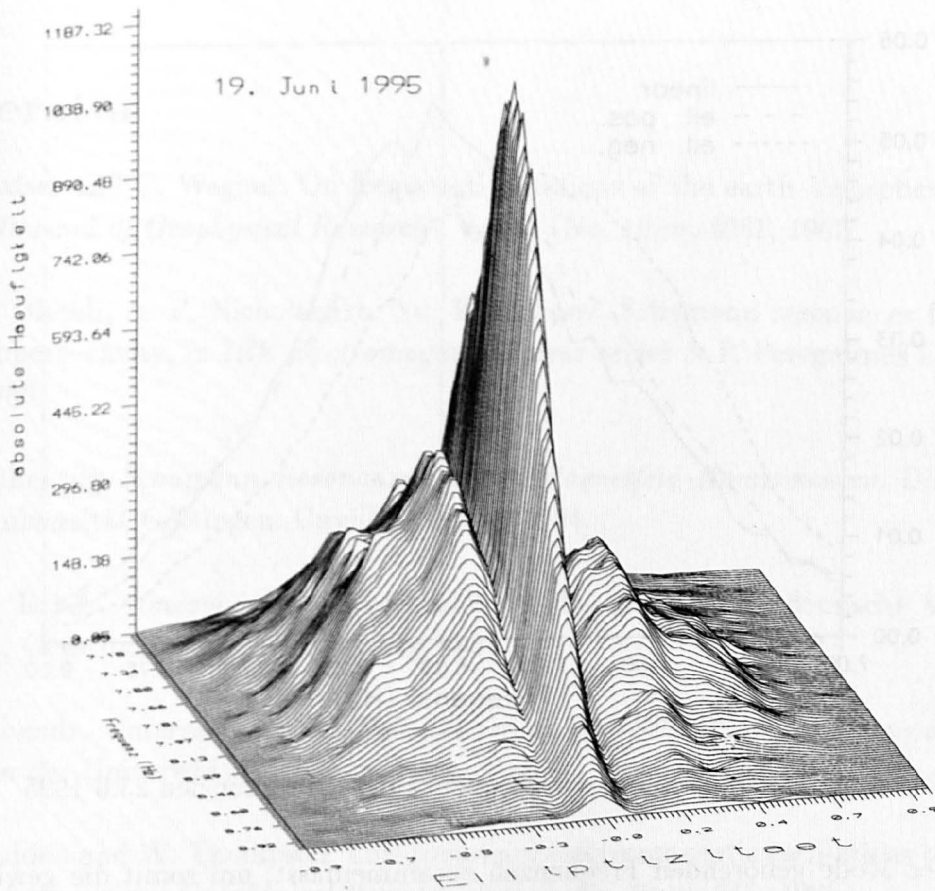


Abbildung 11: Darstellung des zweidimensionalen Beobachtungsraumes für den 19.6.1995.

4.3 Die gemeinsame Untersuchung von Elliptizität und Frequenz

Mit Hilfe des MARQUARDT-LEVENBERG-Verfahrens sind die Frequenzen der gefundenen Einzeleffekte bestimmt worden. Anschließend wurde die Anzahl der Effekte in Abhängigkeit von Frequenz und Elliptizität ermittelt. Als Datengrundlage für diese Untersuchung diente ein kompletter Tag, um eine statistisch ausreichende Analyse zu gewährleisten. Das Ergebnis ist in Abb. 11 dargestellt.

Anhand dieser Darstellung sind die drei theoretisch vorhergesagten Submoden deutlich zu erkennen. Neben der starken Dominanz der Klasse der linear polarisierten Effekte finden sich zwei überdurchschnittlich stark besetzte Bereiche mit elliptisch positiver und negativer Polarisation. Dabei sind die LHP-Effekte stärker als die RHP vertreten. Beachtung findet hierbei, daß die stärksten Häufigkeiten der einzelnen Moden in einem Bereich zu erwarten sind, der innerhalb der ersten Resonanzfrequenz bei etwa 8 Hz liegt. Zu höheren bzw. niedrigeren Frequenzen, in denen nicht so häufig Resonanzerscheinungen vermutet werden, ist die Modenaufspaltung immer schwächer ausgeprägt, bis sie schließlich an den Grenzen gänzlich verschwindet. Das bedeutet, daß der Großteil der getriggerten Effekte nur dann sichtbar zur Modenaufspaltung beiträgt, wenn Polarisationsfrequenzen vorliegen, die den erwartungsgemäß größten Anteil an der Resonanz liefern.

Eine Abschätzung des Frequenzsplittings kann nun dadurch erreicht werden, daß man

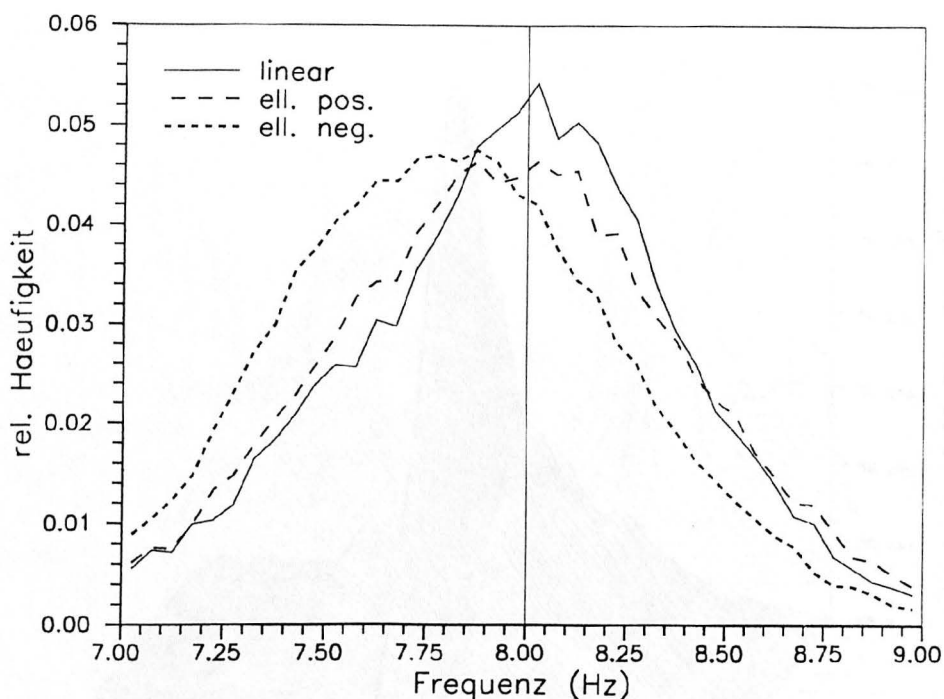


Abbildung 12: Darstellung der Frequenzaufspaltung für den 23.6 1995

alle zu einer Mode gehörenden Frequenzen zusammenfasst, um somit die gewünschte Verteilung besser sichtbar zu machen. Diese Vorgehensweise führt zu dem in Abb. 12 gewonnenen Ergebnis, in der zur besseren Vergleichbarkeit der verschiedenen Moden relative Häufigkeiten berechnet wurden. Als Datengrundlage ist der 23. Juni aus der sechstägigen Sommermessung gewählt worden.

Die aufgeführte Darstellung vermittelt zum ersten Mal den Eindruck, daß durch eine Differenzierung der ermittelten Polarisationsarten eine Frequenzaufspaltung der ersten Schumannresonanz unmittelbar sichtbar gemacht werden kann. Man erkennt, daß die drei normalverteilten Häufigkeiten keineswegs den selben Zentralwert aufweisen, sondern einen relativen Abstand zueinander besitzen. Dieser Sachverhalt ist besonders bei den beiden elliptisch polarisierten Anteilen recht gut ausgeprägt. Mittels eines durchgeführten Polynomfits läßt sich schließlich ein Splitting von $\pm 0.1-0.2$ Hz abschätzen, das recht erstaunliche Parallelen mit den analytischen Rechnungen BLOKH et al. aufweist.

5 Zusammenfassung

Folgende Erkenntnisse wurden im Laufe der Untersuchung erlangt:

- Trotz Beschränkung der Analyse auf Einzeleffekte konnte eine Korrelation der Amplitudenverläufe mit der globalen Gewitteraktivität nachgewiesen werden.
- Die Einzeleffekte offenbarten unterschiedliche Polarisation, wobei der Parameter der Elliptizität innerhalb der maximalen Häufigkeiten einen Tagesgang aufwies.
- Die Häufigkeitsverteilung der Frequenz für die verschiedenen Moden ließ auf ein Frequenzsplitting schließen, dessen Größenordnung mit $\pm 0.1-0.2$ Hz abgeschätzt werden konnte.

Literatur

- M. Balsler and C. Wagner. On frequency variations of the earth-ionosphere-cavity modes. *Journal of Geophysical Research* , Vol.67 (No. 10):p. 4081, 1962.
- P. V. Bliokh, A. P. Nicholaenko, Yu. F. Fillipov. Schumann resonances in the earth-ionosphere-cavity. In *IEE Electromagnetic waves series 8*. P. Peregrinus Ltd., Stevenage, 1980.
- M. Füllekrug. *Schumann-Resonanzen in den Magnetfeld-Komponenten*. Dissertation an der Universität Göttingen. Cuvillier Verlag, 1994.
- A. G. Israél. *Atmosphärische Elektrizität.*, Teil I und II , Akademische Verlagsgesellschaft, Geest und Porlig KG, Leipzig, 1961.
- D. Labendz. *Untersuchung der Polarisation in den Schumann-Resonanzen*. Diplomarbeit an der Universität Göttingen, 1996.
- T. Madden and W. Thompson. Low frequency electromagnetic oscillations of the earth-ionosphere-cavity. *Geophysical Reviews* , Vol. 3 (No. 2) :p. 211, 1965.
- W. O. Schumann. Über die strahlungslosen Eigenschwingungen einer leitenden Kugel, die von einer Luftschicht und einer Ionosphärenhülle umgeben ist. *Zeitschrift für Naturforschung* , Vol. 7a:p. 149 und 250, 1952.
- D. D. Sentman. Magnetic elliptical polarization of Schumann resonances. *Radio Science*, Vol. 22 (No. 4):p. 595, 1987.
- D. D. Sentman. Direction of elliptical polarization and mode-splitting in discrete Schumann resonance excitations. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics* , Vol. 51:p. 507, 1989.
- M. Wehmeier. *Entwicklung eines geländetauglichen Registriergerätes für elektrische und magnetische Felder mit Frequenzen zwischen 0.1 und 10 Hz*. Diplomarbeit an der Universität Göttingen, 1992.
- M. Wehmeier. Persönliche Mitteilung, 1996.