

Peter Wolfgram, München

Ein Versuch zur Interpretation des äußeren Anteils der erdmagnetischen Variationen in Island

Im Sommer 1977 wurden in NE-Island die zeitlichen Variationen des Erdmagnetfeldes mit Askania-Variographen registriert. Die sechs Meßstationen, an denen gleichzeitig registriert wurde, sind in Figur 1 durch Dreiecke gekennzeichnet. In Figur 2 ist der Weg der Datenverarbeitung veranschaulicht: Aus den Filmregistrierungen wurden zeitgleiche Intervalle von allen sechs Stationen digitalisiert, äquidistant linear interpoliert und in Profilmontagen dargestellt. Nach diesen Montagen wurden Teilintervalle ausgewählt und numerisch bandpaß-gefiltert. Die Teilintervalle wurden nach zeitlich begrenzten Schwingungszügen ausgewählt, sodaß vermutlich jedem Teilintervall in den Magnetfeldvariationen eine eigene Entstehungsursache zugeordnet werden kann. Für jedes Teilintervall wurden aus den bandpaß-gefilterten Zeitreihen eine Reihe von Größen bestimmt und zu einem Parametersatz zusammengefaßt - so entstanden etwa 1000 Parametersätze. Trägt man zwei Parameter gegeneinander in einem Diagramm auf, so erhält man etwa 1000 Punkte und kann nach einer Interpretation für ihre Verteilung suchen.

In Figur 3 sind die wichtigsten berechneten Parameter vereinfachend dargestellt. Im oberen Bild ist eine schrägstehe Ebene eingezeichnet, welche die räumliche Punktwolke der Zeitreihen X,Y,Z ausgleicht.

1. Die Korrelationsrichtung RICHT: Die schrägstehe Ebene schneidet die horizontale Ebene. Senkrecht zur Schnittgeraden liegt in der horizontalen Ebene die Korrelationsrichtung RICHT (hier durch einen Pfeil mit beliebiger Länge dargestellt). Sie ist die Richtung derjenigen Horizontalkomponente, die am besten mit der Z-Komponente korreliert ist. Bei homogenem anregendem Magnetfeld über einer zweidimensionalen Leitfähigkeitsanomalie gibt RICHT die Richtung des Induktionspfeils an: senkrecht vom guten Leiter weg. Bei einem ionosphärischen Linienstrom über eben geschichtetem Untergrund erhält man die Richtung senkrecht vom Linienstrom weg.

2. Die horizontale Polarisationsrichtung POLXY: In die schräg-stehende Ebene ist eine Ellipse gezeichnet, die die räumliche Punktwolke der X,Y,Z-Werte andeutet. Projiziert man die Punktwolke in die horizontale Ebene, dann ergibt sich die ähnlich langgestreckte Punktwolke der X,Y-Werte. Die Richtung der Ausgleichsgeraden durch diese horizontale Punktwolke ist die Polarisationsrichtung POLXY. Im oberen Bild der Figur 3 entspricht dies der großen Halbachse der in die horizontale Ebene projizierten Ellipse.
3. Im unteren Bild der Figur 3 ist die vertikale Polarisationsrichtung POLZP veranschaulicht: Nach einer Koordinatendrehung um den Winkel POLXY steht eine Zeitreihe P zur Verfügung. P ist die Horizontalkomponente in der horizontalen Polarisationsrichtung POLXY. Die Zeitreihen P und Z beschreiben jetzt eine Punktwolke in der vertikalen Ebene, die nach der horizontalen Polarisationsrichtung POLXY ausgerichtet ist. Die Richtung der Ausgleichsgeraden durch diese Punktwolke ist die vertikale Polarisationsrichtung POLZP.

Die Parameter RICHT und POLXY sind Winkel in der xy-Ebene, von $x = 0^\circ$ = geomagnetisch Nord aus positiv im Uhrzeigersinn gezählt; POLZP ist ein Höhenwinkel, von der Horizontalen = 0° aus positiv nach oben gezählt. Die Korrelationsrichtung RICHT ist von 0° bis 360° , also in allen vier Quadranten, definiert, während die Polarisationsrichtungen POLXY und POLZP nur in zwei Quadranten berechnet wurden: Es kann z.B. nicht zwischen nördlicher und südlicher Polarisationsrichtung unterschieden werden.

Die Vertikalkomponente Z der Magnetfeldvariationen kann als Indikator für anomale Feldanteile betrachtet werden. Sie steckt in der Korrelationsrichtung RICHT und in der vertikalen Polarisationsrichtung POLZP, aber nicht in der horizontalen Polarisationsrichtung POLXY. Es ist also zu erwarten, daß die drei Parameter unterschiedlich auf anomale Magnetfeldvariationen reagieren.

Im Beispiel der homogenen Anregung über einer zweidimensionalen Leitfähigkeitsanomalie ist die Korrelationsrichtung RICHT konstant senkrecht zum Streichen der Anomalie, wenn man zu ihrer Berechnung jeweils Teilintervalle mit unterschiedlicher mittlerer Polarisationsrichtung POLXY verwendet. Hingegen erhält man bei einem

ionosphärischen Linienstrom über eben geschichtetem Untergrund die Korrelationsrichtung RICHT senkrecht zum Linienstrom - in dieser Richtung schwingt aber auch der horizontale Magnetfeldvektor, so daß die Polarisationsrichtung POLXY den gleichen Wert ergibt: RICHT = POLXY. Um derartige Zusammenhänge zu ergründen, wurden die Parameter für viele Teilintervalle berechnet und gegeneinander aufgetragen. In den so erhaltenen Diagrammen mit je etwa 1000 Punkten ergaben sich unerwartete Verteilungen.

Trägt man die Korrelationsrichtung RICHT und die horizontale Polarisationsrichtung POLXY gegeneinander auf, dann erhält man die Figur 4 mit etwa 800 Kreuzen; die Größe der Kreuze ist proportional zur Periode der Variationen. Es deuten sich Geraden an, auf denen RICHT \perp POLXY ist. Wegen der starken Tageszeit-Abhängigkeit (s.u.) wurde dies als ein Effekt des äußeren Magnetfeldes interpretiert und die Ursache in einem ionosphärischen System elektrischer Ströme gesucht. Die Figur 5 zeigt einen Vorschlag für ein horizontales Stromsystem: Einem relativ homogenem EW-Strom \underline{j}_{en} (extern, normal) ist ein zweidimensionaler schwächerer (oder weiter entfernterer) Strom \underline{j}_{ea} (extern, anomal) überlagert. Beide sollen horizontal und senkrecht aufeinander liegen. Die zugehörigen horizontalen Magnetfeldanteile sind in Figur 6 dargestellt. Der anomale Anteil \underline{F}_{ea} - er enthält auch noch eine Z-Komponente - soll so klein sein, daß er das resultierende gesamte externe Feld \underline{F}_e nur wenig aus der Richtung des normalen Anteils \underline{F}_{en} herausdreht; dann sind \underline{F}_e und \underline{F}_{ea} ungefähr senkrecht aufeinander. Als Polarisationsrichtung POLXY wäre hier die Richtung von \underline{F}_e , also etwa NS, zu erwarten, während die Korrelationsrichtung RICHT nach Osten oder Westen zeigen müßte. Dies ergäbe im POLXY-RICHT-Diagramm ein Kreuz bei etwa $(0^\circ, 90^\circ)$. Um auch andere Punkte im POLXY-RICHT-Diagramm als $(0^\circ, 90^\circ)$ zu erhalten, darf sich das Stromsystem \underline{j}_{en} um $\pm 60^\circ$ aus seiner EW-Richtung herausdrehen. Dabei sollen sich die inhomogenen Ströme \underline{j}_{ea} mitdrehen - es wird also irgendeine Verknüpfung zwischen \underline{j}_{en} und \underline{j}_{ea} angenommen.

Das inhomogene Stromsystem \underline{j}_{ea} scheint vom Meßgebiet weiter entfernt zu sein, denn wie in der Figur 7 zu sehen ist, prägen sich die Geraden mit RICHT \perp POLXY besonders für lange Perioden aus. Aus der Figur 8 ist zu ersehen, wie die Korrelationsrichtung RICHT

im Mittel im Laufe eines Tages von W nach E wandert (von negativen zu positiven Werten). Dies bedeutet, daß die inhomogene Stromkomponente j_{ea} im Mittel von N nach S schwenkt. Die Verknüpfung mit j_{en} , repräsentiert durch die Geraden mit $RICHT \perp POLXY$, deutet darauf hin, daß das ganze Stromsystem: $j_{en} + j_{ea}$ im Verlauf des Tages umschwenkt.

In Figur 9 wurde über der horizontalen Polarisationsrichtung POLXY aufgetragen die Polarisationsrichtung POLZP in der nach POLXY ausgerichteten vertikalen Ebene. Das Diagramm wurde nach Tageszeiten aufgeschlüsselt. In den Bildern 6-12 UT und 19-1 UT sind bei $POLXY=0^\circ$ Sprünge zu erkennen. Die Sprünge könnten auch durch die Art der Berechnung entstanden sein, sodaß hier nur die vergrößerten POLZP-Werte erklärt werden sollten. Sie wurden mit einem Kippen der Polarisationsebene der Magnetfeldvariationen interpretiert, wie die Figur 10 zeigt. Mit POLZP ist aber nur die Z-Variation berücksichtigt, die mit der Horizontalkomponente P in der horizontalen Polarisationsrichtung zusammenhängt. Eigentlich kann die Polarisationsebene auch woanders aufgerichtet bzw. um eine andere Achse gekippt sein - es wurde hier also nur ein Teil der Z-Variationen berücksichtigt. (Die systematischen Verteilungen in Figur 9 zeigen, daß durch die horizontale Polarisationsrichtung ein besonderes Koordinatensystem ausgezeichnet ist, das einer näheren Untersuchung wert wäre). In die Figur 10 sind äquivalente Möglichkeiten eingetragen, wie man das Kippen der Polarisationsebene der Magnetfeldvariationen durch elektrische Ströme interpretieren kann: Die eine Möglichkeit (im Bild a)) ist ein Strom j_{eah} , der horizontal in der Ionosphäre fließt und in EW-Richtung besonders stark ist; die andere Möglichkeit sind Aufwärts- oder Abwärtsströme j_{eav} , z.B. feldparallele Ströme (field aligned currents, Birkeland-Ströme). Die Möglichkeiten sind äquivalent, weil die Polarisationsrichtungen POLXY und POLZP nur bis auf $\pm 180^\circ$ bestimmt wurden.

In Figur 11 wurden Phasendifferenzen zwischen Komponenten der Magnetfeldvariationen über Polarisationsrichtungen POLXY aufgetragen, und zwar in der oberen Reihe die Phasendifferenzen zwischen Z- und X-Komponente (= Nord-Komponente) und unten zwischen Z- und P-Komponente (= Komponente in der Polarisations-

richtung POLXY). Im unteren Bild 6-12 UT spaltet die Punktwolke in zwei Teile auf mit einem 180° -Sprung bei $\text{POLXY}=0^\circ$. Es ist nicht auszuschließen, daß diese Aufspaltung durch die Koordinatendrehung um einen Winkel größer als 90° passiert ist in Verbindung mit der Symmetrie: $\text{POLXY} \equiv \text{POLXY} \pm n \cdot \pi$. Auf eine physikalische Interpretation des Sprungs mußte deshalb verzichtet werden. Indessen deutet sich eine tageszeitliche Systematik in den Verteilungen an: Während für 12-1 UT die Phasendifferenzen kaum Gesetzmäßigkeiten zeigen, fallen für 1-12 UT Häufungen in den Phasendifferenzen auf.

In Figur 12 ist ein Modell von Hughes und Rostoker (1978) wiedergegeben: Es ist in einer Draufsicht auf den geomagnetischen Pol im geomagnetischen Koordinatensystem gezeichnet. Die magnetische Ortszeit zählt von Mitternacht (unten) über Morgen (rechts) und Mittag (oben, Sonnenrichtung) nach Abend (links). Die gm. E-Richtung zählt gegen den Uhrzeigersinn, die gm.W-Richtung im Uhrzeigersinn. Um den Mittag fließen elektrische Ströme von oben in die Ionosphäre hinein (Kreise mit Kreuz) und teilen sich in ostwärtigen und westwärtigen Elektrojet (schattierte Pfeile) auf. Ein Teil der Ströme fließt im Vormittagssektor (als Hall-Ströme) äquatorwärts und im Nachmittagssektor wieder zurück (breite weiße Pfeile). Die beiden Elektrojets treffen sich im Abendsektor und lösen sich in Aufwärts-Ströme (Kreise mit Punkt) auf. Jeder der beiden Elektrojets wird von zwei antiparallelen flächenhaften Birkeland-Strömen begrenzt, die durch (Pedersen-) Ströme in der Ionosphäre verbunden sind (nicht in dieser Zeichnung, aber in Figur 13 dargestellt). Im Bild (b) der Figur 12 ist das gleiche bei Substorm-Aktivität dargestellt. In beiden Bildern ist die Dicke der Pfeile ein Maß für die Stromstärke.

Mithilfe dieses Modells können die beiden äquivalenten Stromsysteme j_{eah} und j_{eav} interpretiert werden: Dem Aufwärts- bzw. Abwärts-Strom j_{eav} entsprechen im Modell Ströme, die im Vormittagssektor in die Ionosphäre hineinfließen. Der horizontale, hauptsächlich EW-fließende Strom j_{eah} kann hier mit dem Elektrojet identifiziert werden. Einen EW-Strom untersucht man am besten mit der NS-Komponente (= X-Komponente) des Magnetfeldes. Deshalb wurde in Figur 14 das Z/X-Verhältnis mit dem Vorzeichen der Phasendifferenz multipliziert und über der Tageszeit aufgetragen. Tagsüber

ist eine Umkehr der Phase zu erkennen, was auf zweierlei Weise erklärt werden kann: (1) Der Elektrojet wandert im Tagesverlauf von S nach N über das Meßgebiet und erzeugt so eine Z-Umkehr im Magnetfeld. (2) Der Elektrojet wandert nicht, fließt aber wie im Modell von Hughes und Rostoker vormittags nach W und nachmittags nach E, sodaß sich die X-Komponente des Magnetfeldes umkehrt.

Abschließend sei darauf hingewiesen, daß alle Angaben im geomagnetischen Koordinatensystem zu verstehen sind.

Literatur:

- AKASOFU, S.I.: Physics of magnetospheric substorms. - Boston, U.S.A., 1977.
- : Dynamics of the magnetosphere. - Boston, U.S.A., 1980.
- FUKUSHIMA, N.: Ground magnetic effect of field-aligned currents connected with ionospheric currents. Handbuch der Physik, 49/4.
- HERMANCE, J.F.: Electromagnetic induction in the earth by moving ionospheric current systems. - Geophys. J. R. astr. Soc. 55, 557-576, 1978.
- HAAK, V.: Interpretationsverfahren für die Magnetotellurik unter besonderer Berücksichtigung lateral variierender elektrischer Leitfähigkeit im Erdinnern und eines räumlich inhomogenen induzierenden Magnetfeldes. - Bayer. Akad. Wiss. München, 1978.
- HUGHES, T.J.; ROSTOKER, G.: Current flow in the magnetosphere and ionosphere during periods of moderate activity. - J. Geophys. Res. 82/16, 1977.
- : A comprehensive model current system for high-latitude magnetic activity - I. The steady state system, - II. The substorm component. - Geophys. J. R. astr. Soc. 58, 525-569, 571-581, 1979.
- KEMMERLE, K.: Einzeleffektauswertung für die Magnetotellurik. - Pr. EMT Neustadt, 1978.
- MERSMANN, U.; BAUMJOHANN, W.; KÜPPERS, F.; LANGE, K.: Analysis of an eastward electrojet by means of upward continuation of ground-based magnetometer data. - J. Geophys. 45, 281-298, 1979.
- PRICE, A.T.: The theory of magnetotelluric method when the source field is considered. - University of California Press, 1970.
- WOLFGRAM, P.: Zeitvariationen des Erdmagnetfeldes, gemessen auf einem Profil durch Nordost-Island 1977. - Diplomarbeit am Inst. f. Allg. u. Angew. Geophysik Univ. München, 1980.

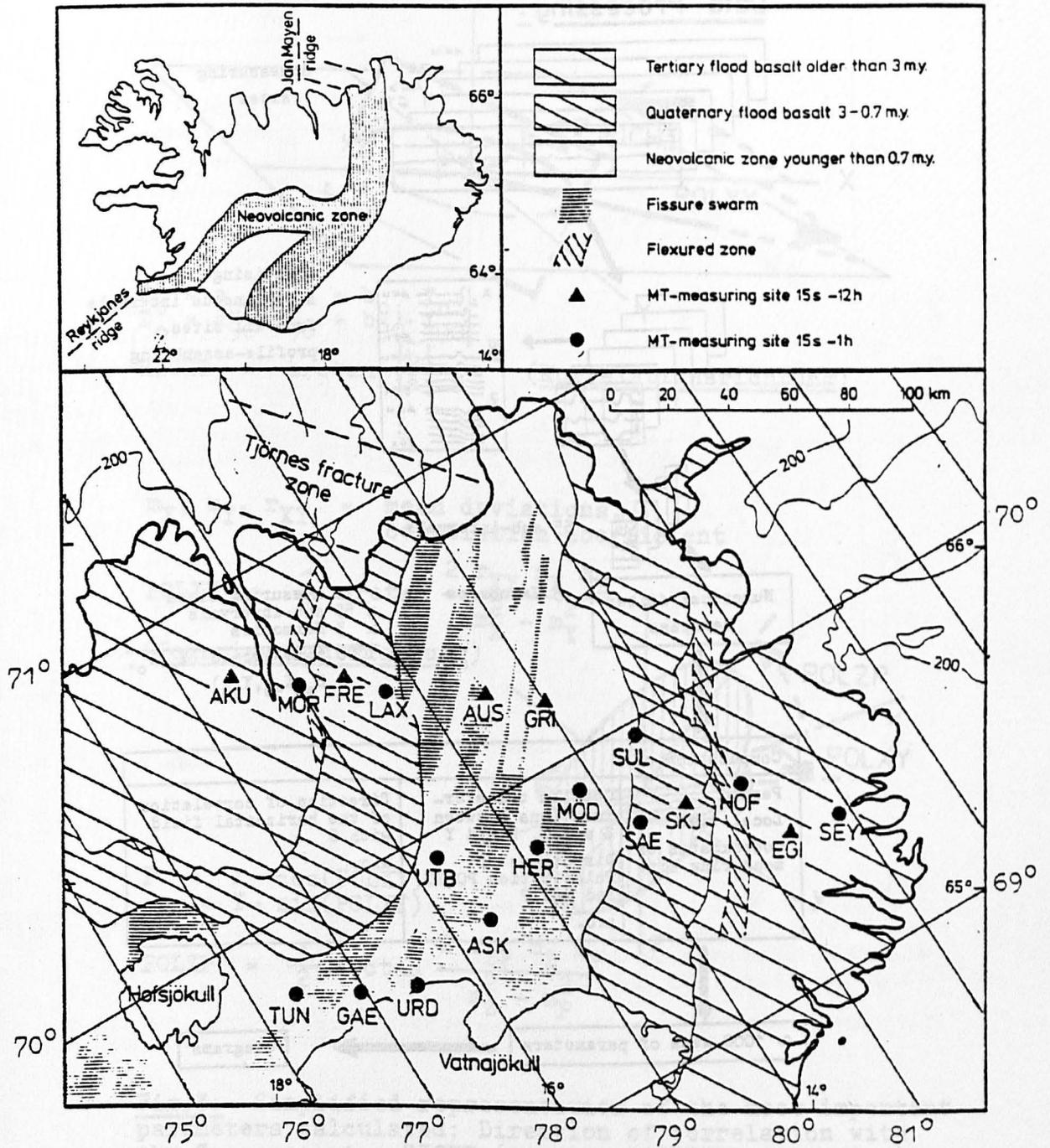


Fig.1: Measuring sites in North-East-Iceland in summer 1977. In this paper the long period (100s - 12h) magnetic registrations at the following sites were used (solid triangles):

- AKU = Akureyri
- FRE = Fremstafell
- AUS = Austaribrekka
- GRI = Grimstadir
- SKJ = Skjöldofsstadir
- EGI = Egilstadir

The numbers at the margin are dipole coordinates.

Data Processing:

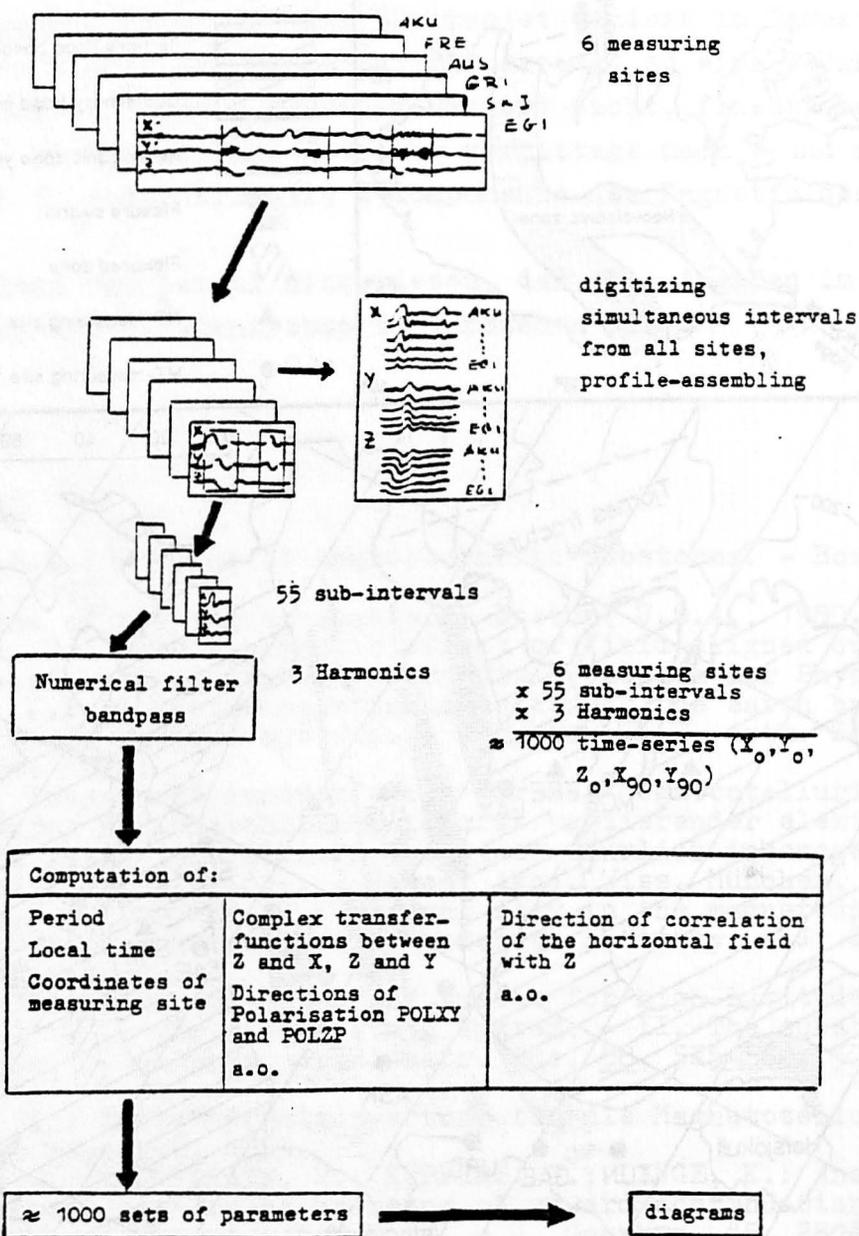
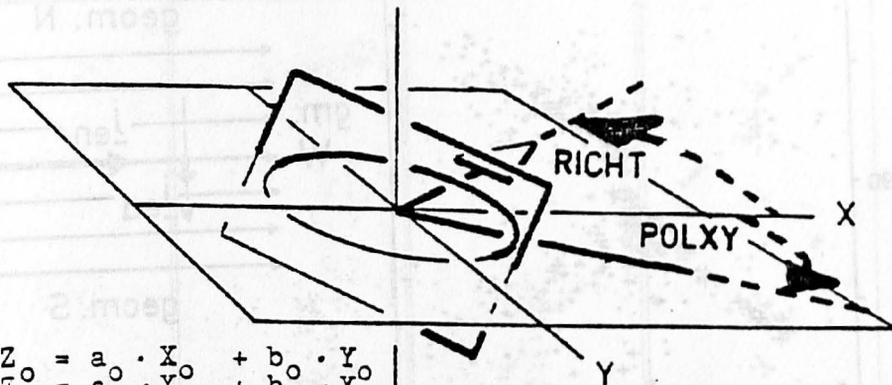


Fig.2: Data processing scheme: from original traces on films to diagrams shown in the following figures.



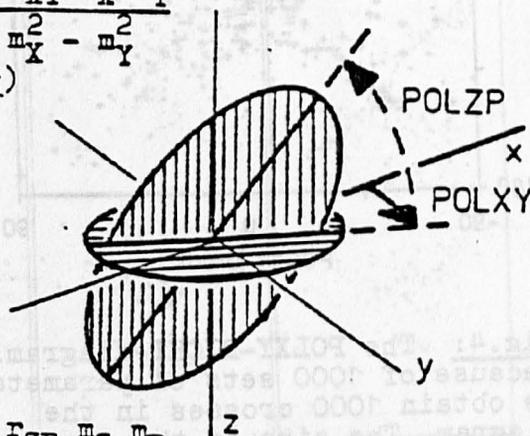
$$\begin{aligned} Z_0 &= a_0 \cdot X_0 + b_0 \cdot Y_0 \\ Z_0 &= a_{90} \cdot X_{90} + b_{90} \cdot Y_{90} \end{aligned}$$

$$\text{RICHT} = \arctan \frac{|b|}{|a|} \quad Z \quad (\text{Korrelationsrichtung})$$

m_X, m_Y, r_{XY} = mean deviations, correlation coefficient

$$\text{POLXY} = \frac{1}{2} \arctan \frac{2 r_{XY} m_X m_Y}{m_X^2 - m_Y^2}$$

(Polarisationsrichtung)



$$P = X \cdot \cos(\text{POLXY}) + Y \cdot \sin(\text{POLXY})$$

$$\text{POLZP} = \frac{1}{2} \arctan \frac{2 r_{ZP} m_Z m_P}{m_Z^2 - m_P^2}$$

Fig.3: Simplified representation of the most important parameters calculated: Direction of correlation with the Z-component = RICHT (german: RICHTUNG=direction); direction of the major axis of the (idealized) polarization ellipse = POLXY; polarization direction POLZP in a vertical plane aligned with the POLXY-direction.

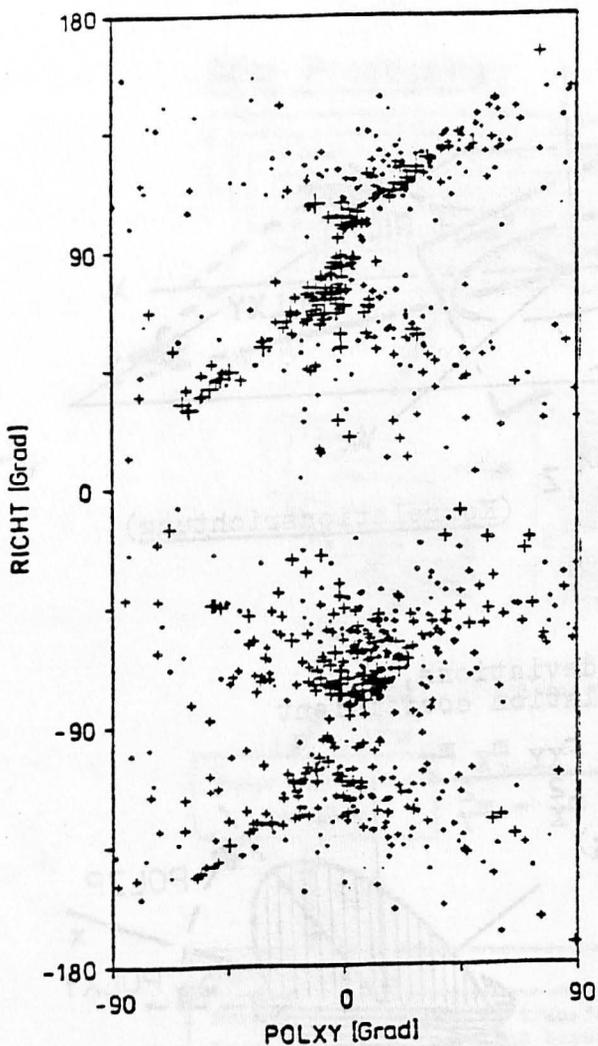


Fig. 4: The POLXY-RICHT-diagram. Because of 1000 sets of parameters we obtain 1000 crosses in the diagram. The size of the crosses is proportional to the period T.

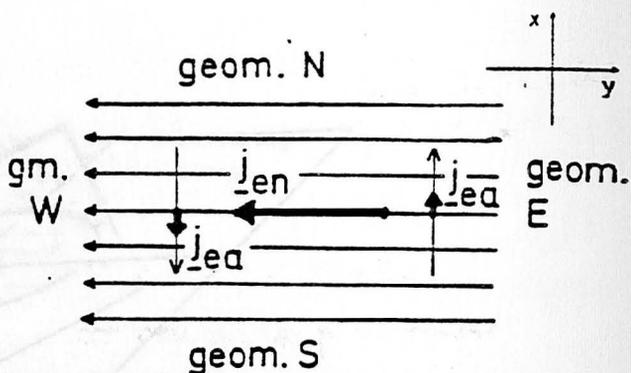


Fig. 5: Simple model of ionospheric currents to explain one cross in the POLXY-RICHT-diagram at $(0^\circ, 90^\circ)$. Current densities j_{en} (extern, normal) and j_{ea} (extern, anormal).

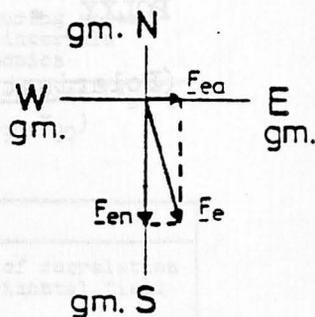


Fig. 6: Horizontal magnetic field components for the model in Fig. 5.

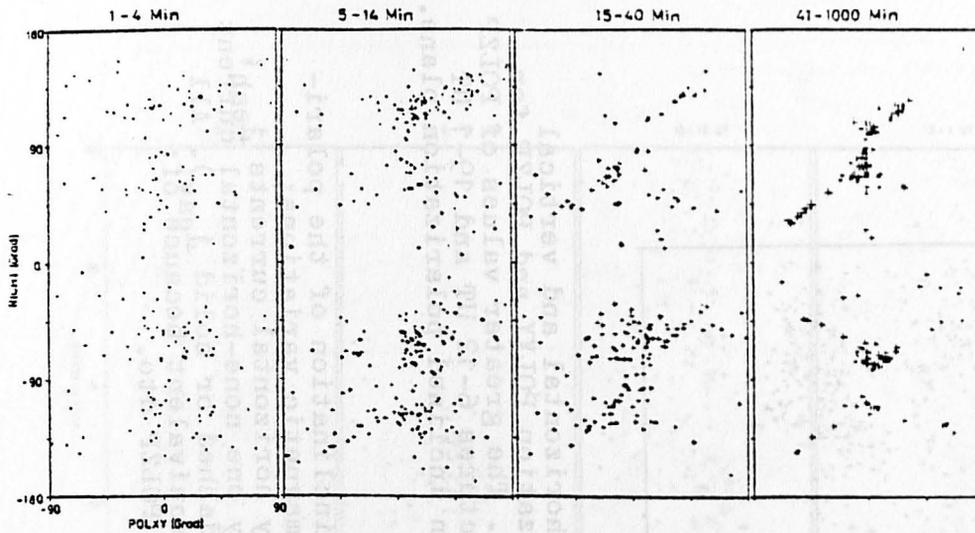


Fig.7: The POLXY-RICHT-diagram for several period groups. The better correlation for longer periods indicates that i_{ea} is more distant to the measuring sites.

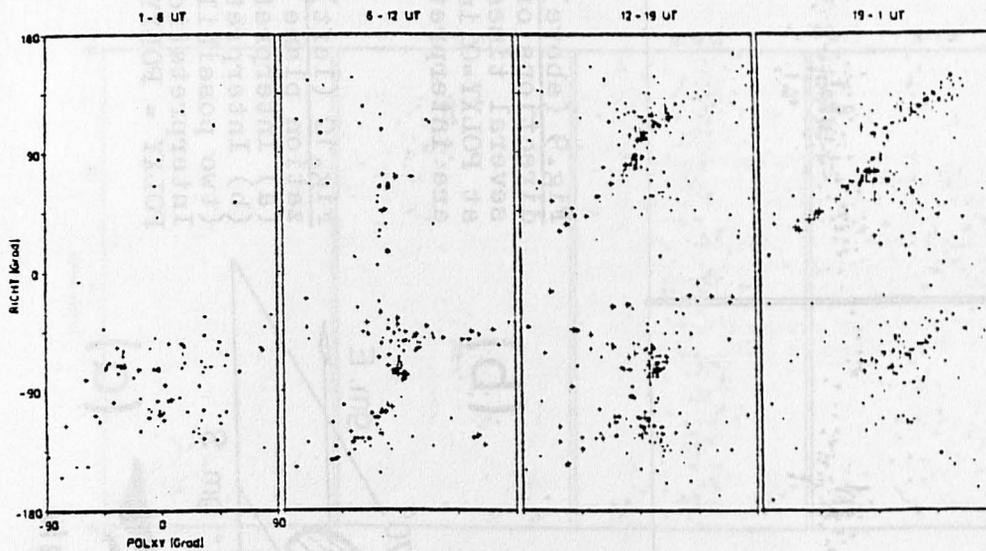


Fig.8: The POLXY-RICHT-diagram for several times of day. RICHT changes from W to E indicating that the whole current system $i_{en} + i_{ea}$ turns around.

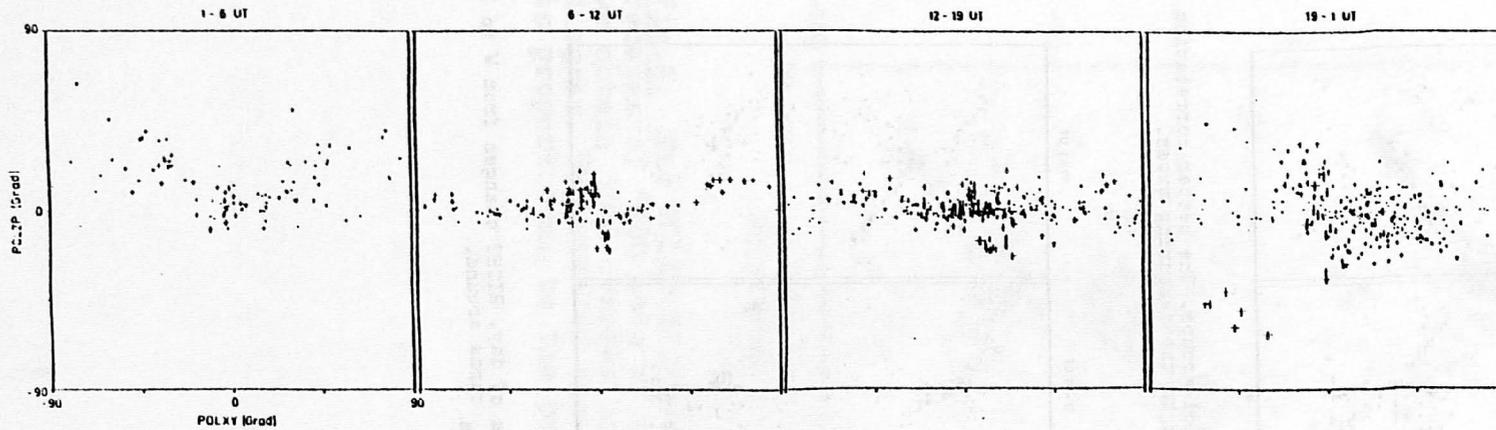


Fig.9 (above): The horizontal and vertical directions of polarization POLXY and POLZY for several times of day. The greater values of POLZY at POLXY=0 in the pictures 6-12 UT and 19-1 UT are interpreted by an inclined polarization plane.

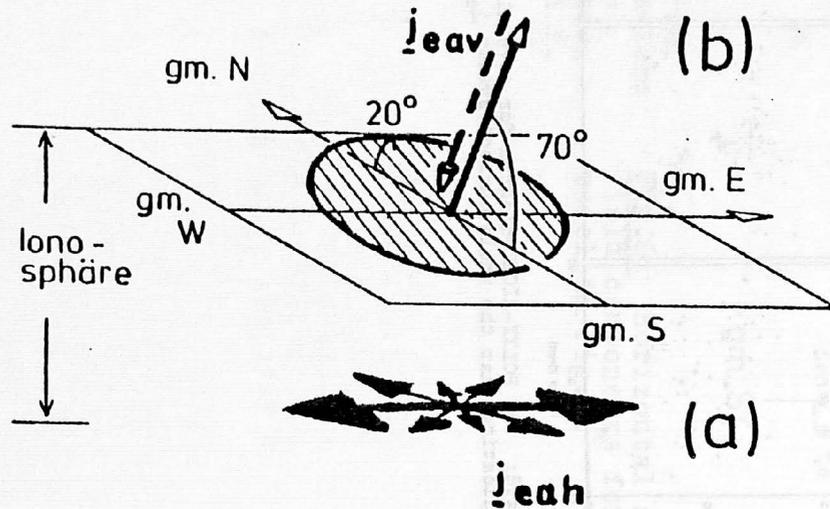


Fig.10 (left): The inclination of the polarization plane of the magnetic variations:
 (a) Interpretation by horizontal currents j_{eah} ;
 (b) Interpretation by one non-horizontal current (two possibilities: dashed or solid j_{eav}). All interpretations are equivalent because of: $POLXY = POLXY \pm n \cdot \pi$, $POLZY$ dto.

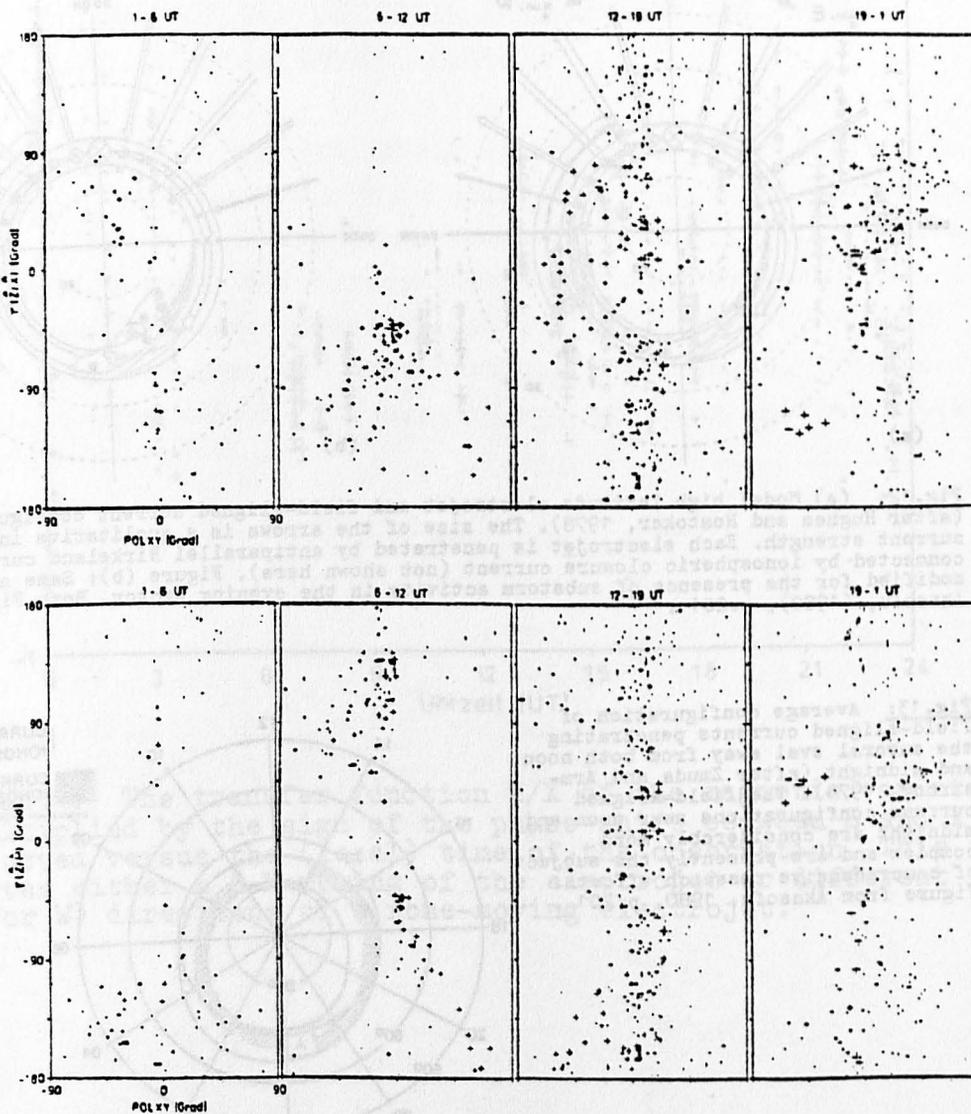


Fig. 11: Phase-shift between vertical and horizontal north-component (upper picture) and horizontal P-component (in the direction of POLXY, lower picture) for several times of day. In the lower picture 6-12 UT there is a step at POLXY = 0° that indicates an uplifting of the polarisation plane in gm.N .

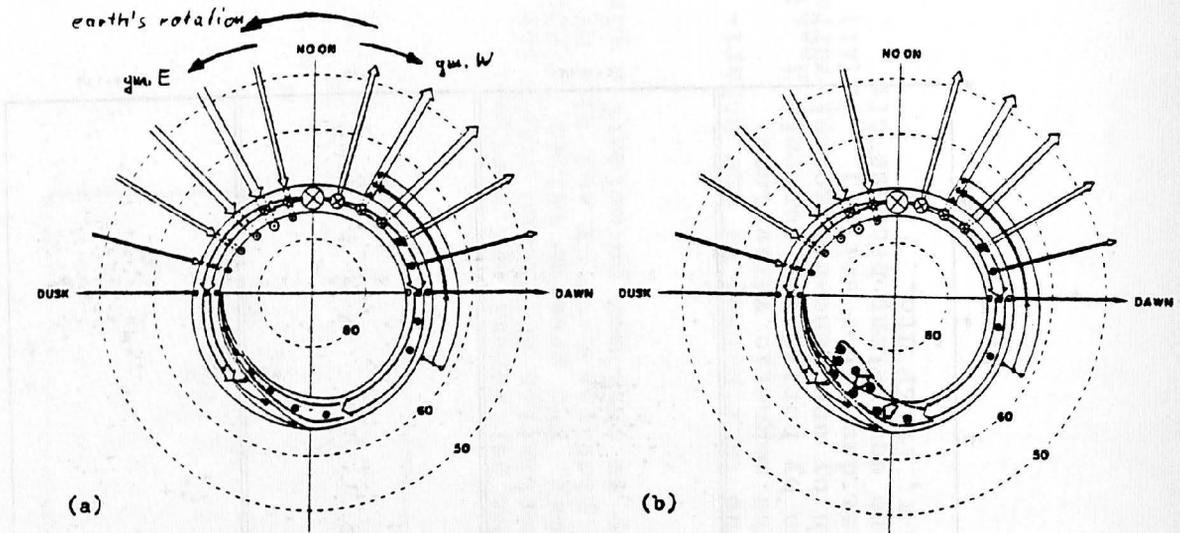
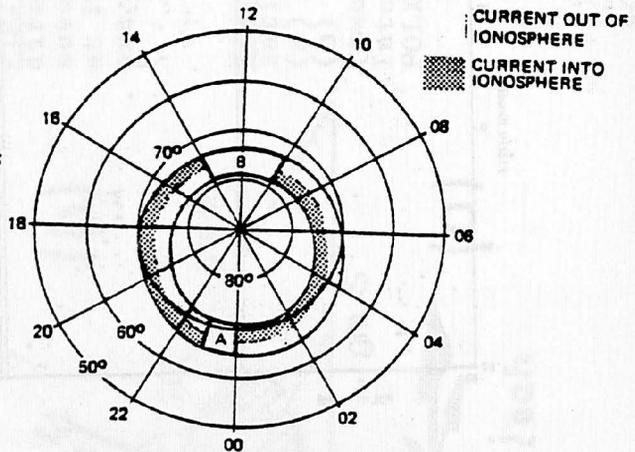


Fig.12: (a) Model high latitude electrojet and field-aligned current configuration (after Hughes and Rostoker, 1978). The size of the arrows is a qualitative indicator of current strength. Each electrojet is penetrated by antiparallel Birkeland current sheets connected by ionospheric closure current (not shown here). Figure (b): Same as (a) but modified for the presence of substorm activity in the evening sector. Both Figures from Akasofu, (1980), p.201 .

Fig.13: Average configuration of field-aligned currents penetrating the auroral oval away from both noon and midnight (after Zmuda and Armstrong, 1974). The field-aligned current configurations near noon and midnight are considerably more complex and are presently the subject of comprehensive research efforts. Figure from Akasofu, 1980, p.201 .



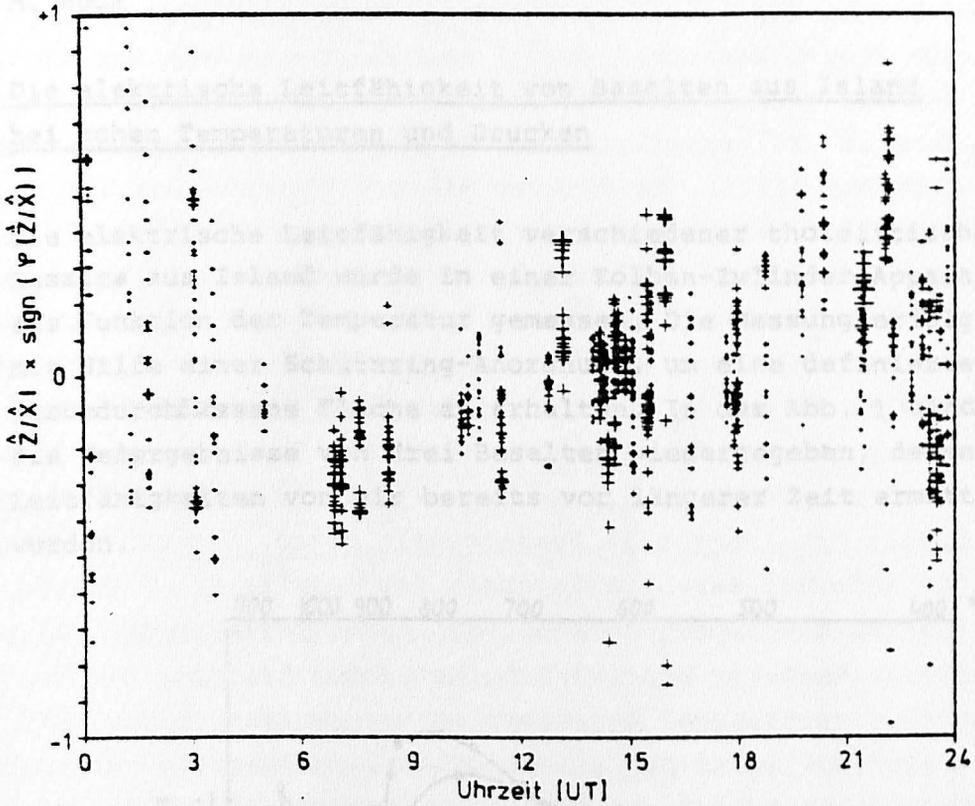


Fig. 14: The transfer function Z/X of the magnetic variations multiplied by the sign of the phase-shift between Z and X and plotted versus the (local) time of the observation. This indicates either a S-N moving of the electrojet or different (i.e. E or W) directions of a none-moving electrojet.

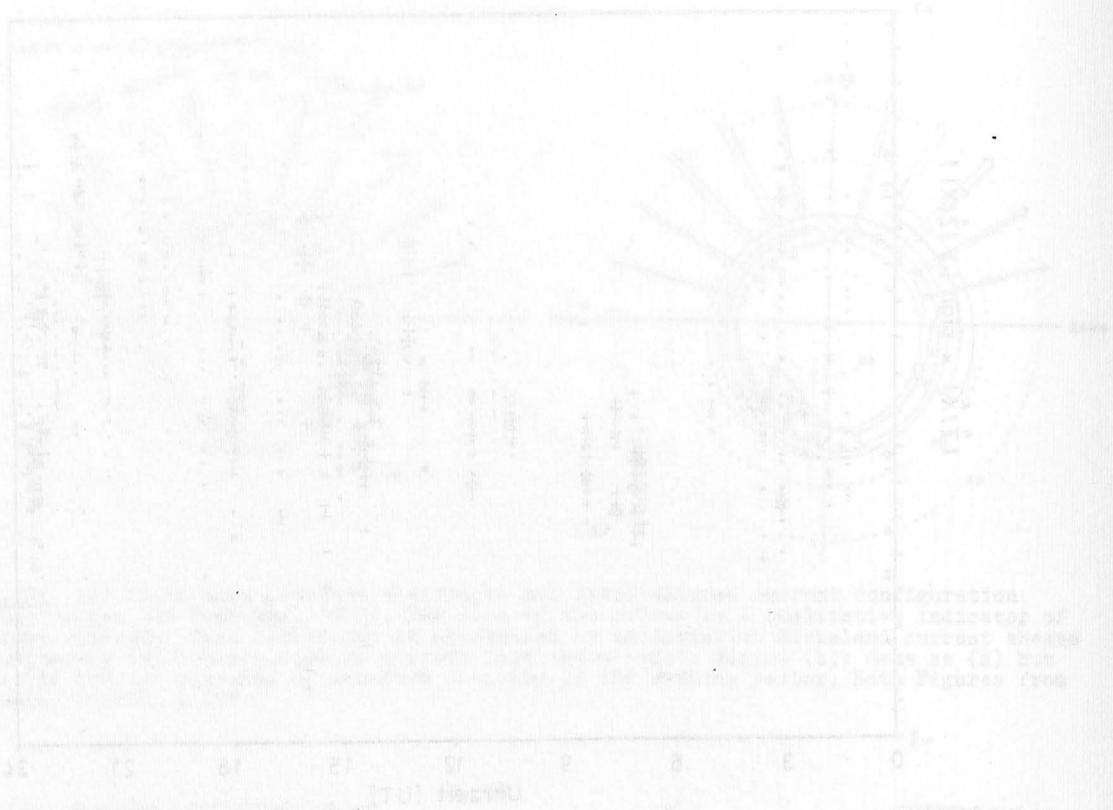


Diagram illustrating the current density distribution in a cylindrical configuration. The plot shows the relationship between the current density components and the radial distance from the center. The axes are labeled 'Current Density' and 'ITUI HeruU'. The diagram includes several concentric circles and radial lines, suggesting a polar coordinate system. There are also some faint, illegible text labels within the plot area.

The transfer function $H(s)$ of the feedback system has a zero in the right half-plane, which is multiplied by the sign of the phase shift between ω and ω plotted versus the local time of the observation. The sign of the phase shift is given by the sign of the imaginary part of $H(s)$. The direction of the phase shift is indicated by the sign of the imaginary part of $H(s)$.

