

A. Junge

"Zum Einfluß der M2-Tide der Nordsee auf das erdelektrische Feld in Nord- und Westdeutschland"

In diesem Beitrag soll ein kausaler Zusammenhang zwischen der M2-Tide der Nordsee und dem räumlichen Verhalten der entsprechenden zeitlichen Variation des tellurischen Feldes, das an sechs Meßstationen in Nord- und Westdeutschland beobachtet wurde, aufgezeigt werden. Der Nachweis erfordert für jede Station die Abspaltung desjenigen Anteils im erdelektrischen Feld, der durch zeitliche magnetische Variationen induziert wird, sowie die Berücksichtigung der Verzerrung des elektrischen Feldes durch kleinräumige oberflächennahe, laterale Leitfähigkeitsanomalien.

Theoretische Überlegungen

Schon Faraday (1832) erkannte, daß in strömendem Wasser elektromotorische Kräfte wirken, wenn die Bewegung geladener Teilchen magnetische Kraftflußlinien schneidet. Sie entsprechen einem senkrecht zur Teilchengeschwindigkeit  $\underline{v}$  und zur magnetischen Kraftflußdichte  $\underline{B}$  gerichteten elektrischen Feld  $\underline{E} = \underline{v} \times \underline{B}$ . Das strömende Medium besitze die Leitfähigkeit  $\sigma$ , dann gilt das OHM'sche Gesetz in der Form

$$\underline{j} = \sigma (\underline{E} + \underline{v} \times \underline{B}) \quad (1)$$

wobei  $\underline{j}$  die elektrische Stromdichte darstellt. Unter stationären Verhältnissen läßt sich das elektrische Feld in Bereichen konstanter Leitfähigkeit durch das Potential  $\phi$  ausdrücken (LONGUET-HIGGINS, 1949, Abs. 8)

$$\underline{E} = -\text{grad } \phi = \frac{1}{\sigma} \underline{j} - \underline{v} \times \underline{B} \quad (2)$$

Die Flüssigkeit sei inkompressibel, d.h.  $\text{div } \underline{v} = 0$ , und es gelte  $\text{rot } \underline{B} = 0$ . Dann ergibt die Divergenzbildung von Gl. (2)

$$\text{div grad } \phi = \underline{B} \text{ rot } \underline{v} \quad (3)$$

An der Grenzfläche zweier Medien unterschiedlicher Leitfähigkeit  $\sigma_1$  und  $\sigma_2$  gilt die Stetigkeitsbedingung für die

Normalkomponente der Stromdichte  $\underline{j} \cdot \hat{n}$  mit  $\hat{n}$  als Einheitsvektor senkrecht zur Grenzfläche

$$\left[ \frac{1}{\sigma} \underline{n} (\text{grad } \phi \underline{v} \times \underline{B}) \right]_1^2 = 0 \quad (4)$$

Die Gleichungen (3) und (4) stellen die Ausgangsgleichungen zur Berechnung des Potentials von elektrischen Feldern bei stationären Strömungen dar.

Für einen in y-Richtung unendlich langen Kanal elliptischen Querschnitts an der Oberfläche eines homogenen Halbraums gibt LONGUET-HIGGINS (1949) die Lösung für das elektrische Feld im Kanal und außerhalb an der Erdoberfläche an:

$$\text{im Kanal: } E_{x1} = \frac{-v_y B_z}{1 + \frac{\sigma_2 a}{\sigma_1 b}} = \text{konst.} \quad (5a)$$

$$\text{außerhalb: } E_{x2}(x) = \frac{v_y B_z a}{\left[1 + \frac{\sigma_2 a}{\sigma_1 b}\right] [a-b] \left[\left(\frac{x^2}{c^2} - 1\right) + \frac{x}{c} \sqrt{\frac{x^2}{c^2} - 1}\right]} \quad (5b)$$

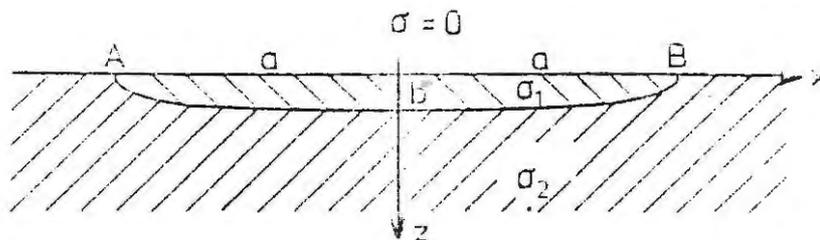
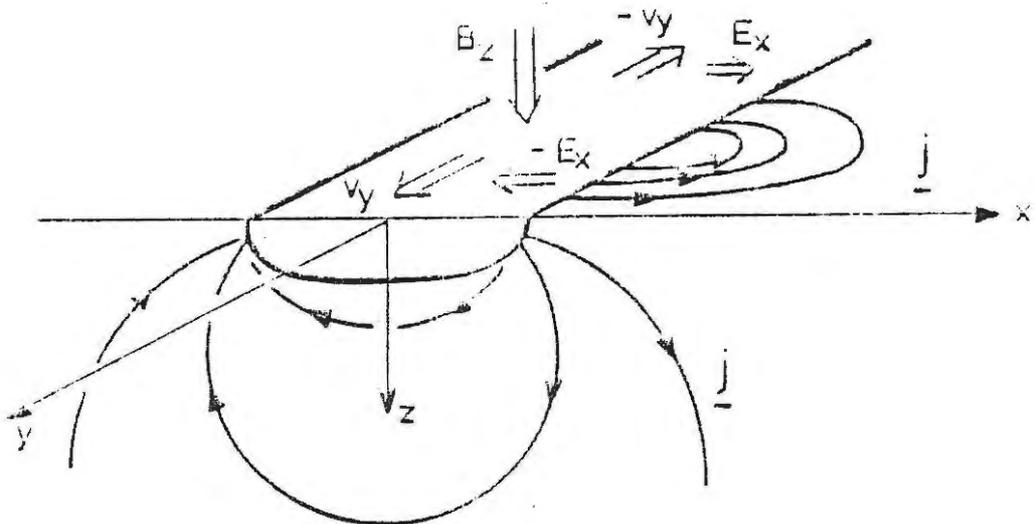


Abb.1: Zur Geometrie des Kanals

Das vertikale Magnetfeld  $B_z$  und die Strömungsgeschwindigkeit  $v_y$  seien konstant,  $\sigma_1$  sei die Leitfähigkeit des strömenden Mediums und  $\sigma_2$  die des Halbraumes. Der Koordinatenursprung befindet sich an der Oberfläche in der Kanalmitte. Mit den Zahlenwerten  $a=50$  km,  $b=50$  m,  $\sigma_1=4$  S/m,  $\sigma_2=0.004$  S/m,  $v_y=0.5$  m/s und  $B_z = 40\ 000$  nT, die in etwa für den Ärmelkanal zu Zeiten maximaler Gezeitenströmung zutreffen, berechnet sich das elektrische Feld im Kanal in  $E_{x1} = -10$  mV/km und in 300 km Abstand von der Küste zu  $E_{x2} = 0.1$  mV/km. Der Vorzeichenwechsel zwischen  $E_{x1}$  und  $E_{x2}$  entsteht durch die Wirkung von  $\underline{v} \times \underline{B}$  in Gl.(2).

Den qualitativen Verlauf der elektrischen Stromlinien gibt der Vertikalschnitt in Abb.2 wieder. Die Ströme umfassen einen Tiefenbereich von der Größe der Kanalbreite, in dem die Leitfähigkeit mit der Tiefe stark abnimmt. Es ist deshalb zu erwarten, daß sich die Stromdichte im oberen Bereich des Halbraumes erhöht und deshalb  $E_{x2}$  größer als in Gl.(5b) ist. Die Gezeitenströmungen im Ärmelkanal und längs der deutschen Nordseeküste können näherungsweise durch eine von West nach Ost fortschreitende Welle beschrieben werden. Demnach ist die Geschwindigkeit  $v_y$  eine periodische Funktion des Ortes längs der y-Achse und der Zeit. Die Zeitabhängigkeit führt zu einer harmonischen Variation des erdelektrischen Feldes mit der halbmondentägigen Gezeitenperiode M2 ( $T = 12.4206$  h). Der Einfluß der Selbstinduktion wird im Folgenden nicht berücksichtigt. Die Ortsabhängigkeit von  $v_y$  erzeugt eine im allgemeinen von Null verschiedene y-Komponente der Stromdichte  $j$  bzw. des tellurischen Feldes an der Erdoberfläche im Landesinnern (Abb.2).



**Abb.2:** Schematischer Verlauf der Stromdichte  $j$  bei einer längs des Kanals fortschreitenden Wasserwelle.  $B_z$  ist die Vertikalkomponente des erdmagnetischen Hauptfeldes.  $E_x$  ist entgegengesetzt zur x-Komponente von  $\underline{v} \times \underline{B}$  (Gl.(5a)).

Feldmessungen

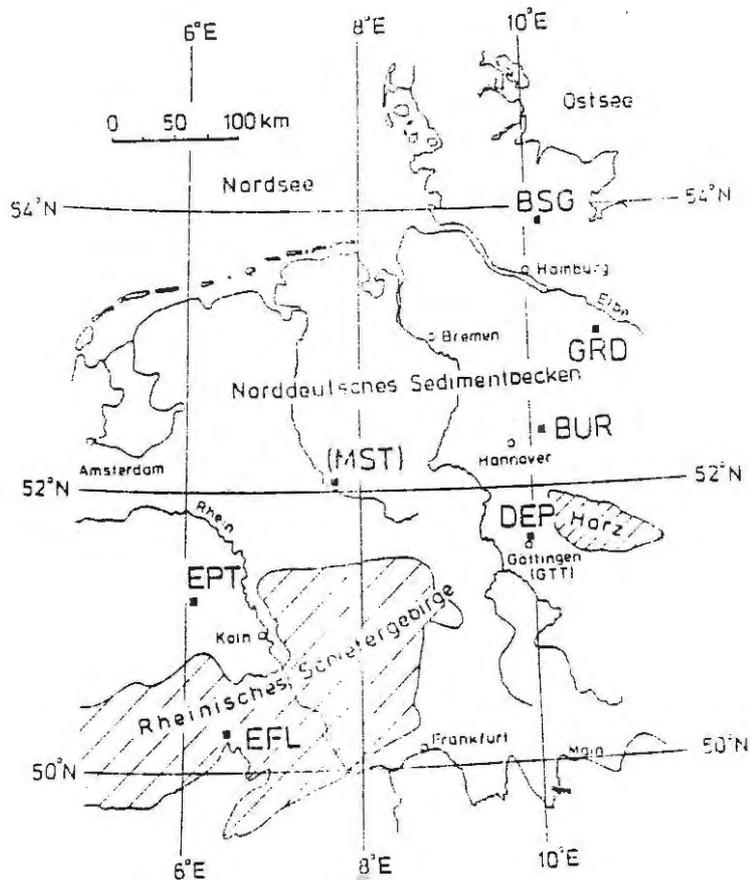


Abb.3: Lage der Meßstationen. Die Station MST ist eingeklammert, da die dort gemessenen Daten für eine Analyse nicht ausreichen.

Zur Auswertung lagen stündliche Mittelwerte zeitlicher Variationen des Nord-Süd- und Ost-West-gerichteten erdelektrischen Feldes aus den Jahren 1980/81 und 1984/85 an sechs Meßstationen vor. Vier Stationen befanden sich im Norddeutschen Sedimentbecken (BSG, GRD, BUR, EPT), eine etwas südlich davon bei Göttingen (DEP) und eine in der Schnee-Eifel im Rheinischen Schiefergebirge (EFL) (Abb.3). Die Registrierung des elektrischen Feldes erfolgte über rauscharme Ag-AgCl/KCl-Sonden (HEMPFLING, 1977) mit Auslagen von etwa 200 m. Die Länge der auswertbaren Zeitreihen variiert zwi-

schen 66 und 204 Tagen; mit einer Ausnahme betragen die Datenausfälle bei den einzelnen Aufzeichnungen weniger als 17%. Während der gesamten Meßdauer wurden zeitliche Variationen des erdmagnetischen Feldes in Göttingen registriert.

#### Gang der Analyse

In diesem Bericht werden die Auswerteverfahren nur schematisch dargestellt; eine ausführliche Beschreibung liefert JUNGE-TIERSCH (1986). Abb.4 zeigt die wesentlichen Schritte der Analyse, die für jede E-Feldstation getrennt nach dem selben Schema erfolgt.

Als Meßgrößen liegen stündliche Mittelwerte der horizontalen Komponenten  $E_x$  und  $E_y$  des erdelektrischen Feldes an jeder Station sowie der H- und D-Komponente (bzw.  $B_x$  und  $B_y$ ) des erdmagnetischen Feldes in Göttingen vor. Möglichst lange lückenlos und simultan registrierte Zeitintervalle werden hochpaßgefiltert (Abschneidefrequenz  $f_0 = 0.5$  cpd) und FOURIER-transformiert; im Frequenzbereich zwischen 0.5-8 cpd werden über einen linearen, bivariaten Ansatz Übertragungsfunktionen (Impedanztensoren) zwischen elektrischem und magnetischem Feld mit Hilfe einer Ausgleichsrechnung geschätzt. Jede Übertragungsfunktion wird dabei im angegebenen Frequenzbereich durch eine Summe orthogonaler Polynome dargestellt, wobei die Orthogonalitätseigenschaft die Angabe eines frequenzabhängigen Vertrauensbereiches zur jeweiligen Übertragungsfunktion ermöglicht. Der magnetisch induzierte Anteil des beobachteten elektrischen Feldes kann damit im hier interessierenden Frequenzbereich aus den magnetischen Variationen vorhergesagt und subtrahiert werden.

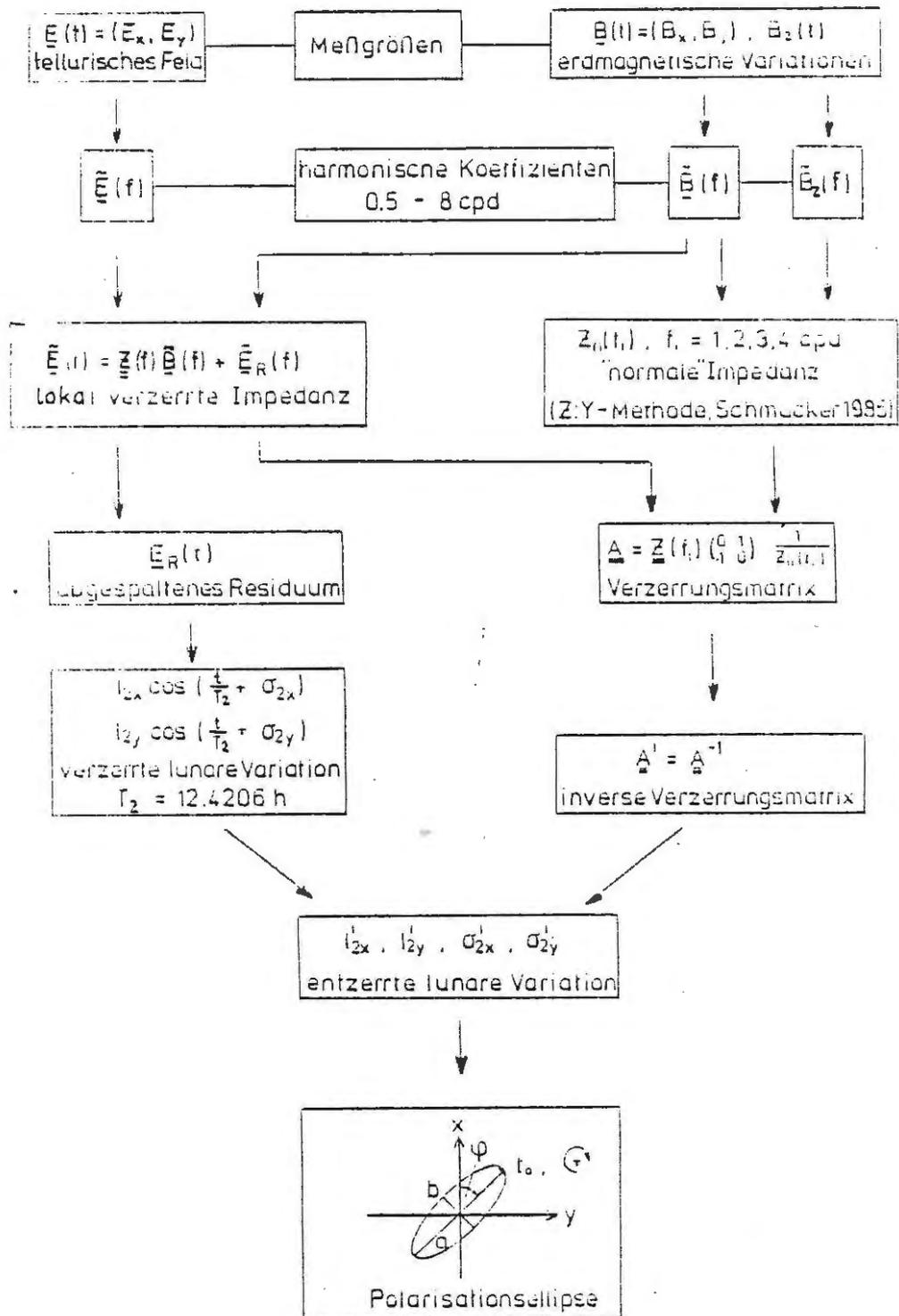


Abb. 4: Schematische Darstellung der Auswerteschritte

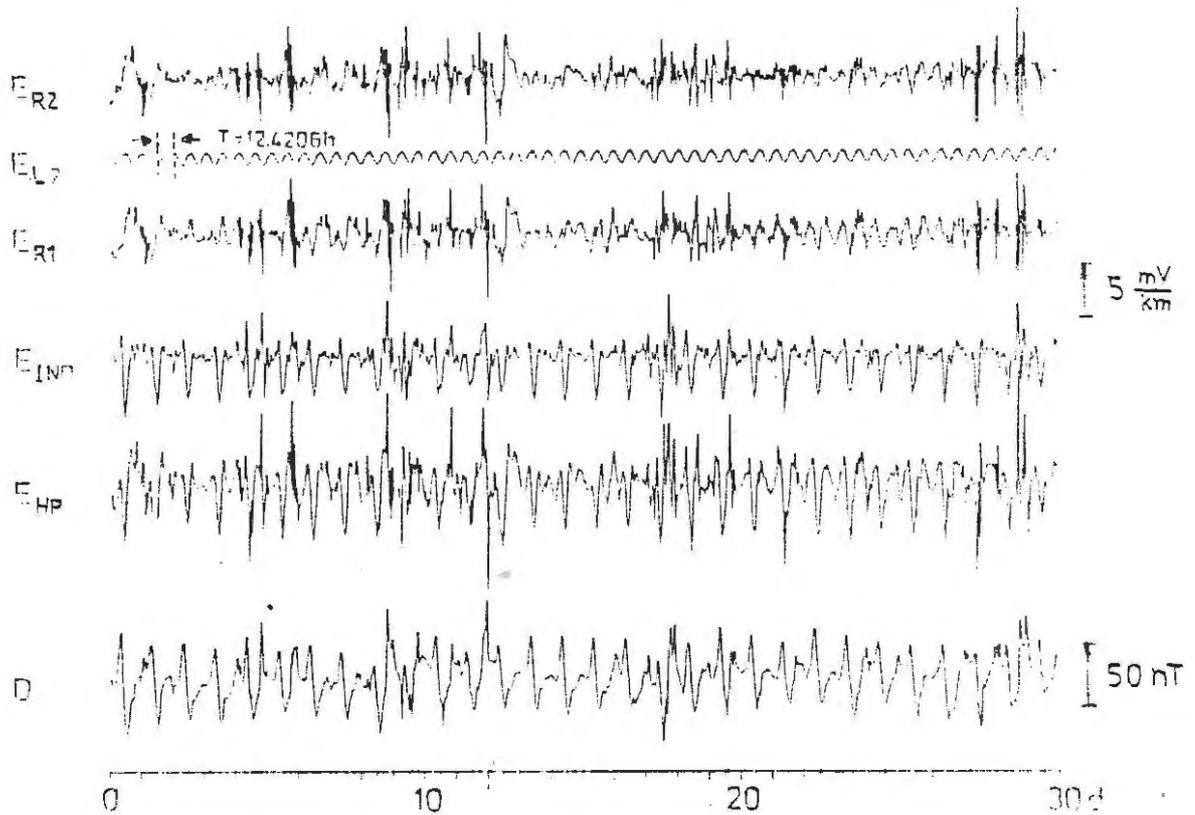
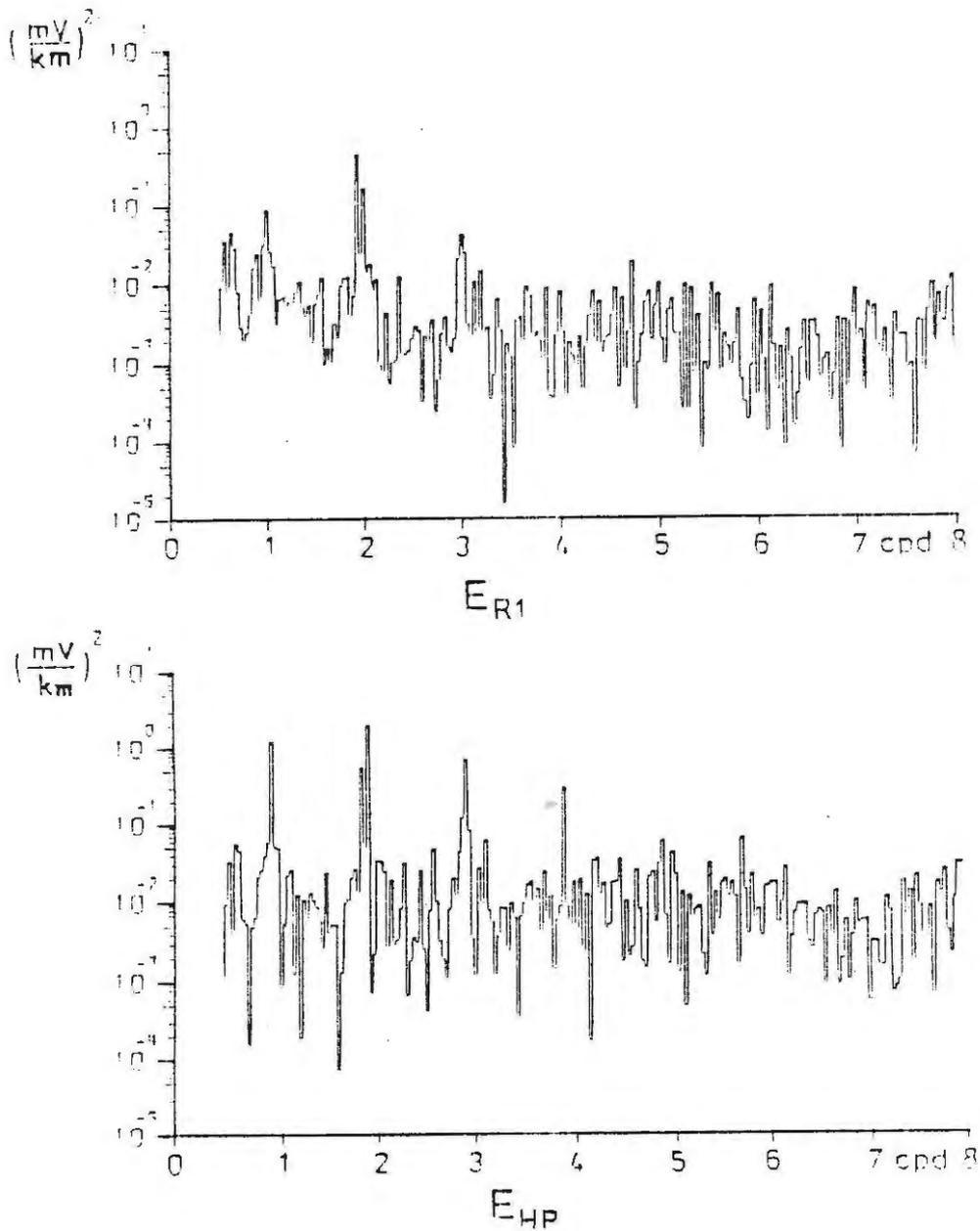


Abb.5: 30-tägiger Ausschnitt (14.10.80-12.11.80) aus der Registrierung der magnetischen D-Komponente von GTT und des elektrischen Nord-Süd-Feldes von DEP.  $E_{HP}$  ist hochpaßgefiltert ( $T_o = 2$  Tage),  $E_{IND}$  der induzierte Anteil und  $E_{R1}$  das Residuum nach Abzug von  $E_{IND}$ .  $E_{L2}$  ist die aus dem Residuum berechnete, halbmondentägige Schwingung und  $E_{R2}$  die Differenz  $E_{L1} - E_{L2}$ .

Abb.5 illustriert die Vorgehensweise anhand eines 30-tägigen Ausschnitts der magnetischen D-Komponente in Göttingen (GTT) und des hochpaßgefilterten elektrischen Nord-Süd-Feldes  $E_{HP}$  an der Station DEP. Die täglichen Variationen treten deutlich hervor und werden zeitweilig von kurzperiodischen, magnetisch induzierten Schwingungen überlagert. Das aus den magnetischen Variationen berechnete elektrische Feld  $E_{IND}$  stimmt in seinen zeitlichen Variationen, besonders im täglichen Gang, sehr gut



**Abb.6:** Quadratische Amplituden nach einer harmonischen Analyse der stündlichen Mittelwerte aus Abb.5 für den Frequenzbereich zwischen 0.5 und 8 cpd. Hochpaßgefiltertes ( $E_{HP}$ ) und residuales ( $E_{R1}$ ) Nord-Süd-elektrisches Feld bei DEP.

mit  $E_{HP}$  überein. Nach Abzug des induzierten E-Feldes weist das Residuum ( $E_{R1}$ ) vor allem in den täglichen Variationen merklich geringere Amplituden auf. Diesen Eindruck bestätigt Abb.6, in der nach einer harmonischen Analyse der Zeitreihen von  $E_{HP}$  und  $E_{R1}$  aus Abb.5 die quadratischen Amplituden von 0.5 - 8 cpd aufgetragen sind. Das Spektrum von  $E_{HP}$  ist annähernd weiß und wird von den ersten vier Sq-Harmonischen um Größenordnungen übertroffen. Zusätzlich erscheint die 58. Harmonische der Grundperiode von der Größenordnung der Sq-Harmonischen. Das Niveau des Kontinuums im Spektrum von  $E_{R1}$  hat sich gegenüber dem von  $E_{HP}$  merklich verringert, jedoch konnten die ersten drei Sq-Harmonischen nicht vollständig beseitigt werden. Sie werden jedoch deutlich von der unverändert gebliebenen 58. Harmonischen überragt, die damit signifikant auf eine nicht durch magnetische Variationen induzierte periodische Schwingung im erdelektrischen Feld hinweist.

Als Ursache wird die halbmondentägige Variation des elektrischen Feldes,  $E_{L2}$ , mit  $T = 12.4206$  h angenommen. Die CHAPMAN-MILLER-Methode (CHAPMAN and MILLER, 1940) eignet sich besonders gut zur Bestimmung von Amplitude und Phase,  $\ell_2$  und  $\sigma_2$ , der lunaren Variation, da sie sich auf die stündlichen Mittelwerte von Einzeltagessegmenten beschränkt; Tage, an denen das jeweilige elektrische Feld künstlich gestört ist oder an denen starke magnetische Aktivität auftritt, werden nicht mit in die Analyse einbezogen. In Abb.5 ist die lunare Variation  $E_{L2}$  abgebildet, die aus  $E_{R1}$  berechnet wurde.  $E_{R2}$  entsteht aus der Differenz von  $E_{R1}$  und  $E_{L2}$ . An magnetisch ruhigen Tagen ist eine deutliche Reduktion der Amplituden zu beobachten.

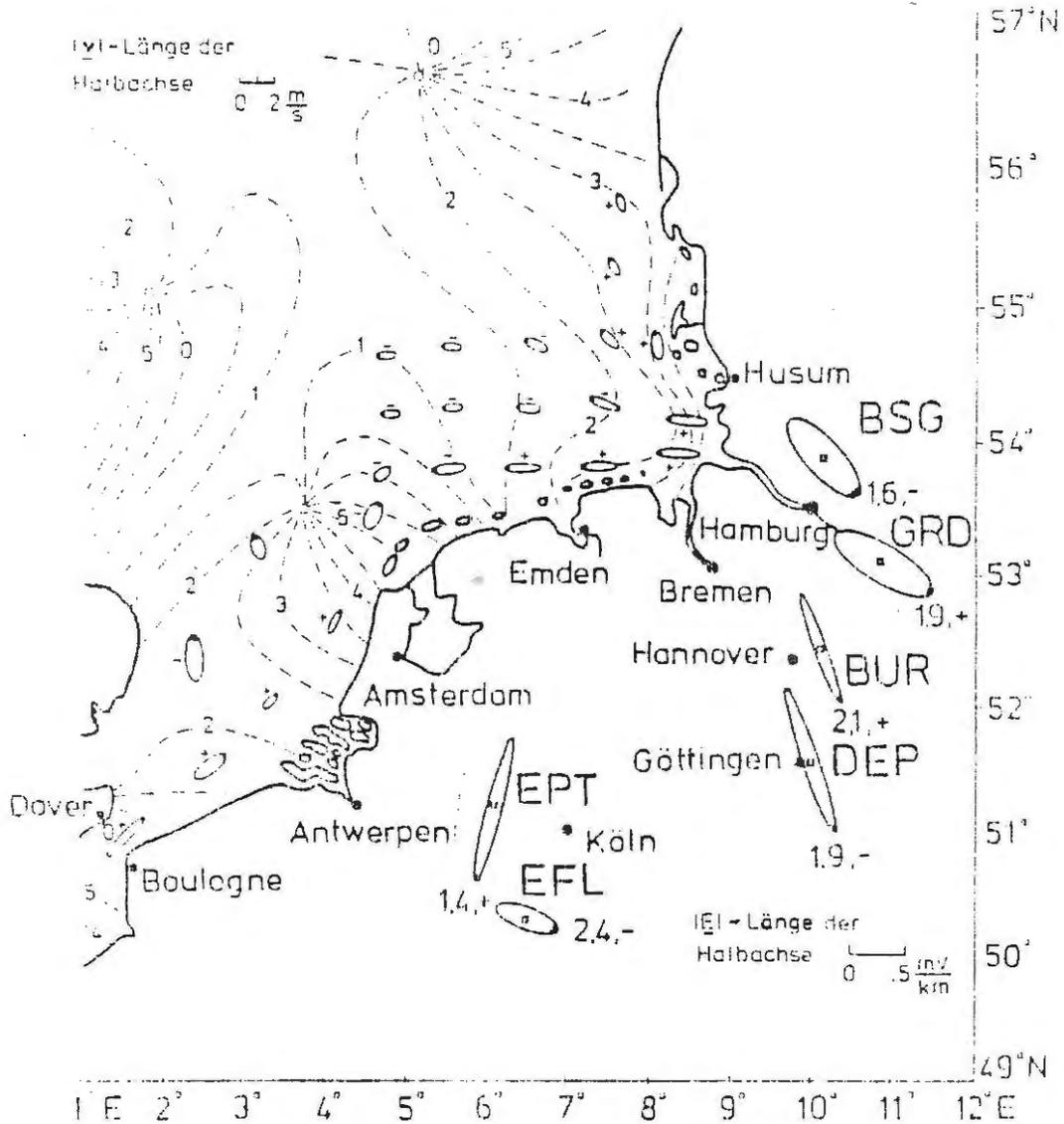
Die Amplituden der lunaren Variation beider E-Feldkomponenten an den einzelnen Stationen sind in der Regel stark durch lokale Verzerrungen des erdelektrischen Feldes beeinflusst. Eine Möglichkeit zur Beseitigung dieses Einflusses zeigt die rechte Seite von Abb.4: Es wurde die Hypothese einer lokalen, frequenzunabhängigen Verzerrung (Gleichstromverzerrung) großräumiger, langperiodischer elektrischer Variationen für die ersten vier Sq-Harmonischen durch den

Vergleich der lokalen Impedanztensoren mit der aus der Z:Y-Methode gewonnenen unverzerrten (= "normalen") Impedanz für Mitteleuropa (SCHMUCKER, 1985) überprüft. Sie trifft näherungsweise für die solare und damit auch für die lunare halbtägige Variation zu und gestattet die Berechnung einer für jede Feldstation unterschiedlichen Verzerrungsmatrix  $\underline{A}$ . Mit Hilfe der inversen Verzerrungsmatrix  $\underline{A}'$  können von lokalen Verzerrungen unbeeinflusste Amplituden und Phasen der M2-Variation des tellurischen Feldes,  $\lambda'_{2x}$ ,  $\lambda'_{2y}$ ,  $\sigma'_{2x}$ ,  $\sigma'_{2y}$  an jeder Station ermittelt werden. Sie werden zweckmäßigerweise in Form von Polarisationsellipsen dargestellt.

### Ergebnisse

Das räumliche Verhalten und die Phase der entzerrten M2-Variation der beobachteten tellurischen Felder sind zusammen mit dem Strömungsbild der M2-Tide in der südlichen Nordsee in Abb.7 dargestellt. Die Ellipsen der tellurischen Felder sind mit Ausnahme von EFL zur Deutschen Bucht hin orientiert. Zwischen 1.4 und 2.4 Mondstunden nach dem Durchgang des Mondes durch den Greenwich-Meridian nimmt das E-Feld einen maximalen Wert an und zeigt von der Deutschen Bucht weg. Das elektrische Feld in EFL ist möglicherweise durch die exponierte Lage auf hochohmigem Untergrund (Abb.3) beeinflusst. Die maximalen Amplituden variieren zwischen 0.66 und 0.32 mV/km; sie entsprechen damit der theoretisch abgeschätzten Größenordnung der M2-Variation des elektrischen Feldes. Ein Zusammenhang mit der Entfernung zur Küste tritt jedoch nicht auf. Der Drehsinn verhält sich uneinheitlich, ist jedoch besonders bei den fast linear polarisierten Schwingungen (DEP, BUR, EPT) von untergeordneter Bedeutung.

Das zeitliche Verhalten und die Richtung der tellurischen Felder an den vier Stationen im Norddeutschen Sedimentbecken und bei DEP lassen als Ursache eine M2-periodische Stromquelle in der Deutschen Bucht vermuten, die durch die horizontale Wasserbewegung der Gezeitenströmung im vertikalen erdmagnetischen Hauptfeld entsteht. Es wurden deshalb zusätzlich



**Abb.7:** Polarisationsellipsen für die M2-Periode des beobachteten elektrischen Feldes und der Meeresgezeitenströmung nach HANSEN (1952) und SAGER (1964). Die Zahlenangaben beziehen sich auf die Zeit in Mondstunden nach Durchgang des Mondes durch die Greenwich-Meridianebene. Die Vorzeichen geben den Drehsinn der Ellipse an (Rechtsdrehung positiv). Die Verdickung des Ellipsenrandes kennzeichnet den Ort des Fahrstrahls zur zugehörigen Mondzeit, die Länge der großen Halbachse ist ein Maß für das maximale elektrische Feld bzw. die maximale mittlere Geschwindigkeit der Gezeitenströmung.

in Abb.7 Gezeitenstromellipsen aus den Arbeiten von HANSEN (1952) und SAGER (1964) eingetragen. Die gestrichelten Linien weisen auf Orte gleicher Eintrittszeit der maximalen Strömung hin, bezogen auf die Anzahl der Mondstunden nach dem  $O^{\circ}$ -Durchgang des Mondes. Nahe der Küste ist die Gezeitenströmung fast linear polarisiert und erreicht dort die größte Geschwindigkeit von fast 1 m/s. Die Abfolge der Eintrittszeiten der Strömungsmaxima weist auf eine vom Ärmelkanal in die Deutsche Bucht fortschreitende Welle hin.

Abb.8 zeigt den qualitativen Verlauf der elektrischen Stromlinien an der Erdoberfläche sowie der mittleren Meeresströmung entlang der Küste in der stationären Näherung für 2 h und 5 h nach dem  $O^{\circ}$ -Durchgang des Mondes. Das gleichzeitig gemessene elektrische Feld an den Meßstationen ist zusammen mit 68%-Vertrauensbereichen angegeben. 2 h nach dem  $O^{\circ}$ -Durchgang des Mondes liegen die Maxima der Meeresströmungen in der Deutschen Bucht und am Eingang des Ärmelkanals. Innerhalb der Fehlergrenzen passen sich die Vektoren des elektrischen Feldes mit Ausnahme von EFL gut dem Verlauf der Stromlinien an. Drei Mondstunden später ist das Geschwindigkeitsmaximum vor die holländische Küste gewandert. Die elektrischen Felder sind entsprechend klein, korrespondieren jedoch bei den westlichen Stationen in ihren Richtungen mit dem zugehörigen elektrischen Stromlinienbild.

Die gute Übereinstimmung der Richtungen von gezeiteninduzierten Strömen und gemessenen elektrischen Feldern tragen zur Annahme bei, daß die in der stationären Näherung nicht berücksichtigten induktiven Beiträge eine untergeordnete Rolle spielen. Eine quantitative Untersuchung der halbmondentägigen Variation des elektrischen Feldes in Norddeutschland ist zur Zeit noch nicht möglich; sie erfordert die genaue Kenntnis des räumlichen und zeitlichen Verhaltens der Stromquellen sowie umfangreiche Programme zur Messung des elektrischen Feldes im Landesinnern.

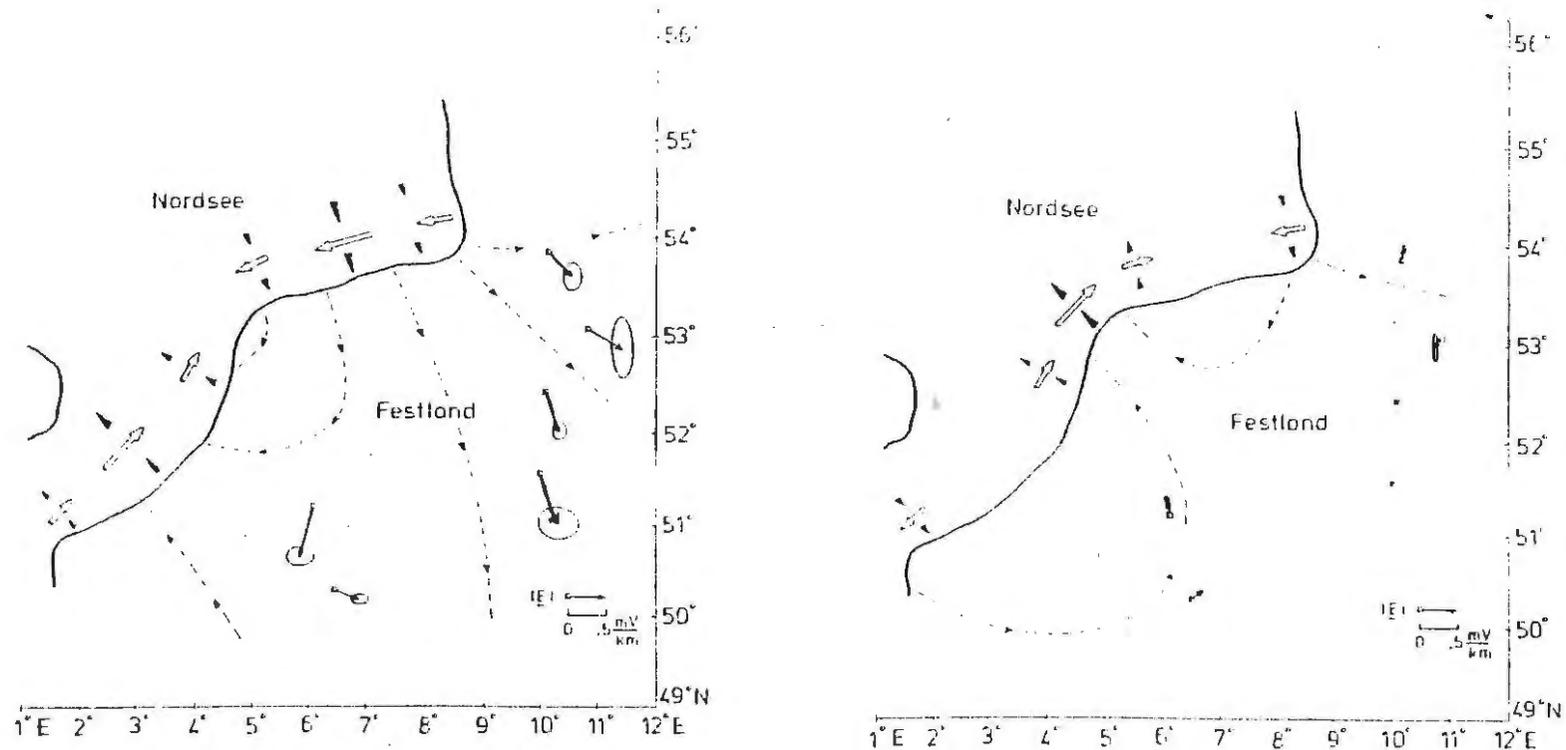


Abb.8: Linke Seite: 2 h nach  $O^{\circ}$ -Durchgang des Mondes.  
 Rechte Seite: 5 h nach  $O^{\circ}$ -Durchgang des Mondes. Qualitativer Verlauf der mittleren  
 Meeresströmung entlang der Küste (offene Pfeile) und der induzierten elektrischen  
 Ströme an der Erdoberfläche im Landesinneren (gestrichelte Linien). In der Nord-  
 see markiert die Größe der Pfeilspitzen in etwa den Betrag der elektrischen Strom-  
 dichte im Meerwasser, der proportional zur Wassergeschwindigkeit gesetzt wurde.  
 Die Pfeile auf dem Festland an den Meßstationen beschreiben Betrag und Richtung  
 des beobachteten elektrischen Feldes mit 68%-Verteausbereich.

Literatur

- Chapman, S. and J.C.P. Miller: The statistical determination of lunar daily variations in Geomagnetic and meteorological elements. Mon. Not. R. Ast. Soc., geophys. suppl. 4, 649-669, 1940
- Faraday, M.: Experimental Researches in Electricity - Bakerian Lectures. Phil. Trans. Roy. Soc., London, 1832
- Hansen, W.: Gezeiten und Gezeitenströme der halbtägigen Hauptmond tide M2 in der Nordsee. Dtsche. Hydrogr. Z., Ergänzungsheft 1, 1952
- Hempfling, R.: Beobachtung und Auswertung tagesperiodischer Variationen des erdelektrischen Feldes in der Umgebung von Göttingen. Diss. math.-nat. Fak. Univ. Göttingen, 1977
- Junge-Tiersch, A.: Zur Messung und Deutung der halbmondentägigen Variation in Nord- und Westdeutschland. Diss. Math.-Nat. Fachb., Univ. Göttingen, 1986
- Longuet-Higgins, M.S.: The electrical and magnetic effects of tidal streams. Mon. Not. Roy. Astr. Soc., geophys. Suppl. 5, 285-307, 1949
- Sager, G.: Das Regime der Gezeiten und der Gezeitenströme in der Nordsee, dem Kanal und der Irischen See, Teil II. Habil. math.-nat. Fak. Univ. Leipzig, 1964
- Schmucker, U.: Depth distribution of the electrical conductivity. In: Landolt-Börnstein, New Series, 5/2b, 2.3.1 Springer-Verlag Berlin-Heidelberg, 1985