

Rückstreuungen ultrakurzer Wellen an Feldlinien-orientierten Irregularitäten

von Dipl. Phys. Volker Grassmann, DF5AI, Hannoversche Str. 103, D-3400 Göttingen-Weende

1. EINLEITUNG

Den Funkamateuren steht mit dem 2m-Band ein außergewöhnlicher Frequenzbereich zur Verfügung, denn kein Amateurband (ausgenommen das 6m-Band) ermöglicht eine so große Vielfalt an unterschiedlichen Ausbreitungsmechanismen (Tropo, MS, Aurora, EME, TEP, FAI, Satellitenfunk etc.). Zusätzlich kann der Amateurfunkdienst ein dichtes Netz von Beobachtungsstationen aufweisen, so daß z.B. kaum noch eine Aurora-Öffnung (zumindest in Europa) unbeobachtet bleibt. Diese Möglichkeiten erweckten auch das Interesse der Wissenschaft an Amateurfunkbeobachtungen. Noch heute erinnern die 2m-Baken DL0PR, OZ7IGY (International Geophysical Year) und SK4MPI (Max Planck Institut) an die damalige fruchtbare Zusammenarbeit. Zwar wird die Beobachtung der Wellenausbreitung an Hand von Bakensendern durch die disziplinlose Verletzung der durch die IARU empfohlenen Banderteilungen erschwert, dennoch wird die Untersuchung der Radiowellenausbreitung durch die Funkamateure fortgesetzt (siehe z.B. den 'FAI-Report 1986' von DL4MEA und DL5MCG in DUBUS 2/87). Dieser Aufsatz rekapituliert die wesentlichen Merkmale der Streuenausbreitung an Irregularitäten in der ionosphärischen Elektronendichteverteilung. Zunächst wird die Rückstreuung ultrakurzer Wellen an Polarlichtern behandelt, anschließend wird die Anwendbarkeit der Ergebnisse für sogenannte FAI-Funkverbindungen beleuchtet.

2. ZUM PHÄNOMEN DES POLARLICHTS

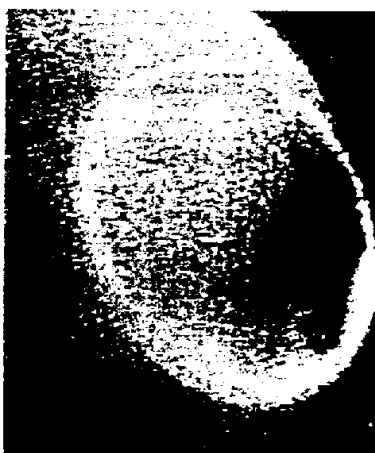


Abb. 1: Satellitenaufnahme des Polarlichtovals, aus [7].

Die folgenden Angaben können die Zusammenhänge beim Auftreten eines Polarlichts oder einer Radio-Aurora nur grob skizzieren. Interessierte Leser finden in der angegebenen Literatur weit erschöpfendere Auskunft, [1]. Das Polarlicht steht im Zusammenhang mit dem Einfall hochenergetischer Elektronen, die entlang der erdmagnetischen Feldlinien in die Atmosphäre eindringen. Die Gestalt des erdmagnetischen Feldes begünstigt das Auftreten von Polarlichtern in zwei ovalen, ringförmigen Regionen (Polarlichtovalen), die asymmetrisch um die geomagnetischen Pole auf der Nord- und Südhemisphäre liegen und unter denen sich die Erde sozusagen hinwegdreht. Abb.1 zeigt das vom VIKING-Satelliten aus 9600km Höhe im UV-Licht aufgenommene "Aufflammen" einer Aurora im Bereich des Polarlichtovals der Nordhemisphäre [7]. Bisweilen kann sich das Polarlicht zu niedrigeren Breiten ausdehnen, so daß die aktive Aurora schließlich in den Beobachtungsbereich unserer Antennen gelangt oder gar optisch beobachtet werden kann.

3. RÜCKSTREUUNG VON RADIOWELLEN

Neben der optisch beobachtbaren Aurora hat der Elektroneneinfall entlang der Feldlinien eine Reihe weiterer Konsequenzen für den Zustand der betroffenen Atmosphärenregion. Als Funkamateure interessieren wir uns besonders für die möglicherweise entstehenden feldlinienorientierten Irregularitäten in der Elektronendichteverteilung, die unter gewissen Voraussetzungen Radiowellen effizient rückstreuen können (Radio-Aurora). Der Begriff "feldlinienorientierte Irregularität (FAI)" ist zunächst sehr unpräzise. Wir werden annehmen, daß die Dielektrizitätszahl im gesamten von der Antenne ausgeleuchteten Streuvolumen einen einheitlichen Mittelwert

annimmt - kleine örtliche Schwankungen aber die Homogenität stören. Diese seien mit ellipsoid- oder säulenförmigen Strukturen parallel zu den erdmagnetischen Feldlinien identifiziert. Man beachte dabei, daß die ungeladenen Bestandteile der Atmosphäre nicht mit dem erdmagnetischen Feld wechselwirken können, so daß die "Irregularität" im Ionen- bzw. Elektronengas zu lokalisieren ist (Stoßprozesse vernachlässigt). Dies ist der Ansatz des BOOKER'schen Rückstreumodells - der daraus resultierende Rückstreuquerschnitt wird u.a. in [2] angegeben und diskutiert. Der Streuquerschnitt enthält neben anderen Abhängigkeiten einen Geometriefaktor, der anzeigt, daß zum Zustandekommen einer Aurora-Funkverbindung neben physikalischen auch bestimmte geometrische Voraussetzungen erfüllt sein müssen. Das erahnen wir auch schon aus unserer Funkpraxis, denn bei einer Aurora-Öffnung sind ja stets nur bestimmte Regionen erreichbar. Betrachten wir zunächst den monostatischen Radarfall, bei dem Sende- und Empfangsort zusammenfallen, um uns anschließend den für Funkamateure interessanteren bistatischen Radarfall (Sende und Empfangsort verschieden) zuzuwenden.

Monostatischer Radarfall

Abb.2 zeigt die für den monostatischen Radarfall einzuhaltenen geometrischen Bedingungen. Die Verbindungslinie zwischen Sender/Empfänger und rückstreuendem Volumen muß senkrecht auf der erdmagnetischen Feldlinie stehen, die das Streuvolumen durchsetzt (m.a.W. das Skalarprodukt vom Radarwellenvektor und magnetischem Feldvektor ist Null: $\underline{k}_{TX} * B = 0$, $\underline{k}_{TX} = -\underline{k}_{RX}$). Da die Rückstreuung an Polarlichtern typischerweise in 110km Höhe erfolgt, können wir

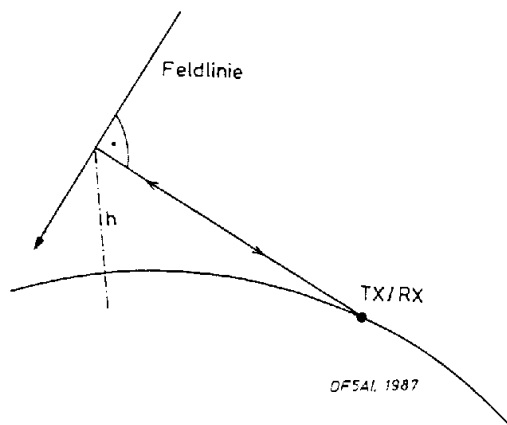


Abb.2: Monostatischer Radarfall

gleichzeitig erfüllt (gestrichelte Linie)! Damit hätten wir schon den bistatischen Radarfall, also unterschiedliche Sende und Empfangsstandorte, vorliegen. Die oben erläuterte Radarbedingung ist für den bistatischen Fall zwar hinreichend, (glücklicherweise) aber nicht notwendig. Denn sonst könnten wir die 90° -Kurven für unseren persönlichen Standort im voraus ermitteln und abwarten, daß entlang der gefundenen Ortskurven eine Aurora eintritt. Die "Ausbeute" wäre gering.

Bistatischer Radarfall

In Wirklichkeit ist der monostatische Radarfall ein Spezialfall der in Abb.4 skizzierten allgemeineren Bedingung. Betrachten wir erneut die Verbindungslinien zwischen Streuvolumen/Sender und Streuvolumen/Empfänger. Beide Verbindungslinien fallen nun nicht mehr zusammen, besitzen aber einen Schnittpunkt am Ort des Streuvolumens in z.B. 110km Höhe. Wie in der Abbildung angedeutet, läßt sich ein sogenannter Streukegel definieren, wenn man die dritte Raumkoordinate beim vorliegenden Problem berücksichtigt. Dazu verlängert man die Verbindungslinie vom Sender über das Streuzentrum hinaus und läßt diesen neu geschaffenen Streckenabschnitt unter Beibehaltung des gemeinsam sichtbaren Punkt in z.B. 110km Höhe anvisieren,

Kegel dieser Art immer definiert werden können! Die Bedingung für die Rückstreuung an Polarlichtern verlangt daher zusätzlich, daß die Kegelachse parallel zur erdmagnetischen Feldlinie (am Ort des rückstreuenden Volumens) verläuft (d.h. $(\vec{k}_{TX} - \vec{k}_{RX}) \parallel \vec{B} = 0$). Alle weiteren geographischen Positionen, die sich auf der Schnittlinie zwischen Kegelmantel und Erdoberfläche befinden, sind vom Sendestandort aus ebenfalls erreichbar.

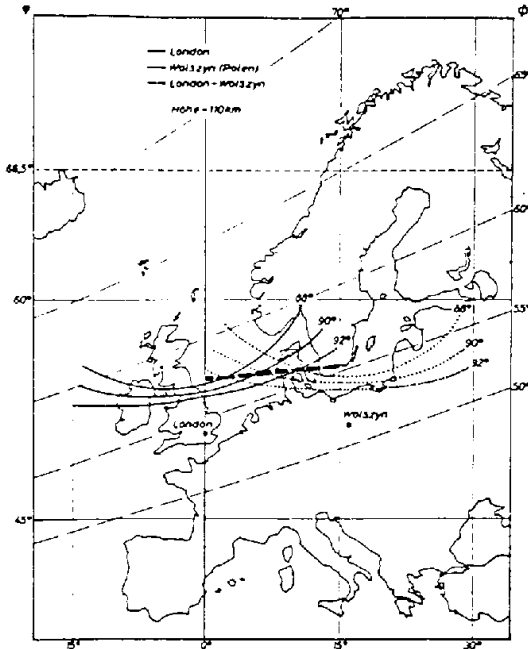


Abb. 3: Ortskurven für London und Wolszyn. Die 90° - Kurven kennzeichnen einen senkrechten Aufblick vom jeweiligen Standort zu den erdmagnetischen Feldlinien in 110 km Höhe, aus [2].

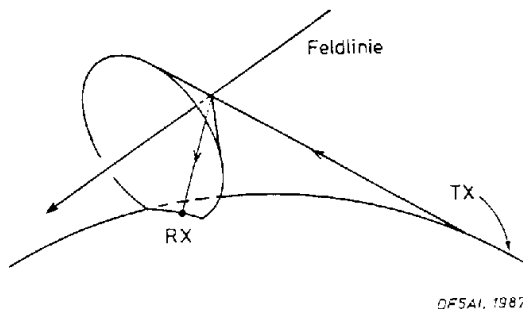


Abb.4: Bistatischer Radarfall. Der vom Sender und Empfänger aufgespannte Streukegel besitzt die lokale erdmagnetische Feldlinie am Streuzentrum als Kegelachse.

Da die Antennenkeule der sendenden Station stets ein großes Gebiet überstreicht, muß an jedem der innerhalb des "Antennenfächers" befindlichen Orte (in z.B. 110km Höhe) ein neuer Rückstreukegel konstruiert werden - vorausgesetzt, daß an dem jeweiligen Ort auch gleichzeitig ein Aurora-Ereignis anzutreffen ist. Aus der Kurvenschar aller so gefundenen Schnittlinien (der jeweiligen Streukegel mit der Erdoberfläche) entsteht dann ein mehr oder weniger zusammenhängendes Gebiet, daß alle momentan über die Aurora erreichbaren Gegenstationen einfaßt. Dieses Gebiet ist für die jeweilige Sendestation spezifisch. Natürlich kann auch jeder der möglichen Empfänger die Rolle eines Senders einnehmen. Man beachte aber an Hand der Abb.4, daß vertauschte Rollen zwischen Sender und Empfänger einen anderen als den gezeigten Streukegel beinhalten - nämlich den an der Feldlinie punktsymmetrisch gespiegelten Kegel.

4. ZUSAMMENFASSUNG

Eine Aurora-Funkverbindung kann zustandekommen, wenn folgende Voraussetzungen erfüllt sind:

1. Sende- und Empfangsantenne beleuchten ein gemeinsames Volumen, in dem die physikalischen Bedingungen (geeignete Wellenlänge, ausreichende Störung der Homogenität usw.)

für den Rückstreuprozeß gegeben sind.

- Die Sichtlinien von Sender und Empfänger schließen mit der erdmagnetischen Feldlinie am Streuort den gleichen Winkel ein.

5. PRAKTISCHE ANWENDUNG

Die soeben mitgeteilten Ergebnisse wurden bei der Erstellung eines Aurora-Echtzeit-Computerprogramms berücksichtigt. Es wurde für ein Atari-ST-System mit mindestens 1 Megabyte Speicherkapazität und monochromen Monitor entwickelt. Die Funktionsweise ist wie folgt: während einer Aurora speist der Benutzer die QTH- Kenner der von ihm gehörten Stationen ein. Das Programm verwertet diese Angaben und berechnet ein momentanes Bild der Aurora- Öffnung. Rückstreugebiete können identifiziert und auf einer Landkarte dargestellt werden, bestimmte Streuzonen können zur Ausgabe der Antennenrichtung (Azimut und Elevation) "mit der Maus angeklickt werden". Ferner besteht die Möglichkeit, die momentan über die Aurora erreichbaren Großfelder besonders zu kennzeichnen. Falls mit einer bestimmten Gegenstation ein QSO getätigt werden soll, kann sich der Benutzer Vorschläge für die optimale Antennenrichtung ausgeben lassen. Selbstverständlich kann auch eine bereits zurückliegende Aurora-Öffnung nachträglich analysiert werden. Um dem Leser eine bessere Vergleichsmöglichkeit zu gewähren, sei dies an Hand der in [3] veröffentlichten Beobachtungen von DK3UZ verdeutlicht. Die Daten vom 8.Feb.1986, 2201 bis 2350 UTC, wurden vor allem auf Grund der gleichzeitig mitgeteilten Antennenrichtungen ausgewählt. Mit einem (dreistündigen) Kp-Index von 9- ([4]) handelte es sich übrigens um eine besonders intensive geomagnetische Störung.

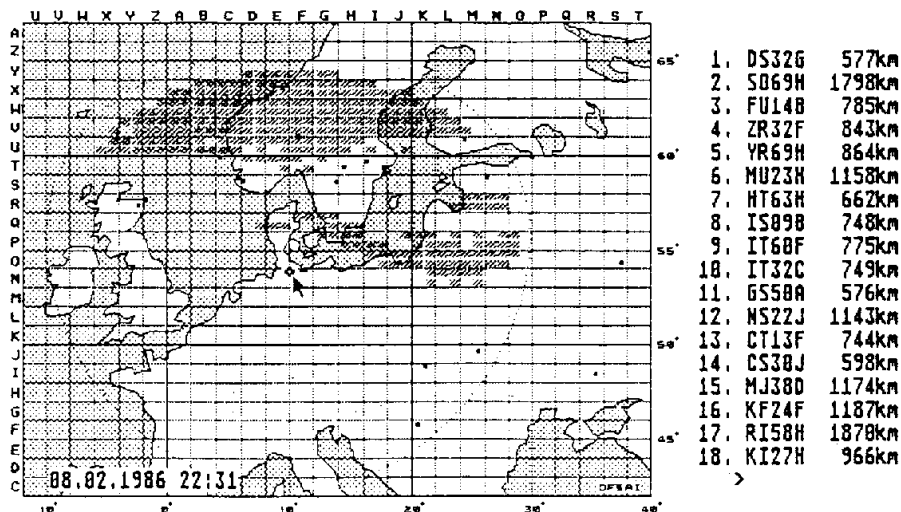


Abb.5a: Aurora-Beobachtungen von DK3UZ vom 8.Feb.1986. Die schraffierten Kästchen kennzeichnen alle zu den 18 Funkverbindungen gehörigen möglichen Rückstreuorte (110km Höhe). Die eingetragene Uhrzeit ist willkürlich.

Abb.5a zeigt neben den Standorten der 18 Gegenstationen (Bezugsort ist das mit einem Kreuz gekennzeichnete QTH-Kenner-Feld EN20c) auch alle Orte in 110km Höhe, an denen die ideale Rückstreubedingung für die jeweiligen QSOs erfüllt war (schraffierte Quadrate). Man erkennt zunächst ein kompaktes Gebilde über Skandinavien - es bezeichnet die möglichen Streuzonen zu den ersten 14 Funkverbindungen. Die Rückstreuzonen im Osten der Bezugsstation sind zu den nach Ost- und Südost- Europa getätigten QSOs zugehörig. Die weitere Aufgabe besteht nun darin, aus den möglichen Rückstreuzonen jene zu selektieren, die tatsächlich die aktive Aurora beherbergt haben. Das Programm liefert hierzu weitere Hilfestellungen, z.B.: bei der Auswertung einer gegebenen Funkverbindung bestimmt das Programm zunächst alle potentiellen Rückstreugebiete. Es besteht nun die Möglichkeit, daß mit Eingabe der nachfolgenden Verbindungen (in Form des QTH-Kenners) bestimmte Zonen erneut ermittelt werden, m.a.W.: man

könnte für jede der angezeigten Funkverbindungen eine getrennte Landkarte mit den zugehörigen möglichen Rückstreuzonen anfertigen - man würde aber feststellen, daß einige der Karten trotz unterschiedlicher Ausgangsdaten in bestimmten Rückstreuzonen übereinstimmen. Diese Schnittgebiete können gesondert zur Anzeige gebracht werden, denn sie besitzen eine erhöhte Wahrscheinlichkeit, die Aurora tatsächlich zu enthalten. So sind in Abb.5b nur die Rückstreuzonen eingezeichnet, die mindestens zweimal ermittelt wurden.

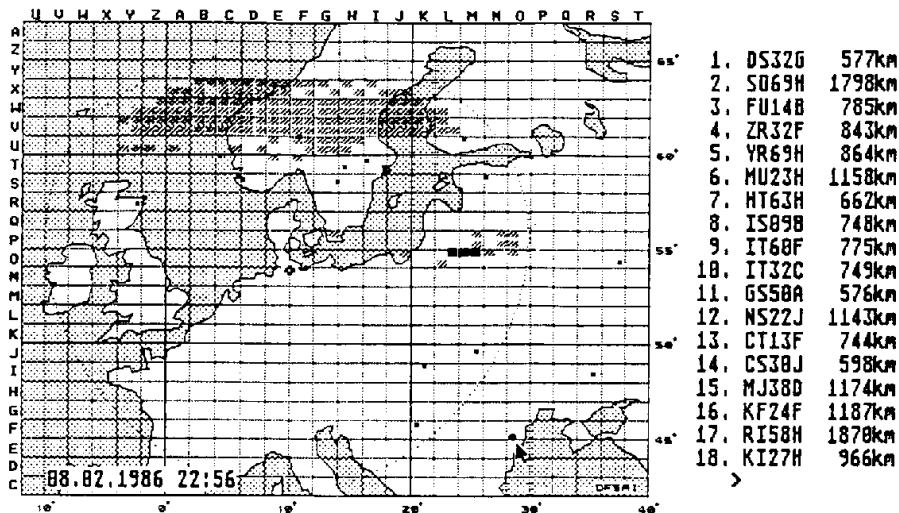


Abb.5b: wie Abb.5a, jedoch sind nur mindestens doppelt ermittelte Rückstreuzonen dargestellt (siehe Text).

Vor allem wird das oben erwähnte östliche Gebiet verdünnt und es entsteht eine sehr gute Übereinstimmung mit der von Eddi (DK3UZ) angegebenen Antennenrichtung von 80°, [3]. Vielleicht hätte der Wunsch bestanden, während der Aurora-Öffnung das Großfeld OF zu arbeiten (siehe Markierung). Die drei schwarzen Quadrate zeigen an, daß ein Teil der gesamten Rückstreuregion die Möglichkeit hierfür gegeben hätte! Mit dem Maus-Cursor (Pfeil) kann das gekennzeichnete Gebiet angewählt werden, das Programm teilt dem Benutzer dann die einzustellenden Azimut- und Elevationswerte mit.

6. ANWENDUNG FÜR FAI-AUSBREITUNG

Als Funkamateure unterscheiden wir zwischen "Aurora"- und "FAI"-Ausbreitung. Diese sprachliche Trennung scheint gerechtfertigt, wenn man die Entstehungsgeschichte des jeweiligen Phänomens beachtet. Die geo- und plasmaphysikalischen Abläufe sind für uns jedoch nicht beeinflussbar, unser Interesse konzentriert sich daher mehr auf die funktechnische Anwendung dieser natürlichen Erscheinungen. Man könnte ebensogut von "Auroral-FAI" und "Mid latitude-FAI" sprechen, die oben mitgeteilten Ergebnisse sind für beide Rückstreuprozesse gleichermaßen gültig. Der übliche Sprachgebrauch im Amateurfunk wird aber im folgenden beibehalten. Obwohl die Konstruktion der Rückstreukegel für Aurora und FAI in gleicher Weise zu erfolgen hat, ergeben sich doch etwas unterschiedliche Ergebnisse, die mit den Eigenschaften des erdmagnetischen Feldes in Verbindung stehen. In nördlicheren Breiten ist die Inklination (der Winkel zwischen örtlicher Feldlinie und örtlicher Horizontalen - die "Steilheit" der Feldlinien) größer als in mittleren Breiten. Das bedeutet für Aurora, daß die Öffnung des Streukegels stärker zum Erdboden geneigt ist als bei FAI. Jeder Funkamateur kennt die für seinen Standort charakteristische nördlichste QTH-Kenner-Reihe, die er noch nie während einer Aurora-Öffnung erreichen konnte. Bei immer weiter nördlich gelegeneren Streukegeln nähert sich der Blickwinkel zu den steiler verlaufenden Feldlinien schließlich einem rechten Winkel - gleichzeitig öffnet sich der Streukegel zunehmend. Man vergegenwärtige sich an Hand der Abb.4, daß sich die Schnittlinie zwischen Kegelmantel und Erdoberfläche bei immer steilerem Feldlinienverlauf in Richtung zum Sender bewegt - aus einer "Forward Scatter"-Geometrie entsteht allmählich eine "Back-Scatter"-Geometrie.

7. DISKUSSION EINES BEISPIELS

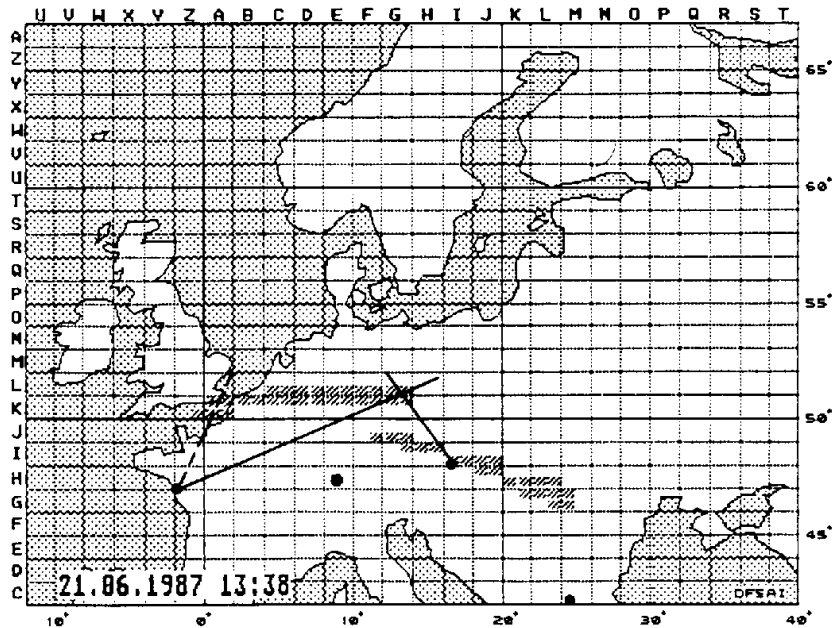


Abb.6a: Mögliche Rückstreuozonen für Funkverbindungen zwischen den Großfeldern ZH-II und EH-MC. Zum Zustandekommen einer Verbindung müssen Sende- und Empfangsantenne ein gemeinsames Rückstreuivolumen ausleuchten.

Abb.6a zeigt die möglichen Rückstreuozonen für FAI-Funkverbindungen zwischen den Großfeldern ZH und II (horizontales Rückstreugebiet, von AK bis GL/GK) und den Großfeldern EH und MC (geneigte Region, von FJ bis MG). Wenn also ein FAI- (oder Aurora-) Ereignis über dem GL/GK-Feld zu verzeichnen ist, kann eine Verbindung zwischen ZH und II ebenso zustande kommen wie bei einer aktiven Rückstreuregion über AK! Freilich haben beide Stationen dann ver-

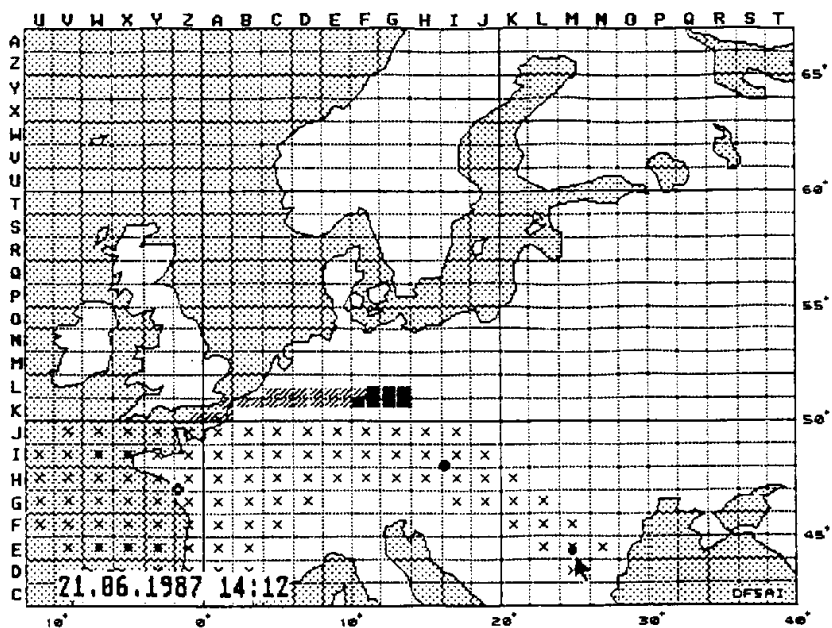


Abb.6b: Von ZH und II erreichbare Großfelder bei voll- ständig aktiver Region und gegenseitiger Hörbarkeit.

änderte Antennenrichtungen zu berücksichtigen. Es ist aber unbedingt zu beachten, daß ein "Auspeilen" der optimalsten Feldstärke nur durch einen Beobachter keine absolute Festlegung der aktiven Region ermöglicht! Nehmen wir an Hand der Abb.6a an, daß das gesamte Gebiet von AK bis GL eine Rückstreuung ermöglicht und daß beide Antennen anfänglich zum rechten Ende (GL/GK) ausgerichtet sind. Dreht die Station in ZH nun die Antenne gen Rückstreuzone bei AK, kommt keine Verbindung zwischen ZH und II mehr zustande, da die Antennen nun kein gemeinsames Rückstrevolumen beleuchten (von II wird weiterhin GL anvisiert)! Der in ZH beheimatete Funker könnte nun die falsche Schlußfolgerung ziehen, daß die Rückstreuzone über AK inaktiv ist, also keine Ausbreitung ermöglicht. Ferner ist bei einem Auspeilen zu beachten, daß unsere Amateurantennen i.a. recht breite Hauptkeulen besitzen (30° Öffnungswinkel ist noch ein ansehnlicher Teil des Vollkreises) und daher nur ein geringes Auflösungsvermögen aufzuweisen haben. Abb.6b kennzeichnet alle Großfelder, die bei geeigneter Antennenrichtung und vollständig aktiver Region (von AK bis GL) von den Großfeldern ZH und II erreichbar wären. Man beachte aber, daß die angezeigte Rückstreuregion unter der Nebenbedingung gefunden wurde, daß eine gegenseitige Hörbarkeit zwischen ZH und II besteht. Die schwarz ausgelegten Zonen kennzeichnen den Bereich, der von ZH für ein QSO nach ME anzupeilen wäre. Dies Beispiel sollte verdeutlichen, daß bei der Planung einer Funkverbindung zwischen zwei festgelegten Standorten stets mehrere mögliche "Scatter-Punkte" in Frage kommen. Ferner gibt die Geophysik bis heute keine Hinweise dafür, daß bestimmte Orte in der E-Region eine Ausbildung von FAI begünstigen. Es dürfte allgemein anerkannt sein, daß eine Identifizierung von ausgezeichneten "Aurora-Punkten" nicht möglich ist - ebensowenig sind bevorzugte "FAI-Scatterer" zu erwarten. Der Eindruck, daß bestimmte Gebiete eine höhere FAI-Häufigkeit hervorbringen, ist mit großer Wahrscheinlichkeit eine Täuschung, womit nicht aus geschlossen wird, daß eine bestimmte Ortszeit-Abhängigkeit oder (geomagnetische) Breitenabhängigkeit besteht.

8. ZUR KONTURLINIEN-METHODE

Die gebräuchlichste Auswerte- und Planungsmethode für FAI dürfte die von Thomas, K4GFG, erläuterte Konturlinien-Methode darstellen, [5], [6]. Hierbei werden die Schnittlinien zwischen Erdoberfläche und Rückstreukegel für unterschiedliche Kegelöffnungen auf Landkarten eingetragen. Die Richtigkeit dieser Methode ist unbestritten und stellt wohl auch die einzige praktikable Methode dar, wenn eine weitergehende Rechnerunterstützung nicht gegeben ist. Der Nachteil hierbei ist aber, daß die Position eines Rückstreupunktes (dem entspricht ein kleines Kästchen auf den früheren Abbildungen) im voraus erraten werden muß. Falls sich die Anwender dieses Verfahrens bewußt oder unbewußt stets auf vergleichbare Bezugsorte einigen (z.B. durch Veröffentlichung angeblicher "heißer Punkte"), wird die Ausbeute an FAI-QSOs zwar steigen, möglicherweise bleiben aber viele "FAI- Öffnungen" in andere Richtungen unentdeckt. Für eine erfolgreiche Funkverbindung müssen sich beide Stationen auf eine Frequenz einigen - sie müssen aber auch ein gemeinsames Rückstrevolumen für ihre Antennen sicherstellen. Bei Aurora-Öffnungen kommen die Funkverbindungen i.a. zufällig zustande. Hingegen hat man sich bei Meteor-Scatter durch Absprache auf eine Frequenz geeinigt. Bei FAI scheint man sich auf irgendeine Weise auf bevorzugte Rückstrevolumina geeinigt zu haben, dadurch kommen (wie bei MS) QSOs leichter zustande. Das hat vielleicht "historische Gründe" : die ersten europäischen Funkamateure, die sich an FAI versuchen wollten, mußten sich eine geeignete Rückstreuregion "aussuchen", da es sich um verabredete Versuche handelte. Nach dem Erfolg wurden andere Funkamateure aufmerksam und schlossen sich der Auswahl an. Weitere Funkverbindungen wurden möglich und ein "Scatter-Point" war gefunden! Meines Wissens wurden z.B. in den USA keine ausgezeichneten "Scatterer" identifiziert, zumindest gibt der Aufsatz von Thomas (K4GFG) keine Hinweise in diese Richtung [5].

9. BEMERKUNGEN ZUM VORGESTELLTEN PROGRAMM

Da das hier vorgestellte Programm noch nicht vollständig fertiggestellt ist, ergeht die dringende Bitte, von möglichen Anfragen z.Z. noch abzusehen. Die Verfügbarkeit wird zu einem späteren Zeitpunkt angekündigt. Bei Bedarf kann auch die in GfA- BASIC (Vers.2.0) formulierte Unterroutine zur Berechnung des erdmagnetischen Feldes zur Verfügung gestellt werden. Die Routine beinhaltet eine Kugelfunktionsentwicklung des erdmagnetischen Innenfeldes und be-

rücksichtigt die Säkularvariation (zeitliche Änderung des Feldes). Es können beliebige geographische Positionen am Erdboden oder in der Atmosphäre eingegeben werden, zu denen dann der Feldvektor ermittelt wird. An dieser Stelle möchte ich mich bei Herrn Dr. K.Schlegel, Max Planck Institut für Aeronomie, für das zur Verfügung gestellte FORTRAN-Programm zur Berechnung des Internationalen Geomagnetischen Referenzfeldes (IGRF) bedanken. Ferner danke ich Herrn Dr. P.Czechowsky, Max Planck Institut für Aeronomie, für die interessanten Anregungen und Diskussionen. Das hier vorgestellte Computer-Programm wurde durch seine in [2] angegebenen Untersuchungen angeregt.

10. LITERATURHINWEISE

- [1] Einführung in die Geophysik, W.Kertz BI Hochschultaschenbücher, Bd.275, 535
- [2] Analyse von Rückstreubeobachtungen ultrakurzer Wellen an Polarlichtern, P.Czechowsky Diplomarbeit, Max Planck Inst. f. Aeronomie, Lindau/Harz,1966
- [3] Aurora News, DUBUS 3/86
- [4] Solar-Geophysical Data, Prompt reports No.500, Part 1, April 1986 National Geophysical Data Center, Boulder/Colorado
- [5] Ionospheric Scatter by Field-Aligned Irregularities at 144MHz T.F.Kneisel, K4GFG, QST, Januar 1982
- [6] Private Mitteilung, T.F.Kneisel, K4GFG, Mai 1982
- [7] A new method to derive "instantaneous" high-latitude potential distributions from satellite measurements including auroral imager data, G.T.Marklund, L.G.Blomberg Geophys.Res.Lett. Vol.14, No.4, 439-442, April 1987