

ÄNDERUNGEN DER IONISATION DER HÖCHSTEN ATMOSPÄRENSCHICHTEN WÄHREND DER NORDLICHTER UND ERDMAGNETISCHEN STÖRUNGEN

VON
LEIV HARANG

(Manuskript am 5. Mai empfangen.)

A. DIE AUSBREITUNG DER RADIOWELLEN IN EINER IONISIERTEN SCHICHT.

1. Einleitung.

Der Gedanke, dass die höchsten Atmosphärenschichten eine hohe elektrische Leitfähigkeit besitzen, wurde schon 1882 von Balfour Stewart als Vorstellung, die seiner Dynamo-Theorie der täglichen Variation des erdmagnetischen Feldes zu Grunde liegt, ausgesprochen.

Die Dynamo-Theorie wurde später von Schuster und Chapman zu einer Theorie ausgearbeitet, die die Einzelheiten der täglichen Variation zu erklären versuchte. Durch Annahmen über Höhen und Grösse der leitenden Schichten, Geschwindigkeit der horizontalen Bewegungen sowie gegenseitige Wirkung der im Erdinnern hervorgebrachten induzierten Ströme, konnte eine weitgehende Übereinstimmung mit der Verteilung der täglichen Variation auf der Erde bestätigt werden, — insbesondere sind die schönen Untersuchungen von Chapman und Bartels über den lunaren Gang hervorzuheben.

Die aus den Studien des täglichen Ganges gewonnenen quantitativen Vorstellungen über den elektrischen Zustand der höchsten Atmosphärenschichten sind jedoch etwas unbestimmt, indem man zur Berechnung des täglichen Ganges sämtliche oben erwähnten Faktoren in Rechnung nehmen muss, von denen wenigstens die Windgeschwindigkeit und die Grösse der gegenseitigen Induktion sehr unsicher sind.

Eine neue Quelle zur Erforschung der Leitfähigkeit der höchsten Atmosphärenschichten eröffnete die Anwendung der elektrischen Wellen. Die grosse Reichweite der elektrischen Wellen führte Kennelly und Heaviside zu der Annahme, dass die

Leitfähigkeit der höchsten Atmosphärenschichten bei der Ausbreitung der Wellen beteiligt sei. Gewöhnlich stellte man sich vor, dass die elektrischen Wellen zwischen den atmosphärischen Schichten hoher Leitfähigkeit und der Erdoberfläche mehrmals reflektiert würden und sich die Wellen in dieser Weise in zweidimensionaler Divergenz ausbreiteten.

Die genauere Vorstellung von der Ausbreitung der Radiowellen in einem ionisierten Gas hoher Leitfähigkeit wurde von Eccles entwickelt,¹⁾ indem er die Formeln der Lorentz'schen Dispersionstheorie auf das Problem anwandte. Er konnte zeigen, dass die Annahme von freien Elektronen oder Ionen den Brechungsindex kleiner als 1 macht. In einer Schicht mit zunehmender Ionisation in vertikaler Richtung wird deshalb die Wellenfront gegen die Erde gebrochen in ähnlicher Weise wie die Lichtstrahlen bei Luftspiegelungen oder die Schallwellen in einer Atmosphäre mit nach oben zunehmender Temperatur.

Die Änderungen der Normale der Wellenfront in einer ionisierten Atmosphäre ist durch den Brechungsindex in jedem Punkte gegeben. Nach Hartree²⁾ ist dieser, aus der Lorentz'schen Theorie unter der Annahme von *freien* Ladungsträgern berechnet, durch folgenden Ausdruck gegeben:

$$\mu^2 = 1 - \frac{4\pi N e^2}{m p^2 + \frac{4}{3}\pi N e^2} \quad (1)$$

hier sind N die Anzahl der elektrischen Träger pro cm^3 , e und m ihre Ladung und Masse und p die anguläre Frequenz der Radiowellen.

¹⁾ Proc. Roy. Soc. (A) 87, 1912, 79

²⁾ Proc. Camb. Phil. Soc. 27, 1930, 143.

2. Die Brechung der Radiowellen in einer ionisierten Schicht.

Nehmen wir an, dass die Radiowellen in eine Schicht mit zunehmender Dichte der Ionisation einfallen, so ist der Strahlengang in jedem Punkte durch die Gleichung

$$\mu_1 \sin \varphi_1 = \mu_2 \sin \varphi_2 \quad (2)$$

gegeben.

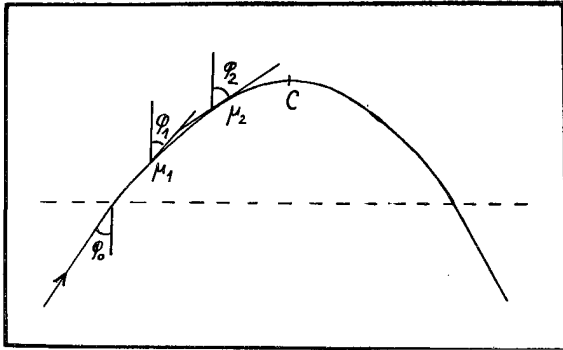


Fig. 1.

Im Umkehrpunkte C , hat man

$$\mu_1 \sin \varphi_0 = \mu_c \quad (3)$$

und nehmen wir an, dass die Wellen in vertikaler Richtung einfallen, ($\varphi_0 = 0$) hat man im Umkehrpunkte

$$\mu_c = 0 \quad (4)$$

Aus der Formel für den Brechungsindex (1) bekommt man bei senkrechtem Einfall für die Ladungsdichte im Umkehrpunkte folgenden Ausdruck

$$N = \frac{3}{8} \frac{mp^2}{\pi e^2} \quad (5)$$

Nehmen wir an, dass die elektrischen Träger freie Elektronen sind, was später dargelegt werden soll, so bekommt man folgenden numerischen Wert

$$N = \frac{3}{2} \frac{\pi m}{e^2} \cdot f^2 = 1.867 \cdot 10^{-8} \cdot f^2 \text{ Elektronen/cm}^3 \quad (6)$$

hier ist die anguläre Frequenz $p = 2\pi f$, wo f die Frequenz der Radiowellen in Hz (Herz) ist.

3. Die Brechung der Radiowellen in einer ionisierten Schicht unter dem Einfluss des erdmagnetischen Feldes.

In Jahre 1925 zeigte Appleton¹⁾ und gleichzeitig Nichols und Schelling²⁾, dass das erdmag-

¹⁾ Proc. Phys. Soc. 37, 1925, 22.

²⁾ Bell System Technical Journal, 4, 1925, 215.

netische Feld einen merklichen Einfluss auf die Fortpflanzung der Radiowellen ausüben muss, indem die Gyrofrequenz der freien Elektronen, die von dem erdmagnetischen Felde, H , durch die Formel $p_H = He/mc$ bestimmt ist, von derselben Grössenordnung ist wie die Frequenz der Radiowellen.

Eine vollständige Theorie der Ausbreitung auf der Lorentzischen Dispersionstheorie fussend wurde von Appleton gegeben. Die Ausbreitung der Radiowellen ist in der Theorie von Appleton¹⁾ vollständig durch zwei Gleichungen gegeben, die die Brechung und die Polarisation der Wellen angeben.

In einem ionisierten Gas mit freien Elektronen ist der komplexe Brechungsindex, der die Richtung der Fortpflanzung der Strahlen und die Absorption derselben angibt, durch folgenden Ausdruck gegeben:

$$c^2 q^2 = \left(\mu - \frac{ikc}{p} \right)^2 = \quad (7)$$

$$1 + \frac{2}{2(a + i\beta) - \frac{\gamma_T^2}{1 + a + i\beta} \pm \sqrt{\frac{\gamma_T^4}{(1 + a + i\beta)^2} + 4\gamma_L^2}}$$

Hier ist

$$a = -\frac{mp^2}{4\pi Ne^2} - \frac{1}{3}$$

$$\beta = \frac{mp\nu}{4\pi Ne^2}$$

$$\gamma_L = \frac{mp(H_L e/mc)}{4\pi Ne^2}$$

$$\gamma_T = \frac{mp(H_T e/mc)}{4\pi Ne^2}$$

c ist die Lichtgeschwindigkeit, e und m die Ladung und Masse des Elektrons, N die Ladungsdichte,

$\nu = \frac{1}{\tau}$ die Kollisionsfrequenz der Elektronen, d. h.

τ ist die mittlere Zeit zwischen zwei Kollisionen von einem Elektron mit zwei Gasmolekülen, H_L und H_T sind die Komponenten des erdmagnetischen Feldes parallel und senkrecht zur Fortpflanzungsrichtung der Wellen, p ist die anguläre Frequenz der Wellen durch $p = 2\pi f$ gegeben, wo f die Frequenz der Wellen in Hz ist, $i = \sqrt{-1}$ und k der Absorptionskoeffizient.

Die zwei Werte des Brechungsindex gemäss Gleichung (7) zeigen, dass eine Welle gegebener Frequenz durch das erdmagnetische Feld in zwei Komponenten aufgespalten wird, jede Komponente mit dem zugehörigen Absorptionskoeffizienten.

¹⁾ Journ. Inst. Electr. Eng., 71, 1932, 642.

Eine Diskussion dieser Gleichung ist von Appleton¹⁾ und später sorgfältig von Mary Taylor²⁾ gegeben. Eine allgemeine Diskussion ist sehr kompliziert. Nehmen wir indessen an, dass die Frequenz der Radiowellen bedeutend grösser ist als die Kollisionsfrequenz ν der freien Elektronen, so kann man als erste Annäherung $\nu = 0$ setzen. Der Brechungsindex wird dann reell und man bekommt folgenden einfacheren Ausdruck:

$$\mu^2 = 1 - \frac{2}{\frac{\gamma_T^2}{1+a} - 2a \mp \sqrt{\frac{\gamma_T^4}{(1+a)^2} + 4\gamma_L^2}} \quad (8)$$

Bei der Brechung der Radiowellen hat man im Umkehrpunkte $\mu = 0$. Dies wird für Gleichung (8) erfüllt, wenn:

$$1 + a = 0 \quad (9)$$

oder $1 + a = \pm \sqrt{\gamma_L^2 + \gamma_T^2} = \pm |\gamma|$ (10)

Für eine gegebene Elektronendichte N hat man deshalb denselben Umkehrpunkt für drei Werte der Frequenz, die durch folgende Gleichungen bestimmt sind

$$N = \frac{3}{2} \frac{\pi m}{e^2} f_1^2 \quad (11)$$

$$N = \frac{3}{2} \frac{\pi m}{e^2} (f_2^2 - f_H f_2) \quad (12)$$

$$N = \frac{3}{2} \frac{\pi m}{e^2} (f_3^2 + f_H f_3) \quad (13)$$

hier ist $p = 2\pi f$. Die anguläre Gyrofrequenz $p_H = He/mc$ ist durch $p_H = 2\pi f_H$ ersetzt.

Appleton und Builder³⁾ zeigten, dass man gewöhnlich nur Zurückwerfungen bekommt, die den Gleichungen (11) und (12) entsprechen. Es wird später gezeigt, dass Zurückwerfung, Gleichung (13) entsprechend, in Tromsö im Winter auftritt.

Die Fortpflanzung der Wellen relativ zu Richtung des erdmagnetischen Feldes ist für die Polarisation der zwei Komponenten entscheidend, und die theoretische Ableitung und experimentelle Prüfung der auftretenden Polarisation ist für die Theorie der Ausbreitung von entscheidender Bedeutung.

Wir nehmen an, dass sich die Welle in der Richtung der X -Achse ausbreitet, vgl. Fig. 2. Durch Orientierung der Y - und Z -Achsen kann ein magnetisches Feld H beliebiger Richtung durch eine X - und eine Z -komponente ersetzt werden.

Von der Lorentzchen Dispersionstheorie ausgehend, hat Appleton folgenden Ausdruck für die

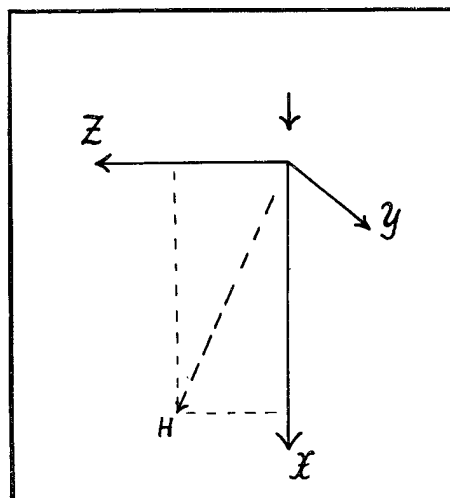


Fig. 2.

Polarisation abgeleitet, die durch die zwei Komponenten des magnetischen Feldvektors H_y und H_z gegeben ist

$$\frac{H_y}{H_z} = \frac{i\gamma_L}{\frac{1}{c^2 q^2 - 1} - (a + i\beta)} \quad (14)$$

hier ist $i = \sqrt{-1}$ und cq , γ_L , a und β haben dieselbe Bedeutung wie in Gleichung (7).

Die allgemeine Diskussion dieser Gleichung ist, wie die allgemeine Gleichung des Brechungsindex, kompliziert. Es gibt indessen zwei Sonderfälle, die von besonderer Bedeutung sind.

Der eine Fall ist Ausbreitung der Wellen in der Richtung des erdmagnetischen Feldes, die longitudinale Ausbreitung. Die Komponente senkrecht zur Ausbreitungsrichtung verschwindet dann und man hat $\gamma_T = 0$. Substituiert man diesen Werte in (14) unter Berücksichtigung von (7) bekommt man folgenden Ausdruck

$$\frac{H_y}{H_z} = \pm i$$

Es ergeben sich zwei zirkulär polarisierte Wellen mit entgegengesetztem Drehungssinn.

Der zweite Fall ist Ausbreitung der Wellen *senkrecht* zum erdmagnetischen Felde. Man hat dann $\gamma_L = 0$ und Gleichung (14) geht im folgenden Ausdruck über

$$\frac{H_y}{H_z} = 0$$

Es ergibt sich lineare Polarisation der zwei Komponenten.

Für beliebige Richtungen des erdmagnetischen Feldes wird man elliptische Polarisation bekommen. Es darf in dieser Verbindung bemerkt werden, dass die Ableitung der Polarisation in diesen zwei Son-

¹⁾ J. I. E. E. 71, 1932, 642. Proc. Phys. Soc. 42, 1932, 208.

²⁾ Proc. Phys. Soc. 45, 1933, 245 und 46, 1934, 408.

³⁾ Proc. Phys. Soc. 4, 1932, 208.

derfällen mit der klassischen Berechnung der Polarisierung des Zeemaneffektes parallel ist.

Es ist wahrscheinlich anzunehmen, dass der Polarisationszustand der Radiowellen, die gegen die Erde gebrochen werden, durch den Polarisationszustand beim Ausgang der Schicht bestimmt wird. Auf höheren Breiten, wo das erdmagnetische Feld annähernd senkrecht steht, muss man deshalb annähernd zirkularen Polarisationszustand der zwei Komponenten erwarten. Dies ist tatsächlich, wie Appleton und Builder¹⁾ zeigten, für die F -Echos der Fall. Geht man von nördlichen zu südlichen Breitengraden, so wird die Richtung des erdmagnetischen Feldes entgegengesetzt. Der Drehsinn der zwei Komponenten wird nach der Theorie wechseln, was durch die Beobachtungen von Green²⁾ bestätigt wurde.

Auf dem Äquator ist das erdmagnetische Feld horizontal und die Feldstärke ist ungefähr die Hälfte von dem Wert auf hohen Breiten. Die senkrecht zurückgeworfenen Signale sind deshalb der Theorie nach linear polarisiert mit einer Frequenzauerspaltung der zwei Echokomponenten von der Hälfte des Wertes, der auf hohen Breiten gemessen wird. Dies ist auch durch Beobachtungen der F_2 -Echos von Berkner und Wells³⁾ bestätigt worden.

Durch eine elegante Antennenkopplung haben Ratcliffe und White⁴⁾ den Polarisationszustand der E -Echos untersucht und vollständige Bestätigung der Theorie gefunden.

Es soll hervorgehoben, dass wir in diesen Betrachtungen die Kollisionsfrequenz $\nu = 0$ gesetzt haben. Für Wellen, deren Frequenz wesentlich höher sind als die Kollisionsfrequenz der freien Elektronen, wird die Ausbreitung den oben entwickelten Formeln entsprechen.

Nimmt aber die Frequenz der Radiowellen im Vergleich zu der Kollisionsfrequenz ab, so werden die Polarisationsverhältnisse und die selektive Absorption der zwei Komponenten wesentlich geändert, wie von Ratcliffe und White⁵⁾ bei Untersuchungen auf mittleren Wellenlängen (200—500 m) experimentell gezeigt worden ist, und was auch mit der Theorie der Ausbreitung und Übereinstimmung ist.

¹⁾ loc. cit.

²⁾ Australien Radio Research Board, Report No. 3, 1932.

³⁾ Proc. Inst. Radio Eng. 22, 1934, 1102.

⁴⁾ Phil. Mag. 16, 1933, 125.

⁵⁾ loc. cit.

Da wir indessen im Folgenden nur die Reflexion von kurzen Wellen behandeln werden, wird auf diese für den praktischen Rundfunkverkehr sehr wichtige Probleme nicht näher eingegangen.

In Appleton's Ableitung der zwei Grundgleichungen der Ausbreitung, der Dispersionsgleichung (7) und der Polarisationsgleichung (14), sind die Radiowellen als Strahlen behandelt. Dies setzt voraus, dass die Wellenlänge der Strahlung klein ist im Vergleich zu dem Lichtwege und der Ausdehnung der Schichten. Hartree¹⁾ hat das Problem der Ausbreitung unter Berücksichtigung der Wellennatur der Strahlen behandelt und dieselben Formeln (7) und (14) abgeleitet.

4. Wellen und Gruppengeschwindigkeit der Signale in einer ionisierten Schicht.

In einer ionisierten Schicht hat man mit zwei Arten von Geschwindigkeiten zu rechnen, die Phasengeschwindigkeit und die Gruppengeschwindigkeit der Signale. Die Phasengeschwindigkeit ist durch den in jedem Punkte auftretenden Wert des Brechungsindex μ durch den Ausdruck $v = \frac{c}{\mu}$ gegeben und wird ∞ für $\mu = 0$, d. h. im Umkehrpunkte. Die Gruppengeschwindigkeit U die durch Beobachtungen messbar ist, ist durch folgenden Ausdruck gegeben²⁾

$$\frac{1}{U} = \frac{\mu}{c} + \frac{p}{c} \frac{d\mu}{dp} = \frac{1}{v} + \frac{p}{c} \frac{d\mu}{dp} \quad (15)$$

Die Gruppengeschwindigkeit ist immer kleiner als die Lichtgeschwindigkeit und nimmt in der Nähe einer kritischen Frequenz, wenn die Wellen die Schicht durchdringen, stark zu.³⁾

Die bei den Echobeobachtungen gemessene Zeitdifferenz zwischen der Bodenwelle und dem Echo ist durch folgenden Ausdruck gegeben

$$\Delta t = \int \frac{ds}{U} \quad (16)$$

Die sogenannte äquivalente Weglänge wird durch folgenden Ausdruck definiert

$$c \cdot \Delta t = c \int \frac{ds}{U} \quad (17)$$

Die geometrische Weglänge ist durch $\int ds$ gegeben, die äquivalente Weglänge entspricht deshalb der

¹⁾ Proc. Camb. Phil. Soc. 27, 1931, 143.

²⁾ Vgl. z. B. Appleton, Proc. Phys. Soc. 41, 1928, 56.

³⁾ Vgl. z. B. White, Electromagnetic Waves, London 1934.

Weglänge, die man bekommt, wenn die Gruppengeschwindigkeit der Lichtgeschwindigkeit gleich gesetzt wird. Da die Gruppengeschwindigkeit immer kleiner als c ist, sind die im folgenden angegebenen äquivalenten Höhen immer grösser als die wahren geometrischen Höhen.

5. Die ionisierten Schichten und deren Nachweis.

Nachdem die Existenz der ionisierten Schichten durch den allgemeinen Rundfunkverkehr erkannt war, konnten Appleton und Barnett¹⁾ durch Bestimmung des Einfallswinkels des reflektierten Strahles und durch Triangulierung die ersten direkt bestimmten Höhen angeben. Die Höhen die durch diese Methode geschätzt wurden, waren von der Grössenordnung 100 km.

Die Entwicklung und Anwendung der sinnreichen Frequenzänderungsmethode von Appleton und Barnett²⁾ bestätigte diese ersten Höhenmessungen und führte ausserdem zur Entdeckung einer neuen Schicht in einer Höhe von 250 km, — die Appleton- oder F -Schicht. Die untere in 100 km's Höhe liegende Schicht wird gewöhnlich als die Kennelly-Heaviside- oder E -Schicht bezeichnet.

Ein grosse Vereinfachung des Beobachtungsverfahrens bot die Einführung der von Breit und Tuve³⁾ angegebenen Impuls-Methode. Nach diesem Verfahren wird ein sehr kurzer Impuls von einem Sender ausgesandt. Die Zeitdifferenz zwischen der direkt ankommenden Bodenwelle und der reflektierten Welle wird mittels eines Empfängers, der mit Oscillographen versehen ist, ausgemessen. Von besonderer Bedeutung war es, dass man durch diese Methode die Theorie der Ausbreitung der Radiowellen, Aufspaltung der Signale im erdmagnetischen Felde und Polarisationsverhältnisse der einzelnen Komponenten genau nachprüfen konnte.

Mittels des Impulsverfahrens können die auftretenden Echos über einen grösseren Frequenzbereich schnell verfolgt werden und dies eröffnete die Möglichkeit zur Bestimmung der maximalen Elektronendichte in einer Schicht. Zahlenmässig kann diese nach der Methode der kritischen Frequenzen bestimmt werden, d. h. man bestimmt die Grenzfrequenz bei welcher die Wellen die Schicht durchdringen. Die maximale Elektronendichte ist dann

für senkrechten Einfall durch die Formeln (11), (12) und (13) gegeben. Wie früher erwähnt, treten gewöhnlich nur die zwei Komponenten auf, die den Gleichungen (11) und (12) entsprechen, und man hat zur zahlenmässigen Berechnung der Elektronendichte

$$N = 1.867 \cdot 10^{-8} \cdot f_1^2 \text{ Elektronen/cm}^3 \text{ (ordentlicher Strahl)} \quad (18)$$

$$N = 1.867 \cdot 10^{-8} \cdot (f_2^2 - f_H f_2) \text{ Elektronen/cm}^3 \text{ (ausserordentlicher Strahl)} \quad (19)$$

Für Tromsö ist die Gyrofrequenz $f_H = \frac{H_0 e}{2 \pi m e} = 1.39 \cdot 10^6 \text{ Hz}$. Neben den zwei Hauptschichten E und F tritt gelegentlich eine Zwischenschicht auf, und zwar dann besonders bei Sonnenaufgang. Im Sommer weist die F -Schicht eine Ausbuchtung in der Ionisation am unteren Rande auf. In Übereinstimmung mit der englischen Schule von Radiophysikern werden wir die im Sommer auftretende Ausbuchtung am unteren Rande der Appleton-Schicht als F_1 und die Hauptschicht als F_2 bezeichnen. Die gelegentlich auftretende Zwischenschicht wird als E'' bezeichnet.

Um die Echos zu identifizieren, ist es gewöhnlich notwendig, diese über einen grösseren Frequenzbereich zu verfolgen und dieselben in einem Frequenz-Höhendiagramm darzustellen. Appleton bezeichnet dies als eine P', f -Kurve (equivalent path, frequency-curve) und die Diskussion der P', f -Kurven ist für das Studium der Änderungen der Ionisation von entscheidender Bedeutung.

6. Die Änderungen der Ionisation der Schichten.

Die ersten ausführlicheren Beobachtungen über die Änderungen der ionisierten Schichten wurden von der englischen Schule von Radiophysikern unternommen. In der ersten Zeit der Beobachtungen wurden fast ausschliesslich die auf einer bestimmten Welle im Laufe des Tages auftretenden Echos registriert. Während der letzten Jahre sind diese Registrierungen durch zeitweise Aufnahmen der Echos über einen grösseren Frequenzbereich ergänzt. Durch Aufzeichnung der P', f -Kurven können die kritischen Frequenzen und dadurch die maximale Elektronendichte der Schichten bestimmt werden. Der Verlauf der P', f -Kurven gestattet bestimmtere Aussagen über den Gradienten der Ionisation in den Schichten zu machen.

¹⁾ Nature, 115, 1925.

²⁾ Proc. Roy. Soc. (A), 113, 1926, 450.

³⁾ Phys. Rev. 28, 1926, 568.

Die kritischen Frequenzen werden gewöhnlich als Mass der Ionisation angesehen, es ist indessen zu beachten, dass die gemessenen kritischen Frequenzen nur die Grösse der *Maximalionisation* in der betreffenden Schicht angeben. Vertikale Massenbewegungen in der Atmosphäre, die die Schichten zusammenpressen oder ausdehnen, werden deshalb die kritischen Frequenzen beeinflussen, und man kann umgekehrt aus den Änderungen der kritischen Frequenzen Aufschlüsse über diese Vertikalbewegungen erhalten. Wir werden im folgenden dafür Beispiele geben.

Als ionisierendes Agens der Schichten wird gewöhnlich der kurzwellige Teil des Sonnenspektrums angesehen, eine Annahme, die schon von Schuster ausgesprochen wurde. Die Beobachtungen der Änderungen der Ionisation der Schichten während Sonnenfinsternissen¹⁾ haben wenigstens für die *E*-Schicht gezeigt, dass die Änderungen der Ionisation der Änderung der Intensität der Sonnenstrahlen genau parallel geht.

Die Berechnung der ionisierenden Wirkung einer Strahlung, die mit exponentieller Absorption eine Atmosphäre mit exponentieller Abnahme der Dichte durchquert, geht auf die Untersuchung von Lenard²⁾ über die Absorption der Kathodenstrahlen in der Atmosphäre zurück. Die Berechnungen sind auf mehrere Probleme unter Annahme von verschiedenen Massenabsorptionskoeffizienten und verschiedener Massenverteilung der Atmosphäre angemant worden. Chapman³⁾ hat in zwei Abhandlungen die Ionisierung auf einer rotierenden Erde berechnet und Formeln für die Ionenproduktion und gleichzeitige Wirkung der Rekombination aufgestellt.

Wir werden die Formeln der Ionenproduktion aufstellen, da wir später dieselben zur Erklärung der Änderungen der Ionisation verwenden werden.

Die Dichte ρ einer isothermen Atmosphäre in einer Höhe h ist durch folgende Formel gegeben

$$\rho = \rho_0 e^{-\frac{h}{H}}$$

Hier ist ρ_0 die Dichte auf die Erdoberfläche, und H die sogenannte «Höhe der homogenen Atmosphäre» die durch folgenden Ausdruck gegeben

ist $H = \frac{RT}{Mg}$, R ist die universelle Gaskonstante, T die absolute Temperatur und M das mittlere Molekulargewicht, indem wir hier völlige Durchmischung der Gase annehmen.

Nehmen wir an, dass die Ionenproduktion pro cm^3 der Intensität der Strahlung und der Dichte der Atmosphäre proportional ist, so wird die Ionenproduktion I in einer Höhe h durch folgende Formel gegeben

$$I(\chi, h) = \beta A S_\infty \rho_0 e^{-\frac{h}{H} - A \rho_0 H \sec \chi e^{-\frac{h}{H}}} \quad (20)$$

Hier ist χ die Zenithdistanz der Sonnenstrahlen, A ist der Absorptionskoeffizient der Strahlen, β die Anzahl Ionen, die durch Absorption einer Einheit der Strahlen produziert wird, und S_∞ die extraterrestrische Intensität der Sonnenstrahlen. Die Ionenproduktion hat ihr Maximum in der Höhe h' , die durch folgenden Ausdruck gegeben ist $\left(\frac{\partial I}{\partial h} = 0\right)$

$$e^{\frac{h'}{H}} = A \rho_0 H \sec \chi \quad (21)$$

$$\text{d. h. } h' = H \log \text{nat} (A \rho_0 H \sec \chi)$$

und die entsprechende Maximalionisation I' wird $\left(\frac{\partial I}{\partial \chi} = 0\right)$

$$I' = \beta S_\infty \cos \chi \cdot \frac{1}{He} \quad (22)$$

hier ist $e = 2.718$.

Die *maximale* Ionisation in einer Schicht ist deshalb einfach $\cos \chi$ proportional. Die Höhe dieses Niveaus maximaler Ionisation ändert sich mit der Höhe der Sonne gemäss Gleichung (21).

Wir haben hier die Erde als plan vorausgesetzt, was nach Chapman¹⁾ für Sonnenhöhen grösser als 5° ($\chi < 85^\circ$) zulässig ist. In seiner zweiten Abhandlung hat Chapman die Erdkrümmung berücksichtigt und die exakten Formeln angegeben.

Appleton und Naismith²⁾ haben die jährlichen Änderungen der Maximalionisation mit Berücksichtigung der Wirkung der Rekombination mit der Theorie verglichen.

Die Rekombination von Elektronen und positiven Ionen ist durch folgende Gleichung gegeben

$$\frac{dN}{dt} = I - \alpha N^2 \quad (23)$$

¹⁾ Vgl. zusammenfassenden Bericht von Appleton und Chapman, Proc. Inst. Radio Eng. 23, 1935, 658.

²⁾ Sitz. Ber. d. Heidelberger Akad. d. Wiss. 12, 1911.

³⁾ Proc. Phys. Soc. 43, 1930, 26, und 43, 1931, 483.

¹⁾ loc. cit. S. 29.

²⁾ Proc. Roy. Soc. (A), 150, 685. (1935).

hier ist N die Dichte der Elektronen und der positiven Ionen, I die Ionenproduktionen und α der Rekombinationskoeffizient.

Zur Zeit der maximalen Ionisation am Tage wird die Ionenproduktion und die Neutralisation durch Rekombination einander gleich sein ($\frac{dN}{dt} = 0$). Die täglichen Registrierungen zeigen, dass die Maximalionisation in den E - und F_1 -Schichten um Mittag erscheint. Man hat dann

$$I'' = -\alpha N^2 \quad (24)$$

Mit Berücksichtigung von (22) wird deshalb das Verhältnis der Änderungen der maximalen Elektronendichten zu zwei Zeiten durch folgende Gleichung gegeben

$$\frac{N_1}{N_2} = \sqrt{\frac{\cos \chi_1 \cdot \alpha_2}{\cos \chi_2 \cdot \alpha_1}} \quad (25)$$

Appleton und Naismith¹⁾ vergleichen die Sommer- und Winterwerte der Maximalionisation für Südost-England (51,°5 N) und fanden für die E - und F_1 -Schicht vollkommene Übereinstimmung mit der Theorie. Der Theorie nach soll $\frac{N \text{ Sommer}}{N \text{ Winter}} = 1,84$ sein, und experimentell wurde für die E -Schicht 1,80 und für die F_1 -Schicht 1,86 gefunden. Beobachtungen aus Deal, U. S. A. (40,2 N) und Washington U. S. A. (38,9 N) zeigten auch eine qualitative Übereinstimmung mit der Theorie.

Wie von Appleton hervorgehoben ist, weist diese gute Übereinstimmung darauf hin, dass die Neutralisation der Schichten dem einfachen Rekombinationsgesetz folgt. Es ist früher angenommen worden²⁾, dass die Schichten einen wesentlichen Verlust an freien Elektronen erleiden durch Anhaftung derselben an Molekülen und Bildung von negativen Ionen. Es lässt sich zeigen, dass dieser Prozess durch die Gleichung $\frac{dN}{dt} = -\beta N$ gegeben ist. Falls man annimmt, dass dieser Prozess im Vergleich mit der Rekombination, die durch $\frac{dN}{dt} = -\alpha N^2$ gegeben ist, eine wesentliche Rolle spielt, hätte man eine andere Variation der Maximalwerte von Sommer- und Winterionisation erwarten müssen als diejenige, die tatsächlich beobachtet ist.

¹⁾ Loc. cit. 701.

²⁾ Vgl. die Übersicht von P. O. Pedersen, The Propagation of Radio Waves, Kopenhagen 1927, 56.

Die jährlichen und täglichen Änderungen der Maximalionisation in der F_2 -Schicht dagegen sind nicht in Übereinstimmung mit der einfachen Theorie der Ionenproduktion. Sämtliche Beobachtungsreihen, die vorliegen, zeigen eine *Abnahme* der Maximalionisation während des Sommers. Die täglichen Änderungen der Ionisation in der E - und F_1 -Schicht zeigen an ungestörten Tagen einen glatten und regelmässigen Verlauf, die Maximalionisation der F_2 -Schicht weist dagegen gewöhnlich einen unregelmässigeren Verlauf auf mit mehreren sekundären Maxima während des Tages.

Es ist wenig wahrscheinlich, dass die Annahmen über Ionenproduktion und Rekombination, die in der einfachen Theorie gemacht werden, für die F_2 -Schicht nicht zutreffend sind. Die Abweichung wird, wie später näher dargestellt werden soll, durch die täglichen und jährlichen Dichteänderungen im Niveau der F_2 -Schicht hervorgerufen. Die Dichteänderungen werden Temperaturschwankungen zugeschrieben, und da die Ionenproduktion der Dichte proportional gesetzt werden kann, ist die gefundene Abweichung des jährlichen Ganges von der einfachen Theorie der Ionenproduktion als ein Mass für die durchschnittliche Änderung der Temperatur im Niveau der F_2 -Schicht anzusehen.

B. DIE RADIOBEOBACHTUNGEN IN TROMSÖ.

7. Experimentelle Anordnung zur Beobachtung der Radioechos und Plan der Untersuchungen.

Die Apparate, die aus einem Impulssender und einem Empfänger bestanden, der mit einem Kathodenoscillographen zur photographischen Registrierung der Bodenwelle und der auftretenden Echos versehen war, waren auf dem Observatorium in einer Entfernung von 120 m von einander aufgestellt¹⁾. Die Signale wurden synchron mit der Netzfrequenz 50 Mal in der Sekunde ausgesandt und das Elektronenbündel in dem Oscillographen im Empfänger wurde durch eine Kippschaltung mit derselben Frequenz gesteuert. Die Bodenwelle er-

¹⁾ Für das lebenswürdige Entgegenkommen beim Bau der Apparate auf der Radio-Forschungsstation in Slough (England) möchten wir dem Direktor Herrn R. A. Watson Watt und den Herren J. A. Herd, L. H. Bainbridge-Bell und R. Naismith unseren besten Dank aussprechen.

scheint deshalb immer auf derselben Stelle auf dem Oscillographenschirm.

Der Senderkondensator konnte durch Synchronmotoren von Empfänger aus abgestimmt werden, und durch Aufbau von Quecksilber-relees konnten die drei Spulen im Sender, die den gesamten Frequenzbereich umfassten vom Empfänger aus nacheinander ein- und ausgekoppelt werden.

Im Winter bei tiefen Temperaturen hatte man Schwierigkeiten mit der Modulation am Sender, indem das mit Quecksilbergas gefüllte Thyatronrohr schlecht arbeitete. Durch Temperaturisolierung konnte dies indessen beseitigt werden. Wegen der Schneemengen, die im Winter das Nachsehen des Senders in der Senderhütte sehr unbequem machten, wurde versucht den Sender in demselben Raum wie den Empfänger arbeiten zu lassen. Einige störende Impulse vom Sender, die als «falsche Echos» erkannt wurden, mussten beseitigt werden. Vom Februar 1936 sind indessen Sender und Empfänger in demselben Raume in einer Entfernung von 1.5 m von einander aufgestellt. Die Sendung und der Empfang geschah auf zwei gekreuzten Dipol-Antennen.

Wie früher erwähnt, ist die Aufnahme der Echos über einen grösseren Frequenzbereich, die die Aufzeichnung der P', f -Kurven zulässt, von besonderer Bedeutung. Dies wurde durch kontinuierliche Änderung der Wellenlänge des Senders und gleichzeitige Abstimmung des Empfängers mit der Hand¹⁾ erreicht. Auf dem Oscillographenschirm wurden die Amplituden der Echos abgeblendet und der ungestörte Teil der Lichtlinie von einem Registrator mit kontinuierlich bewegtem Papier abphotographiert. Tafel IV Nr. 13 a zeigt eine Aufnahme der Echos ohne Abblendung der Amplituden, die übrigen sind Aufnahmen von P', f -Kurven, durch Abblendung der Amplituden der Echos registriert. Die zeitliche Kalibrierung des Oscillographen wurde durch einen kleinen Sender mit einer Frequenz von 3000 Hz vorgenommen, die Kalibrierungsmarken sind auf den Aufnahmen Tafel I—IV sichtbar.

Die Echoregistrierungen sind mit besonderer Rücksicht auf die Bestimmung der kritischen Frequenzen aufgenommen. Die täglichen und jährlichen Beobachtungen gewähren einen Überblick über den ungestörten Verlauf der täglichen und jährlichen Ionisationsänderungen. Über diese regel-

mässigen Änderungen lagert sich die Wirkung der Störungen, — in diesem Falle die Wirkung der erdmagnetischen Störungen und die der Nordlichter.

Einen Überblick über den *jährlichen* Verlauf der Ionisation geben die Mittagsbeobachtungen die möglichst jeden Tag um 10^h, 12^h und 14^h wahre Lokalzeit aufgenommen wurden.

Um die Änderungen des *täglichen* Ganges festzulegen, wurden die kritischen Frequenzen an ausgewählten Tagen dauernd während 24—36 Stunden verfolgt, gewöhnlich durch Aufnahme von Echoregistrierungen jede halbe Stunde. Diese Tagesbeobachtungen geben auch Auskünfte über die Wirkung der Störungen.

8. Der durch die Mittagsbeobachtungen bestimmte jährliche Gang der kritischen Frequenzen.

Die registrierten P', f -Kurven zeigen während des Jahres vom Winter zum Sommer eine kontinuierliche Änderung des Verlaufs, die wenigstens für die F_2 -Schicht auf grosse jährliche Änderungen des Gradienten der Ionisation deutet. In Fig. 3, vgl. auch Tafel I Nr. 1, 2 und 3, sind die typischen P', f -Kurven am Mittag im Winter, Frühling und Sommer gegeben. Links in Fig. 3 ist die Verteilung der Elektronendichte angedeutet. Die Höhenangaben über die E -Schicht sind wegen der auftretenden Gruppengeschwindigkeiten etwas unsicher.

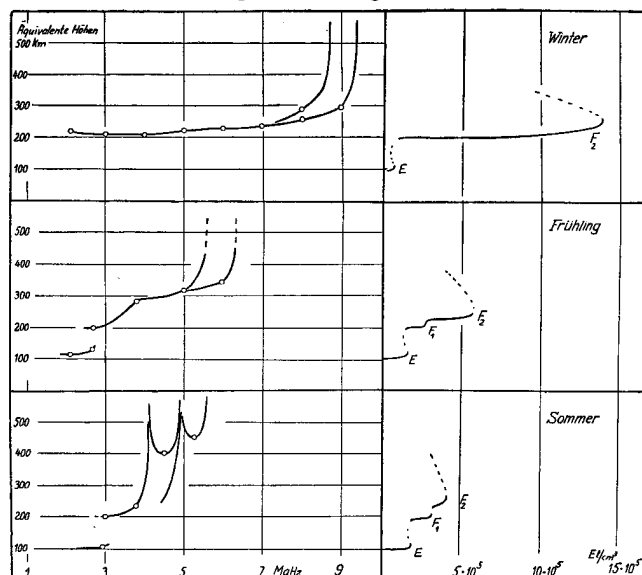


Fig. 3.

Die kritischen Frequenzen der F_2 -Schicht sind während des Jahres dauernd messbar, die E -Echos

¹⁾ Naismith, Nature, 133, 1934, 66.

sind während der dunklen Zeit Dezember—Januar in Tromsø nicht messbar. Die Ausbuchtung in der P' , f -Kurve, die die F_1 -Schicht angibt, ist nur während der vier Sommermonate ausgeprägt.

Tabelle 1 und Fig. 4 geben die mittleren Tageswerte der kritischen Frequenzen des *ordentlichen* Strahles in MgHz für jeden halben Monat von April 1935 bis April 1936 an.

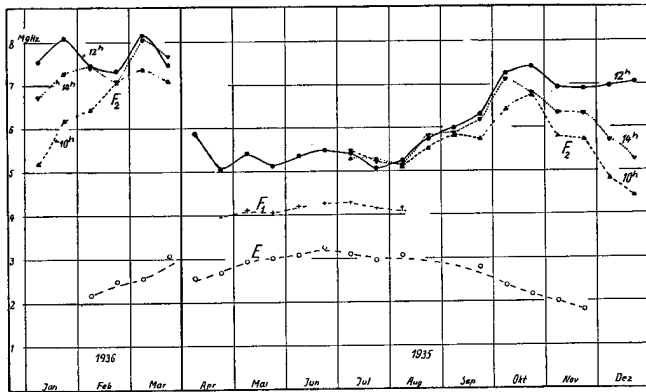


Fig. 4.

kurven für Südost-England¹⁾ und für Deal (U. S. A.)²⁾ vorhanden.

Aus Fig. 4 geht weiter hervor, dass die Frühlingswerte 1936 entschieden etwas höher liegen als die entsprechenden Werte 1935. Dies ist wahrscheinlich der erdmagnetischen Aktivität zuzuschreiben. Die erdmagnetische Aktivität im Frühling und Sommer 1935 entspricht dem Sonnenfleckenminimum, in der letzten Hälfte des Jahres aber nahm die erdmagnetische Aktivität im Vergleich zu den Jahren 1933 und 1935 entschieden etwas zu. Nach einem Sonnenfleckenminimum nimmt gewöhnlich die Sonnenaktivität schnell zu und erreicht im Laufe von 3—4 Jahren das Sonnenfleckenmaximum. Falls die Ionisation eine so grosse Sonnenfleckenabhängigkeit aufweist, wie Fig. 4 andeutet, muss man deshalb in den ersten Jahren eine beträchtliche Steigerung der Ionisation erwarten. Bekanntlich zeigt die Amplitude der ruhigen, täglichen Variation des erdmagnetischen Feldes eine ausgesprochene 11-jährige Periode, die der Sonnenfleckenaktivität parallel geht.

Tabelle 1.

Geographische Koordinaten: $\varphi = 69^\circ 39.8$ N, $\lambda = 18^\circ 56.9$ E. Gr.

Zeitangaben nach Lokalzeit.

		1935										1936		
		April	Mai	Juni	Juli	August	Septbr.	Oktober	Novbr.	Dezbr.	Januar	Februar	März	
		1-15 16-30	1-15 16-31	1-15 16-30	1-15 16-31	1-15 16-31	1-15 16-30	1-15 16-31	1-15 16-30	1-15 16-31	1-15 16-31	1-15 16-29	1-15 16-31	
F_2 -Schicht	10h		5.44 4.92	5.53 5.49	5.43 5.10	5.10 5.80	5.85 6.17	6.43 6.75	5.77 5.70	4.81 4.42	5.20 6.18	6.44 7.05	7.36 7.07	
	12h	5.86 5.04	5.46 5.11	5.47 5.49	5.42 5.05	5.24 5.76	5.99 6.31	7.27 7.41	6.91 6.90	6.57 7.05	7.53 8.08	7.42 7.30	8.14 7.42	
	14h		5.41 4.73	5.24 5.39	5.29 5.14	5.13 5.51	5.82 5.76	7.10 6.79	6.32 6.31	5.70 5.23	6.71 7.28	7.42 7.08	8.08 7.64	
F_1 -Schicht	10h			4.21 4.22	4.23 4.12	4.11								
	12h	3.94	4.10 4.04	4.19 4.24	4.27 4.14	4.15								
	14h		4.02 3.97	4.18 4.19	4.21 4.12	4.09								
E -Schicht	10h		2.83	2.93 3.06	3.00 2.89	2.91		2.29 2.12						
	12h	2.55 2.66	2.93 3.01	3.07 3.14	3.08 2.97	3.08	2.79	2.37 2.15	2.00 1.80			2.17 2.48	2.53 3.05	
	14h		2.98	2.90 3.01	2.96 2.83	3.01		2.22 1.97						

Die mittleren Kurven für E - und F_1 zeigen einen zum Sommersolstitium annähernd symmetrischen Verlauf. Die mittlere Kurve für F_2 zeigt ein Minimum während des Sommers und ein Starkes Ansteigen während des Winters, die kritischen Frequenzen der F_2 -Schicht zeigen deshalb während des Jahres einen der Sonnehöhe entgegengesetzten Verlauf.

Die zwei sekundären Maxima im September—Oktober und im März sind auch in den Jahres-

Es ist von Interesse, die in Tromsø registrierten Werte der kritischen Frequenzen der F_2 -Schicht mit den auf südlicheren Breitengraden gemessenen kritischen Frequenzen zu vergleichen. Zur Zeit liegen graphische Jahreskurven von Appleton und

¹⁾ Appleton und Naismith, Proc. Roy. Soc. A, 150, 1935, 685.

²⁾ Schafer und Goodall, Proc. Inst. Radio Eng. 23, 1934, 670.

Naismith¹⁾ für Südost-England für 1934, von Schafer und Goodall²⁾ für Deal (U. S. A.) für 1933 und von Kirkby, Berkner und Stuart³⁾ für Washington (U. S. A.) für 1932 vor. Die Werte der ordentlichen Komponenten werden verglichen. Falls die ausserordentliche Komponente in den Kurven angegeben ist, wird die ordentliche Komponente durch Subtrahieren von 0.7 MgHz berechnet.

Tabelle 2.

Jahr	φ	Sommer- solstitium MgHz	Winter- solstitium MgHz
Tromsö	1935 66.7 N	5.45	7.05
Slough (England)	1934 50.5	za. 5.30	za. 5.70
Deal (U. S. A.)	1933 40.2	za. 4.60	za. 5.55
Washington (U. S. A.)	1932 38.9	za. 4.85	(za. 6.55)

Wie aus Tabelle 2 hervorgeht nimmt die kritische Frequenz mit wachsender Breite etwas zu. Nach der einfachen Theorie der Ionenproduktion durch Absorption einer monochromatischen Strahlung in der Atmosphäre ist eine Änderung mit der Breite zu erwarten, die in *entgegengesetzter* Richtung geht wie die aus Tabelle 2 tatsächlich beobachtete. Obwohl die hier verglichenen Werte sich auf verschiedene Jahre beziehen, wird die Sonnenfleckenabhängigkeit diesen Breiteneffekt wahrscheinlich nicht verkleinern, da zu erwarten ist, dass in Jahren hoher Sonnenaktivität die Ionisation auf höheren Breiten in noch höherem Masse vergrössert wird als auf mittleren und niedrigen Breiten.

Vergleicht man die *grössten* beobachteten Werte der kritischen Frequenzen der F_2 -Schicht, so kommt derselbe Breiteneffekt heraus. In Tabelle 3 sind

Tabelle 3.

Tromsö:	Jan. 3, 24, und 29: 9.15, 9.30 und 9.20 MgHz Feb. 29: 9.50 MgHz. März 1 und 14: 9.70 und 9.20 MgHz.
Slough:	Mai: 7.45 MgHz. Okt.: 7.80 MgHz.
Deal:	Okt.: zweimal 8.0 MgHz.
Washington:	Jan.: 7.4 und 7.1 MgHz.

¹⁾ Loc. cit.

²⁾ Loc. cit.

³⁾ Bur. Stand. J. Res. Wash. 12, 1934, 15.

die den Jahreskurven entnommenen, grössten Werte der ordentlichen Komponente zusammengestellt.

Die maximalen kritischen Frequenzen der F_2 -Schicht nehmen auf hohen Breiten wie Tromsö im allgemeinen zu.

Die auffallende jährliche Variation der F_2 -Maximalionisation mit Minimumswerten im Sommer und Maximumswerten im Winter wird nach Appleton¹⁾ als ein Temperatureffekt gedeutet.

Wegen der Temperaturzunahme im Sommer wird die Atmosphäre über 200 km aufgelockert, was eine Verkleinerung der Dichte hervorruft, und die Ionenproduktion der Sonnenstrahlen wird der Dichte proportional abnehmen.

Einem Temperatureffekt derselben Herkunft ist der hier nachgewiesenen Breiteneffekt zuzuschreiben.

Wie früher erwähnt, haben Appleton und Naismith²⁾ die jährlichen Änderungen der Mittagswerte der kritischen Frequenzen für die E - und F_1 -Schichten diskutiert und nachgewiesen, dass die jährliche Amplitude in Übereinstimmung mit der einfachen Theorie der Ionenproduktion durch Absorption einer ionisierenden Strahlung ist.

Eine Durchrechnung für Tromsö zeigt, dass die jährliche Variation für die E - und F_1 -Maximalionisation wenigstens qualitativ mit der Theorie in Übereinstimmung ist, eine genaue Prüfung lässt sich erst nach längeren Beobachtungsreihen durchführen, da die Sommerbeobachtungen von 1935 etwas lückenhaft sind.

Die täglichen Variationen werden später behandelt, aus Tabelle 1 und Fig. 4 geht indessen der allgemeine Verlauf der Ionisationsänderungen um Mittag um 10^h, 12^h und 14^h Lokalzeit hervor. Die kritischen Frequenzen der E - und F_1 -Schichten zeigen einen um Mittag symmetrischen Verlauf. Die kritischen Frequenzen der F_2 -Schicht zeigen im Durchschnitt höhere Werte um 14^h als um 10^h, dies ist besonders deutlich Mittwinter, vgl. Fig. 4.

Die Asymmetrie im Verlauf der kritischen Frequenzen der F_2 -Schicht wird durch die Wirkung der Rekombination verursacht und aus der Asymmetrie in der Ionisationskurve kan die Grösse des Rekombinationskoeffizienten abgeschätzt werden. Wir werden später bei den Tagesbeobachtungen dies näher behandeln.

In den E - und F_1 -Schichten verläuft die Rekombination so schnell, dass die kritischen Frequenzen keine

¹⁾ Nature, 136, 1935, 52.

²⁾ Loc. cit.

merkliche Asymmetrie in dem täglichen Verlauf zeigen.

Ein Vergleich der P' , f -Kurven von 10^h und 14^h zeigt indessen, dass der Gradient der Elektrendichte eine tägliche Asymmetrie aufweist, indem der Gipfel in der P' , f -Kurve, der die kritische Frequenz der F_1 -Schicht angibt, vormittags höher und ausgeprägter ist als nachmittags. Die Schichtung zwischen F_1 und F_2 ist deshalb am Vormittage stärker ausgeprägt, nachmittags wird diese etwas «ausgefüllt», wahrscheinlich wegen dauernder Temperaturerhöhung, die die Schichten ausdehnt. Wir werden Beispiele davon beim Durchgehen der Tagesbeobachtungen geben.

9. Einfluss der Nachwirkung der erdmagnetischen Störungen auf die Mittagsbeobachtungen der kritischen Frequenzen.

Der Einfluss von erdmagnetischen Störungen auf die Ausbreitung von Radiowellen im kommerziellen Verkehr ist schon früh erkannt worden. Die Feldstärkebeobachtungen bei transatlantischem Verkehr, sowie zwischen Nord- und Südamerika zeigen eine ausgesprochene Parallelität der Änderungen mit den Relativzahlen der Sonnenflecken und den erdmagnetischen Charakterzahlen (Austin, Stetson und Pickard). Besonders deutlich ist diese Parallelität in den 8-jährigen Messungen des deutschen Senders Nauen vom Bureau of Standards in Washington. Die Korrelation zwischen Feldstärke und erdmagnetischer Aktivität ist positiv für lange Wellen ($\lambda > 1000$ m) und negativ für mittlere Wellen ($200 > \lambda > 500$ m)¹⁾.

Eine Erklärung des verschiedenen Einflusses der erdmagnetischen Störungen auf die Ausbreitung der Radiowellen haben die systematischen Echo-beobachtungen gegeben.

Wie von der britischen Polarjahr-Expedition nachgewiesen²⁾ worden ist, wird auf höheren Breiten die Ionisation stark von Nordlichtern und erdmagnetischen Störungen beeinflusst. Ihre Wirkung besteht in einem starken Ansteigen der Ionisation

im Niveau der E -Schicht. Sehr oft schirmt diese verstärkte E -Ionisation die F -Schicht ab und nur die E -Echos können beobachtet werden. Bei intensiven Nordlichtern und erdmagnetischen Störungen tritt ausserdem *unter* der E -Schicht eine starke *absorbierende* Schicht auf, die die höher liegenden Schichten für Messungen unzugänglich machen. Die direkte Wirkung der erdmagnetischen Störungen auf die F -Schichten in polaren Gegenden lässt sich deshalb wegen der abschirmenden Wirkung der verstärkten E -Ionisation oft schwierig nachweisen.

Schafer und Goodall¹⁾ haben indessen auf eine interessante, negative Korrelation zwischen den kritischen Frequenzen der F_1 -Schicht und der erdmagnetischen Aktivität aufmerksam gemacht, und Appleton und Ingram²⁾ haben dieselbe negative Korrelation für die kritischen Frequenzen der F_2 -Schicht für Südost-England nachgewiesen.

Diese Effekte gehen aus den Mittagsbeobachtungen an einer stark gestörten Stelle wie Tromsø besonders deutlich hervor. Fig. 5 zeigt die Einzelwerte der kritischen Frequenzen am Mittag während eines Jahres. Die erdmagnetische Aktivität, unten in Fig. 5, ist die tägliche Summe (AS = «Absolute Storminess») der stündlichen Abweichungen der Horizontalintensität, die den erdmagnetischen Registrierungen des Observatoriums entnommen sind. Diese tägliche Summe ist hier von 12^h bis 12^h berechnet (statt wie in dem Jahrbuch von 0^h bis 24^h). Aus Fig. 5 ist ersichtlich, dass Perioden mit grosser erdmagnetischer Aktivität mit kleineren Werten der kritischen Frequenzen der F_2 -Schicht parallel gehen. Dies ist im Februar und März 1936 besonders deutlich.

Es ist von besonderem Interesse nachzuforschen, ob diese Abnahme der kritischen Frequenzen der F_2 -Schicht ein *Nacheffekt* der erdmagnetischen Störungen oder ein parallelaufender Effekt ist. Fig. 6 zeigt den täglichen Verlauf der erdmagnetischen Störungen in Tromsø. Die Störungsvektoren zeigen ein Minimum um Mittag, eine neue Störung setzt erfahrungsgemäss um 14^h—17^h ein. Die tägliche Summe von 12^h bis 12^h berechnet ist deshalb ein geeignetes Mass für die natürliche Periodizität der Störungen, im Gegensatz zu dem in den Jahrbüchern gewöhnlich gebrauchten Zeitintervall von 0^h bis 24^h.

¹⁾ Nach einer Übersicht von Kennelly, The Science Monthly, 35, 1932, 42.

²⁾ Vorläufige Mitteilung von Appleton, Naismith und Builder, Nature 132, 1934, 340.

Vgl. auch Wagner, Ber. d. Preuss. Akad. d. Wiss. phys.-math. Kl. 1933, und Wagner und Fränz, ENT 12, 1935, 210.

¹⁾ Proc. Inst. Radio Eng. 23, 1935, 670.

²⁾ Nature, 136, 1935, 548.

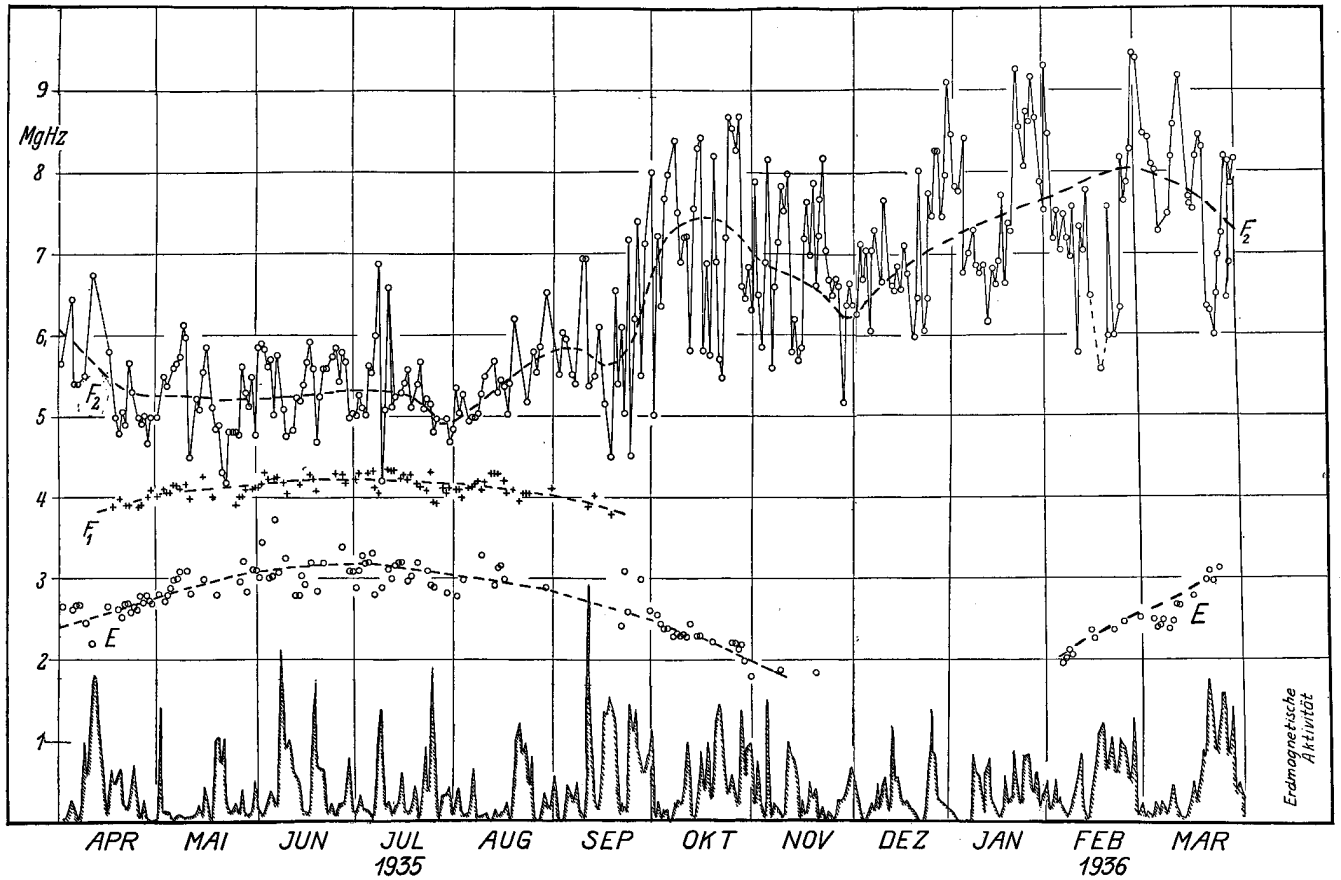


Fig. 5.

Die Abweichung der kritischen Frequenzen von dem ungestörten Verlauf wurde für jeden Tag berechnet. Der Korrelationskoeffizient zwischen diesen

jeder Mittagsbeobachtung wurde berechnet und in den Kolonnen A, B, C und D in Tabelle 4 zusammengestellt.

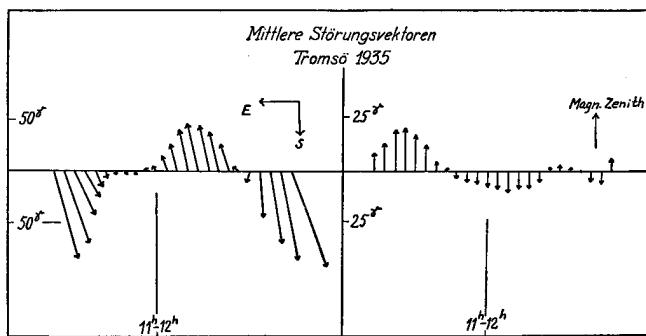


Fig. 6.

Tabelle 4.

F₂-Schicht.

	A	B	C	D
Mai—Juni	-0.354	-0.517	-0.642	-0.444
Juli—August	-0.293	-0.213	-0.427	-0.224
Septbr.—Oktbr. . .	-0.020	-0.259	-0.520	+0.019
Novbr.—Dezember	-0.162	-0.257	-0.337	-0.122
Januar—Februar..	-0.125	-0.317	-0.599	-0.266
März	-0.401	-0.574	-0.655	-0.472

Differenzen und der erdmagnetischen Aktivität¹⁾ am 3., 2. und 1. Tage vor und am 1. Tage nach

Wie aus Tabelle 4 hervorgeht, besteht der grösste negative Korrelationskoeffizient zwischen der erdmagnetischen Aktivität der vorangehenden 24 Stunden und den Mittagswerten der kritischen Frequenzen (Kolonne C). Fig. 7 zeigt die Differenzen der täglichen kritischen Frequenzen als Funktion der erdmagnetischen Aktivitäten an den obenerwähnten vier Tagen. Auffallend ist der kleine

¹⁾ Vgl. die erdmagnetischen Jahrbücher des Observatoriums «Publikasjoner fra det norske institutt for kosmisk fysik» Nr. 3 Bergen 1933. Statt der Tagessumme AS ist hier die bequemere Grösse $\sqrt{\frac{AS}{1000}}$ verwendet worden.

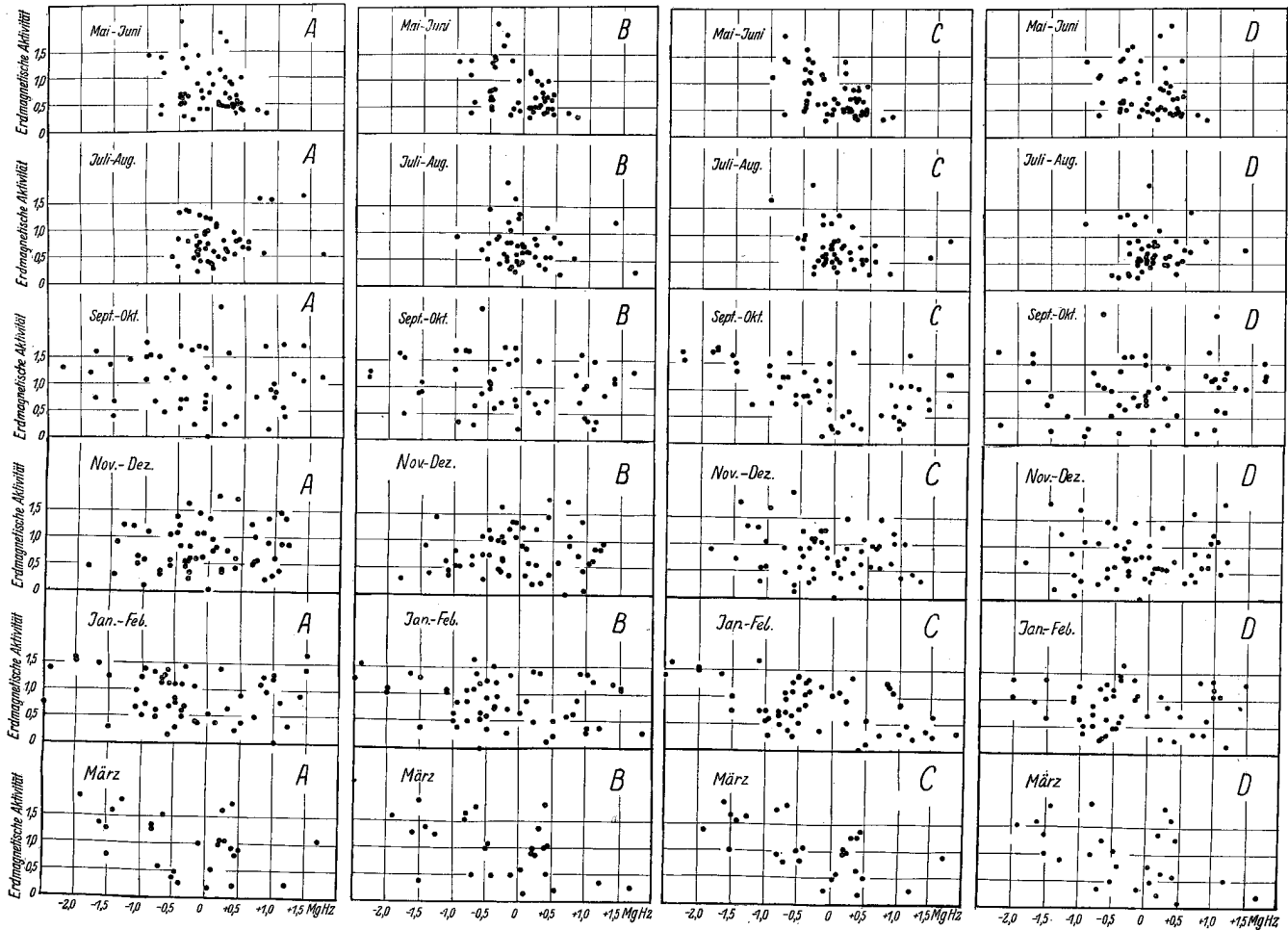


Fig. 7.

Bereich der Variation der kritischen Frequenzen in den Sommermonaten Juni, Juli und August im Vergleich zu den übrigen Monaten des Jahres.

Die Änderungen der kritischen Frequenzen der F_1 -Schicht von Tag zu Tag sind, wie aus Fig. 5 hervorgeht, bedeutend kleiner als die der F_2 -Schicht. Die täglichen Abweichungen der kritischen Frequenzen der F_1 -Schicht wurden auf dieselbe Weise mit der erdmagnetischen Aktivität korreliert. Da die täglichen Differenzen hier klein sind, von der Grösse 0.1—0.3 MgHz, während der Fehler der einzelnen kritischen Frequenzbestimmung zu 0.05—0.10 MgHz angesetzt werden kann, wurden diese Differenzen sowohl für den ordentlichen wie für den ausserordentlichen Strahl berechnet und zur statischen Behandlung verwendet. Tabelle 5 zeigt die Korrelationskoeffizienten zwischen den täglichen Differenzen der kritischen Frequenz und der erdmagnetischen Aktivität an den früher erwähnten vier Tagen.

Tabelle 5.
 F_1 -Schicht.

	A	B	C	D
Juni—Juli	—0.001	—0.190	—0.353	—0.091

Wie aus Tabelle 5 hervorgeht, ergibt sich auch hier der grösste negative Korrelationskoeffizient zwischen der erdmagnetischen Aktivität der *vorangehenden* 24 Stunden und den täglichen Frequenzdifferenzen (Kolonne C). Fig. 8 zeigt die täglichen Abweichungen der kritischen Frequenz als Funktion der erdmagnetischen Aktivität an den vier Tagen.

Es ist natürlich, diesen Nacheffekt der erdmagnetischen Störungen sowie die höheren Winterwerte der kritischen Frequenzen und den Breiten-

effekt der F_2 -Schicht im Anschluss an Appleton¹⁾ als einen Temperatureffekt zu erklären.

Wie früher erwähnt, zeigen die kritischen Frequenzen der F_1 -Schicht einen mit der Theorie der Ionenproduktion übereinstimmenden Verlauf der Sommer- und Winterwerte, was darauf deutet, dass die F_1 -Ausbuchtung in die F -Schicht wenig tem-

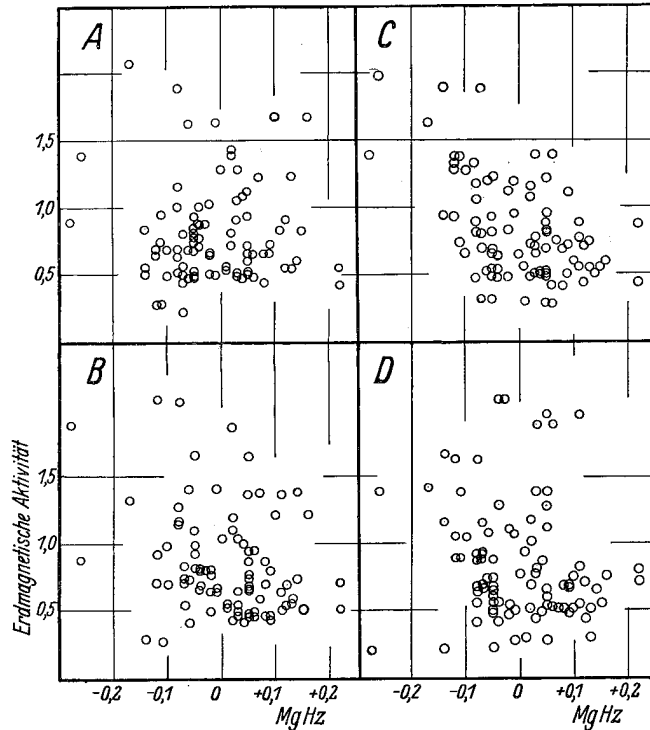


Fig. 8.

peraturempfindlich ist. Diese Annahme wird durch die viel kleineren täglichen Abweichungen der kritischen Frequenzen wegen erdmagnetischer Störungen gestützt.

Die jährliche Periode der erdmagnetischen Aktivität zeigt ein Minimum um Mittwinter, dennoch ist die durch die Nachwirkung der erdmagnetischen Störungen hervorgebrachte Reduktion der kritischen Frequenzen der F_2 -Schicht im Winter mehr als dreimal so gross als im Sommer. Dies stützt auch die Annahme einer verschiedenen vertikalen Ausdehnung der Atmosphäre über 200 km Höhe im Sommer und Winter. Die Winteratmosphäre ist den Störungen gegenüber mehr empfindlich als die Sommeratmosphäre.

Die systematische Änderung der Korrelationskoeffizienten vom Sommer zum Winter in den Kolonnen A bis D scheint auch reell zu sein, —

¹⁾ Nature, 135, 1935, 32.

die Wirkung der erdmagnetischen Störungen sind im Sommer über längere Zeiten deutlicher merkbar als im Winter.

Neben dieser Reduktion der kritischen Frequenzen der F -Schicht während und nach erdmagnetischen Störungen wird auch der Charakter der P' , f -Kurve nach erdmagnetischen Störungen geändert, indem der F_1 -Gipfel an Tagen nach erdmagnetischen Störungen viel stärker ausgeprägt ist als an ungestörten Tagen. Dies zeigt, dass sich der Gradient der Elektronendichte in der F_2 -Schicht geändert hat, was durch vertikale Ausdehnung der oberen Teil der F_2 -Schicht gedeutet werden kann. Beispiele dafür werden wir beim Durchgehen der Tagesbeobachtungen besprechen.

10. Änderungen des Reflexionsvermögens der ionisierten Schichten in Perioden erdmagnetischer Aktivität.

Das Reflexionsvermögen einer Schicht kann für eine gegebene Ladungsverteilung innerhalb der Schicht und eine bestimmte Wellenlänge aus der Dispersionsgleichung (7) abgeleitet werden. Das Reflexionsvermögen ist von zwei Faktoren bestimmt, der Elektronendichte und der Kollisionsfrequenz der freien Elektronen, Appleton nennt diese zwei Faktoren «electron limitation» bzw. «absorbition limitation». Eine einwandfreie Bestimmung des Reflexionsvermögens ist kompliziert, indem das Reflexionsvermögen von der Wellenlänge abhängig ist und ausserdem die zwei verschiedenen polarisierten Echo-Komponenten verschiedene Reflexionskoeffizienten haben. White¹⁾ hat das Reflexionsvermögen für verschiedene Wellenlängen gemessen, indem er einen polarisierten Empfänger, der kalibriert war, zur Trennung der zwei Echo-Komponenten verwandte, und konnte dadurch die zwei bestimmenden Faktoren, die «electron limitation» und «absorbition limitation», quantitativ nachweisen. Aus der «absorbition limitation» konnte die Grösse der Kollisionsfrequenz der freien Elektronen in der F_2 -Schicht abgeschätzt werden.

Das bei starken Nordlichtern und erdmagnetischen Störungen auftretende Ausfallen der Echos auf sämtlichen Wellenlängen wird durch auftretende «absorbition limitation» der Signale in einer Schicht

¹⁾ F. W. G. White, Proc. Phys. Soc. 46, 1934, 91 und F. W. G. White and Brown, Proc. Roy. Soc. 153, 1936, 639.

unterhalb der gewöhnlichen *E*-Schicht erklärt. Gewöhnlich fallen die Echos in Tromsö um *Mittag* nur aus, wenn sehr starke erdmagnetische Störungen auftreten. Dagegen sind erfahrungsgemäss die *Amplituden* der Echos bei den Mittagsbeobachtungen in Tromsö stark von den erdmagnetischen Störungen abhängig. Nach einer starken nächtlichen Störung fehlen gewöhnlich sämtliche Echos auf niedrigen Frequenzen von 1.5 bis 4.0 MgHz, d. h. die «normalen» *E*-Echos fehlen und die *P'*, *f*-Kurve fängt mit schwachen *F*-Echos an, oft sind diese Echos so schwach, dass man sie schwierig aus dem Störspiegel erkennen kann.

Aus den Registrierstreifen während der Monate Oktober und November 1935 sind die Intensitäten der Echos qualitativ abgeschätzt und in vier Stufen angegeben als *vl* («very low»), *l* («low»), *m* («medium») und *h* («high») und in Fig. 9 als Funktion der erdmagnetischen Aktivität eingezeichnet. Die *Abnahme* des Reflexionsvermögens mit zunehmender erdmagnetischer Aktivität ist ersichtlich.

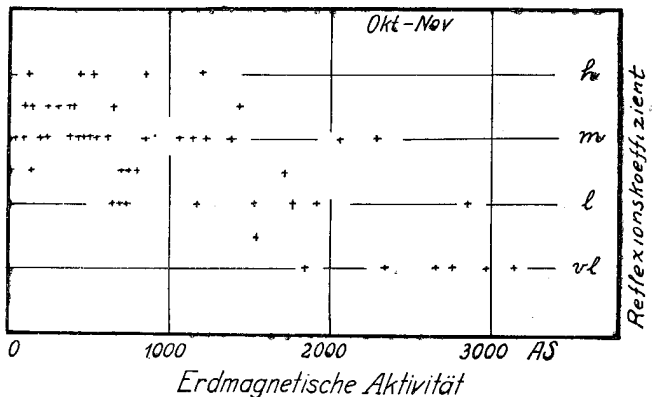


Fig. 9.

Eine Abschätzung der Echo-Amplituden während der übrigen Sommer- und Wintermonate zeigte eine ähnliche Abhängigkeit. Dieselbe starke Abhängigkeit des Reflexionsvermögens von der erdmagnetischen Aktivität wurde von Kreielsheimer und Stoffregen¹⁾ für die Wellenlängen 2 und 4 MgHz gefunden.

Während erdmagnetisch gestörter Perioden ist deshalb eine ionisierende Strahlung dauernd vorhanden, die Ionisation in Schichten unterhalb der normalen *E*-Schicht hervorruft. Wegen der höheren Dichte ist hier die Kollisionsfrequenz der freien

Elektronen gross, was eine starke allgemeine Absorption hervorruft.

Es ist möglich dass man durch Anwendung von ultrakurzen Wellen Reflexionen von dieser absorbierenden Schicht erreichen kann, indem die Kollisionsfrequenz für diese kurzen Wellen eine kleinere Dämpfung ausüben wird. Um Reflexionen zu bekommen muss indessen für ultrakurze Wellen eine sehr hohe Elektronendichte vorhanden sein. Dies ist vielleicht der Fall während sehr starker Nordlichter, die von dem Auftreten dieser absorbierenden Schicht begleitet sind. Der Aufbau von Instrumenten für Ultrakurzwellenversuche ist jetzt im Gang.

11. Auftreten einer dritten Echo-Komponente als kritische Frequenz.

Wie früher erwähnt (vgl. S. 7), ist nach Appletons Theorie der Ausbreitung der Radiowellen unter dem Einfluss des erdmagnetischen Feldes eine dreifache Ausspaltung der Signale zu erwarten, eine ordentliche und zwei ausserordentliche Komponenten. Tatsächlich werden nur zwei Komponenten den Gleichungen (11) und (12) entsprechend beobachtet. Das Ausfallen der dritten Komponente kann nach Mary Taylor¹⁾ theoretisch durch die grössere Absorption dieser Komponente in der Schicht erklärt werden.

Im Winter ist indessen in Tromsö mehrmals eine schwache dritte Komponente auf längeren Wellen im Vergleich zu den gewöhnlichen zwei kritischen Frequenzen der *F*₂-Schicht beobachtet worden, die als die normalerweise fehlende dritte Komponente des ausserordentlichen Strahles gedeutet werden muss. Tafel IV Nr. 12 a und b zeigen zwei Aufnahmen, die die schwache dritte Komponente der kritischen Frequenz der *F*₂-Schicht im Winter zeigen.

Die Frequenzdifferenzen zwischen der ordentlichen Komponente *f*₁ (die mittlere auf Tafel IV Nr. 12) und den zwei ausserordentlichen Komponenten *f*₂ und *f*₃ rechts und links, lassen sich aus den Gleichungen (11), (12) und (13) berechnen. Für eine Gyrofrequenz von *f*_H = 1.39 MgHz werden die Frequenzdifferenzen in diesem Falle *f*₂ - *f*₁ = 0.73 MgHz und *f*₁ - *f*₃ = 0.63 MgHz für einen gegebenen Wert von *f*₁ von 7 MgHz. Diese Abnahme

¹⁾ Wagner und Fränz: Elektr. Nachr. Techn. 12, 1935, 210.

¹⁾ Proc. Phys. Soc. 45, 261. 1935.

der letzten Frequenzdifferenz von 0.1 MgHz ist auf den Registrierungen auf Tafel IV Nr. 12 ersichtlich.

Die dreifache Aufspaltung der Echos tritt nur im Winter und nur während des Tages auf. Die drei kritischen Frequenzen kommen auf einer Anzahl der Mittagsregistrierungen von November bis März vor, und gewöhnlich nur während erdmagnetisch ruhiger Perioden. Wie Mary Taylor¹⁾ theoretisch nachgewiesen hat, ist es möglich, dass die dritte Komponente mit merklicher Intensität auftritt, wenn die Schicht eine schnelle Zunahme der Elektronendichte mit der Höhe am unteren Rande aufweist. Dies scheint auf höheren Breiten im Winter der Fall zu sein. Das Auftreten der dritten Komponente ist deshalb der im Winter auftretenden Kontraktion der F_2 -Schicht zuzuschreiben. Dieselbe Erklärung ist für den im Winter auftretenden Breiteneffekt der kritischen Frequenzen der F_2 -Schicht gegeben.

Für die F_1 -Schicht ist nur in einem Falle, am 28.5.1935, ein sehr schwacher Gipfel in der P' , f -Kurve beobachtet worden, der als die dritte Komponente der kritischen Frequenzen erklärt werden kann. Der Theorie entsprechend ist auch hier die Frequenzdifferenz $f_2 - f_1$ etwa 0.1 MgHz grösser als die Frequenzdifferenz $f_1 - f_3$.

12. Tagesbeobachtungen der kritischen Frequenzen zur Bestimmung der täglichen Änderungen der Ionisation.

Im folgenden wird eine Auswahl der Tagesbeobachtungen während eines Jahres analysiert. Die Reihenfolge ist nicht streng chronologisch, es ist zweckmässig die Tage mit einfacheren Verhältnissen der Ionosphäre zuerst zu behandeln. Wir werden deshalb mit den Tagesbeobachtungen im Mittwinter anfangen und die Änderungen der Ionosphäre durch Frühling und Herbst bis zum Sommer besprechen.

Wie früher erwähnt, ist das Auftreten von Nordlichtern und erdmagnetischen Störungen gewöhnlich von dem Ausfallen der Echos auf sämtlichen Wellenlängen begleitet. Für Tagesbeobachtungen wurden deshalb Tage gewählt, an denen wir nur *kleinere* Störungen erwarteten. Dabei wurde durch Aufzeichnung der erdmagnetischen Aktivitätskurve die bekannte Tendenz zur Wiederkehr

von gestörten oder ruhigeren Perioden nach 26—27 Tagen ausgenutzt. An einer Anzahl von Tagen konnten auf diese Weise an einer stark gestörten Stelle wie Tromsø die Änderungen der kritischen Frequenzen während *kleinerer* Störungen *kontinuierlich* verfolgt werden. Die Tagesbeobachtungen, die im folgenden behandelt werden, sind eine Auswahl einer grösseren Anzahl von Beobachtungstagen an welchen die mehreren wegen eintretender Störungen und Ausfallen der Echos, die Beobachtungen abgebrochen werden müssten.

Im folgenden sind die Ionisationsänderungen durch die maximale Elektronendichte aus den kritischen Frequenzen mittels (11) und (12) berechnet. Dies setzt voraus, dass die Echos als ordentlicher oder ausserordentlicher Strahl erkannt werden können. Für die F_1 - und F_2 -Echos lässt sich dies wenigstens am Tage durch Aufnahme der vollständigen P' , f -Kurve und Messung der Dublettaufspaltung der kritischen Frequenzen gewöhnlich mit Sicherheit entscheiden. Diese beträgt für Tromsø za. 0.7 MgHz. Bei Störungen und während der Nacht, wenn unregelmässige Schichtungen in der Ionosphäre auftreten, die die P' , f -Kurven oft sehr verwickelt machen, ist eine sichere Festlegung des ordentlichen und ausserordentlichen Strahles oft schwierig. Das Bild der Änderungen wird indessen bei Störungen durch eine mögliche Verwechslung der zwei Komponenten nicht wesentlich geändert.

Für die E -Schicht wird gewöhnlich nur die eine Komponente, die ordentliche, beobachtet, da die ausserordentliche in Übereinstimmung mit der Theorie stark absorbiert wird.¹⁾ Bei Störungen, wenn die E -Schicht eine Verstärkung der Ionisation zeigt und die kritische Frequenz oft einen hohen Wert erreicht, wird immer vorausgesetzt, dass die kritische Frequenz die des ordentlichen Strahles ist. In einigen Fällen ist auch eine schwächere Komponente bei höheren Frequenzen beobachtet worden, die als die ausserordentliche Komponente mit der der Theorie entsprechenden Frequenzaufspaltung identifiziert werden kann. Es ist deshalb sehr wahrscheinlich, dass die Einordnung der kritischen Frequenz der E -Schicht als ordentlicher Strahl sowohl bei ungestörtem wie gestörtem Zustand der Ionosphäre richtig ist.

Die Ergebnisse folgender Tagesbeobachtungen werden mitgeteilt:

²⁾ Loc. cit.

¹⁾ Ratcliffe und E. L. C. White, Phil. Mag., 16, 1933, 125.

- | | |
|---------------------|---------------------|
| 1. 29.—30. 1. 1936 | 10. 23.—24. 9. 1935 |
| 2. 20. 12. 1935 | 11. 22.—23. 3. 1935 |
| 23. 12. 1935 | 8.— 9. 4. 1935 |
| 24. 12. 1935 | 12. 2.— 3. 4. 1935 |
| 6. 1. 1936 | 13. 27.—28. 4. 1935 |
| 3. 5.— 6. 12. 1935 | 14. 7.— 8. 5. 1935 |
| 4. 21.—22. 1. 1936 | 15. 15.—16. 5. 1935 |
| 5. 19.—20. 11. 1935 | 17. 4.— 6. 6. 1935 |
| 6. 7.— 8. 11. 1935 | 18. 12.—13. 6. 1935 |
| 7. 4.— 5. 3. 1936 | 19. 4.— 6. 7. 1936 |
| 8. 23.—24. 10. 1935 | 20. 10.—11. 7. 1935 |
| 9. 9.—10. 10. 1935 | |

Die Zeiten sind im folgenden in *MEZ* angegeben.
Nr. 1. 29.—30. 1. 1936.

Der vorhergehende Tag war erdmagnetisch

ruhig, und während des Vormittages des ersten Tages ist es fortlaufend erdmagnetisch sehr ruhig. Eine Störung setzt um 16^h 30^m durch eine langsame Steigerung der Horizontalintensität, *H*, ein. Diese erdmagnetische Störung leitet ein Periode erdmagnetischer Aktivität mittlerer Stärke ein. Die Störung setzt mit mässigen Ausschlägen auf dem Magnetogram die ganze Nacht fort, und während des Tages am 30.1 zeigen die erdmagnetischen Registrierungen dauernd kleine Wellen und Ausbuchtungen.

Die Tabelle 6 gibt die Werte der kritischen Frequenzen und die entsprechenden Werte der maximalen Elektronendichten während der Zeit der Beobachtung. Eine vollständige Aufstellung

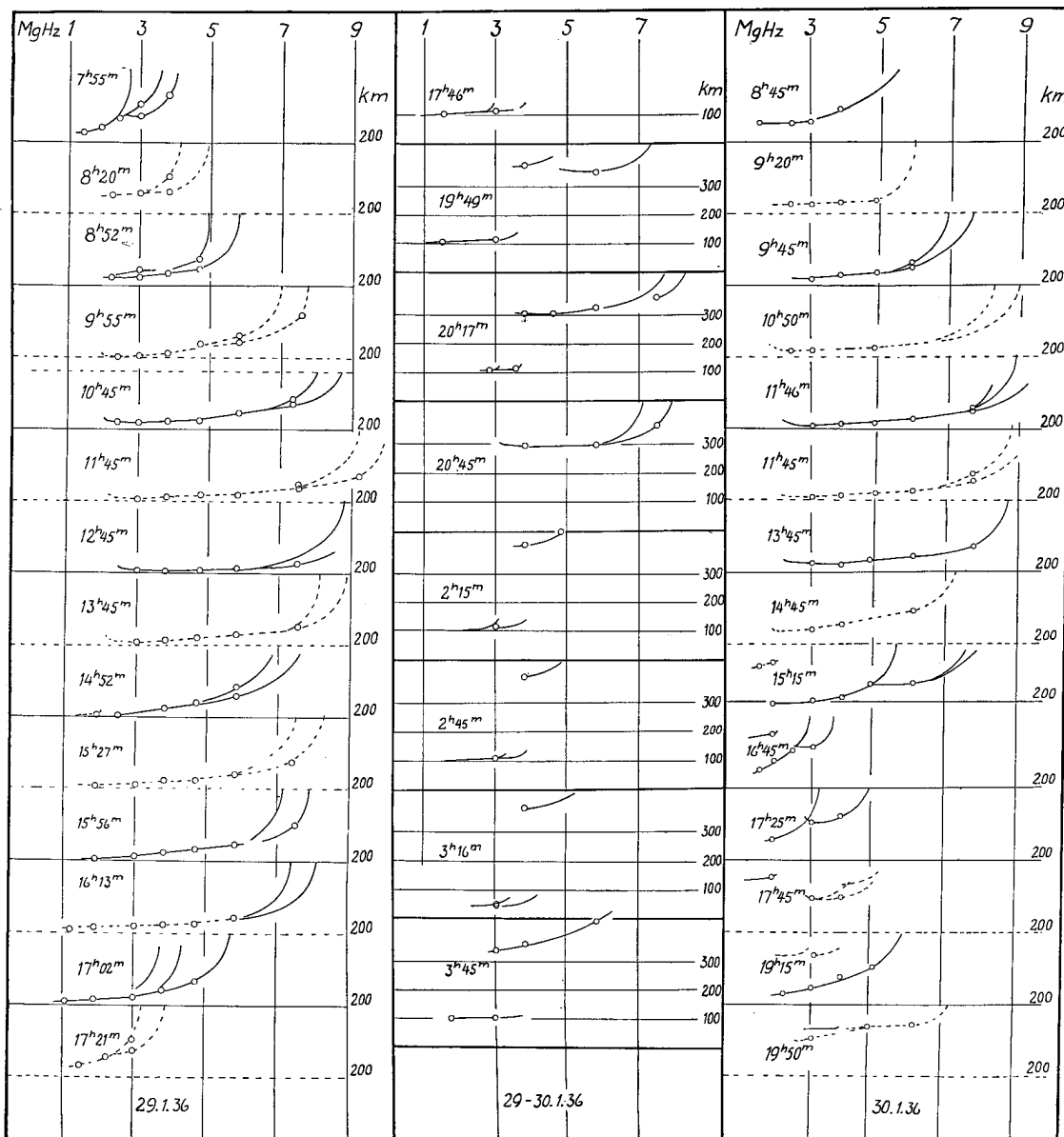


Fig. 10.

Tabelle 6.

MEZ	Kritische Frequenz in MgHz		10 ⁵ Elektronen/cm ³		Anm.
	ordentlicher Strahl	ausserordentlicher Strahl	ordentlicher Strahl	ausserordentlicher Strahl	
	<i>F</i> ₂	<i>E</i>	<i>F</i> ₂	<i>E</i>	
7h55m	2.75		3.60		neben den zwei kr. Frequenzen eine dritte bei 4.20 normale <i>P'</i> , <i>f</i> -Kurve. Verdoppelung der <i>P'</i> , <i>f</i> -Kurve, Schichtung tritt auf, normale <i>P'</i> , <i>f</i> -Kurve, kleiner Reflexionskoeff. —>— —>— normale <i>P'</i> , <i>f</i> -Kurve —>— —>— —>—
8 20	4.12		4.90		
8 43	4.95		5.80		
9 20	6.30		7.05		
9 50	7.00		7.75		
10 20	7.10		7.80		
10 45	8.03		8.75	12.04	
11 15	9.25 (2.10)	—	15.97 (0.82)	—	
11 45	9.25 (2.10)	—	15.97 (0.82)	—	
12 16	9.35 (2.10)	—	16.32 (0.82)	—	
12 44	8.80 (2.10)		14.46 (0.82)	—	
13 16	8.70	2.00	9.40	14.13 0.75	14.06
13 44	8.15	1.85	8.90	12.40 0.64	12.48
14 18	7.90	1.75	8.65	11.65 0.57	11.73
14 52	6.95	1.75	7.70	9.02 0.57	9.07
15 28	7.50		8.25	10.50	10.57
15 56	7.15		7.90	9.53	9.60
16 13	7.40		8.05	10.22	10.01
16 59	5.70			6.07	
17 21	3.22		3.93	1.94	1.87
17 46	Andeutung 2.95			1.62	
18 21		3.20		1.91	—>—
18 46		3.90	7.15	2.84	eine neue, sehr hohe <i>F</i> -Schicht tritt auf, dreifache <i>E</i> -Schicht, nur <i>E</i> -Echos,
19 24		3.35	7.20	2.10	
19 46		3.50	7.30	2.29	
20 17		7.65 3.05		1.74	
20 45		7.10	7.90	9.41	
21 15	nur schwache Andeutung von <i>E</i> -Echos				
21 49		3.80		2.70	
22 19	schwache Andeutung von <i>E</i> -Echos				
22 45		4.05		2.99	
23 15		5.30		5.24	
23 45		keine Echos			
0 17		5.00		4.67	schwache <i>E</i> -Echos, —>— schwache <i>E</i> -Echos, hohe <i>F</i> -Schicht, sehr schwach, —>— —>— —>— —>— stärkere Echos, —>— grosse Echo-Amplituden, —>— —>— —>— —>— —>— —>— —>— —>—
0 45		5.00		4.67	
1 15		keine Echos			
1 45		3.75		2.62	
2 15		3.15	5.60	1.85	
2 45		3.45		2.22	
3 16		3.45		2.22	
3 45		3.70	6.30	2.56	
4 15		4.50		3.78	
4 47		2.30	5.90	0.99	
5 15		3.00	6.60	1.68	
5 45		2.00	6.15	0.75	
6 17		2.20	5.40	0.90	4.04
6 45	4.40	2.30	5.05	3.62 0.99	3.45
7 16		keine Echos			normale <i>P'</i> , <i>f</i> -Kurve, —>—
7 46	Andeutung von Echos				
8 20			4.65		
8 45			5.50		

Kontraktions-
schicht, die
allmählich
sinkt

Tabelle 6. (Fortsetzung.)

MEZ	Kritische Frequenz in MgHz		10 ⁵ Elektronen/cm ³			Anm.
	ordentlicher Strahl	ausserordent- licher Strahl	ordentlicher Strahl	ausserordent- licher Strahl		
9h18m	<i>F</i> ₂	<i>E</i>	<i>F</i> ₂	<i>E</i>	<i>F</i> ₂	normale <i>P'</i> , <i>f</i> -Kurve
9 45	6.80		5.90		4.97	—>—
10 18	7.50		7.55		8.68	—>—
10 45	8.05		8.20		10.43	—>—
11 20	8.50	2.15	8.80		12.17	—>—
11 45	8.70	2.15	9.20		13.48	—>—
					14.13	
12 19	8.55				13.46	
12 42	8.60				13.80	
13 16			8.80		12.17	unregelmässige <i>P'</i> , <i>f</i> -Kurven,
13 43			8.45		11.12	—>—
14 13			7.50		8.55	—>—
14 45		2.30	7.00		7.33	—>— hohe <i>F</i> -Schicht bis 4.30 MgHz,
15 15			7.60		8.81	—>—
16 21						—>—
16 45	2.95		3.60	1.62	1.49	—>—
17 25			4.60		2.76	—>—
17 45		2.95		1.62		—>— und eine hohe <i>F</i> -Schicht bis > 5.0
18 35		3.30		2.03		MgHz,
19 15		2.90	5.50	1.57	4.22	hohe <i>F</i> -Schicht
19 50		2.90	6.85	1.57	7.22	

der ausgemessenen, kritischen Frequenzen in Tabellen wird nur für diese Tagesbeobachtungen und die Tagesbeobachtungen Nr. 7, 4.—5. 3. 1936, gegeben.

Die *P'*, *f*-Kurven, vgl. Fig. 10, am ersten Tage von 7^h 55^m bis 16^h 13^m sind regelmässig und einander ähnlich. Eine Ausnahme zeigt insofern die erste Registrierung um 7^h 55^m, als sie neben den zwei gewöhnlichen kritischen Frequenzen der *F*₂-Schicht bei 2.75 und 3.6 MgHz eine schwache kritische Frequenz bei 4.20 MgHz zeigt.

In der Zeit von 11^h 15^m bis 14^h 52^m ist der Sprung von der normalen *E*-Schicht zur *F*₂-Schicht deutlich sichtbar, und man kann die kritischen Frequenzen der normalen *E*-Schicht von 2.1 bis 1.75 MgHz verfolgen.

Fig. 11 zeigt den zeitlichen Verlauf der maximalen Elektronendichten in der *E*- und der *F*₂-Schicht. Die Zeiten des Sonnenunterganges für verschiedene Höhen sind in dieser und den folgenden Figuren als gestrichelte Kurven dargestellt, die Doppelkurve zeigt die Zeiten *mit* und *ohne* Berücksichtigung der Wirkung der atmosphärischen Refraktion. Wahrer lokaler Mittag (oder Mitternacht) ist mit einem vertikalen Pfeil angedeutet. Auf einer Anzahl der Figuren ist auch die Zeit des Sonnenunterganges in 250 km Höhe angedeutet.

Die kritischen Frequenzen der *F*₂-Schicht zeigen am 29.1 ein sekundäres Minimum um 14^h 52^m, dasselbe Minimum tritt zur selben Zeit am nachfolgenden Tage auf. Die Registrierung um 16^h 59^m zeigt eine Änderung der *P'*, *f*-Kurve, die kritischen Frequenzen haben stark abgenommen und ausserdem treten eine Reihe von kritischen Frequenzdurchbrüchen durch die Schicht auf, was auf Änderungen des Gradienten der Elektronendichte und auf Schichtungen deutet. Gleichzeitig hat man Sonnenuntergang im Niveau 200—220 km. Es treten dauernd nur *F*₂-Echos auf, was darauf deutet, dass die Änderungen der *P'*, *f*-Kurven nicht durch die erdmagnetischen Störungen verursacht werden, deren Anfang um 16^h 30^m durch die schwache Steigerung der Horizontalintensität zu erkennen ist.

Um 17^h 21^m und 18^h 21^m treten *E*-Echos von einer Schicht in der Höhe von 115—120 km auf. Die beiden Komponenten der kritischen Frequenzen mit der der Theorie entsprechenden Frequenzdifferenz treten auf. Die erdmagnetische Störung ist noch klein, von der Grösse 60—80 gamma in *H*. Neben den *E*-Echos sind schwache Spuren von einer hohen *F*-Schicht vorhanden. Diese hohe *F*-Schicht bildet sich immer deutlicher aus, und von 19^h 22^m bis 20^h 45^m kann diese Schicht dauernd verfolgt werden.

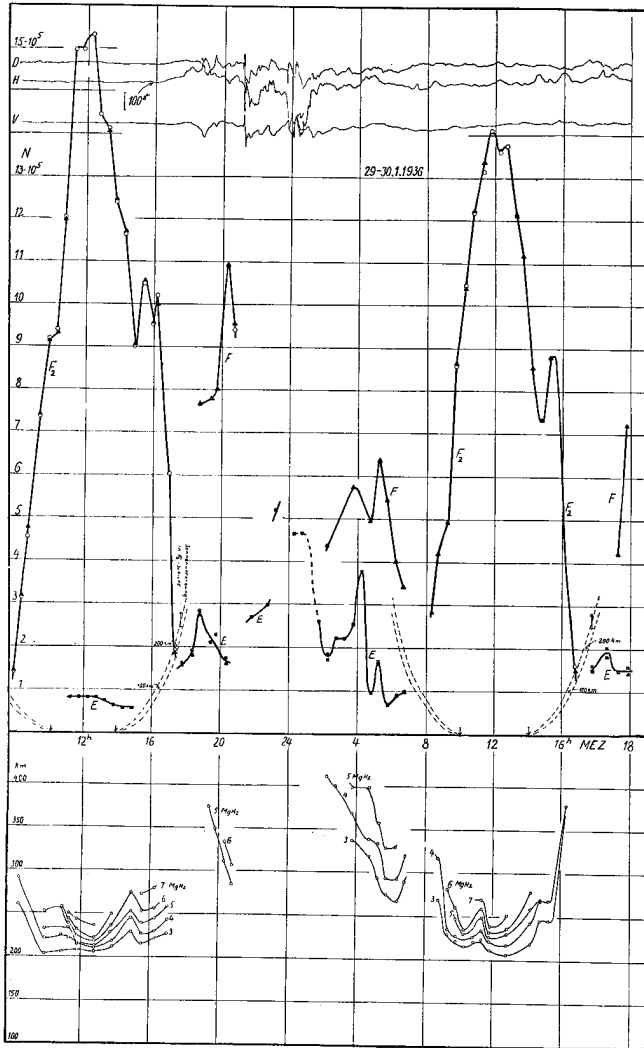


Fig. 11.

Auf der Registrierung um 20^h 17^m sind beide Komponenten der kritischen Frequenzen sichtbar, vgl. Tafel I Nr. 4. Die kritischen Frequenzen dieser Schicht ändern sich unregelmässig, die Höhen indessen *nehmen* stetig *ab*, — von einer äquivalenten Höhe von 380 km bis 280 km für die Frequenz 5 MgHz, vgl. Fig. 11 unten.

Um 21^h 15^m ist die erdmagnetische Störung durch plötzliches Pendeln in allen Komponenten charakterisiert, — in *H* mit einer Amplitude von za. 250 gamma. Die Echoregistrierungen zu derselben Zeit zeigen das Ausfallen sämtlicher Echos auf allen Wellenlängen. Die Störung ist scheinbar jetzt genügend gross geworden, um die früher erwähnte, tiefer liegende absorbierende Schicht auszubilden. Nach dieser Phase setzt die erdmagnetische Störung energisch fort und von 21^h 49^m bis 23^h 45^m treten nur *E*-Echos auf, teilweise zwei-

und dreifache Echos die das Forhandensein einer Schichtung wegen verschiedenen Reichweiten der ionisierenden Korpuskeln im *E*-Niveau zeigen. Der Maximalausschlag der Störung erscheint um 23^h 45^m und zur selben Zeit fallen sämtliche Echos auf allen Wellenlängen wieder aus. Dieser Maximalausschlag der Störung dauert bis 1^h 05^m, und während dieser Zeit treten nur sehr schwache *E*-Echos auf, deren kritische Frequenzen sich nicht bestimmen lassen, — die tiefer liegende absorbierende Schicht hat sich scheinbar wieder ausgebildet. Um 2^h ist die Hauptschwingung der Störung zu Ende und die Störung setzt als kleinere Ausbuchtungen auf dem Magnetogram während der Nacht und des nächsten Tages fort.

In dieser ruhigeren Periode der Nacht treten wieder die hohen *F*-Schichten auf, gleichzeitig erscheinen die *E*-Echos mit grösseren Intensitäten. Die Höhen dieser hohen *F*-Schichten nehmen mit der Zeit ab, von za. 400 km äquivalenter Höhe bis zu za. 300 km. Die kritischen Frequenzen ändern sich unregelmässig und die Anwesenheit der *E*-Echos zeigt, dass die ionisierende Wirkung der erdmagnetischen Störung noch vorhanden ist.

Um 8^h 45^m hat die *P'*, *f*-Kurve der *F*₂-Schicht wieder den normalen *Tages*charakter. Um 9^h 45^m und 10^h 18^m ist die dritte Komponente der kritischen Frequenzen der *F*₂-Schicht sichtbar. Um 14^h 15^m tauchen *E*-Echos in einer Höhe von 130 km auf, und diese sind während des Nachmittages dauernd anwesend. Um 15^h erscheint dasselbe kleine Nachmittagsminimum der kritischen Frequenzen wie am vorhergehenden Tage. Von 16^h 19^m bis 17^h 45^m tritt eine hohe *F*-Schicht auf, die dieselbe Tendenz zum Sinken im Verlauf der Zeit hat wie die hohe *F*-Schicht nach Sonnenuntergang am vorhergehenden Tage. Die *E*-Echos sind dauernd anwesend, auf der Registrierung um 18^h 35^m sind *nur* die *E*-Echos vorhanden. Um 19^h 15^m und 19^h 50^m tritt eine neue hohe *F*-Schicht auf mit den kritischen Frequenzen von 5.50 und 6.85 MgHz.

Diskussion der Änderungen der äquivalenten Höhen und der Ionisation während der Zeit der Registrierung.

In Fig. 10 ist eine Auswahl der registrierten *P'*, *f*-Kurven während der Zeit der Registrierung eingezeichnet. Aus den *P'*, *f*-Kurven sind die äquivalenten Höhen der Umkehrpunkte für die Frequenzen 3, 4, 5, 6, und 7 MgHz entnommen und in Fig. 11 unten eingezeichnet. Die Kurven

der äquivalenten Höhen von beiden Tagen zeigen einen ähnlichen Verlauf, ein Minimum der Höhen zwischen 12^h 30^m und 13^h 30^m wahre Lokalzeit, und zur gleichen Zeit tritt das Maximum der Elektronendichte der F_2 -Schicht auf. Das kleine Nachmittagsminimum um 15^h 30^m ist auch mit einem entsprechenden kleinen Maximum der Höhen begleitet. Diese regelmässige, gleichzeitige Änderungen der Ionisation und der Höhen während des Tages ist nach den quantitativen Berechnungen Chapman¹⁾ zu erwarten. Sie geht aus der Gleichung (21) hervor, die die Höhen der Maximalionisation als Funktion der Sonnenhöhe angibt.

Aus Fig. 11 ist ersichtlich, dass die F_2 -Ionisation bei Sonnenaufgang am Erdboden schon einen beträchtlichen Wert erreicht hat. Die plötzliche Steigerung der F_2 -Ionisation findet za. 90 Minuten nach Sonnenaufgang in 250 km Höhe statt. Ebenso hat die kritische Frequenz der F_2 -Schicht za. 30 Minuten nach Sonnenuntergang ihren Minimumwert erreicht.

Die Grösse des Rekombinationskoeffizienten in der F_2 -Schicht kann aus dem Abklingen der Ionisationskurve auf folgende Weise abgeschätzt werden. Nach Sonnenuntergang hat bei ungestörten Verhältnissen die Ionenproduktion aufgehört, und die Schichten werden durch Rekombination neutralisiert. Die Neutralisierung ist durch die Rekombinationsgleichung $\frac{dN}{dt} = -\alpha N^2$ gegeben, oder in folgender, für diesen Zweck geeigneter Form:

$$\frac{1}{N_1} - \frac{1}{N_2} = -\alpha \Delta t \quad (26)$$

hier ist N_1 die Elektronendichte im Anfang und N_2 nach Δt Sekunden, α ist die Rekombinationskoeffizient.

Aus Fig. 11 ist ersichtlich, dass die Elektronendichte der F_2 -Schicht nach 16^h sehr schnell abnimmt. Nehmen wir an, dass die ionisierende Wirkung der Sonnenstrahlen nach 16^h zu vernachlässigen ist, kann der Rekombinationskoeffizient durch Formel (26) bestimmt werden. Wir wählen folgende Zahlenwerte:

29. 1. 1936.

$$\begin{aligned} 16^h 13^m : N &= 10.10 \cdot 10^5 \\ 16^h 59^m : N &= 6.07 \cdot 10^5 \quad \Delta t = 2760 \text{ sek} \\ 17^h 21^m : N &= 1.90 \cdot 10^5 \quad \Delta t = 1320 \text{ sek} \end{aligned}$$

Im ersten Zeitintervall bekommt man:

$$\alpha = 2.4 \cdot 10^{-10}$$

und im zweiten Zeitintervall:

$$\alpha = 27.3 \cdot 10^{-10}$$

30. 1. 1936.

$$\begin{aligned} 15^h 15^m : N &= 8.81 \cdot 10^5 \\ 16^h 45^m : N &= 1.55 \cdot 10^5 \quad \Delta t = 5400 \text{ sek} \\ \alpha &= 9.9 \cdot 10^{-10} \end{aligned}$$

Obwohl die Anwendung der Rekombinationsformel, wie später gezeigt werden soll, auf diese Weise streng genommen nicht zulässig ist, können die berechneten Werte des Rekombinationskoeffizienten wenigstens als ein relatives Mass für die wirkliche Änderung des Rekombinationskoeffizienten angesehen werden.

Neben der am Tage normal auftretenden F_2 -Schicht in za. 250 km äquivalenter Höhe treten an den beiden Tagen nach Sonnenuntergang um 20^h Schichten in 280—400 km äquivalenter Höhe auf. Diese Schichten, die auch bei den späteren Tagesbeobachtungen besprochen werden sollen, werden als *Kontraktionsschichten*¹⁾ bezeichnet. Nach Aufhören der ionisierenden Wirkung der Sonnenstrahlen ist bei ungestörten Verhältnissen eine Steigerung der Ionisation unmöglich. Bei der nächtlichen Temperaturabnahme im Winter kann indessen eine Verstärkung der *Maximalionisation* durch Kontraktion der höchsten Atmosphärenschichten hervorgerufen werden. Bei den täglichen Änderungen der Ionisation und der äquivalenten Höhen ist eine Abnahme der Ionisation mit sinkender Sonne von einer Höhenzunahme der Schichten begleitet. Dies geht ohne weiteres aus der Gleichung (21) hervor. Zu diesem Effekt kommt die Wirkung der Rekombination, die wegen der Druckabhängigkeit des Rekombinationskoeffizienten im unteren Teil der Schicht wirksamer ist als im oberen und eine Verschiebung der Schicht nach grösseren Höhen hervorruft.

Die nach Sonnenuntergang auftretenden Kontraktionsschichten in grösseren Höhen zeigen indessen eine *Abnahme* der äquivalenten Höhen mit der Zeit. Die Schicht verschiebt sich als *ganzes* nach kleineren Höhen unabhängig von den Änderungen der kritischen Frequenzen. Diese Verschiebung geht aus Fig. 11 um 20^h deutlich hervor.

¹⁾ Loc. cit.

¹⁾ Harang, Terr. mag. 41, 143, 1936.

Der Einbruch der erdmagnetischen Störung ist wie gewöhnlich von dem Auftreten von E -Echos begleitet. Zu den zwei Zeitpunkten grösster Störung fallen sämtliche Echos aus.

Von 2^h ab, nach der Hauptschwingung der Störung, tritt wieder die hohe F -Schicht auf in einer äquivalenten Höhe von 300—400 km. Die Schicht verschiebt sich mit der Zeit nach kleineren Höhen und geht bei Sonnenaufgang kontinuierlich in die normale F_2 -Schicht über.

Wie früher erwähnt, gibt es zwischen den kritischen Frequenzen der F_2 -Schicht und den erdmagnetischen Störungen eine negative Korrelation, die als ein Temperatureffekt gedeutet werden muss, — in Zeiten stärkerer erdmagnetischer Aktivität wird die F_2 -Schicht expandiert und die kritischen Frequenzen nehmen ab. Das Auftreten der hohen F -Schichten nach der Störung kann als Einzelbeispiel dieses Effektes gedeutet werden. Während der Periode stärkster Störung wird die Materie durch Steigerung der Temperatur in die Höhe getrieben, durch Abkühlung nach der Störung wird die Atmosphäre zusammengepresst und Schichten hoher Maximalionisation werden gebildet. Wegen dauernder Temperaturabnahme der Atmosphäre werden diese Schichten dauernd sinken. Wir werden später Beispiele durchgehen, die die Entwicklung dieser Schichten durchsichtiger zeigen.

Wie früher erwähnt, waren die dem 29. 1. vorhergehenden 24 Stunden erdmagnetisch ungestört, und die Mittagswerte der Maximalionisation am 29. 1. zeigen einen sehr hohen Wert. Die Abnahme des Mittagswertes der Maximalionisation der F_2 -Schicht am 30. 1. kann als eine Nachwirkung der nächtlichen Störung angesehen werden, die die Atmosphäre durch Temperatursteigerung aufgelockert hat, die Dichte nimmt ab und gleichzeitig die Produktion von Elektronen durch die ionisierende Wirkung der Sonnenstrahlen.

Die normale E -Schicht tritt am 29. 1. auf und verschwindet bei Sonnenuntergang. Am 30. 1. wurden keine E -Echos registriert, wahrscheinlich wegen starker Absorption in unteren Schichten.

Nr. 2. 20. 12., 23. 12., 24. 12. 1935 und 6. 1. 1936.

An diesen vier Tagen wurden, nur tagsüber, Beobachtungen gemacht, um die Verhältnisse bei tiefstem Stand der Sonne im Jahre zu untersuchen. In Fig. 12 sind die Kurven maximaler Elektronendichte angegeben, die Zeiten des Sonnenunterganges für verschiedene Höhen sind als gestrichelte Kur-

ven dargestellt, die Doppelkurve zeigt die Zeit des Sonnenunterganges mit und ohne Berücksichtigung der Wirkung der Refraktion. Der Sonnenuntergang für 250 km Höhe ist mit einem Pfeil bezeichnet.

20. 12. Nur die F_2 -Schicht tritt von 8^h 34^m bis 14^h 46^m auf. Eine erdmagnetische Störung setzt um 15^h ein, die von dem Auftreten der E -Echos begleitet wird. Wie aus Fig. 12 ersichtlich ist, hat die F_2 -Schicht ihr Minimum kurz nach Sonnenuntergang in 250 km Höhe, — dies ist bedeutend früher als am 23. 12. und 6. 1.

23. 12. Die erdmagnetischen Registrierungen sind vollkommen störungsfrei. Es wurden von 9^h 44^m bis 17^h 55^m Registrierungen aufgenommen. Nur die F_2 -Schicht tritt auf. Aus dem Abklingen der Ionisationskurve nach Sonnenuntergang kann der Rekombinationskoeffizient nach Formel (26) bestimmt werden. Wir wählen folgende zwei Punkte:

$$\begin{aligned} 15^h 23^m : N &= 4.00 \cdot 10^5 \\ 16^h 24^m : N &= 2.03 \cdot 10^5 \quad \Delta t = 3660 \text{ sek} \\ \alpha &= 6.6 \cdot 10^{-10} \end{aligned}$$

24. 12. Die erdmagnetischen Registrierungen sind vollkommen störungsfrei. Das Auftreten der Echos wurde von 8^h 19^m bis 11^h 45^m registriert. Nur die F_2 -Schicht tritt auf. Auffallend für diesen und den vorhergehenden Tag ist der niedrige Wert der kritischen Frequenzen am Mittag während dieser vollkommen störungsfreien Periode.

6. 1. 1936. Die erdmagnetischen Registrierungen sind vollkommen störungsfrei. Die auftretenden Echos wurden von 8^h 32^m bis 19^h 46^m registriert, nur die F_2 -Schicht tritt auf. Der Rekombinationskoeffizient wurde aus dem Abklingen der Ionisationskurve nach Sonnenuntergang bestimmt, folgende Werte wurden benutzt:

$$\begin{aligned} 15^h 30^m : N &= 6.13 \cdot 10^5 \\ 17^h 05^m : N &= 2.15 \cdot 10^5 \quad \Delta t = 5700 \text{ sek} \\ \alpha &= 5.3 \cdot 10^{-10} \end{aligned}$$

Die Registrierungen zwischen 17^h und 19^h 46^m zeigen interessante Änderungen der äquivalenten Höhen und Auftreten von Kontraktionsschichten. Da die erdmagnetischen Registrierungen vollkommen störungsfrei sind, müssen diese Änderungen nur durch vertikale Verschiebungen der Luftmassen vom Tag- zum Nachtzustand verursacht sein.

In Fig. 13 ist eine Auswahl von P' , f -Kurven eingezeichnet, die das Auftreten der F -Echos nach

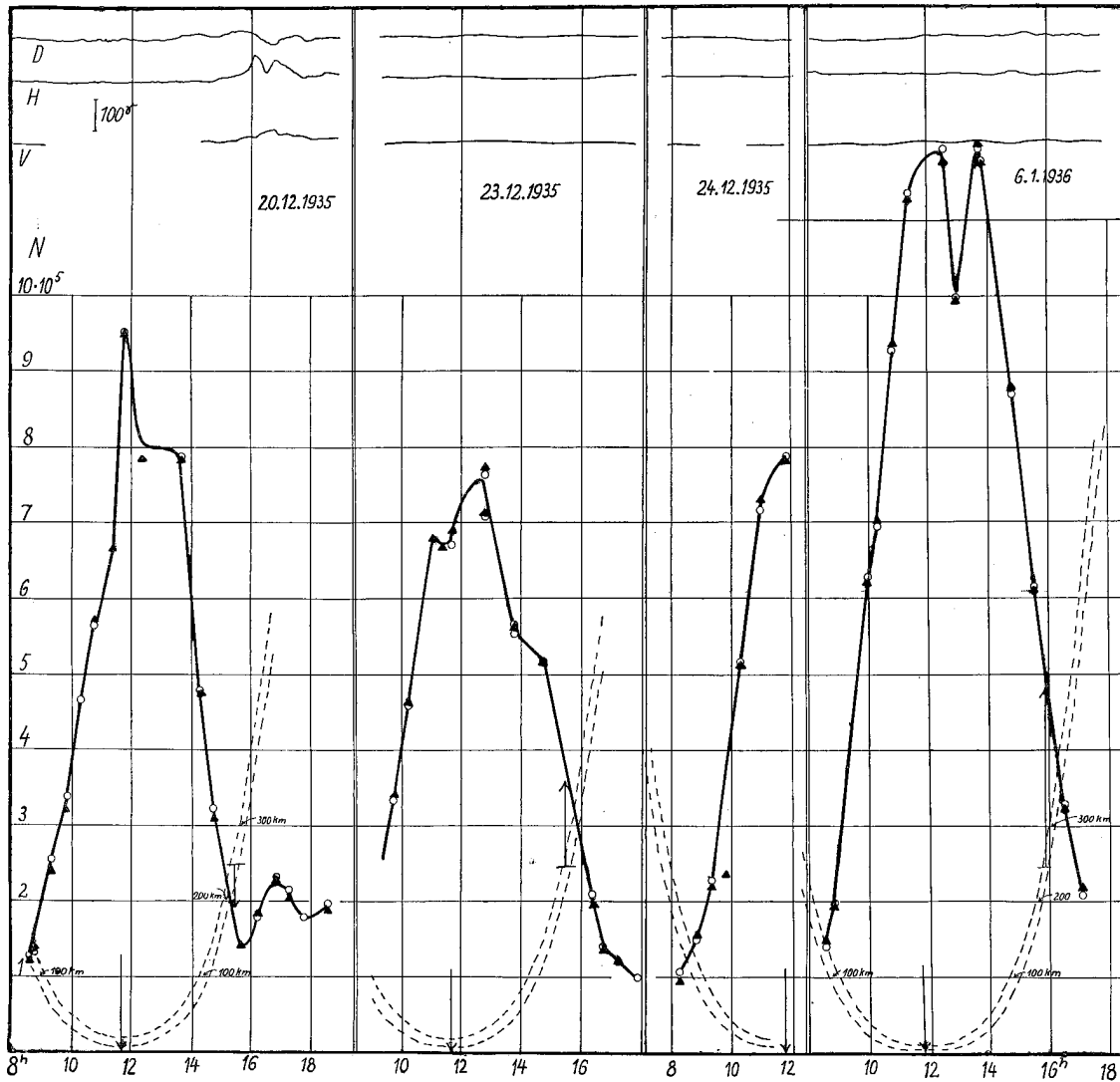


Fig. 12.

Sonnenuntergang zeigen. Die Registrierung um 17^h 05^m vgl. Tafel I Nr. 10 zeigt die komplizierten Echos mit vielen kritischen Frequenzdurchbrüchen, die kurz nach Sonnenuntergang in 250 km Höhe gewöhnlich auftreten, und die auf Änderungen des Gradienten der Elektronendichte und auf Auftreten von Schichtungen in der normalen F_2 -Schicht deuten. Dieselbe normale F_2 -Schicht mit noch verwickelterer Struktur der Echos ist auf den Registrierungen um 17^h 37^m und 18^h 05^m sichtbar. Die äquivalenten Höhen nehmen jetzt schnell zu. Auf der Registrierung um 18^h 33^m und den zwei nachfolgenden ist die normale F_2 -Schicht verschwunden, und eine neue Schicht in einer Höhe von 350—400 km tritt auf, vgl. Tafel I Nr. 11, gleichzeitig erscheint eine tiefere in einer Höhe von 160—190 km mit deutlichem kritischen Frequenzsprung von der

tiefere zu der höheren Schicht. Diese zwei Schichten sind auf den Registrierungen um 19^h 05^m und 19^h 46^m dauernd sichtbar. Fig. 13 zeigt die P' , f -Kurven und Tabelle 7 die äquivalenten Höhen der Umkehrpunkte für die Frequenzen 2, 3 und 4 MgHz.

Tabelle 7.
Äquivalente Höhen.

	2 MgHz	3 MgHz	4 MgHz	
17 ^h 05 ^m	258	287	364	normale F_2 -Schicht
17 ^h 37 ^m	290			
18 ^h 05 ^m	(350)			
18 ^h 33 ^m		358	400	Kontraktions-schicht
19 ^h 05 ^m		390	440	
19 ^h 46 ^m	304	335	376	

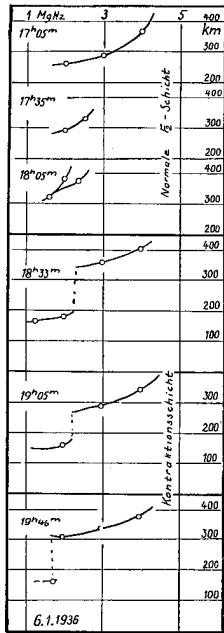


Fig. 13.

Die Zunahme der Höhen der normalen F_2 -Schicht ist die gewöhnliche am Nachmittage und wird durch die abnehmende Sonnenhöhe und schnellere Rekombination an der unteren Grenze der Schicht erklärt. Die Höhen der Kontraktionsschicht nehmen erst zu, dann schnell ab. Die tiefere Schicht in za. 160 km Höhe muss wohl auch als eine Kontraktionsschicht aufgefasst werden. Die äquivalenten Höhen dieser Schicht sind annähernd konstant während der Zeit, die kritische Frequenz nimmt etwas ab.

Die Zunahme der Höhen der normalen F_2 -Schicht ist die gewöhnliche am Nachmittage und wird durch die abnehmende Sonnenhöhe und schnellere Rekombination an der unteren Grenze der Schicht erklärt. Die Höhen der Kontraktionsschicht nehmen erst zu, dann schnell ab. Die tiefere Schicht in za. 160 km Höhe muss wohl auch als eine Kontraktionsschicht aufgefasst werden. Die äquivalenten Höhen dieser Schicht sind annähernd konstant während der Zeit, die kritische Frequenz nimmt etwas ab.

Nr. 3. 5.—6. 12. 1935. Während der Zeit der Beobachtung tritt eine kleine erdmagnetische Störung um 21^h—23^h ein. Die Störung war durch eine Steigerung der Horizontalintensität charakterisiert im Gegensatz zu dem gewöhnlichen Verlauf der

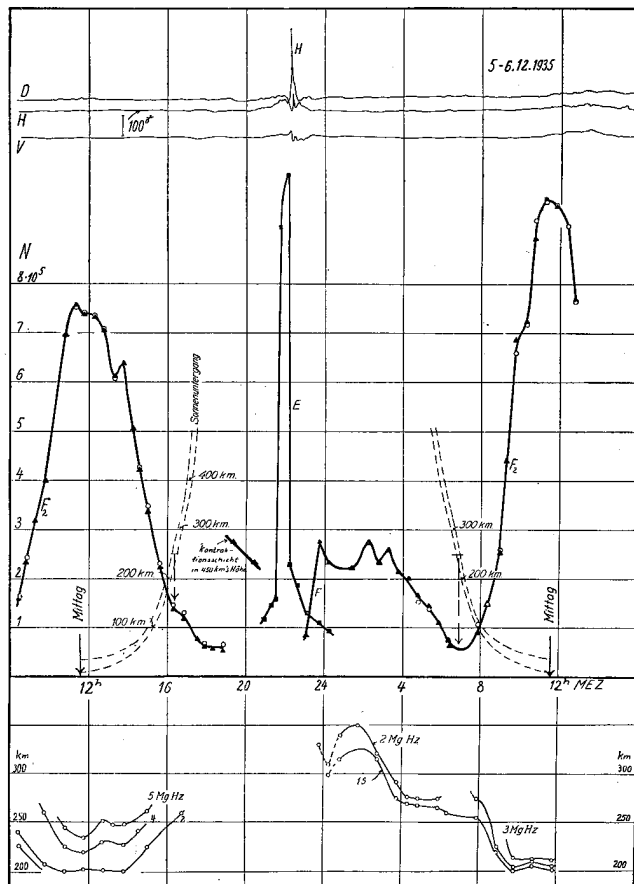


Fig. 14.

Nachtstörungen, die fast immer eine Abnahme der Horizontalintensität aufweisen.

Fig. 14 zeigt den Verlauf der maximalen Elektronendichten in den E - und F -Schichten während der Zeit der Beobachtung. Die P' , f -Kurven sind normal bis 16^h 50^m was der Zeit des Sonnenunterganges in 300 km Höhe entspricht, die Echos werden dann sehr schwach. Keine normalen Tagesecho der E -Schicht traten während der Zeit der Beobachtung auf.

Im Zeitintervall 19^h 19^m—20^h 25^m tritt eine Schicht in einer Höhe von 450—500 km auf. Die Amplituden der Echos sind schwach, vgl. Tafel I Nr. 5, und die kritische Frequenz nicht scharf ausgeprägt, nimmt aber von za. 4.7 bis zu 4.3 MgHz im Zeitintervall ab. Gleichzeitig sinkt die Schicht als ganzes za. 55 km.

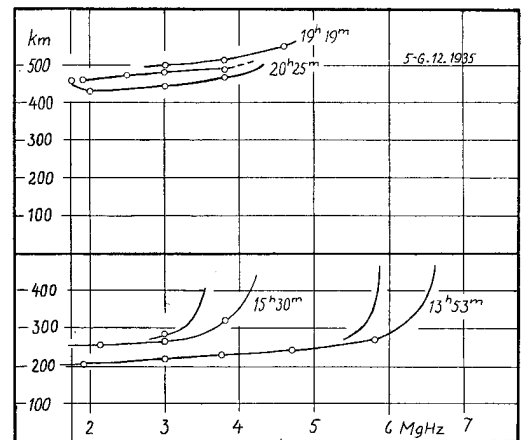


Fig. 15.

Als Vergleich sind in Fig. 15 die P' , f -Kurven der normalen F_2 -Schicht um 15^h 35^m und 13^h 53^m eingezeichnet. Sie zeigen, wie früher diskutiert, im Laufe des Nachmittages eine Verschiebung nach grösseren Höhen. Die hohe Schicht kann als eine Kontraktionsschicht angesehen werden, die sich nach Sonnenuntergang gebildet hat und deren Verschiebung als ganzes nach kleineren Höhen als Wirkung der dauernden Kontraktion der Atmosphäre anzusehen ist.

Während der erdmagnetischen Störung treten nur die E -Echos auf die eine maximale kritische Frequenz von 7.4 MgHz erreichen. Sofort nach dem Abklingen der Hauptschwingung der Störung und nach dem Verschwinden der E -Echos tritt die F -Schicht auf und ist jetzt dauernd während der ganzen Nacht anwesend. Die kritischen Frequenzen variieren unregelmässig, die äquivalenten Höhen

für die verschiedenen Frequenzen, vgl. Fig. 14 unten, nehmen aber stetig ab. Diese neugebildete F -Schicht muss als eine Nachwirkung der erdmagnetischen Störung angesehen werden, die die Materie durch Aufwärmung in die Höhe getrieben hat und die jetzt langsam abnimmt und Anlass zur Schichtbildung gibt. Die Echos zeigen während der Nacht eine starke Streuung, Tafel I, Nr. 6 und 7 zeigt eine Registrierung um 5^h 20^m kurz vor Sonnenaufgang in 250 km Höhe im Vergleich zu einer um 11^h 45^m aufgenommenen Registrierung.

Nr. 4. 21.—22. 1. 1936. Die erdmagnetischen Registrierungen zeigten vor und nach diesem Tage Störungen mittlerer Grösse. Der Vormittag am 21. 1. war völlig störungsfrei. Um 18^h setzt eine Störung durch langsame Steigerung der Horizontalintensität ein. Von 20^h bis 4^h ist die Störung bedeutend, und klingt während des Vormittages des 22. 1. ab, dieser Tag ist jedoch dauernd etwas gestört.

Die Echo-Registrierungen zeigen die F_2 -Schicht mit normalen P', f -Kurven von 8^h 32^m bis 14^h 57^m. Um 10^h 36^m und 11^h 30^m taucht die normale E -Schicht zum ersten Male im neuen Jahre auf mit kritischen Frequenzen bei 1.65 und 1.70 MgHz. Die Registrierung um 16^h 08^m zeigt starke Streuung der Echos und Unregelmässigkeiten, scheinbar eine Wirkung von Sonnenuntergang und darauf folgenden Schichtungen der Atmosphäre. Um 16^h 34^m tauchen die E -Echos mit beiden Komponenten der kritischen Frequenzen auf, und sind von jetzt ab eine Zeit lang dauernd vorhanden. Das Auftreten der Nordlichter an dem wolkenlosen Himmel wurde gleichzeitig überwacht. Das erste Nordlicht war eine schwache Krone, die sich um 19^h 30^m bildete und die von dem Ausfallen sämtlicher Echos begleitet war. Gleichzeitig setzt die erdmagnetische Störung ein. Die Hauptschwingung der Störung ist von 20^h bis 23^h und wird von Nordlichtern am Nordhimmel und zweitweise schwache Kronen begleitet. Die E -Echos sind während dieser Zeit dauernd vorhanden und reichen bis 7.5 MgHz als kritische Frequenz. Die registrierten P', f -Kurven sind sehr kompliziert, sie bestehen aus Echos mehrerer Schichten, die schnell auftauchen und wieder schnell verschwinden. Die Amplituden der Echos zeigen auf dem Fluoreszenzschirm des Kathodenscillographen sehr lebhaftere Variationen. Tafel I Nr. 12 a, b, c und d zeigen Aufnahmen von 20^h 38^m bis 21^h 08^m registriert, die die komplizierte Struktur

der P', f -Kurven zeigen. Eine Reihe von E -Schichten im Höhenintervall 108—200 km sind sichtbar, ausserdem treten gestreute Reflexionen von einer hohen Schicht, einer F -Schicht, bei 3.5 bis 5.0 MgHz auf. Wegen der komplizierten Struktur der Echos ist in Fig. 16 die Variation der Elektronendichte als gestrichelte Kurve angegeben, deren einzelne Punkte aus den Maximalwerten der kritischen Frequenzen berechnet sind.

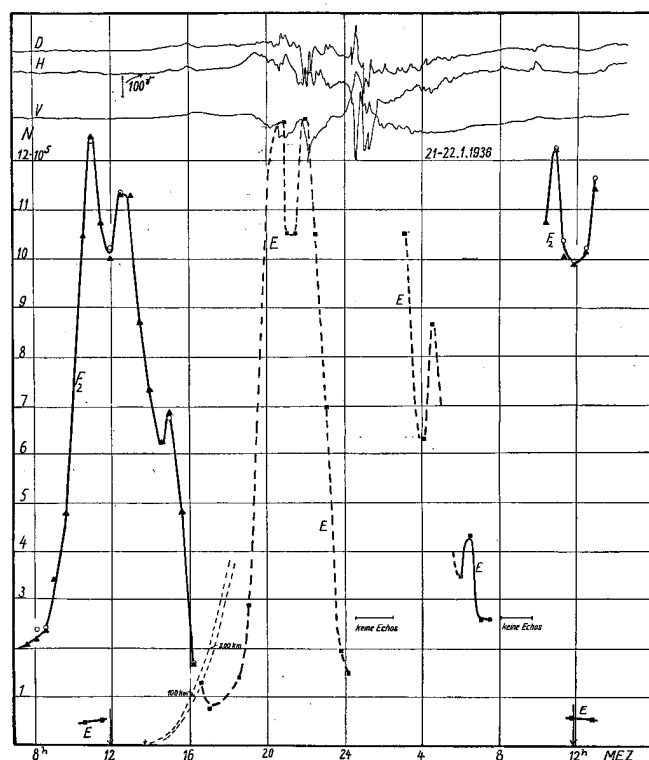


Fig. 16.

Nach der Hauptschwingung der Störung tritt eine ruhige Periode um 23^h ein. Gleichzeitig taucht eine hohe F -Schicht auf, die E -Echos sind dauernd vorhanden. Fig. 17 zeigt die registrierten P', f -Kurven um 23^h 02^m, 23^h 32^m und 24^h 05^m, vgl. Tafel II Nr. 1 a und b. Die Registrierung um 23^h 02^m zeigt eine auffallende P', f -Kurve der E -Schicht. Die zwei ersten kritischen Frequenzen bei 4.2 und 4.85 MgHz sind scheinbar der ordentliche und ausserordentliche Strahl. Neben diesen zwei Komponenten tritt eine dritte mit einer kritischen Frequenz bei 6.1 MgHz auf. Die Krümmung der P', f -Kurve der ausserordentlichen Komponente muss als selektive Gruppenverzögerung des ausserordentlichen Strahles aufgefasst werden, — Beispiele solcher Krümmung werden wir oft für die P', f -Kurven der F_2 -Echos sehen.

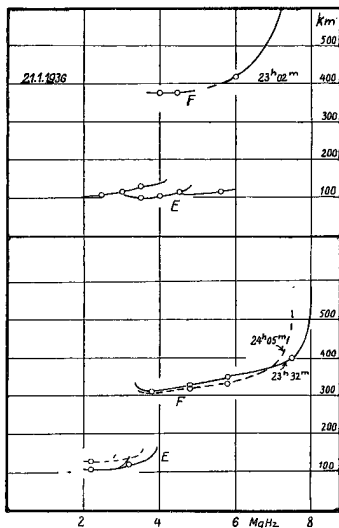


Fig. 17.

Die hohe F -Schicht muss als eine Kontraktionsschicht aufgefasst werden. Wie an den früheren Beispielen wird hier angenommen, dass die erdmagnetische Störung die höchsten Atmosphärenschichten aufgelockert hat. Nach der Störung sinkt der obere Teil der Atmosphäre langsam herunter und Kontraktionsschichten werden gebildet.

Die kritische Frequenz der F -Schicht zu den drei Zeiten der Registrierung ist 7.2, 8.0 und 7.5 MgHz. Die äquivalenten Höhen nehmen mit der Zeit ab, die Schicht sinkt als ganzes. Die kritischen Frequenzen der E -Schicht nehmen gleichzeitig ab, die äquivalenten Höhen dieser Schicht nehmen aber mit der Zeit zu. Die Höhenverschiebung der E -Schicht muss als Wirkung der in der Höhe der E -Schicht auftretenden sehr schnellen Rekombination angesehen werden, die an der unteren Grenze besonders wirksam ist und die die Schicht von unten neutralisiert.

Um 0^h 25^m setzt eine neue, grössere Störung ein, die scheinbar genügend gross ist, um die tiefer liegende absorbierende Schicht auszubilden, — sämtliche Echos fallen in der Zeit von 0^h 33^m—2^h 40^m aus. Um 3^h 00^m treten wieder die E -Echos auf und sind von jetzt an während der Nacht dauernd vorhanden. In der Zeit von 8^h 05^m—9^h 37^m fallen wieder alle Echos aus, diesmal scheinbar ohne sehr energische Störung, erst um 10^h 07^m tritt die normale P' , f -Kurve der F_2 -Schicht auf. Die normale E -Schicht tritt um 11^h 44^m und 12^h 48^m auf mit kritischen Frequenzen bei 1.76 und 1.72 MgHz.

Die Ionisationskurve am 21. 1. nimmt sehr schnell von 15^h bis 16^h ab, obwohl der Sonnenuntergang zu diesen Zeiten in den Höhen von 30 bis 100 km liegt. Nehmen wir an, dass die ionisierende Wirkung der Sonnenstrahlen während dieser Zeit zu vernachlässigen ist, so kann der Rekombinationskoeffizient aus dem Abklingen der Ionisationskurve bestimmt werden.

Wir benutzen folgende Zahlenwerte:

$$14^h 47^m : N = 6.80 \cdot 10^5$$

$$16^h 06^m : N = 1.67 \cdot 10^5 \quad \Delta t = 4140 \text{ sek.}$$

$$\alpha = 10.9 \cdot 10^{-10}$$

Nr. 5. 19.—20. 11. 1935. Die erdmagnetische Aktivität während der Zeit der Beobachtung war von mittlerer Grösse.

Die Echo-Registrierungen am 19. 11. zeigen normale P' , f -Kurven von 8^h 27^m bis 8^h 33^m. Die kleine erdmagnetische Störung um 9^h 20^m ist von dem Ausfallen sämtlicher Echos begleitet. Die ruhige Periode um 11^h—12^h zeigt besonders hohe Werte der F_2 -Ionisation. Der Einbruch von neuen Störungen um 13^h ist von unregelmässigen P' , f -Kurven begleitet, viel Streuung der Echos und starke Absorption. Während des Nachmittages von 14^h ab, sind die P' , f -Kurven sehr kompliziert sowohl wegen eintretenden Sonnenunterganges als auch wegen der Nachwirkung erdmagnetischer Störungen. Die äquivalenten Höhen der F_2 -Schicht nehmen, wie gewöhnlich nach 13^h, regelmässig zu. Die Höhen und kritischen Frequenzen von 16^h 52^m bis 21^h variieren unregelmässig. Die Störung während der Zeit von 20^h 30^m—1^h 47^m ist von dem Auftreten der E -Echos und dem Ausfallen der F -Echos begleitet. Die Änderungen der kritischen Frequenzen zeigen einen verwickelten Verlauf. Während der Hauptschwingung der Störung von 22^h bis 24^h reichen die kritischen Frequenzen der E -Echos nicht über 5 MgHz. Es ist wahrscheinlich, dass dies nicht reell ist, die Echos waren, wahrscheinlich wegen Absorption in der tiefer liegenden absorbierenden Schicht, sehr geschwächt und es ist wahrscheinlich, dass die kritischen Frequenzen viel höher lagen.

Die äquivalenten Höhen der E -Schicht zeigen interessante Änderungen während der Hauptschwingung der Störung. Zur Zeit des Maximalausschlages in der Horizontalintensität um 23^h 18^m zeigen die Höhen der Umkehrpunkte ihren kleinsten Wert, 93 und 96 km für 3 und 4 MgHz. Dies sind die niedrigsten Werte der äquivalenten Höhen die während der Zeit der Beobachtung ausgemessen sind, vgl. Tafel II Nr. 3.

Nach der Hauptschwingung der Störung treten wieder F -Echos auf. Diese F -Schicht muss als eine Kontraktionsschicht aufgefasst werden, sie geht bei Sonnenaufgang kontinuierlich in die normale F_2 -Schicht über. Tafel II Nr. 4 zeigt eine Registrierung dieser Kontraktionsschicht um 3^h 45^m.

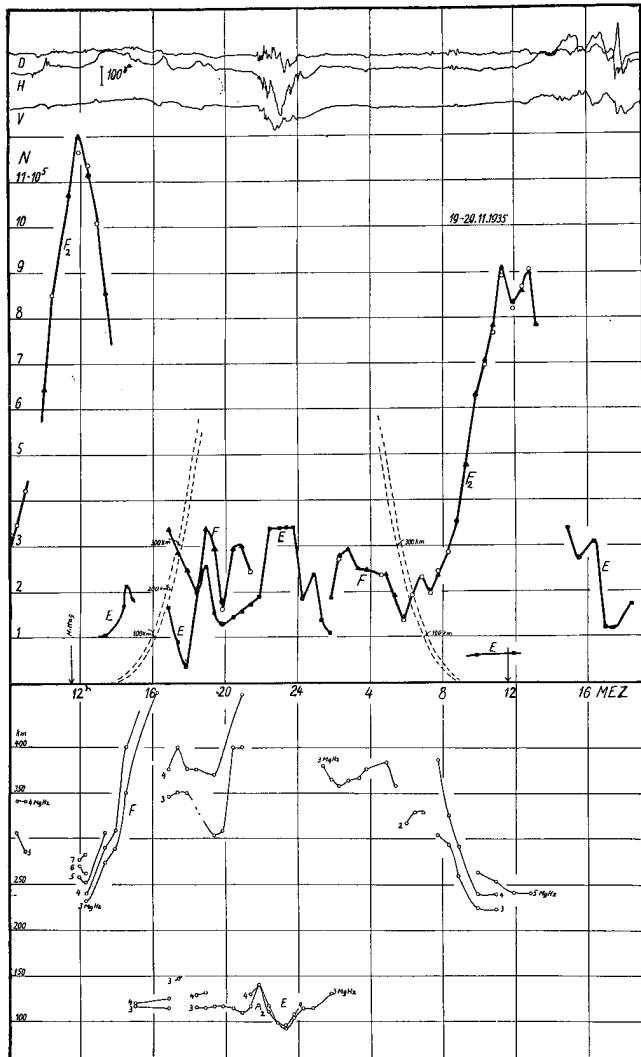


Fig. 18.

Um 13^h setzt eine neue energische Störung ein, die *E*-Echos treten wieder auf und die *F*-Echos fallen aus.

Nr. 6. 7.—8. 11. 1936. Der vorhergehende Tag und der Vor- und Nachmittag des 7. 11. waren erdmagnetisch ungestört. Um 19^h 30^m setzt eine kleine Störung ein, die bis 1^h 45^m dauert. Die erdmagnetischen Störungen am Vormittag des 8. 11. zeigen bis 16^h kleinere Wellen, dann setzt eine neue Störung ein.

Die Echo-Registrierungen am 7. 11. zeigen die normale *F*₂-Schicht mit normalen *P'*, *f*-Kurven von 8^h 17^m bis 16^h 42^m. Dann treten Sonnenuntergangserscheinungen und Schichtungen der Atmosphäre ein, die die *P'*, *f*-Kurven komplizieren. Die normale *E*-Schicht tritt um Mittag an den beiden Tagen auf.

Fig. 19 zeigt den Verlauf der maximalen Elek-

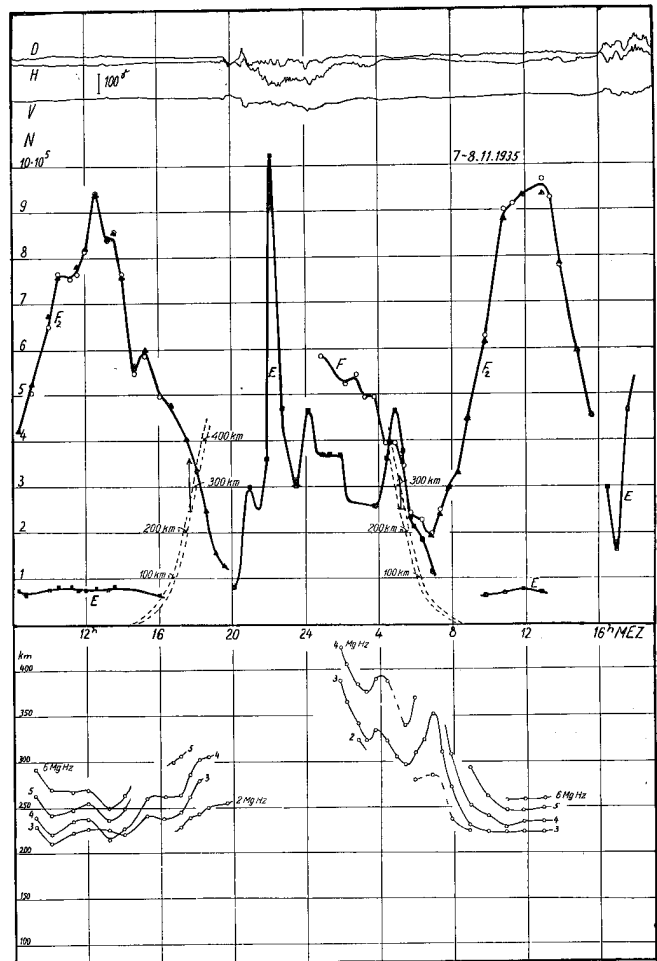


Fig. 19.

tronendichte in der *E*- und der *F*₂-Schicht. Um 20^h 05^m erscheint ein Nordlichtbogen am Nordhimmel, 45° über den Horizont, der von dem Auftauchen der *E*-Echos begleitet ist, gleichzeitig fallen die *F*₂-Echos aus. Beide magnetoionischen Komponenten der *E*-Echos treten auf mit kritischen Frequenzen bei 3.12 und 3.88 MgHz, vgl. Tafel II Nr. 2. Bis 22^h 15^m treten schwache Nordlichter auf, Bogen und Banden, später sind keine Nordlichter sichtbar. Die auftretende *E*-Schicht besteht bei dieser schwachen Nordlichtaktivität nur aus einer einfachen Schicht und hat eine äquivalente Höhe von 108—115 km. Den Maximalwert der *E*-Ionisation zeigt die Registrierung um 22^h 10^m, die eine kritische Frequenz von 7.4 MgHz zeigt.

Um 1^h 45^m ist die Hauptschwingung der Störung zu Ende und die Horizontalintensität hat den Normalwert erreicht. Die Registrierung um 1^h 52^m zeigt jetzt neben der *E*-Schicht eine hohe *F*-Schicht die von jetzt an während der Nacht

dauernd vorhanden ist und die als eine Kontraktionsschicht aufgefasst werden muss. In Fig. 19 sind die Maximalwerte der Elektronendichte dieser Schicht von 1^h 52^m bis 7^h dargestellt, die Schicht geht dann kontinuierlich in die normale F_2 -Schicht über.

Die äquivalenten Höhen dieser Kontraktionsschicht nehmen bis um 5^h 54^m ab, dann nehmen sie wieder zu bis um 6^h 51^m, worauf die Schicht in die normale F_2 -Schicht übergeht und man die normale Tagesabnahme der äquivalenten Höhen während des Vormittages hat. Die Abnahme der äquivalenten Höhen von 1^h 52^m bis 5^h 22^m muss als Wirkung einer Verschiebung der Schicht als ganzes aufgefasst werden. Die Steigerung der Höhen von 5^h 22^m bis 6^h 52^m ist nicht reell und ist der Abnahme der Gruppengeschwindigkeit zuzuschreiben, die kritischen Frequenzen sind zu dieser Zeit so klein, dass man sich auf dem stark gekrümmten Teil der P' , f -Kurve befindet. Eine Auswahl der registrierten P' , f -Kurven ist in Fig. 20 dargestellt.

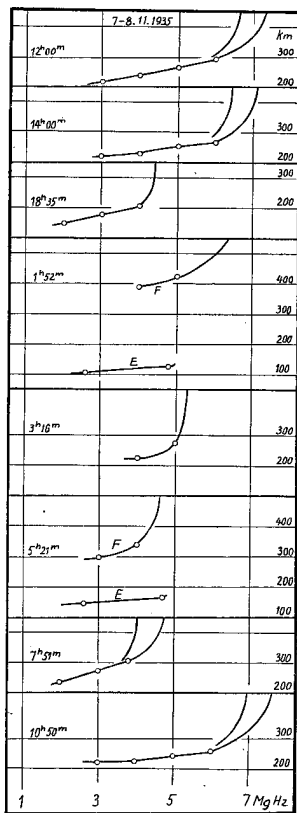


Fig. 20.

und interessanten Nordlichtern begleitet war, trat eine erdmagnetisch ruhige Periode ein. Während der ersten gestörten Periode fehlten entweder die Echos bei den täglichen Mittagsbeobachtungen voll-

ständig oder es traten nur schwache oder unregelmässige Echos auf. Während der nachfolgenden ruhigen Periode zeigte die F_2 -Schicht sehr hohe Mittagswerte der Maximalionisation, — die höchsten die während der einjährigen Beobachtungszeit gemessen sind, vgl. Fig. 5. Die kritischen Frequenzen hatten um Mittag am 29. 2., 1. 3. und 3. 3. folgende Werte: 9.3, 9.4 und 9.4 MgHz für die ordinäre Komponente was einer Elektronendichte von za. $16 \cdot 10^5$ Elektronen/cm³ entspricht. Die hohe Ionisation und auch der hohe Reflexionskoeffizient dauerte während der Zeit der Beobachtungen vom 4.—5. 3. fort.

Tabelle 8 gibt die Werte der kritischen Frequenzen und der Elektronendichte während der Zeit der Beobachtung.

Die erdmagnetischen Kurven am 4. 3. sind vollkommen ungestört. Am 5. 3. um 1^h 30^m—4^h 30^m setzt eine kleine Störung ein, die das Auftreten der E -Schicht zur Folge hat. Nach dieser Störung zeigen die erdmagnetischen Registrierungen am 5. 3. kleinere Ausbuchtungen und Wellen, in H von der Grösse von 5—15 gamma, gleichzeitig hat die Maximalionisation um Mittag am 5. 3. etwas abgenommen.

Fig. 21 zeigt den Verlauf der maximalen Elektronendichte in der E - und der F_2 -Schicht. Die Amplituden der E -Echos, die während der Störung auftreten, sind klein, gleichzeitig fallen die F_2 -Echos aus. Nach der Hauptschwingung der Störung setzt die E -Schicht noch mit merklicher Ionisation fort, man muss deshalb annehmen, dass eine schwache ionisierende Strahlung noch vorhanden ist. Die F -Echos treten nach der Hauptschwingung der Störung wieder auf. Die ersten Spuren einer sehr hohen F -Schicht sind um 3^h 30^m sichtbar, die Echos können bis 8 MgHz verfolgt werden. Diese Schicht scheint der früher erwähnten Kontraktionsschicht ähnlich zu sein. Dieselbe hohe F -Schicht ist um 4^h 05^m sichtbar. Um 4^h 36^m tritt die F_2 -Schicht mit grosser Intensität auf, gleichzeitig hat man Sonnenaufgang in 230—240 km Höhe und die normale F_2 -Schicht ist von jetzt ab dauernd vorhanden,

In Fig. 22 ist eine Auswahl von P' , f -Kurven eingezeichnet und in Fig. 21 unten ist der Verlauf der äquivalenten Höhen der Umkehrpunkte in den Schichten für eine Anzahl von Frequenzen dargestellt. Die Höhen der E - und der F_2 -Schicht haben um Mittag ein Minimum und nehmen am Nach-

Tabelle 8.

MEZ	Kritische Frequenz in MHz		$10^5 \cdot$ Elektronen/cm ³			Anm.	
	ordentlicher Strahl	ausserordent- licher Strahl	ordentlicher Strahl	ausserordent- licher Strahl			
	F_2	E	F_2	F_2	E	F_2	
8h11m	6.80	2.03	7.50	8.63	0.80	8.55	normale P', f -Kurve
8 40	7.50	2.20	8.20	10.22	0.90	8.43	—>—, Andeutung von 3ten Komponenten
9 09	7.68		8.40	11.01		10.99	—>—
9 43	7.85	2.31	8.50	11.51	1.00	11.28	—>—
10 08	8.18		8.82	12.49		12.23	—>—
10 40	8.31	2.45	9.08	12.89	1.12	13.04	—>—
11 05	8.50		9.20	13.48		13.41	—>—
11 45	8.50	2.50	9.20	13.48	1.17	13.41	—>—
12 10	8.60		—	13.80			—>—
12 45	8.72	2.60	—	14.20	1.26		—>—
13 16	8.60		—	13.80			—>—
13 44	9.10	2.58	—	15.46	1.24		—>—
14 08	9.00		—	15.12			—>—
14 48	8.50	2.20	9.20	13.48	0.90	13.41	—>—
15 30	8.25	2.16	9.00	13.01	0.87	12.79	—>—
16 11	8.17		8.90	12.16		12.48	—>—
16 38	8.40		9.15	13.17		13.26	—>—
16 47		1.69			0.53		—>—
17 10	8.37		9.05	13.08		12.94	—>—
17 39	7.75	< 1.40	8.45	11.22	< 0.37	11.14	—>—
18 12	7.80		8.55	11.36		11.43	—>—
18 38	8.00		8.65	11.95		11.73	—>—
19 08	7.50		8.23	10.50		10.51	—>—
19 30	7.45		8.10	10.36		10.15	—>—
20 03	6.90		7.60	8.89		8.81	—>—
20 30			7.12			7.62	—>—, eine neue hohe F -Schicht tritt ausserdem auf
21 05	6.35		7.10	7.53		7.57	—>—
21 34	6.30		7.08	7.41		7.52	—>—
22 04	6.03		6.80	6.79		6.87	—>— die hohe F -Schicht sinkt
22 35	5.90		6.70	6.50		6.64	—>—
23 10	5.50		6.28	5.65		5.74	—>— nur Spuren
23 30	(5.35)		6.27	5.34		5.57	
24 00	(5.40)		6.12	5.44		5.40	
0 28			5.90			4.97	
1 00			5.65			4.50	
1 33	keine	za. 5.1		za. 4.67			keine F -Echos, nur die E -Schicht tritt auf
1 57	»	» 5.5		» 5.65			—>— —>—
2 34	»	» 4.5		» 3.78			—>— —>—
3 00	»	» 4.5		» 3.78			neben der E -Schicht eine hohe, schwache F -Schicht die bis 8.0 MHz geht
3 30	»	» 3.8		» 2.70			—>— dieselbe hohe F -Schicht
4 05	»	» 3.8		» 2.70			—>— —>—
4 36	»	» 2.8	7.00	» 1.46		7.33	die normale F_2 -Schicht taucht auf
5 06			6.80			6.87	
5 35			6.90			7.10	
5 43		1.52			0.43		
6 07			6.95			7.21	
6 37		1.55	6.85		0.45	6.98	
7 05			6.90			7.10	
7 35			6.95			7.22	
7 44		1.95			0.71		
8 06	6.35		7.05	7.53		7.35	normale P', f -Kurve

Tabelle 8. (Fortsetzung.)

MEZ	Kritische Frequenz in MgHz		10 ⁵ · Elektronen/cm ³			Anm.	
	ordentlicher Strahl	ausserordent- licher Strahl	ordentlicher Strahl	ausserordent- licher Strahl			
8h40m	<i>F</i> ₂	<i>E</i>	<i>F</i> ₂	<i>F</i> ₂	<i>E</i>	<i>F</i> ₂	normale <i>P'</i> , <i>f</i> -Kurve, —>— —>— —>— —>— —>— —>— —>— —>— —>— —>—
9 10	6.10		6.82	6.95		6.92	
9 42	6.85		7.60	8.76		8.81	
10 12	7.22	2.32	7.85	9.73	1.01	9.43	
10 45	7.50		8.20	10.50		10.43	
11 10	7.70	2.52	8.40	11.07	1.19	10.99	
11 43	7.55		8.30	11.64		10.71	
	7.50	(2.70)	8.20	10.50	(1.36)	10.43	
12 15	8.05		8.80	12.10		12.17	
12 42	7.80	2.60	8.55	11.36	1.26	11.43	
13 12			8.90			12.48	
13 41	8.40	2.60	9.10	13.17	1.26	13.10	
14 10	8.40			13.17			
14 45	7.95	2.30	8.62	11.80	0.99	11.64	
15 40	7.20	2.20	7.95	9.68	0.90	9.73	
16 12	7.10		7.80	9.41		9.34	
16 50		2.10	7.70		0.82	9.07	

mittag und Abend zu. Auffallend ist der Verlauf der Höhen in der F_2 -Schicht nach der erdmagnetischen Störung, und eben nach Sonnenaufgang in 250 km Höhe. Die Höhen sind anfangs gross und nehmen allmählich ab. Die Maximalionisation ist im Zeitintervall 4^h36^m—8^h45^m annähernd konstant und nimmt dann mit wachsender Sonnenhöhe schnell zu.

Die bedeutende Ionisation, die beim Sonnenaufgang in 250 km Höhe schon vorhanden ist, lässt sich schwierig durch eine spontane Ionisation der Sonnenstrahlen erklären, die zu dieser Zeit die ganzen unteren Schichten der Atmosphäre noch zu durchdringen haben. Es ist wahrscheinlich, dass dieser hohe Wert der Maximalionisation durch eine Kontraktion der höchsten ionisierten Schichten hervorgerufen ist. Während der kleinen erdmagnetischen Störung ist die Materie scheinbar durch Temperatursteigerung in die Höhe getrieben. Nach der Störung sinkt die Materie und bildet zuerst um 3^h30^m in einer Höhe von 450—500 km eine Kontraktionsschicht. Das Herabsinken der Materie setzt fort und ruft eine Steigerung der Ionisation in der F_2 -Schicht hervor. Durch das stetige Herabsinken der Materie und durch gleichzeitige Akkumulation der Ionisation wird die Wirkung der Rekombination kompensiert, und die Ionisation ist annähernd konstant. Die äquivalenten Höhen

nehmen indessen ab, was zeigt, dass die Schicht als ganzes herabsinkt.

Die tägliche Kurve der Ionisation der F_2 -Schicht am 5.3 zeigt zu allen Zeiten kleinere Werte als am vorangehenden Tage. Da man kaum annehmen kann, dass sich die Intensität der Sonnenstrahlen von einem Tage zum nächsten merklich geändert hat, muss man annehmen, dass die durch die Sonnenstrahlen hervorgerufene Produktion von freien Elektronen durch eine Abnahme der Dichte der Atmosphäre herabgesetzt worden ist.

Wie bei vorhergehenden Beispielen lässt sich auch hier der Rekombinationskoeffizient aus dem Abklingen der Ionisationskurve bestimmen. Folgende Werte, die Fig. 21 entnommen wurden, sind benutzt worden:

$$\begin{aligned} 19^{\text{h}} 08^{\text{m}}: N &= 10.50 \cdot 10^5 \\ 21^{\text{h}} 05^{\text{m}}: N &= 7.55 \cdot 10^5 \quad \Delta t = 7200 \text{ sek} \\ 1^{\text{h}} 00^{\text{m}}: N &= 4.50 \cdot 10^5 \quad \Delta t = 14100 \text{ sek} \end{aligned}$$

Im ersten Zeitintervall bekommt man:

$$a = 0.53 \cdot 10^{-10}$$

und im zweiten Zeitintervall:

$$a = 0.64 \cdot 10^{-10}$$

Der Rekombinationskoeffizient ist innerhalb der Fehlergrenze konstant. Fig. 21 zeigt, dass die äquivalenten Höhen während derselben Zeit zunehmen, und die Schicht wird als ganzes gegen



Fig. 21.

grössere Höhen und kleinere Dichten verschoben, was durch die verschiedenen Werte der Rekombinationskoeffizienten im oberen und unteren Teil der Schicht erklärt werden kann. Streng genommen ist deshalb die Anwendung der oben benutzten Formel zur Berechnung des Rekombinationskoeffizienten in diesen und den vorhergehenden Fällen nicht zulässig, da die zu den verschiedenen Zeiten benutzten Werte von N nicht die Elektronendichte in denselben Höhen angeben. Die Sache wird weiter durch eine mögliche Vertikalbewegung der Luftmassen durch Temperaturänderungen nach Sonnenuntergang kompliziert. Ob diese Vertikalbewegung eine Zunahme oder Abnahme der Dichte im Niveau der F_2 -Schicht bewirkt und dadurch

eine Steigerung oder Abnahme der Ionisation zur Folge hat, kann nicht ohne weiteres entschieden werden. Erinnern wir uns indessen an den jährlichen Gang der Mittagswerte der Maximalionisation der F_2 -Schicht, die eine starke Zunahme im Winter zeigt, so ist es wahrscheinlich, dass die Temperaturabnahme vom Tag zur Nacht auch von einer Dichtezunahme im Niveau, der F_1 -Schicht begleitet wird. Es ist deshalb möglich, dass der eben berechnete Wert des Rekombinationskoeffizienten nicht einmal der Grössenordnung nach den richtigen Wert darstellt.

Eine Berechnung des Rekombinationskoeffizienten kann von einem anderen Ausgangspunkte aus zur Kontrolle der ersten Überschlagsrechnungen gemacht werden. Nehmen wir an, dass die Höhen der Umkehrpunkte der Signale annähernd die wahren geometrischen Höhen darstellen, was auf dem annähernd horizontalen Teil der P', f -Kurve nicht mit grösseren Fehlern behaftet ist, so kann man den Rekombinationskoeffizienten in einer bestimmten Höhe während ausgewählter Zeitintervalle berechnen. Aus Fig. 21 unten sind die Zeiten genommen, zu welchen die Umkehrpunkte der Echos für die Frequenzen 5, 4, 3 und 2 MgHz in der äquivalenten Höhe von 250 km liegen. Tabelle 9 zeigt die Werte der Zeiten und die entsprechenden Elektronendichten in 250 km äquivalenter Höhe.

Tabelle 9.

	t	Δt sek	MgHz	N
I	19h 33m		5	$3.37 \cdot 10^5$
II	20 36	3780	4	$1.99 \cdot 10^5$
III	21 27	3060	3	$0.90 \cdot 10^5$
	22 36	4140	2	$0.23 \cdot 10^5$

Beim Einsetzen in die früher verwendete Formel (26) bekommt man folgende Werte:

$$\begin{aligned} \alpha_I &= 3.5 \cdot 10^{-10} \\ \alpha_{II} &= 2.0 \cdot 10^{-9} \\ \alpha_{III} &= 7.8 \cdot 10^{-9} \end{aligned}$$

Diese Werte, die sich auf eine äquivalente Höhe von 250 km in der F_2 -Schicht beziehen, zeigen, dass der Rekombinationskoeffizient während der Nacht dauernd zunimmt. Nehmen wir an, dass die

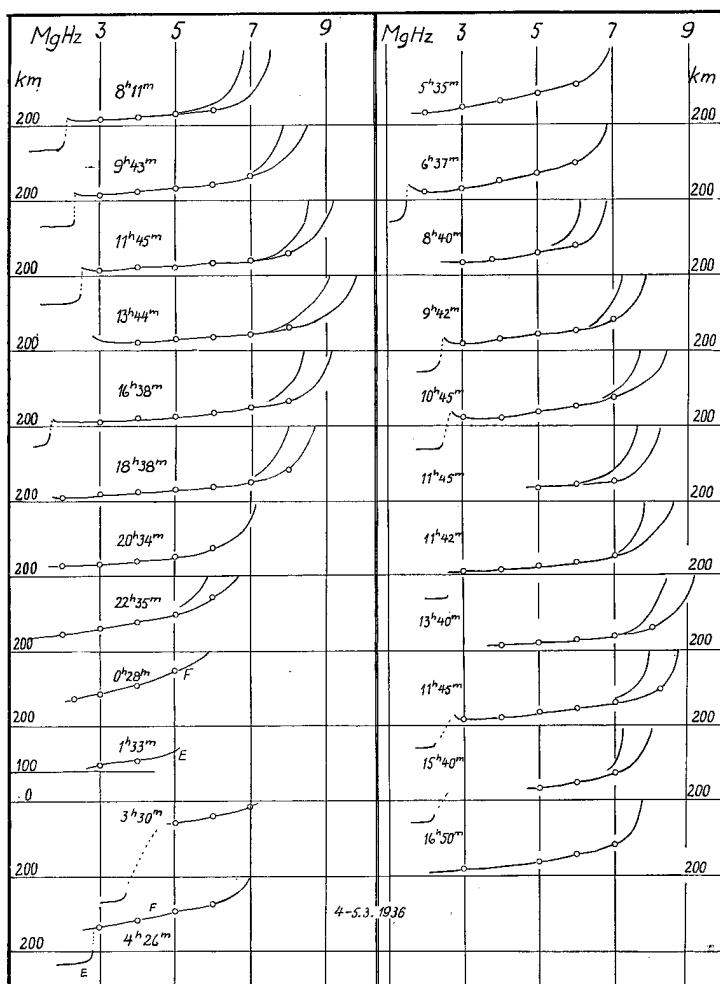


Fig. 22.

Atmosphäre durch Temperaturabnahme im Niveau der F_2 -Schicht dauernd zusammenpresst wird, so ist diese Steigerung des Rekombinationskoeffizienten wegen zunehmender Dichte zu erwarten. Diese Kontraktion wird indessen auch einen Beitrag zur Steigerung der Ionisation liefern, der nicht in Rechnung genommen werden kann. Es ist aber ohne weiteres einzusehen, dass dieser Effekt der Abnahme der Elektronendichte mit der Zeit entgegenwirkt. Die oben berechneten Werte des Rekombinationskoeffizienten würden deshalb für entsprechende Dichtezunahmen noch schneller zunehmen.

Zusammenfassend kann man sagen, dass man kaum von einem bestimmten Werte des Rekombinationskoeffizienten der F_2 -Schicht sprechen kann. Der angenähert konstante Wert von α , der zuerst für diesen Tag berechnet wurde, muss als zufällig angesehen werden. Sowohl die Wirkungen der Kon-

traktion als auch die damit folgenden Dichteänderungen in den verschiedenen Höhen mit der Zeit schliessen die Annahme eines konstanten Wertes des Rekombinationskoeffizienten der F_2 -Schicht aus.

Im Vergleich zu den Werten des Rekombinationskoeffizienten im Januar, die nach Formel (26) bestimmt wurden, sind die Märzwerte bedeutend kleiner. Der kleinere Wert des Rekombinationskoeffizienten im März muss durch den kleineren Druck im 250 km Niveau verursacht werden, der der höheren Temperatur und grösseren Auflockerung der Atmosphäre zugeschrieben werden muss.

Vergleicht man den täglichen Verlauf der F_2 -Ionisationskurve vom 4.—5. 3. mit z. B. demjenigen vom 29.—30. 1., so ist die viel langsamere Abnahme der F_2 -Ionisation nach Sonnenuntergang ohne weiteres sichtlich. Ferner geht daraus hervor, dass das Maximum der Mittwinter-Tageskurven um 12^h—13^h liegt während die Märztagesskurven ihr Maximum um 14^h haben, was auch als eine Bestätigung der langsameren Rekombination im Frühling anzusehen ist.

Nr. 8. 23.—24. 10. 1935. Die erdmagnetischen Registrierungen zeigen schwache Störungen und kleinere Wellen während des Vormittages am 23. 10. Um 20^h 17^m setzt eine kleinere Störung ein, die die ganze Nacht dauert. Um 7^h 38^m am 24. 10. setzt eine grosse Störung ein, die den ganzen Tag dauert.

Die Echoregistrierungen zeigen am 23. 10. normale P' , f -Kurven bis 19^h 49^m. Um 20^h 50^m wird die P' , f -Kurve sehr kompliziert, die Störung hat dann eingesetzt und die E -Echos treten auf. Um 21^h 20^m, wenn die Amplitude in H ihren grössten Wert erreicht hat, geht die E -Schicht bis 8.8 MgHz, — die F -Echos fehlen bei dieser Registrierung. Später tauchen die F -Echos auf, und die kritische Frequenz der E -Schicht nimmt ab. Fig. 23 zeigt den Verlauf der maximalen Elektronendichten.

Der Sonnenuntergang in 250 km Höhe findet um 18^h 15^m statt. Der Rekombinationskoeffizient lässt sich mittels der einfachen Rekombinationsformel (26) bestimmen. Wir wählen folgende Werte:

$$17^h 58^m : N = 5.95 \cdot 10^5 \quad \Delta t = 6660 \text{ sek}$$

$$19^h 49^m : N = 3.95 \cdot 10^5$$

$$\alpha = 1.3 \cdot 10^{-10}$$

Die P', f -Kurven frühmorgens am 24. 10. sind kompliziert, wie gewöhnlich vor Sonnenaufgang.

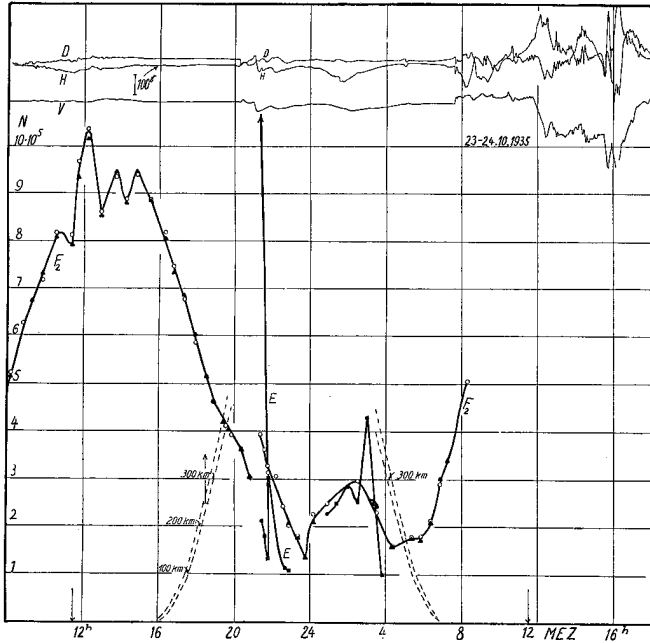


Fig. 23.

In diesem Falle ist neben den zwei kritischen Frequenzen der ordentlichen und der ausserordentlichen Komponente, eine dritte, höhere kritische Frequenz vorhanden, die nach der zeitlichen Entwicklung der P', f -Kurven scheinbar einer höheren Schicht zugeschrieben werden muss.

In Fig. 24 sind die P', f -Kurven aufgezeichnet, die ungefähr symmetrisch vor und nach wahrer

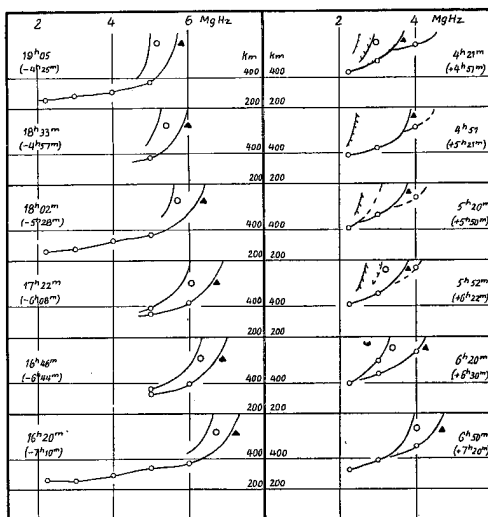


Fig. 24.

Mitternacht registriert worden sind, die Zeitpunkte vor und nach wahrer Mitternacht sind in Klammern angegeben. Die ordentliche und die ausserordentliche Komponente ist mit O bzw. Δ bezeichnet, vgl. Tafel III Nr. 1. Fig. 24 links zeigt die regelmässigen P', f -Kurven am Abend mit kontinuierlich abnehmenden kritischen Frequenzen, rechts sind die verwickelten P', f Kurven am Morgen angegeben. Die äusserste kritische Frequenz, die in den Registrierungen um $4^h 21^m$, $4^h 51^m$ und $5^h 20^m$ sichtbar ist, muss einer Schicht, die über der F -Schicht liegt und eine etwas grössere maximale Elektronendichte besitzt, zugeschrieben werden. Mit der Zeit sinkt diese obere Schicht in die untere Hauptschicht herunter.

Die grosse Störung während des 24. 10. war von sehr verwickelten P', f -Kurven und zeitweisem Ausfallen sämtlicher Echos begleitet. Wegen der starken Störungen der erdmagnetischen Registrierungen am Mittag erwarteten wir eine grosse Nordlichtaktivität nachmittags und abends. Dies traf nicht ein. Nach dem Verschwinden des Dämmerungslichtes konnte am ganzen Himmel die grüne Nordlichtlinie festgestellt werden, und die Intensität war besonders gross im Süden, Nordlichtformen traten indessen nicht auf. Die Echoregistrierungen zeigten nur die E -Echos mit grosser Amplitude, Tafel II Nr. 5 a, b und c, zeigen Registrierungen, die um $17^h 55^m$, $17^h 59^m$ und $18^h 40^m$ genommen sind. Die kritischen Frequenzen der E -Schicht nehmen von 3 und 4.5 MgHz bis 3.5 und 4.2 MgHz ab, man hat hier ein Beispiel von Aufspaltung im ordentlichen und ausserordentlichen Strahl in der durch die erdmagnetischen Störungen gebildeten E -Schicht.

Um 20^h traten einige Nordlichtformen schwacher und mittlerer Intensität auf. Tafel II Nr. 6 a, b, c, d und e zeigen die um $20^h 16^m$, $20^h 32^m$, $21^h 07^m$, $21^h 11^m$ und $21^h 41^m$ aufgenommenen Registrierungen. Schwaches diffuses Nordlicht mit Strahlenstruktur trat dann im Zenith auf. Auf dem Süd- und Nordhimmel erschienen einige Banden und Bogen mittlerer Intensität. Die registrierten P', f -Kurven zeigen zahlreiche Schichten, die schnell wechseln. Man hat den Eindruck, dass die Schichten momentan durch die ionisierende Strahlung gebildet und nach Aufhören der ionisierenden Strahlung sofort durch Rekombination wieder neutralisiert werden.

Nr. 9. 9.—10. 10. 1935. Die erdmagnetischen Registrierungen zeigen am ersten Tage kleinere

Wellen und Ausbuchtungen, während der Nacht setzten zwei kleine Störungen ein. Der Vormittag am zweiten Tage ist erdmagnetisch ungestört, um 16^h setzt eine grössere Störung ein die von Nordlichtern begleitet ist.

Die Echo-Registrierungen am ersten Tage bis 18^h 12^m zeigen normale P' , f -Kurven. Nach 19^h 09^m werden die P' , f -Kurven kompliziert, mit vielen kritischen Frequenzdurchbrüchen, gleichzeitig nehmen die äquivalenten Höhen zu, der Sonnenuntergangszustand tritt scheinbar ein, Fig. 25 zeigt den Verlauf der maximalen Elektronendichten.

Zwischen 2^h und 8^h fehlen die Echo-Registrierungen, die Registrierung um 8^h 11^m am zweiten Tage zeigt normale P' , f -Kurven. Der Einbruch der grossen Störung um 16^h ist von komplizierten P' , f -Kurven begleitet. Während der Echoregistrierungen wurden gleichzeitig die Nordlichter beob-

achtet und teilweise parallaktisch fotografiert. Die P' , f -Kurve um 15^h 48^m ist normal, gleichzeitig setzt der positive Teil der erdmagnetischen Störung ein. Es ist auffallend, dass während der ersten Phase der Störung von 16^h bis 17^h 40^m keine Nordlichter sichtbar waren, die Echoregistrierungen zeigen indessen intensive Ionisation im E -Niveau. Wegen des Vollmondes ist es indessen möglich, dass sehr schwache Nordlichter im Zenith der Beobachtung entgangen sind.

Um 17^h 45^m erschien ein Bogen mit Strahlenstruktur im Zenith. Die um 17^h 33^m, 17^h 40^m und 17^h 45^m aufgenommenen Echo-Registrierungen sind in Tafel II Nr. 7 a, b und c reproduziert. Während der ersten zwei Registrierungen waren keine Nordlichter zu beobachten, während der letzten Registrierung um 17^h 45^m tritt der Bogen mit Strahlenstruktur auf. Wie aus den zwei reproduzierten

Registrierungen von 17^h 33^m und 17^h 45^m ersichtlich ist, erreicht die kritische Frequenz der E -Schicht keinen höheren Wert nach dem Einsetzen der Bogen im Zenith als um 17^h 33^m, als kein Nordlicht sichtbar war.

Im Zeitintervall von 18^h 00^m bis 18^h 52^m wurden zwei Bogen, der eine am Südhimmel der andere am Nordhimmel, parallaktisch fotografiert, im Zenith trat kein Nordlicht auf. Die Echoregistrierung um 19^h 02^m—19^h 08^m zeigte überhaupt keine Echos, gleichzeitig trat nur ein schwacher Bogen am Nord- und Südhimmel auf, keine Nordlichter waren im Zenith sichtbar, die erdmagnetische Störung hat jetzt ihr Maximum erreicht. Die späteren Beobachtungen um 19^h 23^m, 19^h 32^m und 19^h 39^m zeigen auch überhaupt keine Echos, gleichzeitig waren auch keine Nordlichter sichtbar, die Störungsamplitude in H erreicht zu dieser Zeit ihren grössten Wert. Die tiefer liegende absorbierende Schicht hat sich scheinbar jetzt ausgebildet.

Auffallend bei den Beobachtungen an diesem Abend ist, dass die Echotätigkeit und die erdmagnetischen Störungen parallel gehen, während das Auftreten und Verschwinden der Nordlichter im Zenith scheinbar nicht den entscheidenden Einfluss auf die Echotätigkeit hat.

Nr. 10. 23.—24. 9. 1935. Die erdmagnetischen Registrierungen an dem vorhergehenden Tage sind fast störungsfrei. Eine

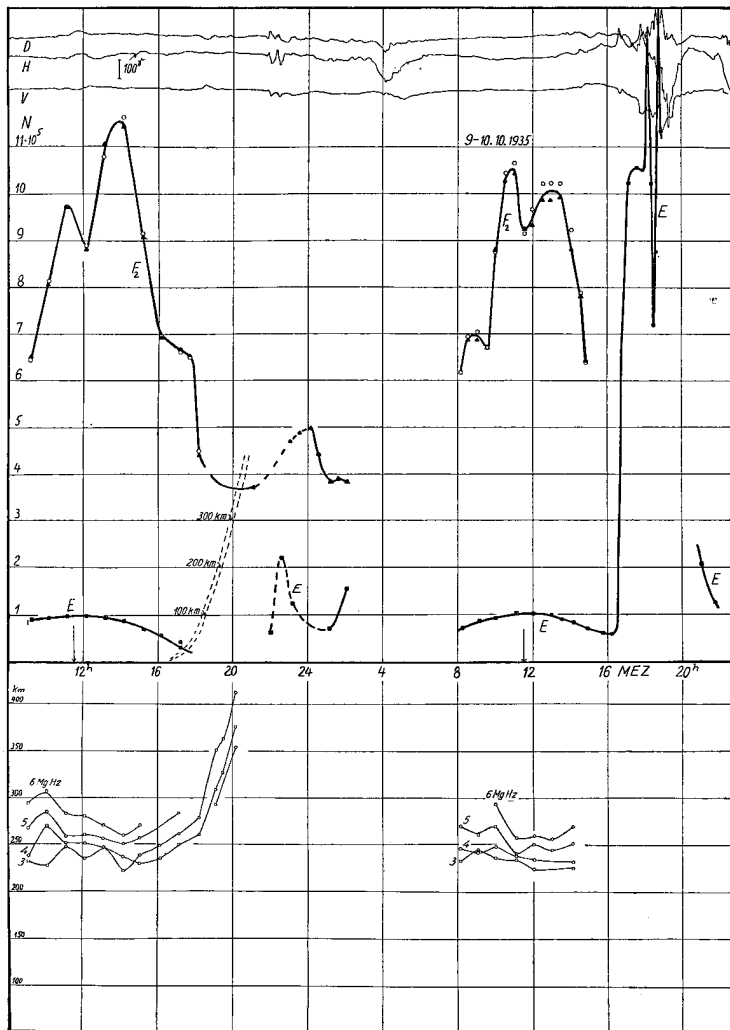


Fig. 25.

grosse erdmagnetische Störung setzt am Formittage des 23. 9. ein, die die ganze Nacht und den nächsten Tag dauert. Das Auftreten der Nordlichter wurde gleichzeitig beobachtet und die Echoregistrierungen zeigen interessante Beispiele des Einflusses und der Nachwirkung der Nordlichter und starken erdmagnetischen Störungen.

Die Echoregistrierungen am ersten Tage zeigen normale P' , f -Kurven von 9^h bis 14^h. Die Störung wird nach 14^h energischer und sämtliche Echos fallen aus. Um 16^h tritt wieder die E -Schicht auf und geht bis zu 9.0 MgHz. Von 16^h 34^m bis 19^h 53^m fallen wieder sämtliche Echos aus. Während dieser Dämmerungszeit — der Sonnenuntergang findet um 17^h 44^m statt — konnten keine Nordlichter beobachtet werden. Fig. 26 zeigt den Verlauf der maximalen Elektronendichten.

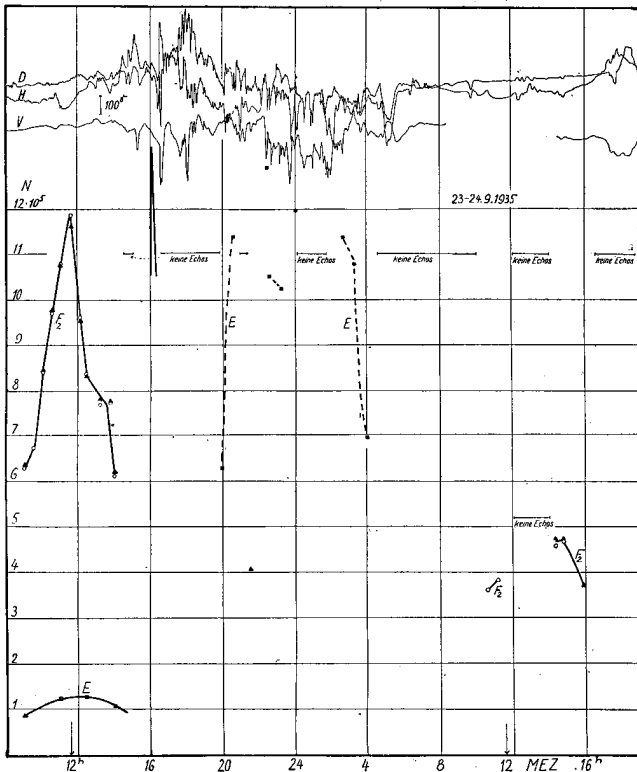


Fig. 26.

Die Registrierung um 20^h 34^m zeigt die E -Echos, die bis zu 7.8 MgHz gehen. Gleichzeitig treten schwache Bogen am Nordhimmel und sehr schwacher Nordlichtdunst im Zenith auf. Die um 22^h 35^m aufgenommene Registrierung, vgl. Tafel III Nr. 2 a, zeigt eine Registrierung während des Auftretens eines intensiven Nordlichtbogens im Zenith. Die kritische Frequenz einer aufgespaltenen E -Schicht,

deren untere Grenze in 102 km äquivalente Höhe liegt, geht bis zu 7.5 MgHz. Die Amplituden der Echos zeigen während der Registrierung sehr schnelle Variationen. Drei Minuten nach dem Abschluss dieser Registrierung verschwindet der Nordlichtbogen, gleichzeitig konnte visuell festgestellt werden, dass die Echos im ganzen Frequenzbereiche ausgefallen sind, es traten überhaupt keine Echos auf. Die um 24^h 00^m aufgenommene Registrierung zeigte indessen eine ähnliche E -Schicht, vgl. Tafel III Nr. 2 b, während dieser Registrierung war kein Nordlicht zu beobachten. Ein unmittelbarer Zusammenhang zwischen der Intensität der Nordlichter im Zenith und der Ionisation in der auftretenden E -Schicht scheint während diesen sehr intensiven erdmagnetischen Störungen nicht zu bestehen. Dasselbe zeigen die Beobachtungen am 9.—10. 10. 1935, die früher erwähnt sind.

Von 0^h 10^m bis 1^h 45^m sind sämtliche Echos ausgefallen. Von 2^h 47^m bis 3^h 55^m treten einige sehr schwache und unregelmässige Echos auf, Tafel III Nr. 3 b zeigt eine um 3^h 15^m aufgenommene Registrierung. Die Registrierung zeigt eine Reihe von Schichten, deren Höhen sich schnell ändern. Eine neue Registrierung nach Verlauf einiger Minuten zeigt eine andere Verteilung der Schichten. Die erdmagnetische Störung ist jetzt sehr gross, es werden scheinbar unaufhörlich neue Schichten gebildet, andere werden durch Rekombination sehr schnell neutralisiert.

Im Zeitintervall von 4^h 33^m bis 10^h 00^m sind sämtliche Echos ausgefallen.

Die Registrierungen am zweiten Tage um 10^h 35^m und 11^h 11^m zeigen die E - und die F_2 -Schicht mit anormalem Charakter der P' , f -Kurven.

In Fig. 27 sind die P' , f -Kurven der entsprechenden Registrierungen vom 23. 9., die um 10^h 30^m und 11^h 00^m aufgenommen sind, zum Vergleich eingezeichnet, die Originalregistrierungen sind in Tafel III Nr: 4 a, b und 5 a, b reproduziert. Die maximale Elektronendichte hat am 24. 9. nach der

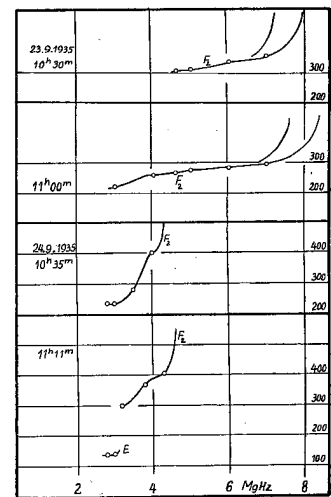


Fig. 27.

grossen nächtlichen Störung sehr stark abgenommen. Gleichzeitig hat sich der Gradient der Elektronendichte geändert. Die starke Zunahme der äquivalenten Höhen weist darauf hin, dass die untere Begrenzung der F_2 -Schicht jetzt verwischt ist, die Schicht hat sich in vertikaler Richtung ausgedehnt. Von 12^h 00^m bis 14^h 00^m fallen wieder die Echos aus. Von 14^h 17^m bis 15^h 56^m treten die E - und die F_2 -Schicht wieder auf, und jetzt mit normalen P' , f -Kurven. Das Ausfallen der Echos durch die *kleine* Störung um 13^h ist scheinbar ohne Wirkung auf die F_2 -Schicht und die P' , f -Kurve gewesen.

Nr. 11. 22.—23. 3. 1935. Die erdmagnetischen Registrierungen sind während des Tages ungestört. Um 21^h 30^m setzt eine Störung mittlerer Grösse ein, die von einer Steigerung der E -Ionisation begleitet ist. Das Auftreten der Nordlichter wurde gleichzeitig beobachtet. Das Maximum der E -Ionisation fällt mit dem Auftreten einer schwachen Krone im Zenith zusammen, die erdmagnetische Störung hat ihr Maximum eine halbe Stunde später.

In Fig. 28 ist das Auftreten der Nordlichter während der Störung angegeben. Bei einer solchen

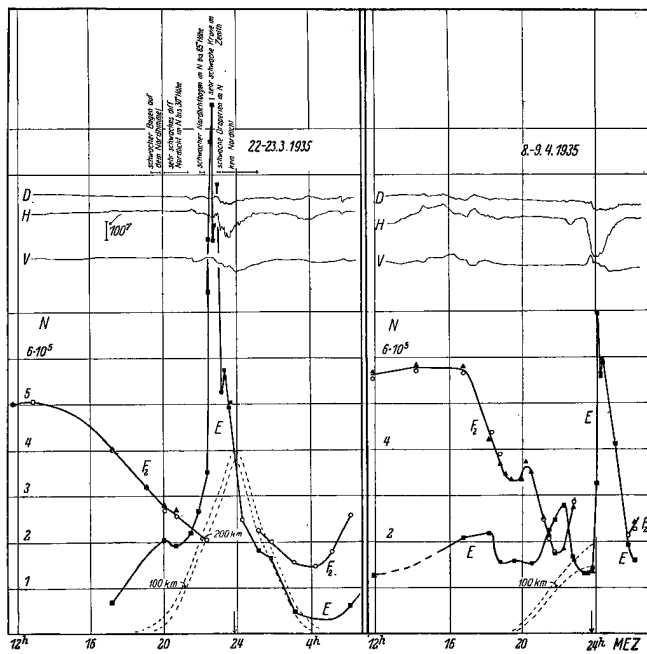


Fig. 28.

kleinen Störung scheint die auftretende starke Steigerung der E -Ionisation genau mit dem Auftreten der Nordlichtformen im Zenith parallel zu gehen.

Auffellend bei diesen Registrierungen ist, dass das sekundäre Maximum nach Sonnenuntergang in der Kurve der F_2 -Ionisation nur sehr schwach angedeutet ist.

8.—9. 4. 1935. Die erdmagnetischen Registrierungen sind etwas gestört. Kurz nach Mitternacht tritt eine Störung auf, die von starker Steigerung der E -Ionisation begleitet ist. In der Kurve der F_2 -Ionisation tritt das sekundäre Maximum bei Sonnenuntergang auf.

Nr. 12. 2.—3. 4. 1935. Die erdmagnetischen Registrierungen zeigen einen völlig störungsfreien Verlauf. Die registrierten P' , f -Kurven am Tage sind alle von normalem Charakter. Die gestrichelten Linien in Fig. 29, die die Zeiten des Sonnenunterganges in den verschiedenen Höhen angeben, zeigen, dass um Mitternacht die Sonnenstrahlen noch bis hinunter zu einer Höhe von 207 km dringen.

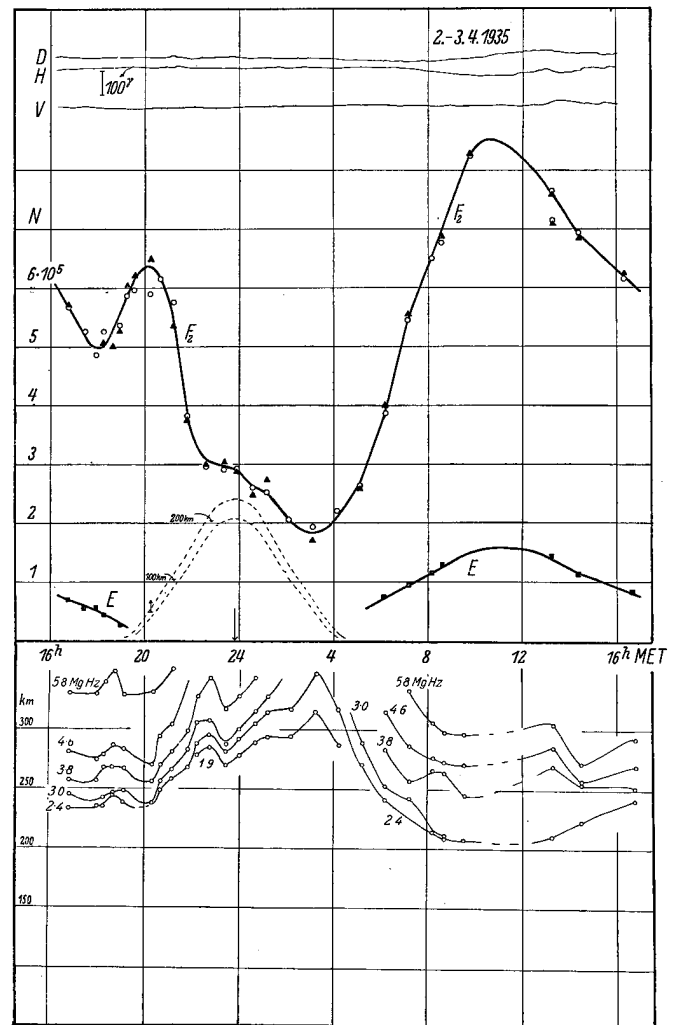


Fig. 29.

Die Kurve der maximalen Elektronendichte hat ein sekundäres Maximum kurz nach Sonnenuntergang am Erdboden um 20^h. Wir erklären dieses Maximum als einen Kontraktionseffekt, wegen der Abkühlung ziehen sich die höchsten Atmosphäreschichten zusammen und die Maximalionisation wird erhöht. Diesem sekundäre Maximum in der Elektronendichte entspricht ein Minimum in den äquivalenten Höhen der Umkehrpunkte für alle Frequenzen, vgl. Fig. 29 unten, die Schicht hat sich nach kleineren Höhen und grösseren Dichten verschoben.

Die grössten Werte der äquivalenten Höhen fallen mit dem Minimumwerte der Ionisation um 3^h zusammen. Mit zunehmender Sonnenhöhe steigt wieder die Ionisation und die Höhen sinken.

Nehmen wir an, dass die ionisierende Wirkung der Sonnenstrahlen um Mitternacht zu vernachlässigen ist, so kann man den Rekombinationskoeffizienten in der F_2 -Schicht aus der einfachen Rekombinationsformel (26) bestimmen. Wir wählen folgende Werte:

$$\begin{aligned}
 22^h 39^m : N &= 2.97 \cdot 10^5 & \Delta t &= 16020 \text{ sek.} \\
 3^h 06^m : N &= 1.83 \cdot 10^5 \\
 \alpha &= \underline{1.3 \cdot 10^{-10}}
 \end{aligned}$$

Die E -Schicht zeigt einen mit den Sonnenhöhen parallelen Verlauf der Maximalionisation. Kurz nach Sonnenuntergang lässt sich die Schicht nicht länger nachweisen, wegen der grossen Dichte in 120 km Höhe ist die Schicht durch schnelle Rekombination neutralisiert.

Die Ausbuchtung in der Ionisation am unteren Rande der F_2 -Schicht, die sogenannte F_1 -Schicht, lässt sich durch eine kleines Maximum in den P' , f -Kurven am Tage nachweisen. Dieses Maximum ist indessen zu klein, um quantitativ gemessen zu werden.

Nr. 13. 27.—28. 4. 1935. Die erdmagnetischen Registrierungen sind völlig störungsfrei. In Fig. 30 ist eine Anzahl der registrierten P' , f -Kurven eingezeichnet. Die F_1 -Schicht tritt jetzt während des Tages auf und veranlasst eine starke Verzögerung der Echos der F_2 -Schicht im Frequenzbereich 3.2—5.0 MgHz.

Die Registrierungen zeigen, dass der Gipfel in der P' , f -Kurve, der die kritische Frequenz der F_1 -Schicht angibt, am Vormittage ausgeprägter als am Nachmittage ist, was auch früher bei der Be-

sprechung der Mittagsregistrierungen erwähnt worden ist.

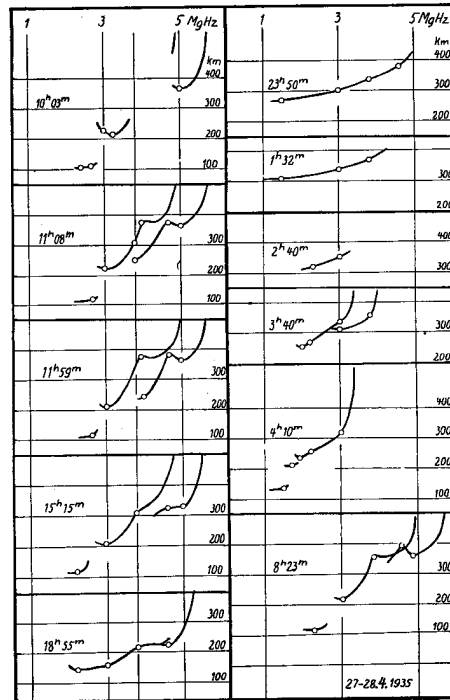


Fig. 30.

Fig. 31 zeigt den Verlauf der maximalen Elektronendichten.

Die Registrierung frühmorgens um 4^h 10^m zeigt die Zwischenschicht (E'') zwischen E und F_2 .

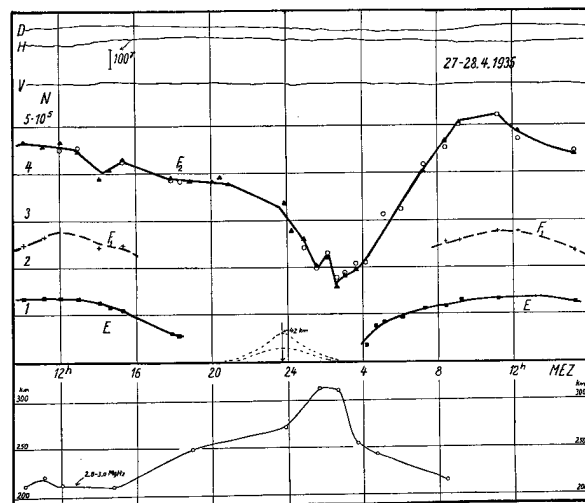


Fig. 31.

Die Änderungen der äquivalenten Höhen während der Zeit der Registrierung müssen mit Vorsicht diskutiert werden. In Fig. 31 oben sind die äquivalenten Höhen der Umkehrpunkte im Frequenzbereich 2.8—3.0 MgHz, wo die P' , f -Kurven am Tage

ein *Minimum* aufweisen, angegeben. Wegen der am Tage auftretenden *E*-Schicht muss man annehmen, dass die Verzögerung der Signale am Tage grösser ist als in der Nacht. Die in Fig. 31 angegebene Amplitude der Höhenänderungen ist deshalb kleiner als Amplitude der Änderungen der wahren geometrischen Höhen der Umkehrpunkte.

Neben der Bestimmung des Rekombinationskoeffizienten in der *F*₂-Schicht aus dem Abklingen der Ionisationskurve, lässt sich dieser nach einem anderen Gesichtspunkt aus der Form der Ionisationskurve abschätzen.

Während zweier symmetrisch zum wahren Mittag gegebener Zeitintervalle Δt ist die Änderung der Ionenproduktion durch die Änderung der Sonnenhöhen dieselbe. Die Änderung der Elektronendichten N_1 und N_2 am Vor- und Nachmittage sind:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta N_1}{\Delta t} &= I - \alpha N_1^2 \\ -\frac{\Delta N_2}{\Delta t} &= I - \alpha N_2^2 \end{aligned}$$

Daraus berechnet sich folgender Ausdruck des Rekombinationskoeffizienten:

$$\alpha = \frac{\frac{\Delta N_1 + \Delta N_2}{\Delta t}}{N_2^2 - N_1^2} \quad (27)$$

Als symmetrisch liegende Zeitintervalle vor und nach wahrer Mitternacht wählen wir 15^h 42^m—19^h 42^m und 3^h 42^m—7^h 42^m. Die entsprechenden Werte der Elektronendichten sind:

$$\begin{aligned} 4.25 \cdot 10^5 N_1 &= 4.05 \cdot 10^5 \\ 3.85 \cdot 10^5 \\ \Delta N_1 &= 0.40 \cdot 10^5 \\ 2.03 \cdot 10^5 N_2 &= 3.19 \cdot 10^5 \\ 4.35 \cdot 10^5 \\ \Delta N_2 &= 2.32 \cdot 10^5 \\ \Delta t &= 14400 \text{ sek.} \\ \alpha &= 3.0 \cdot 10^{-10} \end{aligned}$$

Nr. 14. 7.—8. 5. 1935. Die erdmagnetischen Registrierungen sind völlig störungsfrei, die Echo-Registrierungen zeigen normale *P'*, *f*-Kurven.

Eine Auswahl der registrierten *P'*, *f*-Kurven ist in Fig. 32 eingezeichnet. Die Ausbuchtung in den *P'*, *f*-Kurven, die die kritische Frequenz der *F*₁ Schicht angibt, tritt jetzt am Tage stark hervor. Die Ausbuchtung nimmt nachmittags ab, und verschwindet za. zwei Stunden vor Sonnenunter-

gang. Aus Fig. 32 geht hervor, dass die Grösse der *F*₁-Gipfel in den *P'*, *f*-Kurven nicht symmetrisch um Mittag liegt. Am Vormittage ist der Gipfel ausgesprägter als am Nachmittage, — vgl. die um 17^h 49^m und 5^h 58^m aufgenommenen *P'*, *f*-Kurven.

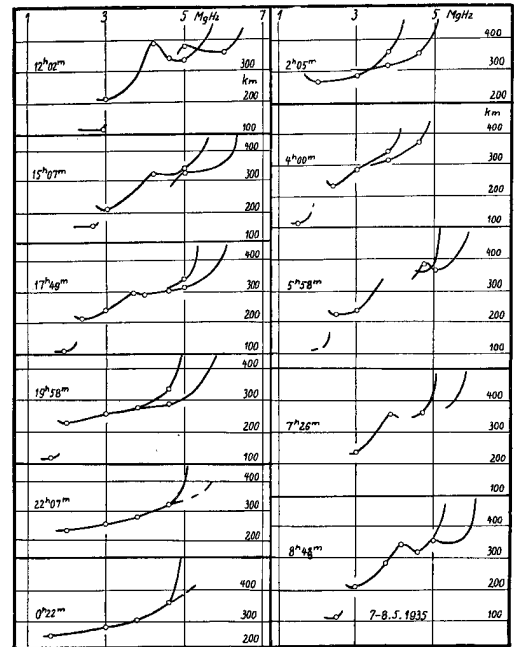


Fig. 32.

Während des Frühlings und Sommers wird die Ionisationskurve der *F*₂-Schicht immer unregelmässiger. Das sekundäre Maximum der kritischen

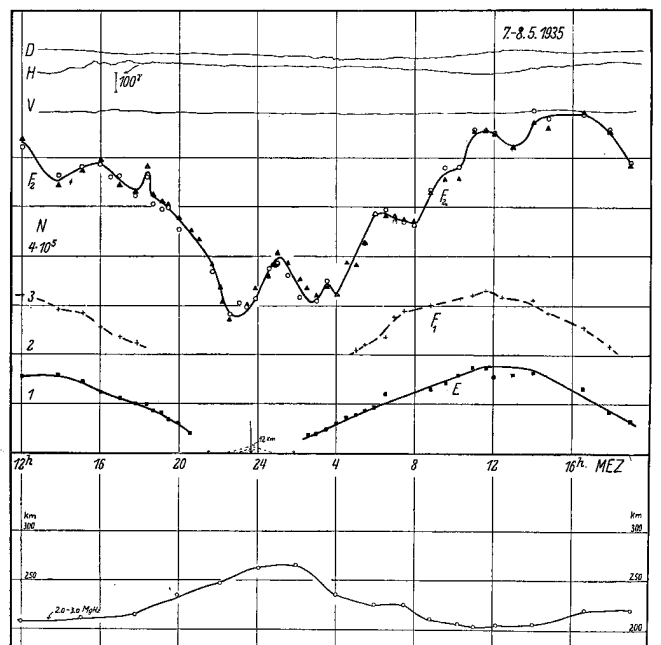


Fig. 33.

Frequenzen der F_2 -Schicht, das bei diesen Tagesbeobachtungen eben nach Mitternacht auftritt, war auch in der Ionisationskurve der vorgehenden Tagesbeobachtungen angedeutet und kann wohl nicht als zufällig angesehen werden. Wir können dieses Maximum als eine Wirkung der nächtlichen Abkühlung und Kontraktion der Atmosphäre ansehen, obwohl die F_2 -Schicht jetzt dauernd von der Sonne bestrahlt wird.

Die E -Echos fallen kurz vor Sonnenuntergang aus, obwohl diese Schicht auch dauernd während der Nacht von der Sonne bestrahlt wird, — die Sonnenstrahlen reichen um Mitternacht bis 12 km Höhe herunter.

Unten in Fig. 33 sind die äquivalenten Höhen, dem niedrigsten Teile der P', f -Kurven der F_2 -Schicht entnommen, während der Nacht angegeben.

Nr. 15. 15.—16. 5. 1935. Die erdmagnetischen Registrierungen sind während des Vormittages des ersten Tages störungsfrei. Um 20^h setzt eine Störung mittlerer Grösse ein, die die ganze Nacht und teilweise dem nächsten Tag dauert.

Die Echoregistrierungen zeigen normale P', f -Kurven bis 19^h 55^m, vgl. Tafel IV Nr. 8. Fig. 34 zeigt den Verlauf der maximalen Elektronendichten. Die erdmagnetische Störung setzt um 20^h 10^m ein, die Registrierung um 20^h 20^m zeigt eine Verdoppelung der F_2 -Schicht, vgl. Tafel IV Nr. 9. Später zeigt die F_2 -Schicht eine noch verwickeltere Struktur, und um 24^h 09^m treten die E -Echos bis 8.1 MgHz auf.

Zwischen 1^h und 3^h 30^m während der Hauptschwingung der Störung treten nur schwache Spuren von Echos auf, die tiefer liegende absorbierende Schicht ist scheinbar wirksam. Während der ruhigen Periode von 4^h bis 7^m treten die Schichten mit normalen P', f -Kurven auf. Die Echos sind noch ziemlich schwach, eine starke Absorption ist noch vorhanden. Während der kleineren Störung von 11^h bis 14^h 30^m fallen wieder sämtliche Echos aus.

Von 15^h bis 18^h findet eine merkwürdige Entwicklung der P', f -Kurven statt. Die erdmagnetische Störung ist noch bedeutend, aber von einem ruhigeren Verlauf. Die Registrierungen um 15^h 00^m und 16^h 05^m zeigen einen normal grossen

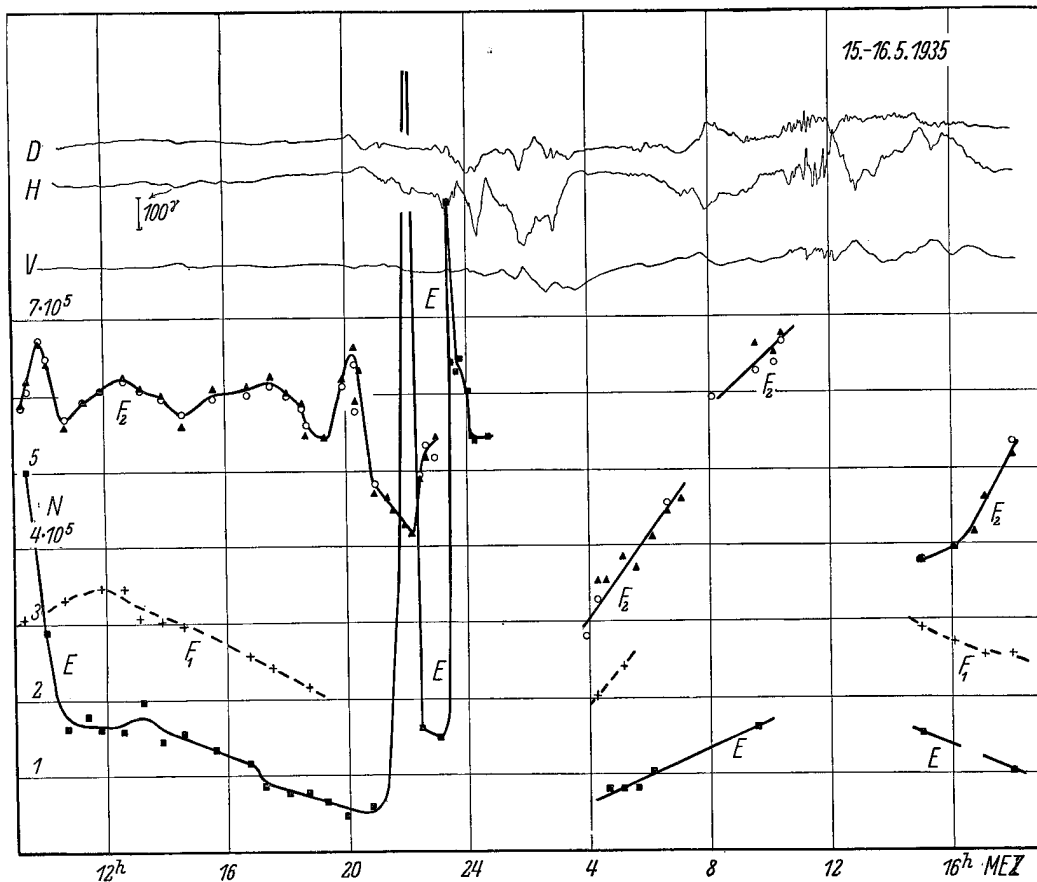


Fig. 34.

F_1 -Gipfel in den P', f -Kurven, — in Fig. 35 ist eine Auswahl der P', f -Kurven vom vorhergehenden, ruhigeren Tage, zum Vergleich mit diesen zwei, eingezeichnet.

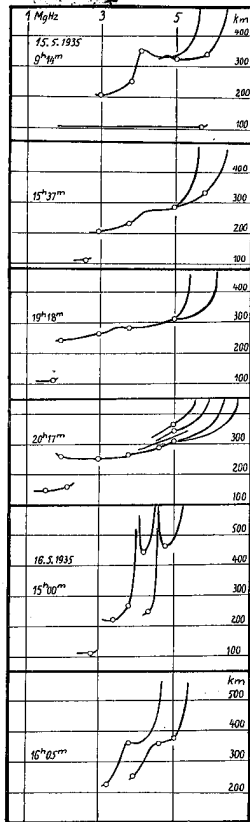


Fig. 35.

Die E - und F_1 -Schichten zeigen am zweiten Tage um der Zeit von 15^h bis 18^h die normalen kritischen Frequenzen, die mit der Zeit abnehmen. Die kritischen Frequenzen der F_2 -Schicht nehmen indessen zu, gleichzeitig nimmt der F_1 -Gipfel mit der Zeit ab. Die erdmagnetische Störung bewirkt scheinbar eine Expansion der F_2 -Schicht ohne den unteren Teil, die F_1 -Schicht und die E -Schicht, merklich zu beeinflussen. Mit abnehmender Intensität der Störung sinkt der obere Teil der F_2 -Schicht herunter und die maximale Elektronendichte steigt während des Nachmittages, gleichzeitig wird die Schichtung zwischen den F_2 - und F_1 -Schichten mehr verwischt.

In Fig. 36 ist die Verteilung der Elektronendichten im normalen und im gestörten Zustand aus den Registrierungen vom 15.5 um 15^h 37^m und vom 16.5 um 15^h 00^m angedeutet. Die Höhenangaben sind selbverständlich sehr unsicher, da die Gruppengeschwindigkeiten der P', f -Kurve entlang grosse Änderungen aufweisen. Die maximalen Elektronendichten sind der Grössenordnung nach zuverlässig, da sie aus den kritischen Frequenzen bestimmt sind.

Nr. 16. 27.—28. 5. 1935. Die erdmagnetischen Registrierungen zeigen eine kleine Störung um 22^h—23^h, die von einer Steigerung der E -Ionisation begleitet ist.

Fig. 37 zeigt den Verlauf der Maximalionisation der F_2 -, F_1 - und E -Schichten. Die Maxi-

malisation der F_2 -Schicht zeigt während der erdmagnetisch ungestörten Zeit viele Unregelmässigkeiten, die sich aber in dem Verlauf der F_1 -Ionisationskurve fast gar nicht widerspiegeln. Die Variationen, die wahrscheinlich als Wirkungen unregelmässigen Vertikalbewegungen des oberen Teiles der F_2 -Schicht erklärt werden können, sind scheinbar ohne Wirkung auf die untere Ausbuchtung der Schicht, die F_1 -Schicht.

In Tafel IV Nr. 2 und 3 sind zwei um 10^h 55^m und 18^h 12^m aufgenommene Registrierungen reproduziert, die die Entwicklung der F_2 - und F_1 -Schichten zeigen. Die Registrierung von 18^h 12^m zeigt M -Echos, die später behandelt werden sollen.

Die Verstärkung der E -Ionisation während der Störung um Mitternacht ist von dem Ausfallen der F_2 -Echos begleitet. Nach der Störung treten wieder die F -Echos auf, und jetzt mit höheren kritischen Frequenzen. Tafel IV Nr. 4 zeigt eine Registrierung um 1^h 24^m. Die auftretenden Echos sind sehr kompliziert, eine Reihe von Schichten treten auf und die Echos zeigen eine Reihe von Frequenzdurchbrüchen. Diese F -Schicht, die höher liegt als die F -Schicht am Tage, verschiebt sich mit der Zeit nach kleineren Höhen, die kritischen Frequenzen nehmen ab und die Schicht geht kontinuierlich in die normale F_1 - und F_2 -Schicht über, vgl. die Registrierung, die um 5^h 06^m aufgenommen und in Tafel IV Nr. 5 reproduziert ist. Man hat dieselbe Entwicklung der Schichten nach einer kleineren, erdmagnetischen Störung, die früher im Winter festgestellt worden ist.

Auf den zwei Registrierungen Tafel IV Nr. 3 und 5, die ungefähr symmetrisch zur wahren Mitternacht aufgenommen sind (5^h 38^m vor und 5^h 26^m nach), sind die verschiedenen Grössen der F_1 -Gipfel in den P', f -Kurven ersichtlich. Die Schichtung in der F -Schicht zwischen F_1 und F_2 ist frühmorgens ausgeprägter als abends.

Nr. 17. 4.—5. 6. 1935. Die erdmagnetischen Registrierungen zeigen einige Störungen während des ersten Tages, die abends um 20^h in eine Störung mittlerer Grösse übergehen. Der zweite Tag ist erdmagnetisch fast ungestört. Fig. 38 zeigt den Verlauf der maximalen Elektronendichten.

Die Echoregistrierungen am ersten Tage zeigen normale P', f -Kurven bis 19^h, obwohl die Störungen am Nachmittage nach den früheren Erfahrungen genügend gross sein sollten, um eine Verstärkung der E -Ionisation hervorzubringen. Erst die Regi-

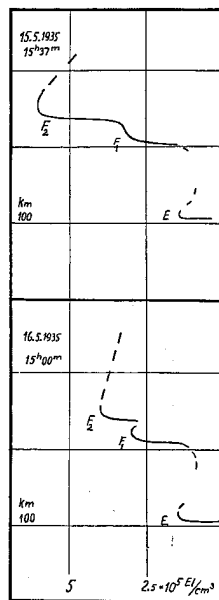


Fig. 36.

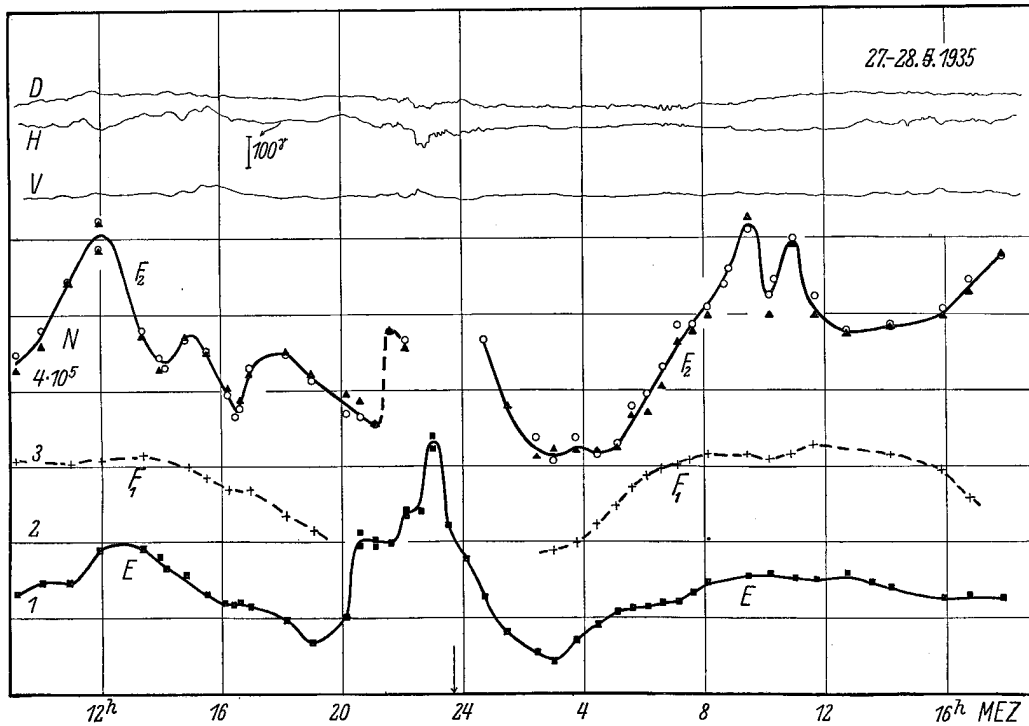


Fig. 37.

strierung um 18^h 12^m zeigt eine Verstärkung der *E*-Ionisation. Um 20^h setzt die Hauptschwingung der Störung durch einen plötzlichen Ansatz (Impe-

tus oder «Sudden Commencement») in *H* ein. Auf der Echoregistrierung, die gleichzeitig aufgenommen wurde, kann die *E*-Schicht bis 7.8 MgHz verfolgt werden, die Echos sind indessen schwach, und die *F*₂-Echos auf niedrigeren Frequenzen sind dauernd sichtbar. Die Steigerung der Ionisation in der *E*-Schicht muss deshalb in einer dünnen, wenig absorbierenden Schicht konzentriert sein. Während der Hauptschwingung der Störung sind die maximalen kritischen Frequenzen entschieden *kleiner*. Der Verlauf der *E*-Ionisationskurve zeigt eine genaue Übereinstimmung mit der Hauptschwingung der erdmagnetischen Störung, die kleine Abnahme in *H* in der Störung um 21^h 32^m spiegelt sich auch in der Ionisationskurve wieder.

In Fig. 36 unten sind die äquivalenten Höhen der Umkehrpunkte der Signale auf 2.25 und 3.0 MgHz eingezeichnet. Die äquivalenten Höhen um Mittag sind 100 km, nachmittags nehmen die Höhen zu, in Übereinstimmung mit Formel (21). Während der Hauptschwingung der Störung nehmen die Höhen der *E*-Schicht wieder bis auf 97—100 km *ab*.

Die *F*₂-Schicht zeigt dieselben unregelmässigen Variationen während des Sommers, die früher erwähnt sind. Diese Änderungen spiegeln sich fast gar nicht in dem unteren Teil der Schicht, der *F*₁-Schicht, wieder.

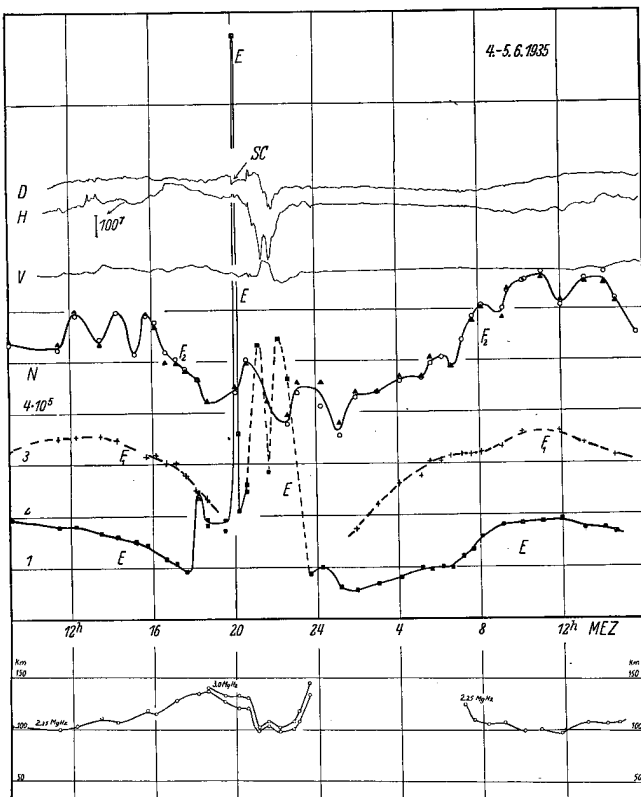


Fig. 38.

Nr. 18. 12.—13. 6. 1935. Die erdmagnetischen Registrierungen zeigen am Tage dauernd kleinere Störungen, während der Nacht tritt eine Störung mittlerer Grösse auf.

Die Echoregistrierungen am ersten Tage von 9^h bis 14^h zeigen normale P' , f -Kurven. Der F_1 -Gipfel ist jetzt um Mittsommer sehr ausgeprägt, und am Vormittage bedeutend höher als am Nachmittage, vgl. die P' , f -Kurven um 9^h 25^m und 14^h 10^m in Fig. 39.

In der um 15^h 53^m registrierten P' , f -Kurve tritt eine Anomalie auf, der F_1 -Gipfel fehlt im ausserordentlichen Strahl — auf den nachfolgenden Registrierungen um 16^h 03^m und 16^h 38^m tritt der F_1 -Gipfel wieder auf.

Von 17^h ab wird die E -Ionisation durch die erdmagnetische Störung verstärkt. Von 19^h 45^m bis 21^h 10^m, während der ersten Hauptschwingung der Störung, fallen sämtliche Echos aus. Nach der Hauptschwingung treten wieder die Echos auf höheren Frequenzen auf, die Amplituden der Echos sind indessen sehr schwach, was auf starke Absorption deutet.

Von 24^h bis 1^h 45^m, während der zweiten Hauptschwingung der Störung, fallen wieder sämtliche Echos aus. Nach der Störung treten die F -Echos mit bedeutender Intensität auf. Von 5^h bis 7^h fallen wieder sämtliche Echos aus, ohne dass dies von einer besonders energischen Störung begleitet wird. Auf der Registrierung um 7^h 02^m tauchen wieder die Echos mit bedeutender Intensität auf.

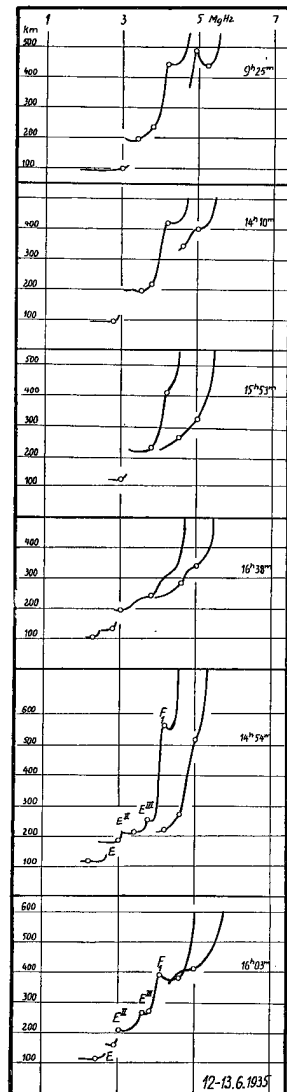


Fig. 39.

Die Registrierungen um 14^h 53^m und 16^h 05^m zeigen eine verwickelte Struktur der P' , f -Kurven. Neben den E -, F_1 - und F_2 -Schichten treten zwei andere Maxima auf, die den Zwischenschichten

E^{II} und E^{III} zugeschrieben werden müssen, vgl. Fig. 39.

Die Ionisationskurve der F_1 -Schicht zeigt einen regelmässigen Verlauf, ohne die unregelmässigen Schwankungen der F_2 -Schicht wiederzuspiegeln, z. B. ist das sekundäre Minimum in der F_2 -Ionisation um 14^h 54^m am zweiten Tage in der F_1 -Schicht nicht bemerkbar. Die P' , f -Kurve dieser Registrierung, vgl. Fig. 39, zeigt indessen einen abweichenden Verlauf, indem der F_1 -Gipfel wenig ausgeprägt ist, gleichzeitig nehmen die äquivalenten Höhen auf höheren Frequenzen stark zu. Die F_2 -

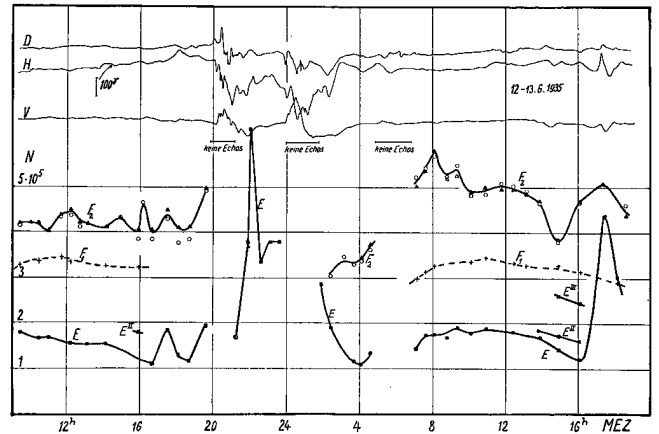


Fig. 40.

Schicht hat sich scheinbar nach unten ausgedehnt. Das scharfe Maximum der maximalen Elektronendichte in F_2 ist mehr verwischt und gleichzeitig ist die Schichtung zwischen F_1 und F_2 etwas «ausgefüllt».

Nr. 19. 4.—6. 7. 1935. An diesen Tagen wurden die Änderungen der Schichten während 60 Stunden kontinuierlich verfolgt. Die erdmagnetischen Registrierungen zeigen am ersten Tage einige unbedeutende Ausbuchtungen und Wellen, sonst sind die erdmagnetischen Registrierungen störungsfrei.

Fig. 41 zeigt den Verlauf der maximalen Elektronendichten in der F_2 , der F_1 und der E -Schicht. Die F_2 -Schicht zeigt jetzt um Mittsommer einen unregelmässigen und verwickelten Verlauf. Wegen der Mitternachtssonne und der langsamen Rekombination ist die tägliche Periode fast verschwunden. Ein Minimum um 17^h tritt an den zwei letzten Tagen auf, ebenso ein Maximum um Mitternacht, das wohl als eine Wirkung der nächtlichen Kontraktion angesehen werden kann.

Die F_1 -Schicht zeigt einen regelmässigen Verlauf während der drei Tage ohne von den unregel-

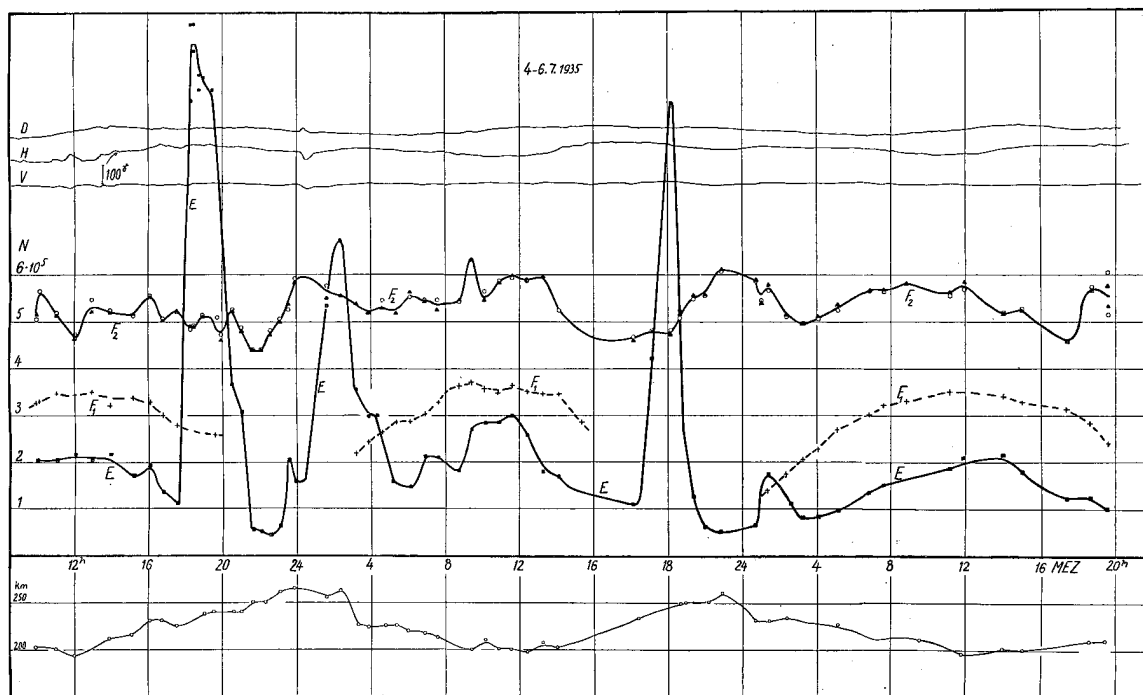


Fig. 41.

mässigen Änderungen der F_2 -Schicht beeinflusst zu werden. In der täglichen Kurve der Ionisation dieser Schicht kommt die früher bemerkte Asymmetrie des täglichen Ganges zum Ausdruck. Die Schicht ist deutlicher entwickelt frühmorgens und am Vormittage als am Nachmittage, der F_1 -Gipfel in den P' , f -Kurven wird am Nachmittage früher verwischt als an der entsprechenden Zeit vormittags.

Die E -Schicht zeigt einen verwickelten Verlauf. Die erdmagnetischen Störungen sind nach unseren Erfahrungen zu klein, um in der E -Schicht eine Steigerung der Ionisation hervorzurufen. Es ist früher beobachtet¹⁾ worden, dass die E -Schicht im Sommer plötzliche und grosse Steigerungen der Ionisation zeigen kann, die nicht durch erdmagnetische Störungen hervorgerufen sind. Die an diesen Tagen auftretende anormale E -Ionisation ist ein Beispiel dafür. Trotz dieser starken Ionisation der E -Schicht dringen die F -Echos während des Tages immer durch, die Steigerung der E -Ionisation muss deshalb in einer dünnen, wenig absorbierenden Schicht konzentriert sein, was gewöhnlich bei Verstärkung der E -Ionisation durch erdmagnetische Störungen *nicht* der Fall ist. Die zwei Maxima der anormalen Steigerung der E -Ionisation

treten zu ungefähr denselben Zeiten auf, was wohl nur als zufällig angesehen werden kann.

Es ist von Interesse zu untersuchen, ob das Einsetzen der anormalen Steigerung der E -Ionisation von Änderungen der äquivalenten Höhen der F -Schicht begleitet ist. Der verwickelte Verlauf der P' , f -Kurven im Sommer und die zeitlichen Änderungen während des Tages machen einen Vergleich der äquivalenten Höhen für bestimmte Frequenzen illusorisch. Um einen qualitativen Vergleich der Höhen des unteren Teiles der F -Schicht durchzuführen, haben wir die äquivalenten Höhen des tiefsten Punktes auf den P' , f -Kurven ausgemessen und in Fig. 41 unten dargestellt. Die Höhenänderungen scheinen von dem Einsetzen der anormalen Steigerung der E -Ionisation völlig unabhängig zu sein. Eine merkliche allgemeine Gruppenverzögerung der Signale in der verstärkten E -Schicht findet deshalb nicht statt.

Ratcliffe und E. L. C. White¹⁾ haben gezeigt, dass bei auftretender anormaler Steigerung der E -Ionisation, die Signale zwischen den E - und F -Schichten reflektiert werden können, — es treten sogenannte M -Echos auf. Die Registrierungen an diesen Tagen zeigen schöne Beispiele dafür, Neben den früher beobachteten M -Echos treten auch

¹⁾ Ratcliffe und E. L. C. White, Proc. Phys. Soc. 46, 1934, 107.

¹⁾ Phil. Mag. 16, 1933, 139.

andere mehrfache Reflexionen auf, die nicht früher beobachtet sind. Tafel IV Nr. 10 b zeigt eine am 4.7 um 18^h 43^m aufgenommene Registrierung. Fig. 42 zeigt die ausgemessenen P', f -Kurven mit der angegebenen Deutung der Echos. In Tabelle 10 sind die äquivalenten Höhen für drei Frequenzen ausgemessen und die aus den Höhen der ersten Reflexionen der E - und F -Echos berechneten Kombinationen angegeben.

Tabelle 10.

Ausgemessene äq. Höhen	Identifizierung	Berechnete äq. Höhen
4.60 MgHz.		km
122	E	
242	$2 E$	244
308	F	
439	$E + F$	430
504	$2 F - E$	494
622	$2 F$	616
4.83 MgHz.		
126	E	
247	$2 E$	252
330	F	
455	$E + F$	456
540	$2 F - E$	534
660	$2 F$	660
5.40 MgHz.		
124	E	
245	$2 E$	248
336	F	
462	$E + F$	460
562	$2 F - E$	548
680	$2 F$	672

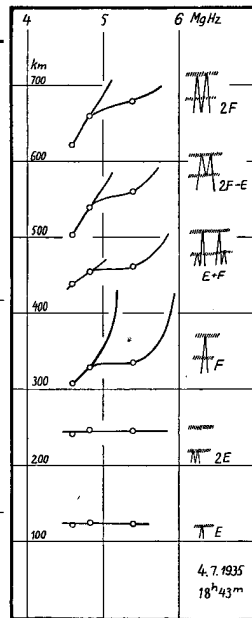


Fig. 42.

Nr. 20. 10.—11. 7. 1935. Die erdmagnetischen Registrierungen sind während des ersten Tages völlig störungsfrei, um 20^h setzt eine kleine Störung ein, die bis 2^h dauert. Um 8^h morgens setzt wieder eine neue Störung ein, die bis zum Abschluss der Beobachtungen dauert. Fig. 43 zeigt den Verlauf der maximalen Elektronendichten.

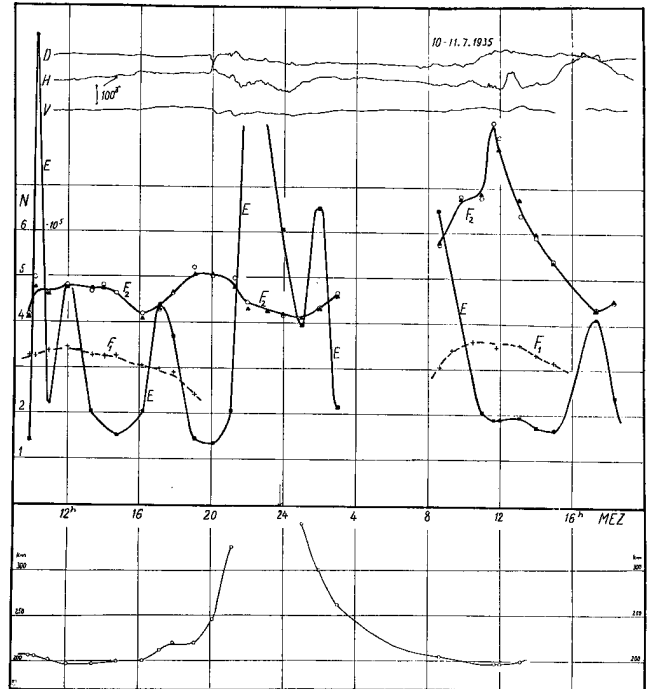


Fig. 43.

Die Echoregistrierungen zeigen zeitweise das Auftreten von anormaler Steigerung der E -Ionisation, die wenigstens teilweise der erdmagnetischen Störung nicht zugeschrieben werden kann. Diese Steigerungen der E -Ionisation setzen ein und verschwinden in kurzer Zeit.

Wie auf den Registrierungen vom 4.—6. 7., durchdringen die F -Echos auch an diesem Tage die anormale E -Schicht ohne wesentlich abgeschwächt zu werden, zeitweise treten auch M -Reflexionen auf.

Die P', f -Kurven der M -Reflexionen am 4.—6. 7. waren ebenso wohldefiniert wie die E - und F -Reflexionen, an diesem Tage dagegen treten M -Reflexionen auf, die unscharf sind, vgl. die um 17^h 10^m aufgenommene Registrierung, Tafel IV Nr. 11. Die E -Schicht hat eine scharfe untere Grenze, die obere Grenze der E -Schicht scheint indessen nicht scharf ausgeprägt zu sein, die M -Echos erscheinen deshalb mit verwischter Struktur.

Wie von Ratcliffe und White¹⁾ hervorgehoben ist, treten die anormalen Steigerungen der E -Ionisation im Sommer besonders dann auf, wenn die Bedingungen zur Bildung von Gewittern da sind. Nach freundlicher Mitteilung von Værvarslingen for Nord-Norge, Tromsø, traten an diesen Tagen (und auch an den Beobachtungstagen am 11.—12. 7.) keine Gewitter im nördlichen Teil Norwegens auf.

In Tafel IV Nr. 10 a, b und c sind mehrere Registrierungen von diesen Tagen reproduziert, die das Auftreten mehrfacher Reflexionen zwischen den Schichten darstellen.

¹⁾ Proc. Phys. Soc. 46, 1934, 107.

Die erdmagnetische Störung von 20^h bis 2^h ist von grosser Steigerung der *E*-Ionisation begleitet. Ob diese Steigerung der erdmagnetischen Störung allein zuzuschreiben ist oder ob gleichzeitig eine anormale Steigerung der *E*-Ionisation eintritt, kann nicht entschieden werden. Die *F*-Echos sind während dieser Steigerung dauernd anwesend.

Von 3^h bis 8^h 30^m fehlen Beobachtungen, die um 9^h einsetzende erdmagnetische Störung ist von einer Steigerung der *F*₂-Ionisation begleitet.

Wie bei den Beobachtungen am 4.—6. 7. sind die Höhen des tiefsten Punktes auf den *P'*, *f*-Kurven unten in Fig. 43 dargestellt. Die Höhenänderungen sind von dem Einsetzen der anormalen Steigerung der *E*-Ionisation unabhängig. Eine merkliche Gruppenverzögerung der Signale in dieser anormalen *E*-Schicht findet deshalb nicht statt.

13. Die Änderungen der Grösse des Rekombinationskoeffizienten während des Jahres.

Die Aufstellung der Rekombinationsformel $\frac{dN}{dt} = -\alpha \cdot \Delta t$ stützt sich auf das Massenwirkungsgesetz von Guldberg—Wäge.¹⁾ Nach Langevin²⁾ ist für atmosphärische Luft bei 760 mm Hg und 0° C $\alpha = 1.6 \cdot 10^{-6}$.

Der Rekombinationskoeffizient ist druck- und temperaturabhängig, indem die Rekombination der positiven und negativen Ionen von der Geschwindigkeit und freien Weglänge derselben abhängig ist. Nach Langevin³⁾ scheint der Rekombinationskoeffizient dem Druck umgekehrt proportional zu sein, die Formel ist indessen nur für Drucke über mehrere Zentimeter geprüft worden. Ist *p* der Druck in mm Hg, so bekommt man, wenn man zu kleinen Drucken extrapoliert, $\alpha = 2 \cdot 10^{-9} \cdot p$.

Die aus den Tagesbeobachtungen der Ionisationskurve durch Messung des Abklingens bestimmten Werte des Rekombinationskoeffizienten sind in Tabelle 11 zusammengestellt.

Ein jährlicher Gang in den Werten von α geht aus Tabelle 11 hervor, der durch die jährliche Druckschwankung in 250 km Höhe zu erklären ist.

Der Druck im *F*₂-Niveau, nach der statischen Grundgleichung unter Annahme einer Temperatur

Tabelle 11.

Tag	α in der <i>F</i> ₂ -Schicht
23. 12. 1935	$6.6 \cdot 10^{-10}$
6. 1. 1936	5.3 »
22. 1. 1936	10.9 »
29. 1. 1936	2.4 » , $9.9 \cdot 10^{-10}$, $27.3 \cdot 10^{-10}$
23. 10. 1935	1.3 »
4. 3. 1936	0.53 » , $0.64 \cdot 10^{-10}$
2. 4. 1935	1.3 »
27. 4. 1935	3.0 »

von 0° C und vollständiger Durchmischung berechnet, ist von der Grössenordnung $p = 10^{-5}$ mm Hg. Der aus den Messungen von Langevin extrapolierte Wert von α in *F*₂-Niveau sollte dann von der Grössenordnung $2 \cdot 10^{-14}$ sein. Die aus dem Abklingen der Ionisationskurve berechneten Werte sind za. 10 000 mal grösser, was wohl darauf deutet, dass diese Extrapolation der Messungen von Langevin auf sehr kleine Drucke nicht zulässig ist.

Die Druckabhängigkeit des Rekombinationskoeffizienten ist noch nicht entgültig festgelegt. Nach Mc Clung¹⁾ ist der Rekombinationskoeffizient vom Druck völlig unabhängig.

Wir bemerken, dass wir eine angenäherte Übereinstimmung mit den beobachteten Werten von α bekommen, falls wir eine Druckabhängigkeit von \sqrt{p} annehmen. Der Rekombinationskoeffizient wird dann $\alpha = 5.8 \cdot 10^{-8} \cdot \sqrt{p}$, und für $p = 10^{-5}$ mm Hg bekommt man $\alpha = 1.8 \cdot 10^{-10}$.

Eine Abschätzung des Druckes im *F*₂-Niveau mittels des Rekombinationskoeffizienten kann indessen erst nach weiteren experimentellen Untersuchungen über die Druckabhängigkeit von α gemacht werden. Eine einwandfreie Untersuchung bei sehr kleinen Drucken lässt sich übrigens schwierig durchführen, schon bei Drucken von 10^{-4} mm Hg wird die freie Weglänge der Gasmoleküle in Luft von der Grössenordnung 50 cm.

14. Der allgemeine Verlauf der Tageskurven.

Aus den Tagesbeobachtungen Nr. 1—20 geht hervor, dass auf einer erdmagnetisch stark gestörten Stelle wie Tromsø die Störungen den allgemeinen ruhigen Verlauf der Tageskurven stark beeinflussen.

¹⁾ Langevin, Ann. de Chimie et de Phys. 28, 1903, 433.

²⁾ Loc. cit.

³⁾ Loc. cit.

¹⁾ Phil. Mag. 3, 1902, 283.

Für die E - und F_1 -Schichten geht indessen an ungestörten Tagen der regelmässige Tagesverlauf deutlich hervor. Der Verlauf der Maximalionisation der F_2 -Schicht ist sowohl bei gestörtem wie ungestörtem Zustand mehr oder weniger unregelmässig. Da man kaum annehmen kann, dass die Intensität der Sonnenstrahlen merkliche unregelmässige Änderungen während des Tages aufweist, müssen die Änderungen den vertikalen Massenbewegungen in F_2 -Niveau zugeschrieben werden.

Aus den Tagesbeobachtungen geht hervor, dass der Verlauf der F_2 -Ionisation vom Winter zum Sommer immer unregelmässiger wird. Ein sekundäres Minimum scheint indessen in den F_2 -Kurven regelmässig wiederzukehren, und zwar bei Sonnenuntergang im Mehresniveau oder kurz nachher, d. h. wenn die Sonnenstrahlen annähernd horizontal in die Schicht einfallen. Neben diesem Minimum scheint ein zweites wenigstens im Mittwinter nicht zufällig zu sein, das ist das Mittagsminimum, das deutlich in den Tagesbeobachtungen Nr. 1, 2, 4, 5 und 9 zu sehen ist und wohl als eine Wirkung der Ausdehnung der Atmosphäre um Mittag anzusehen ist. Das Sonnenuntergangsminimum und das nachfolgende Maximum ist als eine Abendkonzentration wegen Zusammenpressung der Atmosphäre anzusehen. Das Abendmaximum ist im Mittwinter sehr klein und dauert nur kurze Zeit, vgl. die Tagesbeobachtungen 1 und 2, in der letzten fehlt scheinbar das Abendmaximum.

In den äquivalenten Höhen macht sich diese Abendkonzentration durch eine kleine, aber deutliche Abnahme der Höhen bemerkbar.

Während die E -Echos erst nach Sonnenaufgang im Mehresniveau, d. h. wenn die E -Schicht von oben bestrahlt wird, bemerkbar sind, setzt die plötzliche Steigerung der F_2 -Ionisation schon bei Sonnenaufgang in 100—150 km Höhe ein, d. h. wenn die Schicht von den Sonnenstrahlen *von unten* bestrahlt wird und die Sonnenstrahlen schon einmal die Schicht durchquert haben. *Eine vollständige Absorption des ionisierenden Spektralbereiches findet deshalb in der F_2 -Schicht nicht statt.*

15. Die vertikalen Bewegungen der Luftmassen im Niveau der E -Schicht.

In den Mittagsbeobachtungen sowie in den Tagesbeobachtungen sind einige Effekte aufgetaucht, die als Wirkungen von vertikalen Bewegungen von

Luftmassen in Höhen über 200 km gedeutet werden müssen. Diese Vertikalbewegungen werden ausschliesslich Temperaturänderungen wegen Sonnenstrahlung oder Korpuskularstrahlung zugeschrieben.

Der regelmässige jährliche Verlauf der Maximalionisation in den F_1 - und E_2 -Schichten zeigt, dass die jährlichen Dichteschwankungen für die Änderungen der kritischen Frequenzen dieser Schichten nicht von Bedeutung sind.

Die tägliche Temperaturvariation, die in der F_2 -Schicht durch die Bildung von Kontraktionschichten und von dem sekundären Abendmaximum bei Sonnenuntergang zu erkennen ist, lässt sich in den E - und F_1 -Schichten wegen der schnellen Rekombination, die die Schichten nach Sonnenuntergang neutralisiert, nicht nachweisen.

Vertikale Massenbewegungen im Niveau der E -Schicht, die der täglichen Temperaturschwankung zuzuschreiben sind, lassen sich indessen in den Nordlichthöhen nachweisen. Wie zuerst von Størmer gezeigt ist,¹⁾ nehmen die Nordlichthöhen in der sonnenbelichteten Atmosphäre beträchtlich zu, was durch eine Hebung der Atmosphäre in dem sonnenbelichteten Teil erklärt werden kann.²⁾

¹⁾ Nature, 123, 1929, 83 und 868, ZS. f. Geophys. 5, 1929, 177.

²⁾ In einer Anzahl von Abhandlungen hat Vegard die Auffassung vertreten (Vid.selsk. skr. Mat. nat. kl. Nr. 8, 9, 10, 1923, ZS. f. Geophys. 6, 1930, 42. Geofysiske publikasjoner IX, No. 11, 1932, 65), dass ein elektrisches Feld in den höchsten Atmosphärenschichten anwesend ist, das einen merklichen Einfluss auf die vertikale Verteilung der positiv geladenen Ionen ausübt. Wir werden von den grundsätzlichen Fragen, wie das Feld zu Stande kommt und aufrechtgehalten wird, absehen und nur die Folgerungen für die Vorstellungen über die Ionisation der Schichten besprechen.

Wie aus dem Vergleich der Beobachtungen bei der Reflexion der Radiowellen mit der Theorie mit Sicherheit hervorgeht, sind die Ladungsträger, die für die Ausbreitung der Radiowellen verantwortlich sind, freie Elektronen. Die kritischen Frequenzbestimmungen zeigen, dass die maximale Elektronendichten in den E - und F -Schichten normalerweise am Tage von der Grössenordnung $2 - 6 \cdot 10^5$ Elektronen/cm³ ist. Das Auftreten von Zwischenschichten (E_{II}) zeigt, dass der Raum zwischen der E - und der F -Schicht etwas von Elektronen «ausgefüllt» ist, und das Auftreten von Kontraktionsschichten nach Sonnenuntergang zeigt, dass im Höhenintervall 100—300 km eine wechselnde Elektronendichte von mindestens 10^5 Elektronen/cm³ vorhanden ist.

Durch parallaktische Aufnahmen im Oktober 1935 von einem 800 km langen Nordlichtbogen, dessen eine Hälfte in der finsternen, die andere in der sonnenbelichteten Atmosphäre lag,¹⁾ konnte

Die Feldstärke, die genügend ist um die Wirkung der Schwere auf z. B. ein N_2^+ -Ion aufzuheben, ist $2.8 \cdot 10^{-3}$ volt/cm. Die Geschwindigkeit, die den freien Elektronen durch ein Feld dieser Grösse mitgeteilt wird, wird von der Beweglichkeit der Elektronen abhängen, die wieder von der Dichte abhängig ist. Die Dichte in 150 km Höhe lässt sich aus der statischen Grundgleichung zu 10^{-4} mm Hg abschätzen, die freie Weglänge der Moleküle oder Ionen (wir nehmen völlige Durchmischung der Konstituenten der Atmosphäre an) wird bei 0° C dann $l_{Ion} = 75$ cm sein. Die freie Weglänge der Elektronen ist schwierig einwandfrei abzuschätzen, indem diese von der Elektronentemperatur und der Verteilung der Geschwindigkeiten abhängt. Nach Pedersen (The Propagation of Radio Waves, S. 42) ist die freie Weglänge der Elektronen in einer Atmosphäre durch folgende Formel, die auf J. S. Townsend zurückgeht, gegeben: $l_{Elektron} = 3.2 \cdot 10^{-2} \frac{1}{p}$ cm (hier ist p der Druck in mm Hg). In 150 km Höhe wird deshalb die freie Weglänge der Elektronen von der Grössenordnung $l_{Elektron} = 320$ cm.

Ein elektrisches Feld von der Grösse $2.8 \cdot 10^{-3}$ volt/cm wird den freien Elektronen im *Vakuum* nach Durchlaufen einer Strecke von 1 km eine Geschwindigkeit von 32 km/sek mitteilen.

Die Berechnung der Leitfähigkeit eines ionisierten Gases kann mittels bekannter Formeln durchgeführt werden. Die Leitfähigkeit ist durch folgende Formel gegeben (P. O. Pedersen, The Propagation of Radio Waves, Kopenhagen 1927, S. 81).

$$\sigma = \frac{1}{2} \frac{e^2 \cdot N}{m} \cdot \frac{\tau^2}{\tau} \quad (\text{E. S. E.})$$

hier ist $\frac{1}{\tau}$ die mittlere Kollisionsfrequenz.

Die von Vegard vertretene Auffassung von dem Einfluss möglicher elektrischer Felder innerhalb der Ionosphäre kann als Möglichkeit zur Erklärung der vertikalen Massenbewegungen erst herangezogen werden, wenn quantitative Berechnungen über die auftretenden Ladungsverschiebungen durchgeführt sind und die Energiefrage mit Rücksicht auf die Aufrechterhaltung des angenommenen Feldes geklärt ist.

Es ist schwierig zu verstehen, wie man der Kompensierung eines elektrischen Feldes beliebiger Grösse in wenigen Sekunden oder Minuten entgegen kann.

Die oben erwähnte Formel für die Leitfähigkeit eines ionisierten Gases ist nur für den feldfreien Raum gültig. Im erdmagnetischen Felde wird die Leitfähigkeit von der Richtung des elektrischen Feldes im Vergleich zu dem erdmagnetischen Felde abhängen sein.

1) Harang, Terr.mag. 42, 1936.

nachgewiesen werden, dass die Höhe dieses Bogens von einer gleichmässigen Höhe von 100 km in dem finsternen Teil bis 140 km in der sonnenbelichteten Atmosphäre zunahm. Nimmt man an, dass die lichterregenden Korpuskel im ganzen Bogen dieselbe Durchdringlichkeit besitzen, so stellen die Höhen dem Bogen entlang eine Isobarfläche dar. Die Inklination dieser Fläche in Richtung von der finsternen zu der sonnenbelichteten Atmosphäre war von der Grösse $\text{tg } \Phi = 0.1$. Während einer Periode grosser Nordlichtaktivität im Februar 1936 wurden mehrere hundert parallaktische Aufnahmen von teilweise sonnenbelichteten Nordlichtern aufgenommen. Die Ausmessung eines Teiles dieses Materials¹⁾ zeigt dieselbe kontinuierliche Steigerung der Nordlichthöhen von 100 km aus in den sonnenbelichteten Teil der Atmosphäre.

16. Die Ionisierung der höchsten Atmosphärenschichten durch die Sonnenstrahlen und das Problem der zwei Schichten.

Die ionisierende Wirkung der Sonnenstrahlen ist theoretisch zuerst von Swann²⁾ und in Anlehnung an Swann's Betrachtungen von Chapman³⁾ behandelt worden. Eine interessante Anwendung von Saha's Theorie der Photoionisation in Sternatmosphären auf die höheren Atmosphärenschichten hat Pannekoek⁴⁾ gegeben. Da die Theorie von Pannekoek zu quantitativen Zahlenangaben über die ionisierten Schichten führt, werden wir diese kurz besprechen.

Nimmt ein Molekül die Energie $h\nu$ von der Strahlung auf, so wird die Energie $h\nu_0$, die der Ionisierungsenergie entspricht, zur Ionisierung des Moleküls verwendet und der Rest $h(\nu - \nu_0) = \frac{1}{2}mv^2$ in Translationsenergie überführt. Der umgekehrte Prozess findet bei Rekombination von einem Elektron mit Translationsenergie und einem Ion statt. Aus den bekannten Ionisierungsspannungen der N_2 - und O_2 -Moleküle von 16.9 und 16.1 Volt wird der Anfang der Absorptionsbande zu 730 Å und 766 Å bestimmt.

Durch Berechnung des atomaren Absorptionskoeffizienten wird die Ionisierung in einer Atmosphäre mit einem nach der statischen Grundgleich-

1) Harang, Gerl. Beitr. z. Geophys. 1936. Terr. mag. 43, 1937.

2) Terr.mag. 21, 1916, 1.

3) Q. J. R. Met. Soc. 52, 1926, 225.

4) Proc. kon. Akad. Wetenschappen, Amsterdam, 29, 1926, 1165.

ung nach oben abnehmenden Druck berechnet. Für eine reine N_2 - oder O_2 -Atmosphäre bei $218^\circ K$ isotherme Temperatur liegen die Maxima der Ionenproduktion in 145 km bzw. 128 km Höhe, die untere Begrenzung der Schicht liegt bei 130 km bzw. 113 km. In einer reinen H_2 -Atmosphäre oder (wie von Bartels ergänzt ist¹⁾ für eine Atmosphäre mit einem Partialdruck von H_2 am Erdboden von 10^{-8} Atmosphären, wird die Ionenproduktion erst von Bedeutung in Höhen von mehreren Hundert Kilometern, und schliesst ausserdem eine merkliche Ionisation in kleineren Höhen aus. Das Ausschliessen einer Wasserstoffatmosphäre, wie dies, das Fehlen die Wasserstofflinien im Polarlichtspektrum zeigt²⁾, wird deshalb durch die Überlegungen von Pannekoek über die Photoionisation bestätigt.

Obwohl die Theorie von Pannekoek durch das für jeden atmosphärischen Konstituent charakteristische Absorptionsspektrum die Möglichkeit von mehreren Schichten voraussagt, ist der berechnete Höhenunterschied der Niveaus maximaler Ionenproduktion in einer N_2 - und O_2 -Atmosphäre zu

klein, um mit den E - und F -Schichten korreliert zu werden. Diesen Unterschied kann indessen durch die Annahme einer viel höheren Tagestemperatur als $218^\circ K$, was Pannekoek annimmt, vergrössert werden, was auch sehr wahrscheinlich ist.

Durch Messung der Änderungen der Nordlichthöhen von der finsternen zu der sonnenbelichteten Atmosphäre in 100 km Höhe konnte die Hebung der Isobarfläche, die der vertikalen Ausdehnung der Atmosphäre wegen Temperaturerhöhung entspricht, gemessen werden. Daraus konnte die Minimumerhöhung der Temperatur im Grenzgebiet von der finsternen zu der sonnenbelichteten Atmosphäre geschätzt werden, die Temperaturerhöhung entsprach $1 : 1.57^1$). Wird die Temperatur in der finsternen Atmosphäre zu $225^\circ K$ gesetzt, was aus dem Verlauf der Intensitäten im R -Zweig der Rotationslinien des Stickstoff-Bandenspektrums bestimmt werden kann²⁾, so bekommt man einen Temperatursprung von $225^\circ K$ bis $353^\circ K$, und die Tagestemperatur ist wahrscheinlich viel höher.

¹⁾ Ergebnisse d. exakten Naturwiss. 7, 1928, 149.

²⁾ Vgl. z. B. Vegard, Hdb. d. Exp.phys. 25, erster Teil.

¹⁾ Harang, Terr.mag. 1936.

²⁾ Vegard, Terr.mag. 37, 1932, 399, und Vegard und Tønsberg, Geofysiske publikasjoner XI, No. 2, 1935, (Oslo) 11.

Erklärung von Tafel I.

- | | |
|--|--|
| <p>Nr. 1. Mittagsregistrierung vom 21. 1. 1936.
 2, » vom 8. 4 1935.
 3, » vom 19. 7. 1935.
 4, Am 29. 1. 1936, um 20^h 17^m aufgenommen. Die Registrierung zeigt eine hohe <i>F</i>-Schicht die sich nach Sonnenuntergang gebildet hat. Der ordentliche und der ausserordentliche Strahl sind sowohl für die <i>F</i>- als auch für die <i>E</i>-Echos sichtbar.
 5, am 5. 12. 1936, um 19^h 19^m aufgenommen. Die Registrierung zeigt eine hohe Kontraktionsschicht, die sich nach Sonnenuntergang gebildet hat.
 6, vom 5. 12. 1935, zeigt die Mittagsregistrierung.
 7, am 6. 12. 1935 um 5^h 20^m aufgenommen. Diese nächtliche kurz vor Sonnenaufgang aufgenommene <i>P'</i>, <i>f</i>-Kurve zeigt die starke Streuung der Echos im Vergleich zu der Mittagsregistrierung.
 8, am 24. 12. 1935 um 11^h 45^m aufgenommen.</p> | <p>Nr. 9, am 6. 1. 1936 um 13^h 35^m aufgenommen. Diese und die vorhergehende Registrierung zeigen den hohen Reflexionskoeffizient und die hohen kritischen Frequenzen der <i>F</i>₂-Schicht während des Mittwinters.
 10, am 6. 1. 1936 um 17^h 05^m aufgenommen. Die Registrierung zeigt die Streuung der Echos nach Sonnenuntergang in 250 km Höhe.
 11, am 6. 1. 1936 um 19^h 05^m aufgenommen. Eine hohe Kontraktionsschicht mit hohen kritischen Frequenzen hat sich gebildet.
 12 a, b, c und d, am 21. 1. 1936 um 20^h 38^m, 20^h 53^m, 21^h 02^m und 21^h 08^m aufgenommen. Die Registrierungen sind gleichzeitig mit dem Auftreten von Nordlichtbogen mit Strahlenstruktur mittlerer Intensität aufgenommen. Der Bogen erstreckte sich teilweise bis zum Zenith hinauf.</p> |
|--|--|
- Die unten an den Figuren angegebenen Zahlen geben die Frequenzen in MgHz an.

Erklärung von Tafel II.

- | | |
|--|---|
| <p>Nr. 1 a und b, am 21.1. 1936 um 23^h 02^m und 24^h 05^m unmittelbar nach der Hauptschwingung der erdmagnetischen Störung aufgenommen. Hohe <i>F</i>-Schichten die mit der Zeit sinken, werden nach der Störung gebildet.
 2, am 7. 11. 1935 um 20^h 05^m aufgenommen. Eine einfache <i>E</i>-Schicht mit ordentlichem und ausserordentlichem Strahl tritt auf.
 3, am 19. 11. 1935 um 23^h 18^m aufgenommen. Die Registrierung zeigt nur eine <i>E</i>-Schicht in 95 km äquivalente Höhe während einer Störung.
 4, am 20. 11. 1935 um 3^h 45^m aufgenommen. Eine hohe Kontraktionsschicht hat sich nach einer Störung gebildet.
 5 a, b und c, am 24. 10. 1935 um 17^h 55^m, 17^h 59^m und</p> | <p>18^h 40^m aufgenommen. Die Registrierungen zeigen eine allmähliche Abnahme der zwei kritischen Frequenzen der <i>E</i>-Schicht. Eine hohe <i>F</i>-Schicht taucht auf der letzten Registrierung auf.
 Nr. 6 a, b, c, d und e, am 24. 10. 1935 um 20^h 16^m, 20^h 32^m, 21^h 07^m, 21^h 11^m und 21^h 41^m aufgenommen. Die Registrierungen zeigen das Auftreten der Schichten während des Auftretens von schwachen Nordlichtern im Zenith. Die erdmagnetische Störung ist bedeutend.
 7 a, b und c, am 10. 10. 1935 um 17^h 33^m, 17^h 40^m und 17^h 45^m aufgenommen. Während der ersten zwei Registrierungen war kein Nordlicht zu sehen, während der letzten Registrierung trat ein Bogen mit Strahlenstruktur im Zenith auf.</p> |
|--|---|

Erklärung von Tafel III.

- | | |
|--|---|
| <p>Nr. 1 aa', bb', cc', dd', ee' und ff', am 23.—24. 10. 1935 aufgenommen. Die Registrierungen sind ungefähr symmetrisch um Mitternacht aufgenommen.
 2 a und b, am 23. 9. 1935 um 22^h 33^m und 24^h 00^m aufgenommen. Während der ersten Registrierung streckte sich ein intensiver Nordlichtbogen über den Zenith; die Echoamplituden variierten sehr schnell — die Echos «kochten» auf dem Fluoreszenzschirm. Während der zweiten Registrierung war kein Nordlicht zu sehen.
 3 a und b, am 24. 9. 1935 um 2^h 47^m und 3^h 15^m</p> | <p>während einer erdmagnetischen Störung aufgenommen.
 Nr. 4 a und b, am 23. 9. 1935 um 10^h 30^m und 11^h 00^m aufgenommen. Die Registrierungen zeigen die normale <i>F</i>₂-Schicht mit hohen kritischen Frequenzen an einem erdmagnetisch ungestörten Tag.
 5 a und b, am 24. 9. 1935 um 10^h 35^m und 11^h 11^m aufgenommen. Nach der grossen nächtlichen Störung sind die <i>P'</i>, <i>f</i>-Kurven verändert, und die kritische Frequenz der <i>F</i>₂-Schicht hat stark abgenommen.</p> |
|--|---|

Erklärung von Tafel IV.

- Nr. 1, am 27. 9. 1935 um 17^h 45^m aufgenommen.
- 2, am 27. 5. 1935 um 10^h 55^m aufgenommen, der F_1 -Gipfel ist ausgeprägt.
- 3, am 27. 5. 1935 um 18^h 12^m aufgenommen. Der F_1 -Gipfel ist nur angedeutet. M -Reflexionen treten auf.
- 4, am 28. 5. 1935 um 1^h 24^m kurz nach einer kleinen Störung aufgenommen.
- 5 und 6, am 28. 5. 1935 um 5^h 06^m und 5^h 31^m aufgenommen. Die Streuung der Echos nimmt mit zunehmender Sonnenhöhe ab. Nr. 3 und 5 sind ungefähr symmetrisch um wahre Mitternacht aufgenommen. Der verschiedene Verlauf der P' , f -Kurven und die verschiedene Grösse der F_1 -Gipfel ist ersichtlich.
- 7, am 15. 5. 1935 um 9^h 14^m aufgenommen, normale P' , f -Kurve.
- 8, am 15. 5. 1935 um 19^h 18^m aufgenommen, normale P' , f -Kurve kurz vor dem Einsetzen einer kleineren erdmagnetischen Störung.
- Nr. 9, am 15. 5. 1935 um 20^h 17^m aufgenommen. Die allmählich eintretende Störung ist von Verdoppelung der F_2 -Echos begleitet.
- 10 a, b und c am 4. 7. 1935 um 18^h 15^m, 18^h 43^m und 19^h 02^m aufgenommen. Die Registrierungen zeigen M -Echos mehrerer Kombinationen.
- 11, am 10. 7. 1935 um 17^h 10^m aufgenommen. Eine E -Schicht mit etwas verwischter oberer Grenze tritt auf. M -Reflexionen treten auf, die verwischte Struktur zeigen.
- 12 a und b, am 8. 1. 1936 um 10^h 45^m und am 10. 10. 1935 um 13^h 30^m aufgenommen. Die Registrierungen zeigen das Auftreten einer schwachen dritten Komponente der kritischen Frequenzen der F_2 -Schicht.
- 13 a, eine Momentaufnahme von Echos ohne Ablendung der Echoamplituden auf dem Oscillographenschirm.
- 13 b, die zeitliche Kalibrierung des Oscillographen ohne Ablendung.

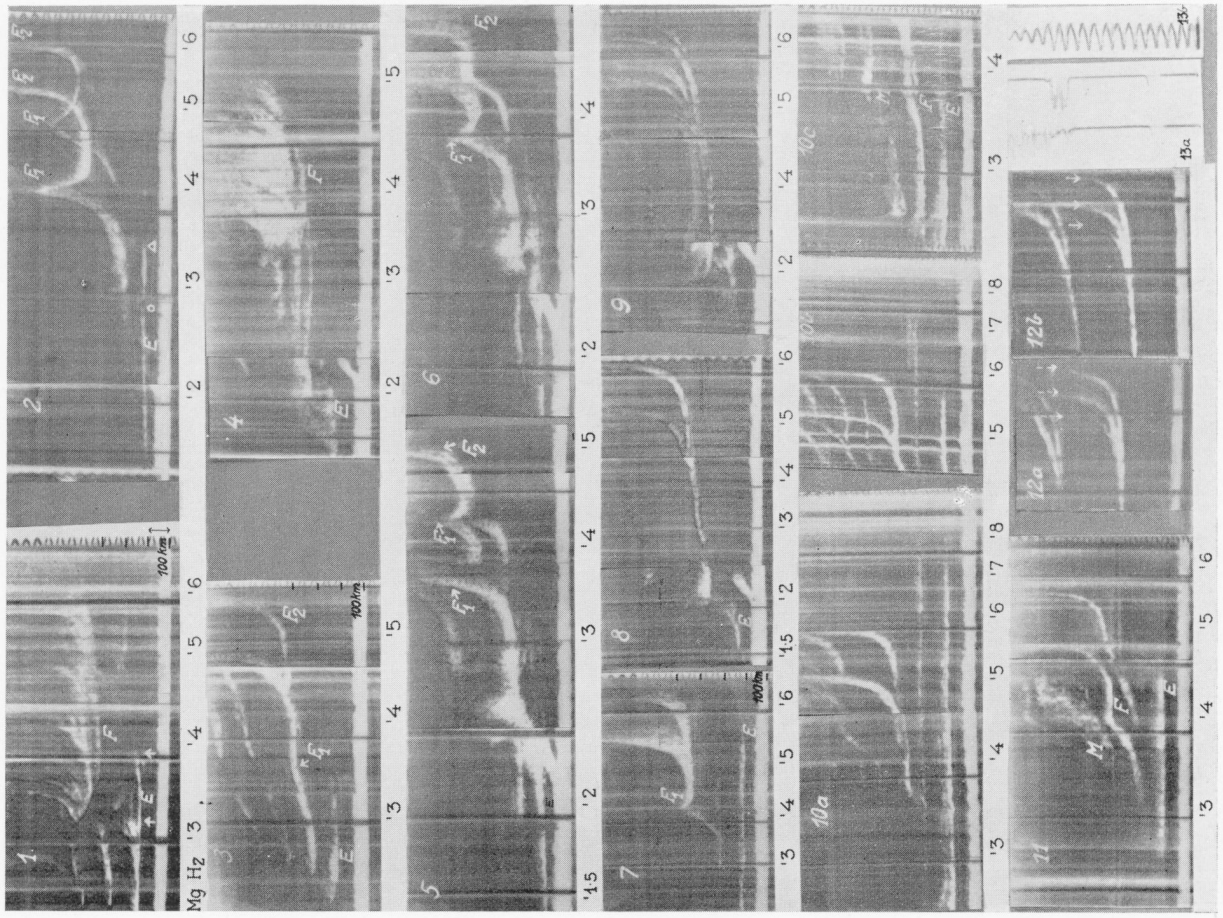
Tafel I.



Tafel II.



Tafel IV.



Tafel III.

