

Beiträge zur Bestimmung der Ionosphären-Struktur

VON

Johannes Malsch

Meine Ausführungen über die Struktur der Ionosphäre müssen sich in diesem Rahmen beschränken auf solche Fragen, die für die Navigation von besonderer Bedeutung erscheinen, und zwar will ich auch hier nur eine spezielle Aufgabe behandeln.

Den Ausgangspunkt bilden experimentelle Untersuchungen über die Wanderungsgeschwindigkeit kurzzeitiger Störungen, die Herr Krautkrämer in meiner Versuchsstation in Buschbell ausgeführt hat. Die Aufgabe Herrn Krautkrämers war, die aus der Ionosphäre reflektierten Echos an verschiedenen Punkten in der Nähe des Senders zu registrieren und nachzusehen, ob und wie weit sich hierbei Abweichungen ergeben.

Überraschenderweise ergab sich nun, daß sich auch bei sehr geringem Abstand der Meßstellen voneinander tatsächlich reguläre Wanderungserscheinungen von Feldstärkeschwankungen zeigten.

Krautkrämer hat diese Ergebnisse ausführlich im ZWB-Bericht Nr. 1761 beschrieben. Bei der Diskussion der Ergebnisse wird ausführlich begründet, warum eine Erklärung durch absorbierende Wolken, durch Polarisationschwund oder durch Änderung des Reflexionsvermögens der Schicht nicht infrage kommt. Vielmehr deutet alles darauf hin, daß diese Schwankungen als Interferenzerscheinungen gedeutet werden müssen. Auf Interferenzerscheinungen weisen insbesondere einige sehr markante Beobachtungen hin, bei denen die Schwankungen während einer längeren Zeit, d.h. über Minuten hindurch, periodisch verlaufen, und zwar so, daß sich die Periode sehr genau bestimmen läßt.

S. 98
Zu Interferenzerscheinungen benötigen wir eine Reihe von Strahlen, die die Interferenzen hervorrufen. Der naheliegendste Gedanke ist natürlich der, sich zunächst einmal auf zwei Strahlen, die an der Ionosphäre reflektiert werden und am Orte des Empfängers zur Interferenz gelangen, zu beschränken. Diesem Gedanken wurde eine mathematische Form zunächst von Herrn von Handel und

Herrn Crone gegeben. Sie waren auf den Gedanken der Interferenz zweier Strahlen, die einmal aus dem Zenit, zum anderen aber unter einem ziemlich grossen Winkel aus der Ionosphäre zur Beobachtungsstelle gelangen, durch die Komet-Versuche gekommen und damit sehen Sie auch schon den innigen Zusammenhang unserer Aufgabe mit den Fragen der Navigation. v. Handel und Crone erklären die Vorgänge der Wanderung nach den im Bild 2 ^{S. 99 unten links} dargestellten Verhältnissen: In diesem Bild ist angenommen, dass sich zwei reflektierende Wolken in der Ionosphäre befinden, die in dem Bild ungefähr symmetrisch zum Zenit gezeichnet sind. Es ist nicht von Belang, ob man von dieser symmetrischen Stellung ausgeht oder aber etwa von der Annahme zweier Wolken, deren eine sich im Zenit befindet. Wenn nun sich beide Wolken mit der gleichen Geschwindigkeit v bewegen, so kommt Wolke 1 nach einer bestimmten Zeit nach 2 und Wolke 1' nach 2'. Soll dann gerade am Boden eine Interferenz durchgegangen sein, so muss der gesamte, durch die Wanderung hervorgerufene Gangunterschied eine volle Wellenlänge betragen, d.h. es würde der Gangunterschied zwischen zwei der betrachteten 4 Strahlen eine viertel Wellenlänge sein müssen, da jeder der Strahlen doppelt durchlaufen wird. Solche Vorgänge an wandernden Wolken hätten wir dann, da die Erscheinungen sowohl in der E- als auch in der F-Schicht auftreten, in beiden Schichten anzunehmen.

Mir schien diese Erklärung von Anfang an nicht ganz unbedenklich, und zwar aus folgenden Gründen, die ich kurz zusammenstellen möchte:

1.) Es müsste bei einer solchen Annahme so sein, dass von den seitlich sich vom Zenit befindenden Wolken aus eine sehr starke nach dem Fusspunkt im Zenit gerichtete Rückstrahlung vorhanden sein müsste, d.h. aber, dass man leicht zu der Annahme geneigt ist, dass dann auch die Wolkennormale nicht mehr senkrecht zur Erdoberfläche liegt. Nimmt man aber die Wolkennormale in der Richtung der Wellenausbreitung an, so würden damit alle quantitativen Betrachtungen über den Gangunterschied nach von Handel und Crone hinfällig.

2.) Krautkrämer rechnet ein Beispiel für die Grösse der Abweichungen, und zwar in der E-Schicht, aus. Dabei kommt er bei der Annahme einer Höhe von 100 km zu einem Wolkenabstand von etwa 50 km. Dies bedeutet aber einen seitlichen Einstrahlwinkel von etwa 26° . Krautkrämer weist schon darauf hin, dass damit eine Wegdifferenz von etwa 12 km resultieren würde, so dass in diesem Falle wegen der grossen Laufzeitdifferenz schon komplexe Echos zur Beobachtung gelangen müssten. Nur dadurch, dass man, wie in Bild 2, annimmt, dass die Reflexion nicht vom Zenit, sondern von zwei symmetrisch zum Zenit gelegenen Wolken herkommt, ergibt sich keine Laufzeitdifferenz. Hierin möchte ich eine zweite Schwierigkeit für die von Handel-Crone'sche Deutung erblicken, insbesondere, da Krautkrämer z.B. auch periodisch Schwankungen derselben Form mitunter minutenlang, also bei den Geschwindigkeiten von etwa 200 bis 500 km/sec auch auf sehr grossen Wegen verfolgen konnte, ohne dass komplexe Echos zu beobachten waren. Dazu kommt, dass es schwierig ist, sich vorzustellen, dass dann der Zenit nichts wesentliches zur Reflexion beitragen soll.

3.) Wenn die Krautkrämer-Versuche als Interferenzerscheinungen zu deuten sind, so ist es naheliegend, die Vorgänge der Wanderungsgeschwindigkeit und der Interferenz an einem bestimmten Ort zunächst einmal zu trennen und sich auf das Studium der letzteren Vorgänge zu beschränken. Auch hier hat Krautkrämer bereits vorbereitende Beobachtungen, wenn auch nur visueller Art, gemacht, und zwar beobachtet er die Schwankungsdauer an einer Beobachtungsstelle in Abhängigkeit vom Sonnenstand. Er stellt eine Statistik des Schwankungscharakters auf, in dem er die beobachteten Schwankungen nach ihrer durchschnittlichen Dauer einteilt. Dabei erteilt er den verschiedenen Dauern verschiedene Charakterzahlen. Charakterzahl 0 heisst, dass die mittlere Schwankungsperiode grösser als 10 Sekunden war. Charakterzahl 1 bedeutet, eine Schwankungsperiode von 4 bis 10 Sekunden und Charakterzahl 2 eine Schwankungsperiode zwischen 2 und 4 Sekunden. Für die F-Schicht ergibt sich dann statistisch das folgende Bild:
5, d.h. die Charakterzahl steigt mit wachsendem Sonnenstand, also wird dann die Periodendauer der beobachteten Schwankungen kürzer.

Für die E-Schicht lässt sich ein solches charakteristische Bild nicht aufstellen.

Es ergibt sich aber weiter ein sehr beachtenswerter Zusammenhang zwischen dem Auftreten einer E-Ionisation und Schwankungen des F-Echos. Krautkrämer weist anhand einer Statistik - auf die ich der Kürze der Zeit halber nicht eingehe - nach, dass die schnelleren Schwankungen der F-Echo-Feldstärken häufiger bei vorhandener E-Schicht auftreten als die langsameren. Ich will hier auf weitere ganz ähnliche Zusammenhänge, die sich auf Mehrfachechos erstrecken, nicht mehr eingehen. Krautkrämer gibt keine Deutung dieser Versuche, die ganz offensichtlich darauf hinweisen, dass z.B. die beobachteten Schwankungen der F-Echos irgendwie in Zusammenhang mit der E-Schicht oder einer darunterliegenden Schicht stehen müssen.

Um diesen Zusammenhang zu erfassen, wird man vor allem von den letzt genannten Beobachtungen, nämlich einmal dem Schnellerwerden der F-Schwankungen bei erhöhtem Sonnenstand und zweitens von dem Schnellerwerden bei beobachteter E-Schicht ausgehen müssen. Zunächst fragen wir uns, ob diese Beobachtungen sich einfach aus der von Handel-Crone'schen Auffassung heraus erklären lassen. Zu dem Zweck nehmen wir, wie in Bild 4 ^{S. 99 plan with (cut off) 1. Refl.} aufgezeichnet ist, einmal an, es schiebe sich eine mehr oder weniger gut stark ausgebildete E-Schicht ein. Es müsste dann so sein, dass mit abnehmendem Brechungsindex dieser E-Schicht die schliesslich beobachtete Periodendauer, die von Interferenzen zweier aus der F-Schicht kommenden Strahlen herrührt, verkleinert würde. Diesen Vorgang können wir auf zwei Weisen durchrechnen, einmal unter der Annahme, dass der Abstand der Wolke vom Zenit gegeben ist, d.h. dass wir, um zu demselben Reflexionspunkt P_1 in der F-Schicht zu gelangen, den Einfallswinkel φ bei kleinerem n der E-Schicht verkleinern müssen oder zweitens mit der Annahme, dass wir unter Beibehaltung des Einfallswinkels in der E-Schicht zu einem anderen Reflexionspunkt P_2 in der F-Schicht gelangen. Wir wir die Durchrechnung aber auch vornehmen, stets kommen wir zu dem Resultat, dass allenfalls eine Vergrösserung der Periodendauer, niemals aber eine Verkleinerung resultiert.

Um mehr Sicherheit in die nur visuellen Beobachtungen von Herrn Krautkrämer zu bringen, hat mein Doktorand Prior nunmehr gleichzeitig E- und F-Schwankungen an einer festen Station registriert. Eine statistische Auswertung, z.B. die für die F-Schicht allein, sehen Sie im nächsten Bild, ^{S. 99 unten rechts} in dem die gemessene Periodendauer in Abhängigkeit von der Zeit aufgetragen ist. Das Absinken in den Mittagsstunden ist unverkennbar. Auch die Beobachtungen bei gleichzeitigem Auftreten der E-Schicht, die allerdings verhältnismässig spärlich sind, weil gerade in den Herbst- und Wintermonaten das Auftreten der E-Schicht selten ist, bestätigen durchaus die Krautkrämer'schen Angaben. Ich will auch hier auf die Angabe weiterer Einzelheiten der Registrierungen Priors verzichten, sondern lediglich mich auf Diskussion der Hauptergebnisse der Beobachtungen beschränken, d.h. also, Kürzerwerden der Periodendauer um die Mittagszeit ohne E-Schicht und Kürzerwerden bei auftretender E-Schicht.

Beide Beobachtungen sind meiner Auffassung nach auf dieselbe Ursache zurückzuführen, nämlich auf ein Wachsen der Ionisierung in der E-Schicht. Alle beobachteten Erscheinungen könnte man nun erklären, indem man die Vorstellung der Interferenzen beibehält, wenn mit einer Erhöhung des Gangunterschiedes eine Verkleinerung der Periode Hand in Hand geht.

Die einfachste unter den vielen möglichen Annahmen scheint mir nun die folgende zu sein:

Sowohl die F- als auch die E-Schicht sind in ständiger Bewegung, d.h. sie entsprechen grob gesagt nicht eben reflektierenden Spiegeln, sondern diffus reflektierenden Oberflächen, optisch gesprochen also rauhen Flächen, bei denen die Rauigkeiten mit der Wellenlänge kommensurabel sind.

Dann reflektiert nicht nur der Zenitpunkt, sondern mit einer relativ grossen Intensität auch noch die Umgebung des Zenits. Die Intensität nimmt mit wachsender Entfernung vom Zenit rasch ab.

Dass die E-Schicht keine homogene Struktur hat, ist nichts Neues. Schon von Dieminger, Goubau und Zenneck ist 1934 die wolkige Struktur aus registrierenden Aufnahmen intermittierender Reflexionen im F-Gebiet erschlossen worden. Durch Annahme einer

wolkigen sehr inhomogenen E-Schicht lassen sich bekanntlich alle möglichen Erscheinungen, z.B. auch die seitlichen Einstrahlungen von F-Reflexion und dergl. erklären, insbesondere, wenn man noch eine Bewegung der Wolken in der E-Schicht annimmt.

Das Rascherwerden der Periode der Schwankungen um die Mittagszeit beim Auftreten von F-Reflexionen allein oder das Schnellerwerden beim gleichzeitigen Auftreten von E-Reflexion findet seine Erklärung aber bereits durch die einfache Annahme, dass die E-Schicht z.B. in ihrem unteren Teil eine gewisse Bewegung aufzeigt, d.h., dass Änderungen der Schicht auftreten, die sich seitlich verschieben. Am einfachsten übersieht man diese Verhältnisse, wenn man z.B. eine wellenförmige Bewegung an der unteren Begrenzung der E-Schicht annimmt. Dabei kann man sich denken, dass es sich etwa nur um eine einzige Halbwelle handelt, die bei irgendwelcher Phasenlage als Störung über die untere Begrenzungsfläche der E-Schicht am Zenit vorüberstreicht oder aber auch, dass es sich um eine regelrechte wellenförmige Bewegung handelt, die etwa ähnlich entstehen könnte wie Wellen an einer Wasseroberfläche, über die ein Luftzug hinwegstreicht. Im allgemeinen wird man natürlich kaum eine Reihe von Wellenlängen beobachten können, da der inhomogene sich stark ändernde Aufbau der E-Schicht sie meistens sehr stark verformen wird, insbesondere dann, wenn in der Nähe der Grenzfrequenz beobachtet wird. Viele Unregelmässigkeiten und grosse Abweichungen von der Mittelwertbildung sind also ohne weiteres verständlich. Sehr stark schematisiert sieht der Vorgang wie in Bild 6 ^{S. 99a} aus. Wollte man den Vorgang durchrechnen, so müsste man die Gangunterschiede sämtlicher vom Sender ausgehenden und in der F-Schicht reflektierten Wellen berechnen, um daraus das Interferenzbild, das man am Boden erhält, zu erklären. Es wäre aber zunächst das Verteilungsgesetz der reflektierten Amplituden als Funktion des Einfallswinkels herauszufinden, so dass jede der reflektierten Wellen mit der richtigen Amplitude versehen werden könnte. Sodann wäre für jede der zurückkehrenden Amplituden der infolge der variierenden Dicke der E-Schicht massgebende Gangunterschied zu berechnen und die Summe über alle Teilwellen zu bilden.

Durch eine elementare Rechnung lässt sich der Vorgang einigermaßen übersehen. Es sei hier nur als Ergebnis angeführt, dass sich im allgemeinen für die Periodendauer Proportionalität mit dem Faktor $1/1 - n$ ergibt. Dies würde aber in Übereinstimmung mit den Versuchen heissen, dass, je grösser die Ionisierung der E-Schicht, d.h. je kleiner n ist, umso kleiner die Periodendauer wird. Auf Einzelheiten der Rechnung möchte ich der Kürze der Zeit halber hier verzichten. Ich habe aber in den folgenden Bildern 7 und 8 ganz kurz schematisch einmal den Durchgang einer Halbwelle und im zweiten Fall den Durchgang einer ganzen Welle gezeichnet. Dabei ist allerdings sehr vereinfachend angenommen, dass die im wesentlichen reflektierende Fläche der F-Schicht gerade so gross ist, dass die Strahlenbegrenzung in der E-Schicht sich grössenordnungsmässig über eine Wellenlänge der Störung erstreckt. Je nach der Amplitude der über die E-Schicht hinwegstreichenden Welle kann dann das Durchwandern einer solchen Welle diesen Gangunterschied von einer oder von mehreren Wellenlängen bedeuten. Für die in der E-Schicht auftretenden Vorgänge wäre die Vorstellung ganz analog. Im Bild 9 habe ich z.B. die Reflexion einer durchwandernden Welle an der E-Schicht in entsprechender Weise aufgezeichnet. Liegt ein Maximum oder ein Minimum über dem Zenit als Beobachtungsstelle, so treten aus Symmetriegründen keine Gangunterschiede auf. Beim Durchgang der Welle zwischen diesen beiden Phasenlagen erhalten wir dann wiederum je nach der Amplitude der durchgehenden Störung einen oder mehrere Interferenzstreifen.

Krautkrämer bemerkt ausdrücklich, dass eine entsprechende Statistik, d.h. eine Änderung der Periodendauer im Laufe des Tages, wie er sie für die F-Schicht hat finden können, für die E-Schicht nicht aufgestellt werden konnte. Dies würde mit unserer Vorstellung durchaus in Einklang sein, da das n der E-Schicht zu der Reflexion nichts beiträgt. Das noch zu spärliche experimentelle Material reicht nur aus, um Grundlagen für Arbeits-hypothesen, nicht für eine feste Theorie, zu schaffen.

Es sei noch bemerkt, dass auch die Möglichkeit anderer ähnlicher Deutungen besteht. Z.B. könnte man zu ähnlichen Ergebnissen durch Annahme von Schwankungen der Dichte anstelle der

Schichtdicke gelangen, die in besonders einfacher Weise das gleichzeitige Auftreten von E und F-Reflexionen erklären würden. Schliesslich können die Beobachtungen auch als Beugungserscheinungen an Öffnungen in der E-Schicht gedeutet werden. Dass hier schmale Öffnungen vorhanden sind, wird durch das häufige gleichzeitige Auftreten von E- und F-Echos zur Genüge belegt, man könnte sich z.B. für die F-Echos gut vorstellen, dass Strahlenbündel, die an den Öffnungen der E-Schicht gebeugt werden, mit anderen direkt durchgehenden oder auf anderem Wege abgebeugten Strahlenbündeln am Ort des Empfängers zusammentreffen und interferieren. Bei der Wanderung solcher Löcher in der E-Schicht, etwa in horizontaler Richtung, würden dann die beobachteten periodischen Störungen in ähnlicher Weise gedeutet werden können, wie es aus den sehr schematischen Rechnungen hervorgeht, da Interferenzerscheinungen und Beugungserscheinungen mathematisch in ähnlicher Weise behandelt werden. Dasselbe gilt für die E-Reflexion.

Wichtig ist vor allem die Messung von seitlichen Einstrahlungen und von Abweichungen von der Zenitstrahlung. Leider kann ich über die Ergebnisse derartiger Versuche, die seit längerer Zeit von meinem Mitarbeiter Dr. Kober in die Wege geleitet sind, noch nichts mitteilen. Ferner laufen Versuche, die feststellen sollen, ob etwa bei ausgedehnteren seitlichen Wolken gleichzeitige Störungen an weiter entfernten Orten (etwa 100 km) beobachtbar sind. Andere Versuche sollen über die Kohärenzfähigkeit und insbesondere die Kohärenzlänge der ausgesandten Wellenzüge, d.h. über das Auftreten von komplexen Echos, Aufschluss geben. Es soll für diese Versuche mit sehr kurzen Impulsen gearbeitet werden oder bei längeren Impulsen Signal-Verformungen festgestellt werden. Sehr wichtig wäre noch die Variierung der Wellenlänge bei diesen Versuchen, einmal in dem üblichen Kurzwellenbereich, zum anderen aber auch durch Beobachtung mit sehr langen Wellen.

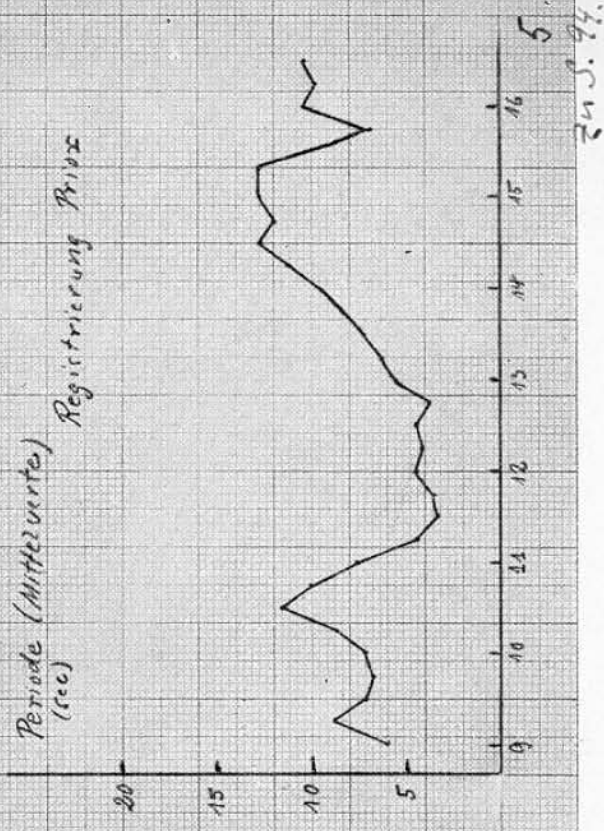
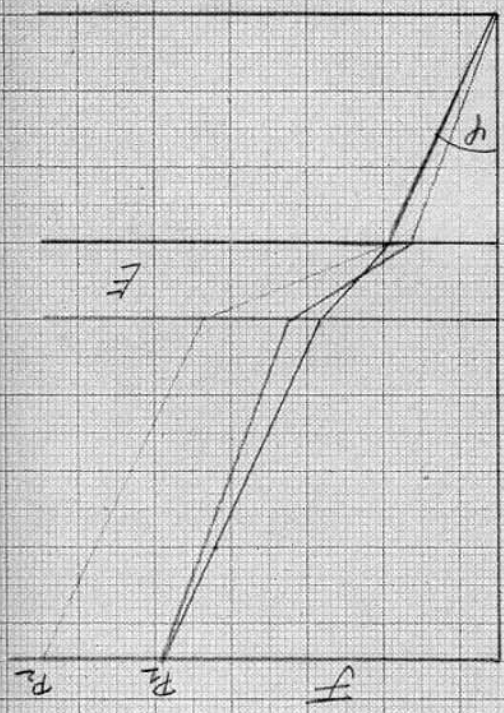


Bild 1:

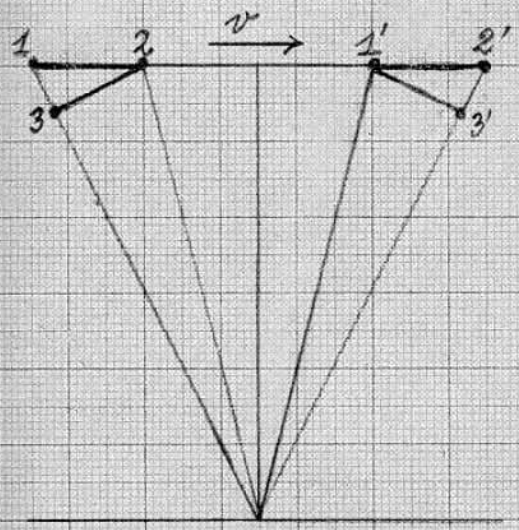
Periodische Schwankungen bei Ionosphärenechos nach Krautkrämer,
ZWB-Forschungsbericht Nr. 1761, Seite 19.

zu S. 90

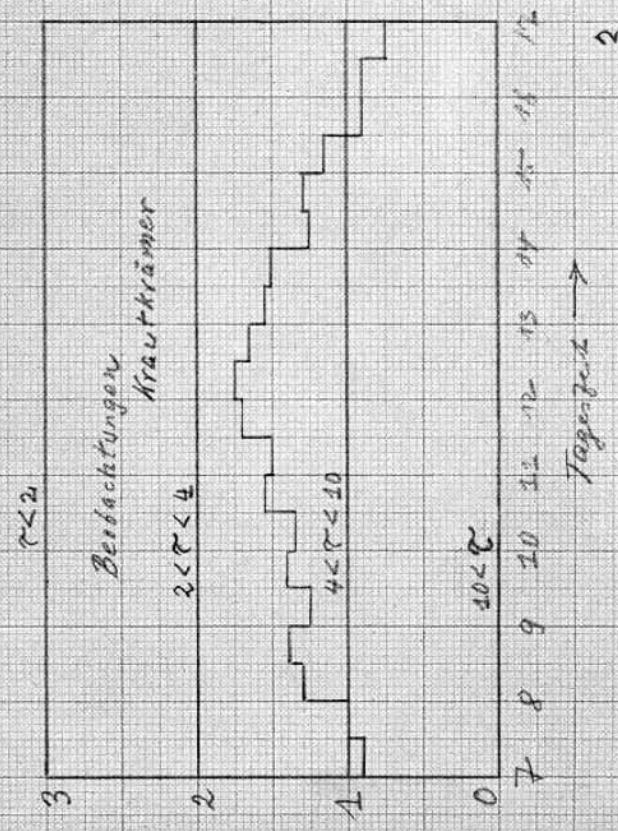
24.5.93 4



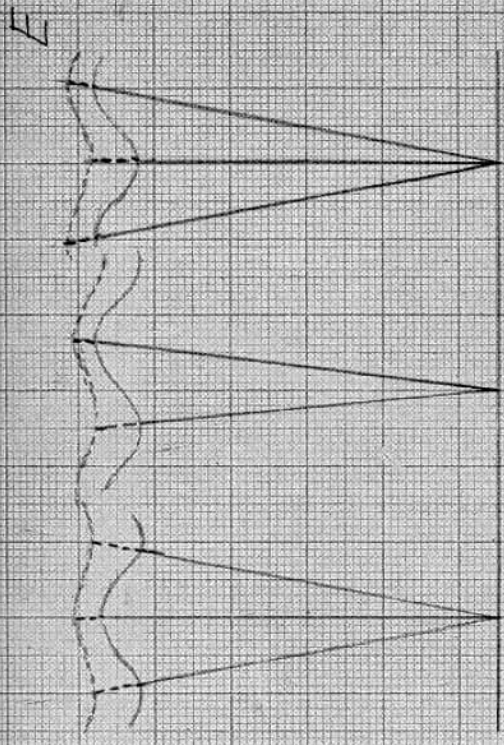
24.5.93 5



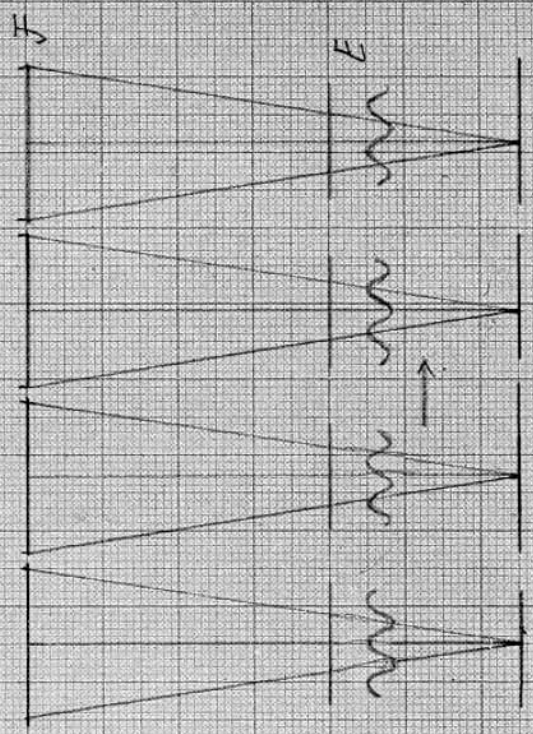
2
24.5.91



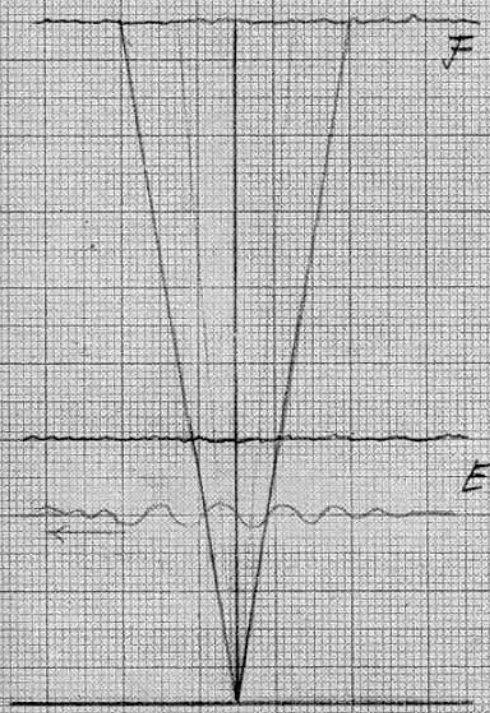
3
24.5.92



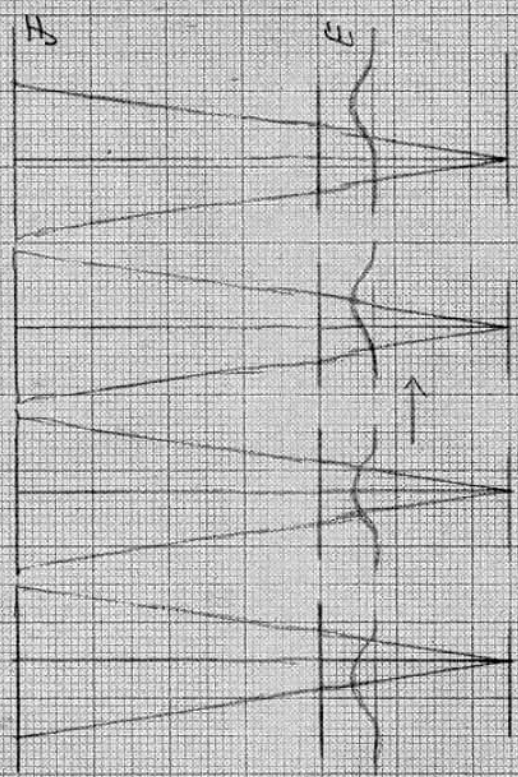
9
24.5.96



8
24.5.96



6
24.5.95



7
24.5.96