

Entwicklung des UKW-Rundfunks

Teil 5: Zeitraum 1934 bis 1940(45), Folge 2

Die Ausbreitung ultrakurzer Wellen jenseits der optischen Sicht

Gerhard Bogner, Neu-Ulm

Nachdem man nicht nur in Deutschland festgestellt hatte, daß UKW-Sender in größerer Entfernung hinter der optischen Sicht empfangen werden konnten, beschäftigten sich Wissenschaftler in Deutschland, England, Frankreich, den Niederlanden, der UdSSR und vor allem in den USA mit der Frage, wie solche Reichweiten zustande kommen konnten.

Erste richtungweisende Hinweise über einen neuen Ausbreitungsmechanismus lieferte *R. Jouaust* bereits 1930 im Zusammenhang mit einer nicht einsehbaren UKW-Verbindung vom französischen Festland nach Korsika (205 km), die offensichtlich seinerzeit in Deutschland wenig Beachtung fanden [88].

In einem Bericht lieferte er eine Erklärung für die Wellenausbreitung, Hinweise für eine grobe Reichweitenberechnung und eine Begründung für festgestellte Schwunderscheinungen (Bild 5.1):

- ♦ Die kurzen Wellen werden in Schichten verschiedener Feuchtigkeit, Temperatur oder verschiedenen Drucks über der Erd- oder Meeresoberfläche gebrochen.
- ♦ Die Wellen durchlaufen einen Kreisbogen, dessen Radius mR ein von den atmosphärischen Verhältnissen abhängiges Vielfaches des Erdradius beträgt.
- ♦ Der Schwund hängt von den meteorologischen Bedingungen ab.

Erst amerikanische Arbeiten, die 1933 und 1935 zur Veröffentlichung gelangten, zeigten wieder auf, daß die Ausbreitung der ultrakurzen Wellen einer Vielzahl physikalischer Gesetzmäßigkeiten, aber auch meteorologischer Einflüsse unterliegt [89] [90].

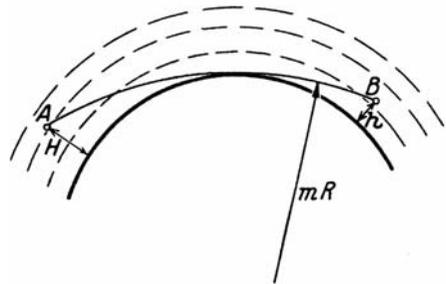


Bild 5.1: UKW-Verbindung Frankreich - Korsika. Darstellung der Brechung an Inversionsschichten. A = Sender, B = Empfänger, mR = vergrößerter Erdradius.

Die Versuche der Forscher, aus der Deutung von Ergebnissen experimenteller Untersuchungen passende Theorien zu entwickeln, gestalteten sich auf Grund der großen Vielfalt der Einflüsse, von denen die Ausbreitung (Feldstärke) abhängig war, als äußerst kompliziert. Abhängig von dem jeweiligen experimentellen Erkenntnisstand unterlagen die verschiedenen Theorien zudem laufend Korrekturen. Widersprüche sorgten für ausreichend Diskussionsstoff nicht nur in den 30er Jahren. Es kam zu unterschiedlichen Anschauungen, die sich damals, was vor allem den Einfluß der

Beugung und der Brechung der Strahlen auf das Ausbreitungsverhalten betraf, nicht unter einen Hut bringen ließen.

Das Vordringen der Strahlen in den Bereich unterhalb der optischen Sicht wurde Mitte der 30er Jahre auf zwei Theorien zurückgeführt:

- ◆ Beugung der Strahlen an der Erdoberfläche
- ◆ Brechung der Strahlen in der Atmosphäre.

verhaltens der Langwellen (J. Zenneck, 1907/08; A. Sommerfeld 1909, 1917) brachte die Erkenntnis, daß sich diese elektromagnetischen Wellen nicht geradlinig, sondern längs der leitenden Erdoberfläche fortpflanzen. Dabei ist die Beugung der Wellen nur von der Form der Erdoberfläche und ihrer Dielektrizitätskonstante (DK) abhängig. Bekannt war auch, daß der Einfluß der Beugung wegen der ansteigenden Bodenabsorption um so stärker abnimmt, je höher die Frequenz ist.

Beugung

Die Untersuchung des Ausbreitungs-

Die durch die Erdkrümmung bedingte Beugung der ultrakurzen Wellen wurde in Deutschland von P. von Handel und

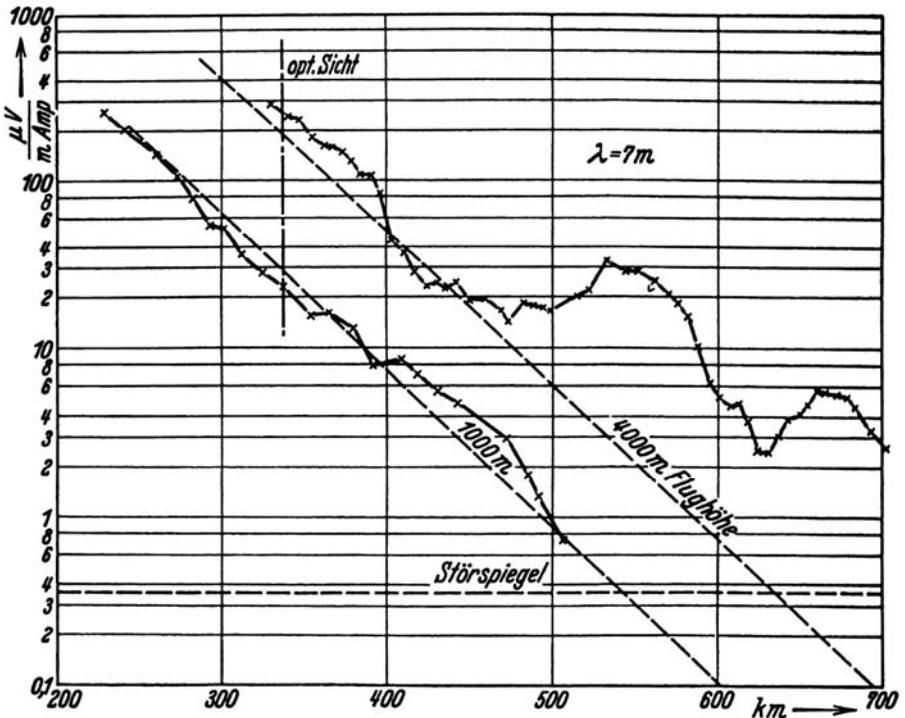


Bild 5.2: Verlauf der Feldstärkeabnahme durch Beugung. Senderhöhe: 1000 m, Leistung: 7 kW, Wellenlänge: $\lambda = 7 m$. - - - Feldstärke berechnet, x x x Feldstärke gemessen (Flughöhe 1000 m / 4000 m) Brechungseffekt zwischen 460 km und 700 km, Flughöhe 4000 m.

W. Pfister (DVL) 1935/36 experimentell festgestellt und annäherungsweise berechnet [91] (Bild 5.2).

Genauere Berechnungen führten B. van der Pol und H. Bremmer durch, die 1937/38 zur Veröffentlichung gelangten [92] und ihren Niederschlag in einer C.C.I.R.(Comité Consultativ International des Radiocommunications)-Publikation über Wellenausbreitung fanden [93]. Besonders anschaulich wurden hierin z.B. für UKW die Verhältnisse dargestellt, welche die Abschwächung der Feldstärke im Verhältnis zur Freiraumausbreitung (Bild 5.3, obere Kurve) für einen Sender auf 100 m Höhe und Emp-

fänger auf Grund zeigt. (Zu einem vergleichbaren Ergebnis kamen in England T. L. Eckersley und G. Millington 1939, die nach einer anderen Methode rechneten.)

Das ebenfalls rechnerisch erstellte Diagramm Bild 5.4 lieferte u.a. den theoretischen Nachweis, daß die UKW-Reichweite (bei $\lambda = 7$ m) sich nicht auf den Bereich der optischen Sicht beschränkte, da die Feldstärke stetig in das Gebiet außerhalb des Horizontes hinausläuft. Eine merkliche Knickstelle (Abschattung) findet sich erst bei $\lambda = 7$ mm! In einer Arbeit von W. Nestel (1942) stellte dieser einen Vergleich zwischen der theoretisch

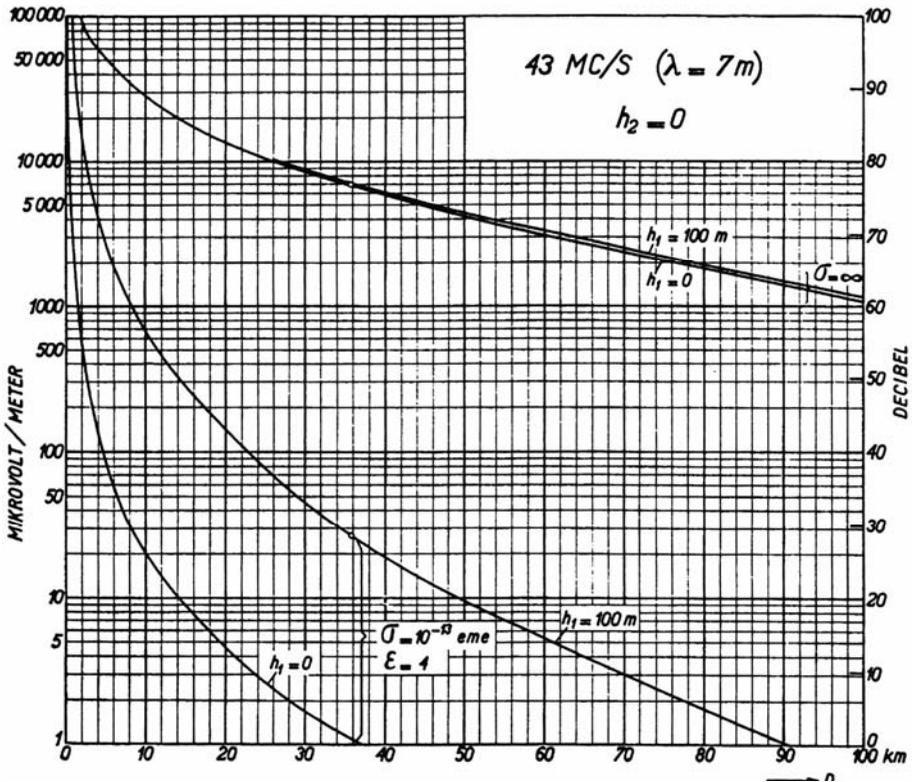


Bild 5.3: Einfluß der Senderhöhe auf das Feld (Beugung) eines Senders ($P = 1$ kW, $\lambda = 7$ m) h_1 = Senderhöhe, h_2 = Empfängerhöhe (= 0 m).

für Seeausbreitung erstellten Kurven von *B. van der Pol/H. Bremmer* und gemessenen Werten, die über See ermittelt worden waren, an [94]. Im Gegensatz zur Ausbreitung über See führten Unregelmäßigkeiten der Erdoberfläche (Geländeunebenheiten) zu beträchtlichen Abweichungen bei den Landkurven, Bild 5.4. (Bei der theoretischen Behandlung hatten *van der Pol* und *Bremmer* von einer Vereinfachung Gebrauch gemacht und gingen von einer glatten Erdkugel endlicher Leitfähigkeit aus.)

Bei Messflügen der DVL konnten 1935 gelegentlich abnormale Reichweiten erzielt werden, die von einem starken Schwanken der Feldstärke begleitet waren. Als Ursache vermutete man Brechungserscheinungen innerhalb der Troposphäre, da diese für die elektro-

magnetische Welle ein Dielektrikum darstellt. Aus dem Bild 5.2 ist ersichtlich, daß bei 4000 m Flughöhe ab ca. 460 km die gemessene Feldstärke wesentlich von der für Beugung gerechneten abweicht [91]. Ähnliche Beobachtungen machte man auch in den USA [90].

Die Mitwirkung einer von der Ionosphäre reflektierten Raumstrahlung schied bei den in Frage kommenden verhältnismäßig geringen Entfernungen (ca. 200 bis 600 km) aus. (Die Sprungentfernung der 7-m-Welle liegt bei Reflexionen an der Ionosphäre bei mehreren 1000 km.) Dagegen sollte es sich zeigen, daß Vorgänge in der Troposphäre ausreichten, um sowohl die Schwunderscheinungen als auch zeitweise auftretende außergewöhnliche Reichweiten der ultrakurzen Wellen zu erklären.

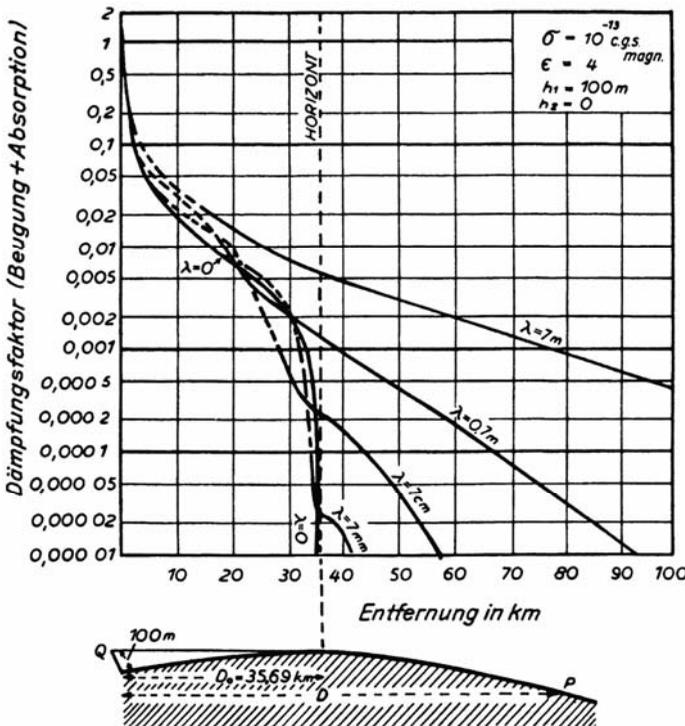


Bild 5.4: Abhängigkeit der Reichweite von der Wellenlänge.

Schwächungsfaktor $F_{\text{diff+abs}}$ herrührend von der Beugung (kugelförmige Erde) und von der gleichzeitigen Absorption ($\sigma=10^{-13}$, $\epsilon = 4$).

Troposphärische Ausbreitung

Brechung

Von *H. Pfendl* wurde 1929 auf Grund von unveröffentlichten Berechnungen über die Abnahme der Luftdichte mit zunehmender Höhe (und die sich daraus ergebende Veränderung des Brechungsindex) gefunden, daß die Brechung in der Atmosphäre allein genügt, um die über die optische Sicht hinausgehenden Reichweiten zu erklären [95] [97]. Im Zeitraum 1934-35 liefen, oft unter großen Schwierigkeiten, die ersten Flug- und Bodenmessungen, um die Ausbreitungsvorgänge der ultrakurzen Wellen, insbesondere über den optischen Horizont hinaus, zu erfassen, siehe Bild 5.5.

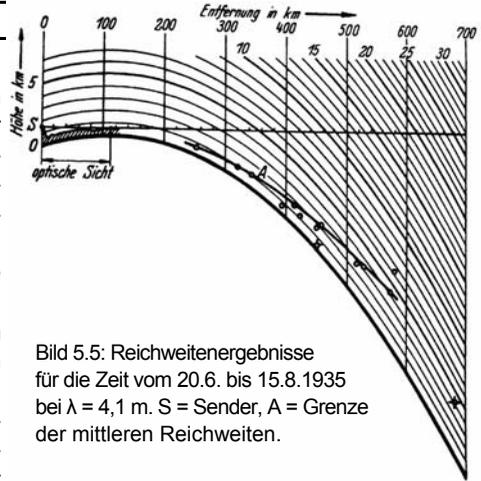


Bild 5.5: Reichweitenergebnisse für die Zeit vom 20.6. bis 15.8.1935 bei $\lambda = 4,1$ m. S = Sender, A = Grenze der mittleren Reichweiten.

O = Tageswerte α = Nachtwerte (zwischen 4.00 und 6.30 Uhr)

Anhand der Meßergebnisse konnte der Nachweis geführt werden, daß der Ausbreitungsvorgang einmal durch das Vertikaldiagramm der Sendeantenne, aber vor allem durch die Strahlungskrümmung beeinflusst wurde, hervorgerufen durch

die Schichtung der Troposphäre [96], siehe Bild 5.6, 5.7, 5.14.

Im unteren Teil der Troposphäre ist die Zusammensetzung nicht gleichmäßig, da Feuchte, Druck und Temperatur mit der

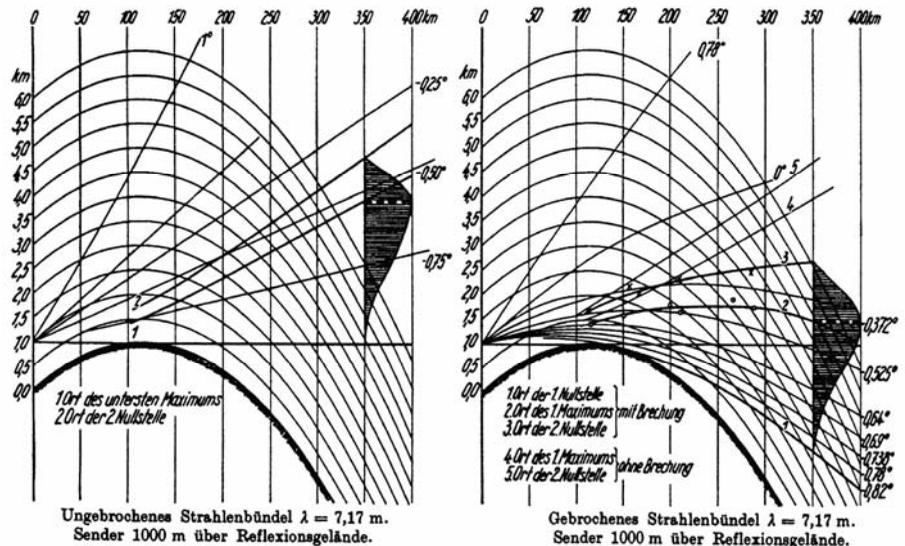


Bild 5.6: Vertikaldiagramm (unterer Diagrammlappen "Keule"). Krümmung des Diagramms (der Strahlen) unter Einfluß der Brechung (schraffierte Flächen = Ende der "Keule").

Höhe über dem Erdboden abnehmen (eine ähnliche Abnahme erfährt damit die Dielektrizitätskonstante ϵ und ihr Brechungsexponent $n = \sqrt{\epsilon}$). Die Strahlen, die von einer Schicht in eine andere eintreten, werden kontinuierlich in den verschiedenen Schichten in Richtung Erde gebrochen, kehren aber unter sogenannten "atmosphärischen Normalbedingungen" (die man später nach langjährigen Messungen definierte), nicht wieder zur Erde zurück. Ansätze zu einer rechnerischen Erfassung der Brechung machten *I. C. Schelleng, C. R. Burrows* und *E. B. Ferrel*, 1933 [89].

Grundsätzliche Schwierigkeiten bestanden von Anfang an bei der Beschreibung des Zusammenhangs zwischen den troposphärischen Vorgängen und der Wellenausbreitung. Dieser Umstand, daß man zwar die Feldstärke der verschiedenen Orte laufend registrieren konnte, nicht dagegen den Luftdruck, die Feuchte und die Temperatur in jeder beliebigen Höhe über dem Boden, verzögerte den Fortschritt. Die Versuche von 1935/36 [96] ließen deshalb wegen unzureichender meteorologischer Daten noch keine gesicherten Gesetzmäßigkeiten zwischen Reichweite und Troposphärenzustand erkennen.

Im Rahmen von Flugmessungen wurde dagegen ein Maximum bei der Zunahme der Reichweite in den Sommer- und Herbstmonaten festgestellt. Es ließen sich vom Sender Brocken aus (2,5 kW, $\lambda = 7,17\text{m}$) nicht nur im Flug Reichweiten erzielen, die ein Vielfaches der optischen Sicht betrug (800 km in 2000 m Höhe), sondern es konnte auch Bodenempfang weit außerhalb der optischen Sicht nachgewiesen werden (200 km und mehr).

Durch eine eingehende theoretische Be-

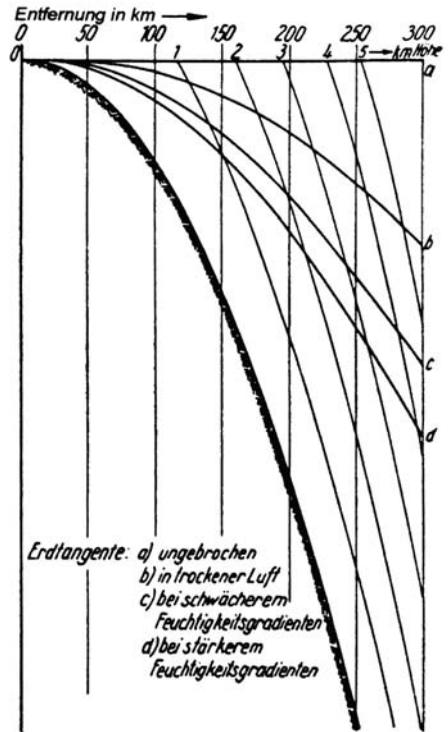
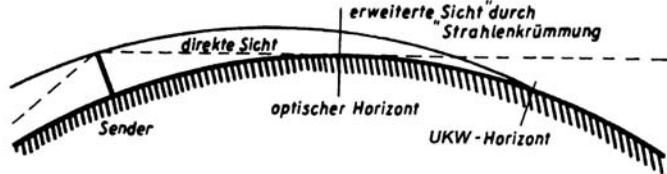


Bild 5.7: Krümmung eines horizontalen Strahles (Erdtangente) in Abhängigkeit von dem Feuchtegradienten.

handlung der Brechung und ihre experimentelle Bestätigung erhielt man damals die Erkenntnis, daß in dem Entfernungsbereich > 100 km die Überwindung der Erdkrümmung allein durch die Brechung verursacht wurde [95] [96] [97].

So schlüssig alles schien, so hatte die Sache doch einen Haken, da die Beugungstheorie gleichfalls von der Messung bestätigt schien. Es blieb die Frage nach der anteilmäßigen Beteiligung der Beugung und der Brechung an der Ausbreitung. Erst in den 50er Jahren war man sich sicher, daß der Einfluß der Beugung an der glatten Erdkugel

Bild 5.8: Reichweitenvergrößerung durch Strahlenkrümmung (Brechung).



gegenüber dem der Troposphäre gering war. Versuche, die im Laufe der Zeit angestellt wurden, ergaben für die Brechung bei mittlerer Feuchte eine ziemlich beständige Reichweitzunahme am Boden von ca. 15 % durch die Strahlenkrümmung. Dieser Zuwachs an Reichweite ließ sich vorausbestimmen, indem man ab 1935 mit einem fiktiven Erdradius (z.B. $r \sim 8500$ km) rechnete, der $4/3$ des wirklichen beträgt [90] [95], siehe auch FG 125, S. 114.

In den 50er Jahren prägte man für den hinausgeschobenen Empfangspunkt den Begriff "Radio- bzw. UKW-Horizont", vgl. Bild 5.8. Im mitteleuropäischen Klima konnte die Brechung eine Verschiebung des UKW-Horizontes bis auf etwa 100 bis 150 km über den optischen Horizont hinaus verursachen.

Schwunderscheinungen bei UKW

Die Forschungsanstalt der Deutschen Reichspost (RPF, *W. Scholz*) befaßte sich experimentell mit den troposphärischen Vorgängen, nachdem man auf dem Inselfberg (Thüringen) Anfang 1935 einen auffälligen Zusammenhang zwischen Feldstärke und Wetterverlauf beobachtet hatte (gleichzeitig mit einem Temperatursturz fiel die Feldstärke des UKW-Senders Berlin und Feldberg/Taunus auf etwa $1/3$ ab).

Die DRP betrieb zur Erforschung dieses Zusammenhangs und anderer Problemstellungen zwischen 1936 und 1937

jeweils über kurze Zeiträume mehrere Meßstrecken, bei denen Distanzen zwischen 70 und 490 km zu überbrücken waren. In Zusammenarbeit mit dem Reichsamt für Wetterdienst (R.f.W., *L. Egersdörfer*) konnte eindeutig ein Zusammenhang zwischen den troposphärischen Vorgängen und langsam verlaufenden Feldstärke-schwankungen hergestellt werden. Der Einfluß der Troposphäre war um so größer, je weiter der Beobachtungspunkt hinter der Sichtgrenze der Sendeantenne lag und dieser damit verstärkt in den Einflußbereich der von der Troposphäre zur Erdoberfläche hin gebrochenen, zeitlich inkonstanten Strahlung geriet, siehe Bild 5.9.

Die Schwundvorgänge führte man auf zeitlich und räumlich sich ändernde Bewegungsvorgänge der Luftschichten zurück, die zu Unstetigkeiten im Brechungsindex führten [98].

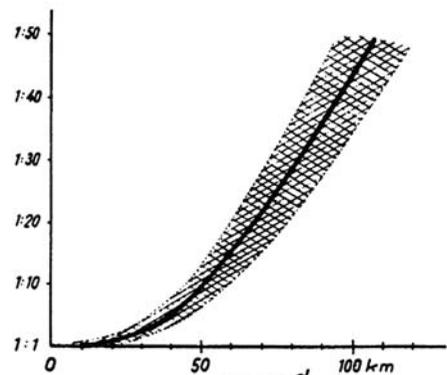
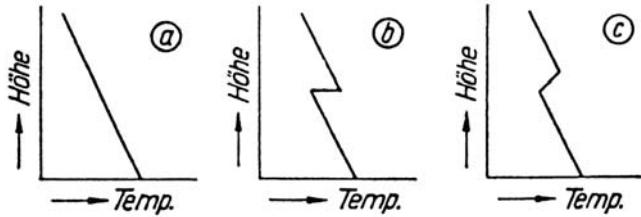


Bild 5.9: Abhängigkeit der Feldstärke-schwankungen von der Entfernung im Bereich der Sichtgrenze.

Bild 5.10: Temperaturinversionen, Verlauf des Brechungsindex in Abhängigkeit von der Höhe.



a) bei normaler Witterung;

b) Ausbildung einer Grenzfläche zwischen zwei Schichten ("Sprung" des Brechungsindex);

c) Inversion durch einströmende Warmluft

Einfluss der Inversionsschichten

Aus der Meteorologie war bekannt, daß es bei bestimmten Wetterlagen (Warm- und Kaltlufteinbrüche), wenn sich z.B. warme Luftschichten über kalte Luftschichten schieben, zu einer Umkehr des Temperaturverlaufs (Inversion) kam. An der Grenze zwischen beiden Schichten trat ein mehr oder weniger ausgeprägter Sprung des Brechungsindex auf (Bild 5.10). Bildeten sich Inversionen aus, so konnte festgestellt werden, daß abhän-

gig von der Lage (Höhe) der Send- und Empfangsantenne zu den brechenden Luftschichten, die Empfangsfeldstärke über oder unter dem Normalwert lag [98]. Zwischen 1938 und 1945 betrieb die DRP unter Einbindung des großen Funkturms von Königs Wusterhausen (KW) eine Versuchsstrecke zwischen Berlin (Funkturn Witzleben) und dem Brandberg bei Märkisch-Rietz (Scharmützelsee), um nähere Aufschlüsse über das Verhalten bodennaher Inversionen zu erhalten (Bild 5.12). Die an dem 240 m

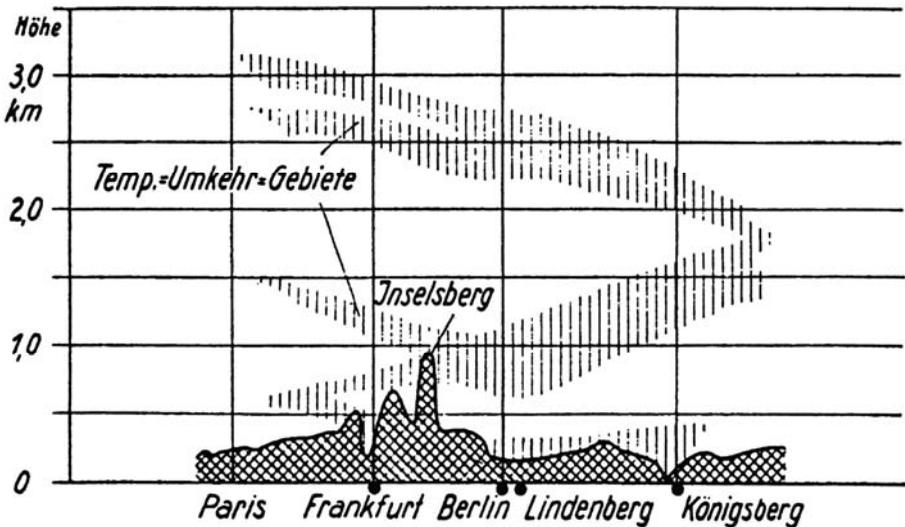


Bild 5.11: Vertikalschnitt durch die Troposphäre bis 3500 m Höhe längs der Linie (Paris-) Frankfurt/M. - Berlin - Lindenberg - Königsberg am Vormittag des 12.12.1937.

Bodeninversion in ca. 300 m Höhe (Berlin - Königsberg), Höheninversion ab ca. 1000 m.

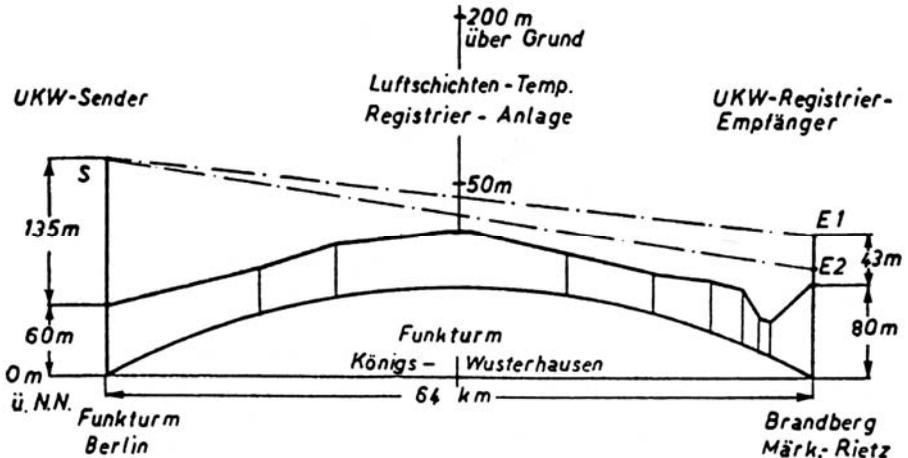


Bild 5.12: Höhenschnitt der UKW-Meßstrecke vom Funkturm in Berlin nach dem Brandberg bei Märkisch-Rietz.

hohen Mast von KW in der Höhe gestaffelt angebrachten Temperaturfühler dienten dabei der fortlaufenden Aufzeichnung bodennaher Temperaturvorgänge [99]. Weshalb diese geniale Idee nicht genutzt wurde, gleichzeitig die nicht unwesentliche Luftfeuchte zu registrieren, ist unklar, da ihr Einfluß bekannt war [88] [96].

Über Bodeninversionen brachte die Auswertung der Daten folgende Erkenntnisse:

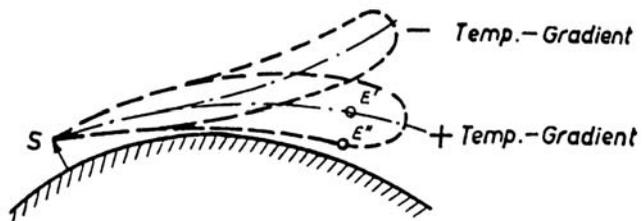
- Bodeninversionen in Mitteleuropa weisen die stärksten Temperaturgradienten (Temperaturgefälle) sowohl in positiver als auch in negativer Richtung auf.
- Die Häufigkeit extremer Feldstärkewerte ist tagsüber und während der

Sommermonate größer als nachts und in den Wintermonaten. (Die Atmosphäre wird durch die Sonneneinstrahlung und nächtliche Ausstrahlung vom Erdboden her erwärmt oder abgekühlt.)

Besonders anschaulich zeigt Bild 5.13, wie das Strahlungsdiagramm eines UKW-Senders (unterer Diagrammlappen) je nach Vorzeichen des atmosphärischen Temperaturgradienten sich hebt oder senkt. Auf diese Weise wurde in [99] bildlich verdeutlicht, wie es dadurch zu ganz erheblichen Schwankungen der Feldstärke kommen kann.

Zeitweise beobachtete rasche Schwankungen der Feldstärke (z.B. mehrere Perioden in der Minute) lieferten Hinweise auf eine weitere Ausbreitungsmöglich-

Bild 5.13: Verformung des unteren Diagrammlappens (Keule) eines Sendedipols S bei extremen Temperaturgradienten in der bodennahen Luftschicht.



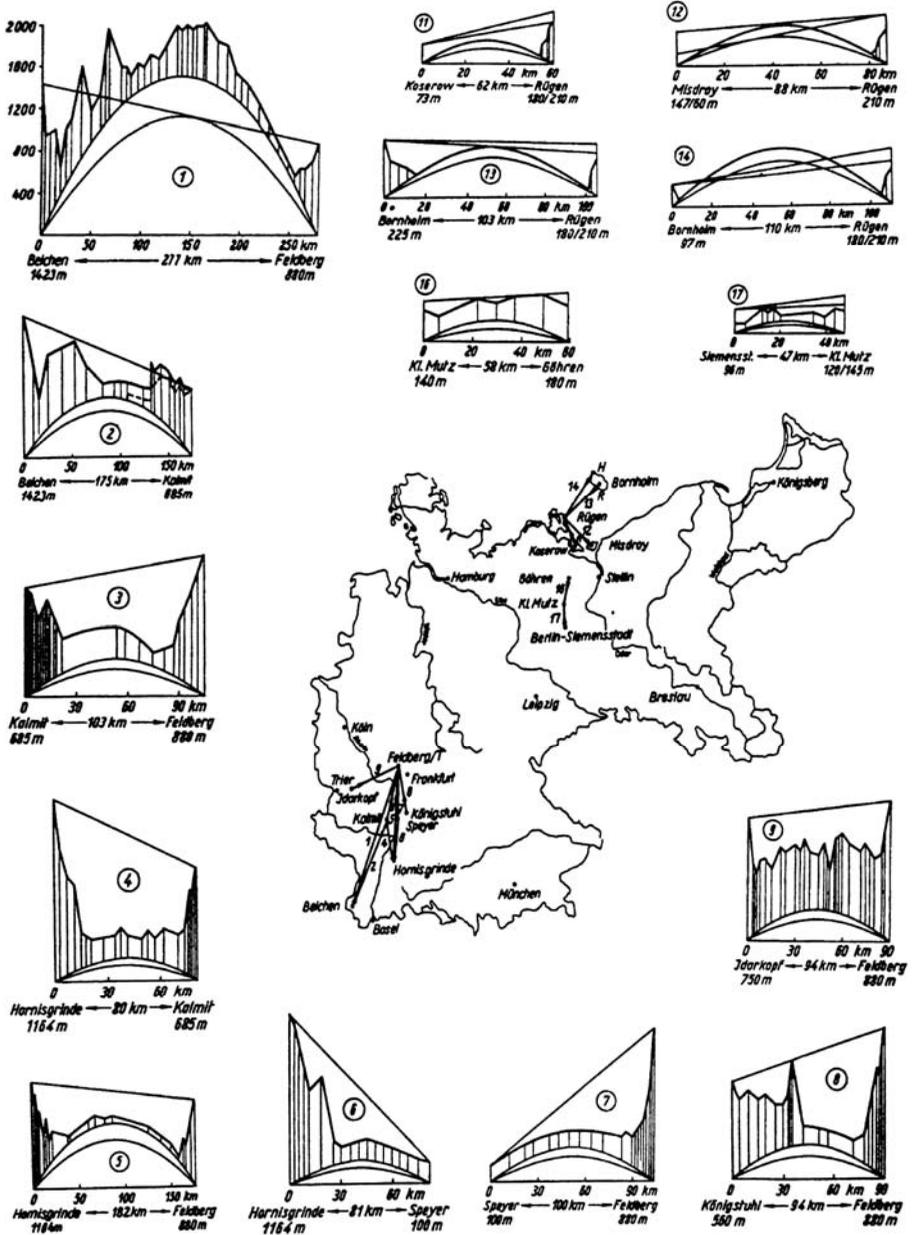


Bild 5.14: Streckennetz der Ausbreitungsmessungen mit Höhenschnitten (aus [101]).
 Legende siehe Bild 5.18.

keit, die man auf eine in der Troposphäre reflektierte Raumstrahlung zurückführte. Amerikanische Forscher (Englund, Crawford, Mumford) nahmen 1938 an, daß dieser Schwundtyp durch Interferenz von Wellen mit verschiedenen Laufwegen unter Einwirkung der Troposphäre zustande kommt [100]. Dies bestätigten Untersuchungen, die während des Krieges in Deutschland liefen.

Die UKW-Ausbreitung wird kriegswichtig

Für die militärische Nutzung (Funkmesstechnik "Radar", drahtlose Nachrichtenübertragung im beweglichen oder festen Einsatz "Richtfunk") der Wellenlängen zwischen 10 m und 50 cm (aber auch darunter) wurden diese Kenntnisse immer wichtiger. Neben den bereits früher genannten Industriefirmen befasste sich die Firma Siemens und Halske,

unterstützt durch die DRP (Reichspostforschungsanstalt RPF) und die Reichsforschungsführung zwischen 1940 und Anfang 1945 mit der Wellenausbreitung zwischen $\lambda = 6,2 \text{ m}$ und 55 cm (9 cm ab 1944). Zu diesem Zweck hatte man - nach Entwicklung einer geeigneten Messtechnik - zwischen 1941 und 1945 für Ausbreitungsmessungen zahlreiche Messstrecken aufgebaut. Die Strecken verschiedener Längen (50 bis 275 km) und (bis auf wenige Ausnahmen) mit verschiedenen guter optischer Sicht verliefen z.T. im Flachland, über der ober-rheinischen Tiefebene, über Mittelgebirge und über See. Zentrale Empfangsstationen befanden sich auf dem Feldberg/Taunus und auf Rügen (Bild 5.14).

Die mit Kennfrequenzen versehenen Sende- und Empfangseinrichtungen waren weitgehend automatisiert und erlaubten z.T. pro Strecke die gleich-

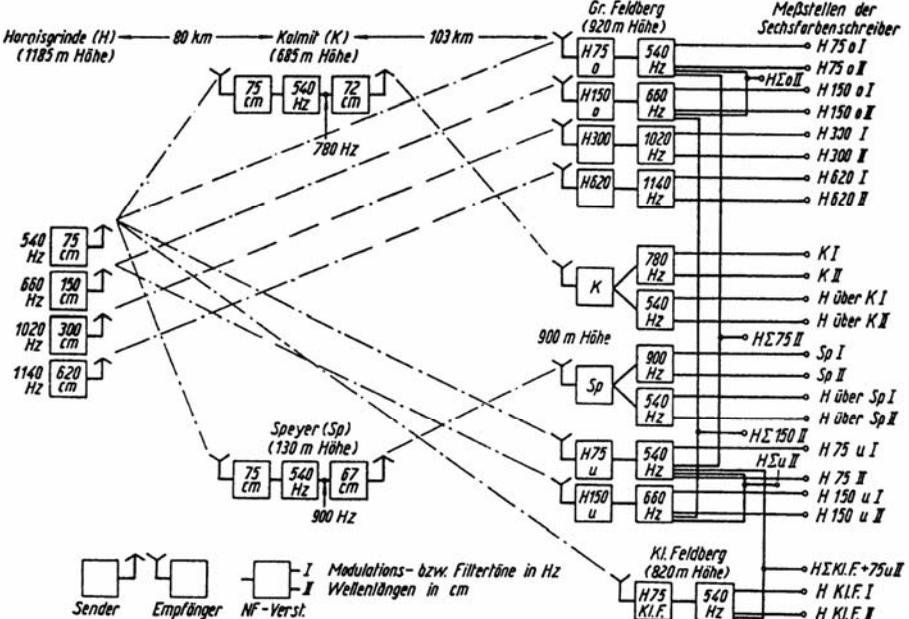


Bild 5.15: Sende- und Empfangseinrichtungen der Strecke Hornisgründe - Feldberg (182 km).

zeitige Registrierung mehrerer Wellenlängen, auch über Umwegstrecken Kalm/Speyer (Bild 5.15).

Neben der Ausbreitungsforschung diente das Vorhaben dazu, für jeden Zweck die günstigste Wellenlänge und Geräteanordnung (Konstruktion) angeben zu können. Die Untersuchungen hatten u.a. das Ziel, den Einfluß der Troposphäre abzuklären. Dieser machte sich durch Brechung schon innerhalb der optischen Sicht (47 km) zwar selten, aber deutlich bemerkbar (sehr langsame Feldstärkeänderungen). Im Gegensatz dazu kam es bei Mehrwegausbreitung (verursacht durch Reflexionen) zu wesentlich tieferen und schnelleren Schwundeinbrüchen, die auch zur vollständigen Unterbrechung der Verbindung durch Interferenz führen konnten [101].

Mehrwegausbreitung durch troposphärische Inversionen

Die Auswertung der Messergebnisse in Verbindung mit meteorologischen Daten und theoretische Überlegungen hatten zum Ergebnis, daß an Trennschichten besonders von bodennahen Inversionen Reflexionen nur dann zustande kamen, wenn der Einfallswinkel α auf die Grenzfläche sehr flach war. Wurden - je nach Lage der Inversionsschicht und des Senders - die Wellen nach unten reflektiert, dann war UKW-Empfang in einem Zustand der "Überreichweite" unterhalb der Horizontlinie möglich, siehe Bild 16a, Strahl 3.

Lag die Inversion über den Bergspitzen, waren außer dem direkten Strahl 1 noch ein oder mehrere reflektierte Strahlen 2 möglich (Bild 16a). Je nach der Wegedifferenz (Laufzeit) entstand am Empfangsort ein Interferenzfeld; der Schwund

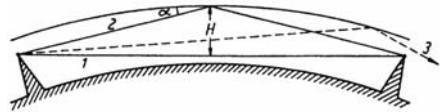


Bild 16a: Die Inversionsschicht liegt über den Bergspitzen, zwischen denen eine Funkverbindung besteht. Durch Empfang des direkten Strahls 1 und des reflektierten Strahls 2 kann es zu einer Signalschwächung bis zur Auslöschung kommen. Strahl 3 bringt Energie hinter den Horizont.

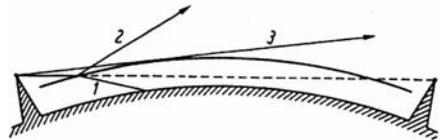


Bild 16b: Die Inversionsschicht liegt tiefer als die Spitzen zweier Berge, zwischen denen eine Funkverbindung bestehen soll. Die Inversionsschicht verhindert durch Brechung (Strahl 1 und 3) und Reflexion (Strahl 2) den Empfang.

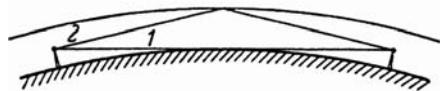


Bild 16c: Flachlandstrecke, Sender und Empfänger stehen auf Masten. Bedingt durch das Antennendiagramm ist der Empfang des direkten Strahls 1 mäßig. Der reflektierte Strahl liefert wesentlich mehr Energie.

(Interferenzschwund) war frequenz- und ortsabhängig. (Gemeinsamer Empfang mit 2 Empfängern im Abstand von nur 20 m beseitigte daher schon Totalschwund).

Es können die Wellen aber auch von oben auf die Inversionsschicht (Bodeninversion) treffen und nach oben reflektiert werden. Eine solche Reflexion verhinderte unter Umständen den Empfang an Orten, die normalerweise vom Sender sicher erreicht wurden. Bei Aufstieg oder

Abbau der Inversionsschicht konnte es zu einem sogenannten Reflexionsfading kommen, das frequenzunabhängig war. Dieser Reflexionsschwund wurde häufig um die Zeit des Sonnenaufgangs beobachtet und leitete die Zeit des konstanten Empfangs ein (Bild 16b).

Bei Flachlandstrecken mit knapper optischer Sicht konnte ein erhebliches Anwachsen der Feldstärke beobachtet werden, das u. a. auf einen reflektierten Strahl 2 (Bild 16c) zurückgeführt wurde.

Neben der bereits von *W. Scholz* festgestellten Abhängigkeit der Feldstärke-schwankungen von der Entfernung kam es zur Feststellung, daß Schwankungen und Einbruchwahrscheinlichkeiten mit zunehmender Frequenz größer wurden (starker Anstieg zwischen $\lambda = 6$ m und

1,5 m; mit weiter abnehmender Wellenlänge stieg die Wahrscheinlichkeit für Totalschwund etwa linear an).

Der Einfluß des Wetters war unverkennbar. Störungen traten am häufigsten auf, wenn folgende Bedingungen zusammenkamen: hohe Luftfeuchte, Windstille (bis über 1000 m Höhe), starker Temperaturgradient [101] [102].

Fernausbreitung "Überreichweiten"

Eine Reihe von Beobachtungen aus dem taktischen Einsatz von Funkgeräten wurden bekannt, nach denen manchmal in Entfernungen von 100 km und mehr hinter dem optischen Horizont verhältnismäßig große Feldstärken auftraten. Dazu zählten Beobachtungen von Richtfunkverbindungen ("Michael"-Gerät, $\lambda =$

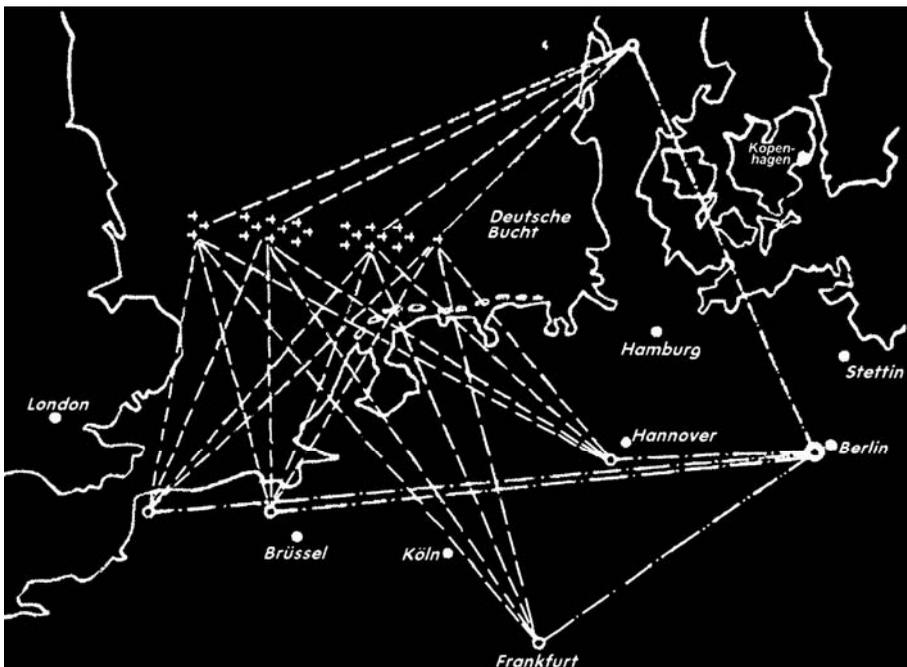


Bild 5.17: "Korfu"-Flugmeldedienst auf $\lambda = 9$ cm.

60 cm), wo der Wellenverteilungsplan im Abstand von etwa 300 km den Einsatz gleicher Wellenlänge vorsah, und in seltenen Fällen ein ferner, unerwünschter Sender mit großer Lautstärke einfiel; ferner die häufig beobachtete Tatsache, daß mit Funkmessgeräten ("Würzburg" $\lambda = 50$ cm, "Freya" $\lambda = 140$ cm) besonders über See sogenannte Scheinziele angemessen wurden. Gegen Ende 1943 ließ eine Beobachtung aufhören, nachdem man im Rahmen der Luftlageaufklärung damit begonnen hatte, einen passiven Funkmessbeobachtungsdienst auf $\lambda = 9$ cm mit "Korfu"-Geräten einzurichten. Sender der englischen Bordradargeräte des Typs H2S (deutscher Deckname "Rotterdam") konnten in Deutschland schon beim Start der Flugzeuge auf englischen Flughäfen bzw. bei Flughöhen von ca. 6000 m auf eine Distanz von bis zu 700 km empfangen werden! Durch Kreuzpeilung ließ sich die Einflugrichtung der Verbände ermitteln [102] [103] [104] (Bild 5.17).

Eine Erklärung für die beobachteten abnormalen Reichweiten gestaltete sich schwierig: *W. Lechfeldt* schloss auf Grund praktischer Erfahrungen mit der Fernstrecke Belchen - Feldberg/Taunus (277 km, ohne optische Sicht, $\lambda = 1,4$ m und $\lambda = 6,1$ m) und theoretischer Überlegungen eine Totalreflexion an sehr hoch gelegenen spiegelnden Flächen einer Höheninversion (z.B. 2000 m) aus. Er führte die zeitweise Überbrückung dieser Strecke rechnerisch darauf zurück, daß durch einen kontinuierlichen Brechungsvorgang in einer Inversionsschichtung der Strahl zur Erde zurück gelangen kann [101] [102] (Bild 5.18).

Experimentelle und theoretische Arbeiten der GEMA (Gesellschaft für elektroakustische und mechanische Apparate m.b.H.

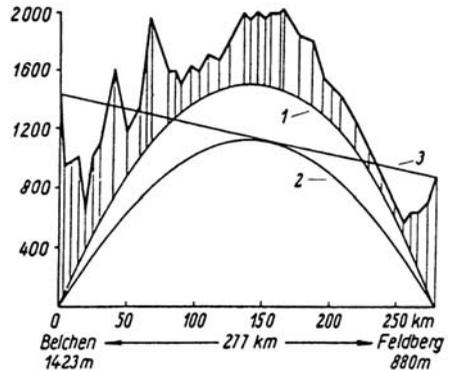


Bild 5.18: Meßstrecke Belchen - Feldberg/Taunus (Höhe gegenüber Länge 100 : 1 überhöht gezeichnet).

1 Geländeprofil über einer kugelförmigen Erde (Radius $r = 6370$ km);

2 fiktiver Radius $r = 8500$ km, durch den die einzelnen Höhenzüge im Zwischengelände scheinbar tiefer rücken;

3 gedachte Direktverbindung.

Berlin-Köpenick, Hersteller der Funkmessgeräte "Freya") und der Kriegsmarine führten u.a. zu der Annahme, daß Scheinziele durch Reflexion des gekrümmten Strahles an der bewegten Wasseroberfläche bzw. eine sich fort-pflanzende Auflösung von über Wasser liegenden Warmluftschichten die Ursache sein könnten [105].

W. Pfister untersuchte theoretisch, inwie weit die Annahme partieller Reflexion an scharfen und stetig verlaufenden Schichten in der Troposphäre und die durch deren Krümmung bewirkte Strahlenkonzentration die beobachteten Ausbreitungserscheinungen erklären konnte. Er fand, daß deren Einfluß praktisch im Gebiet der m-Wellen durchaus in Rechnung zu stellen war, während bei den cm-Wellen die beobachteten Reichweiten auch damit nicht zufrieden stellend begründet werden konnten [106].

Veranlasst durch die Beobachtung von "Überreichweiten" bei den cm-Wellen (9 cm) in Verbindung mit großen Sendeleistungen (10 kW Impulsleistung) wendeten sich v. Handel und v. Soden dieser Erscheinung zu. Sogenannte Streuwellen wurden hinter der optischen Sicht erst bei großen Sendeleistungen messtechnisch festgestellt und mit dem Einfluß gekrümmter Inversionsschichten in Zusammenhang gebracht.

In der entwickelten Theorie ging man damals davon aus, daß eine Strahlenquelle in den Wirkungsbereich einer geeigneten dünnen Luftschicht gerät und diese bei hinreichend kleiner Wellenlänge (z.B. $\lambda = 10$ cm) als Führungsfläche wirkt. Die Energiefortleitung im Wirkungsbereich der Inversion verglich man mit der Energiefortleitung in dielektrischen Stäben, zwischen deren Grenzflächen eine ebene Welle unter Totalreflexion strahlungsfrei im Zickzack fortschreiten kann, siehe Bild 5.20 [107].



Bild 5.20: Totalreflexion an Grenzflächen

Die Auswirkungen des Kriegsendes und ein Arbeitsverbot nach dem Krieg sorgten für eine längere Unterbrechung der Forschungen auf dem Gebiet der UKW-Ausbreitung in Deutschland, in dem man vorläufig überlebenswichtigere Probleme zu lösen hatte.

In der Nachkriegszeit konnte sich im Ausland (UdSSR, USA, England) die Forschung auf dem Gebiet der partiellen Reflexion weiterentwickeln bzw. kam es bezüglich der Streuwellen zu den Turbulenztheorien. Mit den Ausbreitungsmechanismen Brechung, partielle Refle-

xionen und Streuung an Turbulenzzellen war man in der Lage, Probleme der Fernausbreitung befriedigend zu lösen. Alle Theorien gründeten sich darauf, daß die Troposphäre und ihr Brechungsindex nicht homogen sind. □

Literatur

- [88] Jousaust, R. (Hollmann, H. E.): Die sehr kurzen Wellen. (Les ondes tres courtes. L' Onde El. 9 (1930), S. 5 - 17); H. u. E. 36 (1930) H. 2, S. 71 f
- [89] Schelleng, J. C; Burrow, C. R.; Ferrell, E. B. (Zenneck, J.): Fortpflanzung von ultrakurzen Wellen. (Ultra-Short-Wave Propagation. Proc. Inst. Radio Eng. 21 (1933) S. 427 - 461.); H. u. E. 45 (1935) H. 1, S. 26-28
- [90] Englund, C. R.; Crawford, A. B.; Mumford, W. W. (Agricola, A.): Weitere Ergebnisse einer Untersuchung von Ausbreitungserscheinungen bei UKW. (Further Results of a Study of Ultra-Short-Wave Transmission Phenomena. Bell System Techn. Journal 14 (1935) H. 3, S. 369 - 387.); H. u. E. 46 (1935) H. 6, S. 203 f
- [91] Handel, P. v. und Pfister, W.: Die Ausbreitung der ultrakurzen Wellen (cm-, dm-, m-Wellen) längs der gekrümmten Erdoberfläche. H. u. E. 47 (1936) H. 6, S. 182 - 190
- [92] Pol, van der, B. und Bremmer, H.: Ergebnisse einer Theorie über die Fortpflanzung elektromagnetischer Wellen über einer Kugel endlicher Leitfähigkeit. H. u. E. 51 (1938) H. 6, S. 181-188
- [93] Kofes, A.: Ausbreitung elektromagnetischer Wellen. Druckschrift der C. Lorenz A.G., Berlin. Nr. 745, o. Jahr (1938?)
- [94] Nestel, W. und Schwartz, E.: Über die physikalischen und technischen Grundlagen bei der Senderplanung im UKW-Gebiet. Funk und Ton (F. u. T.) 7 (1953) H.4, S. 165-178
- [95] Eckart, G. und Plendl, H.: Die Überwindung der Erdkrümmung bei UKW durch die Strahlenbrechung in der Atmosphäre. H. u. E. 52 (1938) H. 2, S. 44-58
- [96] Ochmann, W. und Plendl, H.: Experimentelle Untersuchung über die Ausbreitung der Ultrakurzwellen. H. u. E. 52 (1938) H. 2, S. 37 - 44

- [97] Eckart, G.: Die Beugungstheorie der Ausbreitung ultrakurzer Wellen. H. u. E. 52 (1938) H. 2, S. 58-62
- [98] Scholz, W. und Egersdörfer, L.: Über den Einfluß der Troposphäre auf die UKW-Ausbreitung. TFT 28 (1939) H. 3, S. 77 - 83
- [99] Scholz, W.: Die Wirkungshöhe troposphärischer Inversionsschichten bei der UKW-Ausbreitung. Fernmeldetechnische Zeitschrift (FTZ) 4 (1951) H. 7, S. 287 - 293
- [100] Lassen, H.: Die Wellenausbreitung. In: Ausstrahlung, Ausbreitung und Aufnahme elektromagnetischer Wellen. (Lehrbuch der drahtlosen Nachrichtentechnik Bd. II, Hrsg. Korshenewsky, N.v. und Runge, W. T.) Berlin: Springer 1940, S. 260
- [101] Lehfeldt, W.: Die Ausbreitung der ultrakurzen (quasioptischen) Wellen. Archiv der Elektrischen Übertragung (A. E. Ü.) 3 (1949), S. 137-142
- [102] Lehfeldt, W.: wie [101], S. 183 -186, 221 - 228, 265 - 269, 305 - 312, 339 - 346
- [103] Reuter, F.: Funkmeß. Opladen: Westdeutscher Verlag 1971, S.134
- [104] Soden, D. v.: Temperaturinversionen als Grund anormaler Reichweiten bei Zentimeterwellen. In: Brandt, L. (Hrsg.): Sitzungsprotokolle der Arbeitsgemeinschaft Rotterdam. Protokoll vom 26.7.1944, S. 31 - 38. Ausschuß für Funkortung. Vertraulicher Nachdruck durch das Ministerium für Wirtschaft und Verkehr des Landes NRW. Düsseldorf 1953
- [105] Pfister, W.: Wellenausbreitung. In: Goubau, G. und Zenneck, J. (Hrsg.): Naturforschung und Medizin in Deutschland 1939 - 1946, Bd. 16., S. 132. Weilheim/Bergstr.: Verlag Chemie GmbH 1953
- [106] Pfister, W.: Partielle Reflexion und Strahlenkonzentration bei Unstetigkeitsflächen in der Atmosphäre. Labor-Bericht Nr. 1/9 des Ferdinand-Braun-Instituts vom 10.3.1945. Qu. wie [105], S. 132 f
- [107] Handel, P. und Soden, D. v.: Über ultrakurze Streuwellen. Bericht des Ferdinand-Braun-Instituts vom 20.7.1944. Qu. wie [105], S. 131 f



Historische Ansichtskarte von 1938 mit Teufelskanzel, Brockenhotel, alter Wetterwarte, Aussichtsturm und Fernsender (Reprint Harzmuseum Wernigerode).