

II. Navigation mit Bodenwellen.

- 1.) Betrachtungen über die physikalischen Grenzen für die Navigationsmöglichkeiten mit Bodenwellen. Pfister
- 2.) Kurzer Bericht über die Untersuchung der Ausbreitung von elektromagnetischen Wellen in Gebirgs-, Flußtälern; Fjorden usw. mittels Modelle. Wilbig
- 3.) Überlegungen über die Möglichkeiten der Navigation mit Rückstrahlung (bisherige Erfahrungen und Aufgaben für die Zukunft). Kotowski
- 4.) Rotterdam-Aufnahmen des Gebirges. Hännel
- 5.) Die submarine Koppelkarte. Hanssler
- 6.) Forschungsarbeiten und Aufgaben der Wehrmacht.
- 7.) Beiträge zur Entwicklung an die Forschung. Bertram
- 8.) Über einige Funkpeilverfahren bei der Kriegsmarine. Waechter
- 9.) Empfangs- und Peilanlagen mit gebündelter Charakteristik (Sektorpeilanlagen). Janssen
- 10.) Die Funkortung beim Heer. Schellhoss

Betrachtungen über die physikalischen Grenzen für
die Navigationsmöglichkeiten mit Bodenwellen.

von

Wolfgang Pfister

Der Begriff "Bodenwelle" ist nicht ohne weiteres verständlich und auch nicht besonders charakteristisch für das, was damit bezeichnet werden soll. Es ist gebildet als Gegensatz zum Begriff der Raumwelle, deren Ausbreitung über die Ionosphäre läuft. Die reflektierenden Schichten der Ionosphäre sind sehr hoch über der Erde, 100 km und mehr, die Welle kommt also gewissermaßen aus dem Raum. In den Begriff der Bodenwelle dagegen fassen wir alle Ausbreitungserscheinungen zusammen, welche nicht über das Gebiet der Troposphäre hinausreichen. Die Bodenwellen sind also nicht nur auf die unmittelbare Nähe der Erdoberfläche beschränkt, auch die Wellen im Erdboden oder im Wasser und die an Inversionsschichten der Atmosphäre oder an sonstige Inhomogenitäten reflektierten Wellen sind zu den Bodenwellen zu rechnen. Wesentlich für die Bodenwelle ist nur die Ausschaltung der Ionosphäre. Damit ergibt sich in der Anwendung für Navigationsverfahren ein wesentlicher Nachteil für die Bodenwelle, das ist die beschränkte Reichweite und ein wesentlicher Vorteil, das ist die grössere Genauigkeit.

Betrachten wir zunächst die Reichweite.

Die Reichweite der Bodenwelle ist ebensowohl wie die der Raumwelle begrenzt durch die Ausbreitungseigenschaften der betreffenden Welle, ferner durch die vom Sender abgestrahlte Leistung und den am Empfangsort vorhandenen äusseren Störspiegel bzw. durch den Rauschpegel des Empfängers. Die Ausbreitungseigenschaften der Bodenwelle lassen sich anhand der von der Pol'schen Beugungstheorie und mit Berücksichtigung normaler Brechungseigenschaften der Atmosphäre unschwer berechnen.

Das Ergebnis bezüglich der Reichweite ist in einigen Bildern dargestellt. Bild 1 ^{S. 12} gilt für die Ausbreitung über See, die Reichweite ist in Abhängigkeit von der Entfernung aufgetragen für eine Reihe von abgestrahlten Leistungen des Senders. Der Feldstärke-

bedarf am Empfangsort ist konstant angenommen zu $5 \mu\text{V}/\text{m}$.
Sender und Empfänger befinden sich am Boden. Wir wollen vorerst den Wellenlängenbereich unter 100 m ausser Betracht lassen, da hier die Reichweiten stark von der Aufstellungshöhe abhängig sind, was über 100 m nicht der Fall ist. Die Reichweite nimmt, wie zu erwarten, mit der Wellenlänge und der Senderleistung zu. Als Anhaltspunkt für die Grössenordnung der Reichweite kann man sich vielleicht den Punkt 10 KW - 100 m - 1000 km merken. Wird die Leistung von 10 KW auf 10 Watt, also auf den 1000sten Teil verkleinert, so sinkt die Reichweite auf die Hälfte. Oberhalb der 500 m-Welle nimmt nach dem Bild die Reichweite mit der 4. Wurzel der Wellenlänge zu. Diese Zunahme ist jedoch in Wirklichkeit nicht realisierbar, denn die Grenze der Reichweite ist durch den atmosphärischen Störspiegel gegeben und dieser nimmt mit der Wellenlänge zu und zwar in dem Wellenlängenbereich über 100 m annähernd linear, so dass also praktisch die Reichweite in der Gegend der 300 m-Welle ihren Höchstwert erreicht und darüber wieder etwas abnimmt. Genaue Angaben über den atmosphärischen Störspiegel lassen sich nur schwer machen. Er ist verursacht durch ferne Gewitterzonen und jahres- und tageszeitlich abhängig, ausser dem in verschiedenen Gegenden verschieden. Es soll hier genügen, für Mittelwellen eine Grössenordnung von $5 \mu\text{V}/\text{m}$ anzugeben und im übrigen den atmosphärischen Störspiegel als physikalische Grenze für die Reichweite zu kennzeichnen. Hinausgeschoben kann diese Grenze werden durch Erhöhung der Senderleistung bis an die technisch-mögliche Grenze und durch Verringern der Empfängerbandbreite, soweit es das zu übertragende Signal zulässt. Man sieht aber schon aus der Kurve und dem eben Gesagten, dass die Grenze der Reichweite für Bodenwellen günstigenfalls bei 2000 km liegt.

Ich bringe nochmals dasselbe Bild ^{3 S. 17} für Ausbreitung über Land. Die Kurven sind selbstverständlich von den Erdbodeheigenschaften abhängig und gelten für mittlere Bodenbeschaffenheit. Die Reichweiten sind durchweg kleiner, sie liegen bei der 100 m-Welle etwa um eine Zahnerpotenz tiefer als die Kurven für See-Ausbreitung und erreichen diese bei $\lambda = 5000$ m. Über dieser Welle, also bei den Längstwellen, ist kein Unterschied mehr zwischen See und Land.

Wir haben bisher bei den Reichweitebetrachtungen die Raumwelle völlig ausser Acht gelassen. Es ist aber sehr häufig so,

dass die Vorteile der Bodenwelle nicht bis an die Grenze ihrer Reichweite ausgenutzt werden können, weil diese bereits vorher von der Raumwelle überdeckt wird. Wo der Übergang zwischen Boden- und Raumwelle liegt, hängt im wesentlichen von den Eigenschaften der Ionosphäre ab. Es ist erwünscht, ihn möglichst weit hinauszuschieben. Bis zu einem gewissen Grade gelingt dies durch Bündelung in der Vertikalebene, was eine gewisse Unterdrückung der Raumwelle bringt. Praktisch ausgenutzt ist dies bei den schwundmindernden Antennen im Rundfunkbereich. Die Möglichkeiten in dieser Richtung sind beschränkt. Weitaus bedeutungsvoller und aussichtsreicher ist jedoch die Methode, die beiden Wellenarten ihrer Laufzeit nach zu unterscheiden und mit der Bodenwelle allein Navigation zu machen. Ich erinnere nur an das bekannte Verfahren der Impulsspeilung. Die in der Trennung von Boden- und Raumwellen liegenden Möglichkeiten für die Navigation sind bisher keineswegs ausgeschöpft worden, ich möchte daher näher auf die dabei prinzipiell auftretenden Probleme eingehen.

Angenommen, wir wollen für den Entfernungsbereich 500 bis 2000 km eine Navigationsmöglichkeit mit der Bodenwelle haben. Zunächst müssen wir nach den Laufzeitdifferenzen fragen, die zwischen Boden- und Raumwelle auftreten. ^{Bild 3 S. 18)} Es betragen bei einer reflektierenden Schicht in 100 km Höhe die Wegdifferenzen bei 500 km Entfernung 44 km, bei 1000 km 28 km und bei 2000 km 24 km. Dem entsprechen die Laufzeitdifferenzen $8 \cdot 10^{-5}$ bis $15 \cdot 10^{-5}$ sec. Bei Verwendung von Impulsen der Dauer $0,8 \cdot 10^{-4}$ sec und Empfängerbandbreiten von 12 kHz ist die Trennung der Bodenwelle ohne weiteres möglich. Diese Impulsbreiten und Empfängerbandbreiten sind im Rundfunkbereich etwa bei $\lambda = 200$ m bis 300 m ohne Schwierigkeiten zu verwirklichen, die großen Reichweiten wenigstens über See sind auch zu schaffen, so daß die Inangriffnahme eines entsprechenden Projekts durchaus aussichtsreich erschien. Ich erinnere an den Namen "Ingolstadt". Bei Ausbreitung über Land ist die Erzielung großer Reichweiten mit der Bodenwelle schon schwieriger. Auf Grund der Ausbreitungskurve müßte man zu längeren Wellen übergehen. Dabei steigt aber der äußere Störspiegel und damit auch die ausnutzbare Empfangsfeldstärke an und die günstigste Wellenlänge bezüglich der Reichweite unter Annahme

konstanter Bandbreite liegt bei einigen 1000 m. Bandbreiten von 10 kHz und mehr, welche zur Trennung von Boden- und Raumwelle nötig wären, sind bei diesen Wellen sehr unerwünscht. Erstens müssten die Senderantennen stark gedämpft werden, so dass deren Wirkungsgrad sehr schlecht wird, wenn man nicht Türme wie für den Deutschlandsender aufstellen kann, zweitens geht die Selektivität der Empfänger verloren. Wir hatten uns daher überlegt, wie man die Forderung nach kleiner Bandbreite und damit nach besserer Empfindlichkeit mit der Forderung nach Trennung von Boden- und Raumwelle vereinen kann. Wir haben dabei zweierlei Wege ins Auge gefasst und Versuche prinzipieller Art angestellt.

Der erste Weg ist kompliziert und technisch nicht leicht zu verwirklichen. ^{B:104 S. 18} Ich will kurz das Prinzip erläutern. Die Impulsdauer ist länger als die Laufzeitdifferenz der Impulse (des Bodenimpulses und des ersten Raumwellenimpulses). Zur Trennung der Impulse wird während der Impulsdauer die Frequenz gleichzeitig am Sender und am Empfänger variiert und zwar so, dass der Empfänger auf den Bodenimpuls abgestimmt bleibt und jeweils beim Eintreffen des ersten Raumwellenimpulses um mehr als eine Bandbreite gegenüber diesem verstimmt ist. Wird die Bandbreite schmaler, so kann die Frequenzvariation langsamer erfolgen. So lange der Gleichlauf zwischen Sender und Empfänger erhalten bleibt, was durch eine automatische Nachstimmung erreicht werden kann, wird nur der Bodenimpuls empfangen. Mit schmaler werdenden Bandbreiten des Empfängers wird die Höhe des Störpegels geringer, der Impuls schwingt aber bei gleichbleibendem Gesamtumfang der Frequenzvariation auf dieselbe Höhe an, da der langsamere Anstieg infolge des schmäleren Bandes durch die dafür länger zur Verfügung stehende Zeit ausgeglichen wird.

Auf einen Punkt darf ich zu diesem Verfahren der Frequenzvariation noch aufmerksam machen. Das Mindestfrequenzband, welches für die Auflösung der Impulse benötigt wird, ist genau so gross wie in dem Normalfall der feststehenden Frequenz, nämlich wie vorhin bei einer Laufzeitdifferenz von $8 \cdot 10^{-5}$ sec 12 kHz. Im Interesse eines günstigen Störverhältnisses ist es erwünscht, die Bandbreite möglichst klein, soweit die Synchronisierung technisch beherrscht werden kann und damit die Frequenzvariation langsam zu machen. Auch mit Rücksicht auf beabsichtigte feindliche Störungen scheint die kleine Bandbreite von Vorteil zu sein, da zwar die Sendung leichter erkannt werden kann, aber der Störauf-

wand erheblich grösser ist.

Der zweite Weg, den wir besprochen haben, bietet technisch weniger Schwierigkeiten. Das Prinzip besteht darin, nicht den voll ausgebildeten Impuls zur Ortung zu benutzen, sondern nur die Anschwingkurve des Impulses. ^{1. und 5. 3. 19} Der Impuls kann dann ruhig länger sein als die Laufzeitdifferenz von Boden- und Raumwelle. Man kann somit mit kleiner Empfängerbandbreite die Trennung von Boden- und Raumwelle vornehmen. Die Ortung geschieht nach einem Amplitudenvergleichsverfahren, wobei die Steilheit des Anstiegs von 2 Impulsen verglichen wird. Wie etwa die Anzeige auf dem Braunschen Rohr dargestellt werden könnte, ist auf dem Bilde 6.5.18 gezeigt. Lässt man zunächst die Bandbreite auf der Senderseite breit und verringert die Empfängerbandbreite, so schwingt der Impuls immer weniger an, gleichzeitig wird der Störspiegel geringer. Trägt man das Verhältnis des maximal nach 80 μ s erreichten Wertes zum Störspiegel auf, so ergibt sich eine günstigste Bandbreite von 3 kHz. Gegenüber der für die normale Anzeige notwendigen Bandbreite von 12 kHz ist das Störverhältnis auf das Doppelte verbessert worden. Im Experiment wurde eine merkbare Verschlechterung des Störverhältnisses erst bei 2 kHz festgestellt. Mit Rücksicht auf das vom Sender ausgestrahlte Störspektrum ist es erwünscht, auch die Bandbreite des Senders möglichst klein zu machen. Zweifellos wird bei Verringerung der Senderbandbreite das Störverhältnis ungünstiger. Wie weit man praktisch an die Empfängerbandbreite von 3 kHz herangehen kann, ohne die Anzeige zu verschlechtern, ist nicht untersucht worden.

Zweck der Trennung von Boden- und Raumwelle ist die Steigerung der Navigationsgenauigkeit. Wie steht es nun damit bzw. wo liegen die Grenzen für diese Genauigkeit? Bei den meisten heute verwendeten Verfahren liegen diese Grenzen nicht in den technischen Mängeln der Geräte begründet, sondern in gewissen schlechten Eigenschaften der Ausbreitung, sie können aber durch Entwicklung entsprechender Navigationsverfahren noch weiter verbessert werden. Es tritt jetzt die Frage auf, wie weit hat es noch Sinn, die Entwicklung vorwärts zu treiben und wo liegen die prinzipiellen ausbreitungsmässig begründeten Grenzen. Die Frage kann heute noch nicht klar beantwortet werden. Einzelne Anhaltspunkte und Beobachtungen darüber liegen vor. Über das, was davon wesentlich und von allgemeinem Interesse ist, möchte ich berichten.

Allgemein kann man sagen, dass die Grenzen der Genauigkeit gegeben sind durch die Abweichungen von den klaren und eindeutigen Ausbreitungsvorgängen. Verursacht sind die Abweichungen durch Ungleichförmigkeiten in dem Medium, in dem die Ausbreitung erfolgt, seien es nun Inhomogenitäten in dem Material oder in der Oberfläche des Erdbodens oder Schwankungen in der Beschaffenheit der Atmosphäre. Die Erdbodeneigenschaften gehen vor allem in die Genauigkeit der Nahnavigationenverfahren ein und in die Langwellenausbreitung, während die Atmosphäre Anlass zu Strahlenbrechung gibt, welche sich praktisch erst auf grosse Entfernungen hin auswirkt.

Ich beginne mit Problemen der Nahnavigation, speziell mit der Frage der Richtungsbestimmung bei langen Wellen. Wir hatten uns seinerzeit mit der Aufgabe des Marschformgerätes zu beschäftigen. Die einfachste Lösung sahen wir in der Verwendung des EZ 2, in dem die Kettenmaschine hinter der Führermaschine fliegt und ständig eine Richtungsmessung macht. Der Abstand der Maschine betrug im Mittel 1000 m. Die Richtungsmessung liess sich in grossen Flughöhen einwandfrei durchführen. Unterhalb 1000 m Flughöhe aber traten willkürliche Schwankungen der Kursanzeige auf, um einen Betrag von etwa $\pm 2^\circ$. Sie sind auf die Beschaffenheit des überflogenen Geländes zurückzuführen. Die Welle war etwa 500 m. Andere Versuche mit einer kürzeren Welle von 100 m zeigten ein etwas anderes Bild, die Kursschwankungen wurden auch beobachtet, aber erst bei einer wesentlich tieferen Flughöhe. Zu einem ähnlichen Ergebnis haben auch Versuche der Firma Siemens zur automatischen Blindlandung mit einem Zielflug nach einem feststehenden Sender geführt. Wie nicht anders zu erwarten, unterliegt auch eine Richtungsbestimmung in der Vertikalebene denselben Ungenauigkeiten. Im Rahmen der Versuche zur Durchführung eines geradlinigen Gleitweges unter Verwendung der 500 m-Welle wurden beim Überfliegen eines Senders in konstanter Höhe Höhenpeilungen von der Maschine aus durchgeführt und über normalem Gelände vertikale Richtungsfehler von $\pm 2^\circ$ festgestellt. Bei Überfliegen der Senderanlage Königswusterhausen wurden noch erheblich grössere Schwankungen periodischer Art beobachtet. Geflogen wurde bis zur Höhe von 2000 m, ohne dass eine Besserung mit der Höhe festgestellt wurde.

In diesem Rahmen soll noch an die Peilversuche von Gloeckner am Boden über den Einfluss des Vorgeländes erinnert werden, wobei Sender in gleicher Richtung, aber verschiedenen Entfernungen, gepeilt wurden und bis zu 4° Peilabweichungen festgestellt worden sind.

Man sieht aus all dem, dass für Nah navigationsverfahren, welche den Anspruch auf Genauigkeit erheben wollen, eine Welle im Rundfunk- oder Langwellenbereich meist ungeeignet ist. Eine Erklärung für die Peilfehler ist verhältnismässig einfach zu geben. Es sind die örtlichen Rückstrahler bzw. die Bodenheterogenitäten in der Nähe des Ortes der Richtungsbestimmung, welche die Fehler verursachen. Sie haben das ja schon zur Genüge bei den Ionosphärenwellen kennengelernt. Im Unterschied dazu gibt es aber bei den Bodenwellen keine verschiedenen Polarisationsdrehungen. Bei den längeren Wellen bildet sich über grössere Entfernungen immer die vertikale Polarisation aus. Auch der Erhebungswinkel ist bei der Ausbreitung über längere Strecken konstant, immer gleich Null. Folglich kann der Fehler, soweit er durch örtliche Rückstrahler am Peiler hervorgerufen wird, nur richtungsabhängig sein. Würden sonst keine weiteren Fehlerursachen vorhanden sein, so könnte er demnach durch Aufnahme einer Funkbeschickungskurve für die betreffende Welle eliminiert werden.

Tatsächlich sind die Verhältnisse noch erheblich komplizierter als hier dargestellt. Dies zeigt Ihnen das folgende Bild. ^{7. 320} Dargestellt sind die Peilfehler in Abhängigkeit von der Entfernung für einen Flug in konstanter Richtung vom Peiler weg und zwar oben auf dem Bild für Flachlandgelände, unten für gebirgiges Gelände. Der Fehler im Flachland beträgt, wie auch bei den Nah navigationsverfahren, wieder etwa $\pm 2^{\circ}$ und zwar unabhängig von der Entfernung. Die Kurve kann als normal für flaches Gelände angesehen werden. An der genauen Einhaltung sauberer Versuchsbedingungen, insbesondere der Vermeidung von Ionosphäreneinstrahlung, kann nicht gezweifelt werden. Man sieht dass man zur Anbringung einer Funkbeschickung erst die Entfernung des Senders kennen müsste, dass eine solche also überhaupt sinnlos ist. Als Ergebnis dieser und ähnlicher Messungen stellen

wir fest, dass für die Peilfehler nicht nur die örtlichen Rückstrahler am Peiler, sondern auch die Umgebung des Senders, allenfalls auch die Bodenverhältnisse, dazwischen verantwortlich sind. Ansätze zur Erklärung des Ausbreitungsmechanismus sind vorhanden, ich kann vielleicht in kleinem Kreise von Interessenten noch darauf näher eingehen. Ich möchte hier nur soviel erwähnen: Massgebend für die Richtungsbestimmung ist die Phase der Feldstärke in ihrer örtlichen Verteilung. Der Phasenverlauf der von einem entfernten Sender herrührenden Schwingung ist regelmässig und unabhängig vom Untergrund in grösserer Höhe, d.h. im Gebiet des linearen Anstiegs der Feldstärke und wird nur in Bodennähe von den Erdbodenkonstanten des jeweiligen Untergrunds beeinflusst. Die Kurve der Höhenabhängigkeit zeigt im unteren gekrümmten Teil den bodenabhängigen Oberflächenanteil der Welle. Je besser die Leitfähigkeit oder je grösser die Wellenlänge ist, desto höher reicht die Wirksamkeit des Untergrunds. Das gilt aus Reziprozitätsgründen genau so für die Senderseite wie für die Empfangsseite. Solange also Sender oder Empfänger sich im Bereich des Einflusses der Oberfläche befinden und die Erdbodenkonstanten in Sender- oder Empfängernähe sind wechselnd, ist immer mit Peilfehlern zu rechnen.

Da im Ultrakurzwellenbereich die Antennen praktisch immer aus dem Bereich der Erdoberfläche heraus sind, sind dort die Erdbodeneigenschaften ohne Einfluss, dafür machen sich aber dann die Bodenerhebungen und über dem Erdboden sich erhebende Rückstrahler bemerkbar. Bezüglich der Peilfehler sind die Ultrakurzwellen insofern günstiger, als es im allgemeinen leichter ist, günstige Aufstellungsorte für den Peiler zu finden. Mit $\pm 1^\circ$ Fehlern ist aber bei Rahmen- und Adcockpeilern wohl immer zu rechnen.

Will man die Genauigkeit der Richtungsmessung erhöhen, so muss man genau wie bei Raumwellen auch bei Bodenwellen, sowohl im Langwellen- wie im Ultrakurzwellenbereich auf Grossbasis-Systeme übergehen. Erfahrungen auf diesem Gebiete liegen von den Messungen an der Anlage Elektra vor. Fliegt man einem Leitstrahl nach und stellt die Lage desselben abhängig von der Entfernung fest, so bekommt man einen ähnlichen Verlauf wie die im Bild gezeigten Peilschwankungen, nur mit dem Unterschied, dass die Abweichungen nicht mehr $\pm 2^\circ$ betragen, sondern erheblich weniger.

Das Ergebnis kann wieder nicht durch örtliche Rückstrahler am Sender erklärt werden. Es sind auch hier die örtlichen Bodenverhältnisse in Nähe der Flugzeugstation für die Fehler verantwortlich. Bei Flugmessungen nach der Elektra "St. Peter" in Ostpreussen in einer Entfernung von ca. 800 km wurden Abweichungen von ± 2 km festgestellt, das sind ungerechnet $\pm 0,14^\circ$. Die Basis der Antennen beträgt in diesem Fall $5,75 \lambda$, der Abstand der einzelnen Leitstrahlen 5° . Es liegt nun die Annahme nahe, dass die Richtungsgenauigkeit mit dem Strahlungsdiagramm des Antennensystems zusammenhängt und zwar so, dass der Fehler linear mit dem Winkelabstand der benachbarten Nullstellen bzw. Leitstrahlen zu- oder abnimmt. Im vorliegenden Fall stellen wir fest, dass der Winkelabstand gegenüber dem Rahmen oder Adcock von 180° auf 5° d.h. auf den 36ten Teil zurückgeht, während die Genauigkeit nur auf das 15fache gesteigert worden ist. Es liegt jedoch zu wenig Material vor, um daraus weitergehende Schlüsse ziehen zu können. Wie weit man die Genauigkeit bei Verwendung von langen Wellen in Bodennähe steigern kann, etwa durch weitere Vergrößerung der Basis, ist noch nicht untersucht worden. Auf Grund von theoretischen Überlegungen wird erwartet, dass die Fehler bei der Ortsbestimmung bestenfalls in der Grössenordnung von $1/10$ der Wellenlänge liegen können.

Anders liegen die Verhältnisse bei Ultrakurzwellen. Hier spielen die Erdbodeneigenschaften des überflogenen Geländes keine Rolle, auch nicht die Bodenerhebungen, soweit es sich nicht um ausgesprochenes Gebirge handelt. Ausschlaggebend für die Richtungsbestimmung ist nur die nähere Umgebung der Richtantennen. Hierdurch verursachte Fehler können für grosse Entfernungen notfalls durch Eichkorrekturen eliminiert werden. Durch Verwendung von Grossbasis-Systemen wie z.B. beim Erika-Verfahren können die durch die Aufstellung verursachten Fehler beliebig weit verringert werden und die erreichbaren Genauigkeitsgrenzen liegen nicht mehr in der Bodenbeschaffenheit, sondern in den Unregelmässigkeiten des Ausbreitungsmediums Luft.

Wir kommen jetzt zu der Frage, wie die Unregelmässigkeiten der Luft in die Navigationsgenauigkeit eingehen. Wir wollen hier bei speziell den Bereich der Ultrakurzwellen und Entfernungen

über der optischen Sicht betrachten. Die Erfahrungen auf diesem Gebiet sind natürlich nicht so weit, dass man schon mit einer gesicherten Theorie oder mit konkreten Angaben aufwarten kann. Es lassen sich aber aus dem bisher vorliegenden Material schon eine Reihe von Schlüssen ziehen, an welchen man nicht achtlos vorbeigehen kann. Registriert man die Feldstärke eines weit entfernten UKW-Senders, so findet man mehr oder weniger unregelmässige Schwankungen derselben: Man kann hierbei verschiedene Perioden der Schwankungen unterscheiden. Über eine ganz langsame Periode, welche etwa mit den Witterungsperioden in Übereinstimmung zu bringen ist, lagert sich eine Periode von der Grössenordnung von Stunden und darüber wieder eine solche von der Grössenordnung von Minuten. Zeitweilig können sogar Perioden von Sekundendauer und noch kürzer auftreten.

Interessant für uns sind nun die Schwankungen, welche sich über Minuten erstrecken. Es fällt auf, dass die Periode ziemlich regelmässig ist, etwa von einer Dauer von 5 Minuten. Die Vermutung, dass es sich hierbei um eine Interferenzerscheinung, d.h. um eine Überlagerung von 2 Strahlen handelt, liegt nahe. Sie wird noch dadurch bekräftigt, dass auch die Kurvenform mit den flachen Maximum- und schärferen Minimumstellen typisch für Interferenzkurven ist. Dass die Kurve nicht vollkommen regelmässig ist, wird am natürlichsten durch das Hinzukommen von weiteren Strahlen geringerer Amplitude erklärt. Wenn wir mehrere Strahlen haben, haben wir mehrere Ausbreitungswege und mehrere Richtungen, aus denen die Strahlen am Empfangsorte ankommen, ausserdem auch verschiedene Laufzeiten für die verschiedenen Wege.

Wir wollen nun einen Schritt weiter gehen und überlegen, in welcher Grössenordnung die Laufzeitunterschiede und die Richtungsabweichungen sind. Als Unterlage hierzu dienen uns die Messungen, welche die Fa. Telefunken über eine Strecke von 200 km zwischen Rügen und der pommerschen Küste durchgeführt hat und zwar die Messungen über die sogenannte Ortsverschiedenheit und die Frequenzverschiedenheit. Das eigentliche Ziel der Messungen war die Suche nach Möglichkeiten für eine Verbesserung der Nachrichtenverbindungen durch Eliminierung von Fehlstellen. Durch Aufstellen von zwei Empfängern auf der gleichen Frequenz an entfernten Orten wird die Ortsverschiedenheit ausgenützt. Festzu-

stellen durch die Messungen war die Mindestentfernung bei der der Feldstärkerverlauf an den beiden Empfängern genügend verschieden war. Das Ergebnis war etwa 3 km. Die Frequenzverschiedenheit tritt dann in Erscheinung, wenn man gleichzeitig 2 verschiedene Frequenzen betreibt, aber Sender und Empfänger jeweils am gleichen Ort hat. Kleine Unterschiede im Kurvenverlauf waren bei 200 kHz Frequenzdifferenz festzustellen, während bei 1 MHz Frequenzabstand das Kurvenbild völlig verschieden war. Die Trägerfrequenz war hierbei etwa 50 MHz. Aus diesem Ergebnis kann nun auf die Laufzeitdifferenz der verschiedenen Ausbreitungswege geschlossen werden. Die Wegdifferenz, gemessen in Wellenlängen, muss bei der kürzeren Welle grössenordnungsmässig um eine halbe Wellenlänge mehr sein als bei der längeren. Damit ergibt sich bei 2% Frequenzunterschied eine Wegdifferenz von 25λ , also etwa 150 m. Das Ergebnis ist wichtig für die Beurteilung der Genauigkeit von Verfahren zur Entfernungsmessung. Es besagt, dass bei einer Welle von 6 m und einer Entfernung von 200 km die E-Messgenauigkeit prinzipiell nicht wesentlich genauer sein kann als ± 75 m. Diese Aussage ist natürlich noch mit Vorsicht zu gebrauchen. Es müssten noch systematische Versuche angestellt werden, um in dieser Beziehung allgemeine und sichere Angaben zu bekommen.

Es ist interessant, die Frage der Genauigkeit der Entfernungsmessung noch von einer anderen Seite zu beleuchten. Bekanntlich ist das ϵ der Luft nicht konstant, sondern ändert sich mit Luftdruck und Feuchtigkeitsgehalt. Aus einer Arbeit von Eckart und Plendl entnehme ich, dass das ϵ , und zwar ein schon gemittelter Wert von ϵ in der Nähe des Erdbodens zwischen $1 + 6 \cdot 10^{-4}$ bis $1 + 9 \cdot 10^{-4}$ schwanken kann. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Wellen ist abhängig von ϵ und zwar ist $v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon}}$ wobei c die Ausbreitungsgeschwindigkeit im freien Raum ist. Legt man die beiden ϵ -Werte zugrunde, so kann man leicht ausrechnen, dass bei einer Laufzeit von 10^{-3} sec die zurückgelegte Strecke 300km abzüglich 135 m bzw. 90 m, d.h. also unter dieser Annahme eine Entfernungsunsicherheit von 45 m bestehen würde.

Wir wollen nun auch die Ortsverschiedenheit heranziehen und sehen, ob zwischen dieser und der Frequenzverschiedenheit Zusam-

menhänge feststellbar sind. Das Ergebnis der Messungen von Telefunken ist, dass eine Mindestentfernung der Empfänger von etwa 3 km nötig ist, um wesentlich verschiedene Kurvenbilder zu bekommen. Wie vorher nehmen wir an, dass die Wegdifferenz zwischen beiden Strahlen, an den beiden Empfangsorten um $1/2$ Wellenlänge sich unterscheidet. Aus der Frequenzverschiedenheit haben wir eine Wegdifferenz von 150 m festgestellt. Dementsprechend nehmen wir als Strahlenverlauf einen direkten und einen an 3900 m Höhe reflektierten Strahl an. Wird die Entfernung um 3 km grösser, so wird die Wegdifferenz um $0,375 \lambda$ kleiner. Ein so angenommener Strahlenverlauf kann also sowohl die beobachtete Frequenzverschiedenheit als auch die Ortsverschiedenheit erklären. Sind jedoch die beiden Empfangspunkte zwar mehrere km voneinander entfernt aber in gleicher Entfernung zum Sender, so würde dieser Strahlenverlauf eine Ortsverschiedenheit quer zur Strahlungsrichtung nicht ergeben. Systematische Messungen in dieser Richtung fehlen.

Wir wollen nun sehen, welche Fehler bei dem angenommenen Strahlenverlauf für eine Richtungsbestimmung zu erwarten sind. Die genaueste Methode der Richtungsmessung ist zweifellos eine Methode nach dem Prinzip des Erika-Verfahrens. Das Messsystem besteht aus 2 Antennen in einem Abstand von mehreren Wellenlängen: es ist dabei gleichgültig, ob sie als Sende- oder Empfangsantennen fungieren. Gemessen wird der Phasenunterschied der beiden hochfrequenten Schwingungen, welche je eine der Antennen mit dem entfernten Punkt, dessen Richtung bestimmt werden soll, verbindet. Wie die Phasenmessung selbst vor sich geht, ist prinzipiell gleichgültig, jedenfalls können mit dieser Methode noch Laufzeitunterschiede von $1/100$ der Schwingungsdauer und Wegunterschiede von $1/100$ der Wellenlänge gemessen werden. Es ist nun die Frage, inwieweit zwischen dem Laufzeitunterschied und der Richtung ein eindeutiger Zusammenhang besteht. Setzen wir voraus, dass Wegabweichungen von der kürzesten Verbindungsstrecke nur in vertikaler Richtung vorkommen können, dass also eine Änderung des Brechungsindex der Luft in horizontaler Richtung ausgeschlossen wird, so ist die Richtungsbestimmung in der Mittelsenkrechten des Antennensystems völlig fehlerfrei, ganz ähnlich, wie wir es bereits bei dem Fall der Ionosphäre gesehen haben. Denn die Änderung der Laufzeit trifft für die beiden Strahlen ganzgleich zu und die Laufzeitdifferenz ist immer Null. Handelt es sich um

eine Richtung, welche von der Mittelsenkrechten um α abweicht und besteht infolge vertikaler Strahlenablenkung eine Ungenauigkeit in der Entfernungsmessung von Δ , so ist angenähert die Ungenauigkeit der Winkelmessung gegeben durch $\chi = \Delta \frac{1}{\sin \alpha}$. χ ist dabei die Fehlerstrecke in seitlicher Richtung. Man sieht also, dass die Richtungsbestimmung unter den gemachten Voraussetzungen grössere Genauigkeiten liefert als die Entfernungsmessung.

Die Voraussetzungen bedürfen allerdings einer Einschränkung insofern, als zweifellos auch Strahlenablenkungen in horizontaler Richtung auftreten können. Solche können zweierlei Ursachen haben, einmal die Inhomogenitäten des Erdbodens und dann die Unregelmässigkeiten in den elektrischen Eigenschaften der Luft. Für letztere ist charakteristisch, dass die Ergebnisse der Richtungsmessung zeitlich nicht konstant bleiben. Ein Beispiel hierfür ist in der Abbildung ^{8 S. 20} gezeigt. Es wurden von einem günstigen Standort an der Kanalküste über längere Zeit englische Sender gepeilt auf eine Entfernung von etwa 150 km. Da es sich um sehr starke Sender handelt, Impulssender von vielen KW-Spitzenleistung, war die Lautstärke sehr gross und die Peilschärfe etwa $1/2$ Grad. Das Peilergebnis wandert im Verlauf von Stunden aus. Die Schwankungen liegen in der Grösse von $\pm 1,5$ Grad. Vergleicht man die Ergebnisse von zwei in der Frequenz und in der Richtung benachbarten Sendern, so kann man bis zu einem gewissen Grad eine Ähnlichkeit des Kurvenverlaufs beobachten. So weit dies der Fall ist, kann man schliessen, dass die atmosphärischen Verhältnisse in der Umgebung des Peilers von massgebendem Einfluss sind. Um einen Zusammenhang mit den Witterungsverhältnissen feststellen zu können, fehlt allerdings noch das genügende Beobachtungsmaterial.

Zieht man aus dem mit einfachen Peilern erzielten Ergebnis von $\pm 1,5$ Grad Fehler einen Schluss auf die Richtungsfehler von Grössenbasissystemen, z.B. der Erika-Anlage mit einem Antennenabstand von 30λ , so würde man rechnen, dass der Fehler genau sowie der Sektor der eindeutigen Anzeige im Verhältnis 180:2 zurückgeht. Man kommt so auf einen Fehler von $\pm 0,0167^\circ$, das sind ± 140 m in 500 km Entfernung. Dieses Ergebnis deckt sich gut mit den bisher an der Erika gemessenen Werten. Es taucht nun die Frage auf: Lässt sich die Genauigkeit durch Vergrössern

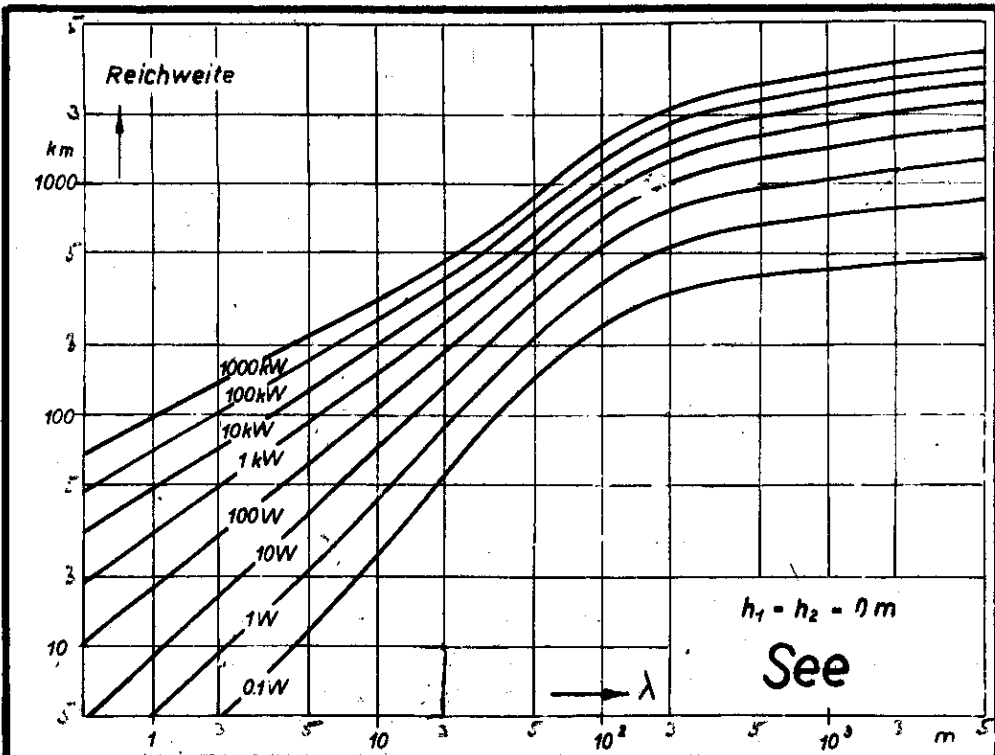
des Basisstandes noch weiter steigern, bzw. wo ist die Grenze der tatsächlich erreichbaren Genauigkeit? Auch darüber kann schon ziemlich genau Auskunft gegeben werden. Denn wir haben im Rahmen der Entwicklung des Erika-Verfahrens Interferenzlinien erzeugt mit einem Basisabstand der Antennen von 15 km, von 3 km und von 300 m und jedesmal genau vermessen. Der Abstand von 15 km war entschieden zu gross. Die Ausbreitung von den beiden Antennen war so verschieden, dass in grosser Reichweite die Interferenzlinien häufig gar nicht mehr richtig ausgebildet waren. Bei 3 km kamen die Linien erheblich besser, die Ortungsgenauigkeit war jedoch nicht viel besser als 1/10 Linienbreite. Bei 300 m dagegen waren die Interferenzlinien so sauber ausgebildet, dass mit dem Phasenmesser bis unterhalb des 1/100 Teils der Interferenzlinie geortet werden konnte. Sowohl bei 3 km Abstand wie bei 300 m Abstand kommt also roh genommen dieselbe Ortungsgenauigkeit heraus und zwar ist das bei der verwendeten Welle von 8 m etwa $\pm 0,015^\circ$ oder ± 125 m in 500 km Entfernung. Die Genauigkeit kann mit dem Basisabstand nur solange gesteigert werden, als die Ausbreitungsbedingungen für beide Wege angenähert gleich sind. Das ist bei 3 km Basis nicht mehr der Fall, wie aus den Interferenzmessungen übereinstimmend mit den Messungen über die Ortsverschiedenheit von Telefunken hervorgeht. Vergleicht man nun die Grenzen der Genauigkeit bei Verfahren mit Laufzeitmessung und mit Richtungsmessung, so kommt man zu dem bemerkenswerten Ergebnis, dass in beiden Fällen bei grossen Entfernungen etwa mit einem Fehler von ± 100 m zu rechnen ist. Ich sehe in der Übereinstimmung der Fehlergrenzen in beiden Fällen kein Zufallsergebnis, sondern eine prinzipielle Gesetzmässigkeit. Zweifelsohne besteht ein Zusammenhang zwischen der Grösse des Fehlers und den Schwankungen des Brechungsindex der Luft. Das Verhältnis des Ortungsfehlers zur Entfernung beträgt

$$\frac{0,1 \text{ km}}{500 \text{ km}} = 2 \cdot 10^{-4},$$

-4

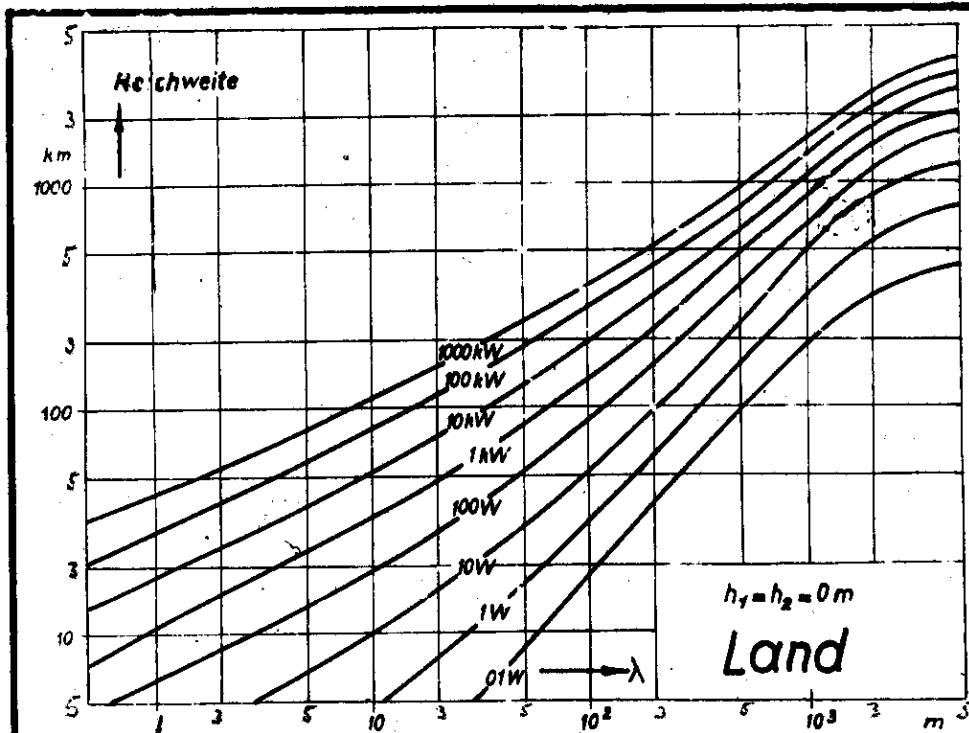
der Brechungsindex schwankt etwa zwischen $1 + 4 \cdot 10^{-4}$ und $1 + 2 \cdot 10^{-4}$, d.h. um $2 \cdot 10^{-4}$, also um denselben Betrag. Man sieht schon aus dieser primitiven Rechnung den Zusammenhang der beiden Grössen und die Beobachtungen finden auf diese Weise eine zwar nicht exakte aber immerhin recht plausible Erklärung.

Damit möchte ich meine Ausführungen schliessen. Eine Reihe von Fragen ist angeschnitten worden, ohne beantwortet werden zu können, eine Reihe von Problemen, welche unter das Thema fallen, ist gar nicht zur Sprache gekommen. Ich bin mir auch klar, dass meine Folgerungen aus dem Beobachtungsmaterial keineswegs immer einwandfrei bewiesen sind. Trotz der Unvollständigkeit in der Behandlung des Themas hoffe ich, doch einige neue Gesichtspunkte und verschiedene Einzelheiten gebracht zu haben, welche zum weiteren Nachdenken und als Anregung für eine Diskussion geeignet sind.



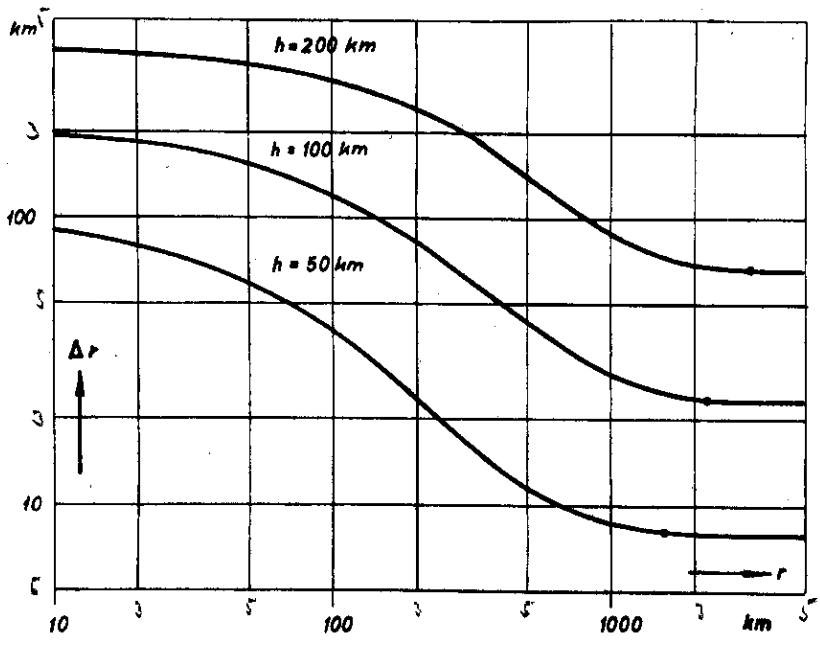
①
24 S.2

Ferd. Braun Institut Reichweite abhängig von der Wellenlänge für 5 $\mu\text{V/m}$ Empfangsfeldstärke 1944 DB₇00111



②
24 S.3

Ferd. Braun Institut Reichweite abhängig von der Wellenlänge für 5 $\mu\text{V/m}$ Empfangsfeldstärke 1944 DB₇00112



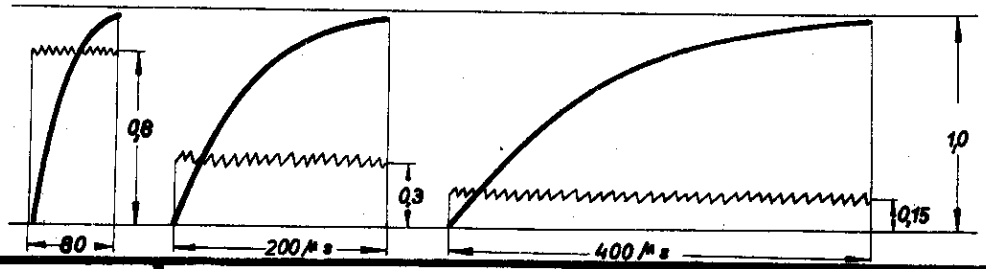
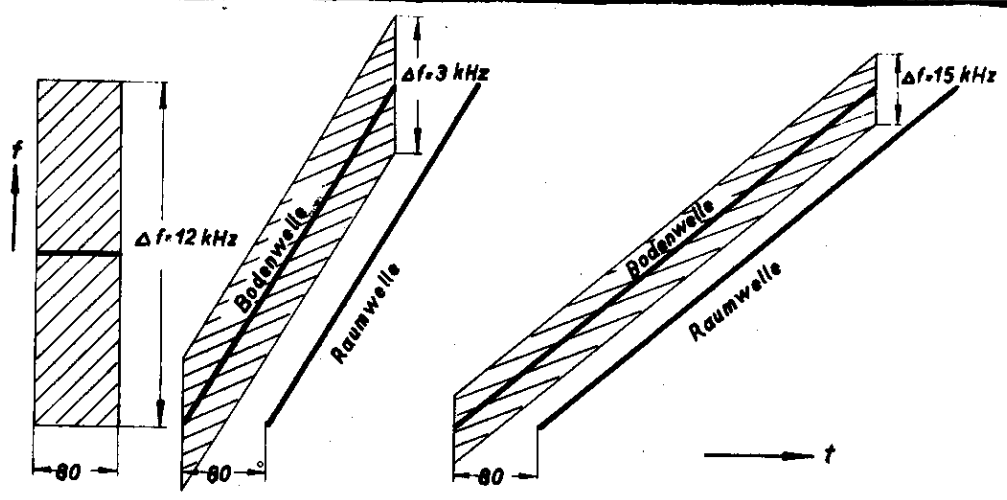
3

zu S. 4

Ferd. Braun
Institut

Wegdifferenz zwischen
direktem und reflektiertem Strahl

1944
DB, 00119



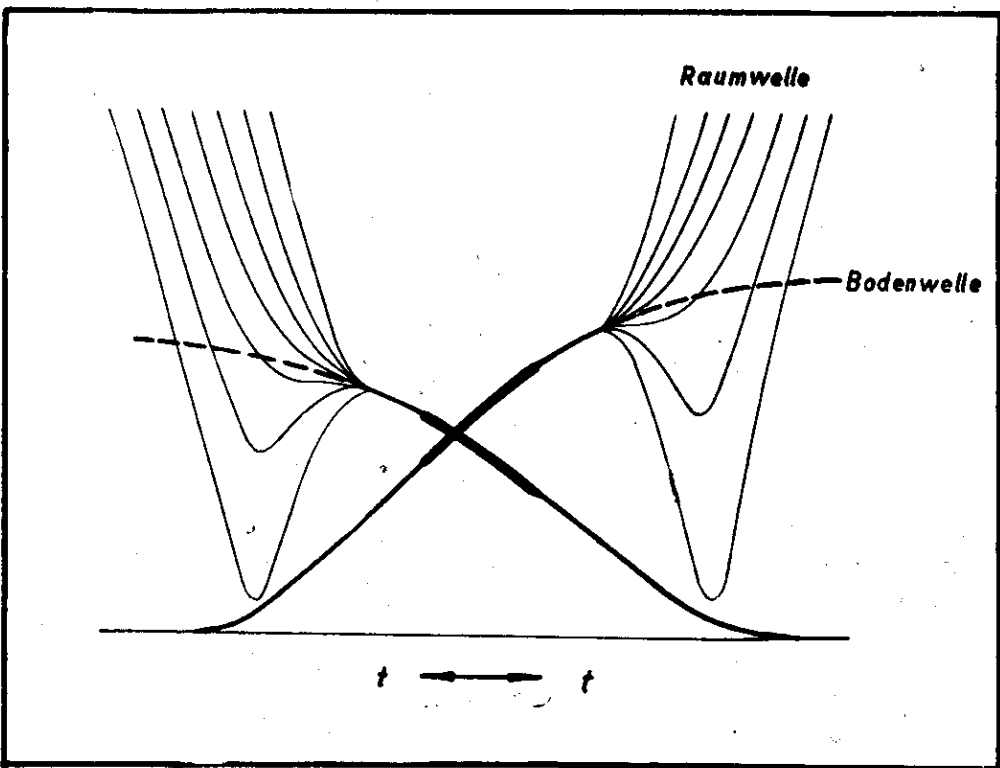
4

zu S. 5

Ferd. Braun
Institut

Trennung von Boden- und Raumwelle
mit Frequenzvariation

1944
DB, 00114

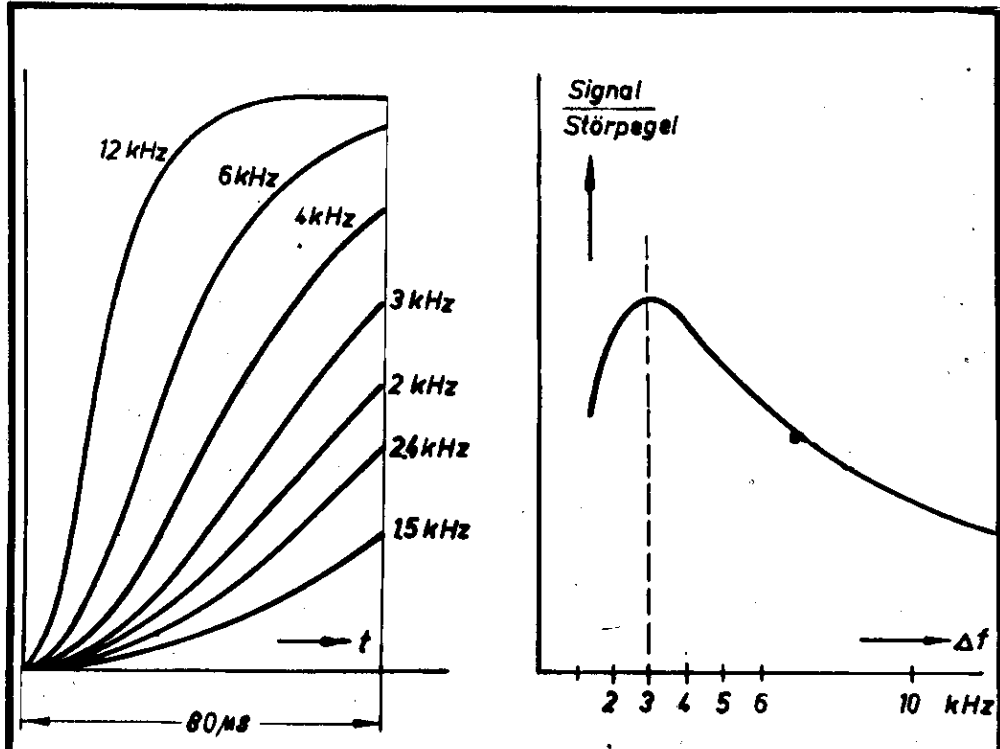


⑤
zu S. 6

Ferd. Braun
Institut

Anzeige für den Amplitudenvergleich
bei Impulsanstieg

1944
DB₁OC115

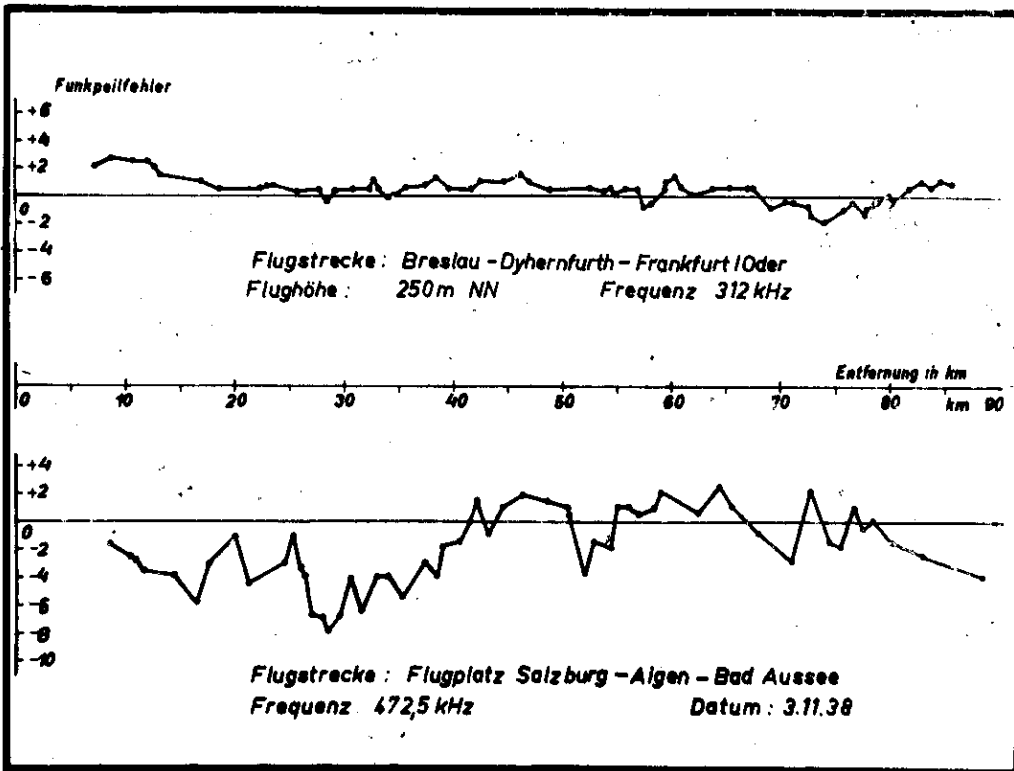


⑥
zu S. 6

Ferd. Braun
Institut

Ermittlung der günstigsten Empfängerband -
breite für 80 μs Laufzeitdifferenz

1944
DB₁00116

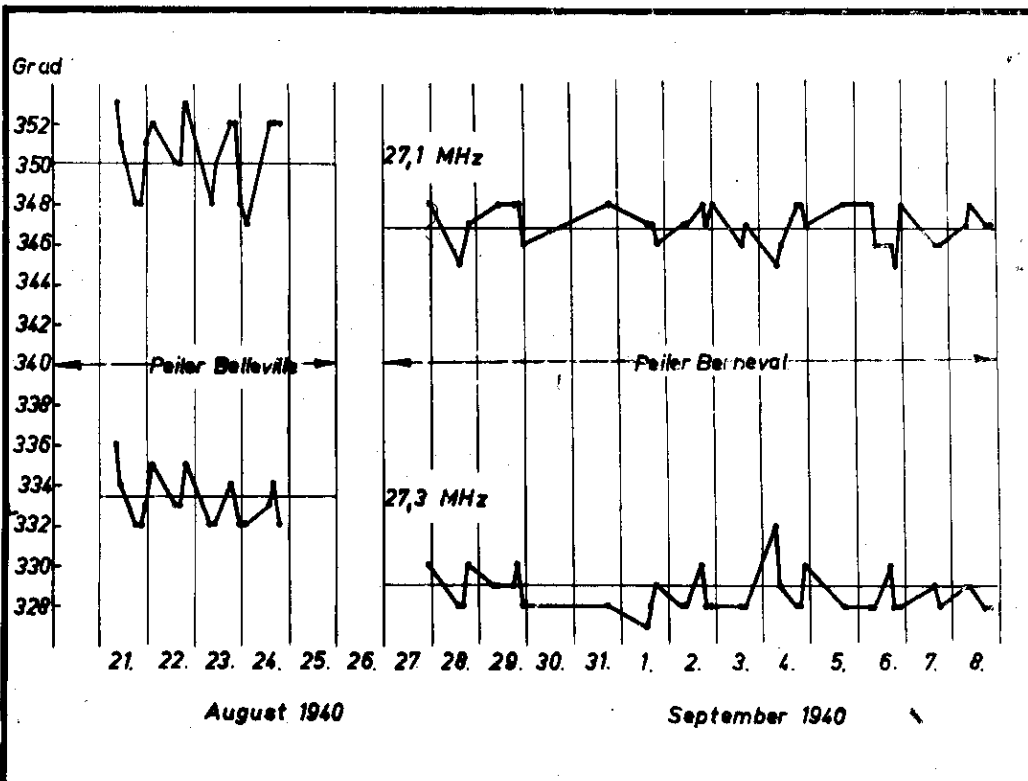


Ferd. Braun
 Institut

Peilfehler abhängig von der Entfernung

1944
 DB, 00117

7
 zu S. 8



Ferdinand Braun
 Institut

Peilung von englischen DT-Geräten an der Kanalküste

1944
 DB, 00118

8
 zu S. 14