

Über grundsätzliche Fragen der Richtungs- und Ent- fernungsmessung

von

Paul Freiherr von Handel

Ich möchte versuchen dazulegen, welche Faktoren von wesentlichem Einfluss sind, wenn wir beabsichtigen, mit Hilfe von elektrischen Wellen Richtungen und Entfernungen zu messen.

Dazu wird es vielleicht nützlich sein, einen kurzen Rückblick darauf zu tun, was eigentlich bei solchen Messungen geschieht:

Bei der Richtungsmessung ist es ja klar, dass wir nie unmittelbar die Richtung der kürzesten geometrischen Verbindungslinie messen können, beispielsweise von einem Punkte S, an dem ein Sender steht, zu einem Punkte E, an dem ein Empfänger aufgestellt ist. Meist wird die Antwort so formuliert, dass wir die Richtung der in E beim Empfänger einfallenden Wellenfront messen, wenn wir in E peilen. Wir nehmen dann an, dass die Ausbreitung dieser Wellenfront geradlinig oder genauer gesagt, in der Grosskreisebene durch die Punkte S und E verläuft und setzen daher die Einfallsrichtung in E gleich der gesuchten Richtung nach S.

Insofern wäre also die Frage nach der Genauigkeitsgrenze von Richtungsmessungen eine Frage an die Physik der Wellenausbreitung, ob die Wellen über Grosskreisebenen der Erde gehen und wie genau sie dies tun. bzw. wie stark die Wellen vom Grosskreis ausbrechen.

Wenn man etwa von der cm-Wellentechnik und der scheinwerferartigen Bündelung absieht, besteht aber das Instrument der Funktechnik, das zur Richtungsmessung dient, allgemein aus einem System von Antennenelementen; diese werden derart zusammengeschaltet, dass die Messung einer Fläche konstanter Phase ermöglicht wird. Das klassische Instrument der Peilung ist der Peilrahmen. Man dreht diesen in eine Lage, in der seine Ebene

mit der Ebene der Phasenfläche der einfallenden Welle übereinstimmt. Dann nimmt der Rahmen keinen Strom auf, weil seine Elemente gegeneinander geschaltet sind, er liegt im "Peilminimum"

Es ergibt sich also bei näherem Zusehen, dass wir auch gar nicht die Richtung der in E einfallenden Wellenfront, wie meist gesagt wird, messen, sondern was wir tatsächlich tun, ist die Messung der Richtung einer Phasenfläche im Orte E. Es wird sich bald zeigen, dass die korrekte Definition dieses Sachverhalts durchaus nicht nebensächlich, sondern recht wesentlich ist. Worauf es dabei ankommt, kann man in gewissen, einfachen Fällen schon am Rahmen deutlich sehen. Wir wissen, dass dieser zu einer fehlerfreien Richtungsmessung von Raumwellen ungeeignet ist, weil Raumwellen mit einem gewissen Einfallswinkel von oben kommen und, wenn ihre Polarisation eine horizontale Komponente hat, so nehmen die horizontalen Teile des Rahmens diese mit auf. Dreht man daher in diesem Falle einen Peilrahmen um seine vertikale Achse so, dass die Rahmenfläche senkrecht zur Richtung der einfallenden Welle zu liegen kommt, so ergibt sich keineswegs das gesuchte Minimum der Stromaufnahme. Man müsste den Rahmen überdies noch um seine horizontale Achse derart drehen, dass seine Fläche in der Phasenfläche der einfallenden Welle liegt, dann würde er nichts mehr aufnehmen und richtig peilen. Da der Einfallswinkel jedoch unbekannt ist, ist diese Prozedur nicht durchführbar und es sind Peilsysteme geschaffen worden, die die Eigenschaft besitzen, keine horizontalen Strahlungskomponenten aufzunehmen, z.B. die Adcock-Systeme. Sie sind zur Peilung aller Wellengattungen in gleicher Weise brauchbar. Auch hier sind die einzelnen Antennenpaare gegeneinander geschaltet und wir peilen auch hier Phasenflächen der vertikal polarisierten Strahlung. Wir wissen, dass über homogener ebener Erde die Phasenfläche einer ebenen Welle senkrecht steht zu deren Einfallrichtung und schliessen also aus der Lage der Phasenfläche auf die Einfallrichtung und aus dieser auf die Richtung zum Punkte S.

Nun war die Lage zunächst so, dass langjährige Untersuchungen in erster Linie zum Gegenstand hatten, die sogenannten inneren Fehler des Messgerätes, des Peilers, auf ein Mindestmass

herabzudrücken. Die inneren Fehler sind in erster Linie danach bemessen, wie weit es möglich ist, jeden Rest von Aufnahme horizontaler Strahlung zu beseitigen, weil diese, wie eben gesagt, zu Fehlpeilungen führt, die gar nichts mit der wirklichen Richtung der Phasenfläche zu tun haben.

Es ist mit Spezialanlagen gelungen, die inneren Fehler bis auf etwa $\pm 1^\circ$ Fehlweisung herunterzubringen. Es war also klar, dass Anordnungen gefunden werden mussten, deren innere Fehler noch etwa um eine Zehnerpotenz kleiner sein müssen, wenn die Aufgabe gestellt war, die Grosskreisigkeit der Wellenfortpflanzung genauer als auf 1° zu messen.

Wir haben solche Anordnungen in Anlagen gefunden, die wir Grossbasis-Anlagen nannten, weil die Antennenbasis grösser als die Wellenlänge gewählt wurde, während man im Gegensatz dazu Rahmen, Adcock und ähnliche Systeme mit Kleinbasis-Anlagen bezeichnen kann, weil ihre Antennenausmasse kleiner als die Wellenlänge sind. Der Grund, weshalb die inneren Fehler der Grossbasis-Anlagen viel kleiner gehalten werden können, ist rechnerisch leicht abzuleiten und es zeigt sich, dass die Fehler bei kleinen Restbeträgen horizontaler Strahlungsaufnahme etwa mit dem Quadrat des Verhältnisses der Basislänge zur Wellenlänge abnehmen. Qualitativ lässt sich dieser Umstand auch unmittelbar begrifflich leicht einsehen: Gegeneinander geschaltete Antennen sind bei kleiner Basis sehr unempfindlich, d.h. zwei gegenphasige Antennen in nahem Abstand nehmen nur sehr wenig Feldstärke auf. Dagegen steigt die Empfindlichkeit der Aufnahme mit dem Abstand (der Basislänge) dieser Antennen. Bei einem gegebenen Verhältnis von horizontaler zu vertikaler Komponente der einfallenden Welle wird also das Kleinbasis-System erheblich weniger vertikale Strahlung aufnehmen können als das System mit grosser Basis. Aber beide Systeme werden bei gleich sorgfältigem Abgleich etwa den gleichen Bestandteil von schädlicher horizontaler Strahlung noch mit aufnehmen. Das Verhältnis der Aufnahme schädlicher Horizontalstrahlung zur gewünschten vertikal polarisierten Strahlung wird also beim Kleinbasisystem erheblich schlechter als beim Grossbasis-System. Das gleiche gilt natürlich auch für gebündelte vertikale Richtstrahler, bei denen man sich erheblich weniger vor

unerwünschten horizontalen Komponenten zu fürchten braucht als bei Einzelantennen, denn alle vertikalen Nutzkomponenten addieren sich, die horizontalen dagegen nicht. Ein typischer Fall war z.B. die Richtantenne des Verfahrens Knickebein, bei der trotz aller horizontalen Leiter des Stahlgerüsts dieser Antennen keine schädliche Horizontalstrahlung störend war; ein weiteres Beispiel ist die Grossbasis-Anlage Elektra oder Sonne, bei der ebenfalls die horizontalen Leitungen nicht stören.

Wir sind also nun so weit, dass wir ein Messinstrument zur Verfügung haben, das die Genauigkeit, mit der die Strahlung sich über Grosskreise der Erde ausbreitet, ausserordentlich empfindlich festzustellen gestattet. Je nach der verwendeten Wellenlänge und Bündelung auf etwa $1/10$ bis $1/100$ Grad genau.

Vergleichende Untersuchungen der Kleinbasis- und Grossbasis-Systeme haben aber nun gezeigt, dass die Verhältnisse in Wahrheit keineswegs so einfach liegen, wie bisher geschildert worden ist, sondern dass noch ein ganz anderer, sehr wesentlicher Umstand hinzukommt. Es hat sich z.B. durch registrierende Dauerpeilungen bei Adcockanlagen gezeigt, dass die Fehlpeilungen bei weitem grösser waren als die inneren Fehler des Gerätes, also viel grösser als etwa 1° ; gleichzeitige Dauerregistrierungen an Grossbasis-Systemen zeigten dagegen meist wesentlich kleinere Fehler. (In den folgenden Vorträgen von Herrn Crone und Herrn Pfister wird hiervon ausführlich die Rede sein). Der Grund konnte also nicht nur in tatsächlichen Ausbrechungen der Wellenfortpflanzung aus dem Grosskreis liegen, weil sonst beide Systeme das gleiche Resultat hätten liefern müssen; er konnte auch nicht in inneren Fehlern der Anlagen liegen, weil die Abweichungen, wie gesagt, viel grösser waren als die inneren Systemfehler. Es musste hier eine neue Erscheinung noch hinzukommen.

Es ist tatsächlich so, dass wir nur in Ausnahmefällen mit der Vorstellung rechnen dürfen, es breite sich eine einzige Wellenfront vom Sender nach dem Empfänger aus, gewissermassen ein einziger Strahl. Im allgemeinen Fall wird sich von S nach E ein Strahlenbündel ausbreiten, insbesondere, wenn die verwendeten Wellen über die Ionosphäre gehen und dort an verschiedenen,

niemals völlig ebenen Schichten nach E reflektiert werden; überdies aber werden diese Wellen, wie auch die Bodenwellen, in der örtlichen Umgebung vom Messpunkt E durch das niemals völlig homogene Gelände nach E aus beliebigen seitlichen Winkeln hereinreflektiert. Es sind Rückstrahler vorhanden, die wir ja in der Funkmesstechnik eifrig benützen und die aber in unserem Fall Anlass zu den bekannten Funkbeschickungen geben.

Was bei einer Richtungsbestimmung auf Grund von Phasenflächenmessungen passiert, sieht man sehr anschaulich, wenn man ein Bild betrachtet, in dem die Phasenflächen zweier ebener Wellen eingezeichnet sind (Abb. 1). Es sollen zwei ebene Wellenzüge einfallen, deren Fortpflanzungsrichtungen nur um einen kleinen Winkel θ rechts und links vom Grosskreis abweichen. Die weissen Linien bedeuten z.B. stets die Phase $+\frac{\pi}{2}$, die schwarzen die Phase $-\frac{\pi}{2}$. In dem Gebiet, in welchem beide Wellen zugleich einfallen, ergeben sich Interferenzen, man sieht die Linien der Interferenzmaxima und -Minima. Betrachten wir zunächst den Fall, dass nur eine Welle allein eintrifft. Der Deutlichkeit halber ist unten im Bilde ein Ausschnitt des Phasenverlaufs einer Welle allein vergrössert herausgezeichnet. Wenn wir ein Antennensystem zur Peilung in einen solchen Wellenzug bringen, so sieht man sofort, dass die Ebene des Systems in der Phasenfläche senkrecht zur Ausbreitungsrichtung liegen muss. Die Antennenfläche wird dann stets in Flächen gleicher Phase liegen und das Peilminimum zeigen. Umgekehrt, wenn man die Antennenfläche senkrecht zu den Phasenflächen stellt: Die Elemente der Antennen liegen dann stets an Orten einer konstanten maximalen Phasendifferenz und nehmen daher Ströme auf. Wir haben ein Maximum der Aufnahme. Die Grösse dieser Phasendifferenz, also die Grösse des Maximums des aufgenommenen Stromes hängt dann ab vom Grössenverhältnis der Basis der Antennen zur Wellenlänge. Sie nimmt zu, bis die Basis eine halbe Wellenlänge lang geworden ist.

Im nächsten Bild ist ein vergrösserter Ausschnitt des Phasenverlaufs zweier gleichzeitig einfallender Wellen herausgezeichnet einmal eine Phase $+\frac{\pi}{2}$ und die andere eine Stelle der Gegenphase

2
1.15. Wir wollen nun das messende Antennensystem zunächst in das Gebiet gleicher Phase bringen (Abb. 2). Man sieht, dass sich hier etwas ganz analoges abspielt zu dem Fall, da nur eine Welle allein vorhanden war. Die resultierende Phasenfläche liegt jetzt genau senkrecht zur Winkelhalbierenden beider Einfallrichtungen, weist also genau senkrecht zur Richtung des Grosskreises. Wenn also an einem Orte zwei gleichphasige Wellen um gleiche Winkel rechts und links vom Grosskreise abweichend einfallen, peilen wir genau richtig in den Grosskreis.

Nun bringen wir schliesslich das Antennensystem mit seinem Mittelpunkt in das Interferenz-Minimum, also an den Ort, in dem die beiden Wellen gegenphasig einfallen. Legen wir wieder die Antennenfläche senkrecht zum Grosskreis, so sehen wir, dass sie jetzt keineswegs mehr in einer Fläche konstanter Phase liegt. Vielmehr reicht das eine Ende der Antennenfläche in ein Gebiet positiver Phase, das andere Ende in ein Gebiet negativer Phase. Wir haben also statt eines Minimums der Stromaufnahme in dieser Lage umgekehrt gerade ein Maximum. Drehen wir nun die Antennenebene um einen rechten Winkel, so sieht man sofort, dass sie nun in einer Phasenfläche liegt, nämlich in der Phase Null, die mit der Linie des Interferenzminimums übereinstimmt. Die an diesem Orte gepeilte Richtung weist 90° , also senkrecht zur Richtung des Grosskreises durch die Punkte E und S. Wie man sieht, hat aber diese Richtung auch nicht das geringste mit der Richtung der resultierend einfallenden Wellenfront zu tun; denn die resultierende Wellenfront fällt nach wie vor aus der Richtung des Grosskreises ein. Wir haben also hier einen sehr drastischen Fall um zu zeigen, dass wir mit den Mitteln der drahtlosen Feilung nicht die Richtung der einfallenden Wellenfront messen, sondern die Lage einer Phasenfläche. Diese Zusammenhänge hat rechnerisch bereits 1923 Heiligtag in einer Dissertation bei Max Wien gezeigt, eine Arbeit, die inzwischen völlig in Vergessenheit geraten war und erst kürzlich durch neuere Arbeiten auf diesem Gebiet wieder entdeckt worden ist.

Nun sieht man an dem Bild der Phasenflächen zweier ebener Wellen aber noch eine weitere wesentliche Erscheinung ganz deutlich und anschaulich: Wählt man nämlich zur Richtungsbestimmung anstelle eines Kleinbasis-Systems mit einer Basis kleiner als $\frac{\lambda}{2}$, ein Grossbasis-System, bei dem die Antennen z.B. zwei

Wellenlängen entfernt liegen, dann zeigt sich folgendes: In dem zuletzt untersuchten Falle, dass der Antennenmittelpunkt auf der Linie des Interferenzminimums liegt, also bei gegenphasig einfallenden Wellen, findet man genau wie vorher eine Phasenfläche 1-1' in der Ebene des Grosskreises, die Peilrichtung weist also ebenfalls um 90° verkehrt. Man findet aber auch noch andere Lagen für die Antennenfläche, in denen die beiden Antennen ebenfalls an Orten gleicher Phase liegen, z.B. bei 2-2' und 3-3', entsprechend den Fehlweisungswinkeln von 48° und 14° . Zur Richtungsbestimmung wird aber jene Lage herangezogen, deren Richtung der Grosskreisrichtung am nächsten liegt; die weiterabliegenden Lagen der Phasenfläche treten nicht in Erscheinung, denn die beiden Wellenzüge treffen in allen möglichen Phasenbeziehungen, zwischen Gleichphasigkeit bis zur Gegenphasigkeit dauernd wechselnd, ein und wir haben ja gesehen, dass bei Gleichphasigkeit die Peilrichtung mit dem Grosskreis übereinstimmt. Ändert sich nun die Phase bis zur Gegenphase, so ändert sich die Peilrichtung von dem richtigen Wert 0° bis zum Fehlwert 3-3', der bei 14° Fehlweisung liegt. Die maximale Fehlweisung ist also nicht mehr 90° wie beim Kleinbasis-System, sondern erheblich kleiner geworden.

Auch hier tritt eine entsprechende Fehlerverkleinerung ein, wenn gebündelte Richtstrahl-Antennensysteme verwendet werden anstelle von Grossbasis-Systemen.

Ein Punkt muss bei Richtungsmessungen noch beachtet werden, wenn mit Grossbasis-Systemen oder mit Richtstrahl-Systemen gemessen wird. Es ist der Einfluss des Erhebungswinkels, des Einfallswinkels der Wellen über der Horizontalebene.

Wir haben gesehen, dass wir die Messung der Richtung auf eine Messung der Phase reduzieren. Nun liegen die Orte gleicher Phasendifferenz zu zwei festen Punkten im Raume, nämlich zu den beiden Antennen-Elementen, auf Rotationshyperboloiden.

Wir sehen in Abb. 3 in perspektivischer Darstellung die beiden Antennen und dazu senkrecht die Ebene der Gleichphasigkeit, die Phasenfläche $\psi_0 = 0$. Wenn im Punkte P_0 auf der Mittelsenkrechten zur Antennenbasis ein Sender steht, so ist der Phasenunterschied, der in den beiden Antennen gemessen wird, stets gleich

Null, ganz unabhängig davon, ob wir eine Bodenwelle empfangen längs des Weges 1 oder eine Raumwelle längs des Weges 1. Das Hyperboloid verformt sich auf der Mittelsenkrechten zu einer Ebene.

Steht dagegen der Sender beispielsweise in P_2 , so ergibt sich eine verschiedene Phasendifferenz, je nach Grösse des Erhebungswinkels der Welle. Arbeiten wir mit der Bodenwelle, so messen wir die Phase ψ_3 , weil P_2 an einem Orte liegt, an dem das Hyperboloid ψ_3 die Erdoberfläche schneidet. Arbeiten wir jedoch mit Raumwellen, so wird die gemessene Phase abhängig sein vom Erhebungswinkel. Es ist im Bild ein Strahl längs des Weges 2' eingezeichnet, der einen Erhebungswinkel hat, der gerade in das Hyperboloid ψ_2 hereinfällt. Wir messen also in diesem Falle nicht mehr die Phase ψ_3 , sondern die Phase ψ_2 .

Es zeigt sich also, dass wir eine einwandfreie Richtungsmessung mit Grossbasissystemen nur in der Mittelsenkrechten zum System ausführen können; es sei denn, dass allein mit der Bodenwelle und dem Erhebungswinkel Null gearbeitet wird. Aus diesem Grunde ist es notwendig, zur Richtungsmessung entweder das ganze System mechanisch zu drehen, wie dies z.B. beim Verfahren Bernhard oder Haubenlerche geschieht, oder elektrisch immer nur um kleine Beträge aus der Mittelsenkrechten zu schwenken und dann auf eine andere Basis umzuschalten, nach dem Verfahren Komet oder Brommy.

Aus dem gleichen Grunde sind die Richtungsmessungen mit Elektra oder Sonne nur am Tage, bei alleinigem Vorhandensein der Bodenwelle, auf allen Sektoren einwandfrei, während bei Nacht, wenn die Raumwelle dazukommt, die Messung beschränkt bleiben muss auf den Bereich um die Mittelsenkrechte, den null'ten Leitstrahl.

Wir können also unsere Betrachtungen über die Winkelmessung zusammenfassen in das folgende Ergebnis:

- 1.) Die Richtungsmessung wird auf eine Messung der Phase zurückgeführt, es wird die Lage einer Fläche konstanter Phase im Raume gemessen.
- 2.) Die inneren Fehler der Messapparatur werden sehr klein, wenn die Basis des Antennensystems gross wird gegenüber der Wellenlänge. Es ist daher vorteilhaft, mit grosser Basis oder mit Bündelung zu messen, wenn es auf genaue Messungen ankommt.

- 3.) Die Fehler werden unter Umständen sehr gross, wenn Streustrahlen aus seitlichen Richtungen einfallen, vor allem dann, wenn diese gegenphasig sind. Auch diese Fehler vermindern sich wesentlich bei Anlagen mit grosser Basis oder mit Bündelung.
- 4.) Die Messung wird nur auf der Mittelsenkrechten des Systems unabhängig vom Erhebungswinkel der Wellen; daher muss entweder mechanisch gedreht oder eine Vielzahl von Systemen verwandt werden.
- 5.) Die Fehler, die dann noch verbleiben, sind im wesentlichen auf wahre Ausbrechungen der Wellenfortpflanzung aus der Grosskreisebene zurückzuführen und wir sind damit an der physikalisch gegebenen Grenze der möglichen Genauigkeit angelangt.

Wenden wir uns nun der Entfernungsmessung zu. Wir werden uns zunächst auch hier fragen müssen, worauf diese Messung zurückzuführen ist. Ganz ähnlich messen wir natürlich auch hier nicht unmittelbare Längen etwa in Metern, so wie wir dort nicht geometrische Richtungen zwischen zwei Punkten gemessen haben.

Wir stellen vielmehr Laufzeiten von drahtlosen Signalen fest. Dann setzen wir die Fortpflanzungsgeschwindigkeit dieser Signale gleich der Lichtgeschwindigkeit im leeren Raume und errechnen daraus den Abstand. Hieraus ergeben sich sogleich wieder zwei Fragen, die analog sind den Fragestellungen bei der Richtungsmessung:

- 1.) Wie ist die Messtechnik der Laufzeitmessung und wie gross sind ihre inneren Fehler.
- 2.) Mit welcher Genauigkeit trifft die Annahme zu, dass die Fortpflanzungsgeschwindigkeit von Signalen, die Gruppengeschwindigkeit also, gleich ist der Fortpflanzung im leeren Raume und wie verhalten sich die Wege, die ein Signal tatsächlich durchmessen hat zu den Wegen, die uns zur Navigation interessieren, nämlich dem Abstand zwischen zwei Orten auf der Erde.

Zunächst zur Messtechnik: Die ganz allgemeine Methode, mit Hilfe einer Wellenstrahlung Laufzeiten zu messen, ist wieder die Messung der Phase einer Welle. Die empfindlichste Phasenmessung geschieht mit der ausgestrahlten Welle selbst. Für eine Navigation ist aber im allgemeinen eine solche Messung nicht brauchbar, weil sie vieldeutig wird, sobald die zu messenden Entfernungen grösser werden als die Wellenlänge. Daher behilft man sich damit, dass man der Hochfrequenz, der Trägerwelle, ein Signal aufmoduliert. Die Modulationsfrequenz ist viel kleiner als die des Trägers und wird so bemessen, dass die Entfernungsmessung in einem interessierenden Bereich eindeutig bleibt. So wurde beispielsweise beim Y-Verfahren mit 3000 Hz moduliert, entsprechend einer Wellenlänge von 100 km, innerhalb deren die Messung eindeutig ist. Aber auch die Laufzeitmessung von Impulsen ist prinzipiell die gleiche Messmethode. Hier wird dem Träger die Gruppenfrequenz einer Impulsfolge aufmoduliert und gemessen wird die Phase, mit der die Gruppenfrequenz dieser Impulse eintrifft.

Wir sehen also, dass sich Richtungsmessung und Entfernungsmessung grundsätzlich gar nicht unterscheiden, was die Messtechnik betrifft. Wir führen beide auf Phasenmessungen zurück. Dass man im Sprachgebrauch doch einmal von Richtungsmessung und einmal von Laufzeitmessung spricht, findet seine Rechtfertigung in folgendem: Wir sprechen von Richtungsmessungen immer dann, wenn die Basis des Antennensystems sehr klein ist gegenüber den Abmessungen der Messtrecke; wir haben dann einen praktisch parallelen Strahlenverlauf zu den einzelnen Antennen des Peilers. Abb. 4 veranschaulicht die Verhältnisse. Bei E_1 stehe eine Anlage zur Messung der Richtung α_1 gegen den Sender in S. Die Rückstrahlung in der örtlichen Umgebung von E ist zu einem resultierenden Rückstrahler zusammengefasst. Die Richtung der Wellenfront zu S ist von den einzelnen Antennenelementen und auch vom Rückstrahler dieselbe und gleich α_1 . Wenn es sich um Raumwellen handelt, heisst dies, dass die Welle auch unter einem gemeinsamen Erhebungswinkel β_1 einfällt. In den Rechnungen zur Ermittlung der Phasenfläche geht daher als Grundelement immer wieder die Phase $e^{i(\frac{2\pi}{\lambda} d \sin \alpha \cos \beta)}$ ein, wobei d der Abstand der Antennenelemente ist, α die gemeinsame Richtung und β der gemeinsame Erhebungswinkel. Weil wir in diesem Falle sehr empfind-

7.25

liche Phasenmessungen vornehmen müssen, auf einer Basis, die vergleichbar ist der Wellenlänge des Trägers, wählen wir zur Phasenmessung die Trägerwelle λ selbst.

Wenn wir von Laufzeitmessungen sprechen, setzen wir Verhältnisse voraus, in denen die Messbasis viel grösser als die Trägerwellenlänge und vergleichbar der zu messenden Strecke selbst ist. Im Bilde ist dies durch die beiden Anlagen bei E_1 und E_2 veranschaulicht. Hier wird die Laufzeitdifferenz zwischen der Strecke r_1 und r_2 gemessen, von S nach E_1 bzw. nach E_2 . Die Messtechnik ist dieselbe. Wir messen auch hier Phasenunterschiede. Aber die Basis D ist nun vergleichbar den Messstrecken r_1 und r_2 und wir verwenden daher nicht mehr die Hochfrequenz der Wellenlänge λ , sondern die Modulationsfrequenz der Länge Λ , z.B. die Impulsfrequenz. In die Rechnung geht der gleiche Term $e^{i\left(\frac{2\pi}{\Lambda} r \sin \alpha + \omega t + \beta\right)}$ ein. Wenn D/Λ gleich ist dem Verhältnis von oben bei der Richtungsmessung, so scheint zunächst alles beim alten geblieben zu sein. Der wesentliche Unterschied liegt aber darin, dass wir jetzt nicht mehr von einem gemeinsamen Winkel α und β sprechen können. Wir müssen α_1, β_1 einführen für den Messpunkt E_1 und α_2, β_2 für den Messpunkt E_2 , d.h. wir haben es mit zwei völlig voneinander verschiedenen Ausbreitungswegen zu tun.

Wir haben gesehen, dass bei der Richtungsmessung die wesentlichen Fehler durch horizontale Strahlungskomponenten entstehen, das sind die inneren Fehler der Apparatur und durch seitlich einfallende Streustrahlen, das sind die äusseren Fehler. Diese Sorgen kümmern uns bei Entfernungsmessungen überhaupt nicht mehr. Die Polarisation der Antennen bei E_1 und E_2 ist ganz beliebig, denn wir messen ja keine hochfrequenten Phasen, sondern die Phase der Impulsfrequenz und diese ist praktisch ganz unabhängig vom Polarisationszustand der Trägerwelle. Auch Rückstrahler durch Inhomogenitäten des Bodens stören uns nicht mehr. Solche könnten nämlich nur dann wirksam werden, wenn der Rückstrahler bei E_1 mit gleicher Amplitude bis nach E_2 wirkt. Nur dann nämlich würde dieser Rückstrahler eine Phasenänderung der Modulationsfrequenz zwischen E_1 und E_2 hervorrufen, die gleich ist der Phasenänderung der Hochfrequenz innerhalb des Richtungssystems der Antennen von E_1 . Bei $\frac{r_1}{\Lambda} = \frac{r_2}{\Lambda}$ wäre dann die Fehlweisung ident.

tisch. Das ist aber ganz ausgeschlossen. Denn der Rückstrahler wirkt nur in der nahen Umgebung von E_1 , vielleicht auf einige hundert Meter, niemals aber bis auf 100 oder mehrere 100 Kilometer, bis nach E_2 .

Die Lage ist also jetzt völlig anders: Die wesentlichen Fehlerquellen der Richtungsmessung fallen bei der Entfernungsmessung fort. Das bedeutet, dass es völlig einerlei ist, mit welchen Antennen wir arbeiten, sie können beliebig aufgestellt werden. Wir brauchen auch keine Sorgfalt auf die Auswahl des Platzes zu legen, wir brauchen nicht nach ebenem Sumpfgelände zu suchen, wie bei den Adcockpilelern.

Dagegen erheben sich hier andere Schwierigkeiten, die wir bei der Richtungsmessung nicht gehabt haben. Diese neuen Fehlerquellen liegen darin, dass wir jetzt zwei völlig voneinander unabhängige Ausbreitungswege vor uns haben, die wir zur Messung heranziehen, einen über r_1 und den anderen über r_2 . Wenn sich die Wellen über die Ionosphäre ausbreiten, so ist es durchaus unwahrscheinlich, dass die scheinbaren Höhen bei r_1 dieselben sind wie bei r_2 . Wir haben verschiedene Erhebungswinkel β_1 und β_2 , die wir nicht kennen. Es ist beispielsweise durch Messungen erwiesen, dass die anomale E-Schicht im allgemeinen an örtlich begrenzten Gebieten auftritt. Die Rechnung zeigt, dass schon Unterschiede der scheinbaren Höhen von wenigen km beträchtliche Fehlmessungen verursachen. (Über die Ergebnisse von Messungen mit einer solchen Anlage wird später Herr Mattes berichten). Bei Verwendung von Ultrakurzwellen werden die Verhältnisse der Berechnung auf den beiden verschiedenen Wegen eine Rolle spielen. (Hierüber wird Herr Pfister vortragen). Bei Raumwellen über die Ionosphäre kommt für die Praxis der Navigation nach einem solchen Verfahren noch eine erhebliche Schwierigkeit hinzu, die wir schon bei der Richtungsmessung kennengelernt haben und die hier in gleicher Weise einwirkt: Es ist der Umstand, dass auch hier die Orte gleichen Phasenunterschiedes auf Rotationshyperboloiden liegen. Daher ist auch hier eine exakte Messung nur auf der Mittelsenkrechten zu D zu erwarten, weil sich dann das Hyperboloid zu einer Ebene deformiert, so dass der absolute Betrag der scheinbaren Höhe der Schicht nicht in den Messwert eingeht. Nun konnten wir bei der Richtungsmessung diese Schwierigkeit dadurch umgehen, dass wir die Basis des Antennen-

systems entweder mechanisch drehen liessen, oder eine Vielzahl von Antennenpaaren angeordnet haben und dazwischen um geringe Winkelbeträge elektrisch drehen. Beide Massnahmen sind auf einer Basis von 100 oder mehr Kilometern nicht möglich, man kann sie weder mechanisch drehen noch ist ein Aufwand denkbar, auf 100 km Entfernung etwa alle 3 Grad ein Messantennenpaar im Kreis herum aufzustellen. Versuche müssen zeigen, wie weit man also hier kommen kann.

Wir wollen wieder kurz zusammenfassen: Die Entfernungsmessung wird genau wie die Richtungsbestimmung auf eine Phasenmessung zurückgeführt. Es besteht grundsätzlich zwischen beiden kein Unterschied. Wesentlich ist jedoch die Abgrenzung, dass bei Richtungsmessungen die Basis des Antennensystems in der Grössenordnung der hochfrequenten Welle liegt und daher sehr klein ist gegen die Messtrecke, so dass wir mit einem einzigen Ausbreitungsweg zu rechnen haben, während bei Laufzeitdifferenzmessungen die Basis der Antennen vergleichbar ist der Messtrecke, also in der Grössenordnung von 100 km. Mehrfachwege, Streustrahlung, Rückstrahler und Polarisationsfehler, die alle bei der Richtungsmessung entscheidend sind, spielen hier gar keine Rolle. Dagegen liegen die Grenzen der erreichbaren Genauigkeit in der Frage, wie weit zwei getrennte Ausbreitungswege übereinstimmen.

Ich möchte schliesslich noch auf ein Entfernungsmessverfahren zu sprechen kommen, das bisher am meisten im UKW-Band angewandt worden ist und das auch bei Raumwellen am aussichtsreichsten zu sein scheint. Es ist die Entfernungsmessung über die Messtrecke selbst auf dem Hin- und Rückwege. (Herr Dieminger wird anschliessend über solche Messungen vortragen). Das Verfahren hat den grossen Vorzug, dass wir alle Schwierigkeiten zweier verschiedener Ausbreitungswege umgehen, da der Hin- und Rückweg ja derselbe ist. Es fallen auch, genau wie bei den vorhin besprochenen Entfernungsmessverfahren, alle Fehler durch Streustrahlung, Rückstrahler und Polarisierungseffekte fort. Dagegen verbleibt als Fehlerquelle die Abhängigkeit der gemessenen Strecke vom Erhebungswinkel, der zunächst unbekannt ist.

Als ich vor einigen Jahren in einem Vortrag auf der Akademie der Luftfahrtforschung auf solche Messungen zu sprechen kam, schien es mir, dass die Genauigkeiten, die damit zu erzielen

sind, für praktische Zwecke der Navigation trotzdem nicht recht befriedigend wären; denn Messungen, die Herr Gloeckner seinerzeit bei der DVL über mehrere 1000 km gemacht hat, brauchten nur Genauigkeiten um die 80 km. Es waren orientierende Versuche, und die Genauigkeit war dadurch begrenzt, dass es stets ungewiss war, auf welche der Mehrfachreflexionen an den verschiedenen Schichten der Ionosphäre der ferne Relaisender angesprochen und seinen Messimpuls zurückgesandt hatte. Herr Dr. Dieminger hat damals in der Diskussion darauf hingewiesen, dass diese Fehler klein werden müssten, wenn man die Messung etwa auf Reflexionen an der E-Schicht beschränkt und in Entfernungsbereichen arbeitet, in denen der Erhebungswinkel kleine Werte hat; dann gehen Schwankungen des Erhebungswinkels nur wenig in die Messgrösse ein. Dies ist zweifellos richtig, nur war, wie gesagt, bei den Gloeckner'schen Arbeiten die Schwierigkeit darin gelegen, dass es meist ungewiss war, mit welcher Reflexion an der E- oder F-Schicht gearbeitet wurde. Leider ist es ja nicht so, dass der erste eintreffende Impuls, also derjenige, der mit dem flachsten Erhebungswinkel und über die E-Schicht geht, mit der grössten Amplitude eintrifft. Messungen von Kotowski und Messungen der Amerikaner haben gezeigt, dass vielfach gerade die flachen Wege infolge der Dämpfung in der Ionosphäre nur schwach einfallen, während die Zeichen der F-Schicht und der steileren Winkel oft stärker ankommen. Dadurch passiert es dauernd, dass das erste Zeichen im Störpegel untergeht und gar nicht registriert wird, während die folgenden Zeichen zur Messung benützt werden, ohne dass man weiss, welche es sind. Die Bemerkungen von Herrn Dieminger bringen aber auf den Gedanken, dass es möglich sein müsste, erheblich genauere Werte zu erhalten, wenn man gleichzeitig mit der Entfernungsmessung eine sorgfältige Messung des Erhebungswinkels laufend durchführt. Eine solche Messung ist an der Bodenanlage mit einem gewissen Aufwand durchführbar. Man könnte dann jedem Messwert, der Entfernung einen Messwert des Erhebungswinkels zuordnen, und aus beiden die gesuchte Entfernung längs der Erdoberfläche geometrisch leicht errechnen. Arbeiten zu einem solchen Messverfahren sind bei uns im Institut in Vorbereitung; orientierende Versuche laufen auch auf quersynchronisierten Fernübertragungsmessstrecken der Zentralstelle für Funkberatung.

Zum Schluss wären noch einige Worte zu sagen über die technischen Möglichkeiten von Richtungsmessungen und Entfernungsmessungen in besonderer Rücksicht auf die Kriegslage und die Kriegserfahrungen: Es ist klar, dass alle Richtungsmessungen, die, wie wir gesehen haben, durch Messung der Phase von hochfrequenten Wellen geschehen, an die verwendete Wellenlänge stark gebunden sind. Besonders bei den feineren Messverfahren der Grossbasisanlagen ist ein Wellenwechsel über einen grösseren Bereich nur durch einen hohen technischen Aufwand möglich. Die Entfernungsmessverfahren dagegen benutzen die Phasenmessung einer amodulierten Niederfrequenz, beispielsweise der Gruppenfrequenz einer Impulsfolge. Nun ist es ohne wesentlichen Umstand möglich, diese Gruppenfrequenz starr und konstant zu lassen, dagegen die Hochfrequenz beliebig zu ändern. Dadurch ändert sich für die Messung zunächst gar nichts. Dies bedeutet einen erheblichen Vorteil für die Störfestigkeit der Entfernungsmessverfahren. Wenn eine Messtrecke vom Feind durch Störsender gefährdet wird, kann man hier elastisch mit der Welle ausweichen; bei den Richtungsmessverfahren dagegen ist dies viel schwieriger und unständlicher.

Noch ein Umstand kommt dazu, der vor allem in der Ultrakurzwellentechnik eine Rolle spielt, in der es wesentlich auf die Grösse der ausgestrahlten Leistung ankommt: Es ist möglich, während der kurzen Impulsdauer sehr hohe Leistungen abzustrahlen, ohne dass die Senderröhren thermisch überlastet werden. Man kann also die Entfernungsmessverfahren mit Impulsen auf viel höhere Leistungen bringen als die Richtungsmessverfahren, die im allgemeinen mit rein ungedämpften Wellen arbeiten. Aus diesen beiden Gründen sind Arbeiten im Gange, auch Richtungsmessungen mit Impulsen durchzuführen und diese elastisch an einen gewissen Wellenbereich anzugleichen.

Die Bilanz unserer Betrachtungen ist also etwa die folgende:

Richtungsmessungen und Entfernungsmessungen beruhen auf der Messung von Phasen. Die Genauigkeitsgrenzen werden von wesentlich verschiedenen physikalischen und messtechnischen Faktoren

bestimmt, es scheint jedoch, dass man nach beiden Verfahren praktisch zu denselben Genauigkeiten gelangt. Die Entfernungsmessung mit Impulsen über die Ionosphäre und über grosse Strecken bedarf noch erheblicher weiterer Forschungsarbeit, um zu eindeutigen Unterlagen zu kommen.

Wegen der grösseren Störfestigkeit und Leistungsabstrahlung von Impulsverfahren bieten diese eindeutige Vorteile. Es wird daher daran gearbeitet, nicht nur Entfernungsmessungen, sondern auch Winkelmessungen mit Impulsverfahren durchzuführen.

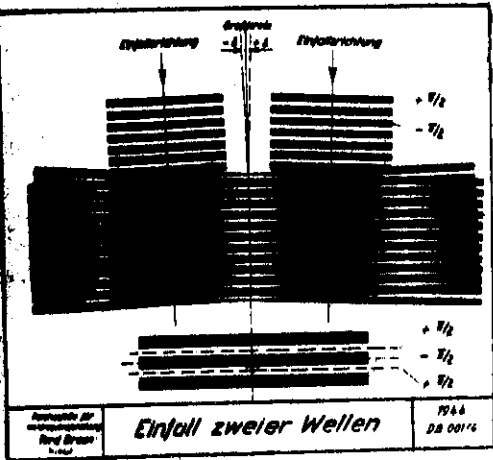


Abb. 1

zu S. 13

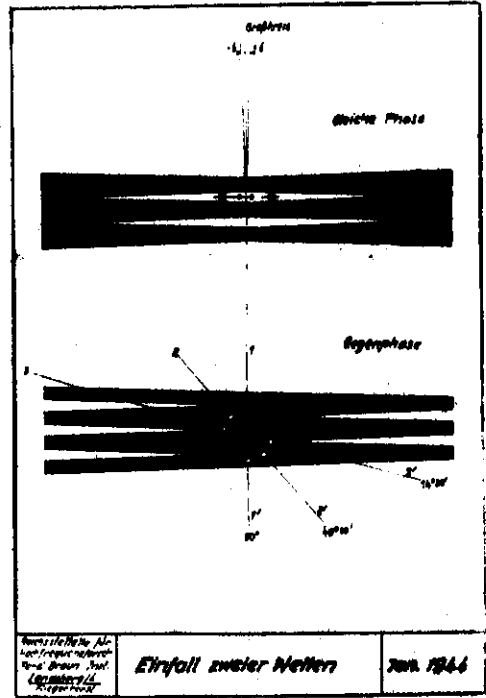


Abb. 2

zu S. 14

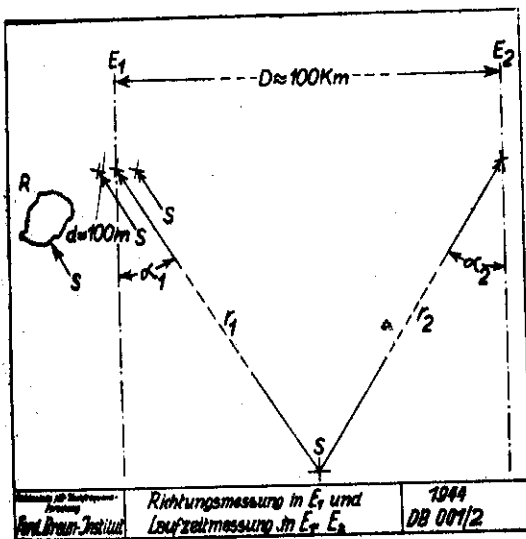


Abb. 4

zu S. 18

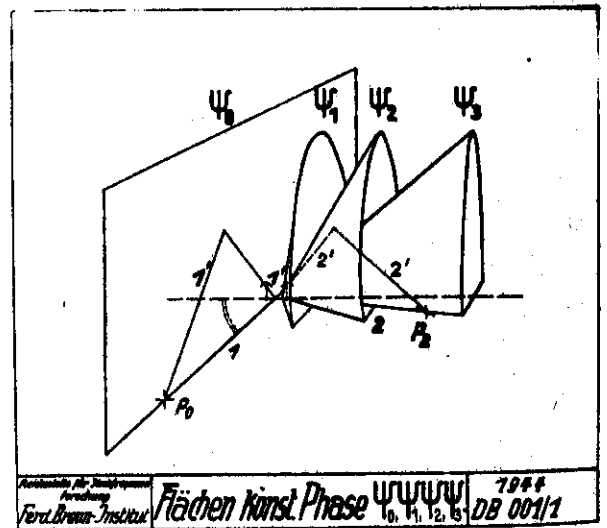


Abb. 3

zu S. 15