

Paper-ID: VGI_195211



Die physikalischen Grundlagen der elektrischen Entfernungsmessung

Friedrich Benz

Österreichische Zeitschrift für Vermessungswesen **40** (3, 4), S. 67–71, 102–108

1952

Bib_TE_X:

```
@ARTICLE{Benz_VGI_195211,  
  Title = {Die physikalischen Grundlagen der elektrischen Entfernungsmessung},  
  Author = {Benz, Friedrich},  
  Journal = {{{\0}sterreichische Zeitschrift f{{\"u}r Vermessungswesen}},  
  Pages = {67--71, 102--108},  
  Number = {3, 4},  
  Year = {1952},  
  Volume = {40}  
}
```



war es dort vergönnt, dem greisen Gelehrten in schwerster Zeit, Verwirrung und Not einen fast sorgenlosen und glücklichen Lebensabend zu bereiten. Dafür danken wir deutsche Geodäten ihnen allen von Herzen.

Ausführliche Würdigungen der Persönlichkeit und der Lebensarbeit Finsterwalders enthalten folgende Schriften:

Clauß, Sebastian Finsterwalder als Geodät. Zeitschrift für Vermessungswesen 1932, S. 722—726.

Gruber, O. v.: „Sebastian Finsterwalders Anteil an der Entwicklung der Photogrammetrie“, S. 9—16.

in „Sebastian Finsterwalder zum 75. Geburtstag“, Festschrift der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Verlag Herbert Wichmann, Berlin 1937.

Kneißl, M.: „Sebastian Finsterwalder zum 80. Geburtstag“, Bildmessung und Luftbildwesen 1942, S. 53—54, mit einem vollständigen Schriftenverzeichnis.

Sauer, R.: „Sebastian Finsterwalder“, Nachrichten der Österr. Mathematiker-Vereinigung S. 30—32.

M. Kneißl

Die physikalischen Grundlagen der elektrischen Entfernungsmessung

Von Friedrich Benz

(Veröffentlichung der Österr. Kommission für die Internationale Erdmessung)

Zweck der vorliegenden Arbeit ist es, die physikalischen Grundlagen der heute üblichen sowie weiteren möglichen Methoden der elektrischen Entfernungsmessung aufzuzeigen und zu untersuchen, unter welchen Voraussetzungen eine genügende Genauigkeit der Meßverfahren erhalten werden kann.

1. Die Ausbreitung der elektromagnetischen Wellen

Die elektromagnetischen Wellen umfassen die elektrischen Wellen, die Wärmestrahlen, die Lichtwellen, die ultravioletten Strahlen und das Gebiet der Röntgen- und Gammastrahlen. Die stärkere Absorption der kürzeren dieser Wellen lassen diese für die Zwecke der Entfernungsmessung nicht geeignet erscheinen. Die Wärmestrahlen hingegen scheiden wegen der geringen Empfindlichkeit der für sie geeigneten Empfangsgeräte aus. Für die Entfernungsmessung eignet sich daher nur die elektrische und die Lichtwelle.

Grundsätzlich zeigen die elektromagnetischen Wellen geradlinige Ausbreitungsrichtung. Die von einem Sender abgestrahlte Welle ist überdies polarisiert. Stets liegen Fortpflanzungsrichtung, Richtung des von der Wellenenergie erzeugten elektrischen Feldes und die des magnetischen Feldes zu einander senkrecht.

Die elektrischen Wellen werden ebenso wie die Lichtwellen reflektiert, gebrochen und auch gebeugt.

Elektrische Wellen werden in erster Linie durch Leiter reflektiert. Bei Metallen hohen spezifischen Leitwertes erfolgt die Reflexion praktisch verlustlos. Neben der metallischen Reflexion tritt bei sehr kurzen elektrischen Wellen auch eine solche durch Isolatoren auf, wenn deren Dielektrizitätskonstante sich stark von der des

zur Ausbreitung benutzten Mediums unterscheidet (sogenannte dielektrische Reflexion). Bei schlechten Leitern wird ebenfalls eine Reflexion erhalten, der Anteil der reflektierten Welle ist jedoch gegenüber dem der Absorption gering, er steigt jedoch mit zunehmender Frequenz an. Deshalb treten insbesondere bei kürzeren Wellen auch beträchtliche Reflexionen durch den Erdboden auf, aber auch durch Bäume, Schornsteine, Türme und Mauern.

Vor allem erfahren längere elektrische Wellen eine starke Beugung längs der Erdoberfläche. Die Beugungserscheinungen nehmen mit zunehmender Frequenz ab. Bei Zentimeterwellen ist der Einfluß der Beugung für die im Freien sich ausbreitende Welle ebenso wie bei der Lichtwelle zu vernachlässigen.

Nicht zu vernachlässigen ist hingegen der Einfluß der Brechung (Refraktion) auf die Ausbreitung der genannten elektromagnetischen Wellen. Die elektrischen Zentimeterwellen werden ähnlich wie die Lichtwellen in der Atmosphäre infolge Druck- und Temperaturänderung gebrochen. Mit guter Annäherung kann die Wellenbahn als eine Kreisbahn angesehen werden. Während für den Krümmungsradius für die Bahn der Lichtwellen auf Grund zahlreicher Messungen für die horizontal abgestrahlte Welle ca. das $1/0,13$ -fache der Erdkrümmung erhalten wird¹⁾, bereitet die Messung der Beugung der elektrischen Welle in der Atmosphäre infolge der geringeren Bündelfähigkeit wesentlich größere Schwierigkeiten und wurde bisher nur bei Zentimeterwellen mit genügender Genauigkeit durchgeführt. S h a r p l e s s²⁾ fand für den Krümmungsradius einer 3 cm -Welle den vierfachen Wert der Erdkrümmung.

Längere elektrische Wellen erfahren in den höheren Schichten der Atmosphäre eine solche Brechung, daß sie wieder zur Erde rückgeführt werden. Der Umkehrpunkt dieser Wellen liegt in einer leitenden Schicht der Atmosphäre, die als Ionosphäre oder Heavisideschicht bezeichnet wird. Die Wirkung dieser Schicht kommt dann der eines reflektierenden Leiters gleich. Die kürzesten Wellen, bei denen solche Reflexionen noch festgestellt wurden, liegen bei etwa 5 m . Zur Ausbreitung der längeren Wellen vom Sender zum Empfangsort dienen demnach zwei Wege, der direkte, längs des Erdbodens verlaufende und der einer in den Raum hinausgestrahlten Welle, die über eine ein- oder mehrmalige Reflexion wieder zur Erde zurückgelangt. Demnach wird zwischen Boden- und Raumwelle unterschieden. Eine Zusammenwirkung dieser Wellen führt infolge der verschiedenen Ausbreitungswege zu oft sehr unerwünschten Interferenzen, die sich z. B. beim Rundfunk als Schwund oder Fading bemerkbar machen. Solche Wellen, deren Ausbreitungswege nicht eindeutig festliegen, eignen sich aber für elektrische Entfernungsmeßverfahren naturgemäß nicht. Es scheiden deshalb die längeren elektrischen Wellen aus und es kommen daher nur die extrem kurzen elektrischen Wellen hierfür in Frage.

Die Dämpfung der sich im Raum ausbreitenden elektrischen Welle ist sehr gering. Auch Regen und Nebel verursachen noch bei Zentimeterwellen meist unbedeutende Schwächungen. Die Dämpfung der elektrischen Welle durch das als kugelförmig angenommene Wassertröpfchen ist von M i e³⁾ berechnet worden. Ähnliche Ergebnisse wurden in neuerer Zeit auch durch Messungen erhalten. So finden E s a u und B ä z⁴⁾ für eine Wellenlänge von 5 cm eine Dämpfung von $0,0049\text{ Np/km}$ und bei $0,5\text{ cm}$ eine solche von $0,5\text{ Np/km}$. Die Dämpfung nimmt

innerhalb eines gewissen Bereiches annähernd mit dem reziproken Wert des Quadrates der Wellenlänge zu.

Aus den angeführten Gründen kommen aus dem großen Frequenzgebiet der elektrischen Wellen nur die extrem kurzen Wellen (Zentimeterwellen) in Frage. Dies auch deshalb, weil die Möglichkeit elektrische Wellen zu bündeln eine umso bessere wird, je kürzer die Welle wird. Während, um die gleiche Bündelwirkung bei einer bestimmten Wellenlänge zu erzielen, eine bestimmte Größe der Antennenfläche erforderlich ist, läßt sich diese proportional mit abnehmender Wellenlänge verkleinern. So erreicht man z. B. bei einer Wellenlänge von 3 *cm* mit einem Parabolspiegel oder mit einem Trichterstrahler von 1,5 *m* Durchmesser, bzw. Seitenlänge eine Bündelung von etwa 10^5), wenn unter Bündelung jener Winkel verstanden wird, innerhalb dessen die Leistungsdichte der Welle auf die Hälfte der maximalen (in der Mitte) absinkt.

2. Entfernungsmessung durch Laufzeitmessung

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit der elektrischen Welle im leeren Raume ist auf Grund zahlreicher Messungen genau bestimmt worden. Sie gleicht der des Lichtes und wird mit 299,793 *km/s* angegeben⁶⁾. In Luft bei einem Barometerstand von 760 *mm* und einer Temperatur von 18° C verringert sich die Ausbreitungsgeschwindigkeit auf rund 299,688 *km/s*. Messungen haben ergeben, daß die elektrische Zentimeterwelle dieselbe Ausbreitungsgeschwindigkeit über See wie über Land aufweist⁷⁾. Bei Messungen in größeren Höhen ergibt sich entsprechend der Luftdruckverminderung eine Zunahme der Ausbreitungsgeschwindigkeit⁸⁾, deren Größe leicht berechnet werden kann.

Aus der bekannten Ausbreitungsgeschwindigkeit läßt sich dann die Entfernungsmessung auf eine Laufzeitmessung zurückführen. Von einem Sender wird ein kurzer Impuls erzeugt und die Zeit gemessen, bis der vom Ziel reflektierte Impuls wieder an die Aussendestelle zurückgekehrt ist. Die *Entfernungsmessung* wird damit auf eine *Zeitmessung* zurückgeführt. Hiefür stehen genügend genaue Zeitnormale zur Verfügung. Die Reflexion selbst erfolgt ohne jegliche Zeitverzögerung, wenn es sich um eine metallische Reflexion handelt.

Die Laufzeitmessung selbst kann auf verschiedene Arten vorgenommen werden. Es besteht insbesondere auch die Möglichkeit, die Laufzeit als Streckenlänge oder Entfernung zweier Lichtpunkte auf einer Kathodenstrahlröhre darzustellen. Der Kathodenstrahl wird mit gleichbleibender geradliniger oder kreisförmiger Bewegung auf den Leuchtschirm dieser Röhre geführt. Ein Leuchtpunkt oder ein zackenförmiges Zeichen erscheint bei Aussendung und eines bei Wiederauftreffen des Impulses. Eine größere Genauigkeit erhält man bei der Kreisbahn, da die Umlaufgeschwindigkeit so gewählt werden kann, daß der reflektierte Impuls erst nach mehreren Umläufen auftritt.

3. Reflexion und stehende Welle

Die Laufzeitmessungen ergeben indes nur geringe Genauigkeiten, da sich die kürzesten, heute herstellbaren Impulse immerhin über mehrere Zehntel Mikrosekunden erstrecken. Da eine solche Impulsdauer einer Weglänge von mehr als

10 m entspricht, würden sich auch dann, wenn man versucht, den Impulsen eine zackenähnliche Form zu geben, doch kaum größere Genauigkeiten als solche in der Größe von wenigen Metern erzielen.

Deshalb wird für genaue Entfernungsmessungen mit sinusförmigen kontinuierlichen Wellen oder sinusförmig modulierten Wellen gearbeitet. Die vom Sender abgestrahlte Welle trifft auf den Reflektor und wird von diesem unter anderem auch wieder in der gleichen Richtung zurückgeführt. Durch Überlagerung der fortschreitenden und der reflektierten Welle entsteht eine sogenannte stehende Welle. Wie man sich durch Betrachtung der Abb. 1 leicht überzeugen kann, ergeben die beiden in entgegengesetzter Richtung fortschreitenden Wellen immer an den gleichen Stellen Schwingungsknoten, während in der Mitte stets Schwingungsmaxima auftreten, deren Größe im Rhythmus der Schwingungsfrequenz zu- und abnehmen.

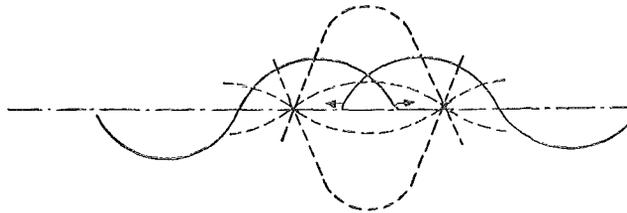


Abb. 1: Stehende Welle

Die Schärfe der Knoten ist allerdings nur dann groß, wenn fortschreitende und reflektierte Welle die gleiche Amplitude aufweisen, bei größerem Amplitudenunterschied wird sie aber immer geringer. Scharfe Knoten erhält man daher nur in geringer Entfernung vom Reflektor und bei scharf gebündelten Wellen.

4. Phasenvergleich zwischen ausgestrahlter und reflektierter Welle

Statt wie oben angegeben, das Auftreten der Knoten an jenen Stellen zu suchen, an denen fortschreitende und reflektierte Welle gerade gleich groß, aber entgegengesetzt gerichtet ist, läßt sich einfacher ein Vergleich der Phasenverschiebungen der Wellen vornehmen. Unter der Phasenverschiebung zweier Wechselspannungen versteht man den zeitlichen Unterschied des Erreichens der Höchstwerte der Amplituden zweier Schwingungen. Statt diesen in Zeiteinheiten anzugeben, erscheint es jedoch zweckmäßig, ihn durch Winkelgrade darzustellen, wobei einer vollen Periode, also der für das Wiederkehren des gleichen Schwingungszustandes erforderlichen Zeit ein Winkel von 360° entspricht. Hat beispielsweise die eine Schwingung gerade ihren Höchstwert und die andere den Wert Null (Nulldurchgang der Sinuskurve), so liegt eine Phasenverschiebung von 90° vor. Natürlich werden nur Phasenverschiebungen kleiner als 360° gemessen.

Auch zwischen der vom Sender ausgesendeten Welle*) und der wieder dort anlangenden reflektierten Welle wird im allgemeinen eine solche Phasenverschiebung vorliegen. Wäre die Entfernung z. B. gleich einer halben Wellenlänge, so

*) Die Wellenlänge ergibt sich aus der bekannten Beziehung: Fortpflanzungsgeschwindigkeit ist gleich Frequenz mal Wellenlänge.

würde die reflektierte Welle mit einer Phasenverschiebung von 180° gegenüber der ausgesendeten ankommen, dies deshalb, weil der Weg einer vollen Wellenlänge zurückgelegt werden muß (was einer Phasenverschiebung von 360° , also 0° entspricht) und weil bei der Reflexion eine Phasenverschiebung von 180° zustandekommt.

Zur Entfernungsmessung genügt daher auch eine Messung der Phasenverschiebung zwischen ausgesendeter und reflektierter Welle, vorausgesetzt, daß die Entfernung wenigstens auf eine halbe Wellenlänge genau bekannt ist.

Bei einer Wellenlänge von beispielsweise 200 m ließe sich, wenn man annimmt, daß die Phasenwinkelmessung mit einer Genauigkeit von etwa $\frac{1}{3}^\circ$ durchgeführt werden könnte, gerade noch eine Strecke von rund 10 cm messen, also eine Entfernung von 100 m auf 10 cm . Ist die Entfernung größer als 100 m , so bleibt die Genauigkeit, doch müßte die Strecke wenigstens bezüglich ihrer 100 m -Werte bekannt sein. Diese könnten aber durch Verwendung einer entsprechend längeren Wellenlänge ebenfalls gemessen werden. Ebenso lassen sich noch kleinere Entfernungen durch Wahl noch kleinerer Wellenlängen bestimmen. Die Meßgenauigkeit steigt dadurch entsprechend. Sie ist lediglich begrenzt durch die Genauigkeit der Kenntnis der Fortpflanzungsgeschwindigkeit und durch die Genauigkeit der Frequenz.

(Fortsetzung folgt)

Zur Reduktion schiefgemessener Teilstrecken

Von Josef E b e r w e i n, Wien

(Veröffentlichung des Bundesamtes für Eich- und Vermessungswesen)

Bei der Durchführung von Streckenmessungen hat trotz der Einführung der Wildschen Basislatte und trotz der Streckenmessung nach dem Zeiß-Boßhardt-Verfahren die Meßbandmessung immer noch eine grundlegende Bedeutung behalten. Über einige Schwächen der Meßbandmessung und ihre Abhilfe hat Herr Dipl.-Ing. Mitter eine ausführliche und sehr fruchtbare Abhandlung gebracht, die in einem der nächsten Hefte dieser Zeitschrift erscheinen wird.

Die im genannten Artikel allein empfohlene Methode der schräggemessenen Seiten mit nivellierten Höhenunterschieden oder Stichmaßen stellt die folgende Aufgabe:

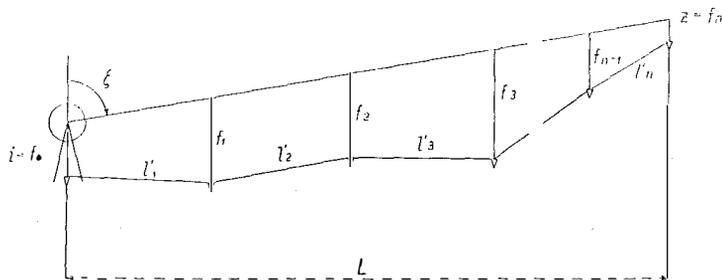


Fig. 1

Betrachtet man nun die einzelnen Fehlereinflüsse für sich getrennt für die Strecke L , so nehmen die einzelnen Glieder die folgenden Werte an:

1. $\pm m_t = \pm m_{\Delta t} \alpha l_B \sqrt{n}$
2. $\pm m_p = \pm m_{\Delta P} \frac{1}{E q} l_B \sqrt{n}$
3. $\pm m_d = \pm k \frac{m_{\Delta P}}{P} 2 l_B^3 \sqrt{n}$, k aus (7 a)
4. Der Ablesefehler: $\pm m_a \sqrt{n}$

(Fortsetzung folgt)

Die physikalischen Grundlagen der elektrischen Entfernungsmessung

Von Friedrich B e n z

(Veröffentlichung der Österr. Kommission für die Internationale Erdmessung)

(Schluß)

5. Modulation der elektrischen Welle

Nach dem oben Gesagten bestimmt sich die zur Messung geeignete Welle aus den gewünschten Genauigkeitswerten. In der Regel handelt es sich daher, da meist Genauigkeiten von Zentimeter- oder Meterwerten erhalten werden sollen, um Wellenlängen von mehr als 10 m Länge. Andererseits wurde aber weiter oben gezeigt, daß sich nach dem heutigen Stand der Hochfrequenztechnik nur Zentimeterwellen eignen.

Diese Schwierigkeit wird umgangen, wenn man Zentimeterwellen zur Übertragung verwendet, aber diese durch die gewünschten Meterwellen moduliert.

Hiefür eignet sich vor allem die Amplitudenmodulation. Bei ihr wird die Zentimeterwelle, die nun auch Trägerwelle genannt wird, mit der gewünschten Meterwelle, z. B. 40 m oder 7,5 Megahertz (= 7,500.000 Hertz, 1 Hertz ist eine Schwingung — Periode — pro Sekunde) bezüglich ihrer Amplitude geändert. Die Amplitude wird also 7,500.000mal in der Sekunde auf einen positiven und ebensooft auf einen negativen Höchstwert gebracht. Die Ausbreitungsgesetze sind für die modulierte Zentimeterwelle genau die gleichen wie für die gewöhnlich unmodulierte. Abb. 2 zeigt den Verlauf einer amplitudenmodulierten Schwingung.

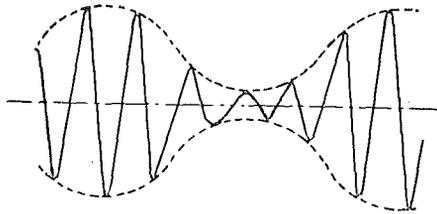


Abb. 2: Amplitudenmodulierte Schwingung

Verglichen wird aber an der Sendestelle die Phasenlage der Modulation der ausgesendeten Welle mit der der reflektierten. Zu diesem Zweck ist es lediglich erforderlich, die Modulation der ausgesendeten Welle und die der eintreffenden reflektierten abzuzweigen und deren gegenseitige Phasenverschiebung zu messen.

Die Erzeugung amplitudenmodulierter Schwingungen bereitet keine grundsätzlichen Schwierigkeiten. Man bedient sich dazu einfacher Röhrensaltungen. Eine Röhre erhält sowohl die Trägerspannung als auch die Modulationsspannung. Die Modulationsspannung wird derart angeschlossen, daß sie die verstärkende Wirkung der Röhre beeinflußt. Hat daher die Modulationsspannung z. B. gerade den positiven Höchstwert, so tritt eine hohe Verstärkung auf und man erhält also eine große Hochfrequenzspannung am Ausgang der Röhre. Ist aber umgekehrt gerade das negative Maximum der Modulationsspannung erreicht, so wird die Verstärkung sehr klein und man erhält am Ausgang der Verstärkerröhre eine besonders kleine Hochfrequenzspannung. Die Ausgangsspannung wechselt somit im Rhythmus der Modulation ihre Größe, ist also moduliert.

Im Empfänger muß nun wieder die Modulation vom Träger getrennt werden. Dies gelingt in einfachster Weise, wenn der empfangene modulierte Hochfrequenzstrom, der ebenfalls den in Abb. 2 gezeichneten Verlauf aufweist, durch einen Gleichrichter geschickt wird. Dieser läßt immer nur Ströme in einer Richtung hindurch. Man erhält also beispielsweise nur den oberhalb der Abszisse verlaufenden Kurvenzug, somit also einen Gleichstrom, dessen Größe im Rhythmus der Modulation schwankt. Man trennt den Wechselstrom von dem Gleichstrom mittels eines Transformators, an dessen Sekundärseite man nur mehr die Wechselspannung erhält. Es läßt sich nun die Phasenlage der zur Modulation des Trägers verwendeten Wechselspannung mit der im Empfänger nach der „Demodulation“ erhaltenen vergleichen.

Bei langen Wellen bereitet die Durchführung dieser Modulation keinerlei Schwierigkeiten. Bei kurzen und insbesondere Zentimeterwellen sind jedoch erst in der letzten Zeit brauchbare Verfahren zur Durchführung der Amplitudenmodulation gemacht worden ⁹⁾.

Bei sehr kurzwelligen Trägern wird daher vielfach der *Frequenzmodulation* ¹⁰⁾ der Vorzug gegeben. Bei ihr wird, wie Abb. 3 zeigt, statt der Amplitude die Frequenz im Rhythmus der Modulationsfrequenz geändert. Die Amplitude des Trägers bleibt dabei konstant. Eine Verdichtung der Schwingungsfolge, also Erhöhung der Frequenz, kommt z. B. dann zustande, wenn gerade die Amplitude der Modulation groß und positiv ist, eine Verringerung der Frequenz, wenn die Modulationsamplitude negative Werte annimmt.

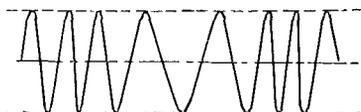


Abb. 3: Frequenzmodulierte Schwingung

Die Durchführung der Modulation erfolgt in der Weise, daß durch die Modulationsschwingung frequenzbestimmende Glieder des Senders beeinflußt

werden. Umgekehrt wird bei der Demodulation die modulierte Schwingung über einen Schwingkreis geführt, der je nach der augenblicklichen Frequenz der modulierten Schwingung eine mehr oder weniger große positive oder negative Spannung an einem Gleichrichter erzeugt. Wieder kann die am Ausgang des Empfängers erhaltene Modulationsschwingung mit der dem Sender zur Modulation zugeführten verglichen werden.

Neben dem Vorteil der leichteren Erzeugung bei sehr kurzen Wellen hat die Modulation noch die erstrebenswerte Eigenschaft geringerer Störanfälligkeit aufzuweisen.

6. Die Modulation des Lichtes

Soll als Träger eine Lichtwelle verwendet werden, so muß auch diese moduliert werden. Es kommt dabei, da es sich fast stets um die Übertragung verhältnismäßig breitbandiger Frequenzspektren handelt, stets nur eine Amplitudenmodulation und keine Frequenzmodulation in Frage. Die Intensität der ausgestrahlten Lichtwelle wird also im Rhythmus der Modulationsfrequenz geändert.

Zur Amplitudenmodulation des Lichtes eignet sich, da es sich um Modulationsfrequenzen von mehreren Megahertz handelt (s. 5), derzeit nur die Kerrzelle. Ihre Wirkungsweise beruht auf dem *Kerreffekt*¹¹⁾. Isolierende Flüssigkeiten zeigen danach in einem homogenen elektrischen Feld die Eigenschaft, eine Doppelbrechung zu erzeugen. Wenn vor und hinter einer solchen Kerrzelle je ein Nicolsches Prisma angeordnet ist, so daß der einfallende Lichtstrahl unter 45° gegen die Richtung des elektrischen Feldes der Kerrzelle polarisiert wird und das hinter der Kerrzelle liegende Nicolsche Prisma zu dem davor befindlichen eine lotrecht gelegene Polarisationsrichtung aufweist, so wird, solange die Kerrzelle keine Spannung führt, das Licht vollkommen ausgelöscht (s. Abb. 4). Durch das Auftreten einer Doppelbrechung, bzw. Drehen der Polarisationsebene bei Auftreten elektrischer Spannungen an der Kerrzelle wird ein mit zunehmender Spannung ansteigender Lichtanteil hindurchgelassen. Als Doppelbrechungsflüssigkeit wird reines Nitrobenzol verwendet. Die Kerrzelle wurde erstmalig von K a r o l u s in der beschriebenen Form zur Lichtmodulation in der Bildtelegraphie verwendet¹²⁾. Die K a r o l u s - Zelle arbeitet bis zu Modulationsfrequenzen von etwa 10 MHz praktisch trägheitslos.

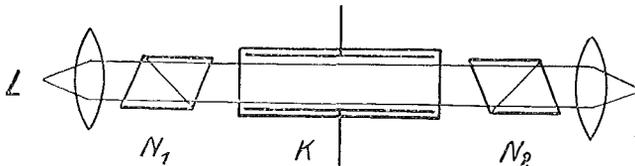


Abb. 4: Kerrzelle. L = Lichtquelle, N_1 = erstes Nicolsches Prisma, K = Kerrzelle, N_2 = zweites Nicolsches Prisma

Das mit Hilfe der Kerrzelle amplitudenmodulierte Licht wird gebündelt und zum Zielpunkt gestrahlt. Dort wird es reflektiert und gelangt wieder zum Ausgangspunkt zurück. Hier wird es mit Hilfe einer Photozelle demoduliert. Bei ihr wird der Photoeffekt ausgenutzt. Dies ist die Erscheinung, daß manche Körper

wie Leiter, aber auch Isolatoren eine an ihnen etwa vorhandene negative Ladung durch Elektronenemission verlieren (Hallwachs-Effekt)¹³⁾. Die moderne Photozelle besteht aus einer Kathode und einer Anode in einem evakuierten Glasgefäß. Die Kathode besteht aus einer im Innern des Glaskolbens aufgedampften dünnen Metallschicht, meist Cäsium und Verbindungen, die bei Auftreffen von Licht einen Elektronenstrom der ihr gegenüber positiv geladenen Anode abgibt. Ist der Lichtstrom amplitudenmoduliert, so entstehen Stromschwankungen, die über einen Widerstand geführt werden, dessen so entstehenden Spannungsschwankungen einem Verstärker zugeführt werden. Am Ausgang des Verstärkers erhält man so wieder die reine Modulationsspannung, die in ihrer Phasenlage wieder mit der dem Licht aufgedruckten verglichen wird. Die Photozelle arbeitet praktisch vollkommen trägheitslos. Es können in ihr noch mit mehreren hundert Megahertz modulierte Lichtwellen demoduliert werden.

7. Messung des Phasenwinkels

Der elektrischen Entfernungsmessung liegt, wie bereits oben ausgeführt (s. 4), die Untersuchung des Phasenwinkels zwischen der ausgesendeten und ankommenden Welle, bzw. deren Modulation zu Grunde. Hiezu sind zahlreiche Verfahren entwickelt worden. Die meisten gestatten eine Genauigkeit der Phasenwinkelmessung von etwa 1° oder mehr zu erreichen. Am häufigsten wird die Phasenverschiebung in der Weise gemessen, daß die eine der beiden Wechselspannungen mit Hilfe eines Phasenschiebers, d. i. ein Gerät, das künstliche Phasenverschiebungen zu erzeugen gestattet, auf die gleiche Phasenlage wie die andere gebracht wird. Werden nun die beiden Spannungen gleich groß gemacht und gegeneinandergeschaltet, so muß die Summenspannung gleich Null werden. Diese Meßmethode ist, da sie eine Minimumsmethode ist, meist die genaueste Methode. Der veränderbare Phasenschieber ist geeicht und es kann an ihm die zur Phasenkompensation erforderliche Einstellung unmittelbar abgelesen werden. Der Zusammenhang zwischen diesem Phasenwinkel und der gesuchten Entfernung ergibt sich aus der bekannten Modulationsfrequenz und der Fortpflanzungsgeschwindigkeit der elektrischen Welle. Ist — wie üblich — die Wellenlänge der Modulation klein gegen die Entfernung, so wird, wie bereits erwähnt, nicht die gesamte Entfernung gemessen, sondern nur der Unterschied, den diese gegenüber einem ganzzahligen Vielfachen der Wellenlänge beträgt. Es ist dann das Verhältnis dieser Strecke zur Wellenlänge gleich dem Verhältnis des gemessenen Phasenwinkels zu 180° . Um die Zahl der zwischen Sender und Ziel liegenden Wellenlängen ebenfalls zu bestimmen, ist es zweckmäßig, weitere Entfernungsmessungen mit anderen geringeren Modulationsfrequenzen vorzunehmen.

8. Messung durch Frequenzänderung

Durch die Verwendung eines Phasenschiebers zur Phasenwinkeländerung wird, wie erwähnt, erreicht, daß Phasengleichheit zwischen der dem Sender zugeführten Modulationsspannung und der aus dem Empfänger wieder rückgewonnenen auftritt. Das Gleiche kann aber auch erreicht werden, wenn die Modulationsfrequenz des Senders um einen geringen Betrag geändert wird. Denn durch die

Änderung der Modulationsfrequenz ändert sich die Wellenlänge der Modulation und es kann durch geeignete Einstellung derselben erreicht werden, daß ausgestrahlte und reflektierte Welle gleichzeitig ihre Wellenberge und Wellentäler haben, die Modulation also wieder in Phase ist. Man erhält dann bei Gegenschaltung der beiden gleich groß gemachten Modulationsspannungen wieder ein Minimum am Indikator, wie bei der Phasenkompensation. Es wird der Zusammenhang zwischen dem Entfernungsunterschied über eine Wellenlänge der Modulation und der Frequenzänderung durch eine Eichkurve festgehalten, so daß in gleicher Weise wie bei der Phasenkompensationsmethode aus der Eichung die Entfernung abgelesen werden kann, sofern sie wenigstens auf eine Wellenlänge genau bekannt ist. Durch Wiederholung des Verfahrens mit größeren Modulationswellenlängen kann jede Unsicherheit nötigenfalls behoben werden. Nach diesem Prinzip arbeitet beispielsweise das von Bergstrand entwickelte Gerät ¹⁴⁾.

9. Die Stabilität der Schwingungserzeugung

Voraussetzung für eine einwandfreie Arbeitsweise des Gerätes ist, abgesehen von der genauen Kenntnis der Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Welle, auch die genaue Festlegung und Konstanthaltung der Wellenlänge der Modulation. Dies wird erreicht durch Verwendung von Quarzoszillatoren. Das Kernstück eines solchen Oszillators ist ein aus einem natürlichen Quarzkristall in bestimmter Richtung ausgeschnittenes quaderförmiges Plättchen. Infolge des Piezoeffektes ¹⁵⁾ und des umgekehrten Piezoeffektes sowie der mechanischen Eigenschwingung des Quarzes treten bestimmte Resonanzerscheinungen zwischen einer an ein solches Plättchen angelegten Hochfrequenzspannung und der mechanischen Eigenschwingung auf ¹⁶⁾. Dadurch wird das Quarzplättchen zu einem elektrischen Schwingkreis, der, verglichen mit den gewöhnlichen Schwingkreisen aus Kapazität und Induktivität, eine wesentlich größere Resonanzschärfe aufweist. Zudem lassen sich die Quarzscheibchen in Schnittrichtungen ausschneiden, in denen ein außerordentlich niedriger Temperaturkoeffizient auftritt. Das Quarzscheibchen wird nun in einer Schwingungserzeugerschaltung mit Elektronenröhre als frequenzbestimmender Schwingkreis verwendet. Hiefür sind verschiedene Schaltungen angegeben worden ¹⁷⁾, insbesondere auch solche, bei denen ein möglichst geringer Einfluß der Betriebsspannungen und der Leistungsabgabe auf die erzeugte Eigenfrequenz auftritt. Der Quarz befindet sich überdies in der Regel in einem Thermostaten. Dadurch können überaus konstante Frequenzen erreicht werden. Es werden heute Toleranzen von weniger als 10^{-8} von ortsfesten und bis zu 10^{-7} von tragbaren Geräten erzielt. Ein Quarzoszillator erzeugt nur eine bestimmte feste Frequenz, die nur in ganz geringen Bereichen geändert werden kann.

Zur Erzeugung sehr konstanter hochfrequenter Schwingungen werden in neuerer Zeit auch die Absorptionsspektren von Gasen verwendet ¹⁸⁾. Man erreicht etwa die gleiche Genauigkeit wie mit dem Quarzoszillator. Auch der Stimmgabeloszillator läßt sich unter Verwendung von Oberwellen der Eigenschwingung der Stimmgabel zur frequenzkonstanten Hochfrequenzschwingungserzeugung verwenden, doch ist eine ziemlich große Temperaturabhängigkeit der Schwingungen nicht vermeidbar.

10. Vergleich der elektrischen Zentimeterwellen und Lichtwellen bezüglich ihrer Brauchbarkeit für Entfernungsmessung

Nach den obigen Ausführungen sind vor allem zwei grundsätzlich verschiedene Wege zur elektrischen Entfernungsmessung möglich, indem als Träger der Modulation entweder elektrische Zentimeterwellen oder Lichtwellen verwendet werden.

Die Zentimeterwellen haben gegenüber den Lichtwellen vor allem den Vorteil, daß bei ihnen die Durchführung der Modulation eine wesentlich einfachere ist. Es ist sowohl Amplituden- wie auch Frequenzmodulation möglich. Die elektrische Zentimeterwelle wird praktisch durch keine anderen Wellen gestört, während die Übertragung mit moduliertem Licht vor allem durch das Tageslicht stark beeinflusst wird. Weiter ist der Wirkungsgrad der Übertragung elektrischer Wellen größer, insbesondere die Empfänger haben wesentlich größere Empfindlichkeiten. Schließlich benötigt der Zentimeterwellensender nur verhältnismäßig sehr kleine Modulationsspannungen von wenigen Volt zur Erzielung einer sehr starken Modulation. Die Kerrzelle hingegen benötigt zur Modulation des Lichtes eine Wechselspannung von mehreren tausend Volt. Eine andere ähnlich trägheitslose Modulation des Lichtes ist bisher noch nicht bekannt.

Andererseits hat aber auch die Verwendung des Lichtes als Träger ganz bedeutende Vorteile. So ist es vor allem möglich, das Licht mit weit einfacheren Mitteln zu bündeln. Während zur Erzielung einer ausreichenden Bündelung der elektrischen Welle verhältnismäßig immer noch große Strahleroberflächen notwendig sind, genügen beim Licht kleine Öffnungsflächen zur Erzielung einer beliebig scharfen Bündelung. Weiter sind eben wegen der besseren Bündelmöglichkeit des Lichtes die Ausbreitungswege, insbesondere aber die Ausbreitungsgeschwindigkeiten bisher bereits genauer untersucht als die der elektrischen Zentimeterwellen.

Literaturverzeichnis:

- 1) s. z. B. Hartner-Doležal: Hand- und Lehrbuch der niederen Geodäsie, Wien 1931, oder M. Nábauer: Vermessungskunde.
- 2) W. M. Sharpless, Proc. I. R. E. 34, 837 (1946)
- 3) G. Mie, Ann. Phys. 25, 377 (1908).
- 4) A. Esau u. G. Bätz, Phys. Z. 38, 774 (1937).
- 5) A. P. King, Proc. I. R. E. 38, 249 (1950).
- 6) L. E. Essen u. A. Gordon-Smith, Proc. Phys. Soc. 194 A S. 348 (1948). — E. Bergstrand: Arkiv för Fysik, Bd. 3, S. 479 (1951).
- 7) F. E. Jones, Jour. I. E. E. III, 94, 399 (1947).
- 8) F. E. Jones, Jour. I. E. E. III, 96, 447 (1949).
- 9) M. Gutton u. J. Ortusi, Onde electr., Aug., Sept. 1947 u. Okt. 1948. — G. Cuccia u. L. S. Donald, Electronics, 26, H. 3, S. 80 (1950).
- 10) K. R. Sturley, Frequency modulation, 3. Aufl., London 1947. — P. Güttinger, Frequenzmodulation, Zürich 1947.
- 11) Kerr, Phil. Mag. 20 (1885).
- 12) F. Schröter, Handbuch der Bildtelegraphie und des Fernsehens, Berlin 1932.
- 13) Hallwachs, Wied. Ann. 33, S. 301 (1888).
- 14) E. Bergstrand, Arch. f. Math. Astron. och Fys. 29, 30 (1943).
- 15) J. u. P. Curie, C. R. Acad. Sci. Paris 91, 1137 (1880).

¹⁶⁾ W. G. C a d y, Proc. I. R. E. 10, 83 (1922); 16, 521 (1928), 18, 1247 (1930).

¹⁷⁾ G. W. P i e r c e, Proc. Amer. Ac. Arts and Sci. 59, 81 (1923). — A. M e a c h a m, Bell Syst. Tech. J. 17, 574 (1938).

¹⁸⁾ W. H e r s h b e r g e r u. L. E. N o r t o n, R. C. A. Rev. 9, 31 (1948).

Fehlertheoretische Untersuchungen der neueren Verfahren zur gegenseitigen Orientierung von Luftbildern

Von H. S c h m i d, Wien

(Schluß)

Auf Grund dieser **fehlertheoretischen Überlegungen** ist es dem Verfasser nun gelungen, drei der Kramesschen Gleichungen, nämlich die der Orientierungselemente ω , φ und bz so umzuformen, daß sie 1. optimale, d. h. die wahrscheinlichsten Werte ergeben, und 2. von der Größe des Widerspruchs w unabhängig sind. Die richtiggestellten Gleichungen lauten nun:

$$(7, 5) \quad \begin{aligned} d\omega &= \frac{1}{2} (d\omega^0 + d\omega^b) \\ d\varphi &= -\frac{1}{b} \cdot Y^0 d\omega^0 + \frac{1}{b} \cdot Y^b d\omega^b \\ dbz &= -Y^b \cdot d\omega^b \end{aligned}$$

Die Elemente $d\kappa$ und $db\gamma$ lassen sich nun entweder unabhängig vom graphischen Verfahren aus:

$$(7, 6) \quad \begin{aligned} d\kappa &= -\frac{1}{b} (p_1 - p_2) \text{ und} \\ db\gamma &= \text{das arithmetische Mittel aus allen 6 } \gamma\text{-Parallaxen} \\ &\text{nach Eindrehung der Orientierungskorrekturen } d\omega, d\varphi, \\ &d\kappa \text{ und } dbz \end{aligned}$$

oder besser aus den Gleichungen ⁴⁾

$$(7, 6a) \quad \begin{aligned} d\kappa &= \frac{Z^b}{b} d\omega^b - \frac{Z^0}{b} d\omega^0 - \left[\frac{3h^2 + 2a^2}{3bh} (d\omega^0 - d\omega^b) \right] \\ db\gamma &= Z^b d\omega^b - \left[\frac{2a^2 + 3h^2}{6h} (d\omega^0 - d\omega^b) \right] \end{aligned}$$

ermitteln. Die Gleichungen (7, 6a) liefern dieselben Werte wie das numerische Formalverfahren.

Für ebenes Gelände erhält man nun durch Einsetzen der analytischen Ausdrücke für Y^0 , Z^0 , Y^b , Z^b , $d\omega^0$, $d\omega^b$ folgende Bestimmungsgleichungen:

$$\begin{aligned} d\omega^0 &= -\frac{h}{2a^2} (2p_1 - p_3 - p_5) & d\omega^b &= -\frac{h}{2a^2} (2p_2 - p_4 - p_6) \\ d\omega &= -\frac{h}{4a^2} (2p_1 + 2p_2 - p_3 - p_4 - p_5 - p_6) \end{aligned}$$