

Zeitschrift: Schweizerische Zeitschrift für Vermessung, Kulturtechnik und Photogrammetrie = Revue technique suisse des mensurations, du génie rural et de la photogrammétrie

Herausgeber: Schweizerischer Verein für Vermessungswesen und Kulturtechnik = Société suisse de la mensuration et du génie rural

Band: 57 (1959)

Heft: 7

Artikel: Grundlagen der elektrooptischen und elektronischen Distanzmessung

Autor: Schmidheini, D.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-215240>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 16.05.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Schweizerische Zeitschrift für Vermessung, Kulturtechnik und Photogrammetrie

Revue technique Suisse des Mensurations, du Génie rural et de Photogrammétrie

Herausgeber: Schweiz. Verein für Vermessungs-
wesen und Kulturtechnik; Schweiz. Kulturingenieurverein;
Schweiz. Gesellschaft für Photogrammetrie

Editeur: Société suisse des Mensurations et Améliorations foncières; Société suisse des Ingénieurs du Génie rural; Société suisse de Photogrammétrie

Nr. 7 • LVII. Jahrgang

Erscheint monatlich

15. Juli 1959

Grundlagen der elektrooptischen und elektronischen Distanzmessung

Zusammengestellt nach einem am 24. April 1959
in der Schweiz. Gesellschaft für Photogrammetrie
gehaltenen Vortrag

von D. Schmidheini, dipl. Ing., Heerbrugg

Nachdem kürzlich Herr Ing. H. Matthias in der Schweiz. Zeitschrift für Vermessung, Kulturtechnik und Photogrammetrie (S. 33–52 und S. 79–90/1959) einen allgemeinen Überblick über die auf dem Markte befindlichen elektronischen und elektrooptischen Entfernungsmesser gegeben hat, sollen hier einzelne Probleme erläutert werden, die mit dem Bau solcher Geräte zusammenhängen und deren Kenntnis dem Benutzer von Nutzen sein können, ohne jedoch Äußerungen über Vor- und Nachteile bestehender Geräte zu tun.

Grundsätzlich unterscheiden wir zwischen elektrooptischen und rein elektronischen Geräten. Beide Typen beruhen auf den gleichen physikalischen Prinzipien, doch sind die technischen Lösungen verschieden.

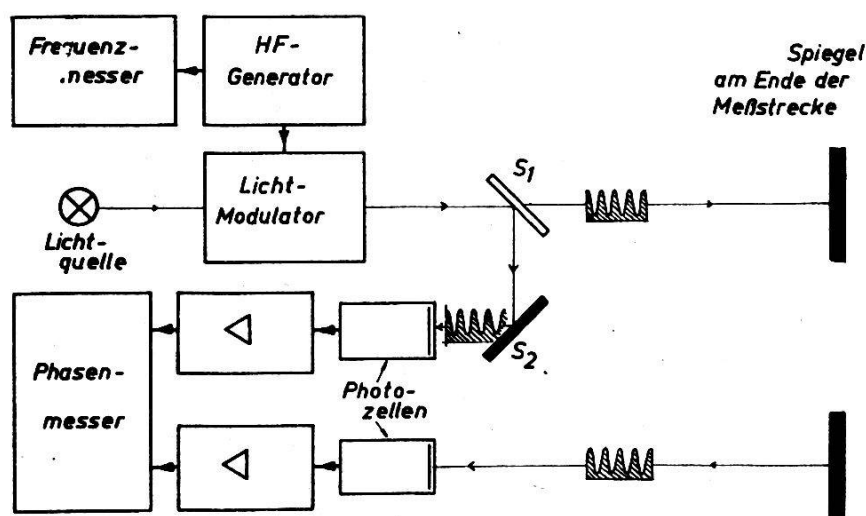


Bild 1

Jedes elektrooptische Gerät (*Bild 1*) setzt sich grundsätzlich aus folgenden Teilen zusammen: Lichtquelle, Lichtmodulator mit HF-Generator, Sendeoptik, Spiegel am andern Ende der Meßstrecke, Empfangsoptik, Photozelle, Verstärker und Meßteil.

Das Wesen der Distanzmessung beruht darauf, daß die Zeit ermittelt wird, die das Licht oder die Radiowelle braucht, um die gesuchte Strecke zurückzulegen.

Bekanntlich ist die Fortpflanzungsgeschwindigkeit von Licht so groß, daß man nicht einfach einen Blitz auslösen und mit der Stoppuhr am andern Ende der Meßstrecke das Eintreffen registrieren kann. Denn um 1 m zurückzulegen, braucht das Licht etwa 3 milliardstel Sekunden, und 1 m ist für den Geodäten in den meisten Fällen keine genügende Genauigkeit. Trotzdem weisen alle heute verwendeten Verfahren Ähnlichkeiten mit diesem «Blitz»-Gerät auf; sie verwenden jedoch verfeinerte technische Hilfsmittel. Die Erzeugung der Lichtblitze geschieht in einem Lichtmodulator, in dem das von der Lichtquelle erzeugte Gleichlicht moduliert wird, so daß sich die Intensität des ausgesandten Lichtes im Takte der Modulationsfrequenz periodisch ändert. Wir erhalten so ein kontinuierliches Lichtsignal, welches in der Sekunde zum Beispiel 1 bis 10 Millionen mal hell und dunkel wird oder – mit andern Worten – mit einer Frequenz von 1 bis 10 MHz amplitudenmoduliert ist. Der Verlauf dieser Helligkeitsveränderung kann sinusförmig sein. Damit erhält der Träger, welcher sich mit Lichtgeschwindigkeit fortpflanzt, eine Information, die einer Zeitskala entspricht, weil in jeder zehnmillionstel Sekunde ein Lichtwechsel geschieht. Setzen wir die Lichtgeschwindigkeit als bekannt voraus, dann beträgt der örtliche Abstand eines Signalkpunktes zum entsprechenden Punkt des Nachbarsignales: Lichtgeschwindigkeit im betreffenden Medium dividiert durch die Frequenz, also in unserem Beispiel 30 m. Dieses Intervall nennt man Wellenlänge. Lassen wir diesen so geteilten Träger an einem Spiegel reflektieren und empfangen ihn wieder optisch auf einer Photozelle, dann erhalten wir von dieser ein elektrisches Signal, welches genau dieselbe Information enthält wie das Licht. Vergleichen wir jedoch in einem bestimmten Zeitmoment die momentane Lage einer abgehenden Information mit derjenigen der zurückkommenden, dann stellen wir einen Unterschied fest, dessen Ursache in der Laufzeit liegt. Diesen Unterschied nennen wir Phasenverschiebung und können ihn in Wellenlängen oder, wie dies üblich ist, in Winkelgraden ausdrücken, wobei eine ganze Wellenlänge 360° entspricht (also eine volle Sinusschwingung). Die Länge der doppelten Meßstrecke setzt sich somit aus der Anzahl der ganzen Wellenlängen plus dem Reststück zusammen. Eine direkte Messung des Phasenwinkels zwischen dem ausgehenden und dem einfallenden Signal ist leider nicht mit genügender Genauigkeit möglich, denn man muß sich bewußt sein, daß bei einer Wellenlänge von 30 m ein Phasenmeßfehler von 1° schon 8 cm Fehler in der Entfernung entspricht. Man betrachtet heute eine direkte Phasenmessung mit einer Genauigkeit von etwa $3,5^\circ$ oder in Distanz von 30 cm als erreichbar, was für die meisten geodätischen Zwecke nicht genügen dürfte.

Deshalb versucht man anders das Ziel zu erreichen und erzeugt künstlich spezielle relative Phasenzustände oder Lagen, wie Phasengleichheit, $\lambda/4$ (90°) oder Vielfache von $\lambda/4$. Diese Phasenzustände können an Hand von elektrischen Nullmethoden indirekt überwacht werden, wobei eine höhere Genauigkeit erreicht wird als bei direkten Phasenwinkel-messungen.

Damit wäre der grundsätzliche Aufbau irgendeines elektrooptischen Distanzmeßgerätes beschrieben, und es sollen nun einige Details erläutert werden, um nicht den Eindruck aufkommen zu lassen, es handle sich bei diesen Geräten um ganz einfache Probleme.

An die *Lichtquelle*, welche den Träger erzeugt, wird die Bedingung gestellt, daß bei minimalem Stromverbrauch das Licht mit möglichst großer Helligkeit zurückkomme. Diese Forderung ist nicht leicht zu erfüllen. Da das Bild der Lichtquelle in sehr großer Entfernung entworfen wird, gehen nur noch die Flächenhelligkeit der Lichtquelle und der Durchmesser der Sende- und Empfangsoptik in den übertragenen Lichtstrom ein. So wird zum Beispiel die Lichtquelle einer Optik von 2 m Brennweite über eine Strecke von 2×1000 m bereits tausendfach vergrößert ($D:f$), so daß ein Empfangsobjektiv von 25 cm Durchmesser bereits von einem Lichtquellendurchmesser von 0,25 mm voll ausgeleuchtet wird.

Es geht also das Licht einer Lichtquelle, welches von leuchtenden Stellen ausstrahlt, die außerhalb eines Kreises von 2,5 zehntel Millimeter liegen, verloren. Man trachtet deshalb darnach, Lichtquellen mit möglichst großer spezifischer Leuchtdichte zu verwenden. Zum Vergleich dienen folgende Angaben: Glühlampe 1000 sb, Kohlenbogenlampe 15000 sb, Phosphore 10 bis 100000 sb, HG-Hochdrucklampen 100000 sb, Sonne 150000 sb.

Bis heute kommen nur Glühlampen und HG-Hochdrucklampen in Frage, wobei bei letzterer die hundertfache Leuchtdichte mit einem ebenso gesteigerten Energieverbrauch und einem erheblichen elektrischen Aufwand erkauft werden muß. Als Vorteil besteht jedoch hier die Möglichkeit, bei Tag zu arbeiten, da das Verhältnis Tageslicht zu Meßlicht die Genauigkeit der Phasenmessung entscheidend beeinflusst. Der Meßlichtanteil sollte mindestens 10% des empfangenen Tageslichtes betragen. Es ist jedoch darauf hinzuweisen, daß die HG-Hochdrucklampe nur bestimmte Spektralbänder emittiert, weshalb ihre Ausbeute noch von den Spektralverhältnissen der übrigen Sende- und Empfangselemente, wie Modulator und Photozelle, abhängt. So zeigt sich, daß Geräte für Tagmessungen sich durch die Wahl der Lichtquelle wesentlich von Nachtgeräten unterscheiden müssen.

An die *Lichtmodulatoren* muß die folgende Forderung gestellt werden: Soll die Entfernungsmessung mit einer Genauigkeit von mindestens 1:100000 erfolgen, in einem Bereich von 300 m bis 30 km, dann muß erstens das Licht mit mindestens 100000 Hz beziehungsweise 100 KHz moduliert werden, da bei tieferen Frequenzen nicht in jeder Entfernung die eingangs erwähnten speziellen Phasenlagen erreicht werden können.

Je höher diese Modulationsfrequenz liegt (das heißt je kürzer die Wellenlänge ist), desto kleiner wird der absolute Phasenmeßfehler. Weitere Bedingungen an den Modulator sind folgende: Alle Lichtbüschel müssen gleiche Phase haben, da man nie weiß, welcher Ausschnitt des Lichtstromes bei großen Entfernungen empfangen wird. Der Modulationsgrad des Lichtes soll konstant und möglichst groß sein, das heißt viel Wechsellicht, wenig Gleichlicht. Der Energiebedarf zur Modulation muß gering sein.

Wir kennen folgende Arten von Lichtmodulatoren:

1. *Die Gasentladungslampe.* Sie hat einen sehr guten Modulationsgrad, jedoch eine kleine Flächenhelligkeit und scheidet deshalb aus.

2. *Phosphore*, angeregt durch Kathodenstrahlen (ähnlich einer Fernsehrohr), werden eventuell in Zukunft eine größere Bedeutung erlangen. Die Flächenhelligkeit und der Modulationsgrad sind sehr gut, der Energieverbrauch ist gering, dagegen bereitet die Nachleuchtdauer, das heißt die Trägheit, noch Schwierigkeiten im gewünschten hohen Frequenzgebiet.

3. *Ultraschallmodulatoren* beruhen auf dem Effekt, daß eine in einer Flüssigkeit erzeugte ebene Schallwelle das Licht ebenso abweist wie ein optisches Strichgitter. Durch Ausnützung dieses Beugungseffektes in Kombination mit einer Spaltoptik kann Licht moduliert werden. Leider sind die Phasenunterschiede der einzelnen Lichtbüschel beträchtlich, weshalb in allen Fällen, wo nicht das gesamte Licht zurückkommt, die Verwendung in Frage gestellt ist; denn die Summe der Phasenvektoren des eingehenden Signals muß gleich sein wie die Summe der Phasenvektoren des ausgehenden Signals. Der Wirkungsgrad wäre gut, der Frequenzbereich liegt leider unter 100 KHz. Es ist nicht ausgeschlossen, daß Ultraschallmodulatoren in Zukunft einmal für Entfernungsmesser kleinerer Genauigkeiten zur Anwendung kommen.

4. Die *Kerrzelle* dürfte bis heute der einzige mit Erfolg verwendete Lichtmodulator für Entfernungsmeßgeräte sein, weshalb ich dieses Element etwas eingehender behandeln werde.

Der Kerreffekt besteht in der Doppelbrechung, die in gewissen Flüssigkeiten, an welche ein elektrisches Feld angelegt wird, auftritt. Das Feld, welches von einer Elektrode zu andern geradlinig verläuft, bewirkt eine Orientierung der Moleküle, und ein ursprünglich isotroper Stoff nimmt die Eigenschaften eines einachsigen Kristalles an, dessen optische Achse in der Feldrichtung liegt. Hierdurch wird die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichtes in Feldrichtung und senkrecht dazu verschieden. Lassen wir linear polarisiertes Licht, dessen Schwingungsebene um 45° zur Feldrichtung verdreht ist, eine doppelbrechende Flüssigkeit passieren, so erfahren die beiden Komponenten des Lichtvektors parallel und senkrecht zur Feldrichtung einen Gangunterschied im Bogenmaß

$$\delta = 2 \pi \cdot B \cdot 1 \cdot \frac{U^2}{a^2 \cdot 300^2}$$

wo B die Kerrkonstante, U die angelegte Spannung für die Länge des Lichtweges und a den Abstand der Elektroden bedeutet. Die Resultierende aus den beiden Komponenten ist demzufolge beim Austritt aus der Zelle nicht mehr unter 45° , sondern entsprechend der Größe der Spannung zusätzlich in Feldrichtung verdreht. Befindet sich am Austritt ein zum ersten Polarisator gekreuzter Analysator, so läßt dieser naturgemäß nur diejenige Komponente durch, die in seine eigene Schwingungsebene fällt.

Ist die angelegte Spannung Null, so tritt kein Licht aus (gekreuzte Polarisatoren). Lassen wir die Spannung langsam ansteigen, dann steigt die Helligkeit stetig entsprechend der Drehung der Schwingungsebene bis zum Punkt, wo der Gangunterschied eine halbe Lichtwellenlänge beträgt. Dort kann alles Licht austreten, die Helligkeit ist maximal und hat nur um die Absorptionsverluste abgenommen. Erhöhen wir die Spannung weiter, so nimmt das Licht wieder ab, das heißt, die Drehung des Lichtvektors geht im gleichen Sinne weiter, und damit wird die durchtretende Komponente kleiner. Man arbeitet jedoch immer im Gebiet zwischen Nullspannung und Hellspannung. Legen wir eine Wechselspannung an die Zelle, so ändert sich die Helligkeit des austretenden linear-polarisierten Lichtes im selben Rhythmus, und das Licht ist moduliert. Von allen bisher bekannten Stoffen ist Nitrobenzol am besten geeignet. Es besitzt eine hohe Kerrkonstante, genügend elektrische Durchschlagsfestigkeit, einen hohen spezifischen Widerstand und geringe dielektrische Verluste. Die Kerrkonstante ist allerdings von der Wellenlänge des Lichtes abhängig, was bei Distanzmeßgeräten mit Filtern usw. zu berücksichtigen ist. Sie ist bei Nitrobenzol im blauen Spektralbereich fast doppelt so groß wie im roten, hingegen wird das blaue Licht durch die gelbliche Tönung des Nitrobenzols fast vollständig absorbiert (Bild 2). Man wird deshalb im

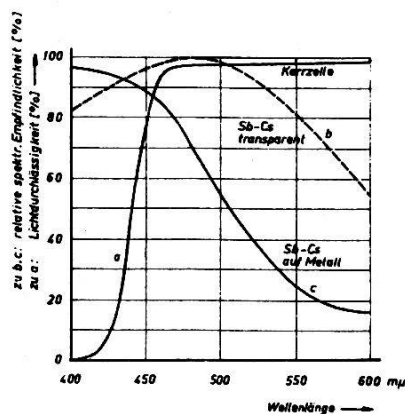


Bild 2

grün-gelben Bereich arbeiten. Da andererseits die Photozellen blau empfindlich sind, geht man möglichst nahe an den blauen Bereich heran. Wie eingangs erwähnt wird die Wahl der Arbeitsfarbe noch durch die Lichtquelle beeinflusst. Die Kerrzelle arbeitet praktisch trägheitslos bis Frequenzen von 10 MHz. Dort ist die Trägheit noch kleiner als $1/1000$ der Modulationsfrequenz. Um Gangunterschiede der einzelnen Büschel infolge verschie-

dener Weglängen zu vermeiden, soll das Licht möglichst parallel durch die Zelle durchtreten. Die Nachteile der Kerrzelle liegen in den zur Steuerung erforderlichen großen Hochfrequenzspannungen, welche bei hohen Frequenzen große dielektrische Verluste erleiden, die die Kerrflüssigkeit erwärmen und damit die Kerrkonstante herabsetzen. Um diesen Nachteilen teilweise zu begegnen, legt man an die Zelle eine Gleichspannung von mehreren 1000 Volt, welche keine dielektrischen Verluste verursacht, und man steuert die Kennlinie nur im geradlinigen Teil mit einer Hochfrequenzspannung von 500 bis 2000 Volt aus. Es muß ferner darauf Rücksicht genommen werden, daß nur ein kleiner mittlerer Ausschnitt zwischen den Platten durchleuchtet wird, um Inhomogenitäten des elektrischen Feldes und der damit verbundenen Inhomogenität der Modulationsphase einzelner Büschel auszuschalten (Bild 3).

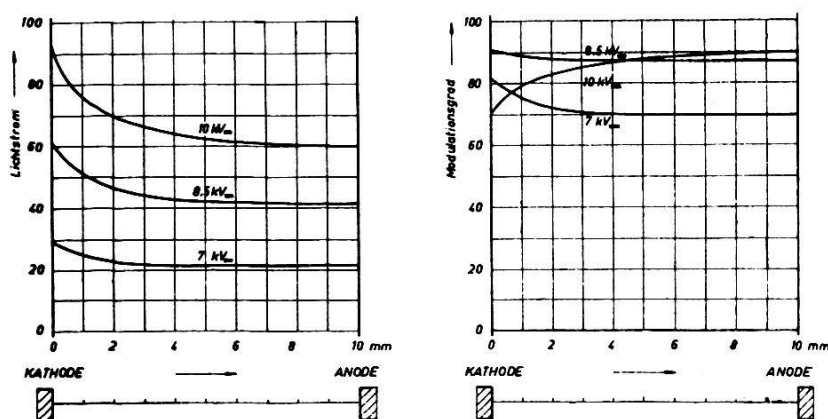


Bild 3

So erweist sich die Kerrzelle, obwohl sie bis heute als tauglichster Lichtmodulator gilt, auch nicht als ideal. Bei sämtlichen technischen Distanzmeßgeräten müssen beim Modulator Kompromisse gemacht werden, um den Aufwand nicht ins Grenzenlose zu treiben. Daß diese Kompromisse natürlich auf Kosten der Meßgenauigkeit gehen, versteht sich.

5. Die Ausnützung der *elektrooptischen Doppelbrechung von Kristallen* ist eine weitere Möglichkeit der Lichtmodulation. Dabei sind zwei Effekte bei Kristallen zu unterscheiden:

a) *der reine Kerreffekt*. Er kommt bei gewissen Kristallen aus Zinkblende, Kalium oder Ammoniumphosphat vor. Diese Kristalle können genau wie eine Kerrzelle trägheitslos verwendet werden, haben jedoch den Nachteil, daß ihr Modulationsgrad bei Frequenzen über 10 KHz zu stark abfällt, weshalb sie für Modulatoren zu Distanzmeßzwecken ausscheiden.

b) Diesem reinen Kerreffekt ist jedoch bei diesen Kristallen wie auch bei Quarz noch der *Piezoeffekt* überlagert. Ein äußeres elektrisches Feld erzeugt eine elastische Deformation einer solchen Kristallplatte, die ihrerseits die Doppelbrechung beeinflusst. Wird ein solcher Kristall mit einer Frequenz angeregt, die seiner mechanischen Eigenschwingung entspricht, dann ist die Änderung der Doppelbrechung genügend groß, um Licht

wirkungsvoll zu modulieren. Die Anordnung ist auch hier analog der Kerrzellenanordnung mit Polarisator und Analysator. Hingegen ist sie an eine bestimmte Frequenz gebunden, entsprechend den Kristallabmessungen (*Bild 4*). Die Doppelbrechung hat im Schwingungsbauch ihr Maximum. Man unterscheidet längsschwingende Kristalle und Dicken-schwinger. Erstere sind nur bis 200 KHz zu verwenden, letztere können bei höheren Frequenzen arbeiten, jedoch ist zu befürchten, daß der Modulationsgrad ziemlich klein ist. Der Energieaufwand bei Kristallmodulatoren ist sehr gering; ihr Nachteil liegt in der Frequenzgrenze und in der Tatsache, daß Lichtbündel außerhalb der Mitte des Druckbauches eine andere Phasenlage haben.

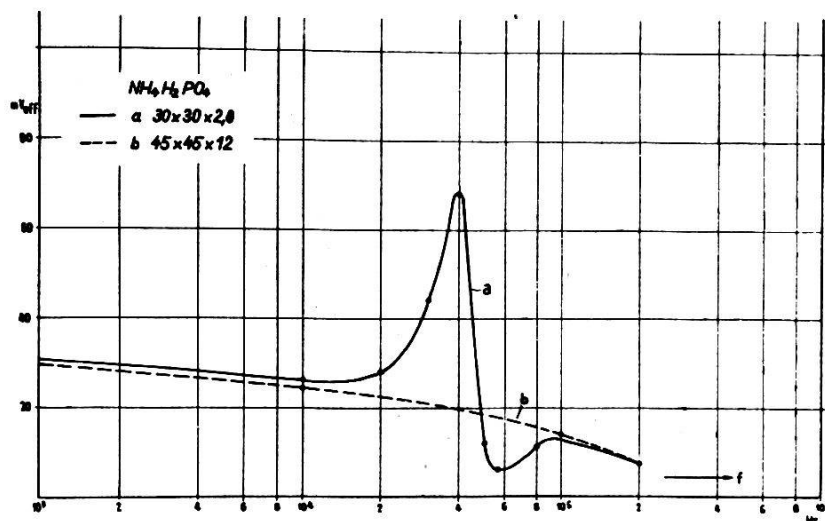


Bild 4

Mit diesen Ausführungen können wir das Thema Lichtmodulation verlassen und die zur Steuerung der Modulatoren erforderlichen HF-Generatoren betrachten.

Wie eingangs erwähnt, muß die Steuerfrequenz mindestens 1 MHz betragen. Der Typ des gewählten Modulators bestimmt die erforderliche Leistung des Generators. Ferner hängt seine Frequenzgenauigkeit vom gewählten Meßverfahren des Meßteiles ab.

Der elektronische Aufbau unterscheidet sich nicht von dem der üblichen Sender der Radiotechnik. Es erübrigt sich deshalb, in Details zu gehen, ich möchte lediglich darauf hinweisen, daß wir zwischen Generatoren für Entfernungsmesser mit fester Frequenz und solchen variabler Frequenz unterscheiden müssen. Bei ersteren bestimmt die Genauigkeit der erzeugten Frequenz die erzielbare Genauigkeit der Messung. Der Frequenzfehler des Generators geht im selben Maß in die Messung ein. Um diesen Fehler möglichst klein zu halten, verwendet man thermostat-regulierte Quarze als Schwingungserzeuger. Damit ist es möglich, Frequenzen auf 1×10^{-6} konstant zu halten, jedoch ist bekannt, daß Quarze erschütterungsempfindlich sind und unter Umständen plötzlich einen

Frequenzsprung machen, der weit über 1×10^{-6} liegt. Um dies zu erkennen, empfiehlt es sich, diese Quarze vor und nach der Messung zu prüfen. Eine solche Prüfung ist, sofern die notwendigen Apparaturen vorhanden sind, auch im Felde durch Vergleich mit den sehr genauen Sendefrequenzen von Droitwich, Rugby oder neuerdings Neuchâtel möglich. Bei Generatoren für Entfernungsmesser mit variabler Frequenz spielt die Frequenzkonstanz eine viel kleinere Rolle, da das Meßprinzip ja darauf beruht, daß die eingestellte Frequenz jeweils im Meßteil gemessen wird. Ich möchte ausdrücklich erwähnen, daß es nicht möglich ist, die Meßfre-

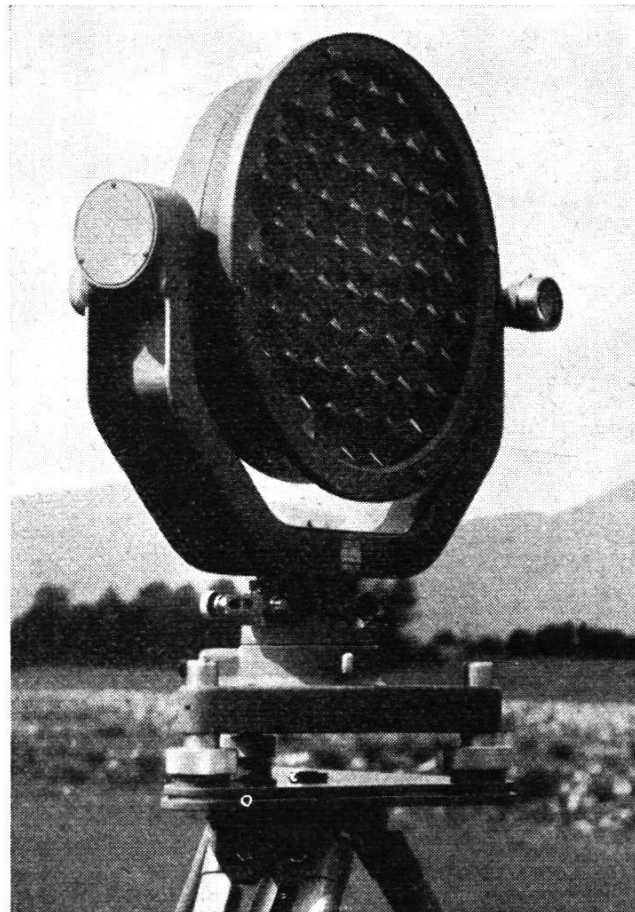


Bild 5

quenz wie bei einem Radioapparat direkt an einer Skala abzulesen, mag sie noch so fein gestaltet sein. Eine solche Methode erlaubt höchstens eine Genauigkeit von 1‰ und ist daher viel zu ungenau.

Damit können wir zum optischen Teil übergehen. Sende- und Empfangsoptik werden meistens als Spiegelsystem ausgeführt, um die eingangs erwähnte Forderung nach möglichst großer Brennweite und großer Öffnung mit einer günstigen Konstruktion verwirklichen zu können. Es müssen Möglichkeiten zur Zentrierung der Lichtquelle, zum Einrichten der Apparatur und zur Beobachtung mit Fernrohr vorgesehen werden. Das gegenseitige Auffinden bei Nacht, ohne vorherige Orientierung

von Sender und Spiegel bei Tag, bereitet unsägliche Schwierigkeiten, sofern nicht geeignete Vorrichtungen vorgesehen sind. Als sehr zweckmäßig haben sich Tripelspiegel für Distanzen über 1000 m erwiesen, welche nur innerhalb $\pm 8^\circ$ orientiert sein müssen (*Bild 5*).

Die Photozelle als eigentlicher Empfänger des Lichtsignals gehört bereits zum Meßteil. Wir unterscheiden: spezielle einfache Photozellen und Vervielfacherphotozellen. Die Wirkungsweise beider Photozellen beruht darauf, daß das auf eine Photokathode fallende Licht Elektronen aus der Photoschicht auslöst, die bei angelegtem elektrischem Feld zur Anode wandern, wodurch ein Stromfluß entsteht. Bei Vervielfacherzellen wird ein weiterer Effekt ausgenutzt. Die soeben erwähnten Elektronen, welche auf die Anode aufprallen, lösen sogenannte Sekundärelektronen aus, die nun ihrerseits in einem weiteren elektrischen Feld auf eine zweite Anode prallen, wo sie wiederum Sekundärelektronen auslösen, die unter Feldeinfluß zu einer dritten Anode wandern. Dieser Vorgang wird bis zu 14mal wiederholt, und da jedes Elektron durchschnittlich zwei Sekundärelektronen auslöst, erhält man auf diese Weise eine ungeheure Verstärkung in der Größenordnung von 10^4 bis 10^7 . Die Zwischenanoden nennt man Dinoden.

Die Zahl der Elektronen verhält sich proportional zur auffallenden Lichtmenge, das heißt, ein bestimmter Vorgang auf der Lichtseite erscheint analog im Stromfluß. Bei der Distanzmessung wollen wir die Phasenverzögerung, die auf der Strecke zufolge der endlichen Laufzeit des Lichtes entstanden ist, in Zusammenhang mit der Phase des ausgesandten Lichtes bringen. Es handelt sich hierbei um einen sehr kurzzeitigen Vorgang, und deshalb bereitet eine Photozelle Schwierigkeiten. Die Geschwindigkeit, mit der sich die Elektronen zur Anode verschieben, ist etwa 100mal kleiner als die Lichtgeschwindigkeit, so daß ein Abstand von Kathode zu Anode von beispielsweise 1 cm bereits einen Lichtweg von 1 m äquivalent ist. Diese zusätzlich entstehende Phasendrehung geht direkt in die Messung ein und wäre nicht tragisch, wenn sie absolut konstant bleiben würde. Leider ist sie aber abhängig von der an die Zelle angelegten Spannung sowie natürlich von der Weglänge der Elektronen. Die Spannung muß äußerst genau stabilisiert werden. Die Bahnlänge ist schwierig zu überwachen, da das Licht nicht in einem winzigen Punkt auf die Kathode trifft und die mechanische Genauigkeit der Photozelle zu wünschen übrig läßt. Es ist deshalb darnach zu trachten, Photozellen mit möglichst kleinen Abständen zwischen Kathode und Anode zu verwenden. Meistens kommen jedoch SEV-Zellen zur Anwendung, die dank ihrem enormen Verstärkungsgrad einen kleinen Lichtbedarf haben. Bezüglich Laufzeitstreuung sind sie jedoch wesentlich ungünstiger als einfache Photozellen, da in ihnen die räumlichen Bahnlängen entsprechend der Stufenzahl wesentlich steigen und damit eine größere Streuung der Meßwerte zu befürchten ist. Natürlich werden diese Fehler gemittelt, jedoch ist es unmöglich, sie von den andern Fehlern zu trennen und zu kontrollieren. Man kann nur optisch und elektrisch alles vorkehren, um sie möglichst klein zu halten (*Bild 6*). $1 \cdot 10^{-9} = 30$ cm Lichtweg.

Bei Geräten für Messungen bei Tag kommen SEV-Zellen nicht in Frage, da bei ihnen der Nutzlichtanteil so groß sein muß, daß einfache Photozellen empfindlich genug sind und den Vorteil wesentlich kürzerer Laufzeiten besitzen.

$$1 \cdot 10^{-9} = 30 \text{ cm Lichtweg}$$

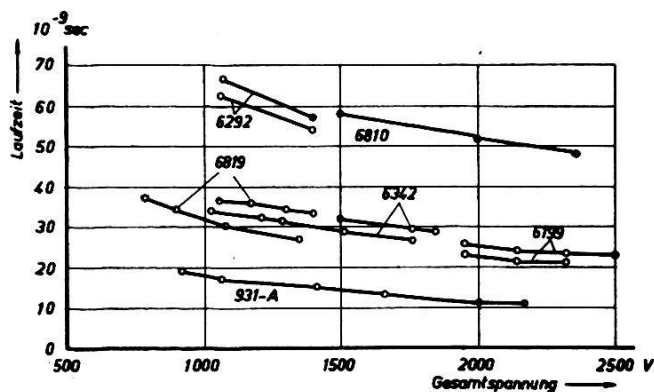


Bild 6

Die Photozellen erfüllen nun allgemein in den Distanzmeßgeräten noch eine weitere Funktion, nämlich die des eigentlichen Phasenanalyzers. Durch Anlegen einer Wechselspannung kann eine Photozelle wie ein Ventil gesteuert werden, indem der vom Licht erzeugte Strom entsprechend der angelegten Wechselspannung zusätzlich moduliert wird. Wir können drei Möglichkeiten unterscheiden:

1. Wir legen nur Gleichspannung an die Zelle. Dann erhalten wir ein elektrisches Ausgangssignal, das genau wie das einfallende Licht moduliert ist. Damit ist aber noch kein Phasenvergleich vorgesehen; er müßte erst noch zusätzlich vollzogen werden.

2. Wir legen dieselbe *HF-Wechselspannung* an die Photozelle, mit der der Modulator betrieben wurde, also die gleiche Frequenz wie die des Lichtes. Da die Photozelle den Strom nur in einer Richtung durchläßt, erhalten wir in jeder positiven Halbwelle dieser Steuerspannung einen Strom, der proportional dem in jenem Zeitpunkt eintreffenden Lichtstrom ist. In der negativen Halbwelle bleibt die Zelle gesperrt. Fällt nun das Maximum der Steuerspannung gerade mit dem Maximum des ankommenden Lichtes zusammen, dann ist der fließende Strom maximal, sind Steuerspannung und Lichtwelle gerade gegenphasig, dann fließt nur der stets vorhandene Dunkelstrom, also ein Minimum. Wir haben damit bereits eine Möglichkeit, die Phasenlage des einfallenden bezüglich des ausgehenden Signales zu messen, die allerdings nicht genügend genau ist, weil die Maxima oder Minima von Sinuskurven zu flach sind. Man bedient sich deshalb verschiedener Kunstgriffe, indem man zum Beispiel die Phase des modulierten Lichtes oder die Phase der an die Photozelle gelegten Steuerspannung periodisch um 180° verändert und auf diese Weise die Größe der beiden Photoströme vergleicht. Dieser Vergleich kommt im

Schnittpunkt zweier sich schneidender Sinuskurven am Orte größter Steilheit zustande. Hier ist die Genauigkeit hoch, und zudem ist die Anwendung von Brückenschaltungen möglich, welche ihrerseits weitgehend unabhängig von momentanen Schwankungen des Lichtes arbeiten.

3. Wir können auch an die Photozelle eine Gleichspannung legen und dieser noch eine kleine HF-Spannung, einer von der Modulationsfrequenz wenig verschiedenen Frequenz, überlagern. Damit erhalten wir einen Photostrom, der neben anderen Frequenzen auch die Differenzfrequenz beider HF-Spannungen enthält. Da die Phaseninformation in dieser Differenzfrequenz erhalten bleibt, kann sie mit einer aus der Sendefrequenz abgeleiteten gleichen Frequenz, in der auch die Phase der Sendefrequenz erhalten geblieben ist, im Phasenmesser verglichen werden. Diese Methode vereinfacht die nachfolgende Verstärkung und erlaubt den Bau von besseren elektrischen Phasenschiebern; sie stellt aber die Bedingung, daß das erwähnte Hilfssignal gesondert erzeugt werden muß.

Das auf eine dieser Arten erhaltene phasenabhängige Signal wird nun nochmals verstärkt und zur Anzeige gebracht. Die Anzeige erfolgt meistens mittels Nullmethode und Nullinstrument oder magischem Auge.

Damit ist aber der Meßteil noch nicht endgültig besprochen, denn es fehlt noch das Element, welches die für die Anzeige erforderlichen Phasenzustände herbeiführt, das heißt irgendeine variable Größe, welche die Phasenlage beeinflußt. Zur Verfügung stehen nur drei solche Größen, nämlich die optischen Weglängen oder die elektrische Laufzeit in der Apparatur zwischen Photozelle und Phasenvergleichsteil oder als dritte die eigentliche Modulationsfrequenz.

Die optische Weglänge kann durch Anbringen eines einstellbaren, zusätzlichen künstlichen Lichtweges so variiert werden, daß in jedem Falle ein spezieller Phasenzustand erreicht wird. Dieser zusätzliche Lichtweg wird an einem Maßstab abgelesen und entspricht dann dem Reststück zur ganzen Anzahl voller Wellenlängen. Physikalisch ist diese Lösung einwandfrei, technisch etwas umständlich.

Die zweite Lösung, an Stelle des optischen Zusatzweges eine elektrische Verzögerung einzufügen, ist zwar technisch viel einfacher, physikalisch jedoch wesentlich ungenauer, weil elektrische Verzögerer zufolge zahlreicher Unstabilitäten der benötigten Bauelemente an sich für derartige Ansprüche noch nicht befriedigen.

Die dritte Lösung, die speziellen Phasenzustände durch variieren der Modulationsfrequenz aufzusuchen, ist physikalisch einwandfrei und läßt sich auch technisch gut durchführen. Sie hat jedoch den Nachteil, daß in jedem Fall die Frequenz genau gemessen werden muß, was einen beachtlichen materiellen Aufwand bedingt. Solche Frequenzmessungen im Felde sind heute mit elektronischen Zählern ohne weiteres mit höchster Genauigkeit möglich und erfordern minimale Zeit.

Diese Ausführungen über die Grundlagen elektrooptischer Entfernungsmesser zeigen, daß bei allen Lösungen immer wieder Kompromisse gemacht werden müssen, sei es aus Gründen der Felddtichtigkeit, also des Aufwandes, sei es wegen physikalischer Schwierigkeiten. Es ist denkbar,

daß in den nächsten Jahren neuartige Lichtquellen und Modulatoren, Photozellen mit hohem Auflösungsvermögen sowie Leistungstransistoren entwickelt werden, die erlauben, elektrooptische Entfernungsmesser höherer Genauigkeit bei kleinerem Gewicht und geringerem Energiebedarf zu bauen.

Bevor ich noch kurz zur rein elektronischen Distanzmessung übergehe, möchte ich einige Ausführungen über atmosphärische Einflüsse machen (*Bilder 7 bis 10*).

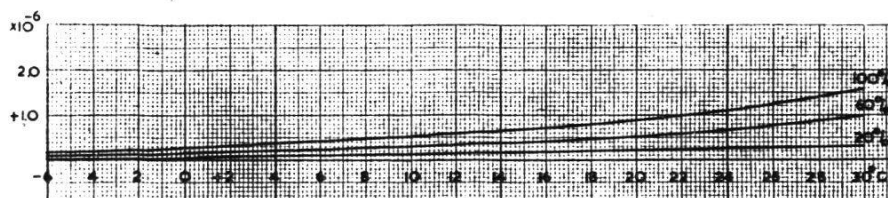


Bild 7

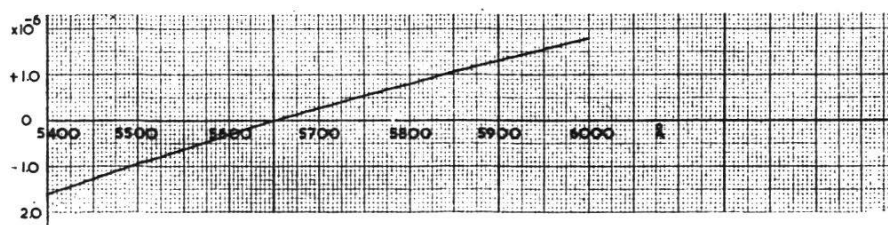


Bild 8

Diese können die Genauigkeit des Meßresultates bis zu 1×10^{-5} der Entfernung beeinflussen. Bei jeder Distanzmessung muß man sich daher auf Grund des topographischen Verlaufes der Meßstrecke über die zu erwartenden atmosphärischen Fehler im klaren sein. Die Luft ist auf großen Strecken nie homogen, Feuchtigkeit und Temperatur können sich stark ändern. In manchen Fällen wird es zweckmäßig sein, die Meßstrecke in 2 bis 3 Teilstücke zu unterteilen. Um dies zu beurteilen, muß man sich über die innere Genauigkeit des verwendeten Gerätes Rechenschaft geben. Jedes Distanzmeßgerät hat einen inneren absoluten Fehler, der unabhängig von der Entfernung ist, und einen zweiten Fehler, der von der Intensität des zurückkommenden Lichtes sowie von der Grenze des Auflösungsvermögens der Anzeige abhängt. Dieser zweite Fehler ist relativ, das heißt distanzabhängig. Nullpunktfehler können durch Verwendung eines zweiten Spiegels in unmittelbarer Nähe des Senders eliminiert werden. Durch abwechselnde Messungen auf den entfernten und auf den nahen Spiegel können bei der Auswertung des Meßresultates die unvermeidlichen Unstabilitäten des Instrumentennullpunktes eliminiert werden.

Das Meßprinzip der elektronischen Distanzmeßgeräte ist naturgemäß demjenigen optischer Geräte ähnlich. Sowohl Radiowellen als auch

Lichtwellen sind beide elektromagnetische Wellen und folgen analogen Gesetzen. Je kürzer die Wellenlänge einer Radiowelle, um so mehr nähern sich ihre Eigenschaften denjenigen der Lichtwelle. Das Brechungsgesetz gilt auch für Radiowellen.

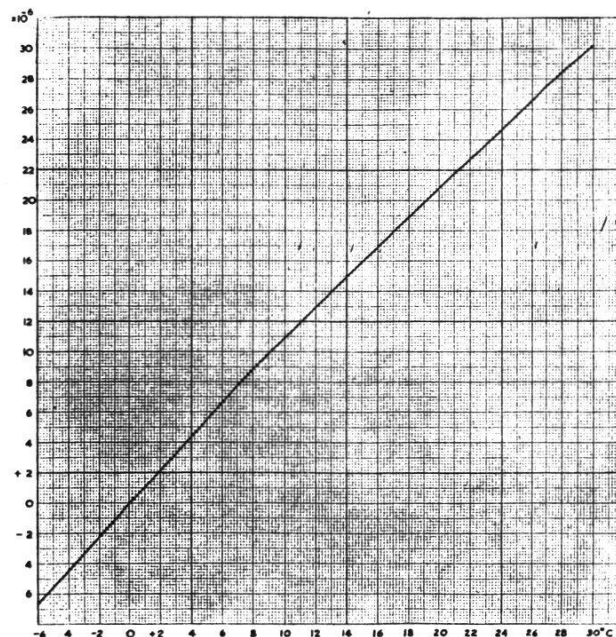


Bild 9

Grundsätzlich kann gesagt werden, daß die Durchdringungsfähigkeit, das heißt die Reichweite, von elektromagnetischen Wellen durch feste, flüssige und gasförmige Körper mit abnehmender Wellenlänge ebenfalls abnimmt. Rundfunkwellen werden von Nebel oder Regen unmerkbar geschwächt. Bei Mikrowellen (Radiowellen) von 1 bis 20 cm Länge ist ein erheblicher Abfall feststellbar. Infrarotlicht ist noch durchdringungsfähiger als ultraviolettes, welches sofort absorbiert wird.

Bei der Distanzmessung geht es nun darum, eine Information von einem Punkt A zu einem Punkt B zu senden und die Laufzeit zu messen. Diese Information muß von einem Träger transportiert werden, und dieser Träger ist in einem Falle das Licht im andern eine Radiowelle. Man kann sich auf Grund des vorher Gesagten fragen, warum man nicht *längere* Radiowellen als Informationsträger verwendet, da diese ja eine größere Reichweite haben. Hier spielt die Forderung der Bündelung eine Rolle. Die Bündelung einer Radiowelle hängt von der Form der Sendeanenne ab. Eine gerichtete Bündelung ist erforderlich, weil sonst die Konzentration am Empfangsort zu klein wird, und zudem muß die Laufbahn der Information möglichst genau vorgezeichnet sein, weil sonst die zu messende Strecke mit dieser Bahn nicht übereinstimmt. Man wählte daher Parabolantennen, und weil der erforderliche Durchmesser der Wellenlänge proportional geht, würde man für lange Wellen Riesenantennen benötigen. Im Gegensatz dazu eignen sich Mikrowellen zwischen 1 und 20 cm Wellenlänge für den Bau von Distanzmeßgeräten, die

heute technisch mit kleinem Aufwand erzeugt werden können. Allerdings ist die Bündelung mit 5 bis 10° der Lichtbündelung weit unterlegen, weshalb Reflexionen eine wesentliche Rolle spielen. Wir unterscheiden Mikrowellenmeßgeräte mit *passiven* Gegenstationen – also Reflektoren

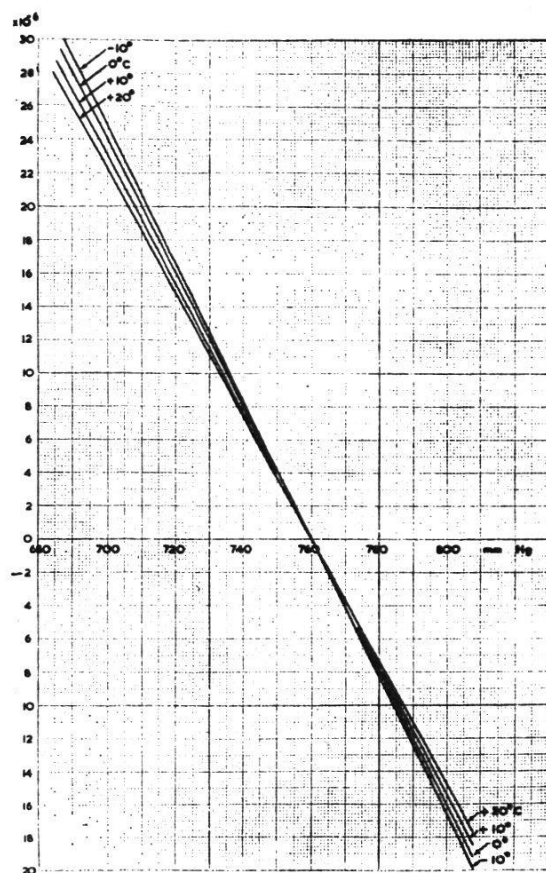


Bild 10

entsprechend optischen Spiegeln – und Geräte mit *aktiven* Gegenstationen. Passive Geräte dürften für schweizerische Verhältnisse vorläufig nicht in Frage kommen, da sie auf dem reinen Impulsverfahren basieren und der technische Stand die geforderte Genauigkeit noch nicht ermöglicht. Zudem sind störende Reflexionen in viel größerem Maße zu erwarten als bei aktiven Geräten. Betrachten wir ein solches aktives Meßgerät, dann stellen wir fest, daß die Lichtquelle durch einen Mikrowellengenerator ersetzt wird, eine sogenannte Klystronröhre. Die Erzeugung der Modulationsfrequenz geschieht wie beim elektrooptischen Gerät durch einen speziellen Quarzgenerator, dessen Leistung wesentlich geringer sein kann als bei den meisten Generatoren für optische Geräte. An seine Frequenzgenauigkeit werden natürlich dieselben Ansprüche gestellt. Die Frequenz oder die Wellenlänge dieser Modulationsspannung liegt im gleichen Gebiet wie bei optischen Entfernungsmessern. Der Meßvorgang selbst hat also mit Mikrowellen gar nichts zu tun, sondern er spielt sich im selben Frequenzgebiet ab wie bei optischen Geräten. Die Modulation des Trägers mit dieser Steuerfrequenz kann jedoch direkt in der Klystronröhre erfolgen, was bei optischen Geräten mittels des Lichtmo-

dulators geschehen muß. Der Träger, welcher eine genau bekannte zeitliche Information enthält, verläßt die Sendeantenne und läuft zur Empfangsantenne der Gegenstation. Dort wird das eintreffende Signal umgewandelt und in einer andern Form durch einen neuen, in der Gegenstation erzeugten frequenzverschobenen Träger zurückgestrahlt. Dieses ankommende Signal wird nun ähnlich wie bei optischen Geräten mit dem abgehenden Signal bezüglich der Phasenlage verglichen. Natürlich muß eine wesentliche Bedingung erfüllt sein, nämlich die Konstanz der Laufzeiten im elektrischen Teil beider Geräte. Dies erreicht man durch entsprechende Ausbildung der Schaltung und Wahl zeitlich konstanter Bauelemente.

Es ist klar, daß die Genauigkeit dieser Geräte nicht beliebig gesteigert werden kann, da durch relative Laufzeitschwankungen in den Geräten, Ungenauigkeiten des Meßkristalles, Grenze der Anzeigeempfindlichkeit gewisse innere Fehler vorliegen. Die atmosphärischen Einflüsse sind analog wie bei Licht, jedoch dürfte der Einfluß der Luftfeuchtigkeit auf die Messung 5- bis 10mal größer sein. Genaue Angaben hierüber liegen meines Wissens noch nicht vor. Hochwertige elektrooptische Geräte sind in ihrer absoluten Genauigkeit den Mikrowellengeräten heute noch überlegen, jedoch können Mikrowellengeräte mit wesentlich kleinerem Aufwand als elektrooptische Geräte gebaut werden. Dies deshalb, weil sich die Umwandlung von elektrischen Signalen in Lichtsignale und von Lichtsignalen in elektrische Signale erübrigt. Ob in Zukunft Licht als an und für sich geeignetster Signalträger seine Bedeutung verliert oder neu gewinnt, kann nicht gesagt werden; dies hängt wesentlich von der weiteren Entwicklung der physikalischen Grundlagenforschung ab. Sicher ist, daß der technische Stand von Distanzmeßgeräten allgemein mit den Fortschritten der Elektronik Schritt halten wird. Die Entwicklung der Elektronik geht so rasch, daß bei Fertigstellung eines neuen Gerätes dasselbe bereits durch neue elektronische Bauelemente überholt ist.

Anmerkung: Ein Teil der Abbildungen entstammt der Arbeit von Professor Karolus, «Physikalische Grundlagen der elektrooptischen Entfernungsmessung».

Eine interessante Neuerung am WILD-Repetitions-Theodolit T1

Von E. Berchtold, dipl. Ing., Heerbrugg

Ein Theodolit mit Höhenkreis, aber ohne Höhenkreislibelle galt lange Zeit als ungeeignet für genaue Messungen, weil – im Gegensatz zum Horizontalkreis – am Höhenkreis unmittelbar Winkel und nicht bloß Richtungen abgelesen werden. Der eine Schenkel dieses Winkels ist die Ziellinie des Fernrohrs, der andere entweder die Richtung nach dem Zenit oder die in der Vertikalebene der Ziellinie verlaufende Horizontale.

Weil die Lotrichtung durch die Stehachse des auf dem Stativ aufgestellten Instrumentes nicht zuverlässig genug definiert ist, benützt man