

Heft 11

München, Januar 1984

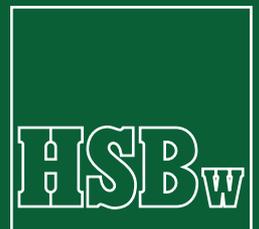
Elektrooptische Präzisionsstreckenmessung

Beiträge zum Geodätischen Seminar
23. September 1983

Herausgegeben von W. Caspary und H. Heister

SCHRIFTENREIHE

Wissenschaftlicher Studiengang Vermessungswesen
Hochschule der Bundeswehr München



Heft 11

München, Januar 1984

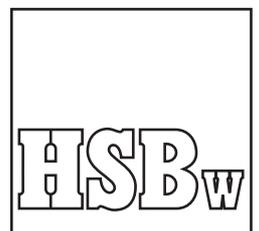
Elektrooptische Präzisionsstreckenmessung

Beiträge zum Geodätischen Seminar
23. September 1983

Herausgegeben von W. Caspary und H. Heister

SCHRIFTENREIHE

Wissenschaftlicher Studiengang Vermessungswesen
Hochschule der Bundeswehr München



Der Druck dieses Heftes wurde aus Haushaltsmitteln der Hochschule der Bundeswehr München gefördert.

Verantwortlich für die Herausgabe der Schriftenreihe:

Der Prodekan des Wissenschaftlichen Studiengangs Vermessungswesen

Bezugsnachweis:

Studiengang Vermessungswesen
im Fachbereich Bauingenieur- und Vermessungswesen
Hochschule der Bundeswehr München
Werner-Heisenberg-Weg 39
8014 Neubiberg

ISSN 0173-1009

Die instrumentelle Weiterentwicklung der elektrooptischen Entfernungsmesser hat in den letzten Jahren zu einer großen Typenvielfalt geführt. Wenn man jedoch Streckenmessungen im Genauigkeitsbereich von unter einem Millimeter durchführen will, so kommt dafür zur Zeit wohl nur ein Instrument in Frage, nämlich das bereits vor 15 Jahren entwickelte Mekometer. Um mit diesem Instrument optimale Ergebnisse zu erzielen, sind verschiedene Meß- und Kalibrierverfahren und insbesondere Zusatzeinrichtungen zur Frequenzkontrolle entwickelt worden.

Als das Institut für Geodäsie der Hochschule der Bundeswehr München 1982 eine Prüfstrecke für elektrooptische Entfernungsmesser einrichtete, entstand der Wunsch, die "wahren" Pfeilerabstände zu bestimmen, da es für die Kalibrierung von EDM-Geräten von besonderem Vorteil ist, wenn Soll-Strecken in das Auswertemodell eingeführt werden können.

So entschlossen sich die Veranstalter, sieben Institute - einschließlich der Herstellerfirma -, die sich durch besondere Aktivitäten auf dem Gebiet der Präzisionsstreckenmessung mit dem Mekometer ausgewiesen haben, dazu einzuladen, Messungen auf der Prüfstrecke durchzuführen. Die gemeinsame Auswertung der Messungen sowie der Vergleich der Ergebnisse sollten zu den angestrebten Soll-Strecken führen und zugleich helfen, die Frage zu klären, welche Streckenmeßgenauigkeit mit welchem Aufwand heute mit EDM-Geräten erreichbar ist. Um das Bild abzurunden, wurden in den Vergleich weitere Geräte (MA 100, Hp-Totalstation, Autoranger) einbezogen, deren Genauigkeit bei sorgfältiger Kalibrierung der des Mekometers am nächsten kommt.

Zum Abschluß dieser Aktivitäten hat das Institut für Geodäsie ein Seminar veranstaltet, in dem die Meß- und Analyseergebnisse vorgelegt wurden. Die Vorträge, die in diesem Heft abgedruckt sind, behandeln das Thema der elektrooptischen Präzisionsstreckenmessung in großer Breite. Ausgehend vom Funktionsprinzip des Mekometers über spezielle Frequenzmeßverfahren und praktische Erfahrungen werden die Ergebnisse auf der Prüfstrecke kritisch gewürdigt. In einem zweiten Teil werden grundsätzliche Probleme der Genauigkeitssteigerung angesprochen, sei es durch Kalibrierung, spezielle

Meßprinzipien und Instrumentenentwicklung oder durch besonders repräsentative Erfassung der Meteorologie.

Die Veranstalter freuen sich sehr, Ihnen schon nach so kurzer Zeit mit dem vorliegenden Heft die überaus vielseitigen und interessanten Arbeiten zu diesem Themenkreis vorlegen zu können. Allen Autoren und Vortragenden sei an dieser Stelle nochmals für ihren Beitrag sowohl zum Erscheinen dieses Heftes als auch zum Zustandekommen des Seminars gedankt.

Neubiberg, im Januar 1984

W. Caspary

H. Heister

INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
SCHNÄDELBACH, K.; Das Mekometer ME 3000 - Wirkungsweise und Probleme	5
MAURER, W., Zum Frequenzverhalten des Mekometers ME 3000	19
HIRSCH, O., NGUYEN, T., Ein objektiviertes Meßverfahren mit dem Kern-Mekometer	41
LOSER, R., Zum Problem der Bestimmung der Additions-konstante	49
KUNTZ, E., MEIER-HIRMER, B., SECKEL, H., Praktische Erfah-rungen mit dem Mekometer ME 3000	57
RITTER, B., Erfahrungen mit dem Mekometer ME 3000 bei Deformationsmessungen in Island	69
FRÖHLICH, H., Die Bestimmung der äußeren Genauigkeit elektrooptisch gemessener Strecken mittels Varianzkomponentenschätzung	79
WUNDERLICH, Th., Ein vertikales Distanznetz höchster Ge-nauigkeit	91
EGREDER, K., Bestimmung dreidimensionaler Koordinaten durch Streckenmessung	101
CASPARY, W., Die Genauigkeit der Mekometermessungen auf der Prüfstrecke Neubiberg	115
KÖNGETER, W., RUOPP, M., Genauigkeitssteigerung bei Nahbe-reichsentfernungsmessern	131
HEISTER, H., Genauigkeitssteigerung elektrooptischer Entfernungsmesser durch Gerätekalibrierung	149
WITTE, B., SCHWARZ, W., Erreichbare Genauigkeit mit speziell ausgewählten Distanzmessern - gezeigt am Beispiel des Autoranger-A	161
GRUBER, C., WITTI, L., OFZ 1 - ein externer Zähler zur Kontrolle der Modulationsfrequenzen elek-trooptischer Entfernungsmesser	173
BRUCKMÜLLER, R., Automatische meteorologische Datenerfassung in der bodennahen Luftschicht	181
ZETSCHKE, H., Vom Mekometer zum Geomensor	187

	Seite
HÜBNER, W., Streckenmessung mit dem Mekometer ME 3000 nach dem Zweifarbenprinzip	197
GERVAISE, J., First results of the geodetic measurements carried out with the Terrameter, two-wave- length electronic distance measurement instrument	213
SCHERER, M., Die Arbeitsweise des Präzisionsentfernungs- messers Polarodist	231
DALLMANN, K.-J., NIEMEIER, W., Zur präzisen mechanischen Längenmessung im Nahbereich - Vorstellung und Vergleich der Geräteentwicklungen DIST- INVAR, DISTOMETER und MPL 60	243
Programm	259
Teilnehmerliste	261

DAS MEKOMETER ME 3000 - WIRKUNGSWEISE UND PROBLEME

von

Klaus SCHNÄDELBACH
Geodätisches Institut
Technische Universität
Arcisstr. 21
8000 München 2
Bundesrepublik Deutschland

ZUSAMMENFASSUNG

Das Meßprinzip des Mekometers ME 3000 wird in seinen Grundzügen erläutert. Darauf aufbauend werden die notwendigen meteorologischen Reduktionen beschrieben, die Frage der Kalibrierung der Meßfrequenz eingehend diskutiert und über neuere Untersuchungen zur Bestimmung der Additionskonstanten, des periodischen Fehlers und zur Verwendung des Mekometers als Zweifarbengerät berichtet.

ABSTRACT

First, the basic principle of the Mekometer ME 3000 is described. There-with, the necessary meteorological reductions are explained and the question of calibrating the measuring frequency thoroughly discussed. Finally, results of investigations are reported about the determination of additive constants, periodical errors and measurements with the Mekometer, using the two-colour-method.

1. VORBEMERKUNG

Der folgende Bericht über die grundsätzliche Wirkungsweise des Mekometers ME 3000 und die daraus entstehenden Probleme ist als Einführung in die Thematik der folgenden Beiträge gedacht, in denen sehr detailliert über aktuelle Messungen mit und an diesem Instrument berichtet wird. Er wird sich daher auf das Wesentliche zur Beschreibung des Meßprinzips beschränken. Der Leser sei wegen Einzelheiten auf die reichhaltige Literatur - auch über Anwendungen und Kalibrierungsmessungen - verwiesen, z. B. *BRADSELL* (1971), *FROOME* (1971), *KERNER* (1970), *MEIER - HIRMER* (1975).

Das Mekometer wurde Anfang der sechziger Jahre von Froome und Bradsell am National Physical Laboratory in Teddington entwickelt und seit 1973 von der Firma Kern in Serie gebaut und vertrieben. Nach den Intentionen der Erfinder sollte ein Instrument entstehen, mit dem Distanzen bis etwa 3 km auf "möglichst einfachste" Weise "sehr genau" gemessen werden können.

"Möglichst einfach" sollte heißen: ohne die sonst üblichen Berechnungen oder Kalibrierungen, ohne zusätzliche meteorologische Beobachtungen zur Bestimmung des Refraktionsindex. Dieser Einfluß sollte weitgehend kompensiert werden.

"Sehr genau" bedeutete zunächst eine Auflösung < 1 mm und eine Streckengenauigkeit $< 10^{-5}$. Daraus wurde dann bald eine Auflösung von 0,1 mm und eine Streckengenauigkeit von 10^{-6} . Bei dem in der elektronischen Entfernungsmessung hauptsächlich verwendeten Verfahren der Phasenmessung verlangt eine solch hohe Auflösung eine hohe Meßfrequenz. Sie beträgt beim Mekometer ca. 500 MHz, entsprechend einer Wellenlänge von 0,6 m.

2. MESSPRINZIP DES MEKOMETERS

Um das Meßprinzip zu erläutern, betrachten wir die Grundgleichung der elektronischen Entfernungsmessung nach dem Phasenmeßverfahren

$$s = \frac{1}{2} \lambda_M (a + \Delta a) . \quad (1)$$

Bei diesem Verfahren wird eine ganze Anzahl a von Modulationswellenlängen λ_M über eine Sequenz dekadisch abgestimmter Meßfrequenzen und das letztlich verbleibende Reststück Δa über das eigentliche Phasenmeßverfahren bestimmt. Im EDM-Gerät wird ein fester Wert $\lambda_{M,0}$ für λ_M benutzt und mit ihm die Entfernung

$$s_A = \frac{1}{2} \lambda_{M,0} (a + \Delta a) \quad (2)$$

angezeigt. Für den Benutzer "am einfachsten" wäre

$$\lambda_M = \lambda_{M,0} = \text{const.} \quad (3)$$

Für λ_M gilt mit der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum c_0 , dem Brechungsindex n_L der Luft für die Trägerwelle (hier Licht) und der Frequenz f_M der Modulationswelle

$$\lambda_M = \frac{c_0}{n_L f_M}, \quad (4)$$

so daß aus (1)

$$s = \frac{1}{2} \frac{c_0}{n_L f_M} (a + \Delta a) \quad (5)$$

folgt. Damit ist λ_M veränderlich als Funktion der Meßfrequenz f_M und dem Brechungsindex n_L , einer immer variablen Größen. Der Benutzer muß also λ_M indirekt über n_L und f_M bestimmen. Um dies zu erleichtern, wird in vielen EDM - Geräten wenigstens f_M weitgehend konstant gehalten (etwa durch Thermostaten), so daß dann gelegentliche Überprüfungen genügen.

"Möglichst einfach" würde also mit (4) oder (5) bedeuten

$$\lambda_M = n_L f_M = \text{const.} \quad (6)$$

Nun können bekanntlich in einem Hohlraumresonator mit konstanten Dimensionen stehende Wellen, d. h. Wellen mit konstanter Länge erzeugt werden. Für einen Resonator zur Erzeugung der Meßfrequenz f_M gilt dann

$$f_M = \frac{c_0}{n_M F(l)} , \quad (7)$$

mit n_M als Brechungsindex für die erzeugte Welle mit der Frequenz f_M , bezogen auf das Medium im Resonator, und $F(l)$ als linearer Funktion der Resonatordimensionen. Einsetzen in (5) bringt

$$s = \frac{1}{2} F(l) \frac{n_M}{n_L} (a + \Delta a) . \quad (8)$$

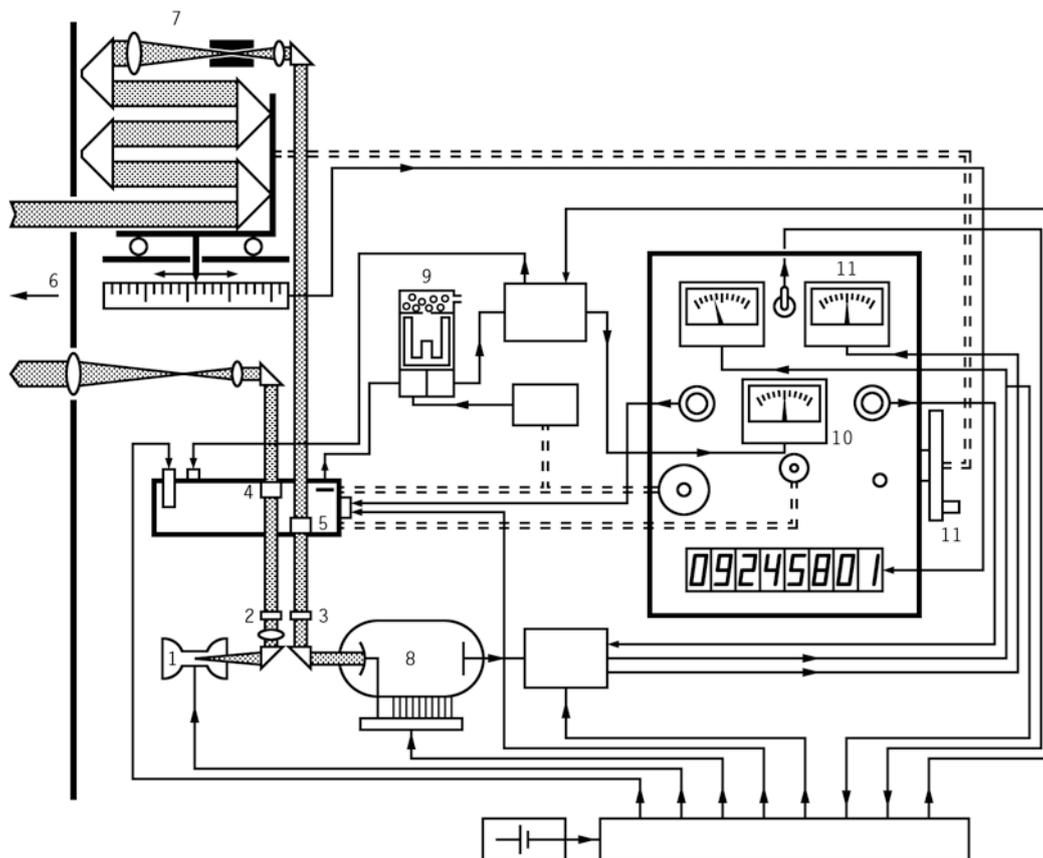
Für ein "einfachstes" Meßprinzip müßte nun $F(l)$ und der Quotient n_M/n_L konstant bleiben. Im übrigen werden hier die Wellenlänge λ_M über $F(l)$ und die Brechungsindizes n_M und n_L definiert. Analog dem Vorgang bei Gleichung (2) werden nun als Ausgangswerte eingeführt: F_0 , $n_{M,0}$ (für Normalbedingungen: Lufttemperatur $T_0 = 20^\circ\text{C}$, Luftdruck $p_0 = 760$ Torr, Dampfdruck der Luft $e_0 = 0$ Torr) und $n_{L,0}$ (für Normalbedingungen: $T_0 = 20^\circ\text{C}$, $p_0 = 760$ Torr, $e_0 = 10$ Torr). Die (2) entsprechende Gleichung lautet dann

$$s_A = \frac{1}{2} F_0 \frac{n_{M,0}}{n_{L,0}} (a + \Delta a) . \quad (9)$$

Dieses Meßprinzip wird im Mekometer ME 3000 realisiert. Sein Hohlraumresonator - die Standard-Cavity - besteht aus einem geschmolzenen Glasrohr, das zur besseren Leitfähigkeit innen mit Silber beschichtet und in ein Aluminium- oder Kupfergehäuse eingebettet ist. Die Dimensionen des Hohlraums sind so bemessen, daß eine Mikrowelle von 7 cm Länge bzw. der Frequenz von ca. 4,4 GHz entsteht. Im Inneren sollen die meteorologischen Bedingungen am Instrument herrschen (T_1, p_1), lediglich die Luftfeuchtigkeit wird durch ein Gel ferngehalten. Damit entspricht n_M dem Brechungsindex für Mikrowellen in trockener Luft.

Nachdem die Konstanz der Cavity, d. h. die Konstanz von $F(l)$, gegenüber Luftdruckänderungen durch eine feste Bauart leicht erreicht wird, bleibt als Störeinfluß die Temperatur. Der Einfluß des, wenn auch kleinen Ausdehnungskoeffizienten von Quarz ($4 \cdot 10^{-7}$) wird durch eine entgegen wirkende Ausdehnung der Abdeckplatte des Resonators weitgehend kompensiert. Die Auswirkung restlicher Kompensationsfehler soll später noch diskutiert werden.

Anhand der Prinzipskizze (Abb. 1) sollen noch einige Eigenheiten des Meßprinzips angesprochen werden. Als Träger dient das Licht einer Xenon-Gaslampe (1), die 100 Lichtblitze/s von jeweils 1,5 μ s Dauer erzeugt.



- | | |
|--------------------------|----------------------------------|
| 1 Xenon Blitzlampe | 7 Variabler Lichtweg |
| 2,3 Polarisationsfilter | 8 Photomultiplier, SEV |
| 4 Modulationskristall | 9 Standard Cavity |
| 5 Demodulationskristall | 10 Frequenzabstimmung ("Tuning") |
| 6 Reflektor am Zielpunkt | 11 Phasenabstimmung |

Abb. 1 Prinzipskizze des Mekometers ME 3000

Das Licht wird zunächst durch einen Polarisationsfilter (2) polarisiert. Durch einen KDP-Kristall (4) wird die Polarisationsrichtung gedreht, da dieser Kristall seine Polarisationsrichtung unter der Einwirkung eines Wechselstromfeldes ändert. Dabei wird die Frequenz dieses Feldes (ca. 500 MHz) nach einigen Umformungen auf die Frequenz der Standard-Cavity (9) abgestimmt, der Prozeß des "Tunings" am Bedienungsknopf (10). So entsteht ein verdrilltes, zugleich noch amplitudenmoduliertes Lichtband von ca. 450 m Länge. Nach der Reflexion am Zielpunkt durchläuft es wieder einen KDP-Kristall (5), der synchron zum ersten geschaltet ist. Je nach Phasenunterschied wird dabei die Elliptizität des polarisierten Lichtes verstärkt oder

abgeschwächt. Das Licht fällt durch ein zweites Polarisationsfilter (3) und erzeugt schließlich in einem Photomultiplier (8) einen Photostrom. Dieser Strom ist ein Minimum, wenn

$$s = a \frac{\lambda}{2} + \frac{\lambda}{4} \quad (10)$$

gilt, wobei a wie oben eine ganze Zahl ist. Um (10) zu erfüllen, kann der Lichtweg optisch durch ein bewegliches Prismensystem (7) verändert werden.

Größere Genauigkeit bei der Minimumbestimmung am Photomultiplier wird nun erzielt, wenn die Modulationsfrequenz gegenüber f_M um kleine Beträge Δf alternierend variiert, so daß nunmehr zwei Frequenzen

$$f_1 = f_M + \Delta f, \quad f_2 = f_M - \Delta f \quad (11)$$

vorliegen. Dabei ist

$$\left. \begin{array}{l} \Delta f \cong 75 \text{ kHz} \\ \Delta f \cong 15 \text{ kHz} \end{array} \right\} \text{ für Meßbereich } \left\{ \begin{array}{l} \text{I : } 10 - 500 \text{ m} \\ \text{II : } 500 - 3000 \text{ m} \end{array} \right.$$

Die Modulationsfrequenz selbst muß nun so lange vorhanden sein, bis der Blitz zum Vergleich zurückkommt. Im allgemeinen sind die Frequenzimpulse

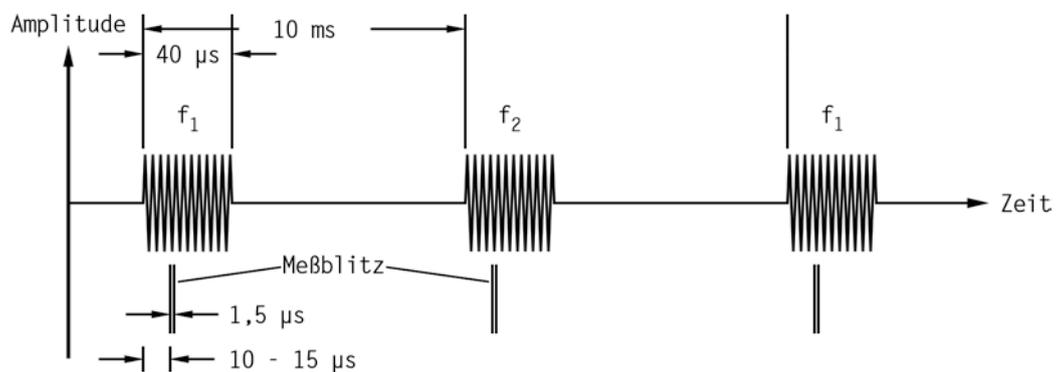


Abb. 2 Zeitlicher Ablauf der Frequenzen f_1 und f_2

daher $40 \mu\text{s}$ lang. Da der Blitzimpuls nach etwa $10 - 15 \mu\text{s}$ moduliert wird, ergibt sich eine mittlere Reichweite des Instruments von $3 - 4 \text{ km}$. Damit haben wir das folgende Frequenzverhalten (Abb. 2):

- eine variable Frequenz f_M in Abhängigkeit von den äußeren meteorologischen Bedingungen und den Dimensionen der Standard-Cavity,
- Frequenzimpulse (100 Impulse/sec, Dauer ca. 40 μ s),
- alternierende Frequenzen in den Impulsen mit Ablagen von $\pm\Delta f$.

3. REDUKTIONEN

Nachdem das Meßprinzip in seinen Grundzügen erläutert ist, soll in den folgenden Abschnitten auf einige Punkte eingegangen werden, deren Beachtung für die volle Ausnutzung der Kapazität des Instrumentes notwendig ist. Wir befassen uns dabei mit den Gleichungen (8) und (9) und erhalten durch Division

$$s = s_A \frac{F(l) n_{L,0} n_M}{F_0 n_{M,0} n_L}, \quad (12)$$

so daß nunmehr s als Funktion von s_A dargestellt ist.

3.1 Berechnung der Brechungsindizes n_M und n_L

Die Brechungsindizes n_M und n_L werden üblicherweise, ausgehend von $n_{M,0}$ und $n_{L,0}$, in drei Schritten berechnet. Wir setzen formal an

$$\frac{n_M}{n_L} = \frac{n_{M,0}}{n_{L,0}} + \left[\frac{n_{M,1}}{n_{L,1}} - \frac{n_{M,0}}{n_{L,0}} \right] + \left[\frac{n_{M,1}}{n_L} - \frac{n_{M,1}}{n_{L,1}} \right] + \left[\frac{n_M}{n_L} - \frac{n_{M,1}}{n_L} \right] \quad (13)$$

und erhalten mit den leicht erkennbaren Abkürzungen

$$\frac{n_M}{n_L} = \frac{n_{M,0}}{n_{L,0}} + v_{L,M} + v_{R,1} + v_{C,1} \quad (14)$$

oder ohne Genauigkeitsverlust

$$\frac{n_M}{n_L} = \frac{n_{M,0}}{n_{L,0}} (1 + v_{L,M} + v_{R,1} + v_{C,1}). \quad (15)$$

Dabei bedeuten die einzelnen Ausdrücke:

- a) die Licht - Mikrowellenreduktion $v_{L,M}$ für den Übergang von den Normalbedingungen (T_0, p_0) auf die Temperatur- und Druckwerte am Instrumentenstandpunkt (T_1, p_1) ;
- b) die meteorologischen Zusatzkorrektion $v_{R,1}$ für den Übergang auf n_L von den meteorologischen Werten am Instrumentenstandpunkt (T_1, p_1) auf repräsentative Werte für den gesamten Lichtweg (T_R, p_R, e_R) ;
- c) die Korrektion $v_{C,1}$ auf Cavity-Temperatur, d. h. den Übergang für n_M von der Temperatur T_1 am Instrumentenstandpunkt auf die Temperatur T_C in der Cavity. Diese Korrektion darf nicht vernachlässigt werden, da immer wieder, variierend mit der Außentemperatur oder der Ventilation, Abweichungen bis zu 2°C zwischen T_1 und T_C festgestellt werden.

Nach *SCHNÄDELBACH* (1981, Gleichung (23)) gilt für die einzelnen Korrekturen

$$v_{L,M} = \left(196,81 - \frac{216,71}{1 + \alpha T_1} \frac{p_1}{760} \right) 10^{-7} \quad (16a)$$

$$v_{R,1} = \left(\frac{11,33}{(1 + \alpha T_1)^2} \frac{p_1}{760} \Delta T - \frac{4,07}{1 + \alpha T_1} \Delta p + \frac{0,55}{1 + \alpha T_R} e_R \right) 10^{-7} \quad (16b)$$

$$v_{C,1} = - \frac{10,54}{(1 + \alpha T_1)^2} \frac{p_1}{760} \Delta T_C 10^{-7} \quad (16c)$$

mit

$$\alpha = 0,003661$$

$$\Delta T = T_R - T_1, \Delta p = p_R - p_1,$$

$$\Delta T_C = T_C - T_1.$$

Um die Wirkung der Korrekturen abzuschätzen, betrachten wir in der Nähe der Normalbedingungen ihre Variation mit Änderungen der meteorologischen Daten. Die Differentiation von (16a) ergibt

$$\frac{ds}{s} 10^{-7} = dv_{L,M} = 0,69 dT - 0,27 dp, \quad (17)$$

woraus sich jeweils Entfernungsänderungen von 10^{-6} für $dT = 15^\circ\text{C}$ und $dp = 38 \text{ Torr}$ ergeben. Damit ist dieser Quotient, wie beabsichtigt, weitgehend unabhängig von Variationen der meteorologischen Parameter.

Für die Abhängigkeit der anderen Korrekturen gelten die bekannten Werte für die Brechungsindizes n_L und n_M , d. h.

$$\frac{ds}{s} = dv_{R,1} = dn_L = 10^{-6} \text{ für } \begin{cases} d(\Delta T) \cong 1^\circ\text{C} \\ d(\Delta p) \cong 3\text{Torr} \\ de \cong 20\text{Torr} \end{cases} \quad (18)$$

$$\frac{ds}{s} = dv_{C,1} = dn_M = 10^{-6} \text{ für } d(\Delta T_C) \cong 1^\circ\text{C} \quad (19)$$

Bereits FROOME (1971) hat auf die Korrekturen $v_{L,M}$ und $v_{R,1}$ hingewiesen, die nur überflüssig werden, wenn in der Nähe der Normalbedingungen gemessen wird ($v_{L,M} \Rightarrow 0$) und durch eine sehr homogene Atmosphäre zwischen Stand- und Zielpunkt ($\Delta T = \Delta p = 0$) die meteorologische Zusatzkorrektur $v_{R,1}$ entfallen kann.

Schließlich ist sorgfältig darauf zu achten, daß die Cavity im Inneren wirklich trocken ist, d. h. das Gel einwandfrei arbeitet. Im anderen Fall wäre der bedeutende Feuchteeinfluß auf n_M zu berücksichtigen!

3.2 Dimensionen der Cavity

Um die Konstanz von $F(1)$ zu beurteilen, müssen die Dimensionen der Standard-Cavity bekannt sein. Diese Dimensionen sind nicht direkt meßbar, sondern

lassen sich nur, ausgehend von Gleichung (7), über das Verhalten der Meßfrequenz f_M beurteilen.

Damit ist das Problem der Frequenzmessung aufgeworfen, wofür im wesentlichen zwei Verfahren bekannt sind:

- eine "oszillographische" Methode (Firma Kern, *MEIER - HIRMER* (1975)). Bei ihr werden die im Mekometer erzeugten Frequenzen mit einer von einem Frequenzgenerator erzeugten Frequenz f' gesampelt, und zwar wird f' so lange verändert, bis $f' - f_1 = f_2 - f'$ und damit $f' = f_M$ ist. Dieser Vergleich wird optisch an einem Oszillographen beobachtet. Wegen der Kürze der Frequenzimpulse ist dieses Verfahren allerdings nur für den Meßbereich I (10 - 500 m) geeignet.
- Eine "Gate" -Methode (*HIRSCH, NGUYEN* (1982), *MAURER, SCHNÄDELBACH* (1978), *MAURER* (1983)). Hier wird im wesentlichen mit einem Zähler gearbeitet, der so geschaltet wird, daß nur in den Zeiten vorhandener Frequenz gezählt wird. Dieses Verfahren ist nach einigen Modifikationen für beide Meßbereiche des Mekometers geeignet, wie auch für genauere Untersuchungen zum Frequenzverhalten selbst (s. *MAURER* (1983)).

Die Messungen an der Cavity führten zu folgenden Ergebnissen:

a) Druckverhalten

Übereinstimmend wurde immer festgestellt, daß die Cavity druckstabil ist (z. B. *MEIER - HIRMER* (1975)). Luftdruckänderungen der Atmosphäre werden also auf f_M weitergegeben. Die Luftdruckkompensation ist vollständig erreicht.

b) Temperaturverhalten

Zumindest die Quarz-Cavity, aber auch die neue Invar-Cavity, ist nicht vollständig invariant gegenüber Temperaturänderungen. Die Herstellerfirma liefert daher Korrekturkurven für Frequenzabweichungen als Funktion der Temperatur. Da diese Abhängigkeit existiert, sind die folgenden Erscheinungen zu berücksichtigen:

- Akklimatisierung des Instruments auf die Außentemperatur, d. h. Einhalten von Wartezeiten bis sich zwischen der Temperatur der Cavity und der Außentemperatur ein stabiles Verhältnis eingestellt hat. *MEIER - HIRMER* (1975) gibt hierfür Erfahrungswerte an: bei einer Ab-

kühlung ca. 5 min/°C bzw. bei einer Erwärmung ca. 7 min/°C.

- Aufheizen der Cavity, d. h. Temperaturänderungen bei längerer Betriebsdauer im Sinne eines Einlaufeffektes. Dabei können Beträge bis ca. 2 ppm erreicht werden.

Die beiden Einflüsse überlagern sich natürlich, auch können zusätzlich noch Einwirkungen aus dem Warmlaufen der Elektronik selbst vorhanden sein.

3.3 Meßfrequenz f_M

a) Zusätzlich zu den oben diskutierten Temperatureinflüssen der Cavity werden temperaturunabhängige Frequenzänderungen beobachtet, die den Frequenzstand ändern - evtl. auch sprunghaft mit Werten bis zu 10^{-5} - oder auch den Charakter von Frequenzdriften haben. Gerade diese Verschiebungen lassen regelmäßige Kontrollmessungen sehr empfehlenswert erscheinen.

b) Änderung der Frequenz innerhalb der Impulse.

Mit der oben genannten "Gate - Methode" ist es möglich geworden, das Verhalten der Meßfrequenz innerhalb der Frequenzimpulse von ca. 40 μ s zu untersuchen (Abb. 3). Die Frequenz zeigt danach einen Einschwingvorgang, durch den plötzlichen Frequenzsprung auf 500 MHz verursacht, nach

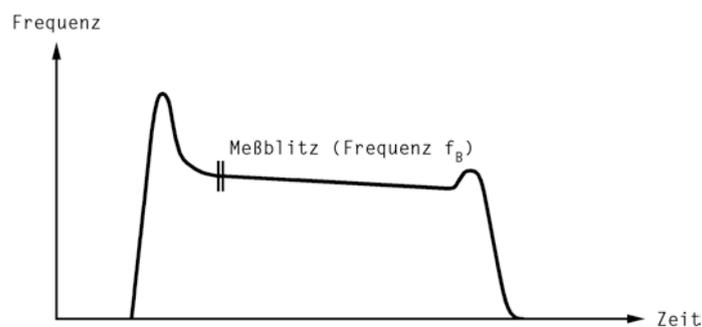


Abb. 3 Verteilung der Meßfrequenz innerhalb des Frequenzimpulses

dessen grundsätzlichem Abklingen der Meßblitz mit der Frequenz f_B moduliert wird. Nun bleibt aber anschließend die Referenzfrequenz des Instrumentes bis zum Phasenabgleich mit dem reflektierten Signal nicht konstant. Daraus resultiert eine Phasenverschiebung, deren Einfluß als "Phasennullpunktsfehler" korrigiert werden muß. Nach den bisherigen

Erfahrungen an der TU München ist dieser Vorgang für jedes Mekometer verschieden, sein Einfluß ist variabel mit der Streckenlänge und erreicht bei den bisher untersuchten Geräten bis zu 2 ppm (s. MAURER (1983)).

3.4 Weitere Einflüsse

a) Additionskonstante

Es wird immer wieder die Frage aufgeworfen, ob die Additionskonstante für die Meßbereiche I und II gleich sind. Da der Unterschied zwischen beiden Meßbereichen nur in den unterschiedlichen Frequenzablagen Δf liegt, ist eine Begründung für eine Differenz schwer zu finden. Sie ist zudem auch meßtechnisch schwer nachzuweisen und bisher auch noch nicht signifikant nachgewiesen worden. Damit muß wohl z. Zt. die Gleichheit der Konstanten angenommen werden.

b) Periodische Fehler

In HÜBNER (1983) wird erstmals über die Bestimmung eines periodischen Fehlers des Mekometers berichtet. Als Ursache kommen nur Unvollkommenheiten bei der optisch-mechanischen Lichtwegveränderung in Frage. Festgestellt wird ein Maßstabsfehler von 0,3 mm zwischen dem Fahrweg der Prismen und der Anzeige sowie periodische Fehler mit der Amplitude von ca. $\pm 0,1$ mm. Bei normalen Anwendungen werden diese Einflüsse wohl nur sehr selten zu berücksichtigen sein.

c) Wellenlänge der Xenongaslampe

Vom Herstellerwerk wird für die Trägerwelle λ - das Licht der Blitzlampe - eine Wellenlänge von 485 nm angegeben. Diese Wellenlänge muß die am Photomultiplier letztlich wirksame Wellenlänge sein, mit der der Phasenabgleich beurteilt wird. Nachdem nun durch Differentiation von n_L nach λ

$$dn_L = -\frac{97.7}{\lambda^3} 10^{-7} d\lambda \quad (\lambda, d\lambda \text{ in } \mu\text{m}) \quad (20)$$

folgt, somit eine Änderung der Wellenlänge des Trägers von 12 nm einen Einfluß von 10^{-6} hat, ist es gerechtfertigt, das Spektrum der Xenongaslampe zu untersuchen. Das Spektrum hat das Aussehen der Abb. 4 mit zwei Spitzen im

Bereich 485 nm. Dieser Wert als wirksame Wellenlänge ließ sich für das Mekometer der TU München aus Vergleichsmessungen mit schmalen Filtern auf der

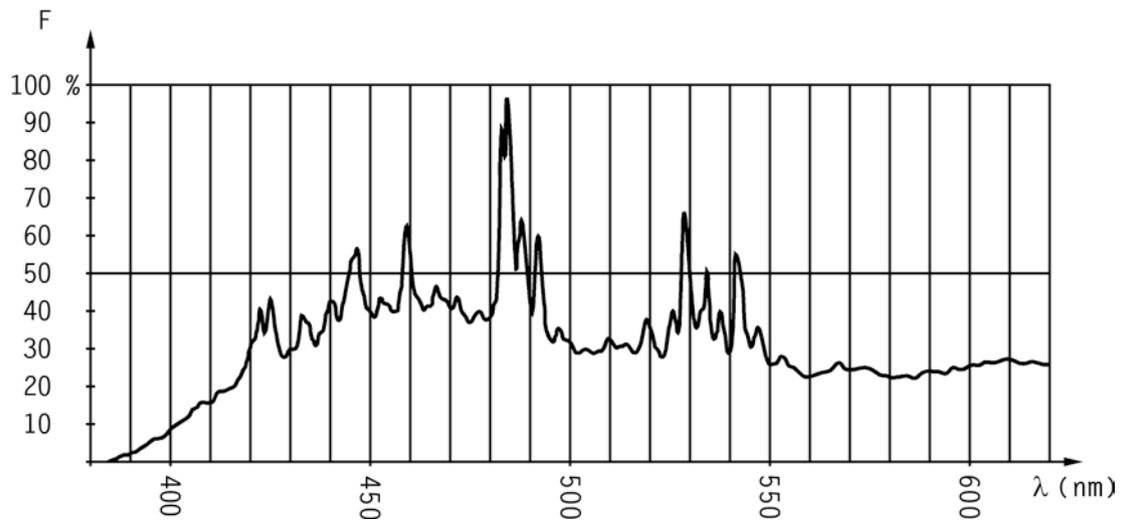


Abb. 4 Spektrale Intensitätsverteilung des Meßblitzes

Normalstrecke im Ebersberger Forst mit guter Genauigkeit bestätigen. In *HÜBNER* (1983) wird darüber hinaus über erfolgreiche Versuche berichtet, das breite Spektrum der Xenonblitzlampe für Entfernungsmessungen mit zwei verschiedenen Wellenlängen zu nutzen, im blauen und roten Bereich.

4. FOLGERUNGEN FÜR DIE PRAXIS

Aus den genannten Eigenschaften des Mekometers lassen sich für genaue Messungen mit diesem Instrument die folgenden Konsequenzen ziehen:

- Das Mekometer sollte sorgfältig kalibriert werden, um seine Eigenschaften zu kennen und ggf. notwendige Korrekturwerte zu besitzen.

Diese Regel gilt im übrigen für alle Präzisionsinstrumente.

- Die aktuellen Entfernungsmessungen sollten durch Frequenzmessungen und/oder Messungen auf Vergleichsstrecken eingerahmt werden. Damit ist eine Aussage über das Sollverhalten des Instruments möglich wie auch eine Interpolation auf Zwischenwerte. Voraussetzung für eine solche Interpolation ist allerdings ein Sollverhalten des Mekometers.

Auch diese Regel, regelmäßige Kontrollen, gilt für alle Präzisionsmessungen.

- Da das Sollverhalten des Mekometers ME 3000 nach unseren Erfahrungen nicht automatisch gegeben ist, werden an der TU München - wie auch an der TU Berlin - alle aktuellen Entfernungsmessungen durch simultane Frequenzmessungen komplettiert. Der Vorteil ist, daß dann keine Korrekturen wegen irgendwelcher Cavity-Eigenschaften notwendig sind, da nunmehr f_M und aus Temperatur- und Druckmessungen auch n_L direkt bestimmt werden. Allerdings ist damit auch die ursprüngliche Zielsetzung für das Mekometer - die Benutzung einer Kompensation - verlassen, da nunmehr die ursprüngliche Bestimmungsgleichung (5) für die Ableitung einer Distanz direkt ausgewertet wird.

LITERATUR

- BRADSELL, R. H.: *The electronic principles of the Mekometer III*. Survey Review, 112 - 118, 1971
- FROOME, K. D.: *EDM with sub-millimetre resolution*. Survey Review, 93 - 112, 1971
- HIRSCH, O., und T. NGUYEN: *Ein modifiziertes und objektiviertes Meßverfahren mit dem Kern-Mekometer*. Allgemeine Vermessungsnachrichten 90, 45 - 54, 1982
- HÜBNER, W.: *Streckenmessung mit dem Mekometer ME 3000 nach dem Zweifarbenprinzip*. Seminar über Elektrooptische Präzisionsstreckenmessung, HSBw, München, 23.9.1983
- KERNER, M.: *Meßprinzip und instrumenteller Aufbau des Mekometers*. VI. Intern. Kurs f. Ingenieurmessungen hoher Präzision. Graz, 1970
- MAURER, W., und K. SCHNÄDELBACH: *Ein neues Frequenzmeßverfahren für das Mekometer ME 3000*. Allgemeine Vermessungsnachrichten 85, 350 - 355, 1978
- MAURER, W.: *Zum Frequenzverhalten des Mekometers ME 3000*. Seminar über Elektrooptische Präzisionsstreckenmessung, HSBw, München, 23.9.1983
- MEIER-HIRMER, B.: *Präzisionsstreckenmessung mit dem Mekometer ME 3000*. Allgemeine Vermessungsnachrichten 82, 41 - 59, 1975
- MEIER-HIRMER, B.: *Frequenzuntersuchungen am Mekometer ME 3000*. Allgemeine Vermessungsnachrichten 82, 373 - 387, 1975
- SCHNÄDELBACH, K.: *Zur Reduktion von Entfernungsmessungen mit dem Mekometer ME 3000*. Allgemeine Vermessungsnachrichten 88, 145 - 149, 1981

Zum Frequenzverhalten des Mekometers ME 3000

von

Wolfgang Maurer
Geodätisches Institut
Technische Universität München
Arcisstr. 21
8000 München 2
Bundesrepublik Deutschland

ZUSAMMENFASSUNG

Das Auflösungsvermögen und die Meßgenauigkeit des an der Technischen Universität München konzipierten automatischen Frequenzmeßplatzes für das Mekometer ME 3000 wurde verbessert. Seine Arbeitsweise beruht weiterhin auf dem "Gate-Verfahren". Durch eine Steigerung der Meßgenauigkeit kann nun die auf die Lichtblitze aufmodulierte Meßfrequenz bestimmt werden. Der Zeitaufwand für die Frequenzbestimmung beträgt nur noch ca. 40 s und entspricht damit der Meßzeit einer simultanen Streckenmessung. Mit der Frequenzmeßanlage wurden erstmals innerhalb der einzelnen "Frequenzpakete" Variationen der Meßfrequenz nachgewiesen. Der Einfluß auf die gemessenen Entfernungen kann bis zu 8 mm und mehr betragen und muß als entfernungsabhängige Korrektur ("Phasennullpunktsfehler") berücksichtigt werden.

ABSTRACT

Resolution and precision of the automatic ME 3000 Mekometer frequency test desk developed at the Technical University of Munich has been further improved. Its mode of working is still based on the "Gate-Method". With an increased precision it is now possible to determine the measuring frequency modulated upon the light-flashes. Time necessary for the frequency analysis is down to approximately 40 seconds and, thus, corresponds to the time requirements for a simultaneous distance measurement. With the aid of the frequency measuring device variations of the measuring frequency within the respective "frequency-bursts" have been detected for the first time. As the effects of these variations with respect to the measured distances can add up to 8 mm or more a distance-dependent correction ("phase-zero-correction") has to be introduced.

1. EINFÜHRUNG

In zahlreichen Meßkampagnen hat sich der im Jahre 1978 von *Maurer, Schnädelbach* vorgestellte Frequenzmeßplatz bewährt. Er ermöglicht eine nahezu automatische Frequenzbestimmung im Feld gleichzeitig zur Streckenmessung und benötigt zur Bedienung nur eine kurze Einweisung und keinen geübten Beobachter. Lediglich die für hohe relative Frequenzgenauigkeiten von $2 - 3 \cdot 10^{-7}$ erforderliche lange Meßdauer von ca. 5 min. verhinderte eine schneller durchzuführende Streckenmessung. Dieser Nachteil wurde jedoch durch die zwangsläufig zahlreicher durchgeführten Streckenbeobachtungen wieder abgeschwächt, so daß anfangs eine Verbesserung des Meßverfahrens nicht unbedingt notwendig erschien.

Bei vergleichenden Frequenzmessungen mit verschiedenen Frequenzmeßeinrichtungen ergaben sich für verschiedene Mekometer Übereinstimmungen innerhalb der Meßgenauigkeiten aber auch teilweise Differenzen von 1000 - 1500 Hz. Diese Abweichungen waren für einige Geräte spezifisch und konnten nach zusätzlichen Untersuchungen, die von der *Fa. Kern* tatkräftig unterstützt wurden, signifikant nachgewiesen werden. Die Ursache der Frequenzunterschiede konnte schließlich in einer zeitlich verschobenen Frequenzmessung des oszillographischen und des von *Maurer, Schnädelbach (1978)* beschriebenen Gate-Meßverfahrens aufgedeckt werden.

Im Gegensatz zum oszillographischen Verfahren, wo nach einer festen Verzögerungszeit von etwa 5 - 10 μs des 40 μs -langen Frequenzsignals mit der Messung begonnen und anschließend über die gesamte Länge "optisch" integriert wird, ist bei der Gate-Methode der Anfangs- und Endpunkt der Frequenzmessung frei wählbar. Geschieht die Beobachtung mit den zwei Meßanordnungen nicht synchron, so ergeben sich für einige Mekometer unterschiedliche Frequenzwerte. Dies kann nur auf inhomogene Frequenzverhältnisse innerhalb der zur Auswertung verfügbaren Frequenzpakete (40 μs) zurückgeführt werden.

2. MODIFIZIERTER FREQUENZMESSPLATZ FÜR DAS MEKOMETER ME 3000

Da die vorhandene Meßanordnung wegen der langen Beobachtungszeiten nur bedingt zur notwendigen Aufnahme des Frequenzverhaltens (Spektrum) innerhalb der 40 μs einsetzbar war, mußte der Meßplatz verbessert und ausgebaut wer-

den. Dabei sollten folgende Bedingungen erfüllt werden:

- a) Verwendung möglichst aller bereits vorhandenen Bauteile
- b) Beibehaltung des automatisierten Beobachtungsverfahrens
- c) Bedienung auch weiterhin durch ungeübtes Personal
- d) Möglichkeit eines wiederum uneingeschränkten Feldeinsatzes
- e) Steigerung der Genauigkeit der Frequenzmessung
- f) Verkürzung der Meßzeit
- g) Reduzierung der zur Messung verwendeten Signalausschnitte von ca. 30 μ s auf 1 - 2 μ s, um die Frequenz während der Blitzdauer von etwa 1,5 μ s (Blitzfrequenz) bestimmen zu können.

Diese an den neuen Frequenzmeßplatz gestellten Bedingungen konnten durch ein zusätzliches Bauteil erfüllt werden. Es ist als Zählereinschub ausgebildet und vergrößert somit den instrumentellen Meßaufwand nicht, da es außerdem gelang, den bei der Gate-Methode notwendigen Oszillographen und Pulsgenerator durch einen kleinen, ins Mekometer fest eingebauten Elektronikteil zu ersetzen. Das Instrumentarium umfaßt deshalb nur noch den Frequenzzähler HP 5345A und das Mekometer selbst, was den Feldeinsatz wesentlich vereinfacht. Durch die Reduzierung der Frequenzmessung auf Ausschnitte von 1 - 2 μ s ist nun die Aufnahme eines Frequenzspektrums und ein signifikanter Nachweis inhomogener Frequenzverhältnisse innerhalb der einzelnen "Frequenzpakete" gegeben.

2.1 Funktionsprinzip

Das Grundprinzip der 1978 vorgestellten Meßanordnung mit seiner externen Zählersteuerung blieb auch bei der neuen Anlage unverändert. Allerdings wurde die umfangreiche "Gate-Steuerung" über die Darstellung des Frequenzsignals auf einem Oszillographen mit der Ansteuerung eines Pulsgenerators, der dann letztlich den Arbeitstakt des Frequenzzählers vorgab, wesentlich vereinfacht. Bei der modifizierten Beobachtungsanordnung übernimmt eine im Mekometer eingebaute Elektronik die Steuerung des Zählers. Über ein Glasfaserkabel mit dem Durchmesser von ca. 2 mm wird das Licht der Blitzlampe in den oberen Teil des Mekometers auf eine Photodiode übertragen, elektronisch aufbereitet und als Rechteckimpuls über ein BNC-Kabel dem Frequenzzähler zur Verarbeitung zugeführt. Damit ist gewährleistet, daß die Frequenzmessung genau zum Zeitpunkt der Blitzerzeugung stattfindet und als Ergebnis die "Blitzfrequenz" erhalten wird. Auf einen direkten elektronischen Abgriff an der Mekometer-Elektronik wurde bewußt verzichtet, um diese

nicht zu belasten und u. U. zu stören oder zu beeinflussen.

Damit war eine Vereinfachung des Meßaufbaus erreicht, einige Quellen für Triggerfehler ausgeschlossen und die Möglichkeit der Frequenzmessung zur Zeit der für die Streckenmessung maßgebenden Modulation des Lichts gegeben. Die Bestimmung der Originalfrequenz des Mekometers von ca. 499,5 MHz hätte allerdings nun etwa 100 min. gedauert, was für den Einsatz im Feld und auch im Labor nicht mehr akzeptabel gewesen wäre. Deshalb mußte die Meßgenauigkeit der Frequenzanlage gesteigert werden.

Grundsätzlich kann bei sog. "Perioden-Zählern", die im Prinzip die Anzahl von Schwingungen pro Zeiteinheit messen, nach den Erläuterungen von *Hirsch u. Nguyen (1983)* sowie von *Maurer u. Schnädelbach (1978)* die Meßgenauigkeit auf zwei Wegen gesteigert werden:

- a) Erhöhung der Auflösengenauigkeit durch Verkleinern des Zeittaktes von 2 ns (HP 5345A) auf z.B. 20 ps (HP 5335A), oder
- b) Frequenzumformung der Mekometersignale von 499,5 MHz auf z.B. 9,5 MHz oder 0,5 MHz.

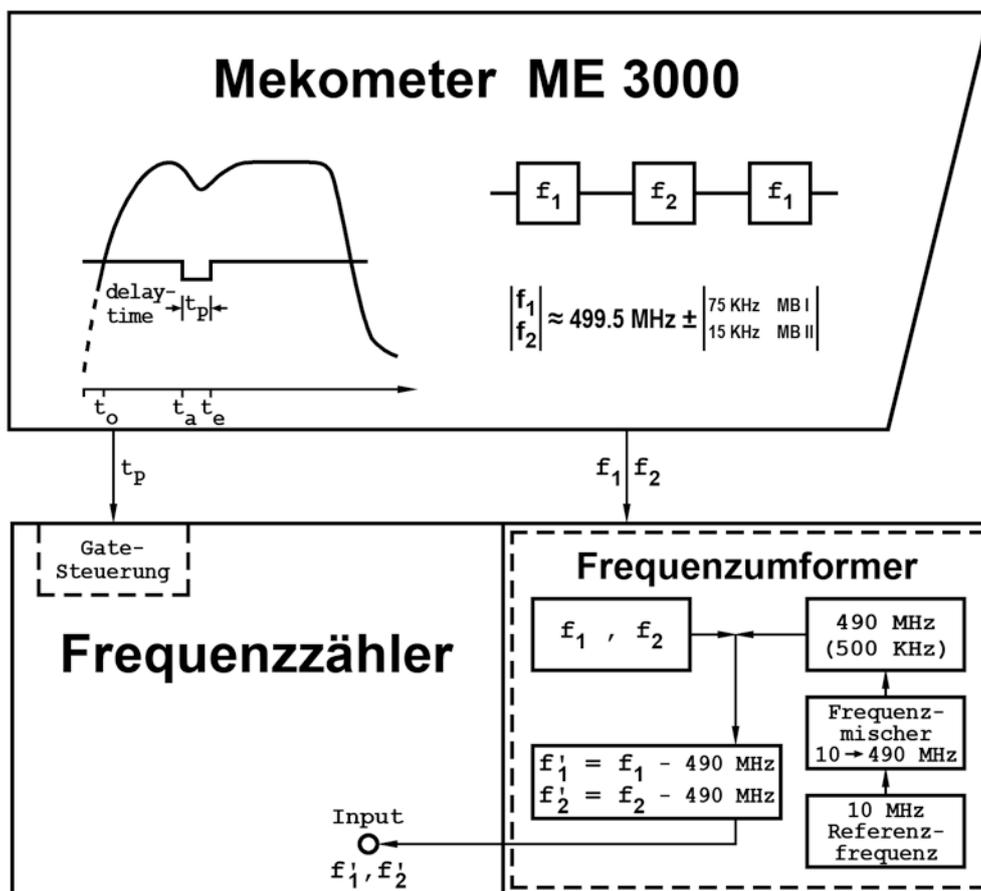


Abb. 1 Neuer modifizierter Frequenzmeßplatz

Obwohl die erste Lösung mit dem im Jahre 1981 auf den Markt gekommenen HP 5335A-Zähler sehr einfach gewesen wäre, konnte sie bisher wegen technischer Schwierigkeiten, die bei der vorliegenden speziellen gepulsten Frequenzmessung auftreten, nicht verwirklicht werden. Aus diesem Grunde wurde ein Frequenzumformer entwickelt und gebaut, mit dem die Originalfrequenzen von 499,5 MHz wahlweise auf 9,5 MHz oder 500 KHz reduziert werden können.

Ausgehend von dem 10 MHz Quarzoszillator, der zur Erzeugung von 500 MHz (= 2 ns-Zeittakt) im Frequenzzähler verwendet wird, werden zwei Frequenzen von 500 MHz und 490 MHz durch Frequenzmischung gebildet. Diese Methode hat gegenüber der einfacheren Vervielfachung (z.B. 10 MHz x 7 x 7) den Vorteil, daß dabei keine Phasensprünge auftreten und die Endfrequenz in reinerer Spektralform vorliegt. Nach Unterdrückung von nicht erwünschten Resonanzfrequenzen durch Filter auf Intensitäten, die der Zähler nicht mehr erkennen kann, wird in einem sog. Ringmischer die aufbereitete Frequenz von der Original-Mekometerfrequenz subtrahiert und dem Frequenzzähler zugeführt (Abb. 1).

2.2 Meßgenauigkeit

Durch die Transformation der Originalfrequenzen von 499,5 MHz auf 9,5 MHz oder 500 KHz konnte durch die gleichbleibende hohe Zeittaktgenauigkeit des Frequenzzählers eine wesentlich höhere Auflösungsgenauigkeit bei den einzelnen Frequenzbestimmungen erreicht werden. Die Verwendung eines sog. Periodenzählers und die von *Hewlett-Packard* eingehend beschriebenen Zählerspezifikationen des HP 5345A-Counters erlauben es nun, sowohl die gate-time von 1 s auf 10 ms und damit die Anzahl der Einzelmessungen zu verringern als auch gleichzeitig die Pulsbreite von 30 μ s bis auf 1 μ s zu reduzieren. Außerdem läßt sich die reine Meßzeit dabei in so starkem Maße verkürzen, daß sogar der Einsatz bei Servicearbeiten möglich ist.

Für die Genauigkeit der Frequenzmessung ist im wesentlichen der Zeitbasisfehler des Zählers und die Auflösungsgenauigkeit maßgebend, die sich hauptsächlich aus Triggerfehlern und dem "± 1 digit-Fehler" zusammensetzt. Der Fehler der Zeitbasis, der durch Alterung oder durch Temperaturabhängigkeiten des Quarzes verursacht werden kann, ruft proportionale Frequenzfehler hervor, die durch thermostatisierte und sehr stabile Referenz-Oszillatoren ver-

nachlässigbar klein gehalten werden können. Triggerfehler, die von der Form des Meßsignals abhängig sind, lassen sich durch geeignete Maßnahmen unterdrücken, so daß als Genauigkeit eines digitalen Meßsystems lediglich die Auflösung ± 1 Einheit (digit) der Anzeige angesehen werden darf. Dieser Fehler ist eine Funktion der Meßzeit. Für die Meßgenauigkeit des Frequenzzählers ist deshalb vor allem die Länge des zur Auswertung gelangenden Frequenzpaketes verantwortlich. Mit

s = Anzahl der Schwingungen pro Einzelmessung

n = Anzahl der zur Bildung der Mittelfrequenz verwendeten "Frequenzpakete" und

f = mittlere Frequenz

ergibt sich die Auflösungsgenauigkeit m_z des Frequenzzählers nach *Hewlett-packard* zu

$$m_z = \pm \frac{1 \text{ digit}}{s} \quad (2.1)$$

und damit eine theoretische Genauigkeit m'_f für die Mittelfrequenz f von

$$m'_f = \pm \frac{m_z}{\sqrt{n}} \cdot f \quad (2.2)$$

Bei dem beschriebenen modifizierten Frequenzmeßplatz ergeben sich demnach für eine Meßfrequenz von 9,5 MHz (500 KHz s. Abschn. 3.4) die in Tabelle 1 zusammengestellten Genauigkeitsmaße

Gate-time	Pulsbreite	Meßzeit	n	s	m'_f
[ms]	[µs]	[s]			[Hz]
10	1	100	10000	10	± 95
	2	50	5000	19	± 71
	3	34	3400	29	± 56
	4	25	2500	38	± 50
	5	20	2000	48	± 44
	10	10	1000	95	± 32
	15	7	670	142	± 26
	20	5	500	190	± 22
	25	4	400	238	± 20
	30	3	334	285	± 18
100	5	200	20000	48	± 14
	10	100	10000	95	± 10
	15	67	6700	142	± 8
	20	50	5000	190	± 7
	25	40	4000	238	± 6
	30	33	3334	285	± 6

Tab. 1 Theoretische Meßgenauigkeit für $f = 9,5$ MHz

Zur Überprüfung der oben berechneten theoretischen Genauigkeiten m'_f und zur gleichzeitigen Kalibrierung des 1978 von *Maurer, Schnädelbach* beschriebenen Zeitdefekts des Frequenzzählers wurde mit Hilfe eines Synthesizers der gesamte Meßablauf simuliert. Dabei wurden die theoretischen Genauigkeiten in keinem einzigen Fall überschritten.

Mit dem Ausbau des Frequenzmeßplatzes ist es gelungen, die Meßanordnung so zu verbessern, daß die Bestimmung der "Blitzfrequenz" bei einer tatsächlichen Blitzlänge von ca. 2,5 μs mit einer theoretischen Genauigkeit $m'_f < 1,5 \cdot 10^{-7}$ in einer Meßzeit von etwa 40 s durchzuführen ist.

2.3 Meßfehler

Die Besonderheit des Mekometers, in dem alternierend zwei Frequenzen

$$\begin{matrix} f_1 \\ f_2 \end{matrix} \approx 499,5 \text{ MHz} \begin{matrix} \pm 75 \text{ KHz im Meßbereich I} \\ \pm 15 \text{ KHz im Meßbereich II} \end{matrix}$$

erzeugt und auf die Lichtblitze aufmoduliert werden, kann einen systematischen Fehler hervorrufen, so daß die in Abschnitt 2.2 tabellierten Genauigkeiten nicht ohne weiteres eingehalten werden können. Wird vom Frequenzzähler zur Bildung der Mittelfrequenz f eine ungleiche Anzahl $n/2$ von Frequenzen f_1 und f_2 verwendet, so resultiert daraus, wie von *Maurer und Schnädelbach (1978)* beschrieben, ein Frequenzfehler

$$df = \pm \frac{f_1 - f_2}{2 \cdot n} \quad (2.3)$$

Dieser mögliche Meßfehler ist sowohl vom Meßbereich als auch von der Anzahl der zur Mittelung verwendeten Frequenzpakete (gate-time) abhängig (Tab. 2).

Gate-time	Meßbereich	Pulsbreite [μs]									
		1	2	3	4	5	10	15	20	25	30
[ms]		df [Hz]									
10	I	± 8	± 15	± 22	± 30	± 38	± 75	± 112	± 150	± 188	± 225
	II	± 2	± 3	± 4	± 6	± 8	± 15	± 22	± 30	± 38	± 45
100	I	± 1	± 2	± 2	± 3	± 4	± 8	± 11	± 15	± 19	± 22
	II	± 0	± 0	± 0	± 1	± 1	± 2	± 2	± 3	± 4	± 5

Tab. 2 Meßfehler df bei nicht exakter Mittelbildung

Die Werte in Tabelle 2 zeigen deutlich, daß bei fehlerhafter Mittelbildung bei der Modulationsfrequenz, besonders bei langen Pulsbreiten, die in Tab. 1 zusammengestellten Werte weit übertroffen werden können und die Meßgenauigkeit m'_f nicht ohne weiteres eingehalten werden kann.

Dieser Frequenzmeßfehler df kann allerdings völlig eliminiert werden, wenn vom Zähler zwei Frequenzmeßzyklen in ununterbrochener Reihenfolge ausgeführt werden. Dies ist möglich, weil die einzelnen Frequenzpakete bei einer Wiederholrate von 100 Hz einen zeitlichen Abstand von 10 ms besitzen und der Frequenzzähler so schnell ist, daß er bei Abschluß der ersten Messung bereits beim nächsten folgenden Signal mit der neuen Frequenzbestimmung beginnt. Der Mittelwert zweier aufeinanderfolgender Meßergebnisse ist demnach fehlerfrei. Streng gilt dies aber nur bei äußerst konstanten Pulsbreiten, die einen derartigen Ausgleich ungleicher Anzahl von Frequenzpaketen gestatten.

3. FREQUENZVERHALTEN DES MEKOMETERS ME 3000

Vergleichsmessungen mit mehreren Mekometern auf der Normalstrecke in Ebersberg in den Jahren 1978 - 1981 zeigten für die einzelnen Instrumente immer wieder signifikante Maßstabsfehler, die anfangs nicht zweifelsfrei gedeutet werden konnten. Sie lagen im Bereich von 2 - 6 ppm und konnten trotz sorgfältiger Instrumentenkalibrierungen im Labor und teilweise selbst durch Frequenzmessungen parallel zur Streckenbeobachtung nicht eliminiert werden. Erste Versuche mit der Frequenzmeßanordnung von 1978 ergaben schon einige Hinweise auf ein inhomogenes Frequenzverhalten innerhalb der einzelnen Frequenzpakete. Auf dem VIII. Internationalen Kurs für Ingenieurvermessung 1980 in Zürich wurde im Rahmen eines nicht veröffentlichten Kurzreferates darüber erstmals berichtet.

Mit dem modifizierten Frequenzmeßplatz ist es nun bei Meßzeiten t_M von $6 \text{ s} < t_M < 60 \text{ s}$ möglich, das Frequenzverhalten des Mekometers differenzierter zu untersuchen. Die relative Genauigkeit der Ergebnisse ist in jedem Fall besser als $2 \cdot 10^{-7}$.

3.1 Einlauf- und Akklimatisierungseffekt

Wird die Modulationsfrequenz nicht durch geeignete Maßnahmen wie Thermostatisierung oder temperaturabhängige Stromversorgung des Schwingkreises von vorneherein stabilisiert, so muß mit einer mehr oder weniger großen Einlaufzeit gerechnet werden. Auf Grund der Systemkonzeption reagiert das Mekometer auf Änderungen von Temperatur und Druck mit Frequenzverschiebungen. Zur Bestimmung des reinen Einlaufeffekts ist deshalb das Mekometer lange genug bei gleichbleibender Temperatur aufzustellen, damit sich alle Bauteile der Außentemperatur anpassen können. Wird das Gerät in diesem stabilen Zustand eingeschaltet, so erhöht sich die Temperatur an der Standard-Cavity auf Grund der Erwärmung der Elektronik, der Blitzlampe und in geringem Maß durch den Ventilator, der die Außenluft am Hohlraumresonator vorbeisaugt. In Abhängigkeit der Lufttemperatur wird sich nach einer gewissen Zeit dann an der Cavity ein Temperaturgleichgewicht einstellen und die Frequenz schließlich stabil bleiben. Je nach Mekometer ergeben sich die in Abb. 2 dargestellten Ergebnisse. Von besonderem Interesse sind dabei die unterschiedlich großen

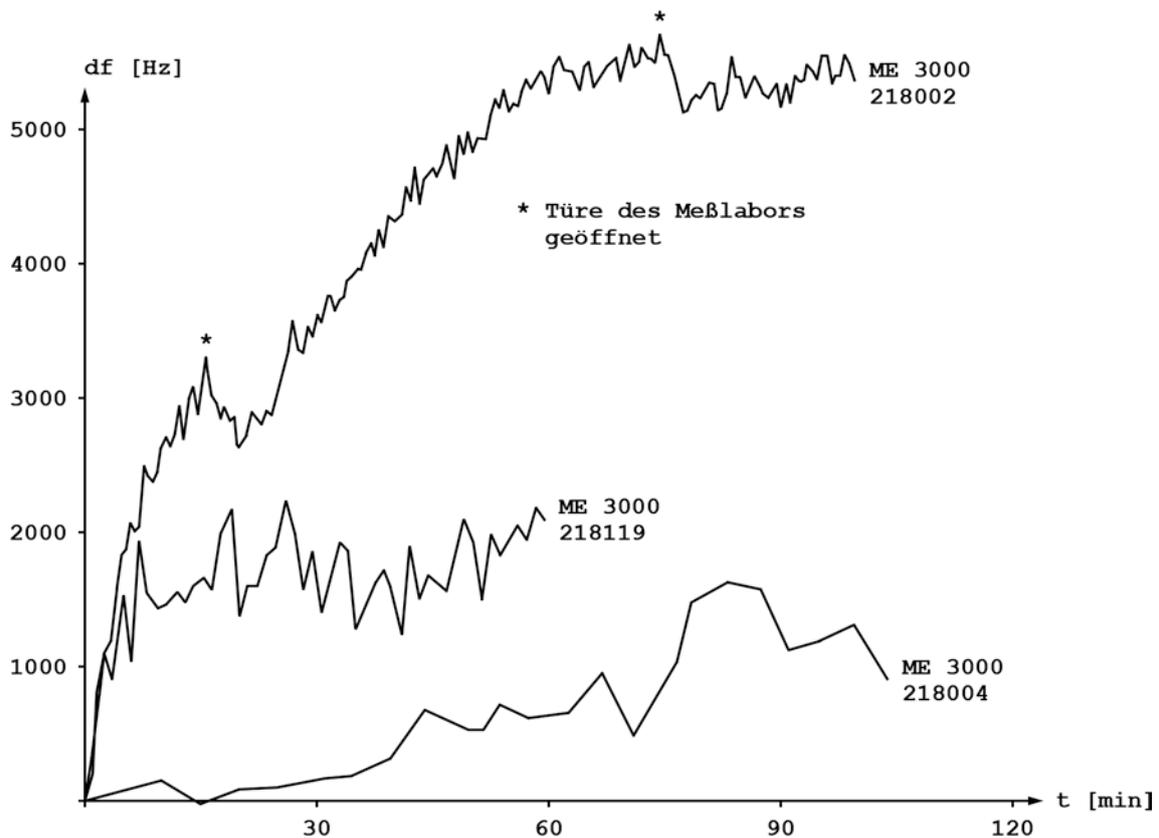


Abb. 2 Einlauf- und Akklimatisierungseffekt

kurzperiodischen Schwankungen (SNr. 218119), die auf verschiedene Materialien der Cavity zurückzuführen sind. Die neue Invar-Cavity hat demnach zu einer wesentlichen Beruhigung des Frequenzverlaufs (Abb. 2, SNr. 218002) beigetragen.

Ändert sich bei der Kalibrierung die Temperatur des Meßraumes, z.B. durch Öffnen der Türe, und wird dadurch an der Cavity Luft mit veränderter Temperatur vorbeigeführt, so reagiert die Cavity nach ihrer Sollfunktion unverzüglich (Abb. 2). Der dabei zu beobachtende Akklimatisierungseffekt, der auch beim Transport des Gerätes zum nächsten Standpunkt auftreten kann, beträgt ca. 5 min/°C. Danach kann wieder mit einem stabilen Frequenzverlauf gerechnet werden.

3.2 Kurzzeitstabilität der Modulationsfrequenz

In der Regel sind ungefähr 60 min. nach dem Einschalten des Gerätes die Akklimatisierungs- und Einlaufeffekte so weit abgeklungen, daß die Modulationsfrequenzen im Bereich ± 500 Hz stabil bleiben (Abb. 2). Streckenmessungen sind dann mit einer relativen Genauigkeit $m_s \leq \pm 1$ ppm durchführbar. Sind höhere Genauigkeiten gefordert, so müssen u.U. Restfehler rechnerisch berücksichtigt werden, oder es sind Distanz- und Frequenzmessung parallel durchzuführen. Im letzteren Fall können die Beobachtungen bereits dann begonnen werden, wenn ein einwandfreies "Tuning" möglich ist. Dies ist in der Regel nach etwa 30 - 45 min. der Fall.

Frequenzkalibrierungen nach einer Laufzeit von 4 - 5 Stunden und länger zeigen für ungestörte, gleichbleibende atmosphärische Bedingungen, wie sie im Labor herrschen, innerhalb kurzer Zeitspannen von ca. 10 min. relativ konstante Frequenzverhältnisse. Ein typischer Frequenzverlauf für die bisher

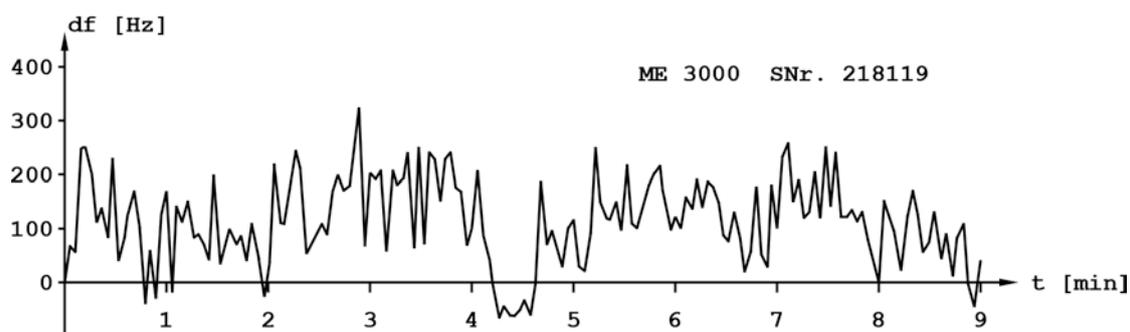


Abb. 3 Stabilität der Modulationsfrequenz im Meßlabor, MB 500 - 3000 m

am Geodätischen Institut der Technischen Universität München untersuchten Mekometer ist in Abb. 3 dargestellt. Die einzelnen Werte sind jeweils Mittelwerte aus 3300 Einzelmessungen und besitzen einen mittleren Fehler $m_f \approx \pm 10$ Hz. Nimmt man für die Beobachtung einer Strecke eine reine Meßzeit von ca. 1 min. (Feinmessung) an, so müßte nach Abb. 3 bei Vernachlässigung der Parallelfrequenzmessung nur mit einer Unsicherheit der Modulationsfrequenz von $m_f \leq \pm 200$ Hz gerechnet werden. Da bei Feldmessungen aber in der Regel gleichbleibende atmosphärische Bedingungen nicht angenommen werden dürfen und das Mekometer beim Transport im Gelände auch oftmals nicht sehr sanft befördert werden kann, ist die Stabilität der Frequenz zum Teil wesentlich geringer.

3.3 Langzeitstabilität der Modulationsfrequenz

Untersucht man die Stabilität der Modulationsfrequenz des Mekometers über einen längeren Zeitraum - dies kann von jedem Benutzer über die Kalibrierung der Frequenzen oder mit geringerer Genauigkeit über die Beobachtung von Soll- und Vergleichsstrecken durchgeführt werden -, so läßt sich jeweils der aktuelle "Frequenzstand" der Modulationsfrequenzen direkt oder indirekt über das Maßstabsverhalten bestimmen. Werden Frequenzmessungen bei verschiedenen Temperaturen wiederholt, so lassen sich aus dem Vergleich von Meßfrequenzen mit den für die jeweiligen atmosphärischen Bedingungen gültigen Sollfrequenzen nach *Meier-Hirmer (1975)* Restfehler berechnen, deren Ursache in einer nicht fehlerfreien Kompensation der Cavity bei verschiedenen Temperaturen liegt. Druckänderungen werden dagegen kompensiert. Man bekommt somit Korrekturwerte, wie sie in Abb. 4 dargestellt sind. Langfristig kann das Fre-

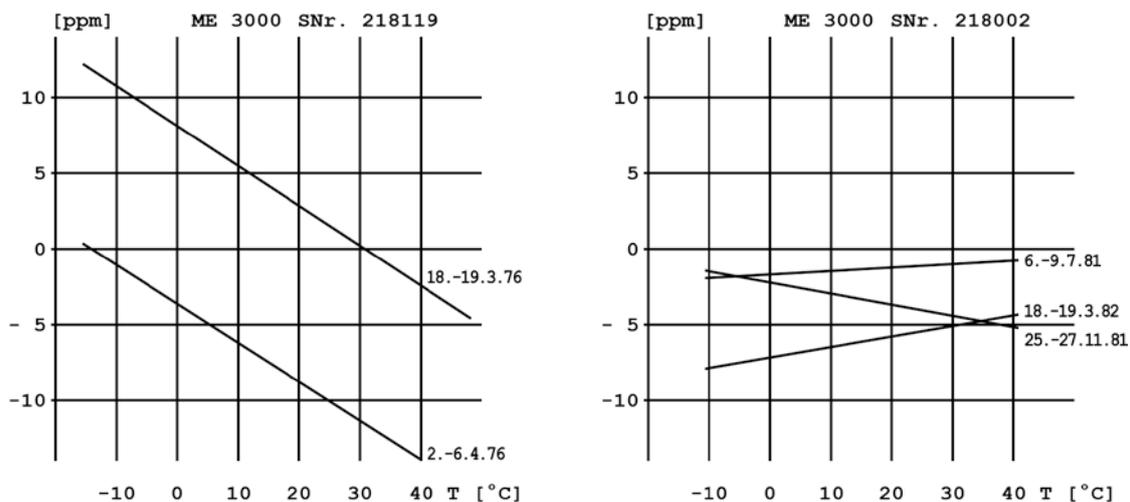


Abb. 4a,b Kompensationsfehler

quenzverhalten der Mekometer keineswegs als sehr konstant angesehen werden. Frequenzstandsprünge in 24 Stunden von mehr als 5 KHz (Abb. 4a) und Änderungen im Kompensationsverhalten selbst (Abb. 4b) innerhalb relativ kurzer Zeit lassen einen sinnvollen Gebrauch derartiger "Eichkurven" fraglich und eine Frequenzmessung parallel zur Streckenmessung als notwendig erscheinen. Sprunghafte Änderungen der Modulationsfrequenz um $df/f > 1 \cdot 10^{-5}$ sind aber nicht ständig zu befürchten, da es sich hierbei meist um einmalige oder seltene "Sprünge" handelt, die bisher auch nur bei den Hohlraumresonatoren älter Bauart bekannt geworden sind. Allerdings muß zumindest für letztere, innerhalb weniger aufeinanderfolgender Meßtage mit Differenzen im Frequenzstand von 1 - 7 ppm gerechnet werden (Tab. 3). Diese Größenordnungen können

df/f [ppm]	Datum	df/f [ppm]	Datum	df/f [ppm]	Datum
- 2.5	31. 3.1977	- 2.9	2.11.1977	- 7.4	12. 6.1978
- 5.0	3. 5.1977	- 2.3	3.11.1977	- 4.7	13. 6.1978
- 6.0	12. 5.1977	- 5.5	22.11.1977	- 4.5	14. 6.1978
- 4.9	29. 6.1977	- 5.2	23.11.1977	+ 2.1	14.12.1978
- 2.0	14. 7.1977	- 8.6	24.11.1977	- 0.1	9. 7.1979
- 5.5	20. 9.1977	- 8.1	1.12.1977	+ 0.4	20. 7.1979
- 4.5	23. 9.1977	- 2.7	12.12.1977	- 1.8	16. 8.1979
- 6.1	12.10.1977	- 1.6	21.12.1977	+ 7.5	17. 8.1979
- 6.6	14.10.1977	- 4.7	29. 3.1978	+ 5.6	18. 8.1979
- 8.1	19.10.1977	- 4.4	30. 3.1978	+ 5.3	19. 8.1979
- 8.8	20.10.1977	- 5.6	31. 3.1978	+ 1.5	21. 8.1979
- 7.5	21.10.1977	- 5.7	3. 4.1978	+ 0.6	25. 8.1979
- 5.9	25.10.1977	- 5.5	4. 4.1978	0	26. 8.1979
- 6.0	26.10.1977	- 6.2	5. 4.1978	+ 2.5	15.11.1979
- 6.8	27.10.1977	- 5.9	6. 4.1978		
- 7.2	28.10.1977	- 6.4	7. 4.1978		

Tab. 3 Kompensationsrestfehler für 0°C, MB I, ME 3000 SNr. 218119

in etwas vermindertem Ausmaß (Abb. 5) im Laufe zweier Meßtage ebenfalls auftreten. In diesem Fall ist dann die Durchführung von Frequenzmessungen

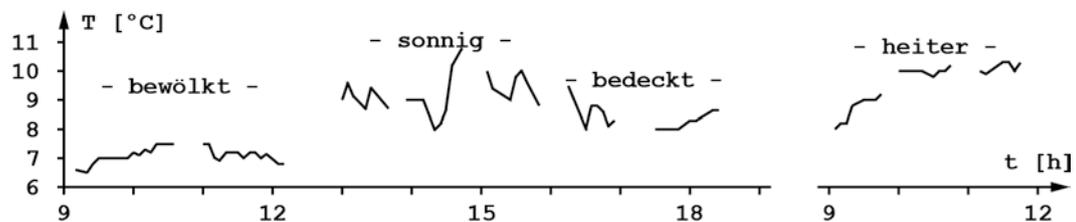


Abb. 5a Temperaturverlauf an zwei Meßtagen (10 Standpunkte)

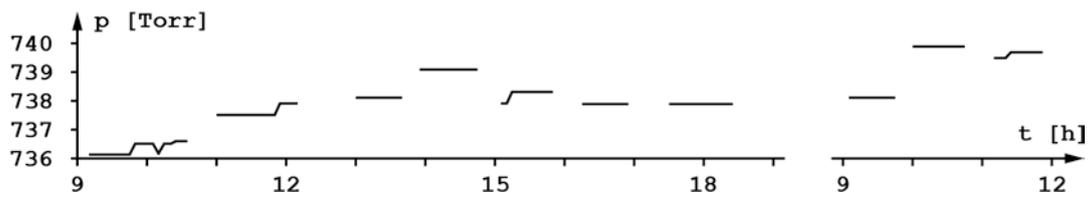


Abb. 5b Druckverlauf an zwei Meßtagen (10 Standpunkte)

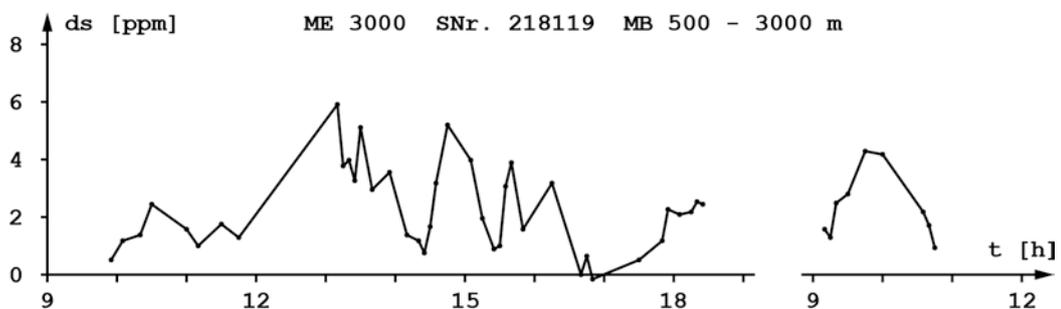
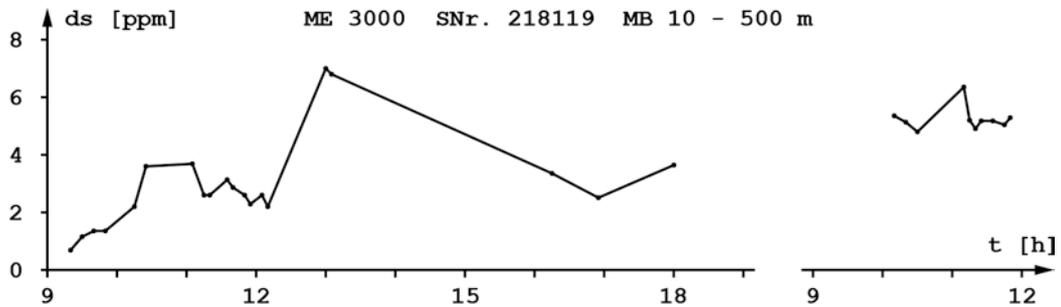


Abb. 5c Maßstabsfehler der Beobachtungen, wenn die aktuelle Modulationsfrequenz nicht parallel zur Streckenmessung erfaßt wird.

parallel zur Streckenbeobachtung unerlässlich, da ein derartig instabiles Frequenzverhalten durch Labormessungen nicht mehr korrigiert werden kann.

3.4 Frequenzspektrum

Mit dem neuen modifizierten Frequenzmeßplatz ist es nun erstmals gelungen, das Verhalten der Modulationsfrequenz innerhalb des 40 μ s-langen Signals eingehend zu untersuchen und den zeitlichen Verlauf zu bestimmen. Ergänzt man die von *Maurer, Schnädelbach (1978)* erläuterte Meßanordnung durch den in Abschnitt 2.1. beschriebenen Frequenzumformer, so erhält man den in Abb. 6 dargestellten Systemaufbau. Mit Hilfe des Oszilloskops lassen sich nun durch Veränderung der "delay-time" t_a an beliebigen Stellen innerhalb

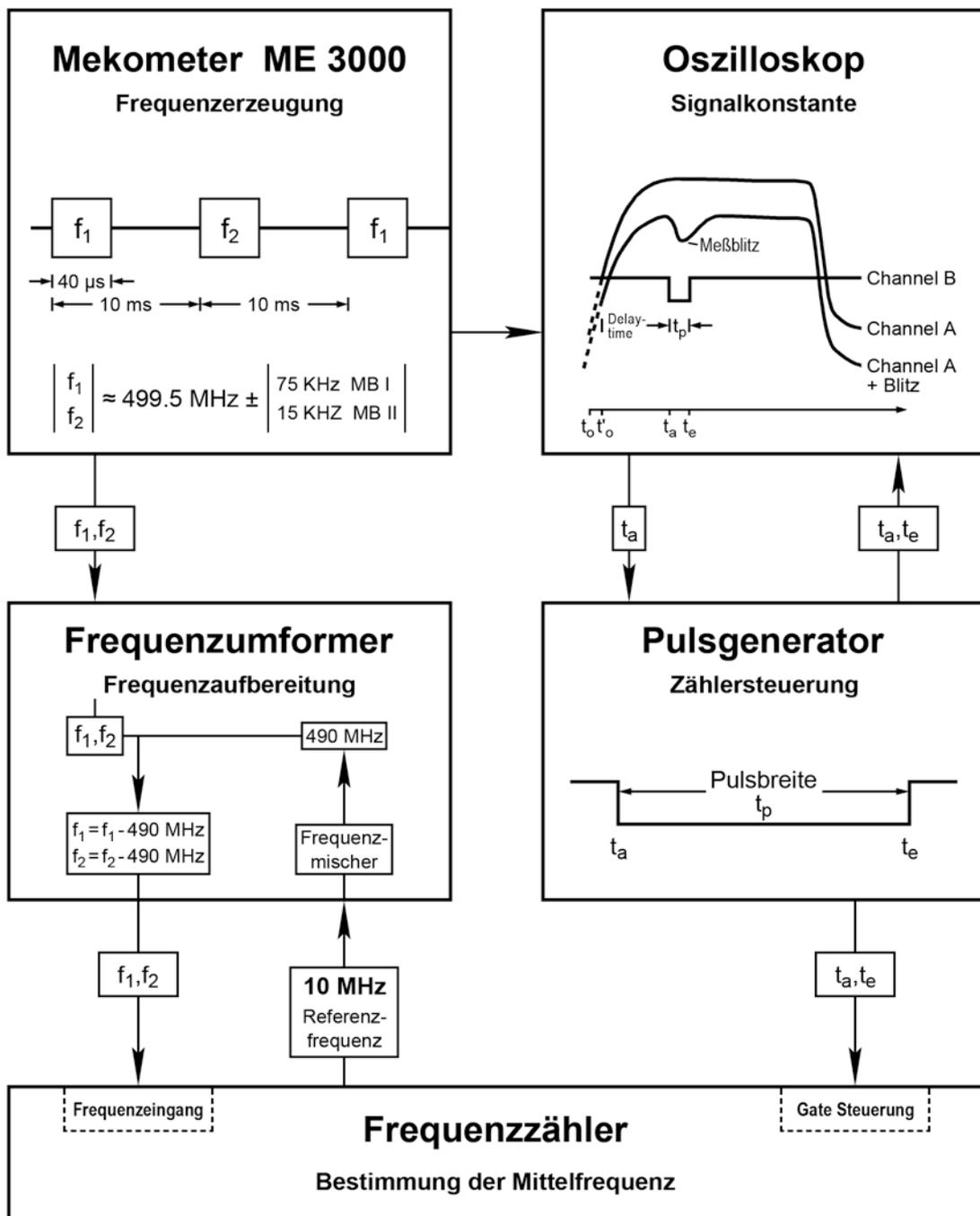


Abb. 6 Frequenzmeßplatz zur Bestimmung des Frequenzspektrums

des Signals die Frequenzen f_p messen. Von besonderer Bedeutung ist dabei die Differenz zwischen der "Blitzfrequenz" f_B und der jeweiligen "Meßfrequenz" f_p . Damit Frequenzänderungen während der Messung eliminiert werden können, wird gleichzeitig zur "Meßfrequenz" f_p mit Hilfe eines zweiten Zählers und der in Abschnitt 2.1. beschriebenen, vom Mekometer ausgehenden "Gate-Steuerung" die "Blitzfrequenz" f_B ebenfalls erfaßt. Untersucht man auf diese

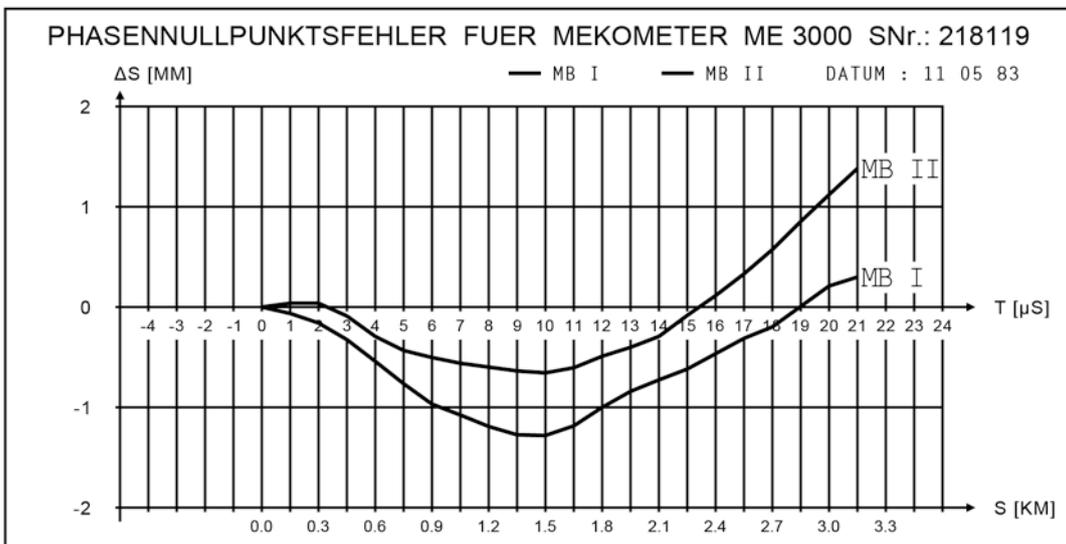
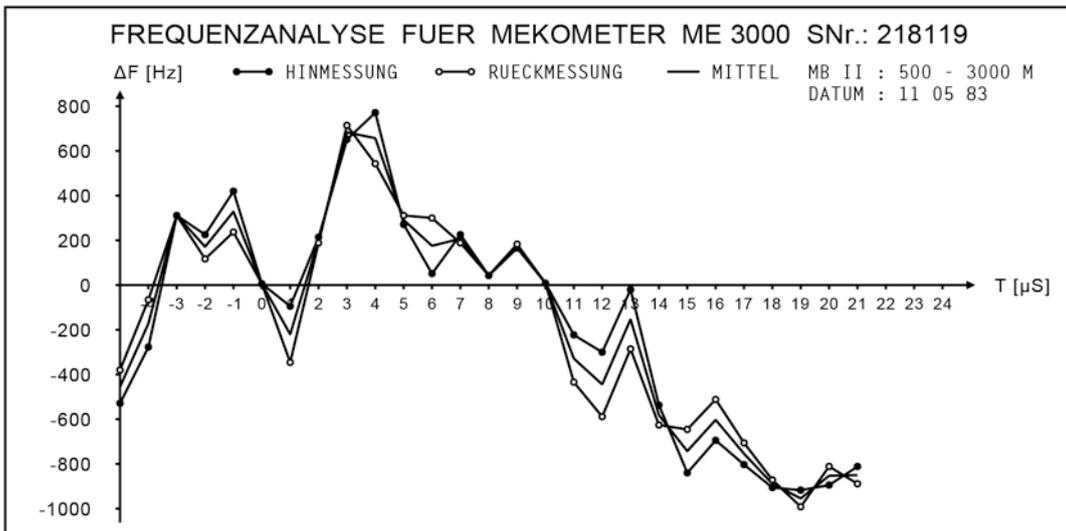
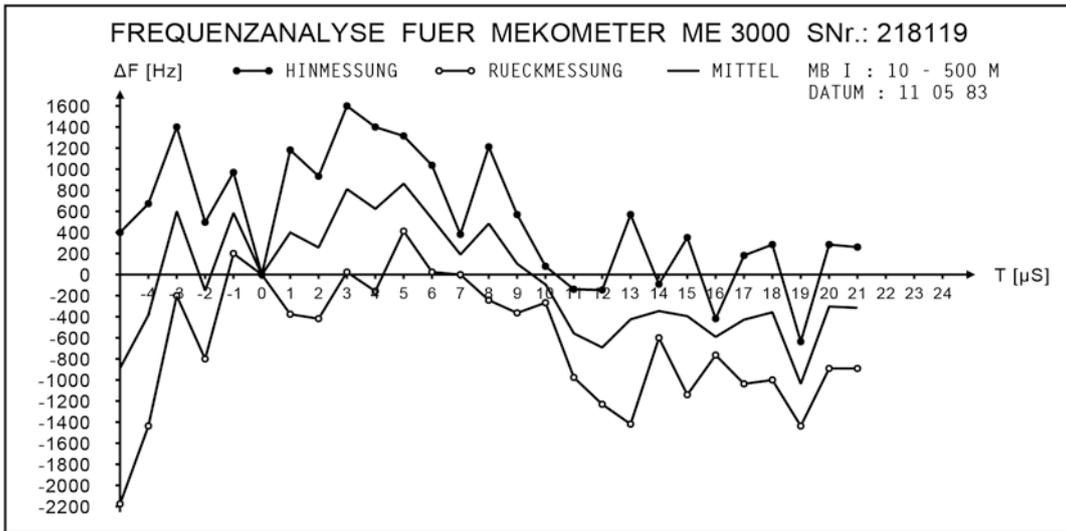


Abb. 7a Frequenzspektrum und Phasennullpunktsfehler (SNr. 218119)

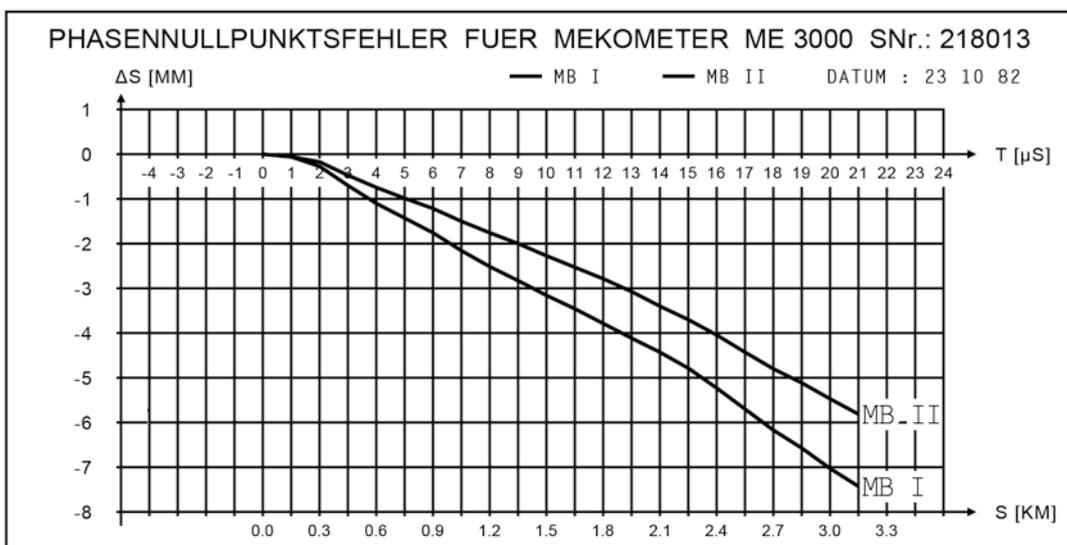
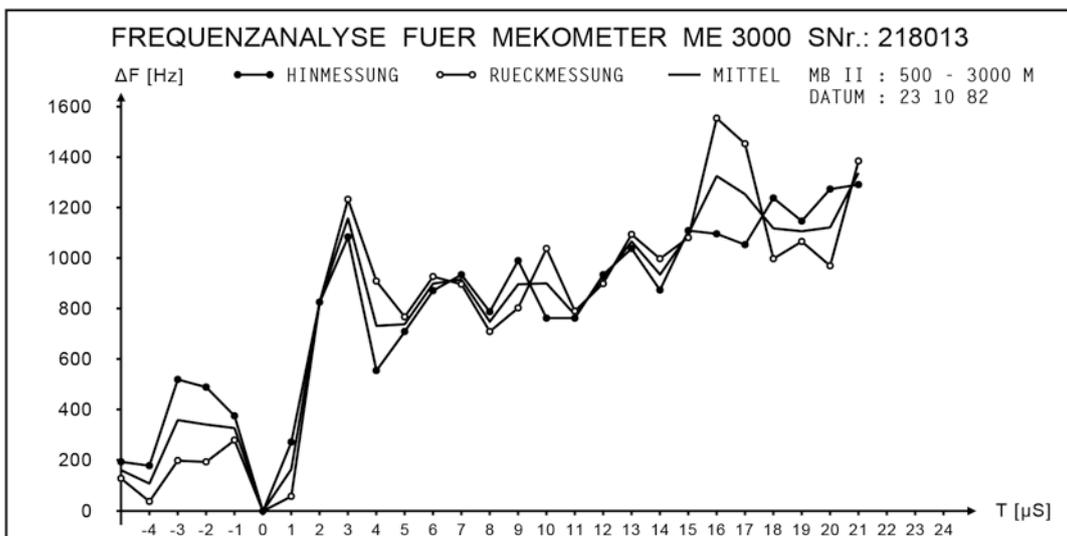
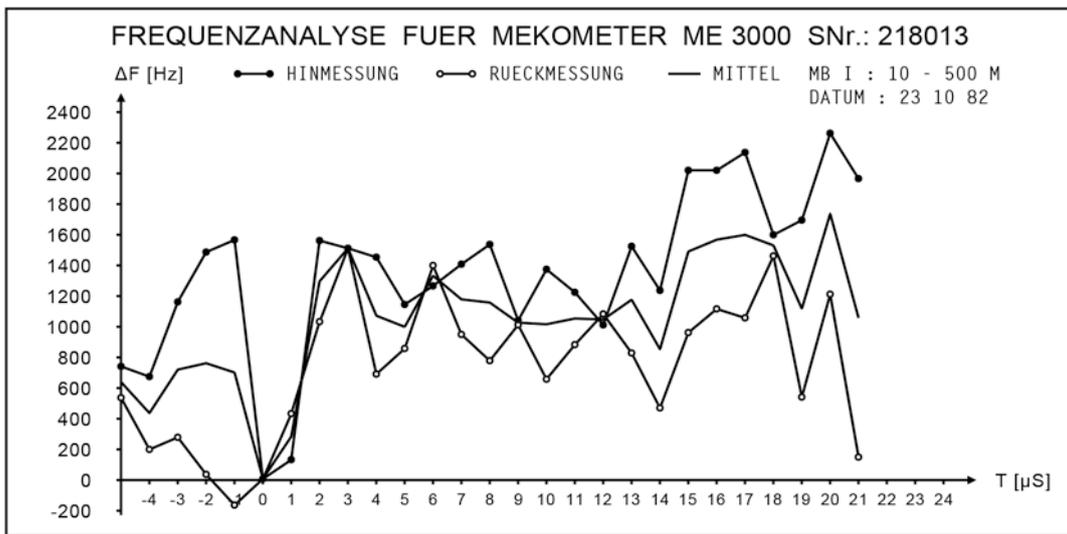


Abb. 7b Frequenzspektrum und Phasennullpunktsfehler (SNr. 218013)

Weise einen Zeitbereich $t_a - 5\mu\text{s} \leq t \leq t_A$ (t_{Abbruch}), indem t_a um je $1\mu\text{s}$ verschoben wird, so ergeben sich für die genannten Mekometer die in Abb. 7 dargestellten Frequenzdifferenzen $\Delta f = f_B - f_P$. Die meisten anderen untersuchten Instrumente liefern ähnliche Ergebnisse, wodurch sich im Prinzip für diese Mekometer die gleichen Schlußfolgerungen ableiten lassen:

- Eine integrierende Frequenzbestimmung über den dargestellten Zeitbereich von $26\mu\text{s}$ liefert einen Mittelwert, der je nach Instrument mehr oder weniger große Abweichungen zur "Blitzfrequenz" aufweist.
- Da diese "Blitzfrequenz" aber für die Streckenlänge ausschlaggebend ist, erhält man bei integrierender Frequenzmessung Maßstabsfehler. Die Bestimmung der "Blitzfrequenz" ist deshalb unerläßlich.
- Die Instabilität der Frequenz innerhalb des $40\mu\text{s}$ -langen Meßsignals verursacht Meßfehler, die im weiteren noch abgeschätzt werden müssen.
- Eine spezielle Spezifikation des verwendeten Frequenzzählers HP 5345A, der erst nach Ablauf der zur Zeit des Meßsignals t_a anliegenden Schwingung seine Periodenzählung beginnt (Abb. 8), und die für einige

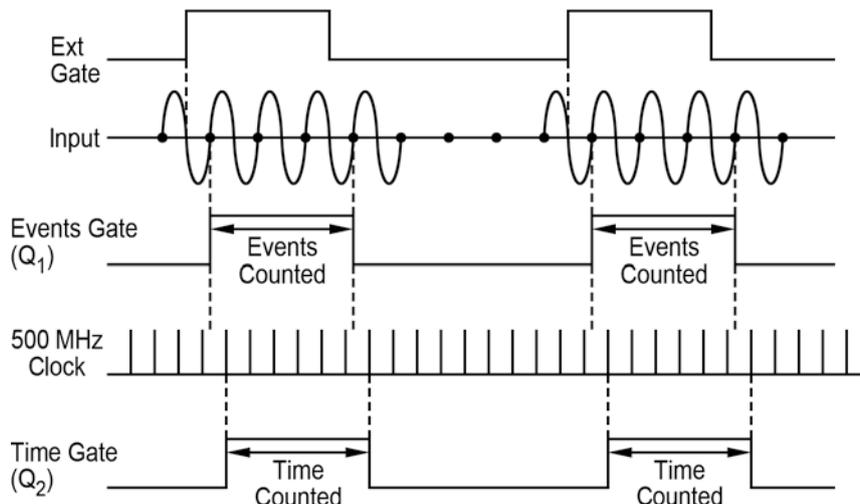


Abb. 8 Messung gepulster Frequenz mit HP 5345A

Mekometer nachweisbare relativ große Frequenzänderung kurz nach der Blitzerzeugung (Abb. 7b) verhindern eine höhere Frequenzmeßgenauigkeit durch die Bestimmung einer Restfrequenz von 500 kHz (Abschnitt 2.2). Da in diesem Fall die Schwingungsdauer bereits $2\mu\text{s}$ beträgt und der Startpunkt der Frequenzmessung deshalb in dieser Zeitspanne variieren kann, ist eine fehlerfreie Erfassung der "Blitzfrequenz" im gezeigten Fall in der Regel nicht mehr durchführbar.

- Da die Modulationsfrequenz nach der Blitzerzeugung nicht konstant bleibt,

geschieht der optisch-mechanische Phasenabgleich im Mekometer nach Durchlaufen der doppelten Strecke schließlich an zwei Wellen unterschiedlicher Frequenz.

Der Einfluß dieser Frequenzänderung auf die Entfernungsmessung liegt nun darin, daß der reflektierte Meßimpuls mit der Frequenz f_B mit einem Signal veränderter Frequenz und deshalb verschobener Phasenlage zusammengebracht wird. Numerisch läßt sich der Einfluß auf die Streckenmessung wie folgt abschätzen.

Die Laufzeit des Meßsignals, d.h. die Zeitdifferenz Δt zwischen Blitzabgang (t_a) und Phasenvergleich (t_v), beträgt in Abhängigkeit von der zu messenden Entfernung s

$$\Delta t = t_v - t_a = \frac{2 \cdot s}{c} . \quad (3.1)$$

Die Phasenlage des Referenzsignals zum Zeitpunkt des Phasenvergleichs folgt dann aus

$$\varphi = c \cdot \int_{t_a}^{t_v} \frac{1}{\lambda(t)} dt = \int_{t_a}^{t_v} f(t) dt . \quad (3.2)$$

Bleibt $f_M = f_B$ konstant, so ergibt sich

$$\varphi = a + \Delta a = f_B \cdot \Delta t \quad (3.3)$$

wobei

a = Anzahl ganzer Wellenlängen

und

Δa = Bruchteile der letzten Wellenlänge

der Blitzfrequenz f_B sind. Bei der Feinmessung ist dann nur noch die Bestimmung von Δa von Interesse. Bei variabler Frequenz f als Funktion der Zeit gilt

$$f(t) = f_B + \Delta f(t) . \quad (3.4)$$

Mit Gleichung (3.2) wird

$$a + \Delta a + d(\Delta a) = f_B \cdot \Delta t + \int_{t_a}^{t_v} \Delta f(t) dt \quad (3.5)$$

und mit (3.3) ergibt sich schließlich ein "Phasennullpunktsfehler" von

$$d(\Delta a) = \int_{t_a}^{t_v} \Delta f(t) dt . \quad (3.6)$$

Als Entfernungskorrektur Δs_f folgt daraus

$$\Delta s_f = d(\Delta a) \cdot \frac{\lambda}{2} \quad (3.7)$$

wobei hier $\lambda = 0,6$ m zu setzen ist. Gelingt es, den Frequenzverlauf $f(t)$ durch eine zeitabhängige Funktion (z.B. Polynomansatz) sinnvoll zu erfassen, so kann die Integration nach (3.2) nach strengen Formeln einfach erfolgen. Für die oben angesprochenen Mekometer ergeben sich somit die in Abb. 7 bereits aufgezeichneten "Phasennullpunktsfehler".

Zur Kontrolle der oben beschriebenen Meßfehler wurden auf der Normalstrecke in Ebersberg im Laufe des letzten Jahres zahlreiche Kalibrierungsmessungen vorgenommen. Die nach der Streckenreduktion verbleibenden Restmaßstabsfehler für das Mekometer SNr. 218119 liegen nun zwischen $-0,1$ ppm und $+0,6$ ppm (früher ca. $2,5$ ppm). Ihre Standardabweichungen betragen etwa $\pm 0,6$ ppm und sind demnach nicht mehr signifikant. Der Versuch, das Maßstabsverhalten in den Griff zu bekommen, kann somit als gelungen betrachtet werden, nachdem auch mit anderen Mekometern ähnliche Ergebnisse hoher Genauigkeit zu erhalten waren.

Für Strecken $s \leq 864$ m konnte damit der Einfluß des Phasennullpunktsfehlers bereits bestätigt werden. Zur Verifizierung auf langen Seiten bis 3000 m wurde deshalb auf dem Testnetz Eichenau der Technischen Universität München eine eigene Prüfstrecke angelegt. Dazu wurden auf einem stillgelegten Bahndamm 7 in einer Linie liegende Punkte stabil vermarktet. Ihr Abstand beträgt jeweils 432 m. Mit einem auf die Normalstrecke abgeglichenen Tellurometer MA 100 und dem Mekometer ME 3000 (SNr. 218119) wurden in mehreren Meßreihen alle 432 m und 864 m Strecken bestimmt. Die anschließend durchgeführten Ausgleichungen der MA 100- und ME 3000-Messungen ergaben die in Tabelle 4 (Spalte 2 bzw. 3) zusammengestellten, praktisch identischen Ergebnisse. Die Ursache der relativ großen mittleren Fehler m_s von $\pm 0,4$ mm - $0,6$ mm liegt in der Konfiguration des Netzes und in Zentrierungenauigkeiten, die auf die Messung über Stative zurückzuführen sind. Werden mit dem Mekometer vom

Standpunkt "1" alle möglichen Seiten gemessen und die Beobachtungen einmal ohne Berücksichtigung des "Phasennullpunktsfehlers" und einmal unter Einbeziehung desselben reduziert, so ergeben sich gegenüber der gemeinsamen Ausglei- chung aller 432 m- und 864 m-Strecken (Spalte 5) die in Spalte 6 bzw. 7 tabellierten Restfehler Δs^- und Δs^+ . Obwohl die hohen Streckenunsicherheiten

Strecke	Ausgeglichene Strecken				ds (2)-(3)	Gemeinsame Ausgleichung	Δs^-	Δs^+
	für MA 100		für ME 3000					
	2	3	4	5				
	[m]	[mm]	[m]	[mm]	[mm]	[mm]		
1 - 2	432.0725 ± 0.4	432.0724 ± 0.3	+ 0.1	432.0724 ± 0.3	+ 0.4	0		
1 - 3	864.1428 ± 0.4	864.1428 ± 0.4	0	864.1428 ± 0.4	+ 0.6	0		
1 - 4	1296.2272 ± 0.5	1296.2272 ± 0.4	0	1296.2272 ± 0.4	+ 1.9	+ 1.1		
1 - 5	1728.3147 ± 0.5	1728.3148 ± 0.5	- 0.1	1728.3148 ± 0.5	+ 1.1	+ 0.5		
1 - 6	2160.3772 ± 0.6	2160.3773 ± 0.6	- 0.1	2160.3773 ± 0.6	+ 1.5	+ 1.2		
1 - 7	2592.4449 ± 0.6	2592.4445 ± 0.6	+ 0.4	2592.4447 ± 0.6	+ 0.9	+ 1.1		

Tab. 4 Restfehler bei Streckenreduktion ohne bzw. mit Berücksichtigung von Δs_f

einen signifikanten Nachweis für die Richtigkeit des Phasennullpunktsfehlers verhindern, wird dennoch zunächst eine "richtige" Tendenz bei seiner Korrektur erkennbar.

4. ERGEBNISSE

Der Frequenzmeßplatz von 1978 wurde vereinfacht und verbessert. Er umfaßt neben dem Mekometer selbst nur noch den Frequenzzähler, der durch einen integrierten Einschub (Frequenzumformer) ergänzt wurde. Die für die Streckenmessung repräsentative "Blitzfrequenz" kann damit in ca. 40 s mit einer relativen Genauigkeit $m_f < 1,5 \cdot 10^{-7}$ bestimmt werden und behindert die Distanzmessung zeitlich nicht mehr.

Aufgrund der Instabilität der Modulationsfrequenz mehrerer Mekometer erscheint die Erfassung der "Blitzfrequenz" grundsätzlich sinnvoll und angebracht. Zusätzlich macht das nachgewiesene inhomogene, nicht konstante Frequenzverhalten innerhalb der einzelnen "Frequenzpakete" (40 μ s) die Ableitung eines "Phasennullpunktes" nötig, dessen Größe die Meßgenauigkeit des ME 3000 teilweise weit überschreitet.

Nach entsprechender Reduktion von Meßdaten unter Berücksichtigung der "Blitzfrequenz" und des Phasennullpunktsfehlers verbleiben beim Vergleich mit Sollstrecken der Ebersberger Normalstrecke nunmehr lediglich Restfehler $\Delta s < \pm 0,8$ ppm.

Literaturangaben

- ÄSCHLIMANN, H.: *Die Bestimmung der Grobdistanz beim Mekometer Kern ME 3000*. Z. f. Verm., Photogr., Kulturtechnik, 33-40, 1976
- BRADSELL, R.H.: *A simple Calibrator for the Mekometer EDM Instrument*. IAG-Symposium, Wageningen 1978, Veröff. der Niederl. Geod. Komm., 1-6, Delft 1978
- HIRSCH, O., und T. NGUYEN: *Ein modifiziertes und objektiviertes Meßverfahren mit dem Kern-Mekometer*. Allgemeine Vermessungsnachrichten, 45-54, 1983
- MAURER, W., und K. SCHNÄDELBACH: *Ein neues Frequenzmeßverfahren für das Mekometer ME 3000*. Allgemeine Vermessungsnachrichten, 350-355, 1978
- MEIER-HIRMER, B.: *Präzisionsstreckenmessungen mit dem Mekometer ME 3000*. Allgemeine Vermessungsnachrichten, 41-59, 1975
- MEIER-HIRMER, B.: *Frequenzuntersuchungen am Mekometer ME 3000*. Allgemeine Vermessungsnachrichten, 373-387, 1975
- HEWLETT-PACKARD: *Manual for Counter HP 5345A*
- HEWLETT-PACKARD: *Application for Manual for Counter HP 5345A*
- HEWLETT-PACKARD: *Users Handbook for HP 5345A, HP 5335A, HP 5345A and associated accessories*

Für die tatkräftige Unterstützung bei der Beschaffung von Synthesizer, Frequenzzähler und Signal-Analyzer zur Durchführung der umfangreichen Kalibrierungs- und Kontrollmessungen sei an dieser Stelle der Fa. Hewlett-Packard in München und Böblingen, dem Max-Planck-Institut für Extraterrestrik in Garching sowie dem Lehrstuhl für Netzwerktheorie und Schaltungstechnik der Technischen Universität München gedankt.

EIN OBJEKTIVIERTES MESSVERFAHREN
MIT DEM KERN - MEKOMETER

O. HIRSCH

T. NGUYEN

Institut für Geodäsie und Photogrammetrie
Technische Universität Berlin
Sekt. H 12, Straße des 17. Juni 135
1000 Berlin 12

ZUSAMMENFASSUNG

Es wird ein transportables Gerätesystem zur Maßstabsbestimmung bei Mekometermessungen anhand eines Prototyps (Labormuster) vorgestellt und die Funktionsweise beschrieben.

1. VORBEMERKUNGEN

Die hohe innere Meßgenauigkeit des Mekometers ist bekannt. Dieser Vorteil wirkt sich besonders bei der Ermittlung relativer Längenänderungen aus. Er wird in zahlreichen Veröffentlichungen gewürdigt. Besteht hingegen die Aufgabe einer absoluten Längenermittlung einer Strecke, z.B. bei der Festlegung von Sollstrecken für den Vergleich verschiedener Streckenmeßgeräte, so muß der Kalibrierung und der Maßstabsüberprüfung besondere Beachtung geschenkt werden. Auf hierbei angewandte Verfahren wurde bereits hingewiesen (*HIRSCH, NGUYEN 1983*) und über die Möglichkeit der Erfassung des aktuellen Maßstabes während der Streckenmessung berichtet. Die dort von uns angegebene Lösung ist mit großem gerätetechnischem Aufwand verbunden. Dieser erlaubt keinen Einsatz im unwegsamen Gelände, da die Geräteausrüstung in einem VW-Bus untergebracht ist, der auch die mobile Stromversorgung für die netzabhängigen Geräte enthält. Zur Vermeidung dieser Nachteile wurde eine kleine, leicht transportable Geräteeinheit entwickelt. Die Vorstellung eines Prototyps soll hier erfolgen.

2. EINLEITUNG

Die Genauigkeit der Streckenmessung mit dem Mekometer wird von der Wellenlänge bestimmt, mit der die Feinmessungen durchgeführt werden. Die sicherste Methode, um einen Maßstabsfehler zu erfassen, besteht in der simultanen Messung der tatsächlichen Modulationsfrequenz und des Brechungskoeffizienten während der Streckenmessung. Es gilt

$$\lambda = \frac{c_0}{n_L \cdot f_M} \quad (2-1)$$

mit c_0 = Ausbreitungsgeschwindigkeit elektromagnetischer Wellen im Vakuum

n_L = Brechungsindex der Luft für Licht als Träger mit der Wellenlänge λ

f_M = Modulationsfrequenz

Die hier beschriebene Meßeinrichtung ermöglicht eine gleichzeitige Erfassung der beiden Parameter f_M und n_L . Dabei wird n_L aus der Messung der atmosphärischen Grundgrößen ermittelt. Abb. 1 zeigt die Systemkonfiguration und die Verteilung der verschiedenen, mit internen Batterien betriebenen Komponenten auf den beiden Endpunkten der Meßstrecke. Der repräsentative

tive Brechungsindex $n_{L_{rep}}$ wird aus

$$n_{L_{rep}} = \frac{1}{2} (n_{Station} + n_{Reflektor}) \quad (2-2)$$

abgeleitet.

Die Einfügung weiterer meteorologischer Meßstellen ist möglich. Dies ist eine Frage des Aufwandes und abhängig von den äußeren Gegebenheiten. Die Meßwerte von der Reflektorstation werden hier manuell übermittelt.

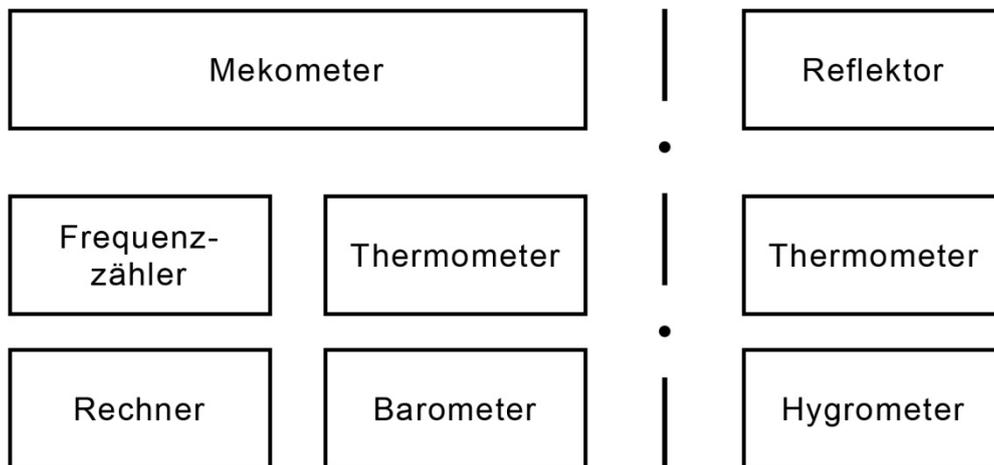


Abb. 1 Schematischer Aufbau der Meßanlage

3. FREQUENZMESSUNG

Das Prinzip des hier angewendeten Verfahrens zur Frequenzmessung wurde bereits ausführlich dargestellt (HIRSCH, NGUYEN 1983). Gemessen wird die Differenzfrequenz F_D gemäß

$$F_D = F_{\ddot{u}} - F_M \quad (3-1)$$

mit $F_{\ddot{u}}$ = Überlagerungsfrequenz

F_M = Modulationsfrequenz

Im Hochfrequenzteil (Abb. 2) wird das Ausgangssignal (10 MHz) eines ther-

misch stabilisierten Quarzoszillators mittels einer Speicherschaltodiode auf die Frequenz $F_{\ddot{u}} = 500 \text{ MHz}$ vervielfacht und zusammen mit dem Modulations-signal F_M des Mekometers dem anschließenden doppelt-symmetrischen Mi-scher zugeführt. Die aus dieser Abwärtsmischung resultierende Differenz-frequenz F_D erscheint am Ausgang des Filter-Verstärkers. Sie wird in dem nachfolgenden Zähler gemessen.

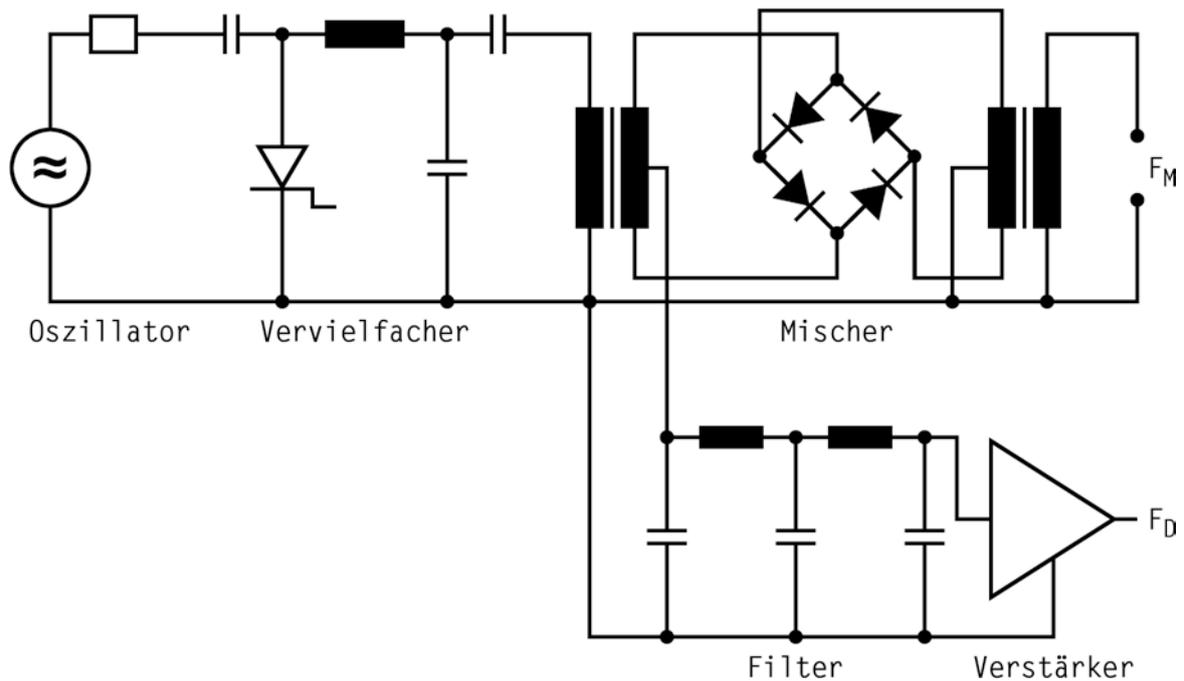


Abb. 2 Aufbau des Hochfrequenzteils

Die Zählschaltung (Abb. 3) besteht aus einer Kette von programmierbaren Synchronteilern. Der am Eingang befindliche Detektor steuert die Enable-Eingänge in Abhängigkeit vom Signal F_D und synchronisiert auf diese Weise den Zählvorgang. Beginn und Dauer der Messung lassen sich an dieser Stelle festlegen. Diese Einstellung ist erforderlich, da das aus dem Modulationsresonator ausgekoppelte Signal bei den verschiedenen Mekometern Unterschiede in der Form und in der Amplitude aufweist.

Diese Schaltung erfüllt noch zwei weitere Aufgaben. Sie dient einmal als Speicher für die Zwischenergebnisse während der Zeiträume, in denen kein Signal anliegt. Zum anderen sind die Teiler als Schieberegister geschaltet, so daß am Ende eines Meßzyklus eine Parallel-Serien-Umwandlung durchgeführt wird. Dies vereinfacht die Weitergabe bzw. Ausgabe der gespeicherten

Meßergebnisse.

Die Genauigkeit der Frequenzmessung beträgt $0,2 \cdot 10^{-6}$ bei einer Meßzeit von insgesamt etwa acht Sekunden!

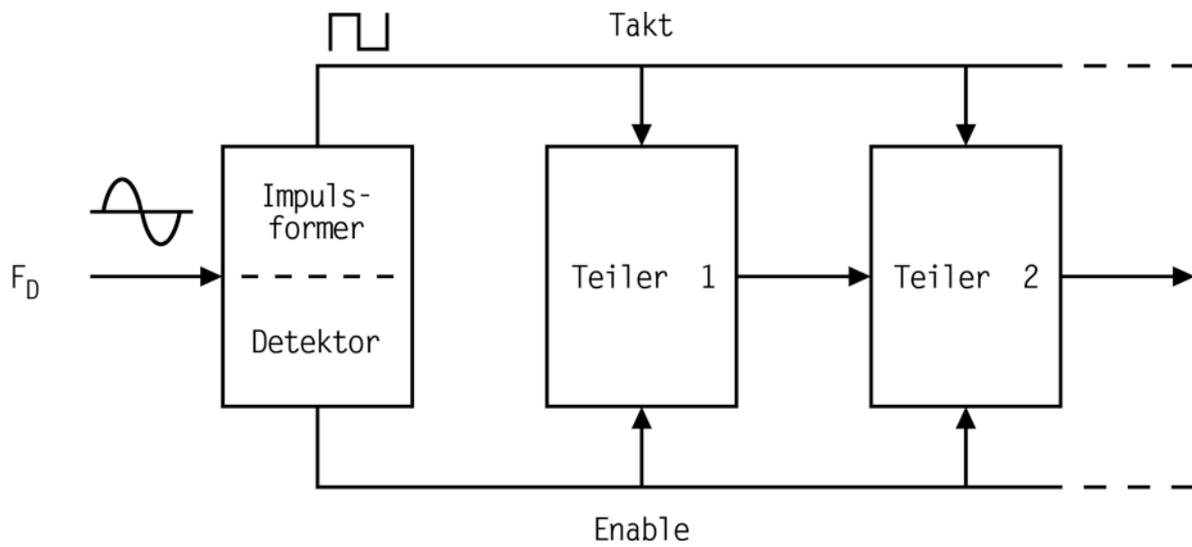


Abb. 3 Prinzip der Zählschaltung

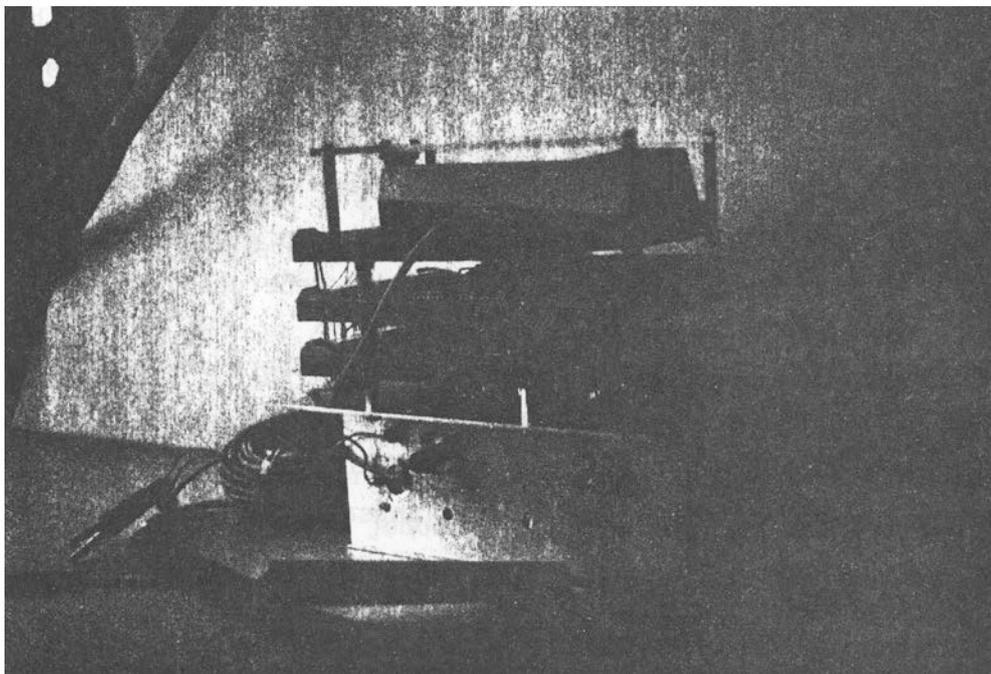


Abb. 4 a

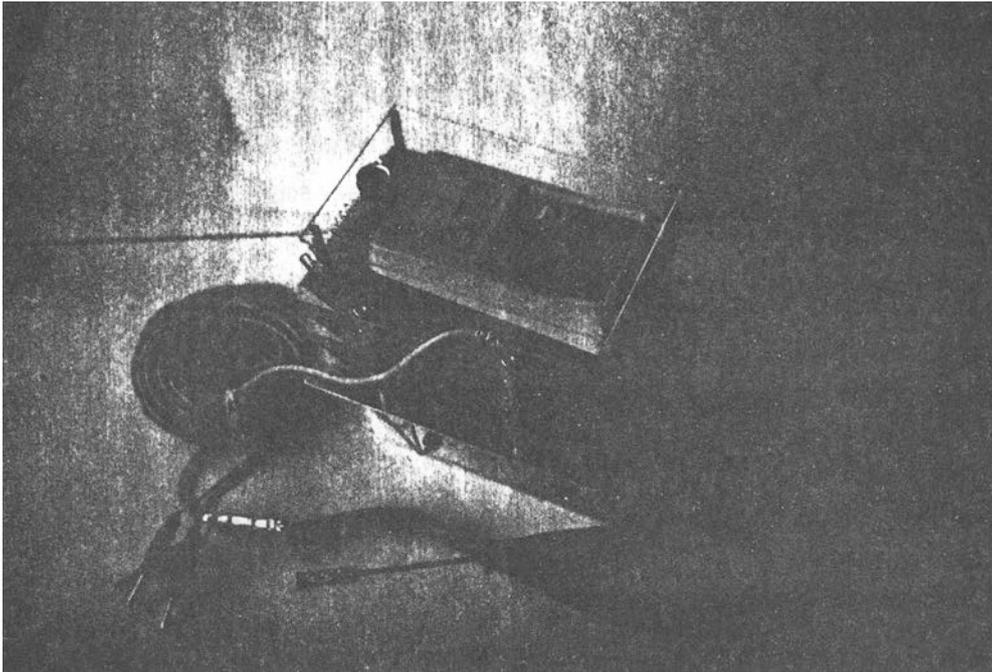


Abb. 4 b

Abb. 4 a und 4 b: Frequenzmeßeinrichtung mit elektronischem Thermometer und Meßfühler. Diese Abbildungen sollen eine Vorstellung von der Größe des Gerätes (Labormuster) vermitteln.

4. ERFASSUNG METEOROLOGISCHER DATEN

Zur Messung der Lufttemperatur werden Thermistoren als Aufnehmer verwendet. Sie können mit so engen Toleranzen hergestellt werden, die eine Austauschbarkeit der Meßfühler ermöglichen. Ein weiterer Vorteil liegt darin, daß die Länge der Zuleitung infolge des relativ hohen Widerstandswerts der Thermistoren praktisch keinen Einfluß auf die Meßergebnisse hat.

Die Erfassung des Luftdrucks erfolgt mittels temperaturkompensierter Aneroide (Thommen). Aus Kostengründen wird hier auf elektronische Digitalbarometer verzichtet. Eine eventuelle Änderung des Luftdrucks erfolgt innerhalb einer Meßreihe ohnehin stetig und langsam.

Die relative Feuchtigkeit wird digital gemessen. Hierfür werden kapazitive Meßfühler (Humicap) eingesetzt.

Eine sorgfältige Kalibrierung der meteorologischen Meßgeräte ist notwendig. Mit den verwendeten Geräten lassen sich die meteorologischen Daten mit folgender Genauigkeit ermitteln:

Temperatur	0,2°C
Druck	0,5 mbar
Rel. Feuchtigkeit	3%

5. AUSWERTUNG DER MESSDATEN

Für die Meßdatenerfassung und -auswertung ist das System mit einem Taschencomputer, Mod. hp 41 CV mit Peripherie, ausgerüstet. Der Rechner ist als Steuereinheit programmiert, d.h. er bestimmt den Ablauf der verschiedenen Messungen im Dialogverkehr mit dem Beobachter und kontrolliert Frequenzzähler und Temperaturerfassung.

Nach erfolgter manueller Eingabe der übrigen Meßwerte (abgelesene Entfernung, Druck, Feuchtigkeit usw.) beginnt die Auswertung. Hierbei werden die vorab gespeicherten Eichfunktionen berücksichtigt, um die Restfehler der einzelnen Gerätekomponenten wie Nichtlinearität, Temperaturabhängigkeit, Stabilität usw. zu kompensieren.

Als Ergebnis dieser weitgehend automatisierten Datenerfassung und Auswertung steht die definitive Länge der gemessenen Strecke unmittelbar nach der Messung im Felde zur Verfügung.

Es werden alle anfallenden Daten ausgedruckt oder auf Magnetband (Mini-Kassette) gespeichert, damit sie für eine Überprüfung und weitere Verarbeitung, z.B. in einer Ausgleichung zur Verfügung stehen.

6. FOLGERUNGEN

Das vorstehend beschriebene, leicht transportable Gerätesystem ist für den mobilen Einsatz im Temperaturbereich zwischen -10°C und $+50^{\circ}\text{C}$ konzipiert. Der Betriebsbereich wird jedoch durch den hp-Taschenrechner und das zugehörige Kassettenlaufwerk eingeschränkt. Sie sind nur für den Bereich 0°C bis 45°C bzw. 10°C bis 40°C spezifiziert. Bei Messungen außerhalb dieser Bereiche muß auf eine Auswertung im Felde verzichtet werden. Meist wird hierbei der Drucker die Funktion des Meßdatenspeichers übernehmen.

Diese Meßausrüstung erlaubt eine Streckenmeßgenauigkeit von $1 \cdot 10^{-6}$ mit dem Mekometer zu erzielen. Die innere Genauigkeit der Meßeinrichtung ist höher, die größte Unsicherheit bleibt die Erfassung des repräsentativen Brechungskoeffizienten entlang der Meßstrecke. Zur Zeit wird deshalb an der Entwicklung einer Datenstation gearbeitet, die gesteuert von der Hauptstation meteorologische Messungen auf der Reflektor-/Zielstation durchführt. Die Kommunikation zwischen den Stationen erfolgt auf telemetrischem Weg.

An dieser Stelle möchten wir uns bei Herrn Dr.-Ing. *J. Ewert*, Institut für Hochfrequenztechnik der TU Berlin, für die uns gewährte Unterstützung bei der Realisierung des HF-Vervielfachers bedanken.

LITERATUR

HIRSCH, O., NGUYEN, T.: *Ein modifiziertes und objektiviertes Meßverfahren mit dem Kern-Mekometer*. Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN) 1983, S. 45 - 54.

ZUM PROBLEM DER BESTIMMUNG DER ADDITIONSKONSTANTE

Raimund LOSER

KERN & CO. AG
Schachenallee
CH - 5001 Aarau

ZUSAMMENFASSUNG

Die Genauigkeit der Entfernungsmessung mit elektrooptischen Distanzmessinstrumenten wird, insbesondere auf kurze Entfernungen, in beträchtlichem Masse von der Additionskonstante bzw. von der Genauigkeit der Additionskonstantenbestimmung beeinflusst. Besonders im Bereich der Präzisionsdistanzmessung sollten Bestimmungsmethoden zur Verfügung stehen, die eine zuverlässige und signifikante Bestimmung der Additionskonstante ermöglichen. Im folgenden soll eine Methode zur Bestimmung von Sollwerten an einer Prüfstrecke erläutert und zur Diskussion gestellt werden, die auch Aussagen über aperiodische distanzabhängige Fehlereinflüsse (Distanzabhängigkeit der Additionskonstante) erlaubt. Gleichzeitig kann mit Hilfe der erhaltenen Sollstrecken eine zuverlässigere Bestimmung der Additionskonstante erfolgen. Die verwendeten Messwerte und Auswertungen beruhen ausschliesslich auf Mekometermessungen, die grösstenteils an der neu angelegten Eichstrecke der Bundeswehrhochschule durchgeführt wurden.

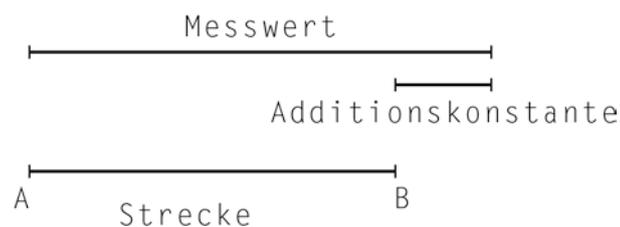
ABSTRACT

The accuracy of distance measurements on short distances with the electro-optical distance meters depends mainly on the accuracy of the additive constant. Specially in the field of precision distance measurement reliable and significant techniques should be available to determine the additive constant. Furthermore the methods of how reference measurements are determined on base lines are explained and discussed, also the possibility of aperiodical distance depending error influence. Together with the obtained results of the reference distance a reliable method is given to determine the additive constant. The applied values and evaluations are based upon Mekometer measurements carried out on the base lines of the "Bundeswehrhochschule".

1. DEFINITION UND BESTIMMUNGSMETHODEN DER ADDITIONSKONSTANTE

Die Definition der Additionskonstante beschreibt gleichzeitig ihre ideale Bestimmungsmethode.

Es gilt: Die Additionskonstante ist der über alle Distanzen gleichbleibende Anteil einer Korrektur, die den Messwert (meteorologisch korrigiert) verbessert. Der verbesserte Wert entspricht dann der tatsächlichen Länge der Strecke (vgl. Abb. 1).



(Abbildung 1)

Die Additionskonstantenbestimmung aus den Vergleichen der Messwerte mit den entsprechenden Sollstrecken führt nur dann zu einem sinnvollen Ergebnis, wenn die Sollstrecken hinreichend genau bekannt sind. Da in vielen Fällen keine bekannten Sollstrecken zur Verfügung stehen, dient die Messung einer Kombination verschiedener unveränderlicher, aber unbekannter Strecken mit anschließender Berechnung der Additionskonstante über eine Ausgleichung als Notlösung.

Die Bestimmung von Sollstrecken und der anschließende Vergleich mit den direkten Messwerten ist als eine bessere Lösung zu empfehlen.

2. BESTIMMUNG VON SOLLSTRECKEN

Die Entfernung zwischen zwei Punkten A und B lässt sich aus der Differenz zweier Streckenmessungen von einem dritten Punkt aus berechnen (vgl. Abb. 2). Die Differenzstrecke ist dann frei vom Einfluss der Additionskonstante. Die gemessenen Distanzen müssen vor der Differenz-

bildung um die meteorologischen und geometrischen Korrekturen verbessert werden (analog z.B. zur Streckenmessung mit einem Interferometer).

Dieses Verfahren ist aber nur dann zulässig, wenn keine weiteren systematischen Distanzfehler auftreten. Die Ueberprüfung des verwendeten Distanzmessinstrumentes, ob periodische oder aperiodische Fehler die Messwerte verfälschen, bleibt folglich unumgänglich.

3. PERIODISCHE UND APERIODISCHE FEHLER AM MEKOMETER

3.1 Periodische Fehler

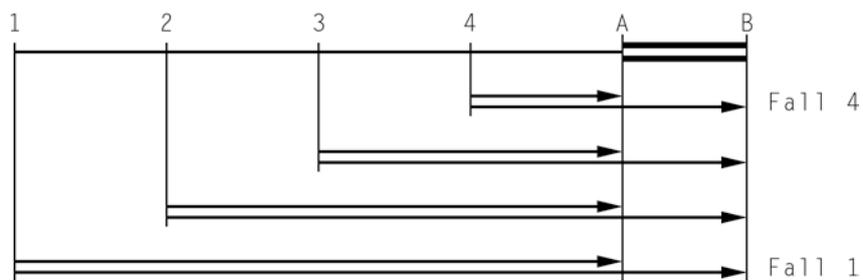
Durch keine der vielen bisher mit Mekometern durchgeführten Messungen konnte ein signifikanter periodischer Fehler nachgewiesen werden, der auch nur annähernd eine Grössenordnung erreicht, die eine Messwertverbesserung rechtfertigen würde.

Trotzdem wurde mit Hilfe einer Zyklusmessstrecke versucht, den Nachweis eines zyklischen Fehlers zu erbringen. Zu diesem Zweck wurden mit mehreren Mekometern aus verschiedenen Entfernungen jeweils zwei Feinmessperioden in einer Schrittweite von 20 mm bei einer Einstellgenauigkeit des Reflektors von $< \pm 0,02$ mm ausgemessen. Keine der Messreihen war um den Einfluss eines zyklischen Fehlers verfälscht.

3.2 Aperiodische Fehler

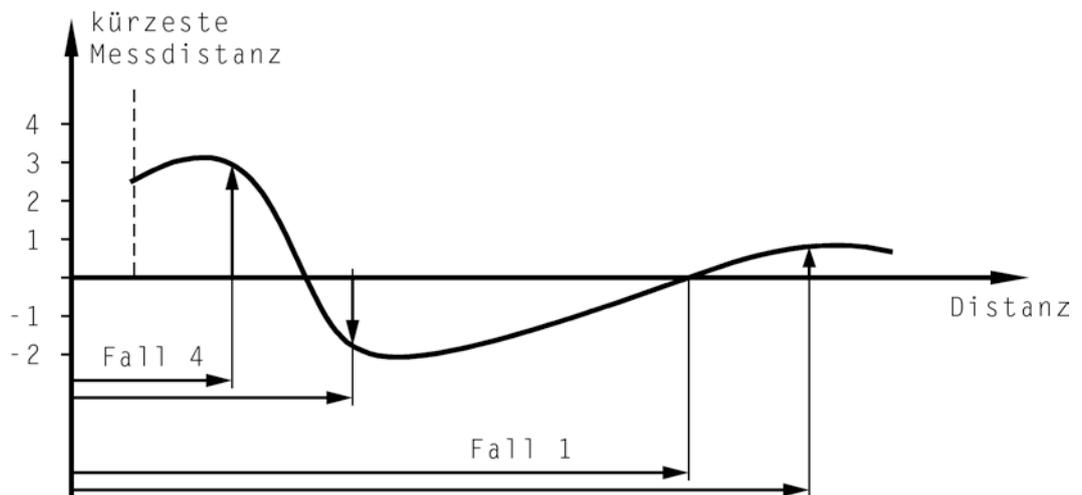
Die Sollstreckenbestimmung aus der Differenz zweier Strecken kann auch aperiodische Fehler aufdecken, wenn die gleiche Distanz mehrmals aus unterschiedlichen Entfernungen bestimmt wird (siehe Abb. 2 und 3).

Instrumentenstandpunkte



(Abbildung 2)

Fehler



(Abbildung 3)

Aufgrund des aperiodischen Fehlers wirken sich unterschiedliche Einflüsse auf die Differenzen aus, was zu systematisch verfälschten Distanzen AB führt. Fall 4: AB = 5 Einheiten zu kurz
Fall 1: AB = 1 Einheit zu lang.

Ausgehend von der Voraussetzung, dass für alle Messungen der gleiche Reflektor benützt wird und kein periodischer Fehler die Ergebnisse zu-

sätzlich beeinflusst, sind zum Nachweis eines aperiodischen Fehlers zwei Dinge entscheidend:

1. Die Wahl der Länge der Differenzstrecke,
2. Die Verteilung der Instrumentenstandpunkte.

Die Messungen an einer Prüfstrecke ermöglichen die Auswertung mehrerer Differenzstrecken bei gleichmässiger Verteilung der Entfernung. Es ergibt sich schliesslich eine Prüfstrecke als Kombination von Sollstrecken.

Eine erste Prüfmessung zum Aufdecken eines aperiodischen Fehlers führte zu folgenden Ergebnissen:

Die direkte Messung einer Prüfstrecke mit Berücksichtigung einer Additionskonstanten von $a = + 0,3 \text{ mm}$ ergab im Mittel aus 4 Einzelmessungen einen Wert von $s = 30,0111 \text{ m}$.

Distanzen in [m]	Differenzwerte in [m]	Unterschiede in mm dir. Wert - Diff.Wert
65/ 35	30,0107	+ 0,4
100/ 70	30,0108	+ 0,3
135/105	30,0110	+ 0,1
180/150	30,0109	+ 0,2
300/270	30,0109	+ 0,2
470/440	30,0108	+ 0,3
520/490	30,0109	+ 0,2
Mittelwerte	30,0109	+ 0,2

Die Ergebnisse erlauben zwei Feststellungen:

Einerseits beweist die geringe Maximalabweichung von 0,4 mm die sehr gute Uebereinstimmung der Differenzwerte der Messungen aus den verschiedenen Entfernungen und spricht gleichzeitig gegen den Einfluss

eines aperiodischen Fehlers. Andererseits ergibt sich aus dem Vergleich der Differenzwerte mit dem aus direkten Messungen ermittelten Wert ein Additionskonstantenunterschied von 0,2 mm, der auch durch den Einfluss eines aperiodischen Fehlers auf sehr kurze Distanzen (z.B. < 100 m) begründet werden könnte.

Wie auch die nachfolgenden Beispiele zeigen, kann ein derartiger Unterschied der Messergebnisse des benutzten Mekometers nur in einer, innerhalb der Herstellerspezifikation liegenden Grössenordnung festgestellt werden.

Beispiele:

direkt gemessener Wert: 81,4944 m		direkt gemessener Wert: 188,9691 m		direkt gemessener Wert: 270,4634 m	
Entf.	Strecke 3 - 4	Entf.	Strecke 4 - 5	Entf.	Strecke 3 - 5
216/135	81,4943	242/ 53	188,9688	324/ 53	270,4632
243/161	81,4940	270/ 81	188,9690	378/108	270,4637
270/189	81,4943	297/108	188,9693	405/135	270,4631
324/242	81,4944	405/216	188,9688	432/161	270,4638
378/297	81,4944	432/243	188,9698	972/701	270,4631
783/701	81,4938	972/783	188,9693		
Mittel:	81,4942	Mittel:	188,9691	Mittel:	270,4634

Kontrolle: Strecke 3 - 4 - Strecke 4 - 5 = 270,4633 m

Unterschied: 0,1 mm

Nachdem aus den Auswertungen gefolgert werden kann, dass das Mekometer die geforderten Voraussetzungen, keine periodischen und aperiodischen Fehlereinflüsse in verbesserungswürdigen Grössenordnungen aufzuweisen erfüllt, kann eine Sollwertbestimmung der Distanzen einer Prüfstrecke

erfolgen.

4. SOLLDISTANZEN AN DER PRUEFSTRECKE DER HOCHSCHULE DER BUNDESWEHR

Die Prüfstrecke der Hochschule der Bundeswehr umfasst 8 Pfeiler, zwischen denen insgesamt 28 verschiedene Strecken messbar sind. Mit dem Mekometer Nr. 218 069 wurden alle Strecken im Hin- und Rückgang gemessen und um die Einflüsse der Meteorologie und des Höhenunterschiedes (Pfeiler 8) korrigiert.

Mit diesem Datenmaterial war es je nach Strecke mit Ausnahme der Distanz zwischen den zwei äussersten Pfeilern möglich, eine oder mehrere Differenzen zu berechnen (vgl. Beispiel vorstehend). Um zwei unabhängige Datensätze zu erhalten, erfolgte bei der Differenzberechnung eine strenge Trennung zwischen Hin- und Rückmessungen. Die Differenzwerte gleicher Strecken wurden anschliessend in Abhängigkeit der mittleren Entfernung der zur Differenzbildung verwendeten Messungen gewichtet gemittelt. Der aus dieser Prozedur resultierende Datensatz umfasst für Hin- und Rückmessung je 27 Strecken, die frei vom Einfluss der Additionskonstante sind. Durch die Elimination der Additionskonstante über die Differenzbildungen sind die einzelnen Strecken nicht mehr als unabhängige Werte zu betrachten. Je nach Strecke entstehen unterschiedliche Korrelationen. Mit einem Gewichtsansatz, der der Streckenlänge und der Anzahl der Differenzen, aus denen die einzelnen Strecken berechnet wurden, gerecht wird, können die 54 Distanzen als Beobachtungen in eine Ausgleichung eingeführt werden. Wenn diese Modellvorstellung richtig ist, dann darf sich durch diese Ausgleichung keine Additionskonstante signifikant bestimmen lassen.

Ergebnis: $a = 0,09 \text{ mm} \pm 0,09 \text{ mm}$

Ueber eine weitere Ausgleichung, ohne den Ansatz einer Additionskonstante als Unbekannte, lassen sich die Pfeilerabstände der Prüfstrecke bezüglich eines Ausgangspfeilers als Sollwerte bestimmen.

Die Bestimmung der Additionskonstante kann dann durch die Messung von einigen kurzen Distanzen der Prüfstrecke mit anschliessendem Vergleich gegenüber den entsprechenden Sollstrecken erfolgen (Voraussetzung: kein aperiodischer Fehler).

LITERATUR

AESCHLIMANN, H., und STOCKER, R.: Gerätefehler von elektro-optischen Distanzmessern. Vermessung-Mensuration 2/75, S. 36 - 44, 1975.

PAULI, W.: Ueber Eichung und Eichstrecken elektrooptischer Entfernungsmessgeräte. Vermessungstechnik, S. 265 - 267, Heft 8, 1977.

RÜEGER, J.M.: Introduction to Electronic Distance Measurement. School of Surveying, The University of New South Wales, 2033 Sydney, Australia, 1982.

SCHWENDENER, H.R.: Elektronischer Distanzmesser für kurze Strecken - Genauigkeitsfragen und Prüfverfahren. Schweizerische Zeitschrift für Vermessungswesen, Photogrammetrie und Kulturtechnik, S. 59 - 67, Winterthur, 1971.

WOLF, H.: Ausgleichsrechnung. Formeln zur praktischen Anwendung. Ferd. Dümmler Verlag, Bonn, 1975.

PRAKTISCHE ERFAHRUNGEN MIT DEM
MEKOMETER ME 3000

von

E. Kuntz, B. Meier-Hirmer, H. Seckel

Geodätisches Institut
Universität Karlsruhe
Englerstraße 7
D-7500 Karlsruhe

ZUSAMMENFASSUNG

Einleitend werden die theoretisch bedingten und praktisch unerläßlichen Voraussetzungen zur Erreichung höchst möglicher Genauigkeit bei Streckenmessungen mit dem Mekometer ME 3000 begründet und zusammengestellt. An einer Reihe praktischer Beispiele wird gezeigt, daß unter Beachtung dieser Voraussetzungen im Meßbereich 10 - 500 m des Mekometers (Strecken bis ca. 600 m Länge) Punktlagegenauigkeiten unterhalb von $\pm 0,5$ mm erreichbar sind.

ABSTRACT

In the first part we discuss the theoretical and practical prerequisites in order to reach the highest possible precision in distance measurements with the Mekometer ME 3000. In the second part we demonstrate by means of several practical examples that point positions accurate to better than ± 0.5 mm can be achieved. These high accuracies were obtained in the range "10 - 500 m" of the Mekometer (distances up to 600 m) paying attention to the prerequisites mentioned in the first part of the paper.

I. GRUNDLAGEN

Das Grundkonzept und die Wirkungsweise des Mekometers sind aus einer Reihe von Veröffentlichungen bekannt. Will man die hohe Präzision des Gerätes voll ausschöpfen, so sind nach unseren Erfahrungen einige wesentliche Punkte zu beachten. Zunächst sind instrumentelle Gegebenheiten zu berücksichtigen, die von Meier-Hirmer (1975a,b) in umfangreichen Meßreihen nachgewiesen wurden.

a) Akklimatisierung:

Als erstes ist hier die Akklimatisierung zu nennen. Nach den Untersuchungen von Meier-Hirmer (1975b) ist mit Akklimatisierungszeiten von 5 min/°C bei Abkühlung und 7 min/°C bei Aufwärmung des Gerätes zu rechnen, ehe sich die Frequenz auf $\pm 1 \cdot 10^{-6}$ stabilisiert hat.

b) Aufheizung:

Der Akklimatisierung überlagert ist der Aufheizeffekt der Standard Cavity. Nach Meier-Hirmer (1975b) ist mit ca. 2°C Aufheizung innerhalb der ersten beiden Betriebsstunden zu rechnen, was einem relativen Frequenzgang von ca. $2 \cdot 10^{-6}$ entspricht.

Leider ist am Instrument keine Sichtkontrolle für die Funktion des Ventilators; die akustische Kontrolle ist durch das Geräusch der Blitzlampe erschwert, so daß bei Ausfall des Ventilators die Temperatur der Cavity bis zu 4°C steigen kann. Um diese Effekte zu vermeiden, ist es wichtig, auf einwandfreie Funktion des Ventilators zu achten, das Gerät frühzeitig einzuschalten und der Außentemperatur anzupassen.

c) Frequenzänderungen:

Die Frequenzänderungen während der Messung sind von den Änderungen der meteorologischen Daten der Stationsumgebung abhängig und kompensieren deren Einfluß auf die Streckenmessung weitgehend (Grundprinzip des Mekometers). Daneben ist aber auch die geometrische Dimension der Standard Cavity temperaturabhängig, was ebenfalls zu Frequenzänderungen führt. Daher ist eine von der Lufttemperatur abhängige Frequenzkorrektur anzubringen. Diese temperaturabhängigen Frequenzkurven zeigen für verschiedene Geräte

unterschiedliche Charakteristika. Die Laborfrequenzzeichnungen sind nach unseren Erfahrungen mit einer Genauigkeit besser als $\pm 1 \cdot 10^{-6}$ reproduzierbar. Voraussetzung für eine richtige Korrektur der Feldmessungen aus Laboreichungen ist der stets absolute Trockenzustand der die Cavity umgebenden Luft. Es ist daher besondere Sorgfalt auf das Trockenmittel (Silicagel) zu verwenden.

Um ein Eindringen von Feuchtigkeit zu erkennen, sollten daher vor und nach jeder Präzisionsstreckenmessung Frequenzzeichnungen vorgenommen werden, wenn möglich bei annähernd den Temperaturen, die auch während der Feldmessung herrschten.

d) Theoretisch bedingte Korrekturen:

Neben diesen rein instrumentell bedingten Einflüssen sind ebenso wichtig die vom Grundprinzip her theoretisch bedingten Korrekturen, die ebenfalls von Meier-Hirmer (1975a) dargestellt wurden. Es handelt sich hierbei einmal um die Licht-Mikrowellen-Korrektur, zum anderen um die meteorologische Zusatzkorrektur, für den Fall, daß die für die Strecke repräsentativen meteorologischen Daten nicht den am Standpunkt automatisch bereits berücksichtigten Daten entsprechen.

Diese Korrekturen werden i. allg. bei mittleren Temperaturen und nahezu horizontalem Gelände zwar nur wenige 1/10 mm betragen; sie liegen jedoch im Bereich der Meßgenauigkeit und können, wenn höchste Präzision angestrebt wird, nicht vernachlässigt werden, insbesondere nicht bei extremen Temperaturverhältnissen oder größeren Höhenunterschieden zwischen Mekometer- und Reflektorstation. Sie erfordern zusätzliche Messungen der meteorologischen Daten auf beiden Stationen, gegebenenfalls auch auf Zwischenpunkten entlang der Strecke.

e) Meßbereiche:

Das Mekometer ME 3000 arbeitet mit zwei Meßbereichen - 10 bis 500 m und 500 - 3000 m - im Überlappungsbereich von ca. 400 bis 600 m sind Messungen in beiden Meßbereichen möglich. Zwischen beiden Meßbereichen besteht ein gerätebedingter Frequenzunterschied. Da Strecken- und Frequenzmessungen im Meßbereich 10 bis 500 m mit höherer Genauigkeit möglich sind, sollte bereits bei der Anlage eines Präzisionsnetzes bzw. einer Eichstrecke darauf

geachtet werden, daß alle Messungen in diesem Meßbereich - zwischen ca. 100 m und ca. 600 m - durchgeführt werden können.

f) Vermarkung:

Für die Meßstationen sollten nach Möglichkeit temperaturisolierte Beobachtungspfeiler verwendet werden. Gut bewährt haben sich doppelwandige Eternit- oder Schleuderbetonrohre auf Betonfundamenten. Am Sockel sollten in den Ecken Höhenbolzen eingebracht werden, damit über ein Pfeilerkontrollnivelement Pfeilerkippen rasch mit hoher Genauigkeit nachzuweisen sind. Wegen seines hohen Gewichts ist das Mekometer für Stativmessungen weniger geeignet, wenn höchst mögliche Genauigkeit angestrebt wird. Stativmessungen sollten daher nur in Ausnahmefällen zur Anwendung kommen.

g) Horizontierung und Ausrichtung:

Bei Präzisionsmessungen ist auf eine saubere Horizontierung des Mekometers zu achten. Die Dosenlibelle reicht bei der Kippachsenhöhe des Instruments von 260 mm i. allg. nicht aus, um den Einfluß der Horizontierung auf die Streckenmessung auf etwa $\pm 0,1$ mm zu begrenzen. Daher haben wir am Instrument zusätzlich eine Röhrenlibelle angebracht.

Weiterhin ist auf eine sorgfältige Ausrichtung von Mekometer und Reflektor zu achten, insbesondere bei Verwendung mehrerer Prismen. Eine einwandfreie Justierung von Zielfernrohr und Sendeoptik ist dafür Voraussetzung.

h) Maßstabssicherung:

Bei der Mehrzahl der Projekte, in welchen das Mekometer zum Einsatz kommt (z.B. Deformationsmessungen), interessieren weniger die absoluten Streckenlängen, als die relative Lage der Objektpunkte zu den Stützpunkten und die Lageänderungen der Objektpunkte zwischen verschiedenen Meßepochen. Zur Gewährleistung gleicher Maßstäbe in allen Epochen und zur Sicherung des Maßstabes während einer Meßepoche sollte bei jedem Projekt eine stabile Basis eingerichtet und wiederholt gemessen werden. Eventuell auftretende Maßstabdifferenzen zwischen den Meßepochen können dann rechnerisch berücksichtigt werden.

i) Nullpunktskorrektur:

Die Nullpunktskorrektur sollte von Zeit zu Zeit in bekannter Weise auf einer Eichstrecke überprüft werden. Sie kann auch als zusätzliche Unbekannte bei Ausgleichungen gemessener Streckennetze bestimmt werden, wenn die Netzkonfiguration stark unterschiedliche Streckenlängen und genügend Überbestimmungen aufweist.

Zusammenfassend seien die bei Präzisionsstreckenmessungen mit dem Mekometer für höchste Genauigkeitsansprüche zu berücksichtigende Punkte noch einmal aufgeführt:

- Beachtung der Akklimatisierung
- Beachtung des Einlaufeffektes
- Kontrolle der Ventilation
- Kontrolle des Trockengels
- Frequenzzeichnung vor und nach einer Meßkampagne und entsprechende Korrektur
- Anbringen der Licht-Mikrowellenkorrektur
- Messung der meteorologischen Daten und Anbringen der atmosphärischen Zusatzkorrektur
- Messung nur im Meßbereich 10 bis 500 m
- Messung in mehreren Sätzen (je nach Wetterlage)
- stabile, temperaturisolierte Beobachtungspfeiler, absolute Zwangszentrierung (keine Stativmessungen)
- sorgfältige Horizontierung und Ausrichtung von Gerät und Reflektor
- Kontrollbasis im Projektbereich
- Überwachung der Nullpunktskorrektur
- Bestimmung der Höhen mit der zur Reduktion der Schrägstrecken auf die Horizontale erforderlichen Genauigkeit

II. ANWENDUNGSBEISPIELE

Im folgenden soll an einigen von uns in den letzten Jahren bearbeiteten Projekten, bei denen die zuvor genannten Punkte sorgfältig beachtet wurden, die Leistungsfähigkeit des Mekometers aufgezeigt werden.

a) Aubecken:

In der Rheinaue bei Dogern am Hochrhein wurde in den Jahren 1975-1978 ein Speicherbecken von 900 m Länge und ca. 300 m Breite errichtet (Kuntz, Meier-Hirmer, Seckel, 1979). Während der Erprobungsphase der ersten Füll- und Entleerungsvorgänge sollten in einigen diskreten Querschnitten eventuell auftretende Bewegungen des Ringschüttdammes größer als 3 mm signifikant nachgewiesen werden. Die Messungsergebnisse sollten unmittelbar nach dem Feldeinsatz der Bauleitung zur Verfügung stehen. Beide Forderungen gaben Anlaß, das Mekometer einzusetzen. Die Stützpunkte sind entlang eines alten Damms als doppelwandige Pfeiler ausgebildet. Die Streckenlängen betragen zwischen 100 und 725 m.

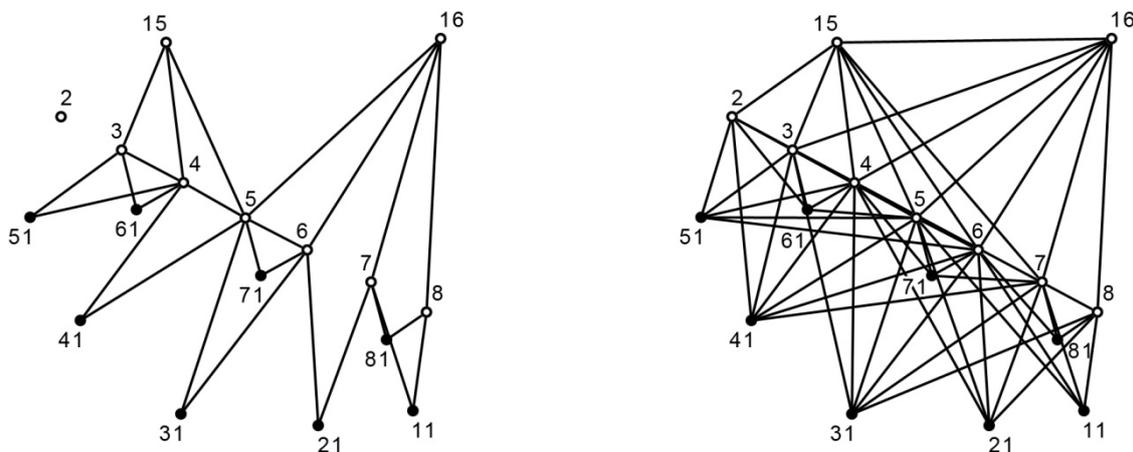


Abb. 1: Beobachtungspläne, reduziertes und komplettes Meßprogramm

Da in erster Linie Bewegungen quer zur Dammrichtung interessierten, konnte in einem reduzierten Meßprogramm (Abb. 1) mit wenigen Streckenmessungen - jeder Objektpunkt wurde zweimal angemessen - und die gewünschte Genauigkeit erreicht werden. Bei fünf der insgesamt 13 Meßepochen wurde ein vollständiges Meßprogramm beobachtet (Abb. 1). Durch übergreifende Messung der Strecken zwischen den Stützpunkten entlang des Damms war im kompletten Meßprogramm zusätzlich die Möglichkeit einer Überprüfung der Nullpunktskorrektur gegeben. Die erreichten Genauigkeiten sind in Tabelle 1 zusammengestellt.

Meßepoche	mittl. Streckenfehler vor der Ausgleichung	durchschn. mittl. Streckenfehler nach der Ausgl.	durchschn. mittl. Punktlagefehler
	[mm]	[mm]	[mm]
1. Messung	$\pm 0,74$	$\pm 0,53$	$\pm 0,72$
9. Messung	$\pm 0,49$	$\pm 0,35$	$\pm 0,47$
10. Messung	$\pm 0,66$	$\pm 0,46$	$\pm 0,62$
11. Messung	$\pm 0,46$	$\pm 0,34$	$\pm 0,47$
13. Messung	$\pm 0,37$	$\pm 0,25$	$\pm 0,35$

Tab. 1: Genauigkeiten der freien Netzausgleichungen (Aubecken)

b) Gauchach-Brücke:

An den Pfeilern einer Eisenbahnbrücke über die Gauchachschlucht zwischen Donaueschingen und Neustadt hatten sich Risse gebildet, die Renovierungsarbeiten erforderlich machten. Für die vermessungstechnische Überwachung der Brücke während der Bauarbeiten und für die späteren periodischen Überwachungen war wegen der bewaldeten Schlucht nur das in Abb. 2 dargestellte Netz möglich. Es ist ein interessantes Beispiel dafür, wie durch Kombination von Präzisionsstreckenmessungen mit entsprechend genauen Richtungsbeobachtungen höchste Genauigkeiten trotz extremer Netzkonfiguration erreicht werden können.

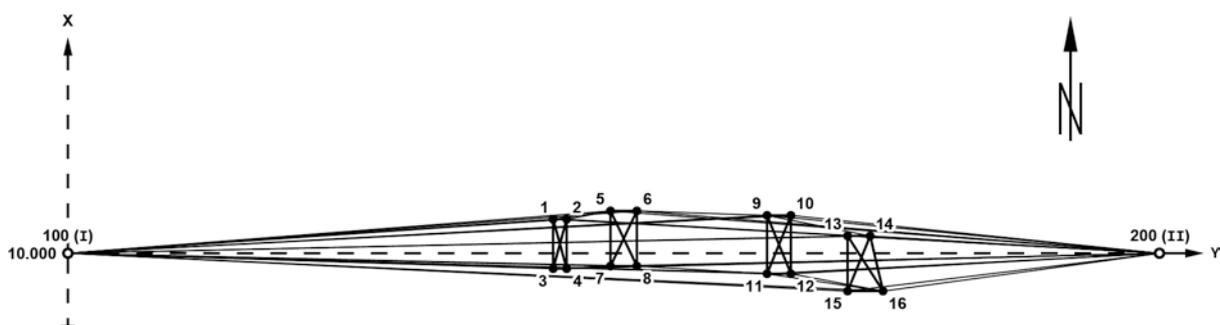


Abb. 2: Skizze der Lagefestpunkte im trigonometrischen Netz der Gauchachbrücke mit örtlichem Koordinatensystem (unmaßstäblich)

Die beiden Beobachtungspfeiler I und II sind nach geologischer Begutachtung im Fels verankert und außerhalb des Bewegungsbereichs der Brücke eingebracht. Die Strecken zwischen den beiden Pfeilern ist ca. 400 m lang und dient als Basisstrecke. Die Objektpunkte sind auf der Sandsteinbrüstung der Brücke für die Kern-Kugelzentrierung vermarktet. Je 4 Objektpunkte wurden zu Punktgruppen zusammengefaßt. Von beiden Pfeilern wurden jeweils zu allen Objektpunkten die Strecken mit dem Mekometer und die Richtungen mit dem Sekundentheodolit DKM 2 gemessen. Zusätzlich wurde von Punktgruppe zu Punktgruppe auf jeder Brückenseite je ein Brechungswinkel sowie zwischen den Punkten einer Gruppe die Strecken mit einem Invarband bestimmt.

Meßepoche	mittl. Beob.fehler vor der Ausgleich.		durchschn. mittl. Streckenfehler nach der Ausgl.	durchschn. mittl. Punktlagefehler
	Strecken [mm]	Richt. [mgon]	[mm]	[mm]
1. Messung	± 0,39	± 0,19	± 0,24	± 0,28
2. Messung	± 0,42	± 0,21	± 0,26	± 0,31
3. Messung	± 0,31	± 0,15	± 0,19	± 0,22
4. Messung	± 0,48	± 0,24	± 0,30	± 0,36
5. Messung	± 0,38	± 0,19	± 0,24	± 0,28
6. Messung	± 0,29	± 0,14	± 0,18	± 0,21

Tab. 2: Genauigkeiten der freien Netzausgleichungen (Gauchach)

Tabelle 2 zeigt die Genauigkeiten der bisherigen sechs Messungen. Die erreichten Streckenmeßgenauigkeiten bleiben trotz der verschiedensten Wetterlagen unterhalb eines halben Millimeters. Bei der ersten Meßepoche konnte sogar ein Fehler in der Eichung des Invarbandes nachgewiesen werden.

Wie die durchgeführten Deformationsanalysen zeigen, ist die Brücke bisher stabil geblieben. Die festgestellten Verschiebungsvektoren erreichen kaum die Grenze des 95%-igen Konfidenzbereichs. Daraus kann man schließen, daß die erreichten Genauigkeiten tatsächlich reproduzierbar und die Ergebnisse weitgehend frei von eventuellen systematischen Fehlereinflüssen sind.

c) Kulturwehr Kehl:

Zur Prüfung des Materialverhaltens während des Vorspannens einer Betonplatte waren am Kulturwehr Kehl (Abb. 3) Präzisionsstreckenmessungen erforderlich. Die notwendigen Messungen wurden mit dem Mekometer und einem Invarband durchgeführt. Die Strecken zwischen den Punkten 3 und 16 konnten mit dem Invarband, die Strecken zum Punkt 1 wegen eines Betonabsatzes nur mit dem Mekometer gemessen werden (Abb. 3). Zum unabhängigen Vergleich und zur Kon-

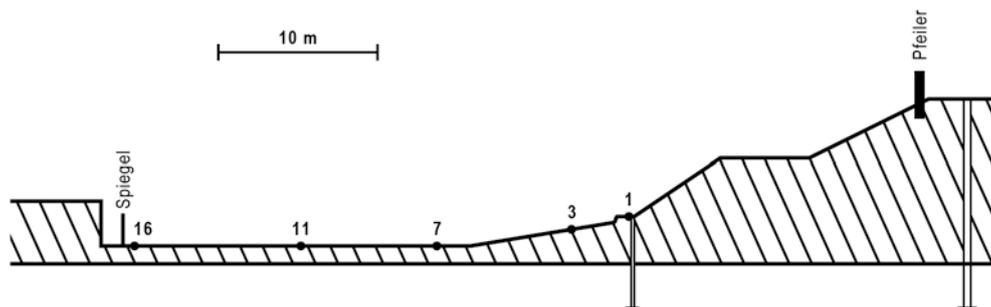


Abb. 3: Kulturwehr Kehl/Straßburg, Längsprofil

trolle wurden die Strecken 16 - 11, 16 - 7 und 16 - 3 zusätzlich mit dem Mekometer bestimmt. Da die Entfernungen sehr kurz waren, die hohe Genauigkeit des Mekometers aber erst bei Streckenlängen ab ca. 100 m gewährleistet wird, mußten die Messungen über Spiegelreflexion von einem zusätzlich errichteten Meßpfeiler aus erfolgen. Der dafür entwickelte Spiegel mit Diop- ter, Hilfsspiegel und Feintrieben gestattete eine sehr schnelle und genaue Ausrichtung. Der Vergleich der Ergebnisse in Tabelle 3 zeigt eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Invarband und Mekometer.

Strecke	16 - 11 (10,5 m) [mm]	16 - 7 (18,9 m) [mm]	16 - 3 (27,2 m) [mm]	16 - 1 (30,8 m) [mm]	1 - 3 (3,6 m) [mm]
Mekometer 2. Mess. - 1. Mess.	-1,16	-1,82	-2,42	-3,96	-1,54
Invarband 2. Mess. - 1. Mess.	-1,14	-1,91	-2,75	-	-
Vergleich	-0,02	+0,09	+0,33	-	-

Tab. 3: Vergleich der Ergebnisse Mekometer - Invarband (Kulturwehr Kehl/Straßburg)

d) Rückhaltebecken:

Als weitere Beispiele zur Demonstration der mit dem Mekometer erreichbaren hohen Meßgenauigkeit können die Ergebnisse aus den Überwachungsnetzen zweier Rückhaltebecken, deren Streckenlängen zwischen 100 und 400 m liegen, mitgeteilt werden (Tabelle 4). Eines dieser beiden Netze eignete sich auch für eine räumliche Streckennetzausgleichung. Wegen der relativ geringen Höhenunterschiede ergab sich eine Höhengenaugkeit im räumlichen Streckennetz von zwar nur $\pm 4,5$ mm, diese Genauigkeit reichte jedoch aus, um einen Fehler im Nivellement bei einem der Objektpunkte nachzuweisen. Der mittlere Streckenfehler wird im räumlichen Netz deutlich kleiner (Tabelle 4).

Projekt	mittl. Fehler d. gemess. Strecke [mm]	durchschnittlicher		
		mittl. Fehler d. ausgegl. Strecke [mm]	Punktlagefehler [mm]	Höhenfehler [mm]
Rückhaltebecken Haslach: Streckennetz	$\pm 0,30$	$\pm 0,25$	$\pm 0,38$	-
Rückhaltebecken Spindelwag: Streckennetz	$\pm 0,45$	$\pm 0,34$	$\pm 0,49$	-
räuml. Streckennetz	$\pm 0,29$	$\pm 0,26$	$\pm 0,54$	$\pm 4,53$

Tab. 4: Genauigkeiten der freien Netzausgleichungen (Rückhaltebecken)

e) Pumpspeicherwerk Vianden:

Das Lagenetz des Pumpspeicherwerkes Vianden (Abb. 4) wurde von uns im April 1982 durchgemessen. Trotz zum Teil widriger Witterungsverhältnisse (Schneesturm) konnte eine mittlere Streckenmeßgenauigkeit von $m_s = \pm 0,5$ mm erreicht werden.

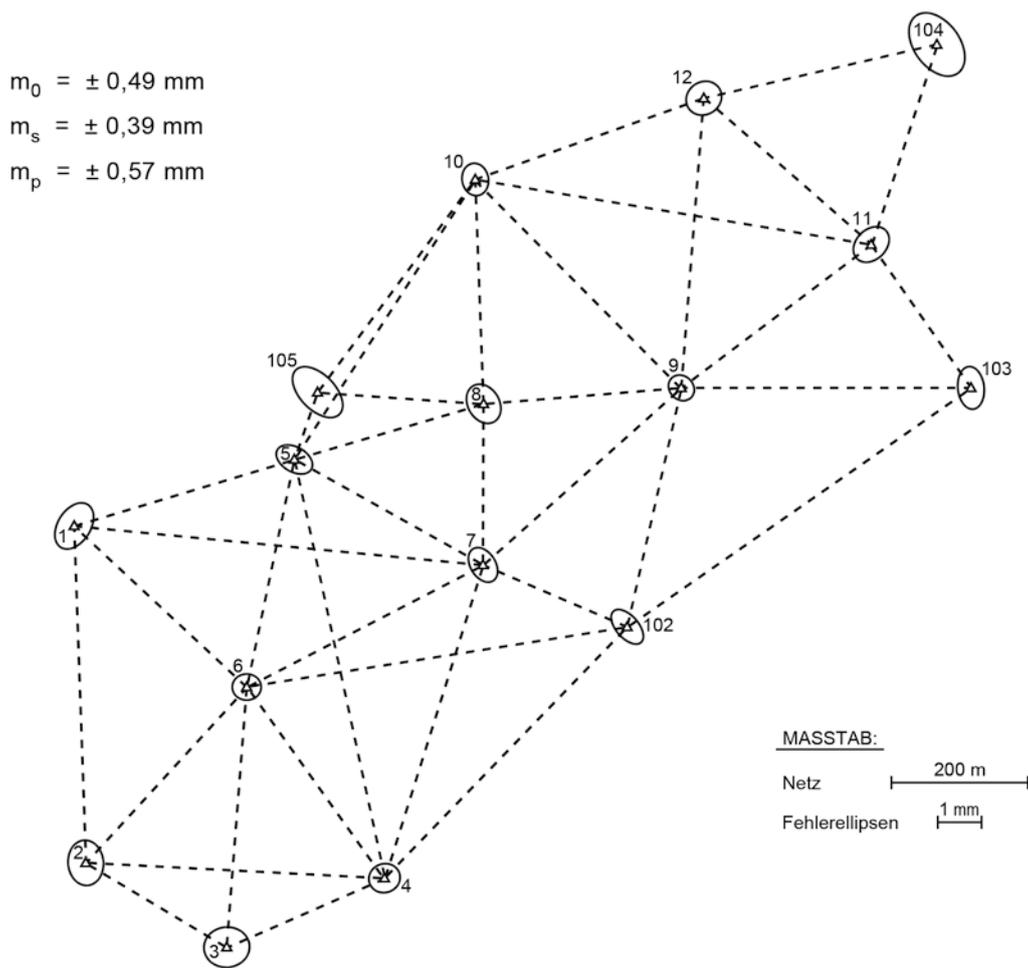


Abb. 4: Pumpspeicherwerk Vianden

f) Albstadt:

Seit Herbst 1981 bestehen auf der Schwäbischen Alb bei Albstadt zwei geodynamische Testnetze mit 18 (Tailfingen) bzw. 7 (Onstmettingen) Pfeilern (Abb. 5). Beide Netze wurden erstmalig im Mai 1982 und wiederholt im Mai/Juni 1983 gemessen. Im Testnetz Onstmettingen konnte mit dem Verfahren der Streckenverhältnisse bei einem erhöhten Arbeitsaufwand eine weitere Steigerung der relativen Genauigkeit erreicht werden. Bei dieser Methode werden je zwei unmittelbar hintereinander gemessene Strecken zu einem Paar zusammengefaßt. In der Auswertung gehen nicht die Streckenlängen sondern das Verhältnis der beiden Strecken ein. Auf diese Weise können alle systematischen Maßstabseffekte, verursacht etwa durch nicht repräsentative meteorologische Daten oder Frequenzinstabilitäten oder Frequenzunterschiede, wie sie beim Mekometer in den Meßbereichen 10 - 500 m und 500 - 3000 m zu erwarten sind, eliminiert werden (Tabelle 5). Das Verfahren eignet sich vor allem bei Deformationsmessungen, bei denen eine stabile Stützpunktbasis für den Bezugsmaßstab vorhanden ist.

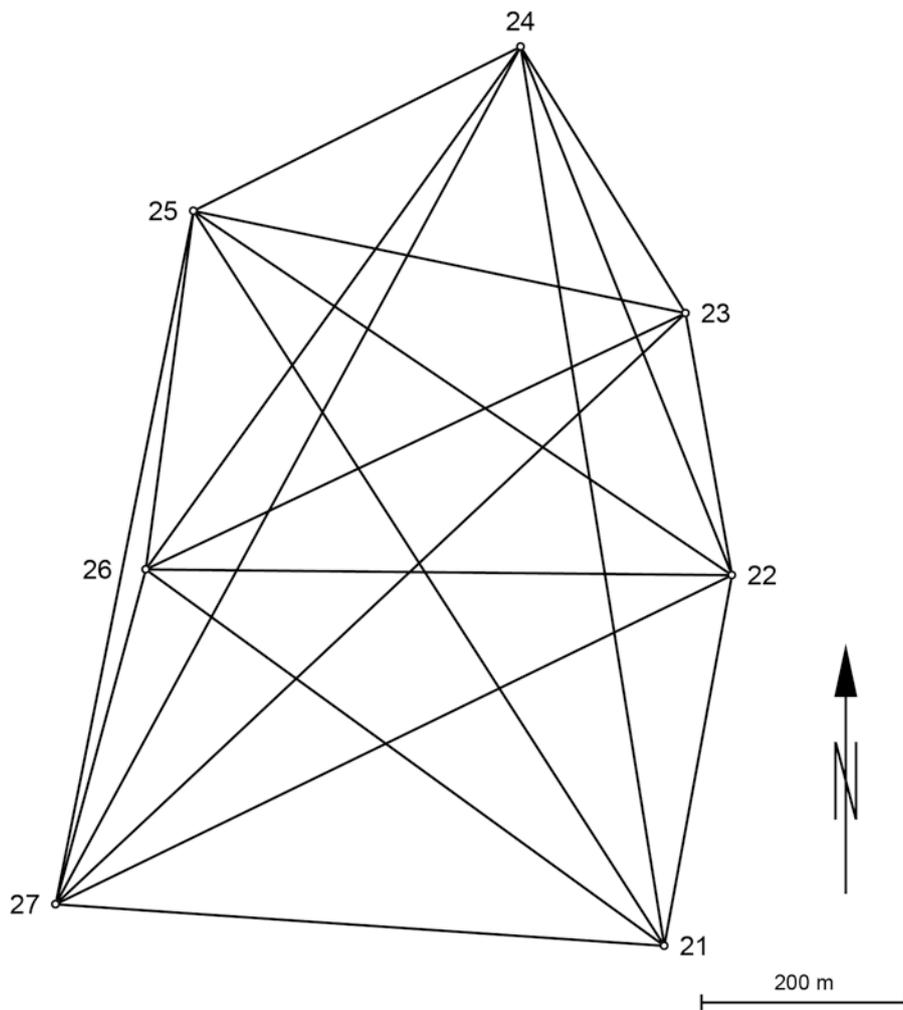


Abb. 5: Netz Onstmettingen

Verfahren	Anzahl der Beobachtungen (Streckenverhältnisse)	Anzahl der Überbestimmungen	Strecken Meßbereich	
			I [mm]	II [mm]
Streckennetz	39	27	0,45	0,71
Streckenverhältnisse mit meteorol. Korrektion	156 (78)	68	0,34	0,51
Streckenverhältnisse ohne meteorol. Korrektion	156 (78)	68	0,34	0,52

Tab. 5: Genauigkeitsangaben im Testnetz Onstmettingen bezogen auf Basis 21 - 24

g) Eichstrecken:

In den vergangenen drei Jahren sind von uns eine Reihe von Eichstrecken zum Teil wiederholt gemessen worden. Die Ergebnisse der inneren Genauigkeiten dieser Messungen sind in Tabelle 6 enthalten. Alle über Pfeiler gemessenen Eichstrecken konnten mit einer inneren Genauigkeit besser als $\pm 0,4$ mm bestimmt werden. Die Eichstrecken Mannheim ist über Stative mit Zwangszentrierung gemessen worden.

Eichstrecke	Anzahl der Punkte	Anzahl der Überbestimmungen	mittl. Streckenfehler [mm]	Bemerkung
Karlsruhe	8	16 / 16 / 16	$\pm 0,32/\pm 0,37/\pm 0,26$	Pfeiler
Hannover	7 / 10	13 / 15	$\pm 0,30/\pm 0,28$	Pfeiler
Saarbrücken	5	3	$\pm 0,33$	Pfeiler
München	8	19	$\pm 0,31$	Pfeiler
Mannheim	12	28 / 34	$\pm 0,46/\pm 0,44$	Stativ

Tab. 6: Genauigkeiten bei Eichstrecken

Literatur:

Meier-Hirmer, B. (1975a): Präzisionsstreckenmessungen mit dem Mekometer. Allgemeine Vermessungs-Nachrichten, Heft 2.

Meier-Hirmer, B. (1975b): Frequenzuntersuchungen am Mekometer ME 3000. Allgemeine Vermessungs-Nachrichten, Heft 11.

Heck, Kuntz, Meier-Hirmer (1977): Deformationsanalyse mittels relativer Fehlerellipsen. Allgemeine Vermessungs-Nachrichten, Heft 3.

Kuntz, Meier-Hirmer, Seckel (1979): Deformationsmessungen an einem Speicherbecken mit dem Mekometer ME 3000. Allgemeine Vermessungs-Nachrichten, Heft 2.

ERFAHRUNGEN MIT DEM MEKOMETER ME 3000 BEI
DEFORMATIONSMESSUNGEN IN ISLAND

von

Bernhard RITTER

Institut für Vermessungskunde
Technische Universität Braunschweig
Pockelsstraße 4, 3300 Braunschweig
Bundesrepublik Deutschland

ZUSAMMENFASSUNG

Das Mekometer ME 3000 des Instituts für Vermessungskunde wird seit 1975 bei Deformations- und Vergleichsmessungen in Island eingesetzt. Es wird über die Genauigkeit des Instruments - vorwiegend im Entfernungsbereich 500 - 3000 m - bei Stativmessungen berichtet. Mittlere Streckenfehler kleiner $\pm (1 \text{ mm} + 2 \text{ mm/km})$ werden auch unter schwierigen Bedingungen erreicht.

ABSTRACT

Since 1975 the Mekometer ME 3000 of Institut für Vermessungswesen is used in Iceland for deformation- and calibration-measurements. The accuracy of the instrument used on tripods mainly in the 500 - 3000 m range was found superior to $\pm (1 \text{ mm} + 2 \text{ mm/km})$ even under difficult conditions.

1. EINFÜHRUNG

Seit dem Jahre 1974 besitzt das Institut für Vermessungskunde der Technischen Universität Braunschweig ein Mekometer ME 3000. Schon bei der Beschaffung war beabsichtigt, das Instrument bei den wiederkehrenden Deformationsmessungen in Island im Meßbereich bis 3000 m einzusetzen.

Im Sommer 1975 wurden die ersten Streckenmessungen mit dem Mekometer in Island in drei Deformationsfiguren und auf einer Vergleichsstrecke ausgeführt (RITTER 1982). Die Messungen im Netz Gjästikki, eine Wiederholungsmessung im Jahre 1977 und die Beobachtungen auf der Vergleichsstrecke Reykjavik eignen sich für einige Untersuchungen, über die hier berichtet werden soll.

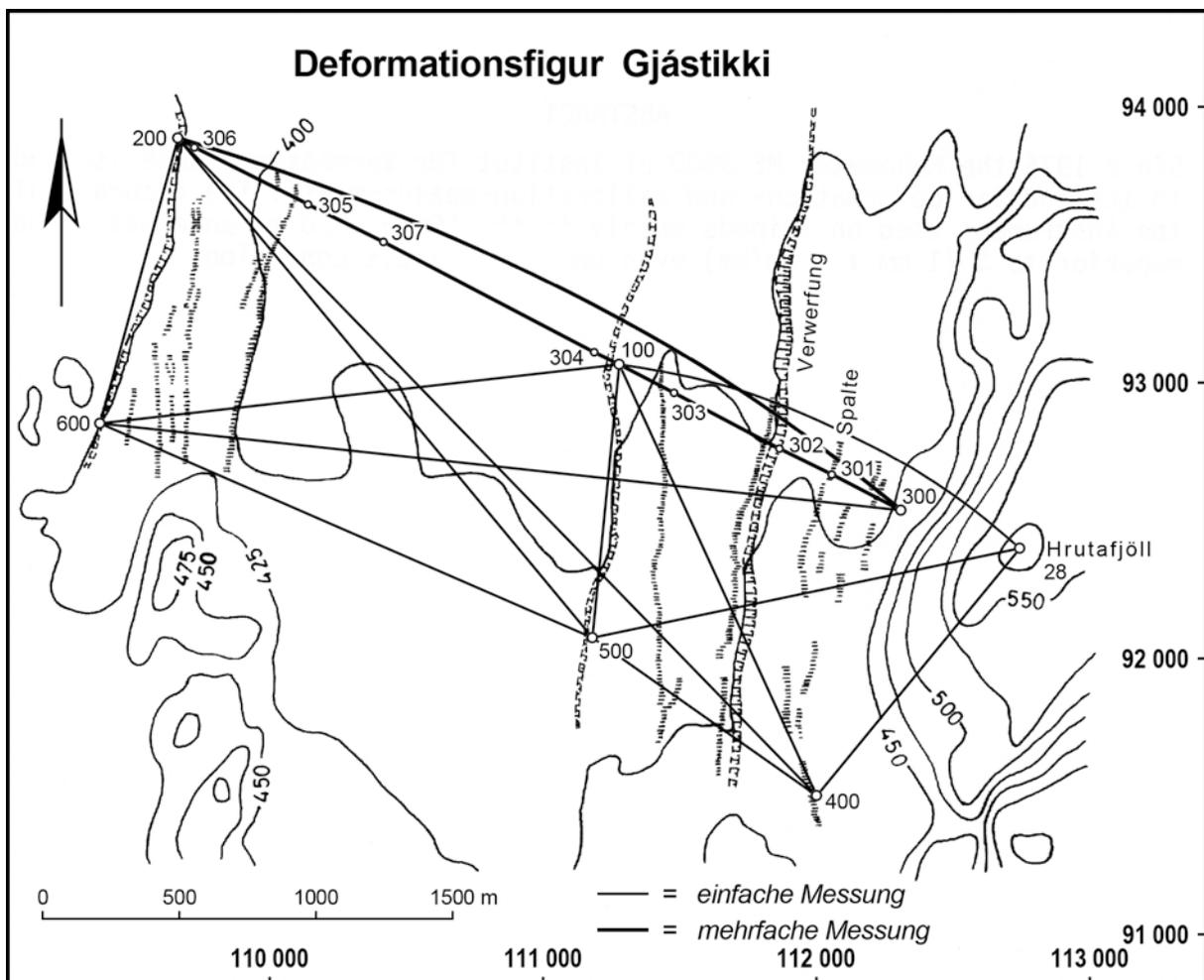


Abb. 1 Untersuchungsgebiet Gjästikki - Mekometermessungen 1975

2. DEFORMATIONSFIGUR GJÁSTIKKI

Die Deformationsfigur Gjástikki (Abb. 1) liegt im Nordosten Islands in der jungvulkanischen Zone und ist sehr schwer erreichbar. Die Entfernung bis zum nächsten Gehöft beträgt etwa 35 km, die An- und Abfahrten bis zu einem Zeltlager rund 2 km nördlich des Hrutafjölls sind zeitraubend. Vom Lager aus sind nur noch Fußmärsche möglich. Die Figur überdeckt einen ausgeprägten Spaltenschwarm und mißt 3 km x 1 km, sie besteht aus 6 Vierecks- und 7 Alignementspunkten. Die bodengleichen Punktfestlegungen sind unterschiedlich ausgebildet und nicht alle für optische Lotungen gut geeignet. Der Anschluß an das Sondernetz Nordost-Island wird über die Station Hrutafjöll, die etwa 150 m höher als die Deformationsfigur liegt, und andere Netzpunkte durchgeführt.

1075 wurden mit dem Mekometer 35 Strecken zur Lagebestimmung der Objektpunkte beobachtet (Tab. 1). Davon entfielen allein 25 Strecken auf das über die Punkte 300, 100 und 200 geführte Profil (Abb. 2). Die Ordinaten aller Zwischenpunkte einer Geraden 200 - 300 sind kürzer als 2 m, sie wurden jeweils durch mehrfache Alignements von den Viereckspunkten aus bestimmt und in den nachfolgenden Auswertungen festgehalten; dadurch können in der Figur reine Streckenausgleichungen in einem örtlichen System durchgeführt werden (Tab. 2).

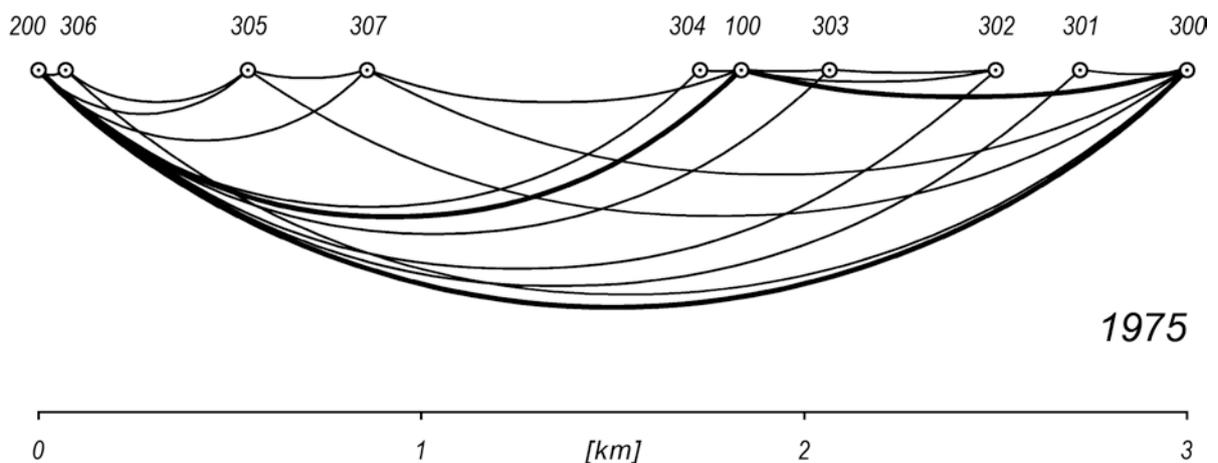


Abb. 2 Mekometermessungen 1975 im Profil Gjástikki

1977 wurden nach starken Lage- und Höhendeformationen im Bereich von maximal 2,8 m mit demselben Mekometer 34 Strecken gemessen (Tab. 1). Allerdings wurde bei der Streckenauswahl nun eine andere Strategie verfolgt.

1975				1977			
von	nach	Ellipsoid. Strecke [m]	mittl. Fehler [mm]	von	nach	Ellipsoid. Strecke [m]	mittl. Fehler [mm]
100	200	1814,9039	4,6	100	200	1816,5368	4,6
100	302	662,3651	2,3	100	300	1153,8507	3,3
100	303	226,0062	1,5	100	301	876,8053	2,8
100	304	105,9430	1,2	100	302	663,1409	2,3
100	307	967,8618	2,9	100	303	226,3943	1,5
				100	304	106,0134	1,2
200	100	1814,9037	4,6	100	305	1282,7660	3,6
200	300	2967,8703	6,9	100	306	1746,3351	4,5
200	301	2690,8984	6,3	100	307	968,4938	2,9
200	302	2477,2715	6,0				
200	303	2040,9121	5,1	200	100	1816,5373	4,6
200	304	1708,9625	4,4	200	304	1710,5162	4,4
200	305	533,1576	2,1	200	305	533,7610	2,1
200	306	70,0215	5,0	200	305	533,7596	2,1
200	307	847,0457	2,7	200	306	70,1925	5,0
				200	307	848,0315	2,7
300	100	1152,9744	3,3				
300	100	1152,9726	3,3	300	100	1153,8598	3,3
300	200	2967,8720	6,9	300	301	277,0466	1,6
300	200	2967,8765	6,9				
300	301	276,9715	1,6	302	300	490,7109	2,0
300	305	2434,7164	5,9	302	300	490,7107	2,0
300	306	2897,8480	6,7	302	301	213,6639	1,4
300	307	2120,8256	5,3	302	303	436,7460	1,9
				302	303	436,7465	1,9
303	302	436,3611	1,9				
				305	304	1176,7549	3,4
305	306	463,1222	10,0	305	306	463,5665	1,9
305	307	313,8896	1,6	305	306	463,5663	1,9
				305	307	314,2679	1,6
100	600	1893,0906	4,8				
200	600	1057,6541	3,1	100	500	986,0716	3,0
300	400	1079,5937	3,2	100	600	1894,6920	4,8
300	600	2928,6375	6,9	200	600	1057,6522	3,1
400	100	1716,2009	4,4	400	100	1716,6336	4,4
400	200	3337,9225	10,0	400	300	1079,6123	3,2
400	500	1005,1274	3,0	400	500	1006,1443	3,0
500	100	986,2290	3,0	500	200	2358,2331	5,7
500	200	2357,0364	5,7	500	600	1946,5692	4,9
500	600	1945,0008	4,9				

Tab. 1 Reduzierte Mekometerstrecken Gjästikki 1975 und 1977

Die beiden Auswahlkriterien sollen kurz erläutert werden (Abb. 2 und 3):

- 1975 wurde der Meßbereich des Mekometers von 3000 m voll ausgeschöpft, einmal mit 3337 m auf eine größere Reflektorkombination sogar übertroffen, und es wurde darauf geachtet, daß jeder Punkt mindestens einmal durch Mekometermessungen überbestimmt wurde. Die mittlere Streckenlänge beträgt 1550 m.
- 1977 wurden - bedingt durch eine veränderte maximale Reichweite des Mekometers und die herrschenden Wetterverhältnisse - nur noch Strecken bis 2400 m gemessen, in jedem Falle kürzeren Strecken im Profil der Vorzug vor längeren gegeben und Distanzen zwischen 400 und 600 m in beiden Meßbereichen gemessen (Meßbereich I: 10 - 500 m, Meßbereich II: 500 - 3000 m). Alle Profilmunkte wurden erneut durch mindestens zwei geometrische Strecken bestimmt. Die mittlere Streckenlänge beträgt nur noch 950 m.

Durch die Streckenauswahl 1977 sollte das eigentlich schon befriedigende Ergebnis von 1975 nochmals verbessert werden.

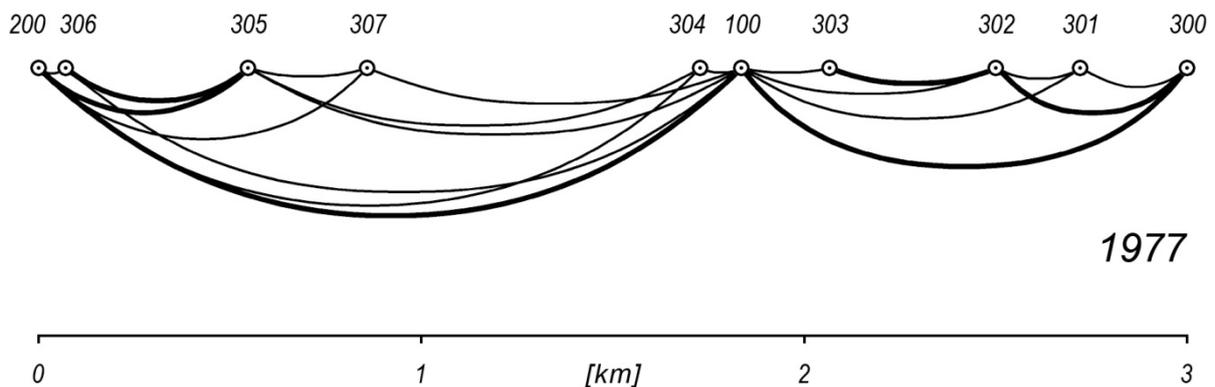


Abb. 3 Mekometermessungen 1977 im Profil Gjástikki

Alle Mekometerstrecken wurden mit den von *MEIER-HIRMER (1975)* angegebenen Korrekturen reduziert. Zusätzliche Maßstabsverbesserungen wurden nach den von 1974 bis 1977 von der Firma Kern und der Universität Karlsruhe ermittelten Frequenzabweichungen der Modulationsfrequenz angebracht.

Als Genauigkeitsansatz für den mittleren Streckenfehler einer Mekometerstrecke wurde 1975, wie 1977, eingeführt

$$m_s = \pm (1 \text{ mm} + 2 \text{ mm/km})$$

	1975		1977	
Pkt.	X	Y	X	Y
100	9998,468	11814,903	9998,276	11816,529
200	10000,000	10000,000	10000,000	10000,000
300	10000,000	12967,872	10000,000	12970,383
301	9999,673	12690,900	9999,736	12693,336
302	9999,369	12477,268	9999,485	12479,671
303	9998,784	12040,908	9998,780	12042,924
304	9998,559	11708,958	9998,489	11710,515
305	9999,563	10533,155	9999,867	10533,761
306	9999,941	10070,027	10000,048	10070,193
307	9999,004	10847,044	9999,254	10848,029
400	8938,491	13164,642	8938,421	13166,908
500	9078,095	12169,257	9077,919	12170,483
600	8967,087	10227,433	8967,011	10227,072

Tab. 2 Näherungskordinaten Gjästikki 1975 und 1977

und die Streckengewichte für die Ausgleichung danach berechnet. Eine kurze und sehr steile Strecke (200 - 306) erhielt wegen der unbefriedigenden Genauigkeit der Neigungsreduktion den mittleren Streckenfehler ± 5 mm, zwei weitere Strecken einen mittleren Fehler von ± 10 mm wegen des Überganges auf einen anderen Reflektortyp. 1975 wurde in der Gesamtausgleichung der Deformationsfigur ein Gewichtseinheitsfehler m_0 von $\pm 0,66$ und 1977 von $\pm 0,95$ erzielt, d.h. bei der ersten Messung war die Genauigkeit etwa ein Drittel höher als der gewählte Ansatz, und bei der zweiten Messung erwies sich der Ansatz als eine zutreffende Schätzung.

Die Ausgleichung der Profile ergab kaum abweichende Gewichtseinheitsfehler von $\pm 0,61$ und $\pm 0,98$. Anschaulicher ist ein Vergleich der Genauigkeiten der ausgeglichenen Strecken 1975 und 1977. Einige kurze Strecken und die vier längsten Strecken werden in der Tabelle 3 gegenübergestellt.

Während im Nahbereich die Streckengenauigkeit der 2. Epoche i.allg. nur unwesentlich niedriger ist - in wenigen Fällen sogar höher -, ist im Entfernungsbereich > 2000 m ein deutlicherer Unterschied ersichtlich. Das Auswahlkriterium für die zu beobachtenden Strecken hat also nicht den gewünschten Erfolg gehabt.

von	nach	1975 m _s [mm]	1977 m _s [mm]
100	303	0,8	1,1
100	304	0,8	1,1
200	305	1,0	1,1
301	302	1,8 *	1,0
200	300	1,3	2,0 *
200	400	2,4	3,8 *
200	500	2,2	3,3
200	600	2,5	4,2 *
* = nicht direkt beob. Strecke			

Tab. 3 Ausgewählte mittlere Streckenfehler Gjástikki 1975 und 1977 nach Ausgleichung

Als Gründe dafür können vermutet werden:

- die Streckenmeßgenauigkeit während der Messungen 1977 war geringer als 1975
- der Ansatz für den mittleren Streckenfehler beider Messungen in dieser Figur ist unzutreffend. Der Parameter für den konstanten Fehleranteil ist zu niedrig geschätzt (z.B. lassen sich Stand-sicherheiten der Stative im Submillimeterbereich nicht überwachen) und der streckenabhängige Fehleranteil ist zu hoch angesetzt. Dadurch würden die relativen Fehler kurzer Strecken größer und langer Strecken kleiner.
- während des viertägigen Zeitraumes der Streckenmessungen 1977 waren die Erdoberflächendehformationen in dem Spaltenschwarm nach den vorangegangenen Aktivitäten noch nicht völlig abgeklungen.

3. VERGLEICHSTRECKE REYKJAVIK

Die Vergleichsstrecke Reykjavik wurde 1975 erstmals bestimmt, sie befindet sich außerhalb der jungvulkanischen Zone in einer Ebene, etwa 15 km östlich von Reykjavik. Die Ordinaten aller Zwischenpunkte, bezogen auf die 2055 m lange Gerade über die Endpunkte 101 und 108, bestimmt durch vier Alignementsmessungen, sind alle kürzer als 1 m. Die Höhenunterschiede der Messingbolzen mit gut definierten Zentren wurden nivelliert.

24 Mekometerstrecken wurden gemessen, um die 8 Punkte zu bestimmen. Die Anordnung dieser Messungen ist der Abb. 4 zu entnehmen. Die mittlere Streckenlänge beträgt hier 680 m, es wurden 7 Strecken im Meßbereich I, 3 in beiden Meßbereichen und 11 im Meßbereich II beobachtet.

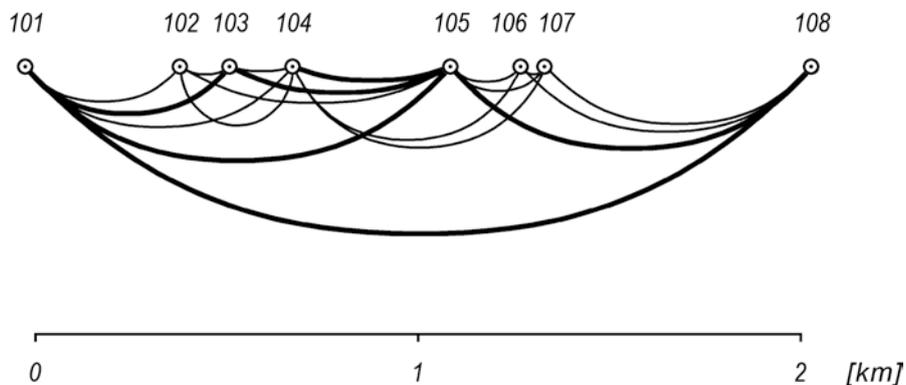


Abb. 4 Mekometermessungen 1975 auf der Vergleichsstrecke Reykjavik

Das Ergebnis der Streckenausgleichung ($m_0 = \pm 0,42$) zeigt, daß die Abschätzung für den mittleren Streckenfehler $m_s = \pm(1 \text{ mm} + 2 \text{ mm/km})$ hier auf $m_s = \pm(0,5 \text{ mm} + 1 \text{ mm/km})$ reduziert werden kann. Dieser Wert dürfte bei Stativmessungen mit dem Mekometer unter sehr günstigen Voraussetzungen der überhaupt erreichbaren Genauigkeit nahe kommen. Die Gesamtlänge der Vergleichsstrecke hat nach der Ausgleichung einen mittleren Fehler von $\pm 0,7 \text{ mm}$.

4. DISKUSSION DER ERGEBNISSE

Die mit dem Mekometer in bestehenden Netzen durch Messungen vom Stativ überwiegend im Meßbereich II erzielten Lagegenauigkeiten haben den Anforderungen an diese Deformationsmessungen entsprochen, auch wenn zusätzlich berücksichtigt wird, daß der absolute Netzmaßstab von den hier ausgewerteten Netzmaßstäben durchaus 1 bis 2 mm/km abweichen kann. Diese Differenzen sind nach verschiedenen Untersuchungen über Kurzzeit- und Langzeitfrequenzverhalten des Mekometers zu erwarten (*RITTER 1982*). An anderer Stelle wurden vergleichbare Ergebnisse gefunden (*MEIER-HIRMER 1978*).

Hier ging es in erster Linie darum, zu zeigen, daß Strecken im Meßbereich II und auch Strecken im Bereich der angegebenen maximalen Reichweite nicht von vorneherein als Messungen minderer Genauigkeit eingestuft und unterlassen werden sollten.

LITERATUR

- MEIER-HIRMER, B.: *Präzisionsstreckenmessungen mit dem Mekometer ME 3000*. Allgemeine Vermessungsnachrichten 82, 41 - 59, 1975
- MEIER-HIRMER, B.: *Untersuchungen zur Langzeitstabilität des Maßstabsnormals verschiedener EDM-Geräte*. Allgemeine Vermessungsnachrichten 85, 121 - 128, 1978
- RITTER, B.: *Untersuchungen geodätischer Netze in Island zur Analyse von Deformationen von 1967 bis 1977*. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Heft 271, München 1982

Die Bestimmung der äußeren Genauigkeit
elektrooptisch gemessener Strecken mittels
Varianzkomponentenschätzung

von

Hans FRÖHLICH

Landesvermessungsamt Nordrhein-Westfalen
Muffendorfer Str. 19-21
5300 Bonn 2
Bundesrepublik Deutschland

ZUSAMMENFASSUNG

Zur Bestimmung der äußeren Genauigkeit elektrooptisch gemessener Strecken bietet sich das Verfahren der Varianzkomponentenschätzung an. Hierbei werden objektive Werte für den entfernungsunabhängigen konstanten sowie den von der Entfernung abhängigen proportionalen Fehler ermittelt. Das Modell wird beschrieben und auf Mekometer-Streckenmessungen in allen Kombinationen auf der Eichstrecke der HSBw in München angewendet.

SUMMARY

The accuracy specification of EDM-instruments is composed of a constant error, independent of distance, and a proportional error, dependent on distance. The values given by the manufactures represent the accuracy of the EDM-instrument but not of the measured distance. Therefore variance components are estimated to determine both terms of the variances of electrooptic distance measurements. The model used is pointed out and results for Mekometer-measurements are given. The measurements were performed on the calibration line of the HSBw at Munich.

1. PROBLEMSTELLUNG

Als bewährtes Verfahren zur Kalibrierung elektrooptischer Streckenmeßgeräte hat sich in den letzten Jahren die Messung in allen Kombinationen auf besonders angelegten Eichlinien herauskristallisiert. Aus diesen Messungen lassen sich insbesondere dann präzise Aussagen über die Additionskorrektur machen, wenn bekannte Sollstrecken vorliegen.

Bei der Anlage einer Eichlinie wird man deshalb die Messungen zur Sollstreckenbestimmung mit einem Streckenmeßgerät höchster Präzision in allen Kombinationen durchführen. Hierdurch erreicht man, daß Messungen in überschüssiger Anzahl vorliegen. Eine Ausgleichung nach der Methode der kleinsten Quadrate liefert dann nahezu fehlerfreie Sollstrecken, deren geschätzte Varianzen eine Aussage über den Grad der "Fehlerfreiheit" erlauben. Zuvor ist es jedoch erforderlich, den einzelnen Messungen ihr individuelles Beobachtungsgewicht zuzuweisen, denn bekanntlich hängt die Genauigkeit einer mit einem elektronischen Streckenmeßgerät gemessenen Strecke von der Entfernung ab.

Als mögliches Genauigkeitsmaß bietet sich z.B. das von den Geräteherstellern in Prospekten angegebene Maß $\pm(a + b \cdot S)$ an. In a schlagen sich unter anderem Unsicherheiten in den Additionskonstanten und im zyklischen Phasenfehler nieder, während b Unsicherheiten in der Maßstabsfrequenz beinhaltet. Vielfach spiegeln diese Werte die innere Genauigkeit (Wiederholungsgenauigkeit) der Streckenmessung wider. Zur objektiven Gewichtung der Beobachtungen benötigt man jedoch die äußere Genauigkeit, in der sich zusätzlich Unsicherheiten in der Zentrierung, Ausrichtung des Reflektors, Erfassung der Meteorologie und die atmosphärischen Turbulenzen niederschlagen.

Um nun die dem Messungsmaterial anhaftenden konstanten und streckenproportionalen Fehleranteile zu ermitteln, schlägt KOCH (1978) vor, sie als Varianzkomponenten zu schätzen.

Die Varianz einer gemessenen Strecke ergibt sich bei diesem Verfahren zu

$$\sigma_S^2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^2 \cdot S^{2H} . \quad (1-1)$$

Hierin bedeuten σ_S^2 die Varianz der Beobachtung S , mit σ_1^2 als dem konstanten und σ_2^2 als dem streckenproportionalen Anteil. Es sei bemerkt, daß sich die Varianz σ_S^2 nicht direkt mit dem vorgenannten Genauigkeitsmaß vergleichen läßt, da die Zusammenfassung der Varianzkomponenten nach dem Fehlerfortpflanzungsgesetz erfolgt. Der Exponent H wird in Abschnitt 2 näher erläutert.

2. VARIANZKOMPONENTENSCHÄTZUNG

Auf einer in U Punkte unterteilten Eichlinie wird die Streckenmessung in allen Kombinationen durchgeführt. Die vom Gerätstandpunkt G zum Reflektorpunkt R gemessene Strecke sei mit S_{GR} bezeichnet. Als Unbekannte X der Eichlinie werden die Strecken vom Anfangspunkt 1 zum Punkt R eingeführt, $X_{12}, X_{13}, \dots, X_{1R}, \dots, X_{1U}$, so daß $U-1$ unbekannte Strecken zu bestimmen sind. Als U -te Unbekannte ist in der Regel noch die Additionskonstante C des Gerätes zu bestimmen. Da die Punkte einer Eichlinie alle in einer Geraden liegen, ergaben sich die Fehlergleichungen ohne Linearisieren zu

$$S_{GR} + v_{GR} = X_{1R} - X_{1G} + C$$

oder in Vektorschreibweise

$$\underline{S} + \underline{v} = \underline{A} \underline{x}$$

worin \underline{A} die $N \times N$ Modellmatrix, \underline{x} der $U \times 1$ Vektor der Unbekannten, \underline{S} der $N \times 1$ Beobachtungsvektor und \underline{v} der $N \times 1$ Fehlervektor bedeuten.

Man denke sich nun den Fehlervektor \underline{v} aus den beiden $N \times 1$ unbekanntem und Messungen nicht zugänglichen Fehlervektoren \underline{v}_1 und \underline{v}_2 zusammengesetzt; \underline{v}_1 repräsentiert den konstanten, \underline{v}_2 den streckenproportionalen Fehler. Die zugehörigen Kovarianzmatrizen $D(\underline{v}_1)$ und $D(\underline{v}_2)$ lassen sich in der Form

$$D(\underline{v}_1) = \sigma_1^2 \alpha_1^2 \underline{I} = \sigma_1^2 \alpha_1^2 \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & \dots \\ 0 & 1 & 0 & \dots \\ 0 & 0 & 1 & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \end{vmatrix} = \sigma_1^2 \underline{V}_1$$

$$D(\underline{v}_2) = \sigma_2^2 \alpha_2^2 \begin{vmatrix} S_{12}^{2H} & 0 & 0 & \dots \\ 0 & S_{13}^{2H} & 0 & \dots \\ \dots & \dots & S_{14}^{2H} & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \end{vmatrix} = \sigma_2^2 \underline{V}_2$$

darstellen, mit σ_1^2 und σ_2^2 als unbekannte Faktoren und α_1^2 und α_2^2 ihren bekannten Näherungswerten, zum Beispiel Erfahrungswerten.

Da bei der elektrooptischen Streckenmessung auch reziprokes Fehlerverhalten auftreten kann, falls sich die kürzeren Strecken als die ungenaueren erweisen, kann zusätzlich mit dem Exponenten H die Längenabhängigkeit gesteuert werden; einem Genauigkeitsabfall mit zunehmender Entfernung trägt $H > 0$ Rechnung, dem gekehrten Verhalten $H < 0$.

Zur Berechnung der Varianzkomponenten (Minimierungsproblem mit Nebenbedingungen) benutzt KOCH eine lokal beste quadratische invariante erwartungstreue Schätzung. Bezeichnen $D(\underline{S}) = \frac{\Sigma}{2} = \sigma_1^2 \underline{V}_1 + \sigma_2^2 \underline{V}_2$ die Kovarianzmatrix von \underline{S} , $\underline{\Sigma}_0$ ihre Näherung, $\hat{\underline{X}}, \hat{\sigma}_1^2, \hat{\sigma}_2^2$ die Schätzwerte (ausgeglichene Werte) von $\underline{X}, \sigma_1^2, \sigma_2^2$, so ergeben sich im Falle $\det(\underline{A}' \underline{\Sigma}_0 \underline{A}) \neq 0$ und $\det \underline{I} \neq 0$ die Unbekannten mit ihren Varianzen zu

$$\hat{\underline{X}} = (\underline{A}' \underline{\Sigma}_0^{-1} \underline{A})^{-1} \underline{A}' \underline{\Sigma}_0^{-1} \underline{S} \quad (2-1)$$

$$\hat{D}(\hat{\underline{X}}) = \hat{\sigma}_0^2 (\underline{A}' \underline{\Sigma}_0^{-1} \underline{A})^{-1} \quad (2-2)$$

$$\hat{\sigma}_0^2 = \Omega / (N-U) \quad (2-3)$$

$$\Omega = \hat{\underline{V}}' \underline{\Sigma}_0^{-1} \hat{\underline{V}} \quad (2-4)$$

und die Varianzkomponenten

$$\hat{\underline{\sigma}} = \underline{\Gamma}^{-1} \cdot \underline{q} \quad (2-5)$$

mit

$$T = \left(\text{sp} \left(\underline{W} \underline{V}_i \underline{W} \underline{V}_j \right) \right), \quad \underline{q} = \left(\underline{S} \underline{W} \underline{V}_i \underline{W} \underline{S} \right), \quad i, j = (1, 2) \quad (2-6)$$

$$\underline{W} = \underline{\Sigma}_0^{-1} - \underline{\Sigma}_0^{-1} \underline{A} (\underline{A}' \underline{\Sigma}_0^{-1} \underline{A})^{-1} \underline{A}' \underline{\Sigma}_0^{-1}, \quad \underline{\Sigma}_0 = \sum_{i=j}^2 \underline{V}_i, \quad (2-7)$$

wobei $\underline{\Sigma}_0$ als positiv definit vorausgesetzt wird und der Index „o“ die Abhängigkeit von den Näherungswerten bezeichnet. Für die Varianzen der Schätzwerte gilt

$$V(\hat{\sigma}_1^2) = 2 t_{11}, \quad V(\hat{\sigma}_2^2) = 2 t_{22} \quad \text{mit} \quad \underline{\Gamma}^{-1} = (t_{ij}) . \quad (2-8)$$

Um die Schätzwerte unabhängig von den gewählten Näherungswerten zu erhalten, werden sukzessive die Schätzwerte so oft als Näherungswerte eingeführt, bis die Näherungswerte sich als Schätzwerte ergeben.

Die geschätzten Varianzkomponenten werden anschließend in die Ausgleichung zur individuellen, objektiven Gewichtung der Streckenmessungen eingeführt.

3. BEISPIEL

Die Varianzkomponentenschätzung bietet ohne Kenntnis von Sollmaßen die Möglichkeit, die den Beobachtungen anhaftenden unterschiedlichen Fehleranteile zu ermitteln. Somit erweist sie sich als geeignetes Verfahren, z.B. den Einfluß von Unsicherheiten in der Erfassung des repräsentativen Berechnungsindex entlang des Meßweges auf die Beobachtungsgenauigkeit insbesondere von Messungen im Bereich mittlerer und langer Reichweite zu untersuchen, um anschließend zu objektiven Beobachtungsgewichten zu gelangen.

Zur Untersuchung der Beobachtungsgenauigkeit elektrooptischer Streckenmeßgeräte mittlerer Reichweite haben die Rheinischen Braunkohlenwerke AG und das Landesvermessungsamt Nordrhein-Westfalen eine mit 8 Bodenpunkten vermarkte 6721 m lange Eichstrecke angelegt (FRÖHLICH u. DUDDEK 1983).

Um objektive Genauigkeitsmaße für die von beiden Vermessungsstellen eingesetzten Streckenmeßgeräte vom Typ HP 3808 A zu bekommen, wurden mit den Geräten A, B und C Messungen in allen Kombinationen (ppm-Schalterstellung gleich Null) zu verschiedenen Jahreszeiten durchgeführt. Die meteorologische Korrektur wurde mit den am Geräte- und Reflektorstandpunkt jeweils zum Zeitpunkt der Streckenmessung gemessenen Luftdruck- und -temperaturwerten berechnet. Für das Gerät B lagen zwei Meßreihen vor.

Tabelle 1 enthält die Ergebnisse der Varianzkomponentenschätzung.

Ein Vergleich der Ergebnisse untereinander zeigt:

- Die geschätzten Varianzkomponenten für die HP 3808 A stimmen nahezu überein, so daß das Ergebnis als gerätetypisch bezeichnet werden kann; jede Strecke wurde als Mittel aus drei nacheinander ausgeführten Messungen mit jeweils neuer Maximumspeilung eingeführt.
- Eine noch längere Eichstrecke wäre wünschenswert, um den streckenproportionalen Fehleranteil sicher ermitteln zu können.
- Vergleicht man die erzielten Ergebnisse mit der vom Geräthersteller angegebenen Genauigkeitsformel, $\pm (5 \text{ mm} + 1 \cdot S)$, so repräsentiert sie bei sorgfältiger Messung und gewissenhafter Erfassung der Meteorologie durchaus die erzielbare Beobachtungsgenauigkeit.

4. AUSWERTUNG VON MEKOMETERMESSUNGEN AUF DER EICHLINIE DER HSBw

Die Punkte 1 bis 7 der Eichlinie der HSBw wurden mit den Mekometern A, B, C, D1 und D2 in allen Kombinationen eingemessen. Die geometrisch und meteorologisch reduzierten Messungsdaten enthält Tabelle 2.

Für die Streckenmessungen wurden mit dem FORTRAN-IV-Programm VARKOM (FRÖHLICH 1983) Varianzkomponenten geschätzt.

Damit die Varianzkomponentenschätzung positive, interpretierbare Schätzwerte lieferte, wurde im funktionalen Modell für die Meßreihen der Geräte C, D1 und D2 ein konstanter Additionswert eingeführt und bei den Meßreihen der Geräte B und C der Exponent H von + 1,0 auf + 2,3 bzw. + 1,5 heraufgesetzt.

Die Ergebnisse in Tabelle 3 verdeutlichen, daß

- bei der vorliegenden Gesamtlänge der Eichstrecke von 540 m insbesondere der streckenproportionale Fehleranteil sich nur unsicher ermitteln läßt;
- den mit dem Gerät B gemessenen Strecken noch eine Additionskorrektur von - 0,4 mm bzw. denjenigen mit den Geräten D1 und D2 von - 0,7 mm anhaftet.

Mit den geschätzten Varianzkomponenten wurden für die anschließenden Ausgleichungen die Beobachtungen mit (1-1) wie folgt gewichtet:

$$p = 1/\hat{\sigma}_s^2 . \quad (4-1)$$

Tabelle 4 enthält geordnet nach Geräten die ausgeglichenen Streckenunbekannten mit den zugehörigen Standardabweichungen.

Während die mit den Geräten B und C erzielten Ergebnisse maximal um 0,2 mm voneinander abweichen, unterscheiden sich die Ergebnisse des Gerätes A von den vorgenannten schon bis zu 1 mm, die mit den Geräten D1 bzw D2 erzielten um mehr als 2 mm.

Da aufgrund der Unsicherheit in den geschätzten streckenproportionalen Varianzkomponenten vermutet werden kann, daß bei Mekometermessungen im Bereich bis 540 m keine Längenabhängigkeit vorliegt, wurden die Ausgleichungen mit gleichgenau gewichteten Beobachtungen wiederholt.

Diese ausgeglichenen Streckenunbekannten, Tabelle 5, weichen von denjenigen aus Tabelle 4 um maximal 0,4 mm ab. Im übrigen weisen die Ergebnisreihen ähnliche Unterschiede wie in Tabelle 4 auf. Die Standardabweichungen liegen etwas schlechter als im Falle unterschiedlich gewichteter Beobachtungen.

Zusammenfassend kann festgestellt werden:

- Aus den vorstehenden Ergebnissen lassen sich keine millimetergenauen Absolutwerte für die Eichlinie der HSBw ableiten.
- Da die Messungen mit verschiedenen Mekometern und unterschiedlichen Meßverfahren durchgeführt wurden, stellt sich die Frage, ob das angestrebte Ziel mit Mekometern erreicht werden kann.

Gerät	$\hat{\sigma}_1^2$ [mm ²]	$\hat{\sigma}_2^2$ [mm ² /km ²]	H	$v(\hat{\sigma}_1^2)$ [mm ²]	$v(\hat{\sigma}_2^2)$ [mm ² /km ²]
A	9,6	1,2	+ 1,0	± 6,3	± 1,1
B	12,3	1,0	+ 1,0	± 10,3	± 1,3
C	9,6	1,7	+ 1,0	± 8,5	± 1,5
B	6,3	0,4	+ 1,0	± 4,5	± 0,5

Tabelle 1 Geschätzte Varianzkomponenten für verschiedene HP 3808 A

Gerät A Meßbereich 1			Gerät B			Gerät C		
1	2	26,50856	1	2	26,50784	1	3	161,51442
1	3	161,51523	1	3	161,51500	1	4	243,00842
1	4	243,00940	1	4	243,00880	1	5	431,97692
1	5	431,97878	1	5	431,97761	1	6	485,52145
1	6	485,52307	1	6	485,52215	1	7	540,01240
2	3	135,00692	1	7	540,01306	2	7	513,50442
2	4	216,50154	2	3	135,00667	2	6	459,01341
2	5	405,47075	2	4	216,50084	2	5	405,46918
2	6	459,01568	2	5	405,46974	2	4	216,50056
2	7	513,50594	2	6	459,01417	2	3	135,00638
3	4	81,49396	2	7	513,50445	3	4	81,49386
3	5	270,46297	3	4	81,49392	3	5	270,46256
3	6	324,00736	3	5	270,46270	3	6	324,00749
3	7	378,49843	3	6	324,00734	3	7	378,49847
4	5	188,96877	3	7	378,49836	4	5	188,96814
4	6	242,51352	4	5	188,96874	4	6	242,51277
4	7	297,00446	4	6	242,51339	4	7	297,00374
5	6	53,54428	4	7	297,00408	5	7	108,03500
5	7	108,03549	5	6	53,54469	5	6	53,54412
6	7	54,49095	5	7	108,03525	6	7	54,49032
			6	7	54,49087			

Gerät D (D1) Reflektor 1			Gerät D (D2) Reflektor 2		
1	2	26,5086	1	2	26,5086
1	3	161,5159	1	3	161,5163
1	4	243,0103	1	4	243,0106
1	5	431,9794	1	5	431,9807
1	6	485,5249	1	6	485,5254
1	7	540,0156	1	7	540,0161
2	3	135,0081	2	3	135,0080
2	4	216,5022	2	4	216,5026
2	5	459,0172	2	5	405,47075
2	7	513,5080	2	6	459,0166
3	4	81,4950	2	7	513,5083
3	5	270,4641	3	4	81,4954
3	7	378,5006	3	5	270,4648
4	5	188,9702	3	6	324,0097
4	6	242,5151	3	7	378,5007
4	7	297,0052	4	5	188,9703
5	6	53,5459	4	6	242,5151
5	7	108,0363	4	7	297,0059
6	7	54,4915	5	6	53,5459
			5	7	108,0367
			6	7	54,4915

Tabelle 2 Gemessene und reduzierte Strecken

Gerät	σ_1^2 [mm ²]	σ_2^2 [mm ² /km ²]	H	σ_0^1	$\hat{\sigma}_1^2$ [mm ²]	$\hat{\sigma}_2^2$ [mm ² /km ²]	$V(\hat{\sigma}_1^2)$ [mm ²]	$V(\hat{\sigma}_2^2)$ [mm ² /km ²]	Additions- konstante C [mm]	m_C [mm]
A	1,0	0,01	+ 1,0	1,000	0,0676	0,3364	0,0488	0,5919	-	-
B	0,01	0,36	+ 2,3	1,000	0,0144	1,0609	0,0083	1,0837	-	-
C	0,01	0,36	+ 1,5	1,000	0,0064	1,6384	0,0102	0,0940	+ 0,4	$\pm 0,1$
D1	0,01	0,36	+ 1,0	1,000	0,0169	0,8836	0,0281	0,6368	- 0,7	$\pm 0,1$
D2	1,0	0,01	+ 1,0	1,000	0,0225	0,3136	0,0224	0,3131	- 0,7	$\pm 0,1$

Tabelle 3 Ergebnis der Varianzkomponentenschätzung

Strecke von nach	Strecken- Grobanteil [m]	Strecken-Feinanteil				
		A [mm]	B [mm]	C [mm]	D1 [mm]	D2 [mm]
1 - 2	26,50..	,...82 \pm 0,16	,...80 \pm 0,08	,...80 \pm 0,12	,...79 \pm 0,13	,...81 \pm 0,11
1 - 3	161,51..	,...55 \pm 0,16	,...48 \pm 0,08	,...47 \pm 0,10	,...52 \pm 0,16	,...54 \pm 0,13
1 - 4	243,00..	,...96 \pm 0,16	,...88 \pm 0,08	,...90 \pm 0,13	,...96 \pm 0,19	,...101 \pm 0,15
1 - 5	431,97..	,...86 \pm 0,17	,...76 \pm 0,08	,...76 \pm 0,16	,...89 \pm 0,22	,...95 \pm 0,17
1 - 6	485,52..	,...31 \pm 0,18	,...22 \pm 0,09	,...23 \pm 0,19	,...40 \pm 0,26	,...46 \pm 0,20
1 - 7	540,01..	,...41 \pm 0,19	,...30 \pm 0,09	,...31 \pm 0,23	,...47 \pm 0,31	,...54 \pm 0,23

Tabelle 4 Ausgeglichene Eichstreckenunbekannte, $p = 1/\hat{\sigma}_s^2$

Strecken-Feinanteil

Strecke von nach	Strecken- Grobanteil [m]	Strecken-Feinanteil				
		A [mm]	B [mm]	C [mm]	D1 [mm]	D2 [mm]
1 - 2	26,50..	,...81 ± 0,17	,...81 ± 0,10	,...79 ± 0,14	,...78 ± 0,17	,...82 ± 0,13
1 - 3	161,51..	,...55 ± 0,17	,...48 ± 0,11	,...44 ± 0,14	,...53 ± 0,18	,...55 ± 0,14
1 - 4	243,00..	,...96 ± 0,17	,...88 ± 0,12	,...88 ± 0,15	,...97 ± 0,19	,...101 ± 0,15
1 - 5	431,97..	,...87 ± 0,17	,...76 ± 0,13	,...74 ± 0,17	,...90 ± 0,22	,...97 ± 0,17
1 - 6	485,52..	,...31 ± 0,17	,...22 ± 0,15	,...19 ± 0,19	,...43 ± 0,25	,...46 ± 0,20
1 - 7	540,01..	,...41 ± 0,19	,...29 ± 0,17	,...28 ± 0,22	,...50 ± 0,27	,...55 ± 0,22

Tabelle 5 Ausgegliche Eichstreckenunbekannte, $p = \text{const.}$

LITERATUR

- KOCH, K.R.: *Schätzung von Varianzkomponenten*. Allgemeine Vermessungs-Nachrichten, S. 264-270, 1978
- FRÖHLICH, H.: *VARKOM-Varianzkomponentenschätzung für elektrooptische Distanzmessungen auf Lichtlinien, ein Auswerteprogramm*. BDVI-FORUM, Heft 1, 1983, S 45-55
- FRÖHLICH, H., DUDDEK, H.: *Zur Ermittlung der äußeren Genauigkeit elektrooptisch gemessener Strecken mittlerer Reichweite auf der Eichlinie Jackerath*. Das Markscheidewesen, Heft 1, 1983, S. 182-184

EIN VERTIKALES DISTANZNETZ HÖCHSTER GENAUIGKEIT

von

Thomas WUNDERLICH

Institut für Landesvermessung und Ingenieurgeodäsie
Abteilung Ingenieurgeodäsie
Technische Universität Wien
Gußhausstraße 27 - 29
Österreich

ZUSAMMENFASSUNG

Zur hochgenauen Bestimmung der Strecken eines vertikalen Diagonalvierecks ($d \leq 2,3 \text{ km}$, $\Delta H \leq 480 \text{ m}$) wurden mehrere Präzisionsdistanzmessungen mit dem Tellurometer MA 100 und eine Meßreihe mit dem Mekometer ME 3000 durchgeführt. Trotz sauberer Übereinstimmung der Distanzmittelwerte von MA 100 und ME 3000 ($\sim \pm 2 \text{ mm}$) lagen einige Differenzen der in relativ kurzem Zeitabstand von beiden Enden her gemessenen Mekometer-Strecken aus bislang ungeklärten Gründen über den erwarteten Grenzbe-trägen.

SUMMARY

To determine the sides and diagonals of a vertical quadrilateral ($d \leq 2.3 \text{ km}$, $\Delta H \leq 480 \text{ m}$) with highest accuracy several series of precise distance measurements using the Tellurometer MA 100 and one campaign using the Mekometer ME 3000 were performed. The accordance of the MA 100 ME 3000 results (averages) was remarkable ($\sim \pm 2 \text{ mm}$). In spite of this some of the differences between the Mekometer-distances measured from both ends in short sequence exceeded the expected limits, the reasons being still open to question.

1. EINLEITUNG

Zum Zwecke von präzisen geometrischen Refraktionswinkelbestimmungen nach einer neuen Methode (WUNDERLICH 1983) wurde am Alpenostrand südlich von Wien ein vertikales Distanznetz angelegt (Abb. 1).

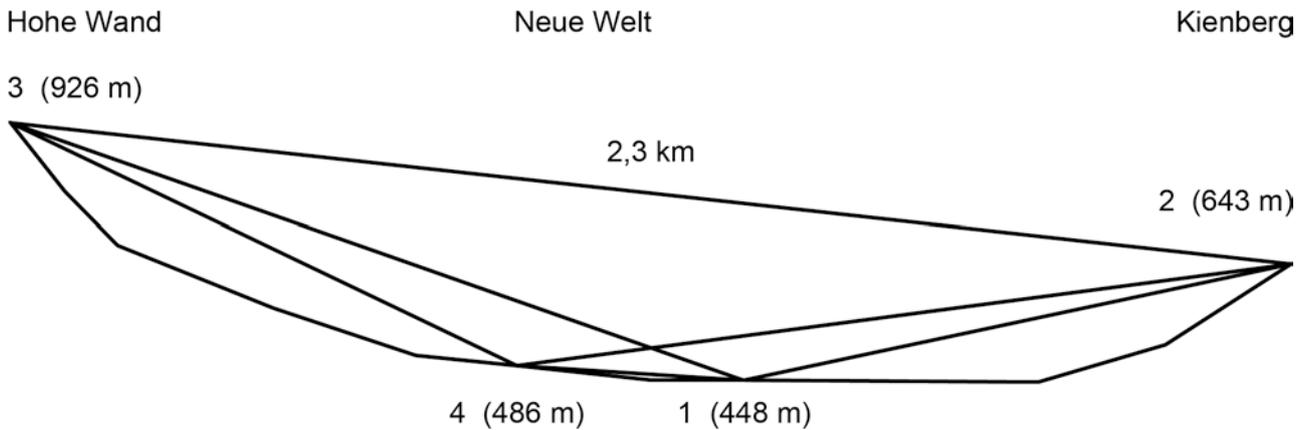


Abb. 1 Vertikales Viereck Hohe Wand

Die vier in einer Vertikalebene gelegenen Netzpunkte sind durch sechs Strecken zwischen 400 m und 2300 m Länge verbunden. Diese Distanzen mußten auf Grund fehlertheoretischer Vorgaben für die Refraktionswinkelermittlung mit einer Genauigkeit von $m_d = \pm 1 \text{ mm/km}$ bestimmt werden. Wie diese Präzision meßtechnisch erreicht werden konnte, wird im folgenden berichtet.

2. ALLGEMEINES

Netzdaten:

Punkt	Höhe	Distanz
1	448 m	1-2 = 1007 m
2	643 m	1-3 = 1398 m
3	926 m	1-4 = 408 m
4	486 m	2-3 = 2320 m
		2-4 = 1403 m
		3-4 = 1008 m

nördl. Azimut der Vertikalebene: $\alpha = 327^g$

Lage: 40 km südlich von Wien im Gebiet Hohe Wand - Neue Welt.
 Punktbeschreibung: Die beiden Talpunkte liegen inmitten von Feldern und Wiesen, die Bergpunkte befinden sich auf ausgesetzten Felsnasen.
 Vermarkung: Ein Punkt ist durch einen Meßpfeiler stabilisiert, die restlichen drei durch einbetonierte Messingbolzen, die fein gekörnt wurden.
 Meßgeräte: Tellurometer MA 100 $m_d = \pm 1,5 \text{ mm} \pm 2 \text{ mm/km}$
 Mekometer ME 3000 $m_d = \pm 0,2 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm/km}$
 Instrumente zur Erfassung des atmosphärischen Zustands: Psychrometer (Kroneis)
 Barometer (Lufft)

Die Messungen mit dem MA 100 wurden vom Verfasser, jene mit dem ME 3000 von den österreichischen Illkraftwerken als Auftragsarbeit durchgeführt.

3. FEHLEREINFLÜSSE

3.1 Zentrierung

Die Zentrierung der Entfernungsmeßgeräte über den Bodenpunkten konnte durch Verwendung von Nadirloten auf $\pm 0,1 \text{ mm}$ gesichert werden. Alle Kampagnen wurden zwangszentriert durchgemessen.

3.2 Instrumenten- und Reflektorhöhen

Da - zur späteren Ausgleichung des Diagonalvierecks - eine Höhenzentrierung aller gemessenen Distanzen auf die Bodenpunkte nötig war, mußte auf die Erfassung der Instrumenten- und Reflektorhöhen besonderes Augenmerk gelegt werden; dies umso mehr, da durch die starke Neigung einiger Strecken (bis zu 70° Zenitdistanz) der Fehlereinfluß besonders kritisch zunimmt. Für Entfernungen im Reichweitenbereich der eingesetzten Präzisionsdistanzmeßgeräte ($\sim 3000 \text{ m}$) und für eine Genauigkeit der Zenitdistanzen z von besser als $3''$ läßt sich der Fehlereinfluß der Instrumenten- und Reflektorhöhen (G,R) auf die Höhenzentrierung durch die einfache Formel beschreiben:

$$m_d(G, R) = \pm \cos z \cdot \sqrt{m_G^2 + m_R^2} \quad (G, R \leq 2 \text{ m})$$

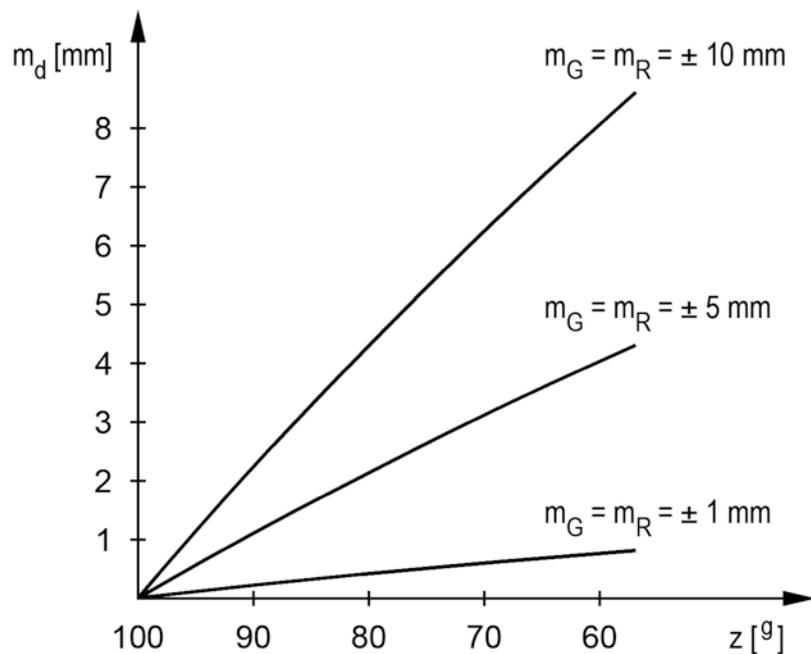


Abb. 2

Die graphische Darstellung (Abb. 2) unter verschiedenen Annahmen für m_G und m_R läßt sofort erkennen, daß selbst für wenig geneigte Strecken die übliche Ermittlung der Instrumentenhöhen mit einem Rollmaßstab ($m_G = m_R = \pm 5 \text{ mm}$) unzureichend ist. Zur Wahrung der mit den erwähnten Geräten erreichbaren Distanzmeßgenauigkeit ist also unbedingt eine Bestimmung der Instrumenten- und Reflektorhöhe auf besser als $\pm 1 \text{ mm}$ einzuhalten. Dieser hohen Genauigkeitsanforderung konnte beim MA 100 durch einen am Gerät angebrachten Glasmaßstab und Beobachtung mit einem Nivelliergerät Rechnung getragen werden. Bei der Mekometer-Messung kamen Zentrierstative mit geeichten Lotstockteilungen und Schublehren zur Anwendung.

3.3 Reflektorkonstanten und Maßstabsfaktoren

Zur Ausschaltung instrumenteller Fehlereinflüsse wurde unmittelbar vor jeder Meßkampagne eine exakte Bestimmung von Reflektorkonstante und Maßstabsfaktor für die jeweilige Instrumenten/Reflektorkombination ausgeführt. Dies geschah auf Invardrahtbasisstrecken mit ähnlichen Längen wie im Netz unter Bedachtnahme auf eine möglichst hohe Redundanz beim Ausgleich. Frequenzkontrollen während der Messungen konnten nicht durchgeführt werden, da eine felddtüchtige Frequenzmeßapparatur nicht zur Verfügung stand. Die zu erwartenden Frequenzabweichungen mußten ohnehin als gegenüber den Restfehlereinflüssen der Atmosphäre unbedeutend erachtet werden.

3.4 Atmosphärische Korrekturen

Die atmosphärischen Korrekturen wurden in üblicher Weise aus den Temperatur-, Druck- und Dampfdruckmeßwerten auf Stand- und Zielpunkt nach bekannten Formeln berechnet. Die Erfassung der meteorologischen Größen erfolgte durch geeichte Psychrometer und Barometer. Den verbleibenden Unsicherheiten der atmosphärischen Einwirkungen auf die Wellenausbreitung wurde - in Ermangelung der finanziellen Mittel für die Bestimmung zusätzlicher diskreter oder integraler meteorologischer Daten entlang des Lichtweges - durch folgende, schon oft empfohlene Vorgangsweisen erfolgreich begegnet:

- 1° Bevorzugung der Zeitpunkte annähernder Isothermie für die Messung
- 2° Mehrfache Wiederholungen zu veränderten Großwetterlagen

Die Chancen, auf den Meßpunkten repräsentative Temperaturen zu erfassen, wurden durch den glücklichen Umstand erhöht, daß das Gebiet der Hohen Wand äußerst windreich ist und so praktisch immer eine gute Luftdurchmischung gesichert war.

4. ERGEBNISSE

D	MA 100	ME 3000	Δ MA - ME [mm]
1-2	1007,0301 \pm 1,2	1007,0274 \pm 0,8	+ 2,7
1-3	1398,0870 \pm 0,3	1398,0898 \pm 2,5	- 2,8
1-4	408,4477 \pm 1,4	408,4493 \pm 0,3	- 1,6
2-3	2319,2710 \pm 0,7	2319,2741 \pm 6,7	- 3,1
2-4	1403,4976 \pm 0,4	1403,4973 \pm 0,0	+ 0,3
3-4	1008,2452 \pm 0,9	1008,2473 \pm 3,3	- 2,1

Tab. 2 Arithmetische Mittel der reduzierten Meßergebnisse d [m] und deren mittlere Fehler m_d [mm]

Bei der Bewertung der Genauigkeiten muß bedacht werden, daß die Ergebnisse der MA 100-Messungen Mittelwerte aus drei Meßkampagnen innerhalb eines Jahres darstellen, während die ME 3000-Resultate in einem Tag durch beidseitige Messung aller sechs Strecken gewonnen wurden.

Eine gemeinsame Verarbeitung der ponderierten Distanzmittel in einem bedingten Ausgleich des Diagonalvierecks führte zu den in Tab. 3 ersichtlichen Endergebnissen und Genauigkeitsmaßen. Die Gewichtung der MA 100- und ME 3000-Meßwerte ist dabei nach den von den Herstellern angegebenen Fehlergesetzen erfolgt.

d	ausgegl. Dist.	m_d
1-2	1007,0285	$\pm 0,3$
1-3	1398,0887	$\pm 0,3$
1-4	408,4489	$\pm 0,2$
2-3	2319,2728	$\pm 0,9$
2-4	1403,4974	$\pm 0,1$
3-4	1008,2469	$\pm 0,4$

Tab. 3 Ergebnisse des bedingten Ausgleichs d [m], m_d [mm]

So erfreulich die aus dem Ausgleich folgenden Genauigkeiten auch sind darf darüber nicht übersehen werden, daß die bei der Mekometermeßkampagne zwischen den Hin- und Rückmessungen der Strecken 3-4, 3-1 und 3-2 aufgetretenen Differenzen (Tab. 4) weit über der inneren Genauigkeit des Gerätes liegen.

Dist.	$T[h]$	d_1 [m]	Dist.	$T[h]$	d_2 [m]	Δ_{12} [mm]	Δ_{12}/km	ΔT_{12}
3-4	11 ²⁵	1008,2450	4-3	13 ³⁵	1008,2496	+ 4,6	+ 4,6	2 ¹⁰
3-1	11 ³⁵	1398,0873	1-3	15 ⁰⁵	1398,0923	+ 5,0	+ 3,6	3 ³⁰
3-2	11 ⁴⁵	2319,2674	2-3	16 ³⁵	2319,2808	+ 13,4	+ 5,8	4 ⁵⁰
4-1	13 ⁴⁵	408,4490	1-4	15 ¹⁵	408,4496	+ 0,6	+ 1,5	1 ³⁰
4-2	13 ⁵⁵	1403,4973	2-4	16 ⁴⁵	1403,4973	0,0	0,0	2 ⁵⁰
1-2	15 ²⁵	1007,0266	2-1	16 ⁵⁵	1007,0282	+ 1,6	+ 1,6	1 ³⁰

Tab. 4 Differenzen der Hin- und Rückmessungen mit dem ME 3000

Eine Erklärung für diese Differenzen zu finden, wird durch das Phänomen behindert, daß die Mittelwerte recht sauber zu den MA 100-Ergebnissen passen (Tab. 2). Die absoluten Differenzen Δ_{12} zeigen eine Abhängigkeit von der Streckenlänge (Abb. 3); die normierten Differenzen Δ_{12}/km deuten eine sehr schwache Korrelation mit den zwischen den Messungen verstrichenen Zeiten (Abb. 4) und den Höhenunterschieden (Abb. 5) an. Auffallend ist auf jeden Fall, daß die Differenzen alle positives Vorzeichen tragen, also jeweils die zweite Messung eine längere Distanz als die erste Messung ergeben hat.

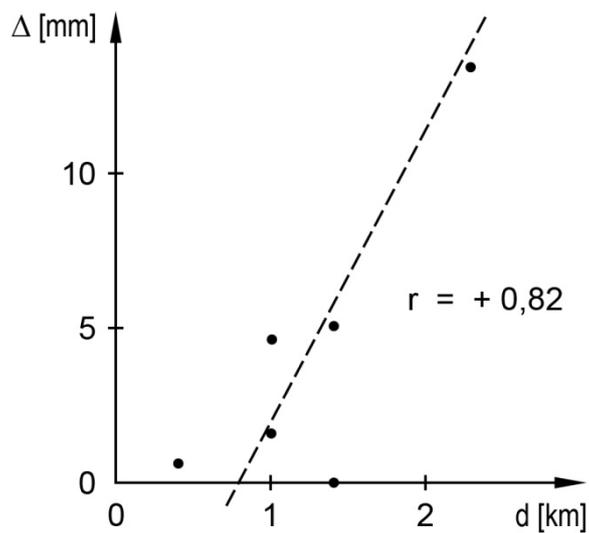


Abb. 3

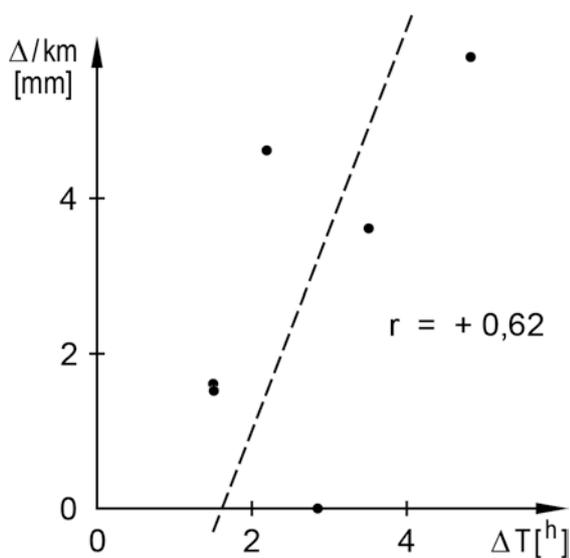


Abb. 4

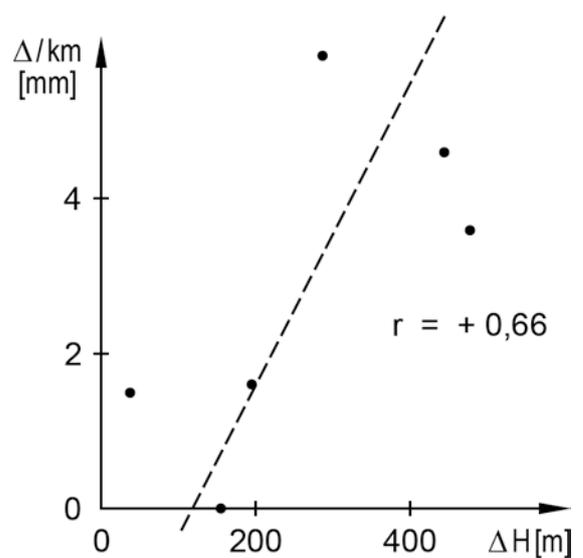


Abb. 5

Möglicherweise sind die Differenzen durch die speziellen meteorologischen Verhältnisse im Bereich des Steilabfalls (~ 500 m) der Hohen Wand bedingt. Die relativ geringen Temperaturdifferenzen (Abb. 6) an dem warmen, wechselnd bewölkten Meßtag lassen aber groben Abweichungen von den - für den Strahlverlauf in der freien Atmosphäre repräsentativen - Temperaturen wenig Spielraum.

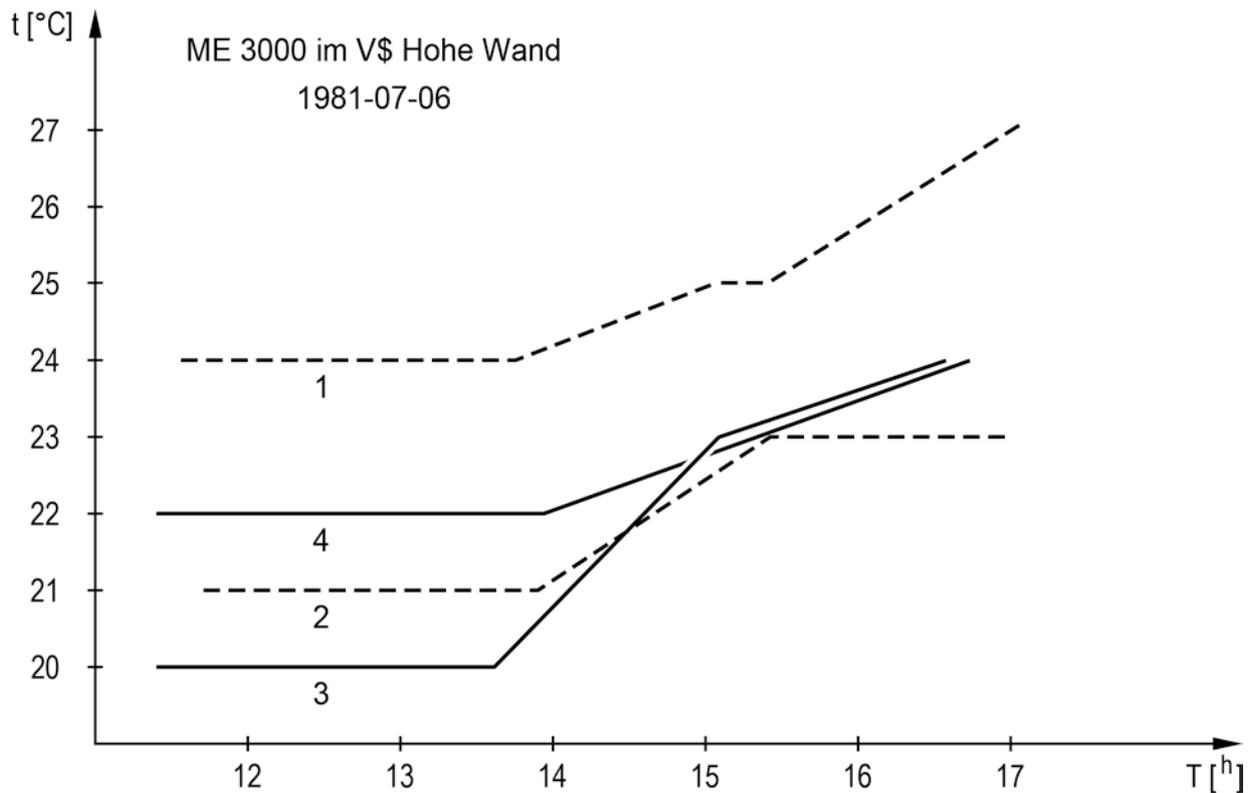


Abb. 6 Temperaturgänge während der Mekometer-Messungen

So bleibt die Größenordnung der aufgetretenen Differenzen ein bislang ungeklärtes Phänomen, das aber, wie die Literatur zeigt, kein Einzelfall ist. *WALLNER* (1981) berichtet von ganz ähnlichen Differenzen zwischen Hin- und Rückmessungen in einem Testnetz im Inntal, das vergleichbare Höhenunterschiede und Streckenlängen wie das vertikale Viereck aufweist. Interessanterweise sind auch dort die Abweichungen nur bei den Mekometer-, nicht aber bei den Tellurometermessungen aufgetreten.

LITERATUR

- MEIER-HIRMER, B.: *Präzisionsstreckenmessung mit dem Mekometer ME 3000*.
Allgemeine Vermessungsnachrichten Nr. 2, 1975
- WALLNER, H.: *Distomat DI 10, Tellurometer MA 100, Mekometer ME 3000 -
Eine vergleichende Studie dieser drei Distanzmeßgeräte im selben
Testnetz*. Österreichische Zeitschrift für Vermessungswesen und
Photogrammetrie Nr. 4, 1976
- WUNDERLICH, Th.: *Die voraussetzungsfreie Bestimmung von Refraktions-
winkeln*. Dissertation, TU Wien, 1983
- WUTZEL, O.: *Bestimmung der Nullpunktskonstanten des Tellurometers MA 100*.
Diplomarbeit, TU Wien, 1974

BESTIMMUNG DREIDIMENSIONALER KOORDINATEN
DURCH STRECKENMESSUNG

von

Kurt EGREDER

Geodätisches Institut
Technische Hochschule Darmstadt
Petersenstraße 13
6100 Darmstadt
Bundesrepublik Deutschland

ZUSAMMENFASSUNG

In der besonderen Topographie des Rheintales bei St. Goar wurde ein Testnetz angelegt und alle Strecken elektrooptisch sowohl mit dem Mekometer ME 3000 als auch mit dem Tellurometer MA 100 gemessen. Die erreichte Genauigkeit der Streckenmessung und der aus dem orientierten Streckenpolyeder berechneten Koordinaten werden dargestellt.

ABSTRACT

In the special topography of the Rhine-valley near St. Goar a testnet is established and all distances are measured by Mekometer ME 3000 as well as by Tellurometer MA 100. The achieved precision of distance-measuring and of the coordinates computed from orientated distance-polyeder are shown.

1. EINLEITUNG

Bei der Ausführung eines Ingenieurprojektes hat der Geodät in erster Linie die Übertragung einer Planung in die Örtlichkeit vorzunehmen und - soweit erforderlich - das fertiggestellte Projekt zur Erfassung von Deformationen zu überwachen. In aller Regel wird dazu ein lokales Sondernetz erkundet, vermarktet, beobachtet und berechnet. Soll die geforderte Genauigkeit der Punktkoordinaten im Millimeterbereich liegen, müssen die Beobachtungen mit höchster Präzision durchgeführt werden. Trotz der hohen inneren Genauigkeit der modernen Instrumente können die Beobachtungen jedoch durch Einflüsse verfälscht werden, die ihre Ursache im Schwerefeld der Erde und/oder in der Meteorologie haben, wobei deren Größe die innere Meßgenauigkeit um ein Vielfaches übersteigen kann. Zur Untersuchung der Möglichkeiten zur Erfassung derartiger Störeinflüsse wurde vom Geodätischen Institut der Technischen Hochschule Darmstadt ein Testnetz angelegt.

Die Punktlage des Netzes sollte dabei folgende Anforderungen erfüllen:

- das Netz sollte eine Ausdehnung bis ca. 1 km aufweisen,
- es sollte in bewegter Topographie liegen, um eine ausgeprägte 3. Dimension zu erhalten,
- von jedem Netzpunkt aus sollten alle anderen Punkte sichtbar sein,
- zwischen den Netzpunkten sollten möglichst viele verschiedenartige Profile liegen.

Diese verschiedenartigen Forderungen können am einfachsten in einem Tal realisiert werden.

Die geeignete Topographie hierfür fand sich bei St. Goar am Rhein (siehe Abb. 1).

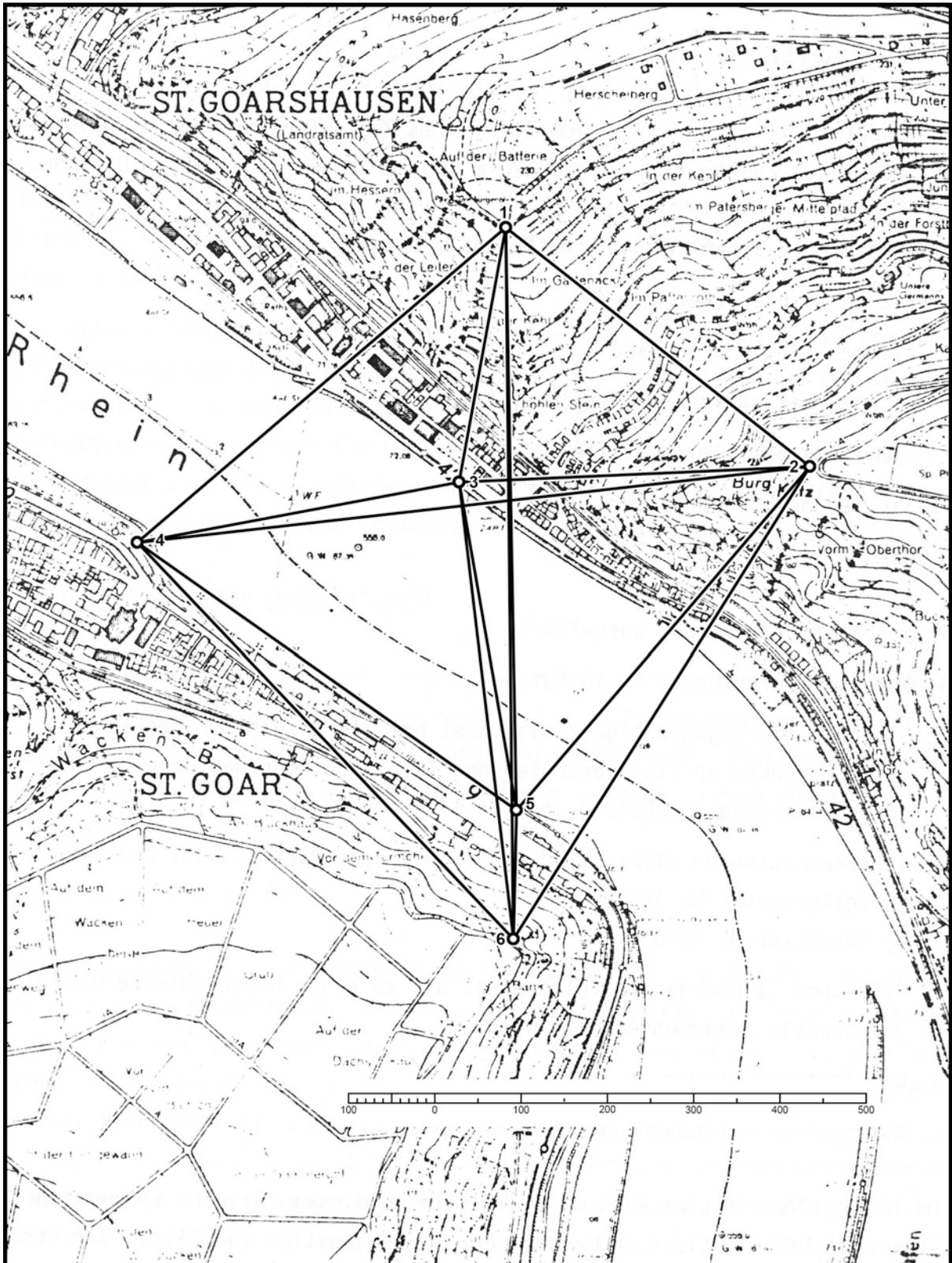


Abb. 1 Lage des Testnetzes St. Goar

2. NETZBESCHREIBUNG

Die Punkte 3, 4 und 5 liegen unmittelbar am Rheinufer in einer Höhe von ca. 70 m, die Punkte 1 und 2 ca. 220 m und der Punkt 6 ca. 180 m über NN.

Die Profile zwischen den Punkten beinhalten daher

- flache Sichten über Wasser,
- flache Sichten über Land,
- Sichten mit steigender Höhe über Wasser,
- symmetrische Taleinschnitte,
- Sichten hoch über Wasser,
- steile Sichten über Land.

An Beobachtungen wurden ausgeführt:

1. Horizontalrichtungen in 10 Sätzen,
2. gleichzeitig-gegenseitige Zenitwinkel bei gleichzeitiger Besetzung aller 6 Punkte an vier verschiedenen Tagen von Sonnenaufgang bis Sonnenuntergang im Abstand von ca. 1 Stunde,
3. Streckenmessungen aller Strecken mit Hin- und Rückmessung, und zwar mit
 - a) Tellurometer MA 100,
 - b) Mekometer ME 3000,
4. Fein- und Talübergangsnivellements, die zu einer Höhenschleife über die 3 Talpunkte zusammengestellt wurden,
5. Gravimetermessungen,
6. Astronomische Beobachtungen auf allen Punkten.

Im lokalen Netz ist es auch möglich, alle in diesem Polyeder vorkommenden Strecken elektrooptisch zu messen. Durch das günstige Verhältnis der Streckenlängen zu den Höhenunterschieden läßt sich in diesem Netz eine Höhenbestimmung z.B. nur durch reine Streckenmessungen durchführen. Die Vorteile einer Höhenbestimmung durch gemessene Schrägstrecken bestehen darin, daß diese Strecken einerseits unabhängig vom Schwerfeld beobachtet werden und

daß andererseits die Verfälschungen der Strecken wegen Refraktion keinen so großen Höhenfehler bewirken wie der Einfluß der Refraktion auf Zenitwinkel.

In einem von BRUNKEN (1983) entwickelten Modell auf der Basis statistischer Daten zur Berechnung von Refraktionskoeffizient und Brechungsindex wurde eine Testrechnung durchgeführt:

Auf einem vorgegebenen Profil des Testnetzes wurden verschiedene Atmosphärebedingungen durch Variation des Temperaturgradienten und der Temperaturverhältnisse von +25°C auf +10°C simuliert. Die aus der Änderung des Refraktionskoeffizienten für Lichtwellen berechnete Höhenänderung ergab sich danach zu 6 mm, die für eine mit dem Tellurometer MA 100 gemessene Strecke ($\lambda = 0,93 \mu\text{m}$) bewirkt dagegen eine Höhenänderung von nur 2 mm.

3. KORREKTIONEN DER BEOBACHTUNGEN

Die Genauigkeit der Höhen hängt sowohl von der Netzkonfiguration als auch von der Präzision der Schrägstrecken ab. Der reine Meßwert der Strecken muß deshalb neben genau bekannten Additions- und Multiplikationskonstanten mit sehr sorgfältig bestimmten Korrekturen versehen werden und zwar

- a) geometrischer Art
- b) meteorologischer Art.

Zu a) Das Netz ist mit Bodenpunkten vermarktet, weil die zum Teil exponierte Lage auf Schieferfelsen den Bau von Beobachtungspfeilern nicht erlaubt. Alle Beobachtungen mußten daher von Stativen aus erfolgen und auf die Bodenpunkte reduziert werden. Während der Beobachtung einer Strecke wurden sowohl Instrument als auch Reflektor mit Theodoliten seitlich abgelotet, um auch kleine Restfehler der optischen Lote des Instrumentenunterbaus zu vermeiden. Die Bestimmung der Höhen von Instrument und Reflektor über den Bodenpunkten erfolgte durch Feinnivellement auf $\pm 0,1$ mm. Durch die aus diesen Beobachtungen berechneten geometrischen Korrekturen wird die aktuelle Lage von Instrument und Reflektor zur Zeit der Streckenmessung erfaßt und der endgültige Beobachtungswert bezieht sich genau auf die Bodenpunkte.

Zu b) Die atmosphärische Korrektion wird berechnet nach der Formel von Barrell und Sears:

$$N = (n_L - 1) \cdot 10^6 = \left(272,711 + 3 \frac{1,4960}{\lambda^2} + 5 \frac{0,0187}{\lambda^4} \right) \cdot 0,37916 \cdot \frac{p}{T} - 15,02 \cdot \frac{e}{T} \quad (3-1)$$

Darin bedeuten:

N = aktuelle Brechzahl (Absolutkorrektion in mm/km)

n_L = Brechungsindex für Lichtwellen

λ = Länge der Trägerwelle

p = Luftdruck in mm Hg

T = Temperatur in °Kelvin

e = Partialdruck des Wasserdampfes in mm Hg.

Für ein Instrument mit einer bestimmten Wellenlänge, z.B. das Tellurometer MA 100 mit $\lambda = 0,93 \mu\text{m}$, lautet die Formel dann

$$N = 105,4 \frac{p}{T} - 15,02 \frac{e}{T} \quad (3-2)$$

Im allgemeinen wird bei der Berechnung von N der Einfluß des Partialdrucks vernachlässigt. Bei der Messung von Präzisionsstrecken wird die Berücksichtigung dieses Korrektionsgliedes jedoch notwendig, wie ein einfaches Beispiel mit angenommenen Werten zeigt:

Trockentemperatur	t	= 25°C
Feuchttemperatur	t'	= 21°C
Luftdruck	p	= 745 mm Hg

Mit diesen Werten ergibt sich nach

$$e = 10^{\frac{7,5 \cdot t'}{237,3 + t'} - 0,6609} - 0,5 (t - t') = 16,65 \quad (3-3)$$

und damit die Korrektur wegen Luftfeuchtigkeit

$$k' = - \frac{15,02 \cdot 16,65}{298} = 0,84 \text{ mm/km} \quad (3-4)$$

Eine Korrektur dieser Größenordnung muß bei der Messung von Präzisionsstrecken berücksichtigt werden.

Die Schwierigkeit bei der Berechnung der atmosphärischen Korrektur liegt in der Ermittlung der Wetterdaten. Während die Zentrierkorrekturen direkt aus Beobachtungen abgeleitet werden können, ist man bei der Erfassung der meteorologischen Verhältnisse auf die Hypothese angewiesen, daß der Mittelwert der Wetterbeobachtungen bei Instrument und Reflektor repräsentativ ist für den gesamten Lichtweg.

Um eine Aussage darüber machen zu können, inwieweit der Mittelwert von Temperaturmessungen an Stand- und Zielpunkt als repräsentativ gelten kann, sind neben einer Streckenmessung zwischen den Punkten 2 und 6 die Temperaturen im Zielstrahl in den Punkten R und L durch Sondenaufstieg an den beiden Rheinufern gemessen worden (siehe Abb. 2).

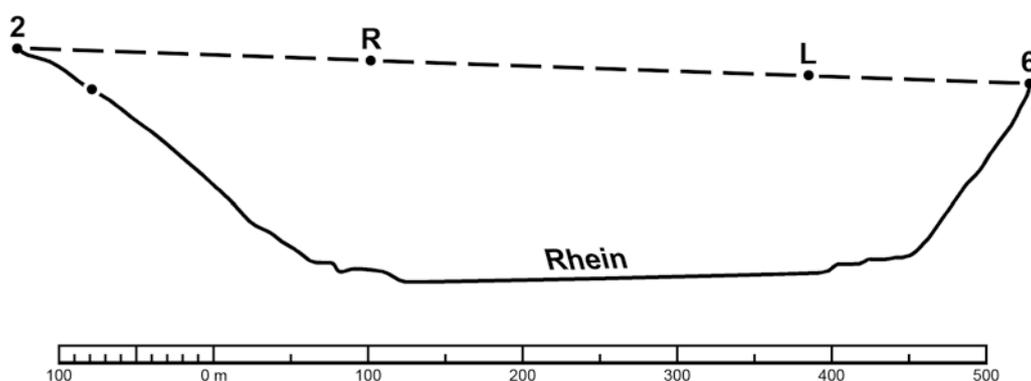


Abb. 2 Profil durch das Rheintal

Die vier Temperaturen in 2, R, L und 6 wurden mit Gewichten gemittelt, die sich aus dem geschätzten Gültigkeitsbereich der gemessenen Temperaturen ergaben. Die als repräsentativ angenommene Temperatur t_{rep} berechnet sich danach aus

$$t_{rep} = \frac{3t_2 + 10t_R + 10t_L + 3t_6}{26} \quad (3-5)$$

Im Vergleich zum Temperaturmittel t_m aus Stand- und Zielpunkt ergibt sich dann Tabelle 1:

Streckenmessung u. Temperaturmessung MESZ	t_{rep} °C	t_m °C	geschätzte Bewölkung in %
7 ⁰⁸	14,8	14,7	20
8 ⁰⁷	16,6	16,3	5
9 ⁰⁶	18,2	18,9	5
10 ⁵⁵	21,2	20,9	60
11 ⁵⁷	23,3	22,2	45
13 ⁰⁹	24,0	24,2	90
13 ⁵⁵	25,1	25,3	40
14 ⁴⁷	24,3	24,6	Gewitter/Regen
16 ³⁹	22,4	21,5	75
17 ¹⁷	23,3	21,9	Gewitter/Regen

Tab. 1 Temperaturvergleich und Wetterverhältnisse
für die Strecke 2-6

Aus dem Vergleich der Zahlen ergibt sich nicht die erwartete eindeutige Abhängigkeit von der Bewölkung. Erst bei der extremen Wetterlage Gewitter mit Regen zeigt sich eine schnellere Abkühlung der bodennahen Luft. Die Differenz zwischen t_{rep} und t_m von 1,4°C um 17¹⁷ bedingt für die Teststrecke von

648 m eine Längenänderung von 1 mm.

4. VERWENDUNG DES PLANSPIEGELS

Die Messung der Strecken (Hin- und Rückmessung) wurde mit den beiden Instrumenten Mekometer ME 3000 und dem Tellurometer MA 100 durchgeführt. Dabei mußte bei der Strecke zwischen den Punkten 5 und 6 ein Planspiegel verwendet werden, weil die Neigung dieser Strecke für eine direkte Messung zu groß war (Höhenwinkel der Strecke ca. 48 gon, mögliche Instrumentenneigung z.B. des MA 100 ca. 42 gon). Eine Hin- und Rückmessung der Strecke war nicht möglich, weil durch die schwierigen Geländebedingungen am Punkt 6 kein Standpunkt für die Instrumente gefunden werden konnte, von dem aus eine Messung mit Planspiegel in Punkt 6 und Reflektor in Punkt 5 hätte durchgeführt werden können. So wurde mit Reflektor in Punkt 6 und Spiegel in Punkt 5 die Strecke mit beiden Instrumenten je zweimal von verschiedenen Standpunkten aus gemessen.

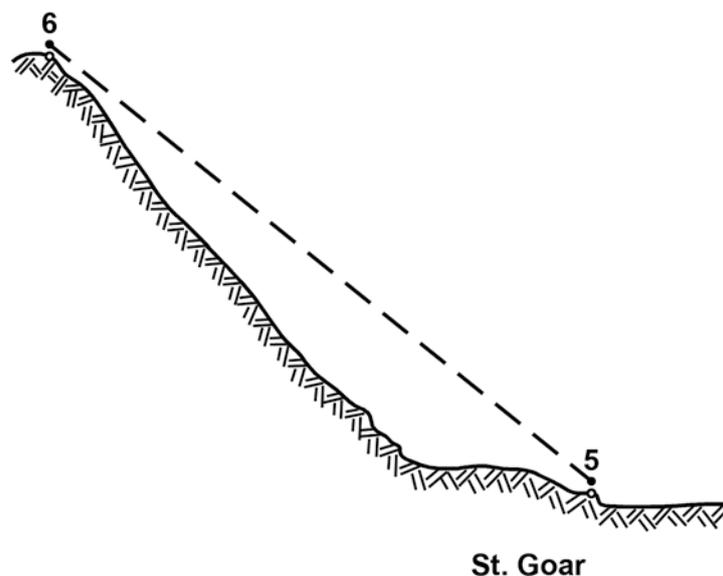


Abb. 3 Profil der Schrägstrecke

Beim Tellurometer MA 100 z.B. lagen zwischen den beiden Messungen ca. 2 Stunden. Dabei wurden folgende Ergebnisse erzielt:

	<u>1. Messung</u>	<u>2. Messung</u>
Gesamt (J - 5 - 6):	202,6754	205,0032
Atm. Korr.:	- 10	- 4
Lot Korr.:	+ 1	- 1
Instr.-Spiegel (J - 5):	21,6692	23,9966
Atm. Korr.:	0	0
<hr/>	<hr/>	<hr/>
Schrägentfernung 5 - 6 (ohne Additionskonstante)	181,0053	181,0061

Bei beiden Messungen war in Punkt 6 ein 3er-Reflektor und in Punkt 5 nach dem Spiegel ein 1er-Reflektor angebracht. Durch die Verwendung verschiedener Reflektoren mit Anbringung der jeweiligen Additionskonstanten entspricht diese Messung nicht streng dem Prinzip des Differenzverfahrens. Trotzdem bestätigt das Ergebnis, daß durch die Verwendung des Planspiegels auch bei ungünstigen örtlichen Bedingungen eine Streckenmessung hohe Präzision möglich ist, was durch die beiden zeitlich verschiedenen Messungen mit veränderten Instrumentenstandpunkten gezeigt werden sollte.

Um die Schrägentfernung zu erhalten, müssen an die Ergebnisse noch die Additionskonstanten der beiden Reflektoren angebracht und die dann erhaltene Strecke über die Instrumentenhöhen höhenzentriert werden.

5. VERGLEICH DER AUF DIE BODENPUNKTE REDUZIERTEN STRECKEN
IM TESTNETZ ST. GOAR

5.1 Streckenmessungen mit dem Mekometer ME 3000

Strecke	Hinmessung m	Rückmessung m	Mittel Hin- Rückmessung m
1 - 2	438,529 2	438,528 6	438,528 9
1 - 3	334,467 5	334,467 5	334,467 5
1 - 4	584,932 6	584,933 8	584,933 2
1 - 5	693,835 6	693,834 1	693,834 8
1 - 6	(819,106 4)	819,102 0	819,102 0
2 - 3	428,269 9	428,269 9	428,269 9
2 - 4	794,526 5	794,526 1	794,526 3
2 - 5	547,884 4	547,882 1	547,883 2
2 - 6	649,378 3	649,376 3	649,377 3
3 - 4	381,077 1	381,077 9	381,077 5
3 - 5	387,792 6	387,792 7	387,792 6
3 - 6	537,085 0	537,084 6	537,084 8
4 - 5	537,176 6	537,176 4	537,176 5
4 - 6	629,034 2	629,033 1	629,033 6
5 - 6	181,193 4	181,193 2	181,193 3

Tab. 2 Ergebnisse der Mekometermessung

Standardabweichung einer aus Hin- und Rückmessung gemittelten Strecke:
 $\sigma = \pm 0,53 \text{ mm}$.

Anmerkung: Bei der Berechnung der Standardabweichung aus Beobachtungsdifferenzen wurde bei der Strecke 1 - 6 die Hinmessung wegen starker Sonneneinstrahlung nicht berücksichtigt.

5.2 Streckenmessung mit dem Tellurometer MA 100

Strecke	Hinmessung m	Rückmessung m	Mittel Hin- Rückmessung m
1 - 2	438,527 3	438,525 7	438,526 5
1 - 3	334,464 5	334,466 7	334,465 6
1 - 4	584,932 0	584,932 8	584,932 4
1 - 5	693,834 3	693,833 2	693,833 7
1 - 6	819,099 2	819,099 3	819,099 3
2 - 3	428,268 5	428,269 7	428,269 1
2 - 4	794,526 5	794,524 6	794,525 5
2 - 5	547,882 8	547,886 1	547,884 5
2 - 6	649,379 8	649,378 8	649,379 2
3 - 4	381,077 3	381,078 9	381,078 1
3 - 5	387,791 9	387,793 4	387,792 6
3 - 6	537,086 1	537,085 3	537,085 7
4 - 5	537,176 3	537,177 4	537,176 8
4 - 6	629,034 2	629,033 9	629,034 0
5 - 6	181,192 7	181,193 2	181,193 0

Tab. 3 Ergebnisse der Tellurometermessung

Standardabweichung einer aus Hin- und Rückmessung gemittelten Strecke:
 $\sigma = \pm 0,76 \text{ mm}$.

6. BERECHNUNG DER PUNKTKOORDINATEN

Zur Berechnung der Koordinaten der sechs Netzpunkte wurde in der Ausgleichung Punkt 4 als fest angehalten und zur Orientierung des jeweiligen Polyeders die Nivellements zwischen den Punkten 3, 4 und 5 als Beobachtung eingeführt.

Die Berechnung erfolgte in drei Versionen:

- Mekometerstrecken
- Tellurometerstrecken
- Kombination aus Mekometer- und Tellurometerstrecken, wobei die a priori

Streckengewichte $p_{\text{Mek}} = 1$ und $p_{\text{Tel}} = 0,5$ aus den angegebenen Standardabweichungen abgeleitet wurden.

Damit ergeben sich folgende Koordinaten mit ihren Standardabweichungen:

Pkt. Nr.	y_m mm Mekometer Tellurometer Kombination	x_m mm	z_m mm
1	8674,7234 ± 0,5	8410,8501 ± 0,3	219,5495 ± 1,5
	,7240 ± 1,3	,8465 ± 0,9	,5522 ± 3,9
	,7236 ± 1,1	,8489 ± 0,7	,5504 ± 3,6
2	9020,1652 ± 0,5	8140,7923 ± 0,1	225,2804 ± 1,9
	,1654 ± 1,3	,7923 ± 0,2	,2784 ± 5,3
	,1653 ± 1,1	,7923 ± 0,1	,2797 ± 4,5
3	8620,9855 ± 0,2	8115,4213 ± 0,3	72,2457 ± 0,5
	,9861 ± 0,7	,4207 ± 0,8	,2457 ± 0,9
	,9857 ± 0,5	,4211 ± 0,6	,2457 ± 1,3
4	8247,3900 –	8040,3200 –	70,466 –
5	8688,3371 ± 0,3	7733,5347 ± 0,3	69,7347 ± 0,4
	,3362 ± 0,9	,5332 ± 0,8	,7347 ± 0,7
	,3368 ± 0,7	,5342 ± 0,6	,7347 ± 1,0
6	8674,7044 ± 0,3	7592,5992 ± 0,2	182,7903 ± 0,7
	,7034 ± 1,0	,5979 ± 0,6	,7903 ± 1,9
	,7041 ± 0,8	,5988 ± 0,5	,7903 ± 1,8

Tab. 4 Zusammenstellung der Ausgleichungsergebnisse

Die Ergebnisse zeigen, daß bei sorgfältig bestimmten geometrischen und meteorologischen Korrekturen im Bereich bis ca. 1 km mit beiden Instrumenten eine Streckenmessung mit einer Standardabweichung < 1 mm erreicht werden kann, wobei das Mekometer die etwas genaueren Werte liefert.

Die Bestimmung von Punkthöhen durch reine Streckenmessung wird nur in Netzen möglich sein, die ähnlich dimensioniert sind wie das Testnetz St. Goar. Aber auch eine zweidimensionale Bestimmung hoher Genauigkeit eines lokalen

Netzes ist durch reine Streckenmessung möglich, wie die Standardabweichungen von y und x zeigen.

DANK

Für die Ausführung der örtlichen Messungen mit dem Mekometer und deren Auswertung bedanke ich mich ganz herzlich bei Herrn Dr. Seckel vom Geodätischen Institut der TU Karlsruhe.

LITERATUR

- BRUNKEN, G.: Berechnung von Refraktionskoeffizient und Brechungsindex unter Verwendung eines aus statistischen Daten gewonnenen Modells der unteren Atmosphäre. Geodätisches Institut TH Darmstadt, unveröffentlicht.
- EGREDER, K.: Elektrooptische Entfernungsmessungen unter Verwendung eines Planspiegels. Arbeiten des Geodätischen Institutes, Technische Hochschule Darmstadt, FB Vermessungswesen, Heft 1, 1982
- EICHHORN, G.: Zur Höhenfestlegung bei Ingenieurprojekten. Arbeiten des Geodätischen Institutes, Technische Hochschule Darmstadt, FB Vermessungswesen, Heft 1, 1982
- HEUPEL, G., und B. WITTE: Messungen hoher Präzision mit dem Tellurometer MA 100. AVN 1974, S. 64
- HRADILEK, L.: Höhenbestimmung aus elektrooptisch gemessenen Längen. *Studia geophysica et geodaetica*, 1958 II, S. 206
- WITTE, B.: Genaue Messungen von beliebig im Raum orientierten Strecken mit elektrooptischen Nahbereichsentfernungsmessern. *ZfV* 1975, S. 21

DIE GENAUIGKEIT DER MEKOMETERMESSUNGEN
AUF DER PRÜFSTRECKE NEUBIBERG

von

Wilhelm CASPARY

Institut für Geodäsie
Hochschule der Bundeswehr München
Werner-Heisenberg-Weg 39
D-8014 Neubiberg
Bundesrepublik Deutschland

ZUSAMMENFASSUNG

Das Institut für Geodäsie der Hochschule der Bundeswehr München hat 1981 eine Prüfstrecke für elektrooptische Entfernungsmesser angelegt. Die Vermarkung der Punkte erfolgte durch tiefgegründete Pfeiler, die mit einer Zwangszentrierungseinrichtung ausgestattet sind. Insgesamt sind acht Pfeiler vorhanden, von denen sieben eine nach *SCHWENDENER* geteilte 540 m-Strecke bilden, während der achte Pfeiler weitere 540 m entfernt steht. Mit dem Ziel, Sollstrecken für die Pfeilerabstände zu ermitteln, wurden sieben Institute eingeladen, Mekometermessungen in allen Kombinationen durchzuführen. Die Auswertung des umfangreichen Beobachtungsmaterials zeigt, daß alle Mekometer eine hohe innere Genauigkeit aufweisen, die zu einer sehr präzisen Bestimmung der Streckenverhältnisse geführt hat. Aussagen über den Maßstab der Strecke sind jedoch nur unter Vorbehalt möglich, da selbst zwischen Messungen mit Frequenzkontrolle im Feld Maßstabsunterschiede bis zu 4 ppm aufgetreten sind.

ABSTRACT

In 1981 the Institut für Geodäsie of the Hochschule der Bundeswehr München established a calibration line for electro-optical distance meters. The monumentation of the points is realized by deep-founded pillars, which are equipped with a forced centering system. There are eight pillars, seven of which are spaced by *SCHWENDENER*'s method over 540 m, while the eighth one is located another 540 m away. With the aim to get error-free distances, seven institutions were invited to perform measurements of all combinations of the baseline with the Mekometer. The evaluation of the extensive data shows, that all Mekometers work with a very high precision which leads to very accurate ratios of distances. But obviously, there are scale differences up to 4 ppm, even between instruments which were operated under frequency control in the field. Therefore it seems impossible to make a reliable statement about the absolute length of the baseline.

1. ZUR EINTEILUNG VON PRÜFSTRECKEN

Mit wenigen Ausnahmen sind die Prüfstrecken für elektrooptische Entfernungsmesser nach den erstmals von *SCHWENDENER* (1971) genannten Kriterien unterteilt:

- A) Gleichmäßige Verteilung der Distanzen über den in der Praxis vorkommenden Entfernungsbereich.
- B) Gleichmäßige Verteilung der Ablesungen über den Feinmaßstab.

Einen Vorschlag, wie diese Unterteilung erzielt werden kann, findet man bei *RÜEGER* (1976). Über umfangreiche Erfahrungen mit einer so angelegten Prüfstrecke berichtet *DUDDEK* (1983).

Es sollen hier nicht die Argumente, die für eine solche Einteilung sprechen, wiederholt werden; diese können in der oben angegebenen Literatur nachgelesen werden. Vielmehr soll ein Weg zur Erfüllung der Kriterien A und B erläutert werden, der erstmals in *CASPARY/HERZOG* (1975) vorgestellt wurde.

Wird eine Strecke L in n Teilstrecken D_i unterteilt, so ergeben sich $n(n+1)/2$ meßbare Distanzen. Sollen diese Distanzen das Kriterium A befriedigen, so muß die kürzeste Distanz die Länge $a = 2L/n(n+1)$ aufweisen und alle anderen müssen ganze Vielfache von a sein, wobei sich keine Distanz wiederholen darf. Nach der Größe geordnet wird also eine Verteilung angestrebt wie $a, 2a, 3a, \dots, \frac{1}{2}n(n+1)a$. Daraus folgt, daß auch die Teilstrecken D_i ganze Vielfache von a sein müssen.

Das Problem läßt sich also so formulieren:

Bilde n Teilstrecken $D_i = k_i a$, wobei $\sum k_i = n(n+1)/2$ und $k_i \neq k_j$ für $i \neq j, i, j \in \{1, 2, \dots, n\}$ und prüfe die Listen der Distanzen, die sich aus den $n!$ Permutationen der Teilstrecken D_i ergeben, auf die Erfüllung des Kriteriums A.

Es zeigt sich, daß die Bildung der Teilstrecken eindeutig durch $k_1 = 1, k_2 = 2, \dots, k_n = n$ gegeben ist. Bei Prüfung der $n!$ Permutationen stellt man fest, daß für $n = 3$ mit $2 : 3 : 1$ eine Permutation gefunden ist, die A erfüllt, für $n > 3$ jedoch keine Lösung existiert.

Schwächt man nun das Kriterium A ab, indem man zuläßt, daß eine Distanz dop-

pelt auftritt, so hat man als Grundeinheit $a' = 2L / (n(n+1) - 2)$ zu bilden. Für $n = 4$ findet man so mit der Teilung $3 : 4 : 1 : 1$ eine Lösung der Aufgabe, während für $n > 4$ auf diesem Weg keine Lösung zu finden ist.

Als weitere Abschwächung des Kriteriums A kommt in Betracht, daß zwei doppelt auftretende Distanzen oder Lücken in der Verteilung zugelassen werden. Für $n = 5$ findet man so z.B. mit $1 : 5 : 3 : 2 : 2$ eine Teilung, bei der zwei Distanzen doppelt auftreten. Schließlich hat man bei $n = 6$ die Wahl zwischen den Teilungen $4 : 2 : 2 : 3 : 9 : 1$, mit einer Lücke der Breite zwei und zwei doppelt auftretenden Strecken, und $1 : 5 : 3 : 7 : 2 : 2$, mit lediglich einer Lücke der Breite eins und zwei doppelt vorkommenden Strecken, bei allerdings nur 19 unterschiedlichen Distanzen.

Nach denselben Grundsätzen können leicht die Möglichkeiten für eine Teilung mit $n > 6$ nach dem abgeschwächten Kriterium A untersucht werden, wobei ein leicht zu schreibendes Rechenprogramm eine große Hilfe ist.

Das Kriterium B kann für eine Feinmeßwellenlänge λ nur erfüllt werden, wenn die Länge der Prüfstrecke so beschaffen ist, daß die Grundeinheit a ein ganzzahliges Vielfaches von λ ist. Alle unter dem Kriterium A auftretenden Distanzen sind dann ebenfalls ganze Vielfache von λ . Teilt man nun noch λ selbst nach Kriterium A und addiert den jeweiligen Bruchteil zu der Teilstrecke D_i hinzu, so erfüllt man für die Gesamtlänge $L' = L + \lambda$ die gewünschte Einteilung. Bei der Teilung von λ treten natürlich die oben beschriebenen Probleme ebenfalls auf, so daß auch hier Kompromisse zu schließen sind.

2. DIE PRÜFSTRECKE NEUBIBERG

Aufgrund der örtlichen Verhältnisse stand für die Prüfstrecke eine Länge von $L = 540$ m zur Verfügung. Es wurde eine Sieben-Pfeiler-Lösung gewählt, für die nach Abschnitt 1 eine Unterteilung wie $1 : 5 : 3 : 7 : 2 : 2$ festgelegt wurde. Da bei dieser Teilung die Gesamtlänge $(20 m + 1) \lambda$ betragen mußte, um Kriterium B erfüllen zu können, war von vornherein klar, daß die Verteilung über den Feinmaßstab nicht optimal sein würde. Dies ist jedoch um so leichter hinzunehmen, als die Prüfstrecke für möglichst alle elektrooptischen Entfernungsmesser geeignet sein sollte, und daher die Festlegung auf eine Feinmeßwellenlänge gar nicht erwünscht ist. In Verlängerung der Prüfstrecke, weitere 540 m entfernt, ergab sich die Möglichkeit, einen ach-

ten Pfeiler zu setzen, so daß sich schließlich die in Abbildung 1 dargestellte Pfeileranordnung und Verteilung der Strecken ergab.

EDM-Prüfstrecke Neubiberg

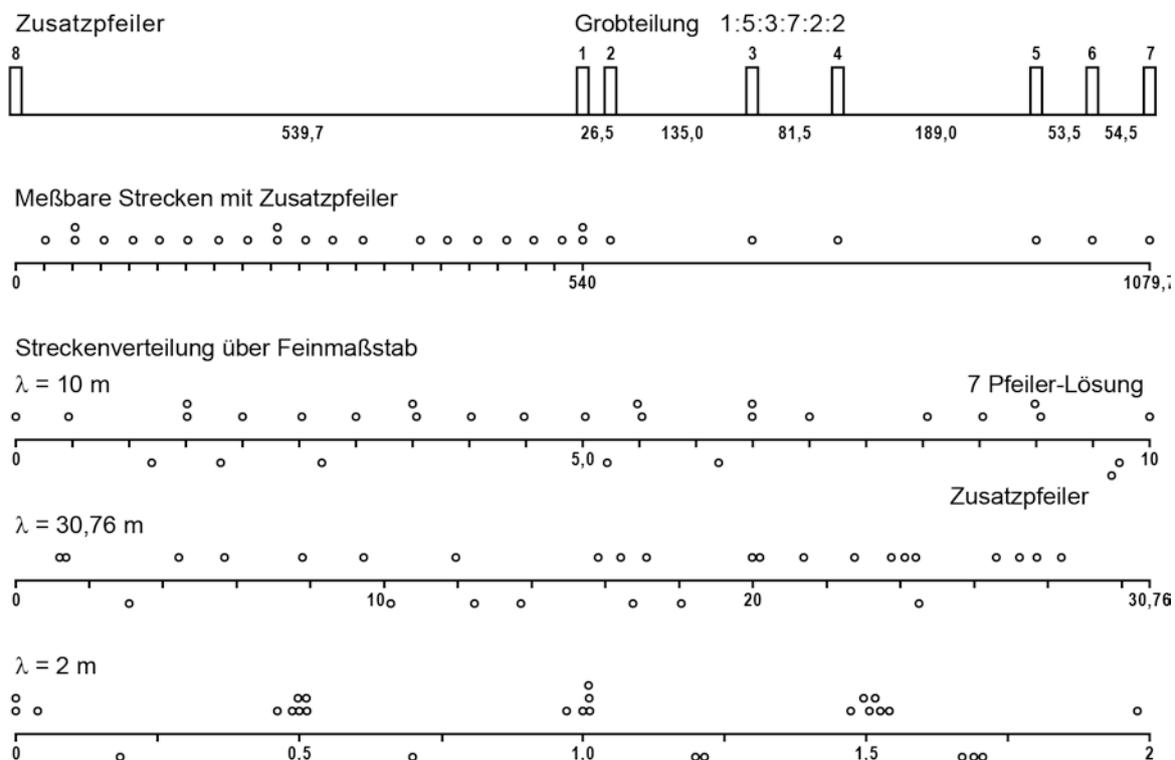


Abbildung 1 Prüfstrecke Neubiberg, meßbare Strecken

Die Verteilung der Strecken über den Feinmaßstäben $\lambda = 10$ m, 30,76 m und 2 m kann ebenfalls in Abbildung 1 abgelesen werden. Obwohl die Voraussetzungen für die Erfüllung von Kriterium B nicht gegeben sind, ist die Verteilung durchaus befriedigend.

Ein Schnitt der Pfeiler ist in Abbildung 2 dargestellt. Der Pfeilerkern, der die mit einer Zwangszentrierungseinrichtung ausgestattete Pfeilerplatte trägt, ist durch ein Außenrohr gegen Stoß und Sonneneinstrahlung geschützt. Die Gründungstiefe beträgt durchschnittlich 5 m. Auf der Pfeilerplatte ist durch eine besondere Vorrichtung das reproduzierbare Aufsetzen einer elektronischen Libelle möglich. Die Pfeiler 1 bis 7 sind auf gleicher Höhe, während der 8. Pfeiler etwa 52 cm höher ist.

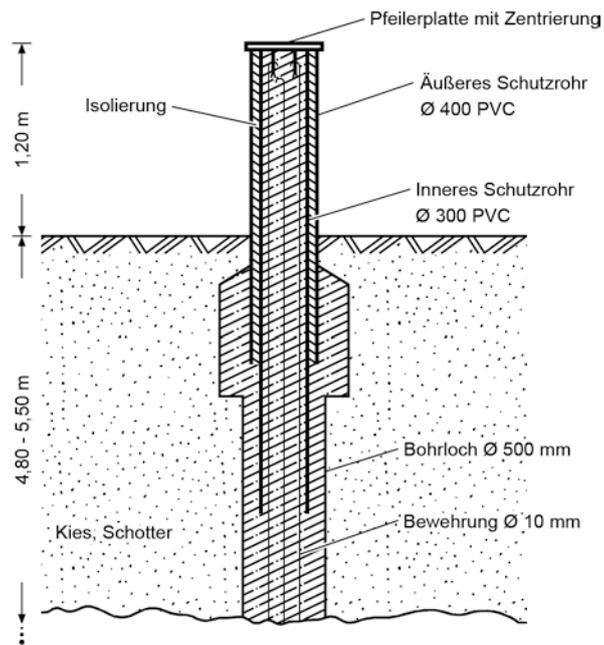


Abbildung 2 Prüfstrecke Neubiberg, Pfeilerschnittbild

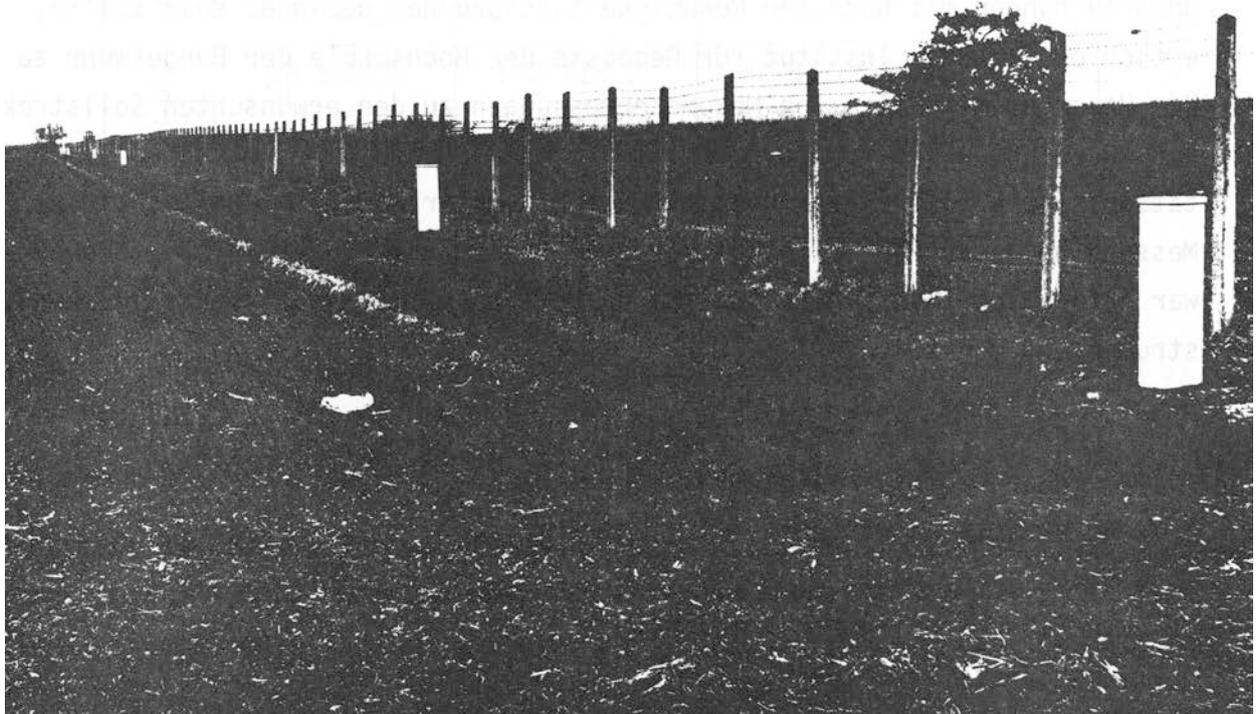


Abbildung 3 Prüfstrecke Neubiberg, Ansicht

Abbildung 3 zeigt eine Ansicht der Prüfstrecke. Die gesamte Anlage befindet sich auf freiem Feld mit gleichen Bedingungen entlang eines Meßweges. Sie ist etwa West-Ost-orientiert und über den parallel verlaufenden Feldweg gut erschlossen.

3. MESSUNGEN AUF DER PRÜFSTRECKE

Für durchschnittliche, an den Bedürfnissen der Praxis orientierte Genauigkeitsforderungen ist es ausreichend, eine mittlere Additionskonstante durch Streckenmessung in allen Kombinationen zu bestimmen. Es reicht in diesem Fall aus, eine Ausgleichung der Messungen mit unbekanntem Teilstrecken durchzuführen. Wird jedoch für höhere Genauigkeitsanforderungen oder für wissenschaftliche Zwecke verlangt, daß der Entfernungsmesser intensiver untersucht werden soll, so ist es zweckmäßig, im Labor eine Bestimmung der zyklischen Phasenfehler und einen Frequenzvergleich durchzuführen. Die verbleibenden Restsystematiken sind dann als entfernungsabhängige Additionskorrekturen aufzufassen, die nur bei bekannten Sollstrecken einwandfrei bestimmbar sind (siehe z.B. *RÜEGER* 1976, *RUOPP* 1981 und *WITTE/SCHWARZ* 1983).

Da die 1981 fertiggestellte Prüfstrecke Neubiberg auch für wissenschaftliche Untersuchungen mit höchsten Genauigkeitsansprüchen geeignet sein sollte, entschloß sich das Institut für Geodäsie der Hochschule der Bundeswehr zu dem Versuch, mit Hilfe von Mekometermessungen zu den erwünschten Sollstrecken zu gelangen. Es wurden daher die Firma Kern und alle deutschen Universitätsinstitute, die Erfahrungen mit dem Mekometer haben, eingeladen, eine Messung höchster Präzision auf der Prüfstrecke durchzuführen. Die Resonanz war erfreulich. Sie führte 1982/83 zu Messungen mit sieben verschiedenen Instrumenten, und zwar von

Technische Universität Berlin	(B)
Technische Universität Braunschweig	(BS)
Universität Karlsruhe	(KA)
Firma Kern, Aarau	(KE)
Technische Universität München	(M)
Universität Stuttgart	(S)
Hochschule der Bundeswehr München	(Y)

An dieser Stelle sei noch einmal allen Kollegen gedankt, die am Zustandekommen und an der Durchführung der Messungen beteiligt waren.

Insgesamt wurden 374 gemessene Strecken zur gemeinsamen Auswertung zur Verfügung gestellt. Es ist zu erwarten, daß die Genauigkeit dieser Daten unterschiedlich ist, da es sich teilweise um ursprüngliche Beobachtungen und teilweise um Mittelwerte handelt, da Messungen im Bereich I und im Bereich II durchgeführt wurden und da auch die äußeren Meßbedingungen sehr unterschiedlich waren. Grobe Fehler mußten im Datenmaterial nicht vermutet werden, da alle Messungen in Vorausgleichungen überprüft worden waren. Die von den Instituten mitgeteilten Ausgleichungsergebnisse sind auszugsweise in Tabelle 1 zusammengestellt.

	Mitgeteilte Ausgleichungsergebnisse in mm			
	1 - 2	1 - 7	7 - 8	s_0
B	26 508,06 ± ,10	540 012,93 ± ,17	1079 701,7	0,17
BS	26 508,3 ± ,1	540 013,6 ± ,1	1079 702,0 ± ,2	0,42*
KA	26 508,01 ± ,18	540 012,34 ± ,17	1079 700,40	0,31
M	26 508,5 ± ,2	540 015,5 ± ,2	1079 705,5 ± ,2	
S	26 508,0	540 015,2 ± ,2	1079 706,0 ± ,3	
Y	26 508,12 ± ,12	540 016,06 ± ,12	1079 707,1	0,32

* Gewichtsansatz aus $s = (0,5 + 1 \text{ ppm})$, s_0 bezieht sich auf eine Strecke von 500 m

Tabelle 1 Von den Hochschulinstituten mitgeteilte Ausgleichungsergebnisse (Auszug)

Nach einer Serie von Versuchsausgleichungen mit entfernungsabhängigen Gewichtsansätzen, mit Korrelationen zwischen den nacheinander von einer Station aus gemessenen Strecken, mit verschiedenen Hilfsparametern für die Meßbereiche und für unterschiedliche Reflektorzahlen, wurde das mathematische Modell für die gemeinsame Ausgleichung aller Strecken festgelegt. Die wichtigsten Erkenntnisse dieser Versuchsausgleichungen seien hier zusammengefaßt.

- In dem auszugleichenden Datenmaterial können die Strecken innerhalb einer Meßreihe als gleichgenau und unkorreliert betrachtet werden.
- Es ist gerechtfertigt, verschiedene Additionsunbekannte für die beiden Meßbereiche bzw. für Messungen mit einem und mit drei Reflektoren anzusetzen.
- Die Maßstäbe für Bereich I und II desselben Instruments sind bei einigen Geräten unterschiedlich.
- Zwischen den Instrumenten treten Maßstabsunterschiede bis zu $6 \cdot 10^{-6}$ auf.
- Die Meßreihen sind unterschiedlich genau.

4. GEMEINSAME AUSGLEICHUNG ALLER STRECKEN

Das mathematische Modell zur Ausgleichung aller Beobachtungen in einem Guß enthält neben den Streckenunbekannten 15 unterschiedliche Additionskonstanten. Jede Additionskonstante ist einer Beobachtungsgruppe zugeordnet. Bei der Gruppenbildung wurden die Merkmale 'Instrument', 'Meßbereich' und 'Prismenzahl' berücksichtigt.

Ferner enthält das Modell 14 zu schätzende Varianzkomponenten. Die zugeordneten Beobachtungsgruppen unterscheiden sich in den Merkmalen 'Instrument', 'Meßbereich' und 'Meßverfahren'. Diese unterschiedliche Gruppenbildung ist deshalb nötig, weil mit einem Instrument Messungen mit und ohne Frequenzkontrolle im Felde durchgeführt wurden und von einem anderen Instrument Messungen mit und ohne vorgeschalteten Farbfiltern vorlagen. Wie die Vorausgleichungen gezeigt hatten, führen diese Varianten des Meßverfahrens zwar zu Unterschieden in der Genauigkeit, nicht aber zu unterschiedlichen Additionskonstanten. Genau entgegengesetzt ist der Einfluß der Anzahl der benutzten Prismen.

Bestandteil des Ausgleichungsprogramms ist ein Ausreißertest nach *POPE* (1976). Wegen des hohen Freiheitsgrades von etwa 350 mußten bei 95% statistischer Sicherheit keine Beobachtungen verworfen werden, obwohl einige Verbesserungen verdächtig groß ausfallen.

Es wurden drei Ausgleichungsvarianten durchgerechnet.

Variante a

Da wegen der genannten Aufgabenstellung alle Messungen mit größter Sorgfalt durchgeführt worden waren und da bei einigen Instrumenten ausgefeilte Verfahren zur Frequenzkontrolle eingesetzt worden waren, wurden in der Variante a nur die oben genannten Parameter als Unbekannte in die Ausgleichung eingeführt. Ein Vergleich der geschätzten Gruppenvarianzen mit den entsprechenden Werten aus den Vorausgleichungen machte deutlich, daß das funktionale Modell verbesserungsbedürftig ist. Das systematische Erscheinungsbild der Verbesserungen wies eindeutig auf Maßstabsunterschiede zwischen den Instrumenten hin.

Variante b

Um die offensichtlichen Maßstabsunterschiede zu modellieren, wurde das Modell um Maßstabsparameter erweitert. Nach denselben Merkmalen wie bei der Varianzkomponentenschätzung wurden 14 Gruppen gebildet, die möglicherweise je einen eigenen Maßstab aufweisen. In der Variante b wurde angenommen, daß die Messungen, bei denen im Felde eine gleichzeitige Frequenzbestimmung durchgeführt worden war, gleichwertig und dem wahren Maßstab am nächsten sein müßten. Diese Meßreihen, es sind insgesamt acht (4 x KE, 3 x M, 1 x B), wurden zur Maßstabsgebung verwandt, während die übrigen sechs Meßreihen je einen eigenen Maßstab erhielten und sich damit den vorgenannten anpassen konnten. Die Varianzen, die in dieser Variante geschätzt wurden, waren, zumindest für die Meßreihe B, noch immer nicht zufriedenstellend. Es wurde daher eine dritte Variante berechnet, in der allen 14 Gruppen ein eigener Maßstab zugeordnet wurde.

Variante c

Um trotz der Einführung von 14 Maßstabsunbekannten von den Näherungsstrecken unabhängig zu sein, wurde durch eine Bedingungsgleichung erzwungen, daß die Summe der Maßstabsunbekannten null wird. Damit erhält man für die unbekanntesten Teilstrecken einen mittleren Maßstab und für jede Beobachtungsgruppe den darauf bezogenen Maßstabsunterschied, so daß es leicht ist, eine Umrechnung der Strecken auf einen beliebigen Gruppenmaßstab vorzunehmen.

In Tabelle 2 sind die ausgeglichenen Strecken, die sich bei den drei Varianten ergeben haben, auszugsweise zusammengestellt.

Version	Ausgegliche Strecken in mm		
	1 - 2	1 - 7	7 - 8
a)	26 508,48 ± ,06	540 015,39 ± ,06	1079 705,43 ± ,09
b)	26 508,40 ± ,05	540 015,24 ± ,06	1079 705,22 ± ,10
c)	26 508,35 ± ,04	540 014,66 ± ,05	1079 704,32 ± ,11

Tabelle 2 Ergebnisse der drei Versionen von Ausgleichungen in einem Guß (Auszug)

Tabelle 3 zeigt die Varianzen, die für die Gruppen geschätzt wurden und im Vergleich dazu die Varianzen aus den Einzelausgleichungen. Es wurden in dieser Tabelle nur die Beobachtungsgruppen, deren Freiheitsgrad größer als 10 ist, berücksichtigt. Bei den mit *f* indizierten Gruppennamen erfolgte eine direkte Frequenzmessung im Felde. Der Index *t* steht für Temperaturmessung in der Cavity während der Beobachtung, *b* steht für Messungen mit Blaufilter und *r* für solche mit Rotfilter.

Meßreihe	s_0 in mm				Freiheitsgrad
	a)	b)	c)	Einzel- ausgleichg.	
B (If)	0,89	0,84	0,20	0,17	22
BS (I)	0,56	0,36	0,36	0,36	38
BS (II)	0,89	0,37	0,40	-	17
KA (I)	0,81	0,31	0,28	0,24	22
M (If)	0,40	0,41	0,42	0,40	60
M (Ibf)	0,21	0,24	0,22	0,15	19
M (Irf)	0,26	0,28	0,24	0,23	19
KE (If)	0,40	0,38	0,32	0,31	14
KE (It)	0,40	0,39	0,41	0,38	30
S (I)	0,44	0,37	0,37	0,34	50
Y (I)	0,48	0,42	0,42	0,32	46

Tabelle 3 Standardabweichung für eine Strecke unter der Annahme unabhängiger, gleichgenauer Messungen innerhalb der Reihen

Die Entwicklung der Additionskonstanten für die verschiedenen Meßreihen in Abhängigkeit vom Ausgleichungsansatz kann in Tabelle 4 verfolgt werden. Es bestätigt sich das Ergebnis der Vorausgleichungen, daß für Bereich I und II bei demselben Gerät unterschiedliche Konstanten auftreten. Ebenso hat die Anzahl der Prismen Einfluß auf die Werte. Die Problematik der gemeinsamen Bestimmung von Maßstab und Additionskonstante kommt in den Ergebnissen sehr klar heraus.

Meßreihe	Additionskonstante mit Standardabweichungen in mm			
	Version			Einzel- ausgleichung
	a)	b)	c)	
B (I)	+ 1,33 ± 0,19	+ 1,27 ± 0,18	+ 0,13 ± 0,07	+ 0,03 ± 0,07
BS (II1)	+ 0,84 ± 0,10	+ 0,11 ± 0,11	+ 0,11 ± 0,11	+ 0,10 ± 0,12
BS (III1)	+ 2,54 ± 0,26	+ 0,01 ± 0,29	- 0,04 ± 0,31	-
BS (III3)	+ 2,22 ± 0,35	- 0,80 ± 0,35	- 0,78 ± 0,38	-
KA (I)	+ 1,74 ± 0,17	+ 0,45 ± 0,13	+ 0,40 ± 0,12	+ 0,41 ± 0,12
M (I)	- 0,10 ± 0,07	- 0,18 ± 0,07	- 0,24 ± 0,09	- 0,17 ± 0,10
M (Ib)	- 0,19 ± 0,06	- 0,25 ± 0,07	- 0,06 ± 0,09	- 0,01 ± 0,07
M (Ir)	- 0,26 ± 0,07	- 0,32 ± 0,07	- 0,07 ± 0,10	- 0,02 ± 0,10
KE (I)	+ 0,57 ± 0,07	+ 0,51 ± 0,07	+ 0,34 ± 0,11	+ 0,49 ± 0,17
KE (II)	+ 1,87 ± 0,19	+ 1,70 ± 0,21	+ 0,46 ± 0,86	-
S (II1)	- 0,67 ± 0,10	- 0,38 ± 0,10	- 0,44 ± 0,10	- 0,53 ± 0,13
S (I3)	- 0,94 ± 0,10	- 0,66 ± 0,10	- 0,72 ± 0,10	-
Y (II1)	+ 0,24 ± 0,08	+ 0,58 ± 0,12	+ 0,58 ± 0,12	+ 0,70 ± 0,10
Y (I3)	+ 1,09 ± 0,20	+ 2,15 ± 0,34	+ 2,40 ± 0,34	-
Y (III3)	+ 1,18 ± 0,16	+ 0,49 ± 0,50	+ 0,73 ± 0,49	-

Tabelle 4 Additionskonstanten in den verschiedenen Versionen der Ausgleichung

Tabelle 5 gibt einen Überblick über die Maßstabsunterschiede der Instrumente bzw. der Verfahren. Die Signifikanz der Werte kann im Vergleich mit den Standardabweichungen beurteilt werden.

Meßreihe		B (I)f	BS (I)	BS (II)	KA (I)	M (I)f	M (Ib)f	M (Ir)f
Vers. b)	Δm SA f	fest	+ 2,67 \pm ,41 37	+ 3,55 \pm ,42 17	+ 3,80 \pm ,38 22	fest	fest	fest
Vers. c)	Δm SA f	+ 2,58 \pm ,23 20	+ 1,58 \pm ,39 38	+ 2,73 \pm ,42 17	+ 2,97 \pm ,33 20	- 0,82 \pm ,33 59	- 1,83 \pm ,32 18	- 2,04 \pm ,34 18
Meßreihe		KE (If)	KE (IIIf)	KE (It)	KE (IIIt)	S (I)	Y (I)	Y (II)
Vers. b)	Δm SA f	fest	fest	fest	fest	- 0,92 \pm ,22 49	- 1,50 \pm ,39 46	+ 0,66 \pm ,61 5
Vers. c)	Δm SA f	- 0,24 \pm ,32 13	+ 0,56 \pm ,78 4	- 0,58 \pm ,38 29	- 0,16 \pm ,94 2	- 1,72 \pm ,23 49	- 2,59 \pm ,37 46	- 0,43 \pm ,56 5

Tabelle 5 Maßstabsdifferenz Δm in ppm mit Standardabweichung SA und Freiheitsgrad f, bezogen auf das Mittel der festgehaltenen Maßstäbe (Version b) bzw. auf das Mittel aller Instrumente (Version c)

Das Ergebnis der Ausgleichsversion c ist zusätzlich in Abbildung 4 veranschaulicht. Schließlich sind in Abbildung 5 die mittleren meteorologischen Daten, die zum Zeitpunkt der Messungen vorlagen (Wetterstation München-Riem), im Vergleich zu den Maßstäben aufgetragen.

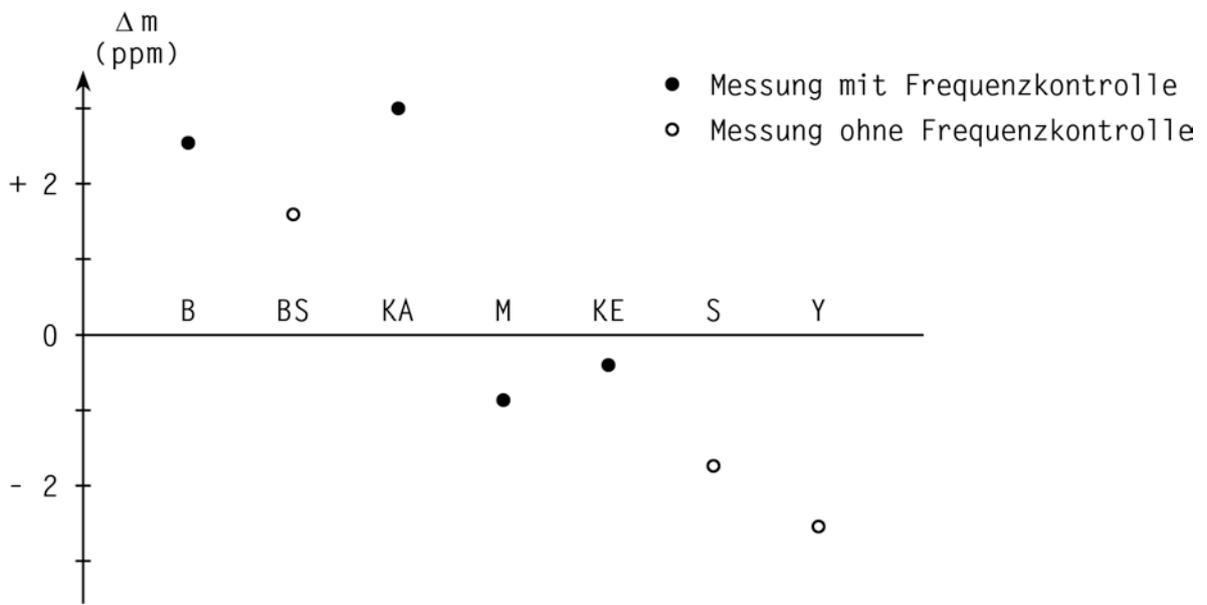


Abbildung 4 Maßstäbe der sieben eingesetzten Mekometer bei Messungen im Bereich I, bezogen auf einen mittleren Maßstab gemäß Version c)

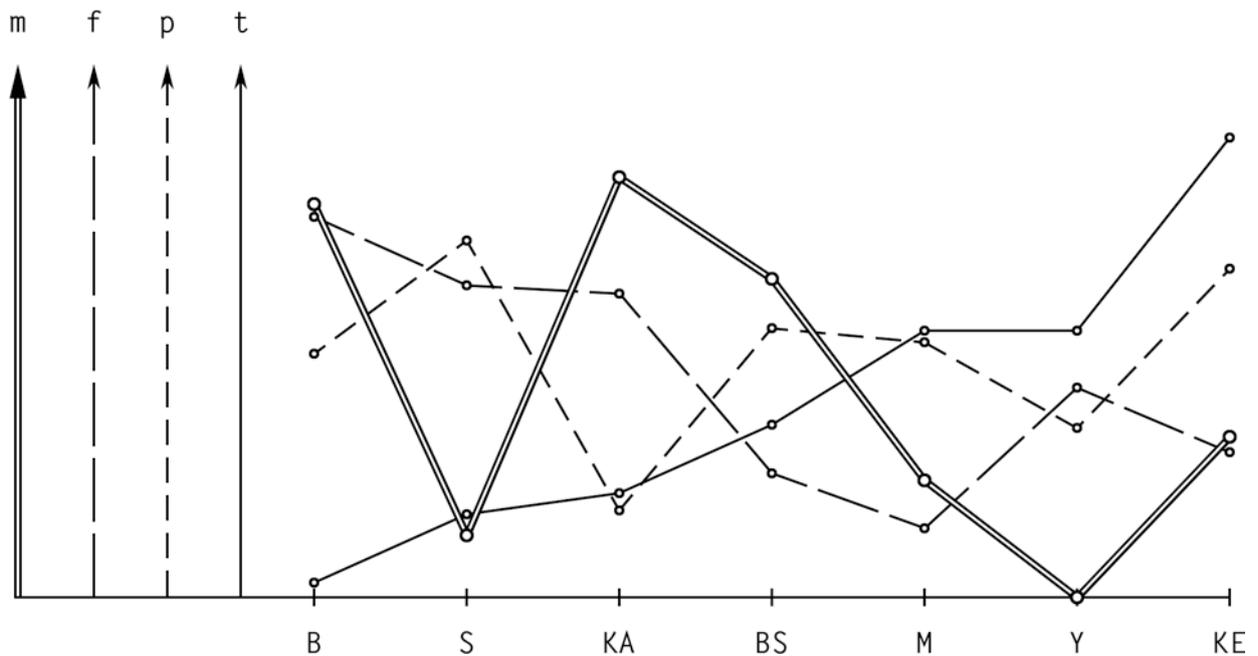


Abbildung 5 Die Maßstäbe (m) im Bereich I der sieben Mekometer und die durchschnittlichen meteorologischen Bedingungen während der Messung: Temperatur (t), Luftdruck (p) und relative Feuchte (f)

Da nur in ganz seltenen Fällen 374 Mekometermessungen für eine gemeinsame Ausgleichung zur Verfügung stehen, wurde die Gelegenheit zu einer Analyse der Fehlercharakteristik genutzt. In Abbildung 6 sind im oberen Teil die normierten Verbesserungen über den Strecken aufgetragen, während im unteren Teil die daraus berechneten lokalen Varianzen aufgetragen sind. Die Darstellungen sprechen für eine streckenunabhängige Gewichtung der Beobachtungen. Das nach der Gerätebeschreibung aufzustellende Fehlergesetz $s^2 = (0,2^2 + (1 \cdot 10^{-6} D_{\text{km}})^2) \text{ mm}^2$ hat bei den ausgewerteten Messungen keine Gültigkeit.

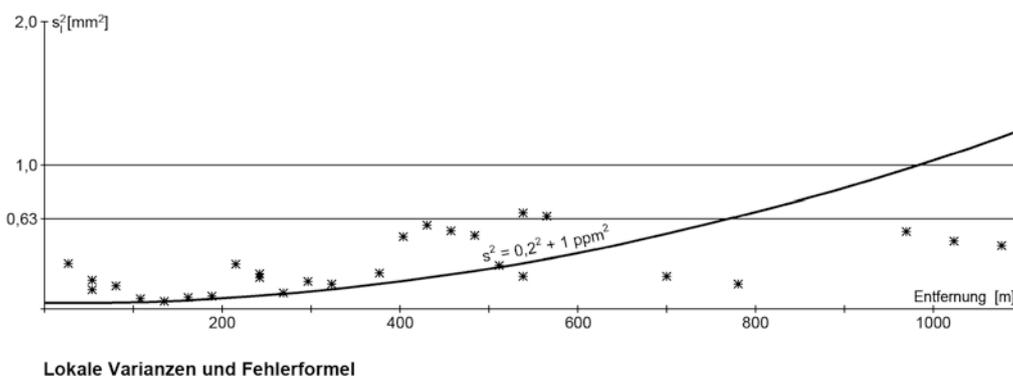
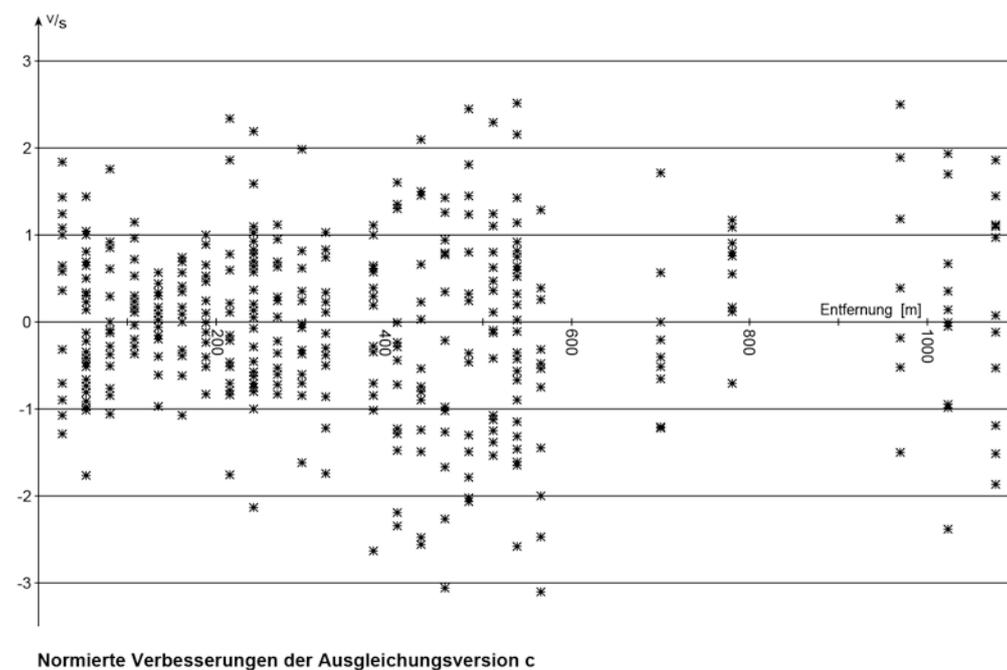


Abbildung 6 Normierte Verbesserungen und lokale Varianzen der Ausgleichung aller Mekometermessungen in einem Guß

5. SCHLUSSFOLGERUNGEN

Das Ziel, mit Hilfe von Mekometermessungen Soll-Distanzen für die Prüf-strecke zu bestimmen, ist nur teilweise erreicht worden. Während die Streckenverhältnisse nun mit hoher Präzision bekannt sind, besteht bezüglich des Maßstabes noch eine gewisse Unsicherheit.

In Abbildung 4 liest man ab, daß die Maßstäbe B und KA gut übereinstimmen. Bei beiden Reihen erfolgten Frequenzmessungen, und zwar bei B gleichzeitig mit der Streckenmessung (*HIRSCH/NGUYEN* 1983), bei KA dagegen im Labor vor und nach dem Meßeinsatz (*MEIER-HIRMER* 1975 und 1978).

Ebenfalls in guter Übereinstimmung, aber etwa um $4 \cdot 10^{-6}$ kleiner sind die Maßstäbe der Messungen KE und M (*MAURER/SCHNÄDELBACH* 1978). Auch bei diesen Meßreihen erfolgte eine direkte Frequenzmessung während der Streckenbeobachtungen. Durch eine auf dem "Normalkilometer" im Ebersberger Forst ermittelte Maßstabskorrektur wurden die frequenzkontrollierten Messungen der Reihe M auf die mit dem Väisälä-Komparator bestimmte Solllänge abgestimmt. Durch diese Vorgehensweise wurde also der Ebersberger Maßstab auf die Prüfstrecke Neubiberg übertragen, was in guter Übereinstimmung mit der Meßreihe KE gelungen ist.

Die Messungen mit den anderen drei Instrumenten erfolgten ohne Frequenzkontrolle. Es sei jedoch erwähnt, daß das Mekometer der Hochschule der Bundeswehr (Y) unmittelbar vor der Messung zur Reparatur und Abstimmung der Frequenz bei der Herstellerfirma war.

Die Maßstabsunterschiede zwischen B, KA und M, KW sowie der Vergleich mit den übrigen Meßreihen legen den Schluß nahe, daß die recht aufwendige Frequenzkontrolle nicht zu der erhofften Annäherung an den wahren Maßstab führt.

Möglicherweise kann die Reproduzierbarkeit des Maßstabes auch durch reine Frequenzmessungen gesichert werden. Das analysierte Datenmaterial läßt dazu keine Aussage zu.

Bei Verzicht auf den absoluten Maßstab liefert das Mekometer eine bemerkenswert hohe Genauigkeit der Streckenmessung. Die in Tabelle 3 zusammengestellten Standardabweichungen für die Messung einer beliebigen Strecke im Meßbereich I liegen zwischen 0,2 und 0,4 mm. Die gute Übereinstimmung zwi-

schen Einzelausgleichungen und gemeinsamer Ausgleichung zeigt, daß die Streckenverhältnisse mit jedem der eingesetzten Geräte durch eine einmalige Messung in allen Kombinationen mit hoher Genauigkeit bestimmt werden können.

LITERATUR

- CASPARY, W., HERZOG, H.: *Zur Überprüfung elektrooptischer Entfernungsmesser*. Mitteilungen aus dem Vermessungswesen Berlin, Nr. 4, 1975, S. 20-38
- DUDDEK, H.: *Eich- und Prüfstrecke für elektrooptische Distanzmeßgeräte "Gürather Höhe", Erfahrungen nach einjähriger Benutzung*. Das Markscheidewesen, 1983, S. 1975-181
- HIRSCH, O., NGUYEN, T.: *Ein modifiziertes und objektiviertes Meßverfahren mit dem Kern-Mekometer*. Allgemeine Vermessungs-Nachrichten, 1983, S. 45-54
- MAURER, W., SCHNÄDELBACH, K.: *Ein neues Frequenzmeßverfahren für das Mekometer ME 3000*. Allgemeine Vermessungs-Nachrichten, 1978, S. 350-355
- MEIER-HIRMER, B.: *Frequenzuntersuchungen am Mekometer ME 3000*. Allgemeine Vermessungs-Nachrichten, 1975, S. 373-387
- MEIER-HIRMER, B.: *Untersuchungen zur Langzeitstabilität des Maßstabsnormals verschiedener EDM-Geräte*. Allgemeine Vermessungs-Nachrichten, 1978, S. 121-128
- PAULI, W.: *Fehlerformel für elektrooptische Streckenmeßgeräte am Beispiel des RECOTA*. Vermessungstechnik, 1982, S. 76-78
- POPE, A.: *The Statistics of Residuals and the Detection of Outliers*. NOAA Technical Report NOS 65 NGS 1, Rockville, 1976
- REINHART/SIEGL/TREMEL: *High Precision Length Measurements by the German Geodetic Research Institute*. Proceedings of the IAG-Symposium High Precision Geodetic Length Measurements, Helsinki, 1978
- RÜEGER, J.M.: *Eine Hilfe für die Projektierung von Eichstrecken elektronischer Distanzmesser*. Vermessung, Photogrammetrie und Kulturtechnik, 1976, S. 245-251
- RÜEGER, J.M.: *Probleme bei der gemeinsamen Bestimmung von zyklischen Fehlern und Additionskonstanten bei elektrooptischen Distanzmessern*. Allgemeine Vermessungs-Nachrichten, 1976, S. 338 ff.
- RUOPP, M.: *Zur Bestimmung der Additionskonstante elektronischer Entfernungsmesser aus Streckenmessung in allen Kombinationen*. Allgemeine Vermessungs-Nachrichten, 1981, S. 132
- SCHWENDENER, H.R.: *Elektronische Distanzmesser für kurze Strecken, Genauigkeitsfragen und Prüfverfahren*. Vermessung, Photogrammetrie und Kulturtechnik, 1971, S. 59-67
- WITTE, B., SCHWARZ, W.: *Erreichbare Genauigkeit mit speziell ausgewählten elektrooptischen Distanzmessern - gezeigt am Beispiel des Autorangers A*. Seminar "Elektrooptische Präzisionsstreckenmessung". Schriftenreihe des Wissenschaftlichen Studiengangs Vermessungswesen der HSBwM, in diesem Heft, 1983/1984

GENAUIGKEITSSTEIGERUNG BEI
NAHBEREICHSENTFERNUNGSMESSERN

von

Werner KÖNGETER

und

Manfred RUOPP

Institut für Anwendungen der Geodäsie im Bauwesen
Universität Stuttgart
Keplerstraße 10
7000 Stuttgart - 1
Bundesrepublik Deutschland

ZUSAMMENFASSUNG

Die Genauigkeit der Distanzmessung mit modernen Nahbereichsentfernungsmessern läßt sich beachtlich steigern, wenn diese Geräte über Vergleichsstrecken kalibriert werden. Durch die Berücksichtigung einer Nullpunktskorrektur, einer zyklischen Verbesserung und einer entfernungsabhängigen aperiodischen Korrektur lassen sich die systematischen Fehleranteile weitgehend ausschalten, so daß innere und äußere Genauigkeit sich beinahe entsprechen. Erfahrungen und Untersuchungsergebnisse werden mitgeteilt.

ABSTRACT

The accuracy of distance measurements by means of short range distance meters can be increased considerably if the instruments are calibrated on base lines. Systematic errors are eliminated largely, taking into account a zero-correction, a cyclic-correction and a non periodic correction which depends on distance. This nearly leads to an equivalence of the internal and the external accuracy.

The paper comprises experiences and results of investigations as well.

1. EINFÜHRUNG

Die Ermittlung von Distanzen bis zu einigen Hundert Metern (Nahbereich) mit höchster Genauigkeit erfordert in der Regel den Einsatz von teuren und aufwendigen Spezialgeräten, wie beispielsweise das MEKOMETER. Sieht man vom streckenabhängigen (Maßstabs-) Fehler ab, so erlaubt dieses Instrument eine Standardabweichung von 0,3 ... 0,5 mm einzuhalten. Bei etwas verminderten Genauigkeitsansprüchen, etwa Standardabweichungen von 1 ... 2 mm, wie dies für viele Präzisionsmessungen im Ingenieurbereich ausreichend ist, denkt man aus naheliegenden Gründen an den Einsatz handlicher und preiswerter Nahbereichsentfernungsmesser, obwohl diese nach den Herstellerangaben diesen Anforderungen im allgemeinen nicht entsprechen können.

Hinweise aus der Literatur (*JACOBS* 1980, *RÜEGER* und *COVELL* 1980, *WITTE* und *SCHWARZ* 1979) und einige Erfahrungen zeigen aber, daß mit etwas erhöhtem Meßaufwand und besonderer Sorgfalt zumindest bei ausgesuchten Geräten nach entsprechender Kalibrierung im Einzelfall Ergebnisse erzielt werden können, die den besonderen Ansprüchen gerecht werden.

Der folgende Beitrag soll in die Problematik einführen, einen der möglichen Wege aufzeigen und zuletzt anhand eigener Untersuchungsergebnisse einen zahlenmäßigen Überblick geben, der sich nicht auf besonders ausgesuchte Geräteexemplare bezieht, sondern auf Instrumente aus einem möglichst breiten Bereich Rücksicht nimmt.

2. FEHLEREINFLÜSSE UND GENAUIGKEIT DER NAHBEREICHSENTFERNUNGSMESSER

Für alle elektromagnetischen Entfernungsmesser ist als Genauigkeitsangabe die Form

$$m_s = \pm (a + b \cdot s) \quad (2-1)$$

üblich, wobei m_s der mittlere Streckenfehler (Standardabweichung der Strecke s) und a und b Konstante sind.

Die Fehlerform (2-1) schließt regelmäßig sowohl zufällige als auch systematische Anteile ein. Da sich die zufälligen Fehleranteile, die mit der Auflösungsfähigkeit des Phasenwinkels bei den hier angesprochenen Phasenentfer-

nungsmessern in engem Zusammenhang stehen, durch Wiederholungsmessungen in ihrer Auswirkung reduzieren lassen, sollen an dieser Stelle in erster Linie die systematischen Fehleranteile erörtert werden, deren Größe und Auswirkung auf die Genauigkeit der Geräte von entscheidendem Einfluß sind.

2.1 Nullpunktsfehler

Bei jedem Distanzmesser bestehen zwischen Anfangs- und Endpunkt der Messung und den mechanischen Zentren der Geräte a priori kleine oder größere Abweichungen, die allerdings herstellerseits im wesentlichen bei der Anzeige berücksichtigt sind. Für präzise Messungen ist jedoch - auch möglicherweise reflektorbedingt - stets von einer Abweichung auszugehen, die zu einer Korrektur C_0 (Additionskonstante) führt.

2.2 Phasenwinkelabhängige Fehler

Wird dem Streckensignal a_2 beim Phasenentfernungsmesser ein frequenzgleiches Störsignal a_1 überlagert, so erfährt dieses gegenüber dem ungestörten Signal eine Phasenverschiebung (Abb. 1). Der Störanteil entstammt meist aus dem zur Phasenvergleichsmessung erforderlichen Bezugssignal, welches durch "optisches Übersprechen" oder infolge einer elektrischen Koppelung in der Hochfrequenz bei nicht vollständig gelungener Abschirmung mit kleiner Amplitude \hat{A}_1 überschlägt. Auch Mehrfachwegsignale können gelegentlich als Störquellen wirken.

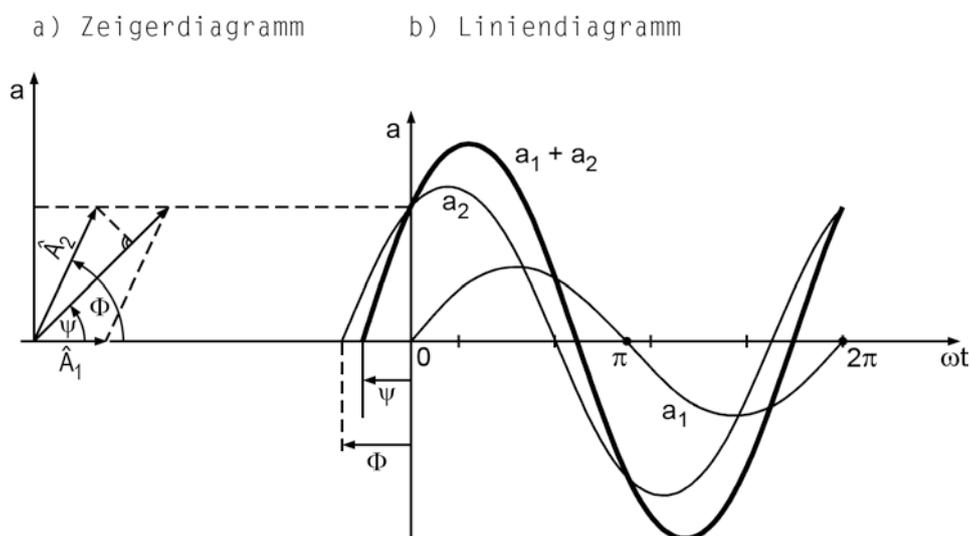


Abb. 1: Zyklischer Fehler

Aus dem Zeigerdiagramm der Abbildung 1 folgt für den Unterschied der Phasenwinkel Φ und Ψ zwischen dem ungestörten und dem gestörten Streckensignal

$$\sin(\Phi - \Psi) = \frac{\hat{A}_1 \sin \Psi}{\hat{A}_2} \quad (2-2)$$

oder, da $\Phi - \Psi \ll 1$

$$\Phi - \Psi \approx \frac{\hat{A}_1}{\hat{A}_2} \sin \Psi \approx \frac{\hat{A}_1}{\hat{A}_2} \sin \Phi \quad (2-3)$$

Mit

$$\lambda = \frac{c}{\omega} \cdot \pi = \frac{c}{2f} \quad (2-4)$$

(c = Fortpflanzungsgeschwindigkeit, ω = Kreisfrequenz, f = Modulationsfrequenz = $\frac{\omega}{2\pi}$, λ = Streckenmaßeinheit) folgt daraus für den zyklischen Streckenfehler:

$$\Delta s_z = \frac{(\Phi - \Psi)}{2\pi} \lambda = \frac{\hat{A}_1}{\hat{A}_2} \frac{\lambda}{2\pi} \cdot \sin \Phi \quad (2-5)$$

Diese Beziehung gilt für den vereinfachten Fall, daß sich dem Streckensignal nur ein (frequenzgleiches) Störsignal überlagert. Mehrfachwegsignale führen zu zusätzlichen Fehlerzyklen. Das Verhältnis zwischen den Amplituden (Signalstärken) zwischen Meß- und Störsignal ist aber stets für die Größe der Auswirkung entscheidend.

Nach (2-5) hat der dominierende zyklische Fehler die Periode der Streckenmaßeinheit (Feinmaßstab). Bei älteren Phasenmeßsystemen treten zusätzlich zyklische Fehler auf, die aufgrund von Imperfektionen der dort verwendeten analogen Phasenmesser die Periode des halben Feinmaßstabs besitzen.

2.3 Streckenabhängige Fehlereinflüsse

2.3.1 Maßstabsfehler

Als "echte" Maßstabsfehler wirken bei jedem EDM-Gerät

a) die Abweichung der Modulationsfrequenz von ihrem angenommenen "Soll"-Wert und

b) die Abweichung der berücksichtigten meteorologischen Korrektur gegenüber der tatsächlich notwendigen.

Beide Fehlereinflüsse lassen sich durch die streng linearen Zusammenhänge

$$\frac{\Delta s_f}{s} = - \frac{\Delta f}{f} \quad \text{bzw.} \quad (2-6)$$

$$\frac{\Delta s_n}{s} = - \frac{\Delta n}{n} \approx -\Delta n \quad (2-7)$$

beschreiben (s = Strecke, f = Frequenz, n = Brechzahl).

Die Frequenzabweichungen der einzelnen EDM-Geräte sind zwar in der Regel gering ($1 \dots 3 \text{ ppm} = 1 \dots 3 \cdot 10^{-6}$), betriebszeitabhängig und temperaturbedingt treten jedoch Größenwerte auf, die für präzise Streckenmessungen auch im Nahbereich bis 500 m nicht außer Acht gelassen werden dürfen. Periodische Frequenzprüfungen mit Erfassung des gerätecharakteristischen Frequenzverhaltens in realistischen Umgebungsbedingungen ermöglichen eine frequenzbedingte Maßstabsgenauigkeit von $\pm 1 \dots 2 \text{ ppm}$. Über Methoden und Möglichkeiten sei auf die Literatur verwiesen, z.B. *RÜEGER* 1982, *SOBOTTA*, *SCHWARZ* und *WITTE* 1980.

Die Genauigkeit der meteorologischen Korrektur für elektrooptische Distanzmesser läßt sich bei sorgfältiger Ermittlung der Lufttemperatur und des Drucks in einer der Frequenzgenauigkeit entsprechenden Größenordnung halten. Bei Messungen in der bodennahen Luftschicht muß jedoch auf die permanente und repräsentative Erfassung der Wetterdaten geachtet werden. Rechnerische Berücksichtigungen der wirksamen Brechzahlwerte sind der unmittelbaren Einstellung im Gerät meist vorzuziehen, insbesondere bei solchen Geräten, die sich nur stufenweise beeinflussen lassen.

2.3.2 Phaseninhomogenitäten

Trotz sorgfältiger Maßstabsbestimmung über Frequenzprüfung und Brechzahlkorrektur weisen die mit elektrooptischen Nahbereichsentfernungsmessern ermittelten Strecken öfter nicht erklärbare distanzabhängige Abweichungen gegenüber ihren Sollstrecken auf. Eine der wesentlichen möglichen Ursachen liegt in der Unvollkommenheit der Bauelemente des Sende- und Empfangssystems

begründet: Die mit hohen Frequenzen erregten Lumineszenz- und Laserdioden sowie die zugeordneten Photodioden reagieren auf ihrer Oberfläche ungleichmäßig. So weist der Querschnitt eines modulierten Lichtbündels einer Sendereinheit zum gleichen Zeitpunkt unterschiedliche Phasenlagen auf, *LEITZ* 1977. Man spricht von Phaseninhomogenitäten, die im wesentlichen elementspezifisch sind und das Ergebnis der Distanzmessung beeinflussen.

Die Begründung für eine entfernungsabhängige Auswirkung der Phasungleichheit sei an folgendem, aus *LEITZ* 1977 entnommenen Beispiel ausgezeigt:

In den Abbildungen 2 und 3 seien für einen Sender die Linien gleicher Phasenlage und gleicher Energiedichte wiedergegeben. Entfernungsabhängig gelangt nun über den Reflektor aus dem ausgesandten Lichtbündel ein unterschiedlicher Ausschnitt auf den Empfänger zurück (Abb. 4). Die angezeigte Entfernung findet sich aber als das arithmetische Mittel aller Phasenlagen, die in die Empfangsoptik zurückgelangen, unter Berücksichtigung der jeweiligen zugeordneten Energiedichte.

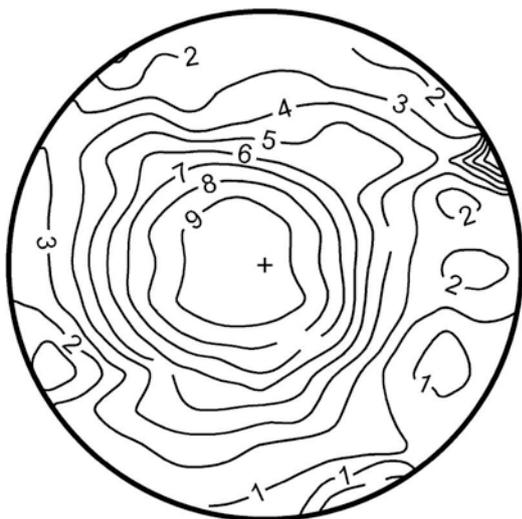


Abb. 2: Linien gleicher Phase

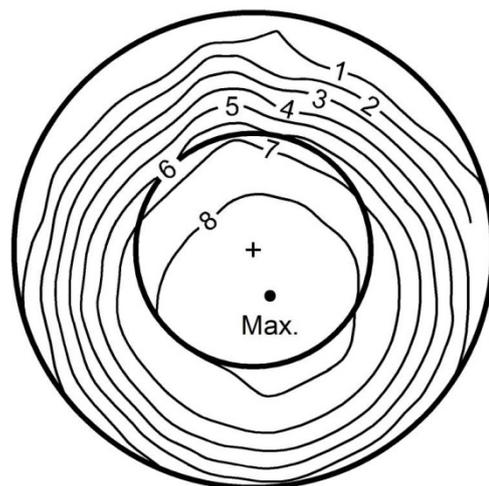


Abb. 3: Linien gleicher Energiedichte

nach *LEITZ*, 1977

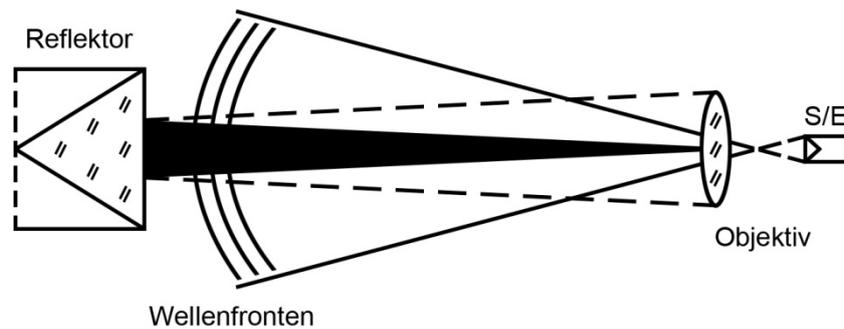


Abb. 4: Ausgesandtes und effektiv nutzbares Lichtbündel

Bildet man nun dieses Mittel durch graphische Integration für den großen Ausschnitt in Abb. 3, der einer kurzen Strecken entspricht, wie auch für den kleinen Ausschnitt, der für längere Strecken gilt, so ergeben sich deutliche Unterschiede (Tabelle 1). Verändert man zusätzlich noch die Zielung, indem man das Bündel nicht zentrisch, sondern nach dem ungefähren Maximum der Energiedichteverteilung auswertet, so erhält man wieder einen signifikant abweichenden Wert:

kurze Strecke (äußerer Kreis)	58 (mm)
lange Strecke (innerer Kreis)	77 (mm)
lange Strecke nach Maximum	72 (mm)

Tab. 1: Ergebnis der graphischen Integration

Es darf daher nicht verwundern, wenn bei Additionskonstantenbestimmungen auf unterschiedlichen Sollstrecken sich jeweils abweichende Ergebnisse zeigen. Die Additionskonstante wird danach (in der Regel) zu einer streckenabhängigen Additionskorrektur (SCHWARZ 1983), die je nach "Güte" der Sender- bzw. Empfangsdioden eines Gerätes einen mehr oder weniger stark ausgeprägten Scheinmaßstab bzw. nicht lineare Zusammenhänge aufweist. Die weiter unten mitgeteilten Ergebnisse eigener Untersuchungen bestätigen ihrerseits die Auswirkung von Phaseninhomogenitäten für verschiedene Instrumente, wenn mit einem Reflektor gemessen wird.

2.4 Äußere und innere Genauigkeit

Untersucht man elektrooptische Nahbereichsentfernungsmesser z.B. auf Vergleichsstrecken, so stellt man fast immer systematische Abweichungen fest, die auf die unter 2.1 ... 2.3 beschriebenen Fehlerquellen zurückzuführen sind. Die unkorrigierten Strecken sind aus diesem Grunde - statistisch gesehen - hochgradig korreliert. Beispiele hierfür sollen die Tabelle 2 ... 4, jeweils 1., aufzeigen:

1. Unkorrigierte Beobachtungen					2. Korrigierte Beobachtungen (\bar{c} , v_{zykl})				
Reihe	a	b	c	d	a	b	c	d	
	Korrelationskoeffizienten								
a	5,0	0,69	0,51	0,54	1,1	0,57	-0,06	0,10	
b	4,1	7,2	0,88	0,91	0,7	1,3	0,21	0,34	
c	4,7	9,7	16,8	0,92	-0,1	0,4	2,3	0,25	
d	5,6	11,4	17,7	21,9	0,1	0,4	0,4	1,4	
	13,5.82 Mi.	13,5.82 Max.	27.82 Mi.	18,8.82 Mi.	Einheit: mm ²				

Tab. 2: Kovarianzmatrix Mittel Hin/Rück (Elta 2)

1. Unkorrigierte Beobachtungen									2. Korrigierte Beobachtungen (\bar{c} , v_{zykl})								
Reihe	a	b	c	d	e	f	g	h	a	b	c	d	e	f	g	h	
	Korrelationskoeffizienten																
a	17,9	0,87	0,83	0,83	0,83	0,74	-0,57	-0,27	4,7	0,31	0,39	0,31	0,38	0,18	-0,59	0,10	
b	13,3	13,1	0,85	0,90	0,84	0,85	-0,31	-0,44	2,2	0,39	0,53	0,17	0,49	-0,10	-0,48		
c	12,3	10,7	12,0	0,72	0,67	0,74	-0,53	-0,25		3,9	-0,01	-0,11	0,28	-0,51	0,07		
d	11,7	10,7	8,2	10,9	0,80	0,81	-0,36	-0,44	(die Kovarianzen wurden weggelassen)		3,3	0,22	0,42	-0,17	-0,36		
e	9,0	7,8	6,0	6,8	6,6	0,75	-0,20	-0,23			2,0	0,14	0,16	0,08			
f	7,8	7,7	6,4	6,7	4,8	6,3	-0,30	-0,17				2,2	-0,24	0,02			
g	-23,4	-11,0	-17,9	-11,7	-5,0	-7,3	93,9	0,05						81,6	-0,20		
h	-11,3	-15,7	-8,6	-14,6	-5,9	-4,2	4,9	99,1								88,9	
	HIN	RÜCK	HIN	RÜCK	HIN	RÜCK	HIN	RÜCK									
		11,5.82 MI		11,5.82 MAX		4,6.82 MI		18,8.82 *) MI	Einheit: mm ²								

*) Mechanischer Defekt am Meßgerät: Unsichere Zielung!

Tab. 3: Kovarianzmatrix Hin-Rück (HP 3820)

1. Unkorrigierte Beobachtungen							2. Korrigierte Beobachtungen (c_o , v_{zykl} , m)						
Reihe	a	b	c	d	e	f	a	b	c	d	e	f	
	Korrelationskoeffizienten												
a	4,4	0,88	-0,04	-0,05	-0,11	-0,03	1,6	0,61	0,58	0,41	-0,19	0,22	
b	4,1	4,8	-0,11	-0,05	-0,12	-0,13		1,6	0,64	0,37	0,10	0,11	
c	-0,2	-0,8	10,7	0,89	0,87	0,91			1,4	-0,14	0,12	0,14	
d	0,4	-0,4	9,3	10,1	0,85	0,89	(die Kovarianzen wurden weggelassen)			3,1	0,37	0,38	
e	-0,8	-0,9	9,9	9,4	12,2	0,91				2,9	0,27		
f	-0,3	-1,1	12,2	11,5	13,0	16,7					1,7		
	HIN	RÜCK	HIN	RÜCK	HIN	RÜCK	Einheit: mm ²						
		18,3.82		18,5.82		17,8.82							

Tab. 4: Kovarianzmatrix Hin-Rück (Di 3-S)

Für verschiedene Geräte sind Meßreihen von jeweils 28 Distanzen im Bereich 30 m ... 470 m miteinander verglichen worden. Die einzelnen Reihen betreffen teils Hin- und Rückmessung, teils bereits das Mittel aus Hin- und Rückmessung, verschiedene Anzielverfahren und umfassen mehrere unabhängige Meßepochen.

Die statistischen Parameter σ_i^2 , $\sigma_{i,k}$, σ_k^2 usw. sind in Form einer Kovarianzmatrix zusammengestellt (untere Dreiecksmatrix). Im oberen rechten Halbfeld findet man die zugeordneten Korrelationskoeffizienten

$$\rho_{i,k} = \sigma_{i,k} / \sqrt{\sigma_i^2 \cdot \sigma_k^2} \quad (2-8)$$

Die Größenordnung der Varianzen bewegt sich zwischen 4,4 und 22, wenn man von den durch grobe Fehler beeinflussten Reihen g und h der Tabelle 3 absieht. Daraus berechnen sich Standardabweichungen zwischen 2,1 und 4,7 mm. Die untersuchten Geräte erfüllen also sämtlich ohne Zusatzkorrektur die Herstellertoleranzen nach (2-1), die in der Regel mit

$$\begin{aligned} a &= 5 \text{ mm,} \\ b &= 2 \dots 5 \cdot 10^{-6} \end{aligned}$$

offeriert werden.

Aus den Tabellen 2 ... 4 läßt sich aber auch unschwer ablesen, daß die sog. innere Genauigkeit wesentlich höher liegt. Nach dem Fehlerfortpflanzungsgesetz für Varianzen und Kovarianzen folgt bekanntlich

$$\sigma_{d_{ik}}^2 = \sigma_i^2 + \sigma_k^2 - 2 \sigma_{ik} . \quad (2-9)$$

Danach finden sich aus den Varianzen der Streckendifferenzen d Standardabweichungen zwischen 1,0 und 2,8 mm nach den Tabellen 2 und 3 (Meßreihen g u. h der Tabelle 3 nicht einbezogen). Die Werte der Tabelle 4 zeigen ein ähnliches Verhalten (hohe innere Genauigkeit) nur innerhalb der jeweiligen Hin- und Rückmessung. Zwischen den einzelnen Epochen geht die Korrelation offensichtlich stark zurück; dies bedeutet, systematische Fehler sind entweder nicht vorhanden oder stark veränderlich.

Tatsächlich ist das letztere der Fall. Bestimmt man im Rahmen einer Kalibrierung (Abschnitt 3) die wesentlichen Korrekturparameter, so gehen auch

bei diesem Instrument die Varianzen stark zurück (Tabellenteil b). Die Größenordnung der Standardabweichung bewegt sich zwischen 1,1 und 1,8 mm (für eine Messung) bei Tabelle 4 und 1,4 bis 2,1 mm bei Tabelle 3 ohne Reihen g und h sowie 1,1 und 1,5 mm für das Mittel aus Hin- und Rückmessung bei Tabelle 2. Dies bedeutet, daß nach der Kalibrierung die äußere Genauigkeit der (nun weniger stark korrelierten Strecken) an die innere Genauigkeit heranreicht. Eine Genauigkeitssteigerung muß sich also aus der sorgfältigen Kalibrierung der Geräte erzielen lassen.

3. KALIBRIERUNG DER NAHBEREICHSENTFERNUNGSMESSE IM TESTNETZ STUTTGART/ VAIHINGEN

3.1 Das Testnetz Vaihingen

Für die Kalibrierung elektrooptischer Nahbereichsentfernungsmesser werden üblicherweise Feldstrecken mit mehreren Zwischenpunkten angelegt, die - je nach Ausstattungsgrad - aus bodenvermarkten Punkten oder Meßpfeilern bestehen. Die Anlage der Meßstrecke in einer Geraden im ebenen Gelände bringt auswertetechnische Erleichterungen, ist aber geländebedingt nicht überall möglich.

Über die Kriterien der Streckenauswahl wurde anderweitig berichtet (*SCHWENDENER* 1971, *JAKOB* 1976, *PAULI* 1977, *RÜEGER* 1978, *FROEHLICH* und *WITTE* 1978, *RUOPP* 1981). Die Festlegung unseres Stuttgarter Kalibrierfeldes mußte aus räumlichen und topographischen Gründen mit Strecken unter 500 m im kuperten Gelände erfolgen. Um Vergleichswerte möglichst hoher Genauigkeit zu bekommen, wurde ein flächenhaftes Netz gewählt, das auch für anderweitige Aufgabe benützt werden kann. Es befindet sich im Bereich des Übungsgeländes Vaihingen der Universität Stuttgart und ist von der Straße Vaihingen-Büsnau aus gut zugänglich (Abb. 5).

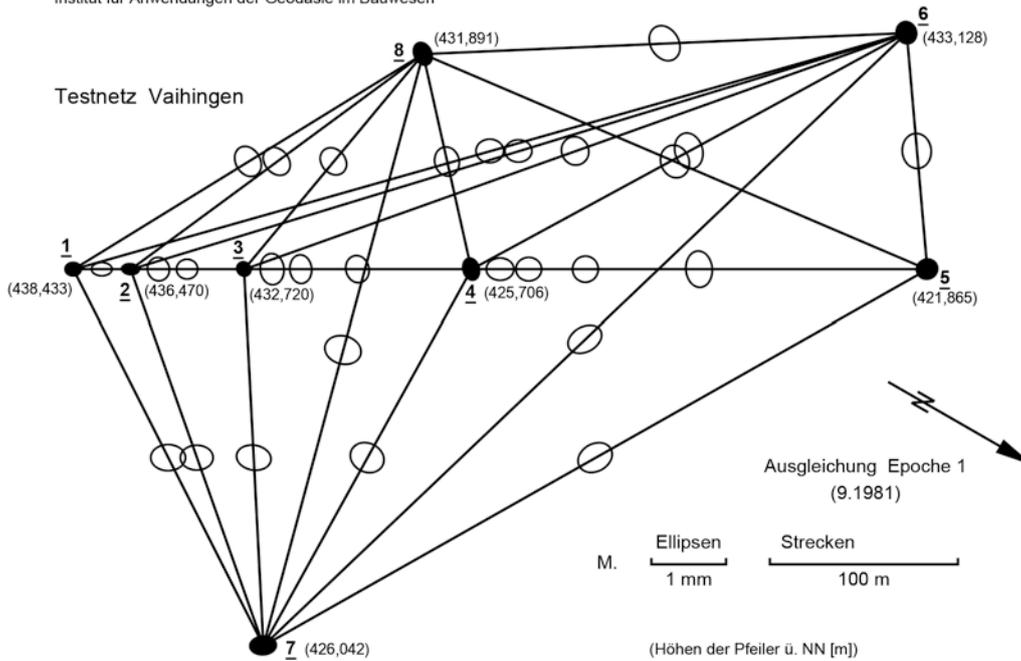


Abb. 5: Testnetz Vaihingen

Optimiert wurde die Netzform hinsichtlich Aufdeckung grober Fehler und Zuverlässigkeit mit dem Programmsystem OPTUN (*BAHNDORF* 1982), unter Beachtung einer gleichmäßigen Streckenverteilung innerhalb des Meßbereichs bis 500 m und über einen 10 m - Feinmaßstab (Abb. 6).

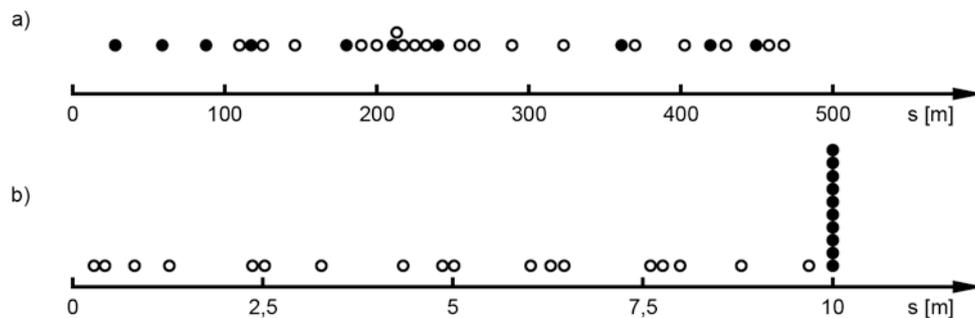


Abb. 6: a) Verteilung der Schrägstrecken über die Streckenlänge
 b) Verteilung der Schrägstrecken über den 10 m Feinmaßstab
 ● s ganzzahlige Vielfache vom 10 m Feinmaßstab
 ○ s unrunde Vielfache vom 10 m Feinmaßstab

Die 8 Netzpunkte wurden durch vorgefertigte Betonpfeiler mit Armierung vermarktet (Abb. 7). Auf dem Pfeilerkopf ist eine Messingplatte mit einem 5/8"-Gewindebolzen eingebracht, der die Zwangszentrierung auf $\pm 0,1 - 0,2$ mm gewährleistet. Zum Schutz gegen thermische Einflüsse wurde der Zwischenraum zwischen Pfeiler und Schutzrohr mit Polystyrolmasse ausgeschäumt. Auf dem Sockel der Beobachtungspfeiler sind außerdem 4 Höhenbolzen angebracht.

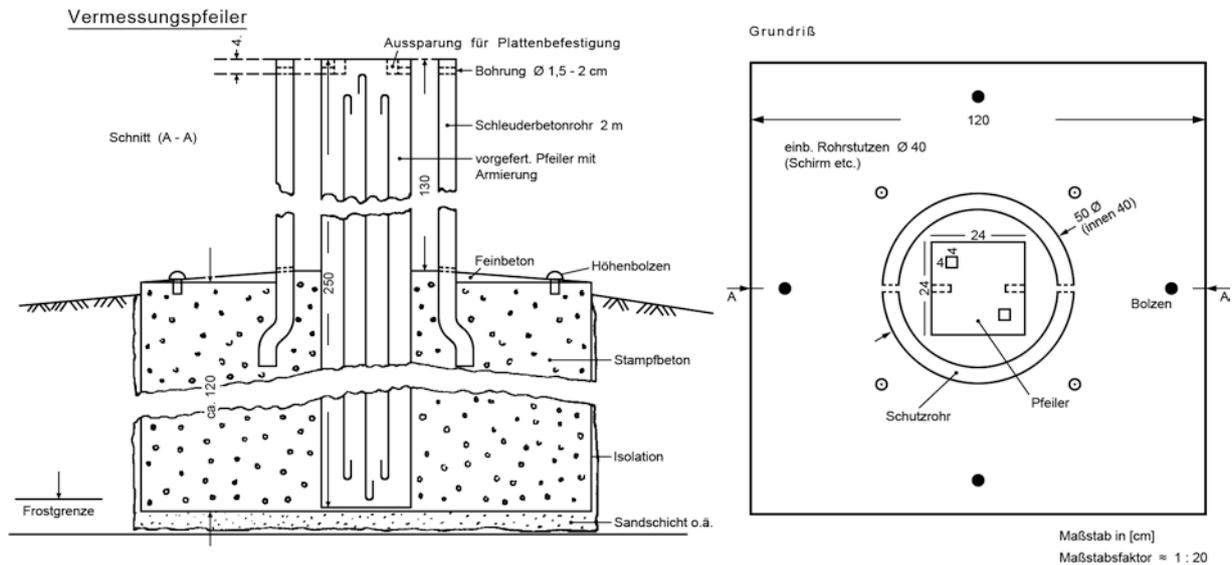


Abb. 7: Vermarkung der Beobachtungspfeiler

3.2 Messungen und Auswertungen

Zur Bestimmung der "Sollstrecken" des Testnetzes werden Streckenmessungen mit dem Mekometer ME 3000 ($m_s = 0,3 \dots 0,5 \text{ mm} \pm 2 \text{ ppm}$) und Richtungsbeobachtungen mit Sekundentheodolit ($m_R = 0,2 \dots 0,3 \text{ mgon}$) durchgeführt. Die Höhenunterschiede der Pfeilerpunkte werden mittels Feinnivellement bestimmt, während genaue Höhendifferenzmessungen am Pfeilersockel der Überprüfung der Standsicherheit der Pfeiler in Bezug auf eventuell auftretende Kippungen dienen.

Über eine freie Netzausgleichung mit einer Additionskonstante als weiterer Unbekannten, die der Überprüfung der Additionskonstante des Mekometers dient, - durchgeführt mit dem Programmsystem OPTUN - erfolgt die Bestimmung der Koordinaten. Ergebnisse mehrerer Ausgleichungen ergeben für den mittleren Punktfehler nach Helmert $0,2 \dots 0,3 \text{ mm}$ (Abb. 5). Daraus werden mit den bestimmten Höhenunterschieden "Sollstrecken" zwischen den Pfeilerplattenbolzen berechnet.

Das Netz wird regelmäßig nachgemessen. Mögliche auftretende Deformationen zwischen den Bestimmungsepochen können durch eine Deformationsanalyse (OPTUN) aufgedeckt, analysiert und mit Hilfe der Kippungsergebnisse kontrolliert werden.

Bei den Kalibrierungsmessungen werden Instrumentenhöhe und Reflektorhöhe in Bezug zur Pfeilerplatte, Temperatur und Luftdruck repräsentativ für das Testnetz sowie die Schrägstrecke durch i.d.R. 3-4-malige Maximumzielung bestimmt. Eine sorgfältige Maximumzielung ist das ausschlaggebende Genauigkeitsmoment. Eine weitere Genauigkeitssteigerung kann durch Erhöhung der Anzahl der Maximumzielungen erreicht werden. Dabei läßt sich bei vielen Instrumenten feststellen, daß die 1. Auslösung der Entfernungsmessung ein Ergebnis liefert, das oft um mehrere mm vom Mittelwert der folgenden Messungen abweicht.

Vergleichende Untersuchungen zwischen Maximumzielungen und Mittenanzielungen (über das Fadenkreuz des Hilfsfernrohrs) zeigen, daß längerfristige Kalibrierungsparameter nur über Maximumzielungen bestimmt werden dürfen.

Für die wegen atmosphärischer Einflüsse, Frequenzkorrektur und Höhenlage korrigierten Prüflingsstrecken wird folgender Ausgleichungsansatz gewählt:

$$v = -c - f(s) - A(K) \cdot \cos\left(K \cdot \frac{2\pi}{\lambda} \cdot R\right) - B(K) \cdot \sin\left(K \cdot \frac{2\pi}{\lambda} \cdot R\right) + \bar{s} - s \quad (3-1)$$

mit c Nullpunktskonstante

$A(K)$, $B(K)$ Fourierkoeffizienten für Darstellung der zyklischen Verbesserungen

$f(s)$ aperiodische, entfernungsabhängige Streckenkorrektur

\bar{s} Vergleichsstrecken

s Iststrecke.

Der aperiodische, entfernungsabhängige Anteil $f(s)$ wird in der Regel empirisch bestimmt und berücksichtigt (vgl. Abb. 8) oder als linearer Einfluß behandelt.

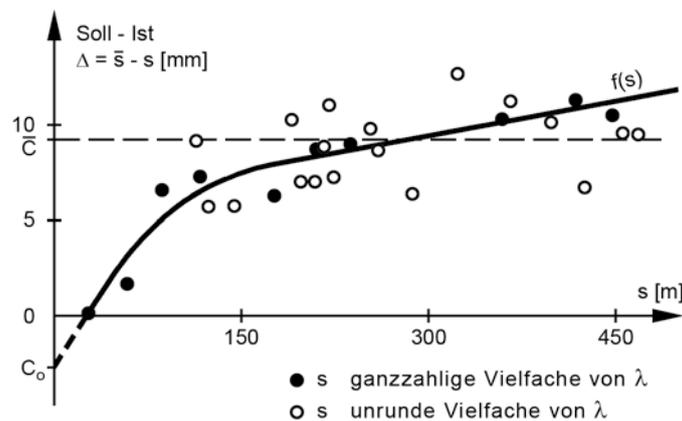


Abb. 8: Bestimmung des aperiodischen, entfernungsabhängigen Anteils $f(s)$

Für die Berechtigung der Annahme eines konstanten zyklischen Fehlereinflusses im Bereich der Kalibrierungsstrecken sprechen zusätzliche unabhängige Bestimmungen mit Hilfe von Differenzmessungen in unterschiedlichen Entfernungen.

Unterschiedliche Gewichtsansätze für die verschiedenen Strecken erwiesen sich im allgemeinen als nicht lohnend. Mit statistischen Testverfahren werden die signifikanten Kalibrierungsparameter abschließend ermittelt.

3.3 Einige charakteristische Ergebnisse

Die Erfahrungen bei der Überprüfung der Nahbereichsentfernungsmesser zeigen, daß die systematischen Fehler deutlich größer sind als die zufälligen (Phasenwinkelauflösung) und daß die Strecken daher miteinander stark korreliert sind (siehe Tab. 2 ... 4). Das Ziel der Kalibrierung ist es, durch Bestimmung und Berücksichtigung sämtlicher Kalibrierungsparameter die äußere Genauigkeit der inneren Genauigkeit so nahe wie möglich zu bringen.

Vergleichende Untersuchungen der unmittelbaren Bestimmung der Frequenzen im Felde mit Labormessungen (Labor für Elektronische Entfernungsmessung der FHT Stuttgart - JOECKEL, STOBER 1983) ergaben nahezu identische Werte, so daß die Erstellung von Frequenzkorrekturkurven im Labor ausreichend ist. Halbjährlich ermittelte Frequenzkorrekturkurven zeigten sich bei 4 verschiedenen Instrumenten sehr stabil und lagen in Größenordnungen unter 4 ppm.

Aus mehr als 25 untersuchten Instrumenten erhielten wir folgendes Verhaltensbild (Tab. 5):

<u>Additionskonstante</u> signifikant von Null abweichend	88 %
<u>Zyklischer Fehler</u> mit Amplitude > 3 mm > 5 mm	44 % 8 %
<u>Aperiodische Additionskorrektur</u> signifikant nicht linear linear $\geq 5 $ ppm linear $\geq 10 $ ppm	16 % 32 % 8 %

Tab. 5: Ergebnisse der Kalibrierungsparameter

Durch Berücksichtigung der Kalibrierungsparameter läßt sich durchschnittlich eine Reduktion des Streckenfehlers auf ca. 40% erreichen (Tab. 6):

m_{s1} (unkalibriert)	$\pm 2 \dots 9$ mm
m_{s2} (kalibriert)	$\pm 1 \dots 3$ mm

Tab. 6: Ergebnisse mittl. Streckenmeßfehler

Es ist leicht erkennbar, daß alle untersuchten Gerätetypen den Kalibrierungsaufwand rechtfertigen.

Einzelne institutseigene Instrumente wurden über längere Zeiträume hinsichtlich ihres Langzeitverhaltens untersucht. Das Ergebnis ist bildlich für die Geräte Elta 2, HP 3820, Autoranger A (Eigentümer ist die FHT Stuttgart) und Di 3S wiedergegeben (Abb. 9).

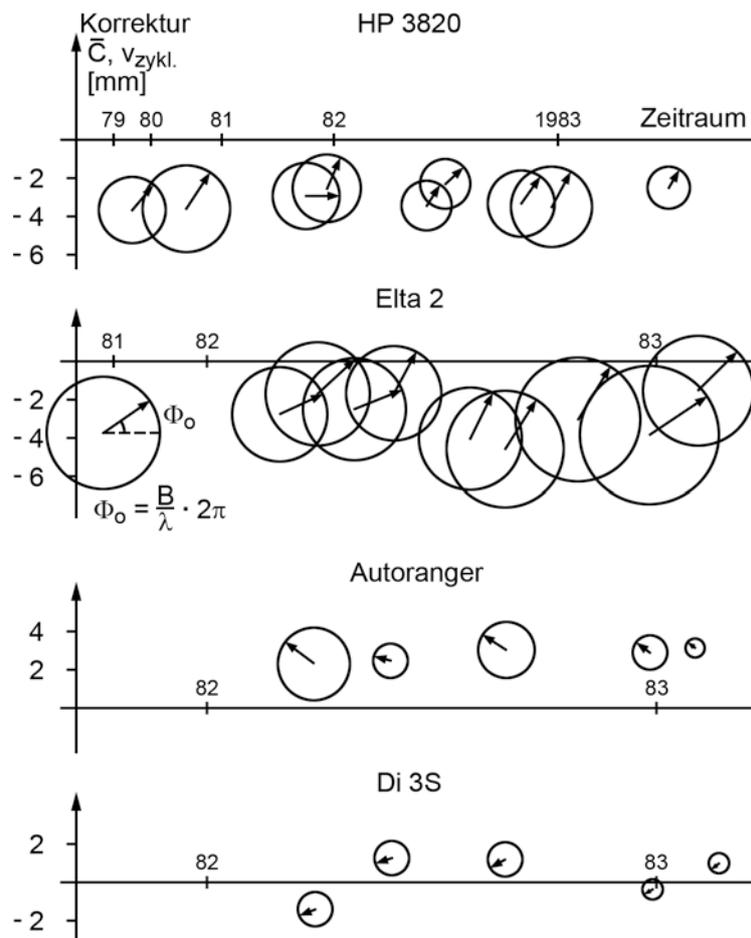


Abb. 9: Langzeitverhalten der Kalibrierungsparameter

Obwohl sich im allgemeinen für die Additionskonstante und die zyklischen Einflüsse eine gute Konstanz bestätigt, sind im einzelnen auch Abweichungen festgestellt worden, die weiter untersucht werden müssen.

Das Testnetz bietet hierfür ausreichend gute Möglichkeiten. Wir verzichten bewußt auf Laborkalibrierungen, um den Verhältnissen in der Praxis möglichst nahe zu kommen. Nach unseren Erfahrungen bedarf es aber besonders beim Einsatz der Nahbereichsentfernungsmesser vor Ort der erforderlichen Sorgfalt bei Reflektoraufstellung, Zielung und Gerätebedienung, wenn die durch die Kalibrierung erreichte Genauigkeitssteigerung auch im Anwendungsfall aufrecht erhalten werden soll.

LITERATUR

- BAHNDORF, J.: *OPTUN - Ein Programmsystem zur Planung und Analyse von geodätischen Netzen*. Technische Akademie Esslingen, Lehrgang "Elektronische Datenverarbeitung und automatisierte Verfahren im Vermessungswesen", Vortragsmanuskript, 1982.
- FROELICH, H., WITTE, B.: *Eichung elektrooptischer Entfernungsmesser - Anlage und Auswertung der Eichmessungen*. FORUM (Bund Deutscher Vermessungsingenieure), 337-347, 1978.
- JACOBS, E.: *Zweckentsprechende und wirtschaftliche Prüfverfahren für elektrooptische Distanzmesser*. Der Vermessungsingenieur 31, 32-39, 1980.
- JAKOB, G.: *Zur wirtschaftlichen Konstantenbestimmung elektrooptischer Entfernungsmesser durch Streckenmessung in allen Kombinationen*. Vermessungstechnik 24, 430-432, 1976.
- JOECKEL, R., STÖBER, M.: *Das Labor für elektronische Entfernungsmessung der Fachhochschule Stuttgart*. Mitteilungen des Deutschen Vereins für Vermessungswesen Landesverein Baden-Württemberg 30, Heft 1, 5-24, 1983.
- LEITZ, H.: *Zur Genauigkeit und Reichweite von elektrooptischen Distanzmessern am Beispiel des Zeiss Eldi 2*. Zeitschrift für Vermessungswesen 102, 152-156, 1977.
- PAULI, W.: *Über Eichung und Eichstrecken elektrooptischer Entfernungsmessgeräte*. Vermessungstechnik 25, 265-267, 1977.
- RÜEGER, J.M.: *Entwurf von Prüfstrecken des Schwendener Typs für elektrooptische Entfernungsmesser*. Vermessungswesen und Raumordnung 40, 315-324, 1978.
- RÜEGER, J.M., und COVELL, P.C.: *Zur Konstanz und Vielfältigkeit zyklischer Fehler in elektrooptischen Distanzmessern*. Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik 78, 261-267, 1980.
- RÜEGER, J.M.: *Quartz Crystal Oscillators and their Effects on the Scale Stability and Standardization of Electronic Distance Meters*. School of Surveying, the University of New South Wales, Kensington, Australia, Unisurv Report S 22, 1982.
- RUOPP, M.: *Zur Bestimmung der Additionskonstante elektronischer Entfernungsmesser aus Streckenmessungen in allen Kombinationen*. Allgemeine Vermessungs-Nachrichten 88, 132-139, 1981.
- SCHWARZ, W.: *Die Additionskorrektur bei elektrooptischen Distanzmessern*. Allgemeine Vermessungs-Nachrichten 90, 54-63, 1983.
- SCHWENDENER, H.R.: *Elektronische Distanzmesser für kurze Strecken. Genauigkeitsfragen und Prüfverfahren*. Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik 69, 59-67, 1971.
- SOBOTTA, Chr., SCHWARZ, W., und WITTE, B.: *Frequenzprüfung elektrooptischer Entfernungsmesser mit Photodioden*. Allgemeine Vermessungs-Nachrichten 87, 257-265, 1980.
- WITTE, B., und SCHWARZ, W.: *Der Autoranger-A - Ein genauer elektronischer Distanzmesser*. Allgemeine Vermessungs-Nachrichten 86, 425-435, 1979.

GENAUIGKEITSSTEIGERUNG ELEKTROOPTISCHER ENTFERNUNGSMESSER
DURCH GERÄTEKALIBRIERUNG

von

Hans HEISTER

Institut für Geodäsie
Hochschule der Bundeswehr München
Werner-Heisenberg-Weg 39
D-8014 Neubiberg
Bundesrepublik Deutschland

ZUSAMMENFASSUNG

Durch die Bestimmung verschiedener systematischer Fehler bei EDM-Instrumenten ist es möglich, die Genauigkeit der Streckenmessung gegenüber den Herstellerangaben zu steigern. Anhand zweier Instrumente - dem Tellurometer MA 100 und der Totalstation HP 3820A - werden unterschiedliche Methoden der Kalibrierung und Auswertung diskutiert.

ABSTRACT

On determining the different systematic errors of EDM-instruments it is possible to increase the accuracy of the measured distances, compared with the specifications of the manufacturers. By the test of two short range electrooptical instruments - the Tellurometer MA 100 and the totalstation HP 3820A - different methods of calibration and evaluation models are discussed.

1. EINFÜHRUNG

Die Genauigkeit s_0 elektrooptischer Entfernungsmesser wird heute von den meisten Herstellern durch folgende Standardabweichung

$$s_0 = \pm(a + bs)$$

angegeben. Sie setzt sich zusammen aus einem konstanten Anteil a sowie einem proportional zur Strecke s anwachsenden Teil b ; beide Koeffizienten sind - gerätetypisch bedingt - aus verschiedenen Fehlerursachen abgeleitet und von unterschiedlicher Größenordnung. Dieser Ansatz scheint aber deshalb problematisch, weil er sowohl systematische als auch zufällige Fehleranteile zu einem statischen Genauigkeitsmaß oder einer Toleranz zusammenfaßt. Aus diesem Grunde ist hier der Versuch unternommen, die Anteile, die im wesentlichen die Genauigkeit des Gerätes beeinflussen, zu trennen und hieraus Kalibriermöglichkeiten zur Genauigkeitssteigerung abzuleiten.

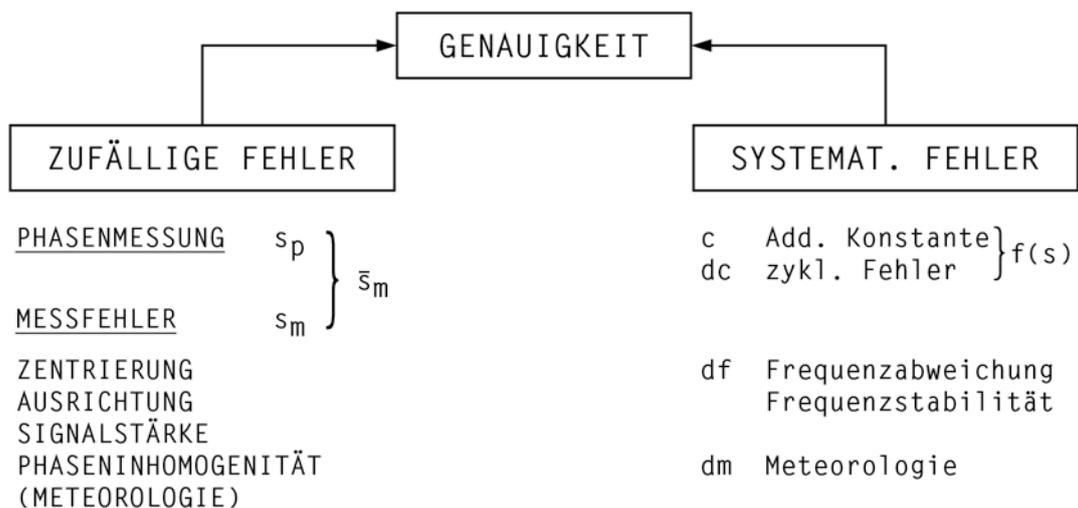


Abb. 1 Fehleranteile der elektrooptischen Distanzmessung

Unter Kalibrieren versteht man gemäß DIN 1319 in der Meßtechnik die Bestimmung des Fehlers einer Maßverkörperung, d.h. die Differenz zwischen 'Ist' und 'Soll'. Sind diese Differenz oder gewisse Anteile signifikant bestimmbar sowie über den Meßzeitraum reproduzierbar, so kann durch ihre Berücksichtigung die Genauigkeit des Meßergebnisses gesteigert werden. Abbildung 1 listet die systematischen Fehleranteile auf, die mit heutigen Kalibrieremethoden schnell und zuverlässig bestimmt werden können; eine Ausnahme hierbei bildet der Fehler dm - verursacht durch die Meteorologie bei der Be-

stimmung des Brechungsindex n , der nur durch sorgfältige Messung von Luftdruck und Temperatur sowie durch die Benutzung von geeichten Instrumenten minimiert werden kann. Er wirkt sich als Maßstabsfaktor aus und ist deshalb direkt korreliert mit dem Fehler df .

Bei den Komponenten der zufälligen Fehler wird davon ausgegangen, daß sie - auch wenn der Fehler für eine einzelne Messung systematischen Charakter hat - durch die Größe der Stichprobe doch zufällig wirken.

2. KALIBRIERUNG

Beschränkt man sich darauf, Additionskonstante c , zyklischen Fehler dc und Frequenzabweichung df als die wesentlichen Einflußgrößen zur Genauigkeitssteigerung zu bestimmen, so können Messungen auf einer Prüfstrecke und/oder Labormessungen und die Anwendung verschiedener Auswertemethoden ihrer Realisation dienen. Abbildung 2 zeigt die verschiedenen Wege, die je nach Verfügbarkeit gewählt werden können.

Die Anlage von Prüfstrecken ist ein in der Literatur breit behandeltes Thema. Die für diese Untersuchungen notwendigen Messungen wurden auf der Prüfstrecke Neubiberg des Instituts für Geodäsie der Hochschule der Bundeswehr durchgeführt. Gründe und Auswahlkriterien für die technische Anlage sind in *CASPARY* (1984) ausführlich dargelegt. Um eine optimale Verteilung über den Feinmaßstab der beiden Geräte sowie den gesamten Entfernungsbereich der Prüfstrecke zu erreichen, wurden die Messungen s_{ik} in allen Kombinationen durchgeführt.

Die Auswertung kann ebenfalls unter Ansatz unterschiedlicher funktionaler Modelle durchgeführt werden (*RÜEGER* 1977, *RUOPP* 1981, *SCHLICHTING* 1981, *SCHWARZ* 1983). Dabei hängt die Auswahl von verschiedenen Faktoren ab, wie z.B. Genauigkeitsanforderungen, Instrument, Art der Prüfstrecke, Hardware und Laborausrüstung u.a.

Sind die Teilstrecken der Prüfstrecke bekannt, so lassen sich im Ausgleichsmodell 1 (siehe Abbildung 2) die Parameter c , dc , df einschließlich ihrer Standardabweichungen s_c , s_{dc} , s_{df} schätzen. Weiterhin können Aussagen über die Standardabweichungen der Streckenmessung gemacht werden. Ergibt sich der zyklische Fehleranteil aus diesem Modell als nicht signifikant oder stellt man an die Bestimmung der Additionskonstante c weniger

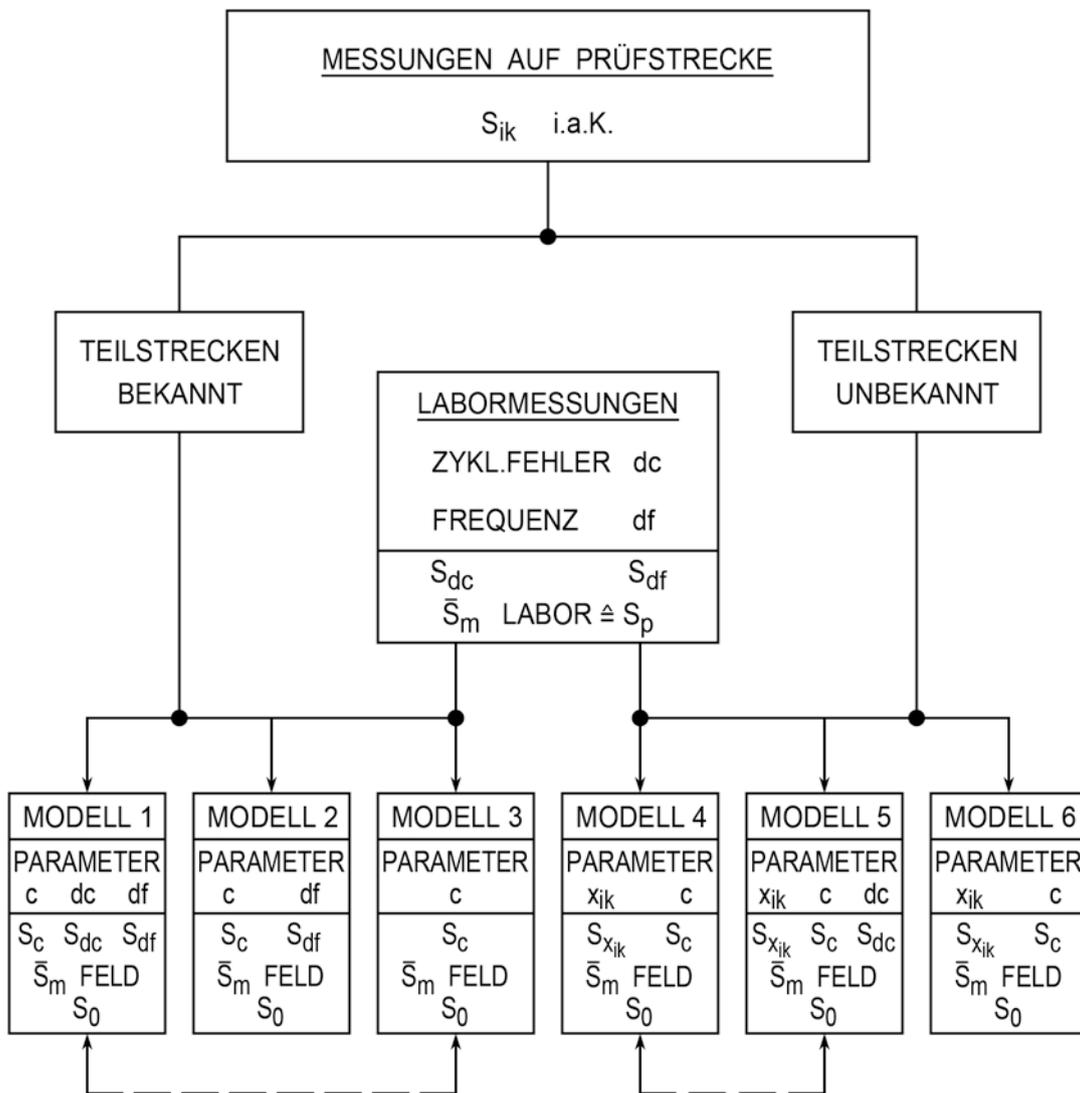


Abb. 2 Auswertemodelle bei der EDM-Kalibrierung

genaue Anforderungen, dann sollte - wie im Ausgleichsmodell 2 - der Parameter dc unberücksichtigt bleiben. Hat man schließlich die Möglichkeit, den zyklischen Fehler dc sowie die Frequenzabweichung df im Labor zu bestimmen, dann können die hierin korrigierten Streckenmessungen in das Auswertemodell 3 eingeführt werden, in dem nur die Additionskonstante c als Parameter eingeführt wird. Die Ergebnisse müssen dann mit dem zuerst aufgezeichneten Weg vergleichbar sein.

Entsprechende Vorgehensweise bietet sich an, wenn die Teilstrecken unbekannt sind. Hier schlägt der DIN-Entwurf 18723 für die Genauigkeitsuntersuchung elektrooptischer Distanzmesser vor, nur die Parameter c und x_{ik}

(Unbekannte für die Strecken vom Anfangspunkt) im Ausgleichsmodell 6 zu bestimmen. Bei einer Gleichverteilung über den Feinmaßstab und Entfernungsbereich der Prüfstrecke dürfte die Additionskonstante nahezu frei von zyklischen Fehleranteilen sein; die Verbesserungen der Strecken sind dagegen um diese Anteile verfälscht, so daß die Schätzung der Standardabweichung zu hoch ausfällt. Führt man wiederum im erweiterten Modell 5 den zyklischen Fehler δc als Unbekannte ein, so kann die ausgeglichene Additionskonstante c von der Amplitude und der Phasenverschiebung des zyklischen Fehlers abhängig sein. *RÜEGER* (1976) weist diese Mängel nach und schlägt zu ihrer Eliminierung ein iteratives Verfahren vor, in dem die Beobachtungen jeweils um den vorher bestimmten zyklischen Fehleranteil so lange verbessert werden, bis kein signifikantes δc mehr ausgewiesen wird. Möchte man diesen Weg vermeiden, so führt nur die getrennte Bestimmung von c und δc durch Feld- und Labormessungen zu einem akzeptablen Ergebnis.

Bei allen Auswertemethoden sind besonders die Genauigkeitsschätzer kritisch zu werten. Je nach Modellansatz sind hier Genauigkeitsaussagen über die einzelnen Fehleranteile, wie sie in Abbildung 1 aufgeführt sind, möglich.

3. UNTERSUCHUNGSERGEBNISSE

Die Laboruntersuchungen für die beiden genannten Geräte erstreckten sich auf die Bestimmung der Feinmeßfrequenz und des zyklischen Fehlers. Beim Gerät HP 3820A (Ser. Nr. 1650 A 00630) wurde die Frequenz mit Hilfe einer vor dem Objektiv angebrachten Photodiode bestimmt. Das Verfahren ist in *SOBOTTA, SCHWARZ* und *WITTE* (1980) eingehend beschrieben. Beim MA 100 (Ser. Nr. 362) konnte die Frequenz direkt an einem vorhandenen BNC-Ausgang mit einem Frequenzzähler abgegriffen werden. Es ergaben sich folgende Maßstabskorrekturen:

$$\text{HP 3820A : } \quad \delta f = 1 \text{ Hz} \cong 0,1 \text{ ppm}$$

$$\text{MA 100 : } \quad \delta f = 28 \text{ Hz} \cong 1,5 \text{ ppm}$$

Der zyklische Fehler wurde auf einem 30-m-Komparator ermittelt; hierbei wurde über Planspiegel eine Verlängerung des Strahlenweges erreicht, so daß der Fehleranteil δc über einen Meßbereich von 120 m untersucht werden konnte. Beim HP 3820A zeigten sich sowohl für die Phase als auch für die Amplitude über dieses Meßintervall keine signifikanten Unterschiede.

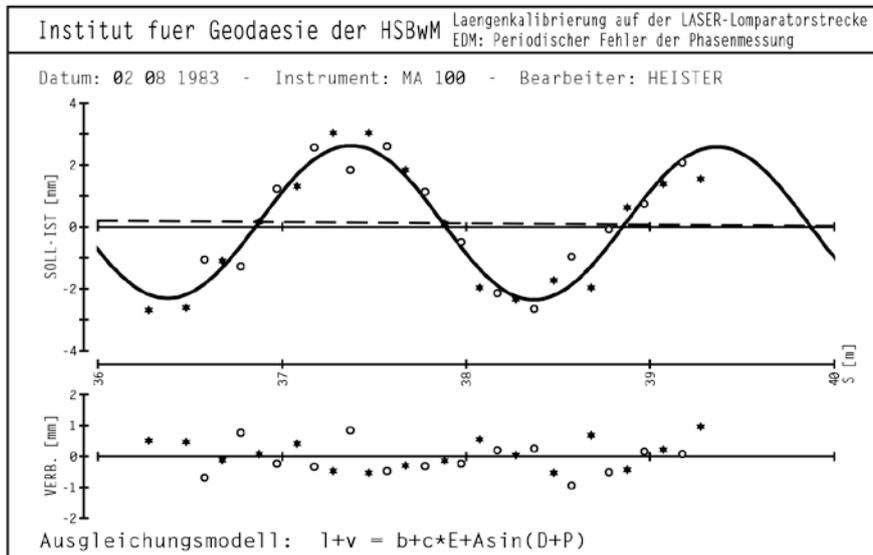
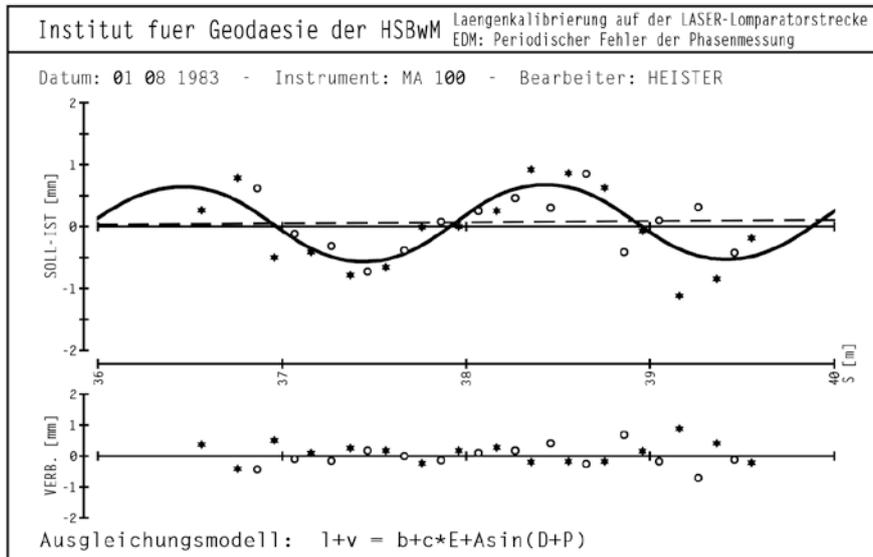
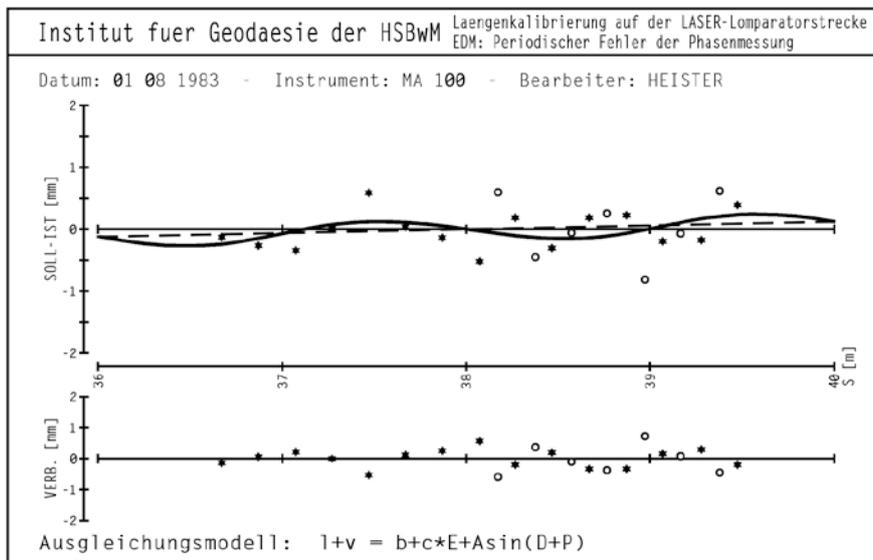


Abb. 3 Zyklischer Fehler beim MA 100

Beim MA 100 hingegen nimmt die Amplitude bei nahezu konstanter Phase mit wachsender Entfernung zu (siehe Abbildung 3).

Die Messungen auf der Prüfstrecke wurden, wie bereits erwähnt, in allen Kombinationen durchgeführt. Diese Meßanordnung hat den Vorteil der Gleichverteilung der Beobachtungen über den Meßbereich von 540 m. Die Streckenverteilung über den jeweiligen Feinmaßstab der beiden Geräte ist der Abbildung 4 zu entnehmen.

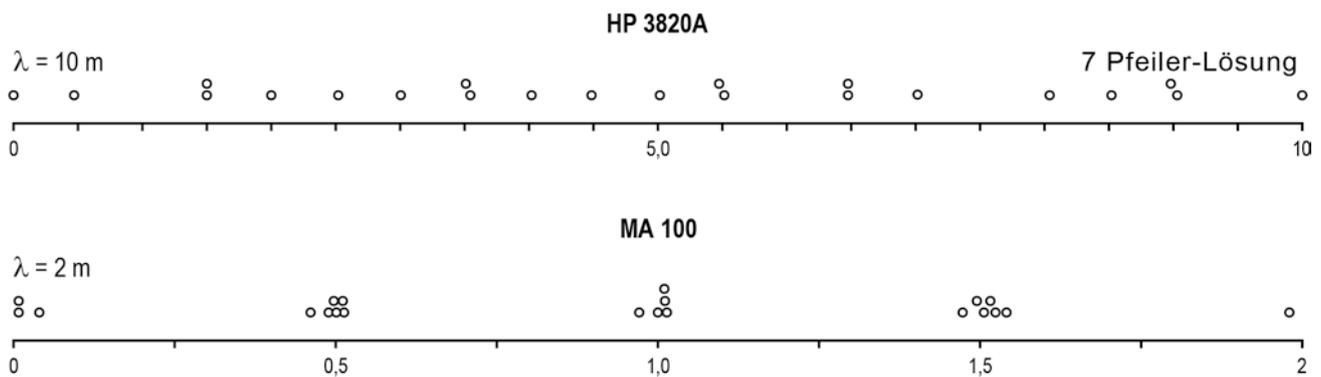


Abb. 4 Verteilung der Strecken über den Feinmaßstab

Ist die Verteilung für die Totalstation HP 3820A noch recht homogen, so ist beim MA 100, jeweils um $\pi/2$ versetzt, eine gleichmäßige Anhäufung abzulesen. Wenn man die Phase des zyklischen Fehlers des untersuchten Gerätes hierzu vergleicht (siehe Abbildung 3), so stellt man fest, daß in diesem Fall die Nullstellen und Extremwerte mit diesen Anhäufungen zusammenfallen, was sich für die Bestimmung von d_c aus Feldmessungen nur positiv auswirken kann.

Ursprünglich war beabsichtigt, die Messungsergebnisse der Kalibrierungen nach allen möglichen Modellen gemäß Abbildung 2 auszuwerten. Da jedoch die Soll-Strecken der Prüfstrecke bisher (siehe *CASPARY* 1984) nicht mit entsprechender Genauigkeit bestimmt werden konnten, verbleiben nur die drei Modelle, in denen diese Strecken auch als Unbekannte eingeführt werden. In den Tabellen 1 und 2 sind die Ausgleichungsergebnisse für beide Geräte zusammengestellt.

Tabelle 1 zeigt in den Ergebnissen aller drei Modelle zur Additionskonstantenbestimmung keine signifikanten Unterschiede. Obwohl der zyklische Fehler im Labor hochsignifikant bestimmt werden konnte, bringt die vorherige Be-

AUSGLEICHUNG NACH	MODELL 6	MODELL 5	MODELL 4	MODELL 5
<u>ADD. KONST.</u>				
C MM	4,87 ± 0,49	4,80 ± 0,53	4,72 ± 0,55	4,39 ± 0,50
<u>ZYKL. FEHLER</u>				
A MM	-	-	0,90 ± 0,1	-
LABOR P M	-	-	2,9 ± 0,1	-
S ₀ MM	-	-	± 0,4	-
A MM	-	0,27 ± 0,4		
FELD P M	-	2,5 ± 2,3		
S ₀ MM	± 1,10	± 1,16	± 1,22	± 1,24
<u>STRECKEN</u>	M MM			
1 - 2	26,5086 ± 0,6	,5087 ± 0,7	,5090 ± 0,7	,5089 ± 0,7
1 - 3	161,5151 ± 0,6	,5151 ± 0,7	,5152 ± 0,7	,5154 ± 0,7
1 - 4	243,0100 ± 0,7	,0100 ± 0,8	,0103 ± 0,8	,0105 ± 0,8
1 - 5	431,9776 ± 0,8	,9777 ± 0,9	,9781 ± 0,9	,9783 ± 0,9
1 - 6	485,5220 ± 0,9	,5220 ± 1,0	,5223 ± 1,0	,5227 ± 1,0
1 - 7	540,0128 ± 1,0	,0129 ± 1,1	,0129 ± 1,1	,0139 ± 1,1
8 - 7	1079, -	-	-	,7019 ± 1,4

Tab. 1 Kalibrierergebnisse für HP 3820A

AUSGLEICHUNG NACH	MODELL 6	MODELL 5	MODELL 4	MODELL 4/5	MODELL 5
<u>ADD. KONST.</u>					
C MM	74,13 ± 0,50	73,87 ± 0,43	74,34 ± 1,20	73,62 ± 0,46	73,87 ± 0,43
<u>ZYKL. FEHLER</u>					
A MM	-	-	2,5 ± 0,1	2,5 ± 0,1	-
LABOR P M	-	-	0,9 ± 0,05	0,9 ± 0,05	-
S ₀ MM	-	-	± 0,5	± 0,5	-
A MM	-	0,8 ± 0,31		2,8 ± 0,32	0,8 ± 0,31
FELD P M	-	0,5 ± 0,1		0,8 ± 0,03	0,5 ± 0,1
S ₀ MM	± 0,95	± 0,80	± 2,26	± 0,84	± 0,80
<u>STRECKEN</u>	M MM				
1 - 2	26,5080 ± 0,6	,5085 ± 0,5	,5074 ± 1,4	,5085 ± 0,6	,5085 ± 0,5
1 - 3	161,5154 ± 0,6	,5148 ± 0,5	,5156 ± 1,4	,5148 ± 0,5	,5148 ± 0,5
1 - 4	243,0090 ± 0,6	,0096 ± 0,6	,0092 ± 1,5	,0098 ± 0,6	,0096 ± 0,6
1 - 5	431,9782 ± 0,7	,9786 ± 0,6	,9784 ± 1,7	,9790 ± 0,7	,9786 ± 0,6
1 - 6	485,5229 ± 0,9	,5236 ± 0,8	,5230 ± 2,2	,5237 ± 0,8	,5236 ± 0,8
1 - 7	540,0133 ± 0,9	,0141 ± 0,8	,0130 ± 2,2	,0145 ± 0,9	,0141 ± 0,8
8 - 7	1079, -	-	-	-	,7037 ± 1,5

Tab. 2 Kalibrierergebnisse für MA 100

rücksichtigung (Modell 4) keine Verbesserung. Dies liegt offensichtlich daran, daß die Amplitude A innerhalb der Standardabweichung (Feldmessung) s_0 liegt. Dies bestätigt auch die Auswertung nach Modell 5. Die für die Festlegung des zyklischen Fehlers eingeführten Parameter werden nicht signifikant geschätzt, obwohl die Phase P einen zu Modell 6 vergleichbaren Wert annimmt. In der letzten Spalte sind die Ergebnisse unter Einbeziehung zusätzlicher Messungen für den achten Pfeiler angegeben.

Tabelle 2 gibt die entsprechenden Resultate für das MA 100 wieder. Hier weichen in den drei Modellen sowohl Genauigkeits- als auch Parameterschätzungen so voneinander ab, daß eine differenzierte Betrachtung angebracht ist.

Bemerkenswert ist zunächst der numerisch hohe Wert für s_0 (Feldmessung) in Modell 4. Vergleicht man hierzu die Werte von Modell 5 und 6, dann kommt man zu dem Schluß, daß der im Labor bestimmte zyklische Fehler, obwohl signifikant bestimmt, für die größeren Entfernungen nicht repräsentativ sein kann; die Strecken werden bei Berücksichtigung von dc verfälscht. Dies beweist einerseits das hohe s_0 , andererseits die Auswertung nach Modell 4/5; hier wurden die um die Laborergebnisse korrigierten Streckenmessungen in das Modell 5 eingeführt. Die aus der Ausgleichung bestimmten Werte für Amplitude und Phase bewirken dabei eine "Rückkorrektur". Additionskonstante c und Streckenunkante x_{ik} sind dann in guter Übereinstimmung mit Modell 5. Vergleicht man hierzu noch die Ergebnisse aus Modell 6, dann erkennt man sowohl an der Additionskonstanten c als auch am erhöhten s_0 sofort, daß die Modellanpassung durch Vernachlässigung der Parameter des zyklischen Fehlers höchsten Genauigkeitsansprüchen nicht genügt. Offensichtlich liefert Modell 5 die plausibelsten Werte, obgleich die Parameter für den zyklischen Fehler nahe ihrer Signifikanzschwelle liegen.

Hier zeigt sich, daß für bestimmte Geräte, bei denen Labormessung und Feldmessung nicht in vollem Umfang vergleichbar sind - beim MA 100 wurde im Labor zur Minderung des Empfangssignals eine Sektorenblende verwendet -, verschiedene Auswertemethoden eine unabhängige Kontrolle sind und Kalibrierfehler aufdecken können. Die letzte Spalte zeigt wiederum die Ergebnisse unter Einbeziehung der Messungen zum Pfeiler 8.

Vergleicht man die Ergebnisse der Teilstrecken s_{ik} der beiden Geräte, so stellt man eine nahezu linear anwachsende Differenz von ca. 2 ppm fest.

Hinzu kommt noch eine Differenz in der Maßstabsverbesserung von 1,4 ppm; dies führt insgesamt zu einer Abweichung von 3,4 ppm.

Diese Differenz kann sowohl auf eine entfernungsabhängige Additionskonstante oder aber auf eine Frequenzmessung zurückgeführt werden, die nicht den Feldmeßbedingungen entspricht. Die Temperatur- und Luftdruckmessung kann als Ursache ausgeschlossen werden, da für beide Geräte das gleiche Instrumentarium benutzt wurde. Die Ursache dieses Fehlers läßt sich mit Sicherheit nur aufdecken, wenn man einen Vergleich zu Sollstrecken durchführen kann (Modelle 1 - 3).

4. SCHLUSSBETRACHTUNG

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß durch sorgfältige Kalibrierung die vom Hersteller angegebene Genauigkeit gesteigert werden kann. Dabei sind sowohl Feld- als auch Labormethoden anzuwenden. Je nach Gerätetyp und Erfahrung sind unterschiedliche Ausgleichungsmodelle anzuwenden. Um eine hohe Zuverlässigkeit des Ergebnisses sicherzustellen, sollten unabhängige Wege beschritten werden, die zu vergleichbaren Ergebnissen führen müssen. Dazu ist eine nach *SCHWENDENER* (1971) aufgeteilte Prüfstrecke eine wesentliche Voraussetzung; einer Kenntnis der "Soll-Strecken" kommt dabei besondere Bedeutung zu, da nur hier eine eindeutige Aussage über das Maßstabsverhalten des gesamten Instrumentariums gemacht werden kann. Außerdem können dann auch Analysen über entfernungsabhängige Fehler gemacht werden.

LITERATUR

CASPARY, W.: *Die Genauigkeit der Mekometermessungen auf der Prüfstrecke Neubiberg*. Schriftenreihe des Wissenschaftlichen Studiengangs Vermessungswesen der Hochschule der Bundeswehr München, in diesem Heft, 1984

RÜEGER, J.M.: *Probleme bei der gemeinsamen Bestimmung von zyklischen Fehlern und Additionskonstante bei elektrooptischen Distanzmessern*. Allgemeine Vermessungs-Nachrichten, 1976, S. 338-344

RÜEGER, J.M.: *Design and Use of Base Lines for the Calibration of EDM-Instruments*. 20th Australian Survey Congress, Darwin, 1977, S. 175-189

RUOPP, M.: *Zur Bestimmung der Additionskonstante elektronischer Entfernungsmesser aus Streckenmessungen in allen Kombinationen*. Allgemeine Vermessungs-Nachrichten, 1981, S. 132-139

- SCHLICHTING, R.: *Vereinfachung der Additionswertbestimmung eines EDM durch Ausgleichung von Streckenmessungen in allen Kombinationen.* Allgemeine Vermessungs-Nachrichten, 1981, S. 139-144
- SCHWARZ, W.: *Die Additionskonstante bei elektrooptischen Distanzmessern.* Allgemeine Vermessungs-Nachrichten, 1983, S. 54-63
- SCHWENDENER, H.R.: *Elektronische Distanzmesser für kurze Strecken, Genauigkeitsfragen und Prüfverfahren.* Vermessung, Photogrammetrie und Kulturtechnik, 1971, S. 59-67
- SOBOTTA; Chr., SCHWARZ, W., WITTE, B.: *Frequenzprüfung elektrooptischer Entfernungsmesser mit Photodioden.* Allgemeine Vermessungs-Nachrichten, 1980, S. 257-265

Erreichbare Genauigkeit mit speziell ausge-
wählten elektrooptischen Distanzmessern
- gezeigt am Beispiel des Autoranger-A -

von
Bertold Witte
und Wilfried Schwarz
Geodätisches Institut
RWTH Aachen
D-5100 Aachen, Templergraben 55
Bundesrepublik Deutschland

ZUSAMMENFASSUNG

Mit Hilfe von umfangreichen Feld- und Laborkalibrierungen wird untersucht, welche Genauigkeit sich mit dem Autoranger-A erzielen läßt. Es wird nachgewiesen, daß unter gewissen Bedingungen eine Genauigkeit von < 1 mm für Distanzen bis ca. 800 m erreichbar ist. Außerdem werden die mit diesem Instrument auf der Prüfstrecke der Hochschule der Bundeswehr München gewonnenen Ergebnisse mitgeteilt.

ABSTRACT

Using a large number of baseline and laboratory measurements the attainable accuracy of the Autoranger-A is tested. An accuracy of about 1 mm over a distance of up to 800 m can be obtained if all corrections are properly applied and no range dependence of the cyclic error is proved.

1. EINLEITUNG

Bei diesem Seminar, das die elektrooptische Präzisionsstreckenmessung zum Thema hat, soll neben den Präzisionsdistanzmessern, wie z.B. dem Geomensor, dem Mekometer oder dem Terrameter, auch über Instrumente berichtet werden, die aufgrund eingehender Kalibrierungen eine Genauigkeit von etwa 1 mm erwarten lassen. Die üblichen Nahbereichsentfernungsmesser können trotz hoch entwickelter Kalibriertechniken solch eine Genauigkeitsforderung in der Regel nicht erfüllen. Von einzelnen Herstellern werden aber Instrumente angeboten, die über besonders ausgesuchte Bauelemente verfügen und dadurch eine höhere Meßgenauigkeit erreichen.

2. AUFLÖSUNGSVERMÖGEN DES PHASENMESSSYSTEMS

Will man überprüfen, welche Genauigkeit sich mit einem elektrooptischen Distanzmesser überhaupt erreichen läßt, sollte man zuerst die "innere" Genauigkeit des Instruments bestimmen. Die innere Meßgenauigkeit wird in erster Linie durch das Auflösungsvermögen des Phasenmeßsystems festgelegt. Zu seiner Bestimmung werden am Geodätischen Institut der RWTH Aachen Messungen zu einem auf einem Schlitten montierten Reflektor durchgeführt. Der Schlitten wird dabei in 0,2 mm Intervallen, die mit einem Laser-Interferometer gemessen werden, über einen Bereich von 16 mm verschoben. Die im folgenden dargestellten Ergebnisse beziehen sich alle auf den Autoranger-A Nr. 06L6104 der Firma Keuffel & Esser.

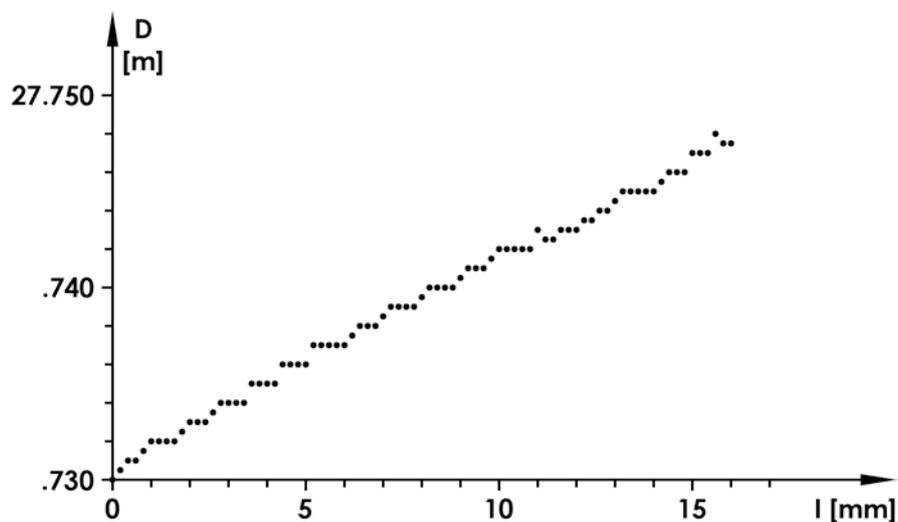


Abb. 1 Auflösungsvermögen des Autoranger-A

Abbildung 1 zeigt deutlich die Millimetersprungstellen über dem Verschiebebereich. Hieraus leitet sich ein Auflösungsvermögen von < 1 mm ab. In einem weiteren Versuch werden bei sonst gleichem Aufbau jeweils 100 Messungen zu den einzelnen Schlittenpositionen ausgeführt, deren Standardabweichung in Abbildung 2 graphisch dargestellt ist. Deutlich erkennt man, daß sich die so ermittelte Standardabweichung mit einer Periode von 1 mm verändert und einen Maximalwert von 0,5 mm aufweist.

Aufgrund dieser Ergebnisse wäre folgendes Meßverfahren zur Genauigkeitssteigerung denkbar: Das Instrument bzw. der Reflektor wird solange verschoben bis die Standardabweichung einen Extremwert (z.B. Minimum) annimmt. Die Genauigkeit des so ermittelten Meßwertes ist dann größer als die Anzeigegenauigkeit des Distanzmessers selbst.

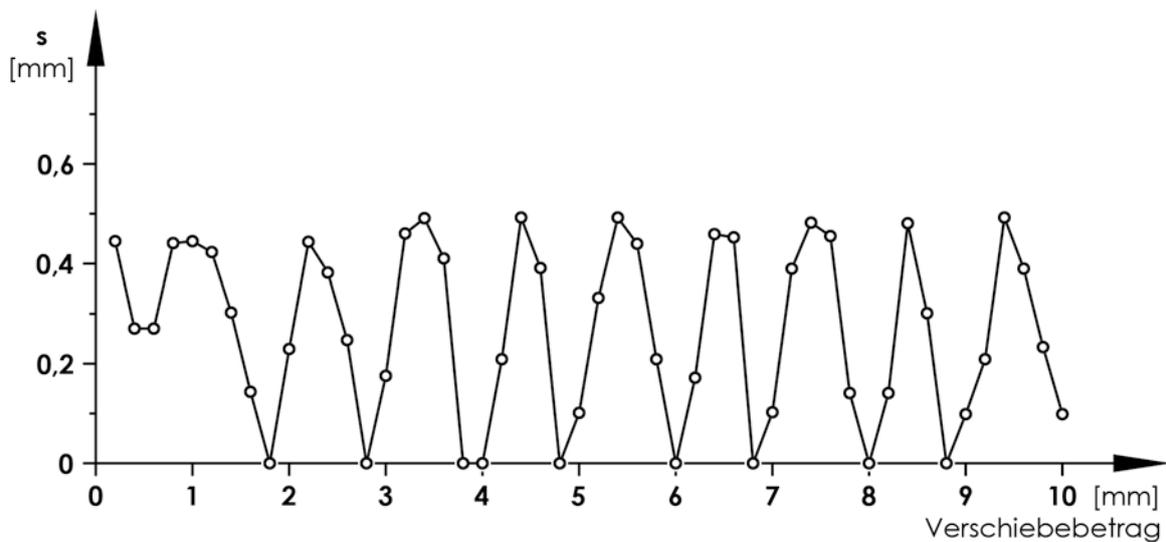


Abb. 2 Standardabweichung einer Einzelmessung für die Bestimmung des Auflösungsvermögens des Autoranger-A

Auch diese Abbildung zeigt wiederum sehr deutlich, daß das Auflösungsvermögen des Phasenmeßsystems unter 1 mm liegt.

3. KALIBRIERUNG

Für praktische Vermessungen ist im Gegensatz zur inneren die äußere Meßgenauigkeit die entscheidende Größe. Sie soll ein Maß dafür sein, wie gut der Meßwert des Distanzmessers dem wahren Wert der auszumessenden Strecke entspricht. Um die äußere Genauigkeit an die innere heranzuführen, müssen systematische Fehlereinflüsse durch eine Kalibrierung so weit wie möglich erfaßt werden, um damit die Meßwerte des Distanzmessers zu korrigieren. Im Rahmen einer Kalibrierung sind für Präzisionsdistanzmessungen die Maßstabskorrektur, die zyklische Fehlerkorrektur und die Additionskonstante zu ermitteln.

Die Maßstabskorrektur wird zweckmäßigerweise direkt im Felde mit Hilfe einer in den Sendestrahrl gestellten Photodiodenschaltung (Sobotta u.a. 1980) bestimmt. Läßt sich eine derartige Meßanordnung bei praktischen Vermessungen nicht realisieren, so muß die Maßstabskorrektur im Labor ermittelt werden. Dann ist aber noch zusätzlich die Abhängigkeit der Oszillatorfrequenz von der Umgebungstemperatur mit Hilfe eines Klimaschranks zu erfassen. Abbildung 3 zeigt diese Abhängigkeit für den Autoranger-A. Die Bestimmung der Maßstabskorrektur stellt bei entsprechender Ausrüstung kein Problem dar, weil Genauigkeiten von $< 1 \cdot 10^{-6}$ leicht erreicht werden können.

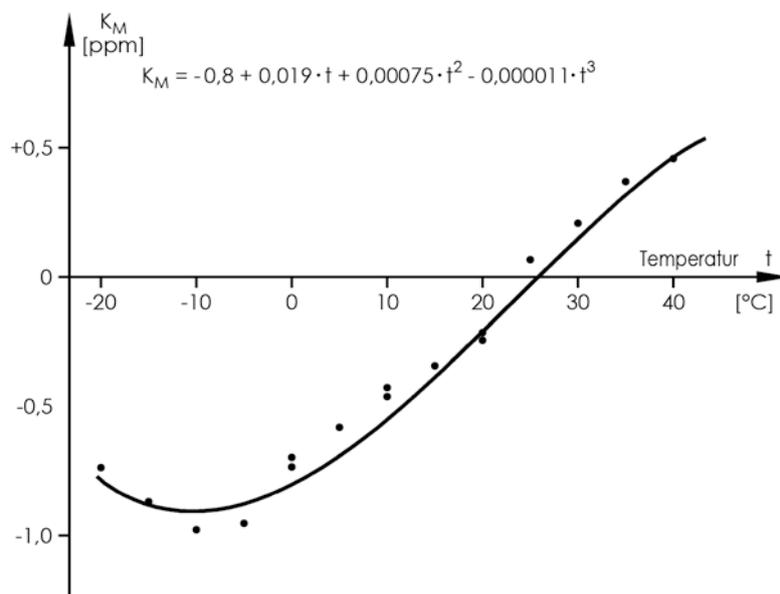


Abb. 3 Maßstabskorrektur in Abhängigkeit von der Außentemperatur bei einer Einschaltzeit von 10 Minuten

Es ist jedoch meßtechnisch schwieriger, den zyklischen Fehler und die Additionskorrektur zu ermitteln, weil diese Korrekturen aus den Meßwerten des Distanzmessers abgeleitet werden müssen. Zunächst wird man versuchen, aus Labormessungen den zyklischen Fehler zu bestimmen. Am Geodätischen Institut der RWTH Aachen wird dazu eine 25 m lange Meßbahn benutzt, auf der ein Schlitten mit einem Reflektor verschoben werden kann, zu dem mit dem zu kalibrierenden Instrument gemessen wird. Der Verschiebungsbetrag wird mit übergeordneter Genauigkeit (wahre Werte) mit Hilfe eines Laser-Interferometers ermittelt. In *Schwarz (1981)* ist der Aufbau dieses Meßsystems und die Auswertemethodik eingehend beschrieben.

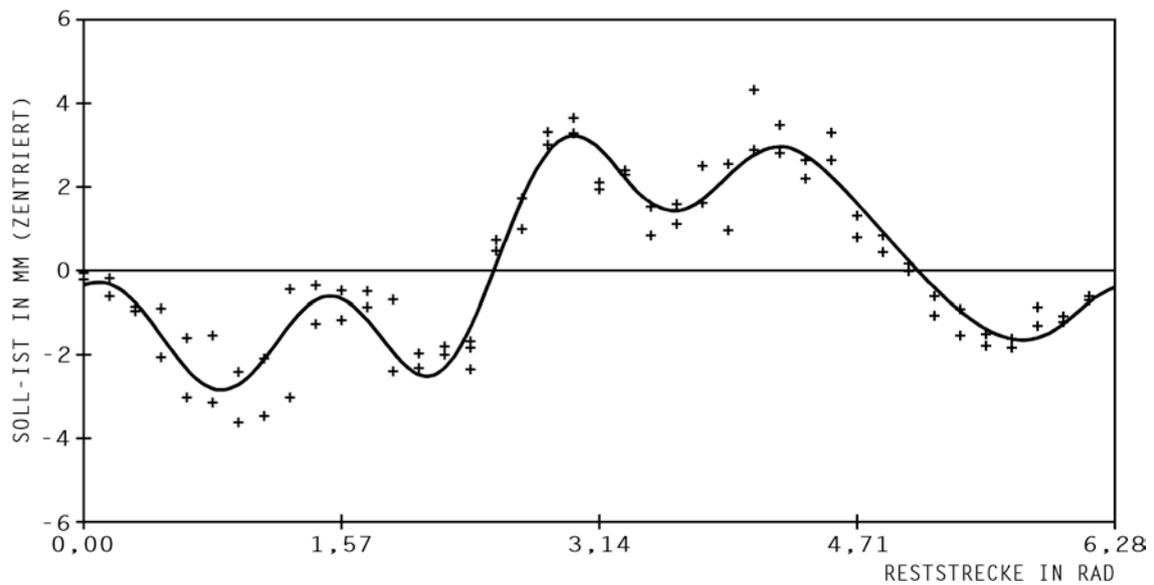


Abb. 4 Zyklische Fehlerfunktion aus Labormessungen

Aus Abbildung 4 läßt sich entnehmen, daß die zyklische Fehlerkorrektur bei diesem Instrument bis zu ± 3 mm betragen kann. Wie gut die Meßpunkte durch die ausgleichende Funktion approximiert werden, zeigt die Standardabweichung der Gewichtseinheit von 0,6 mm.

Um festzustellen, wie weit diese Korrektur auf den gesamten Meßbereich übertragbar ist, wird der zyklische Fehler mit Hilfe einer transportablen Meßbahn auch im Felde ermittelt. Wesentlicher Bestandteil dieser Meßbahn sind kohlefaserverstärkte Kunststoffstäbe, die in genau ausgemessenen Abständen eine Bohrung zur Aufnahme der Zwangszentrierung des Reflektors besitzen. Kohlefaserverstärkter Kunststoff besitzt einen Ausdehnungskoeffizienten, der unter dem von Invar liegt. Abbildung 5 zeigt die Meßwerte des zyklische Fehlerverlaufs für verschiedene Entfernungsbereiche. Die einzelnen Meßreihen zeigen untereinander keine systematischen Abweichungen, so daß bei diesem Instrument der zyklische Fehler als entfernungsunabhängig angesehen werden kann. Die ausgleichende Funktion aller Meßwerte gibt somit die zyklische Fehlerkorrektur für den geprüften Meßbereich an. Die Standardabweichung der Gewichtseinheit beträgt 0,7 mm, während die Standardabweichungen der Fourierkoeffizienten zu 0,07 mm berechnet werden.

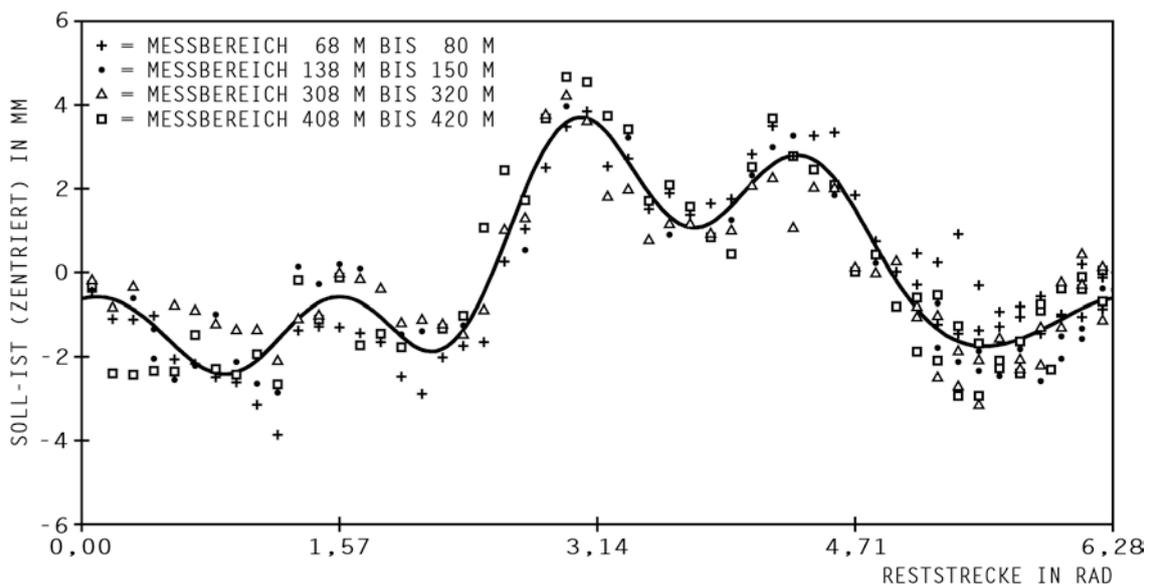


Abb. 5 Zyklische Fehlerfunktion, abgeleitet aus Feldmessungen in unterschiedlichen Entfernungsbereichen

Wie der Vergleich zwischen der Labor- und der Feldbestimmung des zyklischen Fehlers zeigt, unterscheiden sich beide ausgleichende Funktionen nicht signifikant voneinander, weshalb die labormäßige Bestimmung der zyklischen Fehlerkorrektur bei diesem Instrument ausreicht. Wegen der Größe des zyklischen Fehlers muß zur Steigerung der äußeren Genauigkeit diese Korrektur unbedingt berücksichtigt werden.

Neben den beiden bisher betrachteten Korrekturgrößen muß auch die Additionskorrektur präzise bestimmt werden. Am Geodätischen Institut der RWTH Aachen wird hierzu eine aus 9 Betonpfeilern bestehende Vergleichsstrecke benutzt, die mit verschiedenen Mekometern ausgemessen wurde, um die Meßwerte der zu kalibrierenden Instrumente mit den Mekometerstrecken, die als quasi wahre Werte angesehen werden, vergleichen zu können.

In Abbildung 6 sind die Abweichungen zwischen den in allen Kombinationen gemessenen Distanzen und den Mekometermeßwerten dargestellt. Als ausgleichende Funktion ergibt sich eine Konstante mit einem Wert von $-31,1$ mm und einer Standardabweichung von $0,2$ mm. Die Standardabweichung der Gewichtseinheit beträgt $0,6$ mm.

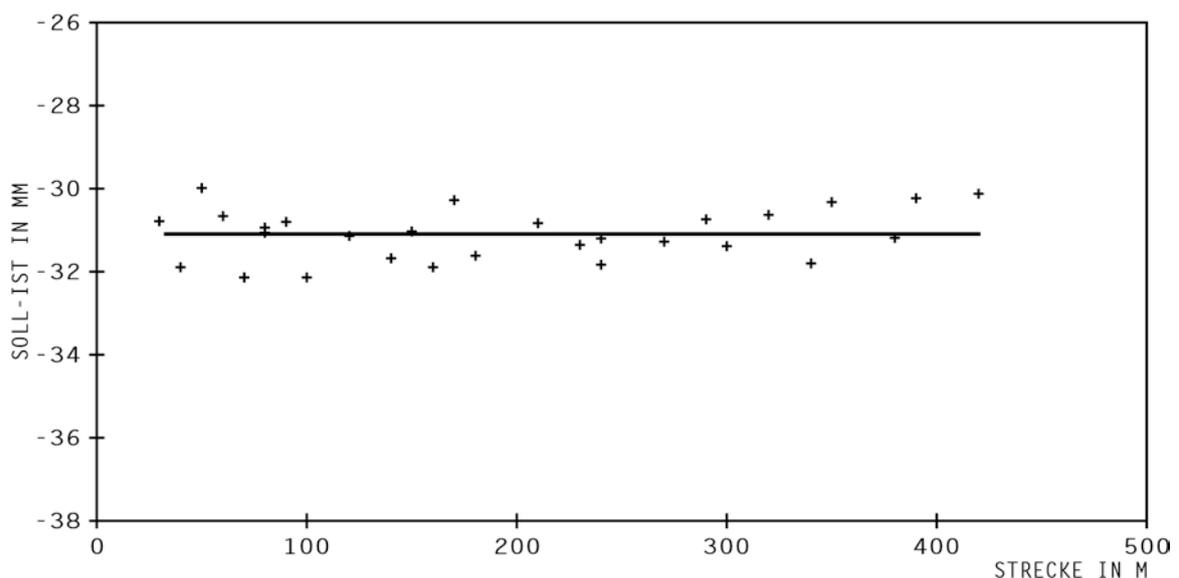


Abb. 6 Additionskorrektur

4. GEGENÜBERSTELLUNG VON MEKOMETER- UND AUTORANGER-A - MESSUNGEN

Um die Leistungsfähigkeit des Autoranger-A zu testen, werden drei Meßreihen zwangsfrei ausgeglichen (siehe Tabelle 1). Neben den Pfeilerabständen wird jeweils eine Additionskonstante im funktionalen Modell berücksichtigt. Diese Ergebnisse weichen im Mittel zweier Mekometermeßreihen um höchstens 0,5 mm ab. Allerdings muß hierbei berücksichtigt werden, daß die Pfeilerabstände ganzzahlige Vielfache des Autoranger-Feinmaßstabes sind und somit die Ungenauigkeiten der zyklischen Fehlerbestimmung nicht zum Tragen kommen.

Vergleich zwischen Mekometer und Autoranger-A

Entf.	M e k o m e t e r			A u t o r a n g e r - A				Differ. der Sp. 4 und 8
	13.6.79	13.5.81	Mittel	3.11.80	17.11.80	12.3.81	Mittel	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1-2	39,9584	39,9595	39,9590	39,9584	39,9599	39,9589	39,9591	- 0,0001
2-3	60,0363	60,0357	60,0360	60,0369	60,0360	60,0365	60,0365	- 0,0005
3-4	80,0176	80,0175	80,0176	80,0179	80,0168	80,0172	80,0173	+ 0,0003
4-5	90,0053	90,0053	90,0053	90,0053	90,0056	90,0057	90,0055	- 0,0002
5-6	69,9922	69,9925	69,9924	69,9930	69,9926	69,9926	69,9927	- 0,0003
6-7	49,9987	49,9977	49,9982	49,9981	49,9983	49,9987	49,9984	- 0,0002
7-8	30,0001	30,0006	30,0004	30,0004	30,0008	30,0007	30,0006	- 0,0002
8-9	350,0133	350,0123	350,0128	350,0122	350,0125	---	350,0124	+ 0,0004



Tabelle 1

5. ZYKLISCHE FEHLERBESTIMMUNG MIT HILFE DES SCHWENDENER-VERFAHRENS

Desweiteren soll der zyklische Fehler auch aus Messungen auf einer nach Schwendener geteilten Prüfstrecke abgeleitet werden. Diese Strecke besteht aus 8 Punkten und hat eine Länge von 640 m. Für die Auswertung wird neben den Pfeilerabständen und der Additionskonstanten im funktionalen Modell zusätzlich die zyklische Fehlerkorrektur als Fourierreihenansatz aufgenommen. Da für diese Strecke keine quasi wahren Werte vorliegen, läßt sich eine Gegenüberstellung wie in der Tabelle 1 nicht vornehmen. Jedoch kann der zyklische Fehler mit den bereits erwähnten Kurven verglichen werden.

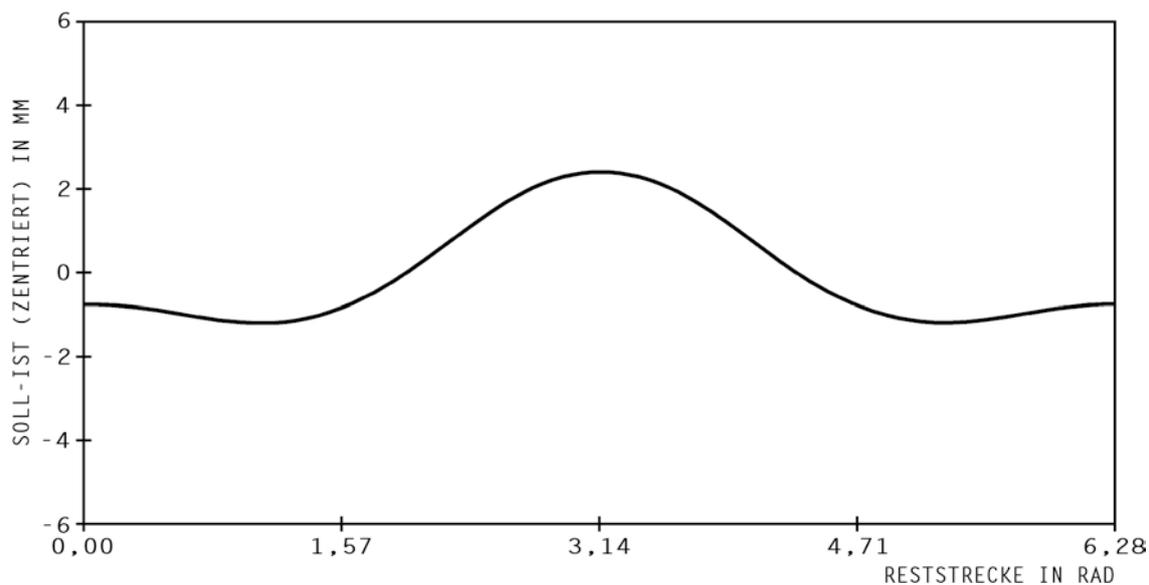


Abb. 7 Zyklische Fehlerfunktion, bestimmt aus Messungen auf einer Schwendener Prüfstrecke

Aus der Abbildung 7 in Verbindung mit der Abbildung 5 erkennt man, daß bei diesem Instrument mit dem Schwendener-Verfahren der zyklische Fehler nur in erster Näherung ermittelt wird, weil die Anzahl der innerhalb des Feinmaßstabs zur Verfügung stehenden Meßwerte gegenüber den zuvor beschriebenen Verfahren zu gering ist.

6. SCHLUSSBEMERKUNG

Die hier für den Autoranger-A nachgewiesene Genauigkeit läßt sich auch mit ausgesuchten Instrumenten anderer Hersteller bei sorgfältiger Kalibrierung erreichen, wie die u.a. am Aachener Institut gesammelten Erfahrungen gezeigt haben. Jedoch sollten für die notwendigen Kalibrierungsmessungen immer Sollstrecken zur Verfügung stehen, um eine entfernungsabhängige Additionskorrektur (*Schwarz 1983*) zu erkennen.

Abschließend sollen die auf der Prüfstrecke der Hochschule der Bundeswehr München mit diesem Instrument erzielten Ergebnisse mitgeteilt werden.

Punkt	Horizontalstrecke in m
Pfeiler 8	-539,6912
Pfeiler 1	0,0000
Pfeiler 2	26,5080
Pfeiler 3	161,5149
Pfeiler 4	243,0105
Pfeiler 5	431,9798
Pfeiler 6	485,5255
Pfeiler 7	540,0157

Tabelle 2 Ergebnisse der Messungen mit dem Autoranger-A auf der Prüfstrecke der Hochschule der Bundeswehr München

Bei der Wertung dieser Meßergebnisse muß man jedoch berücksichtigen, daß während der Messungen ein Defekt am Autoranger-A auftrat und außerdem die Entfernungsunabhängigkeit des zyklischen Fehlers nicht mehr gewährleistet war, wie nachträgliche Messungen in Aachen gezeigt haben. Trotzdem zeigt der Vergleich mit den gemittelten und gewichteten Meßergebnissen der verschiedenen Mekometermessungen (*Caspary 1983*) eine gute Übereinstimmung. Die Abweichungen liegen mit einer Ausnahme unter 1 mm.

LITERATUR

- CASPARY, W.: *Die Genauigkeit der Mekometermessungen auf der Prüfstrecke der HSBwM*. Proceedings des Seminars "Elektrooptische Präzisionsstreckenmessung". Schriftenreihe des wissenschaftlichen Studiengangs Vermessungswesen der Hochschule der Bundeswehr München, in diesem Heft (1984).
- SCHWARZ, W.: *Kalibrierung elektrooptischer Distanzmesser*. Vermessungswesen und Raumordnung 43 (1981) 2, 65-95.
- SCHWARZ, W.: *Die Additionskorrektur bei elektrooptischen Distanzmessern*. Allgemeine Vermessungs-Nachrichten 90 (1983) 2, 54-63.
- SOBOTTA, CHR.; SCHWARZ, W.; WITTE, B.: *Frequenzprüfung elektrooptischer Entfernungsmesser mit Photodioden*. Allgemeine Vermessungs-Nachrichten 87 (1980) 6, 257-265.

OFZ 1 - ein externer Zähler zur Kontrolle der
Modulationsfrequenzen elektrooptischer Entfernungsmesser

von

Christoph Gruber
Fachhochschule München
Karlstraße 6
8000 München 2

und

Leonhard Wittl
Ingenieurbüro
Hauptstraße 18a
8121 Haunshofen

ZUSAMMENFASSUNG

Ein neues Verfahren zur Kontrolle der Modulationsfrequenzen elektrooptischer Entfernungsmesser wird vorgestellt und über Erfahrungen bei Messungen auf der Prüfstrecke HSBw berichtet.

A new method of the controlling of modulating frequencies of electro-optical rangefinders is presented and a report will be given about experiences with measurements on the testrange of the HSBw München.

1. EINLEITUNG

Unter den verschiedenen instrumentenbedingten Einflüssen, durch die Messungen mit elektrooptischen Entfernungsmessern verfälscht sein können, zählt eine Abweichung der Modulationsfrequenz vom Sollwert zu den gefährlichsten Ursachen bei längeren Strecken. Im folgenden wird, ausgehend von den bisherigen Verfahren der Frequenzkontrolle, eine neue Möglichkeit zur Kalibrierung der Modulationsfrequenz vorgestellt und über Erfahrungen beim Einsatz auf der Prüfstrecke der Hochschule der Bundeswehr berichtet.

2. ZUR BEDEUTUNG DER FREQUENZKONTROLLE

Bekanntlich hat ein relativer Fehler der Modulationsfrequenz einen gleich großen relativen Fehler der Meßstrecke zur Folge.

$$\frac{dD}{D} = - \frac{df}{f}$$

Die Kenntnis der Modulationsfrequenz ist deshalb sehr entscheidend, wenn lange Strecken mit hoher Genauigkeit gemessen werden sollen.

Das Bemühen, mittels elektrooptischer Entfernungsmesser Strecken einer Länge bis ca. 1000 m mit Genauigkeiten im mm-Bereich zu messen, setzt deshalb die Kontrolle der Modulationsfrequenz mit $df/f < 10^{-6}$ voraus, da bekanntlich andere Komponenten noch zusätzliche Streckenfehler bewirken können.

Abweichungen der Modulationsfrequenz vom Sollwert können verursacht sein durch

- a) die Grenzgenauigkeit, mit der die Quarze ihre Schwingungen konstant halten;
- b) die Betriebstemperatur im Gerät
- c) durch das Altern der Quarze

Zu a): Es ist damit zu rechnen, daß die handelsüblichen Kurzstrecken-

entfernungsmesser von Quarzen gesteuert werden, deren Frequenzen mit einer mittleren Genauigkeit von $\pm 5 \cdot 10^{-6}$ Impulse abgeben. Zufällige Abweichungen können durchaus in größerem Rahmen auftreten, sind aber ohne besondere Bedeutung, da ja gewöhnlich eine Vielzahl von Streckenmessungen gemittelt wird.

14985516 Hz
14985371 Hz
14985477 Hz
14985469 Hz
14985604 Hz
14985720 Hz
14985825 Hz

Abb. 1 Ausschnitt aus einer kontinuierlichen Frequenzprüfung eines DM 502, Registrierung im 5 Sekunden Abstand

Zu b): Um handliche und leichte Geräte zu erhalten, werden die Quarze in den heute üblichen elektrooptischen Distanzmessern nicht thermostatisch geschützt. Mit Frequenzänderungen im Bereich bis zu $1,5 \cdot 10^{-5}$ bei Temperaturen zwischen -25°C + 50°C ist zu rechnen (ZETSCHKE, 1979). Für Präzisionsmessungen im genannten mm-Bereich ist deshalb die Berücksichtigung einer Temperaturgleichung erforderlich.

Zu c): Langzeituntersuchungen (HERZOG, 1978) zeigen, daß Änderungen bis 100 Hz pro Jahr beobachtet wurden. Über längere Zeiträume hinweg kann also nicht mit einer Konstanz der Modulationsfrequenz gerechnet werden.

Präzisionsmessungen, also Messungen mit höherer als vom Hersteller angegebener Genauigkeit lassen sich mit den elektrooptischen Entfernungsmessern auf langen Strecken nur erzielen, wenn über das Frequenzverhalten des betreffenden Gerätes detaillierte Informationen vorliegen.

3. MÖGLICHKEITEN DER FREQUENZPRÜFUNG

3.1 Abgriff über spezielle Ausgangsbuchsen

Zur Frequenzkontrolle benützt man meist elektronische Frequenzzähler. Die zu messende Frequenz, d.h. also die Anzahl der Schwingungen pro Zeiteinheit, gemessen in Hertz (also 1 Schwingung/sec.) gelangt auf ein elektronisch gesteuertes Tor. Die Öffnungs- und Schließzeiten dieses Tores werden

von einer Zeitbasis gesteuert. Die Torzeiten betragen z.B. 1 Sekunde oder Vielfache. Indem die Anzahl der sinusförmigen Schwingungen während der Torzeiten gezählt werden, erhält man die Frequenz. Sehr wenige elektro-optische Geräte besitzen Anschlußbuchsen, mit denen die Modulationsfrequenz ohne größere Umstände abgegriffen und auf einen Zähler geführt werden kann.

3.2 Abgriff über "optische Koppelung"

Es lag deshalb nahe, einen Frequenzzähler zu bauen, der in der Lage ist, die optischen Modulationssignale nach dem Austritt aus der Sendeoptik aufzufangen, über eine Fotodiode in elektronische Impulse umzuwandeln und elektronisch zu zählen.

4. PRINZIP DES OFZ 1

Im Ingenieurbüro Leonhard Wittl, Haunshofen, wird nach einer im Rahmen einer Diplomarbeit an der Fachhochschule München entstandenen Idee ein Frequenzzähler gebaut und vertrieben, der das modulierte Licht einer GaAs-Diode, wie beschrieben, in elektronische Signale transformiert und zählt. Die Genauigkeit eines Frequenzzählers seinerseits hängt wiederum von der Genauigkeit ab, mit der die Öffnungszeiten des elektronischen Tores gesteuert werden.

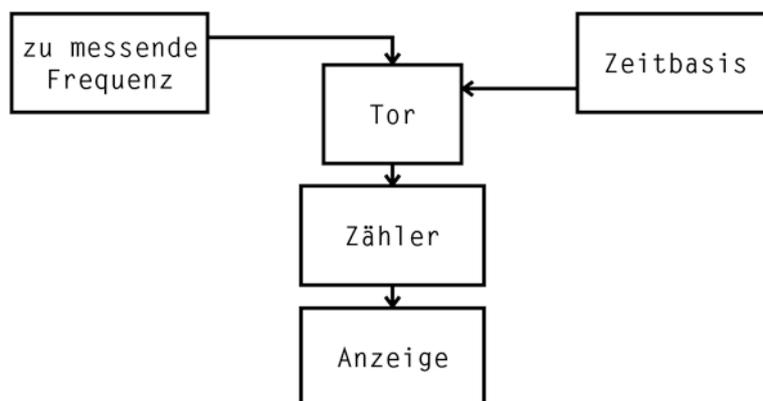


Abb. 2 Grundsätzlicher, stark vereinfachter Aufbau eines Frequenzzählers

In den meisten der üblichen Frequenzzähler muß mit verhältnismäßig großem und kostspieligem Aufwand eine um mindestens 1 Größenordnung genauere Normalfrequenz als geprüft werden soll erzeugt werden. Im OFZ 1 der Firma Wittl wird zur Kalibrierung bzw. Steuerung der Torzeiten der in Mitteleuropa überall empfangbare Langwellensender DCF 77, der in Mainflingen bei Hanau stationiert ist und der eine Frequenz von 77,5 kHz ausstrahlt, verwendet. Dessen Frequenz wird von der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) in Braunschweig kontrolliert. Diese Kontrolle erfolgt im Verbund mit den wichtigsten, mit Zeitnormalen befaßten Instituten der Welt, so daß über den im Zähler eingebauten Langwellenempfänger eine der genauesten Frequenzen überhaupt zur Verfügung steht. Die Genauigkeit der Zeitbasis zur Torsteuerung ist kleiner als 10^{-8} . Das Blockschaltbild, Abb. 3, zeigt den Aufbau des Zählers. Erwähnenswert ist, daß der OFZ 1 netzunabhängig, gespeist von einem aufladbaren Akkumulator, auch im Feld eingesetzt werden kann.

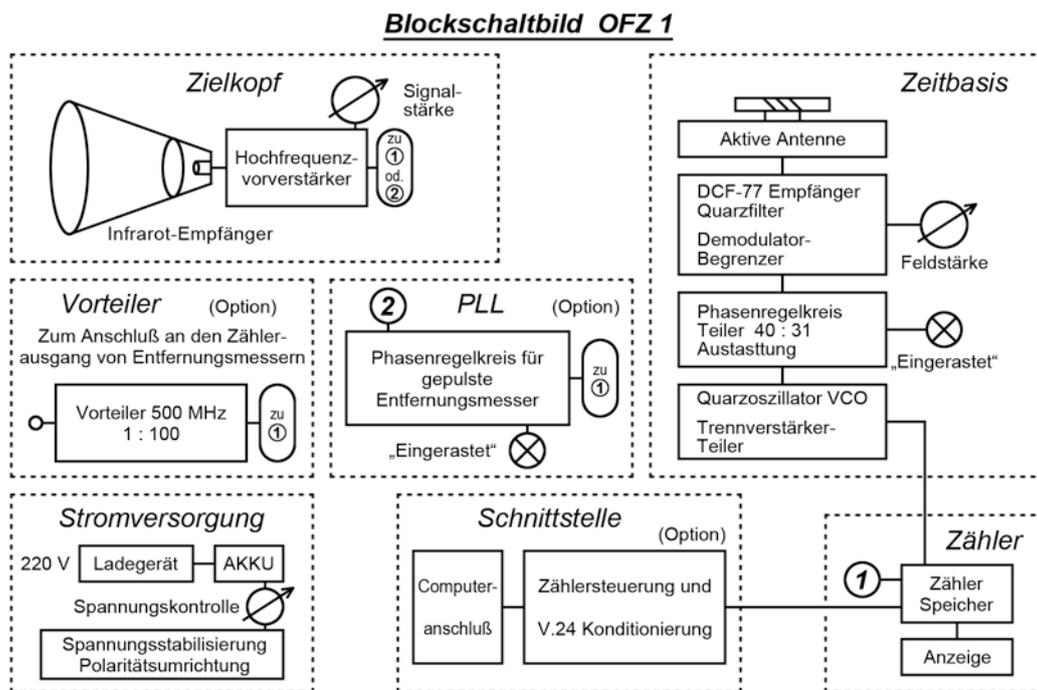


Abb. 3 Blockschaltbild des Frequenzzählers OFZ 1

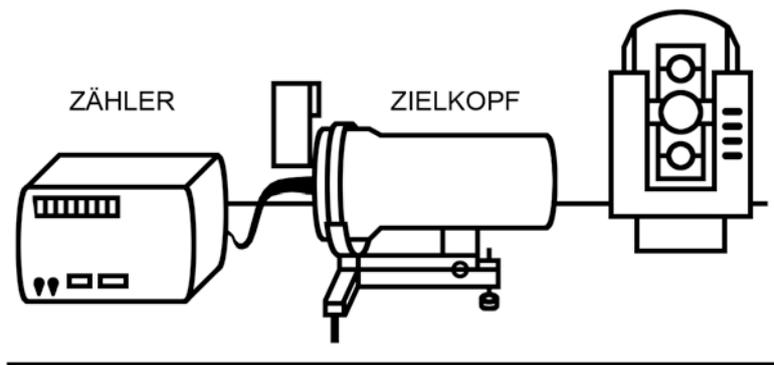


Abb. 4 Tragbarer, netzunabhängiger 8-stelliger Präzisionsfrequenzzähler mit optischer Kopplung von Objektiv zu Objektiv

Anwendung:

Im Feld zur Frequenzmessung bei Präzisionsentfernungsmessungen
 Im Labor zur Frequenzüberprüfung (Kurz- und Langzeitverhalten, Temperaturdrift), Kontrolle der Strahlungsleistung und Erstellung von Richtdiagrammen.

5. MESSUNGEN AUF DER PRÜFSTRECKE MIT FREQUENZKONTROLLE

Untersuchungen mit dem beschriebenen Frequenzzähler hatten ergeben, daß ein verfügbarer Entfernungsmesser DM 502 der Firma Kern sehr stabile und sehr beständige Frequenzen moduliert. Es wurde deshalb der Versuch unternommen, durch Messungen auf der Prüfstrecke der Bundeswehrhochschule zu erproben, inwieweit durch eine die Messungen ständig begleitende Frequenzkontrolle eine Steigerung der üblichen Genauigkeit erreicht werden kann.

Die weiteren Fehlereinflüsse, die üblicherweise die Genauigkeit elektrooptischer Kurzstreckenmesser begrenzen, sind auf der Seite des Instrumentes der zyklische Phasenfehler und Phaseninhomogenitäten, außerhalb des Instruments sind Einflüsse der Meteorologie zu beachten. Die witterungsbedingten Korrekturen wurden aus den sorgfältig ermittelten Temperatur- und Luftdruckdaten berechnet und an den Beobachtungen angebracht.

Eine Untersuchung des zyklischen Phasenfehlers, die in dankenswerter Weise am Institut für Geodäsie der HSBw im dortigen Labor durchgeführt wurde, ergab eine Amplitude von 2,1 mm.

Nach dieser vorbereitenden Kalibrierung wurden die Strecken auf der Neubiberger Prüfstrecke in sämtlichen Kombinationen hin- und zurück gemessen. Vor und nach jeder Streckenmessung wurde die Frequenz kontrolliert. Dies war einfach möglich, da der Zähler OFZ 1 auf ein eigenes Stativ nahe dem Instrumentenstandpunkt gestellt wurde und ohne großen Zeitaufwand angezielt werden konnte. Die Strecken zum Pfeiler 8 wurden nicht gemessen.

Zur Messung der 21 Strecken war ein Zeitaufwand von ca. 6 Stunden erforderlich. Die Außentemperatur stieg von 15,1°C am Vormittag bis 22,2°C gegen Ende der Meßzeit. Das Frequenzverhalten des Quarzes war verhältnismäßig stabil und änderte sich um ca. 1130 Hz. Sämtliche Messungen wurden auf die Sollfrequenz des DM 502, also 14,9854 MHz, und bezüglich der Meteorologie reduziert. Die Ergebnisse der Messungen werden in der nachstehenden Tabelle 1 mitgeteilt, ebenso die Ergebnisse der Ausgleichung in Tabelle 2. Es ergab sich eine Additionskonstante von $-11,1 \text{ mm} \pm 0,3 \text{ mm}$. Als weitere Unbekannte wurden die Strecken vom Pfeiler 1 aus zu den übrigen 6 Punkten eingeführt.

von	nach	reduzierte Strecke m	von	nach	reduzierte Strecke m
1	7	504,0276	3	7	378,5095
1	6	485,5355	3	6	324,0195
1	5	431,9909	3	5	270,4758
1	4	243,0229	3	4	81,5075
1	3	161,5272	4	7	297,0145
1	2	26,5185	4	6	242,5256
2	7	513,5185	4	5	188,9784
2	6	459,0286	5	7	108,0480
2	5	405,4819	5	6	53,5576
2	4	216,5120	6	7	54,5026
2	3	135,0174			

Tab. 1 Auf Sollfrequenz und Normalatmosphäre korrigierte Streckenmessungen

von	nach	ausgeglichene Strecken
1	7	540,0156 m ± 0,4 mm
1	6	485,5250 m ± 0,4 mm
1	5	431,9792 m ± 0,5 mm
1	4	243,0113 m ± 0,8 mm
1	3	161,5157 m ± 0,6 mm
1	2	26,5090 m ± 0,5 mm

Additionskonstante: -0,0111 m ± 0,3 mm

Tab. 2 Ergebnis der Ausgleichung

6. SCHLUSSBEMERKUNG

Das vorgestellte Verfahren der Frequenzkontrolle durch den über optische Zielung angekoppelten Frequenzzähler der beschriebenen Bauart gewährleistet, daß auch längere mit elektrooptischen Streckenmessern gemessene Strecken keinen Maßstabsfehler aufweisen. Im Zusammenhang mit weiteren Kalibrierungsmaßnahmen konnte auf der Prüfstrecke der HSBwM in Neubiberg eine Genauigkeit erreicht werden, die weit besser ist, als die übliche Genauigkeit elektrooptischer Kurzstreckenmesser.

LITERATUR

- HERZOG, H.: *Untersuchung von elektrooptischen Entfernungsmessern ELDI 2*. Zeitschrift für Vermessungswesen 103, 370-383, 1978
- WERMANN, G.: *Überprüfung elektrooptischer Entfernungsmessgeräte für Triangulierungen 3. und 4. Ordnung*. Allgemeine Vermessungsnachrichten 86, 435-445, 1979
- ZETSCHKE, H.: *Elektronische Entfernungsmessung (EDM)*. Wittwer, Stuttgart 1979

AUTOMATISCHE METEOROLOGISCHE
DATENERFASSUNG IN DER BODENNAHMEN
LUFTSCHICHT

von

Reinhard BRUCKMÜLLER

Institut für Landesvermessung u. Ingenieurgeodäsie

Abteilung Landesvermessung

Technische Universität Wien

A-1040 Wien, Gußhausstraße 27-29

Österreich

ZUSAMMENFASSUNG

Die aktuellen Zustandsgrößen der Atmosphäre Druck, Temperatur und Feuchte werden in fünf verschiedenen Niveaus an einem Meßmast gemessen und die berechnete Extrapolation mit einer bis 1000 m über Grund steigenden Fesselsonde überprüft. Die Datenerfassung und -übermittlung erfolgt digital per Funk. Die Meßzyklen von vier und acht Sekunden, verbunden mit den kurzen Ansprechzeiten der Meßwertaufnehmer ermöglichen sowohl die Erfassung kurzperiodischer Schwankungen der Zustandsgrößen als auch softwaremäßig die Berechnung von Mittelwerten und Standardabweichungen für größere Intervalle.

1. EINLEITUNG

In den letzten fünf Jahren wurden am Institut für Landesvermessung der TU Wien unter dem Projektleiter H. SCHMID Geräte zur automatischen Erfassung der atmosphärischen Zustandsgrößen entwickelt.

Die Idee dazu wurde bei der Messung langer Distanzen in einem rezenten Krustenbewegungsnetz in Kärnten geboren. Die Erfassung des aktuellen Brechungsindex der Atmosphäre erfolgte damals durch Mittelung der Endpunktwerte und wurde in topographisch schwierigen, d.h. problematischen Geländeprofilen durch einen 3. Stützwert durch Sondenaufstieg abgesichert. Die Sondenaufstiege hatten nur den Nachteil, daß sie aus Konzeptionsgründen der Sonde (Analogübertragung) nicht die für die Geodäten notwendigen Genauigkeiten in den atmosphärischen Zustandsgrößen erbrachten, vor allem war eine gleichzeitige Erfassung von Temperatur und Dampfdruck in Zuordnung zur Höhe nicht möglich (Tab. 1).

Notwendige Genauigkeiten der meteorologischen Parameter bei einem Streckenfehler von $\leq 1 \cdot 10^{-6}$ (unter vereinfachenden Annahmen).

	Temperatur °C	Luftdruck TORR	Dampfdruck TORR
Elektrooptische Distanzer	± 0,3	± 0,8	± 7
Mikrowelle	± 0,2	± 0,8	± 0,05

Tab. 1

Dies war zusammen mit der Erprobung von Atmosphärenmodellen nach der Turbulenztheorie von MONIN und OBUCHOW die Geburtsstunde für die Eigenentwicklung einer meteorologischen Fesselsonde, sollte doch damit die Gültigkeit der Extrapolation der in Bodennähe gemessenen Parameter überprüft werden.

Im Rahmen eines Forschungsprojekts des Fonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung sollte die Anwendbarkeit dieses Atmosphärenmodells bei den für Österreich typischen topographischen Verhältnissen überprüft werden. Prinzip dabei ist die Erfassung der Energiebilanz durch die Messung verschiedener Größen wie Bodenwärmestrom, Einstrahlung, Rückstrahlung,

Wind, Temperatur und Feuchte, aus denen letztlich die Mächtigkeit der bodennahen (ca. 30 m) und der darüber lagernden labilen Zwischenschicht (ca. 300m) berechnet werden kann.

Die Kontrolle der Gültigkeit des Modells hinsichtlich des Brechungsindex sollte durch direkte Messung desselben mit Hilfe eines Fesselballons und nicht indirekt über die Weglängenänderungen einer Distanz nachgewiesen werden. Diese Konzeption hat den Vorteil, daß auch in Geländeprofilen, die dem Turbulenzmodell widersprechen, z.B. alpines Gelände, unterschiedlicher Bewuchs etc., mit Hilfe der Fesselsonde Stützwerte für den Brechungsindex erhalten werden können.

Es ist klar, daß dieses Verfahren dem einer integralen Erfassung des herrschenden Brechungsindex mit Hilfe der Dispersion unterlegen ist, jedoch wird die Wahrscheinlichkeit für die korrekte Messung gegenüber der Mittelung aus Endpunktwerten wesentlich gesteigert.

Nach der Überprüfung dieses oder eines abgewandelten Atmosphärenmodells in vertikaler Richtung sollte seine Gültigkeit auch in horizontaler Richtung nachgewiesen werden. Dazu wurde ein Meßmast mit Temperatur- und Feuchtefühlern in fünf Niveaus und eine meteorologische Fesselsonde entwickelt.

2. MESSMAST

Der Mast ist ein 38m hoher Alurohrsteckmast militärischer Herkunft, an dem in variablen Höhen (dzt. 38, 19, 10, 5, 2.5 m) an entsprechenden Auslegern Temperatur- und Feuchtefühler angebracht sind. Die entsprechenden Gehäuse sind Eigenentwicklungen und schützen die Aufnehmer in hohem Maße vor Strahlung und Regen.

Die Spezifikationen der Meßfühler zeigt Tabelle 2

Meßwertaufnehmer	Temperatur glasgekapselter NTK 10K Ω	Feuchte Vaisala Fühlerelement
Meßbereich	- 15° bis 35° C	0 - 100 % rel. Feuchte
Ansprechzeit	3 sec	1 - 2 sec
Genauigkeit	$\pm 0,1^\circ$ C	± 1 % rel. Feuchte
Belüftung	Mind. 2,5 m/sec	
Meßzyklus variabel	8, 16, 32, ... 512 sec	
Meßzeit variabel	4, 8, 16, ... 258 sec (max. die Hälfte des Meßzyklus)	

Tab. 2

Direkt neben dem Gehäuse befinden sich die A/D Wandler, so daß von der Steuereinheit, die am Mastfuß steht, entsprechend dem Meßzyklus, nur mehr digitale Zahlenwerte abgefragt werden und entsprechend codiert und datengeschützt zum Sender gelangen.

3. METEOROLOGISCHE FESSELSONDE

Die Fesselsonde kann von einem 15 m³ Helium oder Wasserstoff fassenden Ballon auf eine Höhe bis 1000 m über Grund gebracht werden. Sie besitzt Meßwertaufnehmer für Druck, Temperatur, Feuchte, letztere sind belüftet. Kernstück der technologischen Entwicklung und größtes Problem war die Realisierung der Druckmessung auf $\pm 0,1$ mbar relativ. Angestrebt wurde auf Grund des Temperaturgradienten eine Zuordnung von Temperatur und Feuchte auf ± 1 bis max. ± 5 m Höhe, entsprechend $\pm 0,12$ bis $\pm 0,5$ mbar. Dieses Ziel konnte auch tatsächlich mit einer hochauflösenden kapazitiven Druckdose erreicht werden.

Die nachstehende Tabelle 3 gibt Aufschluß über die technischen Daten der Aufnehmer.

Meßwertaufnehmer:	kapaz. Druckdose	glasgekaps. NTK	Vaisala Fühlerelem.
Meßbereich:	600 - 1020 mbar	- 15° C bis 35° C	0-100% rel. Feuchte
Ansprechzeit:	8 msec	3 sec	1-2 sec
Genauigkeit:	$\pm 0,1$ mbar	$\pm 0,1^\circ$ C	± 1 % rel. Feuchte
Belüftung:	rund 2,5 m/sec		
Meßzyklus	variabel	4, 8, 16, 32, 64, ... 512 sec	
Meßzeit	generell	1 sec	

Tab. 3

Die Sonde ist durch eine Abwurfvorrichtung gegen Verlust bei Seilriß weitgehend gesichert, da vom Boden aus durch ein ganz speziell kreierte Funksignal die Halteschnüre der Sonde durchtrennt werden können und die Sonde dann an einem Fallschirm zu Boden gleitet.

4. MESSELEKTRONIK

Die analogen Meßwerte, das sind Spannungen, Widerstände und beim Vaisalafühler sehr kleine Kapazitäten, werden durch eine eigens entwickelte besonders stromsparende und temperaturunabhängige Elektronik analog-digital gewandelt und liegen als vierstellige Zahlen vor. Die Meßzeit erfolgt für alle Meßwertaufnehmer stets gleichzeitig und unmittelbar vor der Datenübertragung. Die Gleichzeitigkeit ist besonders für die Sonde wichtig, da sonst die Zuordnung der Meßgrößen nicht gewährleistet ist.

Die Gesamtkonzeption Meßwertaufnehmer - Datenübertragung wurde so ausgelegt, daß auch durch kleine Meßzeit und Meßzyklen kurzperiodische Schwankungen der Atmosphäre erfaßbar sind, andererseits besteht beim Meßmast die Möglichkeit, durch Erhöhung der Meßzeit hardwaremäßig eine Integration über ein längeres Zeitintervall herbeizuführen.

5. DATENÜBERTRAGUNG

Die Datenübertragung erfolgt bitseriell doppel parity geschützt und zweifach hintereinander im 30 MHz Band per Funk. Die Maststation besitzt dabei eine Autosynchronisation, durch die, entsprechend dem gewählten Meßzyklus, die Mastdaten unmittelbar an die Ballondaten anschließend gesendet werden. Dadurch ist ein schnellerer Datentransport über das V 24 Interface in den Tischrechner HP 85 gewährleistet, außerdem ist eine Datenkollision von Mastdaten und Ballondaten ausgeschlossen. Im Rechner werden die Daten auf Vollständigkeit und Plausibilität geprüft und auf die eingebaute Magnetbandkassette gespeichert.

6. AUSWERTUNG

Größtes Problem bei der Entwicklung der Meßelektronik war die Erfassung der Temperaturdrift der Elektronik selbst, da die angestrebte Genauigkeit der Meßwerte über den vollen Einsatzbereich von 50° C erhalten bleiben soll. Der Temperatureinfluß wurde letztlich softwaremäßig korrigiert und anschließend erfolgt die Umrechnung der digitalen Zahlenwerte in die physikalischen Einheiten Druck, Temperatur, Feuchte durch Polynome n-ten Grades, deren Koeffizienten nach dem GAUSSschen Minimumsprinzip bestimmt werden. Die hierzu notwendigen Vergleichswerte wurden für den Druck und die Tem-

peratur vom Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen beschafft, für die Feuchtesensoren wurden als Referenz die Werte des gesättigten Dampfes über fünf Salzen (LiCl , MgCl_2 , Na_2Cr_2 , NaCl , K_2SO_4) verwendet.

Die Berechnung der abgeleiteten Größen wie der Sondenhöhe erfolgt mit Hilfe der traditionellen barometrischen Höhenformel von JORDAN.

7. AUSBLICK

Bis jetzt steht leider noch kein repräsentatives Meßdatenmaterial zur Verfügung, jedoch erwarten wir für die nahe Zukunft auf Grund umfangreicher Messungen plausible Aussagen über die Gültigkeit von Atmosphärenmodellen machen zu können. Dafür sollten vornehmlich die kurz- und mittelperiodischen Schwankungen der atmosphärischen Parameter in einem bestimmten Betrachtungsintervall herangezogen werden, die ja ein Maß für die herrschenden Turbulenzen sind. Parallel zu den reinen Modellstudien werden sowohl Dauermessungen mit Elektrooptischen- (AGA 8 und DI 20) und Mikrowellendistanzern (DI 60) als auch Zenitdistanzmessungen durchgeführt.

LITERATUR

MAYR, H.: *Kalibrierung elektronischer Meßwertaufnehmer meteorologischer Parameter*. Diplomarbeit im Druck, TU Wien 1983

JORDAN-EGGERT-KNEISSL: *Handbuch der Vermessungskunde*, Bd. 3, 10. Ausg., S. 491 ff., Stuttgart 1956

LEPUSCHITZ, R.: *Praktische Überprüfung und geodätische Anwendung der Turbulenztheorie in der bodennahen Atmosphäre*. Dissertation, TU Wien 1981

PETERS, K.: *Entfernungsmessung mit Wellen*. Vorlesungsskriptum, Wien 1976/77

PROFOS, P.: *Handbuch der industriellen Meßtechnik*. Essen 1978

SCHMID, H., BRUCKMÜLLER, R., und R. LEPUSCHITZ: *Erfassung der bodennahen Atmosphäre für meteorologische Reduktionen geodätischer Messungen*. ÖHZ, Wien 1983

SCHMID, H. und K. PETERS: *Bericht über vermessungstechnische Untersuchungen zur Frage der Nord- Südalpengrenze im Zusammenhang mit rezenten Krustenbewegungen*. Mitteilungen der österr. geol. Gesellschaft 71/72, 1978/79, S. 307-316, Wien

BRUCKMÜLLER, R.: *Entwicklung einer meteorologischen Fesselsonde mit gesicherter digitaler Datenübertragung zur direkten Bestimmung des für die elektronische Distanzmessung gültigen Brechungsindex*. Dissertation in Vorbereitung, TU Wien 1983

VOM MEKOMETER ZUM GEOMENSOR

von

Hans ZETSCHKE

Geodätisches Institut
Universität Bonn
Nussallee 17
Bundesrepublik Deutschland

1. EINFÜHRUNG

Die Geschichte der elektrooptischen Distanzmessung ist eng mit der Geschichte der Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit verbunden. Als es *KAROLUS* und *HÜTTEL* (1940) gelang, die Lichtgeschwindigkeit auf einer Strecke bekannter Länge mit einem durch eine Kerrzelle modulierten Lichtstrahl zu bestimmen, der am Ende der Strecke zurückreflektiert und in einer Fotozelle demoduliert wurde, griff *BERGSTRAND* (1943) diesen Gedanken auf und verbesserte die Versuchsanordnung insbesondere durch einen im Vergleich mit der Fotozelle wesentlich empfindlicheren Sekundärelektronen-Vervielfacher (SEV). Er benutzte das mit 8 MHz modulierte Licht für die sehr genaue Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit auf schwedischen Basen, ging aber bald dazu über, das Verfahren umzukehren und mit Hilfe der bekannten Lichtgeschwindigkeit die Länge von Dreiecksseiten direkt zu bestimmen, was bis dahin nicht möglich war. Bergstrand wurde damit zum Begründer der angewandten elektrooptischen Distanzmessung. Diese Entfernungsmesser wurden in Zusammenarbeit mit der schwedischen Firma AGA entwickelt und erhielten die Bezeichnung "Geodimeter". Die beiden ersten Typen arbeiteten mit einer Modulationsfrequenz von 10 MHz, was einem Maßstab von etwa 15 Metern entspricht. Da durch den Phasenvergleich zwischen ausgesandtem und reflektiertem Signal nur die Bestimmung der über die letzte volle Maßstabswelle hinausgehenden Reststrecke gelingt, führte man zunächst eine und später mehrere sogenannte Grobfrequenzen ein. Sie lagen aus schwingungstechnischen Gründen sehr nahe bei der für die Erzeugung des Feinmaßstabes benötigten Frequenz; aber die nur wenig kürzeren Grobmaßstäbe koinzidierten bei bestimmten, runden Vielfachen mit dem Feinmaßstab. Sie wurden nacheinander eingeschaltet und ermöglichten die Ermittlung der Vielfachen auf recht umständliche Weise.

Da es seit den denkwürdigen Experimenten von *MICHELSON*, *PEASE* und *PEARSON* (1935) nie wieder möglich wurde, die Vakuumlichtgeschwindigkeit durch eine meilenlange evakuierte Röhre direkt zu bestimmen, ist man seitdem gezwungen, durch die Atmosphäre zu messen und deren Brechungsindex mit Hilfe von Messungen der atmosphärischen Grundgrößen Temperatur, Luftdruck und Dampfdruck zu berechnen, wofür verschiedene Modelle entwickelt wurden. Die Unsicherheit dieser Verfahren beträgt einige Millimeter pro Kilometer und es bestand deshalb auch kein Grund, die Auflösung der Geodimeter wesentlich zu erhöhen, zumal sie für die Messung langer Strecken gedacht waren. Da man die Phasenmessung nur bis zu einer gewissen Genauigkeit steigern kann, ist das einfachste Verfahren zur Verbesserung der Auflösung von Phasen-Entfernungsmessern eine Verkürzung der Länge des Feinmaßstabes. Diesen verkürzte man bei den Geodimetern 4 bis 6 lediglich auf 5 Meter durch Erhöhung der Modulationsfrequenz auf 30 MHz. Damit wurde aber auch eine Grenze erreicht, denn eine weitere Frequenzerhöhung war mit den damals bekannten Mitteln weder mit der Kerrzelle noch mit Kristallmodulatoren möglich.

2. DIE MEKOMETER

In dieser Situation kamen der elektrooptischen Distanzmessung Experimente zur Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit zu Hilfe, die von *ESSEN* (1950) beim National Physical Laboratory (NPL) in Teddington, England, mit Hohlraumresonatoren ausgeführt wurden. In solchen Resonatoren können Mikrowellen zu stehenden Schwingungen angeregt werden. Dabei wurde eine bis dahin unerreicht hohe Frequenzstabilität erzielt. Bei zusammen mit *FROOME* ausgeführten Versuchen zeigte sich, daß ein Kristall aus Kaliumdihydrogen-Phosphat (KDP), der im Hochspannungsende des Hohlraums angeordnet wurde, seine optischen Eigenschaften im Rhythmus der Mikrowellenfrequenz verändert. Ein längs der optischen Achse durch ihn geschickter planpolarisierter Lichtstrahl wird dabei durch den Pockels-Effekt elliptisch polarisationsmoduliert. Der Kristall kann zugleich als Modulator für den ausgesandten und als Demodulator für den zurückkommenden Strahl benutzt werden (*ESSEN* und *FROOME* 1951). Für die Phasenmessung führte man einen variablen Lichtweg ein. Bei entgegengesetzter Phasenlage zwischen ausgesandtem und empfangenem Strahl ist die Restlänge des Lichtweges ein direktes Maß für die Reststrecke. Damit waren alle Probleme der Auflösung bis hinab in den Submillimeterbereich gelöst.

Wesentlich bedeutsamer erschien es aber, daß man die Modulationsfrequenz mit einem Standard-Hohlraum kontrollieren kann, der mit der umgebenden Luft gefüllt ist. Wenn es gelingt, diesen Hohlraum aus einem Material herzustellen, dessen Wärmeausdehnung vernachlässigt werden kann, so paßt sich die Modulationswelle automatisch dem am Gerät herrschenden Brechungsindex der Luft an. Im Gegensatz zu allen anderen elektrooptischen Distanzmessern wird hier nicht mit einer konstanten Frequenz, sondern mit einem konstanten Maßstab gearbeitet, der unabhängig von der in der Atmosphäre sich ausbildenden Lichtgeschwindigkeit ist.

Das von *FROOME* und *BRADSELL* (1961) entwickelte Mekometer I arbeitete bei 9 GHz mit einem Maßstab von 3,3 cm und war für die Eichung von Invardrähten bis zu 50 m Länge gedacht. Das NPL-Mekometer II wurde von *FROOME* und *BRADSELL* (1966) für Aufgaben der Ingenieurvermessung und geologische Verschiebungsuntersuchungen als Prototyp konzipiert. Bei einer Reichweite von 1,5 Meilen sollte es außerdem besonders einfach zu bedienen sein. Die Modulationsfrequenz betrug etwa 500 MHz, was einem Maßstab von 1 Fuß und in der metrischen Variante 30 cm entspricht. Kennzeichen dieses Instruments war der lange Modulationshohlraum mit einem Kristall als Amonium-Dihydrogen-Phosphat (ADP), der koaxial im Hochspannungsende angeordnet war. Ein über einen Motorantrieb verschiebbarer Ring diente zur Abstimmung auf Resonanz wechselweise mit zwei Standard-Hohlräumen. Diese beiden luftgefüllten Viertelwellenresonatoren dienten zur Kompensation des Brechungsindex der Atmosphäre. Da die Längen der Innenleiter als Längen-Normale wirken, wurde die innere Meßstange aus kupferplattiertem Invar und der Mantel aus reinem Kupfer hergestellt. Bei Temperaturänderungen gleichen sich Längenausdehnungen gegenseitig aus. Der den Feinmaßstab kontrollierende Hohlraum hatte die elektrische Länge von 2 Fuß, der andere die Länge von $2 \cdot 20/19$ Fuß. Mit einem mechanischen Zählwerk, das mit dem variablen Lichtweg verbunden war, konnten die Vielfachen in Einheiten von 20 Fuß mit zwei Phasenmessungen bei Resonanz mit den beiden Standard-Hohlräumen aufgelöst werden. Eine entsprechend untersetzte Scheibe zeigte die Fußeinheiten an. Bis etwa 1.500 Fuß arbeitete das Koinzidenz-Prinzip einwandfrei. Für größere Entfernungen ist ein Tauchkolben vorgesehen, dessen Einführung in den Modulations-Hohlraum die Frequenz um 0,2% verstimmt, wodurch man die Vielfachen bis 5.000 Fuß erfassen kann. Wie bei den späteren Mekometern erfolgte die Modulation mit kurzen Impulsen einer Mikrowellen-Triode, während deren Dauer der Licht-

blitz einer Xenonröhre ausgesandt und empfangen wurde. Das diente insbesondere der Verhütung von thermischen Belastungen des Modulationskristalls und verringerte gleichzeitig die benötigte Gesamtenergie. Das NPL-Mekometer II, mit dem auf Basen in England hohe Genauigkeiten erzielt und Ingenieuraufgaben erfolgreich gelöst wurden, blieb jedoch ein verhältnismäßig großes und unhandliches Instrument.

Deshalb bemühte man sich in Zusammenarbeit mit Marconi und Hilger & Watts, London, darum, ein kompakteres und einfacher zu bedienendes Instrument zu konstruieren. Das gelang mit einem theodolitartigen Aufbau, bei dem die Sende- und Empfangsoptik in das kippbare Zielfernrohr verlegt, die sperrigen Resonatoren jedoch - vertikal angeordnet - zusammen mit dem variablen Lichtweg in einem Kasten untergebracht wurden, der zugleich als rechte Fernrohrstütze diente. Blitzlampe, SEV, die erforderlichen Strahlenteiler und Umlenkprismen befanden sich zusammen mit dem optischen Lot im flachen Unterbau, der auch die linke Fernrohrstütze trug. Deren Innenraum enthielt das Vertikalkreissystem. In der metrischen Variante hatte das Instrument einen Feinmaßstab von 50 cm und drei geschickt abgestufte Koinzidenzmaßstäbe ermöglichten die Bestimmung der Vielfachen auf einfache Weise. Obwohl das NPL-Hilger & Watts-Mekometer im Vergleich mit allen anderen den Vorstellungen von einem geodätischen Meßinstrument am besten entsprach, kam es zu keiner Serienproduktion.

Unter konsequenter Beibehaltung des Grundprinzips eines mit Mikrowellen betriebenen Modulationsoszillators, dessen Frequenz durch einen luftgefüllten Standard-Hohlraum kontrolliert wurde, entwickelten *FROOME* und *BRADSELL* ab 1964 das NPL-Mekometer III, das auch die Bezeichnung "The Imperial Mekometer" erhielt, weil es in Imperialen Fuß geeicht war. Ein Kennzeichen dieses Instruments sind die beiden im Hochspannungsfeld gekreuzt angeordneten KDP-Kristalle, von denen einer zur Modulation und der andere zur Demodulation diente. Der Abstimmring wurde von Hand betätigt. Ein Reed-Schalter wobbelte die Frequenz, um bei Resonanz eine Null-Einstellung zu erhalten. Der bedeutendste Schritt war jedoch die Einführung nur eines Standard-Hohlraumes, der für die hohe Frequenz von 4,5 GHz ausgelegt wurde. Sie lag damit neunmal höher als die 500 MHz, die zur Erzeugung des Feinmaßstabes benötigt werden. Der mit einem zentralen Viertelwellen-Resonanzstab von nur 13 mm Länge, einem Außenleiter von 20 mm Durchmesser und einer Gesamthöhe von

30 mm sehr kompakte Resonator aus silberplattiertem, amorphem Quarz, der von einem Kupfermantel umschlossen war, konnte über einen neunfachen Vervielfacher vom Modulations-Hohlraum her angeregt und abgestimmt werden (*FROOME* (1971)). Die Bildung der Koinzidenzmaßstäbe erfolgte einmal durch Umschaltung des Vervielfachers von 9 auf 10, wodurch der Bereich bis 10 Fuß aufgelöst werden konnte, dann durch Amplitudenmodulation des auf neunfach eingestellten Vervielfachers mit einem Quarz, der die Auflösung bis 100 Fuß und anschließend mit einem weiteren Quarz, der diese bis 1.000 Fuß ermöglichte. Zur Berechnung diente ein einfaches Formular. Mit diesem Prototyp wurden Vergleichsmessungen mit dem Vaisälä-Interferometer auf der 840-Meter-Basis in Finnland ausgeführt, die hervorragende Übereinstimmung zeigten (*ESSEN* und *FROOME* 1969). Die praktische Erprobung fand beim U-Bahnbau in London und auf Staudämmen in der Schweiz statt. Eine metrische Variante des NPL-Mekometers III war ab 1970 einsatzbereit.

Das Mekometer ME 3000 wurde ab 1972 von Kern & Co., Aarau, Schweiz, in Zusammenarbeit mit Com-Rad Ltd., Slough, Berkshire, England, entwickelt und ging 1974 in die Produktion. Es wurden etwa 150 Instrumente hergestellt. Dieses Mekometer ist vom Prinzip her identisch mit dem NPL-Mekometer III, das zusätzlich mit einer automatischen Feinabstimmung ausgestattet wurde und zur Vereinfachung der Phasenmessung ein mit dem variablen Lichtweg verbundenes mechanisches Zählwerk erhielt, das sich aus einer Vielzahl von Kupplungen, Differentialen, Schrittgetrieben und Zahnradübersetzungen zusammensetzte (*AESCHLIMANN* 1976). Zur Erweiterung der Auflösungsentfernung ist ein dritter Quarz vorgesehen. Später griff man die Drehung des Handrades für den Stahlbandantrieb des Lichtweges elektrooptisch ab und ersetzte das Zählwerk durch einen elektronischen Rechner mit Numitronanzeige (*KERNER* 1975). Weitere Erläuterungen zur Arbeitsweise des Instruments sind angesichts der Fachkenntnisse der Teilnehmer dieses Seminars nicht erforderlich. Hier sollte nur die Entwicklung chronologisch aufgezeigt werden.

Es war bereits *FROOME*, dem Initiator des Mekometers bewußt, daß der Brechungsindex der Luft für die im Standard-Hohlraum benutzten Mikrowellen vom Index der bei der Streckenmessung benutzten Lichtwellen stark abweicht, besonders weil der Wasserdampfanteil bei Mikrowellen bedeutend größer ist. Dieser Fehler kann aber durch Füllung des Hohlraumes mit trockener Luft beseitigt werden. Deshalb wird die Außenluft über ein Trockenmittel in den

Resonator geblasen. Der Brechungsindex der trockenen Luft liegt dann nur noch um 20 ppm niedriger als der Gruppen-Brechungsindex für die Wellenlänge der Xenonblitzlampe. Dieser Rest kann durch Justierung so weit verringert werden, daß der Modulations-Hohlraum eine optische Wellenlänge erzeugt, die genau den Bedingungen einer Normalatmosphäre bei + 20°C und 760 mm Hg entspricht. Bei Abweichungen davon sind durch zusätzliche Temperatur- und Luftdruckmessungen Korrekturen am Messungsergebnis anzubringen. Das bedeutet aber, daß der Standard-Hohlraum seine Aufgabe nur unvollkommen erfüllen kann.

Trotz sorgfältiger Auswahl der Werkstoffe tritt bei den meisten Mekometern eine Temperaturabhängigkeit des Standard-Hohlraumes auf, die auch nach einer längeren Anpassungszeit an die Umgebungstemperatur Frequenzänderungen bewirken kann, die größer als die Meßgenauigkeit sind. Hinzu kommt, daß der Hohlraum einem bei Quarz bekannten Alterungsprozeß unterworfen ist, dessen Auswirkung ebenfalls nicht vernachlässigt werden kann.

Aus diesen Gründen ist eine Eichung der Meßfrequenz in Abständen erforderlich, die umso kürzer sein sollten, je höher die geforderte Meßgenauigkeit angesetzt wird. Das kann dazu führen, die Frequenz während der Messungen ständig überwachen zu müssen. Die sonst bei elektronischen Distanzmessern übliche Frequenzkontrolle mit einem schnellen elektronischen Zähler ist beim Mekometer nicht möglich, weil die Meßfrequenz wegen des gepulsten Betriebes immer nur für sehr kurze Zeit zur Verfügung steht und außerdem noch gewobbelt wird. Trotzdem wurden eine Reihe von Eichausrüstungen entwickelt, bei denen in der Regel ein hoher gerätetechnischer Aufwand getrieben werden mußte. Ohne Anspruch auf Vollständigkeit seien genannt: *MEIER-HIRMER* (1975), *BRADSELL* (1977), *MAURER*, *SCHNÄDELBACH* (1978), *HIRSCH* (1978) und *JACOBS* (1980). Es ist zu erwarten, daß auf diesem Seminar noch weitere Beiträge zu dieser Frage vorgelegt werden.

3. DER GEOMENSOR

Wenn die verschiedenen Korrekturen angebracht werden, bleibt das Mekometer ME 3000 im Rahmen seiner Reichweite der genaueste elektrooptische Distanzmesser. Es wurde deshalb schon frühzeitig diskutiert, ob man den Standard-Hohlraum wegen seiner verschiedenen, wenn auch nur kleinen Unzulänglichkeiten nicht aufgeben und statt dessen mit einer festen, quarzkontrollierten

Frequenz arbeiten sollte. Das bedeutet aber den Übergang vom Längennormal zu einem Frequenznormal. Entwicklungsarbeiten bei Com-Rad Ltd. führten unter Mitarbeit von *FROOME* zur Konstruktion des Geomensors. Dabei sollten alle bewährten Bauelemente des Mekometers beibehalten werden und der Modulationshohlraum das Herz des Instrumentes bleiben. Auch der Impulsbetrieb mit einer Mikrowelle im Bereich von 500 MHz, die gekreuzten Kristalle im Hochspannungsbereich des Hohlraumes wurden ebenso übernommen wie die Xenonröhre, deren Lichtblitze während der Dauer der Mikrowellenimpulse die Kristalle und die Meßstrecke durchlaufen. Für die Phasenmessung wählte man eine Methode, durch die man auf den variablen Lichtweg verzichten kann. Statt dessen werden die Modulationsfrequenzen ähnlich wie beim Terrameter so lange verändert, bis die zu messende Strecke eine volle Anzahl von Maßstabswellen enthält und keine Reststrecken mehr übrig bleiben.

Ein temperaturkompensierter Quarzoszillator liefert eine Grundfrequenz von 5 MHz. Sie dient als Normal für den Zähler, mit dem die jeweilige Frequenz gemessen wird, deren Maßstabswellen die Strecke ganzzahlig ausfüllen. Die Frequenz wird mit maximal 15 MHz umgeschaltet, um die Nulleinstellung der Resonanz mit Hilfe einer Differenzmessung auf den beiden steilen Flanken des Empfängersignals vornehmen zu können. Dabei entsteht ein geschlossener Regelkreis zwischen Frequenz und Phase. Diese Umschaltung wird mit Hilfe eines Varaktors im vorderen Abschnitt des Modulationshohlraumes vorgenommen. Ein gegenüber angeordneter Varaktor besorgt die Wobbelung für die Bestimmung der Mittenfrequenz.

Da die durch Überlagerung erzeugten Grob frequenzen wegen des kurzen Feinmaßstabes eng gestaffelt werden müssen, können grobe Entfernungsfehler auftreten, wenn sich die Schwingungskreise gegenseitig beeinflussen. Deshalb beschränkte man sich beim Geomensor auf drei Grob frequenzen, die allerdings nur eine Auflösung im Nahbereich ermöglichen. Die größeren Entfernungen werden unter Ausnutzung der Blitzimpulse durch Laufzeitmessungen wie beim Lichtradar bestimmt, wobei die Laufzeit die Umschaltfrequenz für die Feinmessungen steuert.

Sämtliche Messungen werden durch einen Mikroprozessor mit einer Kapazität von 6 K-Bytes gesteuert und ausgewertet. Der Prozessor stellt auch fest, wieviele Messungen erforderlich sind, um eine vorgegebene Genauigkeit zu erreichen und regelt deren Ablauf.

Der Einfluß der Atmosphäre wird durch die Signale von im Instrument eingebauten Sensoren für Temperatur und Luftdruck vom Mikroprozessor kompensiert. Um auch die Temperatur am Endpunkt und an einem Zwischenpunkt der Strecke berücksichtigen zu können, besitzt der Geomensor zwei Eingänge, um die Signale von Telemetrie-Empfängern dem Prozessor zuzuleiten. Die von Com-Rad Ltd. entwickelten Temperatur-Transmitter haben nur die Größe einer flachen Zigarrenkiste.

Die Erhöhung der Reichweite von 3 km auf 10 km wurde durch einen besseren SEV und den größeren Durchmesser der Empfangsoptik erreicht, der jetzt 50 mm beträgt. Sender und Empfänger sind nicht mehr koaxial angeordnet, sondern liegen in der Höhe versetzt nebeneinander und bieten Platz für ein internes Zielfernrohr. Der Geomensor besitzt deshalb drei optische Fenster in der Frontplatte.

LITERATUR

- AESCHLIMANN: *Die Bestimmung der Grobdistanzen beim Mekometer Kern ME 3000.* Z. f. Verm., Phot., Kulturt., S. 33-76, 1976.
- BERGSTRAND: *Measurement of Distances by high Frequency Light Signals.* Arkiv for Math., Astron. och Fysik, S. 30, 1943.
- BRADSELL: *A simple Calibrator for Mekometer EDM-Instr..* Nied. Geod. Komm. Delft, S. 1-6, 1978.
- ESSEN: *The Velocity of Propagation of electromagnetic Waves derived from the Resonant Frequencies of a cylindrical Cavity Resonator.* Proc. Royal Sc. A 204, 1950/51, S. 260-277.
- ESSEN & FROOME: Proc. Phys. Soc., B 64, 1951, S. 662.
- ESSEN & FROOME: *The Velocity of Light and Radio Waves.* Academic Press, London and New York, 1969.
- FROOME & BRADSELL: J. Sci. Instrum. 38, S. 458, 1961.
- FROOME & BRADSELL: J. Sci. Instrum. 43, S. 458, 1966.
- HIRSCH: *Persönliche Mitteilung 1978.* HIRSCH, NGUYEN: *Ein modifiziertes und objektiviertes Meßverfahren mit dem Kern-Mekometer.* AVN 2/1983, S. 45-54.
- JACOBS: *Geodätische Präzisionsmessungen zur Untersuchung rezenter Bodenbewegungen am Nordrand des Ruhrgebietes.* Forschungsberichte des Landes Nordrhein-Westfalen, N. 2934, S. 47-58, 1980.
- KAROLUS und HÜTTEL: *Eine Methode zur Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit unter Verwendung des Kerr-Effektes und einer Photozelle als phasenabhängigem Gleichrichter.* Annalen der Physik, S. 365-402, 1940.
- KERNER: *Rechner für phasenmessende Präzisionstelemeter mit mehr als zwei Wellenlängen.* Z. f. Ver., Phot., Kulturt., S. 283-289, 1975.

MAURER und SCHNÄDELBACH: *Ein neues Frequenzmeßverfahren für das Mekometer ME 3000*. AVN 1978, S. 350-355.

MEIER-HIRMER: *Frequenzuntersuchungen am Mekometer ME 3000*. AVN 11/1975, S. 373-386.

MICHELSON, PEASE & PEARSON: *Astrophys. J.* 82, 26, 1935.

STRECKENMESSUNG MIT DEM MEKOMETER ME 3000

NACH DEM ZWEIFARBENPRINZIP

von

Wolfgang HÜBNER

Geodätisches Institut
Technische Universität München
Arcisstraße 21
8000 München 2
Bundesrepublik Deutschland

ZUSAMMENFASSUNG

Bei der elektrooptischen Streckenmessung muß der für den gesamten Lichtweg repräsentative Brechungsindex bestimmt werden. Da der Brechungsindex frequenzabhängig ist, läßt sich durch die Verwendung von zwei Trägerwellen der integrale Einfluß der trockenen Luft auf die Ausbreitungsgeschwindigkeit eliminieren. Die grundlegenden Gleichungen für die Zweifarbenmethode werden dargestellt. Neben den instrumentellen Voraussetzungen sind einige technische Änderungen beschrieben, die es ermöglichen, das Mekometer ME 3000 für diese Methode zu verwenden. Testmessungen auf einer 1 km langen Strecke über den Kochelsee haben gezeigt, daß die erreichbaren relativen Distanzunsicherheiten zwischen $0,5 \cdot 10^{-6}$ und $1 \cdot 10^{-6}$ liegen.

ABSTRACT

For the electro-optical distance measurement, the refraction index valid for the whole light path is to be determined. Since the refraction index is frequency-dependent, the use of two carrier waves eliminates the total influence of the dry air on the propagation velocity. The basic formulas for the two-colour method are described. The instrumental requirements and some technical modifications are explained to apply the Mekometer ME 3000 for this method. Measurements on a 1 km line across the Kochelsee have shown, that the achievable relative distance uncertainties are between $0,5 \cdot 10^{-6}$ and $1 \cdot 10^{-6}$.

1. EINLEITUNG

Wird die Dispersion von elektromagnetischen Wellen (z.B. Licht) auf dem Übertragungsweg gemessen, so kann man eine Aussage über den Brechungsindex und damit über die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Wellen machen. Bei dieser Methode muß der Luftdruck nicht bekannt sein und die Temperatur wird nur benötigt, um den Wasserdampfdruck sowie dessen Einfluß bestimmen zu können. Es sollen die Möglichkeiten erörtert werden, das Zweiwellenverfahren bei der Streckenmessung mit dem Mekometer ME 3000 anzuwenden. Für die Untersuchung stand das Gerät mit der Seriennummer 218119 zur Verfügung. Einige der angegebenen Daten beziehen sich speziell auf dieses Instrument.

2. ELEKTROOPTISCHE DISTANZMESSUNG MIT ZWEI TRÄGERWELLEN

Als Modell für die Meßsignale dienen Wellenpakete, die aus ebenen monochromatischen Wellen zusammengesetzt sind. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit der maximalen Amplitude innerhalb eines Paketes liefert die sog. Gruppengeschwindigkeit

$$v = \frac{c_0}{n}, \quad (2-1)$$

wobei $c_0 = 299792,458$ km/s die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum angibt und der Gruppenbrechungsindex in Abhängigkeit von der Wellenlänge λ und der meteorologischen Parameter (P_D = Partialdruck der trockenen Luft, T = Temperatur und P_W = Partialdruck des Wasserdampfes) durch

$$n = 1 + A(\lambda) \cdot D(P_D, T) + B(\lambda) \cdot W(P_W, T) \quad (2-2)$$

ausgedrückt wird (vgl. *OWENS* 1967). Besteht eine spektrale Intensitätsverteilung $F(\lambda)$, so bewegt sich der Energieschwerpunkt des Wellenpaketes mit der "mittleren" Gruppengeschwindigkeit (vgl. *BRADFORD* 1976)

$$\langle v \rangle = \frac{\int_{\lambda} F(\lambda) \cdot v(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda} F(\lambda) d\lambda}. \quad (2-3)$$

Sie entspricht der Ausbreitungsgeschwindigkeit der Modulationssignale bei einer modulierten Trägerwelle.

In einem Medium mit veränderlichem Brechungsindex variiert die Fortpflanzungsgeschwindigkeit und die Ausbreitungsrichtung der elektromagnetischen Wellen. Die Bahnkurve ist in Richtung zunehmender Brechzahl gekrümmt. Nach dem FERMATschen Prinzip wird der "optische Weg" (dL = Bogenelement der Lichtkurve)

$$\bar{S} = \int_0^L n dL, \quad (2-4)$$

auch Lichtweg genannt, minimal. Er stimmt i. allg. weder mit der Länge der Bahnkurve L noch mit der geometrisch kürzesten Entfernung S (Sehne) zwischen den Endpunkten P_1 und P_2 überein (vgl. Abb. 1).

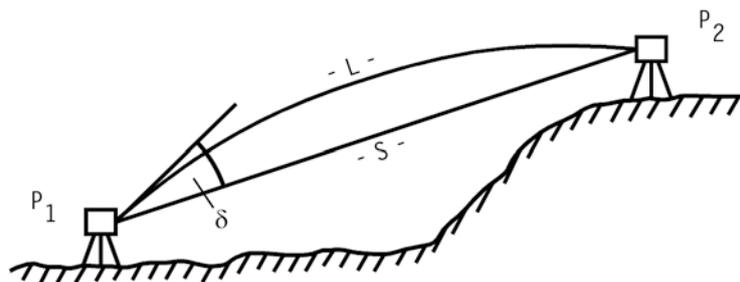


Abb. 1: Bahnkurve und Raumsehne

Mit Hilfe des integralen Brechungsindex

$$\langle n \rangle = \frac{1}{L} \int_0^L n dL = 1 + A\langle D \rangle + B\langle W \rangle, \quad (2-5)$$

wobei $\langle D \rangle$ bzw. $\langle W \rangle$ entsprechend als integrale Werte von D bzw. W zu verstehen sind, läßt sich (2-4) für zwei Lichtwellen mit verschiedenen Frequenzen, d.h. unterschiedlichen Farben (Index B \cong Blau; Index R \cong Rot), in der Form

$$L = \bar{S}_B - \int_0^L (n_B - 1) dL = \bar{S}_B - (A_B \langle D \rangle + B_B \langle W \rangle) L \quad (2-6)$$

$$L = \bar{S}_R - \int_0^L (n_R - 1) dL = \bar{S}_R - (A_R \langle D \rangle + B_R \langle W \rangle) L \quad (2-6)$$

schreiben. Falls die $\langle D \rangle$ - und $\langle W \rangle$ -Werte für beide Wellen gleich sind, kann man das Gleichungssystem (2-6) auflösen zu

$$L = \bar{S}_R - G \cdot \Delta \bar{S} - (B_R - G \cdot \Delta B) \langle W \rangle \tilde{L} \quad (2-7)$$

mit $\Delta\bar{S} = \bar{S}_B - \bar{S}_R$ als Differenz der Beobachtungen, $\Delta B = B_B - B_R$ sowie der "dispersiven Größe"

$$G = \frac{A_R}{A_B - A_R} . \quad (2-8)$$

In der Korrektur für den Wasserdampf genügt die genäherte Bahnlänge $\bar{L} = \bar{S}_R - G \cdot \Delta\bar{S}$.

Um bei gleicher Auflösungsgenauigkeit für $\Delta\bar{S}$ den Streckenfehler klein halten zu können, soll die dispersive Größe G möglichst niedrige Werte annehmen. Dies ist vor allem der Fall, wenn der Nenner in (2-8) groß wird, d.h. die Trägerfrequenzen im Wellenlängenspektrum weit voneinander entfernt sind und "Blau" im ultra-violetten Bereich zu finden ist.

Der Wert für $\langle W \rangle$ muß aus meteorologischen Messungen abgeleitet werden. Im Vergleich zur Einwellenmethode ($L = \bar{S}/\langle n \rangle \cong \bar{S} - A \langle D \rangle \bar{S} - B \langle W \rangle \bar{S}$) steigt der Einfluß des Wasserdampfes auf das ca. 2,5-fache, was an dem Verhältnis $(B_R - G \cdot \Delta B) / (A - B)$ zu sehen ist (Luftdruck $P = P_D + P_W$). Durch die Güte der $\langle W \rangle$ -Bestimmung, die hauptsächlich von der Wasserdampfverteilung längs des Strahlenweges abhängt, wird die Genauigkeit der Streckenresultate nach der Zweifarbenmethode beeinflusst. Bei einer Lufttemperatur von 30°C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 50% ($P_W = 21$ mbar) bewirkt eine Änderung des Wasserdampfgehaltes von 5% relativer Feuchte eine Streckenänderung von $0,2 \cdot 10^{-6}$ S (vgl. Abb. 2).

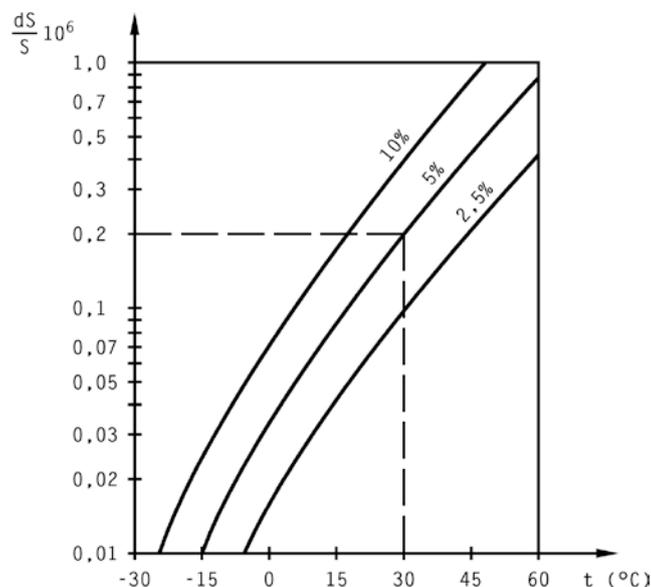


Abb. 2: Auswirkung dS/S auf Grund eines fehlerhaft bestimmten Wasserdampfgehaltes bei 50% relativer Luftfeuchtigkeit

Wie bei der üblichen elektrooptischen Distanzmessung ist ab einer Streckenlänge von ca. 3 km für den Übergang von L auf S die (geometrische) Korrektur

$$K = -\frac{L^3}{24} \kappa^2 \quad (2-9)$$

auf Grund der Strahlkrümmung κ anzubringen. Die Größe von κ kann aus Gradientenmessungen (z.B. über Sonden) oder Zenitwinkelbeobachtungen ermittelt werden. Weiters treten bei Entfernungen über 30 km Mehrwegeeffekte auf (*HÜBNER*), da die Refraktionswinkel δ_B und δ_R (vgl. Abb. 1) unterschiedlich groß ausfallen, d.h. die Strahlwege für "Blau" und "Rot" voneinander abweichen.

3. INSTRUMENTELLE VORAUSSETZUNGEN

Als Strahlungsquelle dient im Mekometer eine Xenon-Gasentladungslampe. Anhand von Abb. 3 ist die spektrale Intensitätsverteilung ersichtlich, die für das vom Sendeobjektiv abgestrahlte Lichtbündel mit einem Spektrographen aufgezeichnet wurde. Aus diesem "kontinuierlichen" Spektrum läßt sich ein blauer und ein roter Anteil (bei $\lambda = 400$ nm bzw. $\lambda = 600$ nm) herausfiltern. Wegen der dabei erheblich geringeren Lichtenergie gegenüber dem Bereich um $\lambda = 485$ nm (ca. 1/10) sind nur noch Strecken von etwas über 1 km Länge meßbar.

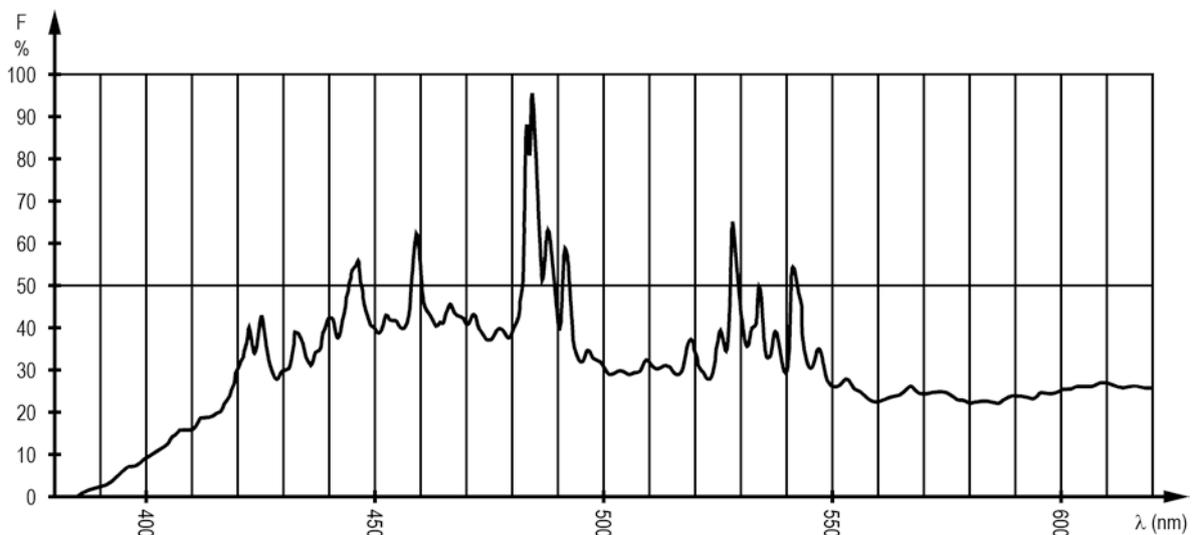


Abb. 3: Spektrale Intensitätsverteilung

Herausragende Spitzen im Emissions-Spektrum der Lampe befinden sich bei $\lambda = 483,4$ nm sowie bei $\lambda = 484,4$ nm. Der Vergleich von Messungen, die mit und

ohne einen schmalen Linienfilter (Mittelwellenlänge $\bar{\lambda} = 484,5 \text{ nm}$) auf einer 864 m langen Strecke erzielt wurden, bestätigt den λ -Mittelwert der beiden Intensitätsmaxima als "effektive" Trägerwellenlänge ($\lambda_{\text{eff}} = 483,9 \text{ nm}$).

Werden verschiedene Trägerwellen verwendet, so ändern sich die Verhältnisse bei der Lichtmodulation. Aus diesem Grund ist das Phasenmeßsystem detailliert zu betrachten. Die Modulation bzw. Demodulation des Sendestrahles erfolgt über KDP-Kristalle (Kaliumdihydrogenphosphat KH_2PO_4 , abgekürzt KDP) in einem Viertelwellen-Hohlraumresonator (Modulations-Cavity). Die hohe Auflösungsgenauigkeit der optischen Weglängen von 0,1 mm wird durch den kurzen Feinmaßstab von 0,3 m (Modulationsfrequenz $f_m = 499,5 \text{ MHz}$) erzielt. Weil die Kristalle beim Anlegen eines elektrischen Feldes anisotrop werden, d.h. die optischen Brechungseigenschaften richtungsabhängig sind (Doppelbrechung), ist eine elliptische Polarisierung der Trägerwelle möglich. Damit eine Phasenverschiebung von π rad (maximale Modulation) zwischen zwei senkrecht zueinander stehenden Feldstärkekomponenten des polarisierten Lichtes auftritt, muß die Spannung (vgl. *KAHMEN* 1978)

$$U_{1/2} = \frac{\lambda}{2 r_{63} n_0^3} \quad (3-1)$$

vorhanden sein. Sie wird auch Halbverzögerungs-Spannung genannt. Für den "ordentlichen" Brechungsindex n_0 von KDP-Kristallen gilt der Wert 1,51 (*KAMINOV, TURNER* 1966). Der elektrooptische Koeffizient $r_{63} = 10,5 \cdot 10^{-12} \text{ m/V}$ ist für den ganzen transparenten λ -Bereich von 0,25 ... 1,7 μm praktisch unabhängig von der Wellenlänge (*BLOKH* 1963); lediglich die Temperatur nimmt auf ihn einen gewissen, hier vernachlässigbaren Einfluß (vgl. *KLEEN, MÜLLER* 1969).

Nach *FROOME* (1971) wird beim Mekometer der Fotostrom am Sekundärelektronenvervielfacher (SEV) als relative Größe durch die Gleichung

$$I = \frac{1}{2} \left\{ 1 - \cos(e) \cdot J_0 \left(\frac{2\pi U}{U_{1/2}} \cos \left(\frac{2\pi L}{\lambda_m} \right) \right) \right\} \quad (3-2)$$

beschrieben, wobei

- J_0 die BESSEL-Funktion 0. Ordnung,
- e die "zusätzliche" Elliptizität des modulierten Lichtes und
- λ_m die Modulationswellenlänge (0,6 m) bedeuten.

Zu untersuchen bleibt die Abhängigkeit des SEV-Stromes von e , L und $U_{1/2}(\lambda)$. Eine zusätzliche Elliptizität kann z.B. durch den Retroreflektor am Zielpunkt, durch Linsen- bzw. Prismenoberflächen oder durch nicht exakt ausgerichtete KDP-Kristalle hervorgerufen werden (FROOME, BRADSELL 1966). Sie zu bestimmen, ist aufwendig und schwierig. Deshalb seien die von FROOME und BRADSELL benutzten Größen $e = 0$ rad und $e = \pi/4$ rad betrachtet. Bei $\lambda = 485$ nm nennt MEIER-HIRMER (1975) den Wert 0,7 für $U/U_{1/2}$. Davon ausgehend zeigt Abb. 4 den Stromverlauf für die Trägerwellenlängen 400 nm und 600 nm ($N =$ ganze Zahl).

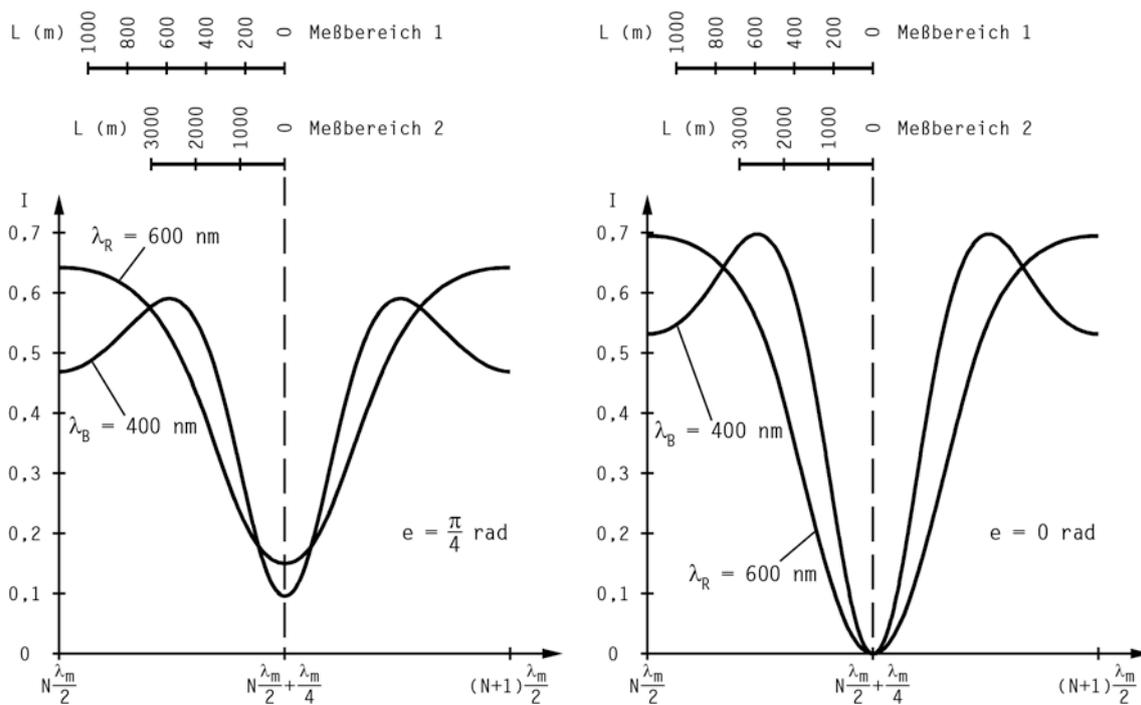


Abb. 4: Verlauf des Fotostromes am SEV

Die, vom Minimum aus gesehen, nach beiden Seiten weitgehend symmetrisch verlaufende Intensitätslinie ermöglicht es, mit Hilfe des Fotostromes die Phasenlage von f_m zu bestimmen. Hohe Genauigkeiten sind dabei erzielbar, wenn die steilen Anstiege der Kurve links und rechts vom Minimum verwendet werden. Der Strom variiert dort stark bei geänderter Phasenlage. Im Hohlraumresonator werden deshalb abwechselnd die Modulationsfrequenzen $f_1 = f_m + \Delta f$ und $f_2 = f_m - \Delta f$ abgestimmt (für das Mekometer der TU München gilt im Meßbereich 1: $\Delta f = 64,8$ kHz bzw. im Meßbereich 2: $\Delta f = 14,5$ kHz). Da die Phasendifferenz

$$\Delta\Phi = 2\pi \frac{\Delta f}{\nu} L \quad (3-3)$$

zwischen f_1 und f_2 streckenabhängig ist, verschiebt sich der Abgriff an der Intensitätskurve entsprechend der gemessenen Entfernung (vgl. Abb. 4).

Wegen der hohen Meßgenauigkeit für die optischen Weglängen muß die Modulationsfrequenz parallel zum Phasenabgleich gemessen werden. Dazu eignet sich der modifizierte "Frequenzmeßplatz" (MAURER 1983). Dieses Instrumentarium kann beim Feldeinsatz benutzt werden. Ein Umformer transformiert die Ausgangsfrequenz f_m von 499,5 MHz auf die Frequenz f_m^* mit ca. 9,5 MHz. Mit dem Zählerstand ZS und dem Zeitverlust δt , die beide aus Kalibrierungsmessungen an einem genauen Frequenzgenerator (Synthesizer bzw. internes 10-MHz-Signal des Zählers) abzuleiten sind, wird die Frequenz für die Zeit des Lichtblitzes in MHz über (t_p = Pulsbreite)

$$f_m = (f_m^* + 490) (1 + ZS) + \frac{\delta t}{t_p} f_m^* \quad (3-4)$$

mit einer Standardabweichung von etwa 70 Hz ($\cong 1,4 \cdot 10^{-7} S$) erhalten. Der Fehler, der durch das Mitteln einer ungeraden Anzahl von Frequenzwerten f_1^* und f_2^* entsteht, kann bei dem für die Zweiwellenmethode wichtigen Meßbereich 2 vernachlässigt werden.

Die Frequenz innerhalb eines Frequenzpaketes verhält sich nach dem Abgang des Lichtblitzes leider nicht konstant. Der Einfluß dieser Änderung auf die Streckenmessung liegt darin, daß die Bestimmung der Phasenlage des am Zielpunkt reflektierten Lichtbündels (f_m moduliert) mit einer veränderten Referenzfrequenz $f_m(t)$ erfolgt. Für die Phasenverschiebung des Referenzsignales vom Zeitpunkt t_b der Blitzmodulation bis zum Zeitpunkt t_v des Phasenvergleiches gilt

$$\Delta\Phi_f = \int_{t_b}^{t_v} (f_m^*(t) - f_m^*) dt, \quad (3-5)$$

wobei der Verlauf von $f_m^*(t)$ durch Labormessungen bestimmt wird. Damit kommt als streckenabhängige ($t_b - t_v = 2\sqrt{S} c_0$) Entfernungskorrektur

$$\Delta L_f = \frac{1}{2} \Delta\Phi_f \lambda_m \quad (3-6)$$

zustande (vgl. MAURER 1983).

4. GERÄTETECHNISCHE ÄNDERUNGEN

Als Schwachstellen für die Zweifarbenmessung mit dem Mekometer erwiesen sich die Polarisationsfolien, die häufig als Polfilter bezeichnet werden. Ihre Durchlässigkeit oder Transparenz τ nimmt bei kurzen Wellenlängen stark ab (vgl. Abb. 5; τ für neutrales, d.h. unpolarisiertes Licht).

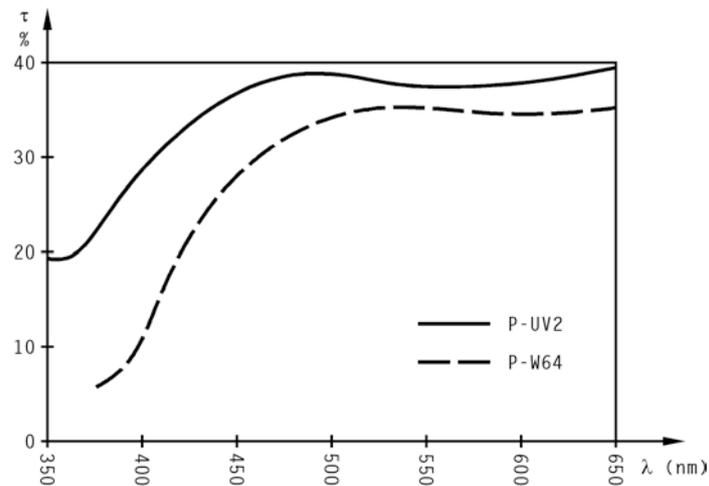


Abb. 5: Transparenz der alten und neuen Polarisationsfolien

Die ursprünglich im ME 3000 eingebauten Polarisationsfolien mit der Bezeichnung P-W64 (0,8 mm stark) ließen sich gegen Filter vom Typ P-UV2 (0,2 mm stark) auswechseln. Hierzu mußte die Modulations-Cavity ausgebaut werden. Anschließend wurde der gesamte optische Strahlengang im Instrument neu justiert. Durch diese Maßnahme gelang es, die Signalstärke bei Messungen mit Trägerwellen in der Nähe von $\lambda = 400$ nm der bei $\lambda = 600$ nm anzugleichen. Den Abfall der Polfiltertransparenz zum "Blauen" hin kompensiert die dort höhere Empfindlichkeit der SEV-Kathode. Die neuen Polfilter bewirken, daß sich im gesamten interessierenden λ -Intervall die Genauigkeit der Modulations-Phasenauflösung steigert. Die Elliptizität des am SEV ankommenden Lichtes wird reduziert, was steiler verlaufende Flanken der Fotostromkurve (vgl. Abb. 4) nach sich zieht. Als Ursache hierfür ist das bessere Lösungsverhältnis (Transparenz zweier Polarisatoren bei gekreuzten Durchlaßrichtungen gegenüber parallelen Durchlaßrichtungen) anzuführen. Die stärkere Löschung drückt sich durch die größere Zahl im Nenner aus (siehe Tabelle 1; vgl. *KÄSEMANN*). Speziell bei der Beobachtung von kurzen Distanzen (bis ca. 400 m) in ruhiger Atmosphäre gelingt nun die Phasenauflösung besser, als dies die Leuchtanzeige des Gerätes mit ihrer 0,1-mm-Auflösung

wiedergibt.

λ (nm)	Löschungsverhältnis	
	P-W64	P-UV2
350	–	1:1800
400	1:20	1:600
450	1:60	1:5600
500	1:350	1:76000
550	1:5000	1:125000
600	1:11000	1:117000
650	1:11000	1:79000

Tabelle 1: Löschungsverhältnis

Um größere Reichweiten zu ermöglichen, wurde die Anzahl der Reflektorprismen von drei auf fünf erhöht. Die Prismenflächen, die den Sendestrahл total reflektieren, müssen wegen der Polarisationsmodulation mit einer Metallschicht versehen sein, da sich bei der Totalreflexion an Glas-Luftflächen die Polarisationseigenschaften des Lichtes ändern (*BORN* 1965).

Eigens gefertigte schmale Linienfilter (MA 7-0,5; gekoppelte All-Dielektrik-Interferenzfilter mit spezieller Blockung; Durchmesser = 50 mm) wurden benutzt, um aus dem Spektrum der Blitzlampe einen roten und einen blauen Anteil herausfiltern zu können. Diese Filter wurden gewählt, weil sie wegen der hohen maximalen Durchlässigkeit und den verhältnismäßig großen Halbwertsbreiten HW viel Energie passieren lassen (vgl. Abb. 6). Die mittlere Durchlaßwellenlänge $\bar{\lambda}$ (Mittelwellenlänge) liegt bei 405,1 nm bzw. bei 595,3 nm. Als Temperaturdrift für $\bar{\lambda}$ kann im ersten Fall der Wert 0,015 nm/°C und im zweiten 0,018 nm/°C angenommen werden.

Mit Hilfe der Beziehung (2-3) lassen sich die effektiven Trägerwellenlängen des Gerätesystems ableiten, wobei $\langle v \rangle$ nach (2-1) sowie (2-2) zu ersetzen ist. Die spektralen Intensitätsverteilungen sind dafür mit den jeweiligen Durchlaßkurven und dem Emissionsspektrum berechnet worden. Der Term $B(\lambda) \cdot W$ in (2-2) ist im vorliegenden Fall vernachlässigbar, so daß man erhält:

$$\langle A(\lambda) \rangle = \frac{\int_{\lambda} F(\lambda) \cdot A(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda} F(\lambda) d\lambda} \quad (4-1)$$

Wenn die rechte Seite der Gleichung (4-1) für "Blau" bzw. "Rot" berechnet ist, so führt zu den Werten von λ_{eff} jeweils eine Interpolation in die Funktion $A(\lambda)$ oder die entsprechende Umkehrfunktion $\lambda(A)$. Als Ergebnis wurden $\lambda_B = 405,2 \text{ nm}$ bzw. $\lambda_R = 595,1 \text{ nm}$ ermittelt.

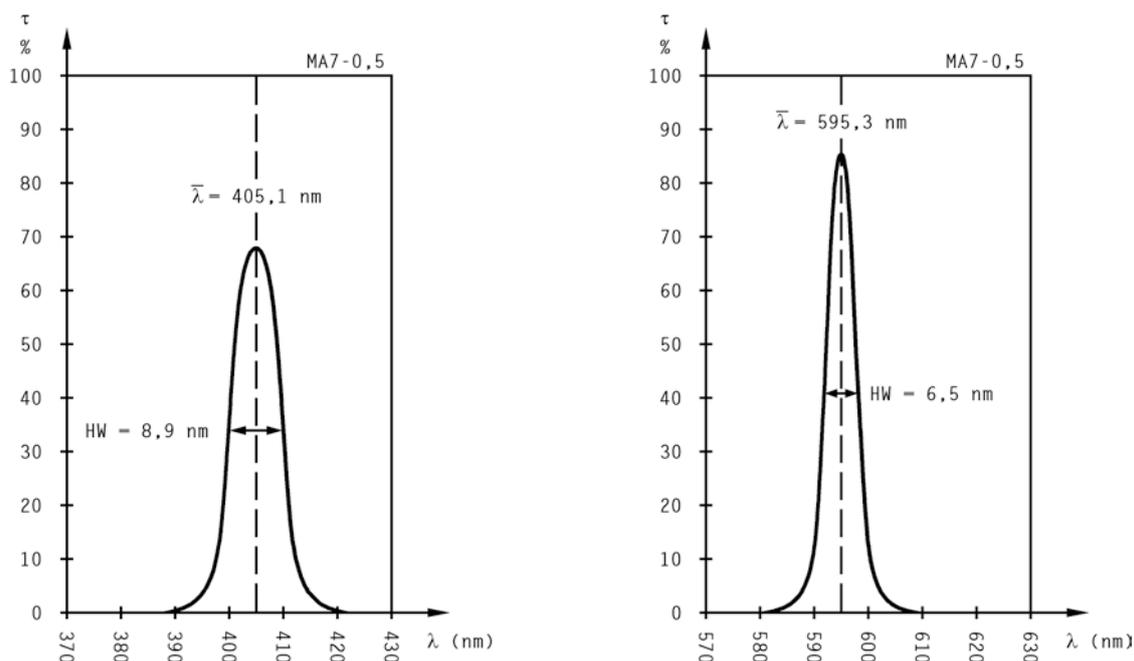


Abb. 6: Durchlaßkurven der Interferenzfilter

5. BESTIMMUNG DER INSTRUMENTENKONSTANTEN

Die Beobachtungsgrößen \bar{S}_B und \bar{S}_R müssen frei von systematischen Fehlern sein, weshalb das Instrument auf additive und periodische Einflüsse, die an die Meßgenauigkeit heranreichen, zu untersuchen ist. Der optisch-mechanische Phasenabgleich (z.B. *KAHMEN* 1978) erzeugt innerhalb des Feinmaßstabes ($\lambda_m/2 = 0,3\text{m}$) immer die gleichen Verhältnisse im Phasenmeßsystem. Periodische Fehler in den gemessenen Phasenlagen, die letzten Endes die entscheidende Größe $\Delta\bar{S}$ beeinflussen, können daher nur der Antrieb und der Abgriff des beweglichen Prismensystems im variablen Lichtweg hervorrufen. Abbildung 7 zeigt eine Meßanordnung, bei der auf einer Komparatorbank der Reflektor um genau definierte Beträge zu verschieben ist. Im Abstand von ca. 10 mm erfolgen Instrumentenablesungen.

Die vom Gerät gelieferte Entfernungsdifferenz ist im Vergleich zu einem Reflektorfahrweg von genau 30 cm um ca. 0,3 mm zu kurz. Dieser lineare Phasenfehler mit der Steigerung u tritt beim Übertragen der Handradstellung

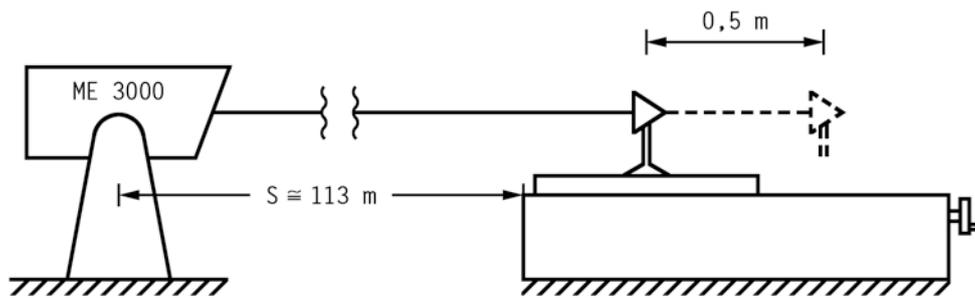


Abb. 7: Messung des periodischen Phasenfehlers

in den Rechner auf. Die im Zuge einer Vorausgleichung um den linearen Fehler korrigierten Meßdaten wurden einer Spektralanalyse unterzogen. Es zeigten sich die Frequenzen 1 und 2 bezüglich der halben Modulationswellenlänge. Eine geringfügige Exzentrizität einer oder beider Führungsrollen des Prismenzugbandes bewirkt eine doppelte harmonische Schwingung ($\lambda = 0,15 \text{ m}$). Wird die Periode mit der Länge $0,3 \text{ m}$ ebenfalls als sinusförmige Schwingung angesetzt, so erhält der Phasenfehler für die i -te Beobachtung L_i die Gestalt ($A = \text{Amplitude}$, $\Phi = \text{Phasennulllage}$)

$$\Delta L_i = \hat{L}_i u + A_1 \cdot \sin\left(\frac{4\pi}{\lambda_m} L_i - \Phi_1\right) + A_2 \cdot \sin 2\left(\frac{4\pi}{\lambda_m} L_i - \Phi_2\right), \quad (5-1)$$

worin

$$\hat{L}_i = L_i - 0,194 - \left(\text{int} \frac{L_i - 0,194}{0,3}\right) \cdot 0,3 \quad *) \quad (5-2)$$

bedeutet. Die Gleichung (5-1) gilt nicht für den oberen, von der Anfangsstellung der Feinmessung "2940" aus gezählten Überlappungsbereich im variablen Lichtweg. In Tabelle 2 sind die aus den Mittelwerten von vier Meßreihen

	Wert (mm)	Standardabweichung (mm)
Steigung u pro 30 cm	-0,276	$\pm 0,023$
Amplitude A_1	0,031	$\pm 0,008$
Amplitude A_2	0,049	$\pm 0,005$
Phasennulllage Φ_1	101,4	$\pm 11,1$
Phasennulllage Φ_2	70,2	$\pm 3,2$

Tabelle 2: Werte zum periodischen Phasenfehler

*) $\text{int}(a) = \text{größte ganze Zahl, die kleiner oder gleich } a \text{ ist (integer=; nicht elementare Funktion (vgl. BRONSTEIN, SEMENDJAJEW 1973))}$

erhaltenen Ergebnisse aufgelistet. Ähnliche Resultate ergeben auch die Ausgleichungen mit den Daten der einzelnen Durchgänge.

Den Funktionsverlauf des periodischen Phasenfehlers bezüglich des Feinmaßstabes (ohne linearen Anteil) sowie die Mittel der Meßwerte verdeutlicht Abb. 8. Eine erneut mit den Residuen durchgeführte Spektralanalyse ergab keine periodischen Restanteile. Damit bestätigte sich die Richtigkeit des gewählten Ansatzes.

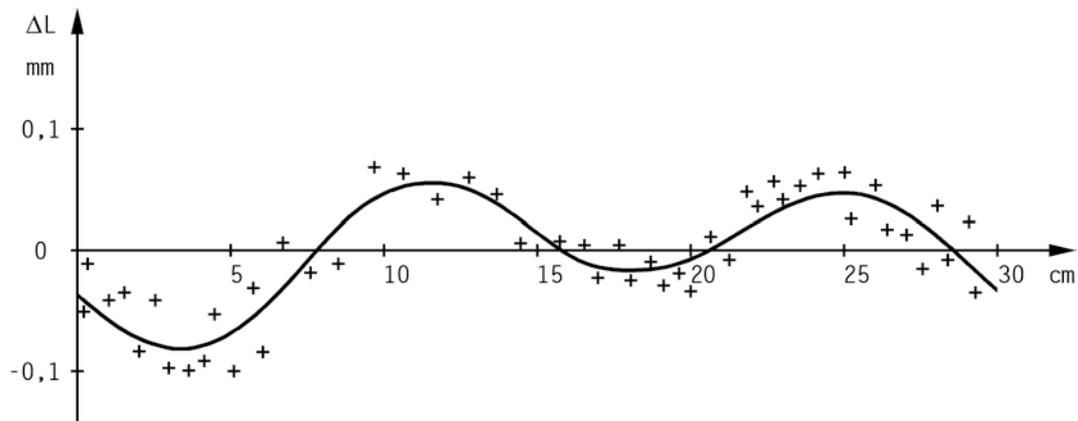


Abb. 8: Periodischer Phasenfehler

Den beiden Trägerwellen "Blau" und "Rot" sind unterschiedliche Additionskonstanten c_B und c_R zuzuordnen. Sie wurden durch die "Messung in allen Kombinationen" auf einer Prüfstrecke mit betonierten Pfeilern (maximale Länge ca. 500 m) bestimmt. Die dabei erreichbare Genauigkeit liegt unter $\pm 0,1$ mm. Als unabhängige Prüfung des c_R - und insbesondere des Δc -wertes ($\Delta c = c_B - c_R$; vgl. (2-7)) ist die Messung nach der Zweifarbenmethode auf einer bekannten Vergleichsstrecke auszuführen. Im vorliegenden Fall wurde dazu die Normalstrecke ($L = 864$ m) des Deutschen Geodätischen Forschungsinstitutes im Ebersberger Forst benutzt. Die Konstanten lauten nach den erhaltenen Testergebnissen für "Blau" $-5,15$ mm sowie für "Rot" $+3,05$ mm.

6. PRAKTISCHE ERFAHRUNGEN

Bei der Ableitung von (2-7) ist vorausgesetzt, daß \bar{S}_B und \bar{S}_R gleichzeitig beobachtet werden. Dies läßt sich beim Mekometer leider nicht realisieren. Hier muß man die optischen Weglängen möglichst rasch hintereinander messen. Als günstig erwies sich die Meßreihenfolge (Satz):

Rot - Forward
Blau - Forward
Blau - Reverse
Rot - Reverse,

wobei in Forward- bzw. Reverse-Stellung je drei Meßzyklen des Frequenzzählers abgewartet werden. Der Zeitaufwand pro Satz beträgt rund 4 Minuten. Für den Mittelwert aus mehreren Satzmessungen sind relative Distanzunsicherheiten zwischen $\pm 0,5 \cdot 10^{-6}$ und $\pm 1 \cdot 10^{-6}$ zu erzielen. Der nutzbringende Einsatzbereich des Gerätekonzepts reicht, je nach den herrschenden Sichtverhältnissen von 0,4 km bis 1,2 km.

Als Beispiel für die bislang erhaltenen Ergebnisse sollen die Beobachtungen auf einer Strecke über den Kochelsee (Nähe Walchenseekraftwerk) dienen. Die Ausgangspunkte liegen nahe am Ufer; der Zielstrahl verläuft in einem Abstand von etwa 2 m parallel zur Wasseroberfläche. Da die mittlere Wassertemperatur im Sommer mit 14°C angegeben wird, war zu vermuten, daß die an den Streckenendpunkten gemessenen Lufttemperaturen an heißen Tagen nicht dem repräsentativen Mittelwert für den Meßstrahl entsprechen. In diesem Fall kann man die Dispersionsmethode mit Vorteil einsetzen, denn bei ihr werden, abgesehen von der Ermittlung des Wasserdampfeinflusses, keine Temperatur- und Luftdruckwerte benötigt (vgl. (2-7)). Aus der Abbildung 9 sind die Resultate von zwei Tagen mit unterschiedlichen Temperaturverhältnissen ($T \cong 22^{\circ}\text{C}$ bzw. $T \cong 12^{\circ}\text{C}$) zu sehen. Die übereinstimmenden Streckenlängen belegen die Konstanz des Gerätesystems. Für die Standardabweichung eines einzelnen Satzes errechnen sich 1,4 mm. Daneben sind in der Graphik die mit den meteorologischen Daten reduzierten Strecken dargestellt. Aus diesen Werten läßt sich für die Beobachtungszeit am 8.7.1983 eine Drift von $-3 \cdot 10^{-6}\text{S}$ ablesen, d.h. die Temperaturen sind an den Endpunkten mittags im Mittel um $1,5^{\circ}\text{C}$ zu hoch und abends entsprechend zu niedrig erhalten worden. Dies stimmt mit den Temperaturwerten überein, die eine selbstregistrierende Meßeinrichtung auf dem See in 2 m Höhe über dem Wasserspiegel ermittelt hat.

Die für den 8.7.1983 erwartete Differenz zwischen den Mittelwerten der Dispersionsmethode und dem Einwellenverfahren tritt nicht auf. Begründet kann dies damit werden, daß die Temperatur der oberen Wasserschicht (0,15 m unter dem Wasserspiegel gemessen) sich durch die starke Sonneneinstrahlung von den nächtlichen $14,5^{\circ}\text{C}$ bis auf ca. 3°C der Lufttemperatur anglich. Demnach ist in der unteren Luftschicht über dem See kein extremer Temperaturgradient vorhanden gewesen.

Datum: 8. 7. 1983

13. 9. 1983

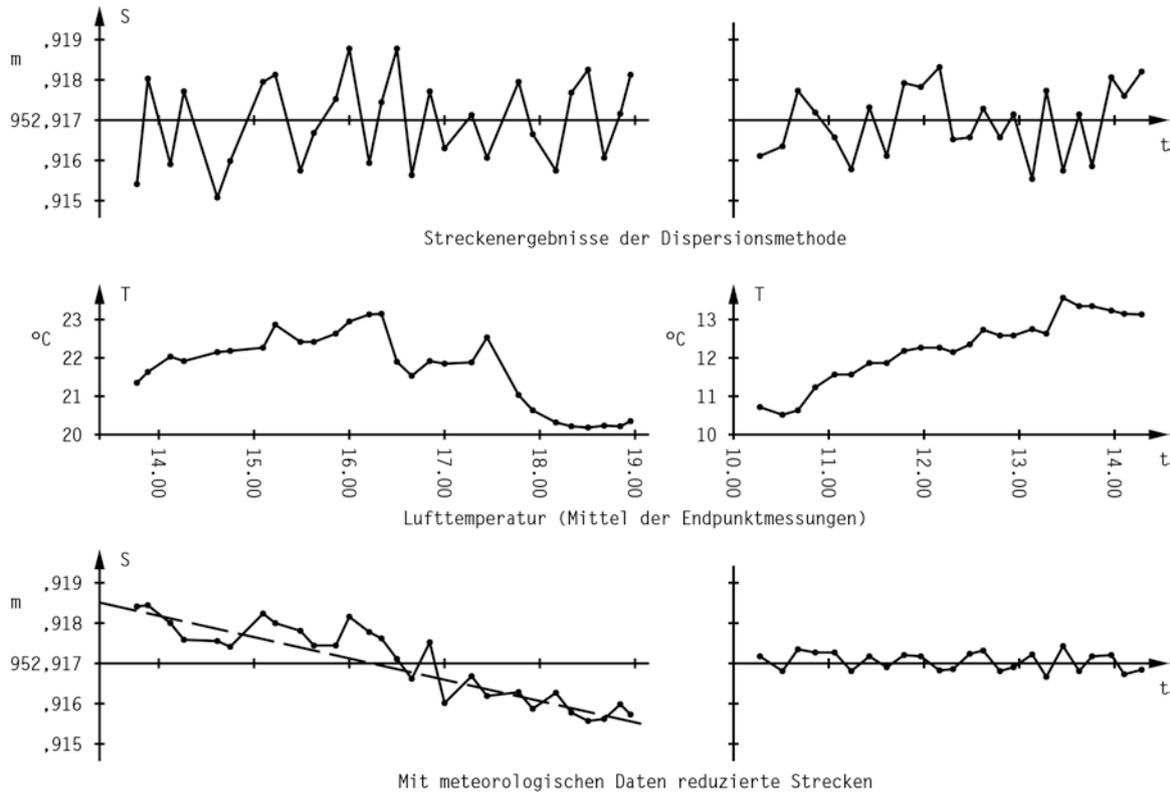


Abb. 9: Meßergebnisse

Das Beispiel zeigt, daß die Resultate nach der Zweifarbenmethode eine Genauigkeit erreichen, die sonst nur bei günstigen meteorologischen Bedingungen zu erwarten sind. Gegenüber der normalen Mekometermessung mit paralleler Frequenzermittlung ist nur ein geringer zusätzlicher technischer Aufwand erforderlich. Der Vorteil des Verfahrens besteht hauptsächlich in der Unabhängigkeit von der Temperaturerfassung an den Streckenendpunkten.

LITERATUR

BORN, M.: *Optik - Ein Lehrbuch der elektromagnetischen Lichttheorie*. 2. Auflage, Springer Verlag, Berlin Göttingen Heidelberg, 1965

BLOKH, O.G.: *Dispersion of r_{63} for Crystals of ADP and KDP*. Soviet Physics - Crystallography, Bd. 7, S. 509-511, 1963, übersetzt aus: Kristallografiya, Bd. 7, Nr. 4, S. 632-633, 1962

BRADFORD, H.M.: *Propagation and spreading of a pulse or wave packet*. American Journal of Physics, Bd. 44, Nr. 11, S. 1058-1063, 1976

BRONSTEIN, I.N., SEMENDJAJEW, K.A.: *Taschenbuch der Mathematik*. 13. Auflage, Verlag Harri Deutsch, Zürich Frankfurt/Main, 1973

FROOME, K.D.: *Mekometer III: EDM with Sub-Millimetre Resolution*. Survey Review, Bd. 21, Nr. 161, S. 98-111, 1971

- FROOME, K.D., BRADSELL, R.H.: *A new method for the measurement of distances up to 5000 ft by means of a modulated light beam.* Journal of Scientific Instruments, Bd. 43, Nr. 3, S. 129-133, 1966
- HÜBNER, W.: *Zur Ausnutzung der Dispersion für die elektromagnetische Streckenmessung* (bislang nicht veröffentlicht)
- KÄSEMANN, E., Optische Werkstätten GmbH (Oberaudorf/Inn):
Informationsschriften und Datenblätter
- KAHMEN, N.: *Elektronische Meßverfahren in der Geodäsie.* 2. Auflage, Herbert Wichmann Verlag, Neue Folge Band 8, Karlsruhe, 1978
- KAMINOV, I.P., TURNER, E.H.: *Electrooptic Light Modulator.* Applied Optics, Bd. 5, Nr. 10, S. 1612-1628, 1966
- KLEEN, W., MÜLLER, R.: *Laser.* Springer Verlag, Berlin Heidelberg New York, S. 425-441, 1969
- MAURER, W.: *Zum Frequenzverhalten des Mekometers ME 3000.* Seminar über elektrooptische Präzisionsstreckenmessung, HSBw München, 23. Sept. 1983
- MEIER-HIRMER, B.: *Frequenzuntersuchungen am Mekometer ME 3000.* Allgemeine Vermessungs-Nachrichten, Bd. 82, Nr. 11, S. 373-387, 1975
- OWENS, J.C.: *Optical Refraction Index of Air: Dependence on Pressure, Temperature and Composition.* Applied Optics, Bd. 6, Nr. 1, S. 51-59, 1967

FIRST RESULTS OF THE GEODETIC MEASUREMENTS
CARRIED OUT WITH THE TERRAMETER,
TWO-WAVELENGTH ELECTRONIC DISTANCE MEASUREMENT INSTRUMENT

Dr.Ing. Jean GERVAISE

Head of the CERN Applied Geodesy Group
European Organization for Nuclear Research
CH - 1211 Geneva 23

ZUSAMMENFASSUNG

Elektronische Messinstrumente zur Messung der Distanz mit zwei Wellenlängen sind für die Geodäsie erhältlich und verbessern die Genauigkeit der Messungen. Ein Terrameter (Terratechnology Corp.) ist seit September 1982 im CERN in Betrieb. Die Resultate der Kalibrierung dieses Instrumentes mit Hilfe der geodätischen Basis im CERN und die ersten Messungen im Streckennetz des LEP (Large Electron Positron Ring) sind in dieser Veröffentlichung beschrieben.

ABSTRACT

The two wave length EDM instruments are now entering into the geodetic techniques and will largely improve the accuracy of the measurements. A Terrameter (Terratechnology Corp.) is now used at CERN since September 1982. The results of the standardization of this instrument on the CERN geodetic base and the first measurements of the trilateration network for LEP (Large Electron Positron Ring) are presented in this paper.

RÉSUMÉ

Les instruments électroniques de mesure de distances à deux longueurs d'ondes font leur apparition dans les techniques de géodésie et améliorant la précision des mesures. Un Terramètre (Terratechnology Corp.) est en service au CERN depuis Septembre 1982. Les résultats de l'étalonnage de cet instrument sur la base géodésique du CERN et les premières mesures du réseau de trilatération du LEP (Large Electron Positron Ring) sont présentés dans ce papier.

FIRST RESULTS OF THE GEODETIC MEASUREMENTS
CARRIED OUT WITH THE TERRAMETER,
TWO-WAVELENGTH ELECTRONIC DISTANCE MEASUREMENT INSTRUMENT

1. REVUE OF THE FORMULA

The use of the two colour electromagnetic distance measurement instruments will considerably modify the approach to the problem of very high accuracy geodesy. Today, the field of application of these instruments is still relatively unknown but it is likely that it will increase greatly.

Rather than consider the time dt taken by the light to cover a light element dl , we use the proportional quantity $c \cdot dt$ called optical path, the length covered in the vacuum during a time dt . The index related to the vacuum or absolute index is a number without dimension defined by $n = c/v$, the ratio of the length of propagation velocities in a vacuum and in the considered environment, n directly depends on the light frequency. The optical path becomes: $n \cdot v \cdot dt = n \cdot dl$

Thus, the optical path L going from A to B is defined by:

$$L_{(AB)} = \int_A^B n \, dl$$

This function of the coordinates of the points A and B is called Hamilton function.

The principle of two-colour electromagnetic distance measurement instruments was proposed by Prilepin in 1957 and Bender & Owens in 1965, in order to make the distance measurements less dependent on the refractive index of air. This index is essentially variable for long paths through the atmosphere and impossible to measure accurately with one frequency EDM instruments. Along the same path, simultaneous measurements of the optical path with different frequencies allow the desired correction for the refractive index to be largely determined.

2. PRINCIPLE OF THE MEASUREMENTS WITH INSTRUMENTS USING TWO DIFFERENT
WAVE LENGTH IN THE VISIBLE SPECTRUM

The two-colour instruments measure two different optical path due to the dispersion of the refractive index in relation with the wave length. We assume a geometrical path length L of 15 km between light source and reflector, i.e. 30 km outgoing and incoming, the one-way optical length will be $L + S$, where S is the additional contribution due to the atmosphere. Light being modulated, $L + S$ is inversely proportional to the group velocity U . If the group refractive index is:

$$n^G = c/U$$

$$S = \int_0^L (n^G - 1) dl$$

For red light alone, S is about 400 cm. If the red line of a Helium Neon laser (632.8 nanometer) and the blue line of a Helium Cadmium laser (441.6 nanometer) are chosen, the extra optical paths S_B and S_R for the blue and red respectively will differ by about 10%, giving a difference $\Delta S = S_B - S_R$ about 40 cm. By convention, the dispersive power of the environment is a number A without dimension:

$$A = (n_B^G - n_R^G) / (n_R^G - 1)$$

its inverse $1/A$ is called the constringency of the atmosphere. One can thus write the difference of the optical path:

$$\Delta S = \int_0^L A (n_R^G - 1) dl$$

A being independent of the atmospheric density along the path and only weakly dependent on the atmospheric composition, we can replace it with a good approximation by its average value $\langle A \rangle$ and take it out the integral sign

$$\Delta S = \langle A \rangle \int_0^L (n_R^G - 1) dl = \langle A \rangle S_R$$

then

$$S_R = \Delta S / \langle A \rangle$$

and

$$L = L_R - S_R = L_R (L_B - L_R) / \langle A \rangle$$

which shows that the true distance is obtained by measuring only the optical lengths L_B and L_R over the same distance thus removing the effect of the atmosphere from the optical measurement.

We call refractivity the value $N = (n-1) 10^6$ and N_{G_0} the group refractivity in standard atmospheric conditions, temperature being equal to 15°C and atmospheric pressure being 760 mm of mercury.

We can calculate $\langle A \rangle$ for the wave lengths used in the Terrameter - 632.8 nanometer in the red, 441.6 nanometer in the blue -.

Barell & Sears formula is particularly convenient for visible wave lengths:

$$N_{G_0} 10^6 = 287.604 + 3(1.6288 / \lambda^2) + 5(0.0136 / \lambda^4)$$

where λ is the wave length of the radiation in nanometers. It allows the constringency of environment to be calculated, $1/A = 21.12$.

If we use Edlen's equation with the Cauchy form for visible and near infra-red light,

$$N_{G_0} 10^6 = 272.600 + 4.608 / \lambda^2 + 0.066 / \lambda^4$$

In this case, $1/A = 21.16$.

In two-wavelength EDM instruments, the influence of temperature and pressure is practically eliminated. The only meteorological data which remains important to the refractive index is the water vapour pressure. The above formula gives the refractive index for a temperature T , a pressure p and a water vapour pressure f in millimeters of mercury:

$$N = 15 f/T$$

It is thus sufficient to know only a approximate value of water vapour in the air. Then, the measurement of ΔS gives the atmospheric correction to the optical path length. To measure ΔS , it is necessary to modulate the polarisation of the red and blue light simultaneously

under frequencies of 3 to 10 GHz. The signal-to-noise ratio allows a great accuracy to be obtained and also the reduction of systematic errors. ΔS is determined with a precision equal to a small fraction of the modulation wavelength under good atmospheric conditions.

3. LDM 2 TERRAMETER (Terratechnologies Corporation)

The first prototype, presented in June 1969 at Boulder, Colorado, at the "International Symposium on Electromagnetic Distance Measurements", is now produced in limited series. Currently, there are three instruments at the National Geodetic Survey, one at the Defense Mapping Agency, one in Japan and one at CERN. Three more instruments are under construction.

Unlike conventional EDM instruments which approximate the refractive index of air along the measurement path by sample measurement of temperature, air pressure and water vapour, the Terrameter makes a direct and precise measurement of the refractive index simultaneously by using distance measurements at two optical wavelengths, one in the red part of the spectrum and the other in the blue. The instrument calculates correction terms from the optical path length differences between the two wavelengths and computes the corrected base line distance. This automatically eliminates the first order effects of temperature, air pressure and water vapour.

The basic principle of operation is the same as that of the Fizeau velocity of light experiment. In that experiment, light was returned from a distant retro-reflector to the photodetector only if there existed a proper temporal and spatial relationship between the outgoing and incoming light. Light returned to the detector only if the transit time of the light was exactly equal to the integral number of modulation periods. The principle of the Fizeau cog-wheel was adapted first by Michelson and then by Bergstrand in 1950. A KDP crystal cell is used in the Terrameter.

In the Terrameter (Figure 1), red and blue light from the He-Ne and He-Cd lasers enters a Rochon prism at the proper angle and polarisation to make the outgoing beams co-linear. The light passes through a

microwave modulator that modulates the ellipticity of the polarized light at 3 GHz. The light, transmitted by a Cassegrainian telescope, traverses the path being measured and is then returned to the retro-reflector. The beam is received by the same optics used for transmission and passes through the modulator a second time where the ellipticity of the polarisation is increased or decreased depending upon the phase of the modulator excitation. The beams emerging from the prism are separated by colour and directed to the photodetector. The analogue outputs of the photodetectors are processed and used to control the modulator frequency for each colour. The frequencies are continually adjusted so that a minimum of light is received at the photodetectors, minima being far better defined than maxima.

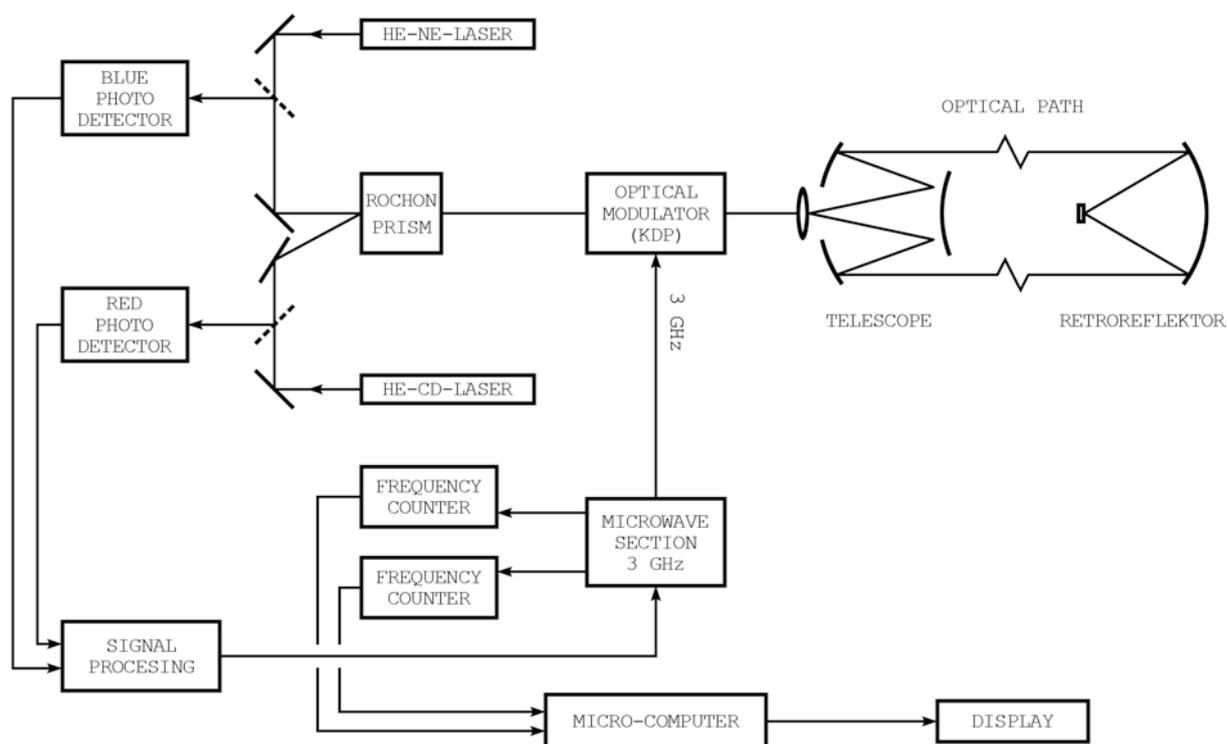


Figure 1: Scheme of the LDM 2 Terrameter

The internal frequencies are measured and the values used in the microcomputer to calculate the true distance. Since $\langle A \rangle$ is a weak function of the meteorological parameters, rough end-point values of temperature, pressure and relative humidity are entered using thumbwheels on the instrument panel. With these data the microcomputer determines the true baseline distance, which is digitally displayed on a liquid crystal readout on the back panel of the instrument. A hard copy of all input data, internal frequencies and true distance may be obtained every ten

seconds by connecting a terminal or a printer to the Terrameter's computer interface (Figure 2).

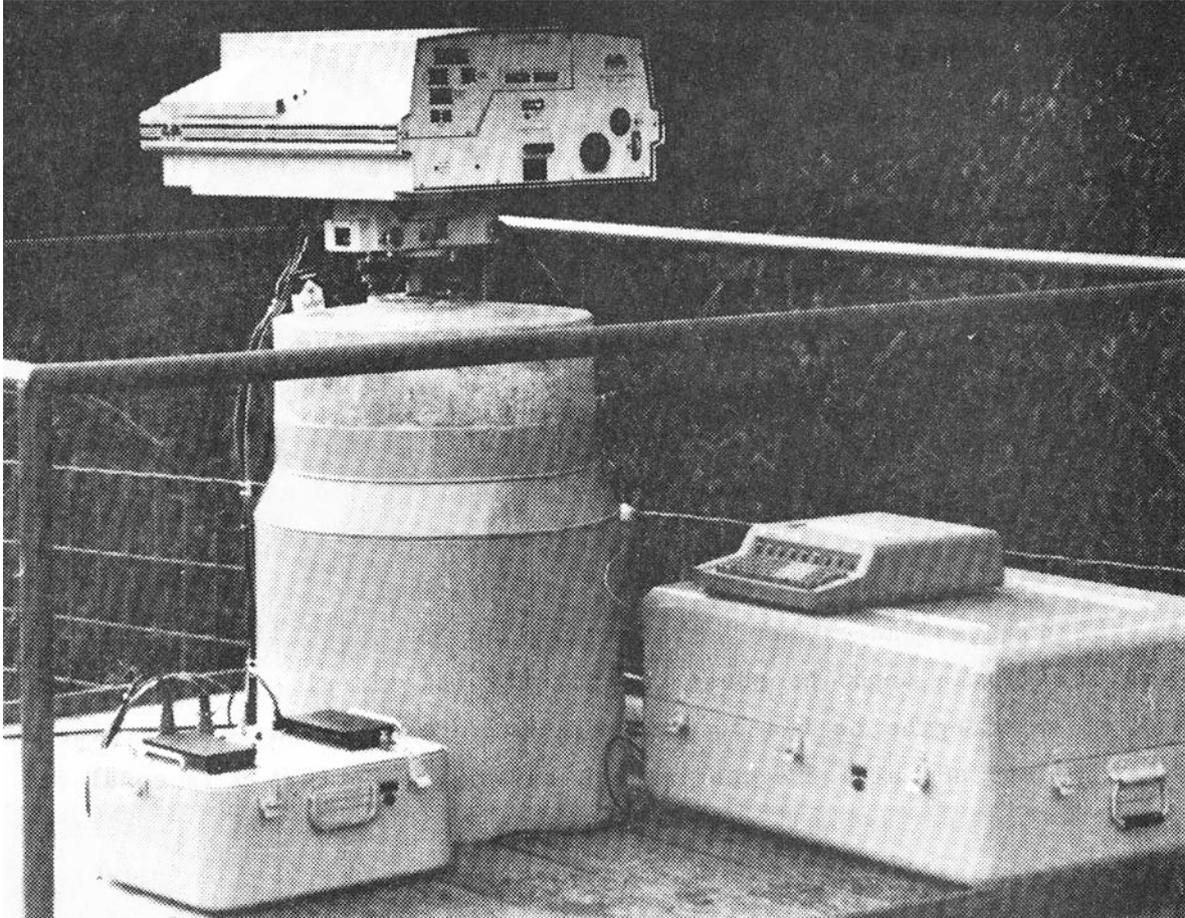


Figure 2

A rubidium frequency standard is used as the reference for counters that measure the internal frequencies that are used for the distance calculations. This standard is several orders of magnitude more accurate than ever required and no subsequent recalibration is necessary. The repeatability is $2 \cdot 10^{-10}$ after 10 minutes of warm up, with a long term stability of $4 \cdot 10^{-11}$.

The laser beam from the instrument are directed to a distant retroreflector (Figure 3). An aligning telescope is used to acquire the reflected beam. The operator can then fine adjust the pointing of the instrument by viewing the frosted glass aperture mounted on the rear of head.

Figure 3



The Terrameter's range varies from 350 m to 15 km. The outgoing power of the He-Ne laser is 5 mw and that of the He-Cd laser is 10 mw. The polarisation is modulated at 3 GHz, i.e. a modulation wavelength of 10 cm. The beam dispersion is limited by the atmosphere at $2 \cdot 10^{-4}$ radians.

The frequencies are servo-controlled in order that the return signal arrives in opposite phase to the outgoing signal. Thus, the number N of wavelengths on the outward and return path is an integer plus a half. The red and blue frequencies are adjusted such that N is equal for the two colours. The ratio of the two indices is equal to the ratio of the two frequencies. Due to the dispersion, it is possible to calculate n_B and n_R indices, all the other parameters are known except N . It is thus necessary to determine an approximate value of the distance to better than half a wavelength (0.05 m).

The Terrameter (Figure 4) is now in operation in the USA, in Japan and in Europe (CERN). It is automatic, apart from the introduction of the approximate distances and meteorological values. However, due to its elaborate optical and electronic system, it needs maintenance and internal adjustments which require the presence of an electronics engineer throughout all the observation period. Also its bulkiness and its weight inhibit its easy use in all field geodetic measurements (Figure 5).

It has principally been used to measure the deformations of the earth's crust, the stability of large construction sites, landslips and so on. It can also be adapted to the measurement of geodetic networks of the particular type as those of CERN.

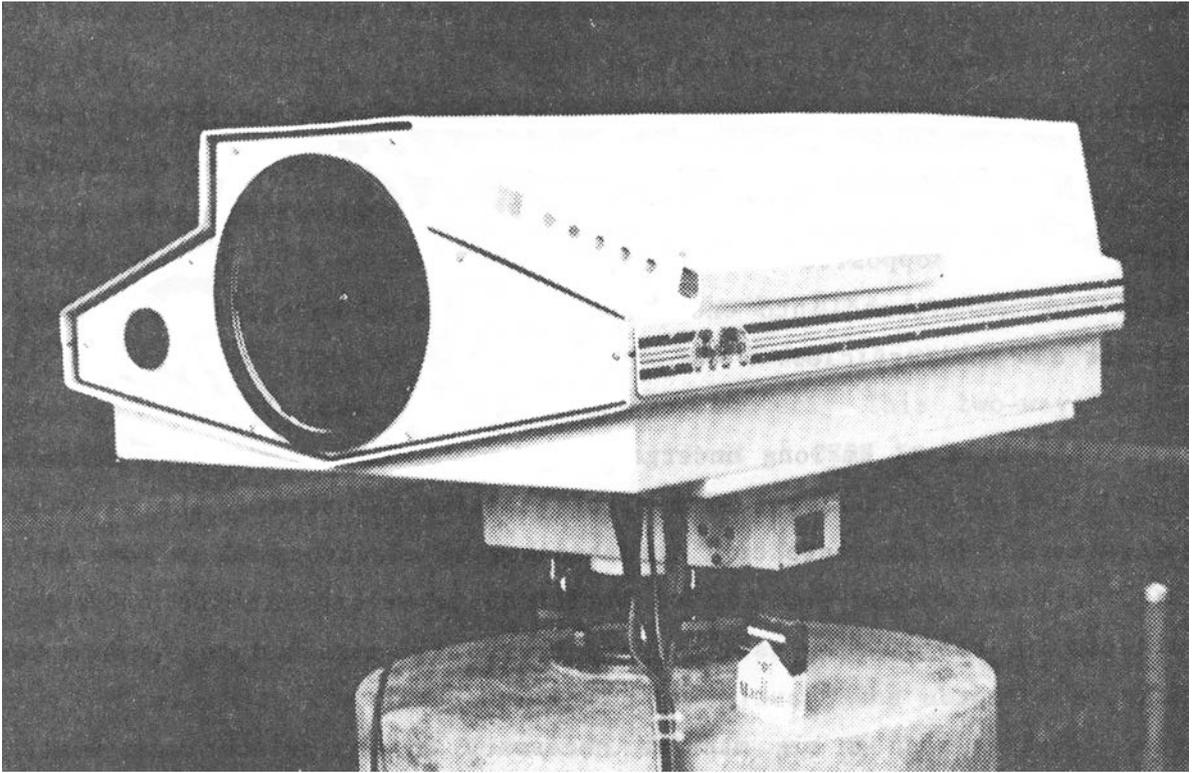


Figure 4



Figure 5

4. THE LEP PROJECT

LEP (Large Electron-Positron Collider) is intended to develop more exactly the extensive new synthesis of electro-weak interaction born out of the discoveries of W and Z₀ bosons. In such a machine, electrons and their antiparticles, positrons, are accelerated simultaneously. Whilst turning in opposite directions, they collide head-on and are annihilated and transformed into energy which, in turn, materializes in new particles and antiparticles.

LEP is a 27 km-long underground ring located in the Pays de Gex and partially in Switzerland, with eight experimental areas. The machine accelerates and brings into collision bunches of electrons 10 cm long and 5 mm wide with similar bunches of positrons travelling in the opposite direction.

Why is such a big machine necessary to manipulate such small bunches of electrons and positrons? The difficulty comes from the fact that at high energy electrons travelling on a circular orbit emit synchrotron radiation which slows them down. The radiated power and therefore deceleration of the particles diminishes when the radius of curvature increases. This explains the choice of the radius of LEP. For geological reasons however, namely to avoid going underneath the Jura, CERN has decided to choose a radius smaller than the optimum theoretical one. The tunnel will be bored in a sloping plane in order to remain within the Chattian molasse which represents the most favorable layer for boring.

It is at each of the eight intersecting points that the four bunches of positrons travelling clockwise and the four bunches of electrons travelling anti-clockwise will collide. It is here that the collisions between these particles will be studied and where the detectors will be installed. During the first phase of the project, the experimental halls will be located on points 2, 4, 6 and 8.

LEP will be fed by the existing machines of CERN, which represents an important economy. The presence on the same site of this succession of accelerators also allows electron - proton collisions to be

envisaged. To make use of these advantages, LEP has to pass close to the SPS and the two machines have to be connected together.

5. MEASUREMENT OF THE LEP GEODETIC NETWORK WITH THE TERRAMETER

The precisions required during the various steps of the construction of LEP necessitate, as it has been the case for the SPS, a surface geodetic network of very high standard. This is why, as soon as the project was approved, the decision was taken to equip the Applied Geodesy Group of CERN with a LDM 2 Terrameter. This two-wavelengths electronic distance measurement device arrived at CERN in Autumn 1982.

The first critical operation was to determine the instrumental constant of the device. The Applied Geodesy Group has at its disposal a 500 m long outside base-line which has a pillar with forced centering at every 50 m. With the new model of the Distinvar, the absolute accuracy on a distance of 50 m is 0.03 mm, which means, on the 500 m of the base, a precision of 0.1 mm (relative precision of $2 \cdot 10^{-7}$).

It has been necessary to increase the length of this base by building two more pillars one of which is located at 478 m to the North and the second at 549 m to the South.

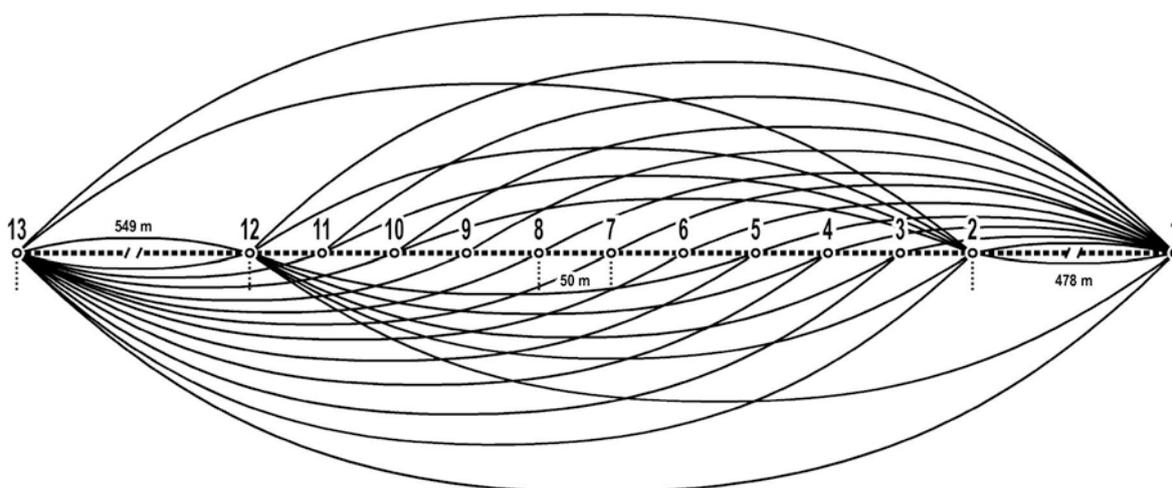


Figure 6: Determination of the constant of the Terrameter

Figure 6 shows all the measurements carried out with the Terrameter. Values measured with the Distinvar between pillars 2 and 12 have been included in the adjustment, the results of which have given a constant for the set instrument-reflector of 0.0275 m.

The constant of the set instrument-reflector being determined with the maximum accuracy, it was possible to measure a geodetic figure, the nucleus of the LEP network, in order to carry out the acceptance tests of the Terrameter.

Figure 7 shows the location of the geodetic points which surround the LEP ring. All the points have been stationed, except the pillar of point 232 located on the water tower of Collex-Bossy. The wooded, hilly and rather dense urbanization of the area meant that all pillars could not be positioned at ground level.

At each point, the pillar is equipped with a forced centering reference socket. The Terrameter has a locating cylinder with an expanding locking system. Each distance was measured 100 times. One measurement is displayed every ten seconds, that means a little more than a quarter of an hour per distance. Measurements were taken at different times of the day and over several days.

Table 1 shows the comparison of reciprocal distance measurements between all the pillars, except pillar 232 which had not been stationed. The r.m.s. value of these differences, expressed as a relative value is $0.9 \cdot 10^{-7}$. Therefore, relative precision of independent measurements carried out under different conditions is as stated by the manufacturer.

The network has been computed by a tridimensional programme of adjustment imposing at each point the measured normal altitude converted to the ordinate Z above the XY plane of the CERN Cartesian system. This transformation makes use of a local reference ellipsoid with the parameters recommended by UGGI (Canberra 1979) and will include the computation of geoidal heights.

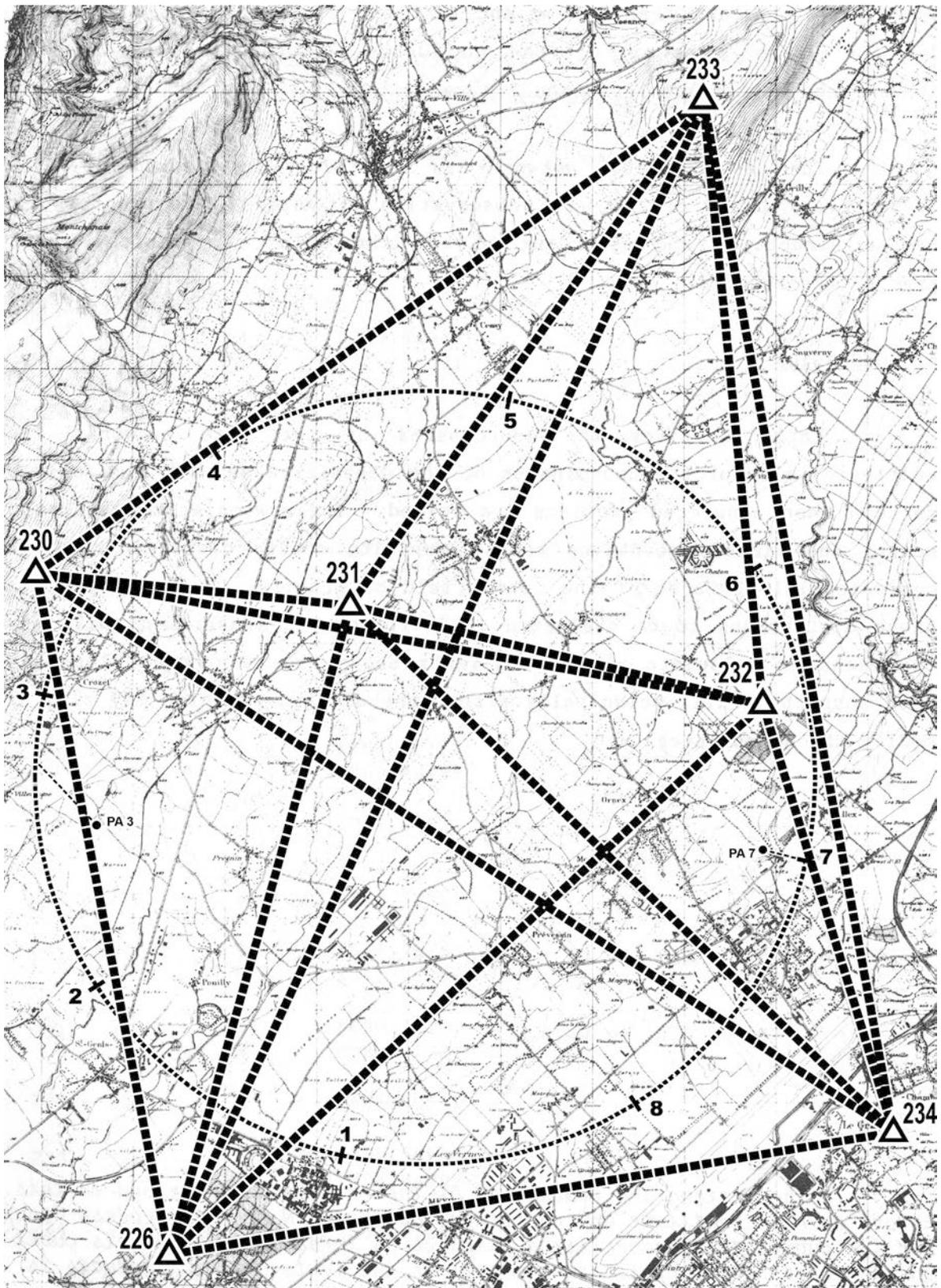


Figure 7

Table 2 shows that the residues on the distances after adjustment are less than 2.5 mm and that the r.m.s. value of these residues is 1.3 mm. The axis of the confidence ellipses resulting from the co-variance matrix are less than 2.0 mm.

The test geodetic network has relatively low redundancy. The definitive network of LEP, the observation of which is in progress, is better structured and according to the simulation computation, should give better results.

6. CONCLUSION

Table 2 gives the coordinates of the test network. The intrinsic value of the coordinates of the definitive network will only be certain when connected problems are solved. The Newtonian attraction of nearby and distant mountains around the site create distortions of the equipotential surfaces of the local field of gravity. Mass models allow these distortions to be evaluated. Astrogeodetic measurement will give the means to calculate the true heights above the reference ellipsoid. This correction will principally affect the altitudes, which may slightly modify the coordinates.

The testing and evaluation of the instrument described in this report do not constitute an endorsement by the CERN Applied Geodesy Group. Use for publicity or advertising purposes of information from this publication concerning proprietary products or the tests of such products is not authorized.

Table 1: LEP geodetic network, June 1983

COMPARISON OF RECIPROCAL OBSERVATIONS WITH THE TERRAMETER
(without addition of the instrumental constant)

PILLARS	SIGHTS	DISTANCES	in mm	RELATIVE PRECISION
226 - 230	A	7482.33805	0.02	$0.03 \cdot 10^{-7}$
	R	7482.33803		
226 - 231	A	7314.84645	0.46	$0.6 \cdot 10^{-7}$
	R	7314.84691		
226 - 232	A	8808.13369		
226 - 233	A	13663.40556	0.32	$0.2 \cdot 10^{-7}$
	R	13663.40524		
226 - 234	A	7755.90733	1.27	$1.6 \cdot 10^{-7}$
	R	7755.90860		
230 - 231	A	3543.57321	0.91	$2.6 \cdot 10^{-7}$
	R	3543.57230		
230 - 232	A	8110.89990		
230 - 233	A	8869.18119	0.29	$0.3 \cdot 10^{-7}$
	R	8869.18148		
230 - 234	A	11001.47017	1.06	$1.0 \cdot 10^{-7}$
	R	11001.46911		
231 - 232	A	4593.22481		
231 - 233	A	6541.98778	1.09	$1.7 \cdot 10^{-7}$
	R	6541.98669		
231 - 234	A	8080.72270	0.49	$0.6 \cdot 10^{-7}$
	R	8080.72221		
233 - 232	A	6458.90541		
233 - 234	A	11294.64935	0.43	$0.4 \cdot 10^{-7}$
	R	11294.64892		
234 - 232	A	4861.91680		
				$0.9 \cdot 10^{-7}$

Note: Pillar 232, water tower of Collex-Bossy, non stationed.

Table 2: Results of the LEP geodetic measurements

Fixed points in X Y Z :

No	X (m)	Y (m)	Z (m)	DX(mm)	DY(mm)	EQX(mm)	EQY (mm)
226	1288.2656	723.7339	2500.8843				
233	-1150.7310	14165.7641	2729.9665	-13.0	71.5		1.5

Fixed points in Z :

No	X (m)	Y (m)	Z (m)	DX(mm)	DY(mm)	EQX(mm)	EQY (mm)
230	-4176.6449	5828.7078	2745.4066	-29.0	13.3	1.7	1.8
231	-1130.9828	7626.9147	2527.4834	-15.4	48.7	1.8	1.5
232	3132.0103	9336.7623	2491.8598	32.0	40.3	1.8	1.6
234	6815.9375	6164.0805	2456.1840	37.5	0.5	1.6	2.0

Distances

Pillars	Observed Distances	Residues (mm)	Compensated distances
231 - 226	7314.87420	-0.60	7314.87360
231 - 230	3543.60020	-0.82	3543.59938
231 - 232	4593.25230	-1.01	4593.25129
231 - 233	6542.01470	-1.22	6542.01348
231 - 234	8080.75000	-0.67	8080.74933
230 - 232	8110.92740	1.83	8110.92923
226 - 230	7482.36550	0.24	7482.36574
226 - 232	8808.16120	1.72	8808.16292
226 - 234	7755.93550	-0.57	7755.93493
234 - 230	11001.49710	2.51	11001.49961
234 - 232	4861.94430	-0.01	4861.94429
233 - 226	13663.43290	-1.44	13663.43146
233 - 230	8869.20880	2.05	8869.21085
233 - 232	6458.93290	0.90	6458.99380
233 - 234	11294.67660	-0.69	11294.67591

LIST OF FIGURES

- Figure 1: Scheme of the Terrameter
- Figure 2: Terrameter on a pillar of the geodetic base
- Figure 3: Retroreflector
- Figure 4: Terrameter frontview
- Figure 5: Terrameter on station with its accessories
- Figure 6: Determination of the constant of the Terrameter on the geodetic base
- Figure 7: Test geodetic network
- Table 1: Comparison of the reciprocal observations
- Table 2: Results of the LEP geodetic measurements

BIBLIOGRAPHY

- CRUSET, J., "Cours d'Optique Appliquée et de Photographie", Vol. 6, (p. 501-508), I.G.N., Paris, 1948.
- PRILEPIN, M.T., "Light Modulating Method for Determining the Average Index of Refraction of Air along a Line", Translation, Institute of Geodesy, Aeronomy and Cartography, URSS, no 114, (p. 127-130), 1957.
- BENDER, P.L. & OWENS, J.C., "Correction of Optical Distance Measurements for the Fluctuative Atmospheric Index of Refraction", Journal of Geophysical Research, Vol. 70, No 10, (p. 2461-2462), The American Geophysical Union, Washington D.C., 1965.
- FROOME, K.D. & ESSEN, L., "The Velocity of Light and Radio Waves", Academic Press, London, 1969.
- HERNANDEZ, E.N. & HUGGETT, G.R., "Two Color Terrameter - Its Application and Accuracy", Technical Papers, The American Congress on Surveying and Mapping, Washington D.C., 1981.
- GERVAISE, J., "Applied Geodesy for CERN Accelerators", Chartered Land Surveyor / Chartered Minerals Surveyor, Vol. 4, No 4, RICS Journal Limited (p. 10-36), London, 1983.
- GERVAISE, J., "Instruments électroniques de Mesure de Distances à deux Longueurs d'Ondes", Proceedings XVII Congrès de la FIG, No 503.2, Sofia, 1983.

DIE ARBEITSWEISE DES PRÄZISIONSENTFERNUNGSMESSERS

POLARODIST

von

Michael SCHERER

Geodätisches Institut
Universität Bonn
Nussallee 17
Bundesrepublik Deutschland

ZUSAMMENFASSUNG

Der vorgestellte Präzisionsdistanzmesser erhielt wegen der gleichmäßigen Polarisationsmodulation der Trägerwelle den Namen Polarodist. Die konsequente Nutzung dieser Modulationsart führte zu einer speziellen Methode der Phasenmessung mittels beweglicher Bauteile, die inzwischen durch ein opto-elektrisches Verfahren zur Phasenmessung abgelöst wurde. Der Vorteil der Polarisationsmodulation für die Streckenmessung wurde experimentell nachgewiesen.

ABSTRACT

The presented high precision electrooptical range finder was named Polarodist because the emitted light is nearly perfectly varying its type of polarization. It is shown how this way of modulating the light enabled the phase-measurement by using optomechanical methods. The methods were meanwhile replaced using an optoelectrical modulator. Finally it is proved by experiments, that there are advances concerning precision of the measurements when the light varies its polarization in the described way.

1. EINLEITUNG

Bei der Entwicklung eines Gerätes von der Idee zur ausgereiften Konstruktion sind - entsprechend der qualitativen Rangfolge - die Reifestadien

- Funktionsmuster,
- Entwicklungsmuster,
- Versuchsmuster,
- Labormuster und
- Prototyp

zu unterscheiden. Der unter dem Namen Polarodist bekannte Bonner Präzisionsdistanzmesser befindet sich im Stadium des Labormusters; seine weitere Vervollkommnung soll ihn für den Feldeinsatz uneingeschränkt tauglich machen.

Der funktionsfähige Entfernungsmesser ist innerhalb des vergangenen Jahres in zweierlei Hinsicht verändert worden; periphere großvolumige Geräte konnten inzwischen in den Distanzmesser integriert werden und es erfolgte ein entscheidender Umbau bei der Art der Phasenmessung, also der Methode zur Ermittlung der Reststrecke.

2. DIE FUNKTIONSWEISE DES POLARODIST

Elementare Voraussetzung für die Konstruktion eines Präzisionsentfernungsmessers sind

- ein kleiner Maßstab, da die Phasenauflösung mit etwa 10^{-4} anzusetzen ist,
- hohe Lang- und Kurzzeitstabilität der Gerätekonstanten, insbesondere des optischen bzw. des mechanischen Nullpunktes,
- hohe Frequenzstabilität oder Messung der aktuellen Maßstabsfrequenz.

Die Maßstabsfrequenz von etwa 640 MHz des Polarodist (Wellenlänge rund 47 cm) entspricht größenordnungsmäßig der Frequenz von 500 MHz des Mekometers, dem bekanntesten elektrooptischen Präzisionsentfernungsmesser für den Nahbereich. Maßstabs- und Trägerwelle entstehen jedoch beim Polarodist auf eine ganz andere Art: Die Strahlungsquelle ist ein HeNe-Laserrohr; zwischen den Resonatorspiegeln bilden sich zwei Schwingungsrichtungen (Moden), die senkrecht aufeinander stehen; in beiden Richtungen hat man

stehende Wellen linear polarisierten Lichtes, wobei sich die Anzahl der Wellen zwischen den Spiegeln für die beiden Schwingungsrichtungen um eine halbe Wellenlänge unterscheidet. Der Vektor zur Charakterisierung des aus beiden Wellenzügen zusammengesetzten emittierten Laserlichtes ändert entsprechend der Phasenlage der beiden Anteile seine Amplitude und/oder seine Richtung, so daß lineare, elliptische und zirkulare Polarisation gleichmäßig, wechselweise rechts- und linksläufig, aufeinander folgen (Abbildung 1). In einer Momentaufnahme würde die Modulationswelle als rechts- bzw. links-

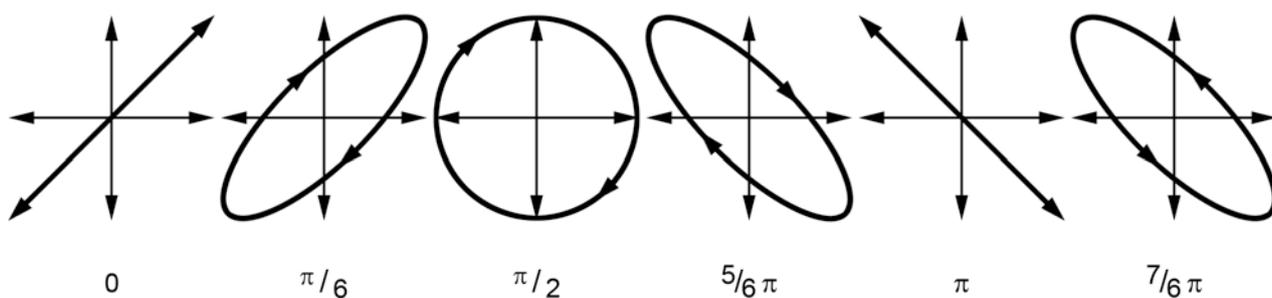


Abb. 1 Querschnitte durch die Modulationswelle bei unterschiedlicher Phasenbeziehung der horizontalen und vertikalen Komponente

läufig gedrehte Spirale erscheinen, die in den Umkehrpunkten des Drehsinns in zueinander senkrechten Richtungen zusammengedrückt ist (lineare Polarisation). Man kann das Laserrohr so ausrichten, daß die Ebenen der linearen Polarisation, die im Rhythmus der 640 MHz auftritt, abwechselnd horizontal bzw. vertikal liegen.

Die Variation der Polarisation des Lichtes wird allgemein als Polarisationsmodulation bezeichnet. Dabei ist die Durchmodulation hier von Natur aus sehr gleichmäßig, da die Änderung der Polarisationsart durch die kontinuierliche Phasenverschiebung zwischen den beiden zueinander rechtwinklig angeordneten Moden im Plasmarohr entsteht. Auch bei der elektrooptischen Modulation mit Kerr- oder Pockelszelle liegt Polarisationsmodulation vor; dort wird aber mit Umkehrpunkten gearbeitet und nur ein Teil der möglichen Polarisationsarten erreicht: die Durchmodulation ist nicht so perfekt.

Da optische Sensoren (Dioden, SEV) nur Intensitätsänderungen zu detektieren vermögen, muß die Polarisationsmodulation in eine Amplitudenmodulation umgewandelt werden, z.B. durch einen Linearpolarisator (Analysator), der in

den Weg des polarisationsmodulierten Lichtes eingeschaltet wird; er läßt das Licht in nur einer Ebene passieren. Die dem augenblicklichen Polarisationszustand entsprechende Ausgangsspannung erhält man am Detektor.

Mit dem beschriebenen Laser-Maßstabsgenerator, bei dem eine Stabilität von 1×10^{-7} erreichbar ist, könnte man einen Distanzmesser nach dem herkömmlichen Prinzip der 3-Wege-Systeme (abwechselnd Phasenmessung zwischen Bezugssignal und internem Signal bzw. Phasenmessung zwischen Streckensignal und internem Signal sowie Ermittlung der Reststrecke aus der Differenzbildung) aufbauen.

2.1 Das mechanisch-optische Phasenmeßsystem

Beim Polarodist in der ursprünglichen Form (Abbildung 2), *SCHERER* 1982, wurden die drei Wege auf zwei Signallaufstrecken reduziert, auf das Bezugssignal (innerer Weg) und das Streckensignal (freie Strecke).

Man betrachte zunächst nur den Verlauf des Streckensignals. Der HeNe-Laser emittiert das perfekt polarisationsmodulierte Licht, das, aufgeweitet von der Sendeoptik, die Strecke durchläuft, am Endpunkt reflektiert wird und, von der Empfangsoptik gebündelt, durch einen Linearpolarisator zur Empfangsdiode gelangt. Am Polarisator geschieht die Umwandlung in die Intensitätsmodulation. Man stelle sich vor, der kontinuierlich mit Lichtgeschwindigkeit aus dem Plasmarohr austretende Strahl würde für einen Moment eingefroren, der Linearpolarisator lasse Licht in Horizontalrichtung passieren und im Augenblick der Betrachtung befinde sich gerade die Horizontalkomponente der Maßstabswelle am Polarisator. Es würde dann das Maximalsignal detektiert werden. Verlängerte man die Meßstrecke um ein Viertel der Maßstabswelle, so träte an die Stelle der Horizontalpolarisation am Polarisationsfilter gerade die Vertikalpolarisation und an der Empfangsdiode würde dann ein Signalminimum festgestellt werden.

Wegen des kleinen Maßstabs könnte man zum Ausmessen des Reststücks einen optisch-mechanischen Phasenschieber einsetzen, analog dem Reflektorsystem im Mekometer. Ausgehend von der Vorstellung des eingefrorenen Modulationsignals erkennt man aber auch die Möglichkeit, durch Drehung des Linearpolarisators um 90° Maximal- und Minimalsignal an der Diode zu vertauschen,

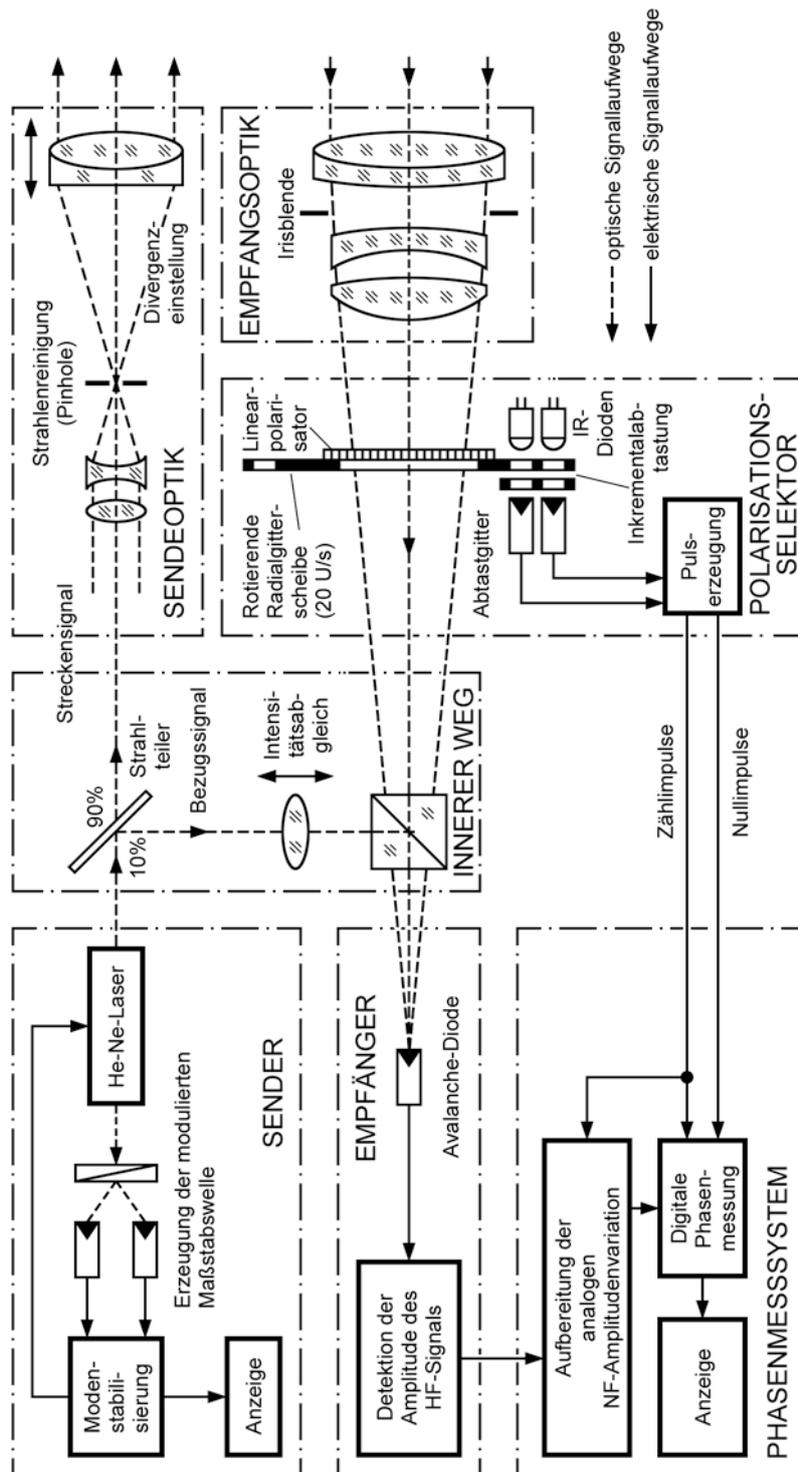


Abb. 2 Blockschaltbild des Polarodist mit optisch-mechanischem Phasenmeßsystem

diese Winkeldrehung des Linearpolarisators also zur Phasenmessung zu nutzen.

Da sich das emittierte Signal mit Lichtgeschwindigkeit fortbewegt, seine Phasenlage somit fortwährend ändert, braucht man einen relativ zum Streckensignal festen Bezug; dieser ist über den inneren Weg hergestellt. Das Bezugssignal wird vom emittierten Laserlicht abgespalten; es ist also phasestarr mit dem Streckensignal verbunden.

Bei der Zusammenführung von Bezugs- und Streckensignal wird, unmittelbar abhängig von der Länge der Reststrecke, eine Phasenverschiebung der beiden Signale zueinander beobachtet. Beide Signale werden ständig gleichzeitig auf die Empfangsdiode projiziert. Ist die Reststrecke gleich Null, so treffen sie phasengleich ein, und bezüglich der detektierten 640 MHz stellt man eine Maximalamplitude fest; entspricht das Reststück einem Viertel der Modulationswellenlänge, so sind die jeweiligen Signalmaxima symmetrisch ineinandergeschachtelt, so daß bezüglich der 640 MHz ein Minimum detektiert wird.

Um die aktuelle Phasenlage beider Signale zueinander auszumessen, benötigt man eine definierte Phasenverschiebung. Diese wird durch Drehung des Linearpolarisators erreicht, der als Phasenschieber fungiert (s. Baugruppe "Polarisationsselektor" in Abbildung 2). Die Winkelstellung des Polarisationsfilters bei maximaler Amplitude der 640 MHz liefert das Maß für die Länge der Reststrecke.

Um die nötige Schärfe der Phasenmessung zu erreichen, rotiert der Polarisator niederfrequent. Man erhält ein entsprechend niederfrequent variierendes sinusförmiges Ausgangssignal, dessen Phasenlage mit der Winkelstellung des Filters (abgeleitet aus Zählimpulsen von der rotierenden Filterscheibe) verglichen wird. Dieses dynamische Meßverfahren erlaubt die Auflösung der Reststrecke innerhalb $\pm 0,1$ mm.

2.2 Phasenmessung mit Kristallmodulator

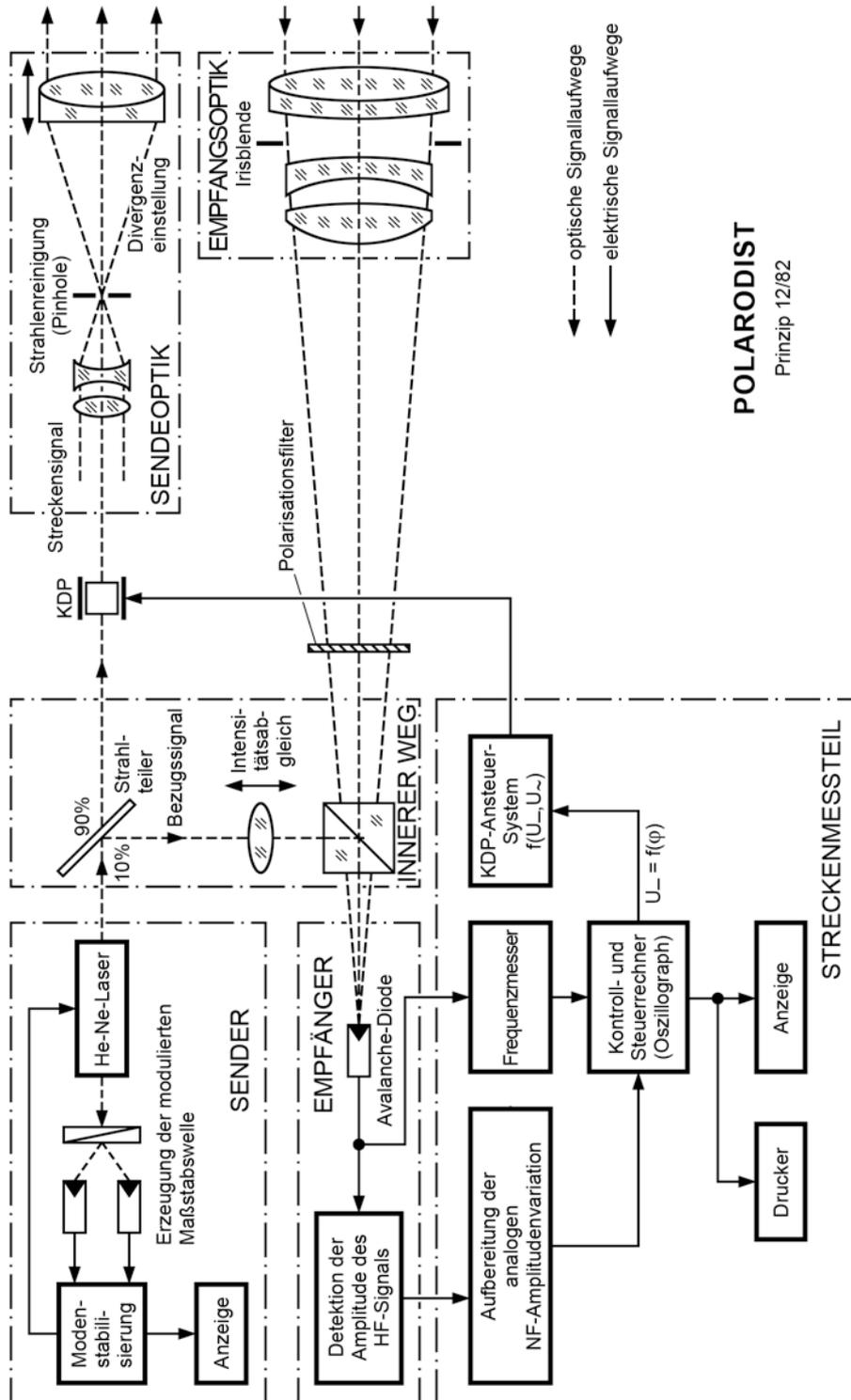
Einige Baugruppen des funktionstüchtigen Labormusters des Polarodist, wie es vorgestellt wurde (vgl. Abbildung 2) sind verbesserungswürdig.

Der Maßstab ist erst stabil, wenn sich das Laserrohr in thermischem Gleichgewicht befindet. Seine Aufheizung geschieht zur Zeit durch die Zuführung elektrischer Energie, die im Laserprozess in Wärme umgesetzt wird. Die Zeitdauer bis zur Stabilisierung kann je nach Temperatur des Labors bis zu einer Stunde betragen. Eine wesentliche Beschleunigung ist durch den Einbau des Laserrohrs in einen Ofen mit Heizwendeln zu erwarten. Derzeit noch auftretende Störungen des Regelvorganges zur Stabilisierung der Rohrlänge durch Schwankungen der Außentemperatur können ausgeschaltet werden, wenn der Ofen bei etwa 55°C thermostatiert wird. So ist die dauerhafte Frequenzstabilisierung bei 1×10^{-7} zu erreichen.

Infolge der Rotation der relativ großen Masse des Polarisationsfilters und der zugehörigen Codescheibe besteht die Gefahr der Vibration des Gerätes; damit ist auch die optimale Nullpunktstabilität gefährdet. Obwohl Fehlerinflüsse wegen eventueller Vibration bisher auch bei Messungen längerer Strecken bis 1,6 km nicht festgestellt wurden, ist das Phasenmeßsystem mit dem rotierenden Filter inzwischen durch ein prinzipiell besseres Verfahren ersetzt worden.

Abbildung 3 ist zu entnehmen, daß ein Modulationskristall die Stelle der rotierenden Bauteile einnimmt. Auf das Streckensignal wirkt der Kristall, eine KDP-Pockelszelle, als Phasenschieber. In Abhängigkeit von der angelegten Gleichspannung ändert sich die relative Phasenlage zwischen dem Bezugssignal und dem Streckensignal. Diese Gleichspannung läßt sich so einstellen, daß die Phasendifferenz z.B. zu Null gemacht wird, also ein 640 MHz-Signal mit maximaler Amplitude empfangen werden kann. Die Höhe der hierzu erforderlichen Gleichspannung am KDP ist somit direkt ein Maß für die Länge des Reststücks.

Zur Steigerung der Meßgenauigkeit wird auch hier ein dynamisches Meßverfahren angewandt: der Gleichspannung ist eine Wechselspannung überlagert, so daß ein hochfrequent polarisationsmoduliertes Signal vorliegt, das niederfrequent phasenmoduliert ist. Bei dieser dynamischen Meßmethode sind Parallelen zur Frequenzvariation beim Mekometer oder zur Rotation der Filterscheibe im alten Phasenmeßsystem zu ziehen. Während beim alten Phasenmeßsystem aber die Phasenlage zwischen dem Bezugssignal und dem polarisationsmodulierten Streckensignal unverändert blieb, also je nach Winkelstellung des Filters



POLARODIST

Prinzip 12/82

Abb. 3 Blockschaltbild des Polarodist mit Kristalldemodulator

immer nur eine andere Richtung des Lichtvektors wirksam war, ist bei der Version mit Kristallmodulator die Phasenbeziehung durch die Spannungsvariation zu verändern, wohingegen die Polarisationsrichtung konstant bleibt. Dadurch ist, unabhängig von der Länge der Reststrecke, eine gleichmäßige Meßgenauigkeit gewährleistet; ein wichtiger Vorteil der Phasenmessung mit Kristallmodulator gegenüber dem Verfahren mit rotierendem Filter.

Der Präzisionsdistanzmesser Polarodist arbeitet in wesentlichen Details anders als die bekannten Geräte. Er wurde in groben Zügen skizziert, die Entwicklung des Phasenmeßsystems schwerpunktmäßig herausgestellt. Allen Präzisionsdistanzmessern gemeinsam ist, daß sie die Polarisationsmodulation nutzen und nicht, wie weitreichende Distanzmesser geringerer innerer Genauigkeit, linear polarisiert amplitudenmoduliertes Licht.

3. VORTEILE DER POLARISATIONSMODULATION

Mit dem Labormuster des Polarodist läßt sich der Vorteil der Polarisationsmodulation für die elektrooptische Präzisionsstreckenmessung gegenüber der Intensitätsmodulation linear polarisierten Lichtes auf experimentell einfache Art verdeutlichen: bei ansonsten gleicher Bauteilanordnung war das Polarisationsfilter (s. Abbildung 3) abwechselnd in den ausgehenden bzw. in den reflektierten Lichtstrahl geschaltet; es wurden also beide Typen der Signalübertragung hergestellt.

Das Oszillographenbild, Abbildung 4, weist Ergebnisse auf, wie sie für die Testreihen zur Gegenüberstellung der Modulationsarten typisch sind. Jeder einzelne Punkt der oberen Linie entstand als Mittel der Signalintensität (Streckensignal, 640-MHz-Amplitude) während eines Zeitraumes von 1 Sekunde. Aus den Differenzen zu diesem Mittelwert \bar{x} wurde die zugehörige Standardabweichung s berechnet, die in der unteren Punktfolge erscheint. Die Punktreihen im Oszillographenbild setzen sich aus 125 derartigen Messungen zusammen. Die Aufnahmedauer betrug etwa 12 Minuten. Zu Beginn bestand Polarisationsmodulation, nach etwa 3 Minuten erfolgte die Umschaltung auf Intensitätsmodulation und im letzten Viertel wurden wiederum die mittleren Amplituden und Standardabweichungen bei Polarisationsmodulation aufgenommen.

Auffallend ist, daß - bei gleichartiger Versuchsanordnung - die Intensität

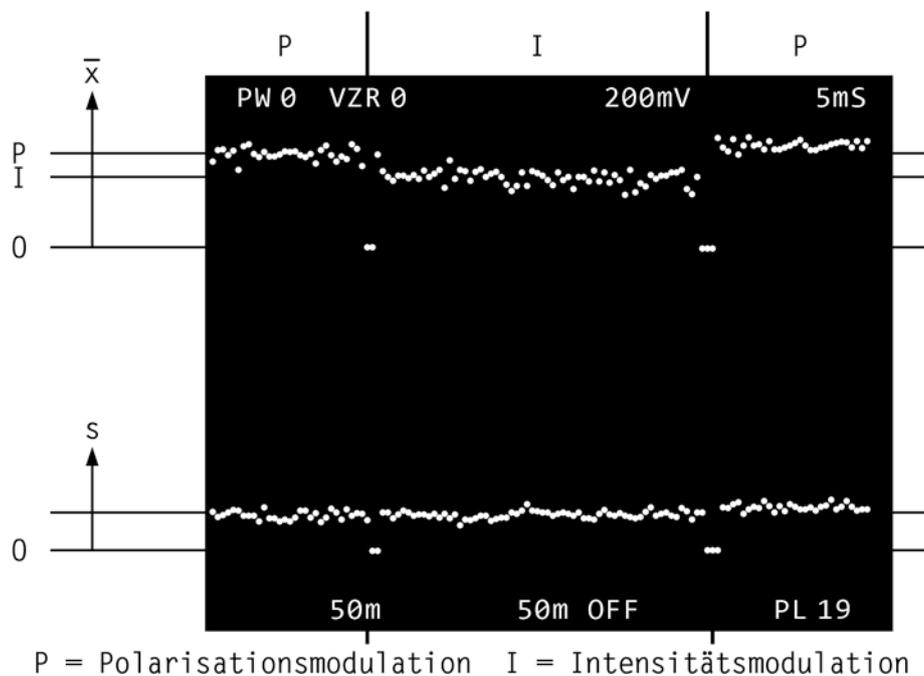


Abb. 4 Gegenüberstellung von Polarisationsmodulation (P) und Intensitätsmodulation (I)

des Signals bei der Polarisationsmodulation um rund 20% größer ist als bei der Intensitätsmodulation. Demgegenüber bleiben aber die Standardabweichungen in ihrer Größe unverändert. Die Polarisationsmodulation bietet also ein günstigeres Signal-Rausch-Verhältnis als die Intensitätsmodulation des linear modulierten Lichtes.

4. AUSBLICK

Der Präzisionsdistanzmesser Polarodist in der vorgestellten Grundkonzeption eignet sich, wie experimentell nachgewiesen wurde, gleichermaßen zum Einsatz im Nahbereich wie auch zur Messung langer Strecken. Um seine hohe innere Genauigkeit dann aber voll nutzen zu können, muß man die äußere Genauigkeit durch die integrale Erfassung der Einflüsse der Atmosphäre - insbesondere bezüglich Temperatur und Luftdruck - steigern.

Derzeit werden zwei Wege verfolgt:

- 1) die Vervollkommnung des bestehenden Gerätes zu einem flexibel einzusetzenden Präzisionsdistanzmesser für den Nahbereich durch die Weiterentwicklung der internen Datenerfassung und -auswertung bzw. durch die Integration peripherer Geräte oder deren Einsatz.

2) die Konzeption eines Zweifarben-Entfernungsmessers nach dem Dispersionsverfahren, in die grundlegende Erfahrungen aus der Konstruktion des Polarodist einfließen.

LITERATUR

SCHERER, M.: *Entwicklung eines weitreichenden Präzisionsdistanzmessers*.
Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Heft 272, München 1982.

ZUR PRÄZISEN MECHANISCHEN LÄNGENMESSUNG IM NAHBEREICH
- VORSTELLUNG UND VERGLEICH DER GERÄTEENTWICKLUNGEN
DISTINVAR, DISTOMETER UND MPL 60 -

von

Klaus-Jürgen Dallmann
Wolfgang Niemeier

Geodätisches Institut
Universität Hannover
Nienburger Str. 1
3000 Hannover 1
Bundesrepublik Deutschland

ZUSAMMENFASSUNG

Für den absoluten Nahbereich bis ca. 50 m erreicht man mit mechanischen Längenmeßgeräten Genauigkeiten, die mit elektrooptischen Entfernungsmeßgeräten gerade für diesen Entfernungsbereich nicht erreicht werden. Neben den schon länger verfügbaren Sonderentwicklungen DISTINVAR und DISTOMETER wird hier besonders das neue MPL 60 vorgestellt, das sich bei einer nur geringfügig niedrigen Genauigkeit durch seine universellere Anwendbarkeit auszeichnet.

ABSTRACT

For extremely short distances with mechanical length measuring devices even now a better precision can be achieved than with EDM-instruments. Besides the existing special developments DISTINVAR and DISTOMETER the new instrument MPL 60 is introduced, with gives an almost adequate precision, but allows a much broader application.

Geodätisches Seminar "Elektrooptische Präzisionsstreckenmessung",
23. Sept. 1983, HSBw München, Bundesrepublik Deutschland

1. EINFÜHRUNG

Besonders in der Ingenieurvermessung sind in den vergangenen Jahren die Genauigkeitsansprüche an die Vermessungsarbeiten gesteigert worden. Durch die Entwicklung von elektronischen Streckenmeßgeräten konnten größere Ingenieurprojekte schneller und präziser in ihren Eigenschaften beurteilt werden, als es je vorher möglich war. Die mit Nachdruck vorangetriebene Entwicklung der elektrooptischen Distanzmesser (EDM) hat die mechanischen Längenmeßverfahren in den Hintergrund treten lassen. Erst kritische Untersuchungen zeigten auf, daß bei fast allen EDM-Geräten für extrem kurze Strecken ein Genauigkeitsabfall in Kauf genommen werden muß: Für den absoluten Nahbereich von 0 bis ca. 50 m können mit EDM-Geräten die in diesem Entfernungsbereich oftmals geforderten Genauigkeiten von besser als 0,5 mm praktisch nicht erreicht werden.

In diesem Meßbereich hat somit weiterhin die mechanische Längenmessung ihren Platz. Die Entwicklung verschiedener Längenmeßgeräte für sehr spezielle Vermessungsaufgaben begann schon 1960 beim CERN in Genf sowie einige Jahre später an der Technischen Hochschule Hannover und an der Eidgenössischen Technischen Hochschule in Zürich. Die mechanische Längenmessung sollte Vermessungsaufgaben außer im Kurzstreckenbereich auch in stark refraktionsbeeinflussten Bauwerksinnenräumen lösen helfen.

Im folgenden werden wir auf die drei bekanntesten mechanischen Längenmeßgeräte eingehen, das Distometer ISETH (Institut für Straßen-, Eisenbahn- und Felsbau der ETH-Zürich), das DISTINVAR (Organisation européenne pour la recherche nucléaire) und das neue MPL 60 (Geod. Institut Uni Hannover/Trelle, Bochum), das als Weiterentwicklung der Streckenmessung mit Drähten ohne Teilung (*GERIGK 1970*) anzusehen ist.

2. FUNKTIONSPRINZIPIEN DER MECHANISCHEN STRECKENMESSGERÄTE

Die mechanischen Streckenmeßgeräte der gegenwärtigen Generation haben teilweise eine Entwicklung vom rein mechanischen Funktionsprinzip zum mehr oder weniger automatisch arbeitenden Instrument erfahren. Durch die Kostensenkung in der Mikroelektronik werden Regelkreise und die Digitaltechnik auch für die mechanische Streckenmessung eingesetzt.

2.1 DAS DISTOMETER ISETH VON KERN, AARAU/SCHWEIZ

Mit diesem Instrument wird eine Streckenmessung durch rein mechanische Funktionen ausgeführt. Das DISTOMETER setzt sich aus 3 Teilen zusammen:

- Meßbolzen und Kupplungen
- Invardraht und
- Meßgerät.

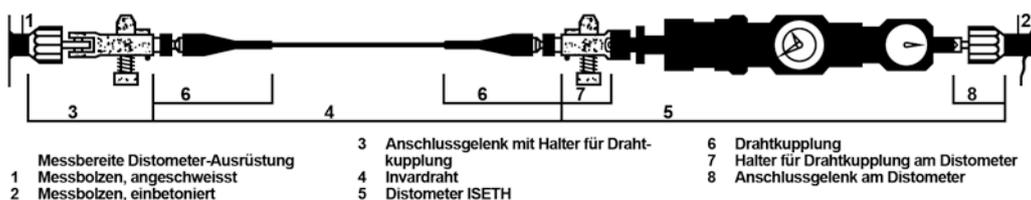


Abb. 1 Aufbau des Distometer ISETH
(Prospekt der Fa. Kern & Co. Aarau/Schweiz)

Zur Messung einer Strecke zwischen zwei Meßbolzen wird folgender Weg beschrieben:

An einem Meßbolzen läßt sich der Invardraht ankuppeln, daran schließt sich das Meßgerät an, das seinerseits wieder an den zweiten Meßbolzen angekuppelt werden kann. Das Invardraht muß die grob gemessene Streckenlänge abzüglich der Meßgerätelänge aufweisen. Letztere läßt sich nun bis zu 100 mm variieren. Das Instrument enthält eine Präzisionsstahlfeder, die eine einstellbare Zugkraft auf den Invardraht ausüben muß und eine Verstelleinheit (Grob- und Feinverstellung), mit der die Meßgerätelänge solange verändert wird, bis die erforderliche Zugkraft von $80 \text{ N} \approx 8 \text{ Kp}$ erreicht ist. Die Zugkräfteeinstellung und die Längenänderung können an Meßuhren kontrolliert bzw. abgelesen werden.

Das Meßverfahren ist für beliebig geneigte Strecken einsetzbar. Mit ein und demselben Draht sind Strecken in einem Variationsbereich von ± 50 mm meßbar, für Strecken außerhalb dieses Bereiches müssen weitere Drähte abgelängt werden. Durch diese Einschränkung ist das Instrumentarium besonders für Relativ- und Deformationsmessungen geeignet. Unbedeutend ist die Einschränkung für die Vermessung von konstanten Querschnitten wie z.B. Tunnelröhren (KOVARI, AMSTAD, GROB 1976). Eine bestimmte Anzahl von Drähten kann somit für das gesamte Projekt benutzt werden. Beschränkt man sich auf Relativmessungen, so muß nur das Meßgerät in einer speziellen Eichlehre kalibriert werden. Absolutmessungen erfordern einen Längenvergleich von Kupplungen, Draht und Meßgerät gemeinsam auf einem Komparator.

2.2 DAS DISTINVAR VON CERN

Das DISTINVAR unterscheidet sich vom DISTOMETER durch die Erzeugung der Zugkraft und deren Betrag. Konzipiert worden ist das Instrument ausschließlich zur Messung von Horizontalstrecken (GERVAISE 1978). Die Zugkraft wird durch ein Hebelsystem auf den Invardraht übertragen (siehe Abbildung 2). Das Längenverhältnis zweier rechtwinklig zueinander stehender Hebelarme beträgt 10:1.

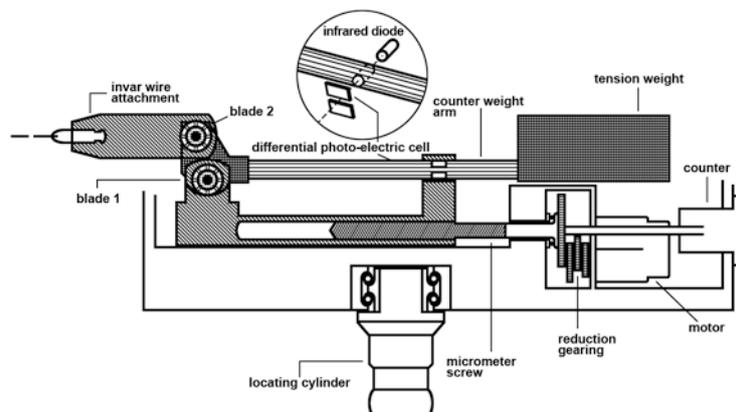


Abb. 2 Aufbau des DISTINVAR (GERVAISE 1981)

Auf dem längeren Hebelarm ist eine Masse mit einer wirkenden Kraft von 15 N angebracht, während an dem kürzeren Arm der Invardraht befestigt wird. Durch das Hebelarmverhältnis ergibt sich eine Zugkraft von 150 N für den Meßdraht. Das Hebelsystem mit seinen schneidenförmigen Lagern ist beweglich auf einer Meßspindel angebracht. Der Draht wird gespannt, indem das Hebelsystem mit Drehungen der Spindel so lange bewegt wird, bis der längere Hebelarm horizontal verläuft. Die Horizontallage erkennt eine Fotodiodenkombination. Bei der automatischen Version des DISTINVAR (*GERVAISE* 1981) wird die Meßspindel durch einen Schrittmotor gedreht. Die erforderlichen Steuerimpulse für Links- und Rechtsdrehung liefert der an der Diode angeschlossene Richtungsdiskriminator. Die Verstellbeträge der Meßspindel werden mit Hilfe eines mechanischen Zählwerkes in [mm/100]-Einheiten angezeigt. Der Meßbereich der Spindel beträgt ± 25 mm aus der Mittellage heraus.

Hinsichtlich der Einsatzmöglichkeiten findet man ähnliche Verhältnisse wie mit dem DISTOMETER. Es sind jedoch nur absolut horizontale Strecken mit einem geringeren Meßbereich pro Drahtlänge möglich (*GERVAISE* 1978). Diese Einschränkungen sind durch das Aufgabengebiet zu erklären, für das das Instrument entwickelt worden ist: Die Lage der Magnetkomponenten im Beschleunigerring des CERN sollte mit hoher Genauigkeit bestimmt werden. Der Beschleunigerring ist kreisförmig und in der Horizontalebene gebaut.

2.3 DAS NEUE DRAHTMESSGERÄT MPL 60

Ein ganz anderes Meßprinzip ist mit dem MPL 60 der Entwicklungspartner Geodätisches Institut der Universität Hannover / Fa. Trelle, Bochum, realisiert worden. Dieses Gerät arbeitet nach dem schon von *GERIGK* (1970) benutzten Prinzip der Längenmessung mit Drähten ohne Teilung, unterscheidet sich jedoch durch eine Vielzahl völlig neuer Gerätekomponenten.

2.3.1 MESSVERFAHREN

Zwischen zwei Streckenendpunkten wird ein dünner Stahldraht mit einem Durchmesser von 0,15 mm gespannt (Abb. 3).

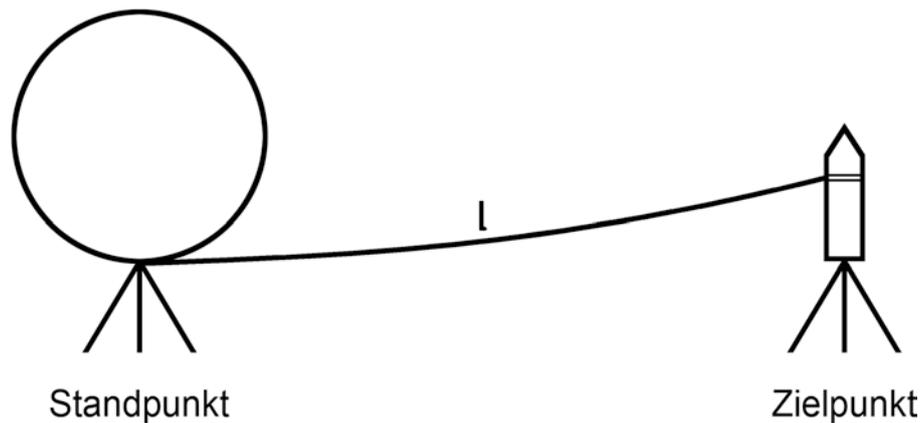


Abb. 3 Prinzip der mechanischen Längenmessung mit Drähten ohne Teilung (nach GERIGK 1970)

Der Draht wird von der Meßtrommel aus Indilatans abgewickelt und an einem Streckenendpunkt in ein spezielles Zielzeichen eingehängt. Den zweiten Streckenendpunkt bildet der Abwickelpunkt an der Meßtrommel. Der Maßstab wird durch den Trommelumfang festgelegt. Für eine Streckenmessung wird das Drahtstück l zwischen den Streckenendpunkten auf die Trommel aufgewickelt (Abb. 4).

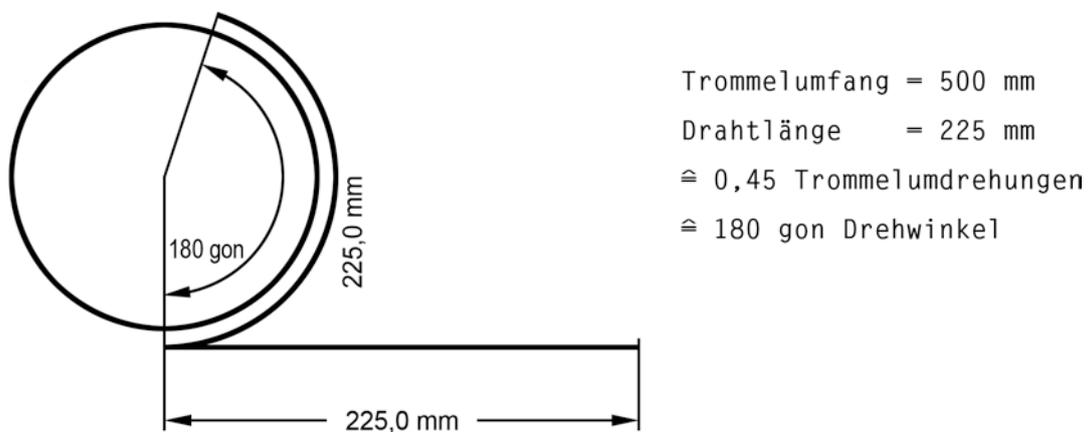


Abb. 4 Zum Zusammenhang Drahtlänge-Umdrehungszahl

Die dafür notwendigen Trommelumdrehungen werden durch einen inkrementalen Drehgeber gezählt. Eine ganze Umdrehung besteht aus 20.000 Zählimpulsen.

Das Auflösungsvermögen bei einem Trommelumfang von 500 mm beträgt somit 0,025 mm. Das Zählergebnis benutzt ein angeschlossener Taschenrechner zur Berechnung der ebenen Strecke.

Ein besonderes Konstruktionsmerkmal liegt darin, daß Temperatureinflüsse auf die Länge des Stahldrahtes keine Rolle spielen, denn es wird stets ein der Umgebungstemperatur angepaßter Draht auf die Trommel aufgewickelt: Nach Ausziehen des Drahtes nimmt dieser nach kurzer Zeit die Umgebungstemperatur an. Hierdurch bedingte Längenänderungen werden jedoch durch die konstant gehaltene Zugkraft vorweg ausgeglichen (siehe Abschnitt 2.3.2), so daß stets nur die aktuelle Drahtlänge gemessen wird.

2.3.2 AUFBAU DES MPL 60

Der Aufbau des neuen MPL 60 ist schematisch in dem Blockbild der Abbildung 5 dargestellt.

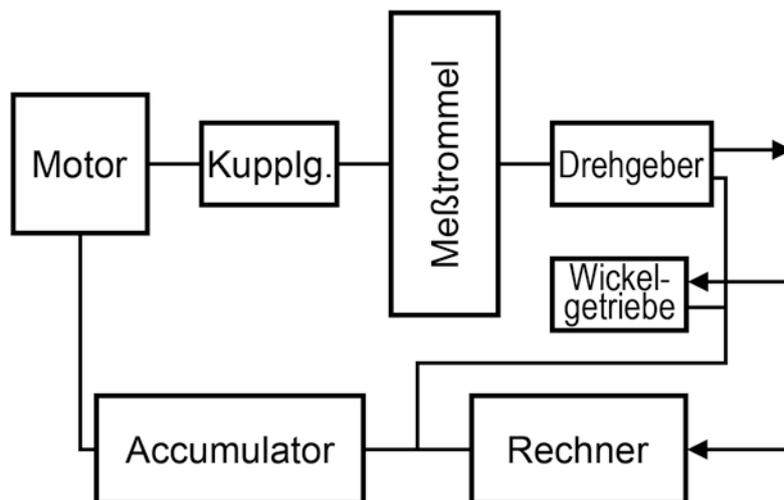


Abb. 5 Blockbild zum Aufbau des MPL 60

Das Drehmoment eines Elektromotors wird über eine kontaktlose Kupplung auf die Meßtrommelachse übertragen. Mit dem Trommelradius als Hebelarm wird dieses Drehmoment in eine auf den Meßdraht wirkende Zugkraft von

1,8 N umgewandelt. Die Zugkraft wirkt während der Auf- und Abwickelvorgänge, so daß auch der aufgewickelte Draht auf der Trommel noch unter Zugspannung steht.

Der inkrementelle Drehgeber liefert Signale, die der Anzahl der Trommelumdrehungen proportional sind. Einerseits wird daraus die gemessene Strecke abgeleitet, in dem die Signale an den angeschlossenen Rechner weitergegeben werden. Andererseits wird mit den Signalen ein Wickelgetriebe angesteuert. Das Wickelgetriebe sorgt beispielsweise beim Aufwickeln des Meßdrahtes dafür, daß der Draht in nur einer Lage auf die Trommel gelegt wird. Der Meßdraht läuft zu diesem Zweck durch einen 0,2 mm breiten Spalt. Durch das Wickelgetriebe wird der Spalt beim Aufwickeln des Drahtes kontinuierlich in Richtung der Trommelachse um 0,2 mm / Trommelumdrehung verschoben.

Die Meßtrommel ist so dimensioniert, daß bis maximal 60 m Stahldraht mit $\emptyset = 0,15$ mm in der beschriebenen Weise aufgespult werden können.

Kalibrierungsmessungen sind zur Umfangsbestimmung für die Trommel und zur Bestimmung der Additionskonstanten auszuführen.

2.3.3 EINSATZMÖGLICHKEITEN DES MPL 60

Mit der Kapazität der Meßtrommel ist der Einsatzbereich des MPL in dem Streckenbereich von 0,2 ... 60 m unbeschränkt. Geeignete Strecken können in einem Zenitdistanzbereich von 70 ... 130 gon gemessen werden. Dafür ist das Instrument um die mechanisch definierte Abwickellinie auf der Trommel kippbar. Diese Linie verläuft parallel zur Trommelachse und ist zugleich Kippachse des Instruments.

3. VERGLEICH DER GERÄTE DISTOMETER, DISTINVAR UND MPL 60

Ein direkter meßtechnischer Vergleich der beschriebenen Geräte DISTOMETER, DISTINVAR und MPL 60 ist, bedingt durch die unterschiedlichen Meßprinzipien, nur mit Einschränkungen durchzuführen.

Der hier vorgenommene Vergleich beschränkt sich daher im wesentlichen auf Gerätekomponenten, den Fehlerhaushalt und Einsatzmöglichkeiten.

3.1 DEFINITION UND REALISIERUNG DER STRECKENENDPUNKTE

Für direkte Instrumentenvergleiche werden in der Regel kleine Netze optimaler Geometrie angelegt. Dieses Vorgehen setzt voraus, daß die zu vergleichenden Instrumente dieselbe Zwangszentrierung benutzen können.

In unserem Fall sind jedoch einerseits die Punktausrüstungen völlig unterschiedlich und andererseits kommen wegen der benötigten hohen Zugkraft mit dem DISTINVAR nur Pfeiler oder stabile Konsolen in Frage.

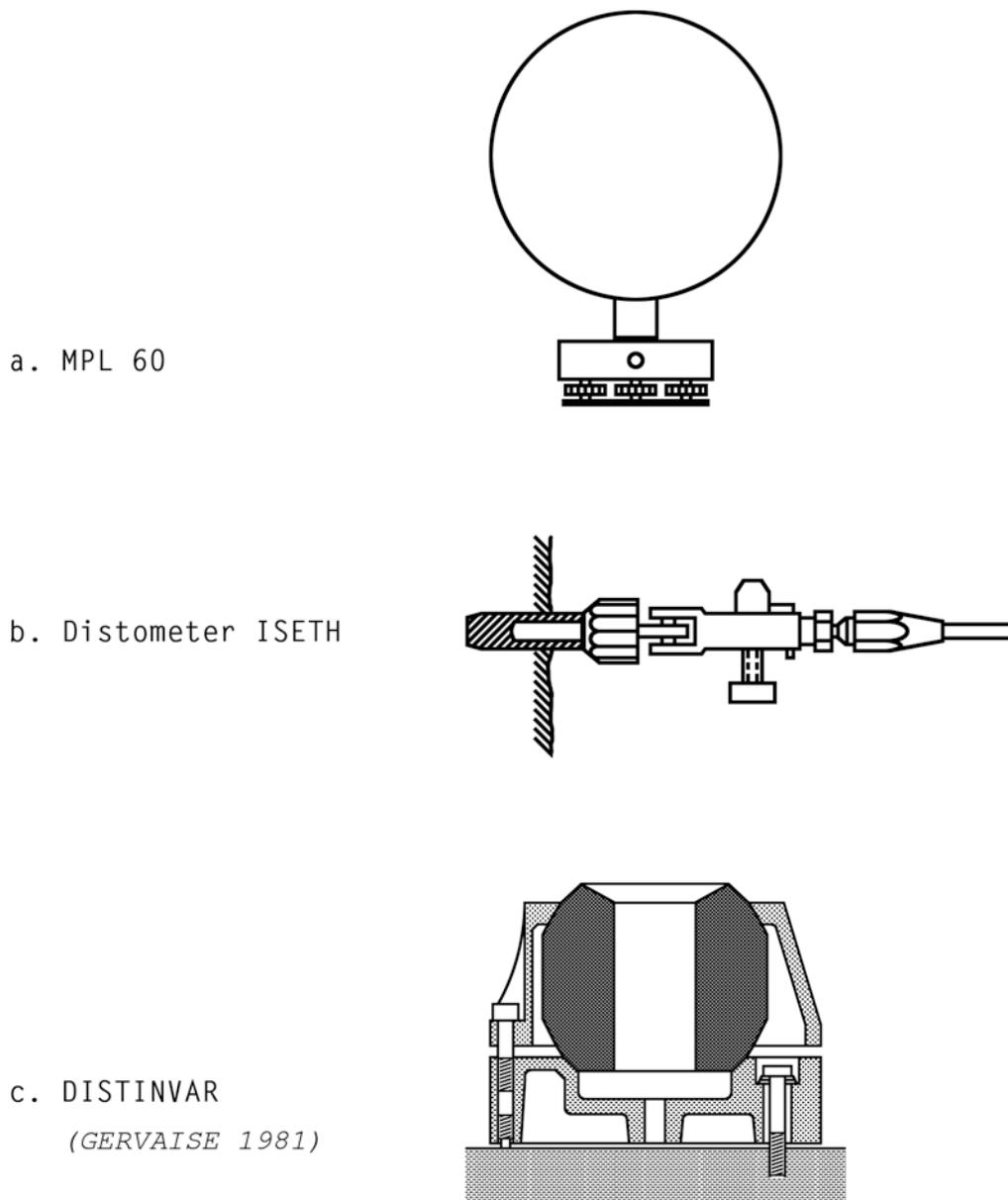


Abb. 6 Zentriereinrichtungen

Das MPL 60 kann mit Stativen und handelsüblichen Dreifüßen eingesetzt werden (Abb. 6a). Sonderkonstruktionen sind für das Distometer ISETH und das DISTINVAR erforderlich: Die Abbildung 6b zeigt beispielsweise die Definition eines Meßpunktes an einer Wand für das Distometer ISETH und 6c den nicht genormten Zentrierzapfen des DISTINVAR.

Jede dieser Zentrierungen nimmt Rücksicht auf die auftretenden Zugkräfte. Für Vergleichsmessungen sind Adapter für z.B. das ZEISS-Zentriersystem nur ein unzulänglicher Behelf, unter dem die Genauigkeit der einzelnen Instrumente nicht voll zum Ausdruck kommt.

Im folgenden sollen die vergleichbaren Gerätekomponenten im Detail betrachtet werden.

3.2 VERGLEICH VON ÄQUIVALENTEN GERÄTEDETAILS

3.2.1 ART DER MESSERGESBNISSE

Die Meßergebnisse lassen sich primär für DISTOMETER und DISTINVAR als Relativmessungen und für das MPL 60 als Absolutmessungen klassifizieren. Unter Relativmessungen sei hier in Analogie zur elektrooptischen Distanzmessung die Ermittlung von dm-Teilstücken (DISTOMETER) verstanden, wobei das ganzzahlig Vielfache eines dm fehlt, was eine Absolutmessung ausmachen würde. Die gleichen Verhältnisse liegen beim DISTINVAR vor. Das MPL 60 jedoch liefert Absolutstrecken, weil sowohl ganze Trommelumdrehungen als auch das Reststück im Meßergebnis ausgegeben sind.

3.2.2 DIE MESSDRÄHTE

Die Wahl der Meßdrähte für alle Meßinstrumente hängt von der Art ab, wie Temperaturprobleme gelöst werden sollen. Für die Relativmeßverfahren ist Invar die günstigste Lösung wegen des geringen Ausdehnungskoeffizienten. Jedoch ist der Umgang mit Invardrähten bekanntlich nicht unproblematisch (siehe auch *GERVAISE 1978*). Wegen der sehr spröden Metallegierung treten plastische Verformungen sprunghaft, insbesondere bei neuen Drähten, mit Zugkräften von etwa 150 N auf. Damit ist es sinnvoll, immer mehrere

Drähte für ein und dieselbe Strecke zu verwenden, um solche Sprünge sofort bei Messungsausführung sichtbar zu machen. Ein weiteres, aber geringeres Problem ist die Alterung der Invardrähte durch ständiges Be- und Entlasten und das Aufwickeln auf Transport- und Lagerungstrommeln. Untersuchungen (*VIEWEG 1982*) zeigen, daß nach 50 Aufwickel-, Be- und Entlastungsvorgängen ein Invardraht von 21 m Länge sich um $\pm 0,9$ mm plastisch deformiert; 50 Be- und Entlastungsvorgänge verlängern den Draht nur um rund 0,2 mm.

Ganz anders liegen die Verhältnisse beim MPL 60: wie schon in Abschnitt 1.3.1 erwähnt, wird hier die tatsächliche Drahtlänge gemessen (*GERIGK 1970*). Das Meßergebnis ist unabhängig von Temperatur- und Deformationseinflüssen, sodaß nur ein Draht eingesetzt werden muß.

3.2.3 TEMPERATUREINFLÜSSE AUF DIE MESSGERÄTE

Direkte Temperatureinflüsse auf das Meßergebnis gibt es beim MPL 60 nicht, wenn eine gewisse Betriebstemperatur erreicht ist. Die temperaturbedingte Änderung des Meßtrommelumfangs ist in den Kalibrierungsergebnissen enthalten (*DALLMANN 1980*).

Unwesentlich ist auch der Temperatureinfluß auf das DISTINVAR. In Untersuchungen (*MEYER 1983*) können bei einer Temperaturänderung von 5°C keine Längenänderungen nachgewiesen werden. Auch diesem Instrument gereicht es zum Vorteil, daß durch den eingebauten Schrittmotor eine Betriebstemperatur entsteht und das Gehäuse außerdem strahlungsisoliert wirkt.

Ganz erheblich jedoch wird das DISTOMETER durch Temperaturänderungen beeinflusst (*VIEWEG 1982*). Durch das verwendete Material für den Instrumentenkörper ergeben sich sehr lange Einlaufzeiten für das Instrument. Für eine Temperaturänderung von $\Delta T = 5^\circ\text{C}$ ist nach 30 min. der Grenzwert der Längenänderung von 0,03 mm erreicht, für $\Delta T = 15^\circ\text{C}$ ergibt sich nach 60 min. eine Längenänderung von 0,12 mm. Diese Ergebnisse zeigen, daß die Einlaufzeiten abgewartet werden müssen oder Temperaturkorrekturen an das Meßergebnis anzubringen sind.

3.2.4 ZUGKRAFTEINFLÜSSE AUF DIE MESSERGEBNISSE

Die Zugkraft ist der entscheidende Faktor bei der mechanischen Längenmessung mit freihängenden Drähten. Ein gespannter Draht beschreibt eine soge-

nannte Kettenlinie, die numerisch durch eine hyperbolische Funktion approximiert werden kann. Das Meßergebnis stellt die Bogenlänge dieser Funktion zwischen den "Streckenendpunkten" dar. Die Raumstrecke zwischen den zwei Punkten läßt sich durch geometrische und mechanische Reduktionen aus der Bogenlänge herleiten. In die mechanische Reduktion fließt direkt die auf den Draht wirkende Zugkraft ein (bekannt als Durchhangkorrektur).

Ändert sich die Zugkraft unkontrolliert, so wirkt sich das erheblich auf die ermittelte Raumstrecke aus. Für das MPL 60 beispielsweise bewirkt die Zugkraftänderung von 0,005 N (*DALLMANN 1980*) bei einer Drahtlänge von 50 m eine Streckenänderung von 0,1 mm. Das bedeutet für dieses Gerät, daß wegen des Spannungsabfalls an der Batterie während einer Meßkampagne für jede gemessene Strecke auch die Zugkraft mit einer Genauigkeit von 0,005 N bestimmt werden muß. Weiterhin darf vor Erreichen der Betriebstemperatur keine Strecke endgültig gemessen werden, weil die kontaktlose Drehmomentkupplung zwischen Motor- und Meßtrommel temperaturabhängig ist. Genaueres wird in einer in Vorbereitung stehenden Veröffentlichung mitgeteilt.

Mit einer Eichlehre läßt sich die Sollzugkraft am DISTOMETER einstellen und während der Messung an einer Meßuhr ablesen (*KOVARI, AMSTAD, GROB 1974*). Ein Einstellfehler von 1 Skalenteil ($\cong 0,01$ mm) an der Kraftmeßuhr wirkt sich bei einem 20 m langen Invar-Draht durch eine Längenfehler von 0,03 mm aus (*VIEWEG 1982*). Änderungen der Federkonstante durch Temperatur und Alterung können direkt mit Hilfe der transportablen Eichlehre erfaßt werden.

Eine optimale Lösung der Zugkraftkonstanz liegt im DISTINVAR vor. Die dort erzeugte Zugkraft wird anschließend über das feste Hebelverhältnis festgelegt und wird weder durch Temperatur- noch mechanische Einflüsse gestört.

3.3 FEHLERHAUSHALT

Zur endgültigen Beurteilung der Einsetzbarkeit der besprochenen Längenmeßgeräte für die Praxis sei an dieser Stelle ein Haushalt der zu erwartenden Fehler in tabellarischer Form dargestellt.

Fehlerquelle	Auswirkung auf das Instrument		
	DISTINVAR	DISTOMETER	MPL 60
Meßdraht	zufällige Längenänderungen mechanische Alterung		-
Maßstab der Längen- meßvorrichtung	nicht nach- weisbar	Korrektion notwendig	durch Kali- brierung erfaßt
Temperatureinfluß auf Längenmeßvorrichtung	nicht nach- weisbar	$\Delta T = 5^{\circ}\text{C}$ $\rightarrow \Delta l = 0,03 \text{ mm}$	-
Temperatureinfluß auf Meßdraht	$1 \cdot 10^{-6} \cdot \Delta T \left[\frac{\text{C}}{\text{m}} \right]$		-
Zugkrafteinfluß auf Meßergebnisse	-	0,01 N-Fehl- einstellung $\rightarrow \Delta l = 0,03 \text{ mm}$	0,005 N $\rightarrow \Delta l = 0,1 \text{ mm}$

Tab. 1 Fehlereinflüsse und deren Auswirkung auf verschiedene Längenmeßgeräte

Die Tabelle berücksichtigt alle für die Praxis wesentlichen Fehlerquellen. Darin kommen die Erfahrungen zum Ausdruck, die am Geodätischen Institut der Uni Hannover in vergleichenden Messungen gesammelt worden sind. Das DISTINVAR birgt am wenigsten Fehlerquellen in sich, das DISTOMETER erfordert sehr sorgfältigen Umgang mit den messenden Elementen und das MPL 60 zeigt seine wesentliche Fehlerquelle in einer nicht ganz konstanten Zugkraft. Die Genauigkeit der Geräte läßt sich mit 0,05 mm für das DISTINVAR, 0,2 mm für das DISTOMETER und 0,3 ... 0,5 mm für das MPL 60 in einem Streckenbereich von 1 ... 50 m angeben.

4. ZUSAMMENFASSUNG

Die vorangegangenen Ausführungen haben den Stand und die Leistungsfähigkeit der mechanischen Längenmessung deutlich gemacht. Die vergleichend beschriebenen Instrumente decken den Nahbereich der Entfernungsmessung für die besonderen Zwecke der Ingenieurvermessung ab. Angesprochen sind hier Strecken zwischen 0,2 und 60 m.

Der eingehende Instrumentenvergleich bezieht sich auf die heute wohl be-

kanntesten Entwicklungen DISTINVAR von CERN/Schweiz und Distometer ISETH von KERN/Schweiz sowie das neue MPL 60, Geod. Institut, Universität Hannover und Trelle, Bochum/Bundesrepublik Deutschland.

In der zusammenfassenden Tabelle 2 sind die wesentlichen Eigenheiten und Spezifikationen der 3 Instrumente erläutert.

Gerät Eigenschaft	DISTINVAR CERN	DISTOMETER ISETH	MPL 60
Streckenmeßergebnisse	Relativ	Relativ	Absolut
Meßbereich	50 mm	100 mm	0,2 - 60 m
geneigte Strecken	nein	ja	ja
Zentriereinrichtung	nicht genorm- ter Zapfen	Mauerbolzen	Dreifuß
Anzahl der Meßdrähte je Strecke	1 ... 3	1 ... 3	1
Material u. Durch- messer des Meßdrahtes	Invar 1,65 mm	Invar 1,65 mm	Stahl 0,15 mm
Zugkraft	150 N konstant	80 N einstellbar	1,5 N (konstant)
Genauigkeiten	0,03 mm	0,02...0,05 mm	-
eigene Testmessungen	0,05 mm	0,2 mm	~ 0,5 mm

Tab. 2 Zusammenfassender Vergleich der untersuchten Längenmeßgeräte

Ein Vergleich der betrachteten Instrumente zeigt, daß das DISTINVAR zwar den stärksten Einschränkungen unterliegt, aber die genauesten Ergebnisse liefert. Das Distometer ISETH schränkt den Anwendungsbereich weniger stark ein, büßt aber gegenüber dem DISTINVAR um den Faktor 4 an Genauigkeit ein. Universelle Einsatzmöglichkeiten bietet das MPL 60, liefert aber um den Faktor 10 ungenauere Ergebnisse als das DISTINVAR. Die für die Praxis wesentlichen Schwierigkeiten in der mechanischen Längenmessung werden durch die Meßdrähte und Zugkräfte erzeugt.

Während die Fehlerquelle Invardraht beim Distometer ISETH und DISTINVAR durch Messen mit verschiedenen Drähten gleicher Länge beseitigt werden kann, muß jede Streckenmessung mit dem MPL 60 in der jetzigen Entwicklungsstufe noch durch eine Zugkraftmessung ergänzt werden. Konstruktive Änderungen lassen jedoch auch am MPL 60 eine zuverlässig konstante Zugkraft erwarten.

DANKSAGUNG

Für die Bereitstellung des DISTINVAR für eingehende Untersuchungen sei Herrn Dipl.-Ing. F. Löffler vom DESY/Hamburg herzlich gedankt.

LITERATUR

- DALLMANN, Kl.-J.: *Weiterentwicklung und Erprobung des Drahtmeßgerätes nach Gerigk*. Unveröffentlichte Dipl.-Arbeit am Geodätischen Institut der Universität Hannover, 1980
- GERVAISE, J.: *Invar Wire Measurement - A Necessary Evil*. In "High Precision Geodetic Length Measurements" Helsinki, 1978
- GERVAISE, J.: *High Precision Instrumentation Developed for CERN*. In "American Congress on Surveying and Mapping" Washington D.C., 1981
- GERIG, H.-U.: *Längenmessung mit Drähten ohne Teilung*. Wiss. Arb. der Lehrst. f. Geodäsie, Photogrammetrie und Kartographie der Universität Hannover, Nr. 40, 1970
- KOVARI, K., AMSTAD, Chr., GROB, H.: *Entwicklung, Bau und praktische Anwendung des Distometers ISETH*. VII. Int. Kurs für Ingenieurvermessungen, Darmstadt, 1976
- KOVARI, K., AMSTAD, Chr., GROB, H.: *Messung von Verschiebungen und Deformationen an Bauwerken mit dem Distometer ISETH*. Schweizerische Bauleitung, H. 36, Zürich, 1974
- MEYER, R.: *Gerätetechnische Untersuchung der mechanischen Längenmeßgeräte DISTINVAR, ISETH und des Drahtmeßgerätes nach Gerigk*. Unveröffentlichte Dipl.-Arbeit am Geodätischen Institut der Universität Hannover, 1983
- PROSPEKT DER FA. KERN & CO. AARAU/SCHWEIZ: *Distometer - ISETH Präzisionslängenmeßgerät*
- SCHNÄDELBACH, K.: *Neuere Verfahren zur präzisen Längen- und Höhenmessung*. AVN, Vol. 87, 1980, S. 2-21
- VIEWEG, B.: *Prüfung des Kern-Distometer ISETH für den Einsatz bei ingenieurgeodätischen Messungen*. Unveröffentlichte Abschluß-Arbeit an der Uni Essen, Gesamthochschule, 1982

PROGRAMM

Donnerstag, 22. September 1983, Geb. 35

ab 16.00 Uhr Führung durch das Labor des Instituts für Geodäsie
abends Zusammensein im Kasino

Freitag, 23. September 1983, Geb. 36

08.30 - 10.15 Uhr K. SCHNÄDELBACH, München:
Das Mekometer ME 3000 - Wirkungsweise und Probleme

W. MAURER, München:
Zum Frequenzverhalten des Mekometers ME 3000

O. HIRSCH / T. NGUYEN, Berlin:
Ein objektiviertes Meßverfahren mit dem Kern-
Mekometer

H. AESCHLIMANN / D. MEIER, Aarau:
Kritische Punkte beim Mekometer

10.15 - 10.45 Kaffeepause

10.45 - 12.30 Uhr E. KUNTZ / B. MEIER-HIRMER / H. SECKEL, Karlsruhe:
Praktische Erfahrungen mit dem Mekometer

B. RITTER, Braunschweig:
Erfahrungen mit dem Mekometer ME 3000

Th. WUNDERLICH, Wien:
Ein vertikales Distanznetz höchster Genauigkeit

K. EGREDER, Darmstadt:
Bestimmung dreidimensionaler Koordinaten durch
Streckenmessung

12.30 - 14.00 Uhr Mittagspause

14.00 - 15.45 Uhr	<p>W. CASPARY, München: Die Genauigkeit der Mekometermessungen auf der Prüfstrecke der HSBwM</p> <p>M. RUOPP, Stuttgart: Genauigkeitssteigerung bei Nahbereichsentfernungsmessern - Erfahrungsbericht</p> <p>H. HEISTER, München: Genauigkeitssteigerung elektrooptischer Entfernungsmesser durch Gerätekalibrierungen</p> <p>B. WITTE, Aachen: Erreichbare Genauigkeit mit speziell ausgewählten elektrooptischen Distanzmessern - gezeigt am Beispiel des Autoranger-A</p> <p>R. BRUCKMÜLLER, Wien: Automatische meteorologische Datenerfassung in der bodennahen Luftschicht</p> <p>H. FRÖHLICH, Bad Godesberg: Die Bestimmung der äußeren Genauigkeit elektrooptisch gemessener Strecken mittels Varianzkomponentenschätzung</p>
15.45 - 16.15 Uhr	Kaffeepause
16.15 - 18.00 Uhr	<p>H. ZETSCHKE, Bonn: Vom Mekometer zum Geomensor</p> <p>W. HÜBNER, München: Streckenmessung mit dem Mekometer ME 3000 nach dem Zweifarbenprinzip</p> <p>J. GERVAISE, Genf: Distance measurement with Terrameter</p> <p>M. SCHERER, Bonn: Die Arbeitsweise des Präzisionsentfernungsmessers Polarodist</p> <p>W. NIEMEIER, Hannover: Präzisionsstreckenmessung im Nahbereich mit mechanischen Längenmeßgeräten</p>
	● ○ ●
	In den Pausen Gerätedemonstrationen von Frequenzmeßanlagen und Drahtmeßgerät
abends	Heimfahrt, Oktoberfestbesuch oder Stadtbummel

TEILNEHMERLISTE

Altmann, H.	Altmann-Schelzke, Ing. Ges. mbH Schillerstraße 3, 8662 Helmbrechts/Ofr.
Augath, Wolfgang	Niedersächs. Landesverwaltungsamt, Abteilung Landesvermessung Warmbüchenkamp 2, 3000 Hannover 1
Augustin, Gert	Institut für Geodäsie, Universität Innsbruck Technikerstraße 13, A-6020 Innsbruck
Bachmeier	Bayernwerke AG Blutenburgstraße 6, 8000 München 19
Backhausen, Dieter	Bundesanstalt für Gewässerkunde Postfach 309, 5400 Koblenz
Barth, H.	Bayernwerke AG Blutenburgstraße 6, 8000 München 19
Bauch, Alfred	TU München Reitmorstraße 37, 8000 München 22
Bayer, Richard	Fa. Hochtief Pettenkoflerstraße 35 8000 München 2
Beckmann, Herbert	Gruppe Ingenieurbau Herzogspitalstraße 8, 8000 München 2
Bernhard, Gerold	LVA Baden-Württemberg Büchsenstraße 54, 7000 Stuttgart 1
Beyer, G.	DB-Dir. München, Vermessungsdezernat 8000 München 19
Blabusch, Rudolf	MilGeoAmt Friesdorfer Straße 194, 5300 Bonn 2
Borutta, Harald	HSBwM
Bretterbauer, Kurt	Inst. f. Höhere Geodäsie und Geophysik, TU Wien Gusshausstraße 27-29, A-1040 Wien
Bruckmüller, Reinhard	Inst. f. Landesvermessung und Ingenieurbau, TU Wien Gusshausstraße 27-29, A-1040 Wien
Brunner, F. K.	Wild Heerbrugg AG CH-9435 Heerbrugg
Caspary, Wilhelm	HSBwM

Chaperon, Francis	ETH Zürich, Hönggerberg
Cuno, J.	DGFI Marstallplatz 8, 8000 München 22
Duddek, Herbert	Rheinbraun AG Postfach 4140, 5010 Bergheim
Dupraz, Hubert	Institut de Géodésie et Mensuration (IGM) 33, Av. de Cour, CH-1007 Lausanne
Egreder, Kurt	Geod. Institut, TH Darmstadt Petersenstraße 13, 6100 Darmstadt
Ehbets, Hartmut	Wild Heerbrugg AG CH-9435 Heerbrugg
Ehlert, Dieter	Inst. f. Angew. Geodäsie Richard-Strauß-Allee 11, 6000 Frankfurt 70
Ellmer, Wilfried	HSBwM
Ermeling, Ulrich	RWE AG Hauptverwaltung, Abt. BauVerm Postfach 10 31 65, 4300 Essen 1
Ernst, Jürgen	Inst. f. Geodäsie, Universität Innsbruck Technikerstraße 13, A-6020 Innsbruck
Ferstl, Artur	Wendl-Dietrich-Straße 54, 8000 München 19
Forstner, Alfred	Planungsbüro Obermeyer Hansastraße 40, 8000 München 21
Fröhlich, Hans	LVA Nordrhein-Westfalen Muffendorfer Straße 19-21, 5300 Bonn 2
van Geldorp, Gé.	DGFI Marstallplatz 8, 8000 München 2
Gerold, Bernhard	LVA Baden-Württemberg, Außenstelle Karlsruhe Kapellenstraße 17, 7500 Karlsruhe
Gerstbach, Gottfried	Inst. f. Theoret. Geodäsie, TU Wien Gusshausstraße 27-29, A-1040 Wien
Gervaise, Jean	CERN CH-1211 Genève 23
Geyer, Sepp	Österreich. Draukraftwerke AG, Abt. BauV Kohldorfer Straße 98
Grimm, Albert	Inst. f. Geodäsie, Universität Innsbruck Technikerstraße 13, A-6020 Innsbruck

Grimm, Kurt	Wild Heerbrugg AG CH-9435 Heerbrugg
Grimm, Werner	Planungsbüro Obermeyer Hansastraße 40, 8000 München 21
Gruber, Christoph	FH München Theodor-Körner-Straße 13a, 8012 Ottobrunn
Grünwedel, Helmut	Fa. Held & Francke Aschauer Straße 21, 8000 München 90
Günther, Gerhard	LVA Nordrhein-Westfalen Muffendorfer Straße 19-21 Postfach 20 50 07, 5300 Bonn 2
Häusler, Klaus	Fa. Moll, Platanenstraße 124, 8028 Taufkirchen
Hagemann, Martin	RWE AG, Hauptverwaltung, Abt. BauVerm Postfach 10 31 65, 4300 Essen 1
Hahn, Hans	FHS Bochum Lenershofstraße 140, 4630 Bochum
Hallermann, Ludger	Geodätisches Institut, Universität Bonn Nußallee 17, 5300 Bonn 1
Hanke, K.	Institut für Geodäsie, Universität Innsbruck Technikerstraße 13, A-6020 Innsbruck
Hartmann, Helmut	U-Bahn Referat München Schillerstraße 14, 8060 Dachau
Haupt, Wieland	Wasser- und Schifffahrtsdirektion Würzburg Sandstraße 45, 8411 Wenzelbach
Heister, Hansbert	HSBwM
Henninger, W.	BLVA München Alexandrastraße 4, 8000 München 22
Hillebrand, Heinrich	FHM Ernst-Krebs-Straße 16, Gauting
Hirsch, Otto	Höhere Geodäsie, TU Berlin Straße des 17. Juni 135, 1000 Berlin
Holewa, R.	Wachenheimer Straße 37, 6520 Worms
Horn, Walter	Baubehörde-VermAmt, VA 31 Postfach 30 05 31, 2000 Hamburg 36
Huber, Josef	Städtisches VA München Eduard-Schmid-Straße 3/3, 8000 München 90

Hübner, Wolfgang	Lehrstuhl für Geodäsie, TU München Arcisstraße 21, 8000 München 2
Huser, René	Elektrowatt Ingenieurunternehmung AG Bellerivestraße 36, CH-8022 Zürich
Ježovnik, Vesna	FAGG Ljubljana Janova 2, Y-61000 Ljubljana
Joeckel, R.	Dillweg 13, 7000 Stuttgart 75
Kahmen, Heribert	Geodätisches Institut Universität Hannover Nienburger Straße 1, 3000 Hannover
Kaspring, Rudolf	FHS Bochum, FB Vermessungswesen Lennershofstraße 140, 4630 Bochum
Keller, Werner	Fa. Walter Schneider Ltd. Reichsgasse 61, CH-7000 Chur
Kersting, Norbert	HSBwM
Klaus, Alois	Ing. Ges. G. Karner mbH Ingolstädter Straße 12, 8000 München 40
Klein, Rolf	Vermessungsbüro Auf Aigen 6, 7447 Aichtal-Neuenhaus
Kögel, W.	Ing. Ges. G. Karner mbH Ingolstädter Straße 12, 8000 München 40
Köngeter, Werner	Institut f. Anwendungen d. Geodäsie im Bauwesen - Lehrstuhl III für Geodäsie Universität Stuttgart Keplerstraße 10, 7000 Stuttgart 10
König, Rolf	HSBwM
Korittke, Norbert	Institut für Markscheidewesen WBK Herner Straße 45, 4630 Bochum 1
Kowitz, Peter-Jörg	Albrecht-Dürer-Straße 17, 8000 München 90
Krakau, Klaus	Fa. Hochtief Pettenkoferstraße 35, 8000 München 2
Kristian, Hermann	MilGeoAmt Friesdorfer Straße 194, 5300 Bonn 2
Kutsch, Alexander	Gesellschaft für Ingenieurvermessung mbH Franziskanerstraße 33, 4300 Essen 1
Lebowsky, Fritz	Phys. Techn. Bundesanstalt, Abteilung 1 Bundesallee 100, 3300 Braunschweig

Lenzen, Peter	RWE AG, Hauptverwaltung, Abteilung BauVerm Postfach 10 31 65, 4300 Essen 1
Löffler, Franz	Deutsches Elektronen-Synchrotron Notkestraße 85, 2000 Hamburg 52
Loser, Raimund	Fa. Kern CH-5001 Aarau
Ludwig, Herbert	FHS Würzburg-Schweinfurt, FB Vermessung Röntgenring 8, 8700 Würzburg
Maurer, Wolfgang	Lehrstuhl für Geodäsie, TU München Arcisstraße 21, 8000 München 2
Mayer, Dieter	LVA Baden-Württemberg Büchsenstraße 54, Postfach 1115, 7000 Stuttgart 1
Meier, Dietrich	Fa. Kern CH-5001 Aarau
Meier, Karl	LVA Baden-Württemberg Büchsenstraße 54, Postfach 1115, 7000 Stuttgart 1
Meier-Hirmer, Birgit	Geodätisches Institut, Universität Karlsruhe Englerstraße 7, Postfach 6380, 7500 Karlsruhe 1
Mensch, Joachim	Ing. Büro Angermeier Unterer Kirchberg Weg 5, 8700 Würzburg
Merkel, Gerd	Hans-Bierling-Straße 13, 8080 Emmering
Mrkić, Radovan	Gradjevninski Fakultet Institut za Geodeziso Bulevar Revolucije 73, Y-11000 Beograd
Müller, Heinz	Vermessungsbüro Authariplatz 13, 8000 München 90
Neugebauer, Gustav	HSBwM
Neuner, Walter	LVA Baden-Württemberg, Außenstelle Karlsruhe Kapellenstraße 17, 7500 Karlsruhe
Nguyen, Hun Trung	Höhere Geodäsie, TU Berlin Straße des 17. Juni 135, 1000 Berlin
Niemeier, Wolfgang	Geodätisches Institut, Universität Hannover Nienburger Straße 1, 3000 Hannover 1
Oswald, Wolfgang	HSBwM
Peters, Kornelius	Institut f. Landesvermessung, TU Wien Gusshausstraße 27-29, A-1040 Wien

Pfründer, Herbert	Vermessungsbüro Egle Postfach 51 01 61, 7500 Karlsruhe
Preisinger, Wilhelm	Arcisstraße 21, 8000 München 2
Printz, Harald	Fa. Hochtief Pettenkoferstraße 35, 8000 München 2
Pumann, Helmut	Lachnerstraße 6, 6000 Frankfurt 61
Reschke, Jürgen	RWE AG, Hauptverwaltung, Abteilung BauVerm Postfach 10 31 65, 4300 Essen 1
Ritter, Bernhard	Institut f. Vermessungskunde Braunschweig Pockelstraße 4 / Hochhaus, VI. Gesch. 3300 Braunschweig
Rossipal, Gunter	FH München Emmeringer Straße 57 B, 8080 Fürstenfeldbruck
Rott, A.	Photogrammetrie GmbH Truderinger Straße 15, 8000 München 80
Rüther, Heinz	HSBwM
Ruland, Robert	Stanford Linear Accelerator Center z.Z. Altlichenrade 5c, 1000 Berlin 49
Ruopp, Manfred	Institut f. Anwendungen der Geodäsie im Bauwesen und Lehrstuhl III für Geodäsie, Universität Stuttgart Keplerstraße 10, 7000 Stuttgart 1
Sauermann, Reinhard	Büro Altmann-Schelzke mbH Schillerstraße 3, 8662 Helmbrechts
Schauerte, Wolfgang	Geodätisches Institut, Universität Bonn Nußallee 17, 5300 Bonn
Scherer, Michael	Geodätisches Institut, Universität Bonn Nußallee 17, 5300 Bonn
Schlichterle, Reinhold	Artillerieschule SpezStab ATV-7 Am Rilchenberg 30, 6580 Idar-Oberstein
Schmidbauer, Otto	TU München Milbertshofener Straße 44, 8000 München 40
Schmidt, F.	FHS Würzburg-Schweinfurt, Fachr. Vermessungswesen Röntgenweg 8, 8700 Würzburg
Schnädelbach, Kurt	Lehrstuhl für Geodäsie, TU München Arcisstraße 21, 8000 München 2

Schneemann, Hendrik	Vermessungsbüro Egle Herrenalber Straße 43, Postfach 51 01 61 7500 Karlsruhe 51
Schödlbauer, Albert	HSBwM
Schudlich, Klaus	Institut f. Markscheidewesen WBK Herner Straße 45, 4630 Bochum
Schuhr, Peter	DB, Eisensteiner Straße 3, 8500 Nürnberg 30
Schwintzer, Peter	HSBwM
Seckel, Hans-J.	Geodätisches Institut, Universität Karlsruhe Englerstraße 7, Postfach 63 80, 7500 Karlsruhe 1
Seifert-Fehling, Werner	Niedersächs. Landesverwaltungsamt, Abt. Landesver- messung, Warmbüchenkamp 2, 3000 Hannover 1
Spellauge, Reinhard	Geodätisches Institut, Universität Hannover Nienburger Straße 1, 3000 Hannover 1
Stadler, Karl	Bayerisches LVA Alexandrastraße 4, 8000 München 22
Steinbrecher, Peter	Ing. Büro
Stix, Peter	TU Wien Gusshausstraße 27-29, A-1040 Wien
Stober, Manfred	FHS für Technik Willi-Bleicher-Straße 29, Postfach 1180 7000 Stuttgart 1
Strobl, Richard	Österreich. Draukraftwerke AG, Abt. BauV Kohldorfer Straße 98, A-9020 Klagenfurt
Tegeler, W.	Niedersächsisches Landesverwaltungsamt, Abt. Lan- desvermessung, Warmbüchenkamp 2, 3000 Hannover 1
Tille, Roland	HSBwM
Traxinger, Werner	Fa. Westward Gabelsbergerstraße 30, 8000 München 2
Trelle, Manfred	Fa. Feinmechanik-Optik Wilhelm-Leithe-Weg 83, 4630 Bochum 6
Tremel, Herbert	DGFI, I. Abteilung Marstallplatz 8, 8000 München 22
Trelep, Darko	Rudnik Orana Zirovski VRH Y-Todraz, 64224 Gorenja Vas

Unger, Hans-Joachim	Wasser- und Schifffahrtssdirektion Würzburg Wörthstraße 19, 8700 Würzburg
Veit, Klaus	Städtisches Vermessungamt Blumenstraße 28 B, 8000 München 2
Vodopivec, Florijan	Fakulteta za Arhitekturo Gradbenistvo in Geodeziso Oddelek za Geodeziso Jamova 2, Y-61000 Ljubljana
Vögeli, Martin	ETH Zürich, Hönggerberg
Welsch, Walter	HSBwM
Wist, Helmut	Bundesminister der Verteidigung, Bonn
Witte, Bertold	Geodätisches Institut, RWTH Aachen Templergraben 55, 5100 Aachen
Witti, Leonhard	Ing. Büro Wittl Beethovenstraße 16, 8135 Söcking
Wunderlich, Thomas	Institut f. Landesvermessung und Ingenieurgeodäsie, TU Wien Gusshausstraße 27-29, A-1040 Wien
Unger, H. J.	Wasser- und Schifffahrtssdirektion Würzburg Wörthstraße 19, 8700 Würzburg
Zhang, Yan	HSBwM
Ziegler, Theodor	Bayerisches LVA Alexandrastraße 4, 8000 München 22

Schriftenreihe

Wissenschaftlicher Studiengang Vermessungswesen
Hochschule der Bundeswehr München

Bisher erschienene Hefte:

(Die Hefte erscheinen in zwangloser Folge)

- Nr. 1/78 A. Schödlbauer :
Curriculum für den wissenschaftlichen Studiengang Vermessungswesen der Hochschule der Bundeswehr München
- Nr. 2/78 A. Chrzanowski and E. Dorrer (Eds.) :
Proceedings "Standards and Specifications for Integrated Surveying and Mapping Systems", Workshop held in Munich, 1-2 June 1977
- Nr. 3/78 W. Caspary und A. Geiger :
Untersuchungen zur Leistungsfähigkeit elektronischer Neigungsmesser
- Nr. 4/79 E. Baumann, W. Caspary, H. Dupraz / W. Niemeier / H. Pelzer, E. Kuntz / G. Schmitt, W. Welsch :
Seminar über Deformationsanalysen
- Nr. 5/81 K. Torlegård :
Accuracy Improvement in Close Range Photogrammetry
- Nr. 6/82 W. Caspary und W. Welsch (Hrsg.) :
Beiträge zur großräumigen Neutrassierung
- Nr. 7/82 K. Borre and W. M. Welsch (Hrsg.) :
Proceedings "Survey Control Networks", Meeting of FIG-Study Group 5B, Aalborg, 7 - 9 July 1982
- Nr. 8/82 A. Geiger :
Entwicklung und Erprobung eines Präzisionsneigungstisches zur Kalibrierung geodätischer Instrumente
- Nr. 9/83 W. Welsch (Hrsg.) :
Deformationsanalysen '83

Schriftenreihe

Wissenschaftlicher Studiengang Vermessungswesen
Hochschule der Bundeswehr München

Nr. 10/84 W. Caspary, A. Schödlbauer und W. Welsch (Hrsg.) :
Beiträge aus dem Institut für Geodäsie

Nr. 11/84 W. Caspary und H. Heister (Hrsg.) :
Elektrooptische Präzisionsstreckenmessung

