Das Mekometer ME5000 von Kern als hochpräziser Kurzdistanzmesser

Ergebnisse von Prüfmessungen
über Distanzen von 0 bis 50 Meter
unter Anwendung des Steuerprogramms PROMEKO
im Messkeller des Instituts für Geodäsie und Photogrammetrie
der ETH-Zürich

R. Ganzoni, R. Köchle

Inhalt

Zusammenfassung 3

1. Einleitung 4
2. Das Messprinzip des ME5000 5
   - 2.1 Geometrie der Nullstellen 5
   - 2.2 Messbereiche bei kurzen Distanzen 6
   - 2.3 Das Programm PROMEKO 9
3. Das Messprinzip des Laser-Interferometers HP5526A von Hewlett-Packard 10
   - 3.1 Funktionsweise 10
   - 3.2 Reduktion der Ablesung 12
4. Der Brechungsindex 14
   - 4.1 Beim ME5000 14
   - 4.2 Beim HP5526A 15
5. Additionskonstanten und Zentriergenauigkeit des ME5000 15
   - 5.1 Nach Schwendener 15
   - 5.2 Auf der Messbahn 15
   - 5.3 Zentriergenauigkeit 17
6. Vergleichsmessungen auf der Messbahn zwischen ME5000 und HP5526A 19
   - 6.1 Gleichläufige Messungen 19
   - 6.2 Gegenläufige Messungen 21
   - 6.3 Ergebnisse 25
7. Vergleich des HP5526A mit Zerodurmassstäben 29
8. Frequenzprüfung am ME5000 31
9. Schlussfolgerungen 33
10. Literatur 35

Zusammenfassung

Die beiden Verfasser haben im Winter 1990/91 das Mekometer ME5000 Nr. 357011 des Instituts für Geodäsie und Photogrammetrie (IGP) der ETH-Zürich im Labor auf seine Eignung zur Messung kurzer Distanzen bis 50 m untersucht und sind zu folgenden Ergebnissen gelangt:

ME5000

Messbereich

Nutzbarer Messbereich	von 1 m an aufwärts
Lückenloses Messen	ab ca. 8 m aufwärts
Lage der Messfenster für Distanz D < 8 m (D_F = Fenstermitte, n = 3, 4, ..., 24, 25)	$D_F = n \cdot 0{,}313 + 0{,}163$ [m]
Fensterbreite (ungefähr)	$B_F = n \cdot 12{,}3$ [mm]

Instrumentenkonstanten

Additionskonstante	-0,11 mm ± 0,02 mm
Massstabskorrektur	-0,18 ppm ± 0,48 ppm

Messgenauigkeit

Mittlerer Fehler einer Distanzmessung	
ohne Zentrierfehler	± 0,035 mm
einschliesslich Zentrierfehler	± 0,049 mm
Mittlerer Fehler der Kern-Zentrierung (aus obigem)	± 0,034 mm

Frequenzstabilität im Labor

Abweichung vom Sollwert über 24 Stunden ab 1 Minute Einlaufzeit	zwischen +0,04 und -0,19 ppm

Weitere Resultate

Kern-Wild Adapter des IGP

Exzentrizität zwischen Kern-Zapfen und Wild-Gewinde (3 Adapter untersucht)	max. 0,051 mm

Messbahn

Für die Nullstellung des Messwagens:

Abstand vom EDM-Null zum Mekometerreflektor (EDM-Null = Bolzen für EDM-Zentrierung)	1148,4 mm ± 0,2 mm

1. Einleitung

In der Industrievermessung, bei der Bestimmung von Deformationen an Bauwerken und anderswo besteht oft das Bedürfnis nach sehr genauer Messung von relativ kurzen Distanzen. Gewünscht wird im Bereich weniger Meter bis weniger Zehnermeter die sichere Angabe des Millimeters oder von Bruchteilen davon. Neben den klassischen Verfahren der Basislatte und der Messung mit gespannten Invardrähten gibt es seit etwa zwei Jahrzehnten ein elektro-optisches Gerät mit der erforderlichen Genauigkeit: das Mekometer der Firma Kern. Mit dem Modell ME5000, das 1986 auf den Markt kam, wurden die hier beschriebenen Messungen gemacht.

Obwohl für den Distanzbereich von 16 m bis 8 km konzipiert, kann das Gerät auch kürzere Distanzen messen, sofern der Messablauf geeignet programmiert ist. Ein solches Programm zur Messbereicherweiterung hat Herr Wolfgang Schirmer von der Technischen Universität München für Feldrechner geschrieben. Es kann bei der Firma Leica Aarau bezogen werden. Mit diesem Programm gelingt es, Distanzen bis hinunter auf einen Meter zu messen. Der Vollständigkeit halber sei erwähnt, dass PROMEKO den Messbereich auch nach oben auf etwa 15 km ausdehnt, wovon hier aber weiter nicht mehr die Rede sein soll.

Im Unterschied etwa zum Laser-Interferometer von Hewlett-Packard, gegen welches das ME5000 kalibriert wurde, arbeitet das Mekometer *statisch*, worunter verstanden sein soll, dass Sender und Reflektor während der Messung an Ort und Stelle stehen bleiben. Das hat den grossen Vorteil, dass irgendwie liegende Strecken fast spielend leicht gemessen werden können; einzig nötig ist eine Zielung nach dem Reflektor. Beim Laser-Interferometer ist der Messvorgang *kinematisch*, dort muss mit einigem Aufwand der Reflektor auf etwa 2 mm genau entlang dem Messstrahl vom Anfangspunkt der Strecke nach dem Endpunkt geführt werden. Das Mekometer misst also direkt den Abstand zwischen Sender und Reflektor, während das Interferometer den vom Reflektor durchlaufenen Weg misst.

Die hier vorgelegten Resultate gehen aus Messungen im Mess- und Eichlaboratorium ("Messkeller") des Instituts für Geodäsie und Photogrammetrie (IGP) der ETHZ hervor. Benutzt wurden die 52 Meter lange Messbahn, auf welcher die Vergleichsmessungen mit dem Laser-Interferometer erfolgten, und sieben Pfeiler einer 50 Meter langen Messbasis für die Bestimmung der Additionskonstanten. Zweck der Untersuchung war es, zu überprüfen, erstens, ob sich die von der Firma angegebene Genauigkeit von *0,2 mm + 0,2 ppm* der Distanz im Bereich von 1 m bis 50 m bestätigt, zweitens, in welchen Bereichen unter 16 m überhaupt Distanzen gemessen werden können und drittens, ob sich das Programm PROMEKO bewährt. Das ME5000 zeigt eine abgelesene Distanz mit 0,01 mm, das Interferometer mit 0,0001 mm Auflösung an.

2. Das Messprinzip des ME5000

2.1 Geometrie der Nullstellen

Das ME5000 arbeitet mit einer kontinuierlichen, von einem HeNe-Laser erzeugten Trägerwelle der Länge $\lambda_T = 632{,}8$ nm, die mit einer zwischen etwa 470 bis 490 MHz variablen Frequenz polarisationsmoduliert ist. Letztere erzeugt die sogenannte Messwelle, deren Länge λ zwischen etwa 64 und 61 cm variiert. Beim Messvorgang werden die Nullstellen gesucht, was bedeutet, dass die Modulationsfrequenz und damit die Messwellenlänge in kleinen Schritten geändert wird, bis ein ganzes Vielfaches der Wellenlänge möglichst gut in die doppelte Distanz hineinpasst. Es wird dazu ein Phasenvergleich zwischen auslaufender und rückkehrender Welle gemacht, wobei die Wellenlänge so angepasst wird, dass der gesamte Phasenunterschied eine ganze Zahl, das heisst die Restphase null ist.

Wenn wir den Phasenunterschied, der als Anzahl ganze Zyklen plus Bruchteile gezählt werden soll , mit ϕ bezeichnen, dann rechnet sich die Distanz allgemein nach

$$s = \phi\frac{\lambda}{2} \qquad (2.1)$$

Beim ME5000 ist ϕ immer eine ganze Zahl m, die es zu bestimmen gilt. Dazu stehen zwei Verfahren zur Verfügung:

1) via Näherungsdistanz

Falls eine Näherungsstrecke s' mit der Unsicherheit von höchstens einer Viertelwellenlänge, also etwa ± 15 cm, vorliegt, kann ein m näherungsweise als

$$m' = \frac{s'}{\lambda/2} \qquad (2.2)$$

berechnet und dieses auf die nächstliegende ganze Zahl m gerundet werden. Bei kurzen Strecken genügt für s' eine Messbandablesung. λ rechnet sich aus der Frequenz f der Nullstelle als $\lambda = c/f$ (c = Lichtgeschwindigkeit).

2) via zwei oder mehrere verschiedene Nullstellen

Es wird eine zweite Messung mit unterschiedlicher Wellenlänge λ gemacht, bei der sich ϕ um k Zyklen von der ersten unterscheidet. Dann gelten die beiden Gleichungen

$$s = m\frac{\lambda_1}{2} \qquad \text{(1. Messung)}$$

$$s = (m+k)\frac{\lambda_2}{2} \qquad \text{(2. Messung)} \qquad (2.3)$$

woraus sich für m der Wert berechnet

$$m = \frac{\lambda_2}{\lambda_1-\lambda_2}k = \frac{f_1}{f_2-f_1}k \qquad (2.4)$$

k ist eine bekannte, ganze Zahl, grösser oder gleich eins, die beim Messvorgang gezählt wird, die Frequenzen f_1 und f_2 sind ebenfalls bekannt und die λ ergeben sich aus $\lambda = c/f$. Damit berechnet sich aus (2.4) zuerst m, das auf die nächstliegende ganze Zahl gerundet wird und anschliessend aus (2.3) der Wert für die Strecke s.

Das Gerät ist so konstruiert, dass f_1 und f_2 in die Nähe des untern (470 MHz) und obern (490 MHz) Randes des zur Verfügung stehenden Frequenzbereichs zu liegen kommen. Damit erhält der Faktor $\gamma = f_1/(f_2 - f_1)$ in Gl. (2.4) einen Wert um 24 (bei kurzen Distanzen auch Werte bis 50).Von der Theorie her müssen k und m ganzzahlig sein. Das heisst, dass man das aus den Frequenzen errechnete m auf die nächste ganze Zahl runden darf und damit den Einfluss kleiner Fehler in der Frequenzmessung auf m eliminiert. Die Verwendung des gerundeten m in (2.3) bringt einen bedeutenden Gewinn an Genauigkeit.

Wo möglich abeitet das ME5000 zur Kontrolle und zur Steigerung der Genauigkeit immer mit drei Nullstellen, den beiden angegebenen am Rande des Frequenzbereichs und einer dritten ungefähr in der Mitte zwischendrin.

2.2 Messbereiche bei kurzen Distanzen

Ein gewöhnlicher Massstab besitzt eine feste Masseinheit und feste Skalenstriche, zwischen denen man zur Feinablesung nötigenfalls Distanzen einschätzt. Im Gegensatz dazu besitzt das Mekometer eine dehnbare Skala mit variabler Masseinheit der Grösse

$$\frac{\lambda}{2} = \frac{c}{2f} \tag{2.5}$$

wo man zur Feinablesung die Länge der Masseinheit mit Hilfe von f variiert, bis ein Skalenstrich mit der zu messenden Strecke genau zusammenfällt. Das Intervall Δs_m, über das man den m-ten Skalenstrich bewegen kann, ist durch den untern und obern Grenzwert der Frequenz f_1 und f_2 gegeben und berechnet sich mit Gl. (2.1) und (2.5) aus der Lage der m-ten Nullstellen zu

$$s_1 = m\frac{\lambda_1}{2} = m\frac{c}{2f_1} \qquad m = 1,2,3 \ldots$$

$$s_2 = m\frac{\lambda_2}{2} = m\frac{c}{2f_2}$$

$$\Delta s_m = s_1 - s_2 = m\frac{1}{2}(\lambda_1 - \lambda_2) = m\frac{c}{2}\left(\frac{1}{f_1} - \frac{1}{f_2}\right) = m\frac{c}{2}\frac{f_2 - f_1}{f_1 f_2} \tag{2.6}$$

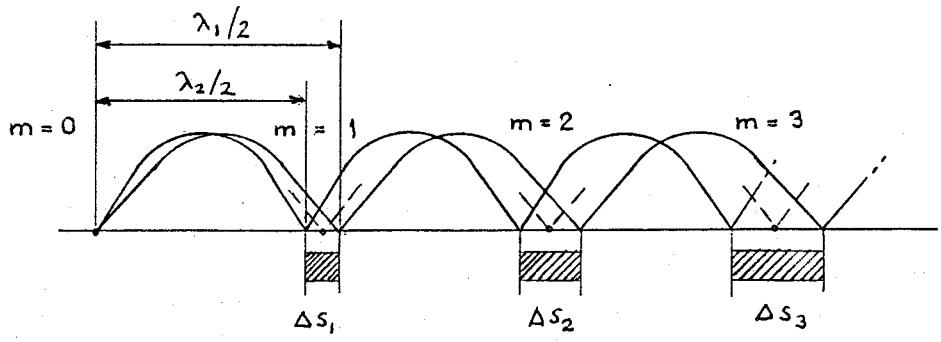


Abb. 2.1. Distanzbereiche Δs_1, Δs_2, Δs_3 ...., in die eine Nullstelle hineingesteuert werden kann und für die eine Distanzmessung möglich ist.

Wie man der Gl. (2.6) und der Abb. 2.1 entnimmt, wächst der Messbereich Δs_m proportional mit der Zyklenzahl m. Während für kurze Entfernungen nur in gewissen Bereichen eine Streckenmessung möglich ist, verschmelzen für grössere Entfernungen diese Bereiche in ein kontinuierliches Band und erlauben lückenloses Messen. Das ist von dort ab der Fall, wo die obere Grenze des m-ten Bereiches höher liegt als die untere Grenze des (m+1)-ten Bereiches. Nach Gl. (2.6) gilt in diesem Fall

$$s_{1,m} \geq s_{2,m+1}$$

$$m \frac{c}{2f_1} \geq (m+1) \frac{c}{2f_2}$$

Daraus und mit $f_1 = 470$ MHz, $f_2 = 490$ MHz wird

$$m \geq \frac{f_1}{f_2 - f_1} = \frac{470}{20} = 23{,}5 \quad \text{gerundet} = 24$$

und

$$s = m \frac{\lambda_1}{2} = 24 \cdot 0{,}32 = 7{,}68 \text{ m.}$$

Demnach kann man Strecken ab rund 8 m lückenlos messen. Ähnliche Überlegungen führen zur Erkenntnis, dass jede Strecke ab 16 m mit mindestens zwei und jede Strecke ab 24 m mit mindestens drei Nullstellen angefahren werden kann.

Die Verhältnisse sind in Tafel 2.1 tabellarisch dargestellt. Die Werte beruhen auf ausgeführten Messungen. Es wurden für jeden Streckenbereich Δs_m die unteren und oberen Grenzen auf Zentimeter genau aufgesucht, die Mitten bestimmt und über alle Mitten in bezug auf die

Zyklenzahl ϕ	Messbereich untere Grenze m	obere Grenze m	Breite Δs_m mm
0	0,163	0,163	0
1	0,470	0,482	12
2	0,777	0,801	24
3	1,084	1,121	37
4	1,391	1,440	49
5	1,698	1,759	61
6	2,004	2,078	74
7	2,311	2,397	86
8	2,618	2,717	99
9	2,925	3,036	111
10	3,232	3,355	123
11	3,539	3,674	135
12	3,846	3,993	147
13	4,153	4,313	160
14	4,460	4,632	172
15	4,767	4,951	184
16	5,073	5,270	197
17	5,380	5,589	209
18	5,687	5,909	222
19	5,994	6,228	234
20	6,301	6,547	246
21	6,608	6,866	258
22	6,915	7,185	270
23	7,222	7,505	283
24	7,529	7,824	295
25	7,836	8,143	307
26	8,142	8,462	320
27	8,449	8,781	332
28	8,756	9,101	345
29	9,063	9,420	357
30	9,370	9,739	369

Tafel 2.1. Untere und obere Grenzen und Breite der Messbereiche für kurze Entfernungen. Das Kontinuum beginnt ab 7,836 m.

Zyklenzahl m eine Regressionsgerade gelegt. Daraus ergab sich eine mittlere Messwellenlänge von $\lambda_0/2 = 0{,}313$ m und eine Additionskonstante von 163 mm. Letztere entspricht gerade dem Abstand zwischen Mekometerstehachse und -objektiv. Physisch liegt die (nach unserer Zyklenzählung) nullte Nullstelle (m = 0) also etwa in der Objektivlinse der Sende-Empfangsoptik. Die Bereichsbreiten wurden einer grafischen Regression entnommen. Die angegebenen Grenzen

stimmen auf einige mm genau; sie sind eher etwas zu eng geschätzt.

2.3 Das Programm PROMEKO

Das an der Technischen Universität München entwickelte Programm PROMEKO zur Steuerung des Messablaufs am ME5000 von einem Rechner aus bietet über das dem ME5000 eingebaute Standard-Messprogramm hinaus folgende Möglichkeiten:

1) Erweiterung des Messbereiches für kurze Distanzen unter 16 m und lange Distanzen über 8 km,
2) Auflösung der Anzeige auf 0,01 mm genau, anstatt auf 0,1 mm,
3) Angabe der Streuung dort, wo über mehr als eine Nullstelle gemessen wird,
4) meteorologische Reduktion der Rohdistanz,
5) Speicherung der Messdaten in einer Datei zur Weiterverwendung,
6) Automatik zur Strahlunterbrechung kann inaktiviert werden (vermeidet das lästige Klopfen bei kurzen Distanzen).

Es ist in BASIC geschrieben, umfasst etwa 750 Zeilen und wird bei uns auf einem Rechner Portable Plus der Firma Hewlett-Packard betrieben. Seine Handhabung ist sehr bequem, da es den Benutzer durch Fragen und Anweisungen Schritt für Schritt durch den ganzen Messablauf führt. Der aktuelle Stand der Messung kann anhand der auf dem Bildschirm erscheinenden Grob- und Feinfrequenzen für die Nullstellen verfolgt werden.

Abgesehen von einigen kleinen Tücken hat sich PROMEKO in der Praxis bestens bewährt. Ohne den angezeigten Hundertstelmillimeter wären die hier vorgestellten Untersuchungen in der angegebenen Präzision gar nicht möglich gewesen.

Bei kurzen Distanzen unter 8 m braucht der Algorithmus ab und zu für eine Messung sehr viel Zeit. In 17 von 68 Fällen (25%) lag die Messzeit über 4 Minuten, in zwei Extremfällen bei 1,084 m und 3,842 m über 10 Minuten.

Die Grenzen der "Beobachtungsfenster" für Entfernungen unter 8 m passen im Programm PROMEKO nicht immer genau auf die im ME5000 vorhandenen. Es gelang einige Male das Programm, das am Fensterrand bei Eingabe des genauen Näherungswertes "Keine Nullstelle" meldete, zu überlisten, indem man einen andern Näherungswert näher zur Fenstermitte wählte und so noch eine Messung zustande brachte.

3. Das Messprinzip des Laser-Interferometers HP-5526A von Hewlett-Packard

3.1 Funktionsweise

(vergl. [9], [10], [11],[12], [13])

Das Instrument arbeitet mit dem aus zwei Frequenzkomponenten bestehenden Strahl eines HeNe-Lasers, der im Interferometerwürfel (Michelson Interferometer) aufgespalten wird. Ein Teil wird auf den äusseren, variablen und der andere auf einen inneren, festen Messweg geschickt (Abb. 3.1). Die beiden Strahlen, die sich in der Frequenz leicht unterscheiden, werden - nach Reflexion an Würfelspiegeln - im Interferometer wieder vereinigt und zur Überlagerung gebracht. Dabei entsteht eine Schwebefrequenz Δf_D (Wechsel hell-dunkel) von etwa 2 MHz im Radiofrequenzbereich, die von einer Diode empfangen und in einem Zähler gezählt wird. Bei Bewegung des Reflektors auf dem äusseren Messweg ändert sich die Frequenz nach dem Dopplerprinzip um f_D, und zwar wird sie grösser, wenn man den Reflektor auf das Interferometer zu und kleiner, wenn man ihn vom Interferometer weg bewegt. Der gleiche Effekt tritt auch bei einer Bewegung des Interferometers relativ zum Reflektor, das heisst, allgemein bei jeder Abstandsänderung auf.

Vor dem Eintritt in den Interferometerwürfel wird ein Teil des Strahls durch einen Strahlteiler abgezweigt und aus den beiden Frequenzkomponenten eine zweite, feste Schwebefrequenz Δf erzeugt. Von beiden Schwebefrequenzen werden, beginnend mit dem Drücken des RESET-Knopfes, die Zyklen gezählt.

Der Unterschied in der Zyklenzahl von Δf und Δf_D ist direkt proportional zum Weg, den der Reflektor zurücklegt, genauer gesagt, zur Verschiebungskomponente des Reflektors in Richtung des Messstrahls. Bei ruhendem Reflektor gilt $\Delta f_D = \Delta f$.

Die Lichtfrequenz f und auch die Schwebungsfrequenz Δf_D erfährt nämlich bei einer Schiebung des Spiegels mit der Geschwindigkeit v durch den Dopplereffekt die Änderung (Faktor 2 wegen Reflexion)

$$f_D = 2\frac{v}{c}f \qquad \text{(c = Lichtgeschwindigkeit)} \qquad (3.1)$$

Die Zahl der Zyklen (Phasenfortschritt), die bei der Frequenz f_D über das Zeitintervall dt gezählt werden, ist

$$d\phi_D = f_D dt = 2\frac{v}{c}f\,dt = 2\frac{f}{c}ds = \frac{2\,ds}{\lambda} = \frac{ds}{\lambda/2} \qquad (3.2)$$

Die gezählte Zyklenzahl $d\phi_D$ ist also gleich der Anzahl halber Wellenlängen von λ, die der Reflektor bei der Verschiebung ds überstreicht. $\lambda \cong 0{,}6328\ \mu m$ ist die Wellenlänge des vom

Laser-Interferometer von Hewlett-Packard

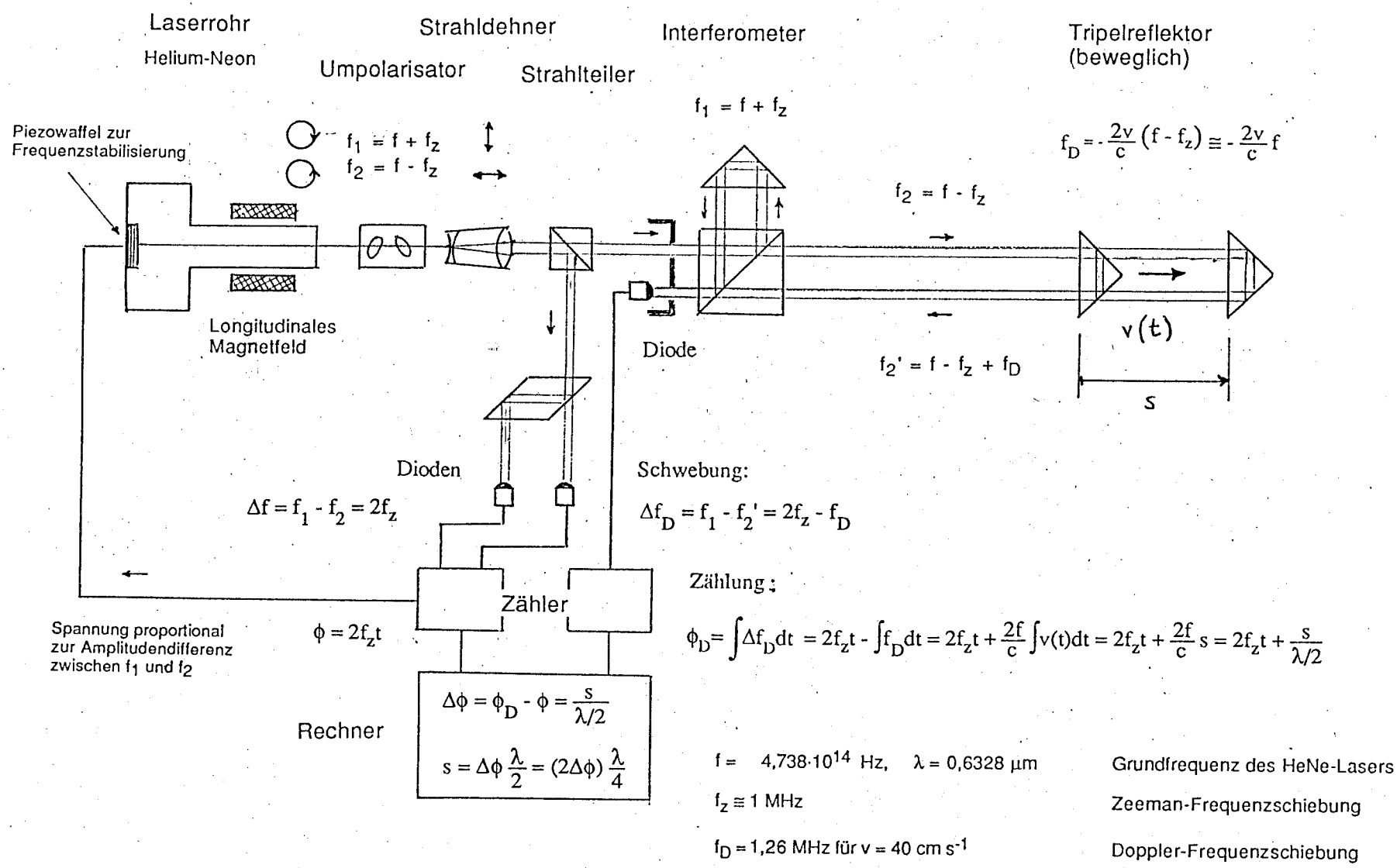


Abb. 3.1. Prinzipschema des Laser-Interferometers von Hewlett-Packard

HeNe-Laser ausgestrahlten Lichtes. Man beachte: Da im HP5526A die Zyklenzählung rechnerisch verdoppelt wird, zählt das Gerät λ/4-Zyklen.

3.2 Reduktion der Ablesung

Mit einem Schalter kann die Einheit der angezeigten Strecke als λ/4, Zoll oder Millimeter gewählt werden. Die Umwandlung der gezählten Zyklendifferenz in λ/4-Einheiten, Zoll oder mm geschieht geräteintern, wobei die an Ziffernrädern einstellbare Zahl C der "Compensation-ppm" berücksichtigt wird. Die *eingestellte Brechzahl* N_e berechnet sich nach [12] aus C als

$$N_e = \left(\frac{10^6}{999000+C} - 1\right)\cdot 10^6 \cong 1000 - C \quad \text{(in ppm, Fehler der Näherung 0,06 ppm)} \qquad (3.3)$$

und der *eingestellte Brechungsindex aus*

$$n_e = 1 + N_e \cdot 10^{-6} \qquad (3.4)$$

Die angezeigte Distanz wird aus der Zählung ϕ im Instrument als

$$a = \phi \frac{\lambda_e}{4} = \phi \frac{\lambda_0}{4} \cdot \frac{1}{n_e} \qquad (\lambda_0 = \text{Vakuumwellenlänge}) \qquad (3.5)$$

berechnet.

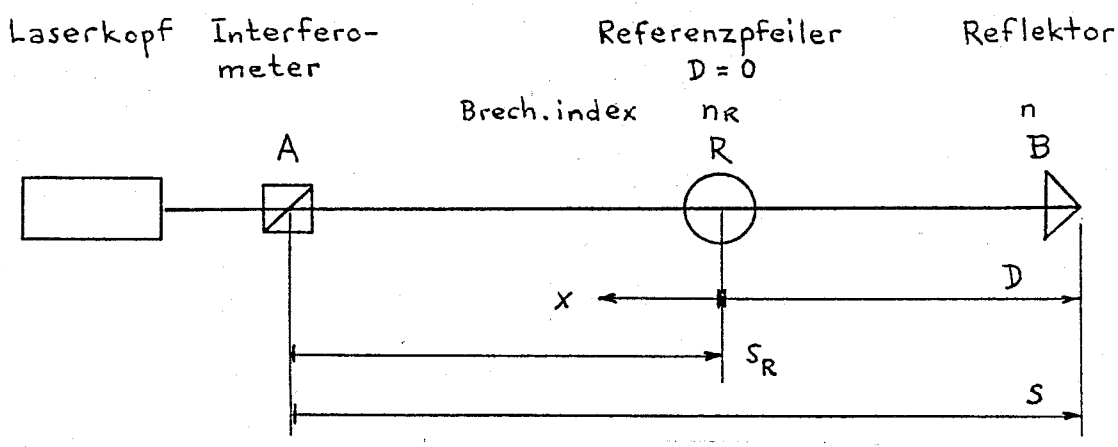


Abb. 3.2. Messandordnung. Die gemessenen Strecken D beziehen sich auf den Referenzpfeiler R.

Wir wollen nun im einzelnen untersuchen, wie die angezeigte Distanz bei einer Messung entsteht, wobei wir berücksichtigen, dass sich bei längeren Messreihen auch die Meteorologie (der Brechungsindex) zwischen der Ablesung im Anfangs- und Endpunkt von D ändern kann.

Aus der angezeigten schliessen wir dann auf die korrigierte Distanz. Die angezeigte Distanz ändert sich also:

1) beim Verschieben des Reflektors, wie unter 3.1 erläutert,
2) bei Änderung des Brechungsindex n über die Strecke s. Dann zieht sich nämlich der für die Interferenz massgebende Wellenzug zusammen oder dehnt sich aus, was ebenfalls die Zählung der hell-dunkel Zyklen an der Diode beeinflusst.

Es seien ϕ_D' und ϕ_s' die Anzahl Wellenlängen (Zyklen) auf den Strecken 2D und 2s (Abb. 3.2). Im Gerät muss wegen der Verdoppelung im Phasenzähler mit $\phi_D = 2\phi_D'$ und $\phi_s = 2\phi_s'$ gerechnet werden.

$$\phi_D = \frac{4D}{\lambda} = \frac{4Dfn}{c_0} \qquad (c_0 = \text{Vakuumlichtgeschwindigkeit})$$

$$\phi_s = \frac{4s}{\lambda} = \frac{4sfn}{c_0} \tag{3.6}$$

Differenzieren gibt die Änderung der Zählung

$$d\phi_D = p\,\phi_D \frac{dD}{D} \qquad \text{bei der Verschiebung } dD$$

$$d\phi_s = p\,\phi_s \frac{dn}{n} \qquad \text{bei einer Änderung } dn \tag{3.7}$$

p ist ein Paritätsparameter, der den Richtungssinn der Zählung berücksichtigt. Es gilt

$p = +1$, wenn Schalter "Direction Sense" auf F (Forward)

$p = -1$, wenn Schalter "Direction Sense" auf R (Reverse)

Beziehungen: $1/p = p, \quad p^2 = 1$ (3.8).

Die resultierende Änderung in der Ablesung ist nach (3.5), (3.6) und (3.7) und Abb. 3.2

$$da_D = d\phi_D \frac{\lambda_e}{4} = p\,\phi_D \frac{\lambda_e}{4}\frac{dD}{D} = p\frac{\lambda_e}{\lambda}dD = p\frac{n}{n_e}dD$$

$$da_s = d\phi_s \frac{\lambda_e}{4} = p\,\phi_s \frac{\lambda_e}{4}\frac{dn}{n} = p\,s\frac{\lambda_e}{\lambda}\frac{dn}{n} = p\,s\frac{dn}{n_e} = p\,s_R\frac{dn}{n_e} + p\,D\frac{dn}{n_e} \tag{3.9}$$

Die gesamte Änderung der Ablesung ist die Summe der beiden

$$da = da_D + da_s = \frac{p}{n_e}(s_R dn + n\,dD + D\,dn) = \frac{p}{n_e}(s_R dn + d(nD)) \tag{3.10}$$

Durch Integrieren erhält man den Unterschied der Ablesungen in R und B

$$a - a_R = \int_{D=0}^{D} da = \frac{p}{n_e}(s_R \int dn + \int d(nD)) = \frac{p}{n_e}(s_R(n - n_R) + nD) \qquad (3.11)$$

Bemerkung: Die Ablesung a (genauer $a - a_R$) ist eine Zustandsvariable, d. h. sie hängt nur von den Messpunkten R und B und dem zur Zeit der Ablesung auf diesen Punkten gültigen n ab, und nicht davon, auf welchem Weg oder wie schnell im einzelnen die Punkte angefahren wurden oder die Atmosphäre während des Messvorgangs sich verändert hat.

Die Gleichung (3.11) lässt sich nach der gesuchten Distanz D auflösen.

$$D = \frac{1}{n}(p\, n_e\, (a - a_R) - s_R\, (n - n_R)) \qquad (3.12)$$

Nach kleinen Umformungen und die Genauigkeit nicht beeinträchtigenden Vernachlässigungen entsteht

$$p\, D = (a - a_R) + (n_e - n)\, (a - a_R) + p\, (n_R - n)\, s_R \qquad (3.12a)$$

Bei *gleichläufiger Zählung* (zunehmender Abstand vom Interferometer positiv) gilt p = +1 und

$$D = (a - a_R) + (n_e - n)\, (a - a_R) + (n_R - n)\, s_R \qquad (3.12b)$$

bei *gegenläufiger Zählung* p = -1

$$x = -D = (a - a_R) + (n_e - n)\, (a - a_R) + (n - n_R)\, s_R \qquad (3.12c)$$

4. Der Brechungsindex

4.1 Beim ME5000

Da die Messwelle dem Lichtstrahl aufmoduliert ist (Polarisationsmodulation), muss der Brechungsindex für die *Gruppengeschwindigkeit* in die Korrekturformel eingeführt werden. Dieser wird im Programm PROMEKO nach Cauchy und Barrell & Sears berechnet.

$$N_{Gr,0} = 287{,}604 + 3\,\frac{1{,}6288}{\lambda^2} + 5\,\frac{0{,}0136}{\lambda^4} \quad \text{(ppm)}$$

$$N_{Gr} = \frac{N_{Gr,0}}{1+\frac{t}{273{,}16}} \cdot \frac{p}{760} - 0{,}55\,\frac{e}{1+\frac{t}{273{,}16}} \quad \text{(ppm)} \qquad (4.1)$$

Darin bedeuten

$N_{Gr,0}$	die Gruppenbrechzahl in ppm bei t = 0 °C, p = 760 mm Hg
N_{Gr}	die Gruppenbrechzahl bei der Messung, t = Temp. in °C, p = Luftdruck in mm Hg, e = Partialdruck H_2O in mm Hg
$\lambda = 0{,}6328\ \mu m$	Wellenlänge des HeNe-Laserlichts

Die dem Mekometer ME5000 eingebaute Brechzahl ist

$N_e = 284{,}514844$ ppm

4.2 Beim HP5526A

Das Interferometer arbeitet direkt mit der Lichtwelle als Messwelle, deshalb ist hier der Brechungsindex für die *Phasengeschwindigkeit* massgebend. Dieser ist für $\lambda = 0{,}6328$ µm um etwa 7,5 ppm kleiner als der Gruppenindex. Wir benutzen zur Berechnung der Brechzahl die von der Firma Hewlett-Packard in [12] angegebene Formel.

$$N_{Ph} = 0{,}287752989\ p \cdot \frac{1+(0{,}6128 - 0{,}00998\ t)\cdot 10^{-6} p}{1+0{,}0036610\ t} - 0{,}003033\ u\ e^{0{,}057627\ t} \qquad (4.2)$$

Darin bedeuten

N_{Ph}	die Phasenbrechzahl in ppm
p	der Luftdruck in hPa
t	die Temperatur in °C
u	die relative Feuchtigkeit in %

5. Additionskonstante und Zentriergenauigkeit des ME5000

5.1 Nach Schwendener

Sie wurde im Messkeller des IGP über 7 Pfeiler bestimmt, die genau auf einer Geraden auf gleichem Niveau liegen und vom Endpfeiler aus die Abstände 4, 10, 20, 30, 40 und 50 m haben.

Die Additionskonstante ergibt sich (Tabelle 5.1) zu

a = -0,111 mm ± 0,022 mm

und der mittlere Fehler einer gemessenen Strecke zu 0,049 mm. Die grösste Verbesserung an einer Strecke ist betragsmässig 0,071 mm.

5.2 Auf der Messbahn

Es wurde zuerst mit dem Interferometer der ca. 8 m lange Abstand zwischen Pfeiler 0 und 8 gemessen, dann die Strecke mit dem ME5000 bestimmt und zum Schluss die Messung mit dem Interferometer wiederholt.

Bei der Interferometermessung wurden mit dem auf den Messwagen montierten Mikroskop der linke und rechte Rand der Kern-Zentrierbohrung abgelesen. Die Einstellung ist fast auf Mikrometer genau möglich. Bei der Mekometermessung wurde der Reflektor einmal

mit Visier unten, ein zweites Mal mit Visier oben eingestellt.

Messung	HP5528A mm	ME5000 mm	Mittel mm
Interferometer, vorher	8003,0990		
" , nachher	8003,1004		8003,100
Mekometer, Vis. unten		8003,22	
" , Vis. oben		8003,16	8003,19
Additionskonstante		**a =**	**-0,09 mm**

Der Wert stimmt auf 0,02 mm mit dem Ergebnis nach Schwendener überein.

Additionskonstante nach Schwendener
****

Gerät : ME5000

Eichstrecke : Messkeller Nr. 0 bis 50
Datum : 12.2.91
Beobachter : DAHöSCHOVO

	Strecke	Länge korr. für Freq. und Meteo L1 m	Länge + Add.konst. L2 = L1+a m	v mm	Länge ausgeglichen L = L2+v m
1	0-1	3.99838	3.99827	.012	3.99828
2	0-2	9.99874	9.99863	-.042	9.99859
3	0-3	20.00216	20.00205	-.008	20.00204
4	0-4	30.00233	30.00222	.071	30.00229
5	0-5	40.00217	40.00206	-.056	40.00200
6	0-6	50.00129	50.00118	.024	50.00120
7	1-2	6.00035	6.00024	.066	6.00031
8	1-3	16.00389	16.00378	-.020	16.00376
9	1-4	26.00408	26.00397	.040	26.00401
10	1-5	36.00390	36.00379	-.067	36.00372
11	1-6	46.00304	46.00293	-.008	46.00292
12	2-3	10.00356	10.00345	.005	10.00345
13	2-4	20.00385	20.00374	-.035	20.00370
14	2-5	30.00350	30.00339	.027	30.00342
15	2-6	40.00270	40.00259	.027	40.00262
16	3-4	10.00038	10.00027	-.019	10.00025
17	3-5	20.00010	19.99999	-.027	19.99996
18	3-6	29.99925	29.99914	.023	29.99916
19	4-5	9.99977	9.99966	.053	9.99971
20	4-6	19.99902	19.99891	.003	19.99891
21	5-6	9.99938	9.99927	-.069	9.99920

Additionskonstante: a = -.111 mm +/- .022 mm

Tabellle 5.1. Additionskonstante nach Schwendener

5.3 Zentriergenauigkeit

Die Zwangszentrierung von Kern, mit der das Mekometer ausgestattet ist, erlaubt ein bequemes und schnelles Zentrieren und genügt der von der Firma für das Mekometer spezifizierten Genauigkeitsanforderung von 0,2 mm. Wie verhält es sich damit, wenn man Genauigkeiten von unter einem Zehntelmillimeter erreichen möchte?

Wir haben diese Frage anhand von einigen Kern-Zentrierplatten untersucht. Zu diesem Zwecke wurde an der Zentrierbuchse der Durchmesser der Bohrung und auch das Spiel zwischen Zentrierzapfen und Bohrung gemessen. Für letzeres wurden einige am IGP hergestellte Kern-Wild-Adapter benutzt, die unten mit dem Bajonettschloss der Kern-Zentrierung versehen sind und oben das 5/8-Zoll Gewinde der Wild-Zentrierung tragen. Als Nebenresultat fiel die Exzentrizität am Kern-Wild-Adapter an.

Bohrung der Zentrierplatte

Pfeiler	Messdatum	Durchmesser mm	m.F. µm	Gewog.Mittel mm
0	4./5.12.90	12,020	5,6	12,012
	27.2.91	12,011	2,5	
28	4./5.12.90	12,005	3,6	12,000
	27.2.91	11,997	2,5	
52	4./5.12.90	12,014	3,6	12,014

Gewogenes Gesamtmittel	12,007
Variation einer Bohrung um das Mittel, m.F.	±7,8 µm

Die mittlere Variation einer Bohrung, einschliesslich Messungenauigkeit, kommt aus der zugegebenermassen kleinen Stichprobe kleiner als 0,01 mm heraus. Sie kann auf jeden Fall vernachlässigt werden.

Spiel des Zapfens in der Bohrung

Das Ergebnis ist aus der Untersuchung von drei Adapterplatten Kern-Wild abgeleitet. Der Adapter wurde auf die Zentrierplatte aufgesetzt, der Zapfen links zum Anschlag gebracht, der Bajonettverschluss geklemmt, mit dem Mikroskop des Messwagens der linke und rechte Aussenrand des 5/8-Zoll Gewindes eingestellt (oberste sichtbare Windung) und das Interferometer beidemale abgelesen. Dasselbe wurde für den Zapfen am rechten Anschlag wiederholt. Entsprechende Ablesungen wurden für die beiden andern möglichen Orientierungen gemacht, wo der Adapter um 120° und 240° gegenüber der ursprünglichen Stellung verdreht ist. Die

Differenzen zwischen Anschlag links und rechts geben Auskunft über das Spiel, die Mittel über die im nächsten Abschnitt behandelten Exzentrizitäten.

Zentrierteller Nr.	Spiel µm
1	110 ± 5
2	159 ± 2
3	33 ± 4

Man erkennt, dass die Werte von Zapfen zu Zapfen erheblich variieren. Im schlimmsten festgestellten Fall könnten 0,16 mm Unterschied zwischen zwei Messungen entstehen. Da man den Teller gewöhnlich nicht in den Extremlagen, sondern irgendwie zufällig zwischendrin aufsetzen wird, muss man für den besagten Zapfen mit einem mittleren Zentrierfehler von etwa 0,04 mm rechnen.

Exzentrizitäten am Adapterteller

Es handelt sich um die Exzentrizität des Wild-Gewindezapfens in bezug auf den Kern-Zapfen.

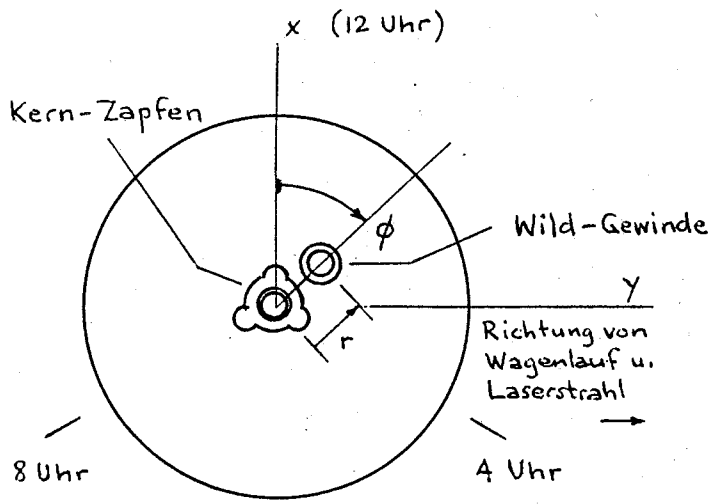


Abb. 5.1.
Kern-Wild-Adapter.
Exzentrizität stark übertrieben.

Zur Berechnung definiert man auf dem Teller eine Nullrichtung und auf der Messbahn ein Koordinatensystem, wie in Abb. 5.1 angegeben. Für die drei möglichen Orientierungen des Adapters: 12 Uhr, 4 Uhr, 8 Uhr, seien y_{12}, y_4, y_8 die aus Anschlag links und rechts gemittelten Werte für das Zentrum des Wild-Gewindes. Im Idealfall ($r = 0$) müsste $y_{12} = y_4 = y_8$ gelten, reell entstehen Unterschiede.

Orientierung	HP-Interferometer	Unterschiede
12 Uhr	y_{12}	$a_1 = y_4 - y_{12}$
4 Uhr	y_4	$a_2 = y_8 - y_4$
8 Uhr	y_8	$a_3 = y_{12} - y_8$

Die Exzentrizitätselemente berechnen sich dann aus den (hier ohne Herleitung gegebenen) Beziehungen

$$r \cos \phi = -\frac{2a_1 + a_2}{3}$$

$$r \sin \phi = \frac{a_2}{\sqrt{3}} \qquad (5.1)$$

am einfachsten mit der R→P-Taste eines Taschenrechners.

Adapter Nr.	Orientierung	Ablesung y mm	Diff. a µm	r µm	ϕ °(sex.)
1	12 Uhr	8,7342	-87,7	50,8	24,7
	4	8,6465	36,8		
	8	8,6833	50,9		
2	12	8,7268	-29,5	34,8	329,3
	4	8,6973	-30,7		
	8	8,6666	60,2		
3	12	8,6916	19,4	14,5	170,4
	4	8,7110	4,2		
	8	8,7152	-23,6		

Tabelle 5.2. Exzentrizitäten von drei Kern-Wild Adaptern.

6. Vergleichsmessungen auf der Messbahn zwischen ME5000 und HP5526A

6.1 Gleichläufige Messungen

Bei dieser Messanordnung messen Mekometer und Interferometer von derselben Seite her. Das Mekometer kann dabei nicht auf einen Pfeiler der Messbahn plaziert werden, weil es sonst den Laserstrahl abdecken würde, sondern muss auf einem Stativ hinter der Messbahn und dem Laserkopf aufgestellt werden (Abb. 6.1). Natürlich wird es vorteilhaft so nahe wie

möglich ans Interferometer herangerückt. Dann durchlaufen beide Strahlen, abgesehen von kurzen Stücken am Anfang und am Ende, fast die gleichen Raumsegmente und atmosphärische Einflüsse wirken sich ungefähr gleich aus.

Die Interferometermessungen erlauben kein absolutes Überprüfen der vom Mekometer gemessenen Distanz, sondern lediglich von Distanzunterschieden. Das ganze läuft auf einen Vergleich der Massstäbe beider Geräte im Kurzdistanzbereich hinaus. Dazu wurden von 5 bis 53 m alle zwei Meter eine Messung ausgelöst und anschliessend die Mekometerwerte mit den Interferometerwerten in einer linearen Regression verglichen.

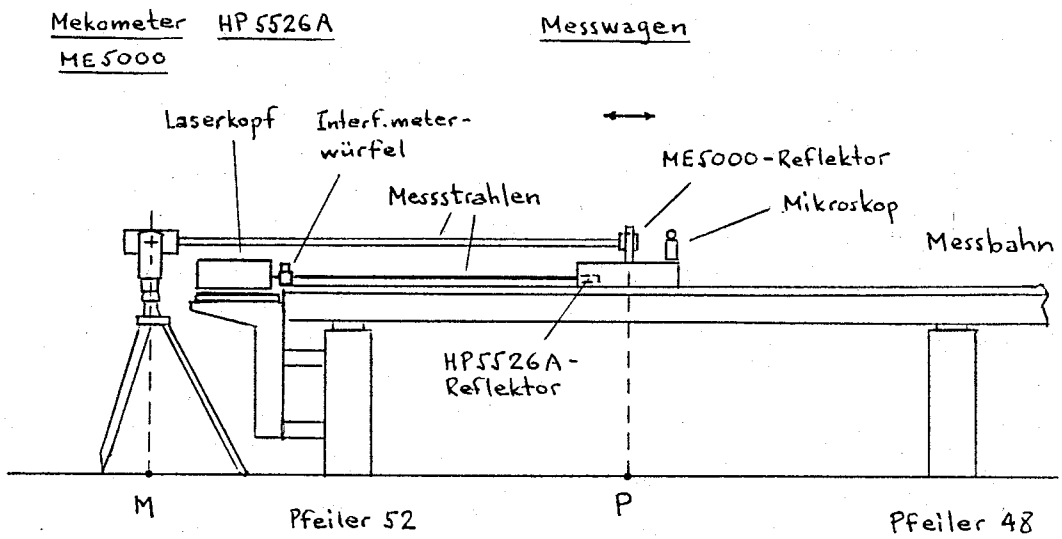


Abb. 6.1. Gleichläufige Messandordnung.

Die Messserie dauerte 3¼ Stunden. Die atmosphärischen Parameter wurden sorgfältig gemessen. Während der ganzen Zeit änderte sich die Temperatur um 0,1°C, der Druck um 1,9 hPa und die relative Feuchte, bei sehr trockenen Verhältnissen von etwa 17%, um 1,5%.

Auf dem Messwagen war der Neigungsmesser NIVEL20 von Kern montiert, mit dem Unebenheiten der Messschienen festgestellt und als Neigungskorrekturen an der Mekometerdistanz berücksichtigt wurden.

In der Abb. 6.2 bedeuten

$\gamma =$ Lotlinienkonvergenz bezüglich Punkt M

$\beta' =$ am NIVEL20 abgelesene Neigung (inkl. Nullpunktsfehler)

$\beta =$ do. ohne Nullpunktsfehler

$h =$ Höhe des Mekometerreflektors über HP-Reflektor

$s =$ Solldistanz Mekometer

$s' =$ abgelesene Distanz Mekometer

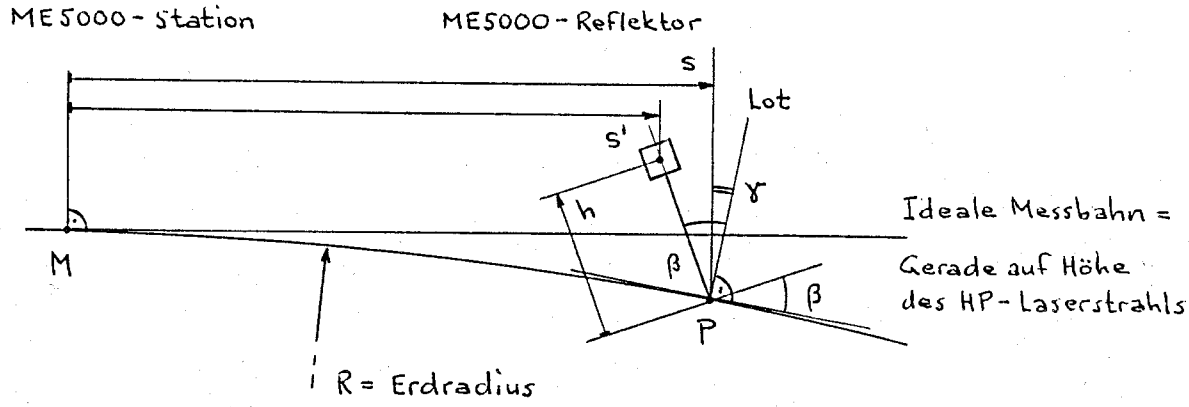


Abb. 6.2. Einfluss von Messwagenneigung und Erdkrümmung auf die in Höhe h über der Messbahn gemessene Mekometerdistanz.

Es gilt

$$s' = s + \gamma h - \beta h$$

$$s = s' + (\beta - \gamma)\, h \qquad (6.1)$$

Da wir nur Differenzen von Mekometerdistanzen und Interferometerdistanzen miteinander vergleichen, sind Nullpunktsfehler ohne Bedeutung, sodass man β durch die Ablesung β' ersetzen und die β' selber um eine beliebige Konstante verändern darf. Die β' können zum Beispiel auf den Anfangspunkt P_1 der Strecke bezogen werden. Dann lautet die endgültige Formel

$$s = s' + (\beta' - \beta_1')\, h - \gamma h \qquad (6.2)$$

Auf der 50 m langen Messbahn des IGP beträgt die Lotlinienkonvergenz $\gamma = s/R$ für die beiden Endpunkte etwa 8 ppm und die gemessene Variation in der Wagenneigung $\pm$ 65 ppm.

Der gleichläufigen Messandordnung ist, wie im nächsten Abschnitt erläutert, bei einem Massstabsvergleich unbedingt der Vorzug über die gegenläufige zu geben.

6.2 Gegenläufige Messungen

Mit dieser Messanordung wurde das Ziel verfolgt, die Mekometerdistanzen absolut zu überprüfen. Dazu wurde auf zwei Stützpfeilern der Messbahn (Pfeiler 0 und 8) je eine Kern-Zentrierplatte montiert und der Abstand zwischen beiden Platten mit dem Interferometer genau gemessen. Auf den Endpfeiler (Pfeiler 0) wurde anschliessend das Mekometer gestellt und der Pfeiler 8 als Referenzpfeiler benutzt, wo Mekometer- und Interferometerablesungen direkt miteinander verglichen werden können. Der Referenzpfeiler diente auch als erneuter Anknüp-

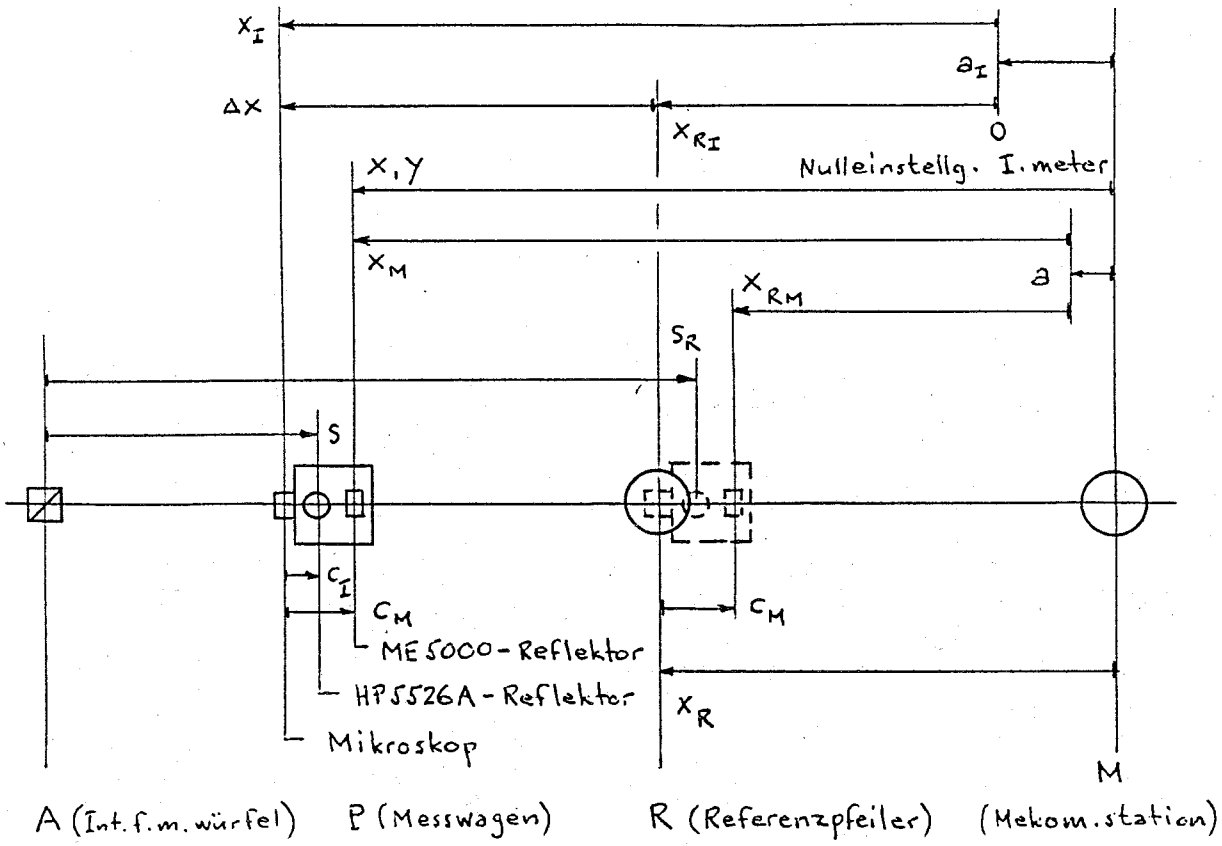
fungspunkt im Falle von Strahlunterbrechung beim Interferometer.

Die nicht ganz einfachen Verhältnisse sind in Abb. 6.3 dargestellt. Man muss auf dem Messwagen drei Bezugspunkte berücksichtigen: das Ablesemikroskop und die beiden Reflektoren für Mekometer und Interferometer. Der Laserkopf und das ME5000 stehen an entgegengesetzten Enden der ca. 50 m langen Messbahn, die Messstrahlen laufen dabei über komplementäre Raumsegmente, und Inhomogenitäten des atmosphärischen Brechungsindex beeinflussen die beiden Strahlen unterschiedlich.

Bei der ersten Messserie zeigte sich bald, dass Gegenäufigkeit viel kritischer ist als Gleichläufigkeit. Nicht nur ist es schwieriger, den Brechungsindex genau zu erfassen, zusätzlich muss die Hypothese der räumlichen Stabilität der Messbahnpfeiler fallen gelassen werden. Dies war zu erwarten, da die Pfeiler oben durch die massiven Stahlträger der Messbahn miteinander verbunden sind. Der lineare Dehnungskoeffizient von 11 ppm pro °C von Stahl bewirkt schon bei einer Temperaturänderung von 0,1 °C eine Längenänderung von 1 ppm, die sich mindestens teilweise auf die Pfeiler überträgt.

Mit der ersten Messserie, die sich über mehrere Tage erstreckte und bei der die Temperatur um mehr als 1 °C schwankte, liess sich die angestrebte Genauigkeit nicht erreichen. Bei einer zweiten Serie wurden zur Verminderung der schädlichen Effekte folgende Massnahmen getroffen:

1) Die gesamte Messdauer wurde kurz gehalten ($3^1/_2$ Stunden).
2) Der Referenzpfeiler wurde möglichst nahe beim Mekometer gewählt (8 m anstatt 28 m).
3) Die Entfernung zwischen Pfeiler 0 (Mekometerstandort) und Referenzpfeiler 8 wurde vor und nach der Messserie gemessen.
4) Ebenso wurde die Entfernung zwischen Pfeiler 0 und einer Lichtschranke in der Nähe des Interferometerwürfels (Punkt A) vor und nach der Messserie gemessen. Damit liess sich die zeitliche Änderung des Abstandes zwischen den massgebenden Bezugspunkten und eine Korrektur für die Ausdehnung der Messbahn berechnen. Die totale Änderung betrug 0,122 mm (2,4 ppm). Mangels einer besseren Hypothese wurde linear mit einer zeitlichen Rate von 0,58 µm pro Minute gerechnet.



x_I'	Rohablesung Interferometer (I), wenn Mikroskop über dem Punkt steht
x_M'	Rohablesung Mekometer (M), wenn Mikroskop über dem Punkt steht
x_I, x_M	meteorologisch korrigierte Ablesungen
x_{RI}, x_{RM}	do. für Referenzpfeiler
a_I, a	Additionskonstanten I, M
$\Delta x'$, Δx	mit Interferometer gemessener Abstand vom Referenzpfeiler aus, roh und meteokorrigiert
x_R	bekannter, vorgängig gemessener Abstand zwischen Referenzpfeiler und Mekometerstation
c_I, c_M	Abstände der Reflektoren von I und M zum Mikroskop
s, s_R	Entfernung vom HP-Interferometerwürfel zum HP-Reflektor für Punkt P und R
n, n_R	Brechungsindex für HP-Interferometer zur Zeit der Punktmessung und Referenzmessung
n_M	Brechungsindex für Mekometer
n_e, n_{eM}	eingestellter (eingebauter) Brechungsindex für I und M
x	aus Interferometermessungen berechnete Distanz zwischen Pfeiler M und Mekometerreflektor P
y	do. aus Mekometermessung

Abb. 6.3. Gegenläufige Messanordnung.

Rechnerische Auswertung

Die instrumentell und meteorologisch korrigierte Mekometerdistanz ist

$$y = x_M' \frac{n_{eM}}{n_M} + a \qquad (6.3)$$

n_{eM} = 1,000284514844

a = Additionskonstante, vorgängig bestimmt

Die entsprechende Distanz x berechnet sich aus den Interferometerablesungen über den Abstand zum Referenzpfeiler als

$$\Delta x' = x_I' - x_{RI}' \qquad \text{aus Rohablesungen}$$

$$\Delta x = \Delta x' + (n_e - n)\,\Delta x' + (n - n_R)\,s_R \qquad \text{nach (3.12c)}$$

$$x = x_R + \Delta x - c_M \qquad (6.4)$$

Der Abstand c_M zwischen Mikroskop und Mekometerreflektor ermittelt sich als

$$c_M = x_R - (x_{RM} + a) \qquad (6.5)$$

aus einer (ev. gemittelten) Mekometerablesung x_{RM}, wenn das Mikroskop über dem Referenzpfeiler R steht. x_R wird mit dem Interferometer vorgängig gemessen.

Die ganze Messerie besteht aus einer Reihe von n Punkten x_i, y_i, in die man mittlels linearer Regression eine Gerade legt entsprechend

$$y_i + v_i = \alpha x_i + b \qquad (6.6)$$

α Steigungsfaktor

b y-Achsabschnitt

Am einfachsten bezieht man die x-Werte auf ihren Schwerpunkt.

$$\xi_i = x_i - x_S\,, \qquad x_S = \frac{1}{n}\sum x_i\,, \qquad \sum \xi_i = 0 \qquad (6.7)$$

Dann schreibt sich (6.6) als

$$y_i + v_i = \alpha \xi_i + \beta \qquad (6.8)$$

β y-Achsabschnitt im Schwerpunkt

Die Lösung für die Parameter lautet

$$\alpha = \frac{\sum \xi_i y_i}{\sum \xi_i^2}, \qquad \beta = \frac{1}{n} \sum y_i, \qquad b = \beta - \alpha x_S \tag{6.9}$$

Als Streuungsmasse ergeben sich

$$m = \sqrt{\frac{\sum v_i^2}{n-2}}$$ mittlerer Fehler eines y_i

$$m_\alpha = \frac{m}{\sqrt{\sum \xi_i^2}}$$ m. F. des Steigungsfaktors (6.10)

$$m_\beta = \frac{m}{\sqrt{n}}$$ m. F. der y-Koord. des Schwerpunktes

$$m_b = \sqrt{m_\beta^2 + (x_S m_\alpha)^2}$$ m. F. des y-Achsabschnitts

α und b sollten statistisch signifikant die Werte $\alpha = 1$, $b = 0$ annehmen. Wären sie signifikant verschieden, würde das heissen

für $\alpha \neq 1$: Mekometer und Interferometer haben unterschiedliche Massstäbe.

für $b \neq 0$: Die Konstanten a und c_M sind zu wenig genau bestimmt.

6.3 Ergebnisse

Die wichtisgsten Ergebnisse sind für beide Messanordnungen in der Tabelle 6.1 zusammengestellt.

Massstabsfaktor

Man bemerkt, dass in beiden Messreihen der Massstabsfaktor nicht signifikant von eins abweicht. Die genauere Bestimmung ergibt sich bei Gleichlauf, wo das 95%-Vertrauensintervall etwa ± 1 ppm ist. Mit dieser Schranke sind wir für die relativ kurze Vergleichsbasis von 50 m Länge an der Grenze der Verifizierbarkeit, die durch den Messfehler des Mekometers von ± 0,035 mm gesetzt ist. Um die in der Anleitung [3] spezifizierten 0,2 ppm sicher zu verifizieren, müsste eine etwa fünfmal längere Messbasis von 250 m zur Verfügung stehen. Schlussfolgerung: Soweit verifizierbar stimmt der Massstab.

	Messanordnung gleichläufig	gegenläufig
Anzahl Messpunkte	25	24
Kürzeste Strecke	5,15 m	4,23 m
Längste Strecke	53,14 m	52,00 m
Massstabsfaktor	**1 - 0,18 ppm**	1 + 1,08 ppm
mittl. Fehler	**± 0,48 ppm**	± 0,79 ppm
Nullpunktsverschiebung	1148,579 mm	- 0,021 mm
mittl. Fehler	± 0,015 mm	± 0,025 mm
Mittl. F. an einer Mekometerdistanz	**± 0,035 mm**	± 0,056 mm
Betragsmässig grösstes Residuum	0,068 mm	0,139 mm

Tabelle 6.1. Massstabsfaktor und Messgenauigkeit des Mekometers ME5000.

Additionskonstante

Die Messwerte y sind sind bereits für die Additionskonstante a = - 0,090 mm korrigiert. Ihre Richtigkeit wird durch die festgestellte kleine Nullpunktverschiebung von - 0,021 mm bei der gegenläufigen Messanordnung (Sollwert null) bestätigt. Das 95%-Vertrauensintervall beträgt hier etwa ± 0,05 mm. Eine gewisse Vorsicht ist bei der Verwendung verschiedener Prismen angebracht, da dann nach Copeland-Davis, Menant [8] die Additionskonstante um 0,1 bis 0,2 mm variieren kann.

Der y-Achsabschnitt von 1148,58 mm bei der gleichläufigen Messanordnung definiert den Abstand zwischen Mekometer und Reflektor, wenn das Mekometer auf EDM-Null und der Messwagen auf dem Punkt der Nulleinstellung des Interferometers steht (Lichtschranke auf der Messbahn). *Bemerkung:* In der Zusammenfassung auf Seite 3 steht ein um 0,2 mm kleinerer Wert mit einem grösseren mittleren Fehler. In jenem Wert sind auch Ungenauigkeiten der Zentrierung mit dem optischen Lot berücksichtigt.

Messgenauigkeit des Mekometers

Der massgebende Wert sind die aus den Residuen hergeleiteten ± 0,035 mm der gleichläufigen Messandordnung, weil bei Gegenlauf noch andere Einflüsse wirken. Dieser Wert stimmt gut mit den von Maurer, Schirmer, Schwarz [7] publizierten ± 0,03 mm überein.

LINEARE REGRESSION
****

Lauf-Nr.	Punktbezeichnung	HP5526A x mm	ME5000 y (gem.) mm	y (ausgegl.) mm	v mm
1	4	3999.652	5148.220	5148.231	-.011
2	6	6000.070	7148.667	7148.648	.019
3	8	8000.037	9148.674	9148.615	.059
4	10	10000.042	11148.569	11148.620	-.051
5	12	12000.054	13148.678	13148.631	.047
6	14	14000.069	15148.651	15148.646	.005
7	16	16000.090	17148.629	17148.666	-.037
8	18	18000.106	19148.718	19148.682	.036
9	20	20000.100	21148.702	21148.676	.026
10	22	22000.117	23148.624	23148.692	-.068
11	24	24000.123	25148.736	25148.698	.038
12	26	26000.121	27148.655	27148.696	-.041
13	28	28000.076	29148.602	29148.650	-.048
14	30	30000.098	31148.641	31148.672	-.031
15	32	32000.070	33148.638	33148.644	-.006
16	34	34000.145	35148.721	35148.718	.003
17	36	36000.111	37148.706	37148.684	.022
18	38	38000.156	39148.736	39148.729	.007
19	40	40000.119	41148.705	41148.691	.014
20	42	42000.116	43148.658	43148.688	-.030
21	44	44000.128	45148.716	45148.700	.016
22	46	46000.132	47148.674	47148.703	-.029
23	48	48000.115	49148.690	49148.686	.004
24	50	50000.184	51148.777	51148.754	.023
25	52	51990.133	53138.736	53138.703	.033

Steigungsfaktor a: .99999982

y-Achsabschnitt b: 1148.579 mm

Mittlere Fehler
---

am Steigungsfaktor a: .00000048
am y-Achsabschnitt b: .015 mm

am einzelnen y : .035 mm
am Mittelwert der y : .007 mm

Tabelle 6.2. Vergleich Interferometer (HP5526A) mit Mekometer (ME5000) bei gleichläufiger Messanordnung.

LINEARE REGRESSION
****

Lauf-Nr.	Punktbezeichnung	HP5526A x mm	ME5000 y (gem.) mm	y (ausgegl.) mm	v mm
1	4	4230.463	4230.440	4230.446	-.006
2	6	6100.449	6100.520	6100.434	.086
3	8	8000.473	8000.460	8000.460	-0.000
4	10	10000.428	10000.420	10000.418	.002
5	14	14000.417	14000.450	14000.411	.039
6	16	16000.457	16000.480	16000.453	.027
7	18	18000.421	18000.280	18000.419	-.139
8	20	20000.416	20000.470	20000.416	.054
9	22	22000.477	22000.510	22000.480	.030
10	24	24000.478	24000.460	24000.483	-.023
11	26	26000.614	26000.680	26000.621	.059
12	28	28000.500	28000.480	28000.509	-.029
13	30	30000.494	30000.450	30000.505	-.055
14	32	32000.440	32000.380	32000.453	-.073
15	34	34000.509	34000.460	34000.525	-.065
16	36	36000.610	36000.580	36000.628	-.048
17	38	38000.729	38000.730	38000.749	-.019
18	40	40000.738	40000.810	40000.760	.050
19	42	42000.736	42000.790	42000.760	.030
20	44	44000.755	44000.720	44000.781	-.061
21	46	46000.832	46000.880	46000.861	.019
22	48	48000.836	48000.870	48000.867	.003
23	50	50000.885	50000.970	50000.918	.052
24	52	52001.017	52001.120	52001.052	.068

Steigungsfaktor a: 1.00000108

y-Achsabschnitt b: -.021 mm

Mittlere Fehler
---

am Steigungsfaktor a: .00000079
am y-Achsabschnitt b: .025 mm

am einzelnen y : .056 mm
am Mittelwert der y : .011 mm

Tabelle 6.3. Vergleich Interferometer (HP5526A) mit Mekometer (ME5000) bei gegenläufiger Messanordnung.

7. Vergleich des HP5526A mit Zerodurmassstäben

Um den Massstab des Interferometers zu überprüfen, wurden drei am Institut vorhandene Zerodurmassstäbe mehrere Male mit dem Interferometer ausgemessen. Es sind dies aus dem sehr temperaturbeständigen Zerodur gefertigte Glasstäbe, auf deren einer, schmalen Seite zwei feine Linien ungefähr die Länge von einem Meter markieren (vergl. Eichprotokoll Abb. 7.1). Die Ausmessung wurde auf der Messbank für Nivellierlatten gemacht. Bei der Messung werden die Stäbe auf einem Wagen unter einem 30-fach vergrössernden Mikroskop verschoben und die Linien genau eingestellt. Mit dem Interferometer misst man die Verschiebung des Stabes mittels einem an die Stirnseite angelegten Reflektor.

Für die Längen der Zerodurstäbe liegen genaue Werte vom Eidgenössischen Amt für Messwesen, Wabern, aus dem Jahre 1981 vor. Als Längennormal diente damals ebenfalls ein Laser-Interferometer von Hewlett-Packard. Die Unsicherheit der Messung für die einzelnen Stäbe wird als ± 0,4 µm angegeben. Die Stäbe Nr. 2, 3, 4 sind am IGP, der Stab Nr. 1 beim Amt für Messwesen deponiert.

Bei der Messung wurde nach einem von H. Oesch entwickelten Programm zur automatischen Datenregistrierung via Computer verfahren. Dabei stellt man den linken und dann den rechten Strich je sechsmal ein, rechnet die Mittel und daraus die Länge als Differenz. Anschliessend wiederholt man das Ganze noch einmal in umgekehrter Reihenfolge und bildet das Gesamtmittel für die Länge.

Aus den Streuungen einer unserer Messserien errechneten sich folgende mittlere Fehler:

$m_1 =$	1,00 µm	an einer Einzeleinstellung eines Striches
$m_6 =$	0,41 µm	am Mittel aus 6 Einstellungen
$m_L =$	0,58 µm	an der einmal ermittelten Länge
$m_{\bar{L}} =$	0,41 µm	am Mittel aus zwei Bestimmungen

Nach dem oben beschriebenen Verfahren wurde die Länge jedes der drei Stäbe vier- bis sechsmal bestimmt. Rein formal hätten dann die daraus errechneten Mittelwerte mittlere Fehler von etwa

$$m = \pm 0{,}2\ \mu m$$

Aus obigem Rahmen fallende Abweichungen bei Längen, die an verschiedenen Tagen gemessen wurden, legen allerdings den Schluss nahe, dass diese Schätzung zu gut ist und nur eine innere Genauigkeit für kurz hintereinander ausgeführte Messungen widerspiegelt. In den Mittelwerten stecken ziemlich sicher noch grössere systematische Abweichungen.

Die Tabelle 7.1 zeigt die für die Längen erhaltenen Mittelwerte und ihr Vergleich mit den Sollwerten.

Eidgenössisches Amt für Messwesen
Office fédéral de métrologie
Ufficio federale di metrologia
CH-3084 Wabern-Bern, Lindenweg 50, ☎ 031-54 10 61

Prüfschein
Bulletin d'examen
Bollettino d'esame

No.	1	20845

Seite / Page / Pagina 1 von / de / di 1 Seiten / pages / pagine

Institut für Geodäsie, ETH Hönggerberg
8093 Zürich

Prüfung von vier Zerodur - Massstäben

Beschreibung

Die quaderförmigen Massstäbe bestehend aus Zerodur (1st expansion class), weisen eine totale Länge von ca. 1048,5 mm und einen Querschnitt von 28 x 48 mm^2 auf. Die Schmalseite, die die Massstriche trägt, ist poliert und an den Enden mit den grünen, eingebrannten Bezeichnungen XA respektive XB versehen. X entspricht der Nummer des Massstabs.
Die Teilung besteht aus zwei Endstrichen mit dem nominalen Abstand von 1 m. Quer über die Endstriche laufen je zwei kurze Richtstriche. Als Masslänge ist der Abstand der zwei Punkte definiert, die auf den Endstrichen in der Mitte zwischen den Richtstrichen liegen.

Messbedingungen

Die Messungen erfolgten im September 1981 auf dem SIP-Hauptkomparator mit Hilfe eines lichtelektrischen Mikroskops und eines Zweifrequenzlasers.
Die oberflächengeteilten Massstäbe wurden dabei in den sogenannten "günstigsten Punkten" (bezogen auf die Totallänge) aufgelegt, d.h. im Abstand $a = 0{,}2113 \times L_{tot} = 221{,}5$ mm von den Enden.
Die Messungen wurden bei Temperaturen der Prüflinge von 19,83 °C bis 19,84 °C durchgeführt.
Der lineare Ausdehnungskoeffizient wird mit $\alpha < \pm 5 \cdot 10^{-8}$ / K angenommen.

Resultate

Massstab Nr. 1	1 000,013 50 mm ± 0,4 µm
Massstab Nr. 2	1 000,015 85 mm ± 0,4 µm
Massstab Nr. 3	1 000,016 00 mm ± 0,4 µm
Massstab Nr. 4	1 000,016 60 mm ± 0,4 µm

Für die Prüfung:

Eidg. Amt für Messwesen
Der Direktor:

i.V. S. Kl

Wabern, 3. November 1981 To/Zg

Der Inhalt dieses Scheins darf nur in vollständiger Form veröffentlicht oder weitergegeben werden. La publication ou la reproduction de ce bulletin ne sont autorisées que dans sa forme intégrale. Il tenore di questo bollettino può essere pubblicato o riprodotto soltanto integralmente.

Abb. 7.1. Eichprotokoll der Zerodurstäbe vom Jahr 1981.

Zerodur-stab Nr.	Messung 1991 Mittel mm	Eichwert 1981 mm	Abweichung vom Eichwert µm
2	1000,0144	1000,0158	-1,4
3	1000,0142	1000,0160	-1,8
4	1000,0149	1000,0166	-1,7
Gemittelte Abweichung vom Eichwert			**-1,6**
M. F. an der gem. Abweich. (inkl. Unsicherh. der Solllänge)			±0,26

Tabelle 7.1. Vergleich der Messwerte vom 20./21.3.1991 mit den Eichwerten von 1981.

Die gemittelte Abweichung von -1,6 µm entspricht einem Massstabsunterschied von 1,6 ppm.

Ist dieser Unterschied reell vorhanden? Rein von der Streuung der Messungen aus gesehen müsste man mit ja antworten, denn er liegt deutlich über dem dreifachen mittleren Fehler von 3·0,26 µm. Weil aber, wie oben erwähnt, die Messungen möglicherweise systematisch verfälscht sind, bleibt die Antwort ungewiss. Wenn der Unterschied reell ist, müsste sich der Massstab des Interferometers oder der Zerodurstäbe im Laufe der letzten zehn Jahre verändert haben. Um diese Frage abzuklären, wäre eine Neueichung der Stäbe und erneute Abgleichung unseres HP-Interferometers beim Bundesamt für Messwesen empfehlenswert.

Ein Grund für die Schwierigkeit der Beurteilung ist die relativ knappe, dreissigfache Vergrösserung des Ablesemikroskops an der Messbank, mit der man die Genauigkeit des Interferometers nicht ausschöpft. Bei einer Auflösung von einer halben Winkelminute im Auge des Beobachters kann man bei dreissigfacher Vergrösserung noch 1,2 µm linear auflösen. Mit einer höheren, zum Beispiel sechzigfachen Vergrösserung liessen sich höchstwahrscheinlich genauere Resultate erzielen.

Auf Grund der vorliegenden Ergebnisse lässt sich lediglich folgern, dass der Massstab des Interferometers nicht mehr als 1 bis 2 ppm vom Sollwert abweicht.

8. Frequenzprüfung am ME5000

Beim ME5000 ist die von einem Schwingquarz erzeugte Grundfrequenz von nominal 10 MHz die Quelle des Massstabes, und eine Abweichung davon erzeugt einen relativen Fehler an der abgelesenen Distanz, der gleich dem relativen Frequenzfehler ist. Die effektiv vorhandene Frequenz lässt sich vorn am Instrument an einer Buchse abgreifen und kann einem Fre-

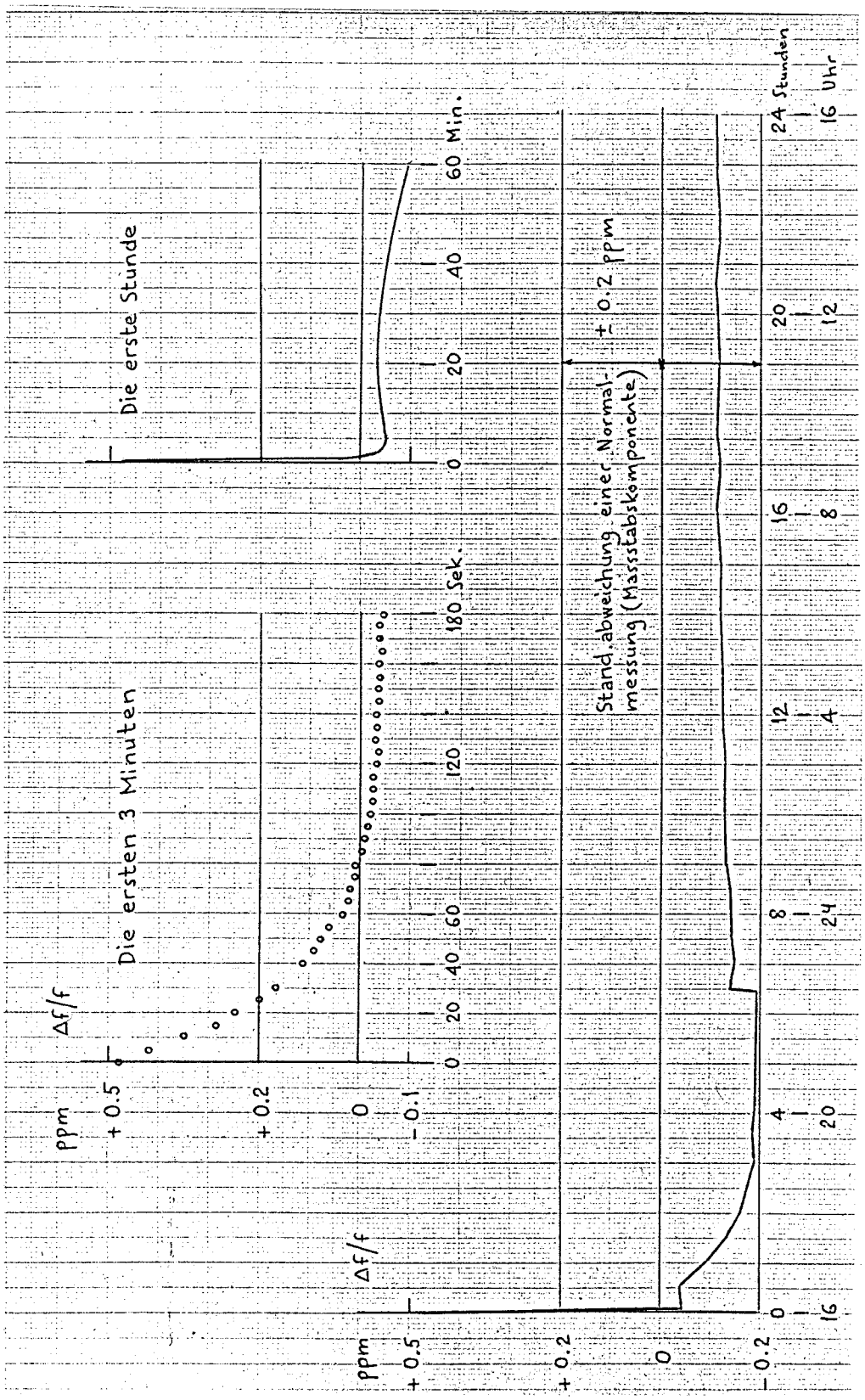


Abb. 8.1. Frequenzverlauf über 24 Stunden im Versuch vom 3./4. April 1991 am ME5000 Nr. 357011 im Messlabor.

quenzzähler zugeführt werden. Bei unseren Messungen wurde der Zähler durch das Signal des Normalfrequenzsenders DCF77 gesteuert, sodass eine Vergleichsfrequenz zur Verfügung stand, die auf 0,01 bis 0,001 ppm stimmt.

Aus der Literatur (Maurer, Schirmer, Schwarz [7]) ist bekannt, dass der Quarz des Mekometers über einen Temperaturbereich von -10° bis +40°C auf 0,2 bis 0,3 ppm genau stabilisiert ist. Anstatt diese Messungen an unserem Instrument zu wiederholen, haben wir das Frequenzverhalten bei kontinuierlichem Betrieb über 24 Stunden geprüft, in der Meinung, damit eine Messreihe zu simulieren, bei dem das Mekometer im Labor kurz nacheinander viele Distanzen misst und dabei die meiste Zeit aktiv im Betrieb ist.

Die Ergebnisse sind in Abb. 8.1 zusammengestellt. Mit Ausnahme der ersten 25 Sekunden nach dem Einschalten bewegt sich die Frequenz innerhalb eines Bandes von ±0,2 ppm um die Sollfrequenz. Die Kurve stimmt qualitativ mit der in [7] Abb. 3 für die ersten 40 Minuten gefundenen überein. Längerfristig senkt sich die Abweichung innerhalb der ersten drei Stunden auf etwa -0,2 ppm, um dann nach $6^1/_2$ Stunden auf -0,15 ppm zu springen und weiterhin sich stetig bis auf etwa -0,1 ppm dem Sollwert zu nähern. Ob der Sprung bei $6^1/_2$ Stunden durch Vorgänge im Instrument selber oder durch äussere Einflüsse (Schalten der Klimaanlage um 22.30 Uhr?) ausgelöst wird, ist nicht bekannt.

Zusammenfassend darf man sagen, dass der systematische, durch die Frequenz verursachte Massstabsfehler bei Messungen im Labor 0,2 ppm nicht übersteigt.

9. Schlussfolgerungen

Auf Grund der vorliegenden Untersuchungen darf man folgern, dass das ME5000 sich zur Messung auch kurzer Distanzen von 1 m bis 50 m eignet und bei sorgfältigem Arbeiten problemlos mindestens auf den Zehntelmillimeter genau gemessen werden kann. Allerdings empfiehlt es sich, bei Distanzen unter 16 m das Gerät über einen Rechner mit einem Programm (z.B. PROMEKO) zu steuern. Unter 8 m entstehen Lücken im Bereich der messbaren Distanzen, die sich in Richtung kleiner Entfernungen ausweiten, bis bei Längen unter 2 m nur noch wenige, eng begrenzte Fenster übrigbleiben, in denen Distanzmessungen möglich sind.
Was die in der Einleitung gestellten Fragen betrifft, ist zu sagen:

1) Genauigkeit 0,2 mm + 0,2 ppm der Distanz

Mit dem Programm PROMEKO wird der Hundertstelmillimeter angezeigt. Aus der Streuung mehrfacher Messungen und aus dem Vergleich mit dem Interferometer auf der Messbahn berechnet sich der mittlere Fehler einer Distanzmessung zu etwa 0,04 mm (Kap. 6.3). Dies gilt für Distanzen von einem Meter an aufwärts. Für die praktisch bedeutungslosen, sehr engen Fenster bei 0,476 m und 0,789 m ist der mittlere, aus den Abwei-

chungen vom Sollwert geschätzte Fehler mehrere Zehntelmillimeter gross.

Für die genaue Verifikation des distanzabhängigen Anteils von 0,2 ppm ist die zur Verfügung stehende Messstrecke von 50 m zu kurz. Die Messserie, in der das ME5000 gegen das Interferometer verglichen wird, ergab bei Gleichlauf für den Massstabsfaktor eine Abweichung von -0,18 ppm von der Einheit mit einem mittleren Fehler von etwa ± 0,5 ppm (Tabelle 6.1, Seite 26). Linear entspricht das ± 25 µm auf 50 m.

Kann die innere Messgenauigkeit des Mekometers ohne Minderung auf äussere Bezugspunkte übertragen werden? Bei dieser Frage spielt die Zentriergenauigkeit von Instrument und Reflektor die entscheidende Rolle. Das Ergebnis der Schwendenermessung auf Seite 15/16 bestätigt, dass man äussere Genauigkeiten von ± 0,05 mm erhalten kann, wenn man die Additionskonstante (ME5000 + Reflektor) sorgfältig bestimmt und als Korrektur einführt. Das schwächste Glied unter diesen hohen Ansprüchen ist die Kern-Zentrierung. Die drei untersuchten Kern-Zapfen zeigten Spiel, das zwischen 0,03 mm (gut!) und 0,16 mm (knapp genügend) variiert. Auf Grund der Untersuchungen ergibt sich:

Der mittlere Fehler einer mit dem ME5000 im Bereich zwischen 1 m und 50 m gemessenen Distanz darf bei sorgfältiger Handhabung zu

0,05 mm + 0,5 ppm der Distanz

angenommen werden. Darin ist die Ungenauigkeit der Kern-Zentrierung enthalten.

2) Messbereiche unter 16 m

Mit dem Programm PROMEKO lassen sich zwischen 8 m und 16 m alle Distanzen messen. Allerdings muss in gewissen Bereichen, nämlich dort wo nur eine Nullstelle vorhanden ist, eine Näherungsdistanz (auf einige cm genau) bekannt sein und ins Programm eingegeben werden.

Zwischen 1 m und 8 m sind Messungen nur noch in gewissen diskreten Bereichen (Fenstern) möglich, und es muss dort immer ein Näherungswert für die Distanz eingegeben werden.

3) Eignung des Programms PROMEKO

Das Programm hat sich bewährt und die in es gesetzten Erwartungen erfüllt. Etwas unbequem sind die langen Messzeiten (1 bis über 10 Minuten), die aber wohl zum grossen Teil dem Messablauf im ME5000 selber zuzuschreiben sind.

Dank

Die Verfasser danken Herrn Hanspeter Oesch für die vielen Hilfeleistungen beim Aufbauen der Versuche und die Mitwirkung beim Vergleich mit den Zerodurmassstäben, ebenso den Herren Gaudenz Danuser, Wolfram Höflinger, Urs Schor und Stephan Voser für die Bestimmung der Additionskonstanten nach Schwendener.

10. Literatur

[1] D. Meier, R. Loser: "Atmosphärenlimitierte Präzisionsdistanzmessung". Bericht FIG-Kongress Toronto, Juni 1986.

[2] D. Meier, R. Loser "Das Mekometer ME5000 - Ein neuer Präzisionsdistanzmesser". AVN 5/1986.

[3] Kern & Co. AG "Bedienungsanleitung Präzisionsdistanzmesser Mekometer ME5000". Kern, Aarau.

[4] K.H. Münch "Das Kern Mekometer für industrielle Anwendungen". Publikation Nr. 346, Kern, Aarau 1987

[5] M. Oetiker "Das Messprinzip des neuen Mekometers ME5000 und wie sich der Messbereich durch zu entwickelnde Programme auf der HP-Portable Plus erweitern lässt". Seminararbeit Wintersemester 87/88, IGP intern 1988

[6] Kern & Co. AG "Programm für die Steuerung des Messablaufes beim KERN Mekometer ME5000: PROMEKO, Gebrauchsanleitung". Aarau 1988

[7] W.Maurer, W.Schirmer, W. Schwarz "Wirkungsweise und Einsatzmöglichkeiten des Mekometers ME5000". Bericht X. Int. Kurs für Ingenieurvermessung, München, Sept. 1988

[8] T.W. Copeland-Davis, E. Menant "The Kern Mekometer ME5000 and short distance measurements". Document Nr. LEP/SU89.2, CERN Geneva, Febr. 1989

[9] J.N. Dukes, G.B. Gordon "A Two-Hundred-Foot Yardstick with Graduations Every Microinch". HP-Journal, Vol. 21, No. 12, Palo Alto, Aug. 1970

[10] R.R. Baldwin, G.B. Gordon, A.F. Rudé "Remote Laser Interferometry". HP-Journal, Vol 23, No. 4, Palo Alto, Dez. 1971

[11] Hewlett-Packard "Laser Measurement System 5526A, Operator's Handbook". Manual Part No. 05526-90002, HP, Santa Clara 1972

[12] Hewlett-Packard "Laser Measurement System 5526A, Compensation Factor Handbook". Manual Part No. 05526-90014, HP, Santa Clara 1973

[13] Hewlett-Packard "Laser Measurement System 5526A". Manual Part No. 05526-90035, HP, Santa Clara 1977