

DIE GENAUIGKEIT DER MEKOMETERMESSUNGEN AUF DER PRÜFSTRECKE NEUBIBERG

Wilhelm CASPARY

In: *CASPARY, Wilhelm / HEISTER, Hansbert (Hrsg.) [1984]:*

Elektrooptische Präzisionsstreckenmessung

Beiträge zum Geodätischen Seminar 23. September 1983

Schriftenreihe des Wissenschaftlichen Studiengangs Vermessungswesen der Hochschule der Bundeswehr München, Heft 11, S. 115-130

ISSN: 0173-1009

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

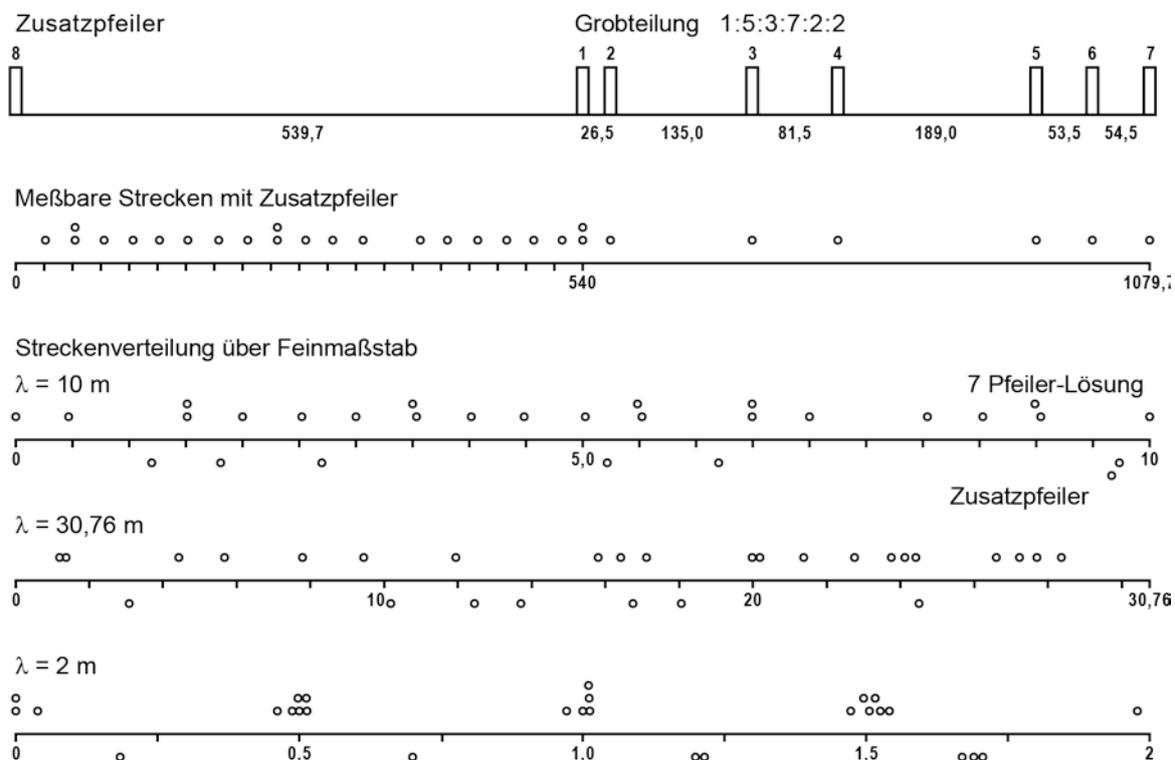


Abbildung 1 Prüfstrecke Neubiberg, meßbare Strecken

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.

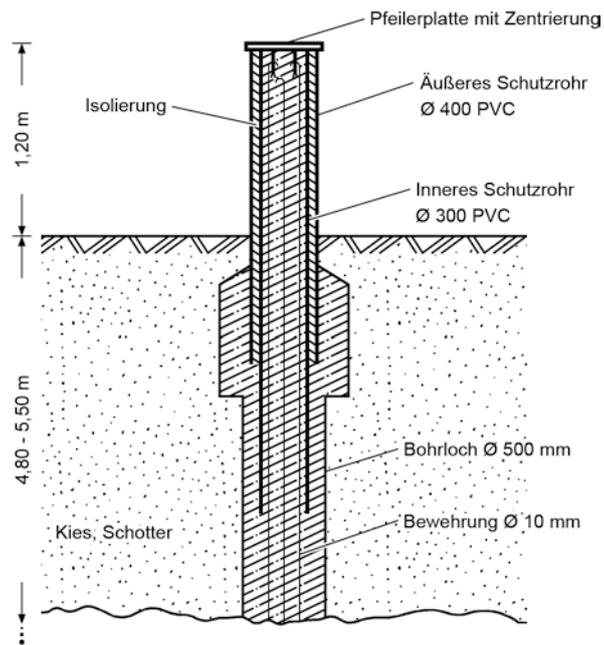


Abbildung 2 Prüfstrecke Neubiberg, Pfeilerschnittbild

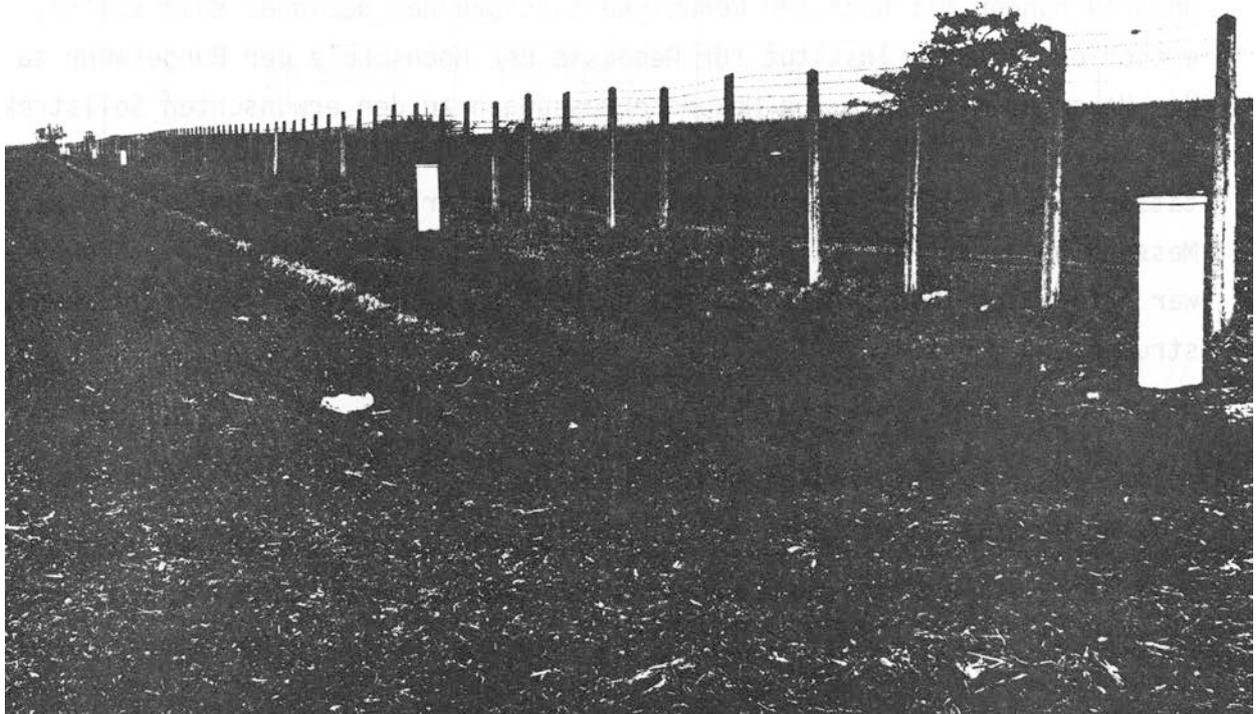


Abbildung 3 Prüfstrecke Neubiberg, Ansicht

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.

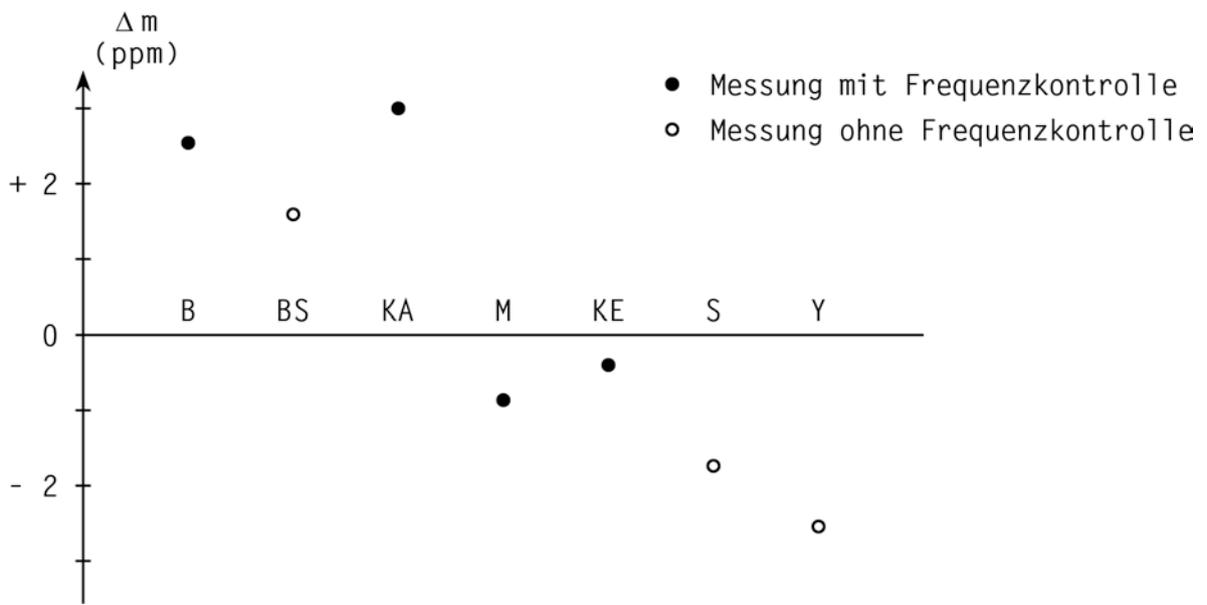


Abbildung 4 Maßstäbe der sieben eingesetzten Mekometer bei Messungen im Bereich I, bezogen auf einen mittleren Maßstab gemäß Version c)

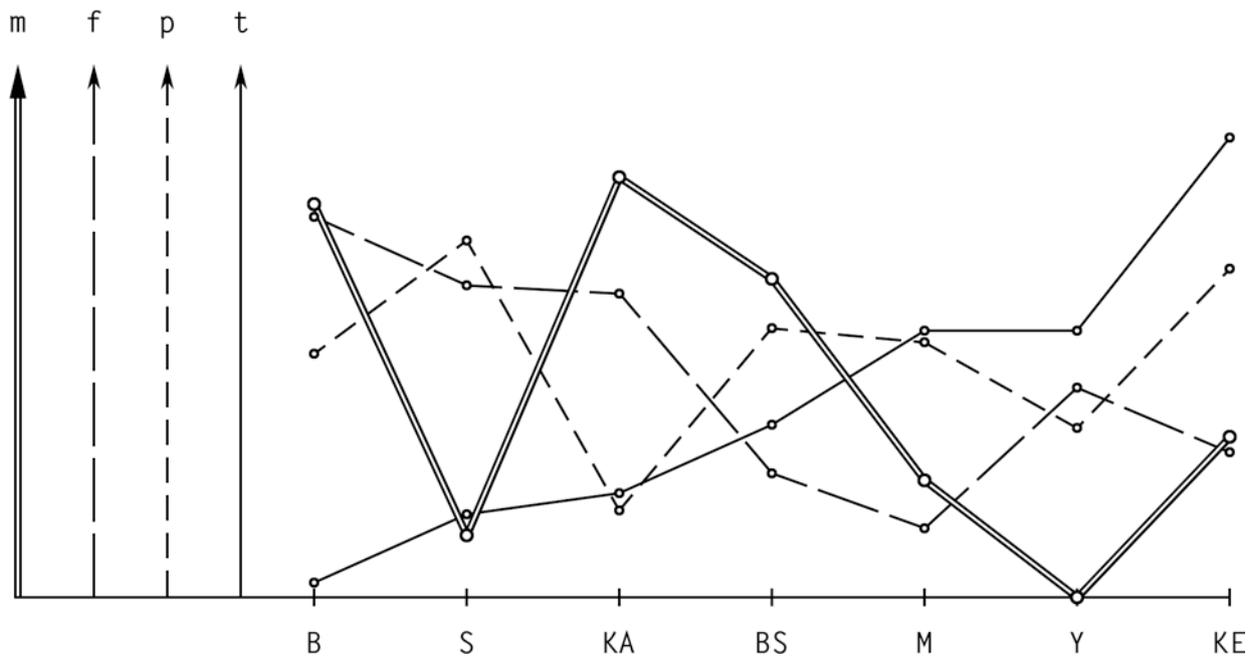


Abbildung 5 Die Maßstäbe (m) im Bereich I der sieben Mekometer und die durchschnittlichen meteorologischen Bedingungen während der Messung: Temperatur (t), Luftdruck (p) und relative Feuchte (f)

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.

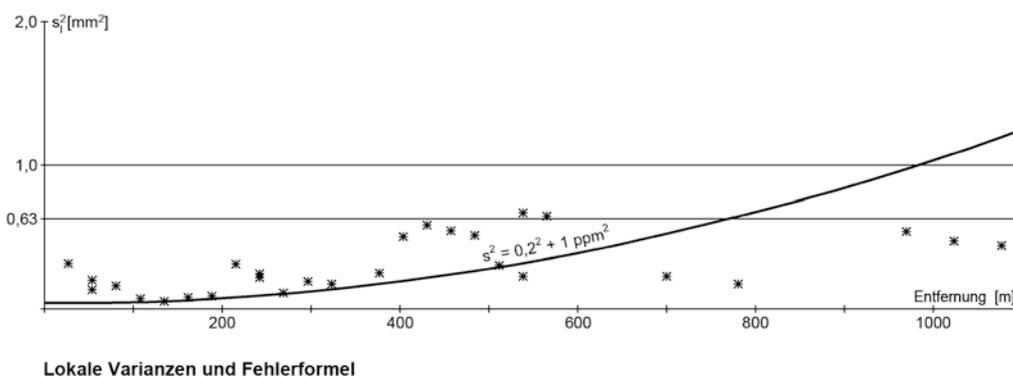
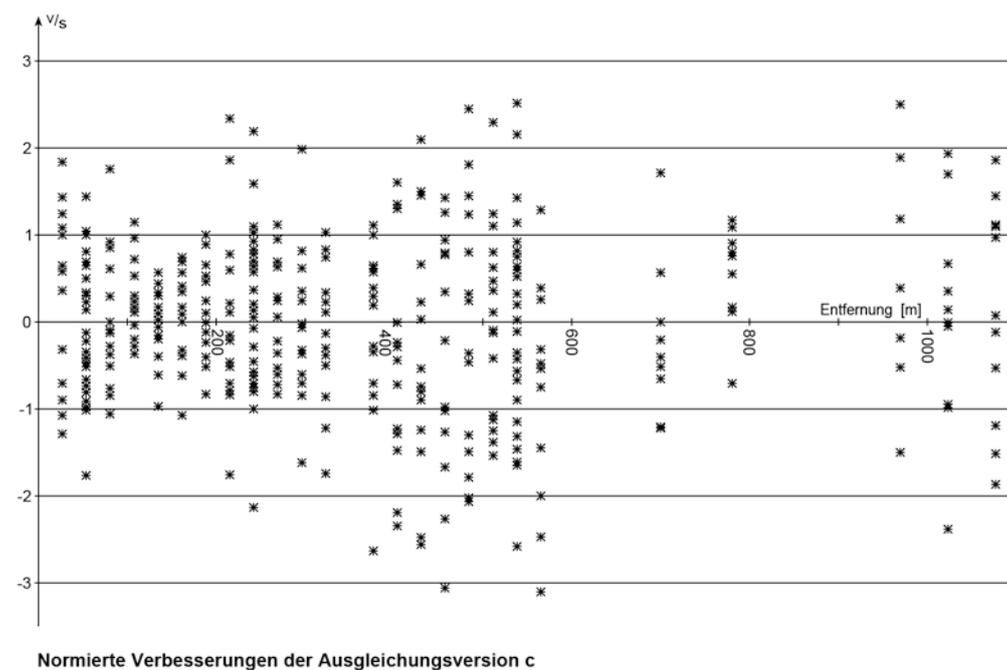


Abbildung 6 Normierte Verbesserungen und lokale Varianzen der Ausgleichung aller Mekometermessungen in einem Guß

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