

AIN 8201

no 452

9

J. C. O. van Gijsen

Optische Distanzmessung:
Doppelbild oder Distanzfäden

BIBLIOTHEEK
DER
LANDBOUWHOGESCHOOL
WAGENINGEN.

NN08201.452

J. C. O. van Gijsen

Optische Distanzmessung: Doppelbild oder Distanzfäden

Proefschrift

ter verkrijging van de graad van

doctor in de landbouwwetenschappen

op gezag van de Rector Magnificus, dr. ir. F. Hellinga,

hoogleraar in de cultuurtechniek,

te verdedigen tegen de bedenkingen van een commissie uit

de Senaat van de Landbouwhogeschool te Wageningen

op vrijdag 26 september 1969 te 16 uur



1969 *Centrum voor landbouwpublicaties en landbouwdocumentatie*
Wageningen

Inhalt

1	Einleitung	1
2	Doppelbilddistanzmessung	4
2.1	Empirische Bestimmung der Fehler, die durch Auge, Prisma und Fernrohr verursacht sind	5
2.1.1	Einfluss der Augenfehler	5
2.1.2	Die erste fotografisch ausgeführte Untersuchung	10
2.1.3	Untersuchung der Ablenkung durch das Prisma	13
2.1.4	Fehler infolge der Zweiteilung des Objektivs	16
2.2	Theoretische Betrachtung der Ablenkung des Prismas und der Zweiteilung des Objektivs	18
2.2.1	Die Ablenkung des Prismas	19
2.2.2	Die Folgen der Justierung des Prismas	21
2.2.3	Die Zweiteilung des Objektivs	24
2.2.4	Mittel zur Ausschaltung der sogenannten persönlichen Fehler und ihr Einfluss auf die Objektiv-Fehler	26
2.3	Ablenkungen durch Spiegelungen	29
2.3.1	Das ablenkende System von Breithaupt-Uhink	29
2.3.2	Neue Systeme	30
2.3.3	Abhängigkeit der Additionskonstante vom Einfallswinkel	32
2.4	Ausschaltung der Fehler durch eine neue Lattenteilung	34
2.5	Einfluss der Temperatur und des Luftdrucks	36
2.6	Schlussfolgerungen über die Doppelbilddistanzmessung	38
3	Fadendistanzmessung	40
3.1	Ergebnisse der ersten Versuche	42
3.2	Die Fokussierung	43
3.2.1	Die Genauigkeit der Fokussierung	44
3.2.2	Einfluss der Fehlfokussierung auf die Distanzmessung	46
3.2.3	Die richtige Fokussierung und die Ausschaltung des Einflusses der Fehlfokussierung	48
3.2.4	Einige Besonderheiten	43
3.3	Einfluss der Temperatur und des Luftdrucks	54
3.4	Messergebnisse	58
3.5	Schlussfolgerungen über die Fadendistanzmessung	59

4	Kritische Betrachtung der Literatur über die optische Distanzmessung	62
4.1	P. Engi	62
4.2	W. Uhink	63
4.3	H. Heckmann	64
4.4	O. von Gruber	65
4.5	G. Bahnert	66
4.6	N. Danial	67
5	Schlussbetrachtung: Doppelbild oder Distanzfäden?	70
	Anhang: Die angewendete Instrumente	71
	Zusammenfassung	76
	Summary	77
	Samenvatting	78
	Literatur	79

STELLINGEN

1.

De dradenafstandmeter is, na uitschakeling van de invloed van de scherpstelling, even nauwkeurig als de dubbelbeeldafstandmeter. Het gebruik van een horizontale baak verdient bij beide de voorkeur.

2.

Uit het oogpunt van de geometrische optiek verdient de dradenafstandmeter de voorkeur boven de dubbelbeeldafstandmeter.

3.

Door het fotograferen en van de rand en van het baakbeeld kan de nauwkeurigheid van de hoekmeting en van de lengtemeting verhoogd worden. Bovendien wordt een welhaast ideaal archief verkregen.

4.

De gyro-theodoliet is bij het meten van veelhoeksnetten zeer wel bruikbaar.

5.

Gezien het verschil in 'klimaat' tussen Delft en Wageningen zou het gunstig zijn de opleiding tot landmeter van de ruilverkaveling naar Wageningen terug te brengen.

6.

De vraag, welke formules men dient te gebruiken voor het ontwerpen van secundaire watergangen, is voor de Nederlandse praktijk van weinig belang.

7.

De nieuwe opname-technieken, samen te vatten onder het begrip 'remote-sensing', kunnen voor het landbouwkundig onderzoek van veel belang zijn. Het verdient echter aanbeveling dit interuniversitair en in samenwerking met het I.T.C. (International Institute for Aerial Survey and Earth Sciences) te onderzoeken.

8.

Het is voor een academische vorming niet bevorderlijk het studieprogramma alleen te laten bestaan uit die leerstof, welke men voor de latere praktijk strikt noodzakelijk acht.

9.

De oecumene wordt niet bevorderd door aan de verschillen in geloofsopvatting tussen de christelijke kerken voorbij te gaan. Deze verschillen dienen juist onderwerp van bezinning te zijn.

1 Einleitung

Die unterstehende Forschungsarbeit ist ein Beitrag zur Automatisierung der Messverfahren in der Vermessungskunde und zwar der Polygonierung zweiter Ordnung und Detailvermessung.

Es ist nicht so erstaunlich, dass diese Forschungsarbeit an der Landwirtschaftlichen Universität ausgeführt wurde. Sowohl Prof. J. Dieperink, wie sein Nachfolger Prof. A. Kruidhof, hat die Methode der Doppelbilddistanzmessung propagiert. Sie waren bestrebt diese Methode in Holland einzuführen. Holland ist zwar ziemlich eben, so dass die Vorteile der Doppelbilddistanzmessung nicht unmittelbar ins Auge fallen. Wenn jedoch die Messungen auf einem etwas struppigem Gelände, wie z.B. auf der Heide verrichtet werden oder wenn man stets Gräben überschreiten muss, wird die Genauigkeit des Messbandes illusorisch.

Eine zweite Ursache für die Ausführung dieser Forschungsarbeit an der Landwirtschaftliche Universität war, dass hauptsächlich die Landwirtschaft und zwar insbesondere die Flurbereinigung ein gesteigertes Tempo der Messungen erfordert. Der Code-Theodolit von Fennel ist auch der Flurbereinigung entsprungen.

Für die Automatisierung der Distanzmessung hat Professor Kruidhof sich bewusst für das Fotografieren des Lattenbildes entschlossen. Wenn man unter Automatisierung die gänzliche Ausschaltung der menschlichen Tätigkeit versteht, so ist dies nicht der richtige Weg. Wenn das Lattenbild jedoch nicht fotografiert wird, gehen viel Auskünfte verloren, wodurch die Genauigkeit stark beeinträchtigt wird. Ein gutes Beispiel hierzu ist der Code-Theodolit von Fennel. Bei diesem sind dreimal zwei Aufnahmen des Code-Kreises erforderlich, um die Länge einer Polygonseite zu bestimmen. Die Genauigkeit der Distanzmessung mit diesem Gerät, das auf Grund einer Basislatte arbeitet, ist nämlich in hohem Masse von der Zielgenauigkeit abhängig. Der Code-Theodolit gibt hierüber keine Aufschlüsse; das einzige Mittel ist demnach die Wiederholung. Wenn das Lattenbild jedoch fotografiert wird, so genügt ein Bild. Beim Ausmessen der Bilder muss der Mensch wohl noch behilflich sein; durch den Gewinn an Genauigkeit ist dies jedoch vollkommen begründet.

Was hat nun unsere Untersuchung mit der Automatisierung zu tun? Über die Doppelbilddistanzmessung ist es bekannt (Kruidhof, 1954; van Gijzen, 1956), dass zum Erzielen einer grossen Genauigkeit das Ablesen im Schfeld stets an derselben Stelle erfolgen muss: dies um gewisse Instrumentalfehler zu verhüten. Wenn man automatisiert mittels der Fotografie, kann man diese Forderung nicht genügen. Wenn nämlich ein Bild aufgenommen wird, auf dem sowohl die Distanz-, wie die Richtungsmessung festgelegt ist, dann zielt man auf die Mitte der Latte (auf die Zieltafel).

Das Ablesen der Distanz gelangt so irgendwo ins Sehfeld, so dass sich hierdurch Fehler ergeben können. Der allererste Zweck unserer Arbeit war diese Fehler qualitativ und quantitativ auszuschalten. Gleichzeitig waren wir bestrebt Systeme zu finden, bei welchen sich keine Instrumentalfehler ergeben können.

Mehrere Verfasser schreiben die Fehler, welche bei der Doppelbilddistanzmessung vorkommen, den sogenannten Augenfehlern zu, d.h. der unregelmässigen Wölbung der Augenlinse, wenn auf diese gesonderte Lichtbüschel fallen. In der Praxis zeigte es sich, dass obzwar diese Augenfehler bestehen, deren Einfluss gegenüber anderen Fehlerquellen vernachlässigt werden kann.

Eigentlich ist die Fadendistanzmessung nur zufallsweise in unsere Forschungsarbeit geraten. Später zeigte es sich, dass sie den wichtigsten Teil dieser Arbeit bildet. Bei der Fadendistanzmessung ist das wichtigste Problem die Fokussierung. Die Fehlfokussierung (Parallaxe) des beweglichen Auges wurde durch Engi (1917) untersucht. In der Praxis fokussiert man jedoch mit einem stillstehendem Auge. Die Genauigkeit dieser Fokussierung war so auch ein Gegenstand unserer Untersuchung.

Der Doppelbilddistanzmesser wurde entwickelt, da man keine Möglichkeit gefunden hatte, um den Einfluss der Fokussierung auf die Genauigkeit der Distanzmessung mit einem Fadendistanzmesser auszuschalten und da man doch bessere optische Distanzmessungen erzielen wollte. Es ist uns gelungen den Einfluss der Fehlfokussierung auszuschalten, so dass mit der Fadendistanzmessung dieselbe Genauigkeit erreicht wird, wie mit der Doppelbilddistanzmessung. Diese Ergebnisse haben wir fotografisch und teils auch visuell erreicht.

Um die beiden Arten der Distanzmessung richtig vergleichen zu können, haben wir zusätzliche Unterschiede ausgeschaltet. Es erfolgten so alle Messungen mit einer horizontalen Latte, so dass die möglicherweise auftretenden Unterschiede nicht der Differential-Refraktion zugeschrieben werden können. Die Fehlerquellen, die in der vorhandenen Literatur eingehend behandelt werden, haben wir hier nicht angeführt. Dies bezieht sich u.a. auf die Fehler der Latte und die Ungenauigkeit des Ablesens.

Obwohl der Einfluss der Temperatur (und des Luftdrucks) bei der Doppelbilddistanzmessung in der Literatur ziemlich eingehend behandelt wurde, haben wir diesen doch in dieser Dissertation erörtert, um ihn mit dem Temperatureinfluss bei der Fadendistanzmessung vergleichen zu können.

Während der ganzen Forschungsarbeit waren wir bestrebt die Probleme sowohl theoretisch zu lösen, wie die Ergebnisse durch Versuche und Messungen zu bestätigen. Eine grosse Schwierigkeit war hierbei die Ausschaltung anderer, der Prüfung nicht unterzogener Fehlerquellen. Bei der Prüfung der Ablenkung beim Messkeil z.B. hat es sich nach einer Reihe von Beobachtungen gezeigt, dass sich noch ein anderer Einfluss bemerkbar machte (siehe Abschnitt 2.1.2). Nach der Ausschaltung dieses Einflusses musste die ganze Reihe von Beobachtungen aufs neue gemacht werden.

Für die empirische Bestimmung des Einflusses der Temperatur und des Luftdrucks wäre eine Klimaanlage von besonderer Grösse (von einer Länge von wenigstens 50 m) erforderlich. Wenn dies nicht der Fall ist, müssten sich die Messungen auf viele verschiedene Klimaverhältnisse erstrecken, was in Holland praktisch undurchführbar ist.

Die Einteilung dieser Arbeit weicht insofern vom normalen Plan ab, dass die kritische Beurteilung der Literatur, die sich mit demselben Gegenstand befasst, in einem eigenen Kapitel (Kapitel 4) aufgenommen ist. In Kapitel 2 wird die Doppelbilddistanzmessung behandelt, während die Fadendistanzmessung in Kapitel 3 erörtert wird. In Kapitel 5 sind die Schlussfolgerungen gegeben. Die benützte Apparatur ist gesondert in einem Nachtrag beschrieben. Dies erfolgte um den Gang des übrigen Berichtes nicht zu beeinträchtigen.

2 Doppelbilddistanzmessung

Bei dieser Methode der Distanzmessung wird der parallaktische Winkel dadurch gebildet, dass ein Teil der Strahlen, die in das Fernrohr gelangen, durch ein Prisma abgelenkt werden, welches das Objektiv zum Teil abdeckt. Der Zusammenhang zwischen der Ablesung y und der Distanz L ist:

$$L = y \cot \gamma + B \quad (\text{Abb. 1}) \text{ oder}$$

$$L = \frac{1}{2} y \cot \frac{1}{2} \gamma + B \quad (\text{Abb. 2})$$

Hierbei ist γ der Ablenkungswinkel.

Welche von den zwei Formeln benützt werden kann, hängt von der Aufstellung der Latte ab. Der Ablenkungswinkel wird so gewählt, dass die Multiplikationskon-

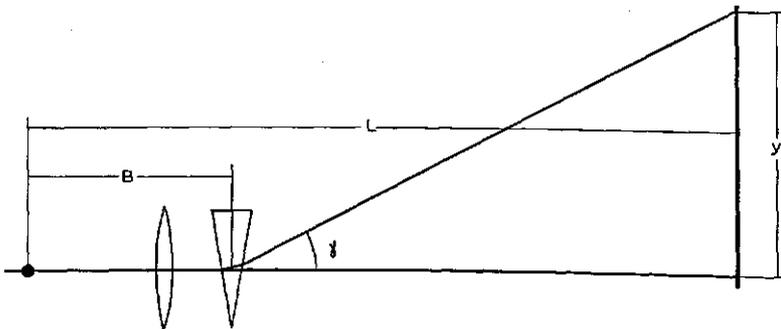


Abb. 1. $L = y \cot \gamma + B$.

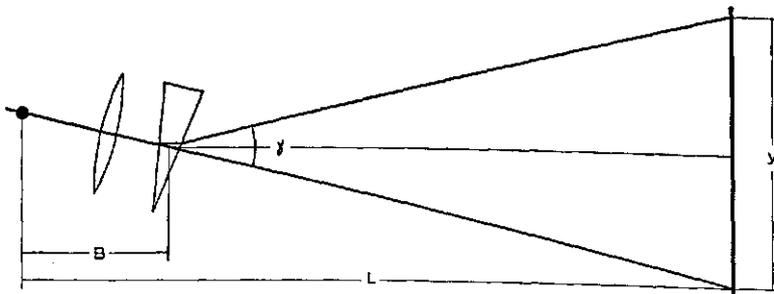


Abb. 2. $L = \frac{1}{2} y \cot \frac{1}{2} \gamma + B$.

stante A (entweder $\cotg \gamma$ oder $\frac{1}{2} \cotg \frac{1}{2} \gamma$) möglichst genau gleich 100 sei.

Der Ablenkungswinkel ist vom Brechungswinkel ε des Prismas und von der Brechungszahl abhängig. Als Annäherung dient: $\gamma = (n - 1)\varepsilon$.

Die sich durch diese Annäherung ergebenden Fehler werden im Abschnitt 2.2.1 behandelt. Beide Strahlenbüschel, die schliesslich auf der Netzhaut ein Doppelbild bilden, durchlaufen gesondert das Fernrohr und treffen die Augenlinse an verschiedenen Stellen. Dadurch, dass man für beide Büschel andere Teile des Objektivs benützt, entstehen Fehler in der Distanzmessung. Auch die Augenlinse kann Fehler verursachen.

2.1 Empirische Bestimmung der Fehler, die durch Auge, Prisma und Fernrohr verursacht sind

In der Literatur über die Doppelbilddistanzmessung (z.B. von Gruber, 1955) wird ein grosser Teil der Fehler den Unregelmässigkeiten in der Augenlinse und Hornhaut, d.h. den sogenannten Augenfehlern zugeschrieben. Da diese bei jedem Beobachter verschieden sein können, nennt man diese auch persönliche Fehler. Zur Bestimmung dieses persönlichen Fehlers war keine eigene Untersuchung erforderlich, da wir über genug Beobachtungsmaterial verfügten, das während der Praktika erhalten wurde.

Wenn man für die Messung mit Doppelbilddistanzmessern die Fotografie benutzt, muss sowohl die Distanzmessung, wie die Richtungsmessung fotografisch festgelegt werden. Für die Richtungsmessung muss das Zielen einer Kontrolle unterzogen werden. Diese Kontrolle erhält man dadurch, dass auf dem Bild der Vertikalfaden mit einer in der Mitte der Latte angebrachten Zieltafel zusammenfallen muss. Die Stelle des Ablesens für die Distanzmessung im Sehfeld steht nun nicht mehr fest, wodurch sich Fehler ergeben. Wenn man folglich die Automatisierung fotografisch ausführen will, müssen diese Fehler erfasst werden. Hierzu bestehen drei Lösungen, und zwar:

1. die Fehler theoretisch und/oder empirisch zu bestimmen und für diese Korrekturen einzusetzen;
2. ein optisches System zu konstruieren, das mit diesen Fehlern nicht behaftet ist, oder
3. durch eine Latte mit symmetrischer Verteilung zu erreichen, dass die Ablesung im Sehfeld stets auf derselben Stelle erfolgt.

Die Untersuchungen wurden in der obenangeführten Reihenfolge ausgeführt.

2.1.1 Einfluss der Augenfehler

Nach den ersten Messungen mit den Doppelbilddistanzmessern, die in Wageningen im Institut für Vermessungskunde ausgeführt wurden, hat es sich schon rasch gezeigt, dass der Einfluss der Augenfehler viel kleiner ist, wie es in der Literatur angegeben wurde. Man hatte den Eindruck gewonnen, dass der Augenfehler als Sündenbock für solche Fehler benützt wurde, die nicht erklärt werden konnten.

Dass der Einfluss der Augenfehler gering ist, geht aus den Tabellen 1 bis 4 hervor.

Tabelle 1. Ablesegenauigkeit und persönlicher Fehler (Hildebrand und Kruidhof-Latte).

Assistent	Student	Mittlerer Fehler der Ablesung (cm auf 100 m)	Persönlicher Fehler (cm auf 100 m)	Mittlerer Fehler im persönlichen Messungen (cm auf 100 m)	Anzahl der Messungen
A	1	0,7	-1,2	0,6	464
	2	1,4	+0,3	0,3	7
	3	1,2	+0,3	0,3	7
	4	1,7	-0,5	0,2	4
	5	1,0	0,0	0,2	12
	6	1,2	-0,5	0,2	14
	7	1,8	-0,3	0,6	10
	8	2,0	-0,8	0,4	6
	9	1,4	-0,4	0,3	8
	10	1,7	-0,5	0,2	6
	11	2,5	-1,5	0,4	4
	12	1,3	0,0	0,2	3
	13	2,1	-1,1	0,4	9
	14	1,6	-0,8	0,3	10
	15	1,8	-0,5	0,3	9
	16	2,9	-0,3	0,3	11
	17	2,2	+0,3	0,3	9
	18	1,7	-0,5	0,5	9
	19	2,7	-1,2	0,8	4
	20	2,9	-0,4	1,0	4
	21	2,4	-0,8	0,3	4
	22	1,9	-0,3	0,5	5
	23	1,6	-0,5	0,3	9
	24	1,2	-0,6	0,2	6
	25	1,1	+0,1	0,1	5
	26	1,2	-0,2	0,5	4
	27	2,3	-0,4	0,3	5
	28	1,0	+0,2	0,2	8
	29	0,9	-0,3	0,3	4
	30	0,9	-0,5	0,3	8
	2,4	-0,6	0,4	8	

Tabelle 2. Ablesegenauigkeit und persönlicher Fehler (Kernvorsatzprisma DM-M).

Assistent	Student	Mittlerer Fehler der Ablesung (cm auf 100 m)	Persönlicher Fehler (cm auf 100 m)	Mittlerer Fehler im persönlichen Messungen (cm auf 100 m)	Anzahl der Messungen
A	61	0,9	-1,0	0,4	560
	62	1,6	-1,8	0,2	13
	63	1,3	-0,3	0,2	9
	64	1,0	-0,1	0,2	12
	65	1,2	-0,7	0,5	14
	66	1,6	+0,7	0,3	13
	67	1,0	-0,1	0,7	5
	68	1,2	-0,4	0,7	8
	69	1,4	-0,1	0,3	18
	70	1,1	-0,8	0,3	30
	71	1,2	-0,8	0,2	22
	72	1,4	-0,4	0,7	9
	73	1,3	-0,7	0,3	27
	74	1,4	-1,0	0,3	15
	75	1,1	-0,5	0,3	15
	76	1,2	-0,1	0,3	11
	77	1,3	+0,1	0,5	9
	78	1,1	+1,5	0,8	5
	79	1,0	-0,1	1,1	7
	80	0,7	0,0	0,7	10
	81	0,4	-0,5	0,1	8
	82	0,6	0,0	0,2	9
	83	1,2	-0,2	0,3	7
	84	1,3	+0,5	0,5	9
	85	0,9	-0,7	0,4	36
	86	1,2	+0,4	0,4	8
	87	1,0	-0,4	0,3	15
	88	1,0	-0,3	0,4	19
	89	0,8	-0,6	0,4	4
	90	0,8	+0,2	0,9	5
	1,0	0,0	0,5	4	

91	0,7	-0,8	0,4	13
92	1,2	-1,8	0,5	14
93	1,1	+0,1	0,2	23
94	0,8	-0,1	0,2	20
95	0,8	+0,2	0,2	20
96	1,4	-1,6	1,0	7
97	1,4	-0,6	0,9	13
98	1,5	0,0	1,7	10
99	2,0	-1,4	0,8	13
100	1,3	-0,1	0,3	8
101	1,3	-0,2	0,7	9
102	1,2	+0,4	0,4	6
103	0,9	+0,2	1,1	3
104	0,8	-0,4	0,9	3
105	1,2	-0,7	0,6	5
106	1,2	-0,5	0,6	8
107	1,2	+0,9	0,8	4
108	0,6	+0,5	0,6	5

C

88	1,2	+0,3	0,5	8
8	1,6	+0,5	0,4	8
8	1,9	-0,7	0,8	10
10	1,7	+1,0	0,4	14
14	1,3	+0,3	0,6	16
16	1,1	+0,7	0,5	10
10	1,6	-0,5	0,8	4
4	1,1	+0,5	1,1	8
8	1,7	+0,2	0,9	10
10	2,5			

D

127	1,1	+2,0	1,0	9
9	1,2	+1,8	0,9	7
7	1,5	+2,3	0,9	9
9	1,6	+2,3	0,5	34
34	1,7	+2,2	1,0	4
4	1,6	+1,6	0,5	22
22	1,4	+2,6	0,6	26
26	2,6	+1,2	1,0	16
16	1,9			

31	0,6	+0,1	0,3	4
32	1,8	-1,9	0,2	4
33	1,3	0,0	0,1	6
34	0,7	+0,1	0,2	5
35	1,8	+0,2	0,2	3
36	1,1	-0,4	0,5	3
37	0,5	-1,8	0,8	4
38	0,5	+0,3	0,1	4
39	1,2	+0,2	0,2	4
40	1,4	-0,2	0,2	3
41	1,6	-0,1	0,2	3
42	1,5	-0,4	0,1	41
43	1,6	-0,1	0,2	18
44	1,6	-0,2	0,2	27
45	1,7	-0,2	0,3	8
46	1,3	-0,4	0,2	14
47	1,2	-0,1	0,3	15
48	1,2	-0,1	0,3	14
49	1,6	-0,2	0,2	17
50	0,9	-0,3	0,2	8
51	1,6	-0,8	0,4	7
52	2,1	-0,2	0,4	6
53	1,4	-0,4	0,4	13
54	1,2	-0,3	0,2	13
55	1,9	+0,2	0,2	4
56	1,7	-0,7	0,1	4

B

51	0,8			51
14	1,1	0,0	0,2	14
13	1,5	+0,2	0,1	13
13	1,2	+0,2	0,2	13
11	1,4	-0,1	0,3	11

Tabelle 3. Ablesenaugigkeit und persönlicher Fehler (Jena-Optik Redta).

Assistent	Student	Mittlerer Fehler der Ablesung (cm auf 100 m)	Persönlicher Fehler (cm auf 100 m)	Mittlerer Fehler im persönlichen Fehler (cm auf 100 m)	Anzahl der Distanzmessungen (5 Ablesungen)
E		1,2			361
	126	1,4	-2,8	0,7	26
	127	3,0	-0,8	1,2	36
	128	2,2	-6,1	1,4	19
	129	1,3	+0,7	0,7	12
	130	1,8	-2,0	1,5	6
	131	2,2	+2,3	2,0	6
	132	1,7	-2,2	0,9	17
	133	2,3	-0,8	0,8	28
	134	2,3	0,0	0,6	19
	135	1,1	-0,7	0,6	17
	136	1,9	0,0	0,7	21
	137	1,0	-2,5	0,4	6
	138	1,5	-1,1	1,1	13
	139	1,7	+0,1	0,6	25
	140	1,6	+0,3	0,4	24
	141	1,9	+3,6	1,1	16
	142	1,3	+1,6	0,6	24
	143	1,9	+1,2	0,7	14
144	1,9	+0,1	0,6	14	
145	1,9	-0,6	1,2	8	
146	1,4	+0,9	1,0	10	
F		2,3			90
	147	2,2	-3,0	0,8	38
	148	2,6	-14,1	4,6	5

Tabelle 3 (Fortsetzung)

Assistent	Student	Mittlerer Fehler der Ablesung (cm auf 100 m)	Persönlicher Fehler (cm auf 100 m)	Mittlerer Fehler im persönlichen Fehler (cm auf 100 m)	Anzahl der Distanzmessungen (5 Ablesungen)
N	174	1,1	-0,6	0,7	10
	175	1,0	-0,1	0,3	29
	176	1,3			77
	177	1,8	-1,8	0,7	8
	178	1,7	-1,7	0,6	26
	178	0,9	-1,8	0,6	36
	179	1,3	-0,4	0,6	7

Tabelle 4. Ablesenaugigkeit und persönlicher Fehler (Wild RDH).

Assistent	Student	Mittlerer Fehler der Ablesung (cm auf 100 m)	Persönlicher Fehler (cm auf 100 m)	Mittlerer Fehler im persönlichen Fehler (cm auf 100 m)	Anzahl der messungen (5 Ablesungen)	
G	149	3,0	-1,1	2,2	4	
	150	2,1	-3,1	0,7	43	
	151	1,8	+1,4	0,4	88	
	152	2,7	+2,8	0,5	45	
	155	2,0	0,0	0,7	43	
H	153	1,2	-0,8	0,4	129	
	154	1,7	-1,6	0,3	56	
	155	1,3	0,0	0,7	52	
	155	1,2	0,0	0,7	21	
	158	1,2	0,6	1,2	24	
J	156	1,9	-0,7	0,7	30	
	157	1,6	+2,5	1,2	15	
	158	1,7	+1,4	0,7	4	
	158	2,5	+1,4	0,7	11	
	158	2,5	+1,4	0,7	11	
K	159	1,4	-0,3	1,1	85	
	160	0,9	+1,1	0,7	4	
	161	1,1	-1,6	1,2	4	
	162	1,8	0,0	0,7	6	
	162	3,4	0,0	0,7	7	
	163	2,6	-3,6	0,9	8	
	164	1,5	-0,1	0,9	11	
	165	1,7	-0,5	0,8	7	
	166	1,7	+1,2	0,6	5	
	167	2,3	-0,8	1,0	4	
L	170	1,2	-0,2	0,4	108	
	171	1,2	-0,6	0,3	35	
	172	1,3	-1,6	0,4	45	
	172	1,3	-1,6	0,4	28	
	173	1,4	+1,0	0,6	53	
M	173	1,1	+1,0	0,6	14	
	173	1,1	+1,0	0,6	14	
	173	1,1	+1,0	0,6	14	
	173	1,1	+1,0	0,6	14	
	173	1,1	+1,0	0,6	14	
P	180	1,2	+0,5	0,3	96	
	181	1,0	-1,2	0,3	17	
	182	1,4	+0,5	0,3	43	
	182	0,6	-0,2	0,3	12	
	183	1,2	0,3	0,3	24	
	Q	184	1,0	-0,1	0,2	150
		185	1,1	-0,1	0,5	33
		186	1,1	-0,2	0,3	14
		187	1,0	-1,5	0,3	32
		187	1,3	-0,5	0,3	35
188		1,2	-0,3	0,3	28	
189		0,9	0,2	0,2	8	
R		190	1,0	+0,1	0,2	55
		191	1,0	-0,4	0,2	38
		191	1,3	+0,9	0,2	8
	192	1,0	0,2	0,2	9	
	192	1,0	0,2	0,2	9	
S	193	0,9	+0,1	0,2	102	
	194	1,1	-1,0	0,6	47	
	195	1,6	-0,3	0,4	10	
	196	0,9	-0,5	0,8	16	
	197	1,3	-0,8	0,3	6	
T	197	0,9	0,2	0,3	23	
	198	1,4	+0,2	0,3	89	
	199	1,6	+0,9	0,5	35	
	200	1,6	-0,9	0,5	28	
	200	1,6	-0,9	0,5	26	

Die Angaben für diese Tabellen wurden während der Praktika erhalten. Bei uns ist es üblich, dass die Distanzmessungen ein Student zugleich mit einem Assistent ausführt. Aus dem Unterschied zwischen diesen Messungen kann der persönliche Fehler bestimmt werden. Sämtliche Tabellen wurden in gleicher Weise zusammengestellt.

Die Tabelle 1 enthält die mit der Kruidhof-Latte erhaltenen Beobachtungen (Kruidhof, 1933). Diese Noniuslatte ermöglicht vier unabhängige Ablesungen für jede Distanz.

In Tabelle 2 sind die Beobachtungen angegeben, die mit dem Kern-Vorsatzprisma mit Planplatte erhalten wurden. Für jede Distanz wurden fünf Ablesungen vorgenommen.

Die Tabellen 3 und 4 enthalten die Angaben der Messungen mit Redta von Jena-Optik, bzw. mit RDH von Wild. Auch hier wurden für jede Distanz fünf Ablesungen ausgeführt. Die zwei letzteren Geräte sind selbstreduzierende Instrumente, bei welchen durch den Einbau eines Biprismas die persönlichen Fehler ausgeschaltet werden sollen. Es ist jedoch auffallend, dass sich bei Redta die grössten persönlichen Fehler ergeben. Dessen mögliche Erklärung kommt im Abschnitt 2.2.3 zur Sprache. Übrigens hat es sich gezeigt, dass der persönliche Fehler stets gering ist und dass daraus mit Recht der Schluss gezogen werden kann, dass nicht die Augenfehler jene Fehlerquellen sind, mit welchen die in der Praxis gefundenen Abweichungen erklärt werden können.

Sehr wichtig ist es jedoch dass die Ablesungen sämtlicher Messungen, die in den Tabellen angeführt sind, an derselben Stelle des Sehfeldes gemacht worden sind, um die Instrumentalfehler auszuschalten.

2.1.2 Die erste fotografisch ausgeführte Untersuchung

Die durch das optische System hervorgerufenen Fehler wurden durch Kruidhof auf folgende Weise geprüft. Durch verschiedene Kombinationen von Fernrohr und Prismen wurde die Latte fotografiert. Die benutzten Fernrohre waren: Wild T1, Kern DKM-2 und ein Fototachymeter (selbstgebautes Fernrohr); die benutzten Prismen waren: Wild DM, Wild DM-M, Kern DM-M, Hildebrand und Fototachymeter. Dieses letztere Prisma wird vor die untere Hälfte des Objektivs angebracht, die übrigen Prismen stehen vor der Mitte des Objektivs. Als Latte wurde eine verbesserte Noniuslatte verwendet, die für jedes Bild vier Ablesungen ergibt. Die Bilder werden mit Hilfe eines binokularen Mikroskops abgelesen. Abb. 3 zeigt die Kombination des Fernrohrs mit der Kamera, während Abb. 4 eines der Bilder zeigt.

Auf Grund dieser Bilder wurde eine Anzahl von Karten zusammengestellt, auf welchen die Fehler bei der Stelle der Ablesung angegeben sind. Ein Beispiel finden wir auf Abb. 5.

Es zeigte sich deutlich, dass die Fehler (f_L) in Abhängigkeit von der Stelle im Sehfeld entstanden waren. Es schien, dass es – auch aus theoretischen Erwägungen (siehe Abschnitt 2.2) – begründet ist eine quadratische Funktion zu gebrauchen, und zwar:

$$f_L = ax^2 + bxy + cy^2 + dx + ey$$

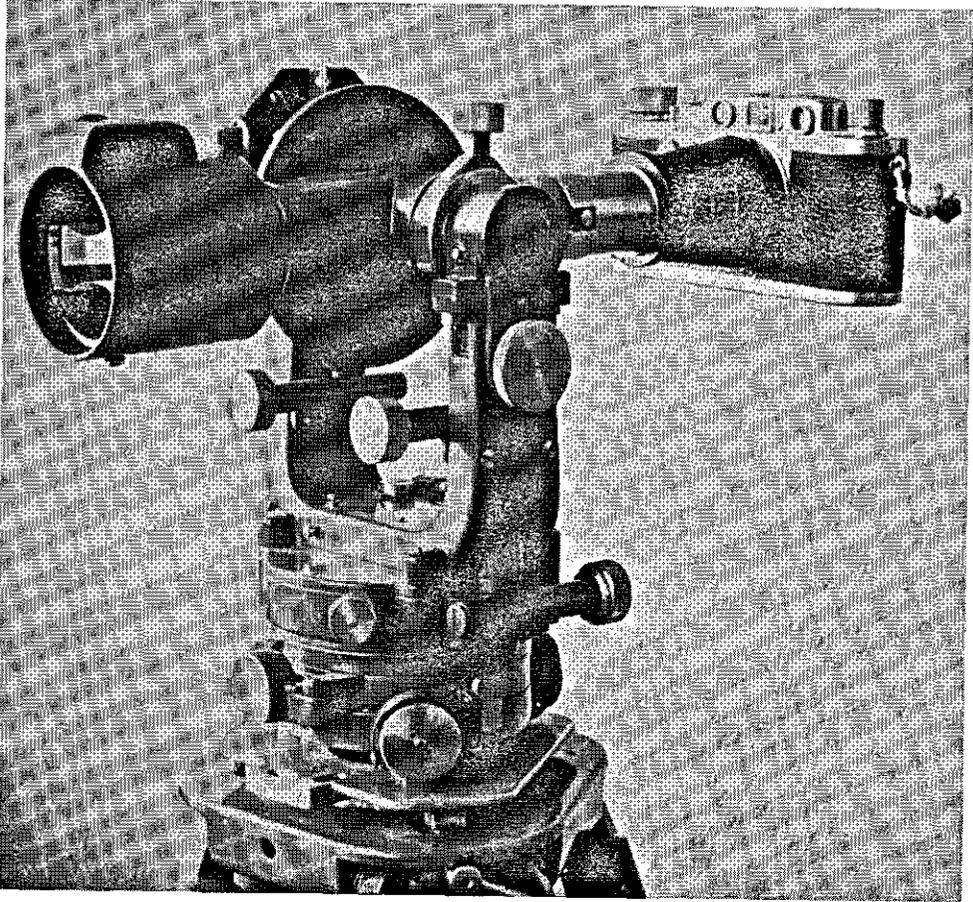


Abb. 3. Kombination eines Fernrohrs mit einer Kamera.

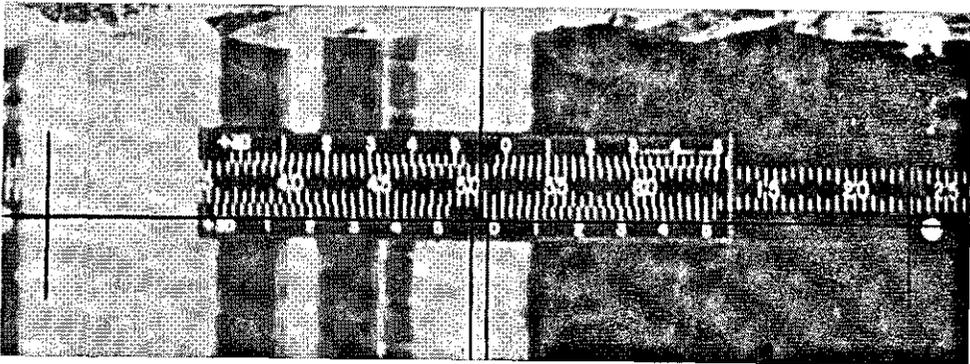


Abb. 4. Foto eines Lattenbildes.

Tabelle 5. Fehler der Distanz als Funktion der Ablesestelle bei verschiedenen Kombinationen des Fernrohrs und des Prismas.

Num- mer	Fernrohr	Prisma	a ¹	b ¹	c ¹	d ¹	e ¹	m ²	n ³
1	Wild T1	Wild DM	-0,5	+1,6	-0,3	+22,4	-9,2	32	30
2		Kern DM-M	+0,1	+0,2	-0,1	+ 0,7	+5,2	34	38
3		Hildebrand	+0,9	-0,5	-0,2	-10,5	-2,0	38	40
4	Kern DKM2	Wild DM	-1,4	+0,6	-0,5	+15,3	+2,2	20	27
5		Wild DM-M	+0,1	+0,1	+0,2	+ 5,3	-0,5	13	49
6		Kern DM-M	-0,2	-0,6	+1,1	- 2,8	-7,2	7	17
7		Hildebrand	-0,2	0	+0,1	- 4,2	-1,1	19	52
8	Fototachymeter	Wild DM	-0,1	+1,0	+0,7	+19,0	-3,7	16	18
9		Wild DM-M	-0,1	+0,2	+0,4	+ 4,2	0	11	45
10		Kern DM-M	0	+0,2	-0,4	- 4,3	+1,9	15	53
11		Hildebrand	0	+0,3	-0,1	- 2,3	+0,4	8	29
12		Fototachym.	+0,1	-6,0	-0,4	- 2,4	-0,8	15	46

¹ a, b, c, d und e sind die Koeffizienten der Funktion $f_L = ax^2 + bxy + cy^2 + dx + ey$ (f_L in mm/hm, x und y in 10^{-3} rad.).

² m = mittlere Fehler in f_L (in mm/hm).

³ n = Zahl der Ablesungen.

2.1.3 Untersuchung der Ablenkung durch das Prisma

Das schwierigste Problem bei der Bestimmung der Ablenkung bei den verschiedenen Ständen des Prismas war die Ausschaltung anderer Fehlerquellen. Die Geräte, welche wir benützt haben, waren der Theodolit erster Ordnung von Heide Nr. 7747 als Kollimator, der Fototheodolit von Breithaupt Nr. 31083 mit aufmontiertem Prisma und der Theodolit Wild T3 Nr. 11176 als Winkelmessgerät. Das Prisma konnte in drei Richtungen gedreht werden, nämlich um die vertikale (α) und um die horizontale (β) Achse des Theodolits und um eine Achse, die senkrecht zur horizontalen Achse war (ω); die Richtung dieser dritten Achse war parallel zur Visierlinie des Fototheodolits. In Abb. 6 ist die Aufstellung wiedergegeben.

Das erste Problem war das Festhalten der Nullrichtung, d.h. der Richtung der Visierlinie des Kollimators-ohne Ablenkung durch das Prisma – so wie dies mit dem Winkelmessgerät gemessen wird.

Abb. 6 zeigt, dass sich die Aufstellung auf eine Konsole befestigt an einer Stelle der Wand befand, wo diese von eben in einen Kreisbogen übergeht. Bei Sonnenschein streckt sich der Bogen, wodurch die Konsole einer Verzerrung unterworfen ist. Aus Messungen, bei welchen nur die Nullrichtung der Zeit gegenübergestellt war, zeigte es sich, dass sich diese Richtung im Verlauf von ungefähr 3 Stunden um 30 bis 40 dmg verändert. Die Aufstellung des Instrumentes haben wir dann in den unteren Teil des Gebäudes versetzt. Hier gab es keine direkte Sonnenstrahlung. Um doch einen

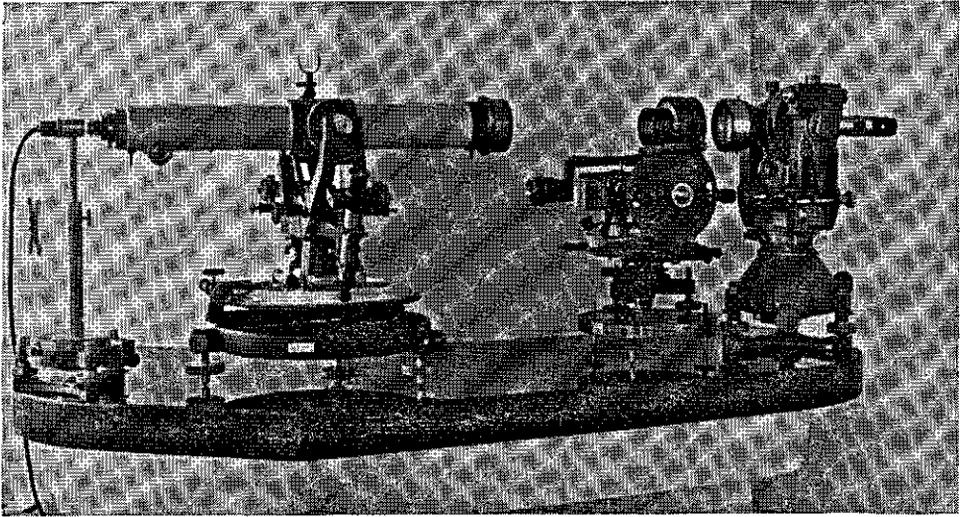


Abb. 6. Instrumentaufstellung für die Messung der Ablenkung.

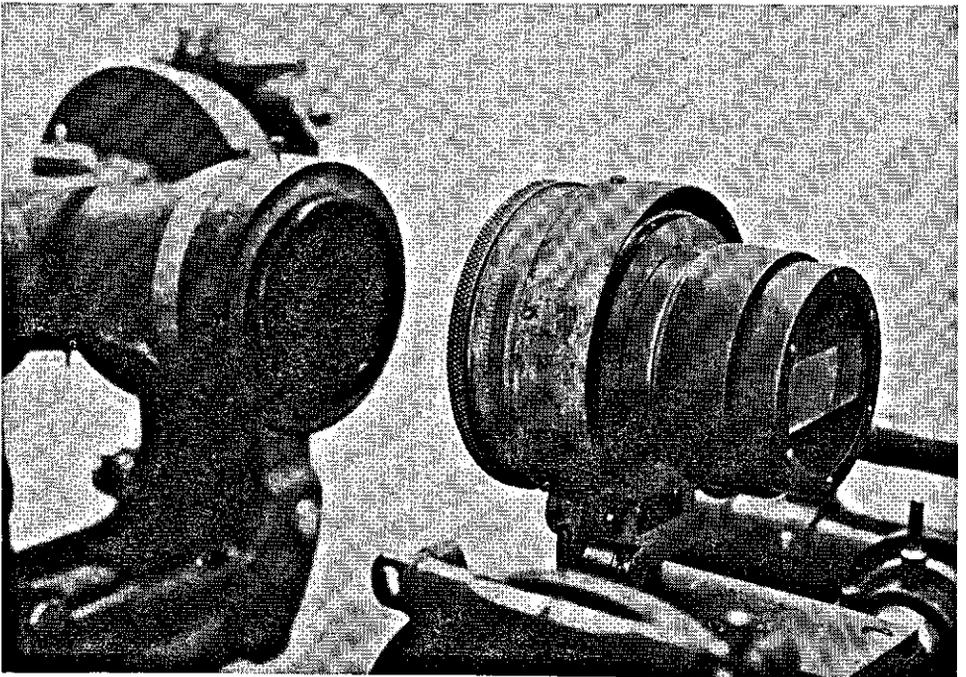


Abb. 7. Blende vor das Objectiv von T3.

möglichen Einfluss der Temperatur auszuschalten, haben wir nach jeder Reihe von 9 (oder 10) Beobachtungen die Nullrichtung fünfmal gemessen. Wenn diese sich verändert hatte, wurde für die zwischendurch gemachten Beobachtungen die Nullrichtung durch lineare Interpolation erhalten.

Ein zweites Problem hat sich ebenfalls in bezug auf die Nullrichtung ergeben. Hier kamen jedoch Abweichungen vor, die wahrscheinlich dadurch verursacht waren, dass nicht immer derselbe Teil des Objektivs von T3 benützt wurde. Die Nullrichtung wurde nämlich dem Prisma entlang gemessen und durch die Veränderungen im Stand des Prismas wurden stets andere Teile des Objektivs von T3 abgedeckt. Dieses Problem wurde durch eine vor das T3 angebrachte Blende gelöst, deren Öffnung kleiner war, wie das Prisma (Abb. 7). Für des Messen der Nullrichtung wurde das Prisma gänzlich fortgeschwenkt.

Der Zweck der Messungen war die Ablenkung (γ) des Prismas in der Form einer quadratischen Funktion von α , β und ω zu bestimmen. Die Formel lautet:

$$\gamma = \gamma_0 + a\alpha^2 + b\beta^2 + c\omega^2 + d\alpha\beta + e\alpha\beta + f\beta\omega$$

Die Koeffizienten sollten durch Ausgleich erhalten werden. Die erste Reihe der Beobachtungen war so geplant, dass sich das Prisma um jede der drei Drehungsachsen in 9 Stellungen befinde, so dass $9^3 = 729$ Beobachtungen gemacht wurden. Als wir aus dieser Reihe 125 Beobachtungen nahmen (um jede Achse fünf Stellungen), zeigte es sich, dass der mittlere Fehler wider alles Erwartens nicht grösser geworden war (siehe Tabelle 6, Nr. 1 und 2).

Es schien so begründet weniger Beobachtungen zu machen, wodurch ziemlich viel Zeit erspart wurde. (Der Faktor Zeit beeinflusst die Ergebnisse meistens in ungünstiger Weise).

Aus der Ausgleichung zeigte es sich, dass die Koeffizienten der gemischten Glieder $\alpha\beta$, $\alpha\omega$ und $\beta\omega$ praktisch mit Null gleich sind. Deshalb konnte man die Messungen für die drei Richtungen getrennt vornehmen, wodurch bei weniger Beobachtungen genauere Ergebnisse erzielt wurden (Tabelle 6, Nr. 8 bis 15).

Aus der Tabelle geht hervor, dass die dritte Richtung eine Kosinus-Funktion ergibt: $\gamma = \gamma_0 \cos \omega \simeq \gamma_0(1 - 0,5 \omega^2)$, wie man auch erwarten konnte.

Es wurden ebenfalls Messungen auf einer Zieltafel auf 10 m Entfernung gemacht (Tabelle 6, Nr. 16). Aus den Unterschieden zwischen diesen Messungen und jenen auf unendlich (mit dem Kollimator) zeigte es sich, dass die Additionskonstante vom Stand des Prismas abhängig ist, jedoch in so geringem Masse, dass dies in der Praxis vernachlässigt werden kann.

Aus der Bestimmung der Ablenkung mittels des Kollimators ergibt sich die Multiplikationskonstante A als Kotangens der Ablenkung γ_0 , wobei die relative Genauigkeit von A gleich mit jener von γ_0 ist.

Die Additionskonstante erhält man aus dem Unterschied in der Ablenkung $\Delta\gamma_0$ zwischen der Messung auf unendlich und jener auf 10 m:

$$B = \frac{\sin\Delta\gamma_0}{\sin\gamma_{0,\infty}} \cdot 10 \text{ m} \approx \frac{\Delta\gamma_0}{\gamma_{0,\infty}} \cdot 10 \text{ m}$$

Tabelle 6. Die Ablenkung des Prismas als Funktion der Stellung des Prismas.

Num- mer	Prisma	γ_0	a^1	b^1	c^1	d^1	e^1	f^1	n^2	m^3
1	Hildebrand	0,9917	0,861	0,361	-0,485	+0,005	-0,021	+0,041	729	7,2
2		0,9920	0,851	0,371	-0,490	+0,011	-0,016	-0,051	125	5,3
3		0,9749	0,872	0,361	-0,480	+0,005	0,000	+0,036	125	5,0
4		0,9900	0,872	0,371	-0,511	-0,027	-0,009	+0,062	125	6,4
5		0,9919	0,851	0,361	-0,485	-0,016	+0,010	-0,036	125	5,8
6		0,9956	0,846	0,356	-0,485	-0,016	+0,016	+0,031	125	8,3
7		0,9897	0,856	0,392		-0,036			25	4,4
8		0,9931	0,856						50	2,7
9		0,9932	0,877						50	2,5
10		0,9931	0,856						50	2,7
11		0,9932		0,356					50	2,7
12		0,9932		0,382					50	3,0
13		0,9909			-0,495				36	4,4
14		0,9932			-0,495				36	3,3
15		0,9932			-0,490				50	2,6
16		0,9749	0,872	0,361	-0,480				125	5,0
17	Kern DM-M	1,0036	0,892	0,361	-0,511	-0,021	0,000	+0,011	125	5,0
18		1,0021	0,872	0,382	-0,505	0,000	-0,026	-0,011	125	5,3

¹ a, b, c, d, e und f sind die Koeffizienten der Funktion $\gamma = \gamma_0 + a\alpha^2 + b\beta^2 + c\omega^2 + d\alpha\beta + e\alpha\omega + f\beta\omega$ (γ und γ_0 in 10^{-2} rad., α , β und ω in rad.).

² n = Zahl der Stellungen des Prismas.

³ m = mittlere Fehler in γ in 10^{-6} rad.

Es zeigt sich so, dass man im Institut, folglich im Gebäude, recht einfach eine Bestimmung der Konstante machen kann, deren Genauigkeit ausreichend ist ($m_A = 2,5 \times 10^{-4}$ und $m_B = 5$ mm).

2.1.4 Fehler infolge der Zweiteilung des Objektivs

Die Fehler, welche sich infolge der Zweiteilung des Objektivs ergeben, führen zu einer Extra-Verzeichnung. Die Verzeichnung, welche sich bei der Benützung der Oberhälfte des Objektivs ergibt, hat sich in bezug auf die Verzeichnung des ganzen Objektivs geändert. Dasselbe gilt auch für die Unterhälfte. Man kann folglich ein Gitternetz bei ganzer Objektivöffnung, sowie bei Benützung der Oberhälfte, bzw. der Unterhälfte des Objektivs fotografieren. Aus den Unterschieden in diesen Bildern kann dann der Fehler bestimmt werden. Es tauchen hierbei jedoch einige Schwierigkeiten auf. Erstens muss man dessen sicher sein, dass das fotografische Material keine Einwirkung hatte. Es ist deshalb empfehlenswert für die Aufnahmen Glasplatten zu

verwenden und zwar bestens eine einzige Glasplatte, auf welcher die Bilder übereinander aufgenommen werden. Falls sich nun eine materialbedingte Wirkung geltend macht, würde diese in den Unterschieden zwischen den Bildern wegfallen.

Ein zweites Problem ist, dass der Strahlenlauf durch das Fernrohr und die Kamera derselbe sein muss, wie jener, der in der Praxis angewendet wird. Aus Abschnitt 2.2.4 sehen wir, dass bei der Teilung des Objektivs nicht nur verschiedene Teile des Objektivs, sondern auch des Okulars und Kamera-Objektivs benützt werden. Bei unseren Untersuchungen musste die Situation dieselbe sein, d.h. wir mussten dessen sicher sein, dass sich die örtliche Aufstellung der Kamera in bezug auf das Fernrohr nicht geändert hat.

Der Versuch wurde wie folgt angestellt. Als Objekt wurde eine schwarze Tafel verwendet, auf die in Abständen von 5 cm, weisse Quadrate von 1 cm geklebt waren. Auf diese Quadrate waren mit Hilfe eines Koordinographs Kreuzchen gezeichnet, die voneinander $50 \pm 0,03$ mm entfernt waren (Abb. 8). In unserem Laboratorium befand sich ein Fototheodolit, bei dem die Linse hinsichtlich des Kameragehäuses, folglich auch hinsichtlich der Platte bewegt werden konnte. Die Kamera wurde nun in einer solchen Weise hinter das Fernrohr von Wild T2 Nr. 40190 montiert, dass die Kameralinse mit ihrer optischen Achse parallel zur optischen Achse des Fernrohrs befestigt war und dass die Platte in horizontaler Richtung bewegt werden konnte. Das Ganze wurde im Praktikum-Saal aufgestellt, wo die Entfernung des Fernrohrs mit der Kamera zur mit den Kreuzchen versehenen Tafel 100/3 m betrug, wobei die Tafel senkrecht zur Visierlinie aufgestellt war. Es wurden vier Bilder aufgenommen:

1. das erste mit ganzer Objektivöffnung;
2. beim zweiten wurde die fotografische Platte ein bisschen verschoben, die Unter-

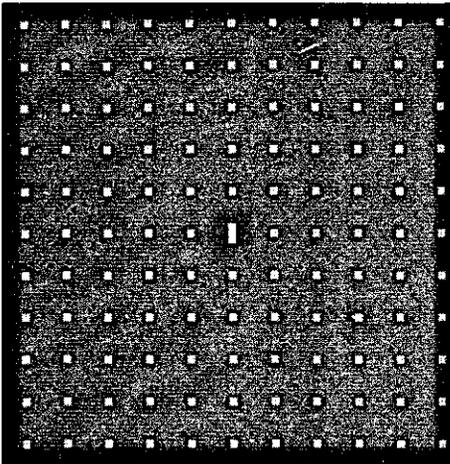


Abb. 8. Schwarze Tafel mit weissen Quadraten von 1 cm in Abständen von 5 cm.

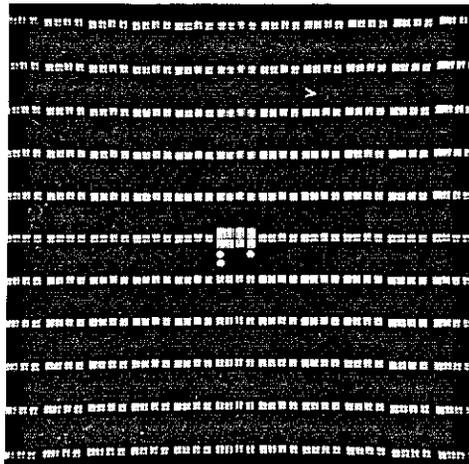


Abb. 9. Dieselbe Tafel wie in Abbildung 8 fotografiert mit verschiedenen Objektivöffnungen und Verschiebung der fotografischen Platte.

hälfte des Objektivs wurde abgedeckt, wobei das Bild jetzt nur durch die Oberhälfte erhalten wurde;

3. nach einer erneuten Verschiebung der Platte und Abdeckung der oberen Hälfte wurde das Bild durch die Unterhälfte aufgenommen;

4. als Kontrolle wurde nach Verschiebung der Platte ein Bild mit ganzer Öffnung gemacht.

Das Ergebnis ist auf Abb. 9 ersichtlich. Was sofort auffällt, ist dass die gegenseitigen Abstände in einer Gruppe von vier Kreuzchen nicht beständig sind. Die Platte wurde unter einem Messmikroskop ausgemessen. Diese Messung ist ausgeglichen bei der Annahme, dass die Abweichungen eine quadratische Funktion von der Stelle im Sehfeld sind. Es zeigte sich, dass der Unterschied zwischen der Aufnahme durch die Oberhälfte des Objektivs und durch dessen Unterhälfte praktisch der Formel $f = bxy$ entsprechend war, wobei die Abweichungen wahrscheinlich der nicht ganz richtigen Zentrierung des optischen Systems zuzuschreiben sind.

Der obenerwähnte Unterschied zeigt sich bei der Distanzmessung als ein Ablesungsfehler und deshalb auch als ein Fehler (f_L) in der gemessenen Distanz. Diese ist: $f_L(\text{mm}) = 1,7xy + 0,8x + 0,8y$. Dessen graphische Darstellung ist in Abb. 10 ersichtlich. Wie es sich im Abschnitt 2.2.3 zeigen wird, steht der Faktor nicht proportional zur Distanz, so dass man auf Grund der Abb. 10 durch Multiplikation mit 3 nicht zu einem Fehler auf 100 m kommen kann.

Von Aufnahmen auf grössere Entfernungen wurde abgesehen, da solche im Freiland gemacht werden müssen and da durch die Unruhe der Luft die Ergebnisse vollkommen zweifelhaft werden. In diesem Fall müsste auch das Objekt – die Tafel – grösser sein.

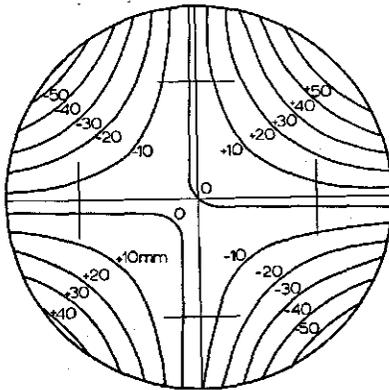


Abb. 10. Fehler der Distanz von $1/3$ hm infolge der Zweiteilung des Objektivs.

2.2 Theoretische Betrachtung der Ablenkung des Prismas und der Zweiteilung des Objektivs

Bis jetzt erfolgte die Ermittlung der Fehler gänzlich auf empirischem Wege. Es ist jedoch erforderlich die Empirie und der Theorie an einander zu prüfen. In bezug

auf das Prisma ergibt sich das Problem, dass trotzdem Formeln vorhanden sind, diese eine solche Form haben (siehe Formel 1), dass es schwierig ist an diese praktische Betrachtungen verbinden zu können.

Um eine Multiplikationskonstante von genau 100 zu erhalten, kann man durch Drehung des Prismas die Ablenkung ändern. Dieses System beeinflusst auch die Fehler, welche durch das Prisma entstanden sind.

Über die Zweiteilung des Objektivs ist selbst in der Literatur – sofern mir bekannt – keine Theorie zu finden. In den Lehrbüchern der Optik werden nur die Fehler von radial-symmetrischen Systemen behandelt. Eine halbe Linse ist jedoch nicht radial-symmetrisch.

Um die sogenannten persönlichen Fehler auszuschalten, wurden Systeme gefunden, durch welche die durch die Zweiteilung des Objektivs entstandenen Fehler eliminiert werden.

2.2.1 Die Ablenkung des Prismas

Für die Theorie des Prismas haben wir als Ausgangspunkt die durch Baeschlin (1925) abgeleitete Formel genommen. Es passt nicht in das Gefüge dieser Arbeit die ganze Ableitung anzuführen bis auf einige Punkte, die erforderlich sind.

Ein Prisma wird durch seine Brechungszahl n und seinen Brechungswinkel ϵ bestimmt; dies ist der Schnittwinkel der zwei Ebenen des Prismas. Wenn ein Strahl die Vorderfläche des Prismas schräg trifft, dann wird der Winkel zwischen diesen schrägen Strahl und der Normale auf dieser Vorderfläche auf einen Hauptschnitt projiziert (dies ist eine Ebene durch die Normale lotrecht zur Brechungsrippe). Diese Projektion bezeichnen wir mit α und den Winkel zwischen dem Strahl und dem Hauptschnitt mit β . Wenn wir die Ablenkung im Hauptschnitt berechnen wollen, dann benützen wir die reduzierte Brechungszahl n' :

$$n' = \sqrt{\{n^2 + (n^2 - 1) \cdot \text{tg}^2\beta\}}$$

In unserem Falle handelt es sich um einen Strahl, der horizontal läuft, während das Prisma um eine vertikale Achse über einen Winkel α und um eine horizontale Achse über einen Winkel β gedreht ist. Der gebrochene Strahl läuft auch horizontal. Der Winkel zwischen dem gebrochenen Strahl und dem einfallenden Strahl ist die Ablenkung γ . Die Formel von Baeschlin lautet:

$$\gamma = 2 \cdot \arcsin \left(\cos \beta \cdot \sin \frac{1}{2} \left[\alpha - \epsilon + \arcsin \left\{ n' \cdot \sin \left(\epsilon - \arcsin \frac{\sin \alpha}{n'} \right) \right\} \right] \right) \quad (1)$$

Aus dieser Formel kann man ableiten, dass die Ablenkung minimal ist, wenn der Strahl in einer Richtung einfällt, für die $\sin \alpha = n \cdot \sin \frac{1}{2} \epsilon$ und $\beta = 0$ gültig ist.

Wenn diese Richtung als Nullrichtung genommen wird und wenn man die obenstehende Formel nach Mac-Laurin bis zum dritten Grad entwickelt, so erhält man:

$$\gamma \simeq (n - 1) \epsilon \left(1 + \frac{n + 1}{2n} \alpha^2 + \frac{1}{2n} \beta^2 \right) \quad (2)$$

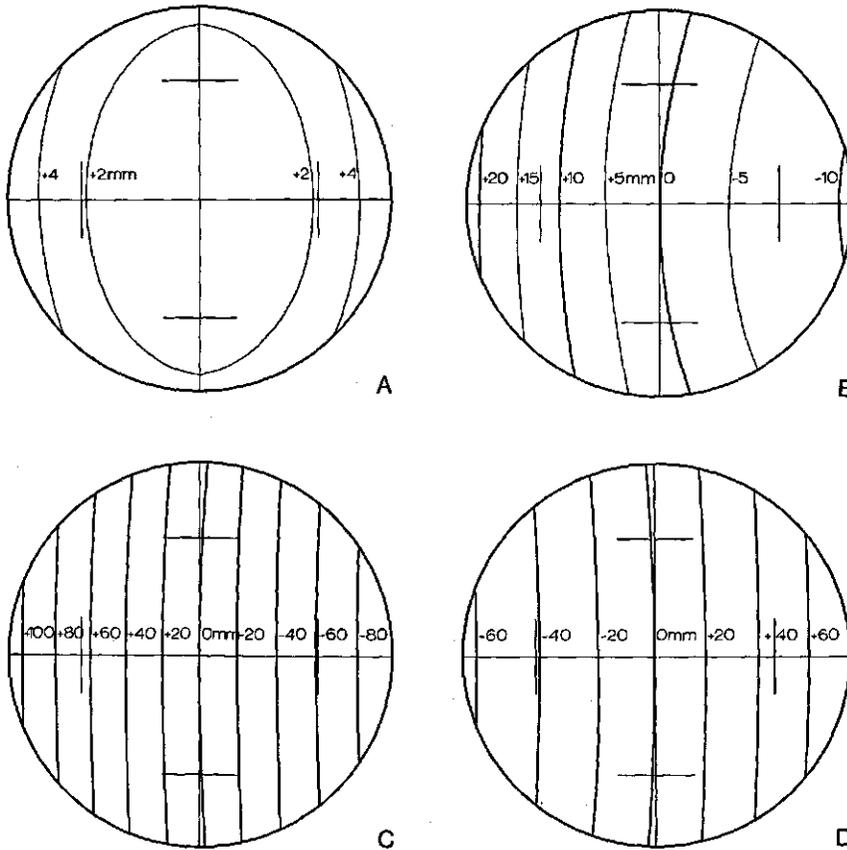


Abb. 11. Fehler der Distanz von 100 m infolge des Prismastandes vor dem Objektiv (Hildebrandprisma).

- A. Prisma im Stand der Minimalablenkung für die Mitte des Sehfeldes.
- B. Einfallswinkel für die Mitte des Sehfeldes ist 0° .
- C. Einfallswinkel für die Mitte des Sehfeldes ist -4° .
- D. Einfallswinkel für die Mitte des Sehfeldes ist $+4^\circ$.

Die Veränderung der Ablenkung wird jetzt:

$$\Delta\gamma \approx \gamma_0 \left(\frac{n+1}{2n} \alpha^2 + \frac{1}{2n} \beta^2 \right) \quad (3)$$

Die Ablenkungsveränderung ergibt nun eine Modifikation der Multiplikationskonstante A. Man arbeitet jedoch stets mit demselben A, so dass man eine falsche Distanz erhält. Der relative Distanzfehler ist gleich mit der relativen Veränderung in der Ablenkung. Wenn ein Strahl in der Richtung α und β einfällt, so wird der Distanzfehler:

$$f_L = L \left(\frac{n+1}{2n} \alpha^2 + \frac{1}{2n} \beta^2 \right) \quad (4)$$

Diese Formel ist nur dann gültig, wenn das Prisma im Stand der Minimalablenkung vor dem Fernrohr steht. Wenn das Prisma zum obenerwähnten Stand einen Winkel δ macht und wenn man die Ablesung am Schnittpunkt des Fadenkreuzes als richtig annimmt, dann geht Formel 4 über in:

$$f_L = L \left(\frac{n+1}{2n} \cdot \alpha^2 + \frac{n+1}{n} \cdot \alpha \cdot \delta + \frac{1}{2n} \cdot \beta^2 \right) \quad (5)$$

In Abb. 11 sind einige Beispiele angeführt (in den Abbildungen ist δ auf die Normale auf der Vorderfläche bezogen, wobei δ positiv ist, wenn der Strahl an der anderen Seite liegt, wie die Brechungsrippe).

Aus den Abbildungen geht hervor, dass beim Fehler der sich durch die Ablesung an verschiedenen Stellen des Sehfeldes ergibt, hauptsächlich das zweite Glied in Formel 5 eine Rolle spielt.

2.2.2 Die Folgen der Justierung des Prismas

Es kann die Frage gestellt werden, warum der Fabrikant nicht dafür sorgt, dass sich das Prisma im Stand der Minimalablenkung vor dem Fernrohr befindet, so dass das zweite Glied in Formel 5 mit Null gleich wird. Wenn wir annehmen, dass die relative Genauigkeit der Multiplikationskonstante 10^{-4} sein muss (eine Genauigkeit von einem Zentimeter zu einem Hektometer), so muss der Brechungswinkel des Prismas bis zu einer Genauigkeit von 1,2 dmg geschliffen sein. Diese Genauigkeit ist vielleicht technisch wohl erreichbar, ökonomisch jedoch nicht verantwortbar. Eine Lösung um doch eine Multiplikationskonstante von ziemlich genau 100 zu erhalten, wäre ein Prisma mit einem zu kleinen Brechungswinkel zu schleifen und durch Drehung des Prismas für eine richtige Ablenkung zu sorgen.

Normalerweise besteht das ablenkende System wegen dem Achromatismus aus zwei Prismen, einem aus Kronglas und einem aus Flintglas. Durch Drehung des einen Prismas oder beider Prismen kann so das System justiert werden. Der Benutzer möchte auch gerne eine Korrektionsmöglichkeit haben um z.B. den Vergrößerungsfaktor der Kartenprojektion in die Multiplikationskonstante einzubeziehen. Die Justierung steht im Gegensatz zur Forderung, dass das Prisma im Stand der Minimalablenkung vor dem Fernrohr stehen soll.

Es muss hier folglich der Zusammenhang zwischen der Justierung und der Ablenkungsveränderung untersucht werden. Wir wollen hier drei verschiedene Möglichkeiten anführen:

- A. Die Multiplikationskonstante ist genau 100 wenn sich beide Prismen im Stand der Minimalablenkung befinden;
- B. die Multiplikationskonstante ist bei diesem Stand grösser als Hundert;
- C. die Multiplikationskonstante ist bei diesem Stand kleiner als Hundert.

In Abb. 12 bis 14 ist für die drei obenerwähnten Fälle die Abhängigkeit der Multiplikationskonstante vom Stand der beiden Prismen gegeben.

Auf der vertikalen Achse ist der Einfallswinkel des ersten Prismas angegeben und

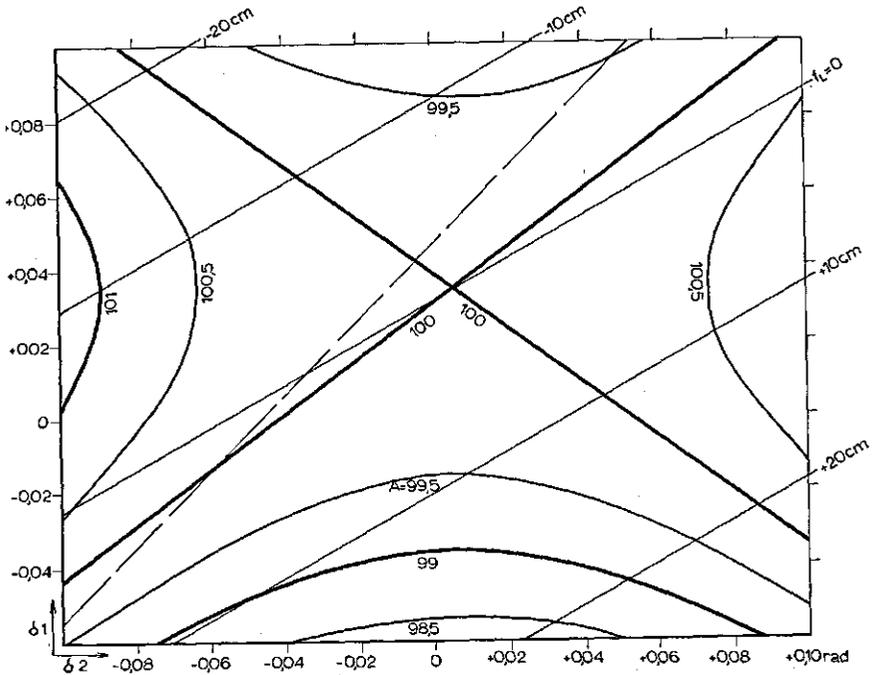


Abb. 12. Multiplikationskonstante als Funktion des Standes beider Prismen. Beim Minimalstand ist $A = 100$.

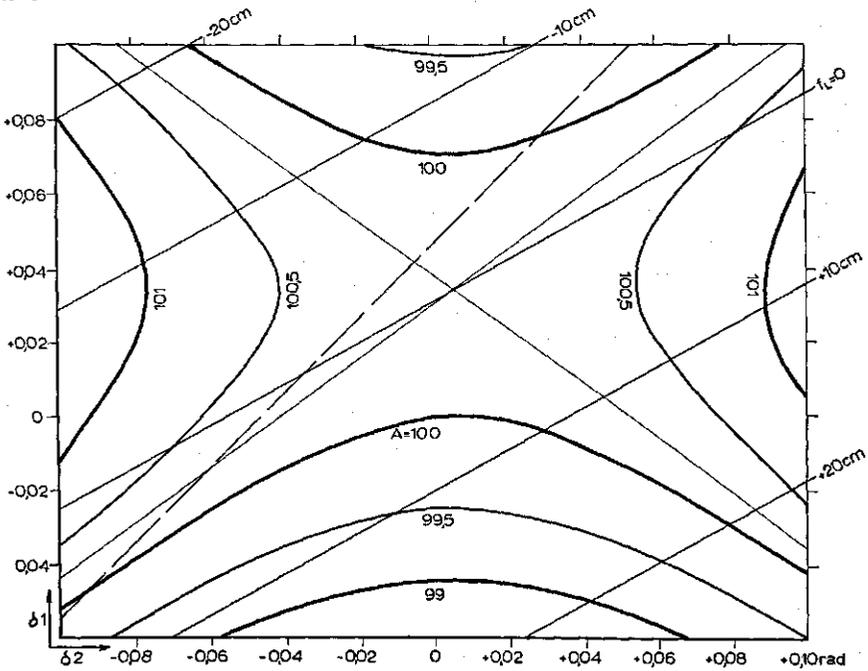


Abb. 13. Multiplikationskonstante als Funktion des Standes beider Prismen. Beim Minimalstand ist $A > 100$.

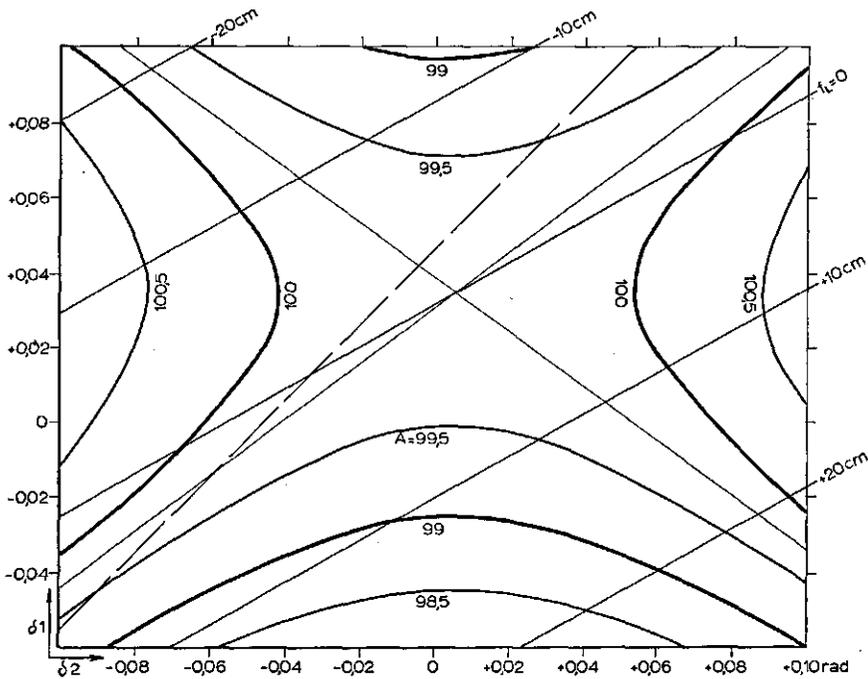


Abb. 14. Multiplikationskonstante als Funktion des Standes beider Prismen. Beim Minimalstand ist $A < 100$.

auf der horizontalen Achse der Einfallswinkel des zweiten Prismas. Die Linien mit der gleichen Konstante bilden ein System von Hyperbeln.

Aus der Formel 3 können wir bei der Benützung von 2 Prismen ableiten:

$$dA = -A^2 \left(\gamma_1 \cdot \frac{n_1 + 1}{2n_1} \cdot \delta_1^2 + \gamma_2 \cdot \frac{n_2 + 1}{2n_2} \cdot \delta_2^2 \right)$$

Hierin ist δ_1 bzw. δ_2 der Einfallswinkel zur Richtung, welche die Minimalablenkung des ersten und zweiten Prismas ergibt. Die Ablenkung des zweiten Prismas ist negativ.

Für die weitere Betrachtung ist es einfacher den Einfallswinkel auf die Visierlinie des Fernrohrs zu beziehen und den Koeffizienten mit Buchstaben anzugeben:

$$A = a\delta_1^2 + b\delta_2^2 + c\delta_1 + f\delta_2 + g \quad (a \text{ und } f \text{ sind negativ})$$

Hieraus folgt:

$$\frac{dA}{d\delta_1} + \frac{dA}{d\delta_2} = 2a\delta_1 + 2b\delta_2 + c + f$$

Wenn wir $d\delta_1$ und $d\delta_2$ auf das Sehfeld im Fernrohr beziehen und diese auf radial 5×10^{-3} stellen sowie auf den Distanzfehler bei 100 m übergehen, so erhalten wir:

$$f_L = a\delta_1 + b\delta_2 + \frac{1}{2}c + \frac{1}{2}f$$

Die Punkte mit gleichen f_L sind in den Abbildungen mit geraden Linien dargestellt. Ideal ist die Justierung, wenn diese eine Linie folgt, bei der $f_L = 0$ ist. Dies kann jedoch nur beim Fall C angewendet werden. Die Drehung beider Prismen muss dann in einem bestimmten Verhältnis gekoppelt sein.

Dieses Verhältnis ist:

$$\delta_1 : \delta_2 = \gamma_1 \frac{n_1 + 1}{n_1} : \left(-\gamma_2 \cdot \frac{n_2 + 1}{n_2} \right)$$

(Wohlgemerkt: γ_2 ist negativ).

Die benötigte Drehung kann man durch eine Schraube mit zwei Gewinden erhalten, deren Steigungen im gleichen Verhältnis stehen.

Eine sehr gebräuchliche Methode ist beide Prismen aneinander zu kitteln und zusammen zu drehen. In diesem Fall ist $\delta_2 = \delta_1 - \varepsilon_1$. Diese Linie ist ebenfalls eingezeichnet (gestrichelte Linie). Wir sehen, dass diese Methode nur im Fall B angewendet werden kann. Dieses System kann man zwar anwenden, es ist jedoch weniger gut, wie das früher erwähnte.

Bei einem System, das früher wohl angewendet wurde, wurde nur ein Prisma gedreht. Im Fall B muss dies das erste Prisma sein und im Fall C das zweite Prisma. Dies letztere System ist zwar etwas besser, aber keines der beiden Systeme kann empfohlen werden. Hierbei wird angenommen, dass das andere Prisma sich im Stand der Minimalablenkung befindet.

Der Fall A ergibt keine leidlichen Möglichkeiten für die Justierung. Man muss das eine Prisma aus dem Minimalstand drehen um das andere Prisma justieren zu können.

2.2.3 Die Zweiteilung des Objektivs

Wie schon erwähnt wurde, konnte für dieses Problem in der Literatur keine Lösung gefunden werden.

Im weiteren wollen wir versuchen mittels der Formeln der Seidel'schen Bildfehler die Extra-Verzeichnung zu erklären, welche durch die Zweiteilung des Objektivs entsteht. Hierzu bestimmen wir die Fehler in sagittaler und meridionaler Richtung des Strahls, der durch den Schwerpunkt der Oberhälfte des Objektivs läuft. Beide Fehler setzen wir zusammen und zerlegen sie in der x- und y-Richtung (Abb. 15). Dasselbe machen wir mit der Unterhälfte des Objektivs. Der Unterschied in der x-

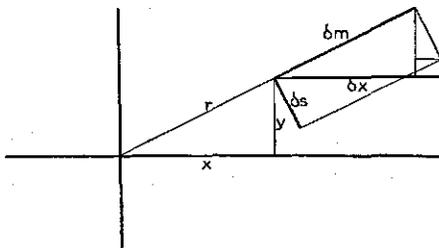


Abb. 15. $\delta_x = \delta_m \cdot x/r + \delta_s \cdot y/r$

Richtung der Strahlen, die durch den Schwerpunkt der oberen bzw. unteren Hälfte laufen, ergibt den Fehler, der durch die Zweiteilung des Objektivs entstanden ist.

Die Formeln der Seidel'schen Bildfehler lauten:

$$\delta_m = A(u_m^2 + u_s^2)u_m + B(3u_m^2 + u_s^2)w + Cu_mw^2 + Ew^3 \quad (6)$$

$$\delta_s = A(u_m^2 + u_s^2)u_s + 2Bu_mu_sw + Du_sw^2$$

Hierbei ist δ_m die Abweichung in meridionaler Richtung,
 δ_s die Abweichung in sagittaler Richtung,
 u_m der Öffnungswinkel in meridionaler Richtung,
 u_s der Öffnungswinkel in sagittaler Richtung, und
 w der Sehfeldwinkel.

Der Faktor mit A ergibt die sphärische Aberration,
 B ergibt das Koma,
 C ergibt den Astigmatismus,
 D ergibt die Bildfeldwölbung, und
 E ergibt die Verzeichnung.

Wenn wir einen Punkt in der Fadenkreuzebene mit den Koordinaten x und y ($x^2 + y^2 = r^2$) nehmen, dann hat der korrespondierende Punkt im Objektraum die Koordinaten $-(x/b) \cdot L$, $-(y/b) \cdot L$ und $-L$ (b ist die Bildweite).

Für den Sehfeldwinkel können wir schreiben:

$$w = \frac{r}{b} \quad (7)$$

Wenn wir die Distanz des Schwerpunktes der Oberhälfte des Objektivs bis zur Mitte des Objektivs mit z bezeichnen, dann hat dieser Punkt für einen Punkt im Sehfeld einen Öffnungswinkel von: $u = z/L$.

Der Öffnungswinkel kann in meridionaler und sagittaler Richtung zerlegt werden:

$$u_m = \frac{z}{L} \cdot \frac{y}{r} \quad \text{und} \quad u_s = -\frac{z}{L} \cdot \frac{x}{r} \quad (8)$$

Für die Unterhälfte des Objektivs gilt:

$$u_m = -\frac{z}{L} \cdot \frac{y}{r} \quad \text{und} \quad u_s = \frac{z}{L} \cdot \frac{x}{r} \quad (9)$$

Für die Abweichung δ_x in der x -Richtung kann man schreiben (siehe Abb. 15):

$$\delta_x = \delta_m \frac{x}{r} + \delta_s \frac{y}{r} \quad (10)$$

Aus den Formeln 6-10 folgt für die Oberhälfte:

$$\delta_{x0} = B \frac{z^2}{L^2} \cdot \frac{x}{b} + (C - D) \frac{z}{L} \cdot \frac{xy}{b^2} + E \frac{xr^2}{b^3} \quad (11)$$

und für die Unterhälfte:

$$\delta_{xu} = B \frac{z^2}{L^2} \cdot \frac{x}{b} - (C - D) \frac{z}{L} \cdot \frac{xy}{b^2} + E \frac{xr^2}{b^3} \quad (12)$$

Der Unterschied zwischen beiden ergibt die Extra-Verzeichnung, die durch die Zweiteilung des Objektivs entstanden ist:

$$f_Y = 2(C - D) \frac{z}{L} \cdot \frac{xy}{b^2} \quad (13)$$

Da der relative Distanzfehler gleich ist mit dem relativen Ablenkungsfehler, ist der absolute Distanzfehler:

$$f_L = 200(C - D)z \cdot \frac{xy}{b^2} \quad (14)$$

Wir sehen folglich, dass der Distanzfehler durch den Astigmatismus und die Bildfeldwölbung entstanden ist.

Aus der vorhergehenden Betrachtung zeigt sich, dass der durch die Zweiteilung des Objektivs hervorgerufene Fehler nicht zur Distanz proportional ist. Es besteht aber doch eine bestimmte Abhängigkeit, da die Bildweite b mit der Distanz im Zusammenhang steht.

Beim Fernrohr mit Innenlinse erfolgt die Fokussierung dadurch, dass die Innenlinse verschoben wird. Hierdurch wird das optische System geändert, so dass die Größen C und D ebenfalls von der Distanz abhängig sind (siehe auch Abschnitt 3.2.4).

2.2.4 Mittel zur Ausschaltung der sogenannten persönlichen Fehler und ihr Einfluss auf die Objektiv-Fehler

In der Literatur werden die im Abschnitt 2.2.3 behandelten Fehler den Unregelmäßigkeiten der Augenlinse und der Hornhaut zugeschrieben. Es wurden Mittel gesucht um diese Fehler auszuschalten. Die zwei Lösungen, die angewendet wurden, waren die folgenden:

1. das Prisma wird in der Mitte vor das Objektiv gesetzt;
2. in den Strahlenlauf des Fernrohrs wird ein Biprisma von Fresnel eingeschaltet.

In diesem Abschnitt werden wir diese Lösungen betrachten. Hier ist der Einfluss, den diese Lösungen auf den Augenfehler haben, so wie dies in der Literatur behandelt wurde, dem Einfluss dieser Lösungen auf die Fehler, die durch die Zweiteilung des Objektivs entstanden sind, gegenübergestellt.

Aus Abb. 16 ergibt sich, dass die gebrochenen Strahlen, welche von einem bestimmten Punkt ausgehen, beim Stellen des Prismas vor die Unterhälfte des Objektivs, durch die Oberhälfte der Austrittspupille laufen. Die nicht gebrochenen Strahlen, welche aus demselben Punkt ausgehen, laufen durch die Unterhälfte der Austrittspupille. Beim Beobachten hält man das Auge so hinter dem Fernrohr, dass die Augenpupille mit der Austrittspupille zusammenfällt. Die zwei Strahlenbüschel gelangen folglich

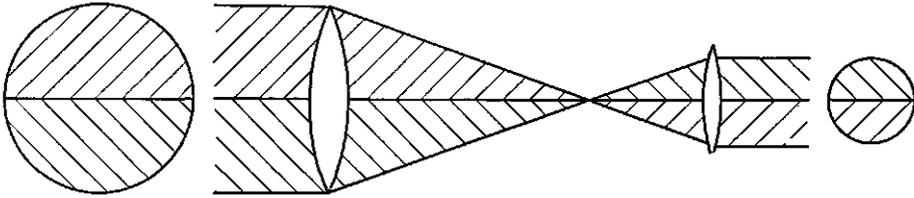


Abb. 16. Strahlenlauf in einem Fernrohr bei der Zweiteilung des Objektivs.

getrennt auf die Augenlinse. Wenn die Augenlinse Assymetrien zeigt, so entsteht dadurch eine Extra-Ablenkung.

Eine andere Erklärung ist von psychologischer Art: es gelangen zwei getrennte Strahlenbüchel auf die Augenlinse. Das Auge 'weiss' nicht, dass diese zusammengehören und reagiert auf beide Büchel auf verschiedene Weise, so dass dadurch ein Fehler entsteht.

Wenn man das Prisma in der Mitte vor das Objektiv bringt, dann erhält man drei getrennte Büchel (Abb. 17), von welchen der oberste und unterste Büchel zusammen das durchgehende Bild ergeben. Hierdurch werden die Abweichungen in der Augenlinse ausgeglichen, wodurch die Fehler geringer werden. Dessen psychologische Erklärung ist jetzt, dass das Auge 'weiss', dass die zwei äusseren Büchel zueinander gehören, so dass die Augenlinse auf beide in gleicher Weise reagiert. Jener Teil der Augenlinse, der für den gebrochenen Büchel benützt wird, wird durch die nächstliegenden Teile mitgenommen und reagiert nun auf dieselbe Weise.

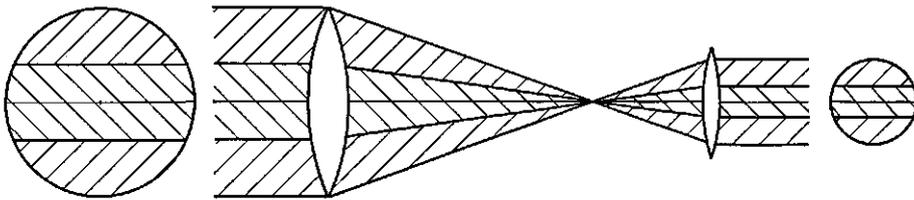


Abb. 17. Strahlenlauf in einem Fernrohr bei einer Dreiteilung des Objektivs.

Wenn wir die Dreiteilung des Objektivs betrachten, so sehen wir, dass das durchgehende Bild durch zwei getrennte Büchel gebildet wird, für die die Formeln 11 und 12 gültig sind. Wenn wir das Mittel dieser Formeln nehmen, dann entfallen die Faktoren, welche sich aus dem Astigmatismus und der Bildfeldwölbung ergeben. Das durchgehende Bild ist weniger scharf geworden, es tritt jedoch keine Extra-Verzeichnung auf.

Beim System mit dem Biprisma von Fresnel (Abb. 18) gelangen beide Büchel auf dieselbe Stelle der Augenlinse, so dass Abweichungen keinen Einfluss haben. Hinter das Okular ist noch eine Blende angebracht, wodurch die Strahlenbüchel, die ein Doppelbild ergeben könnten, daran verhindert werden. Im Fernrohr sieht man beide

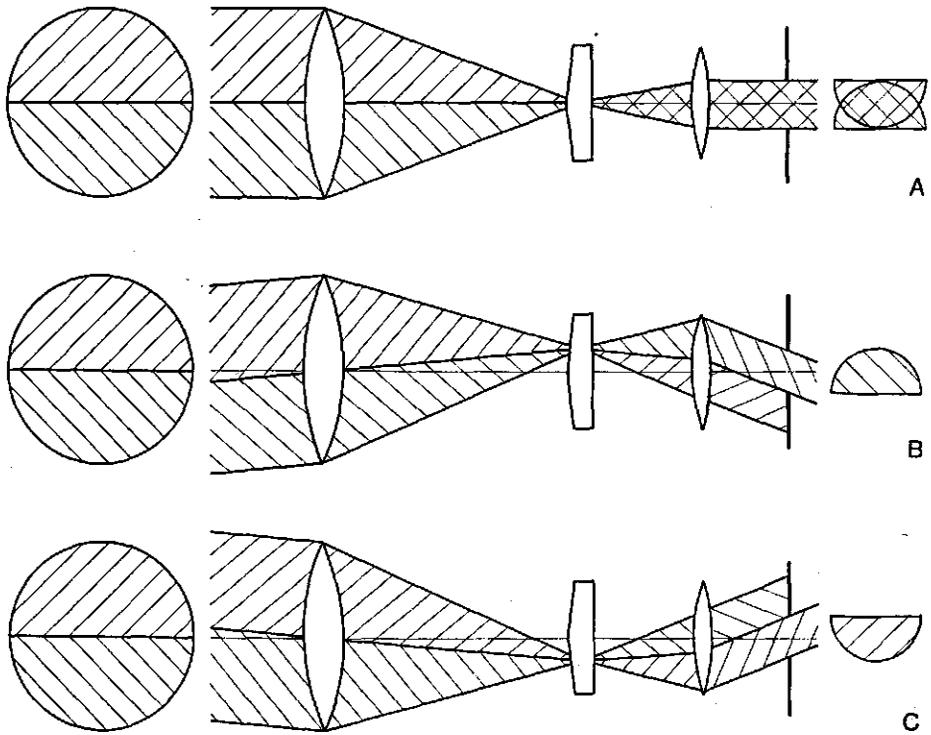


Abb. 18. Bildtrennung mittels eines Biprismas von Fresnel.

- A. Strahlenlauf für einen Punkt auf der optischen Achse.
- B. Strahlenlauf für einen Punkt unterhalb der optischen Achse.
- C. Strahlenlauf für einen Punkt oberhalb der optischen Achse.

Bilder getrennt. Die horizontale Trennung wird durch die Rippe des Biprismas gebildet. Das Ablesen kann nur entlang der Trennungslinie erfolgen.

Wenn wir nun wieder zu den Formeln der Zweiteilung zurückgreifen, dann müssen wir in diesem Fall für y eine Null einsetzen; die Zweiteilung des Objektivs hat keinen Einfluss auf die Ablesung auf der Trennungslinie. Dies gilt nur für den Fall, wenn das ganze optische System gut zentriert ist.

Eine Erklärung für den Umstand, dass der persönliche Fehler bei der Jena-Optik Redta grösser ist, wie bei anderen Tachymetern (siehe Tabelle 1-4) ist möglicherweise das Folgende: wenn die Ablesung durch zwei Beobachter mit verschiedenen Augen nacheinander erfolgt, dann muss das Okular verschoben werden (manche Studenten fokussieren fehlerhaft, indem sie die zentrale Einstelllinse verschieben). Hierdurch wird das optische System geändert, mithin werden auch die Faktoren des Astigmatismus und der Bildfeldwölbung verändert. Wenn nun das Fernrohr optisch oder mechanisch nicht gut zentriert ist, entsteht eine Extra-Ablenkung.

Bei den in diesem Abschnitt behandelten Systemen werden die durch das Prisma entstandenen Fehler nicht eliminiert.

2.3 Ablenkungen durch Spiegelungen

Bis jetzt haben wir nur über das Prisma als ablenkendes System gesprochen. Hierbei ist die Ablenkung vom Einfallswinkel abhängig, was bei einem Tachymeter bedeutet, dass sie von der Stelle der Ablesung im Sehfeld und vom Stand des Prismas vor dem Fernrohr abhängt, was ein Nachteil ist. Man könnte in diesem Fall Systeme suchen, bei welchen die Ablenkung nicht durch Strahlenbrechung, sondern durch eine gerade Zahl von Spiegelungen gebildet wird. Dabei müsste so ein System keine Teilung des Objektivs erfordern. In dem vorgehenden Abschnitt haben wir gesehen, dass die Bildtrennung jene Schwierigkeiten, die durch die Objektivteilung entstehen, nur zum Teil eliminiert, wobei jedoch die vollkommene Bildmischung eine bessere Lösung wäre.

2.3.1 Das ablenkende System von Breithaupt-Uhink

Ein System, bei dem die Ablenkung durch Spiegelungen gebildet wird, wird beim Doppelbildtachymeter von Breithaupt-Uhink angewendet (Uhink, 1929) (Abb. 19). Bei diesem werden zwei Rhomboederprismen mit Winkeln von 50° , $(150^\circ + \frac{1}{4}\gamma)$, $(50^\circ + \frac{1}{4}\gamma)$ und $150^\circ - \frac{1}{2}\gamma$ benützt, wobei γ die Ablenkung des ganzen Systems ist. Optisch gesehen wirkt so ein Prisma als eine planparallele Platte (der Winkel den der Strahl mit der Einfallsebene bildet ist gleich mit jenem zur Austrittsebene). Der grösste Vorteil dieses Systems ist, dass die Ablenkung von der Brechungszahl unabhängig ist, d.h. unabhängig von der Temperatur und dem Luftdruck. Die chromatische Aberration hat auch keinen Einfluss auf die Ablenkung, aber wohl auf die Verschiebung. Die Lichtstrahlen fallen jedoch praktisch lotrecht auf das Prisma, so dass diese Aberration viel kleiner ist wie die Bildfehler, wie z.B. der Astigmatismus. Wenn man beim Fotografieren normalerweise einen Filter benützt, wird die chromatische Aberration praktisch gänzlich ausgeschaltet.

Da der Einfallswinkel keinen Einfluss auf die Ablenkung hat, ist die Multiplikationskonstante von der Stelle der Ablesung im Sehfeld unabhängig. Demzufolge ist dieses Prisma eigentlich besser, wie das gewöhnliche Prisma. Wohl ist beim Rhomboederprisma die Additionskonstante ziemlich gross und hängt vom Einfallswinkel ab. Uhink hat dies benützt, indem er beide Prismen als optische Mikrometer benutzt hat.

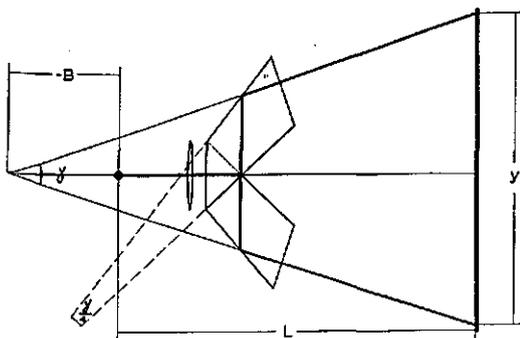


Abb. 19. Strahlenlauf beim Doppelbildtachymeter von Breithaupt-Uhink.

Dazu waren beiden Prismen drehbar, jedoch so, dass die Drehungen in gleicher und entgegengesetzter Richtung gemacht werden konnten.

Das System Uhink hat eine Bildtrennung, deren Vorteile und Nachteile im Abschnitt 2.2.3 erörtert werden. Dass dieses System keine grosse Verbreitung gefunden hat, kann wahrscheinlich der grossen Glasmasse und der Verletzlichkeit des Systems (des optischen Mikrometers) zugeschrieben werden.

2.3.2 Neue Systeme

Da wir die Vorteile des Systems Uhink erkannt haben, wurden unsere Untersuchungen auch auf dieses System ausgebreitet. Wir wollten jedoch die Bildtrennung vermeiden, eine vollkommene Bildmischung schien uns eine bessere Lösung für das Eliminieren der Objektivfehler zu sein.

Professor Kruidhof hat ein System entworfen, das aus zwei Spiegeln besteht, aus einem halbdurchlässigen und einem völlig spiegelnden Spiegel (Abb. 20). Der erste Spiegel steht unter einem Winkel von 50° vor dem ganzen Objektiv. Beide Spiegel schliessen einen Winkel von $\frac{1}{2}\gamma$ ein. Durch den vor der ganzen Objektivöffnung befindlichen halbdurchlässigen Spiegel sind die Strahlenbündel des durchgehenden und gebrochenen Bildes im Fernrohr und Auge vollkommen gemischt. Die Bildfehler des Fernrohrs und des Auges haben auf beide Bilder denselben Einfluss, so dass auf diese Weise keine Unterschiede zwischen beiden Bildern entstehen können. Da der halbdurchlässige Spiegel eine bestimmte Dicke haben muss (wenn der Spiegel zu dünn ist, bleibt er nicht flach), entstehen Nebenbilder (Abb. 21). Das erste Nebenbild ist praktisch ebenso lichtstark, wie das eigentliche Bild, was sehr verwirrend wirkt. Das System kann auch leicht dejustiert geraten.

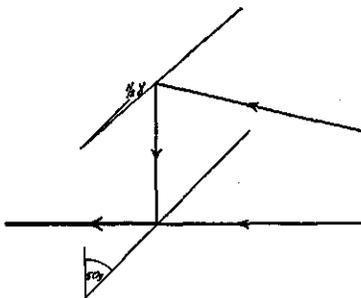


Abb. 20. System Kruidhof mit einem halbdurchlässigen und einem völlig spiegelnden Spiegel.

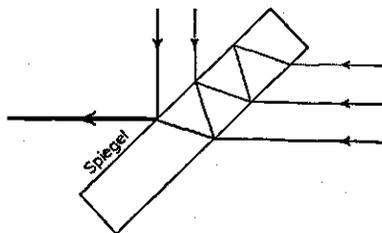
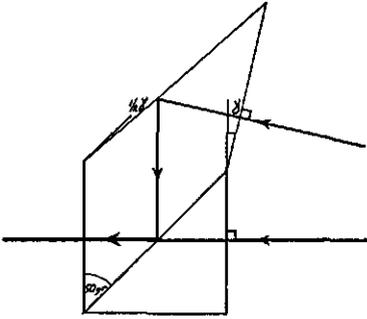


Abb. 21. Das Entstehen von Nebenbildern durch die Dicke der halbdurchlässigen Spiegel.

Abb. 22. Rhomboprismensystem.



Eine weitere Entwicklung ist das Prismensystem, das wir Rhomboprisma genannt haben. Dieses System besteht aus einem Rhomboederprisma, und einem dreiseitigen rechtwinkligen Prisma (Abb. 22). Die Ebene des Rhomboederprisma, auf die das dreiseitige Prisma gekittet ist, ist so versilbert, dass sie einen halbdurchlässigen Spiegel bildet. Dieses System kann nicht dejustiert geraten. Wenn das Rhomboprisma vertikal steht und ein Lichtstrahl in einer vertikalen Ebene lotrecht auf die Einfallsebene liegt, so gelangt dieser Lichtstrahl auch in einer vertikalen Ebene lotrecht auf die Austrittsebene. Der Schnittwinkel zwischen den beiden vertikalen Ebenen ist gleich mit der Ablenkung. Wenn folglich ein Strahl unter einer Neigung einfällt, so ist die Verschiebung auf der Latte unabhängig von der Neigung. Mit anderen Worten: das Rhomboprisma ist selbstreduzierend. Hierzu muss es jedoch nicht als Vorsatzprisma auf das Fernrohr geschoben werden, sondern muss in vertikalem Stand vertikal auf und nieder bewegt werden (Abb. 23).

Es haben sich bei diesem System auch Nachteile gezeigt. Erstens zeigte es sich, dass es schwer ist einen halbdurchlässigen Spiegel herzustellen, bei dem beide Strahlenbündel gleich gross und lichtstark sind. Ausserdem wirkt so ein Spiegel gewissermassen auch als Filter, so dass das eine Bild gelblich und das andere bläulich zu sein scheint. Ein weiterer Nachteil ist die umfangreiche Glasmasse, wodurch der Tachymeter schwerer und auch einseitig belastet wird, was zu einer Abnützung der Achsen führt. Schliesslich gibt dieses Prisma beim Fotografieren kein scharfes Bild, und zwar durch die Bildfehler, in erster Reihe durch den Astigmatismus des Prismas (der planparallelen Platte). In der Literatur steht zwar, dass eine vor dem Objektiv angebrachte Planplatte keine Bildfehler ergibt, was jedoch nur für jenen Fall gilt, wenn das Fernrohr auf unendlich eingestellt ist, wohingegen es sich zeigte, dass Distanzen von 100 und 150 m nicht unendlich sind.

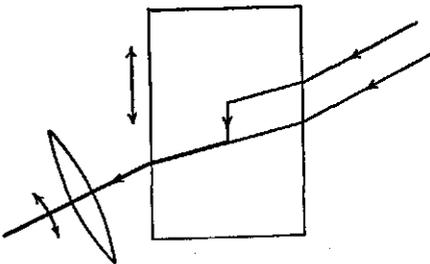


Abb. 23. Bewegung des Rhomboprismas bei der Selbstreduktion: wenn das Fernrohr sich um die horizontale Achse dreht, bewegt sich das Prisma vertikal auf und nieder.

2.3.3 Abhängigkeit der Additionskonstante vom Einfallswinkel

Bei jedem ablenkenden System, das mit Spiegelungen statt Brechungen wirkt, ist die Additionskonstante vom Einfallswinkel abhängig. Die Abb. 24 zeigt, dass der anallaktische Punkt auf einem Kreisbogen liegt, welcher auf der Sehne steht die durch den optischen Mittelpunkt des Objektivs und durch dessen durch Spiegel gebildetes Bild geformt wird. Beide Strahlen schliessen nämlich einen Winkel von $\gamma = 1/100$ rad ein.

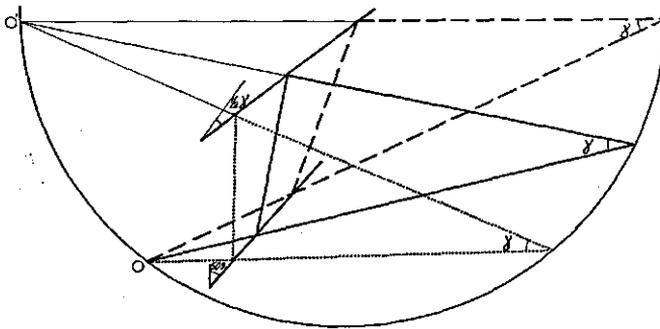


Abb. 24. Ein Kreisbogen als der geometrische Ort des anallaktischen Punktes.

Für die Ableitung einer Formel für die Verschiebung d des Bildes bei der Drehung eines Rhomboederprismas können wir von der Formel der Verschiebung einer Planplatte von einer Dicke $2D$ ausgehen:

$$d = 2D \left\{ \sin \alpha - \frac{\sin \alpha \cos \alpha}{\sqrt{(n^2 - \sin^2 \alpha)}} \right\} \quad (15)$$

Hinzu kommt noch eine Verschiebung durch den veränderten Stand des Prismas (Abb. 25):

$$d' = -D(\sin \alpha + \cos \alpha - 1) \quad (16)$$

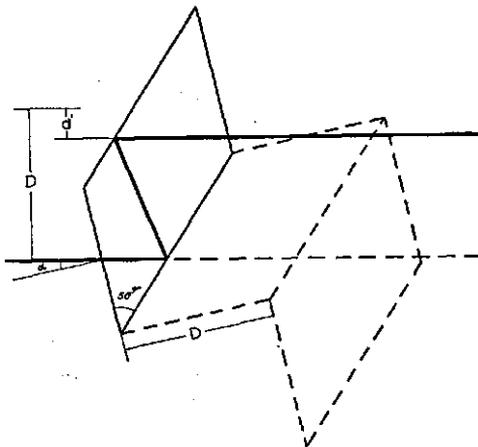


Abb. 25. Verschiebung d' bei der Drehung des Rhomboeder-Prismas bei $n = 1$.

Die gesamte Verschiebung ist nun:

$$d = -D \left\{ \cos \alpha - \sin \alpha - 1 + \frac{2 \sin \alpha \cos \alpha}{\sqrt{(n^2 - \sin^2 \alpha)}} \right\} \quad (17)$$

Eine gute Annäherung ist:

$$d = -D \cdot \operatorname{tg} \alpha \left(\frac{2 - n}{n} - \frac{1}{2} \operatorname{tg} \alpha \right) \quad (18)$$

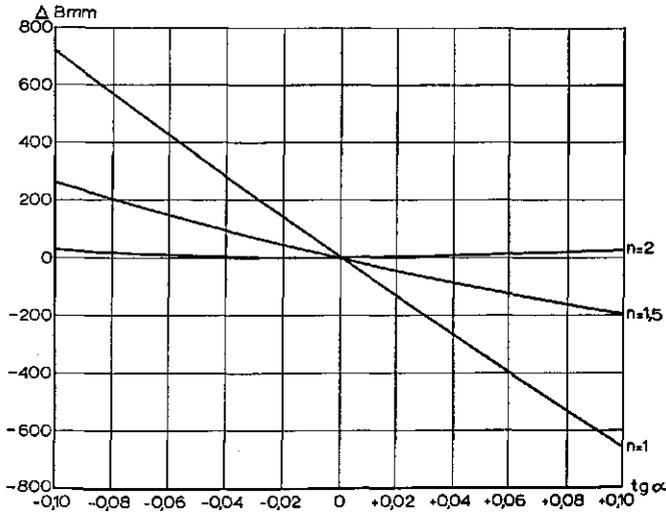


Abb. 26. ΔB beim System Breithaupt-Uhink ($D = 35$ mm).

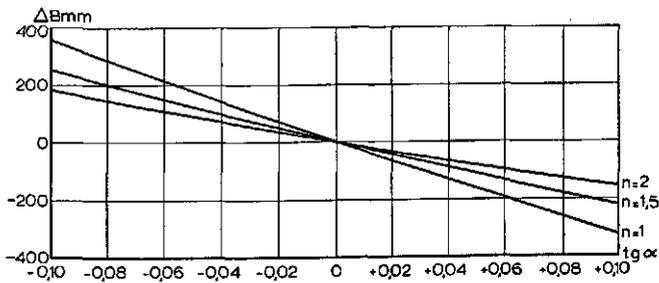


Abb. 27. ΔB beim Rhombo-prisma ($D = 35$ mm).

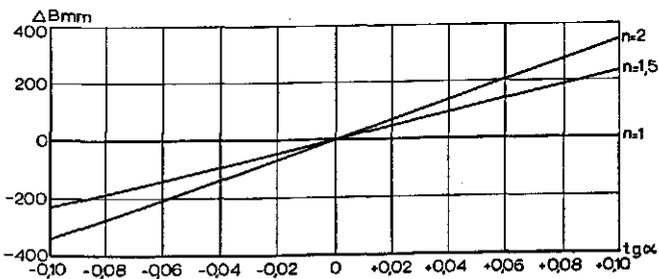


Abb. 28. ΔB bei einer plan-parallelen Platte ($D = 70$ mm).

Wenn beide Prismen in gegensätzlicher Richtung gedreht werden, so beträgt die Veränderung der Additionskonstante ($D = 35 \text{ mm}$):

$$\Delta B_{mm} = -7000 \operatorname{tg} \alpha \left(\frac{2-n}{n} - \frac{1}{2} \operatorname{tg} \alpha \right) \quad (19)$$

In Abb. 26 ist dies graphisch dargestellt.

Für die Abhängigkeit der Additionskonstante von der Stelle im Sehfeld gilt:

$$\Delta B_{mm} = 3500 \operatorname{tg}^2 \alpha \quad (20)$$

Am Rand des Sehfeldes ($\alpha = 10^{-2} \text{ rad.}$) beträgt dies $0,35 \text{ mm}$, und kann folglich gänzlich vernachlässigt werden.

Die für das Rhomboprisma entsprechenden Formeln erhalten wir durch den Unterschied zwischen Formeln 17 und 15, dies letztere jedoch bei einer Dicke gleich D .

$$d = -D \left\{ \cos \alpha - 1 + \frac{\sin \alpha \cos \alpha}{\sqrt{(n^2 - \sin^2 \alpha)}} \right\} \quad (21)$$

$$\Delta B_{mm} = 3500 \operatorname{tg} \left(\frac{1}{n} - \frac{1}{2} \operatorname{tg} \alpha \right) \quad (22)$$

In Abb. 27 ist ΔB gegen $\operatorname{tg} \alpha$ gestellt.

Abb. 29 zeigt die Abhängigkeit von ΔB von der Stelle der Ablesung im Sehfeld.

Zur Vergleichung ist in Abb. 28 die Wirkung einer gewöhnlichen Planplatte mit doppelter Dicke ($D = 70 \text{ mm}$) wiedergegeben.

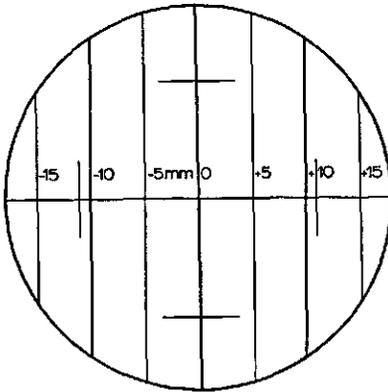


Abb. 29. Distanzfehler beim Rhomboprisma ($n = 1,5$) bei der Ablesung an verschiedenen Stellen des Sehfeldes.

2.4 Ausschaltung der Fehler durch eine neue Lattenteilung

Wie im Abschnitt 2.2 gezeigt wird, ist die Abweichung in der Distanz bei der Benützung eines gewöhnlichen Prismas sowie bei der Zweiteilung und Dreiteilung des Objektivs von der Stelle der Ablesung im Sehfeld abhängig. Wenn wir diese Abweichung eliminieren wollen, müssen wir ein solches System anwenden, wie es im

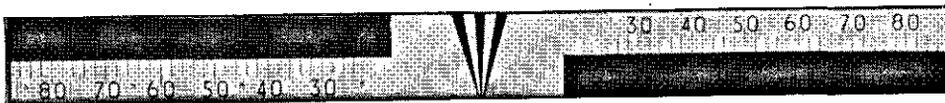


Abb. 30. Die symmetrische Latte.

Abschnitt 2.3.2 beschrieben ist oder müssen dafür sorgen, dass die Ablesung automatisch immer auf derselben Stelle des Sehfeldes erfolgen muss. Dies letztere kann durch die auf Abb. 30 angeführte Lattenteilung verwirklicht werden. Die Latte ist zur Mitte bezüglich symmetrisch geteilt. Auf Abb. 31 ist eine Aufnahme des Lattenbildes ersichtlich. Die beiden in entgegengesetzter Richtung laufenden Teilungen sind übereinander abgebildet, wobei der Punkt abgelesen werden kann in bezug auf den die abgebildeten Teilungen symmetrisch sind. Wenn der vertikale Faden mit der Zieltafel zusammenfällt, dann wird die Stelle der Ablesung immer auf $1/200$ rad. von diesem liegen. Wenn wir den horizontalen Faden zwischen beiden Teilungen durchlaufen lassen, dann ergibt sich stets dieselbe Stelle der Ablesung.

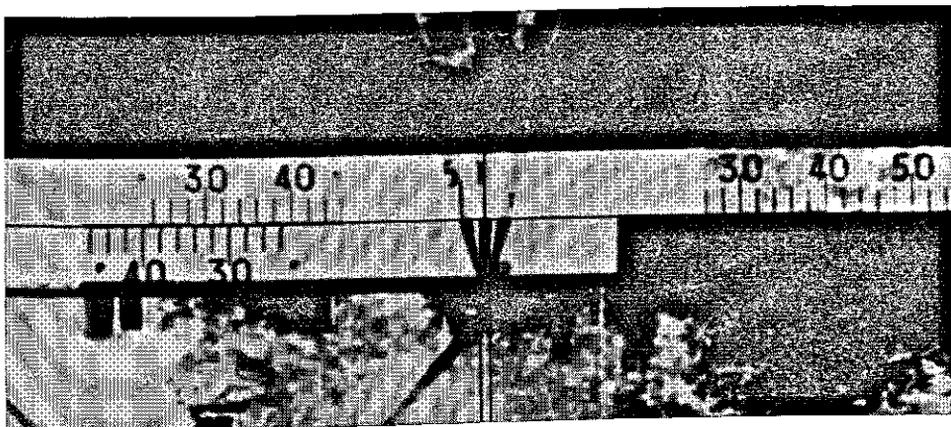


Abb. 31. Beispiel einer Aufnahme der symmetrischen Latte.

Die schwarzen Flächen auf der Latte dienen zur Verhütung von störenden Nebenbildern. Diese Flächen sind nicht auf die Latte gemalt, sondern bestehen aus Platten, die auf ungefähr 1 cm vor dem eigentlichen Lattenkörper liegen um die nachteiligen Einflüsse der Temperatur (und folglich der Sonnenstrahlung) zu verhüten.

Einen gleichen Lattentyp liessen wir mit einer logarithmischen Teilung (Abb. 32)



Abb. 32. Die symmetrische Latte mit einer logarithmischen Teilung.

Tabelle 7. Genauigkeit der Doppelbilddistanzmessung.

	Gemessen				Berechnet
	52	79	105	130	100
Distanz (m)	52	79	105	130	100
m.F. der Distanz (mm)	6,9	10,4	14,6	19,3	13,8

verfertigen. Dessen Vorteil ist, dass der Lattenintervall, welcher abgelesen werden muss, auf dem Bild immer gleich gross bleibt. Dies ist wichtig, wenn die Ablesung unter einem Messmikroskop automatisch erfolgen soll. Ein Nachteil ist, dass man nicht linear interpolieren darf oder, wenn man es doch tut, dass man dann eine Korrektur anbringen muss. Diese Korrektur ist jedoch sehr einfach und von der Distanz unabhängig.

Mit der linear-geteilten Latte haben wir eine Konstanten-Bestimmung ausgeführt und zwar auf vier Distanzen zwischen 50 und 130 m. Auf jeder Distanz wurden zehn Aufnahmen gemacht. Die Ergebnisse dieser Messung sind in Tabelle 7 angeführt.

2.5 Einfluss der Temperatur und des Luftdrucks

Obwohl der Einfluss der Temperatur und des Luftdrucks bei der Doppelbilddistanzmessung in der Literatur ausführlich behandelt wurde (Cremer, 1934), wollen wir uns mit diesem Problem hier doch befassen und zwar deshalb, um diesbezüglich einen richtigen Vergleich mit der Fadendistanzmessung machen zu können.

Wenn man den Einfluss der Temperatur und des Luftdrucks auf die Distanz ermitteln will, so muss man diesen in Grössen zum Ausdruck bringen, bei denen der Einfluss von t und p bekannt ist.

Ausgehend von der Formel $L = Ay + B$ schreiben wir für $A = \cotg\gamma \approx 1/\gamma = 1/\{(n - 1)\epsilon\}$. Für die Brechungszahl müssen wir schreiben $n = n_{\text{Glas}}/n_{\text{Luft}}$. Die Veränderung der Additionskonstante in Abhängigkeit von der Temperatur kann vernachlässigt werden.

Die Ablesung wird kleiner, wenn die Latte sich durch Wärme ausdehnt. Man kann auch sagen, dass die Masseinheit der Latte grösser wird. Um dies mit einer Formel zum Ausdruck zu bringen, teilen wir die Ablesung y auf der Latte durch die Längeneinheit (b) der Latte. Wir erhalten so:

$$L = \frac{1}{\epsilon \left(\frac{n_{\text{Glas}}}{n_{\text{Luft}}} - 1 \right)} \cdot \frac{y}{b} \quad (23)$$

$$L = \frac{1}{\epsilon} \cdot \frac{n_{\text{Luft}}}{n_{\text{Glas}} - n_{\text{Luft}}} \cdot \frac{y}{b} \quad (24)$$

Wir differenzieren nach t :

$$\frac{dL}{dt} = \frac{y}{\varepsilon} \left\{ \frac{n_{G1}}{(n_{G1} - n_L)^2} \cdot \frac{1}{b} \cdot \frac{dn_L}{dt} - \frac{n_L}{(n_{G1} - n_L)^2} \cdot \frac{1}{b} \cdot \frac{dn_{G1}}{dt} - \frac{n_L}{n_{G1} - n_L} \cdot \frac{1}{b^2} \cdot \frac{db}{dt} \right\} \quad (25)$$

$$= L \left(\frac{n_{G1}}{n_{G1} - n_L} \cdot \frac{1}{n_L} \cdot \frac{dn_L}{dt} - \frac{1}{n_{G1} - n_L} \cdot \frac{dn_{G1}}{dt} - \frac{1}{b} \cdot \frac{db}{dt} \right) \quad (26)$$

Wenn wir als Annäherung für die Brechungszahl des Glases 1,5 und für die Luft 1,0 eintragen ($b = 1$), so geht Formel 26 über in:

$$\frac{dL}{dt} = L \left\{ 3 \frac{dn_L}{dt} - 2 \frac{dn_{G1}}{dt} - \frac{db}{dt} \right\} \quad (27)$$

Für den Einfluss der Temperatur und auch des Luftdrucks auf die Brechungszahl der Luft benützen wir die Formel von Beer (Gehrke, 1927):

$$n_{t,p} - 1 = (n_{0,76} - 1) \frac{p}{76} \cdot \frac{1}{1 + \alpha t} \quad (28)$$

(α ist der Ausdehnungskoeffizient von Gasse).

Die Veränderungen in der Brechungszahl des Glases bei 1° Temperaturerhöhung bezeichnen wir mit Δn_{G1} , folglich:

$$\Delta n_{G1} = \frac{dn_{G1}}{dt} \quad (dt = 1^\circ)$$

Der Ausdehnungskoeffizient des Lattenmaterials ist λ , folglich verändert sich jetzt Formel 27 in:

$$\Delta L = L_{0,76} \left\{ 3(n_{0,76} - 1) \left(\frac{p}{76} \cdot \frac{1}{1 + \alpha t} - 1 \right) - 2\Delta n_{G1} \cdot t - \lambda t \right\} \quad (29)$$

Um diese Formel durchsichtiger zu gestalten, benützen wir als Einheit für den Luftdruck nicht Zentimeter Quicksilber, sondern Bar. Die Abweichung des Luftdruck in bezug auf 1 Bar bezeichnen wir mit Δp und als Ausgangspunkt nehmen wir auch 1 Bar.

Für $(n_{0,1} - 1)$ schreiben wir $1/3 \times 10^{-3}$. So erhalten wir:

$$\Delta L = L_{0,1} \left(10^{-3} \cdot \frac{\Delta p - \alpha t}{1 + \alpha t} - 2\Delta n_G \cdot t - \lambda t \right) \quad (30)$$

Bei der Anwendung dieser Formel ergeben sich zwei Schwierigkeiten und zwar die erste beim Faktor Δn_{G1} , die zweite bei der Temperatur. Der Faktor Δn_{G1} ist nicht nur von Glasart zu Glasart, jedoch auch von Schmelze zu Schmelze verschieden. Dieser Faktor ist folglich nicht im vornhinein bestimmt und kann nur experimentell bestimmt werden. Hierbei ergibt sich jedoch noch das Problem, dass das Prisma nicht einfach, sondern wegen dem Achromatismus aus zwei Komponenten zusammengesetzt ist. Tabelle 8 gibt eine Übersicht von Δn_{G1} für verschiedene Kombinationen und den Einfluss auf die Distanzmessung bei einem Δt von 20°C.

Die zweite Schwierigkeit ist durch die Annahme von gleichen Temperaturen für

Tabelle 8. Temperatureinfluss auf die Brechzahl für verschiedene Glassorten sowie auf die Distanz (nach Cremer, 1934).

Kron	n_D	$\Delta n_D \cdot 10^5$	Flint	n_D	$\Delta n_D \cdot 10^5$	$\Delta L(\text{mm/hm})/20^\circ$
S 40	1.5619	-0.194	S 57	1.9625	+1.588	+23.8
S 40	1.5619	-0.194	O 544	1.6130	+0.397	+23.0
S 40	1.5619	-0.194	O 658	1.5452	+0.408	+74.8
S 40	1.5619	-0.194	O 165	1.7545	+0.906	+29.0
S 40	1.5619	-0.194	O 154	1.5710	+0.372	+44.2
S 40	1.5619	-0.194	O 527	1.5718	+0.125	+42.7
O 1022	1.5173	+0.004	S 57	1.9625	+1.588	+15.8
O 1022	1.5173	+0.004	O 544	1.6130	+0.397	+20.4
O 1022	1.5173	+0.004	O 658	1.5452	+0.408	+75.2
O 1022	1.5173	+0.004	O 165	1.7545	+0.906	+20.2
O 1022	1.5173	+0.004	O 154	1.5710	+0.372	+32.3
O 1022	1.5173	+0.004	O 527	1.5718	+0.125	+22.1
O 211	1.5727	+0.151	O 527	1.5718	+0.125	-12.3

die Luft, das Instrument und die Latte verursacht. Diese Annahme wird bei bewölktem Himmel wohl richtig sein, bei Sonnenschein jedoch nicht, so insbesondere bei Instrumenten mit einem Vorsatzprisma, wobei die Latte normalerweise mit einem schwarzen Untergrund mit weissen Streifen versehen ist. Die Temperatur einer solchen Latte kann bis 20° höher sein, wie die Lufttemperatur.

Der gesamte Temperatur-Intervall kann in unserem Land auf 40° gesetzt werden. Wenn wir jedoch die Polygone durch das Einsetzen einer Massstabzahl ausgleichen dann müssen wir nur den Temperaturverlauf während der Messung eines Polygons berücksichtigen. Dieser Temperatur-Verlauf ist sicher geringer als 40° und zwar an sonnigen Tagen 10° bis 15° und bei bewölkten Himmel noch geringer. Die Praxis berücksichtigt deshalb weder die Temperatur noch den Luftdruck, sondern betrachtet deren Einfluss als einen Teil der zufälligen Fehler.

2.6 Schlussfolgerungen über die Doppelbildstanzmessung

Wie es im Abschnitt 2.1 beschrieben ist, war der Zweck unserer Untersuchung die Bestimmung jener Fehler, die bei der Doppelbildstanzmessung vorkommen können, um für diese Korrekturen einzusetzen oder um solche Systeme zu entwickeln, welche keine Fehler ergeben. Die Ergebnisse der Untersuchung können wie folgt zusammengefasst werden:

1. Die persönlichen Fehler spielen nur eine untergeordnete Rolle. Diese Fehler fallen gänzlich weg, wenn das Polygon durch dem Einsatz einer Massstabzahl ausgeglichen wird.
2. Das Einsetzen von Korrekturen für die Fehler des Prismas ist zwar möglich,

kann jedoch bei der Automatisierung nicht empfohlen werden.

3. Es ist besser das Prisma im Stand der Minimalablenkung vor das Objektiv zu setzen als von der Möglichkeit Gebrauch zu machen durch Drehung des Prismas eine Multiplikationskonstante von präzis 100 zu erhalten. Die hierdurch erforderlich gewordenen Korrekturen können leicht in das Rechenschema eingeführt werden.
4. Die für die Zweiteilung des Prismas erforderlichen Korrekturen, können – vor allem bei Fernrohren mit einer Fokussierlinse – nur durch die empirische Bestimmung bei einer grossen Anzahl von Distanzen erhalten werden. Übrigens gilt auch für diese Korrekturen, dass ihre Anwendung nicht zweckmässig ist.
5. Systeme, bei welchen die Ablenkung durch Spiegelungen gebildet wird, haben solche nachteilige Begleiterscheinungen, dass sie keine wirkliche Lösung bieten.
6. Die zur Mitte symmetrisch geteilte Latte ist für die Doppelbilddistanzmessung die einzige praktische Lösung. Diese Latte ist nur verwendbar bei fotografischer Distanzmessung.
7. Bei nicht allzu extremen Witterungsverhältnissen ist es richtig, wenn man die Fehler, welche sich durch die Temperatur und den Luftdruck ergeben, als zufällige Fehler betrachtet.
8. Die Genauigkeit der Doppelbilddistanzmessung kann mit der Gleichung: $m_L = 1,5 L$ dargestellt werden, wobei m_L in Zentimetern und L in Hektometern zum Ausdruck gebracht sind. Diese Genauigkeit gilt nur bei der Konstantenbestimmung unter günstigen Verhältnisse.
9. Die Bildfehler des Prismas bilden ein Nachteil für die fotografische Doppelbilddistanzmessung.

3 Fadendistanzmessung

Beim Fadendistanzmesser sind in die Ebene des Fadenkreuzes noch zwei Distanzfäden angebracht, entweder lotrecht zum horizontalen Faden oder lotrecht zum vertikalen Faden. Die gegenseitige Entfernung p zwischen diesen zwei Distanzfäden ist der hundertste Teil der Brennweite f_{Ob} des Objektivs. Die Latte wird in der Ebene des Fadenkreuzes abgebildet und es kann in der Ebene des Fadenkreuzes mit den Distanzfäden die Ablesung y auf der Latte erfolgen.

Um den Zusammenhang zwischen der Distanz L und der Ablesung y zu finden, wird gewöhnlich eine Abbildung wie Abb. 33 benützt. Die gesuchte Distanz ist:

$$L = \frac{f_{Ob}}{p} \cdot y + B = Ay + B \quad (31)$$

Ebenso wie bei der Doppelbilddistanzmessung wird mit A die Multiplikationskonstante und mit B die Additionskonstante bezeichnet. Die letztere ist gleich mit der Distanz vom Aussenbrennpunkt des Objektivs zur zweiten Achse des Theodolits. Der Aussenbrennpunkt, von dem ein homogener linearer Zusammenhang zwischen Distanz und Ablesung besteht, wird anallaktischer Punkt genannt.

Auf Abb. 34 sind die Hauptstrahlen wiedergegeben. Diese Abbildung zeigt folglich den wirklichen Strahlenlauf. Der Zusammenhang zwischen Distanz und Ablesung wird wie folgt gefunden:

$$x : y = b : p \quad (32)$$

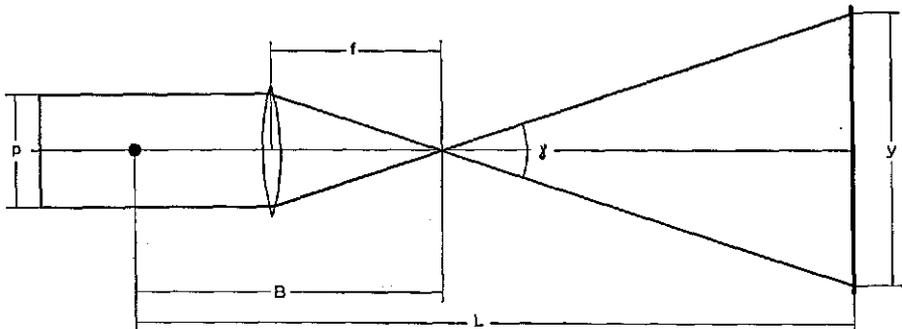


Abb. 33. $L = (f_{ob}/p) y + B$.

Hierbei ist x die Distanz zwischen Latte und Objektiv und b die Distanz vom Lattenbild (der Fadenkreuzebene) zum Objektiv. Der Zusammenhang zwischen diesen beiden ist:

$$\frac{1}{x} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f_{Ob}} \quad (33)$$

Dies eingetragen in Formel 32 ergibt:

$$x - f_{Ob} = Ay \quad (34)$$

und da $L = x - f_{Ob} + B$ ist, kommt man auch hier zur Formel 31.

Obenstehende Ableitung gilt für ein Fernrohr mit Ausziehhokular. Bei einem Fernrohr mit Fokussierlinse ist der Zusammenhang zwischen Distanz und Ablesung quadratisch (Roelofs, 1941) und zwar der folgende:

$$f_i \cdot x^2 + f_o(d - f_o - 2f_i) \cdot x \cdot y \cdot p^{-1} + f_o^2 \cdot f_i \cdot y^2 \cdot p^{-2} - 2f_o \cdot f_i \cdot x + f_o^2(2f_i - d) \cdot y \cdot p^{-1} + f_o^2 \cdot f_i = 0 \quad (35)$$

Hierin bedeutet d die feste Distanz zwischen Objektiv und Fadenkreuzebene, f_o die Brennweite des positiven Gliedes des Objektivsystems und f_i die Brennweite der Fokussierlinse. Die Bedeutung der übrigen Buchstaben wurde schon beim Fernrohr mit Ausziehhokular angegeben.

Da hier kein linearer Zusammenhang zwischen Distanz und Ablesung besteht, kann hier nicht mehr von einem anallaktischen Punkt die Sprache sein. Bei nicht zu geringen Distanzen und wenn keine allzu grosse Genauigkeit gefordert wird, erfolgt die Annäherung der Formel 35 durch einen linearen Zusammenhang, wie er in Formel 31 angegeben ist. Als Brennweite des Objektivs muss die Brennweite des Objektivs und der Fokussierlinse zusammen genommen werden, wenn das Fernrohr auf unendlich eingestellt ist. Die Additionskonstante kann meistens als gleich Null genommen werden.

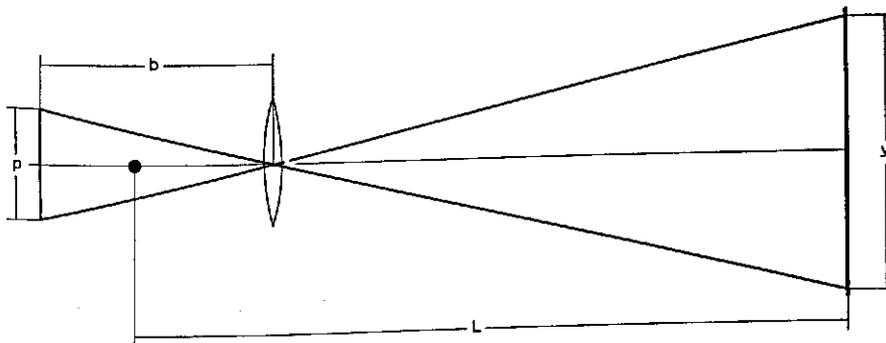


Abb. 34. Die Hauptstrahlen bei der Fadendistanzmessung.

3.1 Ergebnisse der ersten Versuche

Das Instrument, welches wir ursprünglich für die Untersuchung der Doppelbild-distanzmessung benützt haben (Wild T2 Nr. 40190) enthält auch Fäden für die Distanzmessung mit einer horizontalen Latte. Als wir aus einem Bild hiermit die Distanz ausgemessen hatten, zeigte es sich, dass die Ablesegenauigkeit auf die Distanz umgerechnet 8 mm pro 100 m betrug (mittlerer Fehler in der Ausmessung des Bildes war $2 \mu\text{m}$).

Dieses Ergebnis war dermassen ermutigend, dass sich von selbst die Frage aufgedrungen hatte, ob die Fadendistanzmessung für die durch Fotografie erfolgte Automatisierung nicht geeigneter wäre, als die Doppelbilddistanzmessung.

Zuerst haben wir noch einige summarische Versuche vorgenommen. Die Latte wurde in einer Entfernung von 90 m zum Instrument aufgestellt und zwar so, dass sie auf eine Distanz von einem halben Meter verschoben werden konnte. Auf 5 Distanzen wurden stets zwei Aufnahmen gemacht. Das Ergebnis war:

mittlerer Fehler in der Ausmessung des einzelnen Bildes	$m_m = 2 \mu\text{m}$
mittlerer Fehler in der Ablesung des einzelnen Bildes	$m_a = 7 \text{ mm}$
mittlerer Fehler in der Distanz des einzelnen Bildes	$m_x = 37 \text{ mm}$
mittlerer Fehler im Mittel von zwei Bildern	$m_{\bar{x}} = 17 \text{ mm}$

Die zwei letzteren Zahlen stimmen miteinander nicht überein. Die letzte Zahl muss $\frac{1}{2}\sqrt{2}$ mal die vorletzte Zahl sein. Sie ist jedoch kleiner, so dass durch Anwendung eines Mittelwertes gewisse Fehler offenbar eliminiert werden.

Die Ergebnisse der Bilder auf 172 m waren: $m_m = 4,3 \mu\text{m}$ (sehr schlechte Aufnahmen), $m_a = 23 \text{ mm}$ und $m_{\bar{x}} = 47 \text{ mm}$. Noch einige Ergebnisse eines Versuchs auf 109 m mit drei Bildern pro Distanz und sechs Distanzen waren: $m_m = 2 \mu\text{m}$: $m_a = 8 \text{ mm}$ und $m_{\bar{x}} = 18 \text{ mm}$. Die letzte Zahl ist der mittlere Fehler eines Mittels von drei Bildern. Auf Grund dieser Ergebnisse schien es uns gerechtfertigt unsere Untersuchung auf die Fadendistanzmessung auszubreiten.

Als das Versuchsinstrument – von uns Polyphot genannt (siehe Anhang) – fertig war, haben wir eine Bestimmung der Konstanten vorgenommen. Die Beobachtungen

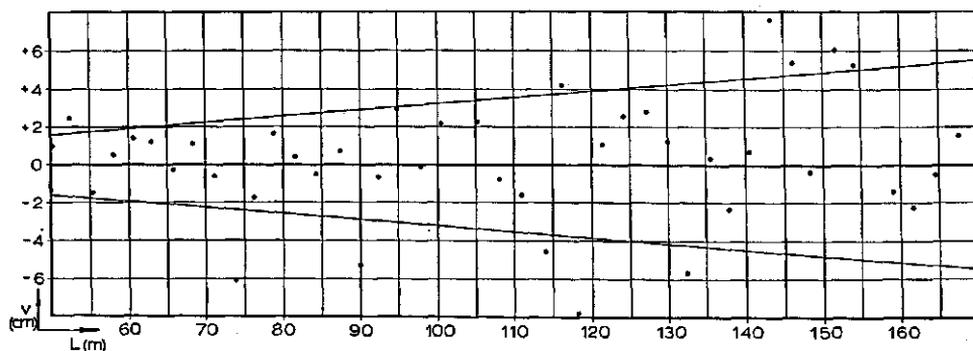


Abb. 35. Genauigkeit der Fadendistanzmessung mit dem Versuchsinstrument (Polyphot).

erstreckten sich auf 45 Distanzen zwischen 48 und 168 m. Die Lattenaufstellungen lagen in Entfernungen von 2,6 bis 2,7 m voneinander. Nach einer Ausglei- chung zeigte es sich, dass die Genauigkeit auf 100 m 3,2 cm betrug (Abb. 35). Die Ursache dieses ungünstigen Ergebnisses war nach unserer Meinung die Parallaxe, richtiger gesagt die Fokussierung.

3.2 Die Fokussierung

Im Gegensatz zur Annahme von vielen anderen Forschern ist nach der Ablesung die Fokussierung *jener* Faktor, der die Genauigkeit der Distanzmessung bestimmt. In der Literatur wird das Problem der Fokussierung meistens mit einer oder mit zwei der folgenden Behauptungen abgetan:

1. Wenn man mit dem beweglichen Auge keine Parallaxe mehr beobachtet, ist die Fokussierung in Ordnung.
2. Wenn die optische Achse des Auges mit der optischen Achse des Fernrohrs zusammenfällt, hat eine fehlerhafte Fokussierung keinen Einfluss. Diese zweite Behauptung wird oft noch durch die folgende Empfehlung vereinfacht: das Auge muss in der optischen Achse des Fernrohrs stillstehend gehalten werden.

Wir wollen nun den Wert beider Behauptungen einer Prüfung unterziehen. Zu allererst die Parallaxe des beweglichen Auges. Diese wird durch die Entfernung zweier Objekte – des Fadenkreuzes und des Lattenbildes – sowie durch die Grösse der Bewegung des Auges bestimmt. Diese letztere hängt zusammen mit den Diametern der Augenpupille und der Austrittspupille des Fernrohrs (normalerweise folglich 2 bis 3 mm). Wenn die Bewegung des Auges grösser ist, so deckt die Austrittspupille nicht mehr die Augenpupille, so dass sich die Helle des Bildes schnell auf Null verringert.

Aus Abb. 42 kann man ableiten, dass man mit einem beweglichen Auge feststellen kann, ob die Fokussierung zwischen den Punkten A und C liegt; zwischen den zwei Punkten liegt aber noch ein Bereich, über welches das bewegliche Auge keinen Aufschluss gibt.

Die zweite Behauptung ist auf den mittleren Faden bezogen richtig und ist folglich für das Nivellieren und Zielen mit einem Theodolit gültig. Der Winkel jedoch, unter dem man beide Distanzfäden sieht, ist gleich mit dem Quotient der Vergrösserung und der Multiplikationskonstante und ist folglich im allgemeinen zu einem Viertel oder Drittel radial (in Graden ausgedrückt: zwischen 15° und 20°). Man kann folglich beide Distanzfäden niemals zugleich scharf beobachten. Das Sehfeld des Auges beträgt nämlich für das scharfe Beobachten weniger als 1 Grad (dieses Mass kann aus der Grösse des gelben Flecks abgeleitet werden).

Um beide Fäden ablesen zu können, muss man folglich das Auge und teilweise selbst den Kopf bewegen. Die Empfehlung, dass man das Auge stillhalten soll, hat denselben Wert, wie die Empfehlung eines Arztes an seinen Patienten zur Verhütung der Grippe nicht mehr zu atmen.

Wenn man mit dem beweglichen Auge keine Parallaxe mehr beobachtet, ist diese doch noch vorhanden. Den Teil, der nicht mehr beobachtet werden kann, nennt man

die Parallaxe des stillstehenden Auges. Hierbei ergeben sich drei Fragen:

- a. Wie gross ist diese Parallaxe und was ist ihre Ursache?
- b. Welchen Einfluss hat sie auf die Genauigkeit der Distanzmessung?
- c. Wie kann dieser Einfluss eingeschränkt oder selbst behoben werden?

3.2.1 Die Genauigkeit der Fokussierung

Wenn man versucht in der Literatur einen Aufschluss über die Grösse der Parallaxe zu erhalten, so findet man in der geodätischen Literatur nur einen einzigen sehr kurzgefassten Versuch (Jordan *et al.*, 1914), auf welchen gestützt im weiteren der Einfluss der Parallaxe vielfach erörtert wird oder man findet theoretische Formeln.

In der optischen Literatur kommt dieses Problem nicht zur Sprache. Die Frage ist nämlich: wie genau kann man mit dem Auge bestimmen, ob sich zwei Objekte in derselben Entfernung befinden. In der physiologischen Optik wird zwar die Genauigkeit behandelt, mit der das blosse Auge bestimmen kann, ob sich zwei Objekte voneinander in verschiedener Entfernung befinden. Zwischen beiden Problemen muss theoretisch ein Zusammenhang bestehen, in Anbetracht des stochistischen Charakters der Grenzen, die so von einem verschiedenen Ausgangspunkt bestimmt werden, kann der Zusammenhang wahrscheinlich nur experimentell festgestellt werden.

Das Fokussieren eines Fernrohrs bedeutet, dass man das durch das Objektiv geformte Bild mit dem Fadenkreuz zusammenfallen lässt. Das Auge wird folglich durch das Fadenkreuz fixiert und wenn sich das Bild scharf abhebt, so ist die Fokussierung in Ordnung. Die fehlerhafte Fokussierung beurteilt man auf Grund der Unschärfe des Bildes. Dies kann auf verschiedenen Weise erfolgen. Wenn sehr feine Einzelheiten vorhanden sind, so gehen diese, bei einer nicht vollkommen richtigen Fokussierung, verloren. Bei grösseren Objekten, wie bei Lattenstreifen, konstatiert man die Unschärfe dadurch, dass der Kontrast von Weiss auf Schwarz nicht mehr sprunghaft, sondern nur allmählich übergeht. Dieser allmähliche Übergang muss auf der Netzhaut eine bestimmte Breite haben um beobachtet werden zu können. Aus Beobachtungen zeigte es sich, dass die Belichtung nur dann einen Einfluss hat, wenn das Objekt stark unter- oder überbelichtet ist. Man verfügt über einen ziemlich grossen Spielraum in der Lichtstärke, bevor diese eine Rolle spielen würde.

Wenn wir die Breite auf der Netzhaut mit a bezeichnen, können wir folgende Formeln ableiten* (Abb. 36):

$$dx' = a \cdot \frac{f'_{\text{Auge}}}{\varnothing \text{ UP}} \quad (36)$$

$$dx = \frac{f_{\text{Auge}} f'_{\text{Auge}}}{dx'} = \frac{\varnothing \text{ UP} \cdot f_{\text{Auge}}}{a} \quad (37)$$

Wenn wir davon ausgehen, dass die Beobachtungen mit einem nicht-akkommodiertem

* Austrittspupille ist abgekürzt: UP. Augenpupille ist abgekürzt: OP.

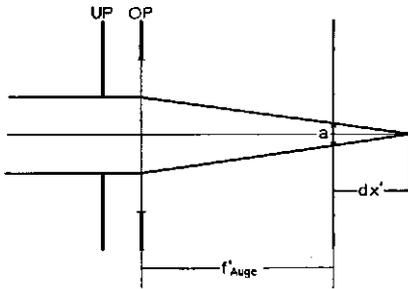


Abb. 36. Zusammenhang von dx' , a , f'_{Auge} und der Austrittspupille.

Auge vorgenommen werden, dann steht das Fadenkreuz in der Brennebene des Okulars. Wenn wir die Distanz zwischen dieser Brennebene und dem durch das Okular geformten Bild mit db bezeichnen, so erhalten wir:

$$db = \frac{f_{\text{Ok}}^2}{dx} = \frac{a}{f_{\text{Auge}}} \cdot \frac{f_{\text{Ok}}^2}{\varnothing \text{UP}} \quad (38)$$

Wenn wir auf den mittleren Fehler übergehen, so wird aus Formel 38:

$$m_b = \frac{m_a}{f_{\text{Auge}}} \cdot \frac{f_{\text{Ok}}^2}{\varnothing \text{UP}} \quad (39)$$

Wenn $m_a/f_{\text{Auge}} = c$ ist, dann ergibt sich die Formel:

$$m_b = c \cdot \frac{f_{\text{Ok}}^2}{\varnothing \text{UP}} \quad (40)$$

Um diese Formel zu überprüfen und zugleich den Faktor c zu bestimmen, haben wir die Genauigkeit der Fokussierung bei einem Fernrohr bestimmt, in das verschiedene Objektive und Okulare eingesetzt werden konnten, während zugleich auch die Eintrittspupille geregelt werden konnte. Die Verschiebung der Fadenkreuzebene zum Objektiv wurde mittels einer Messuhr in hundertsten Millimetern abgelesen. Die Brennweite der Objektiv betrug 105, 180 und 300 mm, sie waren von demselben Fabrikat und Typ, so dass angenommen werden konnte, dass auch die optischen Fehler dieselben sind. Leider hatten wir nur zwei Okulare desselben Typs mit Brennweiten von 9,3 und 10,6 mm. Für jede Objektiv-Okular-Kombination (folglich für jede Vergrößerung) hatten wir ein Objekt von solcher Grösse, dass für das Auge diese Objekte durch das Fernrohr gesehen gleich gross waren. Die Versuche wurden im Keller unseres Institutes vorgenommen, da wir hier die Belichtung vollkommen regeln konnten. Zugleich haben wir dafür gesorgt, dass die absolute Helle bei sämtlichen Kombinationen dieselbe war. Durch Abblenden des Objektivs konnte die Austrittspupille geändert werden, ohne die Vergrößerung zu verändern. In Tabelle 9 sind die Kombinationen von Objektiv, Okular und Austrittspupille, sowie die Ergebnisse der Messungen angegeben. Die Messungen sind gemacht worden von zwei Beobachtern. Für jede Kombination wurde von beiden Beobachtern zweimal fünfzig Mal fokussiert.

Tabelle 9. Mittlerer Fehler der Fokussierung (m_b) für verschiedene Kombinationen des Objektivs, des Okulars und der Austrittspupille.

	$f_{Ob}(mm)$	$f_{Ok}(mm)$	UP(mm)	Beobachter A			Beobachter B		
				$m_b(\mu m)$	$c \times 10^6$		$m_b(\mu m)$	$c \times 10^6$	
1	300	9,3	1,04	85	69	916	59	42	595
2			,52	137	173	922	99	99	589
3		10,6	1,18	89	93	952	54	59	586
4			,59	167	167	873	126	116	633
5			,30	412	281	907	290	388	888 ¹
6	180	9,3	1,04	69	82	904	49	47	583
7			,52	142	141	845	88	105	571
8		10,6	1,18	89	85	910	58	51	575
9			,59	172	200	973	114	95	544
10			,30	390	310	917	409	329	862 ¹
11	105	9,3	1,76	47	48	949	31		626
12			1,04	68	72	821	53	57	655
13			,52	167	180	1029	169	149	946 ¹
14		10,6	1,18	90	79	889	66	60	659
15			,59	188	182	915	137	106	638
Mittelwert									
						915 ± 13			604 ± 10

¹ Diese Werte sind wahrscheinlich wegen der Strahlenbeugung so hoch; bei der Bestimmung des Mittelwertes von c wurden sie nicht einbezogen.

Aus den Beobachtungen ergab sich, dass wir in die Formel $m_b = c f_{Ok}^2 / \varnothing UP$ für c für den Beobachter A $(915 \pm 13) \times 10^{-6}$ und für den Beobachter B $(604 \pm 10) \times 10^{-6}$ eintragen können.

3.2.2. Einfluss der Fehlfokussierung auf die Distanzmessung

Bei der Berechnung des Einflusses einer unrichtigen Fokussierung auf die Distanz bei einem Fernrohr mit Ausziehokular können wir von der Abb. 34 ausgehen:

$$\frac{m_L}{L} \approx \frac{m_x}{x} = \frac{m_b}{b} \quad (41)$$

Für m_b können wir schreiben:

$$m_b = c \frac{f_{Ok}^2}{\varnothing UP}$$

Dies eintragen:

$$\frac{m_L}{L} \approx c \frac{f_{Ok}^2}{b \cdot \varnothing UP} \approx c \frac{f_{Ok}}{\varnothing EP} = c \frac{f_{Ob}}{V \cdot \varnothing EP} \quad (42)$$

Die letzte Formel zeigt uns, dass der mittlere Distanzfehler umgekehrt proportional mit der Vergrößerung und mit dem Diameter der Eintrittspupille ist.

Die normalen Fernrohre für die Vermessungskunde sind mit einer Vergrößerung von 25 bis 30 ×, einer Eintrittspupille mit einem Diameter von 30 bis 35 mm und einer Brennweite des Objektivs, die zwischen 200 und 300 mm liegt, versehen (bei einer Brennweite des Okulars zwischen 8 und 10 mm), so dass wir einen mittleren Distanzfehler von 3 bis 4 cm auf 100 m erwarten können.

Bei einem Fernrohr mit Fokussierlinse ist der Zusammenhang zwischen der Fehlfokussierung und der Genauigkeit der Distanz nicht so einfach, da hier nicht der Stand des Fadenkreuzes, sondern der Fokussierlinse fehlerhaft ist. Als Ausgangspunkt für die theoretische Betrachtung können die durch Roelofs (1941) und Uhink (1932) abgeleiteten Formeln dienen:

$$e^2(x - f_o) + e\{d \cdot f_o - x(d + f_o)\} - d \cdot f_o \cdot f_i + x(d \cdot f_i + d \cdot f_o - f_o \cdot f_i) = 0 \quad (43)$$

und:

$$p \cdot f_i \cdot x - y(e^2 - d \cdot e + d \cdot f_i) = 0 \quad (44)$$

In diesen Formeln bedeutet e die Distanz zwischen der Fokussierlinse und dem Objektiv, während für die übrigen Größen die für die Formeln 31 und 35 gegebenen Erklärungen gültig sind.

Die Formel 43 gebrauchen wir um den Zusammenhang zwischen den Abweichungen von e und d anzugeben (wir schreiben δe und δd um Verwechslungen zu verhüten). Den Zusammenhang gibt nach einigen Umformungen:

$$\delta d = \left\{ 1 - \left(\frac{f_i}{\Delta} \right)^2 \right\} \delta e \quad (45)$$

Hierin ist $\Delta = f_o + f_i - e$.

Aus der Formel 44 ergibt sich der Zusammenhang zwischen dx und δe :

$$dx = \frac{y(2e - d)}{p \cdot f_i} \cdot \delta e \quad (46)$$

oder:

$$\frac{dL}{L} \approx \frac{dx}{x} = \frac{2e - d}{e^2 - d \cdot e + d \cdot f_i} \delta e \quad (47)$$

Tabelle 10. Faktor $(2e - d)/(e^2 - de + df_i)$ als Funktion der Distanz L bei einem Fernrohr mit $f_\infty = 270$ mm, $f_o = 180$ mm, $f_i = -144$ mm, $d = 204$ mm (nach Uhink, 1932).

$L(\text{m})$	Faktor $\times 10^5 (\text{mm}^{-1})$
∞	-154
100	-157
50	-161
20	-170
10	-188
5	-225

Da e von der Distanz abhängig ist folgt hieraus, dass der relative Distanzfehler auch von der Distanz abhängig ist. Tabelle 10 gibt uns hierzu ein Beispiel.

3.2.3 Die richtige Fokussierung und die Ausschaltung des Einflusses der Fehlfokussierung

Um den Einfluss der Fehlfokussierung auf die Genauigkeit der Distanz auszuschalten, können wir zwei Methoden wählen und zwar müssen wir entweder dafür sorgen, dass die Fokussierung vollkommen richtig sei oder wir müssen ein solches optisches System wählen, bei dem eine fehlerhafte Fokussierung keine Auswirkung hat. Als Beispiel für den letzteren Fall kann die Formel 47 dienen. Wenn nämlich $2e = d$ ist, dann sehen wir, dass $dL = 0$ wird; dies gilt jedoch nur für eine bestimmte Distanz und ist demzufolge keine allgemeine Lösung. Ein einfaches Mittel um den Einfluss der Fokussierung einzuschränken ist natürlich die Wiederholung. Man muss dann nicht einmal fokussieren und die Ablesung fünfmal wiederholen, sondern fokussiert fünfmal und liest bei jeder Fokussierung einmal ab. Siehe hierzu Tabelle 16.

Bei den in der erwähnten Tabelle angeführten Messungen haben wir noch eine andere Methode angewendet. Wir hatten nämlich ein Instrument, bei dem die Stelle der Fokussierlinse, folglich der Fokussierung, abgelesen werden konnte. Man führt nun viele, z.B. 50 Fokussierungen aus und stellt die Fokussierlinse auf deren Mittel ein. Noch eine weitere Möglichkeit ist eine Tabelle zusammenzustellen, welche den Zusammenhang zwischen der Distanz und der Stelle der Fokussierlinse angibt. Die für diese Tabelle erforderlichen Messungen können im Laboratorium, folglich unter günstigen Bedingungen, ausgeführt werden. In Tabelle 11 ist ein Beispiel für Wild N-3 Nr. 16233 gegeben. Die Werte von e' sind bestimmt worden als Mittel von fünfzig Fokussierungen. Wenn man so eine Tabelle in der Praxis anwenden will, muss man zuerst die Distanz ablesen, worauf man anhand der Tabelle die Fokussierlinse ein-

Tabelle 11. Einstellung der Fokussierlinse für verschiedene Distanzen bei dem Fernrohr von Wild N3.

x (m)	e' (mm)	L (m)	e (mm)	L (m)	e (mm)
3,02	55,37	30	76,83	50	77,61
3,31	57,90	32	76,95	60	77,80
3,59	59,86	34	77,06	70	77,94
4,16	62,88	36	77,15	80	78,04
4,72	65,07	38	77,24	90	78,12
5,62	67,49	40	77,32	100	78,19
6,48	69,11	42	77,39	150	78,38
8,23	71,29	44	77,45	200	78,48
10,83	73,16	46	77,51	500	78,65
16,02	75,02	48	77,56	1000	78,70
33,32	76,96	50	77,61	∞	78,76

x = Distanz zum Objektiv. L = Distanz zur Horizontalachse. e' ist gemessen. e ist berechnet.

stellen und danach die genaue Messung vornehmen kann.

Eine andere, von Kruidhof stammende, Lösung ist die Tabelle in ein Diagramm zu verarbeiten, das in die Ebene des Fadenkreuzes gebracht und von der Fokussierung mechanisch gesteuert wird. Auf der Latte müssen dann zwei Messmarken angebracht werden. Man lässt das Diagramm mit den zwei Messmarken, mit Hilfe des Knopfes für die Fokussierung, zusammenfallen, wodurch die Fokussierung automatisch richtig ist. In Abb. 37 ist das Diagramm veranschaulicht.

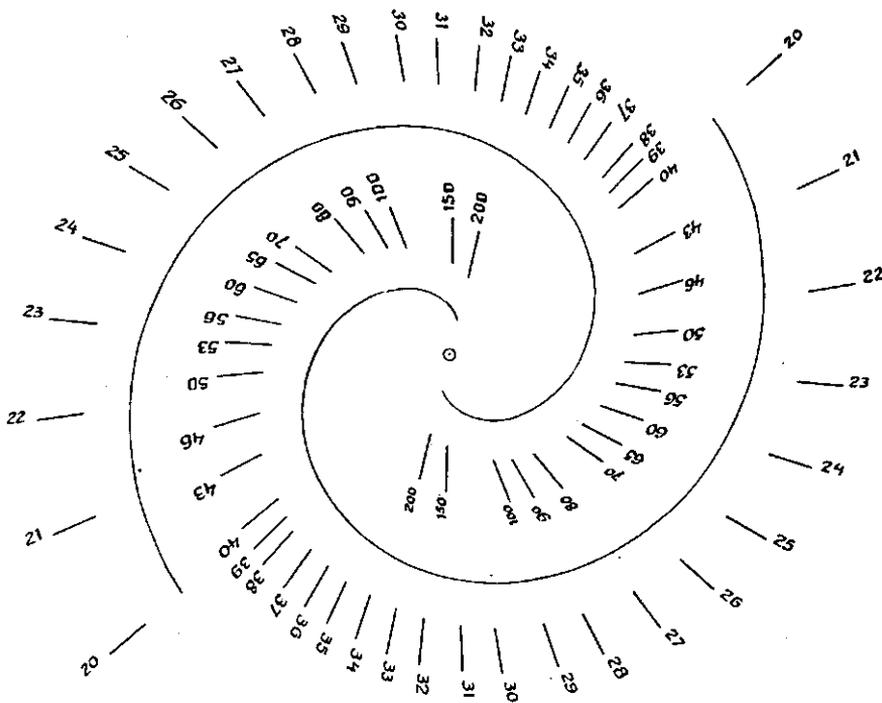


Abb. 37. Diagramm für die automatische Fokussierung.

Von den erwähnten vier Lösungen ist die erste nur für visuelle Beobachtungen anwendbar, während die zweite und dritte Lösung wahrscheinlich nur von theoretischen Wert sind. Die vierte Lösung erfordert ein komplizierteres Instrument wobei das Lattenbild wegen dem Diagramm weniger übersichtlich wird.

Wenn wir den Einfluss der Fehlfokussierung ausschalten wollen, können wir hierzu jene Strahlen wählen, die trotz der fehlerhaften Stelle des Bildes doch durch die Distanzfäden laufen. Das heisst, dass wir andere Hauptstrahlen wählen müssen, demzufolge auch eine andere Eintrittspupille und auch eine andere Öffnungsblende. Hierbei muss wieder ein Unterschied gemacht werden zwischen Fernrohren mit Ausziehokular und Fernrohren mit Fokussierlinse.

Beim Fernrohr mit Ausziehokular kann die Lösung dadurch gefunden werden, dass

aus den Strahlen, die durch die Distanzfäden gehen und die zur optischen Achse parallel laufen, Hauptstrahlen gemacht werden. Man erhält so einen Strahlenlauf wie auf Abb. 33. Dies bedeutet, dass man die Eintrittspupille in die dingeitige Brennebene des Objektivs verlegt. Die Öffnungsblende muss dann auch auf dieselbe Stelle oder in die bildseitige Brennebene des Okulars kommen. Die Eintrittspupille muss wenigstens mit der Entfernung zwischen den Distanzfäden kleiner sein, als der Durchmesser der Objektivfassung. Wenn die Öffnungsblende in der bildseitigen Brennebene des Okulars liegt, so muss deren Durchmesser kleiner sein als $\varnothing \text{ Obj.}/V - f_{\text{Ok}}/100$. Für die Ergebnisse der Untersuchungen verweisen wir auf Abschnitt 3.4.

Beim Fernrohr mit Fokussierlinse ist das Problem komplizierter. Der Umstand, dass das Bild mit der Fadenkreuzebene nicht zusammenfällt, wird hier nicht durch den fehlerhaften Stand der Ebene verursacht (bei einem Fernrohr mit Fokussierlinse ist die Stelle dieser Ebene fest), jedoch durch einen fehlerhaften Stand der Fokussierlinse.

Als Ausgangspunkt für eine allgemeine Betrachtung nehmen wir eine gegebene Objektebene und eine gegebene Bildebene (Abb. 38). Für eine bestimmte Linse gibt es nur einen richtigen Stand (auf der Abbildung L_0). Vorläufig gehen wir von einer positiven Linse aus. Wird nun die Linse über eine Distanz δe verschoben, so fällt das Bild nicht mehr in B_0 , sondern gelangt in B_1 .

Die Aufgabe ist jetzt einen Lichtstrahl zu finden, der ausgehend von V nach der

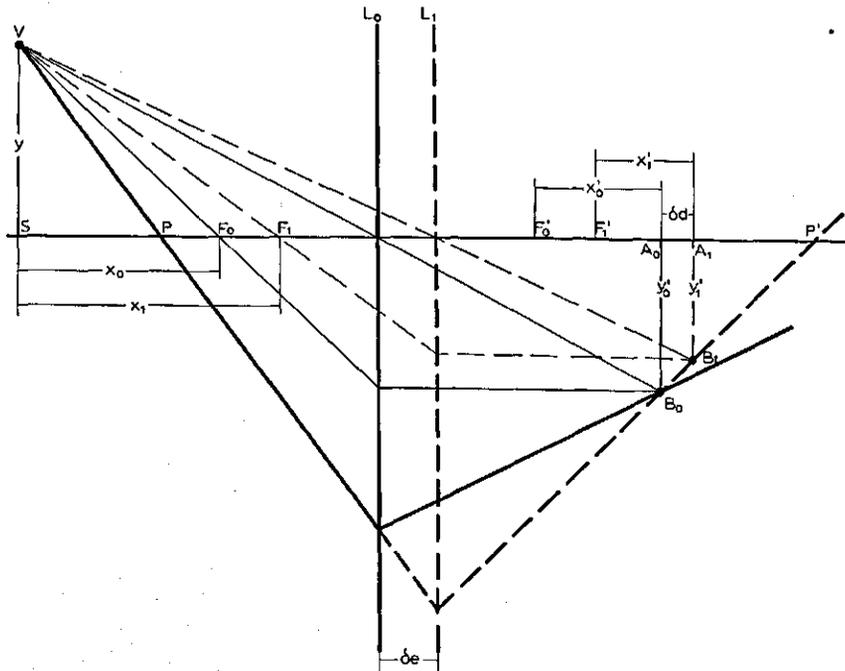


Abb. 38. Die Begründung für die Stelle der Blende zur Ausschaltung des Einflusses der Fehlfokussierung.

Verschiebung der Linse doch noch durch B_0 läuft. Wenn aus diesem Strahl ein Hauptstrahl gemacht wird, hat die Fehlfokussierung keinen Einfluss mehr. Der gesuchte Strahl im Bildraum ist auf der Abbildung mit der Linie angegeben, die durch B_0 und B_1 läuft, im Objektraum durch die Linie VP. Wenn wir eine Blende in der Ebene lotrecht zur optischen Achse in P anbringen, dann wird VP der gesuchte Hauptstrahl. Wo liegt nun P? Als Ausgangspunkt nehmen wir die Formel für den richtigen Stand der Linse:

$$x_0 x'_0 = f^2 \quad (48)$$

und für den fehlerhaften Stand:

$$x_1 x'_1 = f^2 = (x_0 + \delta e) x'_1 \quad (49)$$

Die Verschiebung der Stelle des Bildes ist:

$$\delta d = x'_1 + \delta e - x'_0 \quad (50)$$

Hieraus kann man ableiten:

$$\delta d = e \frac{x_0 - x'_0 + \delta e}{x_0 + \delta e} \quad (51)$$

Für die Bildgrößen y'_0 und y'_1 ergibt sich:

$$y'_0 = \frac{f \cdot y}{x_0} \quad \text{und} \quad y'_1 = \frac{f \cdot y}{x_1} = \frac{f \cdot y}{x_0 + \delta e}$$

oder:

$$y'_0 : y'_1 = (x_0 + \delta e) : x_0 \quad (52)$$

Aus der Abbildung können wir ableiten:

$$P'A_0 : A_1 A_0 = y'_0 : (y'_0 - y'_1)$$

Nach einer Umformung ist dies:

$$P'A_0 = x_0 - x'_0 + \delta e \quad \text{oder} \quad P'F'_1 = x_0 \quad (53)$$

Daraus folgt, dass $PF_1 = x'_0$ ist oder mit anderen Worten, dass die Blende vor der Linse auf einer festen Entfernung stehen muss. Diese Entfernung ist gleich mit der richtigen Bildweite. Die Blende muss sich folglich beim Fokussieren mit der Linse mitbewegen.

Wie verhält sich dies nun beim Fernrohr mit Fokussierlinse? Für jede Distanz, auf die das Fernrohr fokussiert wird, hat die Fokussierlinse eine bestimmte Bildweite. Es müsste sich folglich die Blende für jede Distanz, d.h. auch für die Bildweite, auf einer festen Stelle in bezug auf die Fokussierlinse befinden. Dies ist jedoch unmöglich. Dieser Widerspruch wird dadurch behoben, dass wir in den obenangeführten Formeln nicht $PF_1 = x'_0$, sondern $PF_0 = x'_0$ schreiben. Man muss jetzt dafür sorgen, dass die Distanz der Blende zur Fokussierlinse die gleiche sei, wie die Distanz der Fokussierlinse zur Fadenkreuzebene. Wenn wir statt $PF_1 = x'_0$ die Gleichung $PF_0 = x'_0$ nehmen, gerät die Blende nicht mehr auf den optimalen Platz. Wenn wir den

Tabelle 12. Stelle u der Blende hinter dem Brennpunkt des Okulars und der Einfluss des festen Standes der Blende auf die Distanzmessung bei $\delta e = +40 \mu$ für das Fernrohr von Wild N3.

L (m)	u (mm)	Bei $u = 0,921$		Bei $u = 0,943$	
		dL/L (mm/hm)	dL (mm)	dL/L (mm/hm)	dL (mm)
5	1,153	-22	-1,1	-20	-1,0
10	1,010	-9,6	-1,0	-7,0	-0,7
20	0,966	-5,0	-1,0	-2,6	-0,5
40	0,943	-2,8	-1,1	0	0
80	0,932	-1,3	-1,1	+1,3	+1,0
160	0,927	-0,9	-1,4	+1,9	+3,1
∞	0,921	0		+2,6	

Einfluss der Annäherung berechnen, dann zeigt sich, dass dieser für Wild N3 und bei der Annahme dass $\delta e = 40 \mu\text{m}$ ist (ungefähr der mittlere Fehler in e) für die Distanz einen relativen Fehler von 3×10^{-6} ergibt. Die Annäherung ist folglich zulässig, umso mehr da eine Blende von einer Dicke gleich Null doch nicht verwirklicht werden kann.

Obenstehend haben wir gesehen, dass die Distanz der Blende zur Fokussierlinse bei einer Verschiebung dieser Linse gleich sein muss mit der Distanz der Fokussierlinse zur Fadenkreuzebene. Wenn folglich die Fokussierlinse über eine bestimmte Distanz verschoben wird, muss die Blende auf die doppelte Distanz verschoben werden. Dies ist mechanisch zwar möglich, das Instrument wird dadurch aber komplizierter.

Eine einfachere Lösung erhalten wir, wenn eine Blende hinter das Okular und zwar an der Stelle angebracht wird, wo die früher erwähnte Blende durch die Fokussierlinse und durch das Okular abgebildet wird. Durch das Bewegen der Fokussierlinse müsste diese Blende auch versetzt werden, aus Tabelle 12 zeigt sich jedoch, dass der absolute Fehler bei der Distanzmessung vernachlässigt werden kann. Die Tabelle ist für das Fernrohr von Wild N3 berechnet.

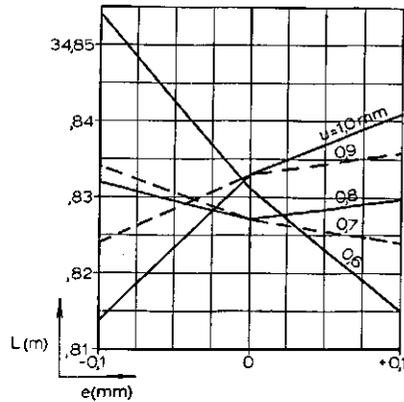
Wenn die optischen Angaben eines Fernrohrs bekannt sind, kann die Stelle der Blende errechnet werden. Aus der Berechnung erhält man die Distanz der Blende zur augseitigen Brennebene des Okulars. Mit dieser Distanz kann man jedoch nicht viel anfangen, da die Lage der Brennebene nicht bekannt ist. Die Stelle der Austrittspupille hingegen kann bezeichnet werden und man könnte folglich die Stelle der Blende in bezug auf die Austrittspupille angeben. Aus der Tabelle 12 ergibt sich aber, dass die Blende auf ihre Stelle mit einer Genauigkeit von drei hundertstel Millimetern angebracht werden muss; hierzu ist die Austrittspupille nicht geeignet, es gibt jedoch hierzu eine gute Annäherung.

Erfahrungsgemäss kann die Stelle ziemlich schnell und genau festgestellt werden, wie aus dem folgenden Beispiel hervorgeht. Wir wollten hinter das Fernrohr von Wild N3 eine Blende anbringen. Diese Blende war in Form einer blinden Schraubenmutter

Tabelle 13. Bestimmung der Stelle der Blende bei dem Fernrohr von Wild N3 auf einer Entfernung von etwa 35 m für den Beobachter A.

Stelle der Blende (mm)	Distanz (m) bei einer Einstellung der Fokussierlinse auf:		
	-0,10 mm	0 mm	+0,10 mm
0,6	34,854	34,831	34,815
0,7	34,834	34,827	34,824
0,8	34,832	34,827	34,830
0,9	34,824	34,833	34,836
1,0	34,814	34,833	34,841

Abb. 39. Ergebnisse für Beobachter B. Erläuterung siehe Tabelle 13.



ausgestaltet. Das Okular wurde mit einem Gewinde versehen. Schraube und Mutter hatten eine Steigung von 2 mm. Die Blende war mit einer Einteilung versehen, so dass die Stellung der Blende in 1/100 mm abgelesen werden konnte. Beim Ablesen des Nullpunktes der Einteilung fällt die Blende möglichst gut mit dem Brennpunkt des Okulars zusammen. Die Stelle der Fokussierlinse kann auch abgelesen werden. Es wurde auf eine Latte gezielt (aus einer Entfernung von ungefähr 35 m) und es wurde möglichst gut fokussiert. Die Beobachtungen wurden durch zwei Personen gemacht. Die Ablesungen erfolgten bei verschiedenen Ständen der Fokussierlinse und der Blende. Die Ergebnisse für den Beobachter A sind in der Tabelle 13 und für den Beobachter B in Abb. 39 angeführt. Durch Ausgleichung wurde gefunden 0,80 und 0,815 mm. Dass für beide Beobachter verschiedene Werte gefunden wurden, kann der verschiedenen Einstellung des Okulars zugeschrieben werden.

3.2.4 Einige Besonderheiten

Aus den Messungen, die für die Zusammenstellung der Tabelle 11 vorgenommen wurden, kann man eine Tabelle der mittleren Fehler in bezug auf die Stelle der Fokussierlinse zusammenstellen. Diese können auch mit Hilfe der Formeln 40 und 45 berechnet werden. Für c werden die im Abschnitt 3.2.1 angegebenen Werte benützt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 14 angeführt. Auffallend ist hierbei, dass die gemessenen Werte grösser sind, wie die berechneten. Bei den in Tabelle 16 angeführten Messungen zeigte es sich, dass der mittlere Fehler bei der Fokussierung eines Fernrohrs mit Blende viel grösser ist, wie bei einem Fernrohr ohne Blende.

Eine Lösung für diese eigenartigen Ergebnisse haben wir bisher noch nicht gefunden. Es scheint jedoch, dass wenn der Einfluss der Fokussierung auf die Distanzmessung geringer wird, der mittlere Fehler der Fokussierung grösser wird. Hieraus kann der Schluss gezogen werden, dass die Parallaxe des beweglichen Auges auch bei der Fokussierung mit einem stillstehendem Auge eine Rolle spielt. Aus der

Tabelle 14. Mittlerer Fehler der Einstellung der Fokussierlinse (m_e), gemessen und berechnet für zwei Beobachter (A und B) für verschiedene Distanzen (x) zum Objektiv.

x (m)	m_e			
	Beobachter A		Beobachter B	
	gemessen (μm)	berechnet (μm)	gemessen (μm)	berechnet (μm)
3,02	48	50	34	33
3,31	45	46	31	31
3,59	45	43	30	29
4,16	45	39	29	26
4,72	53	37	29	24
5,62	48	34	30	23
6,48	43	33	29	22
8,23	39	31	38	20
10,83	55	29	32	19
16,02	47	28	30	18
33,32	41	27	29	18

physiologischen Optik wissen wir nämlich, dass ein stillstehendes Auge eigentlich ein Paradox ist, da das Auge ein Objekt, welches es sieht, gleichsam abtastet.

Ein anderer bemerkenswerter Umstand ist, dass der mittlere Fehler bei der Fokussierung eines Fernrohrs ohne Fadenkreuz gleich ist mit jenem mit einem Fadenkreuz. Erwartet wurde hingegen, dass im ersten Fall die Akkommodationsbreite eine Rolle spielen wird. Eine Erklärung für diese Erscheinung könnte sein, dass das Auge sich hinter einem Fernrohr erfahrungsgemäss auf die günstigste Sehweite einstellt.

Als wir eine Konstantenbestimmung ausführen wollten, bei der die Fokussierlinse anhand der Tabelle 11 eingestellt wurde, zeigte es sich, dass das Bild bei den Distanzfäden nicht scharf war. Die Tabelle wurde aus Fokussierungen zusammengestellt, die beim Mittelfaden vorgenommen wurden. Diese Beobachtungen wurden nun mit Fokussierungen im Bereich der Distanzfäden wiederholt. Es zeigte sich nun, dass der Unterschied in der Stelle der Fokussierlinse auf 30 m 0,05 mm und auf 4 Meter 0,15 mm betrug. Die Bildfeldwölbung nimmt bei kürzeren Distanzen zu. Durch das Versetzen der Fokussierlinse erhält man ein anderes optisches System mit folglich einem anderen Korrektionszustand. Dies ist ein Nachteil des Fernrohrs mit einer Fokussierlinse.

3.3 Einfluss der Temperatur und des Luftdrucks

Über den Einfluss der Temperatur auf die Fadendistanzmessung konnte in der Literatur nur die Bemerkung von Bosshardt (1930) gefunden werden, dass dieser 'recht unangenehm' ist.

Auch bei der Behandlung des Einflusses der Temperatur muss man wieder einen Unterschied zwischen Fernrohren mit Ausziehhokular und Fernrohren mit Fokussier-

linze machen. Naturgemäss wird zugleich auch der Einfluss des Luftdrucks behandelt. Um Formeln ableiten zu können, drücken wir die Distanz in Grössen aus in Funktion von der Temperatur und vom Luftdruck. Bei einem Fernrohr mit Ausziehhokular ist diese Formel:

$$L = \frac{f}{p} \cdot \frac{y}{b} + B \quad (54)$$

Hierbei ist f: die Brennweite des Objektivs,
 p: die Entfernung zwischen den Distanzfäden,
 y: die Lattenablesung,
 b: die Latteneinheit (ein Meter), und
 B: Die Additionskonstante.

Die Veränderung der Additionskonstante kann in bezug auf die Genauigkeit der Distanzmessung vernachlässigt werden.

Als Annäherung für die Brennweite schreiben wir:

$$\frac{1}{f} = (n - 1) \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right)$$

r_1 und r_2 sind die Strahlen der Kugelflächen der Linse. Die Formel 54 wird nun:

$$L = \frac{y}{(n - 1) \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) \cdot p \cdot b} \quad (55)$$

$$= \frac{y \cdot r_1 \cdot r_2}{(n - 1)(r_1 + r_2) \cdot p \cdot b} \quad (56)$$

$$= \frac{y \cdot r_1 \cdot r_2}{\left(\frac{n_{Gl}}{n_L} - 1 \right) (r_1 + r_2) \cdot p \cdot b} \quad (57)$$

Durch Differenzierung und Vereinfachung erhalten wir:

$$\begin{aligned} \frac{dL}{L} &= \frac{dr_1}{r_1} \cdot \frac{r_2}{r_1 + r_2} + \frac{dr_2}{r_2} \cdot \frac{r_1}{r_1 + r_2} - dn_{Gl} \frac{1}{n_{Gl} - n_L} \\ &+ \frac{dn_L}{n_L} \frac{n_{Gl}}{n_{Gl} - n_L} - \frac{dp}{p} - \frac{db}{b} \end{aligned} \quad (58)$$

Angenommen wurde, dass die Distanzfäden auf Glas aufgetragen sind, so dass für p auch die Ausdehnung des Glases gilt, ebenso auch für r_1 und r_2 . Die Formel 58 wird nun durch den Einsatz des Temperaturfaktors verändert in:

$$\frac{dL}{dt} = L \left(\frac{n_{Gl}}{n_{Gl} - n_L} \cdot \frac{1}{n_L} \cdot \frac{dn_L}{dt} - \frac{1}{n_{Gl} - n_L} \cdot \frac{dn_{Gl}}{dt} - \frac{1}{b} \cdot \frac{db}{dt} \right) \quad (59)$$

Wir sehen, dass diese Formel die gleiche ist, wie die Formel 26, so dass der Einfluss der Temperatur und des Luftdrucks beim Fadendistanzmesser mit Ausziehhokular derselbe ist, wie beim Doppelbilddistanzmesser. Auch die Schlussfolgerungen sind dieselben.

Als Ausgangspunkt für die Berechnungen des Einflusses der Temperatur bei einem Fernrohr mit Fokussierlinse nehmen wir den linearen Zusammenhang zwischen Distanz und Ableseung:

$$L = \frac{f_{\infty}}{p} \cdot \frac{y}{b} \quad (60)$$

Für f_{∞} kann laut Roelofs (1941) geschrieben werden:

$$f_{\infty} = \frac{2f_o f_i}{-d + f_o + 2f_i + (d - f_o)^{\frac{1}{2}}(d - f_o - 4f_i)^{\frac{1}{2}}}$$

Diese Formel wird umgeformt in:

$$f_{\infty} = -\frac{f_o}{4f_i} \{(d - f_o)^{\frac{1}{2}} + (d - f_o - 4f_i)^{\frac{1}{2}}\}^2 \quad (61)$$

Dies kann in Formel 60 eingetragen und darauf differenziert werden. Nach vielen Umformungen erhalten wir zum Schluss:

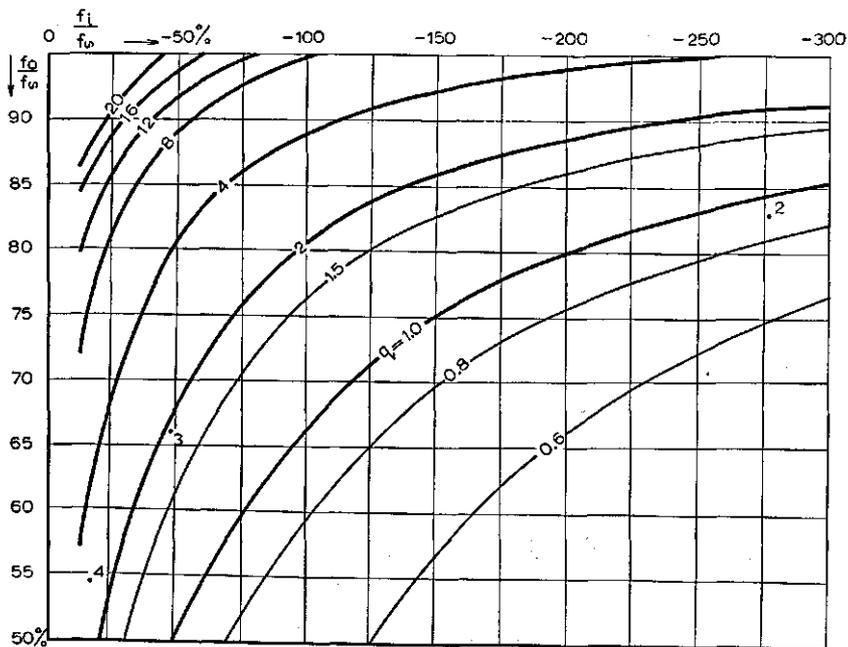


Abb. 40. Koeffizient q in Abhängigkeit von f_o , f_i und f_{∞} . Für die Punkte 2, 3 und 4 siehe Tabelle 15.

$$\Delta L = L \left\{ q(\lambda_g - \lambda_k)\Delta t + (1 - q) \frac{\Delta n_{Gl} - \Delta n_L \cdot n_{Gl}}{n_{Gl} - 1} - \lambda_b \cdot \Delta t \right\} \quad (62)$$

- Hierin ist: λ_g der Ausdehnungskoeffizient für Glas,
 λ_k : der Ausdehnungskoeffizient für das Fernrohr,
 λ_b : der Ausdehnungskoeffizient für die Latte,
 Δn_{Gl} : Veränderung der Brechungsahl für Glas bei Temperaturänderung Δt
 Δn_L : Veränderung der Brechungsahl für die Luft bei Temperaturänderung Δt ,
 q : $d(d - f_o)^{-\frac{1}{2}} \cdot (d - f_o - 4f_i)^{-\frac{1}{2}}$.

Der Faktor q ist folglich von dem Verhältnis von d , f_o und f_i abhängig. In Abb. 40 sind die Koeffizienten q graphisch dargestellt. Auf den Achsen sind die Grössen f_o und f_i in Prozenten von f_∞ angegeben. Zum Vergleich ist die Abb. 41 aufgenommen, in der die Länge des Fernrohrs d auf dieselbe Weise dargestellt ist.

In Tabelle 15 ist der Einfluss der Temperatur für einige Fernrohre angegeben und zur Vergleichung mit diesen ein Fernrohr mit Ausziehokular. Die Schlussfolgerung ist deutlich: der Einfluss der Temperatur ist bei einem Fernrohr mit Fokussierlinse grösser als bei einem Fernrohr mit Ausziehokular.

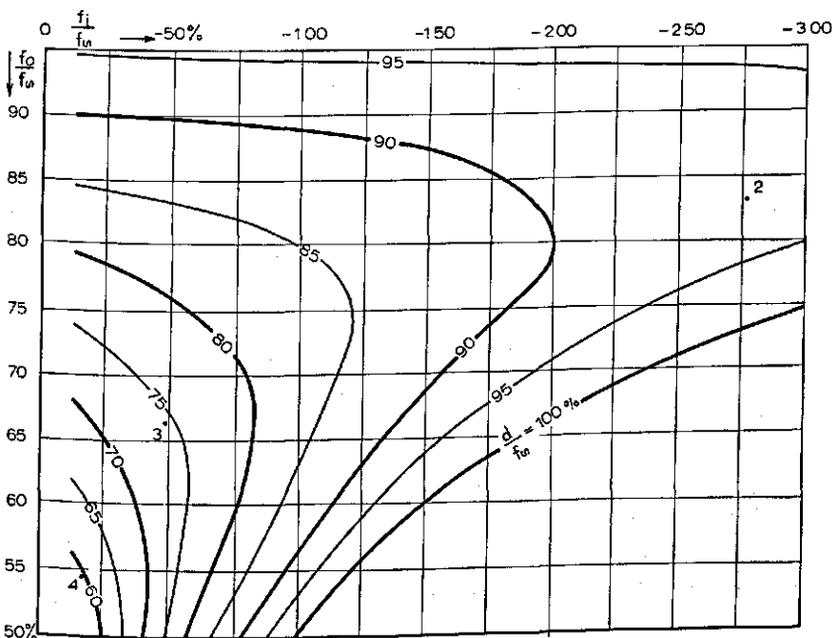


Abb. 41. Länge des Fernrohrs d in Abhängigkeit von f_o , f_i und f_∞ . Für die Punkte 2, 3 und 4 siehe Tabelle 15.

Tabelle 15. Fehler durch Temperatureinfluss in mm bei einer Distanz von 100 m bei 10° Temperaturerhöhung.

Fernrohr	Rohrmaterial	Fehler in mm bei $\Delta n/^{\circ}\text{C} \cdot 10^6$ von:			
		+2	0	-2	-4
<i>Invar-Latte</i>					
1		- 7,5	- 3,5	+ 0,5	+ 4,5
2	Messing	- 6,4	- 6,8	- 7,2	- 7,6
	Aluminium	-12,7	-13,1	-13,5	-13,9
3	Messing	-20,4	-17,2	-14,0	-10,8
	Aluminium	-33,0	-29,8	-26,6	-23,4
4	Messing	-34,4	-27,6	-20,8	-14,0
	Aluminium	-53,3	-46,5	-39,7	-32,9
<i>Stählerne Latte</i>					
1		-18,5	-14,5	-10,5	- 6,5
2	Messing	-17,4	-17,8	-18,2	-18,6
	Aluminium	-23,7	-24,1	-24,5	-24,9
3	Messing	-31,4	-28,2	-25,0	-21,8
	Aluminium	-44,0	-40,8	-37,6	-34,4
4	Messing	-45,4	-38,6	-31,8	-25,0
	Aluminium	-64,3	-57,5	-50,7	-43,9

Fernrohr 1: Fernrohr mit Ausziehhokular.

Fernrohre 2 bis 4: Fernrohre mit Fokussierlinse (f_{∞} , f_0 , f_1 und d in mm).

Fernrohr 2: $f_{\infty} = 179,55$; $f_0 = 149,0$; $f_1 = -500$; $d = 165$; $q = 0,9$; aus (Roelofs, 1941; §5).

Fernrohr 3: 206,45 136,09 -101,64 154 1,8; aus (Roelofs, 1941; §8).

Fernrohr 4: 371,25 202,05 - 66,0 227,5 2,7; Wild N3.

3.4 Messergebnisse

Um die im Abschnitt 3.2 entwickelten Theorien über die Auswirkung einer Blende zu bestätigen, haben wir zum Teil visuelle und zum Teil fotografische Messungen ausgeführt.

Die ersten Messungen wurden visuell auf zwölf Entfernungen zwischen 5 und 33 m mit dem Wild N3 vorgenommen, der in Querrichtung aufgestellt war (Abb. 47) um eine horizontale Latte benützen zu können. Sämtliche Messungen wurden durch zwei Beobachter verrichtet. Auf jede Entfernung wurden viererlei Beobachtungen gemacht und zwar auf folgende Weise:

1. ohne Blende einmal fokussieren und fünfmal ablesen;
2. ohne Blende fünfmal fokussieren und bei jeder Fokussierung einmal ablesen;
3. ohne Blende fünfzigmal fokussieren und als Fokussierung deren Mittelwert benützen; bei dieser Fokussierung fünfmal ablesen;
4. mit einer Blende fünfmal fokussieren und bei jeder Fokussierung einmal ablesen.

Die Ergebnisse dieser Messungen sind in Tabelle 16 angeführt. Für die Ausgleichung zur Bestimmung der Konstanten wurde für die Zusammenhang von der Distanz und der Ablesung angenommen $L = Ay + B + Cy^{-1}$. Die Schlussfolgerung

Tabelle 16. Distanzmessungen mit dem Fernrohr von Wild N3.

	Beobachter A				Beobachter B			
	1	2	3	4	1	2	3	4
$m_e(\mu m)$	—	33	—	68	—	34	—	63
$m_a(mm)$	2,8	4,1	3,1	2,2	3,0	2,7	3,5	2,7
$m_L(mm)$	6,7	5,8	5,3	2,8	5,1	4,6	2,1	2,5

m_e = m.F. der Einstellung der Fokussierlinse.

m_a = m.F. der Ablesung, umgerechnet auf 10 m.

m_L = m.F. der Distanz, umgerechnet auf 10 m.

Bedeutung der Spalten 1 bis 4 siehe Text.

ist deutlich: die mit einer hinter dem Okular angebrachten Blende verrichteten Messungen ergaben eine bedeutsame Verbesserung. Auffallend war hier, dass durch die Blende die Fokussierung viel ungenauer geworden ist.

Auf grössere Entfernungen konnten mit dem N3 keine Messungen ausgeführt werden, da die Lattenteilung hierzu ungeeignet war. Die Lattenstreifen waren in grösseren Entfernungen nämlich in bezug auf die Distanzfäden zu dünn.

Mit dem Hildebrand Nr. 61229 wurden fotografische Beobachtungen vorgenommen und zwar auf sechs Distanzen zwischen 26 und 150 m. Auf jeder Distanz wurden zehn Aufnahmen gemacht. Die Ergebnisse sind in der Tabelle 17 angeführt. Bei diesen Messungen wurde ohne Blende fokussiert, während die Aufnahme mit einer Blende in der dingseitigen Brennebene des Objektivs gemacht wurde. Bemerkenswert ist der Umstand, dass während der Aufnahme auf die zweite Distanz konstatiert wurde, dass das Instrument durch den Wind dermassen zitterte, dass keine visuelle Ablesung möglich war. Die zehn Aufnahmen auf diese Distanz haben wir dann noch beendet und die weiteren Messungen auf später verlegt. Auffallend war jedoch, dass die Messungen auf die ersten zwei Distanzen gute Resultate ergaben.

Aus der Tabelle 17 ergibt sich die deutliche Schlussfolgerung, dass durch die Einschaltung einer Blende die Genauigkeit des Fadendistanzmessers auf 15 mm pro 100 m gebracht wurde.

Tabelle 17. Genauigkeit der Fadendistanzmessung.

	Gemessen						Berechnet
	26	52	79	105	130	155	100
Distanz (m)							
m.F. der Distanz (mm)	4,3	9,6	11,5	10,8	15,0	20,0	13,8

3.5 Schlussfolgerungen über die Fadendistanzmessung

Bei den Schlussfolgerungen über die Untersuchungen mit dem Fadendistanzmesser muss man einen Unterschied zwischen einem Fernrohr mit Ausziehhokular und einem

Fernrohr mit Fokussierlinse machen. Einige Schlussfolgerungen sind für beide Fernrohrtypen gültig:

1. Infolge der Fehlfokussierung kann eine Genauigkeit von 3 bis 4 cm pro 100 m erwartet werden.
2. Durch die Anwendung einer Blende an der richtigen Stelle wird der Einfluss der Fehlfokussierung ausgeschaltet.
3. Hierdurch wird die erreichbare Genauigkeit 15 mm pro 100 m.
4. Diese grosse Genauigkeit kann visuell schwer erzielt werden. Hierzu ist ein sehr stabiles Instrument und eine angepasste Latte erforderlich. Die visuelle Messung ist sehr zeitraubend.
5. Auf fotografischem Wege kann diese grosse Genauigkeit auf einfache Weise erreicht werden.
6. Bei der Benützung eines langsamen Films, folglich bei einer Belichtungszeit von 5 bis 10 Sekunden, wird das Luftzittern und das Zittern des Instrumentes grösstenteils ausgeglichen.
7. Die Ablesegenauigkeit ist bei der fotografischen Beobachtung von der Bildqualität, und so gewissermassen von der Fokussierung abhängig.

Für ein Fernrohr mit Ausziehhokular gilt:

1. Die Genauigkeit der Fokussierung kann mit folgender Formel ausgedrückt werden:

$$m_b = c \frac{f_{Ok}^2}{\varnothing UP}$$

wobei c einen Wert von 5 bis 10×10^{-4} hat.

2. Die Blende für die Ausschaltung des Einflusses der Fehlfokussierung im augenseitigen Brennpunkt des Okulars steht für die Fokussierung auf alle Entfernungen an der richtigen Stelle.
3. Eine gute Optik kann auf alle Entfernungen scharfe Bilder ergeben.
4. Den Einfluss der Temperatur und des Luftdrucks darf man, jedenfalls bei Anwendung einer Invar-Latte, vernachlässigen.

Schliesslich bei einem Fernrohr mit Innenfokussierung:

1. Die Werte für den mittleren Fehler der Fokussierung eines Fernrohrs mit Ausziehhokular dürfen für ein Fernrohr mit Innenfokussierung nicht angewendet werden.
2. Eine feststehende Blende hinter dem Okular schaltet den Einfluss der Fehlfokussierung nur für eine Entfernung völlig aus. Für andere Entfernungen kann jedoch der restliche Einfluss vernachlässigt werden.
3. Bei der Fokussierung, vor allem auf kürzere Distanzen, wird das optische System geändert. Ein Fernrohr, das auf alle Distanzen scharfe Bilder zeigt, wird schwerlich zu finden sein.
4. Den Einfluss der Temperatur und des Luftdrucks kann man bei diesem Fernrohr nicht ohne weiteres vernachlässigen.

5. Wenn das Fernrohr so konstruiert ist, dass der Faktor q (siehe Formel 62) gleich 1 ist und wenn die Ausdehnung des Fernrohrkörpers dieselbe ist wie des Glases, so hat die Temperatur und der Luftdruck praktisch keinen Einfluss mehr.

4 Kritische Betrachtung der Literatur über die optische Distanzmessung

Es kann natürlich in diesem Kapitel nicht die gesamte Literatur über die optische Distanzmessung behandelt werden. Hauptsächlich jene Literatur wurde aufgenommen, die sich auf die Gegenstände bezieht, die in dieser Arbeit behandelt werden.

Die Reihenfolge der Betrachtung ist chronologisch und hat nichts mit einer positiven oder negativen Beurteilung zu machen.

4.1 P. Engi: Untersuchungen über den mittleren Fehler der Einstellung des Fadenkreuzes in die Bildebene an geodätischen Fernröhren. Zürich, 1917.

Über den Zweck seiner Dissertation schreibt Engi das Folgende: 'Meine Untersuchungen waren speziell darauf gerichtet die Abhängigkeit der Grenze der Wahrnehmung einer Relativbewegung zwischen Fadenkreuz und Fernrohrbild von den Fernrohrkonstanten aufzusuchen'.

Wenn wir die wahrnehmbare Bewegung γ auf der Netzhaut bei verschiedener Fokussierung b graphisch darstellen wollen, dann erhalten wir Abb. 42. Engis Zweck war folglich die Bestimmung der Punkte A und C. Die Lage dieser Punkte ist von der Grösse γ_{\min} (die Distanz AA', bzw. CC') und von der Steigung der Linie abhängig, welche letztere durch die Fernrohrkonstanten sowie die Bewegung des Auges, den Platz des Auges hinter dem Okular und durch die Entfernung vom Mittelpunkt des Auges zur Netzhaut bestimmt wird. Für den Mittelpunkt des Auges nimmt Engi zwei Punkte und zwar den optischen Mittelpunkt (S.28 und 46) und den Augendrehpunkt (S.68). Für das bewegliche Auge ist der Augendrehpunkt wahrscheinlich richtig. Engi bestimmt nicht die Punkte A und C, sondern die Genauigkeit, mit der diese Punkte gefunden werden können. Hieraus leitet er den mittleren Fehler in γ_{\min} ab.

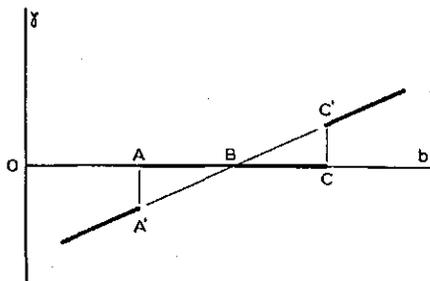


Abb. 42. Graphische Darstellung der wahrnehmbaren Bewegung auf der Netzhaut bei verschiedener Fokussierung.

Hierbei können zwei Probleme zur Diskussion gestellt werden:

1. Was ist die physiologische Bedeutung von m_γ ?
2. Die Punkte A' und C' sind Unstetigkeitsstellen der Funktion $\gamma = f(b)$. Die Frage ist nun ob es gerechtfertigt ist hieraus eine Funktion für m_γ abzuleiten. Die von Engi abgeleitete Funktion ist:

$$m_\gamma = \frac{\varepsilon a}{f_{Ok}^2} m_b \quad (63)$$

Hierin ist ε die Bewegung des Auges auf das Okular projiziert und a die Entfernung des Augenmittelpunktes zur Netzhaut. Die Formel zeigt eine auffallende Übereinstimmung mit der Formel 40, die wir für die Fokussierung mit dem stillstehenden Auge abgeleitet haben.

Die meisten Probleme bildet für Engi der Faktor ε , den er sowohl praktisch wie theoretisch ableitet. Die gefundenen Werte stimmen miteinander nicht überein, so dass Engi einen empirisch bestimmten Faktor q einsetzt, der, wie er selbst sagt, theoretisch gleich Eins sein muss, für den er aber Werte von 0,3 bis 0,8 findet. Über den berechneten Wert ε sagt Engi, dass dieser 'vielleicht etwas erkünstelt erscheinen mag'. In der Schlussbemerkung 4 behauptet Engi, dass ε im Prinzip eine Funktion des Diameters der Augenpupille sein muss. Dies zeigt sich jedoch nirgends, noch aus seiner Dissertation, noch aus den Formeln, die er benützt hat.

Engi behauptet, dass das Auge sich auf die günstigste Sehweite einstellt – was auch richtig ist – er gibt diese Sehweite jedoch in 25 cm an. In der Schlussbemerkung 1 fügt er dann hinzu, dass die Behauptung der Lehrbücher, dass die Beobachtungen mit einem nicht-akkommodierten Auge gemacht werden müssen, falsch ist. Wahrscheinlich ist es so, dass jeder seine eigene günstigste Sehweite hat, so dass hierüber kein unterschiedener Ausspruch getan werden kann.

Das Mass m_γ auf der Netzhaut wird durch Engi noch durch die Wurzel aus der Vergrößerung geteilt um eine Konstante k_1 zu erhalten. Für diese Teilung kann in der physiologischen Optik keine Erklärung gefunden werden. Aus der Tabelle 22 berechnet Engi, dass die Grösse von k_1 0,173 μm beträgt. Dies ist das Mittel von 50 Beobachtungen, deren höchster Wert 0,263 μm und geringster Wert 0,099 μm beträgt, während der mittlere Fehler 0,037 ist. Es zeigt sich folglich, dass die Konstante nicht so konstant ist.

4.2 W. Uhink: Betrachtungen über Fernrohre mit Entfernungsmessfäden. Zeitschrift für Instrumentkunde, 1932.

In diesem Artikel wird der Einfluss der Fokussierung auf die Distanzmessung rein theoretisch behandelt. Uhink unterscheidet hierbei drei Fernrohrtypen, und zwar:

1. das Fernrohr mit einfachem Objektiv und Ausziehhokular;
2. ein Fernrohr, bei dem das Objektiv aus zwei positiven Linsen besteht, die voneinander auf einem festen Abstand stehen; dieses Fernrohr ist ebenfalls mit einem Ausziehhokular versehen;

3. das Fernrohr mit Innenfokussierung, bei dem die Fokussierlinse eine negative Linse ist.

Durch die Betrachtung von Uhink über den zweiten Fernrohrtyp bin ich auf die Lösung für das Ausschalten des Einflusses der Fehlfokussierung bei einem Fernrohr mit Ausziehhokular gekommen. Uhink hat nämlich abgeleitet, dass wenn die Entfernung zwischen beiden positiven Linsen mit der Brennweite der zweiten Linse gleich ist, der Einfluss der Fokussierung gleich Null ist. Wenn man nun die totale Brennweite des Systems mit der Formel $F = f_1 f_2 / (f_1 + f_2 - e)$ berechnet, bei der e folglich mit f_2 gleich ist, dann erhält man $F = f_2$. Die erste Linse hat keinen Einfluss auf die Stärke des Systems, sie kann folglich auch weggelassen werden, in diesem Fall muss man jedoch an dieser Stelle, d.h. in den dingseitigen Brennpunkt der zweiten Linse, eine Blende anbringen, die so als Eintrittspupille fungiert.

Für das dritte Fernrohr, das Fernrohr mit Innenfokussierung wird abgeleitet, dass die Fehlfokussierung die Distanzmessung nicht beeinflusst, wenn die Fokussierlinse in der Mitte zwischen Objektiv und Fadenkreuz steht. Dies stimmt vollkommen mit der Theorie überein, die in Abschnitt 3.2.3 für das Fernrohr mit Fokussierlinse entwickelt wurde. Es wurde dort nämlich abgeleitet, dass die Blende, welche den Einfluss der Fokussierung verschwinden lässt, in derselben Entfernung vor der Fokussierlinse stehen muss, wie dahinter das Fadenkreuz steht. Im von Uhink erwähnten Fall fungiert die Objektivfassung wie diese Blende.

Der dritte Teil hat mich stets sehr intrigiert, da die Ergebnisse hier mit der Praxis nicht übereinstimmen, welche zeigt, dass die Genauigkeit bei der Distanzmessung, unabhängig vom Typ des Fernrohrs, 3 bis 4 cm pro 100 m beträgt (siehe z.B. Danial, 1961). Die Formeln, welche Uhink algebraisch ableitet, habe ich deshalb durch Berechnungen mit Hilfe der analytischen Geometrie kontrolliert. Die Ergebnisse waren jedoch gleichlautend (siehe Formeln 44 bis 46).

Was stimmt hier ja nicht? Uhink schreibt: 'Wir wollen auch hier annehmen, dass der scharfe Bildpunkt um $dl = \pm 0,08$ mm von der Fadenebene liegen kann'. Im Abschnitt 3.2.4 (Tabelle 14) zeigt sich, dass man für die Genauigkeit der Fokussierung bei einem Fernrohr mit Innenfokussierung nicht den mittleren Fehler in der Fokussierung eines Fernrohrs mit Ausziehhokular benutzen darf, jedoch von höheren Werten ausgehen muss. Es ist folglich die obenstehende Behauptung von Uhink, die zu fehlerhaften Schlussfolgerungen führt.

4.3 Heckmann: Erfahrungen mit dem Breithaupt-Heckmann Präzisionsfadentfernungsmesser. Vermessungstechnische Rundschau, 1954.

Heckmann hat schon in 1939 Messungen mit einem Fadendistanzmesser erwähnt, der mit einer Blende im augseitigen Brennpunkt versehen war (Heckmann, 1939). Er erzielte mit diesem eine Genauigkeit von 15 mm pro 100 m.

Ein Artikel von Uhink brachte ihn auf den Gedanken eine Blende zu benutzen. Da sein Artikel einen so schwachen Anklang fand, wollte er in diesem Artikel die Auswirkung der Blende erklären. Die Erklärung für das Fernrohr mit Ausziehhokular

stimmt mit dem überein, was wir in Abschnitt 3.2.3 gefunden haben. Er behauptet jetzt dass diese Blende in jener Ebene liegt, wo der anallaktische Punkt durch das Fernrohr abgebildet wird. Er wendet aber dies auch für ein Fernrohr mit Fokussierlinse an. Bei diesem Fernrohr besteht jedoch kein anallaktischer Punkt.

Dass seine Methode so wenig Anklang gefunden hatte ist wahrscheinlich dem Umstand zuzuschreiben, dass wenn eine so grosse Genauigkeit erreicht werden soll, auch an das Auge und Instrument sehr hohe Anforderungen gestellt werden müssen. Dies zeigte sich schon bei den visuellen Untersuchungen, die im Abschnitt 3.4 beschrieben sind.

Die durch Heckmann erwähnten Untersuchungen erfordern eine Genauigkeit von 0,6 dmg pro Fadenablesung. Da beim Fadendistanzmesser von Heckmann zwischen beiden Ablesungen am Instrument eine Drehung erfolgen muss, stellt dies äusserst hohe Forderungen an die Stabilität des Instrumentes. Wenn man hierzu die Fotografie mit einer hierzu geeigneten Latte anwendet, werden an das Auge und an das Instrument keine so hohen Forderungen gestellt. Die Fotografie ist hier eigentlich die einzige Lösung.

Heckmann behandelt noch die Vorteile der Blende bei gewöhnlichen Winkelmessungen.

Zum Schluss noch ein Zitat aus dem Artikel von Heckmann, das ich gänzlich unter-schreiben kann: 'Die Genauigkeit von Fadendistanzmessern kann so weit gesteigert werden, dass sie allen praktischen Anforderungen der Präzisionstachymetrie genügt und von keinem der bekannten optischen Entfernungsmessern übertroffen wird'.

4.4 O. von Gruber: Optische Streckenmessung und Polygonierung. Berlin, 2. Auflage 1955.

Bei einer Erörterung der Literatur über die optische Distanzmessung darf auch dieses Buch nicht übergangen werden. Es gibt eine Übersicht über alle Methoden. Für meine Untersuchung ist insbesondere das Kapitel 3 (Fehlerquellen) und Kapitel 4 (Genauigkeit) wichtig.

Der Verfasser des Kapitels 3 ist Schwidefsky. Bei der Behandlung der Luft als Fehlerquelle wird der Einfluss der Temperatur und des Luftdrucks nirgends erwähnt.

So wie gewöhnlich, werden die Fehler, welche sich bei der Doppelbilddistanzmessung infolge der Zweiteilung des Objektivs ergeben, mit den sogenannten Augenfehlern erklärt. Dass dies unrichtig ist haben wir im Abschnit 2.1.1 und 2.1.4 schon zur Genüge gezeigt.

Bei der Behandlung des Einflusses der Instrumentalfehler wird der Einfluss der Temperatur auf die Latte zwar erwähnt, jener auf das Instrument jedoch nicht.

Über die Fadendistanzmesser schreibt Schwidefsky ganz richtig, dass '... die wichtigste Fehlerquelle die Parallaxe ist', aber dan schreibt er: 'Man beseitigt sie, indem man die Scharfeinstellung so lange ändert, bis sich das Lattenbild gegenüber der Strichplatte nicht mehr bewegt'. Dass diese Behauptung nicht richtig ist, wissen wir aus der Forschungsarbeit von Engi (1917) und aus den eigenen Versuchen.

In Kapitel 4, der von G. Förstner verfasst ist, gibt es auch einige Punkte, die näher betrachtet werden müssen. Zu allererst die Behauptung: 'Bei den Doppelbildinstrumenten kann der parallaktische Winkel als unveränderlich und damit als fehlerfrei betrachtet werden, so dass der Streckenfehler in erster Linie von der Ablesegenauigkeit an der Latte abhängt'.

In Kapitel 2 haben wir gezeigt, dass der parallaktische Winkel vom Stand des Prismas und vom Einfallswinkel abhängt (folglich auch von der Stelle der Ablesung im Sehfeld), so dass dieser Winkel nicht als unveränderlich und fehlerfrei betrachtet werden darf.

Förstner berechnet die Ablesegenauigkeit aus der Noniensehschärfe, die er auf 36 dm μ stellt. Umgerechnet auf eine Entfernung von 100 Meter und bei einer 25 \times Vergrößerung ist dies 25 mm. Im Abschnitt 2.1.1 ist ein genug grosses Zahlenmaterial angeführt, aus dem hervorgeht, dass die Ablesegenauigkeit bei einem erfahrenen Beobachter 7 bis 10 mm pro 100 m beträgt. Wenn 4 bis 5 \times abgelesen wird, so beträgt sie 3 bis 5 mm. Die Genauigkeit wird folglich durch andere Einflüsse bestimmt.

In Par. 45 schreibt Förstner: 'Der wesentliche Unterschied dieser Art der optischen Streckenmessung (Fadendistanzmesser) gegenüber den bisher behandelten (Doppelbild), liegt in der Verwendung der vertikalen Anstelle der horizontalen Latte'. Durch diese Bemerkung wird der Einfluss der Differential-Refraktion fälschlich als eine wesentliche Fehlerquelle bei der Fadendistanzmessung angegeben. Es ist wahr, dass bei der Fadendistanzmessung meistens eine vertikale Latte verwendet wird, dies ist jedoch nicht das Wesentliche. Der Einfluss der Differential-Refraktion wird durch Förstner stark übertrieben (siehe Bjerhammar, 1949 und Danial, 1961). Er erwähnt einen Fehler von 25 cm auf 100 m um, wie er sagt, '. . . in jedem Falle sicher zu sein'. Auf diese Weise wird die Fadendistanzmessung unbegründet in Misskredit gebracht.

Am Ende des Kapitels 4 steht, dass der geringste Ablesefehler durch die Anwendung eines optischen Mikrometers erzielt wird und dass dies besser ist wie ein Nonius.

Aus Abschnitt 2.1.1 geht deutlich hervor, dass bezüglich der Ablesegenauigkeit für einen erfahrener Beobachter zwischen einem optischen Mikrometer und der Kruidhofflatte (der verbesserten Nonienlatte) kein Unterschied besteht.

4.5 G. Bahnert: Untersuchungen des Einflusses des Beobachters, der Temperatur und des Zustandes der Atmosphäre auf die optische Präzisionsdistanzmessung. Dresden, 1958.

Ein Vorteil dieser Dissertation ist, dass sie keinen ausgetretenen Weg verfolgt, d.h. dass nicht glattweg aus der Literatur übernommen wird, sondern dass diese auf Grund eigener Messungen einer Prüfung unterzogen wird. Die Formeln für die Genauigkeit werden auch mathematisch einer Prüfung unterzogen, mit dem logischen Ergebnis, dass sämtliche Koeffizienten, die von Null nicht signifikant verschieden sind, vernachlässigt werden, wodurch sich einfachere Formeln ergeben.

Es zeigt sich, dass der mittlere Distanzfehler bei der Doppelbilddistanzmessung proportional mit der Distanz ist.

Die eigentliche Ursache, warum ich diese Dissertation in diesem Kapitel einer

Betrachtung unterzogen habe, ist die äusserst reelle Behandlung des Temperatureinflusses. Die Genauigkeit in bezug auf die Distanz wird durch das Eintragen von Temperaturkorrekturen nicht gesteigert und mit Recht hat Bahnert festgestellt, dass diese Korrekturen keinen Sinn haben (siehe Abschnitt 2.5). Anhand der Versuchsmessungen von 79 Personen zeigt Bahnert, dass der Einfluss des persönlichen Fehlers in der Literatur im allgemeinen übertrieben wird. Leider wurden hier die persönlichen Fehler nur aus einer Distanzmessung bestimmt, bei der zehn Ablesungen erfolgten.

4.6 N. Danial: Untersuchung über die regelmässigen und zufälligen Fehler und die Genauigkeit der optischen Distanzmessung mit vertikaler Latte. Zürich, 1961.

Für die Prüfung dieser Dissertation habe ich eine Veröffentlichung verwendet, die als Nr. 9 der 'Mitteilungen aus dem geodätischen Institut an der E.T.H. in Zürich' erschienen ist.

In der Einführung von Prof. Kobold und in der Dissertation sind unter anderem folgende Punkte enthalten (Zitate):

- a. Eine der wichtigeren Fehlerursachen bei der Strichdistanzmessung liegt ohne Zweifel in der ungleichen vertikalen Refraktion bei der oberen und bei der unteren Ablesestelle.
- b. Als wichtigste Neuerung ist eine Anordnung zu betrachten, mit welcher die bisher übliche Schätzung im Zentimeterfeld durch eine Ablesung ersetzt wird.
- c. Die hohe Genauigkeit des DK-RV wird nur erreicht, wenn die systematischen Instrumentalfehler genau berücksichtigt werden.

Zu Punkt a muss bemerkt werden, dass der Übergang von der vertikalen auf die horizontale Latte deshalb erfolgte, da die vertikale Refraktion die Genauigkeit der Distanzmessung ungünstig beeinflusst hat.

Schon in 1948 hat Bjerhammar jedoch darauf hingewiesen (Bjerhammar, 1949), dass, wenn der unterste Strahl mit wenigstens einem Meter vom Boden entfernt bleibt, der Einfluss der Differential-Refraktion auf die Distanzmessung mit der vertikalen Latte so klein ist, dass er vernachlässigt werden kann. Auch Danial findet bei seiner Refraktionsuntersuchung Zahlen (Unterschiede zwischen den Bodenabständen von 1 m und 1,5 m) die dermassen klein sind (ungefähr ein Drittel des mittleren Fehlers im Unterschied von zwei Messungen), dass diesen keine reelle Bedeutung beigemessen werden kann.

Die Erneuerung, die Kobold in Punkt b anführt, ist das Prinzip der Transversale, das Dieperink (1924) schon in 1924 angewendet hatte. Die durch Danial erörterte Lattenablesung stimmt vollkommen mit der durch Heckmann schon in 1928 entworfenen horizontalen Latte (Breithaupt & Sohn, 1931) überein.

Punkt c verdient die grösste Beachtung, da es sich hier um die Genauigkeit handelt, die erzielt werden kann. Danial setzt drei Korrekturen ein:

1. eine für die Lattenteilung;
2. eine für den unrichtigen Stand des geneigten Fadens, und

Tabelle 18. Genauigkeit von Kern DK-RV.

L (m)	a (cm)	b (cm)	c (cm)
10	0,77	0,80	1,08
20	1,02	1,04	1,27
30	1,11	1,13	1,34
40	1,19	1,21	1,41
50	1,50	1,52	1,68
60	1,61	1,62	1,78
70	2,10	2,11	2,23
80	2,11	2,12	2,24
90	2,99	3,00	3,08
100	3,71	3,72	3,79
110	3,92	3,93	3,99
120	4,22	4,23	4,29

Spalte a: m.F. der Distanz, bestimmt von Danial.

Spalte b: m.F. ohne Korrektion für die Lattenteilung.

Spalte c: m.F. ohne Korrektion für die Lattenteilung und für die Steigung des geneigten Distanzfadens.

3. eine für den quadratischen Zusammenhang zwischen Distanz und Ablesung.

Um mit dem letzteren zu beginnen, ist der Zusammenhang zwischen Distanz und Ablesung bei einem Fernrohr mit Fokussierlinse tatsächlich quadratisch und so darf die Annäherung bei kurzen Distanzen nicht durch eine lineare Funktion erfolgen. Bei einer Konstantenbestimmung, bei welcher sehr kurze Distanzen vorkommen, muss deshalb die Ausgleichung quadratisch erfolgen (siehe auch Abschnitt 3.4). Den Umstand, dass man keine lineare Annäherung anwenden darf, kann man nicht einen systematischen Instrumentalfehler nennen.

Wenn man die zwei ersten Korrektionen nicht einsetzt, sondern sie als zufällige Fehler betrachtet, dann ergibt sich:

für die Latte: m.F = $\pm 2,2$ mm, und

für den geneigten Faden: m.F = $\pm 7,9$ mm.

Wenn man diese Fehler – quadratisch – zum mittleren Fehler addiert, wie dies bei Danial erfolgte, dann ergibt sich die Tabelle 18. Wie aus dieser ersichtlich ist, hat die Vernachlässigung der Korrektion für den geneigten Faden nur bei 10 und 20 m einen merklichen Einfluss auf die Genauigkeit. Bei der Polygonmessung kommen solche Distanzen normalerweise nicht vor. Man kann deshalb feststellen, dass die durch Danial eingesetzten Korrektionen für die Latte und für den unrichtigen Stand des geneigten Fadens die Genauigkeit nicht erhöhen.

Die wichtigste Fehlerquelle bei der Fadendistanzmessung, nämlich die Fokussierung wird in der üblichen Weise behandelt. Das heisst, dass die Erklärung, welche für den Mittelfaden gültig ist, hier mit Unrecht für die Distanzfäden verwendet wird (siehe Abschnitt 3.2).

Unter den Fehlerquellen ist die Temperatur weder bei der Latte, noch bei der Luft und auch beim Instrument nicht erwähnt.

Einen Teil der Messungen hat Danial mit einer Blende auf dem Okular ausgeführt. Aus den Messungen kann man ableiten, dass durch diese Blende die Genauigkeit, wenn auch nur in geringem Masse, erhöht wird. Schade, dass Danial uns nichts über die Stellung und den Diameter der Blende mitgeteilt hat.

5 Schlussbetrachtung: Doppelbild oder Distanzfäden?

Aus unseren Untersuchungen ist hervorgegangen, dass wenn es gelingt den Einfluss der Fehlfokussierung auszuschalten, die Fadendistanzmessung ebenso genau ist, wie die Doppelbilddistanzmessung. Die grösste Genauigkeit kann bei der Fadendistanzmessung eigentlich nur auf fotografischem Wege erzielt werden. Die Wahl zwischen den beiden Methoden kann so durch andere Faktoren bestimmt werden.

Zu allererst muss die Wahl getroffen werden, welcher Fernrohrtyp für die Fadendistanzmessung am besten geeignet ist. Aus den Schlussfolgerungen des Kapitels 3 geht hervor, dass diese Wahl schon getroffen ist: dem Fernrohr mit Ausziehhokular muss der Vorzug gegeben werden. Der mechanische Nachteil dieses Fernrohrs kann dadurch behoben werden, dass der Strahlenlauf mit Hilfe von vier Spiegeln geknickt wird und dass zwei dieser Spiegel so angebracht werden, dass sie zusammen verschoben werden können.

Der Einfluss der Temperatur ist beim Doppelbilddistanzmesser und beim Fadendistanzmesser mit Ausziehhokular derselbe.

Für die Wahl des Fadendistanzmessers spricht hier: die einfachere Optik und gegen den Doppelbilddistanzmesser sprechen die Bildfehler des Prismas und der getrennte Strahlenlauf für beide Bilder.

Aus den obenerwähnten Erwägungen muss die Wahl auf den Fadendistanzmesser fallen. Die Blende, welche den Einfluss der Fehlfokussierung ausschaltet, kann auch zur Steigerung der Genauigkeit bei der Winkelmessung und beim Nivellieren angewendet werden.

Zum Schluss noch eine Bemerkung über die Parallaxe (und/oder über die Fehlfokussierung). Deren Einfluss kann durch eine Blende ausgeschaltet werden, so dass die Parallaxe in der Praxis kein Problem mehr darstellt. Weder durch die Forschungsarbeiten von Engi, noch durch unsere eigenen Untersuchungen konnte das Problem der Parallaxe an sich vollkommen gelöst werden.

Anhang: Die angewendete Instrumente

Wir sind praktisch bei allen Untersuchungen von bestehenden Instrumenten ausgegangen. Als erstes Beispiel dient Abb. 3. An das Fernrohr des Theodolits ist ein Sonderteil angebaut, wodurch eine Kamera hinter das Fernrohr angebracht werden konnte. Vor jeder Aufnahme musste jedoch die Kamera durch eine Lupe ersetzt werden.

Eine erste Änderung ist auf Abb. 43 ersichtlich. Die Kamera ist aufklappbar, wodurch eine schnelle Fokussierung möglich wird. Man sieht dass vor das Fernrohr ein Rhomboprisma befestigt ist. Ein Nachteil war jedoch, dass beim Umklappen der Kamera sich die Neigung des Fernrohrs ziemlich stark geändert hat, so dass das Lattenbild auf den Rand des Bildes gelangte oder gänzlich wegfiel.

Als es sich zeigte, dass das Rhomboprisma selbstreduzierend war und als wir den Fadendistanzmesser der Prüfung mit unterzogen hatten, haben wir einen Theodolit, den Th-3 von Zeiss Nr. 151746, zu einen sogenannten Polyphot umgebaut, zu einem Instrument für fotografische Polygonierung. In Abb. 44 ist das Instrument abgebildet. Auf Abb. 45 ist der Strahlenlauf angegeben. Der Vertikalkreis ist vom Fernrohr losgekoppelt und durch Zahnräder mit dem Spiegel über dem Objektiv verbunden. Der Vertikalkreis dreht sich zweimal so schnell wie der Spiegel, so dass

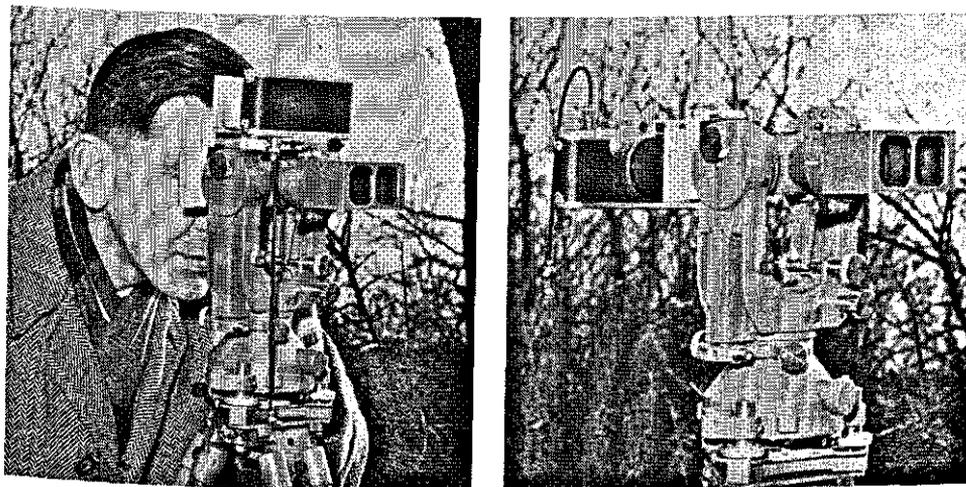


Abb. 43. Fokussieren mit aufgeklappter Kamera (links) und Kamera im Stand für das Fotografieren (rechts).

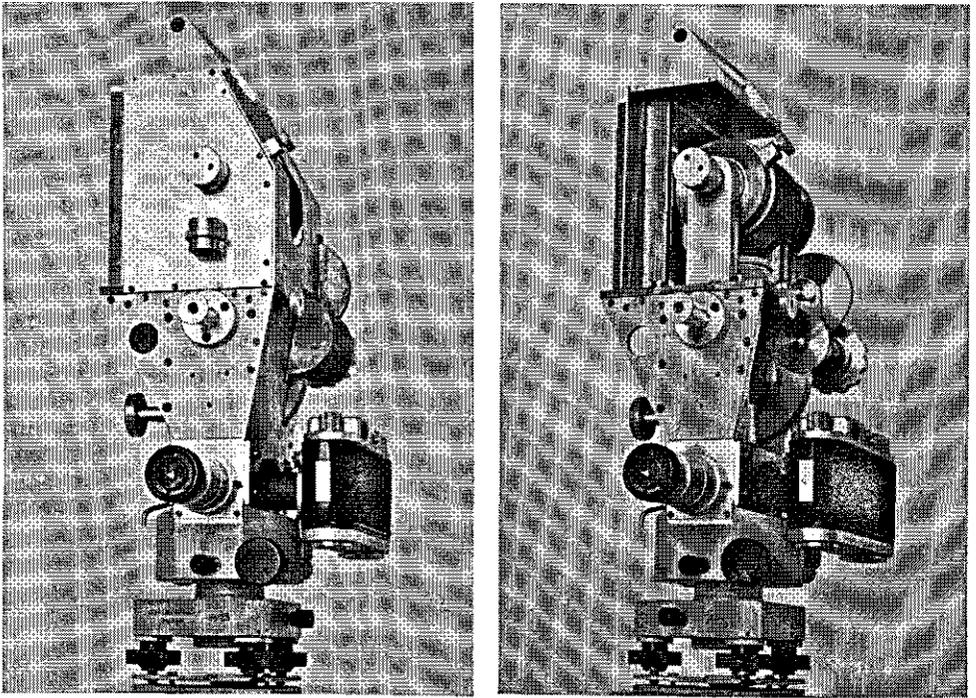


Abb. 44. Polyphot. Ansicht (links) und Ansicht ohne Deckplatten (rechts).

der Höhenwinkel richtig angegeben wird. Auf Abb. 46 ist ein Unterteil ersichtlich, der unter das Okular drehbar angebracht ist. In diesem Unterteil befinden sich drei Linsen, eine für das Lattenbild, eine für beide Kreise und eine für das Standpunktzeichen. Bei einer rechtwinkligen Drehung kann man mit Hilfe eines Extra-Okulars zielen und fokussieren.

Die in den Abschnitten 2.4 und 3.1 angeführten Messungen wurden mit dem Polyphot ausgeführt. In dieses Instrument konnte man jedoch keine Blende mehr einbauen, um den Einfluss der Fokussierung bei der Fadendistanzmessung auszuschalten. Für visuelle Beobachtungen benützten wir den Wild N-3, bei dem auf die Fokussierlinse eine Messuhr befestigt ist und hinter das Okular eine einstellbare Blende (Abb. 47).

Auf Abb. 48 ist das Instrument abgebildet, mit dem die Untersuchung über die Fokussierung ausgeführt wurde. Bei diesem war das Okular feststehend und wurde das Objektiv bewegt. Die Bewegung konnte auf der Messuhr abgelesen werden. Nach der ersten Reihe von Beobachtungen wurde ein Wechselgetriebe eingebaut. Dieses ist hauptsächlich dann erforderlich, wenn der mittlere Fehler der Fokussierung gross ist. Dieses Instrument mit dem Objektiv des Hildebrand Nr. 61229, wurde auch bei der zweiten Reihe der Messungen verwendet, die im Abschnitt 3.4 beschrieben sind. Bei diesen Messungen wurde eine Blende in die vordere Brennebene des Objektivs gesetzt. Beim Fokussieren wurde die Blende herausgenommen. Abb. 49 zeigt die Aufstellung mit einer Robot-Kamera hinter dem Okular.

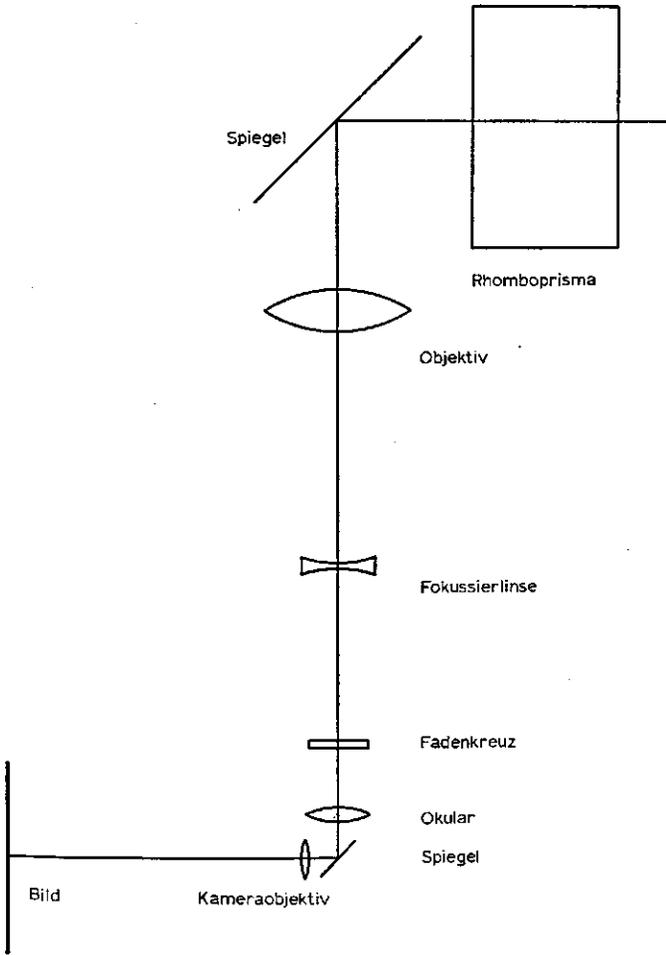


Abb. 45. Strahlenlauf in Polyphot.

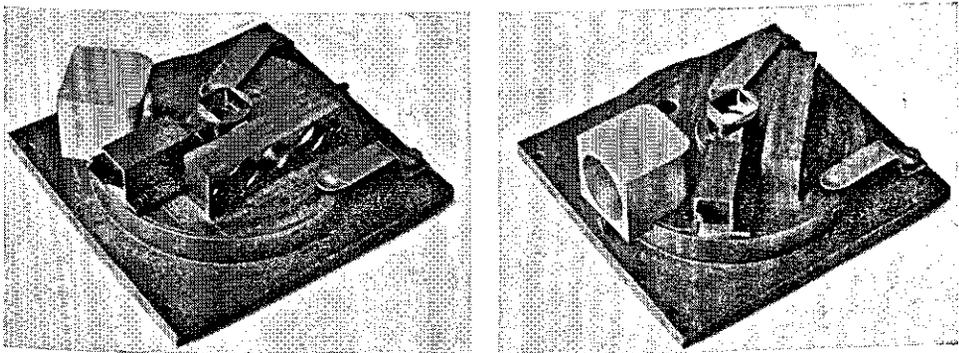


Abb. 46. Drehbarer Unterteil des Polyphots. Links im Stand für die fotografische Aufnahme und rechts im Stand für die visuelle Fokussierung.

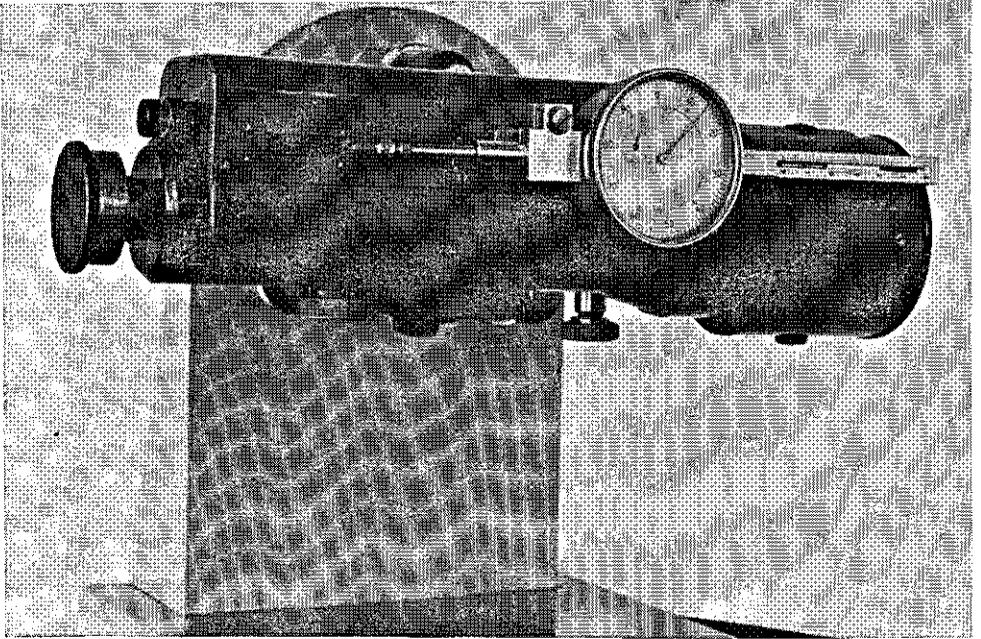


Abb. 47. Fernrohr Wild N-3 mit einer Messuhr auf der Fokussierlinse und hinter dem Okular eine einstellbare Blende.

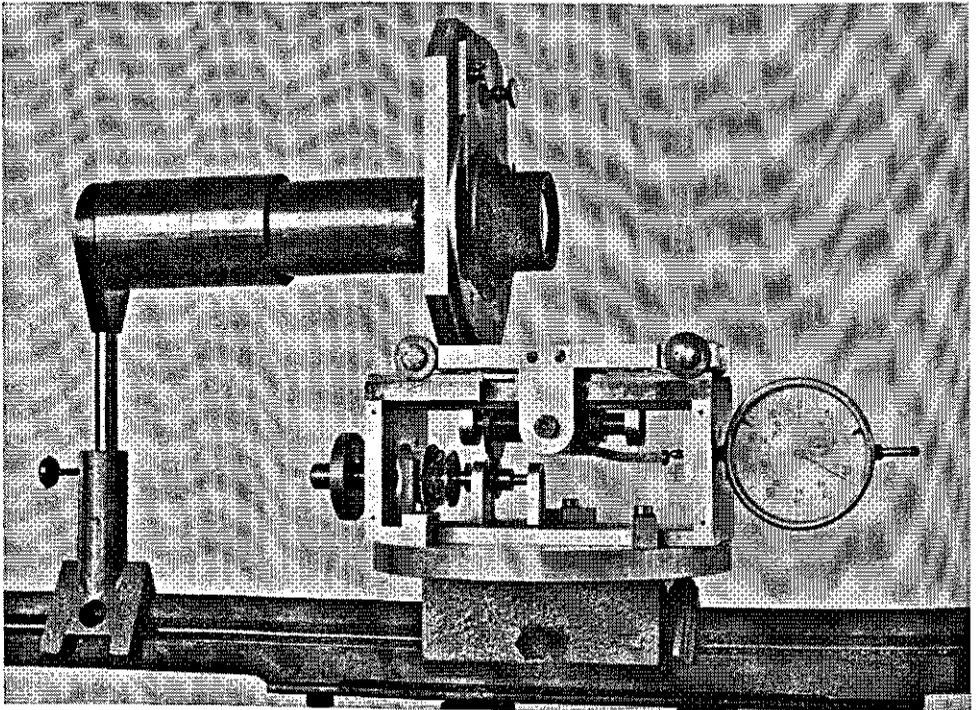


Abb. 48. Instrument zur Bestimmung der Genauigkeit der Fokussierung.

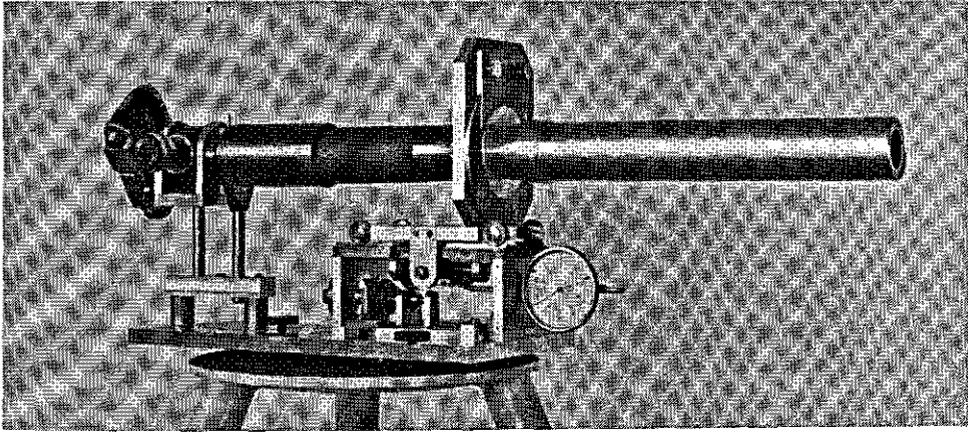


Abb. 49. Versuchsinstrument mit Blende in der vorderen Brennebene und Robot-Kamera.

Zusammenfassung

Wenn man die Doppelbilddistanzmessung durch fotografische Aufnahmen des Lattenbildes automatisieren will, müssen die durch das Fernrohr und das Prisma hervorgerufenen Fehler behoben oder korrigiert werden. Eine Korrektur ist zwar möglich, kann in der Praxis jedoch nicht ausgeführt werden. Es sind Systeme beschrieben, bei welchen durch das Fernrohr und Prisma bedingten Fehler nicht vorkommen. Bei diesen Systemen wird die Ablenkung durch Spiegelungen gebildet. Diese Systeme zeigen jedoch – eben in bezug auf das Fotografieren – solche Nachteile, dass sie keine praktische Lösung bieten. Eine ziemlich gute Lösung ist eine von der Mitte heraus geteilte und bezifferte Latte. Mit einer solchen Latte wurden gute Ergebnisse erzielt.

Bei der Fadendistanzmessung ergeben sich die Probleme durch die Fokussierung. Diese werden eingehend erörtert. Auf Grund zahlreicher Beobachtungen wurde für den mittleren Fehler der Fokussierung eine Formel gefunden.

Möglichkeiten für das Ausschalten des Einflusses der Fehlfokussierung sind beschrieben. Die beste Lösung ist das Anbringen einer Blende hinter das Okular. Bei einem Fernrohr mit Ausziehhokular muss die Blende in die hintere Brennebene des Okulars eingesetzt werden. Bei einem Fernrohr mit Innenfokussierung muss die Blende in das Bild der Ebene eingesetzt werden, die ebenso weit von der Fokussierlinse entfernt ist, wie die Fokussierlinse vom Fadenkreuz.

Der Einfluss der Temperatur ist bei der Doppelbilddistanzmessung derselbe, wie bei der Fadendistanzmessung mit einem Fernrohr mit Ausziehhokular. Bei einem Fernrohr mit Fokussierlinse hat die Temperatur einen ungünstigeren Einfluss.

Es sind Messungen mit Fadendistanzmessern angeführt, bei welchen der Einfluss der Fokussierung ausgeschaltet ist. Es zeigt sich dabei, dass beide Methoden der optischen Distanzmessung in gleichem Masse genau sind.

Summary

In an attempt to automate the double-image distance measurement by photographing the rod image, the errors of telescope and prism must be either eliminated or corrected. In theory, corrections can be made, but in practice they do not appear to be feasible. A description is given of systems which are free of these errors. In these systems the deviations are caused by reflections. Especially in photography they show such disadvantages, that they are of no use in practice. A reasonable solution is obtained by the use of a rod which is marked from the centre into both directions. The results, obtained with this rod are satisfactory.

When measuring distances by the use of stadia hairs, focussing problems appear. These problems are discussed extensively. With the aid of a large series of observations, a formula has been found for the standard deviation in focussing.

A description is given of the possibilities for eliminating the influence of the incorrect focussing. Placing a stop behind the eye piece appears to be the best solution.

In the telescope with external focussing the stop should be placed in the rear focal plane of the eye lens. In the telescope with internal focussing the stop must be placed in the image of the plane, equally far in front of the focussing lens as the focussing lens lies in front of the crosshairs.

The distance measurements by means of double image as well as by means of stadia hairs, using a telescope with external focussing, turn out to be affected by temperature fluctuations in the same manner.

The telescope with internal focussing is more strongly affected by temperature changes.

Measurements of distances by means of stadia hairs with elimination of the influence of incorrect focussing are given. After this elimination both methods of optical distance measurement turn out to be equally accurate.

Samenvatting

Indien men de dubbelbeeldafstandmeting wil automatiseren door middel van het fotograferen van het baakbeeld moeten de fouten ontstaan door kijker en prisma uitgeschakeld of gecorrigeerd worden. Correctie is mogelijk maar praktisch niet uit te voeren. Systemen die de fouten van prisma en kijker niet hebben, worden beschreven. Bij deze systemen wordt de deviatie verkregen door spiegelingen. Deze systemen tonen zulke nadelen, juist bij fotograferen, dat zij geen praktische oplossing geven. Een redelijke oplossing wordt verkregen door een van uit het midden verdeelde en becijferde baak. De resultaten verkregen met deze baak zijn goed.

Bij de dradenafstandmeting geeft de scherpstelling problemen. Hierop wordt uitvoerig ingegaan. Door een grote reeks waarnemingen wordt een formule gevonden voor de standaard-afwijking in de scherpstelling.

Mogelijkheden voor het uitschakelen van de invloed van de foutieve scherpstelling worden beschreven. De beste oplossing is die, waarbij een diafragma geplaatst wordt achter het oculair. Bij de kijker met uitschuifbare oculairbuis dient het diafragma geplaatst te worden in het oogzijdig brandvlak van het oculair. Bij de kijker met centrale instellens dient het diafragma geplaatst te worden in het beeld van het vlak, dat evenver voor de instellens staat als de instellens voor de kruisdraden ligt.

De invloed van de temperatuur bij de dubbelbeeldafstandmeting en bij de dradenafstandmeting met een kijker met uitschuifbare oculairbuis blijkt dezelfde te zijn.

Bij de kijker met centrale instellens is de invloed van de temperatuur ongunstiger.

Metingen zijn weergegeven van dradenafstandmeting waarbij de invloed van de foutieve scherpstelling uitgeschakeld is. Beide methoden van optische afstandmeting blijken nu even nauwkeurig te zijn.

Literatur

- BAESCHLIN, F. 1925 Kurze Darstellung der Gesetze der Prismenoptik als Grundlage des Verständnisses für moderne Distanzmesser. In: Die optische Distanzmessung und ihre Anwendung bei der Schweiz. Grundbuchvermessung. Zürich.
- BAHNERT, G. 1958 Untersuchungen des Einflusses des Beobachters, der Temperatur und des Zustandes der Atmosphäre auf die optische Präzisionsdistanzmessung. Diss., Dresden.
- BERGSTRAND, E. 1950 A determination of the velocity of light. Stockholm.
- BJERHAMMER, A. 1949 A contribution to the methods of optical distance measuring. Stockholm.
- BOSSHARDT, R. 1930 Optische Distanzmessung und Polarkoordinatenmethode. Stuttgart.
- BOUWMEESTER, H. 1955 Voortplanting van fouten bij een tweetal methoden van indirecte afstandmeting. Dipl. Arbeit, Wageningen.
- BREITHAUPT, F. W. & SOHN 1931 Ein Fadendistanzmesser hoher Genauigkeit. *Allg. Vermess. Nachr.* 45: 743-747.
- CREMER, P. 1934 Beitrag zur geodätischen Entfernungsmessung mittels ablenkender Keile. Diss., Aachen.
- CZAPSKI, S. & 1924 Grundzüge der Theorie der optischen Instrumente. 3. Aufl., EPPENSTEIN, O. Leipzig.
- DANIAL, N. 1961 Untersuchung über die regelmässigen und zufälligen Fehler und die Genauigkeit der optischen Distanzmessung mit vertikaler Latte. Diss., Zürich.
- DIEPERINK, J. W. 1924 Ein neue Skalateilung. *Z. InstrumKde* 44: 381-409.
- ENGL, P. 1917 Untersuchungen über den mittleren Fehler der Einstellung des Fadenkreuzes in die Bildebene an geodätischen Fernröhren. Diss., Zürich.
- GEHRCKE, E. 1927 Handbuch der physikalischen Optik. Leipzig.
- GIJSEN, J. C. O. VAN 1956 Fehler der Doppelbildentfernungsmessung, die von den optischen Bauelementen herrühren. *Vermess.-tech. Rdsch.* 18: 166-171.
- GIJSEN, J. C. O. VAN 1961 Bestrijding van fouten en afwijkingen in de optische afstandmeting. *Tijdschr. Kadaster Landmeetk.* 77: 288-300.
- GREGORY, R. L., 1966 Eye and Brain. Milan.
- GRUBER, O. VON 1955 Optische Streckenmessung und Polygonierung. 2. Aufl., Berlin.
- HECKMANN, H. 1939 Die Genauigkeit des Entfernungsmessers Heckmann-Breithaupt. *Allg. VermessNachr.* 51: 377-385.
- HECKMANN, H. 1954 Erfahrungen mit dem Breithaupt-Heckmann-Präzisionsfadentfernungsmesser. *Vermess.-tech. Rdsch.* 16: 150-154.
- HEEL, A. C. S. VAN 1943 Inleiding in de optica. 's-Gravenhage.
- HELMHOLTZ, H. VON 1909 Handbuch der physiologischen Optik. Hamburg.

- JORDAN, W., EGGERT, O. & KNESSL, M. 1963 Handbuch der Vermessungskunde. Band II und III. 10. Aufl., Stuttgart.
- JORDAN, W., REINHERTZ C. & EGGERT, O. 1914 Handbuch der Vermessungskunde. 8. Aufl., Stuttgart.
- KÖNIG, A. 1929 Geometrische Optik. Leipzig.
- KÖNIG, A. 1929 Physiologische Optik. Leipzig.
- KRUIDHOF, A. 1933 Dubbelbeeldafstandmeting met behulp van Dieperink-baak, noniusbaak en verbeterde noniusbaak. *Tijdschr. Kadaster Landmeetk.* 49: 137-152
- KRUIDHOF, A. 1954 Beseitigung optischer Fehler durch systematisches Distanz-Messen. *Vermess.-tech. Rdsch.* 16: 321-325; 368-372.
- OGLE, N. 1962 The optical space sense. In: H. Davson (Editor): *The eye*. Vol. 4. Acad. Press.
- POHL, R. 1941 Einführung in die Optik. Berlin.
- ROELOFS, R. 1941 Fadendistanzmesser mit Innenfokussierung. *Z. InstrumKde* 61: 137-147.
- ROHR, M. VON 1904 Die Bilderzeugung in optischen Instrumenten. Berlin.
- UHINK, W. 1929 Das Breithaupt-Doppelbild-Tachymeter. *Z. InstrumKde* 49: 581-595.
- UHINK, W. 1932 Betrachtungen über Fernrohre mit Entfernungsmessfäden. *Z. InstrumKde* 52: 435-442.
- WAGNER, R. 1886 Über die mit dem Reichenbach'schen Distanzmesser erreichbare Genauigkeit usw. *Z. VermessWes., Stuttg.*, 15: 49-60; 81-90; 97-104.