

# Der neue Sekundentheodolit Kern DKM 2-A

Autor(en): **Aeschlimann, H.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Mensuration, photogrammétrie, génie rural**

Band (Jahr): **70-F (1972)**

Heft 1

PDF erstellt am: **01.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-224997>

## **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

## **Haftungsausschluss**

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

## Der neue Sekundentheodolit Kern DKM2-A

H. Aeschlimann

### Zusammenfassung

Der von Grund auf neu konstruierte Sekundentheodolit Kern DKM2-A zeichnet sich durch verschiedene Neuerungen aus. Die wesentlichsten sind der Kompensator am Höhenkreis und die digitalisierte Groablesung der Kreise. Nach den ausführlichen technischen Daten und einigen allgemeinen konstruktiven Überlegungen wird näher auf die Gedanken eingegangen, die zu den Lösungen für Groablesung und Kompensator führten.

### Résumé

La construction du nouveau théodolite à secondes Kern DKM2-A est caractérisée par quelques innovations remarquables. Les innovations principales sont le compensateur automatique du cercle vertical et la lecture grossière des cercles digitalisée. Après les données techniques explicites et quelques indications quant à la construction générale du théodolite on entrera en détail sur les solutions pour la lecture grossière et le compensateur.

### Summary

The new one seconds theodolite Kern DKM2-A includes a number of interesting features, mainly the automatic compensator for the vertical circle and the digitized readings of the circles. After the full technical data and some general remarks on construction of new classical theodolites the main investigations for the solution of the compensator and the digitized reading are pointed out.

### I. Zweck

Eine Bogensekunde alter Teilung wird in der Vermessungspraxis als bequemes Maß zur Abschätzung von Genauigkeiten verwendet, einerseits, weil sie die kleinste Einheit der Sexagesimalteilung darstellt, und andererseits, weil sie der Meßgenauigkeit von Sekundentheodoliten entspricht. Da der Stand der Technik gestattet, Sekundentheodolite ohne übermäßigen Aufwand herzustellen, wurden sie im Laufe der Zeit zum Inbegriff eines genauen und vielseitigen Winkelmeßinstrumentes. Sogar für den Konstrukteur stellt die Aufgabe, mit den ihm zu Gebote stehenden Mitteln ein auf eine Bogensekunde genau messendes Instrument zu entwerfen, ohne an die Grenzen des technisch Möglichen zu gehen, eine verlockende Herausforderung seines Könnens dar.

Die Genauigkeitsansprüche und Arbeitsmethoden bei der Lösung der einzelnen Vermessungsprobleme sind verschieden. Daher entstanden Instrumente unterschiedlicher Genauigkeit und Zweckbestimmung. Für jede vorliegende Vermessungsarbeit kann somit ein optimal geeignetes Instrument gewählt werden. Als Folge davon möchte im allgemeinen der Benutzer eines neuen Instrumentes besonders über Genauigkeit und Anwendungsgebiete Aufschluß erhalten. Bei Sekundentheodoliten taucht diese Frage selten auf, da sie nicht nur dann gewählt werden, wenn ihre Genauigkeit angemessen scheint, sondern immer auch zur Lösung von fehlertheoretisch ungenügend untersuchten Vermessungsproblemen. Zeigt sich später, daß die Genauigkeit zu hoch ist, so war doch der Meßaufwand gegenüber einem optimal geeigneten Theodolit kaum größer, und wenn sich

herausstellt, daß die Genauigkeit nicht befriedigt, so würde sie in Messungen mit einem Präzisionstheodolit nur um etwa einen Faktor  $1,5 \div 2$  höher liegen. Theodolite geringerer Genauigkeit sind deshalb nicht etwa weniger berechtigt, doch kann die Einbuße an Genauigkeit ein Risiko enthalten, gegen das man sich nur durch Erfahrung oder eine fehlertheoretische Untersuchung des vorliegenden Vermessungsproblems sichern kann.

Es gibt im Vermessungswesen kaum Methoden, die für gewisse Zwecke nicht die Genauigkeit einer alten Bogensekunde erfordern würden. Neben der Triangulation, für die meistens – oft zwar übertriebenerweise – Sekundengenauigkeit gefordert wird, gilt das besonders für Präzisionspolygonierung und genaue Absteckungen. Daraus ergibt sich ein triftiger Grund zur Wahl eines Sekundentheodolits: Man möchte trotz der Vielfalt der Vermessungsprobleme mit einem einzigen Instrumententyp auskommen. Eine gewisse Unhandlichkeit und die für jede Messung erforderliche Einstellung des Kreismikrometers nimmt man dabei in Kauf. Der neue DKM2-A zeichnet sich vor allem durch seine für Sekundentheodolite hohe Meßgenauigkeit, verbunden mit

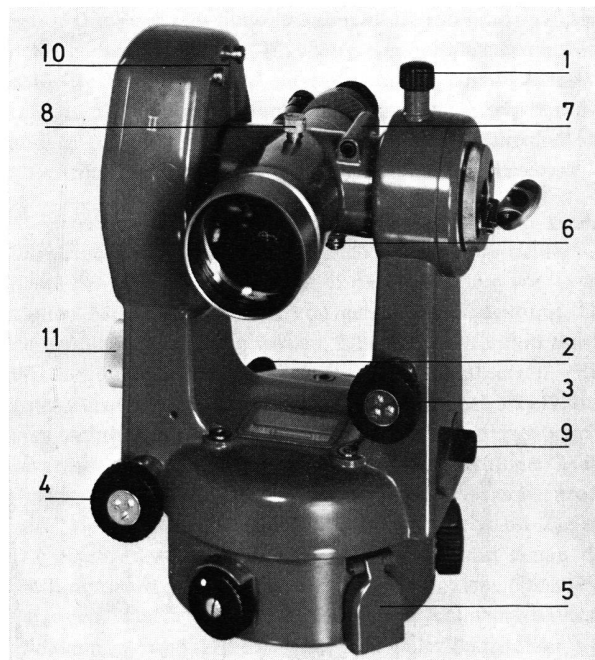


Abb. 1 Kern DKM2-A.

- |  |  |
|--|--|
| 1 Kippachsklemme                                   | 7 Sucherkollimator                     |
| 2 Stehachsklemme                                   | 8 Spiegel für Strichplattenbeleuchtung |
| 3 Höhenfeintrieb                                   | 9 Optisches Lot                        |
| 4 Seitenfeintrieb                                  | 10 Führung für Reiterlibelle           |
| 5 Schutzdeckel für Grobtrieb des Horizontalkreises | 11 Mikrometerknopf                     |
| 6 Beleuchtungsanschluß für Autokollimationsokulare |  |

bequemer Bedienung, aus. Er eignet sich ebensogut für Absteckungen wie für normale Vermessung. Abmessungen und Gewicht sind bescheiden. Er dürfte somit dem Großteil aller Vermessungsaufgaben gewachsen sein.

## II. Technische Daten des DKM2-A

### Fernrohr

Vergrößerung	
Astronomisches Fernrohr	30 ×
Terrestrisches Fernrohr	31 ×
Objektivöffnung	45 mm
Gesichtsfeld auf 1 km	
Astronomisches Fernrohr	26 m
Terrestrisches Fernrohr	25 m
Objektivbrennweite	
Astronomisches Fernrohr	266 mm
Terrestrisches Fernrohr	280 mm
Okularbrennweite	9 mm
Kürzeste Zielweite	1,7 m
Multiplikationskonstante	100
Additionskonstante	0
Verschiebung des anallaktischen Punktes bei Umfokussieren von ∞ auf 5 m	30 mm

### Kreise, Kreisablesung

Teilungsdurchmesser	
Horizontalkreis, bezifferte und unbezifferte Teilung	75 mm / 72 mm
Vertikalkreis, bezifferte und unbezifferte Teilung	69 mm / 71 mm
Teilungsintervall	20' / 20 <sup>c</sup>
Teilungsintervall der Mikrometerskala	1" / 2 <sup>cc</sup>
Vergrößerung der Ablesemikroskope	
Horizontalkreis	43 ×
Vertikalkreis	48 ×
Numerische Apertur der Ablesemikroskope	
Horizontalkreis	0.11
Vertikalkreis	0.10

### Kompensator und Stützenlibelle

Flüssigkeitskompensator am Höhenkreis	
Einspielgenauigkeit	≲ 1" / 3 <sup>cc</sup>
Einspielzeit	~ 3 sec
Kompensationsfehler	< 5% der Stützenschiefe
Kompensationsbereich	
Theoretisch	± 10'
Praktisch	± 2'

Gründe für den Unterschied: Verschiebung des Grobbleseindex gegenüber der Koinzidenzstelle in Funktion der zu kompensierenden Neigung; unsymmetrischer Eingriff von Haupt- und Hilfstellung durch Bildversetzung senkrecht zur Teilung, erzeugt durch die in jeder Richtung horizontale Flüssigkeitsoberfläche des Kompensators.  
Angabe der Stützenlibelle 22" / 2 mm

### Antriebe

Untersetzung zwischen Mikrometerknopf und Ritzel zur Verschiebung der Mikrometerskala	1:3,7
Untersetzung der Feintriebe von Horizontal- und Vertikaleinstellschraube	1:2

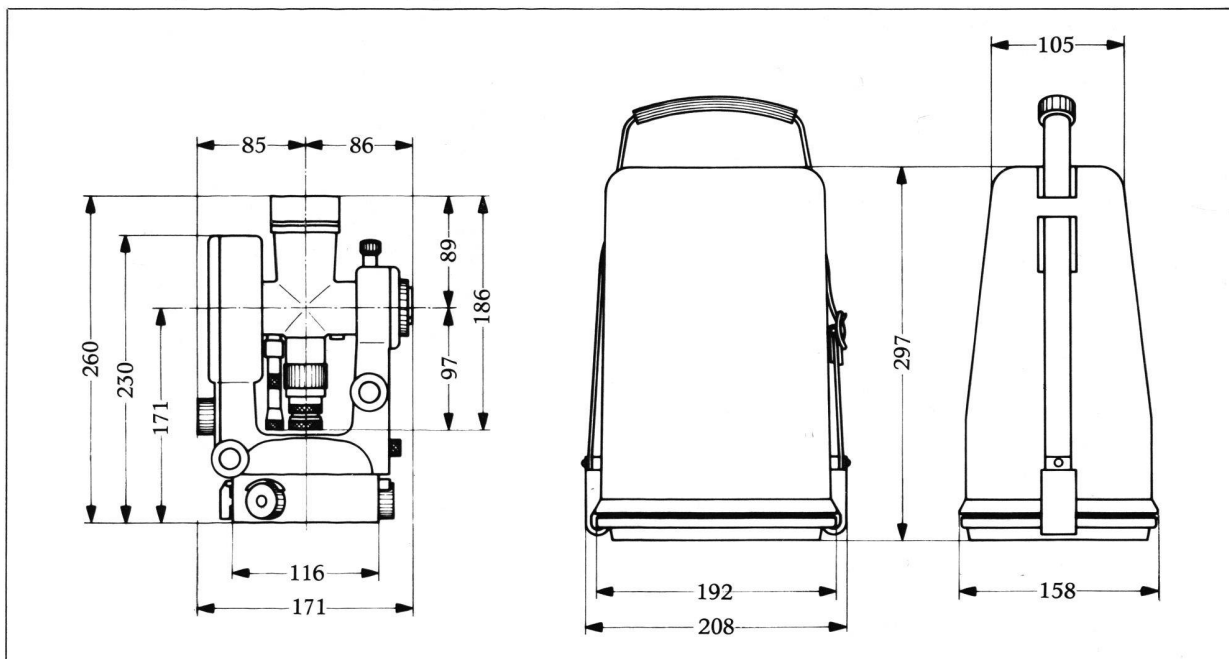
### Optisches Lot

Vergrößerung	3 ×
Fokussierbereich	∞ – 0,7 m
Gesichtsfeld bei Fokussierung auf 1,5 m	10 cm

### Abmessungen und Gewicht

Kippachsenhöhe	171 mm
Durchmesser der Kugellaufbahn der Stehachse	103 mm
Länge der Kippachse zwischen den Lagerstellen	82 mm
Höhenverstellbereich des Exzenters einer Fußschraube	0,6 mm
Gewicht des Instrumentes	6,2 kg
Gewicht des leeren Behälters	2,4 kg

Abb. 2 Abmessungen des DKM2-A und des Behälters.



### III. Allgemeines zur Konstruktion des DKM 2-A

Die Entwicklung neuer Vermessungsinstrumente läuft in zwei Richtungen: einerseits nach Entlastung des Beobachters und andererseits nach höherer Genauigkeit. Die heutigen technischen Kenntnisse und Möglichkeiten erlauben viel eher, den Beobachter zu entlasten – wenn nicht sogar teilweise zu ersetzen –, als höhere Genauigkeit zu erzielen. In Zukunft dürften wohl die am Theodolit eingestellten Richtungen und Höhenwinkel digital mit Sekundengenauigkeit angezeigt werden, womit ohne Schwierigkeiten die Meßwerte auch registriert und über eine Tastatur vom Beobachter adressiert werden können. Einzig die Adressierung der Meßwerte wird dem Beobachter kaum von einem Automaten abgenommen werden können, obwohl gerade hier am häufigsten Fehler begangen werden. Die Erfahrung zeigt, daß dabei mehr Irrtümer auftreten als bei Kreisablesungen. Hingegen wird sich die Genauigkeit der Teilkreise nur durch größere Entwicklungsarbeit um eine Größenordnung gegenüber den heute hergestellten Glaskreisen steigern lassen.

Der Beobachter kann bereits durch wesentlich weniger umfangreiche und billigere Maßnahmen als automatische Meßwertanzeige wirksam entlastet werden. Dazu gehören insbesondere Kompensatoren anstelle der Höhenkreislibelle, dann auch Feinstellschrauben, welche das hohe Auflösungsvermögen des Fernrohres auszunützen gestatten, ein übersichtliches Kreisablesesystem zur Vermeidung grober Ablesefehler, hohe Einstellgenauigkeit des Kreismikrometers oder auch die Möglichkeit, für Absteckungen den Horizontalkreis auf jeden beliebigen Wert mit Sekundengenauigkeit einstellen zu können.

Auch die Meßgenauigkeit von Neukonstruktionen läßt sich innerhalb gewisser Grenzen gegenüber den Vorgängerinstrumenten steigern. Gründe dafür sind der allgemeine Fortschritt in der Genauigkeit der Metall- und Glasbearbeitung, neue Werkstoffe, konsequentere Fehleranalyse in der Konstruktionsarbeit, strengere Auswahl der Einzelteile sowie häufigere und durchgreifendere Kontrollen während der Herstellung.

#### 1. Meßgenauigkeit

Unter Meßgenauigkeit wird üblicherweise der mittlere Beobachtungsfehler verstanden. Für den Instrumentenkonstrukteur ist diese Definition völlig unzureichend. Wenn der mittlere Fehler einer Beobachtung die Genauigkeit eines Meßinstrumentes wiedergeben soll, so muß er drei Bedingungen erfüllen, die zugleich die wichtigsten Eigenschaften eines guten Meßinstrumentes sind:

1. Unabhängigkeit von verschiedenen Beobachtern
2. Unabhängigkeit von der Übung, der Gewöhnung und der Ermüdung eines Beobachters
3. Unabhängigkeit von der Umgebungstemperatur und von Temperaturänderungen

Die beiden ersten Punkte sind im wesentlichen Eigenschaften der Kreisablesemittel, teilweise auch des Fernrohres; der letzte Punkt hängt vom Geschick des Konstrukteurs ab, die Unterschiede in der Wärmedehnung der notwendigerweise verschiedenen Materialien unschädlich zu halten. Erfüllt ein Meßinstrument die drei Forderungen, so erreichen alle Beobachter unter allen klimatischen Bedingungen gleich genaue Resultate. Der DKM 2-A erhielt daher ein den Forderungen 1 und 2 Rechnung tragendes Kreisablesesystem und

zur Befriedigung von Forderung 3 alle die Messung wesentlich beeinflussenden Teile aus Stahl.

Die Meßgenauigkeit eines Theodolits hängt größtenteils von der Genauigkeit des Achssystems und der Kreise ab. Achsfehler und Kreisfehler verfälschen jede Richtung mit gleicher gegenseitiger Lage von Achsen und Kreisen um gleiche Beträge.

#### 2. Kreisfehler

Für horizontale Richtungen lassen sich durch geschickte Anordnung der Messungen die Kreisfehler ausmitteln. Das Mittel aus mehreren Beobachtungen wird dadurch weitgehend von Teilungsfehlerinflüssen befreit, jedoch wird die Fehlerrechnung zu ungünstig ausfallen. Höhenwinkel lassen sich wegen des fest mit der Kippachse verbundenen Höhenkreises nicht auf diese Weise verbessern. Sie sind somit immer ungenauer als Horizontalrichtungen, was nach landläufiger Ansicht über die Refraktionsunsicherheit zulässig ist.

#### 3. Achsfehler

Die Achsfehler müssen in Fehler erster und zweiter Ordnung eingeteilt werden. Der Instrumentenkonstrukteur betrachtet alle Achsfehler, die sich durch Justierung beheben lassen, das heißt die Achsschiefen, als Fehler erster Ordnung. Fehler zweiter Ordnung sind alle jene, die auf Abmessungsfehlern der Einzelteile der Achsen beruhen. Die Achsschiefen werden vom Herstellerwerk in der Hoffnung, der Benutzer wisse über die Eliminationsverfahren der Achsfehlerinflüsse Bescheid, nur innerhalb gewisser, allerdings enger Grenzen gehalten und nicht restlos beseitigt. Für die Qualität eines Instrumentes sind nicht die Fehler erster Ordnung, sondern die Beträge der Fehler zweiter Ordnung maßgebend. Die Fehler zweiter Ordnung werden als Taumelfehler der Achsen bezeichnet [Matthias]. Sie müßten durch konstruktive Vorkehrungen und entsprechende Fertigungstoleranzen auf Beträge gebracht werden, die, verglichen mit den andern Meßfehlern, einflußlos sind. Taumelfehlerinflüsse lassen sich nur teilweise durch Meßverfahren eliminieren.

#### 4. Fehlerinflüsse des optischen Systems

Verglichen mit Achs- und Kreisfehlern sind die Fehlerinflüsse der Ziel- und Ablesemittel mit Ausnahme von eventuellen Mikrometerfehlern von geringerer Bedeutung. Da sie größtenteils zufällig wirken, läßt sich ihr Einfluß durch Wiederholungsmessungen gesetzmäßig herabsetzen. Ein gutes Fernrohr, das kleine Zielfehler sichert, gehört als Aushängeschild zur Tradition jeder Firma. Nur darf darob nicht vergessen werden, daß die Ablesoptik am endgültigen Meßwert mindestens den gleichen Fehleranteil wie das Fernrohr hat. Die Hauptarbeit des Beobachters besteht im Zielen. Die Kreisablesung muß dagegen mühelos und genau die Stellung des Kreisablesesystems gegenüber dem Kreis wiedergeben. Dafür ist die Qualität des Ablesemikroskops allein maßgebend. Die Gepflogenheit vieler Beobachter, wegen unzureichender Ablesegenauigkeit mehrere Kreisablesungen im Kopf zu mitteln, sollte mit Neukonstruktionen überflüssig werden.

### IV. Das Achssystem

#### 1. Wirkungen der Achsfehler

Im folgenden wird von Konstruktionselementen zur Kompensation der Einflüsse von Achsfehlern erster und zweiter



Ordnung abgesehen. Sie kommen für Sekundentheodolite ohnehin nicht in Betracht [Jochmann, Haller].

Stehachsenschiefe heißt die Abweichung der Stehachse von der Normalen auf eine Bezugsebene, Kippachsenschiefe der Winkel zwischen dieser Bezugsebene und der Kippachse. Wird als Bezugsebene eine Horizontalebene gewählt, so werden die Achsschiefen als Achsneigungen bezeichnet. Eine Stehachsenschiefe wirkt auf Richtungsmessungen in der Bezugsebene wie eine periodisch veränderliche Kippachsenschiefe. Da die Kippachsenschiefe bei Visuren parallel zur Bezugsebene einflußlos ist und bei den Justiertoleranzen der Instrumentenhersteller erst bei großen Winkeln zwischen Visur und Bezugsfläche meßbar werden, sind Achsschiefen bis zu Höhenwinkeln von  $10 \div 20^\circ$ , also in den meisten Fällen praktischer Vermessungen, nicht gefährlich.

Taumelfehler der Stehachse wirken wie kleine Änderungen der Kippachsenschiefe. Taumelfehler der Kippachse weisen neben einer Komponente, welche ebenfalls die Kippachsenschiefe verändert, noch eine Komponente senkrecht dazu auf, welche die Zielachse parallel zur Bezugsebene, also mit dem Horizontalkreis meßbar, verändert. Der Einfluß der Taumelfehler der Kippachse ist abhängig von der gegenseitigen Stellung von Achse und Lager. Liegen alle Visuren

parallel zur Bezugsebene, so bleibt die Stellung der Kippachse im Lager konstant. Die Fehler sind für alle Richtungen gleich und fallen daher in Richtungsdifferenzen weg. Anders liegen die Verhältnisse bei verschiedenen Kippwinkeln. Die Veränderungen der Azimutalkomponente des Taumelfehlers zwischen den einzelnen Visuren gehen voll in die Richtungsmessungen ein.

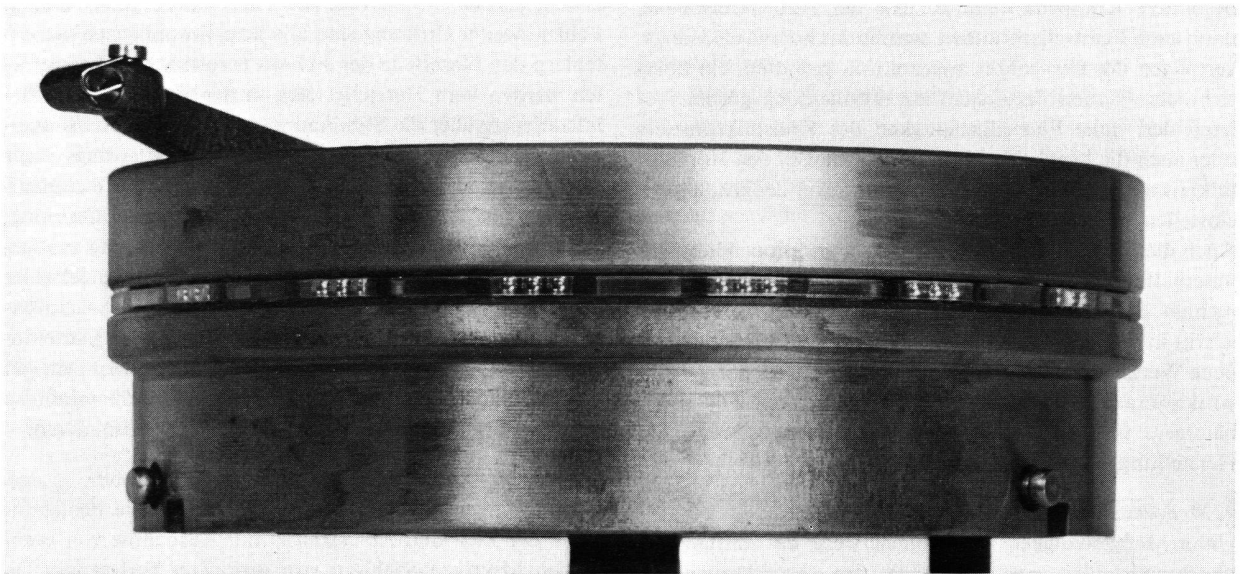
## 2. Stehachse

Die von Dr. Wild im Jahre 1938 im DKM2 eingeführte Achsialkugellager-Stehachse ermöglicht, grundsätzlich beliebig hohe Genauigkeiten zu erreichen. Die Genauigkeit von Zylinderachsen ist, neben der Führungslänge und dem

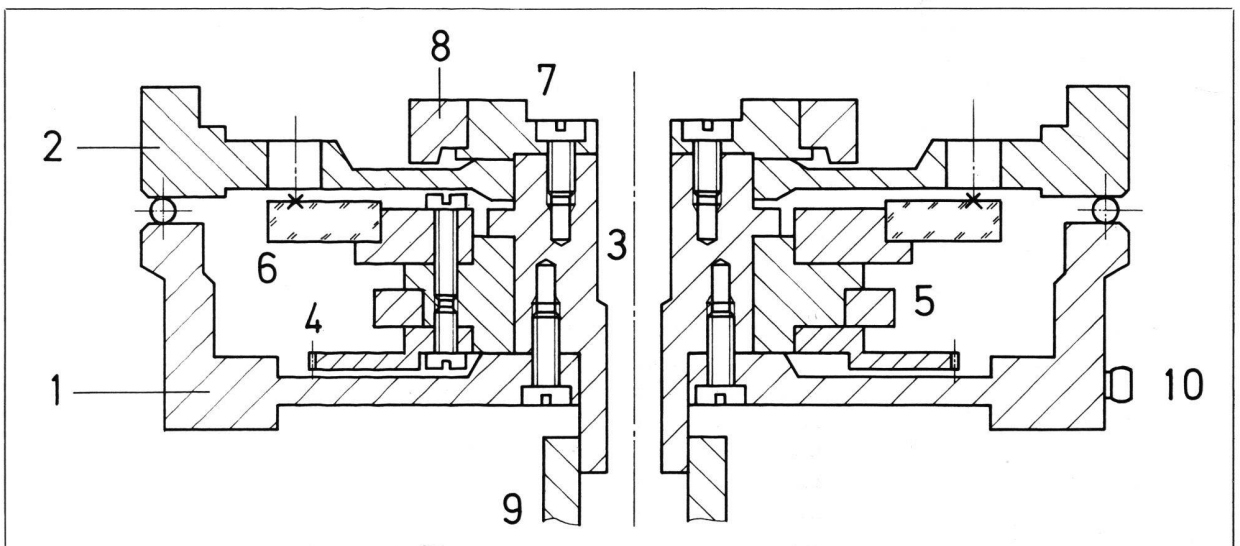
Abb. 3 Stehachse des DKM2-A.

Abb. 4 Schnitt durch die Stehachse.

- |                              |                             |
|------------------------------|-----------------------------|
| 1 Tragring                   | 5 Klemmring des Kreis-      |
| 2 Laufscheibe                | Feintriebes                 |
| 3 Zentrierzylinder           | 6 Horizontalkreis           |
| Oben zur Zentrierung der     | 7 Niederhalterung           |
| Laufscheibe                  | 8 Klemmring der Seitenfein- |
| In der Mitte zur Zentrierung | stellschraube               |
| des Horizontalkreises        | 9 Zentrierbohrung im        |
| Unten als Zentrierzapfen der | Zentrierstativ oder in der  |
| Zwangszentrierung            | Pfeilergrundplatte          |
| 4 Zahnkranz des Kreis-       | 10 Anschlüsse für die       |
| Grobtriebes                  | Horizontiervorrichtung      |



3



4

Spiel zwischen Zapfen und Bohrung, insbesondere abhängig von der Verteilung des Schmiermittels im Raum zwischen Zapfen und Bohrung. Im Gegensatz dazu hängt die Genauigkeit eines Achsialkugellagers nur von der Ebenheit der Lauffläche und den Durchmessern der Kugeln ab.

Bei herstellungstechnisch gegebener Ebenheit der Laufflächen und bekannten Unterschieden in den Durchmessern der Kugeln steigt die Achsgenauigkeit proportional zum Durchmesser der Kugellaufbahn.

Die Ebenheit kann nach dem Schleifen und Läppen optisch mit Hilfe eines ebenen Probeglasses praktisch beliebig genau geprüft werden. Da die Kugeln vom Herstellerwerk mit Durchmessertoleranzen von  $0,1 \mu\text{m}$  geliefert werden, hängt die Achsgenauigkeit nur von der Ebenheit der Laufflächen ab. Einpaßfehler, wie sie bei Zylinderachsen zwischen Zapfen und Bohrung auftreten und dadurch die Achse verschlechtern, sind bei Achsialkugellagern überhaupt ausgeschlossen. Die in die Kippachsrichtung fallende Komponente des Taumelfehlers von DKM2-A-Stehachsen zeigt Abbildung 5. Die Beträge liegen unter  $\pm 1''$  (sexagesimal). Der Verlauf der Fehlerkurve ist bei allen Instrumenten ähnlich. Der Grund dafür liegt in den Dreipunktauflagen von Lauf- und Tragring. Die Befestigung des Laufringes an der Stütze

und des Tragringes an der Horizontiervorrichtung erzeugen kleine lokale Spannungen, die sich in meßbaren, aber einflußlosen Deformationen äußern.

Lauf- und Tragring bestehen aus Nitrierstahl.

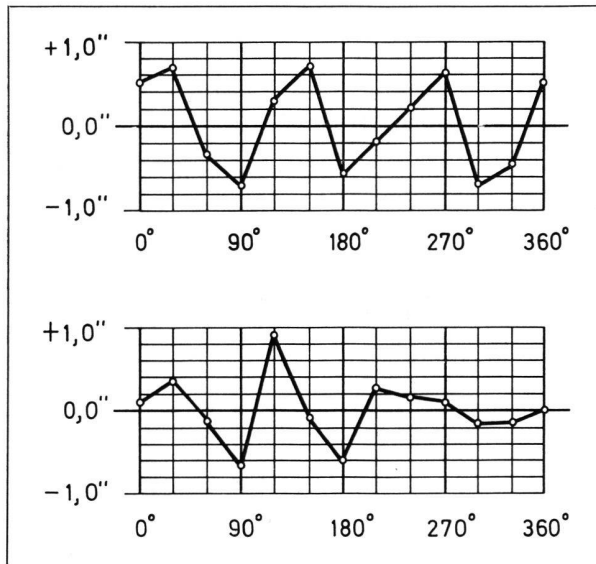
### 3. Kippachse

Die Bedeutung der Kippachs-Taumelfehler wurde bereits erläutert. Die Kippachse des DKM2-A ist deshalb so ausgebildet, daß nur minimale Beträge zu erwarten sind. Dies läßt sich durch Unabhängigkeit vom Schmierfilm und möglichst kreisförmigem Querschnitt der Achszapfen erreichen. Um den Einfluß des Schmierfettes auf die Lage der Kippachse herabzusetzen, wurden anstelle von normalen Zylinderlagern Lager mit einer V-förmigen Auflagefläche gewählt (Abb. 6). Dadurch wird eine spielfreie Führung erreicht, wobei die wegen der kleinen Auflagefläche relativ hohen Drücke den Fettfilm gleichmäßig verteilen helfen.

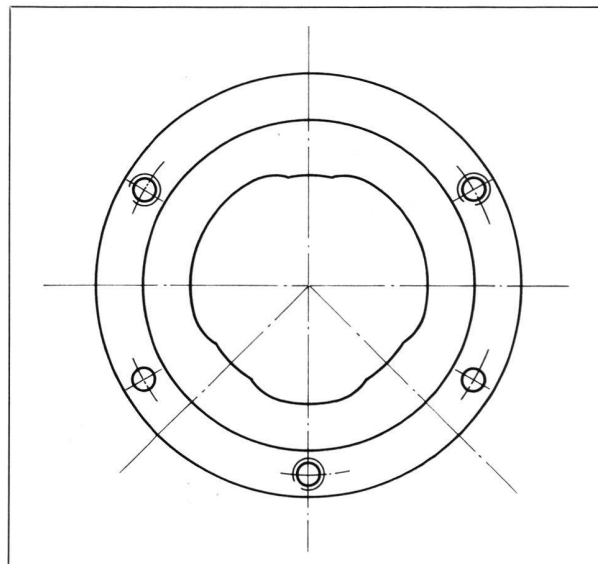
Abb. 5 Taumelfehler der Stehachse. Komponente in Richtung der Kippachse.

Abb. 6 Kippachslager. Die Kippachse liegt auf den beiden um  $45^\circ$  von der Senkrechten entfernten erhabenen Stellen auf.

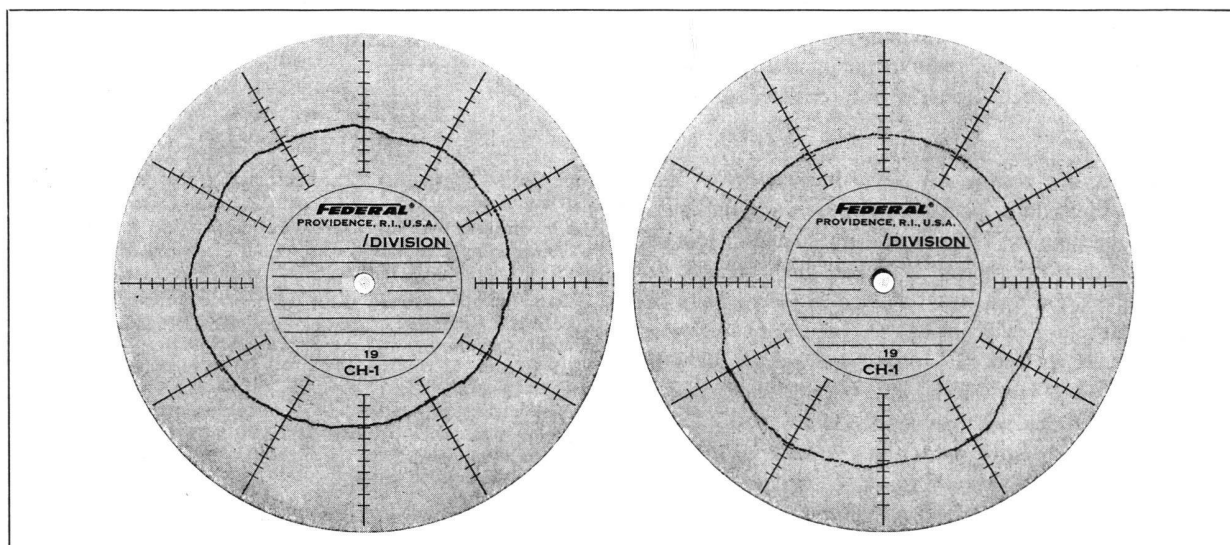
Abb. 7 Prüfprotokolle der Rundheit von Kippachszapfen.



5



6



7

Abbildung 7 zeigt Diagramme der Rundheit von Achszapfen. Ein Teilungsintervall auf den Radien des Prüfblattes entspricht einer Veränderung von  $10^{-4}$  mm. Die Durchmesseränderungen der geprüften Zapfen sind maßgebend für die Taumelfehler der Kippachse. Auf dem Prüfblatt ergeben sich die Durchmesseränderungen als Änderungen der Summen der Intervalle, welche auf einem der angedeuteten Durchmesser innerhalb der Kurve liegen. Sie übersteigen Beträge von  $0,5 \mu\text{m}$  nicht.

Kippachse und Lagerringe bestehen aus gehärtetem Stahl.

## V. Das Kreisablesesystem

Das Kreisablesesystem gestattet, die mit dem Fernrohr eingestellten Richtungen an den Kreisen abzulesen. Es bildet einen Bestandteil der Stütze und besteht aus einer Vielzahl von optischen Elementen. Einwandfreie Meßresultate werden nur erhalten, wenn keines davon sich während der Messung, beispielsweise wegen Temperaturschwankungen, bewegt. Verschiebungen von Teilen zwischen dem abzubildenden Ausschnitt des Teilkreises und der Meßmarke verfälschen direkt den Meßwert, die restlichen Teile verändern nur die Bildqualität. Der Konstrukteur trachtet somit danach, die Meßmarke so nahe wie möglich an den Teilkreis heranzubringen.

Im DKM2-A werden wie bei allen Sekundentheodoliten zur Elimination der Exzentrizität zwischen Teilungszentrum und Drehzapfen der Stütze zwei diametrale Kreisstellen abgelesen. Als Meßmarke für die erste Kreisstelle dient das Bild der zweiten, und zwar wird die erste dort abgelesen, wo der Unterschied zur zweiten genau  $200^{\circ}$  beträgt. Die Optik für die Abbildung der ersten auf die zweite Kreisstelle, von der allein das Meßresultat abhängt, ist im DKM2-A so kurz und so stabil wie möglich ausgebildet. Für den Horizontalkreis liegt sie in einer massiven Stahlbrücke, die, um Temperaturspannungen zu vermeiden, mit dem ebenfalls stählernen Tragring der Stehachse verschraubt ist. Am Vertikalkreis mußte die Ableseoptik etwas auseinandergezogen werden, damit der Kompensator zwischen den Kreisstellen Platz findet. Anstelle einer Stahlbrücke trägt eine Stahlplatte Abbildungsoptik und Kompensator. Sie liegt vor dem Vertikalkreis und ist mit einem hinter dem Kreis liegenden Stahlflansch verschraubt. Der Stahlflansch trägt im Zentrum das Kippachslager einer Stützensseite in Form eines Stahlringes. Da die Kippachse und der damit verschraubte Träger des Vertikalkreises ebenfalls aus Stahl bestehen, können auch hier keine Temperaturspannungen wegen ungleichen Ausdehnungskoeffizienten der Materialien auftreten.

### 1. Kreismikrometer

Zur Ablesung der Kreise mit Sekundengenauigkeit sind Mikrometer notwendig. Jeder Meßwert setzt sich daher aus einer Grobablesung am Teilkreis und einer Ablesung an der Mikrometerskala zusammen. Der Verschiebbereich der Mikrometer ist nun nicht so groß, daß in jedem Falle bezifferte Teilstriche der diametralen Kreisstellen abgelesen werden könnten. Es stellt sich somit die Frage, ob nicht die ganze Grobablesung in Ziffern, ohne unbezifferte Teilungsintervalle abzuzählen, erhalten werden kann.

Die Mikrometer für Horizontal- und Vertikalkreis bestehen aus je einer Meßplanplatte im Strahlengang zwischen den diametralen Kreisstellen und je einer Hilfsplanplatte zwischen der bezifferten Kreisstelle und der Gesichtsfeldblende. Die

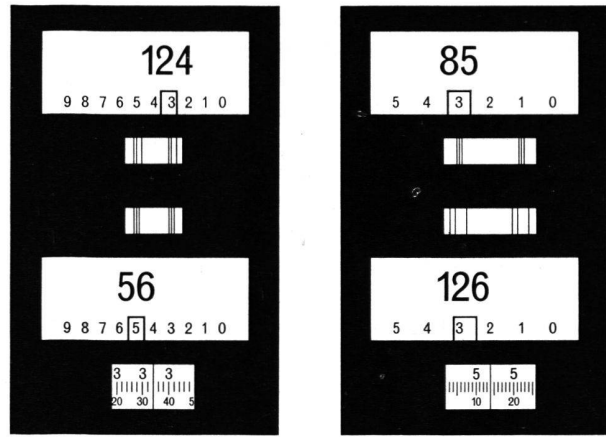


Abb. 8 Kreisablesbilder.

$400^{\circ}$  Horizontalkreis  $56^{\circ} 53' 34''$   
 $360^{\circ}$  Vertikalkreis  $85^{\circ} 35' 14''$

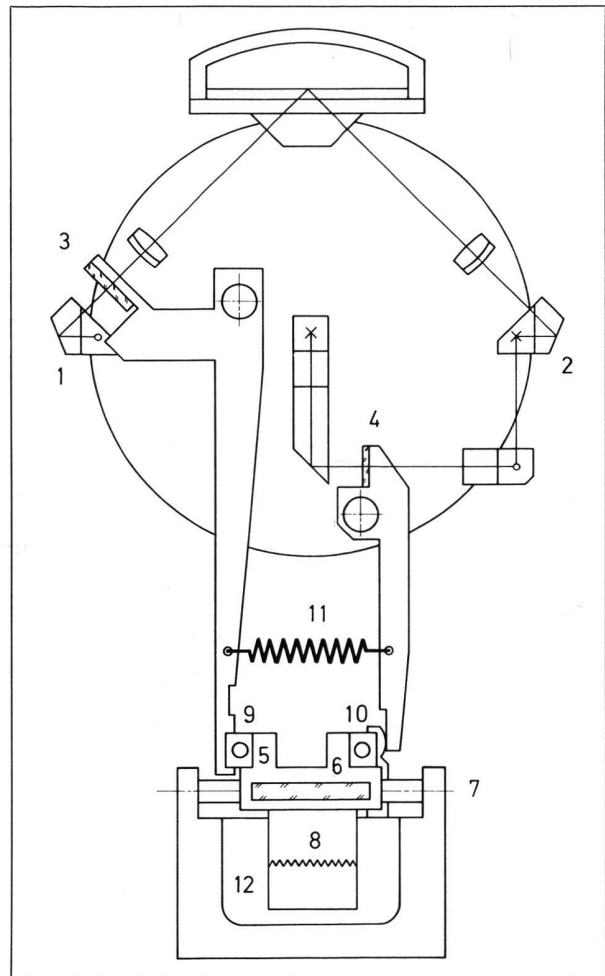


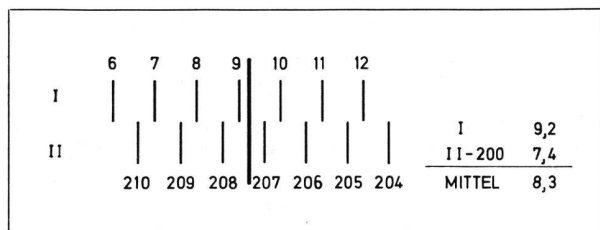
Abb. 9 Schema des Höhenkreismikrometers. Eine Kreismarke im Strahlengang zeigt an, daß der Strahl auf den Betrachter zukommt; eine Kreuzmarke zeigt, daß der Strahl vom Betrachter wegläuft.

- |  |  |
|--|--|
| 1 Unbezifferte Kreisstelle   | 9 Justiervorrichtung für den Bereich des Höhenkreismikrometers       |
| 2 Bezifferte Kreisstelle   | 10 Justiervorrichtung für den Bereich des Horizontalkreismikrometers |
| 3 Meßplanplatte  | 11 Spannfeder  |
| 4 Hilfsplanplatte  | 12 Lagerblock des Mikrometerschlittens                               |
| 5 Mikrometerschlitten  |  |
| 6 Mikrometerskala, durch die Ablesoptik des Horizontalkreises abgebildet |  |
| 7 Gleitschiene des Mikrometerschlittens                                  |  |
| 8 Zahnstange für den Antrieb des Mikrometerschlittens                    |  |

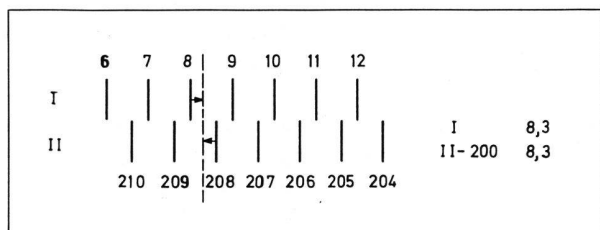
Hebel für alle Planplatten werden von einem gemeinsamen Schlitten angetrieben, der auch die Mikrometerskala trägt. Durch die Hilfsplanplatte wird das gemeinsame Bild der zwei diametralen Kreisstellen derart über eine Ziffernreihe in der Gesichtsfeldblende geführt, daß die gesuchten Zehntelgrad der Grobablesung direkt unter oder über dem bezifferten Teilstrich stehen. Damit der Beobachter nicht irren kann, bezeichnet ein Rahmen die abzulesende Zahl.

An sich kann die Grobablesung bereits an einer Kreisstelle fehlerlos gewonnen werden, da die Exzentrizität des Teilungszentrums auch bei Theodoliten mit diametralen Ablesestellen das Zehntelgrad nicht verfälscht. Grad und Zehntelgrad könnten somit an einem Skalenmikroskop abgelesen werden. Im DKM2-A wird dieser Gedanke aufgegriffen, nur ist die Teilung des Skalenmikroskops durch eine Ziffernreihe ersetzt. Der Rahmen um die abzulesende Ziffer stellt nichts anderes als eine ösenförmige Verlängerung des bezifferten Teilstriches dar. Die Bildversetzung durch die Hilfsplanplatte muß nur so genau sein, daß der Rahmen ungefähr über der abzulesenden Ziffer zentriert ist.

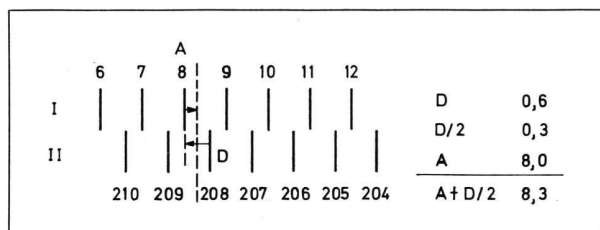
Es bleiben noch die Verschieberegionen und die Verschiebungsrichtungen von Meß- und Hilfsplanplatte zu erläutern. Dafür vergegenwärtigt man sich am besten, wie eine Ableseung an diametralen Kreisstellen entsteht. Drei Möglichkeiten sind in Abbildung 10 angedeutet. Die beiden diametralen Ausschnitte der Teilungen sind untereinander dargestellt, beide beziffert und einander entgegenlaufend. In Abbildung 10a werden beide Teilungen an einem festen Index abgelesen und gemittelt. Denselben Wert erhält man, wenn die eine Teilung dort abgelesen wird, wo die andere genau 200<sup>s</sup> verschieden ist (Abb. 10b). Nochmals denselben Wert erhält man, wenn die halbe Differenz zwischen zwei sich um 200<sup>s</sup> unterscheidenden Teilstrichen zum Wert eines der verwendeten Teilstriche hinzugezählt wird (Abb. 10c). Dieser Fall wird im DKM2-A durch die Meßplanplatte verwirklicht.



10a



10b



10c

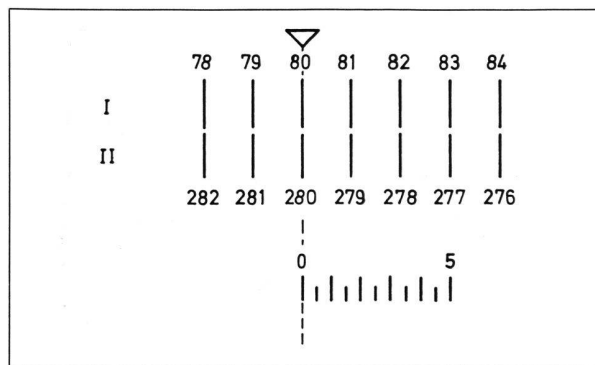
In den Fällen 10b und 10c werden für die Kreisablesung nur Teilstriche der Kreise selbst und keine festen Indexstriche verwendet. Um die Grobablesung zu erleichtern oder bei weggelassener Bezifferung der zweiten Kreisstelle überhaupt zu ermöglichen, wird die Grobablesemarke beibehalten. Im Falle 10c sollte sie wegen der Gegenläufigkeit der Teilungen in der Mitte der zu koinzidierenden Striche liegen. Sie wird jedoch wegen Kreisexzentrizitäten und Justierfehlern von dieser Lage abweichen. Um besonders für ungeübte Beobachter wegen den Zweifelsfällen an den Enden der Teilungsintervalle die Grobablesung eindeutig zu ermöglichen, werden mit einer Hilfsplanplatte beide übereinanderliegenden Bilder der diametralen Kreisstellen in eine konstante und eindeutige Lage gegenüber dem Grobindex gebracht. Ihr Verschiebungsweg muß halb so groß wie derjenige der Meßplanplatte sein, wobei die Verschiebungsrichtungen der zwei Planplatten entgegengesetzt sind. In Abbildung 11 sind die Verhältnisse für drei verschiedene Stellungen der diametralen Teilstriche dargestellt. In Abbildung 11a steht das Mikrometer auf Null, die diametralen Kreisstellen sind koinzidiert und die Stelle der Grobablesung durch eine Dreiecksmarke in der Gesichtsfeldblende festgehalten.

Nach Drehung der Ablesestellen um  $\frac{1}{4}$  Teilungsintervall muß zur Koinzidierung der Teilungen die zweite Kreisstelle mit Hilfe der Meßplanplatte in Richtung des langen Pfeiles nach links und, um die Koinzidenzstelle beim Dreieck in der Gesichtsfeldblende festzuhalten, beide Kreisstellen zusammen um den Betrag des kurzen Pfeiles nach rechts verschoben werden (Abb. 11b).

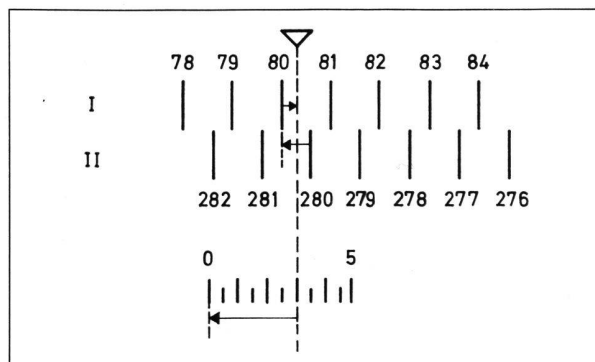
Sobald die Drehung der Ablesestellen gegenüber der Dreiecksmarke mehr als  $\frac{1}{2}$  Teilungsintervall beträgt (Abb. 11c), könnten bei beliebig großem Mikrometerbereich zwei be-

Abb. 10a, b, c Möglichkeit der Ableseung diametraler Kreisstellen.

Abb. 11a, b Ableseung diametraler Kreisstellen mit Hilfe eines Mikrometers.

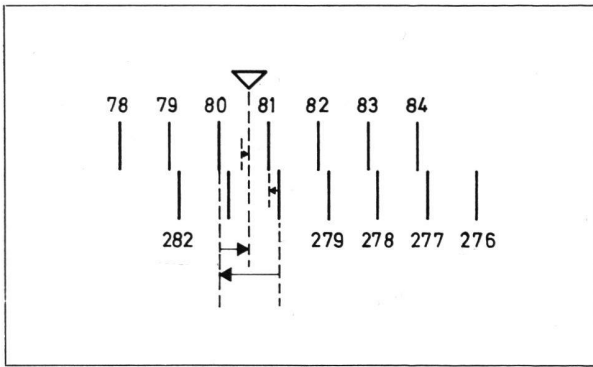


11a

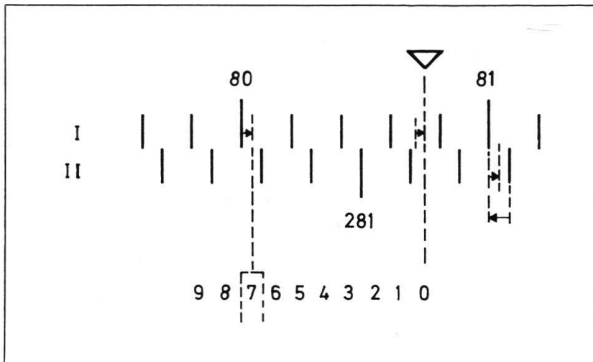


11b





11c



11d

Abb. 11c, d Ableseoptik diametraler Kreisstellen mit Hilfe eines Mikrometers.

liebige diametrale Ziffern (zum Beispiel 79 und 279) koinzidiert werden. Jedoch tritt bereits vorher eine Koinzidenz benachbarter Striche, zum Beispiel der Striche 81 und 280, auf. Damit nur eine einzige Koinzidenz möglich ist, wird der Mikrometerbereich gleich dem halben Teilungsintervall gesetzt. Die Hilfsplanplatte mit dem halben Bereich der Meßplanplatte kann somit im dargestellten Falle nur noch die Intervallmitte unter die Dreiecksmarke legen. Die Folge davon ist, daß eine Groablesung auf ein Teilungsintervall genau nicht genügt, sondern auf ein halbes Teilungsintervall genau sein muß.

Die dezimale Unterteilung eines Grades, wie sie im DKM2-A erforderlich ist, zeigt Abbildung 11d.

Der Mikrometerbereich umfaßt  $\frac{1}{2}$  Teilungsintervall, das heißt  $10^\circ$ . Wenn die Striche 80 und 280 koinzidiert werden könnten, so würde sich die Koinzidenzstelle in die Dreiecksmarke verschieben.

Da der Mikrometerbereich nur reicht, um beispielsweise die Striche  $81,0^\circ$  und  $280,4^\circ$  zu koinzidieren, verschieben sich die Teilungen nur um die Beträge der beiden entgegengesetzten Pfeile; das heißt, im dargestellten Falle wird die Mitte eines Intervalls unter die Dreiecksmarke verschoben. Die Kreisteilung könnte an der Dreiecksmarke auf ein halbes Teilungsintervall genau abgelesen werden, bei  $20^\circ$ -Intervallen also auf  $10^\circ$ . Ohne Abzählen der ganzen und halben Intervalle erhält man die Groablesung an demjenigen bezifferten Strich, dessen Verlängerung innerhalb des als Ziffernreihe ausgebildeten Skalenmikroskops liegt. Aus Abb. 11d geht hervor, daß die Länge des Skalenmikroskops zwischen den Ziffern 0 und  $9\frac{9}{10}$  eines Grades umfassen muß, wobei der Abstand zwischen den Ziffern  $\frac{1}{2}$  Teilungsintervall beträgt. Die Null der Skala tritt an die Stelle der Dreiecksmarke. Die Groablesung wird damit ohne Dreiecks-

marke und ohne Bezifferung der zweiten Kreisstelle eindeutig und gleichzeitig vollständig in Ziffern erhalten.

Die Meßplanplatten sowohl der Horizontal- als auch des Vertikalkreises werden durch eine völlig spielfreie und ideale Tangenssteuerung angetrieben. Skala und Schlitten sind fest miteinander verbunden, und das Spiel zwischen Hebel und Schlitten wird durch eine Zugfeder aufgehoben. Die systematischen Mikrometerfehler liegen wegen der kleinen maximalen Kippwinkel der Planplatten beträchtlich unter der Beobachtungsgenauigkeit. Wegen der absoluten Spielfreiheit sollten sich keine Unterschiede der Meßwerte bei Koinzidieren der Teilungen von links oder rechts ergeben. Wenn sich etwas feststellen läßt, so rührt das vom Beobachter her.

## 2. Kompensator

Bezugsrichtung für Höhenwinkel ist die Richtung der Schwerkraft. Grundsätzlich kann ein System zum Messen von Höhenwinkeln mit Theodoliten auf zwei Arten gebaut werden: Entweder wird der Höhenkreis durch mechanische und optische Mittel bezüglich der Schwerkraft orientiert und an einer sich mit dem Fernrohr bewegenden Stelle abgelesen, oder der Höhenkreis wird mit dem Fernrohr verbunden und an einer Stelle abgelesen, die von der Richtung der Schwerkraft abhängt. Aus konstruktiven Gründen wird durchwegs nur die zweite Möglichkeit verwirklicht. Den beiden Schenkeln des Höhenwinkels entsprechen somit die Fernrohrzielachse und die Verbindungslinie Kreiszentrum–Ablesestelle. Diese Verbindungslinie – im weiteren Ableselinie genannt – wird mit Hilfe einer Libelle reproduzierbar in eine bestimmte Richtung zum Lot gebracht, oder ihre Neigungsänderung wird durch einen Kompensator automatisch im Strahlengang der Ableseoptik berücksichtigt.

Der Strahlengang am Höhenkreis des DKM2-A läuft zwischen den diametralen Kreisstellen durch einen Flüssigkeitskompensator. Bevor das Bild der ersten unbezifferten Kreisstelle auf die zweite bezifferte fällt, wird es an der horizontalen Flüssigkeitsoberfläche total reflektiert und derart auf die zweite projiziert, daß das Mittel der Ableseungen beider Kreisstellen unabhängig von Neigungsänderungen der Ableselinie ist.

Flüssigkeiten als Kompensationsmedien bieten eine Reihe von Vorteilen: Ihre Oberfläche liegt definitionsgemäß horizontal, sofern die Randspannung zwischen Gefäßwand und Flüssigkeitsoberfläche das ausgenutzte Oberflächenelement nicht beeinflusst. Für die Konstruktion läßt sich zwar wegen Justierfehlern in der Ableseoptik nicht direkt verwerten, daß die Oberfläche horizontal liegt, doch fallen dadurch die Einspielfehler der Reflexionsfläche gegenüber dem Lot dahin. Die Dämpfung von Schwingungen läßt sich durch Verändern der Füllhöhe und durch die Wahl der Viskosität den gegebenen Erfordernissen anpassen. Flüssigkeitskompensatoren nutzen sich durch Gebrauch nicht ab, sie sind daher äußerst betriebssicher. Diesen Vorteilen stehen auch Nachteile gegenüber, die aber bei Theodoliten weit weniger ins Gewicht fallen als bei Nivellierinstrumenten. Der Brechungsquotient und die Viskosität aller Flüssigkeiten sind relativ stark temperaturabhängig. Dadurch können sich Kompensationsfehler ergeben und die Einspielzeiten bei tiefen Temperaturen merklich vergrößert werden. Darüber hinaus neigen alle in Frage kommenden Flüssigkeiten wegen der notwendigerweise relativ hohen Viskosität und kleinen Randspannung nach starkem Schütteln zur Bildung von

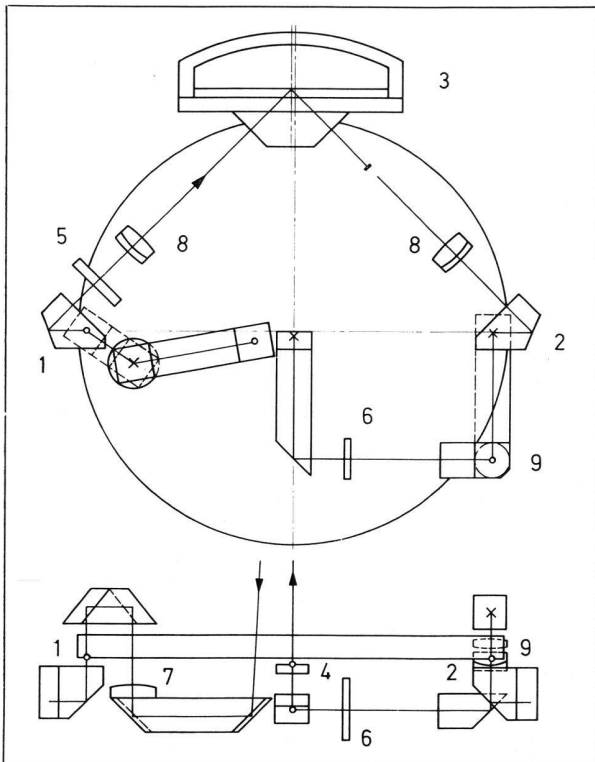


Abb. 12 Schema der Höhenkreis-Ableseoptik. Im Aufriß sind alle Teile hinter der Teilungsebene gestrichelt. Im Grundriß ist nur dargestellt, was sich im Aufriß unterhalb der Linie 1-2 befindet.

- |                          |   |
|--------------------------|---|
| 1 Unbezahlte Kreisstelle | 8 Doppelobjektiv zur Abbildung der unbezahlten auf die bezahlte Kreisstelle       |
| 2 Bezahlte Kreisstelle   | 9 Objektiv zur Abbildung der Bilder beider Kreisstellen in die Gesichtsfeldblende |
| 3 Kompensator            |   |
| 4 Gesichtsfeldblende     |   |
| 5 Meßplanplatte          |   |
| 6 Hilfsplanplatte        |   |
| 7 Beleuchtungslinse      |   |

ziemlich beständigen Blasen, welche die Reflexionsfläche völlig unbrauchbar machen. Mit Silikonölen als Kompensationsmedium lassen sich die Nachteile entweder beheben oder auf ein vertretbares Maß herabmindern.

Die Funktion des Kompensators soll anhand der schematischen, mit vereinfachter Abbildungsoptik gezeichneten Abbildung 13 erläutert werden.

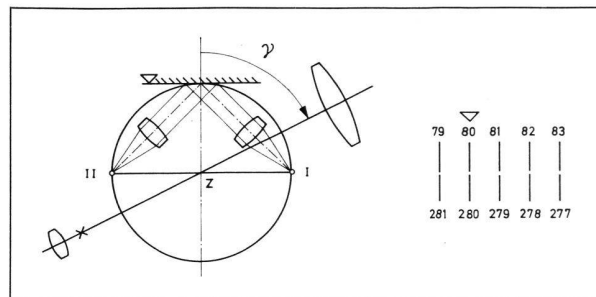
Abbildung 13a zeigt links das ideale – ideal bedeutet ohne Justierfehler – Höhenkreissystem eines DKM2-A. Vom Kompensator ist nur die totalreflektierende Flüssigkeitsoberfläche dargestellt. Die Abbildungsoptik ist zweigliedrig mit parallelem Strahlengang zwischen den Gliedern. In Abbildung 13a und 13b sind zudem noch die Bilder der diametralen Kreisstellen in der Gesichtsfeldblende dargestellt. Die Grobablesemarke sei wiederum dreieckig.

Abbildung 13b zeigt den Theodolit mit einer um den Winkel  $\alpha$  geneigten Ableselinie  $Z-I$ . Der Winkel  $\gamma$  der Zielachse gegenüber dem Lot bleibt unverändert. Um denjenigen Ausschnitt der zweiten Kreisstelle zu bestimmen, der auf die erste fällt, geht man am besten von dem an der Flüssigkeitsoberfläche entstehenden Spiegelbild der Ableseoptik zwischen Kompensator und erster Kreisstelle aus (in Abbildung 13b gestrichelt dargestellt). Die auf die erste Kreisstelle abgebildete diametrale Kreisstelle ergibt sich als Schnittpunkt der Kreisteilung mit einer Parallelen zur strichpunktierten optischen Achse des Spiegelbildes durch den Mittelpunkt des Objektivs zwischen Kompensator und zweiter Kreisstelle. Die Neigung  $\alpha$  ist dann in der Ableseung kompensiert,

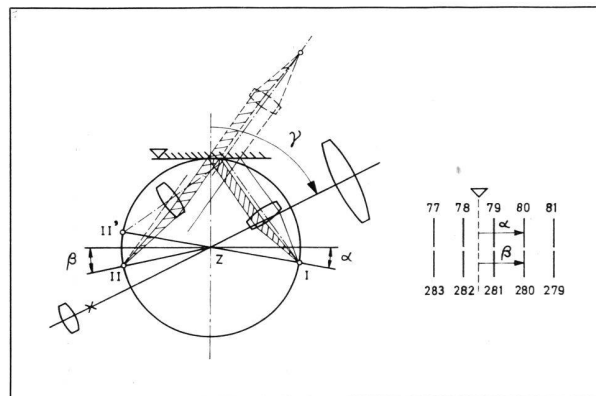
wenn  $\beta = -\alpha$  wird. In diesem Falle verschiebt sich das Bild der zweiten Kreisstelle um gleichviel und im gleichen Sinne wie das Bild der ersten gegenüber der Grobablesemarke. Die Kreisablesung am Mikrometer bleibt erhalten, da die gegenseitige Lage der Teilungen sich nicht ändert. Mit andern Worten: die Neigung wird kompensiert, wenn die Ablesestellen auf einer waagrechten Linie liegen. Die Lage dieser Verbindungslinie gegenüber dem Teilungszentrum hängt von der Neigung  $\alpha$  ab. Der Kompensator wirkt somit scheinbar wie eine von der Neigung  $\alpha$  abhängige Kreisexzentrizität. Wie aus dem schematischen Ablesebild in Abbildung 13b zu entnehmen ist, verschiebt sich durch eine Verschiebung der Bilder beider Kreisstellen im gleichen Sinne die Koinzidenzstelle gegenüber der Grobablesemarke. Hier liegt der Grund, warum der Kompensationsbereich des DKM2-A mit  $2'$  (sexagesimale Teilung) angegeben wird.

Abb. 13a, b Funktionsschema des Kompensators.

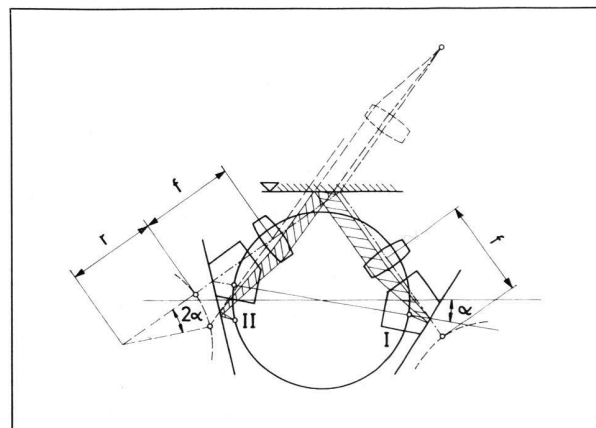
Abb. 13c Funktionsschema des Kompensators. Das Prisma über der Kreisstelle II ist zu klein dargestellt. Das schraffierte Strahlenbündel verläuft im Prisma II analog zum Verlauf im Prisma über der Kreisstelle I.



13a



13b



13c



Würde er größer gewählt, so könnte die zu kompensierende Neigung  $\alpha$  zusammen mit der auf das Ablesebild gleich wirkenden Kreisexzentrizität bei zentesimaler Teilung eine eindeutige Groablesung unmöglich machen.

Das tatsächliche optische System unterscheidet sich in zwei Punkten vom Schema in Abbildung 13a: Die Flüssigkeit muß in einem Gefäß enthalten sein, und damit diametrale Elemente der Teilungsfläche aufeinander abgebildet werden können, sind Prismen notwendig (Abb. 13c). Durch die Prismen wird der Strahlengang senkrecht auf die Teilungsfläche gerichtet und nicht wie in Abbildung 13a um  $(45^\circ \pm \alpha)$  schief dazu. Neigungen in positivem und negativem Sinne ergeben durch die Zwischenschaltung von Prismen symmetrische Verhältnisse zur Ausgangslage.

Außer der größeren Weglänge der Abbildung ändern die Prismen grundsätzlich nichts am Prinzip der Kompensation. Davon kann man sich überzeugen, indem nach jeder Spiegelung an einer Prismenfläche das Spiegelbild des abzubildenden Objektes betrachtet wird (gestrichelt in Figur 13c). Damit  $\beta = -\alpha$  wird, muß der Kompensator eine um  $2\beta$  gegenüber der Ausgangslage (in Figur 13c mit II' bezeichnet) verschobene Kreisstelle (II in Figur 13c) auf die bezifferte Teilung abbilden. Dies ist erreicht, wenn der Abbildungsmaßstab zwischen den Kreisstellen gleich 1:1 und die Brennweite der Objektiv bei Vernachlässigung des Einflusses der Kompensatorflüssigkeit gleich dem Radius der Kreisteilung ist. Das Vorzeichen deutet den Zählsinn des Winkels an. Es wird im weiteren weggelassen.

Der Einfluß der Kompensatorflüssigkeit verkürzt die zur Kompensation notwendige Brennweite. Bis jetzt wurde vorausgesetzt, der Eintrittswinkel eines Strahlenbündels in den Kompensator sei gleich dem Austrittswinkel. Abbildung 14 zeigt einen um den Winkel  $\alpha$  geneigten Kompensator. Es wird weiter vorausgesetzt, die Kompensatorflüssigkeit und das Glasprisma am Boden des Kompensators hätten denselben Brechungsquotienten, das heißt an der Fläche Glas-Flüssigkeit trete keine Brechung auf. Dies läßt sich durch geeignete Wahl von Flüssigkeit und Glas auch erreichen. Das Spiegelbild der Seite zwischen Flüssigkeitsoberfläche und zweiter Kreisstelle ist wiederum gestrichelt dargestellt. Die Änderung  $2\delta$  des austretenden Strahles gegenüber der Änderung  $\alpha$  des eintretenden Strahles ergibt sich aus Abbildung 14. Für kleine Winkel  $\alpha$  gilt, wenn  $n$  der Brechungsquotient der Flüssigkeit ist:

$$2\delta = n \cdot 2\alpha$$

Damit wird die für die Kompensation der Neigung  $\alpha$  notwendige Verschiebung der zweiten Kreisablesestelle durch

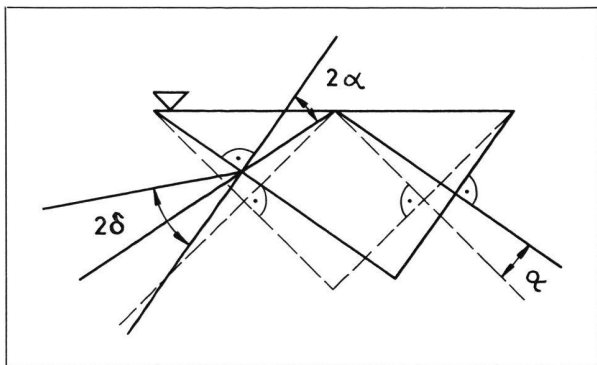


Abb. 14 Schematischer Strahlengang im Kompensator.

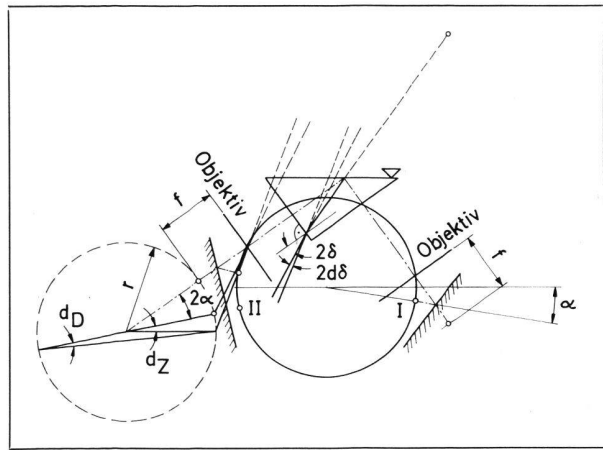


Abb. 15 Schematische Darstellung des Temperatureinflusses auf die Kompensation.

eine Brennweite  $f$  von

$$f = \frac{r}{n}$$

erreicht, mit  $r$  als Teilungsradius.

Der Einfluß einer Temperaturabhängigkeit des Brechungsquotienten auf den Austrittswinkel ergibt sich aus

$$2\delta = n \cdot 2\alpha$$

zu

$$\frac{2 d\delta}{dn} = 2\delta, \text{ oder } 2 d\delta = 2\alpha \cdot dn$$

Dadurch ergibt sich eine Verschiebung der abzubildenden zweiten Kreisstelle von

$$dt = f \cdot 2 d\delta = 2 \cdot f \cdot \alpha \cdot dn.$$

$dt$  ist der lineare Verschiebungsbetrag der Teilung. Im Winkelmaß der Kreisteilung wird die Verschiebung  $dz$ :

$$dz = \frac{dt}{r}$$

oder

$$dz = \frac{2 \cdot f \cdot \alpha \cdot dn}{r}$$

oder

$$dz = \frac{\frac{2r}{n} \cdot \alpha \cdot dn}{r} = \frac{2\alpha}{n} \cdot dn$$

Da nur eine Kreisstelle um diesen Betrag verfälscht wird, reduziert sich der Fehler am Mittel aus beiden Kreisstellen auf die Hälfte:

$$d_D = \frac{\alpha}{n} \cdot dn.$$

Um den Fehler  $d_D$  bei einer gegebenen Temperaturdifferenz klein zu halten, muß entweder  $dn$  klein oder  $n$  groß sein. Hier ist jedoch die Wahl sehr beschränkt, so daß  $d_D$  nur durch Verkleinern der Neigung  $\alpha$  des Theodolits, also durch besseres Horizontieren, vermindert werden kann.

Da jeder Temperaturdifferenz ein bestimmtes  $dn$  entspricht, läßt sich  $d_D$  als Bruchteil von  $\alpha$  in Funktion der Temperatur angeben.

Die Änderung des Brechungsquotienten beträgt etwa  $4,0 \cdot 10^{-4}/^\circ\text{C}$ .

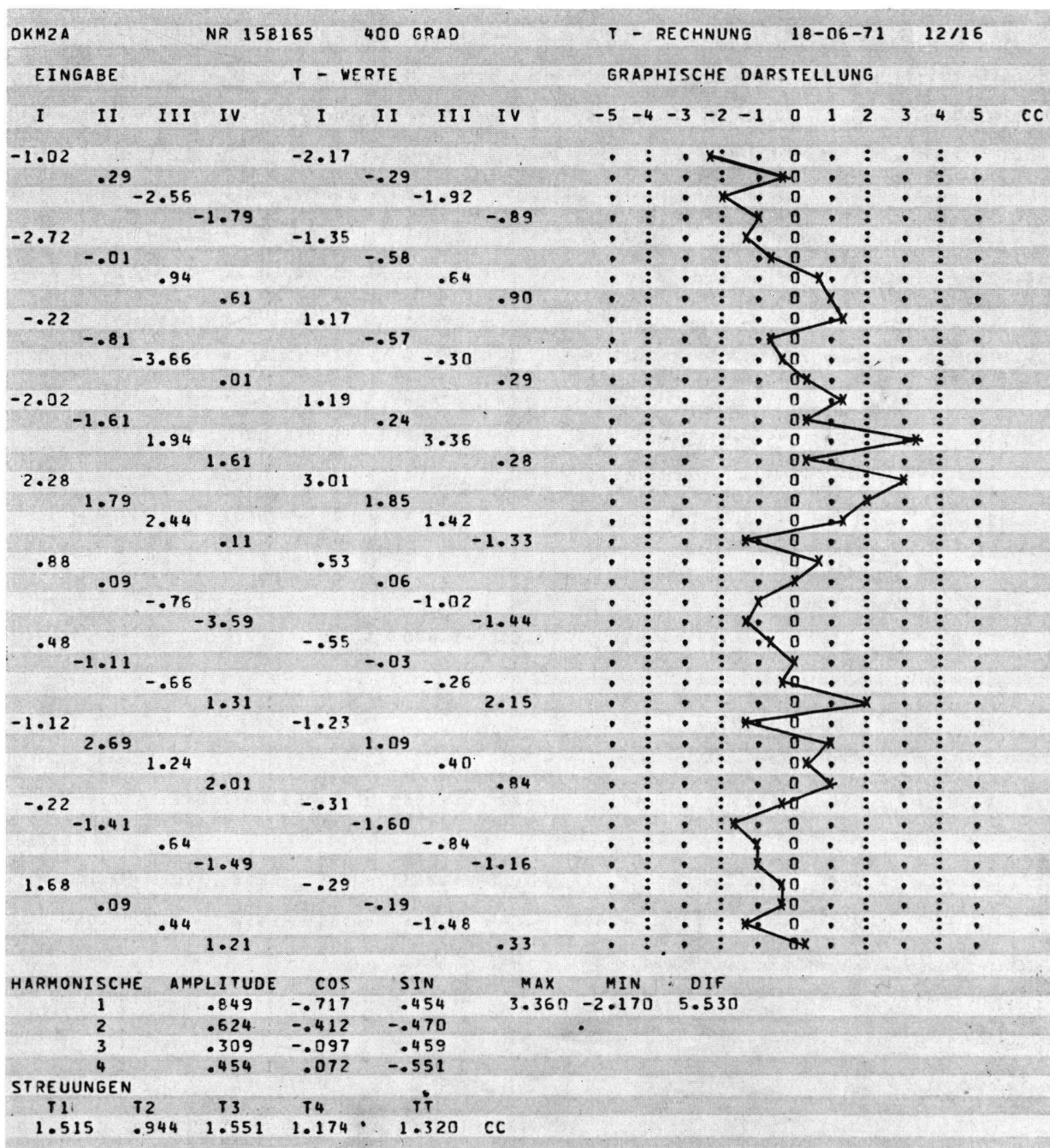
Für  $40^\circ\text{C}$  Temperaturdifferenz ergibt sich ein  $dn$  von  $1,60 \cdot 10^{-2}$ ,  $n$  beträgt 1,42. Die Kompensation wird damit um  $1,13 \cdot 10^{-2}$  oder rund 1,1% der Neigung falsch. Somit ist im Höhenwinkel bei  $-20^\circ\text{C}$  und 2' Horizontierfehler ein Fehler von rund 1,3" enthalten – ein Betrag, der an der Grenze der Meßgenauigkeit liegt und der überdies durch genaueres Horizontieren zum Verschwinden gebracht werden kann. Dieser Wert wäre noch um einen unwesentlichen Betrag zu korrigieren, der von der Änderung der Brechungs-

Abb. 16a Computerauswertung einer Teilkreisprüfung. Durchmesserfehler bei Messung in einer Fernrohrlage. Die Durchmesserfehler haben die Periode  $2\pi$ .

quotienten an der Grenzfläche zwischen Glasboden und Flüssigkeit und von der Ungleichheit des Brechungsquotienten zwischen Glas und Flüssigkeit herrührt. Da das zentrale Strahlenbündel unter  $45^\circ$  und nicht senkrecht in die Flüssigkeit eintritt, ergibt sich bereits bei Normaltemperatur ein nicht linearer und zur Ausgangslage asymmetrischer Zusammenhang zwischen  $\alpha$  und  $\beta$ . Der Einfluß der Unlinearität beträgt jedoch nur Bruchteile des maximalen Temperatureinflusses.

### 3. Kreise

Die Mittelfeldeinstellung als Ablesekriterium verlangt für hohe Einstellgenauigkeit möglichst gleiches Aussehen der beiden symmetrisch zum Mittelstrich gelegenen Striche. Sie müssen daher genau denselben Teil des Ablesestrahlenganges durchlaufen. Da eine der diametralen Kreisstellen als Ableseindex für die andere dient, sollten infolgedessen



an einer Kreisstelle Doppelstriche und an der andern einfache stehen. Am bequemsten läßt sich dies mit Doppelkreisen erreichen. Anstelle einer einzigen Kreisteilung werden zwei konzentrische angebracht, die eine mit einfachen und die andere mit Doppelstrichen.

Doppelkreise bieten dazu noch fehlertheoretische Vorteile. Die zufälligen Teilungsfehler können durch Messen in beiden Lagen ausgemittelt werden, da in jeder Lage eine andere Strichkombination verwendet wird. Hingegen werden ohne Messung in zwei Lagen die Anteile der periodischen Fehler mit ungeradem Vielfachen der Grundperiode nicht eliminiert, was bei einfachen Kreisen bereits durch die Mittelbildung aus diametralen Kreisstellen erreicht wird. Die Genauigkeitsunterschiede zwischen Messung in einer und zwei Fernrohrlagen sind somit bei Doppelkreisen größer als bei einfachen.

Abbildung 16 zeigt die Original-Computerauswertung der Messung eines DKM2-A-Kreises. Die graphische Darstellung rechts in der Figur gibt die Lage der ausgeglichenen Meßwerte in Zentesimalsekunden. Deutlich ist die Verbesserung der Durchmesserfehler durch Mitteln der Messungen beider Fernrohrlagen (Kurve mit Periode  $\pi$ ) zu erkennen.

### VI. Fernrohr

Bereits in Abschnitt 4 über die Fehlereinflüsse des optischen Systems wurde das Fernrohr der Kreisableseoptik gegenübergestellt.

Dem Zielen mit Fernrohren wird seit langer Zeit in der Literatur große Aufmerksamkeit geschenkt, zum Beispiel [Noetzli, Nigge]. Obwohl namhafte Beträge der Meßfehler

Abb. 16b Durchmesserfehler des gleichen Teilkreises am Mittel der Messungen in beiden Fernrohrlagen. Die Durchmesserfehler haben die Periode  $\pi$ .

DKM2A		NR 158165		400 GRAD		T - RECHNUNG		18-06-71		12/16									
MITTEL AUS 1. UND 2. FERNROHRLAGE																			
EINGABE				T - WERTE				GRAPHISCHE DARSTELLUNG											
I	II	III	IV	I	II	III	IV	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	CC
-.07				-.82				.	:	.	:	X	0	.	:	.	:	.	.
	.19				-.11			.	:	.	:	X	0	.	:	.	:	.	.
		-1.66				-1.47		.	:	.	:	X	0	.	:	.	:	.	.
-1.12			-2.69				-1.16	.	:	.	:	X	0	.	:	.	:	.	.
	-.56				-.95			.	:	.	:	X	0	.	:	.	:	.	.
		.14				-.30		.	:	.	:	X	0	.	:	.	:	.	.
-.67			.96				1.53	.	:	.	:	X	0	.	:	.	:	.	.
	.94				-.03			.	:	.	:	X	0	.	:	.	:	.	.
		-1.21			.26			.	:	.	:	X	0	.	:	.	:	.	.
-1.12			1.01			.05		.	:	.	:	X	0	.	:	.	:	.	.
	-1.51				.44		.57	.	:	.	:	X	0	.	:	.	:	.	.
		1.29				-.68		.	:	.	:	X	0	.	:	.	:	.	.
			.06				1.26	.	:	.	:	X	0	.	:	.	:	.	.
1.98					1.36			.	:	.	:	X	0	.	:	.	:	.	.
	.94					.83		.	:	.	:	X	0	.	:	.	:	.	.
		1.44					-.03	.	:	.	:	X	0	.	:	.	:	.	.
			.66					.	:	.	:	X	0	.	:	.	:	.	.
							-.50	.	:	.	:	X	0	.	:	.	:	.	.
HARMONISCHE		AMPLITUDE		COS		SIN		MAX		MIN		DIF							
2		.624		-.412		-.470		1.530		-1.470		3.000							
4		.555		.072		-.551													
STREUUNGEN																			
T1	T2	T3	T4	TT	CC														
.897	.542	.917	.995	.856	CC														
MAX	DIF/2	S	S3	S4	S6	S32	S42	S43											
3.360	2.765	1.252	1.481	1.680	1.999	2.069	2.252	2.452											
1.530	1.500	.812	.922	1.001	1.109	1.188	1.235	1.284											
KORRELATION																			
	.239	.486	.099	.189	-.010	-.030	-.034	-.139	.056	.024									
		-.069	-.208	-.080	-.277	-.060	-.263	-.095	-.203	-.045									
			.230	.337	.004	-.088	-.084	-.365	-.135	-.412									
									-.015	.057									



auf systematische Zielfehler zurückgeführt werden können, stammt doch der größte Anteil von Kreis, Kreisablesung und Achsen. Trotzdem muß das Fernrohr einige Anforderungen erfüllen. Die wichtigste betrifft die Stabilität der Zielinie, wogegen Durchmesser der Austrittspupille, Vergrößerung, Farbkorrektur und Kontrast des Bildes fehlertheoretisch von sekundärer Bedeutung, aber sehr publikumswirksam sind.

Für Sekundentheodolite hat sich ein Fernrohr mit etwa 30facher Vergrößerung und 40–50 mm Objektivdurchmesser eingebürgert. Was der Beobachter damit anfangen kann, hängt nicht so sehr vom Fernrohr, als vielmehr von der Art der Zielpunkte, der Strichplatte und zum Teil dem Zustand der Atmosphäre ab.

Abbildung 17 gibt den Korrektionszustand des neuen Objektivs im DKM 2-A bei Fokussierung auf  $\infty$  und auf 1,75 m wieder. Auf der Abszisse ist die Lage eines Bildpunktes auf der Achse, auf der Ordinate die im Objektiv gemessene Höhe eines einfallenden Strahles gegeben. Das Bild zeichnet sich durch sehr gute Farbkorrektur und hohe Mittenschärfe aus. Die gute Farbkorrektur äußert sich für den Beobachter darin, daß das Bild vor allem keinen blauen oder violetten Farbstich hat und an Stellen mit großem Kontrast, zum Beispiel an schwarzen Brettern eines Stangensignals vor weißen Wolken, keine farbigen Säume auftreten.

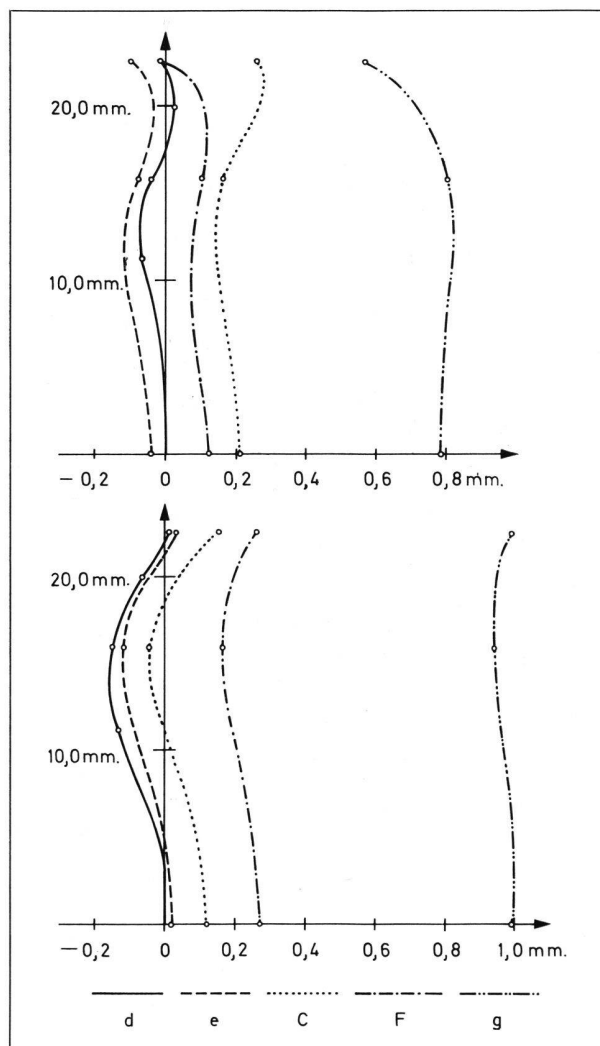


Abb. 17 Korrektionszustand des Fernrohres bei Fokussierung auf  $\infty$  und auf 1,75 m.

## VII. Bedienungselemente und Zwangszentrierung

Alles, was vom Beobachter vor oder während der Messung angefaßt werden muß, fällt unter den Begriff Bedienungselemente.

### 1. Horizontiervorrichtung

Sie muß einerseits gestatten, die Stehachse lotrecht zu stellen, und andererseits während der Messung den Träger des Horizontalkreises absolut verdrehungssicher mit der Unterlage des Theodolits verbinden. Wenn auch das letzte Argument auf Stativen kaum stichhaltig ist, so gilt es um so mehr für Beobachtungen auf Pfeilern. Die Horizontiervorrichtung des DKM 2-A ist völlig spielfrei. Sie wird bezüglich Verwindungssteifigkeit von normalen Fußschrauben nicht erreicht.

### 2. Achsklemmen und Feinstellschrauben

Die Achsklemmen lehnen sich an bewährte Konstruktionen an. Die Feinstellschrauben dagegen sind ganz neu gestaltet worden. Die üblichen Knopfdurchmesser werden für die Arbeit mit Handschuhen als zu klein erachtet, und eine mechanisch noch vertretbare Feinstellschraube mit einem Gewinde von  $M 5 \times 0,3$  mm erweist sich für die in Frage kommenden Längen der Klemmhebel als zu grob. In den neuen Knöpfen mit größerem Durchmesser findet noch ein im Verhältnis 1:2 untergesetzter Grob-Feintrieb Platz, womit beide Anliegen erfüllt sind. Der Feintrieb hat einen relativ kleinen Bereich von rund  $5^\circ$ , der jedoch genügt, wenn der Beobachter mit dem Grobtrieb systematisch etwas über das Ziel hinausfährt. Er kann dann nach Belieben zum genauen Zielen innerhalb des Bereiches von  $5^\circ$  mit dem Feintrieb rückwärts und vorwärts drehen.

Die Anordnung der Feinstellschrauben ist so getroffen, daß der Beobachter mit beiden Händen bequem gleichzeitig beide Feinstellschrauben bedienen kann.

### 3. Zwangszentrierung

Der Schnittpunkt aller mit einem Theodolit gemessenen Richtungen liegt in der Stehachse. Zwangszentrierung heißt jene Vorrichtung, die gestattet, die Zentren anderer Instrumente, beispielsweise in einem späteren Zeitpunkt wieder eines Theodolits, automatisch wieder an denselben Ort zu bringen. Jede Zwangszentrierung besteht aus einem ortsfesten Teil und einem Teil am Meßinstrument. Mechanisch einfach und theoretisch einwandfrei wäre eine Zwangszentrierung durch eine verlängerte Stehachse, die direkt als Zentrierzapfen in eine passende Bohrung im ortsfesten Teil eingreift. Wegen der Drehung der Stehachse ist diese Lösung jedoch undenkbar. Mechanisch gleich einfach und theoretisch ebenso einwandfrei ist eine Lösung mit festem, vom ortsfesten Teil bis in den Theodolit durchgehenden Zentrierzapfen als festen Teil der Stehachse, und als beweglichen Teil eine um diesen Zapfen drehbare Büchse. Wegen der Kugellager-Stehachse des DKM 2-A, die im Zentrum nur eine Büchse zur radialen Führung benötigt, läßt sich durch den in Abbildung 4 deutlich erkennbaren Zentrierzapfen eine allen Genauigkeitsansprüchen – auf Wunsch extremen Forderungen – genügende Zwangszentrierung ohne konstruktiven Mehraufwand bauen.

## VIII. Ausführungsvarianten und Zubehör

Der Theodolit ist mit  $400^\circ$ - oder  $360^\circ$ -Teilung und je mit 4 Fernrohrvarianten lieferbar.

Normales astronomisches Fernrohr (DKM 2-A)

Unter allen Varianten hat das verkehrte Bild wegen des Minimums an optischen Elementen den größten Bildkontrast und die beste Schärfe.

Terrestrisches Fernrohr mit geradsichtigem Prismenumkehrsystem (DKM2-AE).

Astronomisches Fernrohr mit fest eingebauter Autokollimationsvorrichtung (DKM2-AC).

Mit dem Fadenkreuz kann auf eine leuchtende Kreuzmarke gezielt werden. Die Reichweite ist mit rund 40 m erheblich größer als diejenige von Gaußschen Wechselokularen mit nur etwa 4–5 m Reichweite. Wechselokulare haben aber den Vorteil, an bereits vorhandenen Theodoliten ausgetauscht werden zu können.

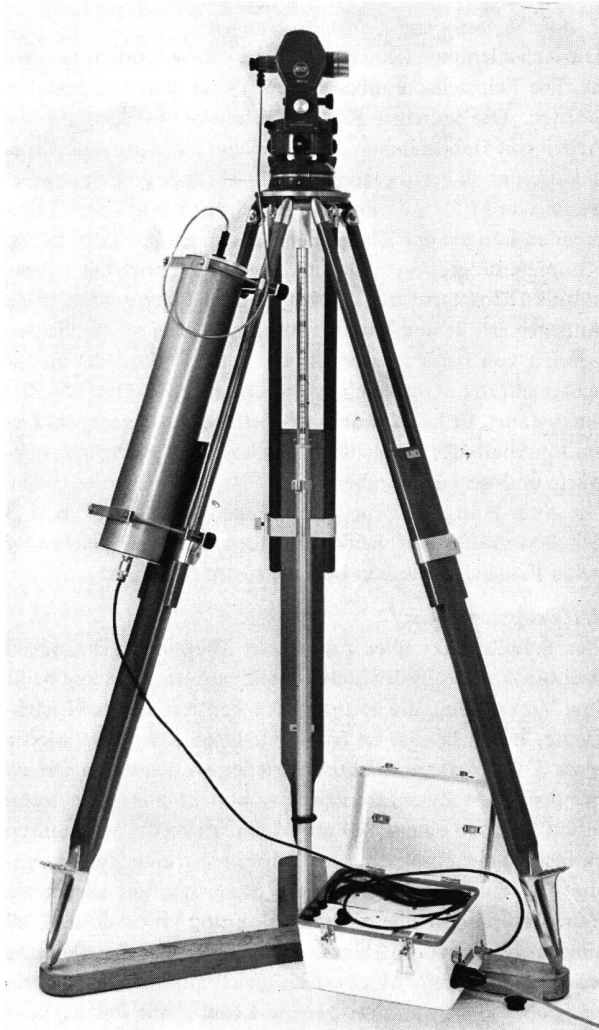


Abb. 18 DKM2-AL. Laserstrahl in das Fernrohr eingeblendet.

Astronomisches Fernrohr mit Vorrichtung zur Einblendung eines Laserstrahles (DKM2-AL).

Über ein Lichtleitkabel wird ein Laserstrahl zwischen Okular und Strichplatte in das Fernrohr eingeblendet. Die vom Laser beleuchtete Strichplatte wird durch das Fernrohrobjektiv auf eine Zieltafel projiziert. Die Reichweite mit der Möglichkeit, die projizierte Strichplatte zu identifizieren, beträgt bei Tage etwa 200–300 m, bei Nacht etwa 600–700 m. Verwendet wird diese Variante vor allem im Stollenbau und allgemein im Bauwesen.

Auf ein Tripelprisma, wie sie beispielsweise als Reflektoren für Geodimeter, DI10 usw. verwendet werden, kann je nach Durchmesser bis auf etwa 4 km bei Sonnenschein tagsüber gezielt werden, freilich nicht auf das projizierte Fadenkreuzbild, sondern auf den Lichtpunkt im Tripelprisma. Damit ergeben sich für Spezialzwecke absolut symmetrische und von der Beleuchtung unabhängige Zielmarken.

Als Zubehör kommt im wesentlichen in Frage: elektrische Beleuchtung, wahlweise 3 V oder 6 V; gebrochene Okulare; Reiterlibelle; Signaltafeln; Pfeilergrundplatten; Basislatte; Wechselokular für  $V = 16\times$ ; Autokollimationsokulare nach Gauß für kleine Reichweite; Planplattenmikrometer zum Messen von Abständen gegenüber der Ziellinie, Bereich 5 mm.

#### Literatur

Haller, R.: Theodolitachsen, ihre Konstruktion, Herstellung und Herstellungsgenauigkeit. Vermessungstechnische Rundschau, 1959, Bd. 21, S. 109.

Jochmann, H.: Die Eliminierung des Einflusses von Neigungs- und Richtungsänderungen der Ziellinie an Instrumenten für geodätisch-astronomische Ortsbestimmungen mit Hilfe mechanischer Neigungskompensatoren. Deutsche Geodätische Kommission, 1964, Reihe B, Heft 95, Teil III, S. 81.

Koch, J.: Die Verbesserung der Grobablesung an Mikrometertheodoliten. Interner Bericht Kern & Co. AG, unveröffentlicht.

Matthias, H.: Umfassende Behandlung der Theodolitachsenfehler auf vektoriellem Grundlag unter spezieller Berücksichtigung der Taumelfehler der Kippachse. Zürich 1961.

Nigge, K.E.: Untersuchungen über die Achromasie moderner Theodolitfernrohre und ihren Einfluß auf die Zielgenauigkeit. Veröffentlichung des Geodätischen Institutes der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, Nr. 4, 1962.

Noetzi, A.: Untersuchung über die Genauigkeit des Zielens mit Fernrohren. Zürich 1913.

Schwebel, R.: Untersuchung instrumenteller Fehler von Universal- und Passage-Instrumenten mit Hilfe von Autokollimation. Deutsche Geodätische Kommission 1968, Reihe C, Heft 117.

Zürcher, W., Čanžek, L.: Studien zur Verbesserung von Linsenfernrohren. Interner Bericht Kern & Co. AG, unveröffentlicht.

Redaktion: Chefredaktion: Prof. Dr. F. Kobold, Institut für Geodäsie und Photogrammetrie ETH, Leonhardstraße 33, 8006 Zürich  
für Kulturtechnik: H. Braschler, dipl. Ing., Chef des Meliorations- und Vermessungsamtes St. Gallen, Moosbruggerstraße 11, 9001 St. Gallen

für Vermessung: Prof. R. Konzett, Institut für Geodäsie und Photogrammetrie ETH, Leonhardstraße 33, 8006 Zürich

für Photogrammetrie: Prof. P. Howald, Dépt. de génie rural et Géomètres, EPF, 33, Ave de Cour, 1007 Lausanne

für Planung und Aktuelles: G. Wyssling, dipl. Ing., Rüeggisingerstraße 29, 6020 Emmenbrücke

Redaktionsschluß am 10. des vorhergehenden Monats

Insertionspreis ab 1. I. 1972: Inland Fr. 1.60, Ausland Fr. 1.90 per einspaltige Millimeterzeile. Bei Wiederholungen Rabatt.

Schluß der Inseratenannahme am 10. des vorhergehenden Monats.

Abonnementspreis: Schweiz Fr. 38.–, Ausland Fr. 46.– jährlich.

Expedition und Administration: Fabag + Druckerei Winterthur AG, 8401 Winterthur, Telefon 052/29 44 21

Inseratenannahme: Fabag + Druckerei Winterthur AG, Stauffacherquai 40, 8004 Zürich, Telefon 01/23 77 44