



Der Elektronische Präzisions-Theodolit Kern E 2

Mechanik – Elektronik – Systemkonfiguration



Dipl. Ing. K.H. Münch
Kern & Co. AG
CH-5001 Aarau, Schweiz

Zusammenfassung

Es wird der elektronische Präzisions-Theodolit Kern E2 in seinem mechanischen und elektronischen Aufbau beschrieben. Besonders hervorgehoben werden die Neuerungen wie die Horizontierung mit nur 2 Horizontierschrauben, der Kompensator mit gleichzeitiger Kompensation in zwei Richtungen, das Verfahren der Kreismessung sowie die internen Kontrollfunktionen.

Der E2 wird vorgestellt als Teil des umfangreichen modularen Gerätesystems Kern, in dem der Uebergang von optisch-mechanischen zu elektronischen Theodoliten für den automatischen Datenfluss unter Verwendung identischer Module fließend möglich ist.

Summary

The electronic precision theodolite Kern E2 is described regarding its mechanical and electronic functions. Special emphasis is put on the innovations like the leveling procedure with only two leveling screws, the compensator for simultaneous compensation in two directions, the method of the angle measurement as well as the internal control functions.

The E2 is presented as part of the extensive modular instrument system Kern with which the transition from optical-mechanical to electronic theodolites in regard to the automatic data flow can be realized any time using identical modules.

Résumé

La construction mécanique et électronique du théodolite électronique de précision Kern E2 est décrite. Les nouveautés comme l'horizontalisation avec seulement deux vis de calage, le compensateur pour compensation simultanée en deux directions, la méthode de la mesure des angles ainsi que les fonctions internes de contrôle du théodolite, sont relevées particulièrement.

Le théodolite E2 est présenté comme partie intégrante du système modulaire d'appareils Kern dans lequel la transition d'un théodolite optique-mécanique à un théodolite électronique concernant la transmission automatique de valeurs se réalise facilement en utilisant les modules identiques.

1. Allgemeine Situation

FIG-Kongresse sind meistens Anlässe, bei denen vor dem internationalen Fachpublikum neue Geräte und Verfahren angekündigt oder vorgestellt werden. So war es 1977 in Stockholm, als die ersten elektronischen Theodolite und Tachymeter zu besichtigen waren. Kern war mit dem E1 vertreten. 1981 in Montreux gab es zu den bestehenden Geräten Ergänzungen, die den elektronischen Theodolit in einem System einbauten. Zweck des Systems ist es, den automatischen Datenfluss vom Feld bis zur digitalen Speicherung oder graphischen Darstellung der Situation zu gewährleisten. Software zur Realisierung des Datenflusses sowie die entsprechenden Registrier-, Lese- und Uebertragungsgeräte samt der Schnittstellen-Fragen wurden behandelt. Kern zeigte zum FIG-Kongress 1981 zum erstenmal das System zur Datenverarbeitung unmittelbar im Feld. Mittels des Kern Dateninterfaces DIF 41 wurde es möglich, Daten on-line zwischen Kern-Messgeräten und dem Taschenrechner HP-41 auszutauschen und zu verarbeiten. Es ist das mit SICORD bezeichnete System (Software and Instrumentation for Coordinate Registration and Determination). Eine Lösung, die ganz entscheidend zur Beschleunigung, Sicherheit und Kontrolle der Feldvermessung beiträgt.

Am FIG-Kongress 1983 in Sofia wurden zusätzliche Geräte zur elektronischen Winkelmessung vorgestellt, die die bisherigen ergänzen und den Einsatzbereich erweitern. Damit wird die elektronische Winkelmessung immer mehr in der täglichen Vermessungspraxis integriert. Dies bedeutet, dass auch Geräte für präzise Arbeiten benötigt werden, sei es für Aufnahme- oder Absteckungszwecke, bzw. in der Industrievermessung.

Entsprechend den verschiedenen Anforderungen an die Genauigkeit, an den Umfang der Daten und an die Organisation der Vermessung hat Kern bereits 1973 begonnen, ein System in modularer Bauweise zu konzipieren. Es gestattet nahezu beliebige Kombinations- und Anpassungsmöglichkeiten.

Seit Mitte 1984 ist zusätzlich ein programmierbarer Feldcomputer verfügbar. Grosse Speicherkapazität, die Eingabe beliebiger alphanumerischer Zeichen und umfangreiche Rechen- und Uebertragungsmöglichkeiten sind einige Merkmale des mit ALPHACORD bezeichneten Gerätes.

Der neue elektronische Sekunden-Theodolit Kern E2 [Fig. 1] fügt sich nun nahtlos in dieses bestehende modulare Gerätesystem ein. Seine Bedeutung wird gleichzeitig noch untermauert durch ein weiteres Programmpaket zur HP-41. Im on-line-Betrieb stehen damit bereits beim Feldeinsatz Möglichkeiten der Rationalisierung der Vermessung offen, die bisher ohne Vergleich sind. Der Operateur kommt schneller zu seinen Ergebnissen, er kennt die Genauigkeitsverhältnisse bereits vor dem Verlassen der Station und erspart sich damit die zeitraubende Fehlersuche oder kostspielige Nachmessungen. Dies hat selbstverständlich auch Auswirkungen auf die Ablieferung der Arbeit sowie auf die gesamte Wirtschaftlichkeit eines Auftrages. Gleichzeitig erschliesst der E2 zusammen mit der entsprechenden Software das weite Feld der Ingenieur- und Industrievermessung.

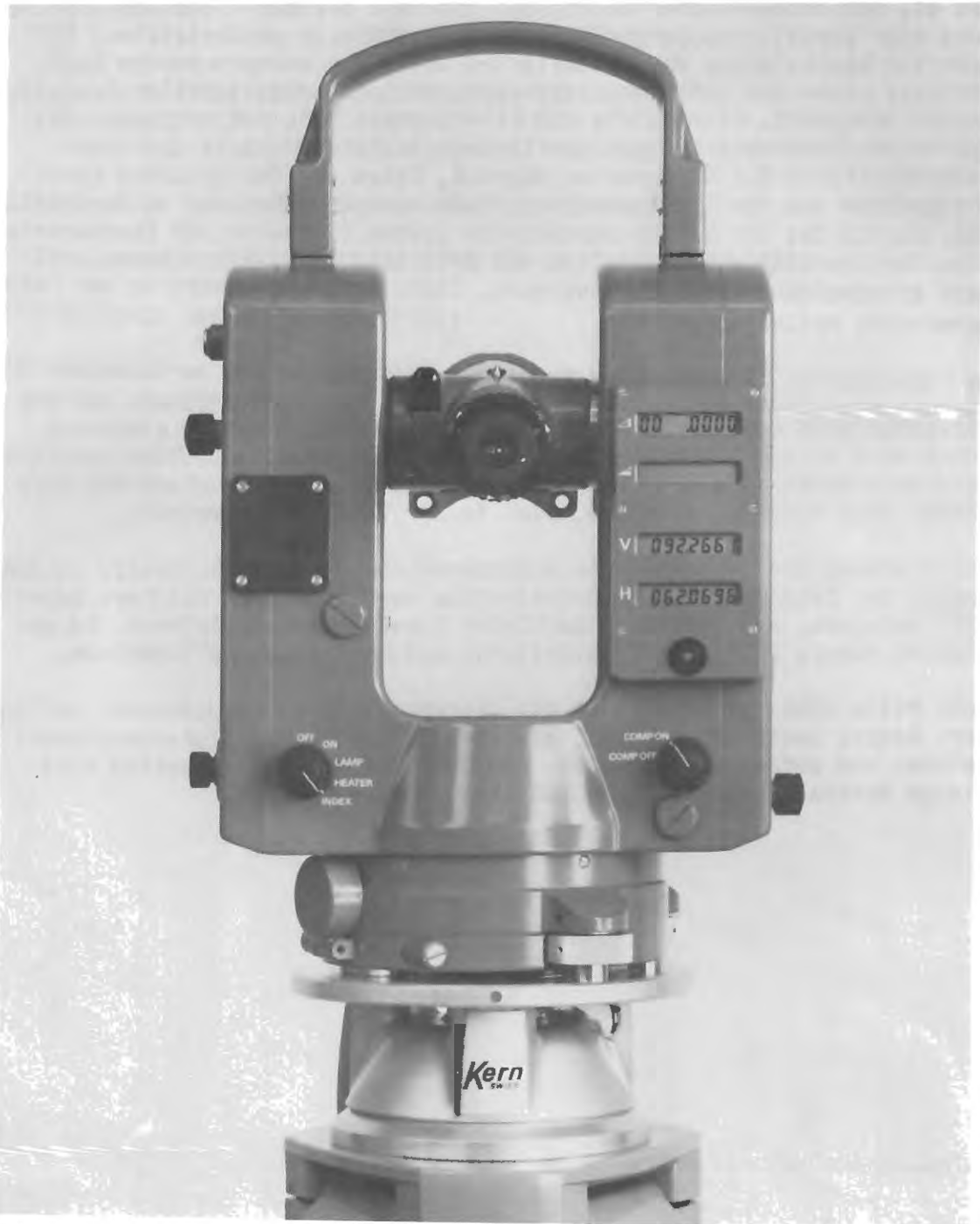


Fig. 1
Elektronischer Sekunden-Theodolit Kern E2

2. Mechanischer Aufbau des E2

2.1 Der Uebergang von optisch-mechanischen zu elektronischen Geräten

Der einfache und von konventionellen Theodoliten her bekannte Aufbau des E2 stellt keine besonderen Anforderungen an den Beobachter betreffend Bedienung oder Einsatz des Gerätes. Zu den sozusagen selbstverständlichen Funktionen bietet der E2 aber einige Besonderheiten. Dieser Aufsatz soll dazu beitragen, den E2 in Aufbau und Anwendung etwas näher kennenzulernen.

Die heute in Vermessungsgerate eingebauten, wirtschaftlich vertretbaren elektronischen Komponenten sind nur in beschränktem Masse in der Lage, die Mechanik zu ersetzen. Für eine hohe Präzision ist weiterhin die Feinmechanik von erheblicher Bedeutung. Ohne die mechanische Stabilität bringt auch die höchste elektronische Auflösung keine Genauigkeitssteigerung. Jedoch können heute instrumentelle Fehler und Abweichungen von Idealverhaltnissen in digitaler Form sichtbar gemacht werden. Damit sind sie für jeden eindeutig und objektiv ablesbar. Diese Abweichungen im Rahmen der Fabrikationstoleranzen sind auch bei optisch-mechanischen Geräten vorhanden, nur mussten sie dort erst durch geeignete Mess- und Rechenverfahren vom Beobachter selbst "sichtbar" gemacht werden.

Microprozessoren ermöglichen nun, Instrumentenfehler zu speichern und nachfolgend automatisch zu berücksichtigen. Aber das ist nur solange sinnvoll, wie die Stabilität der Mechanik diese Abweichungen konstant hält. Jede Mechanik reagiert bekanntlich auf externe und interne Temperatureinflüsse. Die Auswirkungen auf die Messgenauigkeit müssen u.a. durch konstruktive Massnahmen möglichst klein gehalten werden. So ist z.B. eine der Ursachen - die interne Erwärmung elektronischer Theodolite - beim E2 weitgehend eliminiert, da die Leistungsaufnahme des Theodolits nur 3,2W beträgt.

Unvermeidliche Taumelfehler der Stehachse verfälschen die Horizontal- und Vertikalwinkel-Messung. Nur Kompensatorsysteme, die wie beim E2 gleichzeitig in Kipp- und Zielachsrichtung kompensieren, können diese Einflüsse automatisch eliminieren.

Voraussetzung für einen elektronischen Sekunden-Theodolit ist daher, dass die für die Genauigkeit entscheidenden Elemente - mechanische Stabilität, Kreisgenauigkeit, Kompensatorsystem, Interpolationsverfahren, Fernrohr - sehr gut aufeinander abgestimmt sind.

2.2 Die drei wesentlichen Teile eines Theodolits

Ein Theodolit besteht aus den folgenden Haupt-Baugruppen: dem feststehenden Unterteil, der drehbaren Alhidade mit Stütze und schliesslich dem Fernrohr. In diesen Teilen sind die Funktionselemente untergebracht. Der E2 unterscheidet sich in dieser Hinsicht nicht von optisch-mechanischen Geräten.

2.2.1 Der Theodolit-Unterteil

Zentrierung

Mit dem Unterteil [Fig. 2] wird der Theodolit auf dem Stativkopf zentriert und befestigt. Zur Zentrierung dient ein Zentrierzapfen innerhalb der Grundplatte, die Befestigung auf dem Stativkopf erfolgt über den Bajonettverschluss. Der Austausch von Kern-Geräten auf der gleichen Station wird damit innerhalb $\pm 0,03$ mm gewährleistet. Auf der Grundplatte ist die Kreisbüchse mit dem Horizontiersystem befestigt. Zusätzliche Zentrierungen sind für die Stehachse, den Teilkreis und die Alhidade erforderlich. Exzentrizitäten bei letzteren lassen sich durch die diametrale Abbildung weitgehend bereits in einer Lage ausschalten.

Horizontierung

Beim Horizontiersystem hat man neue Wege beschritten. Wie bereits der E1 so wird auch der E2 nur noch über zwei Horizontierschrauben geneigt, die im rechten Winkel zum Zentrum der Aufstellung angeordnet sind. [1] [6]

Das Zentrum ist realisiert durch eine Kugel, die in einer Kugelpfanne die Lage der Stehachse sowie der Stütze und des Teilkreises festlegt. Kreisbüchse und Alhidade werden um dieses zentrale Kugelgelenk gekippt und nicht, wie bei allen anderen Horizontiersystemen, über eine Fusschraube bzw. über die Verbindungslinie zweier Fusschrauben. Dieses neue Horizontiersystem hat die folgenden wesentlichen Vorteile:

- Die Kippachshöhe bleibt konstant, unabhängig vom Hub der Horizontierschrauben. Das Gerät wird im Zentrum der Stehachse unmittelbar über dem versicherten Punkt geneigt. Damit wird allen Anforderungen genüge getan, die eine konstante oder absolut bekannte Instrumentenhöhe voraussetzen. Dies ist z.B. der Fall bei kleinen räumlichen Netzen der Industrievermessung, wo eine hohe Nachbargenauigkeit der räumlichen Koordinaten gefordert wird. Es ist aber auch von Bedeutung bei der genauen trigonometrischen Höhenübertragung.
- Der Vorgang der Horizontierung wird schneller und bequemer. Es genügt grundsätzlich, die Alhidadenlibelle in zwei zueinander rechtwinkligen Stellungen über je einer Horizontierschraube einzuspielen. Bei der Horizontierung mittels drei Fusschrauben wird meist bei der gleichzeitigen Drehung zweier Fusschrauben durch eine ungleichmässige Bewegung die Neigung zur dritten wieder verstellt.
- Das Gewicht des Instrumentes wird von der Kugel getragen und nicht von den Horizontierschrauben. Die gewünschte Belastung der Horizontierschrauben lässt sich durch Federn einstellen.
- Da die Spindeln von Fuss- oder Horizontierschrauben kein geeignetes Element zur azimuthalen Führung des Gehäuses gegenüber der Anzugsplatte sind, wird das Gehäuse mittels einer Feder gegen einen mit der Anzugsplatte verbundenen Anschlag gedrückt. Eine unbeabsichtigte Verdrehung des Unterteils ist damit ausgeschaltet. [Fig. 3]
- Schliesslich ist von Bedeutung, dass sich Spannungen in der Vorrichtung zur Befestigung des Instrumentes auf der Unterlage nicht auf den Instrumentenunterteil und die Genauigkeit der Kreisablesung auswirken können.

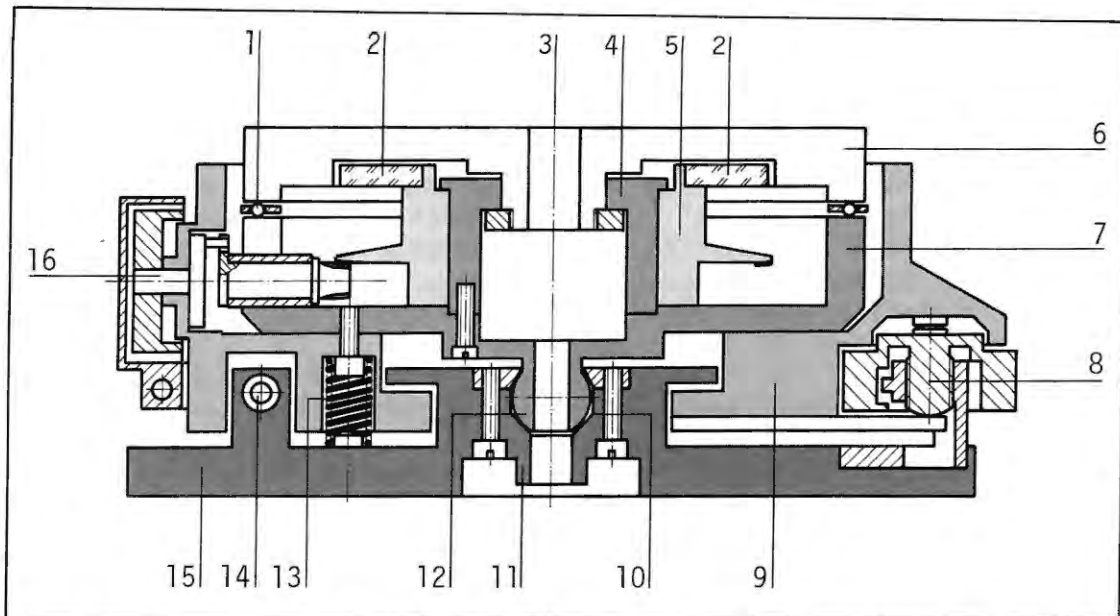


Fig. 2
Theodolit-Unterteil Kern E1, E2

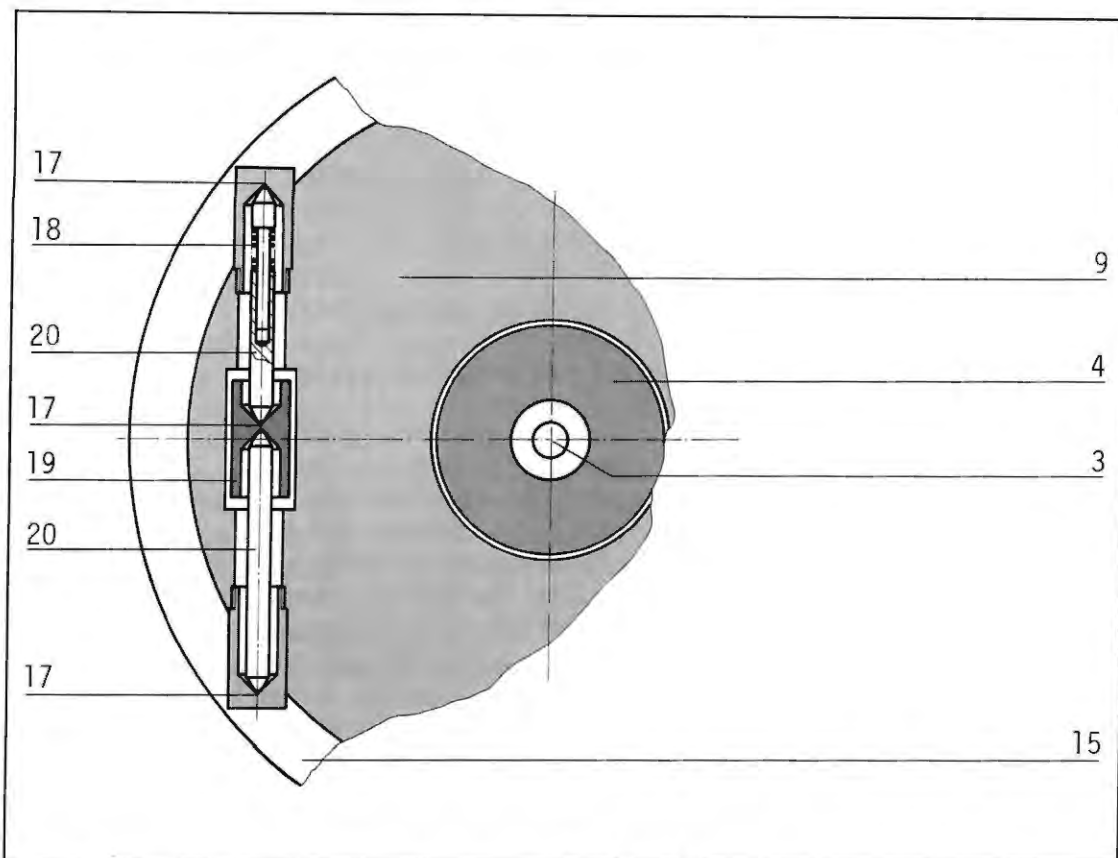


Fig. 3

Azimutale Sicherung

- | | | |
|-----------------------|------------------------|--------------------|
| 1 Kugellager | 8 Horizontierschraube | 16 Kreistrieb |
| 2 Teilkreis | 9 Gehäuse | 17 Drehpunkt |
| 3 Stehachse | 10 Kugelpfanne | bei Horizontierung |
| 4 Zentrierung von | 11 Zentriersapfen | 18 Feder |
| Alhidade und Kreis | 12 Kugel | 19 Anschlag |
| 5 Kreisträger | 13 Druckfeder | auf Anzugsplatte |
| 6 Laufring (Alhidade) | 14 Azimutale Sicherung | 20 Lagerstift |
| 7 Tragring | 15 Anzugsplatte | |

Stehachse

Mit dem Kugelgelenk zur Zentrierung und Horizontierung wird gleichzeitig die Stehachse festgelegt. Mechanisch ist sie realisiert durch zwei Stahlringe, zwischen denen Präzisionskugeln laufen. Entscheidend für möglichst kleine Achsschwankungen ist u.a. die Planität der beiden Laufringe. Durch eine Polierung auf $0,2\ \mu\text{m}$ genau ist man in der Lage, diese Schwankungen unter $0,5''$ zu halten. Durch die Kugellagerstehachse wird ausserdem ein niedriger Aufbau mit gleichzeitig gutem Laufverhalten erreicht. Zur Stromführung und Datenübertragung ist der drehbare Ober- teil über Schleifringe mit dem Unterteil verbunden.

Horizontalkreis

Zentrisch zur Stehachse liegt der Horizontalglaskreis auf einer eigenen Achse. Er hat beim E2 einen Teilungsdurchmesser von 70 mm und liegt innerhalb der Laufflächen der Stehachse. Die Teilung besteht aus 20'000 Strichen von je $5,5\ \mu\text{m}$ Dicke. Der Zwischenraum zwischen zwei Strichen entspricht der Strichdicke. Das Verfahren der Winkelmessung wird im Abschnitt Kreismessung beschrieben.

Mittels eines Kreistriebes lässt sich der Kreis um beliebige Beträge verstellen und so auch eine gewünschte Ausgangsrichtung einstellen. Diese relativ aufwendige Einrichtung ist als eine Konzession an über- lieferte Vermessungsmethoden anzusehen, bei denen eine Kreisverstellung zwischen zwei Messungen zur Verringerung von Teilkreisfehlern ausgeführt wurde. Aufgrund der hohen absoluten Genauigkeit der Teilkreise ist jedoch mit dieser Massnahme heute keine Genauigkeitssteigerung mehr möglich.

2.2.2 Der Theodolitoberteil - Die Alhidade

Die Alhidade dreht sich in einer Ebene um das im Unterteil definierte Zentrum und erlaubt damit, Richtungen in dieser Ebene zu messen. Sie enthält Ables- und Einstellvorrichtungen und trägt die Achse für das Fernrohr.

Alhidadenlibelle und optisches Lot

Die Alhidadenlibelle dient zur Horizontierung des Instruments über dem Aufnahmepunkt. Sie kann teilweise ersetzt werden durch den Kompensator. Gebraucht wird sie noch, um den Arbeitsbereich des Kompensators zu finden ($\pm 0,05\ \text{gon}$, $2,5'$). D.h. es genügt ein grobes Einspielen der Libelle, da 3 Teilstriche erst $1'$ ($0,02\ \text{gon}$) Stehachsneigung entsprechen. Die Horizontierung kann beim E2 sehr rasch auch "digital" kontrolliert und ausgeführt werden mit Hilfe der separaten Anzeige der beiden Neigungs- komponenten und der in Richtung der beiden Achsen wirkenden Horizontier- schrauben.

Zentriert wird bei Kern mittels des Zentrierstockes. Ein Vorteil, der bei diesem Verfahren meist übersehen wird, ist der, dass die Genauigkeit der Horizontierung hierbei keine Rolle spielt. Für diejenigen, die nur das optische Lot gelten lassen, steht auch beim E2 die Möglichkeit of- fen, damit zu zentrieren. Nur muss bei diesem Verfahren auf die Horizon- tierung und die Ueberprüfbarkeit des optischen Lotes geachtet werden.

Ablesesystem

Ueber dem Teilkreis befindet sich zentrisch die Prismenbrücke [Fig. 4] mit den diametralen Ablesestellen. Der Teilkreis wird mittels lichtemittierenden Dioden von unten beleuchtet und die Bilder der Kreisteilung über die Prismenbrücke aufeinander abgebildet [Fig. 5]. Vier Photodioden detektieren die dabei entstehenden Kreissignale. Die Verarbeitung dieser Signale wird im Abschnitt Kreismessung näher beschrieben.

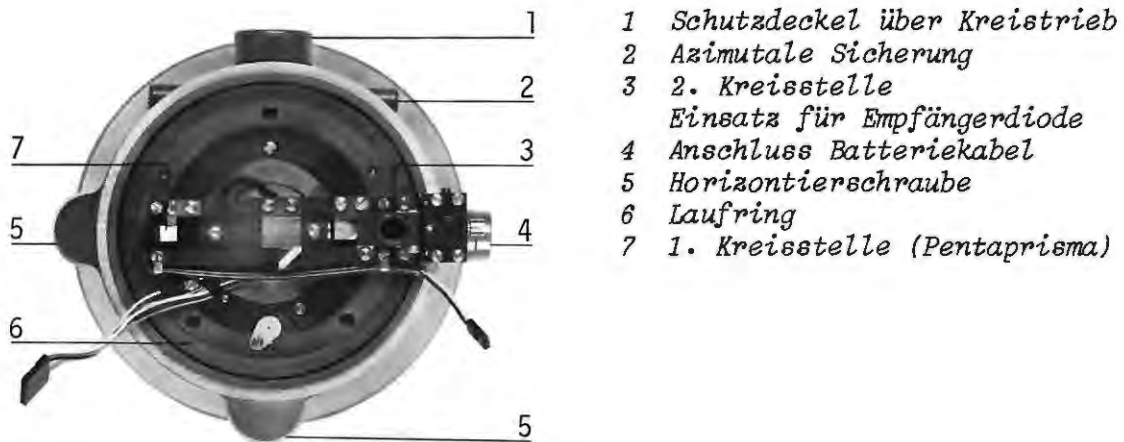


Fig. 4
Theodolit-Unterteil
mit Prismenbrücke

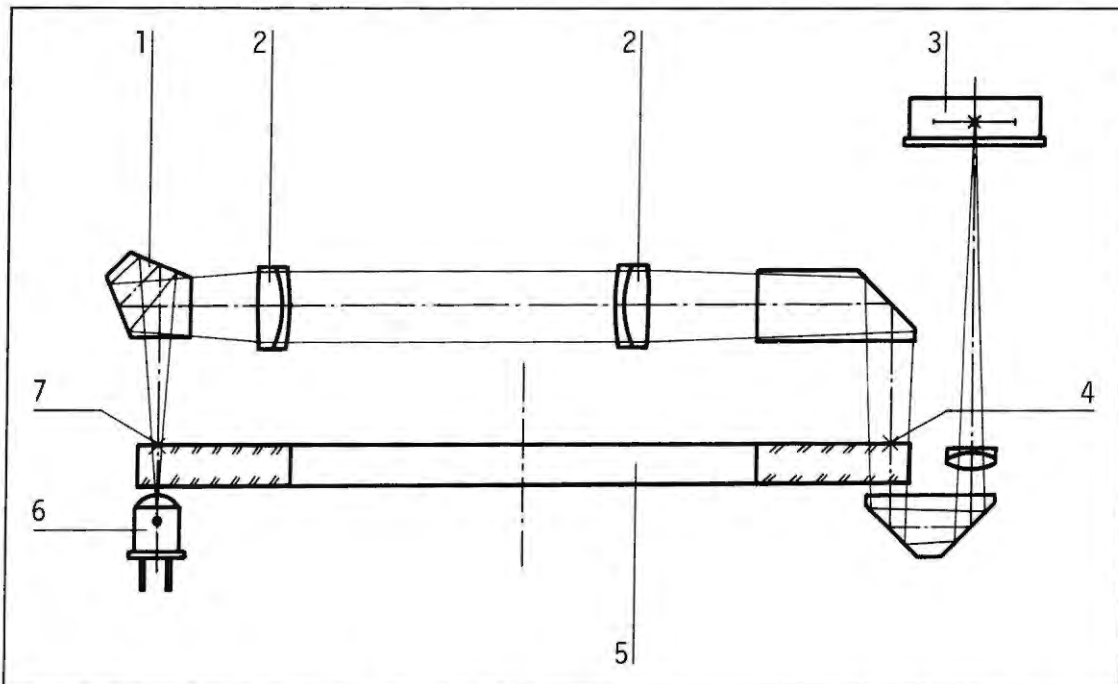


Fig. 5
Kreis-Ablesesystem Kern E2

- | | |
|-----------------------------|----------------------|
| 1 Pentaprisma | 5 Teilkreis |
| 2 Abbildungssystem | 6 Beleuchtungsdioden |
| 3 Photodiode (Moiré-Muster) | 7 1. Kreisstelle |
| 4 2. Kreisstelle | |

Theodolitstütze

Wie bei mechanisch-optischen Theodoliten hat die Stütze die primäre Aufgabe, das Fernrohr zu tragen und seine Lagerung in der Kippachse zentrisch und rechtwinklig zur Stehachse zu gewährleisten. Zusätzlich enthält die Stütze den Vertikalkreis [Fig. 6] mit dem zum Horizontalkreis analogen Ablesesystem, den Kompensator für beide Achsrichtungen [Fig. 7], die Elektronik zur Verarbeitung der Messsignale sowie die Anzeigen. Im Vergleich zu mechanisch-optischen Theodoliten entfallen einige Optikteile, die zur Koinzidenz und Abbildung der Kreisablesungen nötig waren. Es handelt sich dabei zum grössten Teil nur um Betrachtungsoptik.

Zusätzliche Schalter dienen zur Einstellung von Korrekturwerten oder zur Trennung der Kompensationswerte von den angezeigten Winkelwerten.

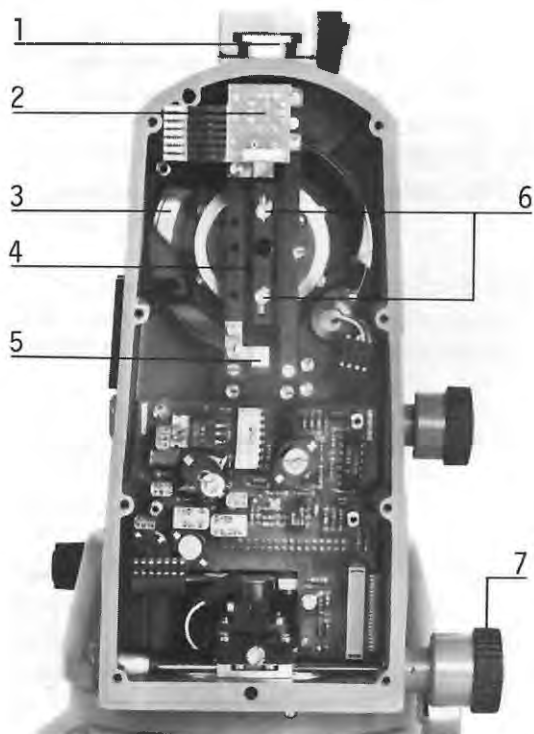


Fig. 6
Theodolitstütze mit Vertikalkreis
1 Griff
2 Photodiode (Moiré-Muster)
3 Vertikalkreis
4 Prismenbrücke
5 1. Kreisstelle (Pentaprisma)
6 Abbildungssystem für Moiré-Muster
7 Horizontalfeintrieb

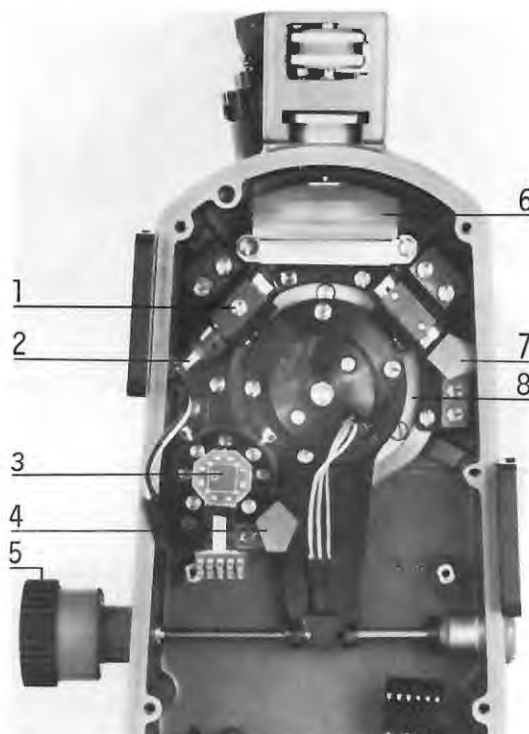


Fig. 7
Kompensatorsystem
1 Abbildungssystem
2 Beleuchtungsdiode
3 Positionsdetektor
4 Pentaprisma
5 Vertikalfeintrieb
6 Flüssigkeitskompensator
7 Pentaprisma
8 Kippachslager

2.2.3 Das Fernrohr

Das Fernrohr wurde vom DKM 2-A übernommen und erfüllt damit alle an einen Sekunden-Theodoliten gestellten Anforderungen. Nicht mehr vorhanden ist das Ableseokular aufgrund der elektronischen Kreisabtastung und der digitalen Anzeige der Winkelwerte. Zielvorrichtung sowie Kontaktstellen zur Stromversorgung und Datenübertragung zwischen Theodolit und Distanzmesser sind die gleichen wie bisher. Ausserdem sind sämtliche Zubehörteile zum DKM 2-A-Fernrohr auch für den E2 verwendbar. Dies ist ein weiterer, wesentlicher Vorteil, der den Uebergang von den optisch-mechanischen zu den elektronischen Theodoliten flexibel und fliessend gestaltet.

3. Funktionsweise des E2

3.1 Zweck eines elektronischen Theodolits

Mit elektronischen Theodoliten wird es möglich, die Winkelwerte in einer Form zu liefern, die für eine weitere, automationsgerechte Datenverarbeitung geeignet ist. Das bedeutet, dass sie von Peripheriegeräten (Speicher, Uebertragungseinheiten, Rechner, Drucker) gelesen und falls erwünscht, weiter verarbeitet werden können. Sozusagen als Nebeneffekt ergibt sich dabei die digitale Anzeige der Messwerte und unter Einsatz eines Microcomputers (Microprozessor als Steuereinheit mit Programm- und Datenspeichermodulen sowie Ein/Ausgabe-Einheit) die Möglichkeit, Berechnungen und Korrekturen von Instrumentenfehlern im Theodolit durchzuführen.

Auf jeden Fall ist aber darauf zu achten, dass die Messwerte jederzeit auch als originäre, unverbesserte und nicht abgeleitete Werte zur Verfügung stehen. Es besteht sonst die Gefahr, dass allzu vielen, z.T. fest eingegebenen Korrekturen blind vertraut wird, ohne dass der Korrekturvorgang bekannt ist oder die veränderten Voraussetzungen berücksichtigt werden. Ganz abgesehen davon, sieht ein Verarbeitungsprogramm dem Messwert nicht unbedingt an, ob er verändert wurde. Beim E1 wie auch beim E2 und den Distanzmessern der DM 500-Serie wird das Prinzip der originären Messwerte für Registrierzwecke eingehalten.

Verschiedene Selbstdiagnose-Funktionen dienen zur Geräteüberwachung und geben Hinweise auf die Funktionstüchtigkeit des Instrumentes.

Die automatische Registrierung und Teilverarbeitung der Messwerte im Feld entlastet den Beobachter, indem die Protokolltätigkeit einfacher, sicherer und schneller wird. Durch den automatischen Datenfluss werden ausserdem reine Uebertragungsfehler (Lesen, Schreiben) ausgeschaltet. Weiterhin erlaubt eine Teilverarbeitung der Messwerte an Ort und Stelle eine unmittelbare Ueberprüfung der Messung, sie gibt Aussagen über die erreichte Genauigkeit und kann teure Nachmessungen verhindern.

Der Zweck eines elektronischen Theodolits kann jedoch nicht sein, die Mechanik weitgehend zu ersetzen oder deren Konstruktionstoleranzen beliebig auszuweiten. Wie stark auch weiterhin die Feinmechanik zur Ermittlung verlässlicher Messwerte mitbeteiligt ist, geht aus den vorangehenden Abschnitten hervor. Dies gilt im Besonderen für Theodolite hoher Präzision wie den E2.

Auf einen Punkt ist im Zusammenhang mit elektronischen Theodoliten noch speziell hinzuweisen. Aufgrund der Entwicklung der Computer- und Speichertechnik vollzieht sich im Hinblick auf die Berechnungen im Feld ein Sinneswandel. Früher war es mangels geeigneter Mittel meist nicht möglich, gleichzeitig zur Feldvermessung auch noch Berechnungen durchzuführen. Heute ist dies bereits zu einer Forderung für rationelles Vermessen geworden und durch den Einsatz dialog-orientierter Programme auch keine Hexerei mehr. Damit ist in der terrestrischen Vermessung eine ähnliche Veränderung zu beobachten wie sie in der Photogrammetrie bereits stattfand. Die Photogrammetrie galt früher als die Kunst, Rechnungen zu vermeiden. Heute werden die Rohdaten unmittelbar durch analytische Auswertegeräte und umfangreiche Programmsysteme aufbereitet.

3.2 Kreismessung

3.2.1 Allgemeines

Die Kreismessung im E2 beruht auf einem inkrementellen, optischen Messverfahren. Gegenüber dem E1 früherer Bauart hat sich die Analog-digital-Wandlung der Kreisteilung etwas geändert [2] [3]. Sie wird im folgenden in ihren Grundzügen beschrieben.

Auf einem Glaskreis sind 20'000 radiale Striche von 5,5 μm Dicke aufgetragen. Die Dicke der Striche ist gleich ihrem Abstand. Die sog. Gitterkonstante, bestehend aus Strich und Abstand, beträgt daher 11 μm , oder im Winkelmaß 0,02 gon. Zur Ermittlung der Winkelwerte werden jedoch nicht einzelne Teilstriche betreffend ihrer Lage zu einer Ablesestelle ausgewertet, sondern es wird ein Ausschnitt von insgesamt 200 Strichen

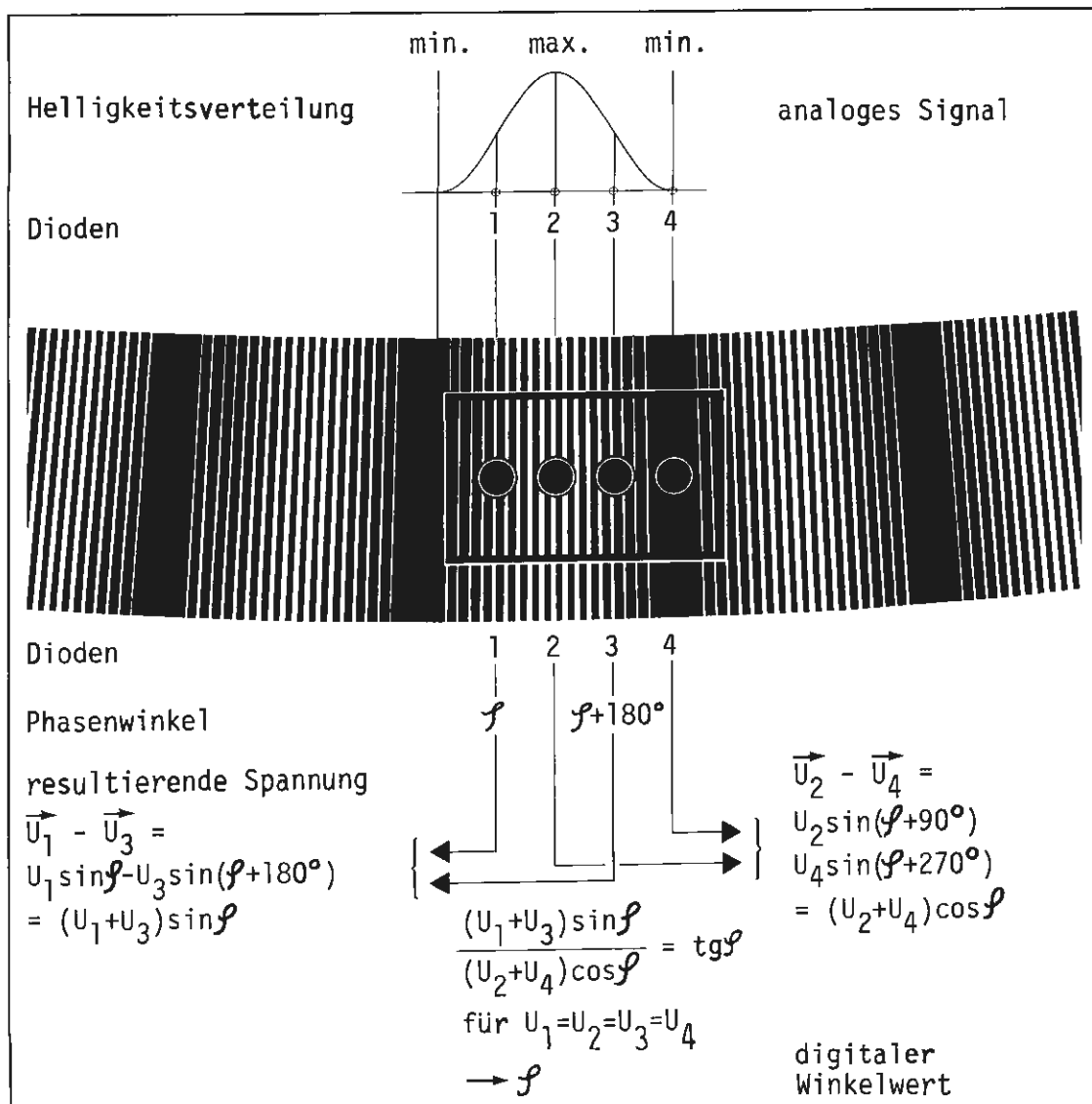


Fig. 8
Signalwandlung zur Feinmessung (Interpolation)

verwendet. Bildet man diesen Ausschnitt auf die diametrale Teilkreisstelle ab und vergrößert ihn dabei um eine Gitterkonstante (Vergrößerungsfaktor 1,005), ergibt sich ein Moiré-Muster mit einer vollen Periode (hell-dunkel-Variation). Die Periode entspricht einem Winkelwert von 0,02 gon, ihre physikalische Länge beträgt rund 2 mm ($200 \times 11 \mu\text{m}$). Mit einer 2-fachen Nachvergrößerung erhält man eine Länge von rund 4 mm, über die nun mit Photodioden die Helligkeitszustände abgetastet werden können.

Durch optische Mittel erreicht man, dass bei einer Verdrehung des Teilkreises eine Gegenläufigkeit der diametralen Kreisbilder entsteht. Bei einer Verdrehung um $\frac{1}{2}$ Gitterkonstante (= 1 Strichbreite, entsprechend 0,01 gon) läuft eine volle Moiré-Periode entgegengesetzt zur Drehrichtung an der Ablesestelle vorbei. Dies erlaubt die direkte Zählung von 0,01 gon-Intervallen. Der Feinmesswert ergibt sich aufgrund der Lage der Ablesestelle innerhalb einer Periode [Fig. 8]. Ein Vollkreis erzeugt somit 40'000 Perioden. Die Möglichkeit der Zählung der einzelnen Perioden bestimmt die maximale Umdrehungsgeschwindigkeit. Sie beträgt 2,5 U/sec entsprechend einer Durchlauffrequenz von 100 KHz.

Mittels des Moiré-Musters hat man erreicht, dass einerseits das Zählintervall von $11 \mu\text{m}$ auf 4 mm vergrößert werden kann, und dass die Ablesung sich als statistischer Mittelwert über 200 Striche ergibt. Eventuelle Teilungsfehler einzelner Striche oder leichte Verschmutzungen auf dem Teilkreis wirken sich nicht genauigkeitsmindernd aus. Das Verfahren bietet daher Gewähr für eine gleichbleibende hohe Genauigkeit über den gesamten Teilkreis.

3.2.2 Teilkreis-Grobmessung

Die Grobmessung wird bei inkrementellen im Gegensatz zu absoluten Messverfahren dynamisch durchgeführt. Es werden während der Drehung der Alhidade oder des Fernrohrs an einer Stelle des Ablesefensters Impulse gezählt und aufsummiert.

Da die Helligkeitsverteilung über eine Moiré-Periode annähernd sinusförmig ist, liefert bei wechselndem Moiré-Muster die Photodiode einen entsprechend modulierten Strom. Mittels elektronischen Verstärkern wird aus dem sinusförmigen Signal ein Rechtecksignal mit gleichen Nulldurchgängen erzeugt [Fig. 9]. Die Flanken derartiger Rechtecksignale können als Zählflanken dienen. Verwendet man nur jeweils die erste, positive Flanke eines Signals (Uebergang vom negativen in den positiven Zustand), lassen sich damit die Anzahl der an der Ablesestelle vorbeilaufenden Moiré-Perioden zählen. Damit ist der Drehwinkel auf 0,01 gon bekannt. Die Messung ist kontinuierlich.

3.2.3 Teilkreis-Feinmessung

Die Feinmessung kann bei inkrementellen Messverfahren statisch, d.h. bei stillstehendem Moiré-Muster durchgeführt werden. Um eine Genauigkeit von 0,1 mgon zu erhalten, muss die Moiré-Periode lediglich auf 1 % genau aufgelöst werden. Ziel der Feinmessung oder Interpolation ist es, die Lage der Ablesestelle zur Zählflanke innerhalb der letzten Moiré-Periode festzustellen. Dies lässt sich mit folgender Anordnung erreichen:

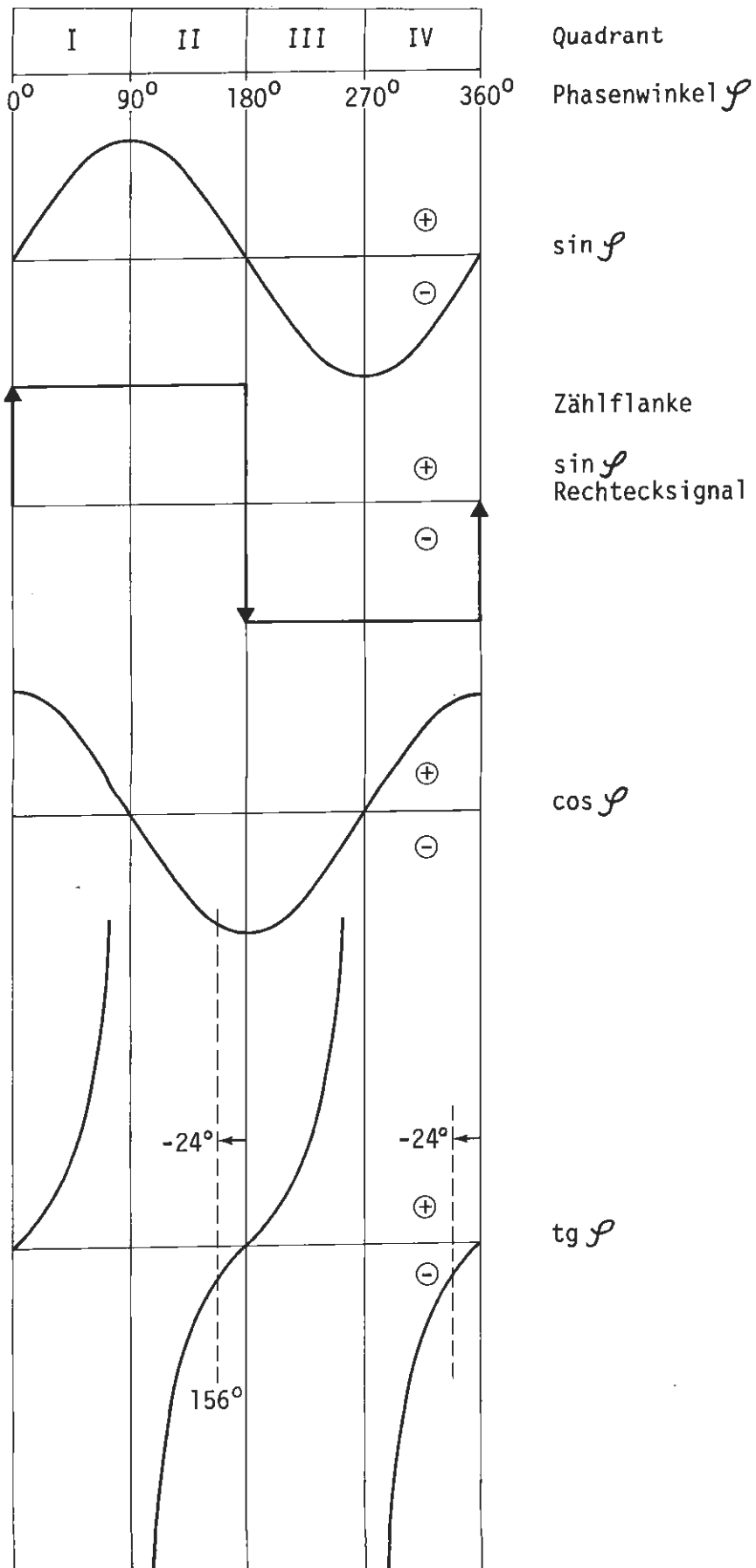


Fig. 9
 Ermittlung des Winkelwertes beim Kern E2
 (Grobzählung, Interpolation, Zuordnung)

Eine Diode liefert ein Signal, das proportional ist zur Helligkeit an der betreffenden Stelle der Periode. Der Abstand der Diode von der letzten Zählflanke ist der Wert der Feinmessung. Er ist definiert durch den entsprechenden Bruchteil n einer Moiré-Periode $2\mathcal{T}$ oder den sogenannten Phasenwinkel \mathcal{P} . Exakt an der Zählflanke wäre \mathcal{P} gleich Null (Nulldurchgang der Sinusfunktion).

Nur mit einer Diode lässt sich der Winkel nicht eindeutig festlegen, da der gleiche Helligkeitswert zweimal vorkommt. Ausserdem würde man einen durch den Gleichstromanteil der Diode instabilen Wert erhalten. Erst mit vier Dioden, die gleichmässig über die Moiré-Periode verteilt sind, lassen sich durch Differenzbildung je zweier Messwerte systematische Fehleranteile ausschalten und eine eindeutige Aussage über die Lage des Moiré-Musters gegenüber der Ablesestelle machen. Zusätzlich werden die unterschiedlichen Signale zur Unterscheidung der Drehrichtung im Vorwärts-, Rückwärts-Zähler benötigt.

Die Ableseioden haben einen gegenseitigen Abstand von $\frac{1}{4}$ Periode oder $\frac{\mathcal{T}}{2}$, im Winkelmass ausgedrückt 90° . Zur Ermittlung des Phasenwinkels werden die aufgrund der Photoströme erhaltenen Spannungen ausgewertet. Ordnet man der ersten Diode (Zählstelle für die Grobmessung) den Phasenwinkel \mathcal{P} zu, lassen sich aus der Differenz der gemessenen Spannungen an den Dioden 1 und 3 bzw. 2 und 4 folgende Werte ableiten [Fig. 8]:

$$\vec{U}_1 - \vec{U}_3 = U_1 \sin \mathcal{P} - U_3 \sin (\mathcal{P} + 180^\circ) = (U_1 + U_3) \sin \mathcal{P}$$

$$\vec{U}_2 - \vec{U}_4 = U_2 \sin (\mathcal{P} + 90^\circ) - U_4 \sin (\mathcal{P} + 270^\circ) = (U_2 + U_4) \cos \mathcal{P}$$

Da die Amplituden U_1, U_2, U_3, U_4 auf gleiche Grösse abgeglichen werden, führt eine Division der beiden Differenzwerte zu

$$\frac{\vec{U}_1 - \vec{U}_3}{\vec{U}_2 - \vec{U}_4} = \frac{(U_1 + U_3) \sin \mathcal{P}}{(U_2 + U_4) \cos \mathcal{P}} = \operatorname{tg} \mathcal{P}$$

Daraus lässt sich der Phasenwinkel \mathcal{P} und damit der Interpolationswert bestimmen. Sind die verfälschenden Stromanteile der Diodenpaare unterschiedlich gross, oder ist ihr Abstand zueinander nicht exakt 90° , werden die Fehleranteile durch die Differenz- und Quotienten-Bildung nicht vollständig eliminiert. Man kann jedoch von der theoretischen Voraussetzung ausgehen, dass als Differenzsignal ein sin- bzw. cos-Wert des gleichen Phasenwinkels \mathcal{P} und der gleichen Amplitude entstehen soll. Vereint man die beiden Signale auf einem Oszillographen zu Lissajous-Figuren, muss sich theoretisch ein exakter Kreis ergeben. Bei Abweichungen davon wird die Signalverstärkung der Dioden entsprechend verändert. Damit erhält man einen fehlerfreien Phasenwinkel. Um die Abweichungen kleiner als $0,1 \text{ mgon}$ (1 %) zu halten, brauchen die Amplituden und Phasenwinkeländerungen nur innerhalb 10 % zu liegen.

Es muss nun noch festgestellt werden, in welchem Quadranten \mathcal{P} liegt. Dies lässt sich eindeutig anhand des Vorzeichens des cos-Signals bzw. von $(\vec{U}_2 - \vec{U}_4)$ bestimmen [Fig. 9]. Ergibt sich z.B. \mathcal{P} mit -24° und ist $\cos \mathcal{P}$ negativ, entspricht dies einem Phasenwinkel \mathcal{P} von $-24^\circ + 180^\circ = 156^\circ$. Der Winkelbruchteil oder Feinmesswert dieser $0,01 \text{ gon}$ entsprechenden Moiré-Periode beträgt demnach $156^\circ/360^\circ \times 0,01 \text{ gon} = 0,00433 \text{ gon}$.

3.2.4 Zuordnung von Grob- und Feinmessung

Das Zusammenfügen wird um den Nulldurchgang der Zählflanke kritisch, d.h. wenn ρ einen Wert nahe 0° oder 360° annimmt. Wie aus der Fig. 9 hervorgeht, muss, falls eine Zählung stattgefunden hat (positive Flanke des sin-Rechtecksignals), der Tangens des Phasenwinkels einen positiven Wert annehmen.

Durch eine leichte Verschiebung der Zählflanke kann die Zählung zu früh oder zu spät eintreten. Um den daraus resultierenden Grobmessfehler von $\pm 0,01$ gon zu vermeiden, wird in der Umgebung der Zählflanke das Vorzeichen des sin-Signals analysiert. Ist z.B. $\text{tg } \rho$ negativ das sin-Rechtecksignal aber positiv, fand bereits eine Zählung statt, obwohl die Ablesestelle aufgrund der Feinmessung noch in der vorhergehenden Periode (4. Quadrant) liegt. Dies bedeutet, dass von der Grobmessung $0,01$ gon abgezogen wird. Entsprechendes gilt mit umgekehrten Vorzeichen für den 1. Quadranten.

Die Feinmessung wird in Abständen von rund $0,3$ sec wiederholt und die Anzeige des gesamten Winkelwertes im gleichen Rhythmus auf den neuesten Stand gebracht.

Eine besondere "Tracking-Funktion" für die Winkelmessung ist daher bei der quasi-kontinuierlichen Anzeige nicht nötig. Die Winkelwerte stehen jederzeit mit voller Genauigkeit zur Verfügung.

3.3 Teilkreisorientierung

3.3.1 Vertikalkreis

Bei inkrementellen Messverfahren ist grundsätzlich die Orientierung der Teilkreise, d.h. die Lage ihrer Nullmarke, nicht festgelegt. Nach dem Einschalten steht der Grobzählwert auf 0 und ist dabei einer zufälligen Stellung von Alhidade oder Fernrohr zugeordnet. Lediglich der Interpolationswert innerhalb einer Moiré-Periode kann ermittelt werden. Beim Vertikalkreis ist jedoch definitionsgemäss die Ablesung 0, sobald die Fernrohrachse mit der Stehachse koinzidiert und das Objektiv in den Instrumentenzenit zeigt. Die Abweichung der Stehachse von der Richtung der Schwerkraft wird unabhängig davon vom Kompensator berücksichtigt.

Zur Orientierung des Vertikalkreises befindet sich daher im Instrument eine "Nullmarke", die speziell eingelesen wird. Diese Marke besteht aus einer feststehenden und einer mit dem Vertikalkreis beweglichen Strichmaske. Im Augenblick der Freigabe sämtlicher Zwischenräume wird durch eine Beleuchtungsdioden ein Impuls auf einer Empfängerdiode erzeugt, der den Zähler für die Grobmessung startet.

Der operationelle Ablauf dieses mit Initialisierung bezeichneten Vorganges ist einfach. Man dreht das Fernrohr ohne spezielle Zielung durch den Horizont.

3.3.2 Horizontalkreis

Erst wenn die im vorhergehenden Abschnitt beschriebene Initialisierung durchgeführt wurde, ist eine Messung möglich. Der Zähler des Horizontalkreises steht auf 0, ausgewertet wird lediglich der Interpolationswert innerhalb der augenblicklich erfassten Moiré-Periode.

Eine Orientierung des Horizontalkreises ist auf drei Arten möglich:

1. Eine Null-Taste erlaubt das Nullsetzen der Anzeige in jeder beliebigen Position der Alhidade. Der zuvor angezeigte Wert wird gespeichert und vom aktuellen Wert abgezogen.
2. Mittels des Kreistriebes lässt sich der Kreis relativ zur Ablesestelle der Alhidade verdrehen. Die Intervalle werden gezählt und zusammen mit dem Interpolationswert angezeigt.
3. Bei Anschluss des ALPHACORD oder des Taschenrechners HP-41 über das DIF 41 wird software-mässig mittels eines Orientierungsprogrammes aufgrund der Messungen zu bekannten Zielpunkten die Orientierungsunbekannte ermittelt. Sie ist im Rechner gespeichert und wird bei Bedarf berücksichtigt. Der Rechner zeigt Theodolitrichtungen an. Eine manuelle Orientierung des Teilkreises mit den damit verbundenen Fehlerquellen (Zielverwechslung, falscher oder ungenauer Wert) entfällt dadurch.

3.4 Kompensator

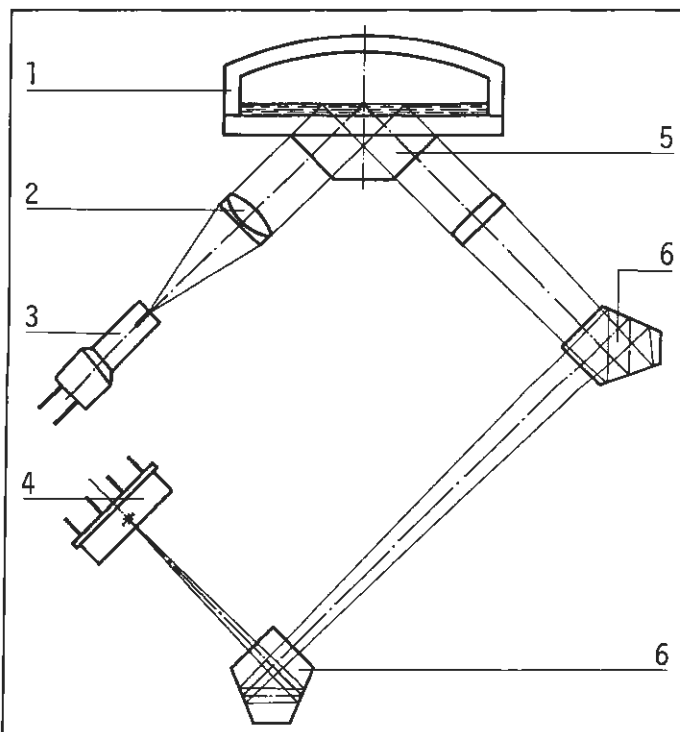
Entsprechend den Anforderungen an einen Präzisionstheodolit wird die Auswirkung einer Stehachsneigung beim E2 sowohl bei der Vertikalkreis- wie auch bei der Horizontalkreis-Ablesung automatisch berücksichtigt. Stehachsneigungen können z.B. durch eine mangelhafte Horizontierung durch Taumelfehler oder durch einseitige Gewichtsverteilungen auftreten.

Im Gegensatz zu optisch-mechanischen Theodoliten befindet sich der Kompensator beim E2 nicht im Ablesestrahlengang der Teilkreise, sondern ist ein separates Element [Fig. 7]. Die Kompensationswerte sind daher jederzeit von der Ablesung trennbar und können separat angezeigt werden. Ihre Werte lassen sich z.B. für die exakte Horizontierung des Gerätes oder zur Feststellung einzelner instrumenteller Korrekturen verwenden (Kompensator-Nullpunktfehler, Indexfehler). Abgesehen davon können auch Situationen auftreten, bei denen die Kompensation unbrauchbar oder unerwünscht ist, z.B. bei der Messung in einem geneigten Koordinatensystem oder auf vibrierendem Untergrund.

Die Kompensation beim E2 beruht auf der Spiegelung an einer horizontalen Flüssigkeitsoberfläche [Fig. 10]. Der Lichtpunkt einer Beleuchtungsdioden wird nach der Reflexion an der Flüssigkeitsoberfläche auf eine grossflächige Photodiode abgebildet. Diese Photodiode funktioniert als zweidimensionaler Positionsdetektor [Fig. 11]. Trifft der Lichtpunkt auf die aktive Fläche des Detektors, ergeben sich an den vier seitlich angebrachten Elektroden Photoströme. Diese Photoströme sind umgekehrt proportional zum Abstand des Lichtpunktes von den Elektroden. Damit kann die Lage des Lichtpunktes gegenüber einem Referenzwert (Kompensator-Nullpunkt) koordinatenmässig festgelegt werden. Die eine Koordinate ist ein Mass für die Neigung des Theodolits in Zielachsrichtung, die andere für die Neigung in Kippachsrichtung. Die Auflösung liegt unter einem μm (besser als 0,1 mgon).

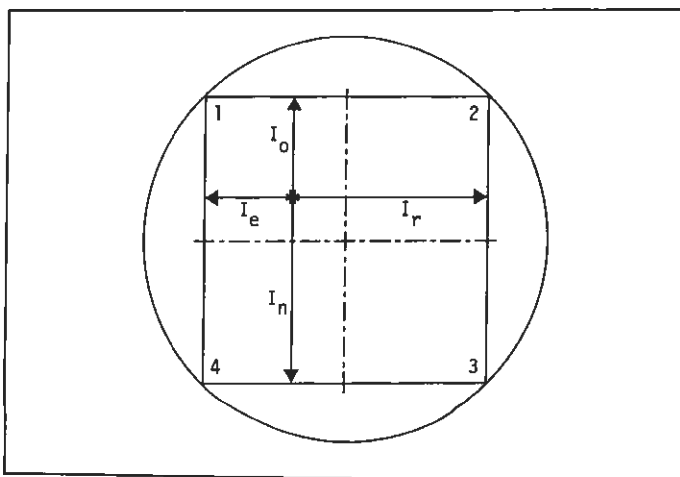
Elektronische Regelkreise sorgen dafür, dass die Messung im Rahmen der Messgenauigkeit unempfindlich ist gegenüber Temperatureinflüsse oder Variationen in der Helligkeit des Lichtpunktes.

Die Komponente $i(F)$ der Stehachsneigung in Zielrichtung wird direkt mit der Vertikalkreisablesung verrechnet [$Z = Z' + i(F)$], die Komponente $i(K)$ in Kippachsrichtung wird in Abhängigkeit des Vertikalwinkels umgerechnet in eine Korrektur für den Horizontalkreis [$H = H' + i(K) \text{ ctg } z$]. Beide Werte sind jedoch wie erwähnt auch von den Ablesungen trennbar. Sie können für die exakte Horizontierung des Instrumentes verwendet werden, ohne dass wie bisher die Alhidade um 90° verstellt werden muss. Eine spezielle Einleseprozedur sorgt dafür, dass der aktuelle Kompensator-Nullpunkt ("Spielpunkt" des Kompensators in Analogie zur Röhrenlibelle) ohne Auswirkung bleibt. Ein Verstellen der Alhidade um 180° zu Kontrollzwecken kann damit entfallen.



- 1 Flüssigkeitskompensator
- 2 Abbildungssystem
- 3 Beleuchtungsdiode
- 4 Photodiode (Posicon)
- 5 Prisma
- 6 Pentaprisma

Fig. 10
Kompensatorsystem Kern E2



- 1 - 4 Quadranten
- * Lichtpunkt
- ←→ Fernrohr-Richtung
- ↑↓ Kippachs-Richtung

Fig. 11
Positionsdetektor

3.5 Berücksichtigung von Gerätefehlern

Um eine Illusion von Anfang an zu zerstreuen: Die üblicherweise als Gerätefehler bezeichneten Einflüsse werden in elektronischen Theodoliten nicht automatisch in dem Sinne berücksichtigt, dass die Elektronik sie selbständig korrigiert. Man muss die Fehler messen und entsprechende Manipulationen vornehmen, damit sie gespeichert und als Korrektur verwendet werden können. Dieses Prozedere hat nur dann einen Sinn, wenn die Fehler zwischen zwei Bestimmungsperioden konstant bleiben. Sie sind abhängig von der Stabilität der Mechanik.

Im E2 lässt sich der Indexfehler als Summe von Vertikalkreis-Nullmarkenfehler (Abweichung der Nullmarke von der Richtung der Stehachse), Kompensator-Nullpunktfehler (Abweichung des Nullpunktes von der Richtung der Schwerkraft) und vertikalem Kollimationsfehler des Fernrohrs bestimmen und berücksichtigen. Die Fehler sind auch getrennt bestimmbar. Weitergehende Korrekturen wie instrumentelle Kippachsneigung und horizontaler Kollimationsfehler können bei Bedarf im angeschlossenen Rechner berücksichtigt werden.

3.6 Kontrollfunktionen

Die Elektronik bietet u.a. den Vorteil, Gerätefunktionen oder Manipulationen zu überwachen. Sobald gewisse vorgegebene Toleranzen überschritten werden, werden Schaltvorgänge ausgelöst, die zu Warnungen oder gar zum Blockieren der Messfunktionen führen. Der E2 bietet eine Reihe solcher Kontrollfunktionen, die die Sicherheit der Resultate und das Vertrauen in das Gerät erhöhen.

So wird bei einer zu schnellen Umdrehung ($>2,5$ U/sec, z.B. durch Stoss) von Fernrohr und Alidade die Anzeige und Ausgabe der Messwerte blockiert, die gleiche Massnahme wird erreicht, wenn das Instrument nicht mehr ausreichend horizontalisiert ist und der Kompensator ausserhalb des Arbeitsbereiches gerät.

Hinweise werden erhalten, wenn die Distanzübertragung vom Entfernungsmesser auf den Theodolit nicht einwandfrei war oder wenn sich grössere Dejustierungen im Messsystem für die Horizontal- oder Vertikalkreisablesung ergeben.

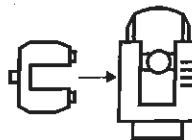
Weiterhin können die einzelnen Ziffern sämtlicher Anzeigen visuell innerhalb eines Kontrollablaufes überprüft werden. Die Anzeigen geben auch Hinweise auf den Zustand der Batterie oder auf Wackelkontakte in der Stromversorgung.

Damit bestehen beim E2 weitgehende Selbstdiagnosefunktionen, die dem Benutzer wertvolle Hinweise auf den Zustand seiner Ausrüstung geben. Wesentlich ist, dass diese Hinweise "automatisch" erscheinen und nicht durch den Benutzer abgefragt werden müssen.

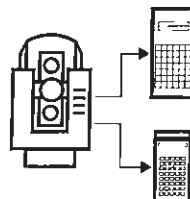
4. Zusatzgeräte

Um den automatischen Datenfluss bei verschiedenartigen Vermessungsarten zu gewährleisten, sind Zusatzgeräte erforderlich. Diese sind:

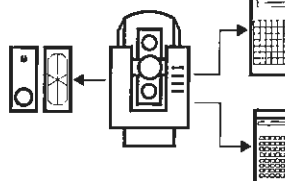
- Die aufsteckbaren Distanzmesser Kern DM 501, DM 502 oder DM 503. Sie machen den E2 zum elektronischen Tachymeter.



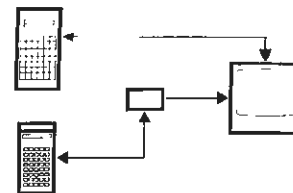
- Der anschliessbare Feldcomputer (ALPHACORD, HP-41, u.a.). Er ergänzt die Ausrüstung zum rechnenden und registrierenden elektronischen Tachymeter.



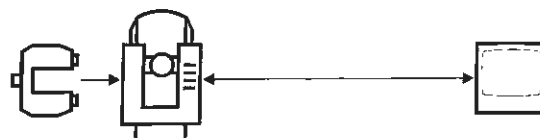
- Der Zielpunktempfänger Kern RD 10. Er ermöglicht den Empfang und die Anzeige von Mess- (E2/DM) oder Rechenwerten (HP-41/ALPHACORD) am Ort des Reflektors.



- Das Data Link Kern DL 40. Es ermöglicht die Kommunikation von HP-41 mit übergeordneten Rechnersystemen. Das ALPHACORD besitzt bereits eine eingebaute RS-232-Schnittstelle.



- Schliesslich ist über eine Kabelverbindung die on-line Datenübertragung zwischen E2/Distanzmesser und verschiedenen Rechnern möglich. Zuständig dafür ist das ASB-Datenbussystem, das u.a. den Übergang auf die RS-232C-Schnittstelle erlaubt [Fig. 9].



Programme

Zur Organisation des Datenflusses, zur Aufbereitung der Messungen und zur endgültigen Berechnung gewünschter Grössen sind neben der Hardware eine Reihe von Programmen zuständig. Sie bilden einen wesentlichen Teil des modularen Systems Kern.

5. Der elektronische Theodolit E2 im modularen Gerätesystem Kern

Der E2 ist Bestandteil eines modularen Systems, das je nach Bedürfnissen eine Reihe von Variationen zulässt [Fig. 12].

Der E2 ist an seiner Stelle im modularen Gerätesystem jederzeit austauschbar mit dem E1 bzw. mit den optisch-mechanischen Kern-Theodoliten DKM 2-A, K 1-S oder K 1-M.

Bei letzteren müssen die Messwerte in den ALPHACORD oder in den HP-41 manuell eingegeben werden. Die Übertragung berechneter Werte aus dem HP-41 zum Zielpunktempfänger RD 10 ist jedoch Sache des Distanzmessers und hängt nicht vom Theodolit ab.

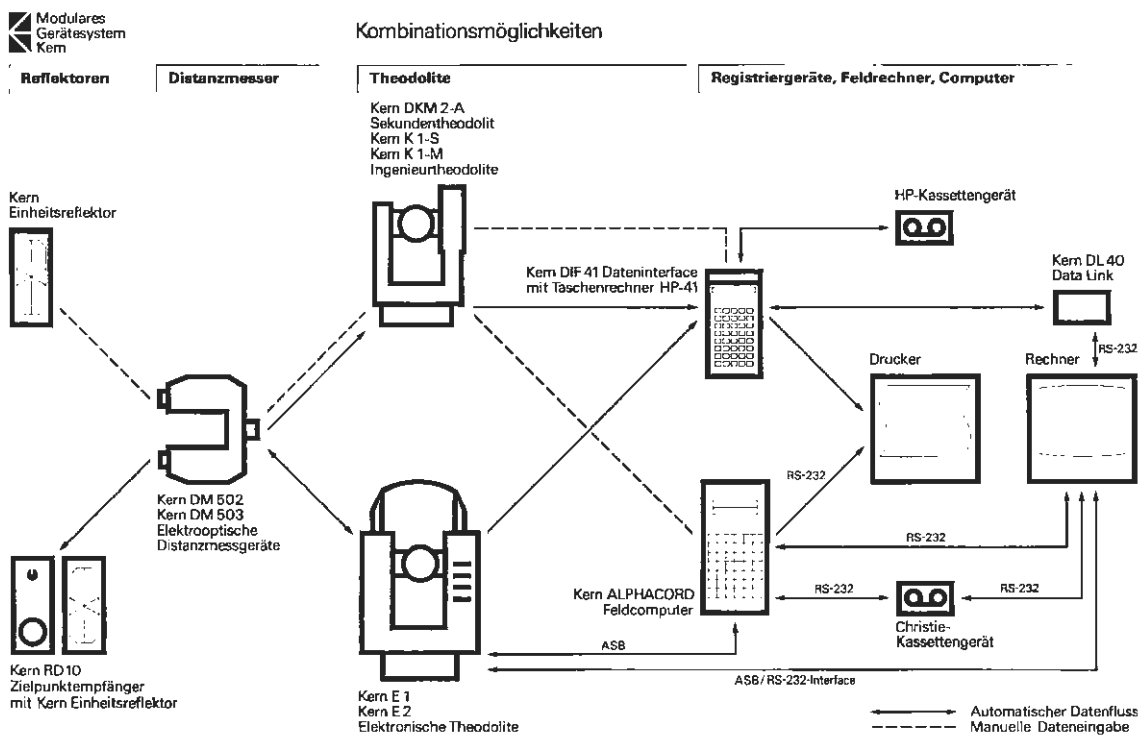
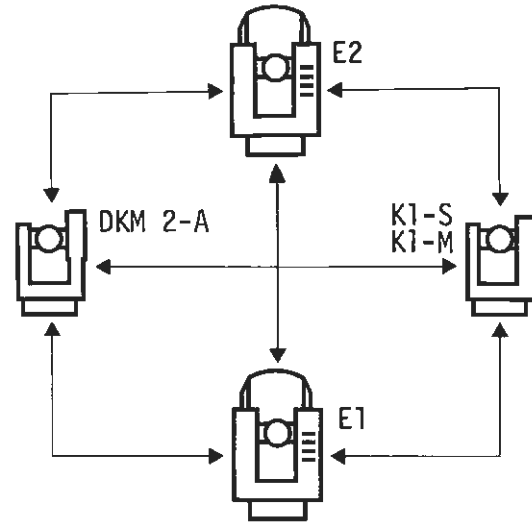


Fig. 12
Modulares Gerätesystem Kern

Literaturangaben

Veröffentlichungen von Kern & Co. AG

- [1] Eine verbesserte Zwangszentrierung
(Aeschlimann, 1975)
- [2] Ein Gerätesystem für die automatische Registrierung
von Messwerten
(Aeschlimann, 1978)
- [3] Vermessungstechnische Feldgeräte für Datenregistrierung
und Absteckung
(Aeschlimann, 1980)
VIII. Internationaler Kurs für Ingenieurvermessung Zürich
- [4] Verfahren der Absteckung nach dem System Kern
(Münch, 1981)
Presented paper, 16. FIG-Kongress, Montreux
- [5] Handbuch zu den Basisprogrammen zur HP-41 (1982)
- [6] Bedienungsanleitung E1/E2 (1983)
- [7] Handbuch zum ALPHACORD (1984)
- [8] Handbuch zu den SICORD-Programmen auf ALPHACORD,
bzw. HP-41 (1984)
- [9] Das ASCII-Single-Bus (ASB)-System von Kern
(Separata Nr. 327)



Kern & Co. AG
Werke für Präzisionsmechanik,
Optik und Elektronik
CH-5001 Aarau, Schweiz
Telefon 064 25 11 11
Telex 981 106

322d 7.85.FA In der Schweiz gedruckt