

Paper-ID: VGI_196911



Moderne physikalische Orientierungsmethoden

Kornelius Peters ¹

¹ *Institut für Landes- und Katastervermessung, Technische Hochschule Wien, 1040 Wien, Karlsplatz 13*

Österreichische Zeitschrift für Vermessungswesen **57** (3, 4, 5), S. 84–93, 132–138, 160–168

1969

Bib_TE_X:

```
@ARTICLE{Peters_VGI_196911,  
  Title = {Moderne physikalische Orientierungsmethoden},  
  Author = {Peters, Kornelius},  
  Journal = {{{\u}sterreichische Zeitschrift f{{\u}r Vermessungswesen}},  
  Pages = {84--93, 132--138, 160--168},  
  Number = {3, 4, 5},  
  Year = {1969},  
  Volume = {57}  
}
```



Moderne physikalische Orientierungsmethoden

Von *Kornelius Peters*, Wien

(Veröffentlichung des Institutes für Landes- und Katastervermessung der Technischen Hochschule Wien)

Inhalt:

Nach einem kurzen Überblick über astronomische Schnellverfahren werden Kreisel, Ringlaser und ein neues amerikanisches Gerät beschrieben. Von den Kreiseln wird der schweregefesselte nord-suchende, bandaufgehängte Vermessungskreislauf ausführlich behandelt. Es werden die gebräuchlichen Typen und Orientierungsmethoden geschildert, sodann einige Erfahrungen mit dem Aufsatzkreislauf des Institutes für Landes- und Katastervermessung mit solchen anderer Autoren verglichen und ein Schnellverfahren zur Orientierung auf Grund dieser Untersuchungen vorgeschlagen.

0. *Einleitung*

Die anschaulichsten Größen zur Angabe der relativen Lage zweier Punkte sind Richtungswinkel und Strecken. Während man die Strecken ohne weitere Hilfsgrößen bestimmen kann, muß die Bestimmung der Richtungswinkel mittelbar unter Zwischenschaltung eines Hilfszieles erfolgen. Dieses Ziel ist entweder ein irdisches, dem gesuchten verwandtes mit bekanntem Richtungswinkel. ein „außerirdisches“, wie Gestirn, Satellit, dessen Lage irgendwie bekannt oder zu berechnen ist und aus welcher Beobachtung sich über relativ umständliche Beziehungen der Richtungswinkel ableiten läßt, oder eine fiktive Nordrichtung selbst.

Der erste Fall ist der bekannte, der fast ausschließlich zur Anwendung kommt. Doch fehlen manchmal diese Anschlußziele: sollte ein Landesnetz orientiert werden, wählte man eine Richtung aus, über welche eine astronomische Orientierung vorgenommen wurde; durch Verwuchs u. dgl. entfallen die ursprünglichen Anschlußrichtungen auf einem KT; ein langer, in einem schmalen Tal geführter Polygonzug kann nicht zwischenorientiert werden; eine Richtung soll ohne genaue Kenntnis der Lage des Ausgangspunktes abgesteckt werden; in Schächten sollen obertägige Richtungen übertragen werden, deren untertägige Basis zu kurz ist. Weitere Beispiele ergeben sich zwanglos. Die Verfahren der astronomischen Orientierung, welche ohne irdisches Anschlußziel arbeiten, waren bis vor kurzem, von der ungenauen magnetischen Orientierung abgesehen, der einzige Ausweg. Sie verlangen ungefähre Kenntnis des Standortes, entsprechende Sichtbedingungen und natürlich auch spezielle Tafelwerke.

0.1. *Astronomische Schnellverfahren*

Abgesehen von Problemen der Höheren Geodäsie und der Landesvermessung, welche hier nicht besprochen werden sollen, da für sie routinemäßig astronomische Verfahren zur Anwendung kommen, können auch solche der Lageaufnahme und Absteckung für technische oder katastrale Zwecke astronomisch gelöst werden.

Zwei Methoden kommen hauptsächlich in Frage: mittels Stundenwinkels des Polaris (und somit Winkelmessung zwischen Polaris und irdischem Ziel) oder Stundenwinkels der Sonne. Beobachtet wird die Durchgangszeit durch den Vertikalfaden

unter gleichzeitiger Ablesung des Horizontalkreises. Im ersten Fall muß das gesuchte irdische Ziel oder eine später damit zu verbindende Mire beleuchtet signalisiert werden, außerdem ist einschlägige Übung vonnöten. Im zweiten Fall benötigt man Roelofs'sche Sonnenprismen und Sonnengläser, außerdem ein aktuelles Astronomisches Jahrbuch. Die Deklination des Polaris ändert sich so wenig, daß man mit einem nicht lange zurückliegenden Tafelwerk auskommt.

In beiden Fällen ist auch die Beobachtungszeit vorgegeben, und zwar Nacht bzw. tiefstehende Sonne. Zu den erforderlichen Geräten ist zu sagen, daß man den Theodolit verwenden kann, den man für die konventionelle terrestrische Arbeit verwendet hätte. Die nötigen geographischen Koordinaten entnimmt man der topographischen Karte des Arbeitsgebietes. Die Genauigkeit des ersten Verfahrens ist praktisch nur vom Gerät (einschließlich Korrekturen wegen Steilvisur) abhängig. Die Güte des Sonnenazimutes wird durch einseitige Erwärmung und Einfluß der Zeitmessung nachteilig beeinflusst. Ein Fehler von einer Zeitsekunde bewirkt in erster Näherung einen solchen von einer Neuminute der Orientierung; eine bessere Zeitnehmung ist nur sehr mühsam zu verwirklichen (Radiosignale, steter Uhrvergleich).

Die erste Methode ist in [1], die zweite in [2] beschrieben. Das Beispiel in [1] erscheint abschreckend, doch mit einem modernen Gerät und ohne Zeitbestimmung bleiben nur mehr wenige Rechnungen über. In [2] sollte der mittlere Fehler des Gesamtmittels $\pm 15''$ heißen. Die Beobachtungen in der Natur sind in etwa einer Stunde durchzuführen, daran schließt noch eine etwas umständliche Berechnung, welche nach Meinung des Verfassers durch einen Kleincomputer nicht leicht vereinfacht werden kann, da viele Winkelfunktionen zu berechnen und viele Werte astronomischen Tafeln zu entnehmen sind. Fehlerabschätzungen sind [3] zu entnehmen. Die Formeln in [1] sind für die numerische Auswertung der Beispiele, in [3] für theoretische Überlegungen günstiger. Bei ungünstigem Wetter oder in geschlossenen Räumen (Wald, Stollen) wird die schon sonst schwerfällige astronomische Orientierung unmöglich. In jüngerer Zeit geht man daher zu anderen, nicht auf externen Zielen basierenden Orientierungsmethoden über.

1. Der Kreisel

Fast unübersehbar ist die Literatur über den Kreisel, besonders in Hinblick auf Vermessungszwecke ([4]). Zur ersten Information seien entweder die pädagogisch besonders geglückte Arbeit [5] oder die Beschreibung in [6] empfohlen, welches letztere Werk auch sonst viel für den Vermessungsingenieur Wissenswertes enthält. Ein ähnliches Lob kann man von gerätetechnischen Gesichtspunkten aus [23] spenden. Bereits 1852 wies *Foucault* das Richtvermögen des Kreisels nach. 1922 prägte *Schuler* den Begriff des „Vermessungskreisels“.

Als Kreisel wird allgemein jeder starre Körper bezeichnet, der eine beliebige Drehbewegung ausführt. Im weiteren Sinn gibt es aber auch Flüssigkeits- und Gaskreisel (lt. Vortrag von Prof. *Desoyer* oder [4]). Hier soll jedoch ein Kreisel betrachtet werden, der rotationssymmetrisch ist und sich um die Symmetrieachse mit großer Winkelgeschwindigkeit dreht. Die Impulsachse fällt dann immer mit der Symmetrieachse und der Drehachse zusammen. Der Kreisel soll aber nicht nur

rotationssymmetrisch sein, sondern auch symmetrische Massenverteilung besitzen, so daß sein Schwerpunkt in der Drehachse liegt. Die zwei fundamentalen Merkmale eines Kreisels sind sein Beharrungsvermögen (Trägheit) und die Präzession (Ver-schwenkung).

Die Begriffe der folgenden Ableitungen sind in Abb. 1 dargestellt.

Eine rotierende Masse mit der Rotationsachse in XX , dem Trägheitsmoment Θ bei der Rotations-Winkelgeschwindigkeit ω gerät in den Einflußbereich einer äußeren Kraft F , welche auf die Rotationsachse angreift. Diese erzeugt in Bezug auf den Kreiselstützpunkt ein Drehmoment $M' = r'F$. Dieses Drehmoment erzeugt im kleinen Zeitintervall dt einen zusätzlichen Drehimpuls (Drall) $d|\omega'$, der senkrecht zum Rotationsimpuls (Drallvektor) $|\omega_R = \Theta \omega$ des Kreisels steht.

$$\text{Drallsatz: } M' = \frac{d|\omega'}{dt} \quad (M' \text{ Präzessionsmoment}) \quad \dots (1)$$

Die Resultierende aus $|\omega$ und $d|\omega'$ ist $|\omega_R$. Die Rotationsachse des Kreisels dreht in der Zeit dt um den kleinen Winkel $d\alpha'$ in der vom Drehmomentvektor M' und dem Rotationsvektor $|\omega$ gebildeten Ebene.

$$\text{Mit } d|\omega' = |\omega d\alpha' \text{ wird } M' = |\omega \frac{d\alpha'}{dt} = |\omega \cdot \omega' = \Theta \omega_{Kr} \cdot \omega' \quad \dots (2)$$

$$\text{Die Präzessionsgeschwindigkeit } \omega' = \frac{M'}{|\omega} = \frac{M'}{\Theta \omega_{Kr}} \quad \dots (3)$$

Hochtourige Kreisel und Kreisel großer Masse präzessieren bei Einwirkung eines Drehmomentes somit langsamer als langsam laufende bzw. Kreisel kleiner Masse. Die Präzession dauert so lange, bis der Rotationsvektor $|\omega$ des Kreisels auf den äußeren Drehvektor M' einschwenkt. Die die Präzession störende äußere Kraft F kommt dann in die neue Rotationsebene des Kreisels zu liegen. Wirkt aber die äußere Kraft F dauernd auf die Kreiselachse ein (etwa wie ein an der Achse einseitig angehängtes Gewicht oder einseitige Lagerreibung), so präzessiert der Kreisel dauernd. Dieses Phänomen tritt etwa beim Kinderkreisel oder bei den Polschwankungen der Erde auf.

1.1. Der schweregefesselte nordsuchende Kreisel

Ein auf das örtliche Lot gefesselter Kreisel steht infolge der Erddrehung unter dem Einfluß einer Kraft F , welche die Rotationsachse in den Meridian eindreht (Abb. 2).

$$\text{Die Rotationsgeschwindigkeit der Erde sei } \omega_e = \frac{2\pi}{86164,1 \text{ sec}}$$

Die Horizontalkomponente dieser Rotationsgeschwindigkeit in der geographischen Breite φ ist $\omega_e \cos \varphi$ (4)

$$(4) \text{ in } (2) \text{ eingesetzt, ergibt } M' = |\omega \omega_e \cos \varphi \quad \dots (5)$$

Bildet der Rotationsvektor $|\omega$ des Kreisels mit der Meridianrichtung den Winkel α (in Abb. 2 ist vorerst dieser Winkel $\alpha = 90^\circ$), entsteht eine Richtkraft

Abb. 1

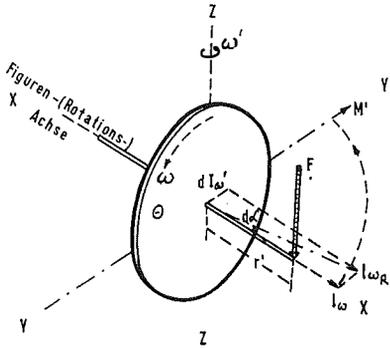


Abb. 2

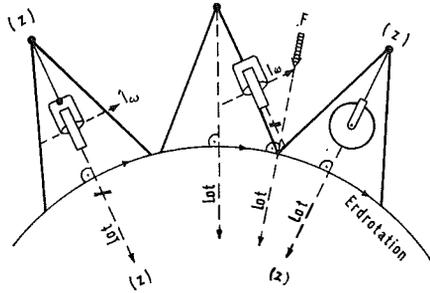


Abb. 3

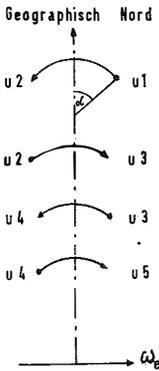


Abb. 4

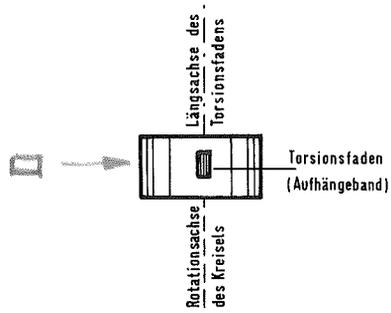


Abb. 6

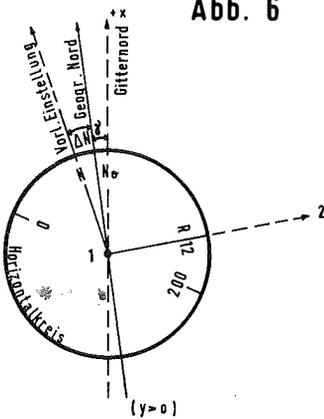
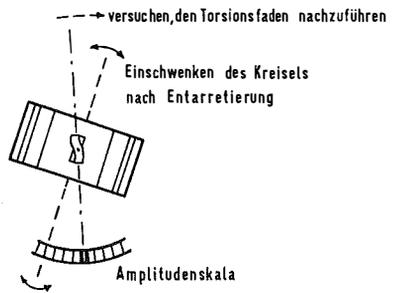


Abb. 5



$R = M \sin \alpha$, die den Kreisel mit der Präzessionsgeschwindigkeit ω' in den Meridian einschwenkt.

$$R = |_{\omega} \omega_e \cos \varphi \sin \alpha = |_{\omega} \omega' \text{ mit } \omega' = \omega_e \cos \varphi \sin \alpha \quad \dots (6)$$

Je größer die Auslenkung von der Nordrichtung, je größer das Trägheitsmoment, desto größer die Richtkraft. In polaren Gebieten versagt der Kreisel. Da ω_e sehr klein ist, muß $|_{\omega}$ besonders groß gemacht werden, um die Messungen wirkungsvoll zu gestalten; dies geschieht aus Gründen der Lagerreibung und des Transportgewichtes hauptsächlich über ω , welches bei den konventionellen Kreiseln etwa 24000 U/min beträgt. Das oben geschilderte Einschwingen des Kreisels in die Nordrichtung kommt natürlich nur allmählich zustande, da der Kreisel an einem elastischen Torsionsfaden an der Kreiselkappe (Gimbal) aufgehängt ist. Die Bandtorsion muß durch Nachführen der oberen Bandklemme ganz ausgeschaltet werden, da sonst eine ungestörte Schwingung nicht gewährleistet werden kann.

Abb. 3 zeigt das Einschwingen der Kreiselachse, dargestellt an einem Punkt der Rotationsachse. 1–5 sind zeitlich aufeinanderfolgende Umkehrpunkte.

Abb. 4 zeigt den Grundriß der Ruhelage des Kreisels, die sogenannte „Bandnullage“; bei nicht rotierendem Kreisel sollen die Achse des Torsionsfadens und die Rotationsachse des Kreisels zusammenfallen. Kleine Abweichungen sind bedeutungslos, können aber gemessen werden, um einen vorgegebenen Maximalwert durch Nachstellen am Gimbal einhalten zu können.

Abb. 5 zeigt eine Abweichung der beiden Achsen und ein tordiertes Aufhängeband, wie es durch das Einschwenken des hochgefahrenen Kreisels geschieht. Der Abweichungswinkel wird auf einer Amplituden-Skala, welche nicht notwendig mit Winkelteilung versehen ist, angezeigt. Um den Faden zu schonen, muß der Kreisel beim Transport oder bei abruptem Schwenken um die Vertikalachse durch eine Dämpfungsvorrichtung etwas angehoben werden. Die gesamte Kreiseleinrichtung ist dann arretiert, der Faden entlastet, α -Bewegungen sind unmöglich. Wird die Vertikalachse des Kreisels (ZZ) mit der Stehachse eines Theodolits und die Gimbal-(Faden-)Achse mit der Zielachse verbunden, spricht man von einem Kreiseltheodolit. Die Ablesung der Nordrichtung am Horizontalkreis und somit die direkte Bestimmung orientierter Richtungen, nach Anbringung der Meridiankonvergenz auch der Richtungswinkel, ist nun möglich. Wie die Ablesung der geographischen Nordrichtung aus dem Einpendeln heraus vorgenommen werden kann, zeigen die später in 1.1.3 behandelten Beobachtungsmethoden.

1.1.1 Kreiseltheodolite

Der schweregefesselte, nordsuchende Kreisel wurde vor allem an der Bergakademie Clausthal ab 1947, dann auch von der Westfälischen Berggewerkschaftskasse Bochum ab 1953 für den praktischen Gebrauch entwickelt ([13], [14]). Während die erstgenannte Stelle den bandaufgehängten, nicht entlasteten Kreisel forcierte, beschäftigte sich Bochum mit flüssigkeitsentlasteten Systemen, wo das Gewicht des Kreisels durch den Auftrieb einer Tragflüssigkeit kompensiert wird. Torsionseinflüsse des Bandes entfallen bei dieser Lösung. Als Nachteile ergeben sich große

Schwingzeiten und Instrumentengewichte. Beide Entwicklungen wurden mit Hilfe der Firma Fennel vorgenommen und waren etwa um 1958 einsatzfähig. In der Folge setzte sich das erstgenannte Prinzip eindeutig durch. In der UdSSR war vorerst ein zapfengelagerter Kreisel konstruiert worden, doch der seit 1964 erzeugte MT 1 bedient sich auch des in Luft schwingenden Kreisels. Der einzige in jüngerer Zeit gebaute flüssigkeitsentlastete Kreisel ist der „Girolit“ von Anschütz, erzeugt bei Askania, mit automatischer Dämpfung, welcher ohne jede Schwingungsbeobachtung nach etwa 30 Minuten die Richtung mit etwa 1° – 2° genau angibt; Gewicht: 80 kg.

Die elektronische Nachführung zur Vermeidung irgendwelcher Bandtorsionen wurde erstmals von Lear, München, erzeugt (vor 1963)

Während in Europa vorerst nur Fennel Kreiseltheodolite serienmäßig erzeugte, wobei die Kreisel selbst Fremdfabrikate waren, erschien die ungarische Firma MOM ab 1965 mit völlig autarker Produktion auf dem Markt. Der Gi B2 ist das erste Serienfabrikat mit elektronischer Nachführung. In der DDR wurde von Freiberg der den Fennel-KT und MOM-GiB Serien ähnliche MRK ab 1964 erzeugt. Ein völlig anderes System als das bisher beschriebene ist das in den angelsächsischen Ländern bevorzugte der Rate-Kreisel, welche nicht bandaufgehängt sind; die Präzession wird in Form einer induzierten Wechselspannung von einem Abtaster abgegriffen. Die Gewichte der bandaufgehängten Kreiseltheodolite liegen bei 30–70 kg bei einer Meßdauer von 30 bis 60 Minuten, Richtungsgenauigkeit von etwa 50° . Von der Angabe einer tabellarischen Übersicht wie in [15] wird hier bewußt abgesehen, da die verschiedenen Quellen kein homogenes Material beinhalten und sowohl hinsichtlich Gewicht als auch Genauigkeit und Meßdauer Mißverständnisse auftreten könnten. Diese Kenndaten hängen davon ab, ob Krafteinheit, Stativ, Theodolit u. dgl. einzeln oder gesamt angegeben werden und welche Beobachtungsmethode angewendet wird.

Als Beispiel sei der MOM-Gi B2 angegeben:

Gewicht Theodolit + Kreisel	9,2 kg	} Summe (lt. Prospekt):	
Stativ	7,5 kg		45 kg.
Generator, Krafteinheit	12,0 kg		} In [15] sind jedoch 70 kg
„Zubehör“	16,0 kg		

1.1.2 Aufsatzkreisel

Großes Gewicht und unhandliche Form beeinträchtigen die praktische Verwendbarkeit der Kreiseltheodolite. Daher war ein Gerät erwünscht, welches wahlweise wie ein konventioneller Theodolit verwendet werden kann. Um 1963 gelang Prof. *Rellensmann* und seinen Mitarbeitern in Clausthal die Konstruktion des Aufsatzkreisels. Die Kreiseleinheit kann auf einen durch eine Aufsatzbrücke adaptierten serienmäßigen Theodolit mit einem Handgriff auf die Kippachse auf- und abmontiert werden.

Für die verschiedenen Wirtschaftsbereiche haben die Erzeugung übernommen:

Fennel, DBR, in der TK-Serie;

Wild, Schweiz, in der GAK-Serie (vgl. [10]);

MOM, Ungarn, in der GiC-Serie.

Der Aufsatzkreisel wiegt jeweils um die 2 kg. Er wird bei den erstgenannten Firmen direkt über ein Kabel aus der Batterie- und Konvertereinheit, bei MOM über die Aufsatzzapfen des Theodolits gespeist.

Durch die mechanische Verbindung Kreisel-Theodolit wird die Größe des Eichwertes beeinflusst. Jedes Auf- und Abnehmen erzeugt theoretisch eine Änderung des Eichwertes und verringert somit die Genauigkeit der Orientierung. Die MOM-Geräte sind daher mit einem Umlenkprisma versehen, welches den Mittelfaden der Amplitudenskala in das Theodolitfernrohr abbildet. Mittels Feinschraube am Aufsatz kann man ihn mit dem Vertikalfaden zur Deckung bringen und die Unsicherheit der mechanischen Verbindung Kreisel-Theodolit zumindest teilweise eliminieren. Wild erzeugt übrigens den Aufsatzkreisel in einer autarken Modifikation zum Gebrauch ohne Theodolit, und zwar hauptsächlich für militärischen Einsatz.

1.1.3 Beobachtungsmethoden

Bei allen Beobachtungsmethoden ist eine vorangehende Groborientierung nötig. Diese gewinnt man durch einen (ev. graphisch entnommenen) vorläufigen Richtungswinkel nach einem gegenständlichen Ziel, Vororientierung mittels Bussole oder als arithmetisches Mittel der beobachteten Richtungen der Umkehrpunkte der Kreiselachse an der Amplitudenskala, wobei die Alhidade bei geöffneter Grobklemme von Hand aus nachgeführt wird. Diese Ablesung N am Horizontalreis des Theodoliten muß dann noch um die aus der Beobachtung des Kreisels gewonnene Korrektur ΔN , die Meridiankonvergenz γ und den Eichwert E verbessert werden, um die Ablesung N_0 nach Gitternord zu erhalten. Die Ablesung nach dem gesuchten Ziel, vermindert um N_0 , ergibt den Richtungswinkel zum Ziel. Arbeitet man in einem lokalen System, kann man γ und E entfallen lassen. Sonst entnimmt man γ einer Leitertafel oder der DV 8 des Bundesamtes (vgl. Abb. 8b).

$$v_{12} = R_{12} - (N + \Delta N + \gamma_1) + E \quad (\text{vgl. Abb. 6}) \quad \dots (7)$$

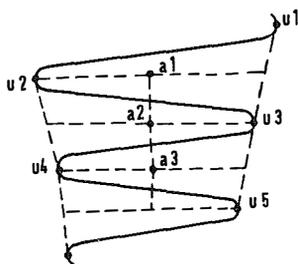
Wie ΔN berechnet wird, ist aus den Gebrauchsanleitungen der Geräte zu sehen. Doch ist die Gegenüberstellung aller Methoden reizvoll.

1.1.3.1 Die Umkehrpunktmethode

Dies ist der älteste und universellste Weg. Die Nullmarke der Amplitudenskala verfolgt das Bild der Kreiselachse und versucht, sie zur Ausschaltung aller Torsionseinflüsse zu decken. Jeder Umkehrpunkt der in langsam abnehmenden Amplituden einpendelnden Kreiselachse wird am Horizontalkreis abgelesen. Die Auswertung geschieht durch das sogenannte *Schuler-Mittel* (Abb. 7), welches höchst plausibel erscheint, doch theoretisch aus den Differentialgleichungen einer schwach gedämpften Schwingung als Näherungslösung relativ schwierig abzuleiten ist (vgl. [7], [8]).

Laut [8] beträgt die optimale Zahl der Umkehrpunkte 4. Die äußeren Einflüsse bzw. die Erwärmung des Motors im Lauf der Messung überwiegen die Ungenauigkeit aus Ablesung und Berechnung bei weitem. Die Fehler in der Nachführung von Hand aus bewirken einen Genauigkeitsabfall bis etwa 50% gegen die optimale und torsionsfreie theoretisch einwandfreie Übereinstimmung der beiden Achsen. Deshalb

Abb. 7

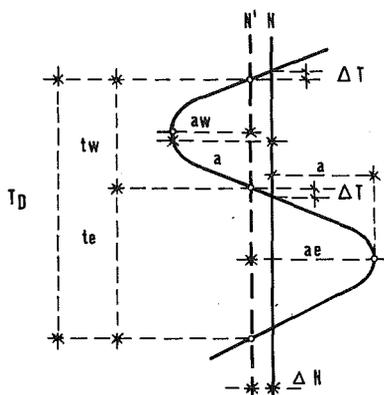


$$a_1 = 1/2 \left(\frac{u_1 + u_3}{2} + u_2 \right)$$

$$a_2 = 1/2 \left(\frac{u_2 + u_4}{2} + u_3 \right)$$

$$\text{Gesamtmittel: } N + \Delta N = \frac{[a]}{n}$$

Abb. 8 a



wurden die unter 1.1.1 angeführten automatischen Nachführungen konstruiert, welche auch wesentlich größeren Beobachtungskomfort bringen.

1.1.3.2 Die Amplitudenmethode

Wird der Kreisel bei der Entarretierung entsprechend gedämpft und ist die Vororientierung ausreichend genau, bleibt das Bild der einschwingenden Kreiselachse auch bei geklemmter Alhidade stets im Blickfeld der Amplitudenskala (vgl. Abb. 5). Kennt man den Umrechnungsfaktor „ $k_a = \text{Neuminuten/Einheiten der Amplitudenskala}$ “, kann man ΔN direkt als Produkt $k_a(a_e + a_w)$ berechnen, wenn man nur a_e und a_w , die Ablesungen der Umkehrpunkte an der Amplitudenskala, vorzeichenrichtig behandelt ([9]). $a_e + a_w = \Delta a$.

1.1.3.3 Die Schwendener-Methode (Durchgangsmethode)

Sie ist die derzeit meist verbreitete Methode, besonders beliebt bei Aufsatzkreisel (9). An dieser Stelle sei auf die Erläuterungen in [10] hingewiesen und gleichzeitig ein dort bedauerlicherweise aufgetretener Fehler berichtigt.

Die Durchgangsmethode beruht darauf, daß sich die sinusähnliche Kurve, welche sich bei Abwicklung der Einpendelung (Abb. 3) auf die Zeitachse (Abb. 7) ergibt, in Nähe der Symmetrieachse (geographisch Nord) als Gerade approximieren läßt, so daß ΔN proportional dem Zeitunterschied zwischen den Durchgängen des Bildes der Kreiselachse von a_e und a_w her durch die Mitte der Amplitudenskala und proportional der Gesamtamplitude a gesetzt werden kann: $\Delta N = c \cdot a \cdot \Delta t$; vgl. Abb. 2 aus [10] oder Abb. 8a. . . . (8)

Es soll nun in [10] richtig heißen: „Aus Abb. 2 sieht man, daß $2\Delta T = \frac{T_D}{2} - t_w$,

also $\Delta T = \frac{T_D}{4} - \frac{t_w}{2} = \dots$ “. Weiter unten soll die Ableitung für die Zulässig-

keit des Linearisierens heißen:

$$\begin{aligned} \Delta N^c &= 23 \cdot a \cdot \sin(\Delta t \times 0.357 \times 10^{-2}) = \\ &= 23^c \cdot a \cdot \Delta t^{\text{sec}} \times 0.357 \cdot 10^{-2} - 23^c \cdot a \cdot \frac{(\Delta t \times 0.00357)^3}{3!} + \dots \end{aligned}$$

Der erste Ausdruck entspricht der linearen Beziehung für ΔN in Zahlen ausgeführt, der zweite der Ungenauigkeit beim Linearisieren. Soll er kleiner als $0^c,1$ sein, wird $\Delta t^{\text{sec}} \leq \sqrt[3]{\frac{0^c,6}{23a}} \cdot 280$; bei $a = 10$ wird $\Delta t_{\text{max}} \doteq 40 \text{ sec} \dots$

In der Praxis verfährt man wie nach 1.1.3.2, nimmt aber mittels Schleppeziger-Stoppuhr die Durchgänge durch die Skalenmitte ab. Abb. 8b zeigt einen Ausschnitt aus einem Original-Meßprotokoll.

(Fortsetzung folgt)

Literatur

- [1] Mühlig: Astronomisch-Geodätische Ortsbestimmung. Wichmann 1960. S. 103 u. 126.
- [2] Bauer: Ein Beispiel für die Berechnung eines Sonnenazimutes. VR 12/65.
- [3] Roelofs: Astronomy applied to Land Surveying. Ahrend, Amsterdam 1950. S. 111 u. 118.
- [4] Pollmann: Vermessungskreisell. VR 4, 6/69 (mit umfassender Literaturangabe in Heft 4).
- [5] Strasser: Der Kreisell. Soldat und Technik, Hefte 5, 6, 7 u. 8/63. Umschau-Verlag, Frankfurt/Main.
- [6] Zeller-Franke: Das physikalische Rüstzeug des Ingenieurs. Darmstadt 1966.
- [7] Grafarend: Chronometrische Nordbestimmung mit Vermessungskreiseln. ZfV 3/69.
- [8] Halmos: Ermittlung der Ruhelage der Schwingungen bei Girotheodolitmessungen. Acta Geodaetica Acad. Sci. Hung. 1/66.
- [9] Schwendener: Verfahren und Erfahrungen bei Nordbestimmungen mit dem Aufsatzkreisell. AVN 4/66.
- [10] Korschineck-Peters; Bekanntschaft mit dem Aufsatzkreisell. ÖZfV 6/66.
- [11] Halmos: Die Schnellbestimmung des Azimuts mit Hilfe von Girotheodolitmessungen. Acta Geodaetica Acad. Sci. Hung. 1/66.
- [12] Grafarend: Fehlertheoretische Untersuchungen und chronometrische Meßverfahren beim Einsatz von Aufsatzkreiseln ... DGK, Reihe C, Heft 112, München 1967.
- [13] Stier: Der Vermessungskreisellkompaß und seine Einsatzbedingungen. ZfV 1, 2/62.
- [14] Liersch: Der Entwicklungsstand bei Vermessungskreisellgeräten. VT 9/64.
- [15] Halmos: Untersuchungen der Kreiselltheodolite sowie deren Anwendungsmöglichkeiten. AVN 10/66.
- [16] Korschineck-Peters: Aufsatzkreisell (GAK 1) im Einsatz. WILD-Reporter 2/69.
- [17] Halmos: Über den Kreiselltheodolit MOM Gi-B2 und seine Anwendung bei unterirdischen Orientierungsmessungen. Mitteilungen aus dem Markscheidewesen 2/68.
- [18] Merkel: Ergebnisse der Untersuchung eines Meridianrichtungskreisells MRK 2. VT 2/66.
- [19] Williams-Belling: Quasi-harmonic patterns of pendulous gyroscopes during protracted oscillation. Tijdschrift v. Kadaster en Landmeetkunde 5/67.
- [20] Gotthardt: Der Einfluß unregelmäßiger Fehler auf Luftbildtriangulationen. ZfV 1944 (Abb. auf S. 79).
- [21] Moritz: An Explanation of the „Systematic“ Effect of Accidental Errors in Aerial Triangulation. Photogrammetria 1/1960/61.
- [22] Wolf: Ausgleichsrechnung. Dümmler 1968.
- [23] Deumlich: Instrumentenkunde. VEB-Verlag f. Bauwesen 1967.
- [24] Knüppel: Der Bau des Düsseldorfer Rheintunnels. AVN 8/61.
- [25] Halmos: Föld alatti létsítmények tájékozása girotheodolittal, különös tekintettel az áttöresi mérsekre. Geodésia és Kart., 1968.

- [26] *Killian*: Zur analytischen Luftbildauswertung der Lagekoordinaten von signalisierten Punkten, deren Höhen terrestrisch bestimmt wurden. *ÖZfV* 1961, S. 173ff.
- [27] *Berger*: Der Kreisel als Stabilisierungselement bei Tunnel- und Stollenvortriebsmaschinen. *Baummaschine und Bautechnik* 10/66.
- [28] *Wittke*: Ring-Laser-Theodolit. *VR* 3/69.
- [29] *Montag*: Anwendungsmöglichkeiten der Laser in der Geodäsie. *VT* 9, 10/68.
- [30] *Russell*: Der Laser: Anwendungen für militärische Zwecke und in der Raumfahrt. *Interavia* 5/64.
- [31] *Follow the bouncing ball*: S. 58f., *Electronics*, Oct. 14, 1968 (Verlag McGraw-Hill).

Referat

Beitrag zur Untersuchung systematischer Fehler der Aerotriangulation*)

Von *Peter Waldhäusl*, Riyadh

Die Internationale Gesellschaft für Photogrammetrie hat anlässlich des X. Internationalen Kongresses für Photogrammetrie 1964 in Lissabon in der Resolution Ib der Kommission III empfohlen, in nächster Zukunft die Fehlerursachen der Aerotriangulation und die Fehlerfortpflanzung in Streifen schwerpunktmäßig zu behandeln. Auch im Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen, war man an ähnlichen Fragen interessiert, vor allem an der Klärung der Ursachen und Wirkungen die zu den Anschlußdifferenzen zwischen aufeinanderfolgenden Modellen führen. Auch in der OEEPE, der Europäischen Organisation für Experimentelle Photogrammetrische Untersuchungen, befaßt man sich intensiv mit diesem Problem. So sollte die vorliegende Arbeit ein Beitrag des Institutes für Photogrammetrie der Technischen Hochschule Wien zu dieser Frage sein.

Die Untersuchung beschränkt sich auf die klassische, freie Aerotriangulation, die wegen der großen Anzahl der in aller Welt vorhandenen Universal-Analogauswertegeräte noch keineswegs als überholt angesehen werden darf, wengleich die analytischen Verfahren der Aerotriangulation an Bedeutung gewonnen haben.

Im folgenden sei der Inhalt der Arbeit kurz zusammengefaßt wiedergegeben:

Nach einer Einleitung werden im zweiten Abschnitt die Fehlerursachen bei der freien, räumlichen Aerotriangulation zusammengestellt. Die damit erreichbare Genauigkeit ist durch die Größe der Fehler in den Streifenrandpunkten begrenzt, da die zu bestimmenden Paßpunkte für die Detailauswertung am Streifenrand liegen und dort auch der Zusammenschluß mit den Nachbarstreifen, möglichst widerspruchsfrei erzeugt werden soll. Die Aerotriangulation kann nicht genauer sein als es die Klaffen zwischen den Folgemodellen zulassen. Die Verfahren zur Glättung dieser Klaffen werden zusammengestellt und kritisch betrachtet. Erst nach einer hinreichend guten Streifenglättung, etwa nach der vom Verfasser in dieser Zeitschrift 1964 vorgeschlagenen, lassen sich die Streifen besser ausgleichen als bisher. Das Problem wird durch Beispiele aus der Praxis näher beleuchtet. An Hand einer Gittertriangulation wird gezeigt, daß auch die Instrumentalfehler für die Klaffen wesentlich mitverantwortlich sind.

Damit erscheint die Folgerung begründet, daß bei der von der Internationalen Gesellschaft für Photogrammetrie 1964 empfohlenen, schwerpunktmäßigen Untersuchung systematischer Fehler der Aerotriangulation besonders auch auf die Fehler am Streifenrand Rücksicht genommen werden soll. Um den Verhältnissen in Österreich Rechnung zu tragen, wird in einem den Kern der Arbeit bildenden dritten Abschnitt ein Fortran-Untersuchungsprogramm vorgelegt, worin auch der Einfluß gebirgiger Geländeformen beachtet wird. Die Elektronenrechenmaschine berechnet auf Grund der als Funktion oder als Messungsergebnisse eingegebenen Bildkoordinatenfehler für die freie Aerotriangulation:

*) Autorenreferat über die an der Technischen Hochschule Wien approbierte Dissertation gleichen Themas. 150 Seiten, 90 Abbildungen. Begutachter: Honorarprofessor Ing. Dr. techn. h. c. Karl Neumaier und o. Professor Dipl.-Ing. Dr. techn. Friedrich Hauer.

Moderne physikalische Orientierungsmethoden

Von *Kornelius Peters*, Wien

(Veröffentlichungen des Institutes für Landes- und Katastervermessung der Technischen Hochschule Wien)

(Fortsetzung)

1.1.3.4 Die Halmos-Methode

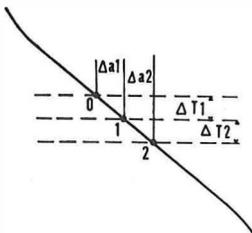
In [11] wird eine Erweiterung der Durchgangsmethode 1.1.3.3 von der abschließlichen Beobachtung des Skalenmittelpunktes auf beliebige Skalenpunkte vorgeschlagen. Dies entspricht einer Kombination von 1.1.3.2 mit 1.1.3.3, da man zu den jeweils für die a_i gewonnenen ΔN_i noch die vorzeichenrichtigen $k_a \cdot a_i$ hinzufügen muß. Man geht wieder wie bei 1.1.3.2 vor, stoppt aber nun nicht nur die Durchgänge durch den Nullpunkt der Amplitudenskala, sondern auch durch markante Skalenstriche, etwa $+5$ und -5 , und erhält jeweils ein ΔN_0 , $\Delta N + 5$, $\Delta N - 5$; dabei ist aber zu beachten, daß man nicht den linearen Bereich der Schwingung verläßt, der gemäß [10] etwa 35° beträgt. Ist etwa $a_1 = -5$, wird beim Wild-Aufsatzkreisel $k_a \cdot a_1 = -11^\circ \cdot 5 = -57^\circ$, also weit jenseits der Linearitätsgrenze, wenn das zugehörige ΔN nicht positiv ist oder man sich mit einer geringeren inneren Genauigkeit als $0^\circ,1$ begnügt.

Der Vorteil der Methode liegt darin, daß man auf jeden Fall nur ein T_D abwarten muß, also ein kontrolliertes Resultat schon nach der gegen 1.1.3.3 um mindest eine halbe Schwingzeit kürzeren Zeit erhält. Nachteil: k_a muß mindest auf die Zehnelminute bekannt sein, was aber durch Eichmessungen oder von Werksseite her möglich ist.

1.1.3.5 Die Grafarend-Methode

Grafarend leitete in [12] eine rein chronometrische Methode ab, was einen Endpunkt in der Entwicklung von 1.1.3.3 und 1.1.3.4 her bedeutet. Dem Vorteil der Vollautomatisierung stehen der große instrumentelle Aufwand und die dadurch im praktischen Einsatz verminderte Robustheit nebst höheren Kosten entgegen. Auch die Abbildungen aus [12] wirken in dieser Hinsicht entmutigend.

Abb. 9



$$\Delta a_1 = \Delta a_2 = \Delta a$$

$$\Delta T_1 \neq \Delta T_2$$

$$\Delta N = \frac{\Delta a \cdot k_a \cdot T_D^2 (\Delta T_1 - \Delta T_2)}{2\pi^2 \cdot \Delta T_1 \cdot \Delta T_2 \cdot (\Delta T_1 + \Delta T_2)}$$

In [12] wird mit Hilfe der Bewegungsgleichung des Kreisels die auch anschaulich faßbare Beziehung abgeleitet, daß aus den (kurzen) Zeiten, welche die Meßmarkezischen den Amplitudenwerten „0“ und „1“ bzw. „1“ und „2“ benötigt, und der Kenntnis der Amplitudenwerte die Parameter der Schwingungsgleichung und somit auch die Ruhelage zu berechnen sind, wenn die Messung angenähert orientiert stattfindet. Es ist auch einleuchtend, daß die Zeitdifferenzen etwa 100-mal so genau wie bei der Durchgangsmethode gemessen werden müssen, da es sich um den Schluß von klein auf groß handelt (etwa wie der Schluß von Sehne

und Pfeilhöhe auf den Radius eines Kreises). Diese Zeitdifferenzen müssen daher mittels elektronischer Zähler und durch Photoverstärker gemessen werden. Die Rechnung selbst ist einfach, die unkontrollierte Messung selbst dauert nur 1 Minute. Abb. 9 sei ein Ausschnitt aus Abb. 8 a. Die Formel in Abb. 9 ergibt sich durch Einsetzen der Begriffe von [9] und [10] in die Formel (156) von [12].

1.1.4 *Diskussion der Ergebnisse von Messungen mit dem Aufsatzkreisel WILD GAK 1 des Institutes für Landes- und Katastervermessung*

Im Sommer 1966 ([10]) sowie ab April 1967 stand unserem Institut ein Aufsatzkreisel Wild GAK 1 samt adaptiertem T 16 zur Verfügung, welcher im April 1968 generalüberholt wurde. Dank der Förderung durch den Institutsvorstand, Herrn Prof. *Dr. Barvir*, konnten durch Herrn *Dipl.-Ing. Korschineck* und den Verfasser bei häufigem Einsatz in praktischen Arbeiten und bei Versuchsmessungen einige Erfahrungen gesammelt werden, welche sich vor allem auf Ingenieurvermessungen und die hiezu nötigen Überlegungen erstrecken.

1.1.4.1 *Praktische Messungen*

Besonders bei kurzen bis mittleren Stollen für großstädtische Versorgungsleitungen, deren Ausgangsschächte nur 2–3 m Durchmesser aufweisen, erwies sich der Aufsatzkreisel als unschlagbar. Wegen der hohen Genauigkeitsanforderungen, welche sich durch den Vortrieb und gleichzeitigen Ausbau im Sollprofil ergeben, kam eine konventionelle Richtungsübertragung unter Tage nicht in Frage. Bis März 1969 wurden 12 Stollen durchgeschlagen, die Länge betrug zwischen 19 und 134 m, die Tiefe zwischen 4 und 20 m. Die Durchschlagsgenauigkeit lag zwischen 0 und 4 cm ([16]). Jeder Stollen wurde in einem eigenen lokalen System abgesteckt, um die Meridiankonvergenz und den Eichwert nicht mitzuschleppen. Die Zentren der Endschächte wurden mittels WILD-ZNL (Zenitlot) aufgelotet und durch Einbinden mit Maßband in die obertägigen Bezugspunkte in das lokale System gebracht. Für jeden Stollen wurde der Kreisel in diesem obertägigen System periodisch überprüft. Bei allen Messungen mußte nur Zentimetergenauigkeit angestrebt werden. Die obertägigen Einmessungen verlangten manchmal Husarenstücke, wie einen Kreiselzug durch das Stiegenhaus einer Wohnhausanlage, wobei eine vertikale Geländerstrebe als Springstandpunkt dienen mußte, und zwar von einer Seite her der höchste, von der anderen der tiefste Punkt der Strebe! Die Übertragung von Lage, Richtung und Höhe dauerte pro Schacht brutto 2 bis 3 Stunden; mittels konventioneller Methoden wie Doppellotung wäre bei der erforderlichen Genauigkeit von etwa 1^e pro Richtung $\underline{\underline{\triangle}} 0,5$ mm relativem Punktlagefehler der abzulotenden Punkte mindestens ein Tag erforderlich gewesen, von der obertägigen Einmessung (und Vermarkung!) ganz zu schweigen. Die Einsatzbedingungen reichten vom Schneesturm bis zur Hitzewelle; die relative Feuchtigkeit betrug unter Tag oft an die 100% (Abb. 10).

Aber auch die mechanischen Einwirkungen glichen oft einem Rütteltest. Bei einiger Übung konnte man die Amplitudenskala auch bei starkem Schlingern des Zeigers ablesen. Jedenfalls war die erstaunliche Robustheit des Gerätes bemerkenswert.

Abb. 10



1.1.4.2 Stabilität der Kreiselkonstanten

Über die Stabilität der Kreiselkonstanten liegen ausgezeichnete Untersuchungen vor ([15], [17], [18]). Es sollen nun alle Faktoren untersucht werden, welche die Formeln (7) und (8) beeinflussen, und zwar hinsichtlich des Einflusses der Zeit. Der Einfluß der geographischen Lage (Breite) ist etwa aus [9] oder den Betriebsanleitungen zu entnehmen.

In (7) erkennt man ΔN und E als Variable. ΔN wird aus (8) berechnet, a und Δt werden jeweils gemessen, so daß die Additionskonstante E (Eichwert) und die Multiplikationskonstante c als zeitabhängig verbleiben.

c ist laut [9], S 140 oder [10] mit $c = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{k_a a}{T_D}$ gegeben. k_a ist der Umrechnungsfaktor Amplitudenskala in Neuminuten, T_D die Schwingzeit des Kreisels. . . . (9)

Eine ausführlichere Darstellung ((9)) lautet $c = \frac{\pi}{2} \frac{k_a}{T_D} \left(1 + \frac{\kappa_0}{\cos \varphi}\right)$, worin κ_0 die relative Richtkraft der Bandtorsion bedeutet . . . (10)

k_a ist zeitunabhängig, so daß c nur durch die Stabilität der Schwingzeit und bei eingehender Betrachtung noch durch die Bandtorsion beeinflusst wird. T_D sank während eines Jahres von 7min 04,5sec auf 2min 03,5sec, d. i. von 424 auf 423 sec oder um 20/00; dies bewirkt eine Vergrößerung von c um 20/00, also weit unter der Meßgenauigkeit. Der Einfluß der Bandtorsion ist somit allein dominierend für c .

Auf der Eichstrecke des Institutes ergab sich

im April 1968 $c = (0.088_6 \pm 0.001_1) \text{ } ^\circ/\text{sec}$ (Messungsgenauigkeit)

im April 1969 $c = (0.088_6 \pm 0.001_2) \text{ } ^\circ/\text{sec}$ (Messungsgenauigkeit)

also keinerlei Änderung, auch von der Bandtorsion her. Die Bestimmung des Eichwertes ergibt gleichzeitig eine Aussage über die zu erreichende absolute Meßgenauigkeit. Auf der Eichstrecke des Institutes ergab sich

im April/Mai 1968 $E = + 2^\circ,1 \pm 0^\circ,9$

im April 1969 $E = + 4^\circ,4 \pm 0^\circ,8$

Die Meßgenauigkeit ist also offensichtlich gleich geblieben, unter einer Neuminute, während sich die Konstante stark verschoben hat. Innerhalb der einzelnen Messungsreihen war kein zeitlicher Trend zu erkennen. Eine Eichung zwischen den Meßreihen im Oktober 1968 ergab noch $E = + 2^\circ,1$. Für die praktischen Messungen war die Verschiebung des Eichwertes nicht maßgeblich, da laufend Eichmessungen in jedem lokalen System vorgenommen wurden, welche eine kurzfristige Stabilität im Minutenbereich nachwiesen.

In [18] wird neben der völligen Gleichwertigkeit der Umkehrpunkt- und Durchgangsmethode hinsichtlich Genauigkeit der Orientierung auch eine ähnliche Verschiebung des Eichwertes beim DDR-Kreisel MRK 2 nachgewiesen. Binnen weniger als zwei Monaten änderte sich E um etwa $2^\circ,5$. Hierbei ist aber schon innerhalb der beiden Meßreihen ein zeitlicher Trend zu erkennen. In [17] ist kein Einfluß der Zeit auf E erkennbar.

Nach [15] äußert sich der Einfluß der Bandnullage in einem additiven Zuschlag zur Additionskonstanten E (Eichwert).

$$E_{(BNL)} = \frac{M_B}{M_K} \cdot k_a \cdot a_0,$$

worin M_B Bandtorsionsmoment, M_K Kreiselrichtmoment, k_a Umrechnungskonstante Amplitudenskala \rightarrow Neuminuten, a_0 die Bandnullagen-Ablesung an der Amplitudenskala. Da $\frac{M_B}{M_K}$ sehr klein, überschreitet ΔE laut GAK 1-Betriebsan-

leitung erst bei $a_0 > 2$ die Meßgenauigkeit. Für die MOM-Typen GiB ist $\frac{M_B}{M_K} k_a = 0^\circ,15$, was mit der WILD-Anweisung übereinstimmt. Es dürften ja auch die technologischen Merkmale aller Kreisel ziemlich gleich sein.

April 1968 betrug die Bandnullage $+ 0,7$ Amplitudeneinheiten vor Hochlauf.

April 1969 wurde die Bandnullage vor und nach den Messungen bestimmt.

Die Ablesung nach der Messung ist für den Einfluß auf ΔE von größerer Bedeutung. Die Ruhelage vor der Messung schwankte zwischen $-0,25$ und $+0,15$, nachher zwischen $+0,5$ und $+1,7$ Amplitudeneinheiten, war also ohne Einfluß auf Eichwert und Orientierung.

1.1.4.3 Einfluß der Aufstellungsart

In [17] wird der Gang der Eichwerte in Abhängigkeit von Zeit und Transport des Gerätes und Beobachtungsort dargestellt. Es zeigt sich, daß die erstgenannten Faktoren beim GiB 2 keinerlei Einfluß auf E ausüben. Auch beim Wild GAK 1

sind die Differenzen von unmittelbar hintereinander ermittelten Eichwerten, wobei der Kreisel mit dem Theodolit verbunden blieb, und solchen, zwischen deren Bestimmung ein strapaziöser Stolleneinsatz lag, praktisch gleich. Bei mechanischer Verbindung war die Streuung $\pm 0^{\circ},8$, bei gelöster Verbindung $\pm 1^{\circ},0$. Der entsprechende F -Test ergibt $F = 1,64$, $F_{0,05} = 3,29$, also nicht einmal bei 5% Niveau gesicherter Unterschied der Grundgesamtheiten. Die mechanische Verbindung zwischen Kreisel und Theodolit ist also so ausgezeichnet, daß eine konstruktive Maßnahme wie das Umlenkprisma der MOM-GiC Serie bei Wild überflüssig ist. Laut der sehr realistischen Tabelle in [15] sind beide Erzeugnisse gleichwertig. Für den GAK 1 stehen in [15] z. B. $30''$ ($= 0^{\circ},9$) Orientierungsgenauigkeit verzeichnet.

Aus [17] geht eine etwa 2,5mal so große Genauigkeit der im Meßkeller ermittelten Eichwerte gegen die im Feld ermittelten hervor. Da unser Institut über keinen Meßkeller verfügt, wurden von Pfeilern ausgeführte Messungen mit solchen mit Stativ-aufstellung verglichen. Auch hier konnte kein systematischer Unterschied festgestellt werden. Die äußeren Einflüsse (Sonne, Wind) waren in beiden Fällen gleich. Durch den Aufbau des Kreisels, welcher fast wie ein Segel wirkt, scheint die starrere Pfeiler-aufstellung sogar benachteiligt. Schwankungen an der Amplitudenskala waren dort schon während der Messung zu erkennen.

1.1.4.4 Die „Sinusschwingung“ der Δt

Das in [10] erwähnte Phänomen einer „überlagerten Schwingung“ wird in [19] ausführlich beschrieben. Dort beobachteten die Verfasser an einem auf einem T 2 (!) montierten GAK 1 Schwankungen der Schulermittel, welche in erster Näherung Sinuslinien gleichen und dort als „SHAR effect“ (Secondary HARmonic) bezeichnet werden. Die Ursache war den Verfassern unerklärlich. Die halben Phasenlängen (von 0 bis π) schwankten zwischen 40min und $1\frac{1}{2}$ Stunden, die Amplituden zwischen $7''$ und $35''$. Zur Ermittlung des „wahren Wertes“ bei hohen Genauigkeitsanforderungen wird empfohlen, die Beobachtung über eine ganze „Schwingung“ auszudehnen, also bis die Abwicklung der ΔN auf der Zeitachse eine Phase von 2π durchlaufen hat was mindest $1\frac{1}{2}$ bis 2 Stunden Beobachtungsdauer bedeuten würde. Bei langdauernden Beobachtungen mit dem GAK 1 des Institutes ergaben sich Schwingungsbilder, welche sich bei einigem Einfühlungsvermögen wie jene aus [19] interpretieren lassen. Zu bemerken ist, daß die Anpassung an die Ausgleichskurve recht grob ist, was in Abb. 5 von [19] aber ebenfalls zutage tritt.

Eine Erklärung für die eigenartige Erscheinung der „überlagerten Schwingungen“ ergibt sich vielleicht aus ausgleichstheoretischen Überlegungen. Die „Schwingungsbilder“ gemahnen stark an die Fehlerverteilungen bei photogrammetrischen Streifen-triangulationen, welche in [20] und [21] beschrieben und erklärt sind. In der Tat entstehen die Schulermittel und auch die Δt beim Durchgangsverfahren durch doppelte Summation, wenn sie auch nicht durch so kumulative Gesetze wie die Modellfehler beschrieben werden. Das Schulermittel beim Umkehrpunkt i wird beschrieben durch

$$s_i = \frac{1}{2} \left(\frac{(u_{i-1} + u_{i+1})}{2} + u_i \right). \text{ Ein Fehler } \delta u \text{ in den Punkten}$$

$$i-2, i-1, i, i+1, i+2 \text{ bewirkt entsprechende } \delta s \text{ von } 0, \frac{\delta u}{4}, \frac{\delta u}{2}, \frac{\delta u}{4}, 0 \dots (11)$$

Der Ausdruck für Δt_i lautet $\pm (t_{i-1} - 2t_i + t_{i+1})$, wenn die t_i die einzelnen Zeitablesungen bedeuten. Ein Fehler δt bei der Ablesung + Zeitnehmung in den Punkten $i - 2, i - 1, i, i + 1, i + 2$ bewirkt entsprechende $\delta \Delta t$ von $0, \delta t, 2\delta t, \delta t, 0$ (12)

Beide Methoden gehorchen somit denselben Fehlergesetzen, nur wirkt sich der Fehler in der Zeitnehmung ziffernmäßig stärker aus als jener der Kreisablesung, welcher hinwieder aus anderen Gründen schon an und für sich ziffernmäßig größer ist. In manchen Arbeiten wurde bereits die starke Korrelation der bei allen Verfahren als unabhängig behandelten Größen s_i und Δt erwähnt ([8]).

Die Matrizenrechnung und das allgemeine Fehlerfortpflanzungsgesetz sollen Klarheit über diese Beziehungen schaffen.

Der Vektor Δt entsteht aus dem Vektor t der Durchgangszeiten durch eine doppelte lineare Transformation $\Delta t = R_2^T R_1^T t$ (13)

R_1^T hat bei i Durchgängen die Gestalt $\left| \begin{array}{cccc} 1 & -1 & 0 & 0 & \dots \\ 0 & -1 & 1 & 0 & \dots \\ 0 & 0 & 1 & -1 & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \end{array} \right|$. . . (14)

mit $i - 1$ Zeilen und i Spalten;
 R_2^T hat die Gestalt $\left| \begin{array}{cccc} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & \dots \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & \dots \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \end{array} \right|$. . . (15)

mit $i - 2$ Zeilen und $i - 1$ Spalten. . . . (15)

Die Kovarianzmatrix $Q_{\Delta t}$ entsteht aus der Kovarianzmatrix Q_t durch $Q_{\Delta t} = R_2^T R_1^T Q_t R_1 R_2$. . . (16)

Q_t ist in Wirklichkeit voll besetzt, da außer den Einflüssen von der Erfassung des Durchganges her, welche rein zufällig sind, sich physikalische Gegebenheiten bemerkbar machen. Der Einfachheit halber wollen wir aber Q_t als Einheitsmatrix annehmen, so daß wir die Fehler der Δt durch den mittleren Fehler der Zeitnehmung (und Erfassung des Durchganges) ausdrücken.

Durch Einsetzen von (14), (15) und (17) in (16) wird die Kovarianzmatrix $Q_{\Delta t}$

zu $\begin{array}{c} i = 3 \quad i = 4 \quad i = 5 \\ \begin{array}{c} i = 3 \\ i = 4 \\ i = 5 \end{array} \left| \begin{array}{ccc} 6 & 4 & 1 \\ 4 & 6 & 4 \\ 1 & 4 & 6 \\ 0 & 1 & 4 \\ \dots & \dots & \dots \end{array} \right| \begin{array}{ccc} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 7 & 1 & 0 \\ 6 & 4 & 1 \\ \dots & \dots & \dots \end{array} \end{array}$

woraus sich die einzelnen Kovarianzmatrizen für verschiedene Anzahlen von Durchgängen ablesen lassen.

Das Auftreten der Binomialkoeffizienten der vierten Potenz ist nicht verwunderlich, wenn man die Tienstra'sche Symbolik und die Art der Berechnung der Δt bedenkt.

Im allgemeinen sind die Ergebnisse von 5 Zeitnehmungen noch miteinander korreliert! (Schluß folgt)

im ersten Moment den Verdacht, daß sich in den Formeln ein Fehler eingeschlichen haben müßte. Dem ist aber nicht so! Stellt man nämlich die entsprechenden Gewichtskoeffizienten der Helmert- denen der Affintransformation gegenüber, dann sieht man, daß *diese* schon den doppelten Wert geben:

$$\begin{array}{ll}
 \text{Helmert:} & \text{affin:} \\
 Q_{aa} = \frac{1}{[y_r y_r + x_r x_r]} = \frac{1}{2 [y_r y_r]} & Q_{aa} = \frac{1}{[y_r y_r] [x_r x_r] - [x_r y_r] [x_r y_r]} = \frac{1}{[y_r y_r]} \\
 Q_{ab} = 0 & Q_{ab} = 0 \\
 Q_{ac} = \frac{[y]}{2n [y_r y_r]} & Q_{ac} = \frac{[y]}{n [y_r y_r]} \\
 Q_{bb} = \frac{1}{2 [x_r x_r]} & Q_{bb} = \frac{1}{[x_r x_r]} \\
 Q_{bc} = \frac{[x]}{2n [x_r x_r]} & Q_{bc} = \frac{[x]}{n [x_r x_r]} \\
 Q_{cy} = \frac{1}{n} + \frac{[y]^2 + [x]^2}{2n^2 [y_r y_r]} & Q_{cc} = \frac{1}{n} + \frac{[y]^2 + [x]^2}{n^2 [y_r y_r]}
 \end{array}$$

Es sind also ausschließlich in den quadratischen Gewichtskoeffizienten der Ursprungsverschiebungen und dort auch nur die Anteile der Punktzahlen n bei Helmert- und Affintransformation gleich, nämlich $1/n$. Der Einfluß der Punktlagen aber ist bei diesen Koeffizienten, ebenso wie bei allen anderen (quadratischen und gemischten) Q -Werten in der Helmert-Umrechnung nur halb so groß wie in der affinen! Das heißt aber, daß die Punktlage der Paßpunkte bei der affinen Umrechnung viel mehr ins Gewicht fällt, daß diese gewissermaßen einen anderen Maßstab anlegt, als die Helmert'sche. Und diese Erkenntnis wird bei der Diskussion der Beispiele noch besonders augenfällig werden. (Schluß folgt)

Moderne physikalische Orientierungsmethoden

Von *Kornelius Peters*, Wien

(Veröffentlichungen des Institutes für Landes- und Katastervermessung der Technischen Hochschule Wien)

(Schluß)

Aus (18) berechnet man Tabelle 1:

1	2	3	4	5	6	7	8		9	10
2*)	3,5	14	3,0*)	3,0*)	0,9*)	2,5*)
3	7,0	17	2,4	2,4	2,4	.	.	.	1,0	2,5
5	14,0	24	2,4	2,0	1,4	1,8	2,0	3,2	1,0	2
7	21,0	31	2,4	1,7	1,1	1,5	2,0	3,2	3,5	3,5
16	52,5	62	2,4	1,0	0,6	—	2,0	3,2	3,5	... 3,5
									1,2	1,5

*) siehe Kapitel I. 1.4.5!

Es bedeuten die Spalten in Tabelle 1:

- 1 ... Anzahl der Durchgänge
- 2 ... Netto-Meßzeit in Minuten
- 3 ... Brutto-Meßzeit in Minuten
- 4 ... mittlerer Fehler eines beliebigen Δt in Einheiten des m. F. einer Zeitnehmung
- 5 ... mittlerer Fehler des arithmetischen Mittels der Δt in Einheiten von m_t
- 6 ... fiktiver mittlerer Fehler des arithmetischen Mittels der Δt unter Vernachlässigung der Korrelation
- 7 ... mittlerer Fehler des nach der Methode der kl. Qu. geschätzten Δt
- 8 ... mittlerer Fehler der Differenz zweier um 1, 2, ... $i - 3$ Durchgänge auseinanderliegenden Δt
- 9 ... Wirtschaftlichkeitskoeffizient $((\text{Sp. 5}) \cdot \sqrt{(\text{Sp. 3})})^{-1} \cdot 10 \text{ lt Köhr}$ (zitiert in [22], Seite 572).
- 10 ... Wirtschaftlichkeitskoeffizient $((\text{Sp. 5}) \cdot (\text{Sp. 3}))^{-1} \cdot 100$

Spalte 7 ergibt sich aus konsequenter Behandlung des allgemeinen arithmetischen Mittels unter Verwendung der Inversen der Kovarianzmatrix (allgemein etwa in [22], Seiten 111, 133).

Der Genauigkeitsgewinn durch überschüssige Messungen ist erstaunlich gering, auch wenn man streng ausgleicht (vgl. Spalten 5 und 7 mit 6!). Durch die Korrelation der mittleren Fehler der Durchgänge ist die Konvergenz noch geringer als in obigem Beispiel, so daß man nur eine möglichst geringe Anzahl der Durchgänge und möglichst einfache Berechnungsart empfehlen kann! Die Bindung an den benachbarten Punkt (Sp. 8) bewirkt eine Glättung der Fehler-Zeit-Kurve; daß nur jeweils der zweitnächste Punkt den Wert beeinflusst, fördert eine Rückkehr zum Erwartungswert, so daß eine sinusähnliche Kurve noch wahrscheinlicher ist als unter den Voraussetzungen von [20].

1.1.4.5 Gedanken zu einigen Beobachtungsmethoden

Tabelle 1 und praktische Erfahrungen ([11], [17], [18]) lassen es geraten erscheinen, die Orientierung möglichst schnell und einfach vorzunehmen. Der mittlere Fehler des Azimutes ist weniger von Berechnungsart und Wiederholungszahl der Messungen als von physikalischen Faktoren abhängig. Die Analyse aller Beobachtungsverfahren empfiehlt ein aus Amplituden- und Durchgangsmethode kombiniertes Verfahren, da dieses bei einfachsten Beobachtungen die kürzeste Zeit verlangt, wenn man von der Grafarend-Methode absieht, auf welche noch zurückgekommen werden soll. Das Durchgangsverfahren bedarf dreier Durchgänge, um ein Δt und damit ein ΔN zu bestimmen. Der dritte Durchgang (und jeder $i + 1$ te mit ihm) gibt aber nur die Ablesung der Gerätekonstanten T_D , also keine eigentlich neue Messung.

Die für Δt bestimmenden Werte sind die beiden ersten Durchgänge:

$$\Delta t = (t_1 + T_D - t_2) - (t_2 - t_1) = T_D - 2t_2 + 2t_1 \quad \dots (19)$$

Ist $t_1 = 0$, was man in der Praxis immer durchführen wird, ergibt sich $\Delta t = T_D - 2t_2 \quad \dots (20)$

Die Berechnung kann entweder direkt gemäß (20) oder auch aus dem Formular gemäß Abb. 8b durchgeführt werden. Dort kann man das bekannte T_D in der dritten

Zeile einsetzen. Die Nettomeßzeit beträgt nunmehr 3.5 Minuten gegenüber der Halmos-Methode 1.1.3.4, welche mindest 7 Minuten nebst gesteigerter Konzentration auf die von Null unterschiedenen Skalenstriche erfordert. Die Kontrolle des solcherart berechneten ΔN wird durch eine Amplitudenmessung vorgenommen, indem je ein Umkehrpunkt mittels k_a umgerechnet wird. (Halmos schlägt übrigens in [11] eine auf ähnlichen Gedankengängen beruhende Vereinfachung der Umkehrpunktmethod vor. Dort werden nur 2 Schulerpunkte durch Zeitmessung kontrolliert).

Nun zur Fehlerabschätzung a priori:

Der mittlere quadratische Fehler eines Δt ergibt sich zu $m^2_{t_i} = m^2_{T_D} + 8 m^2_{t_i}$
 . . . (21)

Die Kovarianzen m_{TDt_i} und $m_{t_1 t_2}$ sind hiebei Null gesetzt, da wir auch in (17) die Kovarianzmatrix der Durchgänge als Diagonalmatrix angenommen haben. m_{t_1} muß berücksichtigt werden, obwohl $t_1 = 0$, da die Ablesefehler auf der Stoppuhr selbst klein sind gegen die Erfassung des Durchganges. m_{t_i} kann bestimmt werden aus den Lesungen selbst, der Übereinstimmung korrespondierender erster Differenzen oder aus den zweiten Differenzen und Tab. 1.

T_D und m_{T_D} wurden für diese Untersuchung jeweils aus der ersten Bestimmung $t_3 - t_1$ der einzelnen Messungen berechnet, da ja auch nur dieser erste Wert im Schnellverfahren verwendet wird. Etwa jeden Monat muß die T_D -Bestimmung wiederholt werden, wenn man die Schnellmethode (20) verwendet. Für die T_D und m_{T_D} ergaben sich beispielsweise für den Zeitraum April/Mai 1968 7min 04,5 sec \pm 0,3sec, für Juni/Juli 1968 dieselben Werte, für April 1969 7min 03,5sec \pm 0,3sec. Die t_i wurden in mehrere Klassen eingeteilt: in solche, welche bei Amplituden $a \geq 7$ und solche, welche bei $a < 7$ beobachtet wurden; $t_a \geq 7$ wurden wieder in durch ungeübte Beobachter (Hörer im Rahmen der lehrplanmäßigen Meßübungen) und durch geübte Beobachter erzielte Werte $t_a \geq 7$, und $t_a \geq 7,8$ getrennt.

Die mittleren Fehler wurden gemäß $m^2 = \frac{1}{2} m^2_{t_i - t_{i-1}}$ aus den ersten Differenzen berechnet.

Für $t_a \geq 7,8$	wurde $m_{t_i} = \pm 0,22\text{sec}$
$t_a \geq 7,8$	$m_{t_i} = \pm 0,41\text{sec}$
$t_a \geq 7$	$m_{t_i} = \pm 0,6\text{sec}$

Die Unterschiede in den mittleren Fehlern sind sogar auf dem 1%-Niveau überzufällig. $m_{t_a \geq 7,8}$ stimmt mit den in der Literatur angegebenen Werten überein. Die erzielten Werte in (21) eingesetzt, wird $m_{t_i (i=2)} = 0,66\text{sec}$; daraus ergeben sich die mit *) bezeichneten Angaben in Tabelle 1.

Nun zur Kontrolle durch die Amplitudenskala. Interessanterweise ist der Umrechnungsfaktor k_a in der Wild-GAK-1-Anleitung nicht angegeben, obwohl er eine markante Gerätekonstante ist. Für den Aufsatzkreisel der Lehrkanzel wurde k_a aus einer Gegenüberstellung Durchgangs- kontra Amplitudenmethode zu $k_a = 11^{\circ},8 \pm 0^{\circ},3$ bestimmt, was dem in [9] mit $6,2 = 11^{\circ},5$ angegebenen Wert soweit entspricht, daß dieser noch in das Konfidenzintervall ($\alpha = 5\%$) fällt. Wie m_{t_i} kann auch m_a aus den ersten Differenzen bequem berechnet werden. Es ergaben sich $m_a = \pm 0,05$ Amplitudeneinheiten, $m_{sa} = \pm 0,08$ Amplitudeneinheiten, wieder in Übereinstimmung mit den Angaben in der Literatur.

Aus $\Delta N = k_a \cdot \Delta a$ wird

$$m^2_{\Delta N} = (k_a m_{\Delta a})^2 + (\Delta a \cdot m_{k_a})^2 \quad \dots (22)$$

Zahlenbeispiel: $a = 1,0$ Skaleneinheiten

$$m^2_{\Delta N} = (12 \times 0,08)^2 + (1,0 \times 0^c,3)^2$$

$m_{\Delta N} = \pm 1^c,0$, ein durchaus beachtlicher Wert, an der Genauigkeit von E gemessen.

Genauigkeit der Durchgangsmethode:

$$\Delta N = c \cdot a \cdot \Delta t$$

$$m^2_{\Delta N} = (a \cdot \Delta t \cdot m_c)^2 + (c \cdot \Delta t \cdot m_a)^2 + (c \cdot a \cdot m_{\Delta t})^2 \quad \dots (23)$$

bei $i =$ wird $m_{\Delta t} = \pm 0^c,66$, $m_a = \pm 0,04$

$i = 4$ wird $m_{\Delta t} = \pm 0^c,48$, $m_a = \pm 0,03$

damit werden für $a = 10$, $\Delta t = 10\text{sec}$, $c = 0,089^c/\text{sec}$

$i = 2$: $m^2_{\Delta N} = (0,1)^2 + (0,4)^2 + (0,6)^2$; $m_{\Delta N} = \pm 0^c,7$

$i = 4$: $m^2_{\Delta N} = (0,1)^2 + (0,3)^2 + (0,4)^2$; $m_{\Delta N} = \pm 0^c,55$

Die Genauigkeit der orientierten Richtung berechnet sich daraus unter Berücksichtigung der Theodolitgenauigkeit (Kreisangabe) und der Genauigkeit des Eichwertes.

Der Eichwert dominiert die zwei restlichen Parameter:

$$m^2_{\nu} = m^2_{Kr. Abl.} + m^2_E + m^2_{\Delta N} \quad \dots (24)$$

$T 16$: $m^2_{\nu,2} = (0^c,3)^2 + (0^c,8)^2 + (0^c,7)^2$; $m_{\nu,2} = \pm 1^c,1$

$m^2_{\nu,4} = (0^c,3)^2 + (0^c,8)^2 + (0^c,55)^2$; $m_{\nu,4} = \pm 1^c,0$

Durch Verwendung des Kontrollwertes aus der Azimutmethode mit der Näherungsformel $\Delta N_{2A} = \frac{1}{2} (\Delta N_2 + k_a \Delta a)$ $\dots (25)$

wird $m^2_{N,2,A} = ((0^c,7)^2 + (1^c,0)^2) / 4$; $m_{N,2A} = \pm 0^c,6$, also sogar schwach besser als der bloße Wert aus der Durchgangsmethode. Die Berechnungen werden vorteilhaft mit einem dem Horskydiagramm nachempfundenen Nomogramm ausgeführt (Abb. 11).

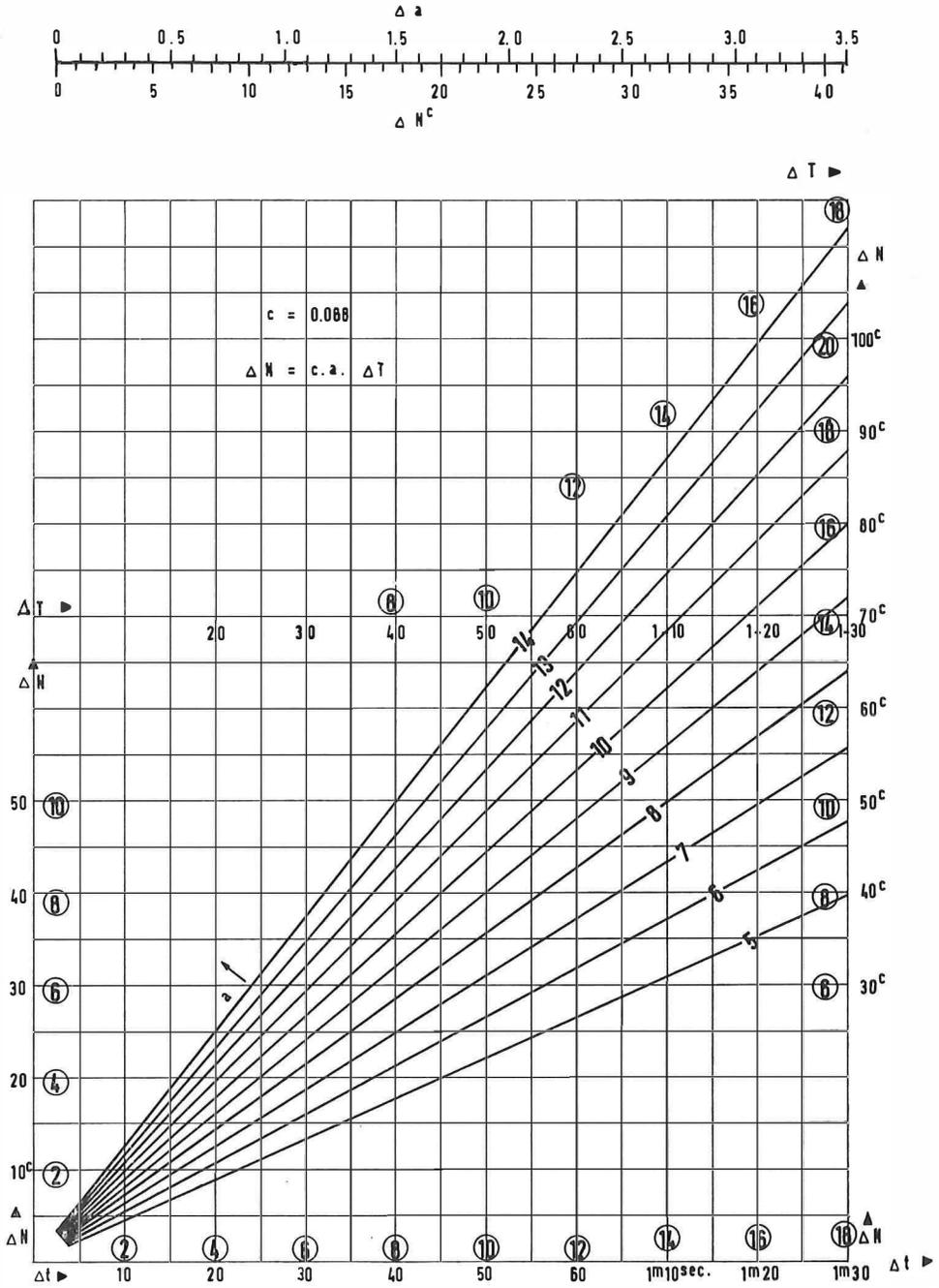
Alle E -Bestimmungen wurden interessehalber mit der Schnellmethode (20), (25) durchgerechnet. Die mittlere Abweichung zwischen ΔN (alle Werte) und ΔN_2 wurde $m_{N\Delta/\Delta N_2} = \pm 0^c,5$ nach (20), $\pm 0^c,8$ nach (25).

Die mittlere Abweichung der nur gemäß der Schnellmethode gewonnenen Werte vom Sollwert $m_{E/E\Delta N_2} = \pm 0^c,7$ nach (20), $\pm 1^c,1$ nach (25).

Besonders bemerkenswert erscheinen der mittlere Fehler von nur $\pm 0^c,7$ mit der nackten Bestimmung aus einer Halbschwingung (2 Durchgänge), welcher auf die ungünstigen physikalisch bedingten Korrelationen innerhalb einer längeren Meßreihe hinweist, sodann auch die der theoretischen Ableitung widersprechende Verschlechterung der Genauigkeit durch Beziehung der Amplitudenmessungen. Letztere Erscheinung dürfte durch mangelnde Sorgfalt bei der ersten Amplitudenablesung infolge Konzentration auf die wesentlich „interessanteren“ Durchgänge bedingt sein, kann aber durch entsprechende psychische Einstellung behoben werden.

Nun noch einige Gedanken zur noch weniger Zeit erfordernden und besonders theoretisch zweifellos eleganteren Grafarend-Methode: Grafarend diskutiert in seiner überaus umfassenden und vielseitigen Dissertation [12] die Fehlereinflüsse bei verschiedenen Orientierungsmethoden. Bei der Schwendener-(Durchgangs-)methode setzt er m_{st} mit $\pm 1\text{sec}$ an und kommt damit zu einer a priori-Genauigkeit

Abb. 11



von $\pm 0^{\circ},65$. Obige, gewiß nicht sehr tiefschürfenden Untersuchungen lassen aber gemäß Tab. 1 ein $m_{st} \pm 0,5\text{sec}$ mit Sicherheit erwarten. Dies würde den a priori-Fehler etwa halbieren. Grafarend fordert für seine Methode auf S. 71 *entweder* eine Schleppeizerstoppuhr *oder* eine photoelektrische Kreiselabtastung. Die zuerst genannte Art der Zeitmessung scheint besonders hinsichtlich der geforderten Genauigkeit von $\pm 0,01\text{sec}$ inferior. Und erst mit dieser Zeitgenauigkeit ist die Grafarend-Methode a priori der Schwendener-Methode ebenbürtig! Etwas schwer verständlich ist auch die Ableitung der a posteriori-Genauigkeit der einzelnen Methoden. Aus Tab. 26 auf S. 85 geht hervor, daß 6 Standpunkte observiert, die E (und somit die Meßgenauigkeit) nur mit 5facher Überbestimmung erhalten wurden. Daß Schuler- und Schwendener-Methode ungefähr übereinstimmen würden, war zu erwarten. Der plötzliche Genauigkeitsanstieg innerhalb zweier Grafarend-Beobachtungen durch Messung der Bandnullage ist zumindest als auffallend zu bezeichnen. Für Schuler betrug $m \pm 1'2$, für Schwendener $\pm 1'5$, für Grafarend $\pm 1'5$, für Grafarend mit Bandnullage $\pm 0'4$ (auch in [7] angegeben).

Die Resultate lassen auf grobe Dejustierung des verwendeten Kreisels, besonders hinsichtlich der Bandtorsion, sicher aber nicht auf Unbrauchbarkeit der konventionellen Methoden schließen. Der Fehler von $\pm 1'5 = \pm 3^{\circ}$ übertrifft immerhin alle a priori-Berechnungen um das 3- bis 5-fache, die Beobachtungen anderer Autoren um das dreifache. Überhaupt scheint Grafarend bei Angabe praktischer Werte keine glückliche Hand zu besitzen. So kann man auf S. 25f. erfahren, daß der Fehlergradient des Geodimeters NASM 4B 2 $\cdot 10^{-5}$ beträgt. (Dies würde auf 10 km einen mittleren Fehler von ± 20 cm bedeuten!). So ist der Leser leider zu sehr kritischer und wacher Betrachtung der theoretisch brillanten Ableitungen von [12] gezwungen.

1.1.5 Anwendungsmöglichkeiten des Kreisels

So zahlreich die theoretischen Arbeiten über den Kreisels vorliegen, so spärlich erscheinen Berichte über praktisch ausgeführte Arbeiten (vom markscheiderischen Einsatz sei hier abgesehen). Es scheint, als sei er einerseits wie das Geheimnis des Grals zu hüten, andererseits dürfte eine gewisse Scheu vor dem neuen, dynamischen Meßprinzip vorliegen. Immerhin konnten WILD und MOM jeweils schon eine vierstellige Stückzahl von Kreiselgeräten absetzen. Aus Literaturzitaten ist zu ersehen, daß in Südafrika der Aufsatzkreisels häufig zum Einsatz kommt. Die entsprechenden Arbeiten standen aber dem Verfasser nicht zur Verfügung.

Die nach Kenntnis des Verfassers erste ingenieurgeodätische Arbeit, welche mit dem Kreisels durchgeführt wurde, war die Kontrolle der Absteckung des 905 m langen, im Druckluftschildvortrieb ausgebauten Düsseldorfer Rheintunnels ([24]). Zur Anwendung kam der damals einzige Clausthale Kreiseltheodolit KT 1, der Prototyp der späteren Clausthal-Fennel-Serie KT. Durch die Druckluft unter Tage ergab sich damals (1959) eine systematische Eichwertverschiebung, welche einen Durchschlagfehler von 12 cm bewirkte, während die tatsächliche, mit Hilfe von Präzisionsschnurloten durchgeführte Durchörterung mit nur 1 cm (Theodolitzug) bzw. 3 cm (Alignment) Querfehler durchgeführt werden konnte! Die Toleranz betrug übrigens 20 cm, so daß der für die spezielle Aufgabe nicht adaptierte „Urkreisels“ die Aufgabe zufriedenstellend und vor allem einfach gelöst hätte.

Die Budapester U-Bahn wird unter Einsatz der GiB-Serie abgesteckt. Hiefür wurde eine eigene Beobachtungsanordnung durch spezifische Aufeinanderfolge von Eich- und Feldmessungen geschaffen, welche der Charakteristik der Kreiselmessungen entsprechen. Als optimale Kombination wurde die Folge 2 Eichmessungen — 2 Messungen vor Ort — 2 Eichmessungen ermittelt ([25]). Damit wird der Fehler der einfachen Messung um etwa ein Drittel gesenkt.

Der mittlere Fehler einer Gi-B2-Messung ergab sich damit zu $\pm 8'',5$ ($= 0'',25$), auch für den Wild-GAK 1 würde er sich unter Verwendung von nur 4 Durchgängen bei der Schwendener-Methode auf $\pm 0'',6$ reduzieren! Daraus läßt sich leicht schließen, daß auch ein Aufsatzkreisel sich nicht nur für Richtungskontrolle langer Polygonzüge, Richtungsangabe von Richtstrahlern, Antennen, Hochspannungsanlagen, Pipelines, militärische Anlagen (vgl. die Absatzziffern!) eignet, sondern vor allem für Absteckungen unter Tage. Der erfolgreiche Einsatz bei der Absteckung untertägiger Versorgungsleitungen und die Überlegung, daß die Verhältnisse gerade bei dieser Arbeit durch Entfall von Sonnen- und Windeinfluß solchen im Meßkeller nahe kommen, läßt eine Eignung zumindest für eine unabhängige Zweitmessung untertägiger Großanlagen gegeben scheinen.

1.2 Weitere Anwendungen des Kreiselpinzipes

Die Ausführungen erheben keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

1.2.1 Der Killian-Kreisel für die Luftbildmessung

In [26] wird ein zweifach kardanisch gelagerter „freier“ Kreisel beschrieben und durchgerechnet, welcher als „Sinnesorgan“ zur Ermittlung der wahren Nadirpunkte von aufeinanderfolgenden Luftbildern dient, wenn der Nadirpunkt des ersten etwa durch räumliches Rückwärtseinschneiden bekannt ist. Durch die Horizontal- und Vertikalbeschleunigung des Meßflugzeuges präzisiert der Kreisel; seine Achse kann durch ein photoelektrisches System annähernd mit der Achse einer Dosenlibelle in Deckung gehalten werden. Bei jeder Aufnahme wird die relative Lage der Libellenblase zur Kreiselachse photographiert; daraus läßt sich die Bahn der Kreiselspitze und des Nadirpunktes mit günstiger Fehlerübertragung rekonstruieren.

1.2.2 Kreisel in Stollenvortriebsmaschinen

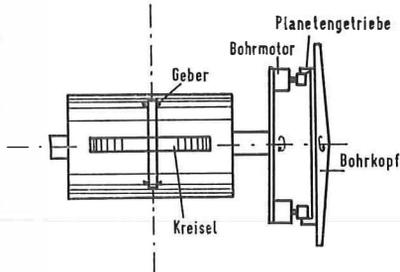
Das Drehmoment des Bohrkopfes einer Stollenvortriebsmaschine erzeugt ein Reaktionsmoment an der Maschine. Bei nicht selbst fahrbaren Maschinen, welche nach Abbaulängen von 60—80 cm umgesetzt werden müssen, wird dieses Moment über die Verspannung im Stollen an das Gebirge abgegeben. Bei den rationelleren, selbstfahrenden Abbaumaschinen, welche etwa über Raupen fortbewegt werden, bewirkt es jedoch eine Vertrimmung, gegen welche besonders Schildvortriebsmaschinen sehr empfindlich sind. Wird nun in einer Vortriebsmaschine ein Kreisel so angebracht, daß seine Figurenachse senkrecht zur Vortriebsrichtung liegt, während sein Gehäuse um eine in der Vortriebsrichtung liegende Achse drehbar ist, wird das Reaktionsmoment durch eine zur Drehung der Bohrkopfes gegenläufige langsame Rotation des Gehäuses abgefangen. Solche Kreisel laufen bereits in serienmäßigen Vortriebsmaschinen.

In [27] wird eine Konstruktion beschrieben, welche den Kreisel außer zur Ver-

hinderung des Vertrimmens auch als Kursgeber verwendet (Abb. 12). Der Bohrkopf wird über ein Planetengetriebe angetrieben, so daß die Reaktionsmomente von der Abbauseite her, welche bei den beschriebenen Geräten etwa 100000mal so groß sind wie jene aus der Erdrotation, von diesen getrennt werden können. Diese relativ kleinen Momente können durch ihre Auswirkung auf die Lagerdrücke von Meßdatengebern angezeigt werden; die Ablesung läßt auf das Azimut der Längsachse der Vortriebsmaschine schließen.

Über die erreichbare Genauigkeit liegen keine Angaben vor; sie dürfte aber durch die Richtungsabhängigkeit der Methode (vgl. Formel (6) bzw. deren Ableitung nach α) ungünstiger sein als bei Einweisung durch kreiseltheodolit-orientierte Visur oder Laserstrahl.

Abb. 12



2. Der Ringlaser

Ab 1963 wurden Überlegungen, aus Frequenzdifferenzen von Laserstrahlen auf dem Dopplerprinzip auf Richtungsänderungen zu schließen, praktisch verwirklicht. Vier Laser (in der Ausführung He-Ne-Laser) sind parallel zu den 4 Seiten eines Quadrates aufgestellt und strahlen in beiden Richtungen. Durch unter 45° gegen die Quadratseiten geneigt angebrachte Spiegel wird das von einem Laser ausgesandte Licht wieder zu seinem Ausgangspunkt zurückgeleitet. Einer der Eckspiegel ist halbdurchlässig ausgebildet, damit das Licht, aus beiden Richtungen kommend, von dort einem Photodetektor zugeführt werden kann.

Ist das Quadrat nun etwa vertikal aufgestellt, hat der in der Richtung des Erdrotationsvektors liegende Ast eine andere Frequenz als der entgegengesetzte; der Frequenzunterschied verschwindet nur dann, wenn die Vertikalebene des Ringlasers mit der Meridianebene zusammenfällt.

Derzeit liegt auf Grund der technologischen Fertigungsmöglichkeit der Laser die Winkelkonstanz bei $0',1$ bis $1'$ pro Stunde; aus diesem Grund und wegen des sehr großen Raumbedarfes wird mit einem Ringlaser-Theodolit, wie etwa in [28] beschrieben, in nächster Zeit nicht zu rechnen sein.

Näheres über den Ringlaser in [4] und [29]; Abbildungen in [30].

3. Beschleunigungsmesser als Richtungsweiser

Auf Seite 1099 der Zeitschrift INTERAVIA, Jg. 1967, ist von einem bereits in Dienst gestellten Typ eines Beschleunigungsmessers von ONERA (Office National d'Etudes et de Recherches Aerospatiales) zu lesen, welcher aus Verschiebungen einer Berylliumkugel, welche in einem elektrischen Feld schwebt, Beschleunigungen in der x -, y - und z -Richtung mittels dreier Geber auf 10^{-9} g messen kann.

In [31] wird über ein 1964 gestartetes Projekt berichtet, welches ein nichtmechanisches Inertial-Anzeige-System primär zum Ersatz von Navigationskreiseln entwickeln sollte. Eine staubkorngroße Glaskugel (\varnothing 0,002 mm) schwebt in einem

Magnetfeld und wird von einem Lichtstrahl beleuchtet. Ihre Bewegungen werden von drei Photosensoren erfaßt; die Meßdaten dienen auch zur entsprechenden Dimensionierung des Magnetfeldes, um die Kugel zentrisch zu halten.

Beide Geräte könnten zur Azimutmessung verwendet werden; wenn das gesamte System mit der Alhidade eines Theodolits verbunden wird, kann durch die Anzeige „Maximum in y ,- Null in x -Achse der Vorrichtung“ die Nordrichtung bestimmt werden.

Das in [31] beschriebene System kann natürlich auch als Gravimeter dienen. Weitere Varianten der Anzeigemöglichkeiten werden wie folgt angegeben:

Wird an die Richtung einer der drei Sensoren (lokalen Koordinatenachsen) eine Wechsellspannung gelegt, oszilliert das Kügelchen entlang dieser Richtung. Bei Drehung des Systems bleibt die Glaskugel etwas zurück und gerät in die Erfassung durch die beiden anderen Sensoren. Man kann auch die Kugel entlang einer Kreisbahn senden und das an vier Elektroden erzeugte elektrische Feld, welches diese Bewegung steuert, messen.

Über die tatsächliche Genauigkeit und Kosten liegen keine Unterlagen vor.

Nach Meinung des Verfassers hat das zuletzt beschriebene System eher Chancen, den klassischen Kreisel in absehbarer Zeit zu ergänzen bzw. zu ersetzen, als der Ringlaser, sofern der Laser dort nicht wenigstens als Leitstrahl verwendet werden kann.

Vorerst liegt aber nur im Kreiseltheodolit ein technisch ausgereiftes Gerät vor, um Richtungen absolut zu messen oder abzustecken.

Anhang

Ad 0. 1, Astronomische Schnellverfahren: Herrn *Dipl.-Ing. Kurt Bretterbauer* danke ich für den Hinweis auf die Arbeiten über „Astronomische Hilfsziele zur Orientierung von Polygonzügen“, beschrieben von Fränzel in der *ZfV* 5/54 und Moerke in der *ZfV* 5/64. Durch gleichzeitige Zielung nach einem Gestirn von zwei benachbarten Punkten aus kann man, wenn im ersten eine bekannte Anschlußrichtung nach einem irdischen Ziel vorliegt, im zweiten ohne Koordinatenanschluß, aber auch ohne Tafelwerke und Zeitmessung orientiert anschließen. Die Gleichzeitigkeit kann man durch Handfunksprechgeräte erreichen. Bretterbauer arbeitet an praktischen Versuchsmessungen hiezu mit Einschluß der in den zitierten Arbeiten nicht berücksichtigten, jedoch bedeutsamen Unterschiede der Meridiankonvergenz in den beiden Standpunkten.

Ad 1. 1. 1 Kreiseltheodolite: Weiterhin danke ich Herrn *Dipl.-Ing. Bretterbauer* für die Übermittlung zweier Manuskripte von *Gregersen* (Geodetic Survey of Canada), welcher bei MOM GiB2-Instrumenten innere Genauigkeiten von etwa einer Altsekunde zu erreichen glaubt und mittels dieser Geräte Messungen aus dem Problemkreis der Höheren Geodäsie ausführen will.

Ad 2. Ringlaser: In der VR 7/69 erschien ein höchst lesenswerter Beitrag von *Kahlen*, welcher das Thema ausführlich und auf Grund neuer Unterlagen behandelt. Erfahrungswerte über ausgeführte Messungen oder Gerätekosten standen diesem Autor zwar nicht zur Verfügung, doch scheinen sich Dimension und Genauigkeit besonders der Typen von Honeywell wesentlich günstiger zu gestalten als bisher: Volumen, Gewicht und Genauigkeit im Bereich des Aufsatzkreisels; keine Nachteile der Kreiselmechanik; Möglichkeit, den Laser gleichzeitig als Richtstrahl zu verwenden. Die neueren Ringlaser zeigen nicht mehr die Gestalt eines Quadrates, sondern die eines Tetraeders.

Ad Literatur: [25] ist in englischer Sprache unter dem Titel „Orientation of Underground Networks with Gyroscopic Theodolites“ in der MOM-Review erschienen. Die irrtümlich mit VR 6/69 angegebene Fortsetzung von [4] läßt leider noch auf sich warten.