

Zeitschrift: Schweizerische Zeitschrift für Vermessung, Kulturtechnik und Photogrammetrie = Revue technique suisse des mensurations, du génie rural et de la photogrammétrie

Herausgeber: Schweizerischer Verein für Vermessungswesen und Kulturtechnik = Société suisse de la mensuration et du génie rural

Band: 64 (1966)

Heft: 10

Artikel: Satellitengeodäsie

Autor: Schürer, M.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-220781>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 01.04.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Schweizerische Zeitschrift für Vermessung, Photogrammetrie und Kulturtechnik

Revue technique Suisse des Mensurations, de Photogrammétrie et du Génie rural

Herausgeber: Schweiz. Verein für Vermessungswesen und Kulturtechnik; Schweiz. Gesellschaft für Photogrammetrie; Fachgruppe der Kulturingenieure des SIA

Editeurs: Société suisse des Mensurations et Améliorations foncières; Société suisse de Photogrammétrie; Groupe professionnel des Ingénieurs du Génie rural de la SIA

Nr. 10 · LXIV. Jahrgang

Erscheint monatlich

15. Oktober 1966

Satellitengeodäsie

Von Prof. Dr. M. Schürer, Bern

Zusammenfassung

Nach einer kurzen Erläuterung der geometrischen und der dynamischen Methode der Satellitengeodäsie werden die verschiedenen photographischen Beobachtungstechniken geschildert und die notwendigen Reduktionen beschrieben. In einem letzten Kapitel wird auf die gegenwärtigen europäischen Arbeiten eingegangen und insbesondere auf die in der Sternwarte Zimmerwald angewandten Methoden.

Résumé

Un bref exposé des méthodes géométriques et dynamiques de la géodésie par satellites est suivi de la description des différentes techniques d'observation et de réduction des mesures. Un dernier chapitre traite des travaux qui sont actuellement en cours à l'échelle européenne et plus particulièrement de la méthode appliquée à l'observatoire de Zimmerwald.

1. Aufgabe der Geodäsie und deren Lösung mittels Satelliten

Die vornehmste Aufgabe der Geodäsie besteht in der Bestimmung der Größe und Form des Geoids oder, noch allgemeiner, in der Bestimmung der Niveaulflächen des Gravitations- und Schwerepotentials der Erde, so den Gradienten des Schwerepotentials, die Schwerkraft, in das allgemeine Problem mit einschließend. Im weiteren sind die Koordinaten von Fixpunkten in einem einheitlichen erdfesten System zu bestimmen. Bisher waren diese Aufgaben nur unvollkommen lösbar. Die Weltmeere bildeten für die klassische Triangulation unüberwindliche Hindernisse. Schwere-messungen auf dem Meere und in der Luft waren zu wenig genau und zu wenig zahlreich, als daß sie zur exakten Bestimmung des Geoids hätten herangezogen werden können. Jedes Land benutzte seine eigenen Grundlagen und sein eigenes Referenzellipsoid, auf das die Koordinaten seiner Triangulationspunkte bezogen wurden. Auch wenn gleiche Dimensionen

für alle Referenzellipsoide gewählt worden wären, etwa diejenigen des internationalen Ellipsoids von Hayford mit dem Äquatorradius $a_e = 6\,378\,388$ m und der Abplattung $f = 1/297$, würden die verschiedenen Ellipsoide im allgemeinen nicht zusammenfallen, einerseits wegen der Beobachtungsfehler in den Grundlagen (geographische Breite und Länge sowie Azimut im Nullpunkt), andererseits wegen der Abweichung des Geoids vom Ellipsoid. In der Regel läßt man im Nullpunkt des Koordinatensystems das Referenzellipsoid das Geoid berühren. Das Zentrum des Ellipsoids fällt aber bei diesem Vorgehen, auch wenn man von den Beobachtungsfehlern absieht, im allgemeinen nicht mit dem Erdschwerpunkt zusammen. Dagegen sind bei verschwindenden Beobachtungsfehlern die kleinen Achsen aller Referenzellipsoide unter sich und mit der mittleren Rotationsachse der Erde parallel. Man ändert an dieser Sachlage wenig, wenn man etwa aus den sichtbaren Maßen eine Lotabweichung im Nullpunkt berechnet und berücksichtigt, so daß schon im Nullpunkt geographische (astronomisch bestimmte) und geodätische Koordinaten nicht zusammenfallen. Absolute Lotabweichungen (gegen ein Ellipsoid, das sich dem Geoid möglichst gut anschmiegt) sind kaum bestimmbar und ebensowenig die Dimensionen des bestmöglichen Ellipsoides aus Beobachtungen auf relativ kleinen Flächen der Erde.

Die Anwendung von Satelliten macht nun die grundlegenden Aufgaben der Geodäsie erstmals einer praktischen Lösung zugänglich. Man darf deshalb die Satellitengeodäsie nicht etwa nur als ein wohl interessantes, aber nicht sehr wesentliches Teilgebiet ansehen. Sie steht vielmehr im Mittelpunkt der heutigen höheren Geodäsie und wird in Zukunft eine immer größere Bedeutung erlangen.

Y. Väisälä hat schon 1946 vorgeschlagen, Hochziele, die von Flugzeugen, Ballonen oder Raketen in die Höhe getragen werden, für die Triangulation zu benutzen. Ja er erwähnt schon damals, daß künstliche Erdsatelliten für diese Zwecke eingesetzt werden könnten. Diese Hochziele sollten aus Blitzlichtern bestehen, die nachts gegen den Sternenhimmel als Hintergrund photographiert werden könnten. Man nennt deshalb heute diese Methode auch etwa Stellartriangulation.

Die Hochziele müssen von zwei gegenseitig festgelegten Punkten auf der Erde vorwärts eingeschnitten werden, wobei die Richtungen durch die mitphotographierten Sterne gegeben sind. Durch Rückwärtseinschnitt gegen mehrere solche Hochziele (zum Beispiel auch verschiedene Bahnpunkte ein und desselben Satelliten) kann die Lage dritter Punkte gefunden werden. Die Gleichzeitigkeit der Vorwärts- und Rückwärtseinschnitte wird durch die sehr kurzen Blitzlichter gewährleistet. Die gegenseitige Entfernung der Fixpunkte auf der Erdoberfläche kann etwa das Doppelte der Höhe der Hochziele über dem Erdboden betragen. Satelliten, die ja in beliebiger Höhe kreisen können, gestatten es, Triangulationen über Tausende von Kilometern hinweg anzustellen. Dabei spielt die bei der klassischen Triangulation so schädliche Seitenrefraktion eine viel geringere Rolle, da sie in Visuren hoch über dem Erdboden wesentlich kleiner ist.

Ist die Position eines Satelliten in seiner Bahn aus Bahnbestimmungen bekannt, so fällt das Vorwärtseinschneiden dahin. Man spricht in diesem Falle von der Bahnmethode (englisch: Orbital Method). G. Veis hat 1964 die Beobachtungen von 12 Stationen an 13 verschiedenen Satelliten analysiert, 46 535 an der Zahl. Die Bahnelemente müssen aus diesen Beobachtungen mitbestimmt werden. Man geht aus von genäherten Koordinaten der Stationen und genähert bekannten Bahnelementen der Satelliten. Für die 12 Stationen sind die Verbesserungen der drei räumlichen Koordinaten und für die 13 Satelliten die Verbesserungen der je 6 Bahnelemente zu berechnen, total 114 Unbekannte. Nun sind aber die Bahnelemente noch starken und zum Teil unvorhersehbaren Störungen durch den Luftwiderstand unterworfen, und die Koeffizienten der Reihenentwicklungen für das Gravitationspotential der Erde, die für die Störungsrechnung notwendig sind, sind ebenfalls als Unbekannte anzusehen, so daß das ganze Problem noch wesentlich komplizierter ist.

Veis hat die Aufgabe getrennt, indem er zuerst einmal mit Hilfe von Näherungskordinaten der Beobachtungsstationen möglichst gute Bahnelemente der Satelliten für kürzere Zeiten (im ganzen für 437 Bahnstücke) ableitete und dann die Restfehler der Beobachtungen benutzte, um die Koordinaten der Beobachtungsstationen zu verbessern. Die Verbesserungen in den einzelnen räumlichen Koordinaten betragen bis zu 100 m. Für das bestangepaßte Ellipsoid fand er die Dimensionen $a_e = 6\,378\,169$ m und $f^{-1} = 298,25$. Die letzte Zahl wurde dabei der dynamischen Methode entnommen, auf die nun noch eingegangen werden muß.

Die bisher erwähnten Methoden, die Stellartriangulation und die Bahnmethode, werden etwa auch die geometrischen genannt. Die Beobachtung der Bahnen der Satelliten erlaubt jedoch, noch nach einer dritten Methode, eben der dynamischen, die geodätischen Aufgaben zu lösen. Ein Satellit stellt ja auch eine Sonde im Gravitationsfeld der Erde dar, und aus seiner Bewegung läßt sich dieses bestimmen. Es ist üblich, das Gravitationsfeld der Erde nach Kugelfunktionen zu entwickeln und zu schreiben:

$$U = \frac{GM}{r} \left\{ 1 + \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^n \left(\frac{a}{r} \right)^n P_{nm}(\sin \beta) \left(C_{nm} \cos m \lambda + S_{nm} \sin m \lambda \right) \right\}$$

Dabei bedeuten:

a	Erdäquatorradius
GM	Produkt der Gravitationskonstanten mit der Erdmasse
r	Geozentrische Distanz
β	Geozentrische Breite
λ	Länge
$P_{nm}(\sin \beta)$	Legendresche Kugelfunktionen
C_{nm}, S_{nm}	harmonische Koeffizienten

Legt man den Ursprung des Koordinatensystems in den Schwerpunkt der Erde, dann fallen die Glieder mit $n = 1$ weg. $P_{n0} = P_n$ heißen auch zonale Kugelfunktionen, P_{nm} mit $m \neq 0$ tesserale Kugelfunktionen. Für C_{n0} wird etwa auch $-J_n$ geschrieben. U ist das Newtonsche Potential der reinen Gravitation des Erdkörpers, das die Bewegung der Satelliten

bestimmt. Das Geoid ist jedoch eine Niveauläche der Schwerkraftsfunktion, die bekanntlich noch die Zentrifugalkraft der rotierenden Erde enthält. Diese kann auch durch eine Kräftefunktion dargestellt werden, nämlich:

$$Z = \frac{\omega^2 r^2}{2} \cos^2 \beta$$

ω ist die Winkelgeschwindigkeit der Erde. Das Potential der Schwerkraft W ist also $W = U + Z$, und dieses gleich konstant gesetzt, gibt die Niveaulächen der Schwerkraft, wovon eine das Geoid ist.

Die harmonischen Koeffizienten C_{nm} und S_{nm} werden nun aus den Störungen der Bahn des Satelliten bestimmt. So ist beispielsweise in erster Näherung die mittlere Änderung der Knotenlänge eines Satelliten

$$\frac{d\Omega}{dt} = -\frac{3}{2} \frac{a^2}{a_e^2} J_2 \frac{\cos i}{(1-e^2)^2} n,$$

und es läßt sich daraus J_2 berechnen (a = Halbachse der Bahnellipse, i = Neigung der Bahn gegen den Äquator, e = Exzentrizität der Bahn, n = mittlere Bewegung des Satelliten). Die neuesten Werte stammen von Y. Kozai für die zonalen und I. G. Izsak für die tesseralen harmonischen Koeffizienten (in Einheiten von 10^{-6}):

$C_{20} = -1082,645$		
$C_{30} = 2,546$		
$C_{40} = 1,649$		
$C_{22} = 1,345$		$S_{22} = -0,808$
$C_{31} = 1,730$		$S_{31} = -0,042$
$C_{32} = 0,130$		$S_{32} = -0,245$
$C_{33} = -0,024$		$S_{33} = 0,196$

Auffallend ist, daß die Koeffizienten nur sehr langsam abnehmen. So ist beispielsweise immer noch $C_{140} = -0,179$, $C_{61} = -0,017$ und $S_{61} = 0,092$. Mit diesen Koeffizienten und den weiteren Konstanten $a_e = 6378165$ m, $GM = 3986032 \cdot 10^8 \text{ m}^3 \text{ sec}^{-2}$ und $\omega^2 = 5,31749 \cdot 10^{-9} \text{ rad}^2 \text{ sec}^{-2}$ kann das Geoid $W = \text{konst.}$ berechnet werden.

Der erste Koeffizient $C_{20} = -J_2$, dessen physikalische Bedeutung durch

$$J_2 = \frac{C - A}{Ma_e^2}$$

gegeben ist (A und C sind die Hauptträgheitsmomente der Erde), hängt mit der Abplattung auf folgende Weise zusammen. Es ist

$$f = \frac{3}{2} J_2 + \frac{1}{2} m + \frac{9}{8} J_2^2 + \frac{15}{8} J_2 m - \frac{39}{56} m^2 \text{ mit } m = \frac{a_e \omega^2}{g_e}$$

(g_e ist die Schwerebeschleunigung am Äquator). Die Abweichungen des Geoids vom Ellipsoid mit $a_e = 6378165$ m und $f^{-1} = 298,25$ sind am Nordpol $+13,13$ m, am Südpol $-24,95$ m. Der Radius nach dem Nordpol ist demnach etwas länger als der nach dem Südpol. Deshalb von einer

Birnenform der Erde zu sprechen ist aber übertrieben oder sogar falsch, denn es gibt außerdem ungefähr längs des Äquators Aufwölbungen des Geoids über das Ellipsoid von 60 m bei Australien und 40 m im Atlantik sowie Vertiefungen von 70 m in Indien und etwa 40 m an der Westküste Amerikas, so daß man eher von einem dreiachsigen Ellipsoid sprechen sollte. Weitere Undulationen des Geoids sind kleiner und nicht mehr irgendwie symmetrisch verteilt. Die schweizerische geodätische Kommission hat seit nunmehr 100 Jahren das Geoid in der Schweiz untersucht

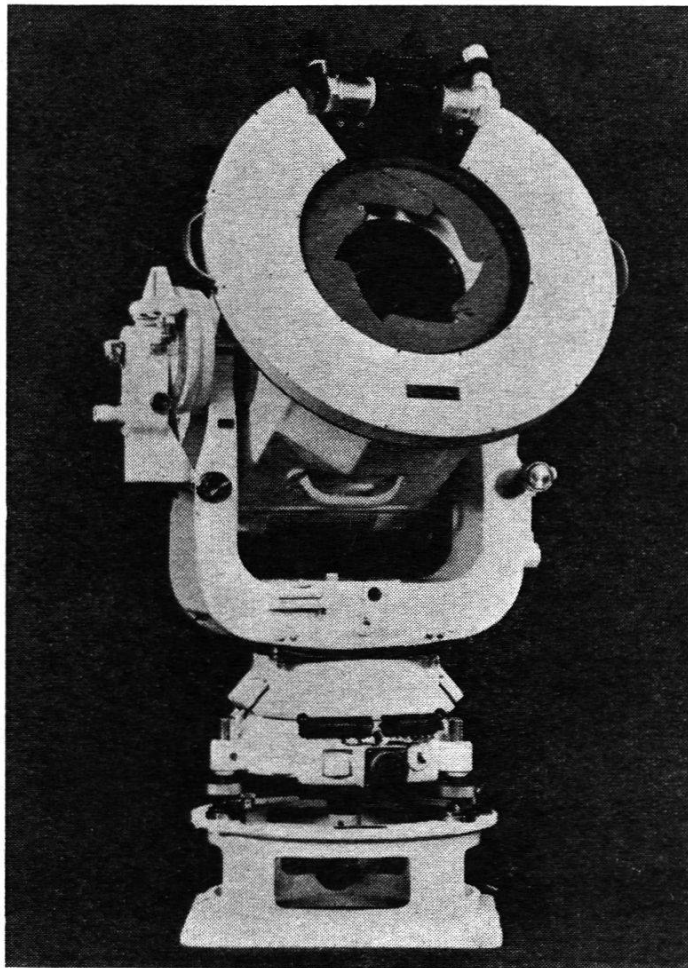


Fig. 1: Ballistische Kamera Wild BC-4

und dabei gefunden, daß dieses sich in den Alpen gegenüber dem lokalen Referenzellipsoid doch noch um einige Meter aufwölbt. Es darf deshalb nicht verwundern, daß die harmonischen Koeffizienten so langsam abnehmen. Nach außen zu werden die Niveaulflächen des reinen Gravitationspotentials immer sphärischer. Beträgt die Abplattung in der Nähe der Erdoberfläche noch $1/615$, so ist sie in einer Höhe von 100 000 km nur noch $1/171\,290$.

2. Die Beobachtungen und ihre Reduktion

Die Beobachtungen sind nicht auf die photographische Bestimmung von Richtungen mittels der Hintergrundsterne beschränkt. Mit Radiointerferometern lassen sich Richtungen, mit elektronischen Distanzmessern und Lasern lassen sich Entfernungen zu den Satelliten bestimmen. Aus

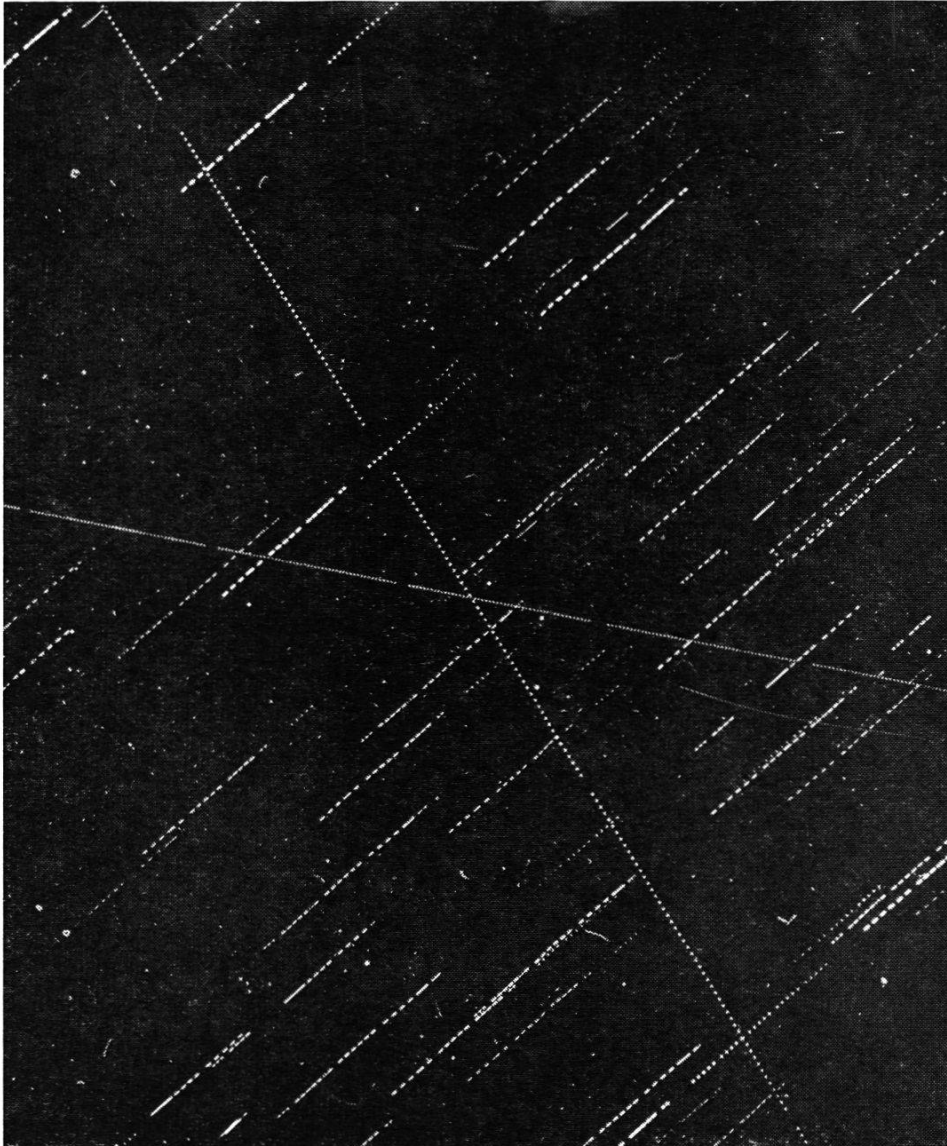


Fig. 2

Ausschnitt einer Aufnahme mit der BC-4. Die parallelen Spuren rühren von Sternen, die sich kreuzenden von den Satelliten «Echo I» und «Echo II» her

Dopplerverschiebungen der Frequenzen von in Satelliten eingebauten Sendern kann die Geschwindigkeitskomponente in der Blickrichtung und aus deren zeitlichem Verlauf die kürzeste Distanz und die totale relative Geschwindigkeit abgeleitet werden. Wir wollen uns jedoch auf die am häufigsten angewandte photographische Methode beschränken.

Es können prinzipiell drei verschiedene Aufnahmetechniken unterschieden werden, je nachdem ob die Kameras fest aufgestellt, den Sternen oder den Satelliten nachgeführt werden. Jede dieser Techniken hat ihre Vor- und Nachteile. Bei fest aufgestellten Kameras — am weitesten verbreitet ist die BC4 der Firma Wild in Heerbrugg (Fig. 1) — hinterlassen der Satellit und die Sterne Spuren, die mit Zeitmarken versehen werden müssen (Fig. 2). Bei den den Sternen nachgeführten Kameras handelt es sich um äquatorial aufgestellte Astrographen (Fig. 3). Die

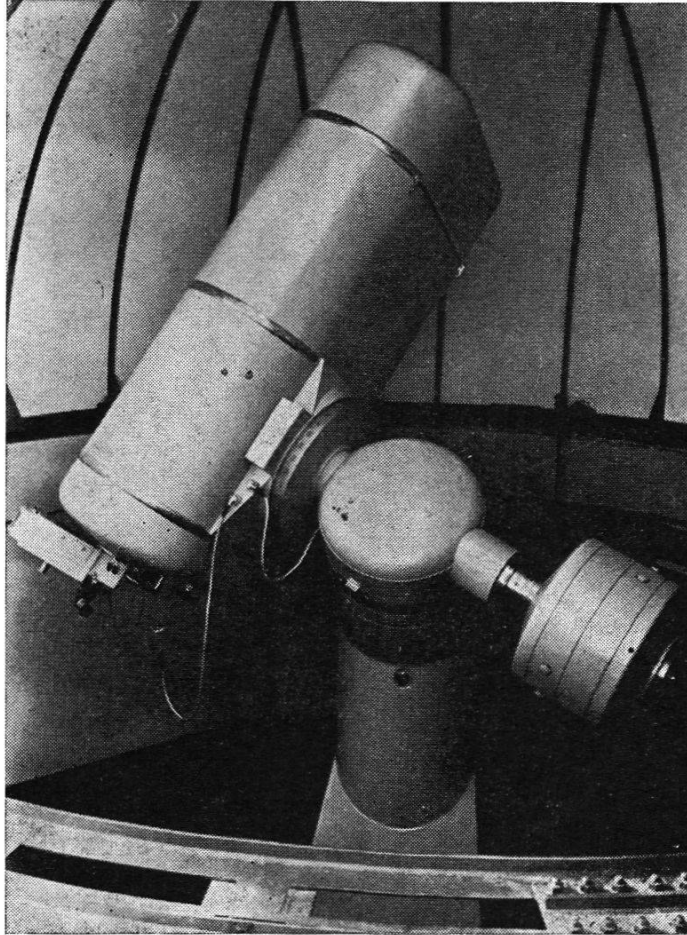


Fig. 3: Schmidt-Kamera von Zimmerwald

Sterne werden punktförmig abgebildet, und es können, unter sonst gleichen Umständen, schwächere Sterne photographiert werden (Fig. 4). Es muß aber eine sehr gute mechanische Nachführung des Instruments vorausgesetzt werden. Die Sternbilder sind Mittelbildungen über alle Nachführfehler und Refraktionsschwankungen, während das Satellitenbild von der momentanen Lage des Instruments und der momentanen Refraktion bestimmt wird. Photogrammeter halten aus diesen Gründen die Aufnahmen mit Astrographen nicht für die besten (siehe D.C. Brown [1962] und H. Deker [1964]). Bei einiger Sorgfalt und einer guten Montierung kann man aber nach unsern bisherigen Erfahrungen auch diese Methode für durchaus konkurrenzfähig halten.

Den Satelliten nachgeführte Kameras (englisch Tracking Cameras) integrieren das Licht des Satelliten über längere Zeiten und können daher viel schwächere Satelliten noch registrieren. Die Kameras müssen jedoch Bewegungsmöglichkeiten um drei Achsen und einen komplizierten Nachführmechanismus haben. Der bekannteste dieser Typen ist die Baker-Nunn-Kamera (Fig. 5 und 6).

Weiter unterscheiden sich die Beobachtungsmethoden noch nach zwei Typen von Satelliten: den passiven, die nur Sonnenlicht reflektieren und

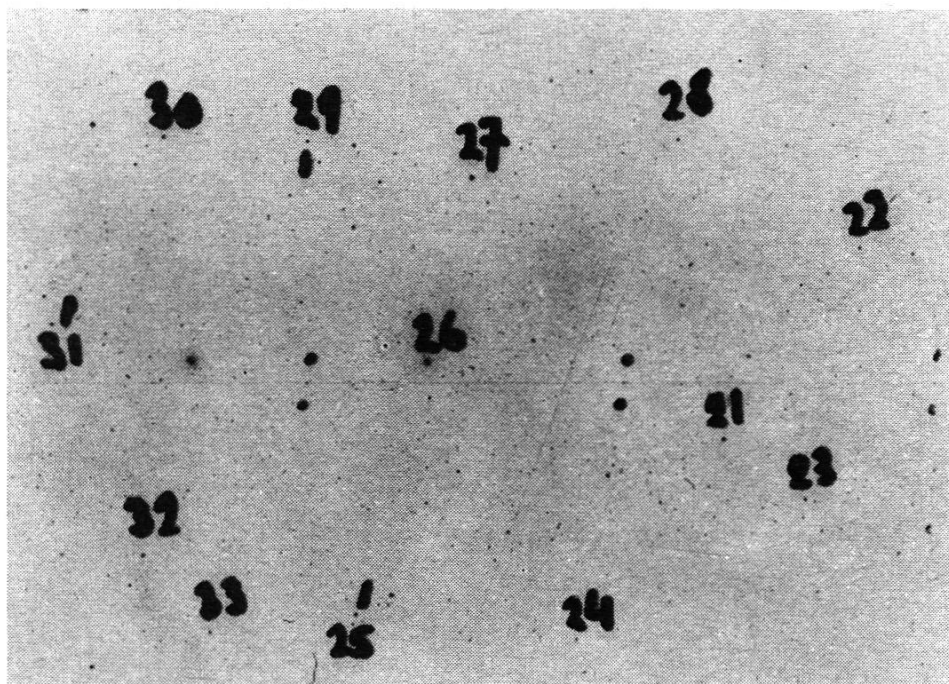


Fig. 4

Ausschnitt aus einer Aufnahme des Satelliten «Geos A» mit der Schmidt-Kamera in Zimmerwald. Der feine horizontale Strich ist die Spur des Satelliten, der sich noch im Sonnenlicht befindet. Zwischen den dicken Markierungspunkten findet man drei Knoten in der Spur, die von den Blitzlichtern herrühren. Mit 21, 22, 23 ... sind die Anhaltsterne angeschrieben, die sich meist unterhalb der ersten Ziffer befinden

deshalb im Erdschatten unbrauchbar sind, und den aktiven, die Blitzlichtsignale aussenden. Bei den aktiven Satelliten ist die simultane Beobachtung automatisch gewährleistet. Passive Satellitenspuren müssen mit Zeitmarken versehen werden, was in der Regel durch rotierende Blenden geschieht. Dadurch werden Unterbrüche in der Satellitenspur erzeugt, die ausgemessen werden. Der simultane Ort eines Satelliten für verschiedene Beobachtungsstationen kann dann durch zeitliche Interpolation gefunden werden. Es setzt dies jedoch auf 1 msec synchron laufende Zeitanlagen auf den verschiedenen Beobachtungsstationen voraus.

Die Genauigkeit der Positionsbestimmung wird beschränkt einmal durch die Genauigkeit der Sternpositionen, an die die Satellitenbeobachtungen angeschlossen werden müssen, zum andern durch die Luftunruhe,

die momentane Schwankungen der Sternörter und Satellitenörter von der Größenordnung $1''$ und mehr verursacht, und zum dritten von der Meßgenauigkeit auf den Photoplatten.

Das Smithsonian Astrophysical Observatory hat einen Sternkatalog mit 258 997 Sternen herausgegeben, der eine Kompilation aus verschiedenen modernen Sternkatalogen darstellt und heute für die Satellitengeodäsie verwendet wird. Die darin aufgeführten Sternpositionen hatten zur Zeit ihrer Messungen mittlere Fehler von etwa $0,2''$. Infolge der un-

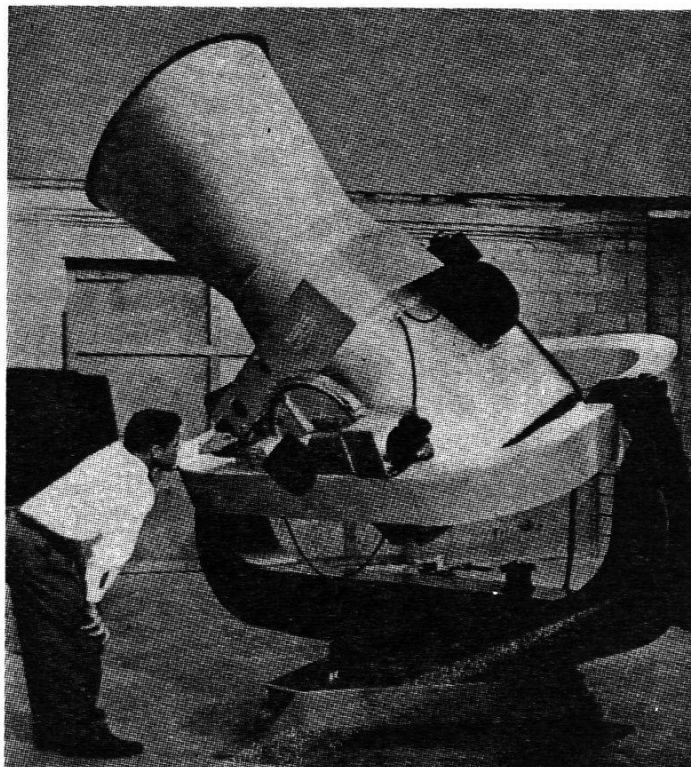


Fig. 5: Baker-Nunn-Kamera

genügend bekannten Eigenbewegungen verschlechtert sich die Präzision der Örter im Laufe der Zeit und beträgt heute etwa $\pm 0,5''$. Wenn wir diese Genauigkeit ausnützen wollen, sind gewisse Erfordernisse an die Aufnahmeoptik und die Zeitmessung zu stellen. Geodätische Satelliten haben meist Entfernungen vom Beobachter von 2000 bis 3000 km. Sie kreisen mit rund 8 km/sec um die Erde. Der scheinbaren Bewegung von $1''$ entspricht eine wirkliche Bewegung von rund 10 m. Diese Strecke wird in 1 msec zurückgelegt; die Zeit muß also auf 1 msec genau festgelegt werden können. Die Meßapparate gestatten die Bestimmung der rechtwinkligen Plattenkoordinaten auf einige Mikron genau. Bei einer Brennweite von 20 cm entspricht $1\mu \sim 1''$. Die Brennweiten der Aufnahmekameras sollten demnach nicht kleiner als etwa 50 cm sein.

Die Positionsbestimmungen sind noch gewissen Reduktionen zu unterwerfen. Einflüsse von $0,1''$ sollten berücksichtigt werden, wenn man die Beobachtungen nicht durch sie verschlechtern lassen will. Zu diesen Ein-

flüssen gehören ein parallaktischer Effekt der Refraktion, die Aberration, die Parallaxe und gegebenenfalls noch eine Phasenkorrektur.

Bei den Beobachtungen von der Erde aus sind Satellit und Vergleichsterne in gleicher Weise der Refraktion unterworfen, und man könnte fälschlicherweise annehmen, daß bei Anschluß des Satelliten an die Katalogpositionen der Sterne die Refraktion automatisch eliminiert sei. Aus der Figur 7 ist jedoch zu entnehmen, daß bei gleicher scheinbarer Zenitdistanz z' die wahren Zenitdistanzen des Satelliten z_s und des Sterns z_*

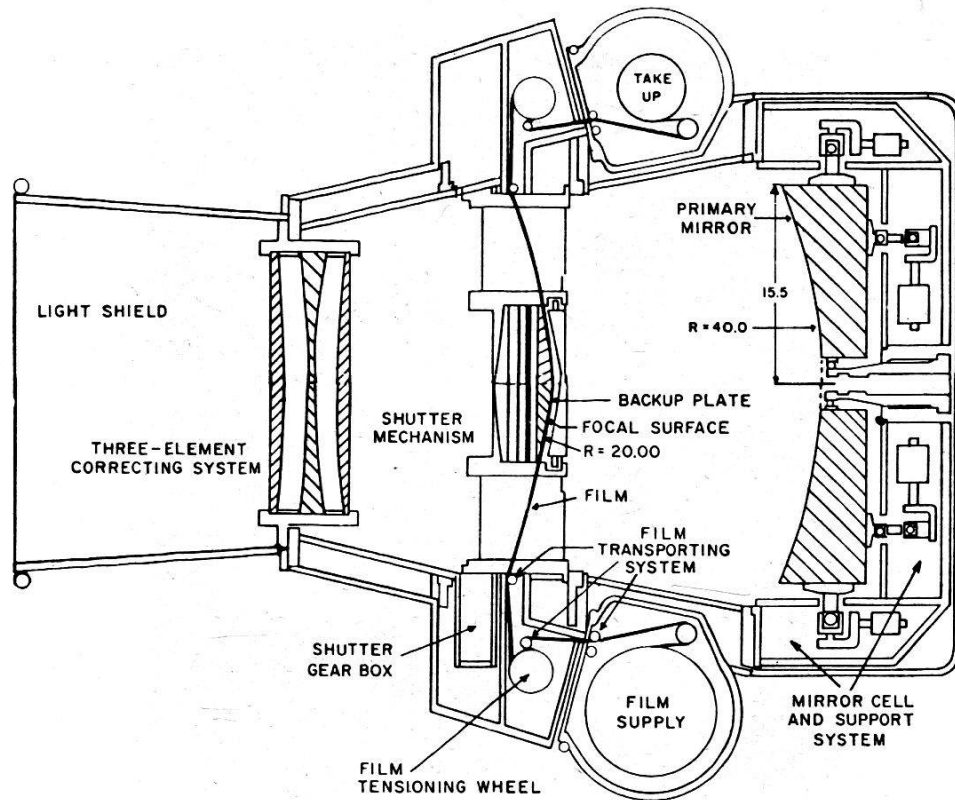


Fig. 6: Baker-Nunn-Kamera

verschieden sind. Die Differenz $z_* - z_s$ beträgt allerdings bei Satellitenentfernungen von 1000 km und mehr erst bei Zenitdistanzen von über 60° mehr als $1''$.

Wegen der endlichen Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichts und der Bewegung des Satelliten sehen wir ihn nicht dort, wo er sich zur Beobachtungszeit befindet. Man kann diese Aberration auf zwei Arten berücksichtigen: man extrapoliert entweder den Ort des Satelliten aus seiner Bewegung auf den Beobachtungszeitpunkt, oder man zieht von der Beobachtungszeit die Aberrationszeit r/c ab, die von der Größenordnung einer Hundertstelsekunde ist.

Bei Astrographen mit der sogenannten deutschen Montierung geht die optische Achse nicht durch den Achsenschnittpunkt des Instruments. Dieser wird aber in der Regel als Instrumentenposition angenommen. Die Blickrichtung kann bei größeren Instrumenten bis zu 1 m daran vorbeiziele, so daß diese Parallaxe ebenfalls berücksichtigt werden muß.

3. Die westeuropäische Subkommission der internationalen Kommission für künstliche Satelliten und die schweizerische Station in Zimmerwald

Im Rahmen der internationalen Assoziation für Geodäsie haben westeuropäische Länder eine Subkommission der internationalen Kommission für künstliche Satelliten gegründet, zum Zwecke der Organisation der Beobachtung geodätischer Satelliten. Das Ziel ist die Verbesserung des europäischen Triangulationsnetzes und dessen Anschluß an ein Weltnetz. Vorerst haben sich 15 Stationen für die Beobachtungen bereit erklärt, nämlich: München, Bochum, Berlin, Braunschweig, Frankfurt und Bamberg in Westdeutschland, Tuorla in Finnland, Uppsala in Schweden, Delft in Holland, Malvern und Edinburgh in Großbritannien, Meudon und St-Michel in Frankreich, Athen in Griechenland und Zimmerwald in der Schweiz. Inzwischen sind Bamberg, Tuorla, Uppsala und St-Michel ausgefallen, neu hinzugekommen jedoch sind Bordeaux, Nizza, Straßburg, Cádiz, Brüssel, Kopenhagen, Stockholm, Karlsruhe und Graz. Die Schweizerische Geodätische Kommission hat den Verfasser beauftragt, in Zimmerwald (in der Zweigsternwarte des Astronomischen Instituts der Universität Bern) Satellitenbeobachtungen anzustellen.

Eine erste Versuchsperiode lief Ende 1965 an. Die NASA hatte am 10. November 1965 den aktiven geodätischen Satelliten «Geos A» gestartet. Diesen Satelliten hat man mit 4 Xenon-Elektronenblitzlichtlampen ausgerüstet, deren Lichtausbeute pro Blitz etwa 1600 Kerzensekunden beträgt. Durch geeignete Reflektoren wird nach gewissen Richtungen von allen vier Lampen eine Lichtmenge von über 40000 Kerzensekunden ausgestrahlt innerhalb etwa 1 msec. In einer Distanz von 1000 km ergibt dies bei Berücksichtigung der Extinktion in der Erdatmosphäre immer noch eine Lichtmenge pro Quadratmeter von $5 \cdot 10^{-9}$ luxsec. Wird durch ein Objektiv von 40 cm Durchmesser ein Bild von etwa 40μ Durchmesser erzeugt, so fällt auf die betreffende Stelle der photographischen Emulsion eine Belichtung von 0,5 luxsec, was noch einer sehr guten Schwärzung entspricht.

Die Energie für diese Blitze wird über NiCd-Batterien von Sonnenzellen geliefert. Eine Quarzuhr im Satelliten, die mit dem amerikanischen Zeitzeichensender WWV synchron gehalten wird, löst nach ferngesteuerten Befehlen eine Reihe von 7 Blitzen in Intervallen von je 4 sec aus, wobei der erste Blitz auf eine volle Minute fällt. Zur Schonung der Lampen werden nicht immer alle vier Elektronenblitze ausgelöst. Die Synchronisation mit WWV ist auf $\pm 0,4$ msec, die Intervalle von 4 sec sind auf $\pm 40 \mu$ sec genau.

Die Lampen sollten natürlich immer gegen die Erde zu gerichtet sein. Man hat dies dadurch erreicht, daß man den Satelliten zu einem Körper mit sehr ungleichen Trägheitsmomenten ausbaute. Ein solcher befindet sich in der Gleichgewichtslage, wenn die Achse mit dem kleinsten Trägheitsmoment vertikal steht. Ein 30 m langer Stab mit einem Gewicht von 5 kg am Ende dient als Stabilisator. Auftretende Schwingungen werden durch eine Wirbelstrombremse gedämpft.

Schließlich sind die passiven Satelliten, wie «Echo» I und II und «Pargoos», Kugeln von 30 m Durchmesser mit einer reflektierenden Aluminiumhülle. Der Reflex der Sonne fällt dabei nicht in die Richtung nach dem Mittelpunkt des Ballons, und es wird eine weitere Korrektur erforderlich, die man den Phasenwinkel nennt, der bei 2000 km Distanz bis zu $1,5''$ betragen kann.

Als Resultat haben wir schließlich die wahre Richtung nach dem Satelliten, gemessen in einem astronomischen Koordinatensystem mit Rektaszension und Deklination für das momentane Äquinoktium oder ein mittleres Äquinoktium, beispielsweise das von 1950.0. Diese Richtungen

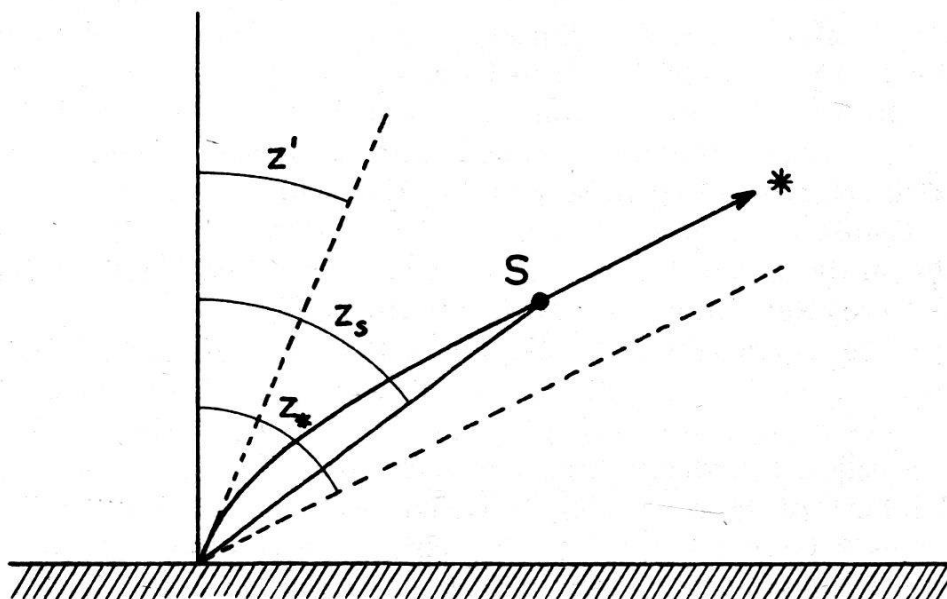


Fig. 7

müssen nun noch auf ein erdfestes System umgerechnet werden. Dieses ist definiert durch den mittleren Pol von 1900 bis 1905 und den mittleren Meridian von Greenwich. Abgesehen von der Rotation der Erde, fallen auch die z -Achsen des momentanen Äquinoktialsystems und des erdfesten Systems wegen der Polhöenschwankungen nicht zusammen. Noch etwas komplexer sind die Verhältnisse bei der dynamischen Methode. Die Beschreibung der Bewegung verlangt eigentlich ein Inertialsystem, also ein astronomisches System mit festem Äquinoktium. Da aber die Erde in diesem Inertialsystem wegen der Rotation und der Präzession nicht fest bleibt, ist auch ihr Gravitationsfeld in diesem System nicht konstant, und die Änderungen beeinflussen natürlich auch die Bahnbewegung des Satelliten. Andererseits hätte ein mit der Erde fest verbundenes Koordinatensystem wohl den Vorteil eines darin ruhenden Gravitationsfeldes, wäre jedoch kein Inertialsystem. Es muß deshalb eine Entscheidung getroffen werden. Man entschließt sich meist für das erste System oder macht einen Kompromiß und wählt das astronomische System mit dem beweglichen momentanen Äquinoktium. Die Umrechnung vom einen ins andere erfordert jeweils eine orthogonale Transformation.

Die einzelnen Beobachtungsstationen werden zum voraus mit genauen Ephemeriden versehen. Während eines Durchgangs des Satelliten sind bis zu drei Aufnahmen mit je sieben Blitzen in Intervallen von 5 bis 6 Minuten anzustellen. Pro Nacht sind so bei drei Durchgängen schon bis zu acht Aufnahmen gemacht worden. In vielen Fällen verhindert natürlich schlechtes Wetter die Beobachtungen. In Zimmerwald konnten bis Ende August 1966 total 129 erfolgreiche Aufnahmen mit 862 Blitzen gewonnen werden.

Zimmerwald ist ein kleines Dorf auf dem Längenberg, 8 km südlich vom Zentrum Berns. Die Sternwarte (Fig. 8) steht seit 10 Jahren und hat die geographischen Koordinaten $\varphi = 46^{\circ} 52' 42''$, $\lambda = -29^{\text{m}} 51^{\text{s}}.8$. Sie liegt ziemlich genau in 900 m Höhe, oft über der winterlichen Nebeldecke.

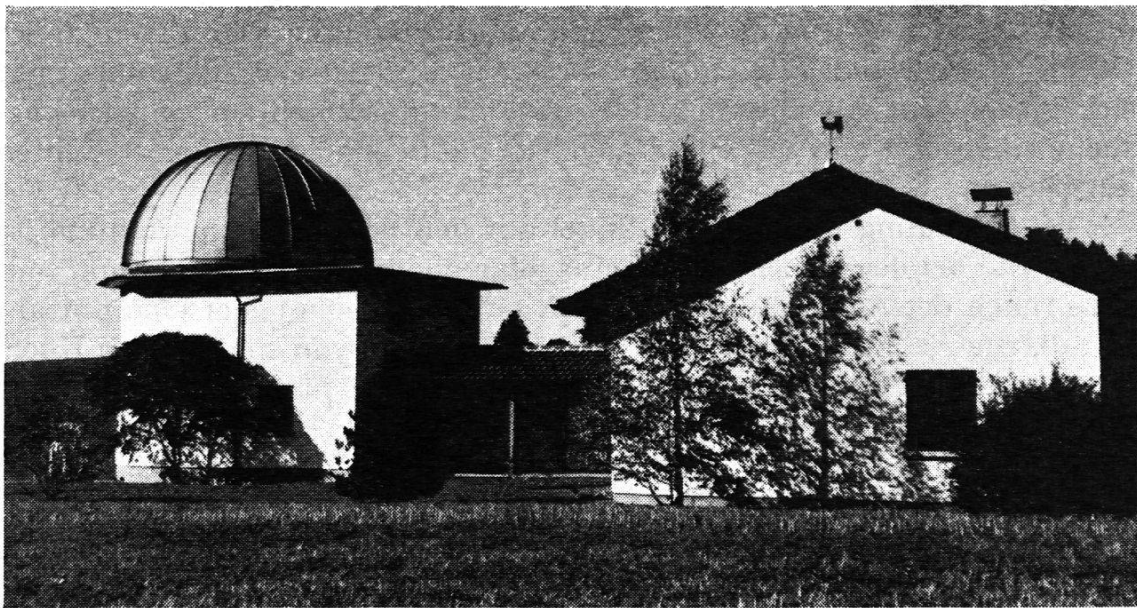


Fig. 8

Im Herbst 1959 konnte das Instrument in Betrieb genommen werden, eine auf einer deutschen Kniemontierung aufgebaute Schmidt-Kamera und parallel dazu ein Cassegrain-Spiegelteleskop, das einerseits als Leitrohr bei den photographischen Aufnahmen, andererseits zu photoelektrischen Beobachtungen dient. Das Instrument steht auf einem Pfeiler, der aus Zementsteinen kreisförmig gemauert und innen zur Erreichung einer möglichst großen Schwingungsdämpfung mit Sand gefüllt wurde. Er ruht auf einer Gletschermoräne. Da keine größere Straße nahe vorbeiführt, sind Erschütterungen nicht zu erwarten. Die Montierung wurde in Bern gebaut. Fuß und Säule bestehen aus einer geglihten Schweißkonstruktion. Das obere Ende der Stundenachse ist in Form einer Kugelzone geschliffen worden, deren Mittelpunkt mit dem Schwerpunkt der beweglichen Teile des Instruments zusammenfällt. Die Kugelzone ruht auf zwei Tellern, in welche Öl mit einem Druck von etwa 30 Atmosphären gepreßt wird. Der Antrieb der Stundenachse erfolgt mittels eines Synchron-

motors, der wahlweise von einem Stimmgabeloszillator oder vom Netz gespeist werden kann.

Eine Schmidt-Kamera besteht aus einem Kugelspiegel, dessen sphärische Aberration durch eine Korrektionslinse im Krümmungsmittelpunkt behoben wird. Die Optik zu unserer Kamera wurde im Institut selbst geschliffen. Die Korrektionslinse besitzt eine freie Öffnung von 39 cm. Der Kugelspiegel hat einen Durchmesser von 62 cm, und die Brennweite der Kamera beträgt 103 cm, was einem Abbildungsmaßstab von 200"/mm entspricht. Schmidt-Kameras haben die gute Eigenschaft, ein großes Feld ohne merkliche Fehler scharf abzubilden, und die Eigenheit, daß die Fokalfläche eine zum Spiegel konzentrische Kugelfläche ist. Diese Besonderheit macht es notwendig, Planfilme (bei größeren Instrumenten auch dünne Photoplatten) zu benutzen und während der Aufnahme durchzubiegen. Wir verwenden kreisrunde Planfilme von 12 cm freier Öffnung, also einem Bildfelddurchmesser von 6° 40'. Das Instrument hat sich bisher sehr gut bewährt. Es wurde hauptsächlich zur Supernovae-suche eingesetzt und sollte sich auch für die Beobachtung von Satelliten gut eignen.

Die Abbildung der Himmelskugel auf den gekrümmten Planfilm ist nicht, wie bei den üblichen Kameras, eine gnomonische Projektion, sondern (nach der Ausbreitung des Films auf eine Ebene) eher eine mittabstandtreue Azimutalprojektion. Die Umrechnung von sphärischen Koordinaten auf rechtwinklige Planfilmkoordinaten ist in diesem Falle recht einfach (Fig. 9).

$$\begin{aligned} \text{Es ist } \sin x &= \sin s \sin p = \cos \delta \sin (\alpha - \alpha_0) \\ \sin y &= \sin s \cos p = \cos \delta_0 \sin \delta - \sin \delta_0 \cos \delta \cos (\alpha - \alpha_0) \\ \text{oder } \sin x &= \cos \delta \sin \Delta \alpha \\ \sin y &= \sin \Delta \delta + \frac{\text{tg } \delta_0}{2} \sin^2 x \end{aligned}$$

Gemessen werden die rechtwinkligen Koordinaten ξ und η mittels eines Wildschen Stereokomparators StK-1114, den uns die Sektion für Schießversuche der KTA in Thun freundlicherweise zur Verfügung stellt und der eine Meßgenauigkeit von etwa $\pm 2 \mu$ in beiden Koordinaten zu erreichen gestattet. Die gemessenen Koordinaten unterscheiden sich nun von den x und y durch Nullpunkt, Orientierungsfehler, Verzerrungen und Refraktion. Man kann den linearen Anteil dieser Einflüsse mit dem Ansatz eliminieren:

$$\begin{aligned} x &= a\xi + b\eta + c \\ y &= d\xi + e\eta + f \end{aligned}$$

Unsere Formeln gelten eigentlich nur, wenn man den Punkt mit den Koordinaten α_0, δ_0 in die Mitte des kreisförmigen Films legt. Sie bleiben aber auch brauchbar, wenn man kleinere Felder irgendwo im Bildbereich ausmißt. Es wurden deshalb jedesmal in der Nähe des auszumessenden Sa-

tellitenpunktes 6 bis 8 Anhaltsterne mitgemessen, der Rechnungsnullpunkt α_0 und δ_0 in der Nähe des Satelliten angenommen und damit die Koeffizienten a bis f der Transformation nach der Methode der kleinsten Quadrate ermittelt.

Dieses Verfahren ist allerdings, streng genommen, nicht ganz korrekt. Es wird nämlich vorausgesetzt, daß die Koeffizienten der Unbekannten – in unserem Falle die ξ und η – exakt bekannt sind. Die ξ und η haben wir aber aus Beobachtungen gewonnen, und sie sind somit auch Fehlern unterworfen. Wir haben vorläufig auf die komplizierteren Methoden, die diesem Umstand Rechnung tragen, verzichtet, in der Annahme, daß unsere Resultate dadurch nicht wesentlich beeinflußt werden.

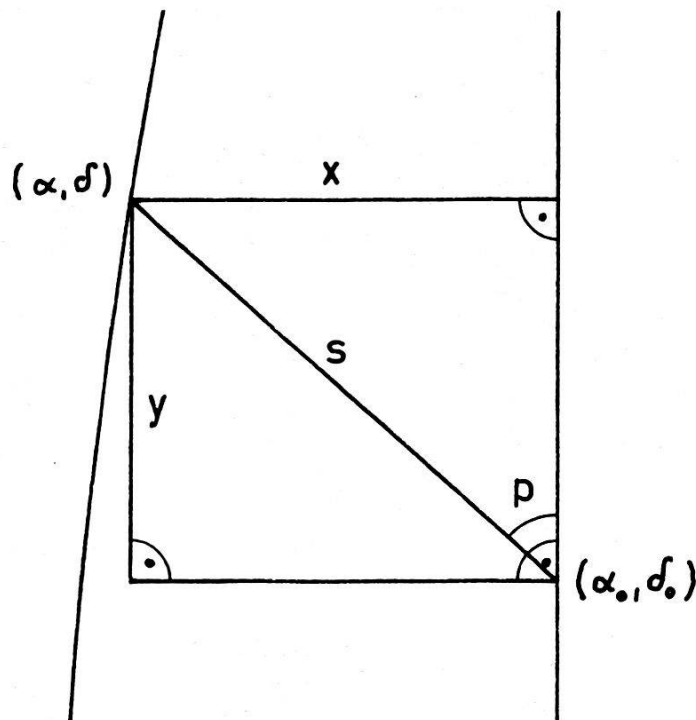


Fig. 9

Unsere Transformation ist eine affine, die die linearen Glieder des Maßstabfehlers, der differentiellen Refraktion, der ungenauen Orientierung und sonstiger Verzerrungen eliminiert. Aus den gemessenen Koordinaten ξ und η für den Satelliten erhält man danach seine Koordinaten x und y und daraus seine sphärischen Koordinaten α und δ .

Dieses Aufnahme- und Reduktionsverfahren mag vielleicht auf Kritik stoßen, vor allem, wie schon erwähnt, bei den Photogrammetern, die fest aufgestellte Kameras mit ebenen Glasplatten genügender Dicke bevorzugen. Unser Verfahren muß sich erst bewähren. Der Planfilm vor allem scheint sich auf den ersten Blick für genauere Messungen nicht zu eignen. Es ist nun aber zu bemerken, daß wir jeweils nur ein kleines Gebiet mit Durchmessern kleiner als 2° (entsprechend 3 cm) betrachten und durch unsere affine Transformation lineare Schrumpfungen eliminieren. Die Beobachtung des «Geos»-Satelliten zeigt denn auch, daß unser Verfahren

sehr wohl brauchbar ist. Die sphärischen Koordinaten der 7 Blitze einer Aufnahme, die in sehr konstanten zeitlichen Intervallen aufeinanderfolgen, wurden mit je einem Polynom dritten Grades ausgeglichen und die Reste als Beobachtungsfehler angesehen. Man tut diesen deshalb einigen Zwang an und unterschätzt damit eher die Genauigkeit. Die Fehler liegen bei guten Aufnahmen in beiden Koordinaten unter 1", bei schlechten können sie bis 2" erreichen. Im allgemeinen sind die mittleren Fehler in α auch etwas größer als in δ , was auf kleine Nachführfehler hinweist. Die Unterschiede in den beiden Koordinaten sind jedoch nicht sehr groß. Auch steht zu hoffen, daß durch eine noch etwas verfeinerte Beobachtungstechnik die Fehler weiter heruntergedrückt werden können.

Die Beobachtung von passiven Satelliten mit Hilfe der Schmidt-Kamera ist nun wesentlich schwieriger, da ja die Spuren mit Zeitmarken zu versehen sind. Rotierende Verschlüsse sind bei den großen Optiken

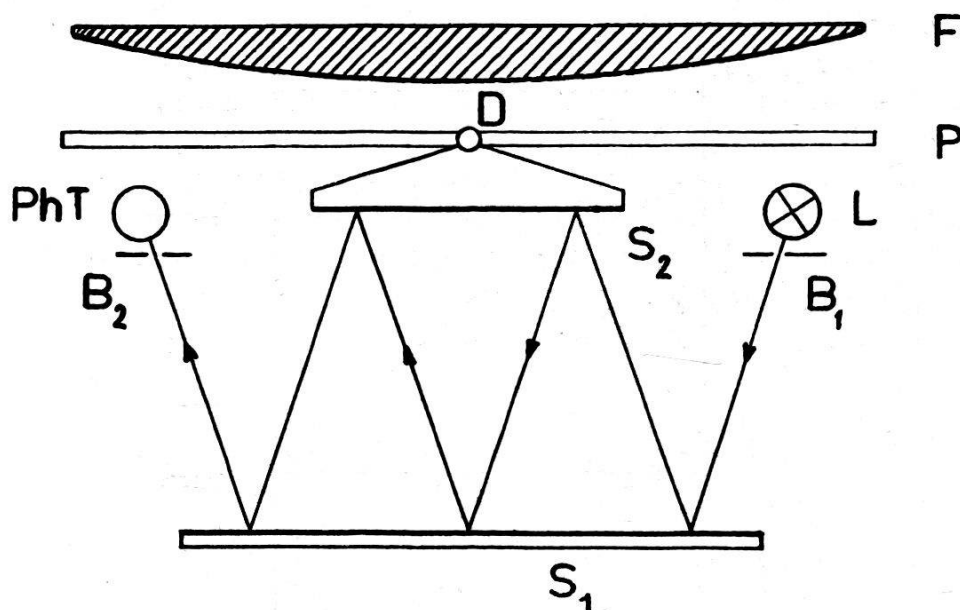


Fig. 10

nicht mehr einfach zu realisieren und wahrscheinlich auch zu wenig genau. Wir haben uns deshalb zu einem anderen Verfahren entschlossen. Vor der Kassette (Fig. 10) liegt eine um einen Durchmesser D schwenkbare Platte P (wir verwenden ein Gelbfilter, das gleichzeitig die etwas hellen Satelliten «Echo» I und II und «Pageos» abschwächt). Die Platte wird abwechslungsweise in zwei um wenige Grade verschiedene geneigte Lagen zum Aufnahmefilm F gebracht, wodurch die Spuren versetzt werden. Die Kippung der Filterplatte muß um eine Achse parallel zur scheinbaren Satellitenspur erfolgen. Von den Sternen entstehen dabei Doppelbilder. Der Moment des Umkippen der Platte wird elektronisch gemessen. Eine Lichtquelle L beleuchtet eine Spaltblende B_1 . Sie wird nach Reflektionen an den Spiegeln S_1 und S_2 auf die Blende B_2 abgebildet, und das Licht fällt dahinter auf einen Phototransistor PhT . Beim Umkippen der Platte P und des damit fest verbundenen Spiegels S_2 streicht das Licht an der

Blende B_2 vorbei und belichtet in einer Mittellage den Phototransistor. Der erzeugte elektrische Impuls dient zum Stoppen eines Zählers, der von einer vollen Sekunde an die Zehntausendstelsekunden zählt. Als Zeitbasis für unsern Zähler, der einen Impulsuntersetzer darstellt, verwenden wir einen Quarzoszillator von 100 kHz, dessen Frequenz an die stabile Sendefrequenz von 75 kHz des Zeitzeichensenders von Prangins gekoppelt ist. Ein Sekundensignal desselben Senders gibt den Startimpuls für die Zählung der 100 kHz in unserem Impulsuntersetzer mit 6 Dekaden, die durch Zählröhren angezeigt werden. Die Mittellage unserer Kipp-Platte und damit die Versetzung der Spur des Satelliten auf der Aufnahme sollte so auf etwa 0,1 msec genau festgelegt werden können.

Der Beobachtungsaufwand und die rechnerischen Arbeiten sind in der Satellitengeodäsie recht erheblich, und nur größte Sorgfalt kann zu brauchbaren Resultaten führen. Diese liegen für die Station Zimmerwald naturgemäß noch nicht vor. Es ist aber zu hoffen, daß dies in einigen Jahren der Fall sein wird und daß dann die Resultate auch ein größeres Interesse finden werden.

Ich möchte am Schluß noch den Dank aussprechen an den Schweizerischen Nationalfonds, der unsere Arbeiten finanziell unterstützt, an die Sektion für Schießversuche in Thun, die uns den Wildschen Stereokomparator zur Verfügung stellt, und an die Mitarbeiter, die in vielen Stunden am Fernrohr, am Komparator, an den Katalogen und Atlanten und an der Rechenmaschine die eigentliche Arbeit leisteten und noch leisten.

Literatur

a) Im Text erwähnt:

Brown, D.C. (1962): Notes on the reduction of stellar plates for determination of directions of flashing-light beacons. In: The Use of Artificial Satellites for Geodesy, Washington.

Deker, H. (1964): Photogrammetrische Gesichtspunkte bei der Satellitengeodäsie. In: Bildmessung und Luftbildwesen.

Izsak, I.G. (1965): A new determination of the non-zonal harmonics by satellites. Presented posthumously at the IAG-COSPAR 2nd International Symposium on the Use of Artificial Satellites for Geodesy, Athens.

Kozai, Y. (1964): New determination of zonal harmonics coefficients of the earth's gravitational potential. Smithsonian Astrophys. Obs. Spec. Rep. 165.

SAO (1966): Smithsonian Astrophysical Observatory Star Catalog.

Väisälä, Y. (1946): An astronomical method of triangulation. Sitz.-Ber. der Finnischen Akademie der Wissenschaften, Helsinki 1947.

Veis, G. (1964): The deflection of the vertical of major geodetic datums and the semimajor axis of the earth's ellipsoid as obtained from satellite observations. Space Research V.

b) Im weiteren benützt:

Köhnlein, W. (1966): Geometric structure of the earth's gravitational field as derived from artificial satellites. Smithsonian Astrophys. Obs. Spec. Rep. 198.

Mueller, I.I. (1964): Introduction to satellite geodesy. New York.

Veis, G. (1960): Geodetic Uses of Artificial Satellites. Smithsonian Contributions to Astrophysics. Vol. 3, Nr. 9.

Veis, G. (1963): Optical Tracking of Artificial Satellites. Space Science Reviews, Vol. II.