Einiges über den Zweck und über die Methoden astronomisch-geodätischer Postitionsbestimmungen

Autor(en): **Müller, Helmut**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Orion : Zeitschrift der Schweizerischen Astronomischen Gesellschaft**

Band (Jahr): **29 (1971)**

Heft 125

PDF erstellt am: **29.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-899924

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

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

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

ORION

Zeitschrift der Schweizerischen Astronomischen Gesellschaft
Bulletin de la Société Astronomique de Suisse

29. Jahrgang, Seiten 97–132, Nr. 125, August 1971 | 29e année, pages 97–132, No. 125, août 1971

Einiges über den Zweck und über die Methoden astronomisch-geodätischer Positionsbestimmungen

von Helmut Müller, Zürich

Résumé

Dans les temps anciens, on utilisait les constellations à la fois pour la mesure du temps et pour l'orientation. On montre ici qu'aujourd'hui encore, les étoiles servent à ces deux fins.

On traite principalement de l'important problème de la déviation du fil à plomb, et on explique aussi ce qu'on entend en géodésie par le point de Laplace, et quelle conséquence il en découle.

Les instruments principaux et leurs appareils accessoires, tels que chronographes, compteurs-enregistreurs, micromètre impersonnels, etc. que l'on utilise pour ces mesures géodésiques, sont aussi décrits.

Certaines méthodes spéciales pour les mesures de longitude, de latitude et d'azimut, sont particulièrement détaillées, ainsi que leur principe et leur application pratique.

Der praktische Nutzen der Gestirne in alten Zeiten

Es steht wohl ausser Zweifel, dass der gestirnte Himmel mit allem, was dazu gehört, mit der Unzahl leuchtender Lichtpunkte der verschiedensten Helligkeit, mit dem matten Schimmer der Milchstrasse, mit dem Silberglanz des Mondes in seinen wechselnden Phasengestalten, mit der völlig lautlosen und so regelmässigen Bewegung einen gewaltigen Eindruck auf den Menschen macht und stets gemacht hat. Das gilt für alle Zeiten, ganz besonders für die uralten Epochen, wo der Mensch noch innig mit der Natur verbunden war, wo sich keiner diesem Eindruck entziehen konnte, es gilt aber auch heute noch für die Menschen, welche die Beziehungen zur Natur noch nicht völlig verloren haben, welche noch gedankenvoll zu einem Himmel emporschauen, der nicht durch irdische Leuchtquellen erhellt, nicht durch von Menschen geschaffene Bauten eingeengt und entstellt ist, hier spürt man noch einen Hauch von wahrer Grösse, von Überirdischem, von Unendlichkeit.

Doch auch schon in sehr alter Zeit liess man sich nicht von der Erhabenheit erdrücken, man schaute recht genau, man beobachtete und man entdeckte dabei so manches. So fiel schon frühzeitig auf, dass der Sternenhimmel sich offenbar mit sehr grosser Regelmässigkeit dreht, dass die Sterne nach einer gewissen Zeit immer wieder in der gleichen Richtung und Höhe stehen, ferner dass die Höhe der Sterne über dem Horizont an verschiedenen Erdorten häufig etwas anders war, während ihre gegenseitige Lage zueinander sich gar nicht änderte, so dass man sie in feste Konfigurationen, in Sternbilder einordnen konnte; auch die Verschiebung von Sonne und Mond gegen diese Sternbilder, gegen die Fixsterne hatte man bemerkt und später auch die der 5 Wandelsterne, der Planeten.

Aus allem zog man zwei wichtige Nutzanwendungen. Man kam zunächst mit Hilfe der Gestirne zu einer Einteilung der Zeit. Bei der Bestimmung der Jahreslänge und der Festlegung der Jahreszeiten denke man z. B. an die sehr alten ägyptischen Beobachtungen des jeweils ersten Erscheinens von Sirius, der bei ihnen Sothis hiess, am Morgenhimmel, nachdem er einige Wochen unsichtbar gewesen war, wodurch dieser glanzvolle Stern offensichtlich die für die Ägypter so wichtigen Nilüberschwemmungen ankündigte oder gar veranlasste. Das Jahr unterteilte man wiederum mit Hilfe des Mondlaufes in Monate, die Ägypter auch noch feiner in 10-Tage-Wochen, Dekane, durch Beobachtung der Frühaufgänge bestimmter Sterne. Für die Teilung des Tages verwandte man Sonnenuhren, zunächst recht primitiver Art, für die der Nacht Wasseruhren, die bei den Babyloniern durch Beobachtung von Sterndurchgängen geeicht wurden, wodurch man schon zu einer ziemlich gleichmässigen Teilung von Tag und Nacht kam.

Die zweite wichtige Nutzanwendung der Sterne bestand darin, dass man mit ihnen die Richtung festlegte, sie dienten zur Orientierung. Von grosser Bedeutung war dies zunächst sicherlich für die Seefahrer, und es sind auch Anzeichen vorhanden, dass unsere heutigen Sternbilder auf die Kreter, die eine Seefahrernation waren, zurückgehen, von denen übernahmen sie dann die Babylonier und von diesen erst die Griechen, auf deren Wissenschaft die des Abendlandes aufbaut. Ein anderes Beispiel wäre, dass das sehr exakte Ausrichten der Pyramiden auch nur mit Hilfe von Gestirnen erfolgt sein kann. Recht interessant und wichtig ist die gut verbürgte Tatsache, dass Eratostenes im 3. vorchristlichen Jahrhundert, vielleicht sogar ein Jahrhundert vor ihm Archytas aus Tarent in ähnlicher Weise, aus der Mittagshöhe der Sonne am längsten Tage an zwei Orten, die nahezu auf dem gleichen Erdmeridian lagen, den Winkelabstand dieser Orte auf der Erdkugel ermittelte; dass die Erde eine Kugelgestalt hat,

hatten schon vorher die Pytagoräer erkannt und ebenfalls astronomisch begründet. Aus dem Winkelabstand und dem linearen Abstand dieser Orte auf der Erdoberfläche, den ERATOSTENES durch Seilzüge und durch Läufer ausmessen liess, vermochte er, den Umfang der Erde zu berechnen, und kam schon zu einem erstaunlich guten Resultat.

Die Definition der Zeiteinheit

Im Prinzip benutzen wir auch heute noch die Sterne für diese beiden Aufgaben, einerseits für die Festlegung der Zeit, andererseits für die Vermessung, für die Orientierung und für die Ortsbestimmung auf der Erde. Es ist noch gar nicht lange her, dass unsere Zeiteinheit durch die Dauer der Rotation der Erde definiert war und die Rotationsdauer konnte man nur durch Beobachten der Stellung von Sternen ermitteln. Dieser Zeitdienst beschäftigte viele Astronomen in der ganzen Welt recht ausgiebig, denn laufend mussten Sterndurchgänge beobachtet, daraus die genauen Zeiten berechnet und damit die Uhren kontrolliert werden. Als es allmählich, eigentlich erst im Laufe dieses Jahrhunderts, klar wurde, dass unsere Erduhr gar nicht so schrecklich genau geht, dass sie säkulare, periodische und dazu noch ganz unregelmässige Gangänderungen aufweist, hat man davon Abstand genommen, die Rotationsdauer für die Definition der Zeiteinheit zu benutzen und hat dann dafür ein Weilchen die Umlaufsdauer der Erde um die Sonne verwandt. War vorher die Sekunde 1/86400 des mittleren Sonnentages, so galt nun für die Ephemeridensekunde 1/31 556925.9747 des tropischen Jahres 1900.0.

Inzwischen aber hatten die Uhren ganz rapide Fortschritte gemacht. Vor gut 40 Jahren begann man, die sehr konstanten Schwingungen eines angeregten Quarzkristalles für die Konstruktion von Uhren zu verwerten, diese Quarzuhren waren viel genauer als die besten Pendeluhren, und in den letzten zwei Dezennien hat man etwas noch Genaueres gefunden, man benutzt die sehr regelmässigen Schwingungen von Atomen oder Molekülen als Uhr, man musste nur noch diese äusserst raschen Schwingungen hinreichend transformieren, um daraus eine zweckmässige, ablesbare Uhr zu gewinnen, und das ist nun gelungen. Daraufhin hat man auch die Zeiteinheit auf dieser Basis festgelegt. Definitionsgemäss entspricht jetzt die Sekunde 9192631770 Schwingungen des Cäsiumatoms 133 beim Übergang zwischen zwei ganz bestimmten Energieniveaus, und man wählte diesen Zahlenwert, damit die Atomsekunde der Ephemeridensekunde möglichst gut angepasst ist.

Wir haben jetzt also eine Uhr, die viel genauer ist als die Erduhr, doch damit ist der astronomische Zeitdienst nicht etwa überflüssig geworden, nur hat man ihn etwas reduzieren und auf einige wenige Zeitdienst-Observatorien beschränken können. Der Zeitdienst ist wichtig, weil wir ja schliesslich auf der Erde leben und das tägliche Leben durch die Rotation der Erde bestimmt wird. Es soll Mittag sein, wenn die Sonne kulminiert, nicht wenn unsere Atomuhr 12 Uhr anzeigt, und beides, Atomzeit und Zeit der Erduhr oder Weltzeit können aus den genannten Gründen differieren. Auf den Zeitdienst-Observatorien wird durch Sternbeobachtungen mit fest aufgestellten, grossen und diesem Zweck angepassten Spezialinstrumenten wie dem Meridiankreis, dem Zenitteleskop, dem Prismenastrolab der Stand der Erduhr ermittelt; der Vergleich mit der Atomuhr gibt uns dann Aufschluss über die verschiedenen Unregelmässigkeiten der Erdrotation und liefert die Reduktion der Atomzeit auf die Weltzeit.

Die Bedeutung der Sterne für die Erdvermessung

Den Stand der Erduhr, die Weltzeit, die von zahlreichen, über die ganze Erde verteilten Zeitzeichensendern kontinuierlich oder auch immer nur ein Weilchen zu festgesetzten Zeiten ausgestrahlt wird, brauchen wir nun aber auch für die zweite der erwähnten Aufgaben, für die Vermessung der Erde mit Hilfe der Sterne. Hier wird nun mancher vielleicht die Frage stellen, warum denn heute für die Erdvermessung noch Sterne nötig sind. Durch Triangulation haben wir die Erdoberfläche von Punkt zu Punkt genau vermessen, d. h. wir haben in erster Linie Winkel gemessen, was leichter zu bewerkstelligen ist als über unebenes oder schwer zugängliches Gelände lange Strecken auszumessen, und wenn man nur eine passend gewählte Grundstrecke, eine Basis, genau kennt, so kann man dann beliebig viele daran anschliessende Dreiecksketten ausrechnen. In neuester Zeit ist es übrigens möglich geworden, auch Distanzen bequem und recht genau zu bestimmen, und zwar mit Instrumenten, bei denen man mit Mikrowellen oder mit Lichtwellen arbeitet und durch Phasenvergleich der ausgesandten und wieder zurückkommenden Wellen die Länge der durchlaufenen Strecke ermittelt; Tellurometer, Distomat, Geodimeter, Laser-Geodimeter sind z. B. solche Apparaturen. Sie haben recht erfreuliche Ergebnisse gebracht und die Zuverlässigkeit der Triangulationsnetze sehr gefördert. So hat jedes Land sein eigenes Triangulationsnetz, die Grundlage für seine Landeskarten, gewonnen. Nun muss man aber noch die Lage dieses Netzes auf der Erdoberfläche in bezug auf die Rotationsachse, in bezug auf den mit der Erde rotierenden Nullmeridian von Greenwich kennen, das Netz muss auch exakt ausgerichtet sein, der Skalenwert muss stimmen, und dafür braucht man die Sterne, die bekannte, feste Richtungen im Raum liefern, und durch Anschluss an diese Richtungen werden wir einige Punkte unseres Netzes auf der Erdoberfläche verankern und damit auch unser ganzes Netz sichern.

Die Lotabweichung und Laplace-Punkte

Bei der Lösung dieses Problems zeigen sich indes Schwierigkeiten, die uns gleich zu einer weiteren Aufgabe der astronomischen Vermessung führen. Unsere Erde ist keine homogene Kugel, in recht guter Näherung können wir sie als ein Rotationsellipsoid ansehen und die üblichen Koordinaten der Erdorte, geogra-

phische Länge und Breite, beziehen sich auf dieses Rotationsellipsoid, man spricht auch von ellipsoidischen oder geodätischen Längen und Breiten. Die nähere Umgebung des Beobachtungsortes kann man wegen der geringen Krümmung der Erdoberfläche als eben ansehen, sie wird durch die Tangentialebene an das Erdellipsoid im Beobachtungsstandpunkt verifiziert. Die Senkrechte auf dieser Tangentialebene, die Normale auf dem Ellipsoid im Beobachtungspunkt, trifft in ihrer Verlängerung die Himmelskugel im geodätischen Zenit. Die Instrumente, mit denen wir unsere Vermessung durchführen, Theodolite oder Universalinstrumente, auch Meridiankreise und Zenitteleskope, sind alle nach der Richtung der Schwerkraft, nach der Lotlinie aufgestellt; sie werden mit Wasserwaagen, Libellen oder Niveaus genannt, so justiert, dass die eine Achse mit der Lotlinie zusammenfällt und zum Zenit weist, die andere senkrecht dazu in der Horizontalebene liegt. Da die Massen in der Erde nicht ganz gleichmässig verteilt sind und die Erdoberfläche auch keineswegs glatt und eben ist, es gibt Berge und Täler, so wird die Richtung der Schwerkraft, also unsere Lotlinie, im allgemeinen gar nicht mit der Ellipsoidnormalen zusammenfallen, es existieren Lotabweichungen, das sind die Winkel zwischen der Lotlinie und der Ellipsoidnormalen, und das bedeutet, dass der astronomische Zenit, der Durchstosspunkt der Lotlinie mit der Sphäre, und der vorher definierte geodätische Zenit nicht identisch sind. Diese Lotabweichungen findet man durch den Vergleich der astronomisch gewonnenen Erdörter mit den geodätischen und dies ist eine sehr wichtige Aufgabe der astronomischen Ortsbestimmungen besonders in einem gebirgigen Land, wo die Beträge der Lotabweichungen verhältnismässig gross werden können, wo sie von Ort zu Ort, oft schon bei sehr geringen Distanzen, stark variieren. Man versucht auch, diese Lotabweichungen theoretisch zu berechnen, indem man die Anziehungskräfte der sichtbaren Massen, also der Berge, berücksichtigt. Man braucht dazu Grösse und Form der Berge sowie die durchschnittliche Materiedichte ihres Gesteins, was man alles ganz gut kennt oder zumindestens ausreichend genau abschätzen kann. Was man weniger gut weiss, das ist die Massenverteilung in der Nachbarschaft unseres Punktes nach dem Erdinnern zu, und mit aus diesem Grunde ist es wichtig, dass man bei der Berechnung der Lotabweichungen aus sichtbaren Massen eine ganze Anzahl von möglichst gleichmässig verteilten Stützpunkten hat, an die man dann die andern, errechneten anschliesst.

Man spaltet die Lotabweichung in üblicher Weise in zwei Komponenten auf, die eine, die ξ-Komponente, in der Nord-Süd-Richtung, die andere, die η-Komponente, in der Ost-West-Richtung. Steht der astronomische Zenit nördlich vom geodätischen, so ist ξ positiv, steht er östlich vom geodätischen, so ist η positiv. ξ erhält man aus Breitenbestimmungen. Bezeichnet man mit φ die Breite des Ortes oder die Polhöhe über dem Horizont, man kann sich leicht überlegen, dass beides identisch ist, so ist der Abstand des Pols vom Zenit $90° - \varphi$. Liegt der astronomische Zenit nördlich vom geodätischen, also dem Himmelspol näher, so ist $90° - \varphi_a$ kleiner als $90° - \varphi_g$, also die astronomische Breite φ_a grösser als die geodätische φ_g. Die η-Komponente kann man aus Längenbestimmungen gewinnen. Ist η positiv, so verläuft der astronomische Meridian, der Grosskreis durch Himmelspol und Zenit, östlich vom geodätischen, und zählen wir die Längen positiv nach Osten, wie es bei uns, die wir uns ein wenig östlich von Greenwich befinden, oft getan wird, so gilt: $\eta = (\lambda_a - \lambda_g) \cos \varphi$. Die Multiplikation der Längendifferenz mit $\cos \varphi$ rührt daher, dass dem Winkel $(\lambda_a - \lambda_g)$ zwischen den beiden Meridianen auf einer Kugel mit dem Radius 1 bei der Breite φ ein Bogen auf dem Kleinkreis mit dem Radius $\cos \varphi$ entspricht. Man kann die η-Komponente auch aus Azimutmessungen herleiten. Man misst das astronomische Azimut der Richtung von einem Triangulationspunkt zu einem andern und vergleicht dies mit dem berechneten geodätischen Azimut. In erster Näherung gilt dann: $\eta = (A_a - A_g) \operatorname{ctg} \varphi$; die exakte Formel ist noch etwas komplizierter und die Herleitung ist ziemlich umständlich, so dass wir hier darauf verzichten.

Jedenfalls hat man die Möglichkeit, die η-Komponente der Lotabweichung auf zweierlei Weise zu bestimmen. Früher bevorzugte man Azimutmessungen, sie waren etwas bequemer und Unsicherheiten der Uhr spielten eine geringe Rolle; heute, wo die genaue Zeit stets leicht zu erhalten ist, führt man lieber Längenmessungen durch. Hat man Längen- und Azimutmessungen, so sollten die nach den beiden Verfahren gewonnenen η-Werte gleich sein. Besteht eine verbürgte Abweichung, so ist das ein Zeichen dafür, dass das Triangulationsnetz nicht ganz richtig orientiert ist, es ist ein wenig verdreht. Man spricht von einem LAPLACE-Widerspruch, der sich aus der LAPLACE-Gleichung ergibt, welche die Verbindung zwischen diesen beiden η-Komponenten liefert. Entsprechend nennt man solche Triangulationspunkte LAPLACE-Punkte, auf denen man astronomisch die ξ-Komponente der Lotabweichung aus Breitenbestimmungen, die η-Komponente sowohl aus Längen- wie auch aus Azimutmessungen gewonnen hat, so dass man die LAPLACE-Gleichung aufstellen kann.

Im Rahmen der Verbesserung des europäischen Triangulationsnetzes sind in der Schweiz im letzten Dezennium 12 geodätisch gut bestimmte Triangulationspunkte zu LAPLACE-Punkten gemacht worden. Man hat sich dabei nicht mit Messungen an nur einem Abend begnügt, sondern hat Länge, Breite und Azimut an 8–10 Abenden gemessen. Diese Wahl einer ganzen Anzahl von Nächten erfolgt abgesehen von dem Gesichtspunkt, dass durch die Vermehrung des Beobachtungsmaterials eine Erhöhung der Genauigkeit der endgültigen Werte zu erwarten ist, vor allem deshalb, dass die Beobachtungen bei verschiedenen Witterungsbedingungen durchgeführt werden. Ausser der normalen Refraktion, die alle Sterne in grösserer Höhe

erscheinen lässt und die einerseits von der Zenitdistanz, andererseits von der Temperatur und vom Luftdruck der durchlaufenen Atmosphärenschichten abhängt, wofür man in erster, ziemlich guter Näherung Temperatur und Luftdruck am Beobachtungsort nimmt, gibt es Refraktionsanomalien, also Abweichungen von der Normalrefraktion, die man gar nicht erfassen kann und die sich sowohl auf die Zenitdistanz als auch auf das Azimut auswirken können, man spricht im letzteren Fall von Lateralrefraktion. Man kann nun hoffen, dass solche Refraktionsanomalien, die man eben nicht berechnen kann, nach dem Gesetz des Zufalls verteilt sind, so dass sich ihre Wirkung aufhebt, wenn man die Beobachtungen einer Anzahl von Nächten mittelt. Wie stark die Örter von Sternen durch ungewöhnliche Verhältnisse in unserer Atmosphäre verschoben werden können, und zwar an irgendeinem Abend nicht bloss regellos, sondern auch systematisch, weiss jeder, der z. B. einmal bei Föhn beobachtet hat, wo derartige Effekte besonders ausgeprägt sind, aber es ist durchaus zu erwarten, dass so etwas in weniger auffälliger Weise auch an andern Abenden vorhanden ist.

Universalinstrumente und Hilfsapparaturen; Zeitzeichen

Es ist sicherlich von Interesse, mit welchen Instrumenten man nun solche, eben besprochene Messungen durchführt und welche Methoden man hierbei bevorzugt. Man braucht Instrumente, mit denen man die sogenannten Horizontsystem-Koordinaten, also Höhenwinkel über dem Horizont h oder Abstände vom Zenit, Zenitdistanzen z, die komplementären Winkel zur Höhe $z = 90° - h$ misst, sowie Azimute, das sind Winkel zwischen auf den Horizont projizierten Richtungen, und diese Instrumente heissen Theodolite oder Universalinstrumente. Das Fernrohr ist im Prinzip um zwei Achsen drehbar, direkt um eine horizontale, die Kippachse, und diese wieder bzw. der ganze Instrumentenoberteil, die Alhidade, um eine vertikale, die Stehachse. Beide Achsen sind mit sorgfältig geteilten Kreisen versehen, die man mit zweckmässigen optischen Vorrichtungen bequem und genau ablesen kann. Die Beobachtungsstationen befinden sich in der Schweiz häufig oder meist auf Berggipfeln, die mehr oder weniger bequem zugänglich sind, entsprechend müssen die Universalinstrumente gut zu transportieren und rasch aufzustellen sein; andererseits ist aber wegen der zu erreichenden Genauigkeit auch eine gewisse Grösse erforderlich. Universalinstrumente, die diese beiden Bedingungen erfüllen und drum hierzulande gern benutzt werden, sind der T4 der Firma Wild, Heerbrugg, und der DKM3A der Firma Kern, Aarau. Der Objektivdurchmesser von 6–7 cm genügt, dass man Sterne bis zur 7. Grösse, bei sehr gutem Wetter auch noch etwas schwächere, bei schwach beleuchtetem Gesichtsfeld, wie man es zum Messen haben muss, noch gut einstellen kann; man hat dann stets ausreichend viele Sterne für alle in Frage kommenden Zwecke zur Verfügung. Wichtige zusätzliche Instrumente sind Uhren und Zeitzeichenempfänger. Neben den früher gern benutzten Schiffschronometern gibt es heute tragbare Quarzchronometer, die ungefähr von der gleichen Grösse wie die Schiffschronometer sind, aber eine höhere Genauigkeit aufweisen. Sternzeituhren, die um knapp 4 Minuten pro Tag schneller gehen müssen als Uhren nach mittlerer Zeit, sind zum bequemen Einstellen der Sterne erforderlich, weniger zum Messen, so dass hier jetzt statt der grösseren Schiffschronometer kleine Deckchronometer von den Dimensionen der Taschenuhren genügen.

Sehr wichtig ist in der heutigen Zeit, dass man einen guten Empfang von Zeitzeichen hat, mit denen man den Stand der Uhren bestimmt, gegebenenfalls kann man sogar die Zeitzeichen als Beobachtungsuhr benutzen. In der Schweiz sind wir in der glücklichen Lage, in Prangins nahe Nyon am Genfer See einen Zeitzeichensender zu haben, der vom Observatorium Neuenburg betreut wird und laufend Tag für Tag ohne jede Unterbrechung jede Sekunde ein Signal von $^1/_{10}$ Sekunde Dauer ausstrahlt; die Minute ist dadurch gekennzeichnet, dass zu Beginn jeder vollen Minute zwei solche $^1/_{10}$ Sekunden-Signale nach einer kurzen Pause von wiederum $^1/_{10}$ Sekunde aufeinanderfolgen. Der Sender arbeitet auf der Frequenz von 75 kHz, das entspricht einer Wellenlänge von rund 4 km, also einer Langwelle. Zwischen der Verwendung von Langwellen und der von Kurzwellen besteht folgender Unterschied: Bei Langwellen empfängt man nur die direkte, sogenannte Bodenwelle, bei Kurzwellen hingegen zumeist die an der Ionosphäre einfach oder mehrfach reflektierte Welle, und darauf, dass diese reflektierte Welle weniger geschwächt ist als die Bodenwelle, die relativ rasch abklingt, beruht der gute Empfang von Kurzwellen über grosse Entfernungen. Die Ionosphäre unserer Erdatmosphäre besteht aus verschiedenen elektrisch geladenen Schichten in 60 bis 350 km Höhe über der Erdoberfläche, wobei die Höhe und die Ionenkonzentration stark variiert, beides hängt vom Einfallswinkel und von der Intensität der Sonnenstrahlung sowie auch von der Aktivität der Sonne ab. Der Weg, den die empfangene Kurzwelle zurückgelegt hat, ist länger als der der Bodenwelle, und man kann die Länge dieses Weges wegen der genannten Veränderlichkeiten, von deren Existenz man weiss, die man aber im betreffenden Moment nicht genau genug kennt, gar nicht ganz exakt angeben. Bei zuverlässigen Zeit- oder Längenbestimmungen sollte man aber doch recht genau wissen, wielange das Zeitsignal gebraucht hat, um vom Sender bis zu uns zu gelangen. Dem Vorteil der grösseren Reichweite der Kurzwellen steht also der Nachteil der Unsicherheit der Laufzeit des Signals gegenüber. In der Schweiz und praktisch auch in ganz Europa empfängt man den ziemlich starken Langwellensender Prangins recht gut, dass er für diesen Bereich tatsächlich ein sehr geeigneter Zeitzeichensender ist. Die Radioempfangsgeräte können heute auch sehr klein dimensioniert werden; zweckmässig sind es Empfänger, die fest auf die Fre-

quenz von 75 kHz abgestimmt sind, man muss dann gar nicht erst nach der Wellenlänge suchen, auch ist es auf diese Weise leichter möglich, Störungen auszufiltern.

Dass man für den Betrieb und die Beleuchtung der Instrumente elektrischen Strom braucht, ist selbstverständlich. Netzstromanschluss wird man auf Bergen keineswegs immer voraussetzen können, so nimmt man sich eben seine Stromquellen mit, also Batterien oder auch kleine transportable Generatoren, die mit Benzinmotoren betrieben werden und nicht einmal sehr viel Lärm machen. Es gibt heute solche Generatoren in recht passenden Grössen und sie liefern Strom verschiedener Art und Spannung.

Andere Zusatzgeräte, die man bei Azimutmessungen benötigt, sind Scheinwerfer. Wenn man ein irdisches Ziel an Sterne anschliessen will, muss es in der Nacht natürlich sichtbar sein. Da ist es recht zweckmässig, man stellt als Zielmarke einen Scheinwerfer auf, dessen Lichtbündel man durch eine Spaltblende verengen und damit auch wunschgemäss abschwächen kann. Kleine Scheinwerfer von rund 15 cm Durchmesser, die Strom von 6 V Spannung benötigen, genügen hier im allgemeinen vollauf; sie sind auch bei Tagesbeobachtungen durchaus brauchbar. Bei günstigem Wetter kann man damit mühelos Entfernungen bis etwa 70 km überbrücken; lästig sind tiefliegende Dunst- und Nebelschichten, so hat man gerade im Sommer bei Schönwetterlagen recht selten die nötige Fernsicht, selbst bei relativ kleinen Distanzen, weil der allgemeine Dunstpegel viel zu hoch liegt.

Methoden der Längenbestimmung

Es gibt mannigfache Methoden, die man bei den astronomisch-geodätischen Messungen anwendet, und einige von ihnen, die man dabei besonders bevorzugt, sollen doch ein wenig beschrieben werden; wir wollen zunächst mit den Längenbestimmungen beginnen. Hier handelt es sich im Prinzip darum, den Winkel zwischen dem Meridian der Beobachtungsstation und dem Meridian von Greenwich, dem Null-Meridian, zu messen. Die Messung von Winkeln zwischen zwei Meridianen ist identisch mit der Messung von Zeitdifferenzen. Befinden wir uns beispielsweise an einem Ort der östlichen Länge 15° oder 1^h, also um $^1/_{24}$ des ganzen Kreisumfanges östlich von Greenwich, und geht hier irgendein Stern durch den Meridian, der, woran noch einmal erinnert sei, am Himmel durch den Grosskreis durch die Himmelspole und den Zenit verifiziert ist und den Horizont im Südpunkt trifft, so muss sich die Erde noch um $^1/_{24}$ eines vollen Kreises, also um $360°/24 = 15°$, oder um $^1/_{24}$ ihrer Rotationsdauer von 24 Stunden, also um 1 Stunde weiterdrehen, bis der gleiche Stern in Greenwich durch den Meridian geht, und was für diesen Stern gilt, gilt auch genau so für den Frühlingspunkt, dessen Durchgang durch den Meridian definitionsgemäss um 0^h Ortssternzeit erfolgt. Das bedeutet mit anderen Worten, dass wir an unserem Ort Zeitbestimmungen mit Sternen durchführen müssen, der Unterschied der auf diese Weise erhaltenen Ortssternzeit gegen die Greenwicher Sternzeit, die man mühelos aus der vom Zeitzeichensender gelieferten mittleren Zeit ausrechnen kann, gibt uns dann sofort die Länge unserer Beobachtungsstation.

Um die Ortssternzeit zu erhalten, genügte es im Prinzip, den Zeitmoment zu registrieren, zu dem ein Stern, dessen Ort an der sich drehenden Himmelskugel durch seine äquatorialen Koordinaten Rektaszension α und Deklination δ gegeben ist, eine bestimmte Höhe oder ein bestimmtes Azimut hat, was wir ja mit unserm Theodoliten messen können. Kennen wir noch die Breite φ unserer Beobachtungsstation, so ist mühelos aus φ, δ, h oder φ, δ, A der Stundenwinkel und dann mit α die Sternzeit zu berechnen. Es fragt sich nun bloss, wo am Himmel beobachtet man am besten den Stern, damit die Zeitbestimmung möglichst genau wird, dass der Einfluss der stets vorhandenen Fehlerquellen auf ein Minimum reduziert ist.

Man wird den Zeitmoment für die am Universalinstrument abgelesene Sternposition, oder noch präziser ausgedrückt, den Augenblick, zu dem der Stern genau auf einer Strichmarke im Gesichtsfeld steht, um so schärfer erfassen, je schneller der Stern diese Strichmarke durchquert. Dabei wäre gleich noch zu bemerken, dass man im Gesichtsfeld stets eine ganze Anzahl von sich rechtwinklig schneidenden Strichen hat, die eine Schar ist so justiert, dass sie senkrecht zum Horizont verläuft, also Vertikalkreise am Himmel verifiziert, die andere Schar entspricht dann den Parallelkreisen zum Horizont, den Almukantaraten, wie der alte arabische Name für diese Kleinkreise ist. Aus Differentialformeln der bekannten Gleichungen, welche die verschiedenen Koordinaten an der Sphäre miteinander verbinden, entnimmt man leicht, dass alle Sterne im Meridian ihr Azimut am raschesten ändern, also hier die vertikalen Strichmarken am schnellsten durchqueren.

Auf dieser Erkenntnis gründet sich die Meridianmethode der Zeitbestimmung, die zudem für die Auswertung recht bequem ist, denn man ersieht sogleich aus bekannten Formeln der sphärischen Astronomie, dass im Meridian, wo definitionsgemäss der Stundenwinkel gleich Null ist, die Ortssternzeit identisch mit der Rektaszension des Sterns ist. Es ist dabei nur noch zu beachten, dass stets instrumentelle Fehler und Aufstellungsfehler vorhanden sind und das Resultat ein wenig verfälschen.

Es sind vor allem drei Fehler, die man bestimmen oder eliminieren muss. Die horizontale Drehachse oder Kippachse wird nie ganz genau horizontal liegen. Aus diesem Grunde wird dann das Fernrohr beim Drehen um diese Achse keinen Vertikalkreis, der definitionsgemäss den Horizont senkrecht schneidet, beschreiben, demnach auch nicht streng den Meridian. Die Neigung der Kippachse misst man mit einem darauf gesetzten Niveau und kann dann ihren Einfluss auf die beobachtete Durchgangszeit berücksichtigen. Ferner wird die Kippachse nicht ganz exakt von Ost nach

West verlaufen, was bedeutet, dass das Fernrohr beim Herumschwenken wohl einen Vertikalkreis beschreibt, aber einen, der gegen den Meridian ein wenig geneigt ist. Diesen Azimutfehler bestimmt und berücksichtigt man durch die Durchgangsbeobachtungen von mindestens zwei Sternen, deren Deklinationen stärker voneinander verschieden sind. Schliesslich wird auch die Zielrichtung des Fernrohrs, die durch die Mittelstrichmarke im Gesichtsfeld definiert ist, nicht ganz genau senkrecht auf der Kippachse stehen, so dass das Fernrohr wieder keinen Vertikalkreis beschreibt, sondern einen Kleinkreis parallel zum Meridian. Diesen Zielachsen- oder Kollimationsfehler kann man eliminieren, wenn man den gleichen Stern in beiden Fernrohrlagen beobachtet, d. h. man beobachtet den Stern erst kurz vor dem Meridiandurchgang an einem Seitenstrich im Gesichtsfeld, dann legt man um, das bedeutet, dass man die Alhidade um 180° um die Stehachse dreht, nun das Fernrohr um 2 z um die Kippachse schwenkt, also wieder auf den Stern richtet, den man dann am gleichen Seitenfaden wieder beobachtet, also kurz nach dem Meridiandurchgang. Man sieht sofort, dass sich nun der Einfluss des Kollimationsfehlers heraushebt, wenn man den Mittelwert der Zeiten bildet, da das Fernrohr in beiden Lagen um den gleichen Winkel, aber in entgegengesetzter Richtung gegen den Meridian geneigt ist, so wird der Stern das eine Mal etwas zu früh, das andere Mal um die gleiche Zeit zu spät beobachtet.

Wie schon erwähnt war, hat man im Gesichtsfeld nicht nur einen Mittelstrich, der den Meridian verifiziert, sondern eine ganze Anzahl paralleler Striche in bekannten Abständen vom Mittelstrich. Man wird die Beobachtungsgenauigkeit steigern, wenn man die Zeiten der Durchgänge durch mehrere dieser Striche registriert und diese Zeiten dann mit Hilfe der bekannten Strichabstände auf die Durchgangszeit durch den Mittelstrich umrechnet. Zu diesem Strichsystem wäre nebenbei noch folgendes zu bemerken. Früher sprach man von Fäden und hatte effektiv in der Brennebene des Fernrohrs Spinnenfäden ausgespannt, das waren die feinsten Striche, die man herstellen konnte; diese Spinnenfäden waren auch noch ziemlich widerstandsfähig. Heute benutzt man dünne, planparallele Glasplatten, auf die man Linien einritzt oder einätzt, die an Feinheit den Spinnenfäden ebenbürtig sind, und eine solche Strichplatte ist praktisch unverwüstlich.

Nun müssen wir aber noch kurz auf zwei sehr wichtige Zusatzgeräte eingehen. Wenn man Sterndurchgänge durch mehrere Strichmarken beobachtet, die der Stern in zeitlichen Abständen von 10 Sekunden oder etwas mehr durchquert, kann man dabei nicht ständig die Uhr ablesen oder, wie man es früher machte, die Sekundenschläge der Uhr mitzählen und die beobachteten Durchgänge dahinein einschätzen, man muss irgendeine Vorrichtung haben, um die Zeit zu registrieren, indem man ähnlich wie bei einer Stoppuhr beim Durchgang des Sterns durch die Strichmarke jeweils auf eine Taste drückt, und derartige Apparaturen heissen Chronographen. Bis vor gar nicht so langer Zeit kannte man einzig den Schreibchronographen. Hier läuft mit gleichmässiger Geschwindigkeit ein Wachspapierstreifen ab, auf den zwei Stifte zwei parallele Spuren einzeichnen; beide Stifte können durch je ein Relais nach Bedarf ein wenig senkrecht zur Spur abgelenkt werden. Das eine Relais ist mit der Beobachtungsuhr verbunden, die so eingerichtet ist, dass die Sekundenschläge Kontaktschlüsse herstellen, oder man kann auch in ähnlicher Weise die Signale des Zeitzeichensenders dahin leiten, es zeichnen sich jedenfalls je nachdem die Sekundenschläge der Uhr oder die Zeitsignale auf der einen Spur ab. Auf der andern Spur erhält man ganz analog eine Markierung, wenn der Beobachter durch Betätigung der Taste den Kontaktschluss herstellt. Diese Markierung kann man in die regelmässigen Uhrzeichen bequem einmessen und erhält damit die Beobachtungszeit mit einer Genauigkeit von $^1/_{100}$ Sekunde. Dieses Verfahren funktioniert ausgezeichnet und diese Schreibchronographen wurden auch noch weiter ausgebaut, so konstruierte man statt Zwei-Spitzen- Vier-Spitzenchronographen und konnte nun auf dem Streifen z. B. gleichzeitig eine Uhr nach mittlerer Zeit, eine nach Sternzeit, das Zeitzeichen und die Beobachtersignale abbilden.

Zeitersparnis und bequemeres Arbeiten brachte dann der Druckchronograph. Das Prinzip besteht hier darin, dass ein kontinuierlich schwingender Quarzoszillator ein Zählwerk steuert, und dieses Zählwerk kann man so einstellen, dass es der Uhrzeit der benutzten Uhr entspricht. Drückt nun der Beobachter bei einem Sterndurchgang auf die Taste, gibt also ein Signal, so bekommt die Druckapparatur damit den Befehl, den Stand des Zählwerkes in diesem Moment auszudrucken; ganz entsprechend kann man vorher oder nachher mit einem Hebelgriff auch die Uhr mit der Druckapparatur zusammenschalten oder das Zeitzeichen, dann werden genau entsprechend die Sekundenschläge der Uhr oder die Zeitzeichen ausgedruckt. Auf diese Weise hat man stets die ausgedruckte Zeit der Zeitangabe der Uhr oder die des Zeitzeichens und kann damit leicht die ausgedruckten Zeiten in die Zeit der Uhr oder die des Zeitzeichens verwandeln. Das ist wichtig, weil beim Einstellen des Zählwerkes und der Inbetriebnahme der Apparatur sicherlich eine kleine Differenz zwischen Uhrzeit und gedruckter Zeit entsteht, man bedenke, dass der Chronograph noch $^1/_{1000}$ Sekunde oder eine Millisekunde ausdruckt, und das ist ein sehr kurzes Zeitintervall, das man gar nicht erfasst. Ausserdem wird sich diese ursprüngliche Differenz meist noch stetig ein wenig ändern, da der Quarzoszillator im allgemeinen einen von der Temperatur abhängigen Gang aufweist. Der Vorteil eines solchen Druckchronographen ist zweifellos der, dass einem das Ausmessen der Schreibchronographenstreifen erspart bleibt, was mühsam ist, wenn sehr viele Beobachtungszeiten vorliegen, auch werden Ablesefehler beim Ausmessen vermieden und man hat die Druckstreifen als Kontrollbeleg.

Das andere vorher erwähnte zusätzliche Hilfsmittel heisst das unpersönliche Mikrometer. Wenn man Durchgänge von Sternen durch die Strichmarke beobachtet, werden verschiedene Beobachter etwas voneinander abweichende Zeiten registrieren; das hängt vor allem von der verschiedenen Reaktionsfähigkeit der einzelnen ab und man nennt dies die persönliche Gleichung. Sie kann recht merkliche Werte bis zu einigen Zehntel Sekunden annehmen, auch die Vorzeichen sind bisweilen verschieden, mancheiner drückt vielleicht zu früh auf die Taste, um den richtigen Moment ja nicht zu verpassen. Bemerkenswert ist, dass die persönliche Gleichung für den gleichen Beobachter ziemlich konstant ist. Der ganze Effekt lässt sich aber sehr stark vermindern, wenn man nicht den Durchgang des Sterns durch die Strichmarke beobachtet, sondern wenn man mit einer Mikrometerschraube, die mit zwei Handrädchen zu betätigen ist, dafür sorgt, dass eine solche Strichmarke mit dem Stern mitbewegt wird, so dass der Stern immer vom Strich biseziert wird. Wohl will dieses Nachfahren geübt sein, mal läuft einem der Stern vielleicht weg, mal ist der Strich ihm voraus, doch das wird sich im Mittel aufheben, diese Abweichungen werden meist nach dem Gesetz des Zufalls verteilt sein und die persönliche Gleichung ist weitgehend eliminiert. Es bleibt nur ein relativ kleiner Rest von ihr übrig, weil jeder Beobachter die Bisezierung ein wenig anders auffasst. Man nennt diese ganze Vorrichtung drum das unpersönliche Mikrometer. Die Zeit wird bei diesem Verfahren in der folgenden Weise registriert: Die Mikrometerspindel ist mit einer Trommel versehen, die 10 feine Kontaktstreifen hat. Wird der Kontakt geschlossen, erhält der Chronograph den Druckbefehl, bzw. wird beim Schreibchronographen das Relais betätigt, und so werden pro Trommelumdrehung 10 Zeiten registriert, das ist 10mal mehr, als man sonst Strichmarken hatte, so wird dadurch auch zugleich die Genauigkeit im Mittel erhöht.

Schliesslich wäre noch zu bemerken, dass man den Rest der persönlichen Gleichung und eine ihr entsprechende analoge instrumentelle Gleichung, es ist ja möglich, dass die instrumentelle Reaktion auf das Mikrometersignal etwas anders erfolgt als die auf das Zeitzeichen, dadurch eliminiert, dass man die Längenbestimmungen ausser auf den neu zu bestimmenden Stationen vorher und nachher auch auf einer Station genau bekannter Länge, der Referenzstation, durchführt. Man erhält auf diese Weise Längendifferenzen gegen die bekannte Länge der Referenzstation und die persönlich-instrumentelle Gleichung fällt völlig heraus.

Für eine zuverlässige Längenbestimmung nach dieser Methode braucht man 8–14 Sterne. Man meidet wegen der früher schon mal erwähnten Refraktionsanomalien, deren Einfluss mit der Zenitdistanz wächst, Sterne zu grosser Zenitdistanz, beschränkt sich am besten auf Zenitdistanzen zwischen 0° – 30°. Man benutzt Sterne des FK4, des vierten Fundamentalkatalogs des Berliner astronomischen Jahrbuches, das sind 1535 Sterne bis zur 6. Grösse, einige etwas schwächere sind auch noch dabei, die ziemlich gleichmässig über den Himmel verteilt sind, deren Örter wir sehr genau kennen und für die jährlich Ephemeriden der sogenannten scheinbaren Örter im Intervall von 10 Sterntagen veröffentlicht werden. Den scheinbaren Ort des Sterns nennt man den Punkt am Himmel, wo man den Stern effektiv sieht, und dieser Ort an der sich drehenden Sphäre ändert sich aus verschiedenen Gründen wie Präzession, Nutation, Aberration, Parallaxe, Eigenbewegung, worauf hier aber im einzelnen nicht näher eingegangen werden soll, weil das etwas zu weit führt. Jedenfalls kann man den scheinbaren Ort aus dieser Sternephemeride für das Datum der Beobachtung relativ bequem interpolieren. Eine derartige Beobachtungsserie nach der Meridianmethode wird vielleicht 1¼ bis 1¾ Stunden erfordern, man muss also solange klaren Himmel haben.

Der Meridianmethode ähnlich ist die Döllen-Methode, die nach Döllen in Pulkova so genannt ist, der sie 1863 in eine brauchbare Form brachte; die Idee zu dieser Methode existiert allerdings schon viel länger und besteht in Folgendem: Um die Bestimmung des Azimutfehlers bei der Meridianmethode zu vermeiden, führt man die Beobachtung einfach stets im Vertikalkreis des Polarsterns durch. Man stellt also zuerst Polaris ein und notiert die Zeit, wenn er auf dem Mittelstrich steht. Die Stehachse lässt man geklemmt, dreht das Fernrohr nur um die Kippachse und richtet es auf einen Stern, der bald danach südlich vom Zenit durch diesen Vertikalkreis geht, und registriert dessen Durchgang durch den Vertikal in der gleichen Weise wie eben bei der Meridianmethode. Zur Eliminierung des Zielachsenfehlers wird man auch hier während des Durchganges umlegen, also um genau 180° um die Stehachse drehen, und wird am Schluss nochmals Polaris auf den beweglichen Strich einstellen, also seine Azimutänderung in der Zwischenzeit mit dem Mikrometer messen. Dass man auch wie üblich die Achsenneigung mit dem Niveau bestimmen muss, ist selbstverständlich.

Der Vorteil der Methode ist, dass jedes Paar Polaris-Südstern eine abgeschlossene Zeitbestimmung darstellt, man kann also auch relativ kurze Aufhellungen ausnutzen. Da der Vertikal von Polaris dem Meridian sehr nahe liegt, der Winkel zwischen beiden beträgt bei uns maximal 1½°, gilt der gleiche Vorzug der Meridianmethode, dass der Stern diesen Vertikal sehr rasch durchquert, auch hat man annähernd gleichviele Sterne vom FK4 zur Verfügung. Da sich Polaris wegen seines geringen Polabstandes von weniger als 1° sehr langsam bewegt, genügt für die Berechnung seines Azimuts eine nur genähert richtige Zeit, wie man sie immer hat, die ganz genaue will man ja erst nach dieser Methode ermitteln. Der Nachteil der Methode besteht darin, dass sie nur in nördlichen, nicht zu niedrigen Breiten anwendbar ist, wo man Polaris sieht und er nicht zu tief steht. Ferner ist der Rechen-

aufwand für die Auswertung unvergleichlich grösser als bei der Meridianmethode; nun dies ist heute kein Hinderungsgrund mehr, wenn man die Auswertung programmiert und einen Computer benutzt.

Statt Durchgänge durch Vertikalkreise kann man auch solche durch Almukantarate beobachten, also die Zeit registrieren, zu der der Stern den horizontalen Mittelstrich passiert; man liest die dazugehörende Zenitdistanz am Höhenkreis ab. Die Differentialformeln lehren, dass dieses Verfahren für Sterne, die im Osten oder Westen, also im sogenannten ersten Vertikal stehen, am günstigsten ist, denn hier ändert jeder Stern am schnellsten seine Höhe, man erfasst den Durchgang durch den Almukantarat am schärfsten. So kann man also durch Zenitdistanzmessungen in der Nähe des ersten Vertikals die Zeit bestimmen; die Genauigkeit ist geringer als bei der Meridianmethode, die Reduktionsarbeit grösser. Ein Nachteil ist, dass die Refraktion voll eingeht, die man nie ganz genau kennt, da man nur aus den Bedingungen am Beobachtungsort auf sie schliessen kann. Auch eventuelle Fehler der Kreisteilung, die früher oft eine grosse Rolle spielten, bei modernen Instrumenten allerdings weitgehend beseitigt sind, verfälschen die Zenitdistanzmessung.

Diese beiden Nachteile vermeidet man bei der ZINGER-Methode. Auch hier hatten die grundlegenden Gedanken für diese Methode schon verschiedene Astronomen im 18. Jahrhundert, doch ZINGER fand im 19. Jahrhundert eine zweckmässige Anwendungsform. Man beobachtet die Almukantaratdurchgänge von zwei Sternen, die kurz nacheinander, man wählt ein Zeitintervall von etwa 5 Minuten, die gleiche Höhe erreichen, also den gleichen Almukantarat durchqueren, beide möglichst symmetrisch zum Meridian, der eine auf der Ostseite, der andere auf der Westseite, wobei es auf die Reihenfolge nicht ankommt, und beide möglichst nah dem ersten Vertikal. Man stellt die vorher berechnete gemeinsame Höhe des Sternpaares ein, richtet durch Drehung im Azimut das Fernrohr auf den Stern, der den Almukantarat zuerst passiert, und beobachtet den Durchgang durch den horizontalen Mittelstrich. Auch hier verwendet man dabei zweckmässig das unpersönliche Mikrometer; man muss nur darauf achten, dass der bewegliche Meßstrich gegen früher, wo er einen Vertikalkreis verifizierte, um 90° gedreht ist, da der Almukantarat senkrecht auf dem Vertikalkreis steht. Ist die Beobachtung des ersten Sterns beendet, dreht man die Alhidade um die Stehachse, während die Kippachse fest geklemmt bleibt, richtet das Fernrohr auf den zweiten Stern des Paares und beobachtet nun genau so dessen Almukantaratdurchgang. Die Bewegung des zweiten Sterns verläuft natürlich in der dem ersten Stern entgegengesetzten Richtung, denn stieg der östliche Stern empor, so sinkt der westliche herab.

Um nun aber zu kontrollieren, dass die Höhenstellung des Fernrohres wirklich bei beiden Sternen exakt die gleiche war, Aufstellungsfehler des Instrumentes und andere instrumentale Unzulänglichkeiten können dies ja verfälschen, hat man eine zusätzliche Libelle, nach einer anderen Methode das HORREBOW-Niveau genannt, das man fest an die Kippachse klemmt. Ist die Höhenstellung bei beiden Sternen exakt die gleiche, wird auch das Niveau die gleiche Blasenstellung haben, andernfalls berechnet man leicht aus der Änderung der Stellung der Niveaublase die Änderung der Höhenstellung des Fernrohrs und berücksichtigt dies dann bei der Ausrechnung. Aus den beobachteten Durchgangszeiten beider Sterne, den bekannten äquatorialen Sternkoordinaten und der Polhöhe kann man mühelos die genaue Zeit berechnen. Wesentlich ist bei dieser Methode, dass jedes Sternpaar eine abgeschlossene Zeitbestimmung liefert, man also auch kurze Aufhellungen ausnutzen kann, dass Fehler der Kreisteilung keinen Einfluss haben, da man Kreisablesungen gar nicht braucht, der Kreis dient nur zum Einstellen, dass die Refraktion abgesehen von Anomalien, also Änderungen mit dem Azimut, gar nicht einwirkt, da beide Sterne die gleiche Höhe haben, also die gleiche Refraktion erfahren, und dass instrumentale Unzulänglichkeiten keine Rolle spielen. Relativ mühsam ist das Heraussuchen und Vorbereiten geeigneter Sternpaare und auch die Auswertung, doch kann man heute beides programmieren und einem Computer auftragen.

Methoden der Breitenbestimmung

Bequemer als Bestimmungen der Länge sind solche der Breite. Misst man die Zenitdistanz eines Sterns beim Meridiandurchgang, so hat man sehr einfache Beziehungen zwischen der Meridianzenitdistanz, der Deklination des Sterns und der Polhöhe oder Breite des Beobachtungsortes, man kann also mit der bekannten Deklination des Sterns und der gemessenen Zenitdistanz die Breite sehr leicht berechnen. Berücksichtigen muss man die Refraktion, die voll eingeht, und ausserdem braucht man für eine abgeschlossene Breitenbestimmung stets zwei Sterne, von denen man jeden in der anderen Fernrohrlage beobachten muss, d. h. man muss die Alhidade um 180° um die Stehachse drehen, man muss umlegen, dann eliminiert man den unbekannten Nullpunktsfehler des Höhenkreises, den Zenitpunktfehler, denn es wird nie völlig zu erreichen sein, dass man exakt 0° 0′ 0.00″ abliest, wenn das Fernrohr genau zum Zenit gerichtet ist, und das wird sich auch mit der Zeit etwas ändern. Den Einfluss der Refraktion kann man sehr beschränken, wenn die beiden Sterne eines solchen Paares nicht allzu verschiedene Zenitdistanzen haben, der eine von ihnen südlich, der andere dann aber nördlich vom Zenit kulminiert. Zielachsenfehler und eine kleine Neigung der Kippachse wirken sich auf Zenitdistanzmessungen praktisch nicht aus, wie man leicht zeigen kann, so bleiben Kreisteilungsfehler die einzige Fehlerquelle. Da solche, wie schon erwähnt, heute auch nur noch geringfügig vorhanden sind, benutzt man diese sehr bequeme Methode gern und oft für Breitenbestimmungen. Will man indes doch völlig von Kreisteilungsfeh-

lern und auch weitgehend vom Einfluss der Refraktion befreit sein, so bedient man sich der HORREBOW-TALCOTT-Methode der Polhöhenbestimmung. Sie ist so genannt nach PETER HORREBOW, der im 18. Jahrhundert der Nachfolger von OLAV RÖMER in der Leitung der Kopenhagener Sternwarte war, und nach dem Amerikaner TALCOTT, der im 19. Jahrhundert zweckmässige Spezialinstrumente dafür entwickelte. Die Grundideen gehen übrigens auf OLAV RÖMER selber zurück.

Man sucht sich zwei Sterne aus, die kurz nacheinander den Meridian passieren und bei ihrer Kulmination sehr nahe die gleiche Zenitdistanz haben, aber der eine geht südlich vom Zenit durch den Meridian, der andere nördlich vom Zenit. Die Meridianzenitdistanzdifferenz beider Sterne eines Paares darf den Durchmesser des Gesichtsfeldes nicht überschreiten, soll sogar merklich kleiner, höchstens gleich dem halben Gesichtsfelddurchmesser sein. Man stellt das Fernrohr auf die mittlere Zenitdistanz beider Sterne ein und richtet es auf den ersten durch den Meridian gehenden Stern, nachher dreht man die Alhidade um 180° um die Stehachse, dann wird der zweite Stern das Gesichtsfeld durchqueren; beider Wege verlaufen symmetrisch zum horizontalen Mittelstrich im Abstand der halben Zenitdistanzdifferenz von ihm. Den genauen Abstand beider Wege, also die volle Zenitdistanzdifferenz misst man mit dem Mikrometer, indem man den beweglichen Meßstrich jedesmal beim Meridiandurchgang mit dem jeweiligen Stern zur Deckung bringt; volle Umdrehungen der Mikrometerschraube kann man an einer Skala im Gesichtsfeld ablesen, Teile einer Umdrehung an der Teilung einer Trommel am Kopf der Spindel. Grössenordnungsmässig entspricht eine volle Umdrehung 100–150″ und $^1/_{1000}$ Umdrehung kann man gut schätzen. Um zu kontrollieren, dass das Fernrohr bei beiden Sternen eines Paares auch wirklich zur gleichen Zenitdistanz weist, klemmt man wieder das schon bei der ZINGER-Methode erwähnte HORREBOW-Niveau fest an die Kippachse und notiert bei beiden Sternen die Blasenstellung. Schliesslich wird man zur Erhöhung der Genauigkeit bei jedem Stern mehrere Einstellungen des beweglichen Striches vor und nach dem Meridiandurchgang symmetrisch zum Meridian machen und die abgelesenen Werte nach einer leicht zu berechnenden Korrektur wegen der Krümmung des Parallels mitteln.

Die HORREBOW-TALCOTT-Methode ist sehr genau und zuverlässig. Man vermeidet Kreisteilungsfehler, weil man den Kreis nur zum Einstellen braucht. Fehler der Mikrometerspindel können sich auswirken, doch sind die meist so klein, dass man sie vernachlässigen kann, ernsthafter sind vom Niveau herrührende Fehler, die auf Schliffehler, auf die Einflüsse der Temperatur und vor allem des Windes zurückzuführen sind. Die Refraktion braucht man wegen des geringen Unterschiedes der Zenitdistanzen nur differentiell zu berücksichtigen und die ganze Auswertung ist ziemlich bequem. Als einzigen Nachteil der Methode kann man ansehen, dass unter den Sternen des FK4 viel zu wenig passende Sternpaare zu finden sind. Man muss also umfangreichere Sternkataloge zur Hilfe nehmen, die auch noch etwas schwächere Sterne enthalten, so vor allem den Boss-Katalog mit 33 342 Sternen. Allerdings sind die Sternörter dieses Kataloges nicht ganz so zuverlässig wie die des FK4, sodann muss man auch die Reduktion auf den scheinbaren Ort für das Beobachtungsdatum durchführen, da es für diese Sterne keine solchen bequemen Sternephemeriden gibt. Diese Berechnung ist etwas mühsam, wofern man nicht das Verfahren programmiert und einen Computer benutzt.

Aus diesen Gründen verwendet man die HORREBOW-TALCOTT-Methode selten bei Feldbeobachtungen, hingegen gern auf Observatorien, wo grössere Instrumente fest aufgestellt sind, wo man entsprechend der konstanten Breite immer die gleichen Sternpaare benutzen kann, die man sich ein für alle Male heraussucht. Auf solchen Stationen macht man laufend Polhöhenbestimmungen, um die kleinen Schwankungen der Polhöhe herauszufinden, die von der Polwanderung herrühren. Um die ruhend gedachte Rotationsachse der Erde, die allerdings auch nicht «ruht», sondern bestimmte, aber wohl bekannte Kreiselbewegungen ausführt, die mit Präzession und Nutation bezeichnet werden, taumelt der Erdkörper, so dass die Durchstosspunkte der Rotationsachse durch die Erdoberfläche, das sind die Pole auf der Erde, um eine mittlere Lage wandern. Wir kennen mehr oder weniger periodische Bewegungen mit zwei Perioden, die sich überlagern, aber auch mit der Zeit fortschreitende Verschiebungen. Alle diese Effekte sind sehr klein, und es gehören viele und sehr genaue Beobachtungen dazu, um sie überzeugend zu ermitteln. Man hat auch ein spezielles Instrument konstruiert, auf TALCOTT gehen schon die Ideen dafür zurück, das für diese Methode besonders zweckmässig ist, das Zenitteleskop, das man jetzt meist in der Form des photographischen Zenitteleskops verwendet. Das gleiche Instrument benutzt man übrigens heute auch für Zeitbestimmungen auf festen Stationen, um gewisse Unregelmässigkeiten der Erdrotation zu kontrollieren. Doch soll darauf und auch auf ein anderes für derartige Zwecke sehr wichtiges Instrument, den Prismenastrolab, nicht näher eingegangen werden, da es sich nicht um transportable Feldinstrumente handelt, wie man sie zu Positionsmessungen auf neu zu bestimmenden Punkten der Erde braucht.

Methoden der Azimutmessungen

Von den Methoden der Azimutmessung kommt in unsern Breiten eigentlich nur die Polarismethode in Frage, die ein rasches Arbeiten ermöglicht und sich gut bewährt hat. Wenn man das Azimut eines irdischen Zieles, also z. B. das Signal eines Triangulationspunktes bei Tage oder nachts einen dort aufgestellten Scheinwerfer, an einen Stern anschliessen und damit seine astronomisch definierte Richtung messen will, so kann man das im Prinzip mit jedem Stern ma-

chen. Man stellt zuerst das irdische Ziel ein und liest den Horizontalkreis ab, dann richtet man das Fernrohr auf den Stern, registriert die Zeit, wenn er genau auf dem vertikalen Mittelstrich steht, und liest wieder den Kreis ab; das gleiche wiederholt man dann in der anderen Fernrohrlage, legt also um, damit man sich vom Einfluss des Kollimationsfehlers befreit. Dass man auch wieder die Stehachsenschiefe, die das Resultat etwas verfälscht, mit dem Niveau bestimmen und ihren Einfluss berücksichtigen muss, sei nur nebenbei erwähnt.

So wie bei den früheren Methoden wird man sich auch hier überlegen, welchen Stern man sich aussucht und wo am Himmel man ihn beobachtet, damit das Resultat möglichst genau herauskommt. Aus den Differentialformeln ersieht man, dass es am günstigsten ist, entweder Sterne sehr grosser Deklination, also polnahe Sterne, zu wählen, oder Sterne in der grössten Digression zu beobachten, worunter folgendes zu verstehen ist: Wenn Sterne zwischen Pol und Zenit kulminieren, also auf der nördlichen Halbkugel nördlich, nicht südlich vom Zenit, können sie auch nicht alle Azimutwerte von 0° bis 360° einnehmen, wie man sich leicht klar machen kann, sondern sie pendeln zwischen zwei Extremwerten des Azimuts hin und her, die symmetrisch zu 180° liegen. Die Stellen dieser Grenzwerte des Azimuts erhält man, indem man vom Zenit aus die tangierenden Vertikalkreise an den Kleinkreis um den Pol legt, den der Stern in einem Tag durchläuft, und sie heissen die Digressionen. Man sieht leicht ein, dass hier der Stern eine kurze Zeit sein Azimut überhaupt nicht und in der Nähe der Digression auch nur sehr langsam ändert. Man kann also nahe der Digression den Stern sehr bequem einstellen und Fehler der Zeit der Beobachtung spielen kaum eine Rolle. Das einzige, was vorbereitet werden muss, ist, dass man sich eine schön nach Sternzeit geordnete Liste von Sternen anfertigt, die in die grösste Digression kommen. In sehr hohen Breiten sind das nur wenige Sterne, mit abnehmender Breite werden es immer mehr.

Das ist auch gar keine ungeschickte Verteilung, denn in hohen und auch schon in mittleren Breiten wird man lieber die andere der beiden vorhin aufgeführten Möglichkeiten benutzen, nämlich Sterne grosser Deklination. Solche Sterne bewegen sich sehr langsam, denn sie müssen ja in einem Tag nur einen ganz kleinen Kreis um den Pol beschreiben, somit ändert sich ihr Azimut nur wenig, und Fehler in der Zeit des Einstellens spielen eine geringe Rolle. Auf der Nordhalbkugel haben wir dafür einen sehr günstigen Stern, Polaris, α im kleinen Bären. Er ist weniger als 1° vom Pol entfernt und bewegt sich in einer Sekunde nur um 0.23″, was sich auf Zenitdistanz- und Azimutänderungen verteilt und je nach der Ortssternzeit im Azimut noch merklich kleiner ist. Das Azimut von Polaris pendelt in unseren Breiten zwischen 178½° und 181½° hin und her. Übrigens kommt Polaris wegen der Präzession im nächsten Jahrhundert dem Himmelspol noch etwas näher, um sich dann später wieder zu entfernen. Ein weiterer Vorzug von ihm ist seine beachtliche Helligkeit von 2.12 Grössenklassen. Man findet ihn dadurch stets leicht, kann ihn mit den Universalinstrumenten T4 und DKM3A sogar gut bei Tage beobachten, wovon man häufig Gebrauch macht. Nachts ist er manchmal fast zu hell, was sich auf das Einstellen eher ungünstig auswirkt; es ist bisweilen ganz nützlich, dann das Objektiv irgendwie abzublenden. Man kann nachts auch stattdessen den Stern λ im kleinen Bären beobachten, er ist dem Pol fast so nahe wie Polaris, hat aber nur die Helligkeit 6.55, man sieht ihn also mit blossem Auge kaum mehr. So ist er weniger bequem zu finden und die Sicht sollte sehr gut sein. Auf der Südhalbkugel hat man in der Nähe des südlichen Himmelspols den Stern σ Octantis; sein Polabstand beträgt knapp 1° und er hat die Helligkeit 5.48, so gilt für ihn Ähnliches wie für λ im kleinen Bären.

Es gibt noch manch andere Methode, um mit Hilfe der Sterne die Erde zu vermessen, auch die künstlichen Satelliten benutzt man heute dazu, also künstliche Sterne, doch wir wollen nicht alles bringen. Es sollte hier nur einmal gezeigt werden, dass und warum wir auch für geodätische Messungen unsere Sterne immer noch gebrauchen, welche Methoden wir dabei bevorzugen und welches die Gründe dafür sind.

Adresse des Verfassers: Prof. Dr. Helmut Müller, Herzogenmühlestrasse 4, 8051 Zürich.

Observations des occultations de β Scorpii les 13 et 14 mai 1971

par Jean Dragesco, Yaoundé

1. Occultation de β Scorpii par Jupiter
le 13 mai 1971 à Yaoundé (longitude est 0^h46^m; latitude nord +3°51′).

Conditions d'observation: Telescope Newton de 260mm (1:6); grossissement 265×; photographies avec oculaires de 16 et 20 mm ou lentille de Barlow 2×; film Ilford Pan F; poses 1 à 9 secondes; images turbulentes au début, moyennes ensuite.

L'immersion de β_2 et β_1 Scorpii a été invisible à Yaoundé.

Les temps d'émersions de β_1 et β_2 Scorpii sont donnés dans le tableau suivant.

étoile	*émersion prévue par éphémérides*		*émersion réelle*
	Meudon	*Astron. Ephemeris*	
β_1 Scorpii	20^h06^m TU	19^h54^m TU	$19^h52^m30^s$ TU
β_2 Scorpii	20^h33^m TU	20^h18^m TU	$20^h17^m30^s$ TU

L'éphéméride de Astronomical Ephemeris correspond mieux à la réalité. Remarquons aussi que les deux émersions ont été séparées par 25 minutes (au lieu des 27 et 24 données par les éphémérides).