

Astrogeodätische Lotabweichungsbestimmung mit dem digitalen Zenitkamerasystem TZK2-D

Christian Hirt und Günter Seeber

Zusammenfassung

Mit der Verfügbarkeit von CCD-Sensoren zur digitalen Bild erfassung hat sich ein durchgreifender Wandel in der astronomischen Beobachtungstechnik vollzogen. Im Bereich der geodätischen Astronomie ist es dadurch in jüngster Zeit möglich geworden, die Messdatenerfassung zu automatisieren und astrogeodätische Lotrichtungsbestimmungen praktisch in Echtzeit durchzuführen. Am Institut für Erdmessung der Universität Hannover wurde eine konventionelle, fotografische Zenitkamera zu einem echtzeitfähigen Digitalmesssystem umgebaut und ein leistungsfähiges Auswertesystem zur vollautomatischen Datenprozessierung entwickelt. In Verbindung mit einem GPS-Empfänger können mit dem System Lotabweichungen wirtschaftlich und hochgenau online bereitgestellt werden. Die geodätische Astronomie kann damit auf erfolgversprechende Perspektiven für die hochgenaue lokale Geoidbestimmung und hochauflösende lokale Schwerfeldmodellierung blicken.

Summary

The availability of CCD sensors for digital image data acquisition has considerably changed astronomic observation techniques and replaced conventional measurement methods. In the field of geodetic astronomy, this progress has enabled the automation from data acquisition to processing giving the plumb line's direction practically in real-time. At the Institut für Erdmessung of the Universität Hannover, a conventional photographic zenith camera has been converted into a real-time capable digital measurement system. A powerful software system for automatic data processing has been developed. Combined with a GPS receiver, the system allows the economic and high-precision online determination of vertical deflections. Geodetic astronomy offers encouraging prospects for high-precision local geoid determination and high-resolution local gravity field modelling.

1 Einleitung

Eine Grundaufgabe der Geodäsie besteht darin, das Geoid möglichst exakt zu bestimmen. Als wesentliche terrestrische Messgrößen können dazu die Schwerkraft g und die astronomischen Koordinaten Breite Φ und Länge Λ verwendet werden, die den lokalen Schwerkraftvektor \mathbf{g} vollständig beschreiben

$$\mathbf{g} = -g \cdot \begin{pmatrix} \cos \Phi \cos \Lambda \\ \cos \Phi \sin \Lambda \\ \sin \Phi \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Die astronomischen Koordinaten legen die örtliche, physikalische Lotrichtung im geozentrischen System fest und werden daher auch als Lotrichtungsparameter bezeichnet. Mit den Lotrichtungsparametern können die auf die lokale Lotrichtung bezogenen terrestrischen Messgrößen Azimut, Horizontalrichtungen und Zenitwinkel im geozentrischen System orientiert werden.

Der Vergleich von astronomischen Lotrichtungsparametern (Φ, Λ) mit ellipsoidischen Lotrichtungsparametern (φ, λ) führt zu den Lotabweichungskomponenten ξ im Meridian und η im ersten Vertikal

$$\xi = \Phi - \varphi \quad \eta = (\Lambda - \lambda) \cos \varphi. \quad (2)$$

Ihnen kommt eine besondere Bedeutung zu, da sie das Maß für die Neigung des Geoids gegenüber dem Ellipsoid sind und für die astrogeodätische Geoidbestimmung nach dem von Helmert eingeführten astronomischen Nivellement verwendet werden können. Die Differenz der Geoidundulation ΔN_{12} zwischen zwei Punkten P1 und P2 ergibt sich dabei zu

$$\Delta N_{12} = - \int_1^2 (\xi \cos \alpha + \eta \sin \alpha) ds - E_{12}. \quad (3)$$

Die Größe ds ist ein differentielles Wegelement im Azimut α . E_{12} ist die orthometrische Korrektion, die aufgrund der Lotkrümmung anzubringen ist (Torge 2001).

Das am Institut für Erdmessung entwickelte digitale Zenitkamerasystem TZK2-D (Transportable Zenitkamera-2-Digitalsystem) ist ein leistungsfähiges astrogeodätisches Instrument zur Online-Bestimmung der Lotabweichungskomponenten ξ und η . Das System setzt sich aus zwei Hauptkomponenten zusammen, der digitalen Zenitkamera zur physikalischen Lotrichtungsbestimmung und einem GPS-Empfänger zur Bestimmung der ellipsoidischen Lotrichtung.

Da die Methodik der ellipsoidischen Lotrichtungsbestimmung mit GPS in den Lehrbüchern zur Satellitengeodäsie hinreichend abgehandelt ist, wird in diesem Aufsatz vorrangig die Bestimmung der physikalischen Lotrichtung mit der digitalen Zenitkamera dargestellt. Schwerpunkte sind dabei das technische Design des digitalen Zenitkamerasystems und die Datenauswertung.

2 Lotrichtungsbestimmung mit der Zenitkamera

Eine Zenitkamera ist eine lotrecht aufstellbare, azimuthal drehbare Kamera, mit der zenitnahe Sterne auf einem

lichtempfindlichen Sensor (CCD¹ oder Fotoplatte) abgebildet werden können. Aus den Zenitaufnahmen in zwei sich um 180 Grad unterscheidenden Aufnahmelagen können unter Verwendung geeigneter Sternkataloge die astronomischen Lotrichtungsparameter (Φ, Λ) berechnet werden.

Mit einer Zenitkamera wird das nachfolgend dargestellte Grundprinzip der astronomischen Ortsbestimmung besonders anschaulich umgesetzt. Abb. 1 zeigt das raumfeste Koordinatensystem, in dem die Positionen von Sternen mit den Äquatorialkoordinaten Deklination δ und Rektaszension α beschrieben werden können. Ein Standpunkt auf der Erdoberfläche lässt sich im erdfesten Koordinatensystem bekanntlich mit den astronomischen Koordinaten Breite Φ und Länge Λ festlegen². Die beiden Koordinatensysteme unterscheiden sich nur durch den Einfluss der Erdrotation, für die die scheinbare Greenwicher Sternzeit Θ ein Maß ist. Für den Zenitpunkt Z auf der Himmelskugel und die Lotrichtung im Beobachtungs-ort B sind die astronomischen und äquatorialen Koordinaten bis auf die Sternzeit Θ identisch (Seeber 1978)

$$\Phi = \delta \quad \Lambda = \alpha - \Theta. \quad (4)$$

Ein direkt im Zenitpunkt stehender Stern würde mit seinen Äquatorialkoordinaten (δ, α) zur Beobachtungszeit Θ direkt die gesuchten astronomischen Koordinaten (Φ, Λ) angeben. In der Praxis stehen Gestirne in der Regel jedoch nur zenitnah, deshalb ist die Zenitrichtung in das mit der Zenitkamera erfasserte Feld zenitnaher Sterne zu interpolieren. Vor der Interpolation des Zenitpunktes ist es notwendig, die Bildkoordinaten (x, y) der in den Zenitaufnahmen abgebildeten Sterne astrometrisch zu bestimmen. Die Bildkoordinaten (x, y) der Sterne müssen mit den Äquatorialkoordinaten (δ, α), die einem Sternkatalog entnommen werden können und als Referenz dienen, verknüpft werden. Dies geschieht nach der Sternidentifizierung über einen geeigneten Transformationsansatz (Abschnitt 6).

Von besonderer Bedeutung ist nach Formel 4 die Erfassung des Belichtungszeitpunktes Θ , da nur dadurch die astronomische Länge Λ berechnet werden kann. Zur hochgenauen Zeitmessung stehen heute die Signale des GPS zur Verfügung (Abschnitt 4.3).

Bei der Lotrichtungsbestimmung mit einer Zenitkamera wird die Zenitrichtung als Gegenstück der Lotrichtung

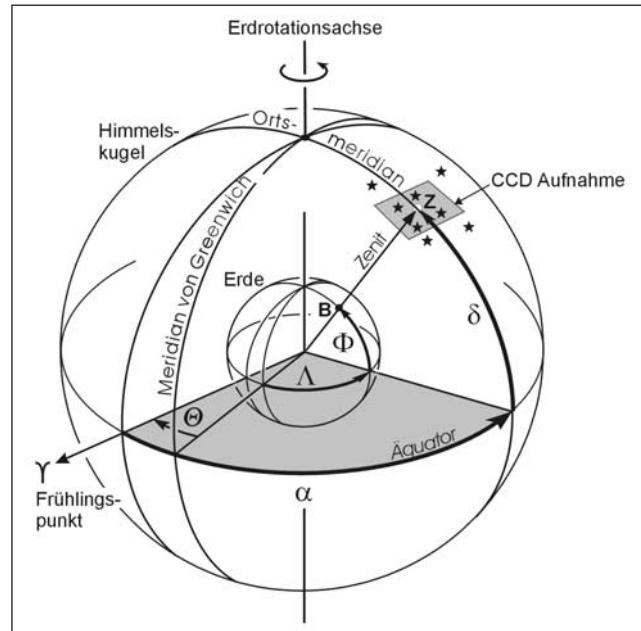


Abb. 1: Grundprinzip der astronomischen Lotrichtungsbestimmung

durch die Kameradrehachse annähernd realisiert. Abweichungen zwischen der Drehachse und der Lotrichtung werden mit elektronischen Neigungssensoren erfasst (Abschnitt 4.4).

3 Zenitkameraentwicklungen in Hannover

Die Entwicklung von Zenitkameras zur astrogeodätischen Lotrichtungsbestimmung kann in Hannover auf eine jahrzehntelange Tradition zurückblicken. Ausgehend von den positiven Erfahrungen einer Prototypentwicklung in den siebziger Jahren wurde die transportable Zenitkamera TZK1 für den operationellen Einsatz konstruiert (Gessler 1975). In den nachfolgenden Jahren wurde die transportable Zenitkamera TZK2 entwickelt, die eine kompakte Weiterentwicklung gegenüber der TZK1 ist (Wissel 1982). Ein in Hannover konstruiertes, mit der TZK2 etwa baugleiches Zenitkameramodell TZK3 wird seit 1983 am Institut für Geodäsie und Photogrammetrie der ETH Zürich genutzt. Die hannoverschen Zenitkamerasysteme wurden in den achtziger Jahren sehr erfolgreich zur Lotrichtungsbestimmung in Deutschland, Dänemark, der Schweiz, Brasilien, Venezuela und anderen Ländern eingesetzt (Seeber und Torge 1985). Die mit einer durchschnittlichen Genauigkeit von etwa 0.5 Bogensekunden durchgeföhrten astronomischen Messungen wurden hauptsächlich zur lokalen und regionalen astrogeodätischen Geoidbestimmung verwendet.

Im letzten Jahrzehnt jedoch wurden Zenitkameras nur noch selten eingesetzt. Das fotografische Verfahren konnte die gestiegenen Standards der Geodäsie hinsichtlich Methodik und Wirtschaftlichkeit nicht mehr erfüllen. Dies sind insbesondere die Messdatenerfassung mit digitalen Sensoren, automatischer Messdatenfluss und eine

1 Charge Coupled Device

2 Die Abbildung zeigt die erdfesten Koordinaten (Φ, Λ) in einer etwas vereinfachten Darstellung. Aufgrund der Erdabplattung und der unregelmäßigen Ausprägung des Erdschwerefeldes schneiden sich die Lotrichtungen bei einer exakten Darstellung nicht direkt im Geozentrum. Aufgrund des unendlich großen Radius der Himmelskugel ist es zulässig, die Lotrichtungen parallel ins Geozentrum zu verschieben. Dadurch lassen sich die krummlinigen astronomischen Koordinaten (Φ, Λ) in streng sphärische Äquatorialkoordinaten (δ, α) überführen.

weitgehend automatische, echtzeitfähige Datenprozessierung, die eine Genauigkeitskontrolle der Messdaten im Feld ermöglicht. Als den heutigen geodätischen Standards entgegenstehend ist besonders der Entwicklungsprozess und die anschließende manuelle Ausmessung der auf den Fotoplatten abgebildeten Sterne an einem Komparator zu nennen. Dieser Prozess gilt mit etwa einer Stunde häuslicher Bearbeitungszeit als ein an heutigen Maßstäben gemessener sehr zeitintensiver Auswertschritt von fotografischen Zenitkameramessungen. Wirtschaftliche und präzise gravimetrische Methoden sowie die zunehmende Verfügbarkeit von Satellitedaten drängten zudem astrogodätische Verfahren zur Geoidbestimmung in den Hintergrund.

Auf dem Gebiet der Astronomie hat in jüngerer Zeit die auf die CCD-Technologie gestützte Digitalfotografie die konventionelle Fotografie fast vollständig abgelöst. CCD-Sensoren sind Silizium-Halbleiter und bestehen aus matrixförmig angeordneten, lichtempfindlichen Pixeln mit einer Ausdehnung von wenigen Mikrometern. Beim Auftreffen von Photonen werden aufgrund des lichtelektrischen Effektes Elektronen aus dem Silizium herausgelöst, wobei sich die Anzahl der herausgelösten Elektronen proportional zur Anzahl eingetroffener Photonen verhält. CCD-Sensoren weisen eine ungleich höhere Lichtempfindlichkeit als fotografische Platten auf und zeichnen sich durch die unmittelbare Verfügbarkeit der Bildinformation aus. Hierdurch ist die Möglichkeit zur sofortigen Datenprozessierung im Rahmen von Echtzeitanwendungen gegeben.

Diese Entwicklungen wurden am Institut für Erdmessung aufgegriffen und die fotografische Zenitkamera TZK2 mit einem CCD-Sensor zu einem echtzeitfähigen Digitalmesssystem umgerüstet. Die mit dem digitalen Zenitkamerasytem TZK2-D erfassten Messinformationen (Abschnitt 5) werden in einem vollautomatisierten Datenfluss auf einen Feldrechner übertragen und können dort mit einem neu entwickelten, leistungsfähigen Softwaresystem in Echtzeit ausgewertet werden (Abschnitt 6). Das digitale Zenitkamerasytem TZK2-D ermöglicht damit eine weitgehend automatisierte Lotrichtungsbestimmung, die den heutigen geodätischen Standards gerecht wird. Die gegenüber fotografischen Zenitkamerasytemen erheblich gestiegene Wirtschaftlichkeit, aber auch die absehbare deutliche Verbesserung der Genauigkeit (Abschnitt 7) eröffnen ermutigende Aussichten für die Wiederbelebung von astrogodätischen Methoden im Rahmen der hochpräzisen lokalen Geoidbestimmung (Abschnitt 8).

4 Systemdesign

Das digitale Zenitkamerasytem TZK2-D setzt sich aus der transportablen Zenitkamera TZK2 (Abb. 2), einem CCD-Sensor, einem GPS-Empfänger, zwei elektronischen Neigungssensoren und einem Industrierechner zusammen.



Abb. 2: Digitale Zenitkamera TZK2-D

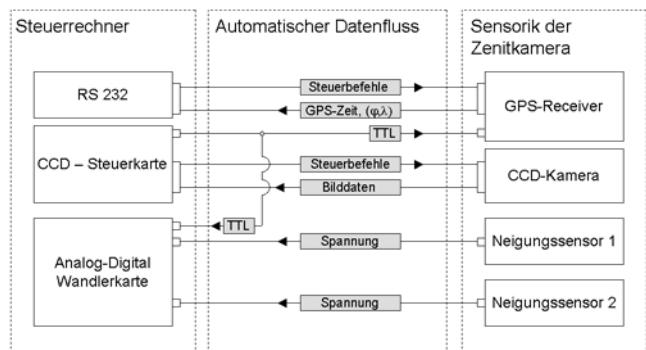


Abb. 3: Konzeption des digitalen Zenitkamerasytems

Dieser dient zur Steuerung der Sensorik des Zenitkamerasytems, der Messdatenerfassung und -speicherung sowie der sofortigen Datenprozessierung im Felde. Abb. 3 verdeutlicht die Konzeption des Zenitkamerasytems.

4.1 Zenitkamera TZK2

Als mechanische und optische Komponenten des digitalen Zenitkamerasytems werden das Objektiv, der Drehkreis und der Unterbau mit Fokussiereinheit der 1982 am Institut entwickelten TZK2 verwendet. Das Objektiv als optische Komponente ist das Spiegelinsensystem Mirotar der Firma Zeiss mit einer Brennweite von 1000 mm bei verkürzter Bauweise und einem Gesichtsfeld von 3.6 Grad. Es zeichnet sich durch große Lichtstärke (20 cm

Durchmesser) und geringe Verzeichnung aus. Das mit dem Drehkreis fest verbundene Objektiv lässt sich azimuthal um 180 Grad drehen. Hierdurch wird die Messung in zwei Lagen zur Elimination des Einflusses der CCD-Sensorexzentrizität (Abschnitt 6.5) und der Nullpunktfehler der elektronischen Neigungssensoren möglich. Die stabile Bauweise der TZK2 Mechanik und die Präzision der Optik hat sich im Laufe vieler Einsätze des fotografischen Zenitkamerasystems bewährt.

4.2 CCD-Kamera

In der Fokalebene des Objektives ist die CCD-Kamera KX2E (Abb. 4) der Firma Apogee montiert und ersetzt dort die Fotoplatte. Der in der CCD-Kamera eingebaute digitale Sensor KAF-1602E der Firma Kodak ist das Herzstück des Zenitkamerasystems. Der Sensor besteht aus 1530 x 1020 Pixeln mit je $9\mu\text{m}$ Kantenlänge und hat eine Größe von 13.8 mm x 9.2 mm. Die lichtempfindliche Fläche nutzt nicht die gesamte Bildinformation des Gesichtsfeldes, sondern nur ein effektives Gesichtsfeld von 47.2 Bogenminuten x 31.5 Bogenminuten. Dadurch ergibt sich ein Maßstab von etwa 1.85 Bogensekunden/Pixel im digitalen Bild. Die Verwendung des CCD-Sensors führt zu einer beachtlichen Steigerung der erreichbaren Grenzgröße. Mit der fotografischen Zenitkamera konnten Sterne bis zur 10. Größenklasse abgebildet werden. Durch Einsatz der Digitaltechnik ist es nun möglich, Sterne bis zur 14. Größenklasse zu erfassen.

Die CCD-Kamera besitzt eine thermoelektrische Kühlung, um den Dunkelstrom zu reduzieren. Unter dem Dunkelstrom, einer der wesentlichen radiometrischen Fehlerquellen bei CCD-Sensoren, versteht man die Erzeugung von Elektronen auf dem CCD-Sensor durch Wärme und nicht durch Photonen der Sterne.

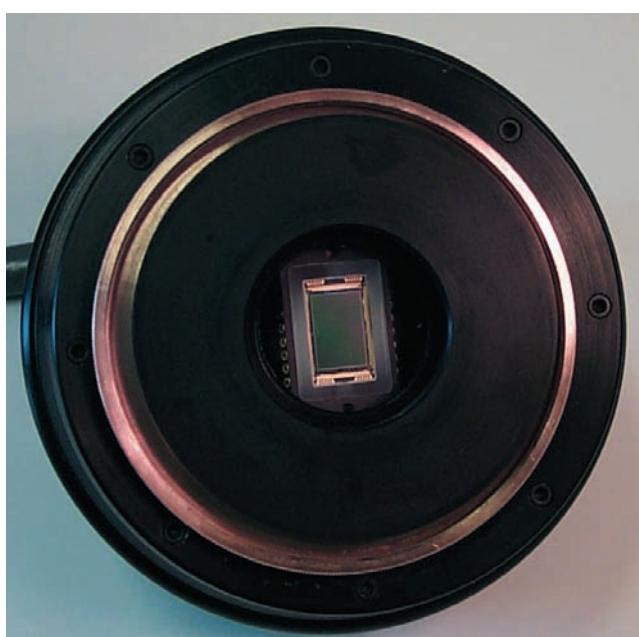


Abb. 4: CCD-Kamera KX2E

Über eine schnelle Ausleseeinheit kann innerhalb von weniger als 3 Sekunden der CCD-Sensor ausgelesen und das Bild über die PCI-Schnittstelle an den Industrierechner übertragen werden. Dadurch ist die Voraussetzung geschaffen, innerhalb kurzer Zeit Wiederholungsmessungen zur Steigerung der Genauigkeit der Lotrichtungsparameter und deren Zuverlässigkeit durchzuführen.

4.3 GPS-Empfänger und Zeiterfassung

Zur Bestimmung der ellipsoidischen Koordinaten (φ, λ) und des Belichtungszeitpunktes wird ein GPS-Empfänger Z12 der Firma Ashtech verwendet. Die Positionsbestimmung erfolgt gegenwärtig nach dem einfachen DGPS-Prinzip. Die erreichbare Genauigkeit für die ellipsoidische Breite und Länge liegt in der Größenordnung von etwa 1 m. Diese Genauigkeit entspricht etwa 0.03 (0.05) Bogensekunden in der ellipsoidischen Breite (Länge)³ und genügt damit vollständig den Anforderungen. Die ellipsoidischen Koordinaten werden nicht nur für die Lotabweichungsberechnung (Gleichung 2) verwendet, sondern auch als Näherungskoordinaten für die physikalische Lotrichtungsbestimmung (Gleichung 12).

Essentielle Bedeutung hat GPS für die Zeiterfassung. Die GPS-Zeitsignale sind auf die GPS-Zeitskala bezogen, die direkt über einen Offset mit der Zeitskala UTC verknüpft ist (Seeber 1993). Die Atomzeit UTC kann über die an die Erdrotation gebundene Zeit UT1 in Sternzeit Θ umgerechnet werden, die für die Berechnung der astronomischen Länge mit Gleichung 4 benötigt wird. Die Transformation zwischen den Zeitskalen ist beispielsweise in Schödlbauer (2000) ausführlich dargestellt.

Auf der Hardwareebene wurde durch Verbindung der Steuereinheit der CCD-Kamera mit dem GPS-Empfänger eine automatische Prozedur zur Zeiterfassung implementiert. An der Steuereinheit der CCD-Kamera kann eine Spannung abgegriffen werden, die als logisches Signal (TTL) angibt, ob der Verschluss der CCD-Kamera geöffnet ist. Dieses TTL-Signal wird in den Ereigniseingang des GPS-Empfängers geleitet. Der Beginn einer Belichtung wird über die aufsteigende Flanke des TTL-Signals als Ereignis auf der Zeitskala des GPS-Empfängers festgehalten. Der GPS-Empfänger gibt den Belichtungszeitpunkt im ASCII-Format auf die RS 232 Schnittstelle des Industrierechners.

Die Genauigkeit dieser Prozedur wird durch das zeitliche Verhalten des Verschlusses begrenzt. Nach der Kalibrierung etwaig vorhandener systematischer Verzögerungen lässt sich eine äußere Genauigkeit für die Zeitmessung in der Größenordnung von etwa 1 Millisekunde erreichen. Die Auswirkung eines Zeitfehlers von dieser Größenordnung auf die astronomische Länge lässt sich leicht abschätzen. Das erdfeste Bezugssystem bewegt sich gegenüber dem raumfesten System mit einer Winkelge-

³ für eine Breite von 50°

schwindigkeit von 15 Bogensekunden pro Zeitsekunde. Folglich verfälscht ein Zeitfehler von 1 Millisekunde die astronomische Länge um 0.015 Bogensekunden und fällt damit im Gesamtfehlerbudget der Messung nicht ins Gewicht. Die Genauigkeit der Längenbestimmung wird hierdurch weitgehend an die Genauigkeit der Breitenbestimmung herangeführt. Die Verwendung von GPS für die Zeiterfassung ist neben der Nutzung der CCD-Technologie eine wesentliche Verbesserung des früheren fotografischen Zenitkamerasytems.

4.4 Elektronische Neigungssensoren

Die Zenitkamera ist mit zwei zueinander senkrecht angeordneten elektronischen Neigungssensoren ausgestattet, mit denen der Bezug zur Lotrichtung realisiert wird. Die Neigungssensoren werden vor der eigentlichen Messung zur Horizontierung der Zenitkamera verwendet. Während der Zenitkameramessung wird die verbleibende Restneigung der Kameradrehachse gegenüber der Lotrichtung erfasst, damit eine anschließende rechnerische Korrektur möglich wird (Korrektur des Stehachsfehlers).

Als Maß für die Neigung liefern die elektronischen Neigungssensoren ein analoges Spannungssignal, das mit einer Analog-Digital-Wandlerkarte mit 16 Bit digitalisiert wird. Die Signalwandlung wird mit einer Abtastfrequenz von 100 Hz durchgeführt. Um die Neigungsmessungen den Zenitaufnahmen zeitlich zuordnen zu können, wird auch das TTL-Signal vom Verschluss der CCD-Kamera mit der Analog-Digital-Wandlerkarte registriert.

In der gegenwärtigen Systemkonfiguration werden Neigungssensoren vom Typ Talyvel-2 der Firma Taylor-Hobson eingesetzt, die eine Genauigkeit von ca. 0.2 Bogensekunden aufweisen. Die Steigerung der Genauigkeit der Neigungsmessung ist Gegenstand aktueller Untersuchungen am Institut für Erdmessung. Dazu werden gegenwärtig zwei hochpräzise Neigungssensoren HRTM (High Resolution Tiltmeter der Firma Lippmann Geophysikalische Messgeräte) für den Einsatz im Zenitkamera-system konfiguriert.

5 Datenerfassung

Nach der Horizontierung der digitalen Zenitkamera mit den elektronischen Neigungssensoren und der Fokussierung der CCD-Kamera wird rechnergesteuert eine vollautomatische Prozedur zur Messdatenerfassung abgearbeitet, die pro Lage etwa 10 Sekunden in Anspruch nimmt. Nach Start der Prozedur in Lage 1 öffnet die CCD-Kamera ihren Verschluss und bildet zenithnahe Sterne auf dem CCD-Sensor während typischer Integrationszeiten zwischen 0.5 und 1.0 Sekunden ab. Parallel dazu wird während der Belichtung das Signal der elektronischen Neigungssensoren mit der Analog-Digital-Wandlerkarte registriert und die Zeiterfassung mit GPS durchgeführt.

Dazu wird, wie bereits beschrieben, das TTL-Signal vom CCD-Kameraverschluss abgegriffen, in den GPS-Empfänger geleitet sowie von der Analog-Digital-Wandlerkarte registriert. Nach der Übertragung der digitalen Zenitaufnahme und der Zeitinformation vom GPS-Empfänger auf den Industrierechner wird der Oberbau der digitalen Zenitkamera durch azimutale Drehung um 180 Grad in Lage 2 gebracht. Die beschriebene Prozedur zur Messdatenerfassung wird wiederholt und schließt mit der Übertragung der ellipsoidischen Koordinaten vom GPS-Empfänger zum Industrierechner.

Zur Berechnung der Lotrichtung reicht im Prinzip eine Messung in zwei Lagen aus. Zur Erhöhung der Genauigkeit und Zuverlässigkeit werden auf jedem Punkt jedoch mindestens 5 Messungen in beiden Lagen ausgeführt. Da die Auswertung in Echtzeit möglich ist, können innere Standardabweichungen für die Lotrichtungsparameter aus Wiederholungsmessungen im Felde ermittelt werden. Ist ein zuvor festgelegtes inneres Genauigkeitsniveau nach 5 Wiederholungsmessungen noch nicht erreicht, so können weitere Messungen angeschlossen werden. Wiederholungsmessungen können vorteilhaft zur Minderung des Einflusses der atmosphärischen Szintillation⁴ auf die abgebildeten Gestirne genutzt werden.

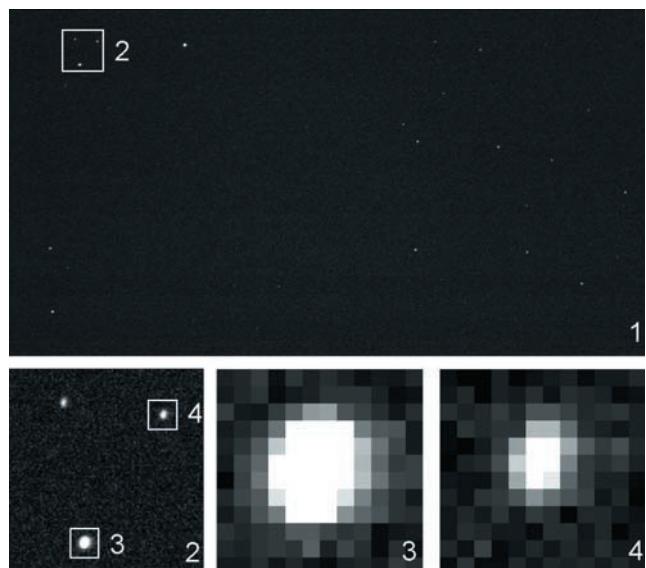


Abb. 5: Vollständige Zenitaufnahme (1) und vergrößerte Sternabbildungen (2 bis 4).

Mit einer digitalen Zenitaufnahme (Abb. 5) können in Abhängigkeit vom abgebildeten Himmelsausschnitt durchschnittlich 20 bis 30 Sterne bis zur 14. Größenklasse erfasst werden. In sternarmen Himmelsregionen finden sich im Gesichtsfeld der digitalen Zenitkamera nur etwa 10 Sterne. Stehen jedoch sternreiche Himmelsregionen (die Milchstraße) im Zenit, so können auch mehr als 100 Sterne beobachtet werden.

⁴ Unter der Szintillation versteht man die kurzperiodische Richtungsveränderung von Gestirnen um bis zu einigen Bogensekunden.

6 Auswertung

Entscheidend für die Lotrichtungsbestimmung mit einem digitalen Zenitkamerasystem ist die Verfügbarkeit einer echtzeitfähigen Auswertesoftware, die aus den digitalen Aufnahmen des zenitalen Sternfeldes unter Verwendung eines Sternkataloges als Referenz automatisch die Lotrichtungsparameter (Φ, Λ) des Kamerastandortes berechnet. Zur Auswertung der Zenitkameramessungen wurde am Institut für Erdmessung das Auswertesystem AURIGA (Automatic Realtime Image Processing System for Geodetic Astronomy) entwickelt (Hirt 2000, 2001, 2002). Es ermöglicht die vollautomatische Auswertung der Messdaten und bietet unterschiedliche Möglichkeiten zur Analyse und Visualisierung der Messdaten und Ergebnisse. Auf einem leistungsfähigen Industrierechner (1 GHz-Prozessor) dauert die Auswertung einer Zenitkameramessung in zwei Lagen zwischen 3 bis 5 Sekunden. Damit stehen die Lotrichtungsparameter (Φ, Λ) sowie die Lotabweichungskomponenten (ξ, η) online zur Verfügung. Abb. 6 zeigt die wesentlichen Teilschritte, die zur Auswertung von Zenitkameramessungen notwendig sind und nachfolgend beschrieben werden.

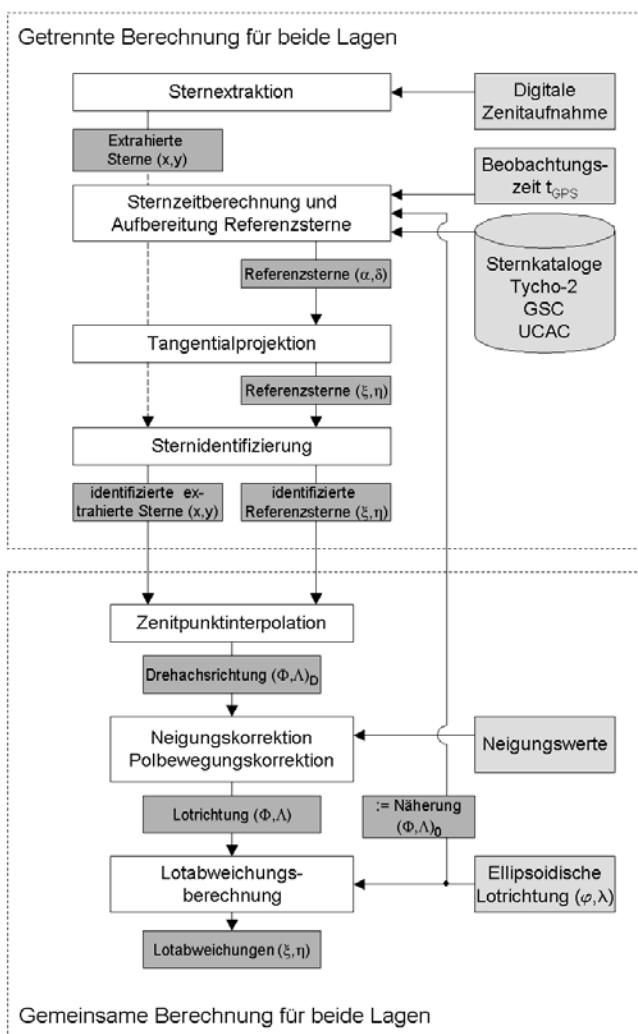


Abb. 6: Auswertung von Zenitkameramessungen

6.1 Sternextraktion

Der Gang der Auswertung beginnt mit der Prozessierung der digitalen Zenitaufnahmen. Die Abbildungen der Sterne in den digitalen Aufnahmen können mit Methoden der digitalen Bildverarbeitung automatisch extrahiert werden. Die Sternabbildungen im digitalen Bild können als Pixelgruppen mit ähnlichen Eigenschaften aufgefasst werden. Sie heben sich durch ein signifikant höheres Grauwertniveau von dem dunkleren Bildhintergrund ab (Abb. 7).

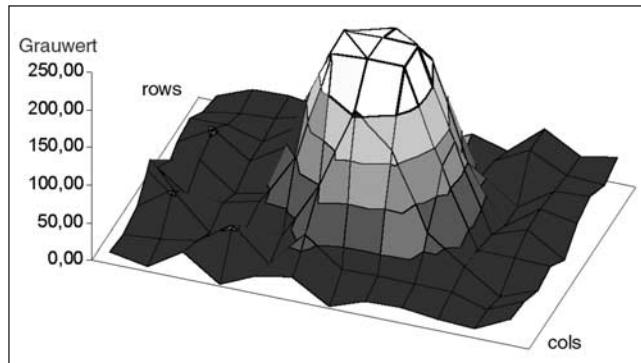


Abb. 7: Sternabbildung (3D-Darstellung)

Eine geeignete Methode zur Sternextraktion ist die Bildsegmentierung mit dem Bereichswachstumsverfahren, das in Haralick und Shapiro (1993) dargestellt ist. Dabei werden die Sternabbildungen als Pixelgruppen zu Segmente zusammengefasst und extrahiert. Durch den Prozess der Bildkoordinatenmessung wird die Lage der extrahierten Segmente innerhalb des digitalen Bildes vermessen, indem die Bildkoordinaten jedes zu einem Segment gehörenden Pixels mit seinem Grauwert linear gewichtet werden und anschließend das Mittel gebildet wird. Mit diesem Verfahren werden die Bildkoordinaten (x, y) der Sternmittelpunkte mit einer Subpixelgenauigkeit von etwa 0.1–0.2 Pixel bestimmt. Diese Genauigkeit entspricht einer Richtungsgenauigkeit von 0.2–0.4 Bogensekunden.

6.2 Referenzsterne

Bei der Auswertung von Zenitaufnahmen übernehmen Referenzsterne die Funktion von koordinatenmäßig bekannten Anschlusspunkten. Die Äquatorialkoordinaten (δ, α) von Referenzsternen sind in Sternkatalogen verfaßt, die von astrometrischen Institutionen veröffentlicht werden. Referenzsterne für die Zenitaufnahme werden in Abhängigkeit von genäherter Standortkoordinaten der Kamera, der Beobachtungszeit (scheinbare Greenwicher Sternzeit Θ) und der Größe des mit dem CCD-Sensor erfassbaren Himmelsausschnitts aus dem Sternkatalog entnommen. Die Koordinaten der Referenzsterne sind von bestimmten zeitabhängigen physikalischen Phänomenen (Eigenbewegung der Gestirne, Nutation und Präzession der Erde sowie jährliche und tägliche Aberration des Lichtes) abhängig, deren Einfluss entsprechend korrigiert

werden muss. Ausführliche Formeldarstellungen hierzu finden sich in Seidelmann (1992).

Mit der digitalen Zenitkamera TZK2-D können – über die gesamte Himmelskugel verteilt – mehr als 13 Millionen Sterne erfasst werden, für die korrespondierende Referenzsterne verfügbar sein müssen. Mit den beiden Katalogen Tycho-2 (Hog et al. 2000) und dem Guide Star Catalogue (GSC) (McLean 1997) sind umfassende Sternverzeichnisse vorhanden, die sich für die Auswertung von digitalen Zenitkameramessungen eignen.

Der Sternkatalog GSC 1.2, der vom Space Telescope Science Institute der NASA für die Orientierung des Hubble Weltraumteleskops erstellt wurde, enthält für die gesamte Sphäre Äquatorialkoordinaten von etwa 19 Millionen Sternen. Der Tycho-2 Katalog, der im Zusammenhang mit der astrometrischen Hipparcos-Satellitenmission⁵ in Kooperation vom Copenhagen University Observatory, dem United States Naval Observatory (USNO) und dem Astronomischen Recheninstitut Heidelberg erstellt wurde, enthält 2.5 Millionen Positionen, die mit einer höheren Genauigkeit (besser als 0.1 Bogensekunden) als die des GSC (etwa 0.5 Bogensekunden) astromatisch bestimmt wurden. Trotz der niedrigeren Sterndichte sind die im Tycho-2 Katalog vertafelten Äquatorialkoordinaten aufgrund ihrer hohen Genauigkeit besser als Referenz für die Lotrichtungsbestimmung geeignet.

Das United States Naval Observatory führt gegenwärtig bodengebundene astrometrische Messungen für den Sternkatalog UCAC (USNO CCD Astrograph Catalogue) durch, der etwa 80 Millionen Sternpositionen mit Genauigkeiten von 0.02 bis 0.07 Bogensekunden und die Eigenbewegungen der Sterne enthalten wird (Zacharias et al. 2000). Die für das Jahr 2004 geplante Satellitenmission FAME (Full Sky Astrometric Mapping Explorer) verfolgt das Ziel, die Positionen von 40 Millionen Sternen mit Genauigkeiten im Bereich von 0.0005 Bogensekunden zu bestimmen (Horner et al. 2001). In der nahen Zukunft werden also dichte Sternkataloge mit bisher nicht bekannten hohen astrometrischen Genauigkeiten vorhanden sein, die gewinnbringend für die Auswertung von Zenitkameramessungen genutzt werden können.

6.3 Sternidentifizierung

Für den weiteren Gang der Datenprozessierung ist es erforderlich, die aus den digitalen Zenitaufnahmen extrahierten Sterne mit den Referenzsternen aus dem Sternkatalog zu identifizieren. Hierdurch wird die Zuordnung zwischen den Bildkoordinaten (x, y) und den Äquato-

rialkoordinaten (δ, α) vorgenommen. Des Weiteren sind nicht identifizierbare Sterne (sowohl extrahierte Sterne als auch Referenzsterne) vom weiteren Auswerteprozess auszuschließen. Der Prozess der Sternidentifizierung kann mit objekterkennungs- und korrelationsbasierten Techniken zuverlässig durchgeführt werden (Valdes et al. 1995) sowie (Hirt 2000).

6.4 Reduktion der Zenitaufnahmen

Nach der Sternidentifizierung sind die digitalen Zenitaufnahmen zu reduzieren, d. h. es ist der funktionale Zusammenhang zwischen den Äquatorialkoordinaten (δ, α) und den Bildkoordinaten (x, y) streng herzustellen. Da sich die sphärischen Äquatorialkoordinaten (δ, α) nicht direkt mit den ebenen Bildkoordinaten in Verbindung setzen lassen, sind Tangentialkoordinaten (ξ, η) ⁶ einzuführen. Tangentialkoordinaten sind ebene Koordinaten, die durch Projektion der Äquatorialkoordinaten (δ, α) in eine an der Himmelskugel im Berührpunkt (δ_0, α_0) angelegten Tangentialebene entstehen (Abb. 8). Für die Transformation von Äquatorialkoordinaten (δ, α) eines Sternes S in Tangentialkoordinaten (ξ, η) (Projektion S') gilt nach Einführung einer Hilfsgröße q (Seeber 1993)

$$\cot q = \cot \delta \cos(\alpha - \alpha_0) \quad (5)$$

$$\xi = \frac{\tan(\alpha - \alpha_0) \cos q}{\cos(q - \delta_0)} \quad (6)$$

$$\eta = \tan(q - \delta_0). \quad (7)$$

Die inversen Beziehungen lauten nach Gessler (1975)

$$\alpha = \alpha_0 + \arctan \frac{\xi}{\cos \delta_0 - \eta \sin \delta_0} \quad (8)$$

$$\delta = \arctan \frac{(\eta + \tan \delta_0) \cos(\alpha - \alpha_0)}{1 - \eta \tan \delta_0}. \quad (9)$$

Tangentialkoordinaten (ξ, η) und Bildkoordinaten (x, y) lassen sich nun mit den Formeln der projektiven Transformation verknüpfen, wobei die Koeffizienten $a_1, a_2, b_1, b_2, c_1, c_2, d$ und e zusammen durch Ausgleichung bestimmt werden

$$\xi = \frac{a_1 + b_1 x + c_1 y}{1 + dx + ey} \quad (10)$$

$$\eta = \frac{a_2 + b_2 x + c_2 y}{1 + dx + ey}. \quad (11)$$

In Wessel (1982) wurde gezeigt, dass nach der Berücksichtigung des Einflusses der Objektivverzeichnung auf die Bildkoordinaten mit diesem Ansatz die funktionale Beziehung zwischen Bildkoordinaten und Tangentialkoordinaten hinreichend genau modelliert wird.

5 Der astrometrische Satellit Hipparcos hat im Zeitraum von 1993 bis 1996 Messungen durchgeführt, um einen hochgenauen Katalog von Positionen, Eigenbewegungen und Parallaxen für über 100 000 Sterne zu erstellen.

6 Die Tangentialkoordinaten (ξ, η) sind nicht mit den Lotabweichungen (ξ, η) zu verwechseln.

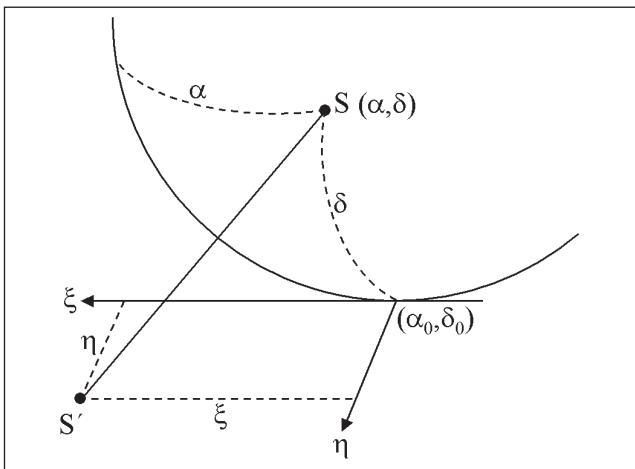


Abb. 8: Tangentialkoordinaten

6.5 Berechnung der Lotrichtungsparameter

Nach der Reduktion der digitalen Zenitaufnahmen kann nun die Zenitrichtung⁷ in das zentrale Sternfeld interpoliert werden. Im Bildkoordinatensystem kann der Zenitpunkt (x_z, y_z) näherungsweise in der Mitte des CCD-Sensors angenommen werden und erhält die Koordinaten $(0,0)$. Mit den Formelbeziehungen 10 und 11 der projektiven Transformation und den Formeln 8 und 9 der inversen Tangentialprojektion können die genäherten Bildkoordinaten – für beide Lagen getrennt – in sphärische Äquatorialkoordinaten (δ_z, α_z) transformiert werden. Geäherte Koordinaten des Anlegepunktes (δ_0, α_0) der Tangentialebene ergeben sich hierfür mit der Sternzeit Θ und den ellipsoidischen Koordinaten (φ, λ) ausreichend genau über:

$$\Phi_0 := \varphi \quad \Lambda_0 := \lambda \quad (12)$$

$$\delta_0 = \Phi_0 \quad \alpha_0 = \Lambda_0 + \Theta \quad (13)$$

Da der Zenitpunkt nicht genau mit dem Mittelpunkt des Bildkoordinatensystems zusammenfällt (Exzentrizität des CCD-Sensors), ergeben sich für beide Aufnahmelagen jeweils unterschiedliche sphärische Koordinaten. Diese liegen jedoch annähernd punktsymmetrisch um die gesuchte Zenitrichtung, d. h. sie weichen systematisch, aber mit unterschiedlichen Vorzeichen von den gesuchten Werten ab. Hier kann das Prinzip der Zweilagenmessung gewinnbringend zur Elimination der Abweichungen eingesetzt werden. Das Mittel der sphärischen Äquatorial-

koordinaten beider Lagen führt zu Äquatorialkoordinaten (δ_z, α_z) für den Zenitpunkt, die von den Abweichungen weitgehend befreit sind. Diese können nach der Transformation in den Bildraum mit Hilfe der Formeln 5 bis 7 sowie den invertierten Beziehungen 10 und 11 als verbesserte Ausgangswerte verwendet werden. Nach zwei bis drei Iterationen führt diese Berechnung zu endgültigen Äquatorialkoordinaten für den Zenitpunkt. Die so erhaltenen Werte für den Zenitpunkt (δ_z, α_z) können mit den aus beiden Lagen gemittelten Sternzeiten unter Verwendung der Ausgangsformel 4 in Koordinaten $(\Phi, \Lambda)_D$ umgerechnet werden, die die Richtung der Kameradrehachse angeben.

Mit den während der Belichtung gemessenen Neigungswerten wird die berechnete Drehrichtung der Kamera auf die physikalische Lotrichtung bezogen (Neigungskorrektion). Die Lotrichtung unterliegt noch den Variationen der Polbewegung und wird mit den Polkoordinaten des Internationalen Erdrotationsdienstes mit Standardformeln (Torge 2001) auf die mittlere Orientierung der Erdrotationsachse reduziert. Als Ergebnis liegen nun die endgültigen Lotrichtungsparameter (Φ, Λ) vor. Die Lotabweichungen (ξ, η) ergeben sich aus den mit GPS ermittelten ellipsoidischen Koordinaten (φ, λ) mit der Gleichung 2.

7 Genauigkeitspotential

Mit dem digitalen Zenitkamerasystem TZK2-D konnten bislang eine Reihe von Testmessungen in Hannover durchgeführt werden, die Aussagen hinsichtlich der inneren Genauigkeit (Präzision) der Lotabweichungskomponenten (ξ, η) erlauben. Abb. 9 zeigt ein typisches Ergebnis von 10 Wiederholungsmessungen. Die Einzellösungen dieser exemplarisch durchgeföhrten Lotabweichungsbestimmung streuen zwischen 0.1 und 0.2 Bogensekunden um ihren Mittelwert. Die Mittelwerte der Lotabweichungskomponenten haben eine innere Genauigkeit von unter 0.1 Bogensekunden und weisen damit schon im jetzigen Entwicklungsstadium des Systems ein deutlich höheres inneres Genauigkeitsniveau nach als mit der fotografischen Zenitkamera erzielt wurde (Wissel 1982).

Ergebnisse von Beobachtungsverfahren der geodätischen Astronomie sind erfahrungsgemäß von systematischen Restfehlereinflüssen betroffen, die ihre Hauptursache in zenitnahen Refraktionsanomalien haben (siehe z. B. Ramsayer 1967) oder instrumenteller Natur sind. Dies trifft sicher auch für die digitale Zenitkamera zu. Gegenwärtige am Institut für Erdmessung durchgeföhrte intensive Untersuchungen haben zum Ziel, systematische Restfehler des Instrumentes sorgfältig zu modellieren und durch geeignete Kalibrierprozeduren messtechnisch zu erfassen. Auch die Einflüsse atmosphärischer Refraktionsanomalien sollen detailliert untersucht und soweit wie möglich erfasst werden. Hierdurch soll die äußere

⁷ Genaugenommen handelt es sich um die Drehrichtung der Kamera. Die eigentliche Zenitrichtung wird aus der Drehrichtung nach dem Interpolationsprozess durch Anbringen der Neigungswerte berechnet. Die Abweichungen zwischen Drehrichtung und Zenitrichtung betragen in der Regel nur wenige Bogensekunden. Aus Gründen der Anschaulichkeit wird im Rahmen der Interpolation von Zenitrichtung bzw. Zenitpunkt gesprochen.

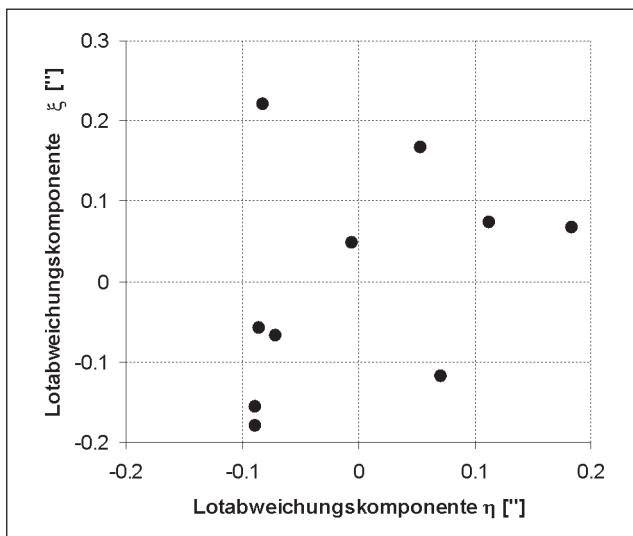


Abb. 9: Einzellösungen einer Lotabweichungsbestimmung

Genauigkeit des digitalen Zenitkamerasystems weitgehend an die innere Genauigkeit herangeführt werden.

8 Ausblick

Mit dem digitalen Zenitkamerasystem TZK2-D befindet sich ein leistungs- und echtzeitfähiges Instrument zur automatischen astrogeodätischen Lotabweichungsbestimmung gegenwärtig in einer fortgeschrittenen Entwicklung. Die bislang durchgeföhrten Testmessungen haben gezeigt, dass mit dem System Lotrichtungs- und Lotabweichungsbestimmungen wirtschaftlich und weitgehend automatisiert mit hoher Präzision durchgeföhr werden können.

Die Verfügbarkeit eines solchen modernen astrogeodätischen Digitalmesssystems eröffnet erfolgversprechende Perspektiven für die hochpräzise lokale und regionale Geoidbestimmung (Hirt und Bürki 2002). Durch den hohen Automatisierungsgrad ist es möglich, in kurzer Zeit eine größere Zahl von Lotabweichungsstationen zu beobachten. Dies kann genutzt werden, um beispielsweise für Wasserbaumaßnahmen oder den Pipelinebau in geodätisch unerschlossenen Gebieten linienhafte Geoidprofile für die GPS-gestützte Höhenbestimmung als Ersatz des aufwändigen Nivellements bereit zu stellen. Es lassen sich aber auch für höchste Anforderungen im Anlagenbau durch dichte Anordnung der Lotabweichungspunkte (≤ 50 m) lokale Geoidverläufe hochauflösend ableiten.

Es zeichnet sich ab, dass die geodätische Astronomie, die als einzige geodätische Disziplin die direkte Bestimmung der Lotrichtung ermöglicht, im Zeitalter der Digitaltechnologie eine neue Bedeutung im Rahmen der Schwerefeldbestimmung erlangen kann.

Dank

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die Förderung des Forschungsvorhabens im Rahmen des Projektes Se 313/21-1.

Literatur

- Gessler, J.: Entwicklung und Erprobung einer transportablen Zenitkamera für astronomisch-geodätische Ortsbestimmungen. Wiss. Arb. Lehrst. Geod., Phot. u. Kart. Techn. Univ. Hannover, Nr. 60, 1975.
- Haralick, R. und Shapiro, L.: Computer and Robot Vision Vol. 2. Addison Wesley, Reading, Massachusetts, 1993.
- Hirt, C.: Theorie und Realisierung eines echtzeitfähigen Auswertesystems zur astronomischen Ortsbestimmung mit einer digitalen Zenitkamera. Unveröffentlichte Diplomarbeit am Institut für Erdmessung der Universität Hannover, 2000.
- Hirt, C.: Automatic Determination of Vertical Deflections in Real-Time by Combining GPS and Digital Zenith Camera for Solving the GPS-Height-Problem. Proceed. 14th Intern. Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation, Alexandria, VA, S. 2540–2551, 2001.
- Hirt, C.: The Digital Zenith Camera TZK2-D., A Modern High-Precision Geodetic Instrument for Automatic Geographic Positioning in Real-Time. Proceed. 12th Meeting of the Astronomical Data Analysis Software and Systems (ADASS) of the Space Telescope Science Institute, published at the Astronomical Society of the Pacific, San Francisco, CA, 2002 (in press).
- Hirt, C. und Bürki, B.: The Digital Zenith Camera – A New High-Precision and Economic Astrogeodetic Observation System for Real-Time Measurement of Deflections of the Vertical. Proceed. 3rd Meeting of the International Gravity and Geoid Commission of the International Association of Geodesy, Thessaloniki, Greece, 2002 (in press).
- Hog, E., Fabricius, C., Makarov, V., Urban, S., Corbin, T., Wycoff, G., Bastian, U., Schwegendiek, P., und Wicenec, A.: The Tycho-2 Catalogue of the 2.5 Million Brightest Stars. Astronomy and Astrophysics 335, S. 19–22, 2000.
- Horner, S., Germain, M., Harris, F., Johnson, M., Johnston, K., Monet, D., Murison, M., Phillips, J., Reasenberg, R., Seidelmann, P., Urban, S., und Vassar, R.: Full-sky Astrometric Mapping Explorer: An optical, astrometric survey mission. United States Naval Observatory. URL: <http://www.usno.navy.mil/fame>, 2001.
- McLean, B.: The Guide Star Catalog. URL: <http://www-gsss.stsci.edu/PublishedPapers/Papers.htm>, 1997.
- Ramsayer, K.: Investigation on Errors in the Determination of Astronomical Refraction. Proceed. Intern. Symp. Figure of the Earth and Refraction, Wien. Veröffentlicht in: Österreichische Zeitschrift für Vermessungswesen, Sonderheft 25, S. 260–269, 1967.
- Schödlbauer, A.: Geodätische Astronomie – Grundlagen und Konzepte. W. de Gruyter, Berlin, New York, 2000.
- Seeber, G.: Die transportable Zenitkamera – ein modernes Instrument zur geographischen Ortsbestimmung. Sterne und Weltraum Heft 2, S. 45–50, 1978.
- Seeber, G.: Satellite Geodesy. Foundations, Methods, and Applications. W. de Gruyter, Berlin, New York, 1993.
- Seeber, G. und Torge, W.: Zum Einsatz transportabler Zenitkameras für die Lotabweichungsbestimmung. Zeitschrift für Vermessungswesen 110, S. 439–450, 1985.
- Seidelmann, P.: Explanatory Supplement to the Astronomical Almanac. University Science Books, Mill Valley, CA, 1992.
- Torge, W.: Geodesy, Third Edition. W. de Gruyter, Berlin, New York, 2001.
- Valdes, F., Campusano, L., Velasquez, J., und Stetson, P.: FOCAS Automatic Catalog Matching Algorithms. Publications of the Astronomical Society of the Pacific 107, S. 1119–1128, 1995.
- Wissel, H.: Zur Leistungsfähigkeit von transportablen Zenitkameras bei der Lotabweichungsbestimmung. Wiss. Arb. Fach. Vermessungswesen der Univ. Hannover, Nr. 107, 1982.
- Zacharias, N., Urban, S., Zacharias, M., Hall, D., Wycoff, G., Rafferty, T., Germain, M., Holdenried, E., Pohlman, J., Gauss, F., Monet, D., und Winter, L.: The First United States Naval Observatory CCD Astrograph Catalog. The American Astronomical Society, The Astronomical Journal 120, S. 2131–2158, 2000.

Anschrift der Autoren

Dipl.-Ing. Christian Hirt
Institut für Erdmessung, Universität Hannover
Schneiderberg 50, D-30167 Hannover
Tel.: 0511-762 3892, hirt@mbox.ife.uni-hannover.de

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Günter Seeber
Institut für Erdmessung, Universität Hannover
Schneiderberg 50, D-30167 Hannover
Tel.: 0511-762 2475, seeber@ife.uni-hannover.de