Zeitschrift: Orion : Zeitschrift der Schweizerischen Astronomischen Gesellschaft
Herausgeber: Schweizerische Astronomische Gesellschaft
Band: 56 (1998)
Heft: 286

Artikel: Bezugssysteme für Himmel und Erde
Autor: Beutler, Gerhard
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-897490

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 15.07.2025

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

Bezugssysteme für Himmel und Erde*

Prof. Dr. GERHARD BEUTLER

Die Fundamentalastronomie befasst sich traditionell mit der Festlegung von Bezugssystemen auf der Erde und am Himmel, mit der Verknüpfung dieser Systeme und mit der Bewegung von Sonne, Mond, Planeten und Satelliten in diesen Bezugssystemen. Die Weltraumfahrt revolutionierte die Fundamentalastronomie durch Satellitensysteme und durch Beobachtungsmissionen vom Weltraum aus.

Prinzipielles

Eine der wichtigsten Aufgaben der Fundamentalastronomie besteht in der Verknüpfung des *raumfesten* mit dem *erdfesten* Bezugssystem. Konkret bedeutet dies, dass man die Koordinaten eines jeden Punktes auf der Erdoberfläche zu jedem Zeitpunkt nicht nur im erdfesten, sondern auch im raumfesten Bezugssystem kennen muss und umgekehrt die Koordinaten eines jeden Sterns zu jedem Zeitpunkt auch im erdfesten System. Da die Erde im raumfesten Sy-stem rotiert, müssen wir *zur Festlegung der Transformation zwischen dem erd- und dem raumfesten System zu jedem Zeitpunkt die exakte Stellung der Rotationsachse auf der Erdoberfläche und im Raum sowie die Winkelgeschwindigkeit der Erdrotation (die Länge eines Tages) kennen.* Dies mag auf den ersten Blick einfach erscheinen, wissen wir doch alle (insbesondere die Pfadfinder unter uns), dass die Erdachse am Himmel – wie schon der Name sagt – «durch den Polarstern geht» und dass die Rotationsachse der Erde auf der Erdoberfläche durch den Nordpol (irgendwo nördlich von Spitzbergen im Packeis) und durch den Südpol in der Antarktis geht. Polarforscher haben den Nordpol, als Durchstosspunkt der Rotationsachse der Erde mit der Erdoberfläche, immer (im wesentlichen) als fest mit der Erdoberfläche verbunden angenommen. Zudem wissen wir alle, dass jeder Tag etwa gleich lang ist (obwohl uns das manchmal gar nicht so erscheint).

Unsere Vorstellungen halten einer genauen Nachprüfung nicht stand. So wandert beispielsweise der Rotationspol am Himmel auf einem (Klein-)Kreis im Abstand von etwa 23,5 Grad um den *Ekliptikpol* (Ekliptik: die einen Grosskreis am Himmel bildende scheinbare Jahresbahn der Sonne). Diese Bewegung bezeichnet man als *Präzession.* Unabhängig davon verschiebt sich der *Rotationspol* auf der Erdoberfläche. Diese Bewegung ist wesentlich weniger spektakulär, man bezeichnet sie als *Polschwankung.*

Ist wenigstens die Winkelgeschwindigkeit der Erdrotation konstant, d. h. dreht sich die Erde gleichförmig? Auch diese Frage muss verneint werden: Man weiss seit längerer Zeit, dass die *Tageslänge* pro Jahrhundert um etwa 2 Millisekunden zunimmt. Nun wird man mir vorhalten, dieser Effekt sei doch wegen seiner Kleinheit wirklich unbedeutend. Mitnichten: Würden wir unsere Uhren nicht ständig neu richten, würden diese nach 2000 Jahren eine um etwa 4 Stunden falsche Zeit anzeigen! Tatsächlich wird dieser Effekt in der Praxis durch das gelegentliche Einfügen von Schaltsekunden in unsere bürgerliche Zeit korrigiert.

Historisches

Die Fundamente der Theorie der Erdrotation wurden von ISAAC NEWTON und vom Basler Mathematiker und Astronomen LEONHARD EULER gelegt. NEWTON war es, der die Bewegung des Pols unter den Fixsternen (*Präzession und Nutation) als Auswirkung der durch Mond und Sonne auf die abgeplattete Erde ausgeübten Drehmomente* erklärte (1687). EULER postulierte die *Polschwankung als eine zwingende Konsequenz der Bewegung des kräftefreien Kreisels* und prägte die bis heute verwendete Beschreibung der Erdrotation (1765). Er sagte voraus, dass sich der Rotationspol auf der Erdoberfläche gleichförmig auf einem Kreis *um die Achse des maximalen Trägheitsmoments* bewegen sollte, dies mit einer Periode von etwa 300 Tagen. Er bewies, dass diese Periode bei einem *starren Körper* (seine Annahme für die Erde) nur durch die Tageslänge und durch die Abplattung bestimmt ist. Er hatte hingegen keine Ahnung von der Grössenordnung der Polschwankung (für den Fachmann sei vermerkt, dass diese allein durch die Anfangsbedingungen gegeben ist, dass man sie also nur durch Messungen, nicht aber durch theoretische Überlegungen erfassen kann). Die Polschwankung wurde 1821 bzw. 1844 von FRIEDRICH WILHELM BESSEL vermutet resp. entdeckt, konnte aber erst Ende des letzten Jahrhunderts dank dem Aufbau des *Internationalen Breitendienstes* durch KARL FRIEDRICH KÜSTNER mit Sicher-

* Dieser Artikel erschien im UNIPRESS Nr. 96 vom April 1998, S. 36-48, der Universität Bern.

Aufgaben der Fundamentalastronomie

■ Fundamentalastronomie war seit jeher für Forschung und Anwendung von Bedeutung. Angewandte Forschung war in diesem Gebiet nie ein «Schimpfwort». Es sei daran erinnert,

- dass die Bewegung von Sonne und Mond sowie der Planeten, Kleinplaneten und Kometen im raumfesten System beschrieben werden,
- dass es JOHANNES KEPLER 1609 nur dank der systematischen Beobachtungen der Planeten und der Sonne durch TYCHO BRAHE gelang, seine berühmten Gesetze der Planetenbewegung zu entdecken,
- dass die Transformation zwischen erdfestem und raumfestem System gebraucht wird zur Voraussage von wichtigen Ereignissen wie Sonnen- und Mondfinsternissen und zur Berechnung der Bahnen von Planeten, Kleinplaneten und Kometen so, wie sie uns am Himmel (z.B. über Bern) erscheinen und
- dass die Bezugssysteme der Fundamentalastronomie unabdingbare Voraussetzung für genaue Positionierung und Navigation auf der Erde (und heute im erdnahen Raum) darstellen.

Letztere Aussage war und ist übrigens zu jedem Zeitpunkt in der Entwicklungsgeschichte der Menschheit richtig. Verändert hat sich lediglich die Vorstellung, was unter «genau» zu verstehen ist ...

Bezugssysteme

■ Fig. 1a zeigt das Bezugssystem am Himmel, das wir uns als ein mit den Fixsternen fest verbundenes Koordinatensystem (raumfestes Koordinatensystem) vorstellen wollen, Fig. 1b das geographische Koordinatensystem auf der Erdoberfläche (erdfestes Koordinatensystem), beide angedeutet durch die Längen- und Breitenkreise, und Fig. 1c die Stellung von Erde und Sonne im raumfesten Bezugssystem; man beachte insbesondere den Rotationspol (resp. die Rotationsachse) der Erde sowie den Ekliptikpol als Normale zur Erdbahnebene.

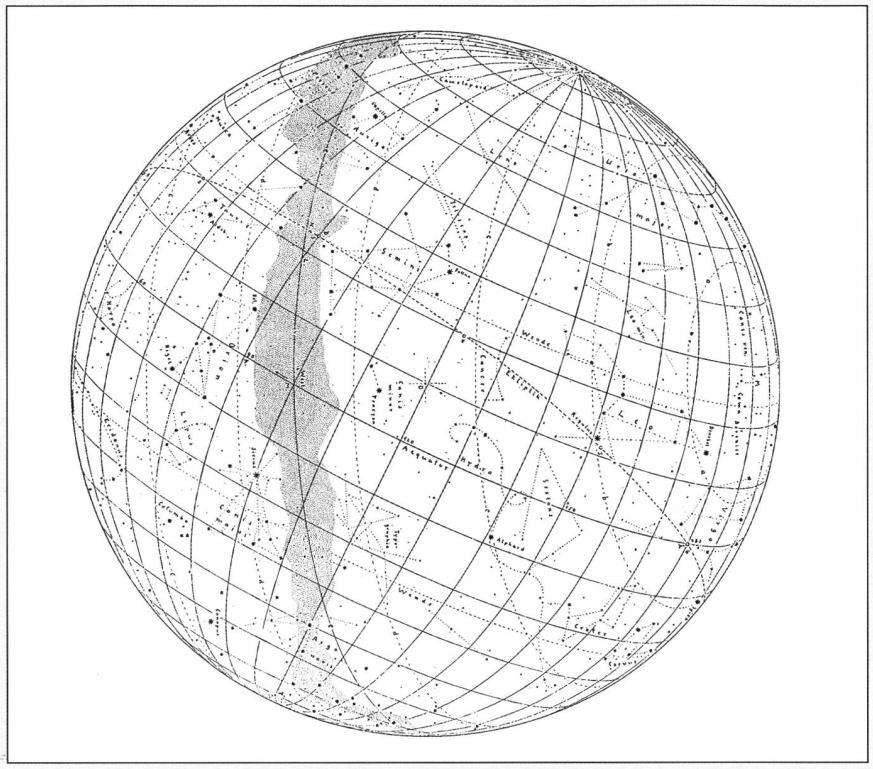


Fig. 1a: Das Bezugssysten am Himmel: Die Himmelsphäre definiert durch die Sterne ein raumfestes Koordinatensystem.

Die Bewegung des Rotationspols im Raum wird von den Astronomen mit den Ausdrücken *Präzession* und *Nutation* versehen. Die Auftrennung ist künstlich: mit *Präzession* wird die gleichförmige Bewegung auf einem Kleinkreis um den Ekliptikpol (im Abstand von 23,5 Grad von diesem) bezeichnet, mit *Nutation* werden alle andern überlagerten kleinen periodischen Bewegungen bezeichnet (in Fig.1c mit einer Schlangenlinie angedeutet). Die Nutation besteht aus Hunderten von periodischen Termen, wobei die grössten etwa 10" Amplitude haben (10" = 10 Bogensekunden). Präzession und Nutation haben die gleiche physikalische Ursache (siehe weiter unten).

Die Präzession ist (über lange Zeiten betrachtet) sehr regelmässig mit einer Periode von etwa 26000 Jahren. Dies bedeutet, dass vor etwa 13000 Jahren (und wieder in 13000 Jahren) ein Stern im Sternbild der Leier Polarstern war (und sein wird). Der Pol wird also zu jenen Zeiten etwa 47 Grad vom momentanen Polarstern im kleinen Bären entfernt sein!

Der Pol bewegt sich um eine mittlere Lage (die Achse des maximalen Trägheitsmomentes der Erde) auf einem «Kreis» mit variierendem Radius von etwa 7 m bis 15 m mit einer Periode von etwa 430 Tagen (Fig. 1b). Dass der Effekt klein ist, zeigt die folgende Überlegung: Auf der Erdoberfläche entsprechen 10 m vom Geozentrum aus gemessen einem Winkel von 0,3 Bogensekunden [1 Bogensekunde (1") ist der Winkel, unter dem man eine Fliege aus einem Kilometer Entfernung sieht!].

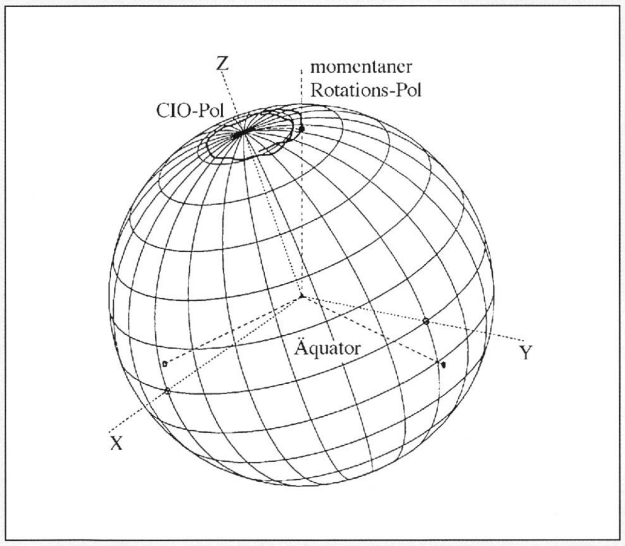


Fig. 1b: Die Rotationsachse der Erde auf der Erdoberfläche: Der Rotationspol der Erde bewegt sich auf der Erdoberfläche um die Achse des maximalen Trägheitsmoments (Polschwankung). Diese Bewegung ist nicht regelmässig. Die Periode beträgt etwa 430 Tage (Chandler-Periode). Die Winkelgeschwindigkeit (Tageslänge) weist auch unregelmässige Änderungen auf (=> Schaltsekunden).

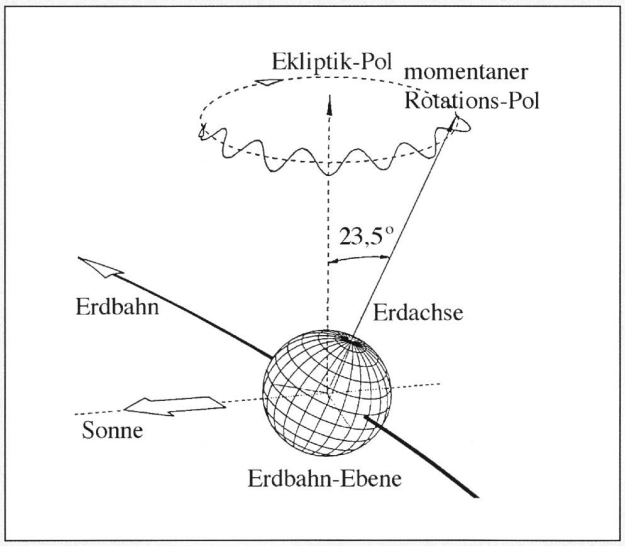


Fig. 1c: Die Rotationsachse der Erde im Raum: Die Rotationsachse bewegt sich infolge der Gravitation von Sonne und Mond im (inertialen) Koordinatensystem der Sterne auf einem Radius von e ≈ 23,5° um den Ekliptikpol herum (Präzession).

heit nachgewiesen werden. Diese Vorläuferorganisation der Internationalen Assoziation für Geodäsie zog um 1900 ein Netz von fünf Beobachtungsstationen in gleichen geographischen Breiten auf. Mit Mühe gelang die kontinuierliche Bestimmung der Polschwankung mit einer Genauigkeit von etwa 0,1" (0,1" = 0,1 Bogensekunden) über mehrere Jahrzehnte hinweg.

Vier Entwicklungen gingen der Revolutionierung der Fundamentalastronomie durch die Weltraumforschung voraus und sollen kurz vorgestellt werden:

- Entwicklung der Atomuhren
- Entwicklung der Radioastronomie, insbesondere VLBI
- Entwicklung der LASER-Technologie
- Entwicklung der CCD-Technik

Mitte der 1950er Jahre hatte man mit der Entwicklung von *Atomuhren*, die im wesentlichen auf atomaren Prozessen beruhende Schwingungen zählen, die Instrumente zur Verfügung, mit welchen man die Erdrotation als Funktion einer gleichförmige(re)n Zeit studieren konnte. Diese Erfindung war eine Voraussetzung für die kommenden Entwicklungen. *Ein genauer (auf Atomuhren beruhender) Oszillator ist das Kernstück eines jeden modernen Navigationssatelliten.*

Die *Radioastronomie* entwickelte sich nach dem zweiten Weltkrieg rasch als Nebeneffekt der im Krieg gebauten Radaranlagen. Mächtige Instrumente wurden zur Beobachtung im Mikrowellenbereich (Wellenlängen typischerweise 10 cm) entwickelt. Trotz der Grösse der Anlagen (Teleskope von mehr als 20 m Durchmesser sind die Regel) ist das Auflösungsvermögen (Fähigkeit, benachbarte Objekte zu trennen) des ein-zelnen Teleskops keinesfalls beeindruckend. Für ein im 10-cm-Bereich arbeitendes 100-m-Teleskop beträgt die Auflösung nur etwa 200". Dass Radioteleskope in der Fundamentalastronomie trotzdem eine sehr grosse Bedeutung erlangt haben, liegt daran, dass man im Prinzip Radioteleskope, die über die ganze Welt verteilt sind, mit der «VLBI-Methode» (Very Long Baseline Inter-ferometry) so *miteinander verknüpfen* kann, dass diese *von der Auflösung her gesehen als ein einziges Teleskop betrachtet werden können* (VLBI-Experten mögen mir einige Vereinfachungen verzeihen). Unnötig zu sagen, dass die Auflösung unerhört gesteigert wird, wenn ein 100-m-Teleskop ersetzt wird

Beobachtung einst

■ Bis in die Mitte dieses Jahrhunderts war Beobachtung in der Fundamentalastronomie ein Synonym für Richtungsbeobachtung. Fig. 2a zeigt, dass Richtungen vom Beobachter aus zu verschiedenen Himmelskörpern vor der Erfindung des Teleskops mit mechanischen Hilfsmitteln (Hand, Jakobsstab, Quadrant) gemessen, resp. geschätzt wurden. Die besten dieser mechanischen Hilfsmittel zur Richtungsmessung standen TYCHO BRAHE zur Verfügung. Es waren seine, grösstenteils auf Mauerquadranten beruhenden, Messungen mit einer Genauigkeit von etwa 2', welche es JOHANNES KEPLER erlaubten, die Gesetze der Planetenbewegung zu entdecken.

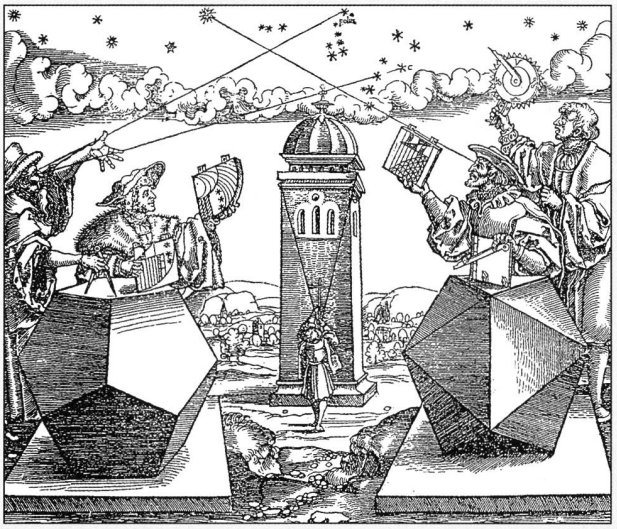


Fig. 2a: Titelblatt zu PETER APIANS «Instrument Buch» (1533) mit der Anwendung astronomischer Instrumente für die Himmelsbeobachtung und im Ingenieurwesen.

Die Pendel-Uhr von GALILEO GALILEI (Fig. 2b) soll andeuten, dass Beobachtungen ohne eine Zeitzuordnung wertlos sind (jedenfalls gilt dies für die Objekte des Sonnensystems). Mechanische Uhren lösten ab dem 14. Jahrhundert allmählich die viel weniger genauen Sand- und Wasseruhren ab. Bis etwa in die Mitte unseres Jahrhunderts konnten Uhren «nur» zur Interpolation der durch die Erdrotation selbst definierten Zeit verwendet werden. Der Sterntag, als Zeitintervall zwischen zwei oberen Kulminationen ein und desselben Sterns durch den Meridian eines Beobachtungsortes (Durchgang dieses Objektes genau im Süden eines Beobachtungsortes auf der nördlichen Hemisphäre), war bis etwa in die Mitte unseres Jahrhunderts das am besten reproduzierbare Zeitintervall, von welchem sich denn auch sämtliche übrige Zeiteinheiten wie Sekunden etc. ableiten liessen.

Fig. 2c: Fernrohr von J. HEVELIUS. (aus «Selenographia», 1647)

Fig. 2b: GALILEO GALILEIS Pendeluhr.

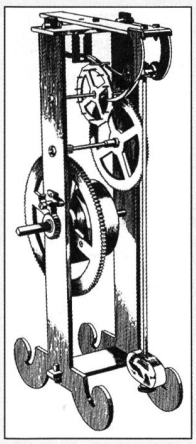


Fig. 2c symbolisiert die Einführung des Teleskops um 1610 z.B. durch GALILEO GALILEI sowie des Fadenkreuzes durch GASCOIGNE (1640) und PICARD (1667). Mit dem Teleskop und der Erfindung immer besserer mechanischer Uhren fand in der Fundamentalastronomie eine erste Revolution statt. Man gewann praktisch zwei Zehnerpotenzen an Genauigkeit, konnte man doch jetzt etwa auf Bogensekunden genau Richtungen bestimmen und die zugehörigen Messzeiten auf Bruchteile von Sekunden festhalten.

Die wichtigsten Wegbereiter der Fundamentalastronomie

TYCHO BRAHE (1546–1601)	Erste genaue Beobachtungen mit Quadranten
JOHANNES KEPLER (1571–1630)	Entdeckung der Gesetze der Planetenbewegung
ISAAC NEWTON (1643–1727)	Entdeckung der universellen Gravitation
LEONHARD EULER (1707–1783)	Beschreibung der Rotation der starren Erde
PIERRE SIMON DE LAPLACE (1749–1827)	Formulierung der Gezeitengleichung
FRIEDRICH WILHELM BESSEL (1784–1846)	Erster Fundamentalkatalog der Sterne
KARL FRIEDRICH KÜSTNER (1856–1936)	Definitiver Nachweis der Polschwankung
SETH CARLO CHANDLER (1846–1913)	Entdeckung der 430tägigen Polbewegung

durch eines mit Durchmesser = 2 x Erdradius! Als Radioquellen haben sich in der Fundamentalastronomie die sogenannten *Quasare* (quasistellare Radioquellen) bewährt: es handelt sich um extrem weit entfernte (und daher fast punktförmig oder sternförmig erscheinende) Radioquellen, die sich auf Grund ihrer enormen Entfernung scheinbar nicht bewegen. *Quasare, gemessen mit VLBI, definieren heute das Referenzsystem der Fundamentalastronomie am Himmel.*

Die Revolution

Die Weltraumfahrt hat die Fundamentalastronomie in zweierlei Hinsicht von Grund auf geändert: Erstens ergab sich die Möglichkeit, vom Weltraum aus fundamentalastronomische Experimente durchzuführen, zweitens konnten künstliche Erdsatelliten sowie der Mond(!) von der Erde aus mit fundamentalastronomischen Zielsetzungen beobachtet werden. Der zweite Forschungszweig wird oft (nicht ganz zutreffend) mit *Satellitengeodäsie*, also Erdvermessung mit Hilfe von Satelliten, bezeichnet. Puristen würden wohl nur bei den Experimenten erster Art von Weltraumforschung im engeren Sinn reden, während die Beobachtung von Erdsatelliten auch als erdgebundene Astronomie unter Verwendung von Hilfskörpern, welche dank der Weltraumfahrt zur Verfügung standen und stehen, definiert werden könnte. Von der Fundamentalastronomie aus gesehen sind solche Unterscheidungen müssig. Wir betrachten hier beide Aspekte.

Satellitengeodäsie

Die Satellitengeodäsie erlaubt es, rein geometrische Grössen wie *geozentrische Stationskoordinaten* und *-geschwindigkeiten* sowie dynamische Eigenschaften der Erde, insbesondere deren *Gravitationsfeld* (durch das sogenannte *Potential*), zu bestimmen. Rückschauend auf vierzig Jahre Satellitengeodäsie unterscheiden wir verschiedene Perioden.

Optische Periode, ca. 1960-1973: Künstliche Erdsatelliten wie Geos, Echo und Pageos (die beiden letzteren waren Ballonsatelliten, bestehend aus einer dünnen Aluminiumhülle von etwa 30 m Durchmesser, welche man nachts auch von blossem Auge sehen konnte) wurden mit konventionellen optischen Teleskopen und mit photographischen Techniken beobachtet. Erstmals gelang es in dieser Phase, die *Abstände der Kontinente* mit einer Genauigkeit von vielleicht 5 m zu bestimmen. Es entstand ein *erstes globales terrestrisches Bezugssystem*, welches das Attribut «global» auch verdiente (mit terrestrischen Hilfsmitteln war über die Weltmeere hinweg nur eine Genauigkeit von vielleicht 100 m zu erzielen). Noch wichtiger war die Herleitung eines *ersten relativ genauen Potentials* für das Gravitationsfeld der Erde. Kannte man vor der Satellitenära ledig-

Messprinzipien

■ Die Fig. 3a zeigt die an Einfachheit kaum zu überbietende Messmethode mit LASER. LASER steht für «Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation». LASER sind in der Astronomie von Interesse, weil damit *extrem stark gebündelte, extrem kurze* und *extrem intensive Lichtstrahlen* erzeugt werden können. In der Tat ist es heute üblich, Lichtpulse von einigen 10 Picosekunden (Billionstel Sekunden) zu erzeugen und die Laufzeiten von der Quelle zu einem weit entfernten LASER-Reflektor und zurück mit hoher Genauigkeit zu messen.

In der «VLBI-Technik» (Fig. 3b) wird von zwei oder mehreren Teleskopen gleichzeitig ein und dieselbe Radioquelle beobachtet, d.h., die Radiosignale werden als Funktion der Zeit auf Magnetband aufgezeichnet. Herzstück des Radioteleskops ist eine Atomuhr (ein sogenannter *Wasserstoffmaser)*. Korreliert man die von zwei Teleskopen aufgenommenen Signale, kann man offensichtlich die Zeitdifferenz t der Ankunftszeiten ein und desselben Signals bei den Teleskopen T_1 und T_2 bestimmen. Multipliziert man diese Zeitdifferenz mit der (bekannten) Lichtgeschwindigkeit, erhält man daraus die Distanzdifferenz der beiden Teleskope, so wie sie die Radioquelle sieht.

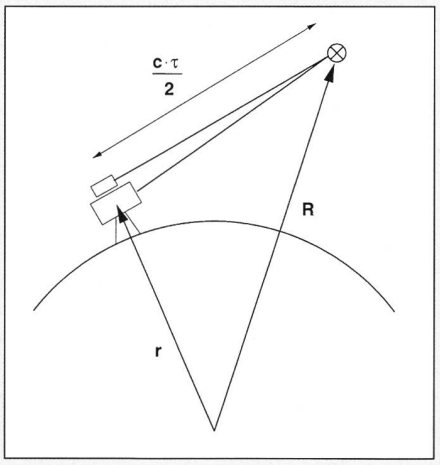


Fig. 3a: Satellite Laser Ranging (SLR): Vom Teleskop werden Laserpulse zum Satelliten geschickt, die von diesem reflektiert werden. Messgrösse ist die Lichtlaufzeit t. Die Distanz Teleskop–Satellit beträgt $\frac{c \cdot \tau}{2}$.

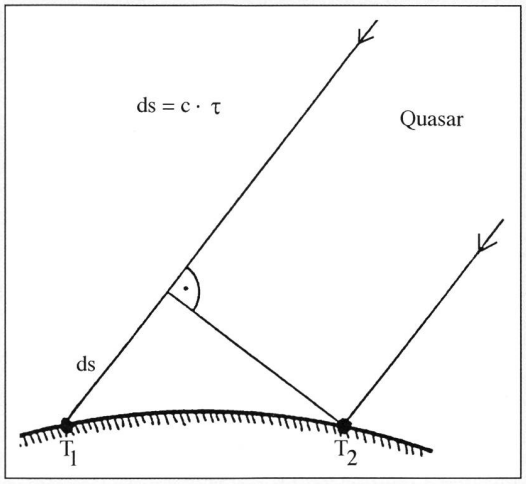


Fig. 3b: Messprinzip bei VLBI (Very Long Baseline Interferometry).

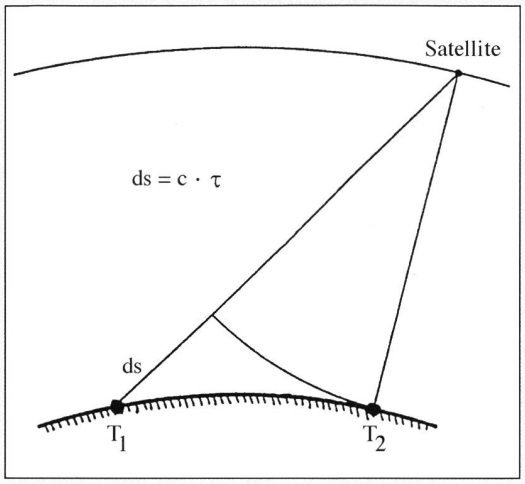


Fig. 3c: Messprinzip bei GPS (Global Positioning System).

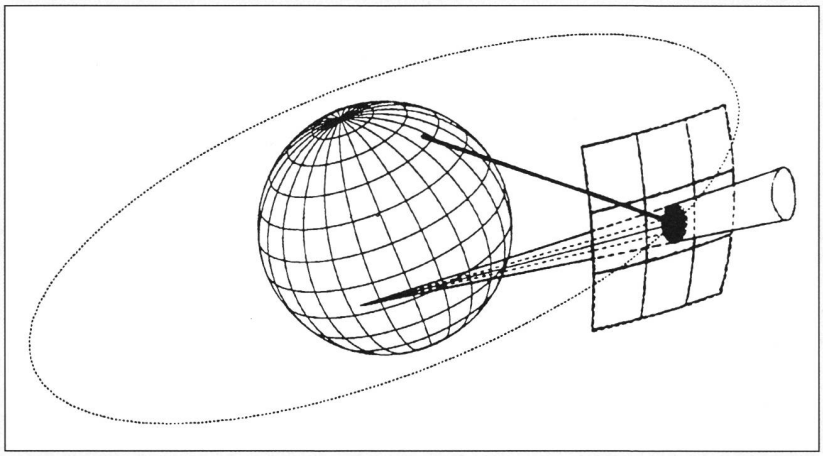
■ Tatsächlich ist das Messprinzip von GPS (Fig. 3c) dem von VLBI nahe verwandt (was man auch durch den Vergleich der Messprinzipien VLBI und GPS einsieht). In der Tat könnte man GPS-Satelliten mit VLBI-Teleskopen beobachten. So gesehen dürfte man wissenschaftliches Arbeiten mit GPS als eine Art VLBI betrachten. GPS hat aber noch einen gewichtigen Vorteil: Die Konstellation der GPS-Bahnen (Fig. 7, auf Seite 43) legt nahe, dass man von jedem beliebigen Ort der Erdoberfläche aus gleichzeitig mehrere Satelliten sieht. Dies ist ein entscheidender Vorteil gegenüber VLBI: Die von einem Empfänger empfangenen GPS-Signale zweier gleichzeitig beobachteter Satelliten enthalten «absolut den gleichen, durch den Empfänger verursachten Uhrfehler», was heisst, dass die Differenz dieser Signale praktisch unabhängig von einem Empfängeruhrfehler ist. Dies bedeutet, dass man zur Ermittlung der simultanen Distanzdifferenzen zu verschiedenen Satelliten (gemessen von einer Station aus) mit «sehr billigen» Empfänger-Quarzuhren auskommt, während VLBI auf die bestmöglichen Wasserstoffmaser angewiesen ist! (MASER: Microwave Amplitude by Stimulated Emission of Radiation). Günstig ist zudem, dass naturgemäss die beim Empfänger gemessenen GPS-Signale um Grössenordnungen stärker sind als die Quasar-Signale und dass die GPS-Signalstruktur bekannt ist. Das bedeutet, dass die Antennen bei GPS viel kleiner als bei VLBI sind: eine moderne GPS-Antenne, mit der sämtliche über Horizont befindlichen Satelliten «zu sehen» sind (omnidirektionale Antenne), misst etwa 2 cm x 2 cm!

Fig. 3d zeigt die Kombination von Distanz- (mit LASER) und Richtungs-Messungen (mit CCD), welche die genaue Position eines Satelliten im Raum ergeben.

LASER wurden in den 1950er und 1960er Jahren in der Festkörperphysik entwickelt. Es wurde bald klar, dass die Eigenschaften des LASERs die Messung grosser Distanzen, insbesondere auch zu Satelliten und zum Mond, mit hoher Genauigkeit (einige Millimeter) erlauben würden, falls diese Satelliten mit LASER-Reflektoren ausgestattet würden.

In der optischen Beobachtung mit Hilfe von Teleskopen löste etwa Mitte des letzten Jahrhunderts die *Photographie* die *Beobachtung von Auge* ab. Es wurden Methoden zur genauen Vermessung photographischer Aufnahmen entwickelt, welche es erlaubten, *Sternkataloge* mit einigen 100 000 Sternen mit einer Genauigkeit im Bereich von Bogensekunden zu kompilieren (zusammenzufassen). Die photographische Aufnahme hat hervorragende Eigenschaften als Bildarchiv, sie hat aber auch schwerwiegende Nachteile: In modernem «Computer-Chinesisch» ausgedrückt ist die *Zugriffszeit zur Bildinformation* geradezu *prohibitiv*: Nach der Belichtung muss ein Film entwickelt werden, die Positionen der Sterne auf der Aufnahme müssen mit mechanischen Hilfsmitteln gemessen werden, dann erst können die Messdaten auf ein computergerechtes Medium übertragen werden. Die restliche Prozedur kann dann automatisiert werden: Die Bestimmung von Richtungen zu interessierenden Objekten und allenfalls deren Helligkeiten erfolgt computergesteuert. Heute ersetzt die *CCD-Technologie* (CCD steht für Charge Coupled Device) den mühsamen ersten Teil der Prozedur.

Fig. 3d: Kombination von Distanz- und Richtungsmessungen.



CCD-Technologie

■ Anstatt die Brennebene eines Teleskops mit einem photographischen Film zu versehen, wird diese mit einer CCD-Matrix bestückt. Es handelt sich dabei um ein Siliziumplättchen, welches mit einem rechteckigen Schema von Bildelementen, sogenannten Pixels, ausgelegt wird. Während des Belichtungsvorgangs (der nur Sekunden oder gar nur Bruchteile von Sekunden dauert, im Gegensatz zu typischerweise 15 Minuten bei der Photographie) werden in den einzelnen Pixeln durch die einfallende Strahlung Ladungen erzeugt. Die Zahl der Elementarladungen wird für jedes Pixel «numerisch festgehalten», was bedeutet, dass die gesamte Information einer Aufnahme von Anfang an in digitaler (computergerechter) Form vorliegt.

Der CCD-Detektor revolutioniert die astronomischen Beobachtungstechniken. In der Astronomie hat das Aufkommen einer neuen Generation elektronischer Bildaufnehmer, der sogenannten *Charge Coupled Devices, kurz CCDs*, das klassische photographische Material innert kurzer Zeit fast vollständig verdrängt. Schon die ersten Versuche an grossen Teleskopen anfangs der achtziger Jahre waren vielversprechend. Im Observatorium Zimmerwald der Universität Bern wird diese Technik seit 1989 eingesetzt. Ein CCD-Detektor besteht aus einem Siliziumplättchen mit einer Matrix von Bildelementen, sogenannten Pixeln. Die Grösse der einzelnen Pixel beträgt ca. 10 bis 20 Mikrometer. Heute sind CCDs mit Kantenlängen von einigen zehn bis einigen tausend Pixel erhältlich (Fig. 4a).

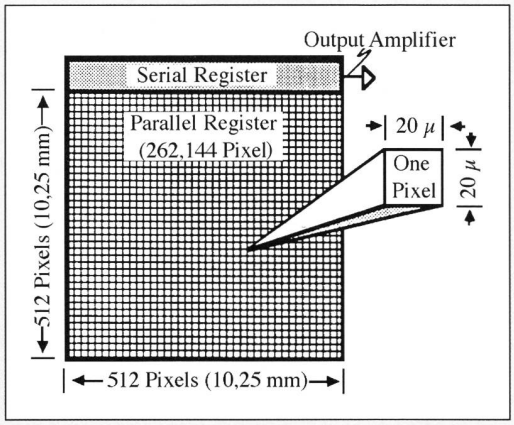


Fig. 4a: CCD-Matrix.

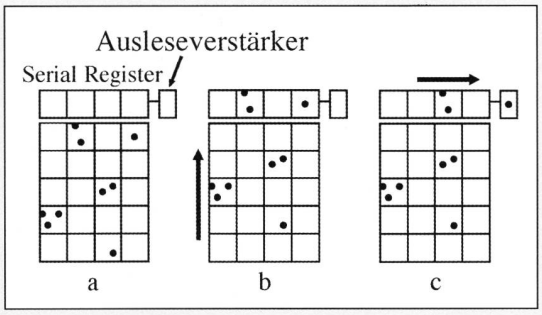
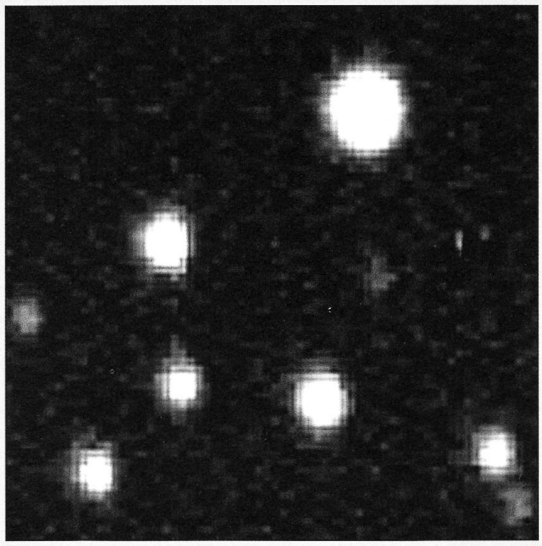


Fig. 4b: Ausleseprozess.

CCDs werden «ausgelesen». Während der Belichtung werden in den einzelnen Pixeln durch die einfallenden Lichtteilchen Ladungen erzeugt. Diese müssen anschliessend, Pixel für Pixel, über einen Verstärker ausgelesen werden. Nach der Verstärkung werden die Ladungen «gezählt» (in einem sogenannten analog-zu-digital-Wandler) und in digitaler Form gespeichert (Fig. 4b).

CCD-Bilder sind Zahlen im Rechner. Das Bild steht anschliessend als Matrix von Zahlen in einem Rechner zur Verfügung. Diese Daten können nun digital weiterverarbeitet werden, um zum Beispiel Positionen oder Helligkeiten von Objekten zu bestimmen. Die Resultate wiederum werden als Bilder, Helligkeitsprofile usw. ausgegeben (Fig. 4c).



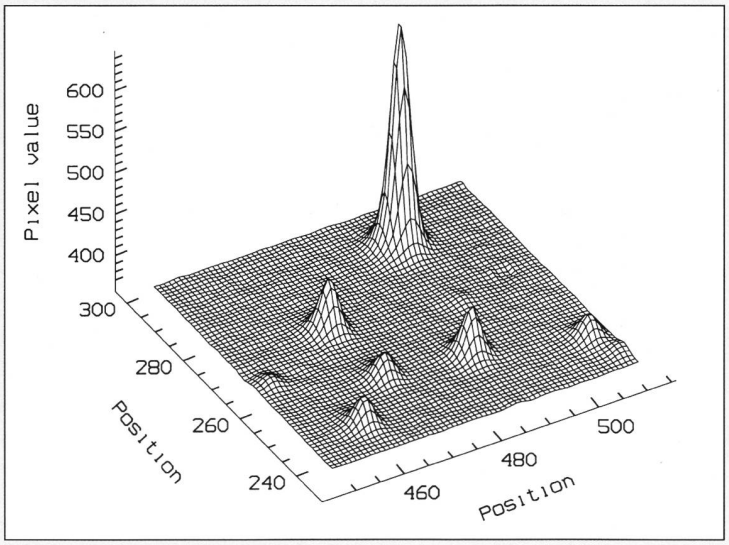


Fig. 4 c: CCD-Aufnahme, links als Bild, rechts als Helligkeitsprofil dargestellt.

lich die *Abplattung der Erde* zuverlässig, wurde nach dieser ersten Epoche der Satellitengeodäsie die Anziehungskraft auf einen Satelliten schon mit vielleicht 100 Termen charakterisiert. Dank der vielen Umläufe, während denen man die Bahnen der künstlichen Erdsatelliten beobachten konnte, liessen sich auch relativ kleine Unregelmässigkeiten in der Massenverteilung (resp. im Potential) der Erde bestimmen. Verglichen mit der Vorsatellitenära war dies in der Tat ein Quantensprung in der Erkenntnis. Fig. 5 zeigt (15 000 fach über-höht) eine Äquipotentialfläche (eine Fläche, auf der die Lotrichtung überall senkrecht steht).

Dopplerperiode ab Mitte der 1960er bis Mitte der 1980er Jahre: Ein amerikanisches Navigations-Satellitensystem mit Satelliten auf polaren Umlaufbahnen konnte auch zur *Positionsbestimmung* mit einer Genauigkeit von etwa einem Meter verwendet werden. Die Satelliten waren ausgestattet mit einem *Oszillator* (einer Atomuhr!), welcher zur Generierung sinusförmiger Trägerwellen im Radiobereich diente (Frequenzen 150 MHz und 450 MHz). Jedermann, der bereit war, einen *Dopplerempfänger* zu kaufen, konnte die Signale dieser Satelliten empfangen und damit nach etwelchem Aufwand seine eigene Position «genau» bestimmen. (In Echtzeit waren Genauigkeiten von etwa 100 Meter möglich, erst nach einigen Tagen und im Verbund mit vielen anderen Empfängern war die erwähnte Genauigkeit von etwa 1 m zu erreichen). Immerhin war klar, dass *Positionierung und Navigation mit Hilfe von Satellitensyste-men* zu einer echten Konkurrenz zur astronomischen und Kreisel-Navigation geworden war. Optische und Doppler-Ergebnisse waren etwa gleich genau.

Die *Periode des Satellite Laser Ranging (SLR) und des Lunar Laser Ranging (LLR)* begann ernsthaft zu Beginn der 1970er Jahre und dauert bis heute an. *Distanzen* zu künstlichen Erdsatelliten wurden erst auf Meter genau, später auf Bruchteile von Zentimetern gemessen. Mit LASER-Beobachtungen konnten die Koordinaten der etwa 30 Stationen des internationalen SLR-Netzes in relativ kurzer Zeit auf Zentimeter genau bestimmt werden. Da die Beobachtungen über Jahre hinweg wiederholt wurden, konnte man damit auch direkt die *gegenseitigen langsamen Bewegungen der Beobachtungsstationen nachweisen*. Es gelang mit Hilfe dieser Beobachtungstechnik, die von ALFRED WEGENER schon zu Beginn des Jahrhunderts (1912) postulierte *Kontinentalverschiebung* zu bestätigen. Besonders eindrücklich war, dass die LASER- und die unabhängigen VLBI-Ergebnisse sehr gut zueinander passten.

1969, 1971 und 1973 wurden von den amerikanischen Apollo-Missionen 11, 14 und 15 und von der russischen Mission Lunokhod 2 LASER-Reflektoren auf dem Mond deponiert. Fig. 6 zeigt den von Apollo 14 ausgesetzten Reflektor.

Damit war auch der Weg frei zum sogenannten *Lunar Laser Ranging (LLR)*. Es gibt keinen prinzipiellen Unterschied zwischen SLR und LLR. Dass es hingegen sehr viel schwieriger ist, am Mond reflektierte LASER-Pulse zu detektieren, mag man daran ermessen, dass bislang nur drei Observatorien, das amerikanische McDonald Observatory in Texas, das Observatorium auf Mt. Haleakala (Insel Maui des Hawaii-Archipels) und das französiche Observatorium in Grasse, erfolgreich über Jahre hinweg den Mond mit LASER beobachtet haben. LLR hat vom wissenschaftlichen Standpunkt aus bemerkenswerte Einsichten gebracht:

- Die Mondbewegung – Bahn und Rotation (Libration) – konnte um Grössenordnungen genauer modelliert werden.
- Es gelang der direkte Nachweis, dass sich der Mond langsam (mit einer Geschwindigkeit von 3,82 cm/Jahr) von der Erde entfernt. (Ein Effekt, der aus theoretischen Überlegungen zu erwarten ist).
- LLR birgt bis heute die besten Testmöglichkeiten für die allgemeine Relativitätstheorie (für Fachleute: Überprüfung des starken und schwachen Äquivalenzprinzips, alternative Formen der Einsteinschen Relativitätstheorie).

Heute gilt die LASER-Beobachtungstechnik als eine *Eich-Technik* (Kalibrier-Technik) für die billigere und weiter verbreitete *GPS-Technik* (siehe unten). Attraktiv ist insbesondere, dass SLR im optischen Bereich des Spektrums arbeitet und dass daher die atmosphärische Refraktion (Laufzeitänderungen der Signale in der Atmosphäre) wesentlich besser vorausgesagt werden kann als bei den übrigen Methoden (VLBI und GPS). Zudem ist SLR eine *nicht-interferometrische* Methode, d.h., genaue Resultate können mit der Einzelmessung, nicht erst mit Differenzen von gleichzeitigen Messungen, erzielt werden. Damit ist es mit SLR beispielsweise möglich, das *Geozentrum* (Schwerpunkt der Erde) relativ zu den SLR-Beobachtungsstationen sehr genau und mit hoher zeitlicher Auflösung zu bestimmen.

Die *GPS-Periode* ab Anfang der 1980er Jahre stützt sich ab auf das amerikanische Global Positioning System (GPS), ein System von 24 Navigations-

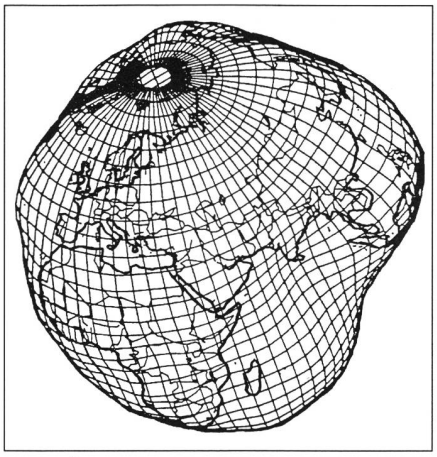
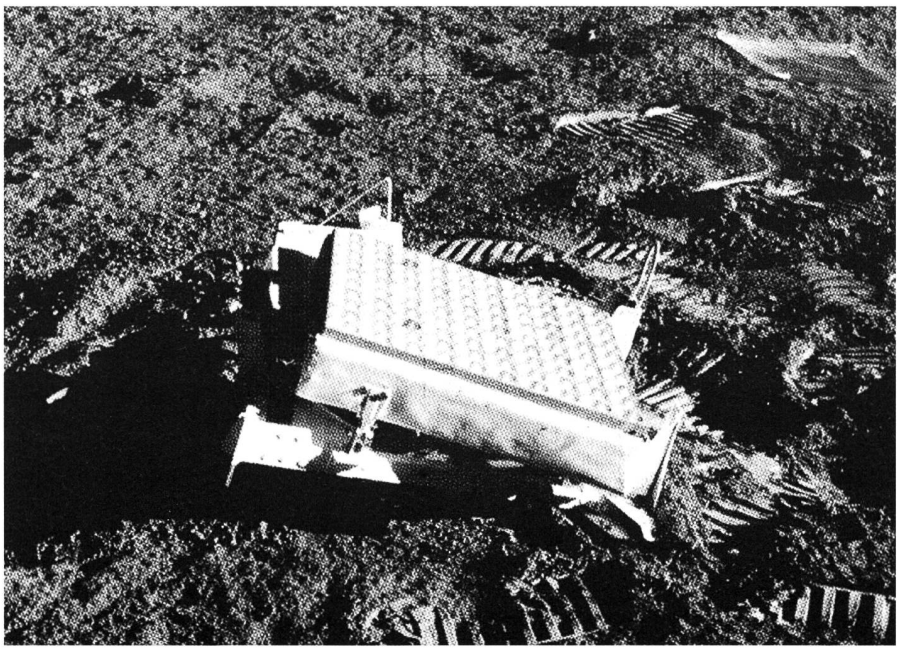


Fig. 5: Äquipotentialfläche der Erde.

Fig. 6: LASER-Reflektoren auf dem Mond, von Apollo 14 ausgesetzt.



satelliten. Die GPS-Satelliten sind in sechs Bahnebenen angeordnet (im Äquator je 60 Grad voneinander getrennt), welche je 55 Grad gegen die Äquatorebene geneigt sind. Die Satelliten bewegen sich in fast kreisförmigen Bahnen etwa 20 000 km über der Erdoberfläche, was einer Umlaufszeit von ziemlich genau 12 Stunden entspricht. Fig. 7 zeigt massstäblich die Erde und die Bahnen der GPS-Satelliten.

Abgesehen von «kleinen» Unterschieden bietet GPS im wesentlichen die gleichen Möglichkeiten, aber auch die gleichen Probleme wie VLBI, was heisst, dass man die Messgrösse zwar auf Millimeter genau bestimmen kann, dass diese aber um die atmosphärische Refraktion (im Radiobereich) korrigiert werden muss (Refraktion: Ablenkung des geradlinigen Lichtstrahls durch die Atmosphäre). Beichten müssen wir zudem, dass wir zur wissenschaftlichen Nutzung des Systems die Bahnen der GPS-Satelliten sehr genau (auf einige Zentimeter genau) bestimmen müssen. Nur dann dürfen wir – in den meisten Belangen – mit den anderen «Space Geodetic Techniques», insbesondere SLR und VLBI, vergleichbare Resultate erwarten.

Resultate

Seit 1992 gibt es einen wissenschaftlichen Dienst, den *International GPS Service for Geodynamics (IGS)*, der genaue Bahnen für alle jeweils verfügbaren GPS-Satelliten täglich zur Verfügung stellt. Den Bahnberechnungen liegen die Beobachtungsdaten eines Netzes von heute etwa 100 Stationen zugrunde (siehe Fig. 9).

Jede Station beobachtet dabei im 30-sec-Takt alle über Horizont befindlichen Satelliten. Pro Tag und Station fallen etwa 1,5 MBytes an Daten an. Diese werden wenige Stunden nach der Beobachtung (meist via Internet) von den Stationen zu regionalen und schliesslich globalen Datenzentren übermittelt. Von dort werden sie von IGS-Rechenzentren abgeholt und verarbeitet.

Die IGS-Rechenzentren bestimmen nicht nur die Bahnen (jede Bahn wird pro Tag durch etwa 20 Parameter beschrieben), sondern auch die Erdrotationsparameter (Koordinaten des Pols auf der Erdoberfläche, Tageslänge in Atomzeitsekunden), die atmosphärische Refraktion als Funktion der Zeit und viele andere Parameter.

Ein IGS-Rechenzentrum befindet sich am Astronomischen Institut der Universität Bern (AIUB). Das Rechenzentrum heisst CODE (Center for Orbit Determination in Europe) und ist eine Zusammenarbeit des Bundesamtes für Landestopographie, des deutschen Instituts für Angewandte Geodäsie (IfAG), des französischen IGN (Institut Géographique National) und des AIUB. Wir wollen hier ausgewählte CODE-Resultate vorstellen.

Fig. 10 zeigt die während der letzten Jahre von CODE bestimmte Polschwankung (Wanderung des Nordpols auf der Erdoberfläche).

Wie wir sehen, bewegt sich der Pol tatsächlich auf einem «Kreis» mit langsam variierendem Radius. Die Genauigkeit, mit welcher der Pol heute jeden Tag bestimmt wird, beträgt etwa 0,0002" [0,2 milliarcseconds(mas)], was auf der Erdoberfläche etwa 6 mm entspricht! Gegenüber der bestmöglichen Auflösung ohne Zuhilfenahme von künstlichen Erdsatelliten (oder VLBI) ist dies eine Verbesserung um etwa einen Faktor 1000. Eine Frequenzanalyse dieser Bewegung zeigt übrigens, dass die dominierende Periode der Polschwankung nicht 300 Tage beträgt (wie von EULER vorhergesagt), sondern etwa 430 Tage. Der Unterschied erklärt sich durch die Elastizität der Erde, ja, er ist wohl der beste Beweise dafür, dass die Erde kein starrer Körper ist. Die Periode von etwa 430 Tagen wird übrigens zu Ehren von SETH CARLO CHANDLER (1846–1913), der diese 1891 empirisch bestimmte und auf den signifikanten Unterschied zur Eulerschen Periode hinwies, *Chandler-Periode* genannt.

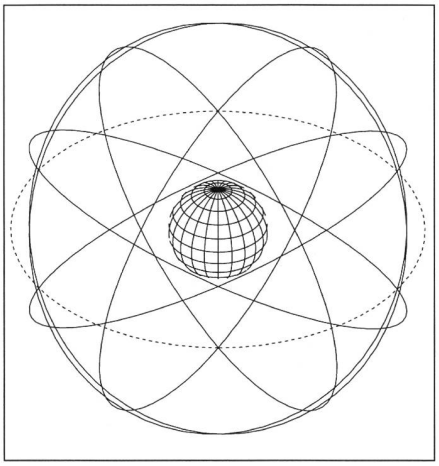


Fig. 7: Bahnen der GPS-Satelliten. Das GPS-Satellitensystem aus einer Breite von 35° gesehen.

Beobachtung heute

■ Im Observatorium Zimmerwald betreibt die Universität Bern zusammen mit dem Bundesamt für Landestopographie eine von etwa 30 Stationen des Internationalen Satelliten-LASER-Netzes.

Fig. 8a zeigt das neue Zimmerwalder 1-m-Astrometrie- und LASER-Teleskop (kurz ZIMLAT genannt). Mit diesem Instrument können sowohl Richtungs- (mit CCDs) als auch Distanzmessungen (mit LASER) zu Satelliten durchgeführt werden. Für VLBI wird unter anderen auch das in Fig. 8b dargestellte Radio-Teleskop in Effelsberg (in der Nähe von Bonn) benützt. Mit einem Durchmesser von 100 m ist es das grösste voll bewegliche Radioteleskop auf der Welt. Fig. 8c zeigt einen GPS-Empfänger mit festeingebauter Microstrip-Antenne. Ein permanenter GPS-Empfänger befindet sich im Observatorium Zimmerwald.

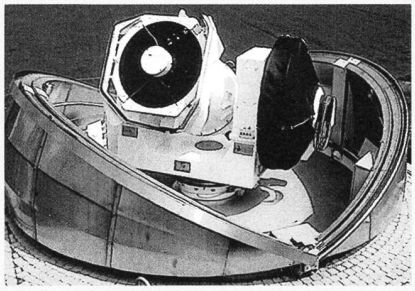


Fig. 8a: Offene Kuppel mit Teleskop.

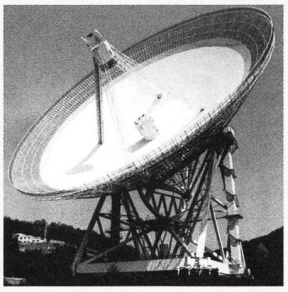


Fig. 8b: Radio-Teleskop (in Effelsberg/Bonn).

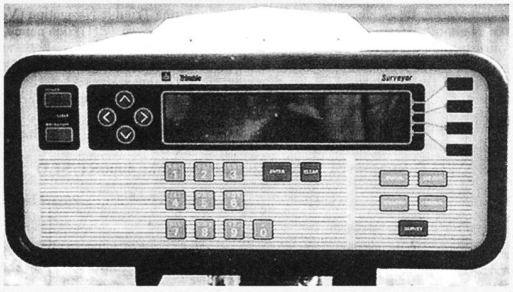


Fig. 8c: GPS-Empfänger mit eingebauter Antenne.

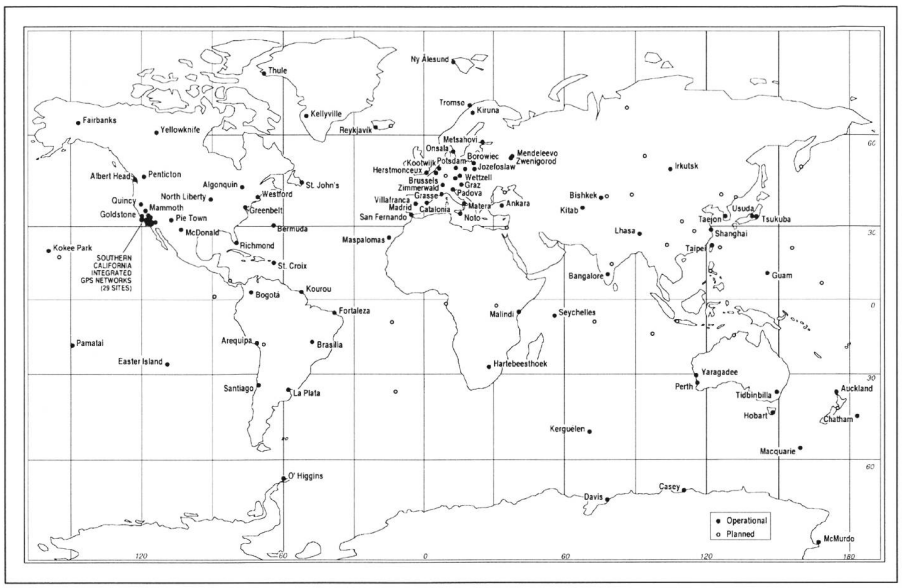


Fig. 9: Das globale GPS-Stationsnetz.

Fig. 11 zeigt die von CODE bestimmte Tageslänge in Atomzeit [effektiv die Tageslänge minus 86 400s (Atomzeit) in Einheiten von Millisekunden]. Wir sehen, dass die Tageslänge täglich mit einer Genauigkeit von einigen Hundertstel Millisekunden bestimmt wird. Die kurzperiodischen Änderungen (Perioden bis zu einem Monat) sind durch die Gezeitendeformationen der Erde erklärbar. Immerhin sei erwähnt, dass wir hier erneut einen direkten Beweis dafür sehen, dass der gesamte Erdkörper elastische Deformationen erleidet. Resultate dieser Qualität und mit dieser hohen zeitlichen Auflösung sind heute nur dank der Satellitengeodäsie möglich.

Interessanter, und erst in den letzten Jahren verstanden, sind die deutlich sichtbaren jährlichen Schwankungen der Tageslänge. Tatsächlich gelingt es, diese Variationen zum grössten Teil durch die «Jetstreams», die grossräumigen Windsysteme in der Atmosphäre, zu erklären. Dies wird durch Fig. 12 untermauert, wo die Änderungen der dritten Komponente des Drehimpulses der Erde als Funktion der Zeit aufgetragen werden, einerseits abgeleitet aus den gemessenen Tageslängen, andererseits berechnet aus meteorologischen Messungen (globale Modelle für Druck und Windgeschwindigkeiten). Die beiden Kurven sind absichtlich in vertikaler Richtung gegeneinander verschoben, um die grosse Ähnlichkeit besser sichtbar zu machen. Es ist also in der Tat so, dass die Atmosphäre die Erdrotation beeinflusst. Das Beispiel zeigt, dass heute Gebiete wie Fundamentalastronomie, Geophysik und sogar Meteorologie immer enger zusammenrücken.

Neben den täglichen Arbeiten werden von den IGS-Rechenzentren jede Woche die Koordinaten sämtlicher Beobachtungsstationen des IGS-Netzes (zusätzlich zu den Bahnelementen der Satelliten) bestimmt. Aus einer langen Zeitreihe von Koordinaten lassen sich sodann (fast) hypothesenfrei die Geschwindigkeiten der Stationen des IGS-Netzes relativ zum ITRF (International Terrestrial Reference Frame) berechnen. Fig. 13 zeigt das Resultat einer vierjährigen CODE-Koordinatenreihe. Die Pfeile deuten an, mit welchen Geschwindigkeiten (in cm/Jahr) sich die Stationen gemäss CODE bewegen. Man misst also heute in der Satellitengeodäsie die Kontinentalverschiebung mit grosser Genauigkeit fast in «real time». Man lasse sich übrigens von der Kleinheit der Geschwindigkeiten nicht täuschen: Bern bewegt sich gemäss Fig. 13 mit einer Geschwindigkeit von etwa 2,5 cm/Jahr nach Nordosten. Im Jahrhundert beträgt dieser Effekt also schon 2,5 m, in einer Million Jahren 25 km. Bedenkt man, dass das Erdalter etwa 4,5 Milliarden Jahre beträgt, sind die bestimmten Geschwindigkeiten erdgeschichtlich durchaus bedeutend!

Satellitenexperimente

Bekanntlich ist die Qualität der astronomischen Beobachtungen durch die Erdatmosphäre sehr stark eingeschränkt, in vielen Bereichen des Spektrums (z.B. im Infraroten) ist eine Beobachtung von der Erde aus kaum sinnvoll. Es erstaunt daher nicht, dass heute viele astronomische Beobachtungen von künstlichen Erdsatelliten aus gemacht werden. Das bekannteste Beispiel dürfte wohl – auch wegen der ursprünglichen Schwierigkeiten mit der Optik und der spektakulären Reparatur u.a. durch den Schweizer Astronauten CLAUDE NICOLLIER – das Weltraum-Teleskop Hubble sein.

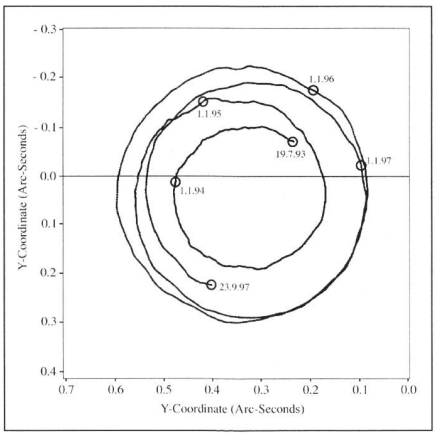
In der Fundamentalastronomie wird es nie möglich sein, «alle» Beobachtungen in den Raum zu verlegen: Die Referenzsysteme am Himmel und auf der Erde bilden eine Einheit; die Transformation zwischen den Systemen macht die Beobachtung von der Erde aus zur Notwendigkeit. Daraus darf man aber nicht schliessen, dass Beobachtungen vom erdnahen Raum aus in der Fundamentalastronomie ohne Bedeutung sind. Wir wollen zwei sehr verschiedene Beispiele skizzieren.

TOPEX/POSEIDON

TOPEX/POSEIDON ist eine gemeinsame Mission der amerikanischen NASA und der französischen Agentur CNES (Centre National d'Etudes Spatiales). Die Mission muss im Rahmen des *Global Change Programms* gesehen werden. TOPEX/POSEIDON ist die erste Satelliten-Mission, welche speziell zur Untersuchung der *Meeresströmungen* durchgeführt wird. Zwei Radar-Altimeter, ein amerikanisches und ein französisches, messen die genaue Höhe der Meeresoberfläche unter dem Satelliten. Aus den Messungen lässt sich Information zur Zirkulation des Wassers in den Ozeanen gewinnen. Der Satellit wurde am 10. August 1992 gestartet und hat seit September 1992 Meereshöhen-Messungen mit bisher unerreichter Genauigkeit (Messfehler wenige Zentimeter) geliefert. Die Mission war auf drei Jahre angesetzt. Der Satellit ist noch heute (im Jahr 1998) aktiv und liefert nach wie vor hervorragende Messungen.

Wie funktioniert TOPEX/POSEIDON? Der Satellit überfliegt immer wieder, aber bei verschiedenen Stellungen von Sonne und Mond, praktisch die gleichen Stellen der Meeresoberfläche.

Fig. 10: Die Polschwankung von Mitte 1993 bis Mitte 1997.



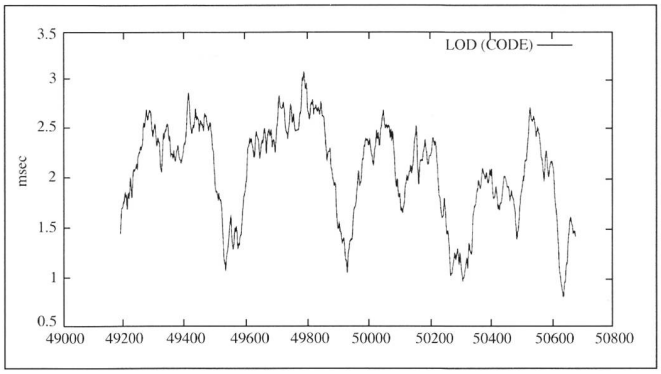


Fig. 11: Tageslänge (Mitte 1993 bis Mitte 1997), bestimmt von CODE.

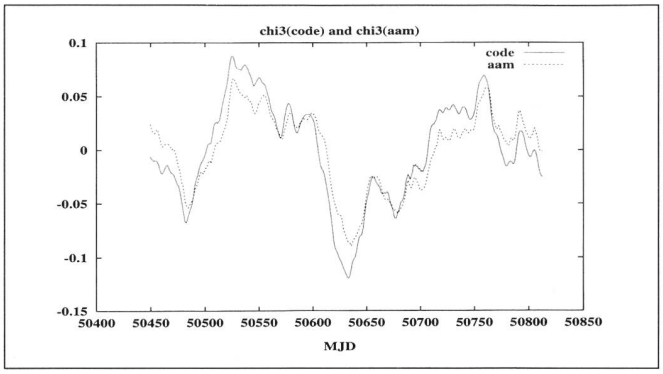


Fig. 12: Änderung der dritten Komponente des atmosphärischen Drehimpulses, hergeleitet aus CODE-Tageslängenbestimmungen und aus meteorologischen Messungen.

Trägt man die Altimetermessungen nicht als Funktion der Zeit, sondern als Funktion der Stellung von Sonne und Mond auf, kann man sich im Prinzip «jeden Punkt» der Meeresoberfläche als mit einem Gezeiten-Pegel ausgestattet denken. Man erhält so die zeitliche Entwicklung der Meereshöhe für jeden Punkt der Meeresoberfläche.

Wozu dienen diese Meereshöhenmessungen? Zunächst lassen sich aus ihnen globale Massenumschichtungen herleiten. Mit Betrachtungen, die auf PIERRE SIMON LAPLACE zurückgehen (Laplacesche Gezeitengleichungen) lassen sich daraus «im wesentlichen» die Meeresströmungen herleiten, welche wiederum für das Global Change Programm von grösster Bedeutung sind. Nach Abzug der gezeitenbedingten Bewegungen hofft man, die sehr kleinen Signale der langzeitlichen Meeresspiegelveränderungen zu sehen.

Welches ist das Interesse der Fundamentalastronomie an solchen ozeanographischen Experimenten? Wir geben zwei Antworten:

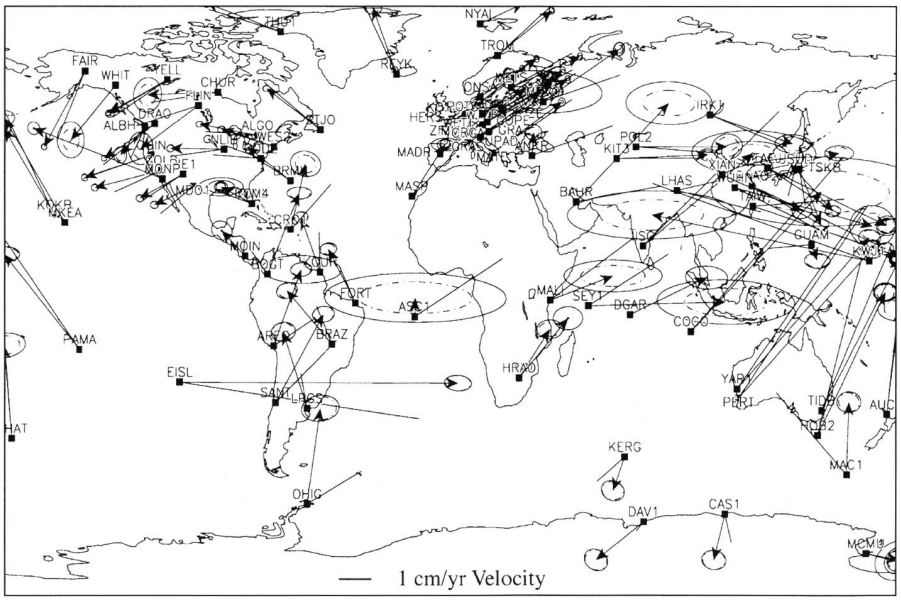
- Die Fundamentalastronomie muss sich an solchen Experimenten beteiligen, denn nur durch die Verknüpfung dieser Messungen mit dem hochgenauen terrestrischen Referenzsystem sind Fragen wie die nach der langsamen Änderung der Meeresspiegels sinnvoll zu beantworten.
- Meeresspiegeländerungen und Meeresströmungen bewirken (analog zu den Druckänderungen und den Windsystemen der Atmosphäre) Drehimpulsänderungen, die wir im Spektrum der Erdrotation wiederzufinden erwarten. Dass wir in der Erdrotation tatsächlich die Auswirkungen der ozeanischen Gezeiten sehen, wird durch die Fig. 15 belegt, wo wir von einer speziellen CODE-Polserie mit einer zeitlichen Auflösung von zwei Stunden (unseres Wissens eine weltweit einzigartige Serie) einen Ausschnitt von zehn Tagen sehen, welche belegt, dass die hochfrequente Polschwankung sehr gut mit dem aus den TOPEX/POSEIDON-Messungen berechneten Ray-Modell zu erklären ist.

HIPPARCOS

Die HIPPARCOS-Mission stand anfänglich unter einem schlechten Stern. Zwar gelangen der Start mit einer Ariane-Trägerrakete am 9. August 1989 und das Einschiessen in den elliptischen geostationären Transfer-Orbit (GTO) problemlos, hingegen konnte der Apogäumsmotor weder, wie geplant, am 11. August noch später gezündet werden. Dies bedeutete, dass HIPPARCOS gar nie in die geplante geostationäre Bahn geschossen werden konnte. Die Mission konnte schliesslich im GTO zum grössten Teil und mit grossem Erfolg doch durchgeführt werden. Der Satellit wurde im August 1993, nach mehr als vier Jahren Mission und drei Jahren astronomischer Messungen, abgeschaltet.

Im Akronym werden die Sternparallaxen an prominenter Stelle erwähnt. Unter der Parallaxe eines Sterns verstehen wir den Winkel, unter dem der Bahnradius der Erde um die Sonne (die astronomische Einheit) vom Stern aus gesehen wird. Diesen Winkel können wir von der Erde oder von einem Erdsatelliten aus z.B. durch die Verschiebung des Sterns im Laufe des Jahres relativ zu den Hintergrundsternen (wegen unserer Bahn um die Sonne herum) messen. Aus Sternparallaxen können wir sodann mit elementarer Trigonometrie die Distanzen zu den Sternen berechnen. Mit der HIPPARCOS-Mission sind heute die Parallaxen von etwa 100 000 Sternen mit einer Genauigkeit von 0,002" bekannt. Die Eigenbewegungen konnten mit einer Genauigkeit von etwa 0,005"/Jahr bestimmt werden. Neben dem Hauptkatalog wurde der Tycho-Katalog erstellt mit insgesamt

Fig. 13: Geschwindigkeiten der IGS-Stationen, bestimmt von CODE.



Satelliten

■ Fig. 14a zeigt die schematische Darstellung eines GPS-Satelliten. GPS-Satelliten sind recht gross und massiv (Die rechteckigen Sonnen-Panels sind etwa 3,2 m lang und 1,7 m breit, die Satelliten-Masse beträgt ca. 900 kg). Das Herzstück des Satelliten besteht wiederum aus einem Oszillator, von welchem zwei Trägerfrequenzen von 1,57542 GHz und 1,2276 GHz (was Wellenlängen von etwa 19 cm und 24 cm entspricht) abgeleitet werden. Diese Trägerwellen dienen dazu, Information vom Satelliten zum Empfänger zu übertragen.
In Fig. 14b ist der LASER-Satellit LAGEOS (LAser GEOdynamic Satellite) dargestellt. LAGEOS hat einen Durchmesser von 60 cm, ist mit 426 Retroreflektoren bestückt und fliegt in einer mittleren Höhe von 5900 km. LASER-Reflektoren sind «klein und handlich», es sind Glasprismen, welche das Licht bei beliebigem Einfallwinkel wieder in die gleiche Richtung reflektieren; sie entsprechen den «Katzenaugen» beim Fahrrad.
Fig. 14c zeigt den Satelliten TOPEX/POSEIDON mit seinen Instrumenten.
Der Astrometrie-Satellite HIPPARCOS ist in Fig. 14d dargestellt. Der Name HIPPARCOS erinnert an HIPPARCH (180-125 v.Chr.), den Schöpfer eines der ersten Sternkataloge der Astronomie, der im Rahmen seiner Arbeiten unter anderem die astronomische Präzession entdeckte. Der Name steht für HIgh Precision PARallax COllecting Satellite und charakterisiert den bislang ersten und einzigen Satelliten, der von der Europäischen Raum-fahrtagentur ESA rein für die Zwecke der Astrometrie (Positionsastronomie) in Umlauf gebracht wurde.

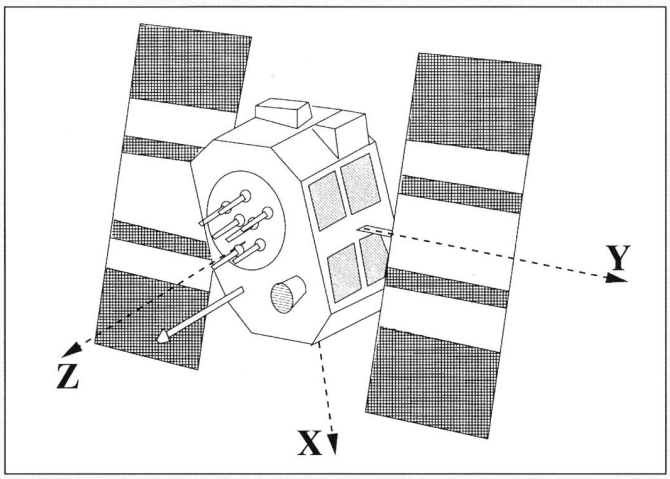


Abb 14a : Schematische Darstellung eines GPS-Satelliten.

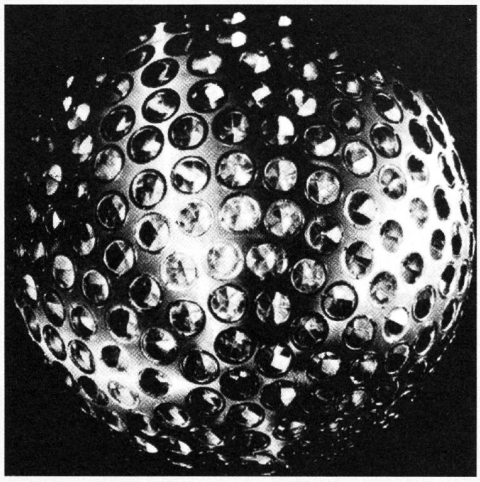


Fig. 14b: Der Satellit LAGEOS, ein Satellit für die Laserentfernungsmessung.

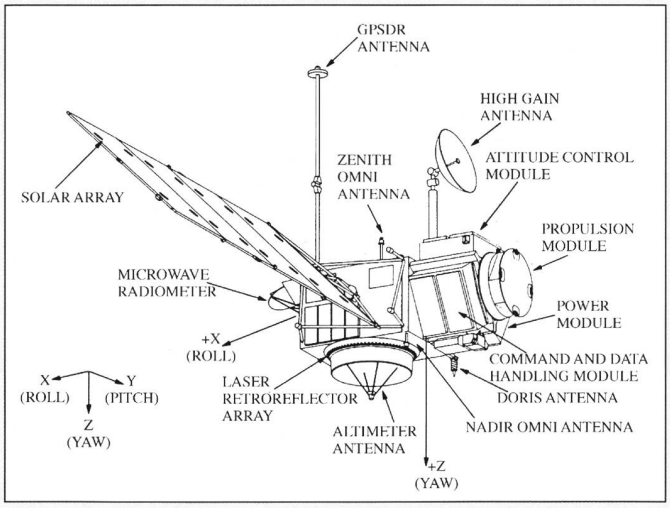


Fig. 14c: Der Satellit TOPEX/POSEIDON mit all seinen Instrumenten.

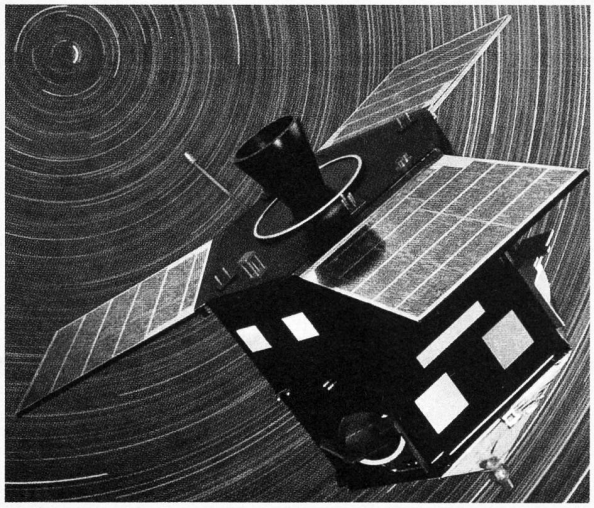


Fig. 14d: Modell des Satelliten HIPPARCOS.

etwa 1 000 000 Sternen. Auch hier liegen Positions-, Eigenbewegungs- und Parallaxenmessungen mit einer etwa zehnmal geringeren (aber immer noch wesentlich höheren Genauigkeit als vor der HIPPARCOS-Mission) vor. Man darf deshalb bei der HIPPARCOS-Mission von einem Quantensprung in der Verbesserung der erzielten Genauigkeit sprechen. Neben den astrometrischen Messungen wurden auch Helligkeitsmessungen im grünen und blauen Spektralbereich durchgeführt – Messungen, die unter anderem zur Bestimmung der Oberflächentemperatur eines Sterns verwendet werden können. Parallaxen resp. die daraus abgeleiteten Sterndistanzen sind nicht zuletzt in der Astrophysik zur Eichung der photometrischen kosmischen Distanzskala von grösster Bedeutung.

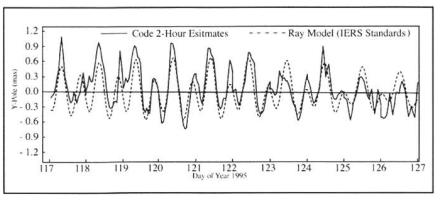


Fig. 15a: Auswirkung der ozeanischen Gezeiten (Pol-Serie): Untertägliche Polbewegung in x (1. Januar 1995 bis 15. Mai 1997).

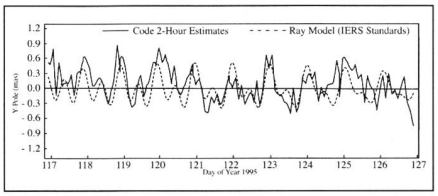


Fig. 15b: Auswirkung der ozeanischen Gezeiten (Pol-Serie): Untertägliche Polbewegung in y (1. Januar 1995 bis 15. Mai 1997).

Für die Fundamentalastronomie ist es wichtig, dass Parallaxen nicht unabhängig von der Position der Sterne und nicht unabhängig von ihrer Eigenbewegung, d.h. ihrer Bewegung in unserem Milchstrassensystem, bestimmt werden können.

Damit ist anzunehmen, dass bei relativen Positionsbestimmungen in der Satellitengeodäsie, wie sie beispielsweise von Zimmerwald aus durchgeführt werden (Fig. 16), die Katalogposition eines Sterns als Fehlerquelle praktisch ausscheidet. Mit dem HIPPARCOS-Katalog und mit der CCD-Astrometrie sind die Voraussetzungen gegeben, dass optische Richtungsbeobachtungen in Zukunft auch in der Fundamentalastronomie wieder Bedeutung erlangen.

Raumschrott (Space Debris)

Seit 1957 sind fast 4000 Raketen gestartet worden. Es wurden etwa 25000 beobachtbare Objekte erzeugt, die zu einem grossen Teil beim Wiedereintritt in die Atmosphäre verglüht sind. Trotzdem werden heute etwa 8500 Objekte mit Durchmessern von 10 cm oder mehr beobachtet. Es gibt zu denken, dass nur etwa 500 dieser Objekte funktionstüchtige Satelliten sind. Der Rest ist Raumschrott (alte Satelliten oder Teile davon, Bruchstücke aus Explosionen, Werkzeuge, etc.).

Die Verteilung dieser Objekte ist in Fig. 17 gezeigt. Die Verteilung ist nicht gleichförmig. «Dicht besiedelt» ist der erdnahe Raum und der Gürtel, in welchem sich die geostationären Satelliten befinden. Man weiss zudem, dass sehr viele Trägerraketen in geostationären Transferbahnen sind.

Fig. 18 zeigt die vier geostationären Satelliten Astra A-D sowie ein nicht identifiziertes Schrotteil. Dieses CCD-Bild wurde am Observatorium Zimmerwald aufgenommen.

Raumschrott wird zu einer Bedrohung der bemannten und unbemannten Raumfahrt. Es ist klar, dass man die Produktion von Raumschrott nicht gänzlich verhindern kann (dies ist insbesondere für Objekte in hohen Umlaufbahnen der Fall, da dort der Luftwiderstand die Satelliten kaum zum Absturz bringt). Es leuchtet aber auch ein, dass wir nicht im gleichen Ausmass wie bis jetzt Trümmer produzieren dürfen, wenn wir auch den künftigen Generationen die Freude an der Weltraumforschung gönnen wollen.

PROF. DR. GERHARD BEUTLER
Direktor Astronomisches Institut der Universität Bern

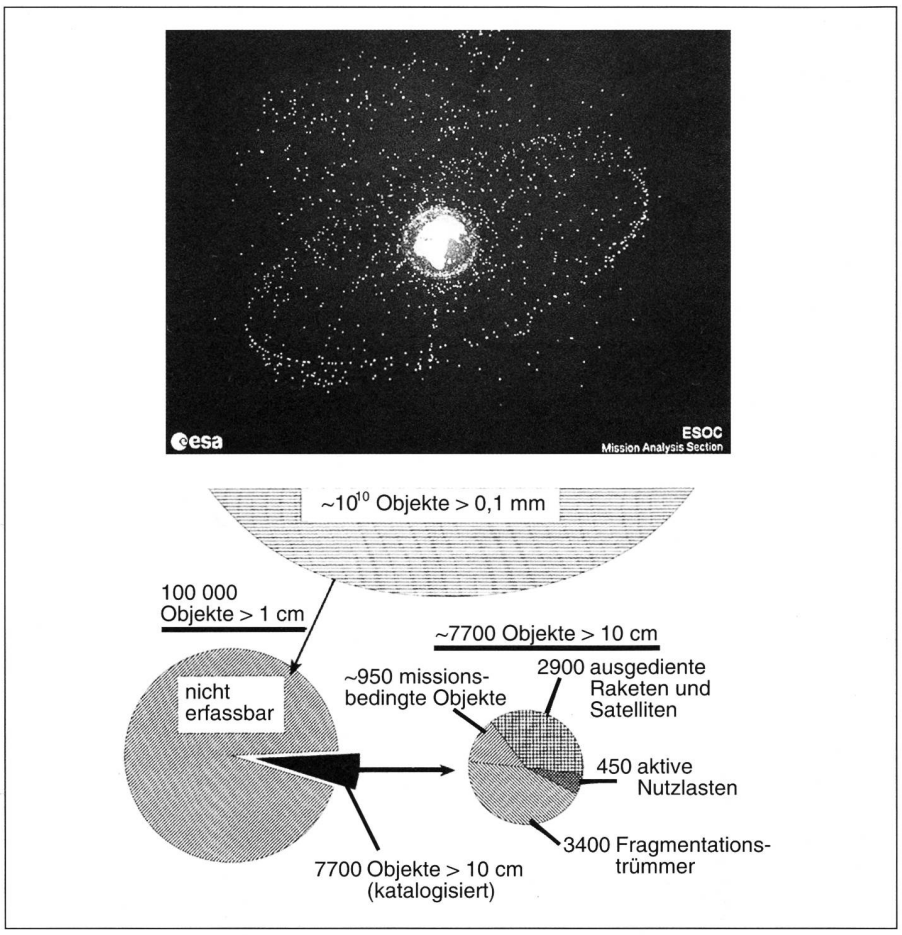


Fig. 17: Verteilung des Raumschrotts: Bekannte Objekte in 200–35000 km Höhe.

Fig. 16: Geostationäre Satelliten TDF-1 und TDF-2 (Pfeile) mit einem vorbeilaufenden Referenzsstern. Überlagerung einer Serie von zehn Aufnahmen.

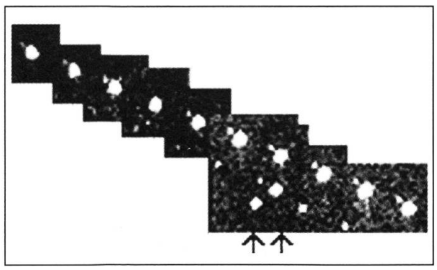
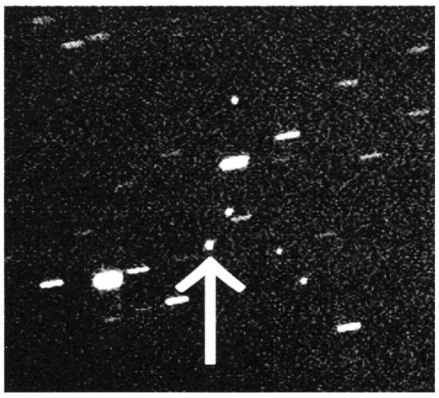


Fig. 18: Die geostationären Satelliten Astra A bis Astra D sowie ein Schrotteil. Die Striche bedeuten Sterne, die vier kleinen Punkte Satelliten. Der grosse Punkt (siehe Pfeil) muss somit ein Trümmerteil sein.



Verdankungen: Der Verfasser möchte sich bei den DRS. WERNER GURTNER, MARKUS ROTHACHER und THOMAS SCHILDKNECHT für das reichhaltige Bild- und Figurenmaterial bedanken. DR. ANDREAS VERDUN dankt er für die Hilfe bei der Redaktion dieses Artikels und für die Assistenz in «historischen Belangen».