

Der Laser

★ Titanium-Saphir Laser-System

λ_1 : ~423 nm λ_2 : ~846 nm, je ca. 50 mJ

★ Pulslänge: 100 ps, Kadenz: 10 Hertz

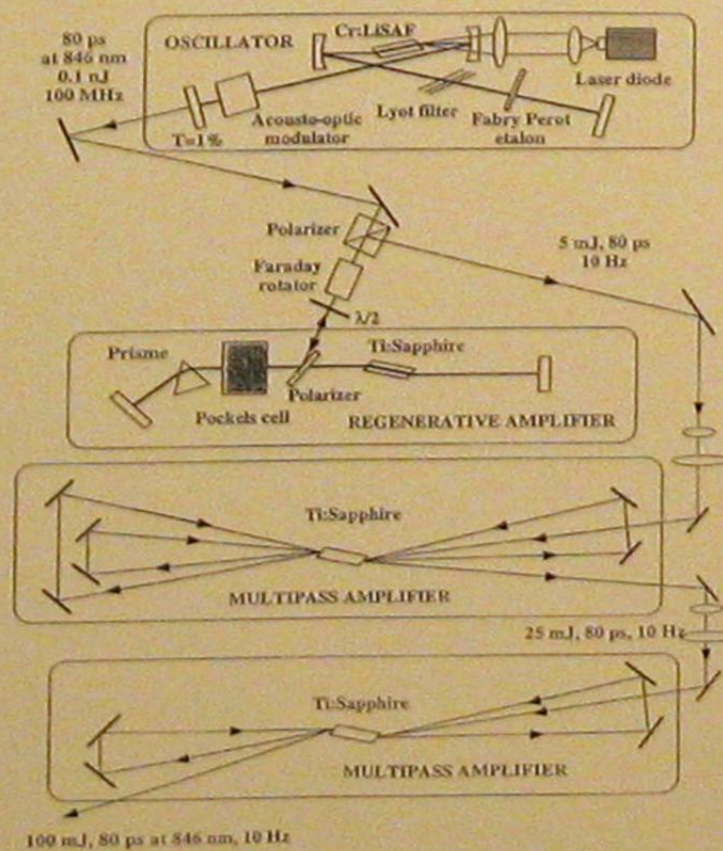
★ Hersteller: BM Industries, Frankreich

★ Besteht aus:

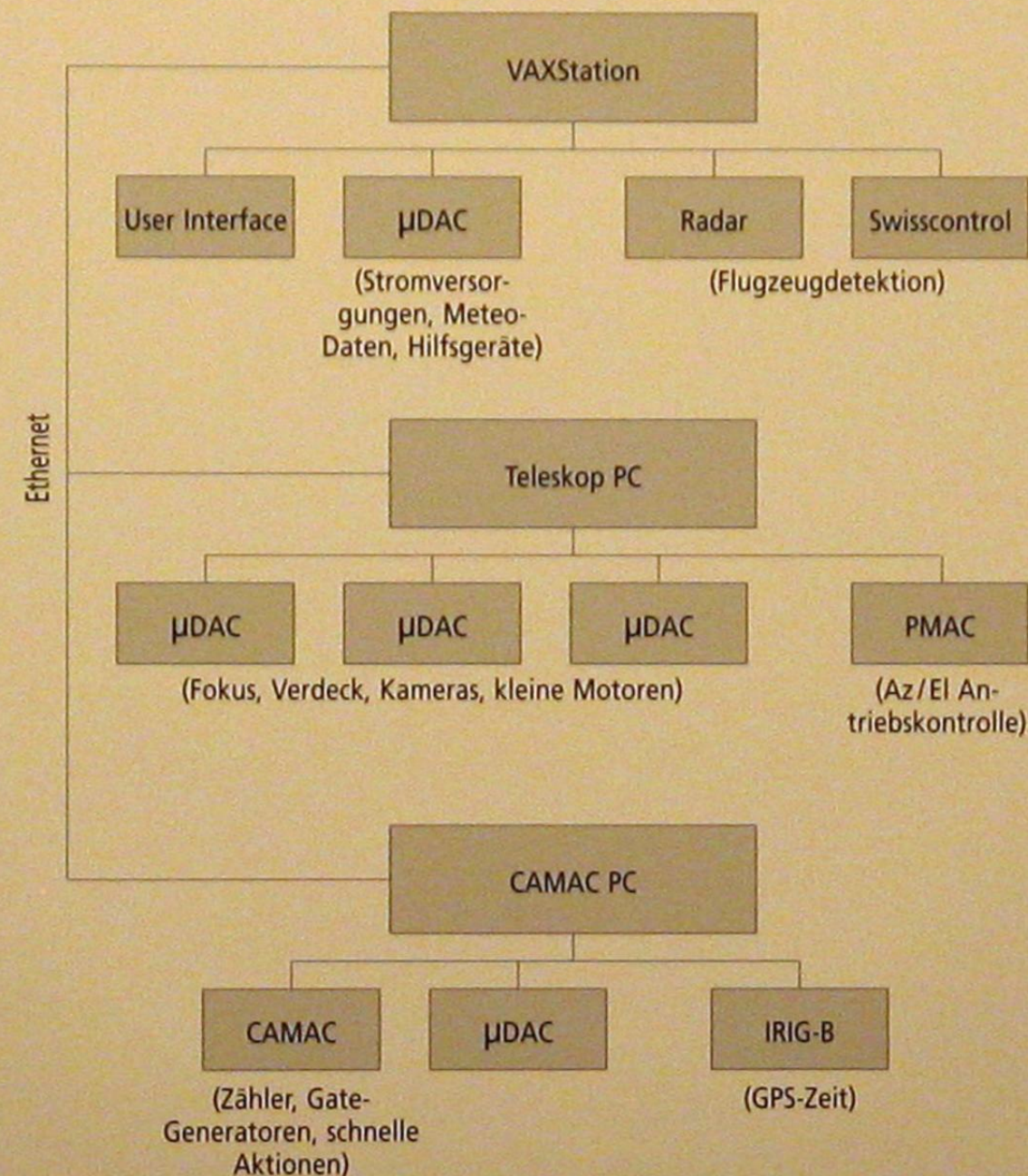
1 Cr:LiSAF Oszillator (diodengepumpt)

3 Ti:Al₂O₃ Verstärker (gepumpt mit Nd:YAG Laser)

Dies ist der erste solche Laser, der für SLR-Anwendungen entwickelt wurde.



Das Kontroll-System



Die beteiligten Institutionen

★ Universität Bern

- Astronomisches Institut
- Philosophisch-Naturwissenschaftliche Fakultät

★ Bundesamt für Landestopographie

★ Kanton Bern

- Kantonales Hochbauamt

★ Schweizerischer Nationalfonds

★ Schweizerische Akademie der Naturwissenschaften

- Schweizerische Geodätische Kommission

★ Eidgenössische Technische Hochschule

- Institut für Geodäsie und Photogrammetrie (Erdgezeitenstation)

SLR: Sende- und Empfangs-Pfad

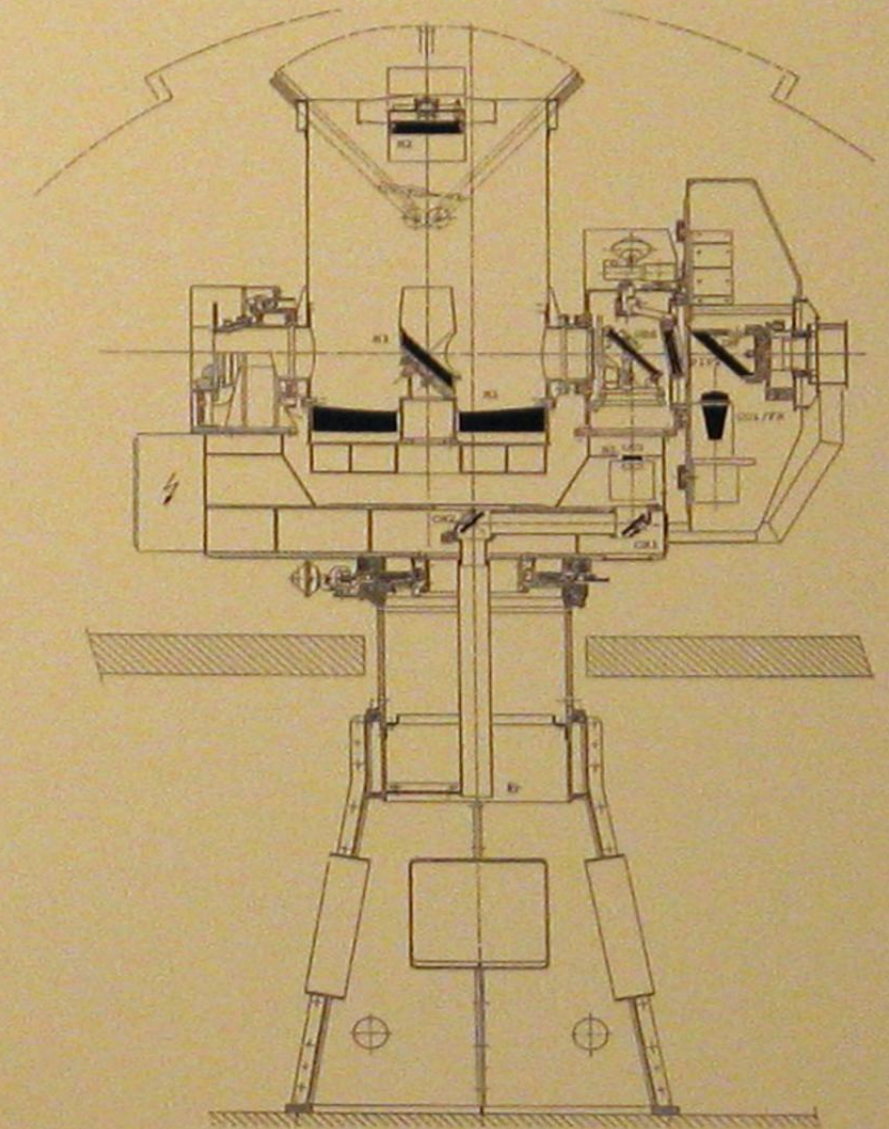
Sendepfad

- ★ Der Laserstrahl wird mit Axikon in einen Ring expandiert.
- ★ Strahl wird über Coudé-Pfad und Strahlteiler in das Teleskop geführt, verlässt Teleskop als konzentrischer Ring um den Sekundärspiegel.
- ★ Identischer Sende- und Empfangspfad im ganzen Coudé-Pfad und Teleskop.
- ★ T/R Switch: 45°-Spiegel mit zentralem Loch.

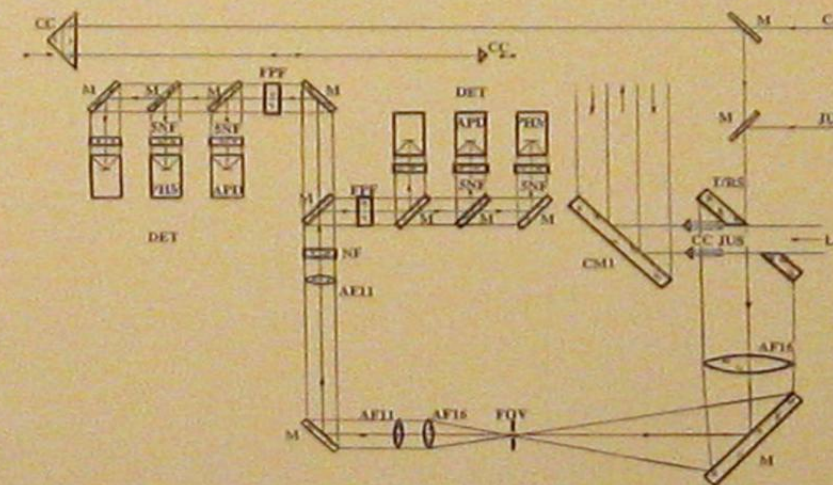
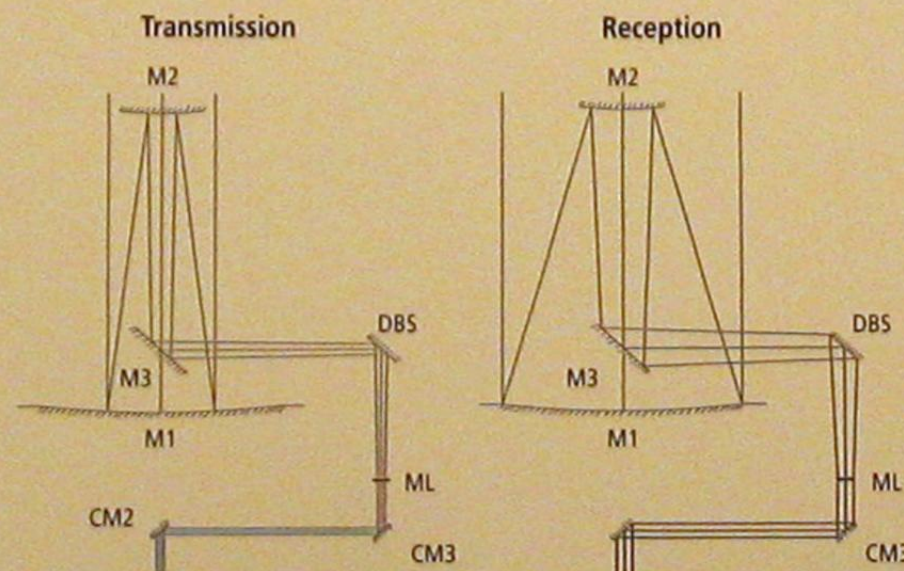
Empfangspfad

- ★ Zwei Lochblenden für die Gesichtsfeld-Begrenzung (> 20")
- ★ Schneller Verschluss wegen Rückstreulicht
- ★ Strahlteiler für die zwei Wellenlängen
- ★ Filter:
 - Fabry-Perrot (0.1 nm)
 - 5-nm-Filter vor jedem Detektor
- ★ Detektoren:
 - Hamamatsu Photomultiplier
 - SPAD (Avalanche-Dioden)

Querschnitt des neuen Teleskops



Laser Path



AF	Afocal system	JUS	Alignment laser beam
APD	Avalanche photo diode (detector)	LAS	Transmitted laser beam
CAL	Calibration laser beam	M	Mirror
CC	Corner cube reflector	PHM	Photomultiplier (detector)
CM1	First Coudé mirror	T/RS	Transmit/receive switch
FOV	Field of view definition	SNF	5 ns spectral filter
FPF	Fabry-Perrot 0.1 nm filter		

Anforderungen an das neue System

Astronomisches Teleskop

- ★ Hochgenaue Nachführung für
 - stationäre Objekte (geostationäre Satelliten)
 - langsame Objekte (zum Beispiel Kleinplaneten)
 - schnelle Objekte (tiefe Satelliten)
 - Zwei Nachführbereiche
 - = 0–1 Bogenminute/Sekunde mit Belichtungszeiten von mehrere Minuten
 - = 0–1 Grad/Sekunde mit Belichtungszeiten von wenigen Zehntelsekunden
- ★ Hohe Bildauflösung: ca. 1" pro CCD pixel
- ★ Nachführung kleiner Objekte (einige cm)
- ★ Derotation des Gesichtsfeldes
- ★ Schnelles Umschalten von einem Experiment zum andern, das heisst mehrere Kamera-Montierungen mit individuellen Reduktionsoptiken

Generell

- ★ Gleichzeitig SLR und astrographischer Betrieb möglich, kleine Reduktion der Leistung (zum Beispiel Bildqualität, Laser-Kadenz) akzeptierbar
- ★ Umschalten vom reinen SLR-Betrieb in den astrographischen Modus und umgekehrt in wenigen Sekunden
- ★ Betrieb:
 - Tagsüber, Dämmerung und Mondnächte: SLR
 - Sonst: vor allem CCD

Satelliten-Distanzmessungen

- ★ Messen von tiefen Satelliten bis zu den geostationären Satelliten (400–40 000 km)
- ★ Genauigkeit: Wenige mm bis cm pro Einzelschuss
- ★ Auch Tagesbeobachtungen möglich
- ★ Rasches Wechseln zwischen Satelliten
- ★ Vollautomatischer Betrieb
- ★ Vorbereitet für Zweifarben-Messungen
- ★ 10 bis 20 Grad minimale Elevation
- ★ Visuelle Nachführungskontrolle
 - Grosses Gesichtsfeld (> 0.5 Grad)
 - Kleine Objekte sichtbar

Das Astronomische Institut der Universität Bern

Chronologie

Das Institut wurde **1921** von *Professor Sigmund Mauderli* gegründet.

1922 konnte die Sternwarte an der Muesmattstrasse eingeweiht werden. Bis **1961** war die Sternwarte auch der Sitz des Instituts.

Professor Mauderli arbeitete in der klassischen Astronomie. In Zusammenarbeit mit dem Astronomischen Recheninstitut in Heidelberg wurden Bahnen von Kleinplaneten und Kometen durch numerische Integration und Störungsrechnung bestimmt.

1946 wurde *Professor Max Schürer* Direktor des Instituts. Er verbreiterte insbesondere das Vorlesungsangebot. Seine Astrophysik und seine Betrachtungen zur Struktur und Bewegung des Milchstrassensystems wurden für viele Berner Physik- und Mathematik-Studenten zu einem Begriff.

In den Jahren **1955** und **1956** wurde das Observatorium Zimmerwald auf dem Längenberg gebaut. Seit **1959** wurde vor allem die Schmidt-Kamera zur Himmelsüberwachung eingesetzt. Supernovasuche, Kleinplaneten- und Kometenjagden waren angesagt!

Im Jahre **1961** erfolgte der Umzug des Instituts von der Muesmattstrasse an die Sidlerstrasse, ins Institut für Exakte Wissenschaften.

Etwa Mitte der Sechziger Jahre erfolgte der *Einstieg in die Satellitengeodäsie* durch photographische Beobachtung künstlicher Erdsatelliten mit der Schmidt-Kamera in Zimmerwald auf Initiative von Professor Schürer.

1976 konnte in Zimmerwald die zweite Kuppel, die sogenannte *Satellitenbeobachtungsstation Zimmerwald*, in Zusammenarbeit mit dem Institut für Angewandte Physik gebaut werden.

1980 wurde *Professor Paul Wild* Direktor des Instituts. Zusätzlich zu seiner sehr erfolgreichen Beobachtertätigkeit setzte er in der Lehre neue Akzente.

Geodynamik und *Global Positioning System GPS* wurden in Bern zunächst durch die Tätigkeit von *Professor Ivo Bauersima* zu wichtigen Begriffen.

Ab **1984** profilierte sich das AIUB durch die Entwicklung anspruchsvollster Auswerteverfahren in der Satellitengeodäsie. Die *Bernese GPS Software* wurde ab **1984** weltweit zu einem Begriff in der regionalen Geodynamik.

GPS brachte einen ersten Anknüpfungspunkt mit dem Bundesamt für Landestopographie (L+T): Mit der *Bernese GPS Software* wurde das neue GPS-Landesnetz berechnet.

Die Zusammenarbeit mit der L+T wurde **1992** auch auf SLR ausgedehnt.

1991 wurde der Leiter der GPS-Gruppe, *Professor Gerhard Beutler*, neuer Direktor des Instituts. Fundamentalastronomie wurde zum offiziellen Forschungsschwerpunkt.

1992 wurde das *CODE-Rechenzentrum* gegründet. CODE steht für *Center for Orbit Determination in Europe*. Die Zusammenarbeit zwischen dem deutschen *Institut für Angewandte Geodäsie (IfAG)*, dem französischen *Institut Géographique National (IGN)*, dem Bundesamt für Landestopographie (L+T) und dem AIUB erwies sich als äusserst effizient und fruchtbar.

Mit dem Kauf der ersten CCD-Kamera im Jahre **1989** wurde eine Gruppe für optische CCD-Astrometrie geschaffen. Zusammenarbeiten mit der ESA im Gebiet *Space Debris Survey* waren ein erster Lohn für Anstrengungen in diesem Gebiet.

Das Astronomische Institut der Universität Bern

Heute



Von links nach rechts: Prof. Paul Wild, Johannes Utzinger, Dr. Werner Gurtner, Eugen Pop, Prof. Max Schürer, Dr. Thomas Schildknecht, Prof. Ivo Bauersima, Prof. Gerhard Beutler, anlässlich der Demontage des alten Teleskops im Jahr 1995.

Das Astronomische Institut der Universität Bern hat heute **Fundamentalastronomie** als Schwerpunkt.

Organisatorisch ist das Institut wie folgt gegliedert:

Infrastruktur:	Werkstätten (mechanisch/elektrisch) Sekretariat Photographie
Observatorium:	CCD-Astrometrie SLR-Beobachtung GPS-Beobachtung
GPS-Gruppe:	CODE Rechenzentrum Software Theorie
CCD-Gruppe:	Software Beobachtung Theorie

Das AIUB bildet Astronomen im Haupt-, Neben und Ergänzungsfach aus. Angeboten werden Grundvorlesungen, Praktika, Hauptvorlesungen in Fundamentalastronomie, globaler Geodynamik und in Astrophysik. Zudem werden Dienstleistungen in Form von Auskünften und Führungen angeboten.

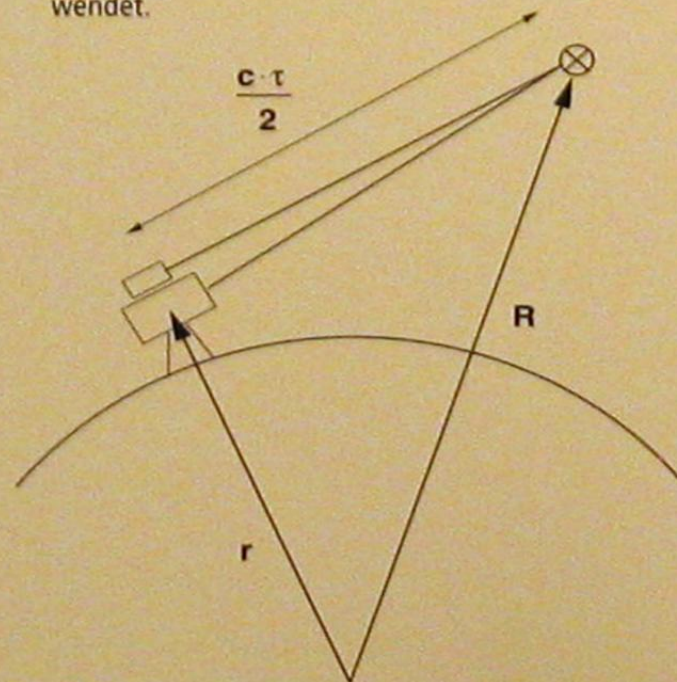
Satellitengeodäsie

Satellitengeodäsie heisst Erdvermessung mit Hilfe von Satelliten

Die Satellitengeodäsie erlaubt es, rein geometrische Grössen wie Stationskoordinaten und -geschwindigkeiten sowie die dynamischen Eigenschaften der Erde wie deren Potential (Gravitationsfeld) zu bestimmen.

Die Entwicklung der Satellitengeodäsie in Stichworten:

- ★ **Optische Periode**, ca. 1960–1973. Künstliche Erdsatelliten wie *Geos*, *Echo*, *Pageos* werden mit astronomischen Teleskopen beobachtet. Kontinentalabstände (mit einer Genauigkeit von etwa 5 m) und erste gute Modelle für das Gravitationsfeld der Erde wurden so bestimmt.
- ★ **Doppler-Periode** ab Mitte der Sechziger- bis Anfang Achtzigerjahre: Satelliten auf polaren Umlaufbahnen wurden zur Positionierung im 1-Meter-Bereich verwendet.



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

- ★ **SLR-Periode** ab Siebzigerjahren: Distanzen zu Satelliten wurden zunächst auf Meter, dann auf Zentimeter genau vermessen.
- ★ Geozentrische Stationskoordinaten und Geozentrum wurden mit Zentimeter-Genauigkeit vermessen. Hochgenaues Gravitationsfeld, gute Gezeitenmodelle wurden bestimmt.
- ★ **GPS-Periode** ab Anfang der Achtzigerjahre: Gleichzeitige Beobachtung von mehreren aktiven Satelliten im Radiobereich. Genaue Navigation und hochpräzise Vermessung.
- ★ **GPS-Periode für Geodynamik** ab Anfang der Neunzigerjahre: Das Satellitensystem wird auch für Geodynamik gebraucht.

Weitere Fragestellungen der modernen Satellitengeodäsie sind:

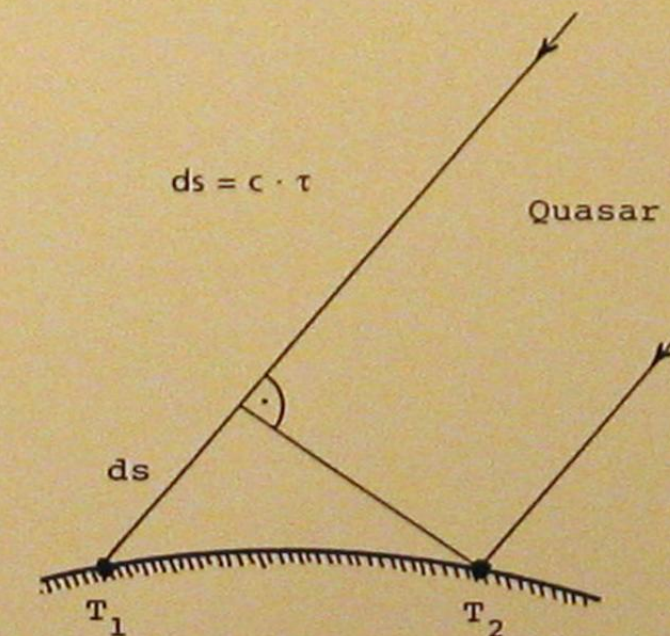
- ★ Bestimmung der zeitlichen Variation des Erdpotentials
- ★ Bereitstellen des Bezugssystems für Forschungsaufgaben zum Beispiel im Rahmen von *Global Change*
- ★ Uhrenvergleich über grosse (interkontinentale) Distanzen mit sehr hoher Genauigkeit (sub-Nanosekunden)
- ★ Grundlagen für regionale, nationale, ...geodätische Hochpräzisionsnetze; als Beispiel sei erwähnt, dass das neue schweizerische Landesnetz vollständig mit den Methoden der Satellitengeodäsie erstellt wurde (LV-95)
- ★ Wissenschaftlicher Bahnbestimmungsdienst zum Beispiel für GPS-Satelliten, für wissenschaftliche Nutzsatelliten wie Topex/Poseidon, ERS-1, ERS-2.

Einige Resultate aus 30 Jahren Forschung

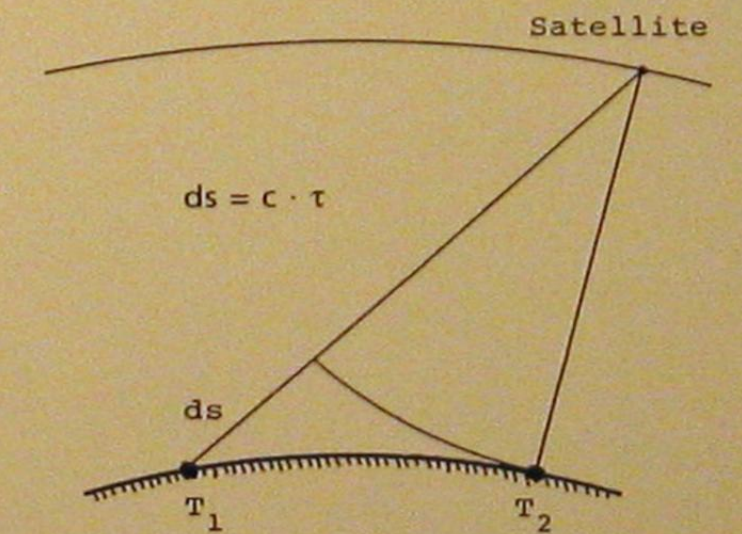
- ★ Terrestrisches Referenzsystem von 100 Stationen mit *cm-Genauigkeit* in der Position und mit *mm/Jahr-Genauigkeit* in der Geschwindigkeit (VLBI, SLR, GPS).
- ★ Referenzsystem am Himmel mit $1/1000''$ -Genauigkeit (*mas*) durch VLBI realisiert.
- ★ *Polschwankung* täglich mit Genauigkeit von 0.2 *mas* bestimmt. Dies entspricht auf der Erdoberfläche einer Genauigkeit vom 6 mm!

- ★ *Tageslänge* mit einer Genauigkeit von einigen *Mikroskunden* bestimmt (VLBI, SLR, GPS).
- ★ *Hochgenaues Gravitationsfeld*, (etwa 1000 Terme) der Erde.
- ★ Abschätzung für zeitliche Entwicklung der Abplattung (und anderer Potentialterme).
- ★ *Grundlage für Ozeanographie, Global Change*.

Das Messprinzip



VLBI (Very Long Baseline Interferometry): Die von den Teleskopen T_1 und T_2 empfangenen Signale werden mit Zeitmarken versehen (Wasserstoffmaser) und auf Magnetbänder geschrieben. Diese Signale werden später korreliert. Die Differenz der Ankunftszeiten liefert die Grösse ds . Diese enthält die Information über die Positionen von Quasar und Teleskop. Daraus lässt sich die Bewegung der



Beobachtungsstationen im inertialen Raum ermitteln (Erddrotation).

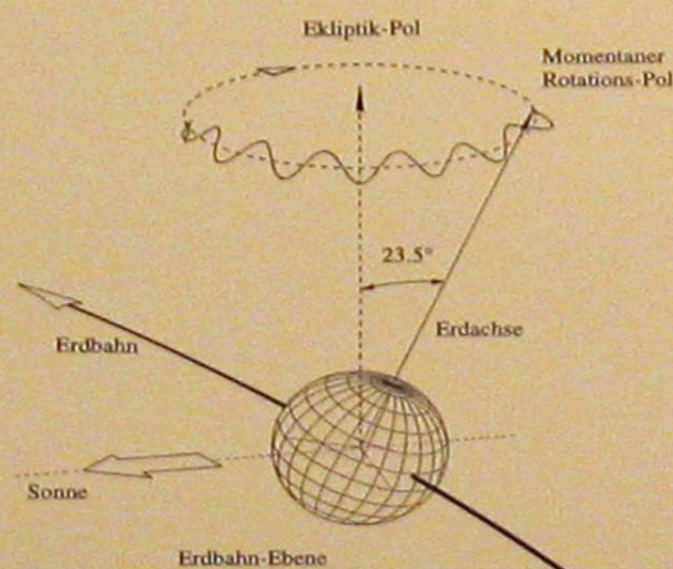
GPS (Global Positioning System): Gleiches Vorgehen wie bei VLBI, nur dass anstelle der Position des Quasars die Bahnen der Satelliten sehr genau bestimmt werden müssen.

Fundamental- astronomie

Die *Fundamental-astronomie* umfasst diejenigen Gebiete der Astronomie, die gebraucht werden zur Festlegung raumzeitlicher Bezugssysteme und der Transformationen zwischen diesen Systemen.

Insbesondere müssen ein *inertiales* «raumfestes» Bezugssystem und ein *terrestrisches* «erdfestes» Bezugssystem festgelegt werden.

Die Rotationsachse der Erde im Raum

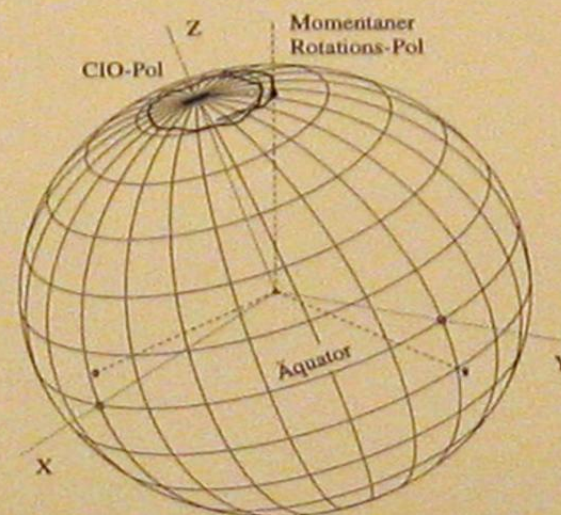


Die Rotationsachse der Erde bewegt sich infolge der Gravitation von Sonne und Mond im (inertialen) Koordinatensystem der Sterne auf einem Kreis mit Radius $\epsilon = 23,5^\circ$ um den Ekliptikpol herum (Präzession).

Die Transformation zwischen diesen Systemen umfasst die *Präzession*, die *Nutation*, die *Polschwankung* und die *Tageslänge*, wie sie durch die Winkelgeschwindigkeit der Erdrotation gegeben ist.

Von der Fundamental-astronomie aus gesehen sind *Geodynamik*, *Himmelsmechanik* und *Satellitengeodäsie* zentrale Hilfswissenschaften.

Die Rotationsachse der Erde auf der Erdoberfläche



Der Rotationspol der Erde bewegt sich auf der Erdoberfläche um die Achse des maximalen Trägheitsmomentes (Polschwankung). Diese Bewegung ist nicht regelmässig. Die Periode beträgt etwa 420 Tage (Chandler-Periode). Die Winkelgeschwindigkeit (Tageslänge) weist auch unregelmässige Änderungen auf (Schaltsekunden).

Bezugssysteme der Fundamental-astronomie

Nach Newton versteht man unter einem *Inertialsystem* eine Zeitskala und ein rechtwinkliges Koordinatensystem des dreidimensionalen Raumes, welches gegenüber dem Newton'schen absoluten Raum *nicht* rotiert. Die *Zeitskala* ist heute durch die *Atomzeit* realisiert (durch ein Ensemble von Atomuhren). Das bestmögliche Inertialsystem ist das Ruhesystem der Quasare.

Das Inertialsystem ist das natürliche Bezugssystem für die Himmelsmechanik.

Beim *terrestrischen Bezugssystem* würde man gerne von einem erdfesten System sprechen. Die beobachteten Kontinental- oder Plattenbewegungen und Gezeitenbewegungen lassen dies nicht zu.

Das *quasi-erdfeste System* wird de facto durch die gegenseitige Lage und Bewegung eines Ensemble von fundamental-astronomischen Observatorien festgelegt. Zimmerwald ist ein solches Observatorium.

Fundamental-astronomie

Beobachtungsmethoden sind:

- ★ Astrometrische Richtungsbeobachtungen, optisch oder radio-interferometrisch.
- ★ Entfernungsmessungen mit Radar, respektive LASER, respektive Phasenbeobachtungen von Radio-Signalen (zum Beispiel bei GPS-Satelliten).
- ★ Radialgeschwindigkeitsmessungen (Dopplereffekt).

Fundamental-astronomie wurde früher auch *klassische Astronomie* oder *Positionsastronomie* genannt.

Fundamental-astronomie ist Grundlage für die ganze Astronomie. So beruht beispielsweise die *kosmische Entfernungsskala* auf den in der Fundamental-astronomie gewonnenen Erkenntnissen (trigonometrische Parallaxen).

Geodynamik

Primäres Ziel der Geodynamik ist es, die *Bewegung der Erde als eines Körpers endlicher Ausdehnung* (nicht Massenpunkt) im Kräftefeld von Mond, Sonne und Planeten zu formulieren und zu verstehen.

Das einfachste Modell, das *Starrkörpermodell*, geht schon auf *Leonhard Euler* (1707–1783) zurück.

Das modernste Modell unterscheidet zwischen *elastischem Erdmantel*, *flüssigem äusserem* und *festem innerem Erdkern*.

Die Geodynamik stützt sich auf die *Kontinuumsmechanik*, auf Messungen der Satellitengeodäsie, der Seismologie, usw.

Die Fundamental-astronomie bezieht von der Geodynamik und der Himmelsmechanik die Modellansätze für Präzession, Nutation und Polschwankung.

Das Observatorium Zimmerwald

Chronologie

Die erste Kuppel des Observatoriums Zimmerwald konnte in den Jahren 1955 und 1956 erbaut werden. In den Jahren 1956–1958 konnte erstmals mit einer *kleinen Schmidt-Kamera* (Öffnung 25 cm, Brennweite 104 cm) beobachtet werden.

Ab 1959 steht in Zimmerwald die *grosse Schmidt-Kamera* (Öffnung 40 cm, Brennweite 104 cm) sowie ein Cassegrain-Instrument (Öffnung 60 cm, Brennweite 13 m) zur Verfügung.

Der grösste Teil der wissenschaftlichen Arbeit erfolgte mit der Schmidt-Kamera, welche sich dank dem Gesichtsfeld von etwa 6 Grad Durchmesser für Überwachungsarbeiten eignet.

Das Arbeitsprogramm besteht aus der Suche nach Supernovae, Novae und anderen Veränderlichen. Als willkommenes Beiprodukt wurden in Zimmerwald Kleinplaneten und Kometen entdeckt.

Erste Erfolge mit der Zimmerwalder Schmidt-Kamera:

- ★ Am 2. März 1957 entdeckte *Professor Max Schürer* eine Supernova 14-ter Grösse in der Galaxie NGC 2841.
- ★ Am 2. Oktober 1957 entdeckte *Paul Wild* den Kometen 1957f.

Seither wurden in Zimmerwald

- ★ 47 Supernovae,
- ★ 3 Novae,
- ★ 7 Kometen,
- ★ rund 100 Kleinplaneten entdeckt.



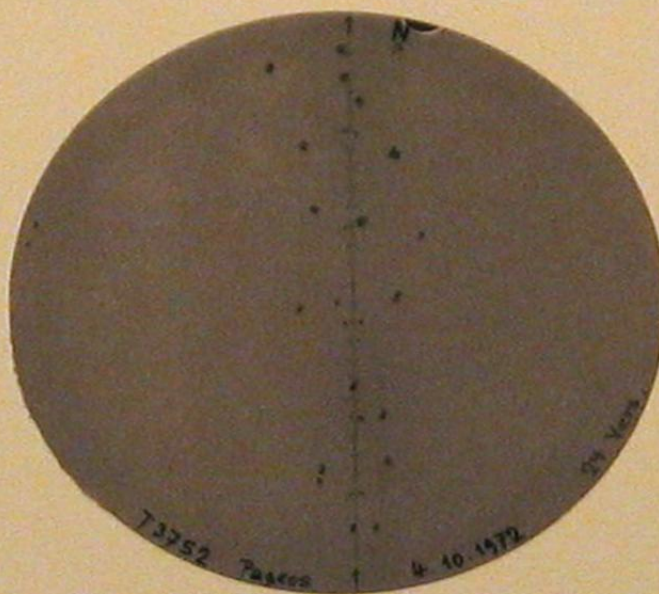
Professor Paul Wild

Erwähnenswert ist insbesondere der im Jahre 1978 entdeckte Komet *Wild 2*, welchen die NASA Mission *Stardust* im Jahr 2003 erreichen soll.



Professor Max Schürer

Insbesondere wurden die Satelliten *GEOS*, *Explorer*, *Pageos* und *Echo* mit der Zimmerwalder Schmidt-Kamera beobachtet.



Schmidt-Aufnahme des Satelliten Pageos aus dem Jahr 1972

Als Resultat erschien Zimmerwald erstmals als Station im weltweiten Netz von Satelliten-Beobachtungsstationen. Die Genauigkeit der Koordinaten betrug damals etwa 5 m (!).

Mitte der siebziger Jahre gerieten die Richtungsbeobachtungen mehr und mehr in Vergessenheit. Entscheidend war, dass die Reduktion photographischer Richtungsbeobachtungen im Vergleich mit Laser und Doppler *äusserst arbeitsintensiv* war (Monate anstelle von *near real-time*).

Ab etwa 1965 beteiligte sich das AIUB auf Initiative von Professor Max Schürer an den weltweit koordinierten optischen Beobachtungskampagnen aktiver und passiver geodätischer Satelliten.

Laser-Beobachtungen in Zimmerwald

1971–1972 fanden erste Versuche mit einem vom IAP Bern gebauten Laser statt, welcher auf dem astronomischen Teleskop montiert war. Wertvolle Erfahrungen wurden gesammelt, zählbare Erfolge waren minimal.

1974–1976 wurde die Satellitenbeobachtungsstation in Zusammenarbeit mit dem IAP (neue Kuppel in Zimmerwald) aufgebaut.

1976–1979 wurden Testmessungen auf Satelliten mit einer Genauigkeit von etwa 80 cm mit dem Berner Rubinlaser durchgeführt.

1981–1984 wurde ein neuer Laser angeschafft, die Optik, Elektronik und die Software wurden wesentlich verbessert. Die Beobachtung wurde automatisiert. Alle geodätischen Satelliten (inklusive Lageos) wurden mit einer Genauigkeit von etwa 8 cm vermessen.



Laserstrahl zum Satelliten Lageos

1987 wird *Dr. Werner Gurtner* Leiter des Observatoriums Zimmerwald.

1984–1995 operationeller Betrieb mit Teilnahme an vielen internationalen Kampagnen, insbesondere

- ★ **MERIT**: Ein langfristiges Projekt von 14 Monaten 1983/84 unter Einschluss sämtlicher *Space Geodetic Techniques*, insbesondere VLBI, SLR, Doppler.

- ★ **Wegener Medlas**: Mit SLR (und Doppler Beobachtungen) wurde die Geotektonik des Mittelmeerraumes erforscht.

- ★ **Crustal Dynamic Project (CDP)** der NASA mit Fragestellungen in globaler und regionaler Geodynamik.

- ★ **International Earth Rotation Service (IERS)**: Teilnahme erst als Laser-, später auch als GPS-Station. Der IERS entstand aus MERIT.



Das alte Laser-Teleskop

Entwicklung zur Fundamentalstation

1990 wurde die Station ans Internet angeschlossen. Nach dem Kauf der ersten CCD-Kamera im Jahre 1989 wurden in Zimmerwald wieder astrometrische Beobachtungen durchgeführt.



CCD-Aufnahme von fünf geostationären Satelliten

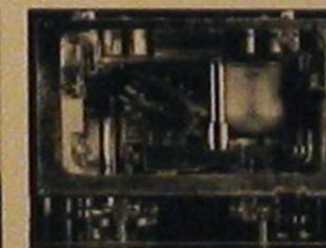
Im Jahre 1992 konnte die Zusammenarbeit mit dem Bundesamt für Landestopographie intensiviert werden (Beteiligung des Bundesamtes auch bei den Laserbeobachtungen in Zimmerwald).

Ab 1991 Planungs- und Realisierungsphase für das Neue Teleskop *ZIMLAT*, ein kombiniertes *LASER- und Astrometrie-Teleskop*.

1995 brachte die Beteiligung der ETH in Zürich durch Bau und Betrieb einer Gravimeterstation in Zimmerwald.

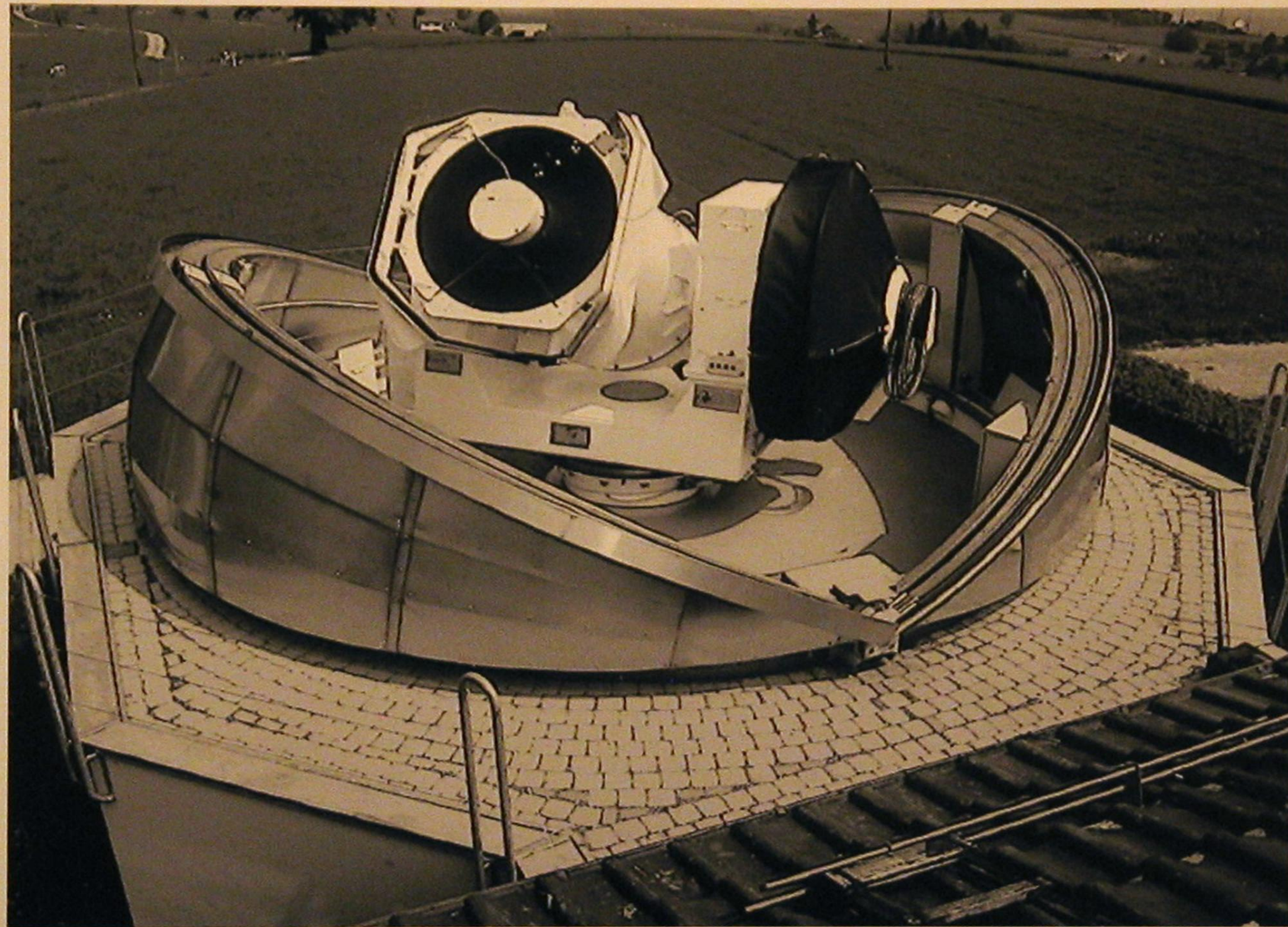


Die Gravimeterstation



Das Innere des Gravimeters

Das Neue ZIMLAT-Teleskop



- ★ Hersteller: G.I.E. Télas, Frankreich (Aérospatiale + Framatome)
- ★ 1-m-Spiegel F 1/1.95
- ★ Rohr 1.80 m, Höhe 2.4 ü/B, Gewicht 4.5 t
- ★ Richey-Chrétien-System
- ★ Nasmyth-Weg zu 4 verschiedenen Kamera-Montierungen, jede mit ihrer eigenen Reduktionsoptik:
 - CO1: CCD Kamera FOV 13' (f = 4 m)
 - CO2: CCD Kamera FOV 40' (f = 4 m)
 - CO3: CCD Kamera FOV 13' (f = 8 m)
 - FR: TV Kamera FOV 45' (f = 1.2 m)
- ★ Ferngesteuerte Filterräder für jede CCD-Kamera-Montierung
- ★ Nachführung:
 - Azimet <math>< 30^\circ/s; 10^\circ/s^2; \pm 270^\circ</math>
 - Elevation <math>< 15^\circ/s; 5^\circ/s^2; -2^\circ + 90^\circ</math>
- ★ Nachführgenauigkeit:
 - $\pm 2''$ absolut
 - einige Zehntel-'' relativ
- ★ Coudé-Pfad für Laser-Sende- und -Empfangspfad.
- ★ Strahlteiler, Coudéspiegel und Linsen sind für 2 Farben (423 + 846 nm) optimiert.

Der internationale GPS-Dienst für Geodynamik (IGS)

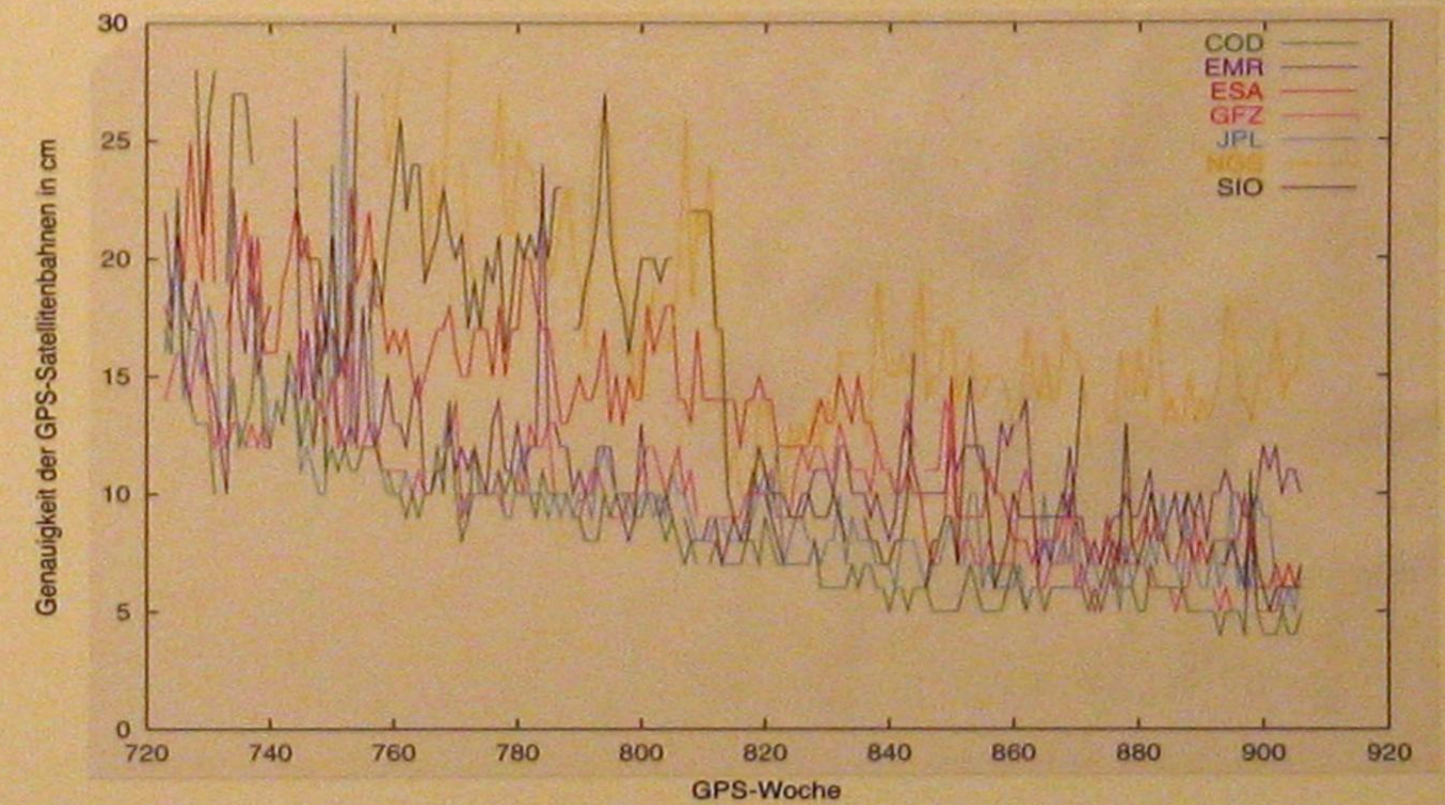
Das IGS-Netz



- ★ IGS stützt sich heute auf ein Netz von etwa 100 Permanentstationen.
- ★ Via Internet stehen die Daten wenige Stunden nach der Beobachtung den IGS-Rechenzentren zur Verfügung.

IGS-Resultate

Qualitätsentwicklung der verschiedenen IGS-Bahnen vom 14.11.1993 bis 24.05.1997



Der IGS-Koordinator berechnet aufgrund der Rechnungen der IGS-Rechenzentren täglich kombinierte GPS-Bahnen mit einer Genauigkeit von wenigen Zentimetern.

Die Figur zeigt die Entwicklung der Genauigkeit der Bahnen, wie sie von den einzelnen IGS-Rechenzentren dem IGS-Koordinator zur Verfügung gestellt werden.

Der «Berner» Beitrag (CODE-Rechenzentrum) ist oben mit COD bezeichnet.

Zudem liefert IGS die Polschwankungen, Tageslängen, Koordinaten und Geschwindigkeiten der Stationen des Netzes.

Der internationale GPS-Dienst für Geodynamik (IGS)

Wissenschaftliche Organisation

Drei internationale Organisationen sind im Gebiet Fundamentalastronomie, Geodynamik und Satellitengeodäsie von Bedeutung:

- ★ **IERS**, der Internationale Erd Rotations Service. Dieser ist zuständig für Definition und Unterhalt der Referenzsysteme sowie für die Berechnung und Publikation der offiziellen Transformation zwischen den Systemen (Bulletins A und B).
- ★ **IGS**, der Internationale GPS-Service für Geodynamik ist primär ein Bahnbestimmungsdienst für die (momentan) 24 aktiven Satelliten des U.S.-Amerikanischen **Global Positioning System**, liefert daneben aber immer mehr und immer bedeutendere Beiträge zum IERS liefert.
- ★ **CSTG**, die Commission on International Coordination of Space Techniques for Geodesy and Geodynamics, nimmt Koordinierungsaufgaben im Gebiet Satelliten- und Weltraumgeodäsie wahr.

IGS-Zielsetzungen

Die folgenden Zitate stammen aus den *IGS Terms of Reference* (siehe zum Beispiel *IGS Colleague Directory*).

- ★ IGS sammelt, archiviert und verteilt GPS-Beobachtungen eines weltweiten Netzes.
- ★ Diese Daten werden durch den IGS zur Erzeugung der folgenden IGS-Produkte genutzt:
 - GPS-Satelliten-Ephemeriden,
 - Erdrotationsparameter,
 - Koordinaten und Geschwindigkeiten der Beobachtungsstationen,
 - GPS-Satelliten- und Stations-Uhreninformationen,
 - Informationen über die Atmosphäre.
- ★ Die IGS-Produkte sollen den jeweils höchsten Ansprüchen genügen. Insbesondere soll IGS einen wesentlichen Beitrag zum ITRF, dem *International Terrestrial Reference Frame* sowie zu den Fragestellungen im Bereich *Global Change* liefern.

Der IGS besteht aus den folgenden Komponenten:

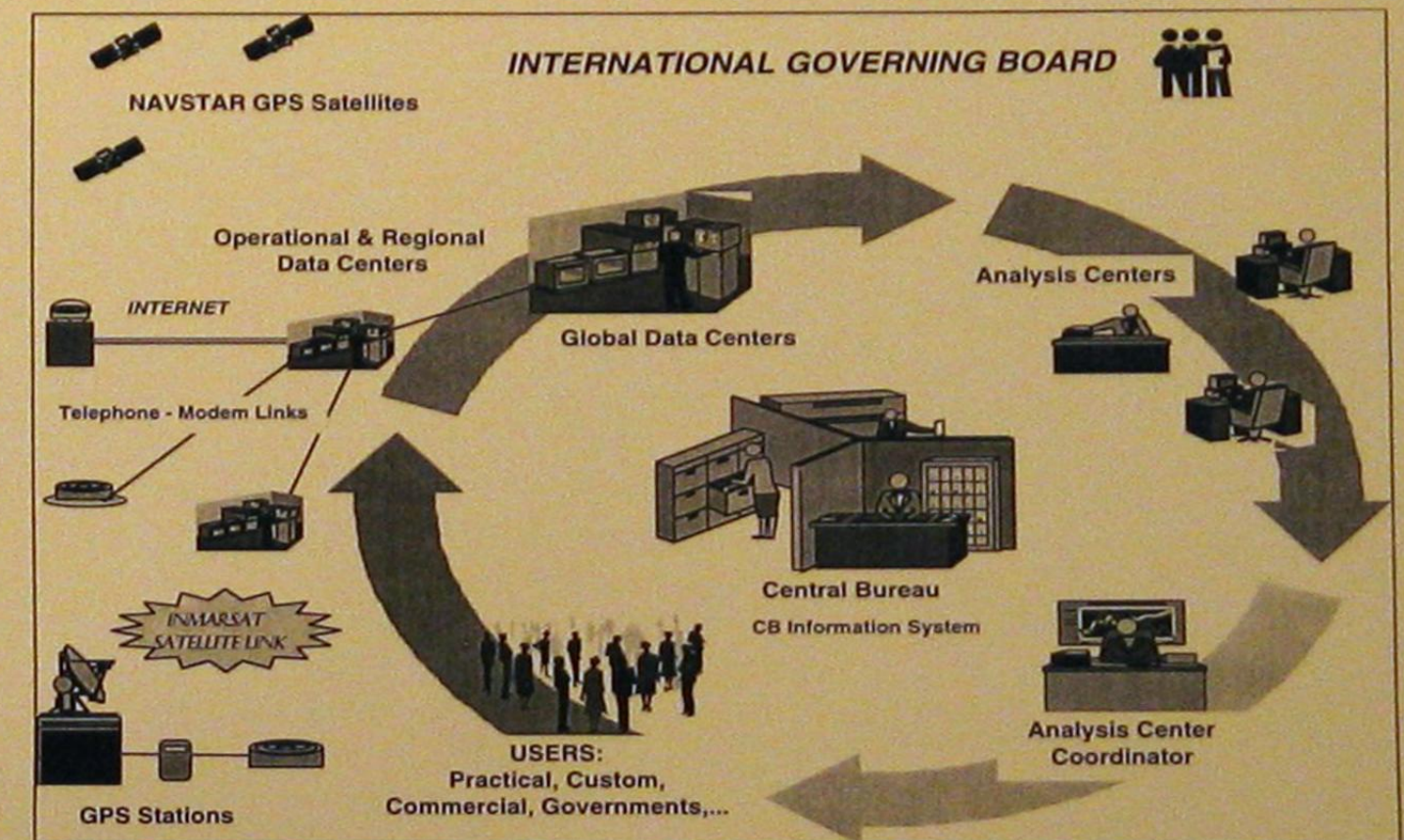
- ★ einem Netz von Beobachtungsstationen
- ★ Datenzentren
- ★ Rechenzentren
- ★ einem Koordinator für die Rechenzentren
- ★ einem *Central Bureau*
- ★ einem internationalen *Governing Board*, bestehend aus 15 Mitgliedern.

Von 1991 bis 1997 ist Professor Gerhard Beutler *Chairman* des *Governing Boards*.

Die Rechenzentren werden in zwei Kategorien unterteilt:

- ★ Operationelle Rechenzentren, welche täglich Resultate abliefern. Das AIUB betreibt das CODE-Rechenzentrum
- ★ Assoziierte Rechenzentren, welche zum Beispiel regionale Analysen, möglicherweise nur während beschränkter Zeit, durchführen.

Es gibt operationelle, regionale und globale Datenzentren. Erstere stehen in direktem Kontakt mit den Stationen, die zweiten sind für eine Region, letztere für das ganze Netz zuständig.



Das IGS-Rechenzentrum CODE

- ★ Das *Center for Orbit Determination in Europe (CODE)* ist eines von momentan sieben operationellen Rechenzentren des *International GPS Service for Geodynamics (IGS)*.
- ★ Das CODE-Rechenzentrum wurde 1992 gegründet und basiert auf einer Kooperation zwischen dem deutschen *Institut für Angewandte Geodäsie (IfAG)*, dem französischen *Institut Géographique National (IGN)*, dem *Bundesamt für Landestopographie (L+T)* und dem *Astronomischen Institut der Universität Bern (AIUB)*. Das eigentliche «Rechenzentrum» von CODE befindet sich am AIUB in Bern.
- ★ CODE wertet täglich die GPS-Daten der weltweit verteilten IGS-Permanentstationen aus und bestimmt hochgenaue GPS-Satellitenbahnen, Erdrotationspa-

rameter, Koordinaten (und Geschwindigkeiten) der GPS-Beobachtungsstationen (unter anderem Zimmerwald, siehe dreiteilige Graphik), genaue Information über die Satellitenuhren, Troposphären- und Ionosphärenmodellparameter, sowie weitere Größen von geophysikalischer Bedeutung.

Tägliche Koordinatenschätzungen für die GPS-Permanentstation Zimmerwald; aufgetragen sind die Nord-, Ost-, und Höhenkomponente (in Millimeter) bezüglich einem mittleren Koordinatensatz. Die Nord- und Ost-Komponente zeigen eindrücklich die horizontale Stationsbewegung in einem globalen Referenzsystem.

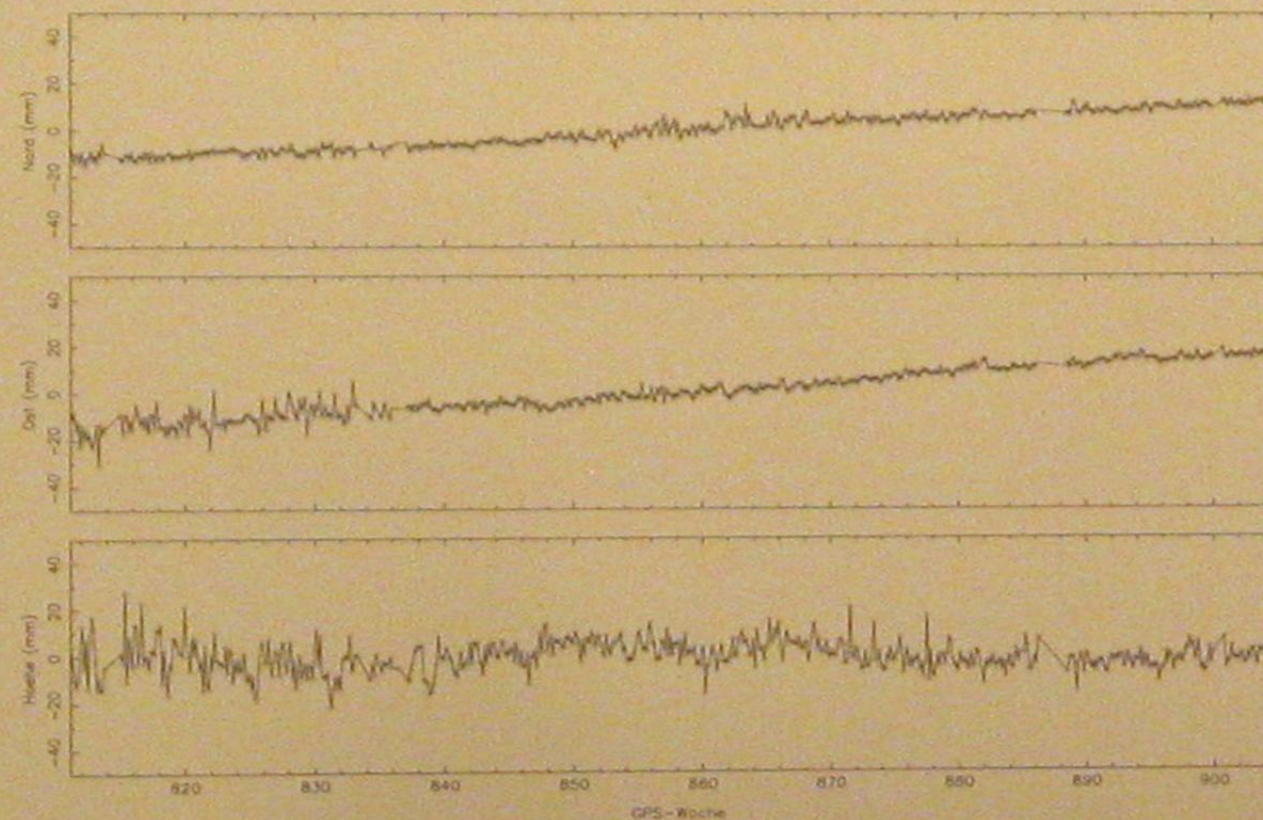
- ★ Die Datenverarbeitung geschieht mit der *Bernese GPS Software* auf Alpha-Rechnern des Vax-Clusters der

Universität Bern. Die sogenannte *Bernese Processing Engine (BPE)* – eine Entwicklung des AIUB in Zusammenarbeit mit UNAVCO (University Navstar Consortium) – erlaubt die GPS-Datenverarbeitung in einem vollautomatischen Modus. Die «BPE» kommt auch bei der Auswertung des japanischen 600-Stationen-überwachungsnetzes «BiGG» zum Einsatz.

- ★ In der IGS-Datenverarbeitung werden einerseits rasch verfügbare Satellitenbahnen (*rapid orbits*) und über zwei Tage prognostizierte Bahnen (*48-hour predicted orbits*) berechnet. Diese Produkte sind ungefähr 10 Stunden nach dem Ende einer 24-Stunden-Session (jeweils von 00 bis 24 Uhr Weltzeit) verfügbar. Diese Satellitenbahnen weisen eine typische Genauigkeit von 10 cm respektive 50 cm auf. Andererseits erfolgt

mit viertägigem Verzug basierend auf mehr IGS-Stationen, nämlich durchschnittlich 75–80, die Bestimmung der «endgültigen» Bahnelemente (*final orbits*) und weiterer Größen. Die «final orbits» zeigen – im statistischen Vergleich mit den anderen sechs IGS-Rechenzentren – einen mittleren Fehler (Standardabweichung) von etwa 5 cm. Resultat jenes Orbit-Vergleichs ist ein *kombinierter IGS-Orbit*.

- ★ Ferner erfolgt – unter Berücksichtigung der globalen Satellitenbahninformation – eine separate Auswertung von gegenwärtig 37 europäischen IGS-Permanentstationen. Hier werden auch verbesserte oder neue Auswertestrategien für regionale GPS-Netze getestet.

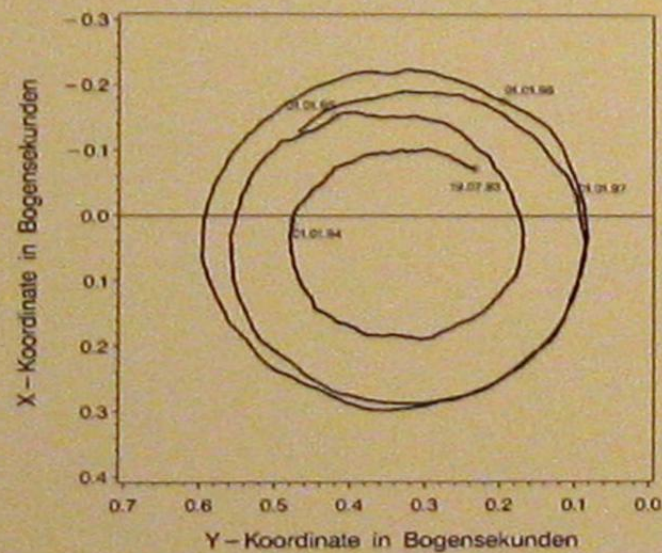


Zeitliche Koordinatenänderung der IGS-Station Zimmerwald.



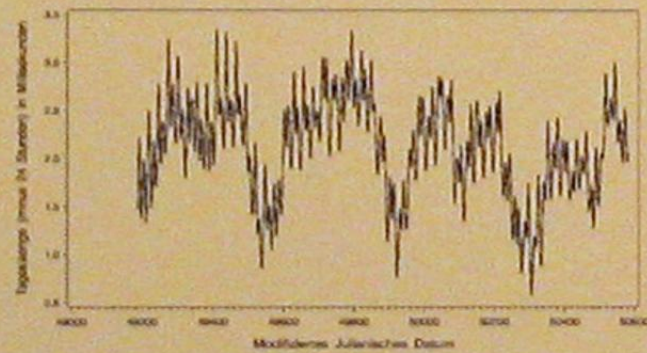
Europäische IGS-Permanentstationen, ausgewertet am CODE.

★ Die aktuelle Rotationsachse der Erde wird täglich mit einer Genauigkeit von 0.2 Millibogensekunden (mas) bestimmt. Projiziert auf die Erdoberfläche sind 0.2 mas zirka 5 mm, und der Durchmesser der «Polspirale» entspricht ungefähr 15 m. Man darf behaupten, dass der «Bern» Pol den genauesten je in der Schweiz bestimmten Rotationspol der Erde repräsentiert. Dominiert wird die Polschwankung durch die sogenannte Chandler-Periode von rund 430 Tagen. Der Schweizer Mathematiker Leonhard Euler (1707–1783), abgebildet auf der «alten» Zehner-Note, hatte die entsprechende Periode für eine «starre» (nicht-elastische, homogene) Erde mit etwas mehr als 300 Tagen budgetiert.



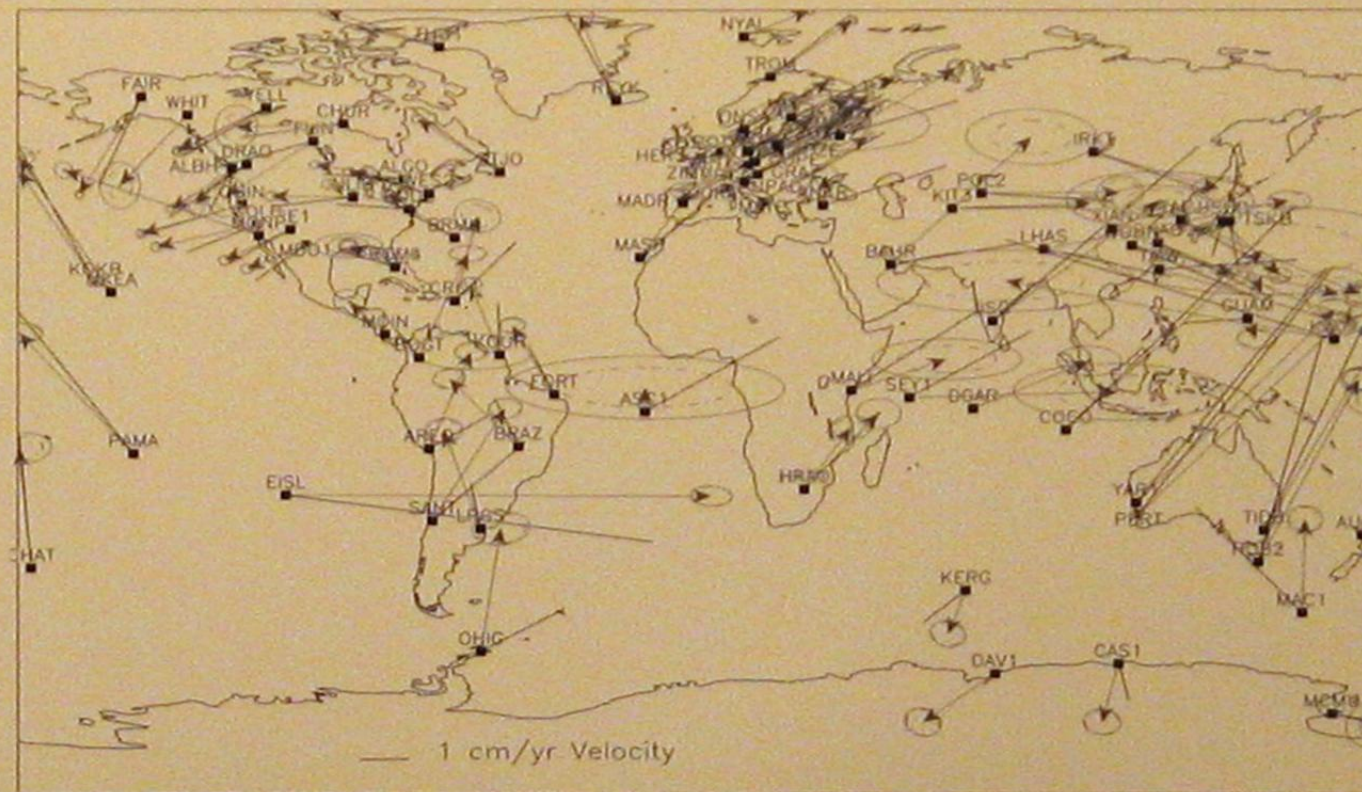
Polschwankung vom 19. Juli 1993 bis 13. Mai 1997

★ Ein zentraler Parameter zur Beschreibung der Orientierung der Erde ist die *Tageslänge* oder *Length Of Day (LOD)*. Die statistische Unsicherheit der LOD-Schätzungen von CODE liegt bei 20 Millionstelsekunden. Die Erde rotiert bezüglich der Atomzeit (TAI) um durchschnittlich 2 Tausendstelsekunden pro Tag zu langsam (siehe LOD-Graphik). Man beachte, dass die kurzperiodischen Bewegungen, verursacht durch die Mond-Gezeiten, bekannt sind. Um die konstant laufende Weltzeit UTC (Universal Time Coordinated, TAI plus eine ganze Anzahl von Sekunden) synchron mit UT1 (gekoppelt mit effektiver Erdrotation), beziehungsweise UT1–UTC kleiner als 0.3 Sekunden zu halten, wird gelegentlich am 30. Juni oder 31. Dezember eine Schaltsekunde eingeführt.



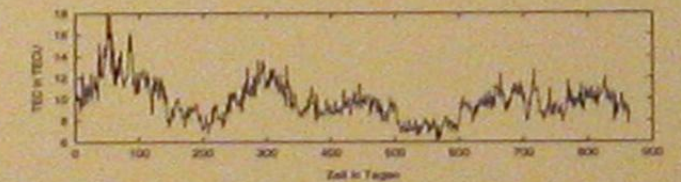
Tageslänge vom 19. Juli 1993 bis 13. Mai 1997

★ Die Geschwindigkeiten der IGS-Stationen können nunmehr basierend auf einer 4-Jahres-Koordinatenserie sehr genau geschätzt werden. Die GPS-abgeleiteten Geschwindigkeiten sind mit roten Pfeilen dargestellt. Zum Vergleich sind auch die Geschwindigkeitsvektoren des aktuellen ITRF-Modells (respektive eines theoretischen Modells) in schwarz aufgetragen. Die Beträge liegen in der Größenordnung von einigen Zentimeter pro Jahr (cm/yr). Ellipsen quantifizieren die formalen Fehler der Geschwindigkeiten (und Koordinaten).



Stationsgeschwindigkeiten berechnet aus den GPS-Daten von vier Jahren

★ Anfangs 1996 wurde begonnen sowohl globale als auch regionale (europäische) Ionosphärenkarten routinemässig zu generieren. Diese Ionosphärenkarten beschreiben die vertikal integrierte Dichte der freien Elektronen (Total Electron Content). Die folgende Graphik zeigt die Entwicklung der ionosphärischen Aktivität seit 1. Januar 1995. Die Variationen mit Perioden von 25–30 Tagen entstehen aufgrund der Rotation der Sonne (Sonnenflecken). Der Zustand der Ionosphäre gehorcht dem bekannten 11-jährigen Zyklus der Sonnenaktivität. Jüngstes ionosphärisches Minimum wurde von CODE im Sommer 1996 gemessen; das nächste Maximum erwartet man in den Jahren 2000–2002.



Mittlerer globaler Elektronengehalt der Ionosphäre vom 1. Januar 1995 bis 13. Mai 1997.

Astrometrie bewegter Objekte

Die Astrometrie befasst sich mit der Bestimmung von Richtungen zu Himmelskörpern und der Realisierung von Bezugssystemen.

In Zimmerwald werden folgende bewegte Himmelsobjekte vermessen:

- ★ Kleinplaneten
- ★ Kometen
- ★ künstliche Erdsatelliten

Die Richtungen werden relativ zu Referenzsternen mit bekannten Himmelskoordinaten gemessen (relative Astrometrie).

Vermessung künstlicher Satelliten

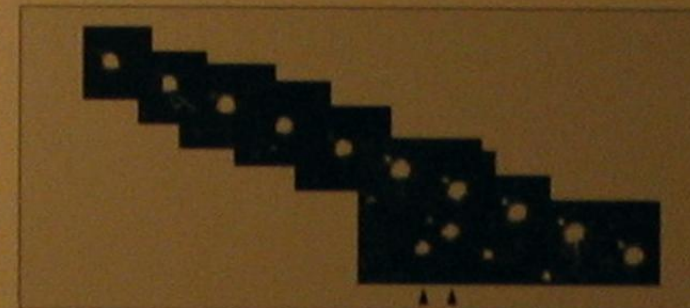
Künstliche Erdsatelliten bewegen sich schnell relativ zu den Sternen. Zudem sind sie häufig nicht sehr hell. Die astrometrische Vermessung dieser Objekte erfordert daher eine spezielle Technik.

Satellit	Meteosat	GPS	LAGEOS	ERS-1
Höhe	36 000 km	20 000 km	6000 km	750 km
Grösse	2 x 3 m	3 x 5 m	60 cm	3 x 12 m
Helligkeit	15 mag	8-14 mag	14 mag	< 6 mag
Max. Bewegung	15"/sec	30"/sec	240"/sec	2000"/sec
Zeit im Bildfeld	110 sec	55 sec	7 sec	0.8 sec

Beispiele typischer Satelliten, welche in Zimmerwald beobachtet werden.

Technik

Zum Photographieren der Satelliten wird eine empfindliche elektronische Kamera (CCD-Kamera) verwendet, welche am Teleskop montiert ist. Während ein Referenzstern im Hintergrund des Satelliten vorbeiwandert, wird eine Serie von Aufnahmen belichtet. Der Zeitpunkt jeder Belichtung wird auf die Millisekunde genau registriert.



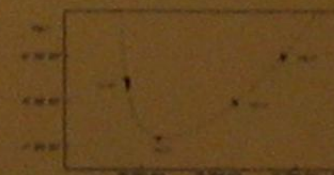
Geostationäre Satelliten TDF-1 und TDF-2 (Pfeile) mit einem vorbeilaufenden Referenzstern. Überlagerung einer Serie von zehn Aufnahmen.

Die im Computer gespeicherten Bilder werden elektronisch verarbeitet. Als Resultat erhält man genaue Himmelskoordinaten des Satelliten zu den Zeitpunkten der Beobachtung.

Die Genauigkeit der Richtungen, welche mit dem neuen Teleskop gemessen werden können, beträgt 0.1".

Bahnbestimmung

Die gemessenen Richtungen eines Satelliten werden verwendet, um dessen Bahn um die Erde zu bestimmen.



Gemessene Richtungen des geostationären Satelliten Meteosat 5 (Kreuze) sowie gerechnete Bahnkurve des Satelliten (gestrichelte Linie).

Anwendungen

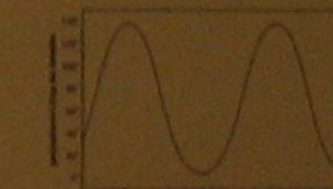
Richtungsbeobachtungen zu künstlichen Satelliten ermöglichen eine ganze Reihe von Anwendungen:

- ★ Überwachung der Bahnen von Raketentrümmern und nicht mehr funktionstüchtigen Satelliten («Raumschrott»).
- ★ Bahnbestimmung zur Unterstützung wissenschaftlicher Missionen.

- ★ Eichung anderer Beobachtungsmethoden (zum Beispiel Radar, Transponder).

- ★ Bestimmung von Erdpotentialtermen mit Hilfe von geostationären Satelliten:

Geostationäre Satelliten bewegen sich in 36 000 km Höhe um die Erde. Da ihre Umlaufzeit 24 Stunden beträgt, scheinen sie für einen Beobachter am Himmel festzustehen. Durch Ungleichmässigkeiten in der Erdanziehung (infolge der nicht perfekten Kugelgestalt der Erde), würden die Satelliten ihre zugewiesene Position verlassen und wegdriften, wenn sie nicht alle paar Wochen manövriert würden.

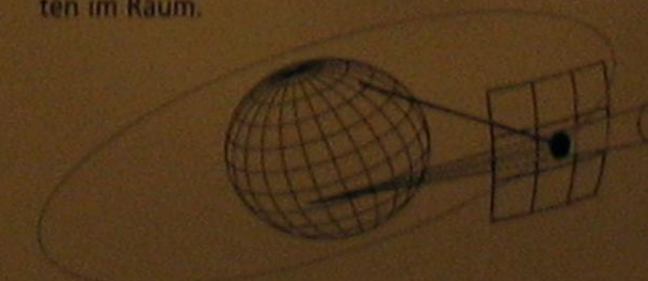


Variation der Position des toten geostationären Satelliten Intelsat 4a f-6. Der Satellit pendelt innerhalb von 3 Jahren von Europa nach Japan und zurück.

Die Beobachtung von driftenden (toten) geostationären Satelliten erlaubt die Bestimmung der dafür verantwortlichen Terme des Erdschwerefeldes.

- ★ Kombination von Laser-Distanzmessungen und astrometrischen Richtungsbeobachtungen:

Mit dem neuen Zimmerwald-1-m-Teleskop steht ein Instrument zur Verfügung, mit welchem die Distanz (mit Laser) und die Richtung (astrometrisch) zu einem Satelliten gemessen werden kann. Die beiden Messgrössen kombiniert ergeben die Position des Satelliten im Raum.



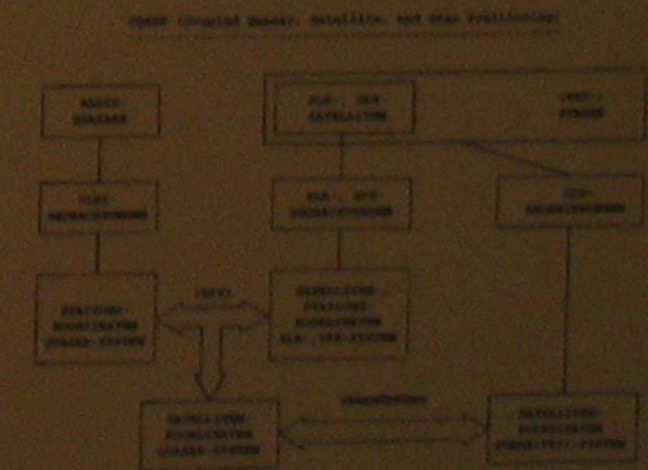
Distanzmessungen (mit Laser) und Messungen der Richtung (mit Astrometrie) gibt die Position des Satelliten im Raum.

Astrometrie ist die einzige Methode, mit welcher die Satelliten direkt bezüglich eines sogenannten inertialen Referenzsystemes gemessen werden können (welches definiert ist durch die Referenzsterne). Dieser Vorteil kann ausgenutzt werden zum Beispiel bei der Bestimmung der Variation der Tageslänge und der Schwankung der Erdachse im Raum (Nutation).

- ★ CQSSP (Coupled Quasar, Satellite, and Star Positioning):

Mit Hilfe von astrometrischen Beobachtungen von Satelliten können verschiedene Referenzsysteme verknüpft werden: Die Positionen gewisser Satelliten (zum Beispiel von GPS-Satelliten) sind in einem Referenzsystem bekannt, welches (mittels Radio-Messmethoden, sogenannten VLBI-Beobachtungen) durch sehr weit entfernte astronomische Objekte, sogenannte Quasare, definiert ist.

Werden dieselben Satelliten zusätzlich im Referenzsystem der Sterne astrometrisch vermessen, können die beiden Referenzsysteme verknüpft werden. Dies ist das Ziel des Projektes CQSSP (Coupled Quasar, Satellite, Star Positioning).



Schematische Darstellung der Verknüpfung zweier Referenzsysteme (definiert einerseits durch Quasare, andererseits durch Referenzsterne) im Projekt CQSSP.

Photometrie

Helligkeiten

Mit dem Zimmerwalder Instrument können Helligkeiten von Sternen und anderen astronomischen Objekten bestimmt werden (*Photometrie*). Die CCD-Kamera eignet sich dank ihrer Dynamik und Linearität sehr gut für diese Aufgabe. Die Helligkeiten der Objekte auf den elektronischen Aufnahmen können im Computer bestimmt werden. Gemessen werden kann auch die Helligkeitsverteilung in flächenhaften Objekten (Gasnebel, Galaxien).

Die Helligkeit von Sternen hängt von ihrer *Entfernung*, aber auch von ihren physikalischen Grössen (Temperatur, Masse, Durchmesser) ab. Viele Sterne ändern ihre Helligkeit in mehr oder weniger regelmässigem Rhythmus (zum Beispiel pulsierende Sterne, Bedeckungsveränderliche).

Photometrische Beobachtungen von Sternen erlauben zudem, die atmosphärischen Bedingungen (Resthelligkeit des Nachthimmels, Lichtverlust in der Atmosphäre) zu bestimmen.

Farben

Werden zur Bestimmung der Helligkeiten verschiedene Farbfilter verwendet, so können die Farben von Sternen, Gasnebeln und Galaxien bestimmt werden. Die Farbe der Sterne hängt hauptsächlich von ihrer Temperatur ab. Bläuliche Sterne sind heiss (bis über 20 000 Grad), rötliche Sterne sind kühl (bis 4000 Grad). Die Farben von Gasnebeln hängen mit der Zusammensetzung und der Temperatur der Gase ab.

Werden Bilder, welche durch Rot-, Grün- und Blaufilter aufgenommen wurden, elektronisch kombiniert, so können echtfarbige Aufnahmen hergestellt werden (sogenannte Kompositaufnahmen).



Aur: Sternfeld im Sternbild Fuhrmann (Auriga). Auf der Farb-Kompositaufnahme zeigen die Sterne unterschiedliche Farben. Deutlich rot ist der Stern AAur in der Mitte des Feldes. Dies ist ein kühler Riesenstern, welcher seine Helligkeit variiert, ein sogenannter Mira-Veränderlicher.



Messier 27: Gasnebel im Sternbild Füchsen (Vulpecula). Der Stern im Zentrum dieses sogenannten planetarischen Nebels hat vor rund 50 000 Jahren seine äussere Gashülle abgestossen. Das Gas, der sich mit 30 km/sec ausdehnenden Wolke leuchtet, angeregt durch das ultraviolette Licht des heissen Zentralsternes. Durchmesser: ca. 2 Lichtjahre; Entfernung: 700 Lichtjahre.



Messier 16: Adlernebel NGC 6611 am Rande eines offenen Sternhaufens im Sternbild Schlange (Serpens). Aus dem Gas der dunklen Staub- und Molekülwolke entstehen neue Sterne. Das rötliche Licht des Nebels stammt von Wasserstoffgas. Entfernung: ca. 7000 Lichtjahre.



Messier 51: Spiralgalaxie im Sternbild Jagdhunde (Canes Venatici). Eine kleinere, kompakte Galaxie (oben) streift eine grosse Galaxie, die aus rund 50 Mio. Sternen besteht. Gezeitenkräfte erzeugen besonders schöne Spiralarme. Entfernung: ca. 30 Mio. Lichtjahre.



NGC 4565: Spiralgalaxie im Sternbild Haar der Berenice (Coma Berenice). Die Galaxie zeigt sich von der Kante. Das dunkle Band längs der Scheibe stammt von Gas und Staub, welches das Licht von Sternen verdeckt. Der Durchmesser der Galaxie beträgt rund 250 000 Lichtjahre. Entfernung: ca. 50 Mio. Lichtjahre.

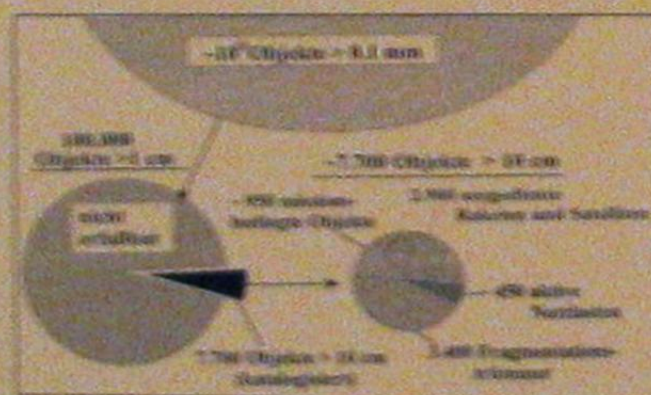


Messier 82: Irreguläre Galaxie im Sternbild Grosseer Bär (Ursa Major). Die unregelmässige Form der Galaxie wird durch aktive Regionen verursacht, in denen Sternentstehung in gewaltigem Ausmass im Gange ist. Entfernung: ca. 10 Mio. Lichtjahre.

Raumschrott

Die Problematik

Die nähere Umgebung der Erde wird zunehmend verschmutzt mit Raumschrott. Seit 1957 sind mehr als 3800 Raketen gestartet worden. Dadurch wurden etwa 25.000 beobachtbare Objekte erzeugt (größer als 10cm). Ein guter Teil davon ist in der Zwischenzeit beim Wiedereintritt in die Atmosphäre verglüht. Zur Zeit werden jedoch fast 8500 Objekte regelmässig beobachtet. Davon wiederum sind nur etwa 400 bis 500 Objekte funktionstüchtige Satelliten, der Rest ist Schrott! Die weitaus meisten dieser Trümmer sind Überreste von Explosionen im Weltraum. Letztere haben entweder unabsichtlich, zum Beispiel Explosion von Resttreibstoff in ausgebrannten Raketenstufen, oder absichtlich in Form von Tests von Antisatellitenwaffen stattgefunden.



Anzahl und Herkunft der Trümmer

Weltraumschrott ist im allgemeinen ungefährlich, solange man sich nicht selber im Weltraum befindet (abgesehen von wenigen sehr massiven Teilen verglüht der Schrott beim Eintritt in die Atmosphäre vollständig). Für Satelliten und die bemannte Raumfahrt hingegen bedeutet er eine steigende Gefahr. Bei einer Kollision mit einem Schrottteilchen beträgt die Einschlagsgeschwindigkeit im Mittel 10 Kilometer pro Sekunde (36.000 km/h)! Ein 0,1-Millimeter-großes Teilchen durchschlägt einen Raumanzug, ein 5-Millimeter-Geschoss durchdringt die Kabine des Space Shuttle.

Verteilung im Raum

Raumschrott ist nicht regelmässig verteilt. Er fällt hauptsächlich in der Nähe der für Satelliten bevorzugten Bahnregionen an. Dies ist im erdnahen Raum der Bereich zwischen 800 und 1000 Kilometer Höhe. In grossen Höhen ist vor allem der geostationäre Ring (36.000 km Höhe) stark belastet.



Bekannte Objekte in 200-36.000 km Bahnhöhe.

Optische Beobachtungen

Raumschrottteile (wie auch operationelle Satelliten) werden von der Sonne angestrahlt und können in der Nacht als leuchtende Objekte gesehen werden. Diese bewegen sich scheinbar gegenüber dem Sternhintergrund mit Geschwindigkeiten von einigen Bogensekunden pro Sekunde (geostationäre Objekte) bis zu einem Grad pro Sekunde (Objekte in 200-1000 km Höhe). Auf astronomischen Bildern, die den Sternen nachgeführt wurden, hinterlassen Schrottobjekte somit mehr oder weniger lange Strichspuren. Im folgenden Beispiel wurde hingegen das Teleskop überhaupt nicht nachgeführt. Die Sterne haben Strichspuren hinterlassen, die fünf geostationären Satelliten wurden punktförmig abgebildet. Vier der Objekte sind die TV-Satelliten Astra A-D, während das fünfte Objekt ein Schrottteil ist (ausgebrannte Raketenstufe).



Die Geostationären Satelliten Astra A-D, sowie ein Schrottteil. Die Feldgrösse beträgt 17x15 Bogenminuten (entspricht 180x160 km in 36.000 km Höhe).



Objekt auf einer tiefen Umlaufbahn. Die beiden Aufnahmen (von gleichem Feld) wurden in einem Abstand von 7 Sekunden aufgenommen und je 5 Sekunden belichtet.

Suche nach Schrott

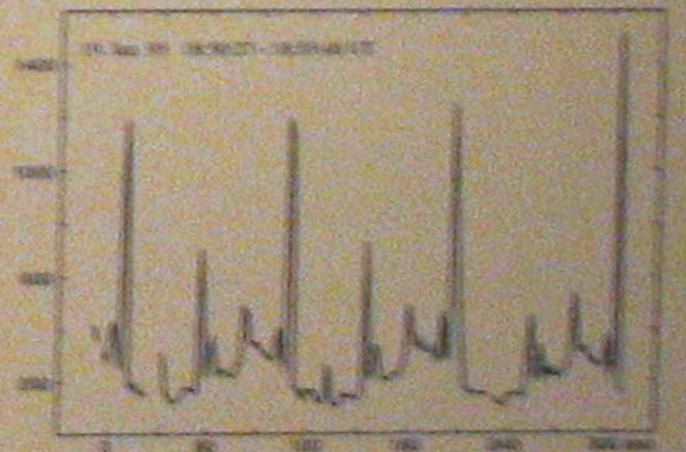
Zur Suche von Raumschrott in hohen Bahnen sind optische Teleskope anderen Methoden wie Radar an Empfindlichkeit überlegen. Am AILB wurden daher im Rahmen von ESA-Projekten Methoden zur automatischen Suche von Raumschrott mit Hilfe von CCD-Aufnahmen entwickelt. Es werden Suchaufnahmen mit entsprechenden Referenzaufnahmen verglichen. Dies geschieht nicht direkt, sondern mit Hilfe einer Maske aller auf der Referenzaufnahme erkannten Objekte.



Links oben eine Referenzaufnahme, rechts oben die daraus gewonnene Maske, links unten eine Suchaufnahme vom gleichen Feld, und rechts unten die gleiche Aufnahme maskiert. Die nicht maskierten Objekte sind die Satelliten Astra A-D.

Helligkeitsmessungen

CCD-Aufnahmen erlauben genaue Messungen der Helligkeit von Schrottobjekten. Diese können, unter Annahme der Reflexionseigenschaften, dazu dienen, die Grösse des Objektes zu bestimmen. Im weiteren geben zeitliche Änderungen der Helligkeit Aufschluss über die «Eigenbewegung» der Objekte (zum Beispiel Taumelbewegungen).

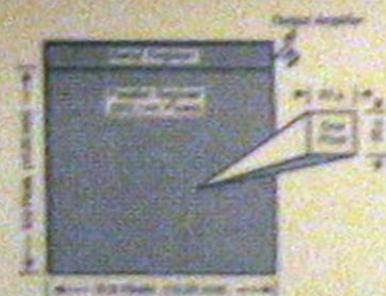


Lichtkurve vom ausgedienten geostationären Satelliten «Gorizont 15». Das Objekt rotiert anscheinend mit einer Periode von rund 97 Sekunden. Die hellsten Spitzen stammen von Reflexionen an der Vorderseite der Sonnensammel. Man beachte die sich wiederholenden feinen Strukturen.

Ein 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 in kurzer Zeit fast vollständig verdrängt. Schon die ersten Versuche an grossen Teleskopen anfangs der achtziger Jahre waren vielversprechend, in Zimmerwald wird diese Technik seit 1989 eingesetzt.

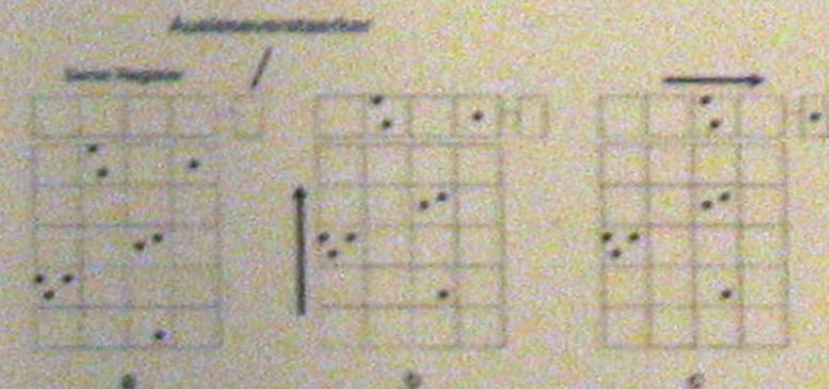
Ein CCD Detektor besteht aus einem Siliziumplättchen mit einer Matrix von Bildelementen, sogenannten Pixeln. Die Grösse der einzelnen Pixel beträgt ca. 10 bis 20 Mikrometer. Heute sind CCDs mit Kantenlängen von einigen zehn bis einigen tausend Pixel erhältlich.



CCD-Matrix

CCDs werden «ausgelesen»

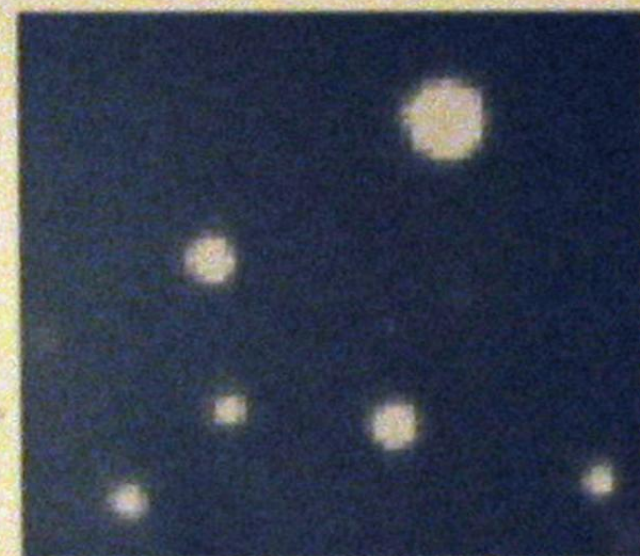
Während der Belichtung werden in den einzelnen Pixeln durch die einfallenden Lichtteilchen Ladungen erzeugt. Diese müssen anschliessend, Pixel für Pixel, über einen Verstärker ausgelesen werden. Nach der Verstärkung werden die Ladungen «gezählt» (in einem sogenannten analog-zu-digital-Wandler) und in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



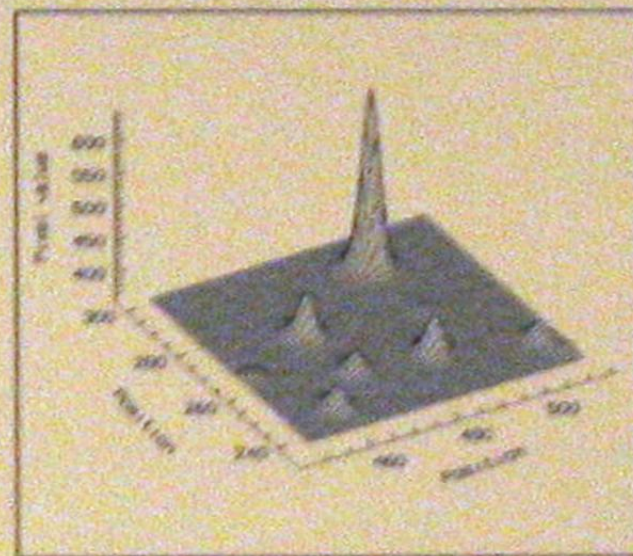
Ausleseprozess

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.

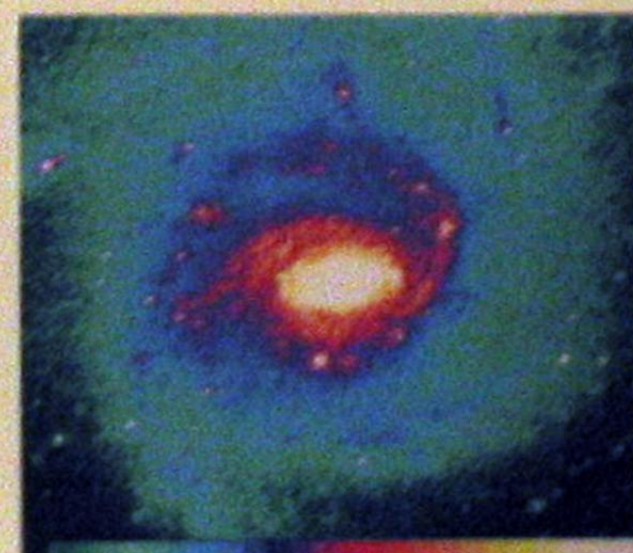


Bilder von Sternen, links als Bild, rechts als Helligkeitsprofil dargestellt.



Farben

Farbige Bilder lassen sich mit CCD-Detektoren nicht direkt erzeugen. Im Rahmen der Auswertung können die digitalen Bilder zum Beispiel zur Verdeutlichung von Strukturen beliebig «eingefärbt» werden. Solche sogenannten Falschfarbendarstellungen entstehen dadurch, dass jeder Helligkeitsstufe eine bestimmte Farbe zugeordnet wird. Um «echte» Farben zu erhalten, müssen mehrere Belichtungen durch verschiedene Farbfilter (zum Beispiel blau, grün, rot) aufgenommen und dann entsprechend gemischt ausgegeben werden.



Falschfarbendarstellung der Spiralgalaxie M101 (Schwarzweissaufnahme). Den verschiedenen Helligkeitsstufen wurden willkürlich Farben zugeordnet.

Dynamik

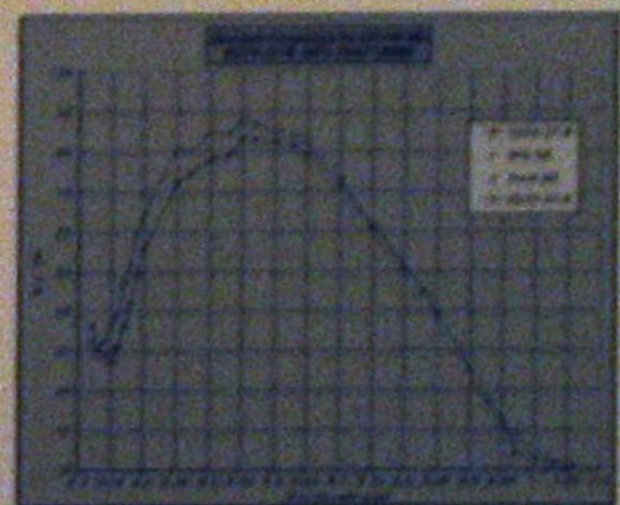
Ein weiterer Vorteil von CCDs besteht in ihrer Fähigkeit, grosse Helligkeitsunterschiede gleichzeitig erfassen zu können (dynamischer Bereich). Mit CCDs ist es möglich, sehr schwache Lichtquellen und 100 000 mal hellere auf derselben Aufnahme abzubilden, ohne dass die hellen Quellen den Detektor sättigen («überstrahlen»). Photoplatten oder Filme lassen nur einen Helligkeitsunterschied von ca. 1000 zu. Da Bildschirme und Drucker nur etwa 30 bis 50 Graustufen erzeugen können (unser Auge kann auch nicht mehr Stufen erkennen) müssen CCD-Bilder separat in mehreren Helligkeitsbereichen dargestellt werden, um ihren ganzen Dynamikumfang auszuschöpfen. Der Zentralbereich einer Galaxie kann beispielsweise nicht gleichzeitig mit ihren schwachen Randbereichen sichtbar gemacht werden (obwohl ein und dasselbe CCD-Bild zugrunde liegt!).



Verschiedene Darstellungen einer Aufnahme der Galaxie M63. Links wurde der Zentralbereich, rechts der Randbereich sichtbar gemacht.

Empfindlichkeit

Eine herausragende Eigenschaft von CCDs ist ihre enorme Empfindlichkeit. Photographisches Material kann etwa 1 bis 5 Lichtteilchen von 100 einfallenden Lichtteilchen in eine messbare Schwärzung umwandeln. CCDs hingegen können bis zu 9 von 10 Lichtteilchen detektieren. Der Prozentsatz von einfallendem zu detektiertem Licht wird Quanteneffizienz genannt.



Quanteneffizienz von CCD-Detektoren.