

Zeitschrift: Orion : Zeitschrift der Schweizerischen Astronomischen Gesellschaft
Herausgeber: Schweizerische Astronomische Gesellschaft
Band: 61 (2003)
Heft: 316

Heft

Nutzungsbedingungen

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

Conditions d'utilisation

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

Terms of use

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

Download PDF: 03.05.2025

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

316



3 2003

**Zeitschrift für
Amateur-Astronomie
Revue des
astronomes amateurs
Rivista degli
astronomi amatori
ISSN 0030-557 X**

ORION

LX200GPS

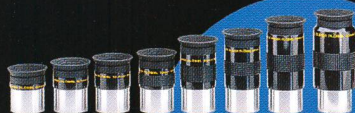
EIN NEUER WELT-STANDARD

Die neuen Meade LX200GPS Teleskope bieten außergewöhnliche optische, mechanische und elektronische Leistungen, die Sie auf dem Markt vergeblich suchen werden.

Meade Ultra High Transmission Coatings (UHTC-Vergütung): Alle neuen LX200GPS werden in Europa bereits mit dieser neuen Vergütung ausgeliefert. Die UHTC-Vergütung erhöht die Bildhelligkeit um etwa 20% über das visuelle Spektrum.

Die neue Autostar-II Steuerung beinhaltet alle Funktionen der LX200 Vorgängermodelle, und zusätzlich einen 3,5MB-Speicher mit vielen neuen Funktionen und einer riesengroßen Datenbank mit über 145.000 Himmels-Objekten.

Abbildung: Meade 8" LX200GPS Schmidt-Cassegrain-Teleskop. Auch erhältlich: 10", 12", 14" und 16" Schmidt-Cassegrain-, sowie 7" Maksutov-Modell.



Bitte beachten Sie auch unsere Okularaktion: Kaufen Sie jetzt ein bestimmtes* MEADE-Teleskop und erhalten ein 7-teiliges Okularset für nur sFr. 249,- statt sFr. 1.250,-! Diese Aktion gilt solange der Vorrat reicht.

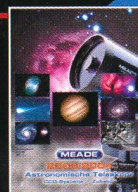
* Die genauen Bedingungen erfahren Sie bei unserer Infoline 0049 2861-9317-50 oder im Internet unter www.meade.de.

GPS Präzisions-Ausrichtung: Drücken Sie einfach nur die ENTER Taste auf der Autostar-II Handbox und beobachten Sie, wie das LX200GPS mit 8°/sec. den ersten Referenzstern positioniert.

„Zero-Image-Shift“ Mikro-fokussierer: Präziseste Fokussierung auf mikroskopischem Niveau. Der Mikrofokussierer lässt sich über die Autostar-II Handbox mit 4 Geschwindigkeiten motorisch steuern.

Hauptspiegelfixierung: Stellt den Hauptspiegel des Teleskops fest. In Verbindung mit dem „Zero-Image-Shift“ Mikrofokussierer beseitigt die Hauptspiegelfixierung jegliches Shifting beim Fokussieren während visueller, fotografischer oder CCD-Beobachtungen.

Hergestellt unter den US-Patenten Nr. 6.304.376 und 6.392.799; weitere Patente in den USA und anderen Ländern angemeldet.



Neuer 2003/04 Meade Hauptkatalog.

Fordern Sie noch heute per Fax, Brief oder telefonisch ihr kostenloses Exemplar an.



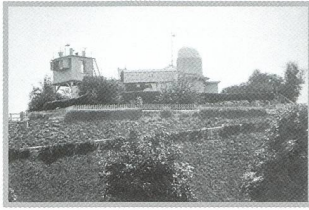
ADVANCED PRODUCTS DIVISION

Meade Instruments Europe

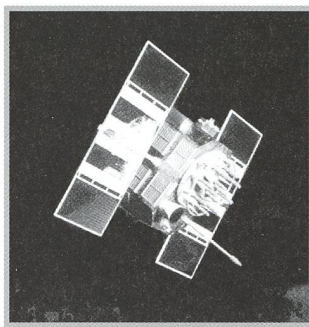
D-46325 Borken/Westf. • Siemensstr. 6 • Tel. 0049 2861 93 17 50

Fax 0049 2861 22 94 • Internet: www.meade.de

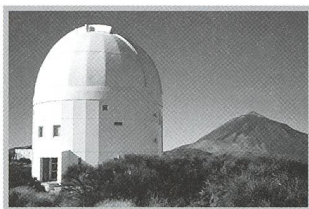
E-mail: info.apd@meade.de



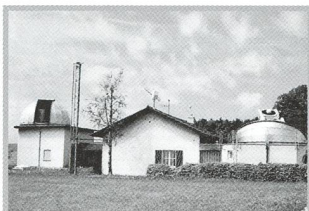
Zwei Jahrhunderte Astronomie
 und Geodäsie in Bern - 4



Erdsatelliten als Mittel zur Erforschung
 der globalen Geodynamik - 25



Wiedergeburt der traditionellen
 Himmelsüberwachung... - 30



Die Fundamentalstation Zimmerwald - 36

Geschichte der Astronomie - Histoire de l'Astronomie

Zwei Jahrhunderte Astronomie und Geodäsie in Bern - ANDREAS VERDUN

4

Grundlagen - Notions fondamentales

Planeten-, Kometen- und Satellitenbahnen - GERHARD BEUTLER

14

Neues aus der Forschung - Nouvelles scientifiques

Erdsatelliten als Mittel zur Erforschung der globalen Geodynamik

URS HUGENTOBLE

25

Wiedergeburt der traditionellen Himmelsüberwachung

und Astrometrie dank moderner Techniken - THOMAS SCHILDKNECHT

30

Die Fundamentalstation Zimmerwald - WERNER GURTNER

36

Der Aktuelle Sternenhimmel - Le ciel actuel

Mars wird bald so hell wie Sirius

Der rote Planet nimmt Anlauf zur grossen Opposition - THOMAS BAER

41

Erste Bilder des Merkur-Transits vom 7. Mai 2003

Merkurdurchgang begeisterte die Schulkinder - THOMAS BAER

42

Beobachtungen - Observations

Meteorströme II: Die Juni-Bootiden (JBO) - ANDREAS BUCHMANN

44

Die Sonnenfinsternis am 4. Dez. 2002 in Australien - ROBERT NUFER

45

Maksutov-Cassegrain WebCam Vesta Pro - A. OSSOLA

46

Diversa - Divers

Die neue Maturität - Chance für die Astronomie in der Schule? - FRITZ EGGER

47

Freiwilligenarbeit in der Astronomie - STEPHAN SPAHR

48

Weitere Rubriken - Autres rubriques

Swiss Wolf Numbers 2003 - MARCEL BISEGGER

44

Veranstaltungskalender / Calendrier des activités

47

Buchbesprechungen / Bibliographies

49

Impressum Orion

50

Inserenten / Annonces

50

Abonnemente / Abonnements

Zentralsekretariat SAG
 Secrétariat central SAS
 SUE KERNEN, Gristenbühl 13,
 CH-9315 Neukirch (Egnach)
 Tel. 071/477 17 43
 E-mail: sag.orion@bluewin.ch

Titelbild / Photo couverture

Das multifunktionale Laser- und Astrometrie-Teleskop ZIMLAT der Fundamental-Station in Zimmerwald am 28.04.2003. Hauptspiegel-Durchmesser 1 Meter, Kuppel-Durchmesser ca. 6 Meter.
 Aufnahme: JOHANNES UTZINGER, Astronomisches Institut, Universität Bern. E-mail: utzinger@aiub.unibe.ch

Redaktionsschluss / Délai rédactionnel N° 317 - 13.6.2003 • N° 318 - 12.8.2003

Zwei Jahrhunderte Astronomie und Geodäsie in Bern

ANDREAS VERDUN

Ende des 18. Jahrhunderts wurden im Kanton Bern die ersten astronomisch-geodätischen Arbeiten von wissenschaftlicher und nationaler Bedeutung durchgeführt. Als Folge dieser Arbeiten entstand 1812 die erste Sternwarte in Bern, die etwas später als Koordinaten-Ursprung für die Vermessungen der Schweiz, insbesondere für die Dufour-Karte, diente. Geodätische Astronomie und astronomische Geodäsie haben in Bern somit eine lange Tradition. Seit der Gründung des Astronomischen Instituts der Universität Bern im Jahre 1922 waren die Forschungsprojekte dieser Tradition verpflichtet. Noch heute ist der zentrale Forschungsbereich die sog. Fundamental-Astronomie, deren Ziel die Definition und Realisierung von Bezugssystemen am Himmel und auf der Erde sowie die Transformation zwischen diesen Systemen ist. Dieser Bereich der klassischen Astronomie umfasst heute modernste theoretische und beobachtungstechnische Methoden der Himmelsmechanik, Satellitengeodäsie und Astrometrie. Die Resultate haben für Astro- und Geodynamik weitreichende Bedeutung und werden international anerkannt.

Einleitung

Die Entwicklung der Astronomie in Bern war von Beginn an stark verflochten mit der Geschichte der eidgenössischen Landesvermessung. Diese enge Beziehung hat sich heutzutage sogar noch intensiviert, indem nicht mehr nur lokale und regionale, sondern auch globale astronomisch-geodätische Forschungsprojekte (z.B. mit dem Global Positioning System, GPS) im Vordergrund stehen und z.T. sogar gemeinsam (vom Astronomischen Institut der Universität Bern und dem Bundesamt für Landestopographie, Wabern bei Bern) durchgeführt werden (z.B. im Bereich Satellit Laser Ranging, SLR). Diese aussergewöhnliche Verflechtung der klassischen Positions-Astronomie (s. dazu z.B. [35]) mit der Geodäsie prägte eine Tradition, nach der auch die astronomischen Forschungsprojekte definiert und ausgerichtet wurden und werden. Es erstaunt deshalb nicht, dass sich das Material zur Geschichte der Astronomie in Bern unter anderem auch in der Literatur zur Geschichte der Landesvermessung findet, so z.B. in den erschöpfenden Werken von RUDOLF WOLF [42] und JOHANN HEINRICH GRAF [17] sowie HANS ZÖLLY [43]. Was die Gründungszeit und die alte Sternwarte betrifft, wurden für diesen Artikel vor allem die grundlegenden Arbeiten [11] und [12] von FRANZ FLURY sowie der Abriss [31] von MAX SCHÜRER herangezogen. Für die neuere Geschichte der exakten Wissenschaften in Bern war der Beitrag [15] von VIKTOR GORGÉ in [28] eine wertvolle Quelle, und für die jüngste Geschichte des Astronomischen Instituts der Bericht von GERHARD BEUTLER in [7]. Die meisten biographischen Angaben stammen aus [29].

Die Gründungszeit um 1800

Im Jahre 1785 übernahm JOHANN GEORG TRALLES (1763–1822) von Hamburg die Professur der mathematischen, physikalischen und astronomischen Wissenschaften an der Berner Akademie. Ihm wurde ein Kabinett auf dem Kirchhof des grossen Münsters für astronomische Beobachtungen zur Verfügung gestellt mit dem Auftrag, «dass von dem neuen Professor in den math. und phys. Wissenschaften auch etwas in der Astronomie und der Lehre über die Atmosphäre geleistet werde und dass derselbe mit seinen Auditoren auch zuweilen astronomische Beobachtungen anstelle...» Dazu sei «... ein Ort und ein kleines Gebäude vonnöten, das einen ausgebreiteten Horizont hat. Beide dieser Vorteile vereinigen sich in dem Kabinett auf dem Kirchhof des grossen Münsters; mit kleinen Kosten könnte dieses kleine Gebäude wahren Nutzen verschaffen.» Ob TRALLES nur auf der Münster-Plattform oder auch anderswo beobachtete, ist ungewiss. Offenbar gab es auch einen «Gartenpavillon», «Pavillon Küpfer» genannt, der sich auf dem Areal «Engehof» an der Reichenbachstrasse 8 befand und der bereits im Stadtplan von 1797 eingezeichnet ist. Er wurde auf den Plänen allgemein mit «Sternwarte» bezeichnet und für Vermessungszwecke als trigonometrischer Punkt verwendet. Von 1792 an begann TRALLES mit seinen Vorbereitungen zu einer genauen und umfassenden Vermessung des Kantons Bern und bestellte einen grossen Azimutalkreis von RAMSDEN, der aber erst 1797 in Bern eintraf. Von 1792 bis 1795 bestimmte er astronomisch die geographische Breite von Bern und publizierte die



Fig. 1: JOHANN FRIEDRICH TRECHSEL (4. März 1776 – 26. November 1849), Begründer der ersten Sternwarte in Bern.

Resultate in einer meisterhaften Arbeit, die für die Sorgfalt und Umsicht des Beobachters spricht. Bemerkenswert ist die Tatsache, dass TRALLES im Zuge seiner trigonometrischen Vermessungen des Kantons Bern bereits an eine astronomisch-geodätische Landesvermessung der Schweiz dachte und dieses Projekt in einer 1798 publizierten Abhandlung [33] ausarbeitete. Vom Juli 1798 bis Dezember 1799 nahm TRALLES im Auftrag der helvetischen Regierung an der internationalen Meterkonferenz in Paris teil, an der er eine bedeutende und geachtete Rolle spielte und deren Resultate er 1801 publizierte. Reibereien mit den Behörden, die TRALLES' Wohnung während seiner Abwesenheiten anderweitig vergaben und seine Habeslichkeiten und Instrumente kurzerhand in der Stadtbibliothek versorgten, führten TRALLES schliesslich zur Einsicht, dass er in Bern nicht die seinen Fähigkeiten und Plänen nötige Anerkennung und Zustimmung fand. Er verliess Bern 1803 voller Verbitterung.

Als 1805 die Bernische Akademie neu eingerichtet wurde, erhielt JOHANN FRIEDRICH TRECHSEL (1776–1849) von Burgdorf den Lehrstuhl für Mathematik, wozu 1812 noch jener für Physik kam (Fig. 1). TRECHSEL studierte bei TRALLES und wurde am 22. Mai 1798 ordiniert. Er leitete zwischen 1812 und 1819 das Nivellement für die Juragewässer-Korrektion. Er wurde auswärtiges Mitglied der Royal Society in London. Eine der bedeutendsten geodätischen Arbeiten

TRECHSELS betrifft die trigonometrische Vermessung des Kantons Bern, die er während einigen Jahren durchführte und deren Resultate er 1812 und 1819 veröffentlichte. Diese und jene von den französischen Ingenieurgeographen durchgeführten topographischen Arbeiten zeigten TRECHSEL die Notwendigkeit eines zentralen astronomischen Observatoriums. Am 15. Januar 1812 äusserte er seinen Wunsch, wenigstens über ein kleines Observatorium zu verfügen. Er schrieb an den Schanzenherrn FEER in Zürich: «Auf unserer grossen Schanze wäre ein prächtiger Horizont – und ein jetzt nicht mehr gebrauchtes Pulverhaus». Am 29. August 1812 berichtete er weiter, dass er die beiden französischen Geodäten HENRY und DELCROS auf den höchsten Punkt der Schanze geführt habe, der sich ausserordentlich schön zu einem Observatorium eignete. Noch im selben Jahr wurde an diesem Ort, auf der sog. Bastion Hohliebi, auf Kosten der Franzosen ein provisorisches «Observatorium» gebaut (Fig. 2). In der hölzernen Baracke wurden 4 massive Eichenpfosten in den Boden gerammt, auf denen der grosse Ramsden-Theodolit als Passageninstrument aufgestellt wurde. Sämtliche darauffolgenden astronomisch-geodätischen Messungen bezogen sich auf diesen Punkt, der während der weiteren Ausbauphasen der Sternwarte stets beibehalten wurde. Die Gründung der «alten Sternwarte Bern» geht somit auf das Jahr 1812 zurück und wurde auf Initiative TRECHSELS veranlasst.

Die alte Sternwarte Bern

TRECHSEL war jedoch mit diesem Provisorium, der «*morschen baraque*», wie er das «Observatorium» mittlerweile bezeichnete, bald nicht mehr zufrieden. Am 10. Juni 1820 machte er eine energische Eingabe an die akademische Kuratel, in der er den Bau eines Observatoriums verlangte, das er zusammen mit dem Architekten WAEBER entwarf. Er begründete seinen Antrag für einen Neubau unter anderem damit, dass die langjährigen Beobachtungsreihen mit dem Verschwinden des «Gebäudes» wertlos würden und dass es Bern zu keiner besonderen Ehre gereichen würde, wenn es hiesse, das 1812 von den Franzosen gebaute Observatorium faulte im Jahre 1820 endlich zusammen und werde nicht wieder hergestellt. Dies überzeugte die Regierung, und sie ermächtigte TRECHSEL, nach vorgelegten Plänen mit dem Neubau zu beginnen. Rechtzeitig zur Jahresversammlung der Schweiz. Naturforschenden Gesellschaft in Bern am 10. Juli 1822 konnte TRECHSEL sein neues Observatorium einem grossen

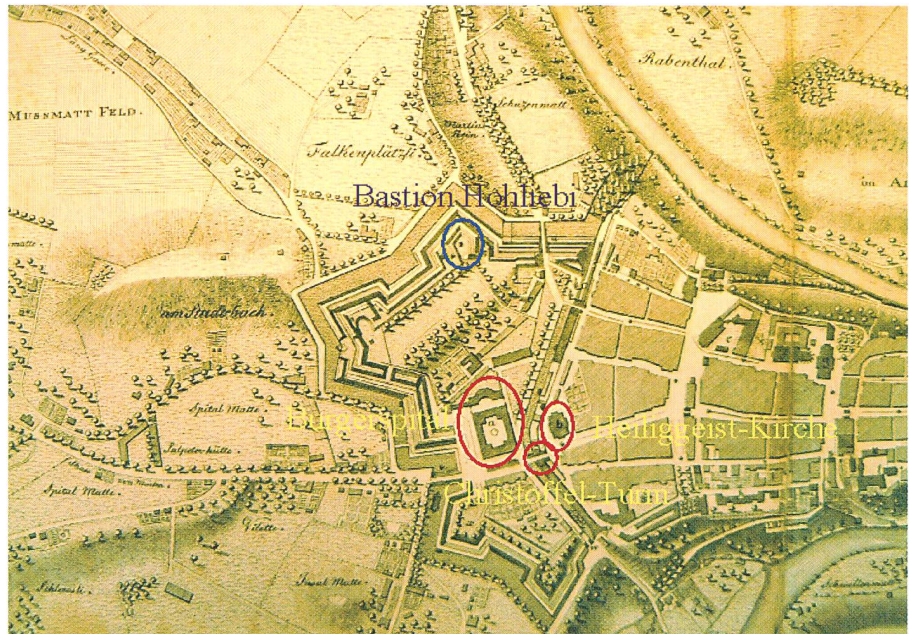
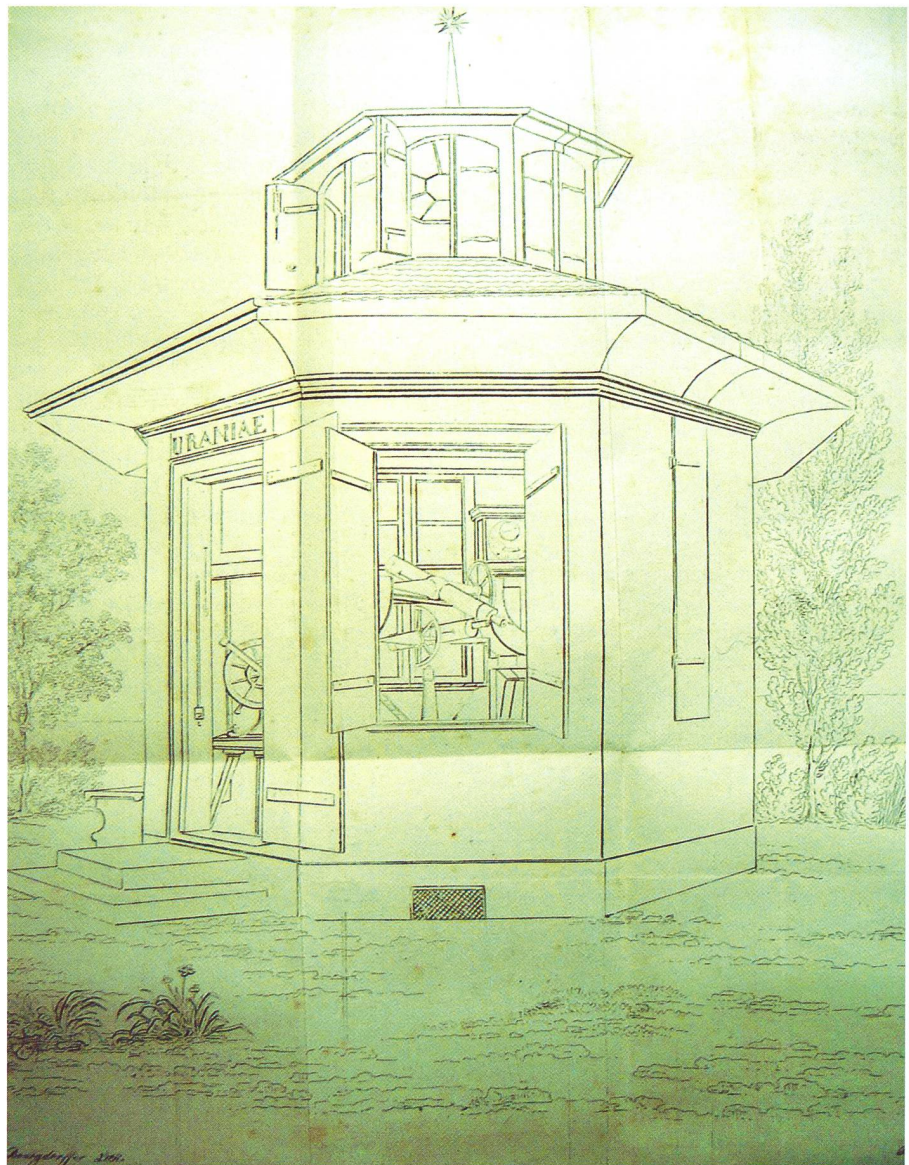


Fig. 2: Bern um 1807 (Staatsarchiv Bern, AA IV 2190).

Fig. 3: Die alte Sternwarte Bern um 1822 (Lithographie von Burgdorffer in [34], Stadt- u. Uni.-Bibl. Bern).



Publikum präsentieren (Fig. 3). Die Existenz der Sternwarte Bern wurde durch TRECHSELS «Nachricht» [34] auch international rasch bekannt. Das Gebäude wurde genau am Ort des Provisoriums errichtet, wobei darauf geachtet wurde, dass der Beobachtungspunkt von 1812 erhalten blieb. Der Grundriss des Riegelbaus war ein reguläres Achteck von etwa 3 Metern Durchmesser, das genau nach den Himmelsrichtungen ausgerichtet wurde. Im Osten befand sich der Eingang, im Westen, diametral gegenüber, ein Erker, in dem eine bewegliche Treppe angebracht war, mit der man auf den oberen Boden (etwa 3 Meter über der Erde) gelangen konnte. Gebäude, Dach und Turm wurden durch den Meridianspalt «durchschnitten». Der Fussboden im unteren Beobachtungssaal befand sich etwa 60 cm über dem Erdboden, was eine ausreichende Lüftung ermöglichte. Auf den Seiten Süd-Ost, Süd-West, Nord-Ost und Nord-West befanden sich hohe, auf Rollen bewegliche Schiebefenster. In der Mitte des Beobachtungssaales stand das Mittagsrohr auf zwei grossen steinernen Säulen, die berührungsfrei zum Fussboden direkt in den Moränenschutt der Schanze eingemauert wurden. Als Hauptinstrument diente der Ramsdenkreis. Neben vielen weiteren Instrumenten war der von SCHENK nach der Reichenbach'schen Bauart konstruierte Bordakreis wohl das schönste Instrument, das die Sternwarte damals besass. Die Bastion, auf der die Sternwarte errichtet wurde, gehörte zum Nord-Ost-Flügel der alten Fortifikation der Stadt Bern. Diese Wehrbauten wurden seit Mitte der 1830er Jahre sukzessive abgetragen. Anlässlich der Demolierung der «Schanzen» sollte auch die Bastion fallen, auf der sich die Sternwarte befand. WILHELM HEINRICH DUFOUR (1787–1875), der die Berner Sternwarte als Nullpunkt der schweizerischen Triangulation gewählt hatte, wehrte sich vehement gegen diese Absicht und erhielt von der Berner Regierung die Zusicherung, dass das Observatorium wenn irgend möglich erhalten bleibe. Dennoch wurde der Sternwarten-Hügel anfangs 1841 von allen Seiten abgegraben, und TRECHSEL konnte mit einem Schreiben vom 7. Juni 1841 an das Baudepartement in «letzter Minute» verhindern, dass das Observatorium Schaden nahm, da sogar schon mit dem Abbruch der Palisaden begonnen wurde. Der Sternwarten-Hügel wurde aufgrund dieser Intervention neu angelegt und bepflanzt.

Am 25. April 1847 wurde JOHANN RUDOLF WOLF (1816–1893) aus Fällanden (ZH) Direktor der Sternwarte. WOLF war in Bern seit 1839 Lehrer an der Re-

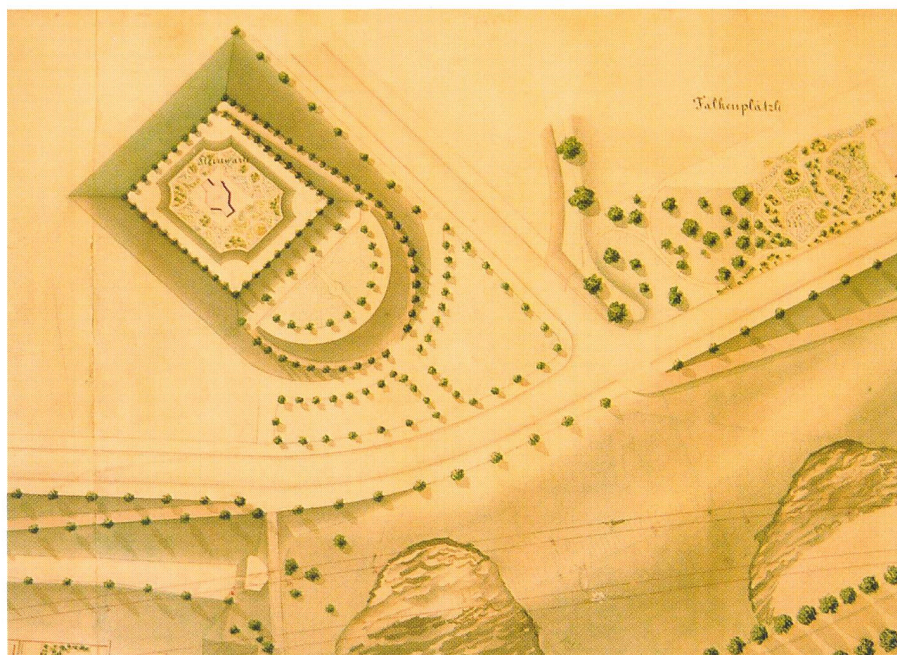


Fig. 4: Grundriss der alten Sternwarte Bern nach der ersten baulichen Erweiterung um 1848 (Staatsarchiv Bern, AA VIII/III 67a).

alschule, seit 1841 Sekretär, Quästor und Archivar der Naturforschenden Gesellschaft, und seit 1847 Privatdozent der Mathematik an der Universität [1]. Als WOLF die Sternwarte übernahm, erschien ihm das von mächtigen Bäumen umschattete Häuschen mit der Inschrift «Urania», dessen Umgebung inzwischen als öffentliche Promenade erklärt worden war, eher wie «die Grabstätte der Urania, als eine ihr geweihte Werkstätte». Am 19. August 1847 ermächtigte die Erziehungsdirektion WOLF, «die den nächtlichen topographischen Studien hinderlichen Bäume bei der Sternwarte auf geeignete Weise wegräumen zu lassen». Nach WOLF bestand die «geeignete Weise» darin, dass er eines Nachts durch einige Zimmerleute alle Bäume umsägen liess. WOLF war bestrebt, eine zweckmässige Einrichtung der Sternwarte zu erreichen, was ihm trotz Widerstand der Behörde gelang. Am 7. April 1848 veranlasste der Regierungsrat die Heizbarmachung und Beleuchtung der Sternwarte. Heizung, Beleuchtung und Möblierung machten zwei kleine Anbauten «Süd-West» und «Nord-Ost» nötig (Fig. 4). Doch schon bald nach dieser ersten, kleineren baulichen Erweiterung wurde 1853/54 eine zweite, grössere nötig, ausgelöst durch die Einrichtung des schweizerischen Telegraphennetzes durch VON STEINHEIL. Die Sternwarte Bern wurde dazu ausersehen, die Normalzeit für sämtliche Telegraphenstationen der Schweiz herauszugeben. Zur Sendung und zum

Empfang von Telegrammen mit genauen Zeitangaben waren präzise (astronomische) Zeitbestimmungen nötig. Das vorhandene Mittagsrohr war für diese Aufgabe ungeeignet. Um das zu diesem Zweck angekaufte Ertel'sche Meridian-Instrument unterbringen zu können, musste der Bau vergrössert und insbesondere der turmartige Aufbau entfernt werden. Am 12. Mai 1852 beantragte die Berner Regierung auf Anfrage des schweizerischen Postdepartements dem Bundesrat, auf die Sache einzutreten. Der Umbau dauerte 4 Monate und war im Herbst 1853 beendet. Im Frühjahr 1854 wurde das Meridian-Instrument aufgestellt. Die Sternwarte erhielt seitlich am Gebäude einen Turm mit Drehkuppel, bestückt mit einem parallaktisch montierten 78 mm-Fraunhofer-Teleskop (Fig. 5). Erst mit WOLF bekam die Sternwarte in Bern internationale Bedeutung. WOLFS wissenschaftlichen Leistungen, insbesondere in seiner Berner Zeit, sind beachtlich. So begann er 1849 mit systematischen Beobachtungen der Sonnenflecken und bestimmte 1852 erstmals den Sonnenflecken-Zyklus. 1855 wurde er ans Eidgenössische Polytechnikum und an die Universität Zürich berufen. 1864 begründete er dort die Eidgenössische Sternwarte, war deren erster Direktor, war Präsident der 1861 gegründeten Schweizerischen Geodätischen Kommission (SGK) [10] sowie Präsident der Meteorologischen Zentralanstalt. Für sein Leben und umfangreiches Werk konsultiere man [16], [38] sowie [20].

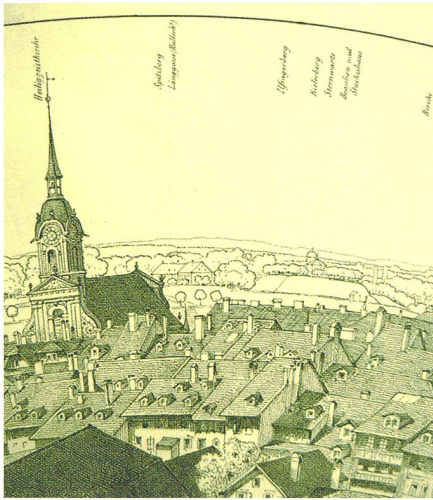
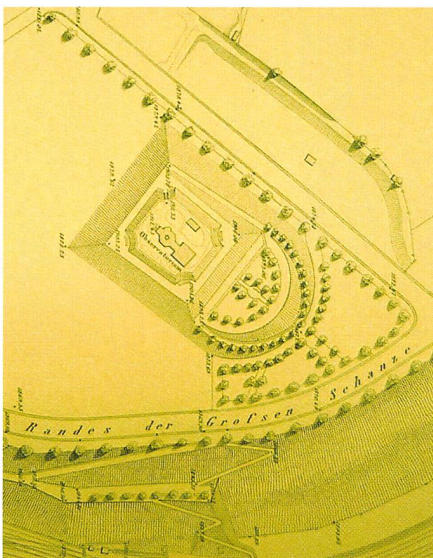


Fig. 5: Die alte Sternwarte Bern nach der zweiten baulichen Erweiterung um 1858, von der Altane des Bundesratshauses aus gesehen (Stadt- u. Univ.-Bibl., Roll. 124/124a).

Nach dem Abgang von WOLF 1855 und der interimistischen Betreuung durch JOHANN RUDOLF KOCH [36] wechselte die Sternwarte mehrmals die Leitung und wurde sukzessive in eine meteorologische Zentralanstalt umfunktioniert, insbesondere durch Initiative von HEINRICH WILD (1833–1902), Professor für Physik und Astronomie. 1861 erfuhr die Sternwarte ihre dritte und grösste bauliche Erweiterung (Fig. 6): einen Anbau von ca. 120 m² Fläche mit Keller und Terrasse für die von WILD entwickelten selbstregistrierenden meteorologischen und geophysikalischen Instrumente [39]. WILD legte damit den Grund zu dem

Fig. 6: Planskizze (Auf- u. Grundriss) von H. Wild zur dritten baulichen Erweiterung um 1861 der alten Sternwarte in Bern (Staatsarchiv Bern).



1863 geschaffenen schweizerischen meteorologischen Beobachtungsnetz. Als Direktor der eidgenössischen Normaleichstätte führte er bis 1867 die Reform der schweizerischen Ur-Masse aus. 1868 wurde er als Direktor des physikalischen Zentral-Observatoriums nach St. Petersburg berufen.

Dies bedeutete nun allerdings das Ende der «alten Sternwarte» als astronomisches Observatorium (Figs. 7, 8 und 9). Sie diente bloss noch der meteorologischen Beobachtung und wurde schliesslich unter der Direktion des Professors für Physik, AIMÉ FORSTER, in ein geophysikalisches Observatorium umgewandelt. Die «alte Sternwarte» wurde 1876 auf Veranlassung FORSTERS abgerissen und an ihrer Stelle ein tellurisches Observatorium erstellt, da es in der Schweiz nach seiner Meinung nicht an Sternwarten, wohl aber an einem geophysikalischen Institut fehlte [13]. Ausserst bemerkenswert ist die Tatsache, dass WOLF von Zürich aus dafür sorgte, dass beim Abriss und Neuaufbau wenigstens der ursprüngliche Nullpunkt erhalten und gesichert wurde: eine Leistung, die nur der Ein- und Weitsicht eines Astronomen, Geodäten und Wissenschafts-Historikers seines Kalibers entspringen konnte.

Das Tellurische Observatorium

Im tellurischen (oder magnetischen) Observatorium [14] wurde der Astronomie nur noch ein Nebenplatz eingeräumt in Form eines Meridiansaales, in dem auch die übriggebliebenen astronomischen Instrumente «aufbewahrt» wurden. Das tellurische Observatorium (Fig. 10) hat in der Folge als geophysika-

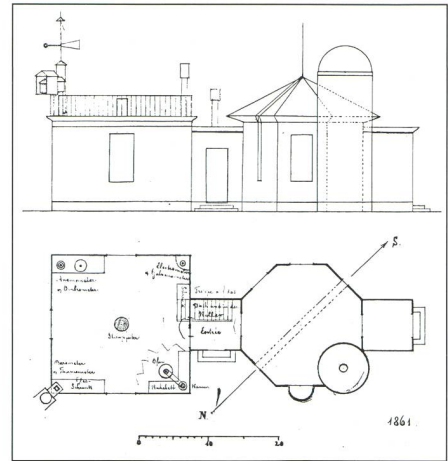
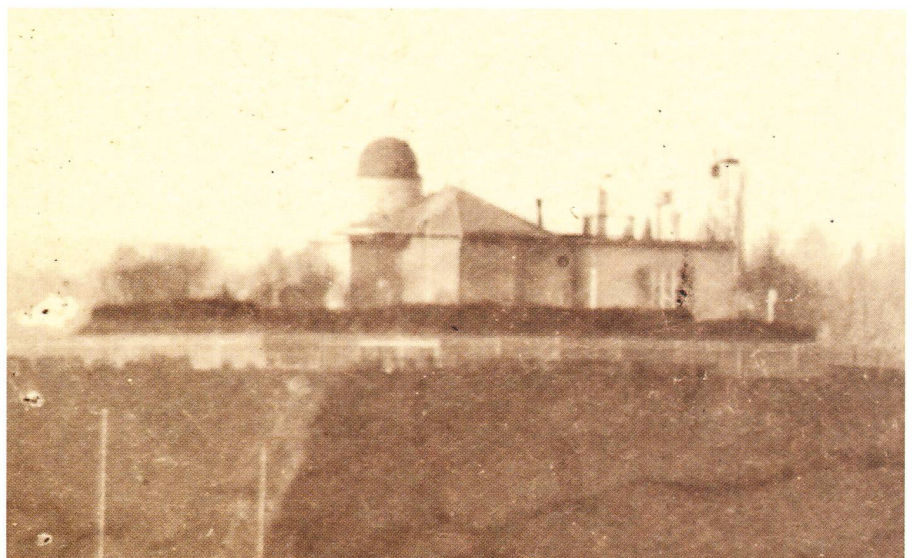


Fig. 7: Grundriss der alten Sternwarte Bern um 1864 (Staatsarchiv Bern, AA IV 1864).

lisches Institut nie eine bedeutende Rolle gespielt, da die für ein tellurisches Forschungsprogramm notwendigen seismographischen und erdmagnetischen Messungen wegen der ungeeigneten, verkehrsreichen Lage langfristig nicht zufriedenstellend durchgeführt werden konnten. FORSTER leitete das Observatorium dennoch bis zu seinem Tode (1926). Die beobachtende Astronomie war zwar von 1876 an für mehr als vier Jahrzehnte nicht mehr als eigenständiges Forschungs- und Lehrfach an der Hochschule vertreten, wurde wieder der Mathematik unterstellt und zwischen 1880 und 1921 «nur» noch als theoretische Disziplin von zwei Vertretern des Fachbereichs Mathematik, GEORG JOSEPH SIDLER und GOTTLIEB HUBER, gelehrt. Während dieser rein theoreti-

Fig. 8: Photographie der alten Sternwarte Bern im Januar 1865, von Süden aus gesehen (Staatsarchiv Bern).



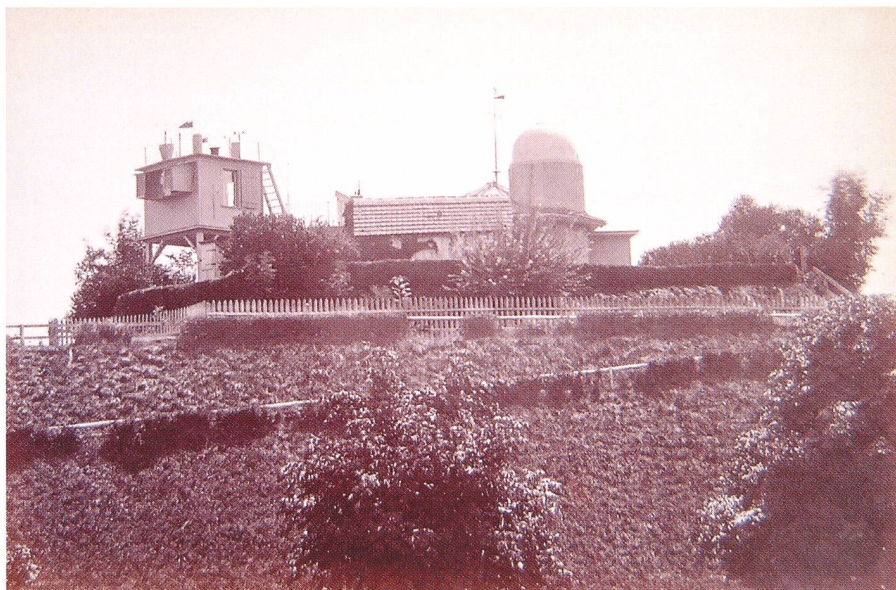


Fig. 9: Photographie der alten Sternwarte Bern um 1868, von Norden aus gesehen (Privatbesitz).

schen Epoche erhielt die Astronomie in Bern aber einen entscheidenden neuen Impuls. SIDLER und HUBER hielten Vorlesungen über die eher mathematisch ausgerichteten Gebiete der klassischen Positions-Astronomie, insbesondere sphärische Astronomie und Himmelsmechanik. Spezialvorlesungen über Störungstheorie, Theorie der Mondbewegung sowie Bahnbestimmung wurden erarbeitet und gehalten.

Im Jahre 1918 wurde SIGMUND MAUDERLI (1876–1962) ausserordentlicher, 1921 ordentlicher Professor der Astronomie an der Universität Bern [37]. Er hatte seit 1898 Mathematik, Astronomie und Physik an der Universität in Lausanne studiert und 1909 bei WOLFER (dem Nachfolger WOLFS) in Zürich promoviert mit «Untersuchungen über Stabilität dynamischer Systeme in der Mechanik des Himmels» [21] (ein erstaunlich modernes Thema!). MAUDERLI entwickelte eine engagierte Lehrtätigkeit, die bis zu seiner Emeritierung weit über 300 Vorlesungen und etwa 50 umfangreiche (z.T. publizierte) Manuskripte, vorwiegend zur klassischen Positions-Astronomie, umfasste. Er habilitierte sich 1910 mit einem ebenfalls himmelsmechanischen Thema zu einem heute noch sehr aktuellen Forschungsbereich, nämlich «Über Kommensurabilitäten in unserem Sonnensystem» [22]. MAUDERLI war 1928/29 sowie 1938/39 Dekan der Fakultät und 1942/43 Rektor der Universität. Der Zustand der Astronomie im tellurischen Observatorium führte unweigerlich zu Spannungen zwischen FORSTER und MAUDERLI, der bestrebt war, die beobachtende Astronomie in Bern wieder einzuführen. Dazu sah er jedoch keine andere

Möglichkeit als die Gründung eines neuen astronomischen Instituts mit eigenem Gebäude. Das tellurische Observatorium, das im Volksmund noch lange Zeit (irrtümlich) «alte Sternwarte» genannt wurde, leistete ohne wesentliche Umbauten seine Dienste als physikalisches Institut bis 1958. Die einzige Neuerung betraf die vom Nachfolger FORSTERS, HEINRICH GREINACHER, veranlasste Einrichtung einer Werkstatt. Platznot und das Bedürfnis, sämtliche exakten Wissenschaften in einem einzigen Gebäude zu vereinen, führten zum Entschluss, das hübsche Gebäude 1958 abzureissen (es wurde gesprengt) und ein neues, modernes Institutsgebäude zu

errichten, das im Sommer 1961 bezugsbereit war und in dem auch das Astronomische Institut seinen heutigen Platz fand (Fig. 11).

Das Astronomische Institut

Seit 1910 bemühte sich MAUDERLI um den Bau einer neuen Berner Sternwarte, die auch ein eigenes Astronomisches Institut beherbergen sollte. Am 25. November 1922 hatte er endlich sein Ziel erreicht. Es ist dies das «Geburtsdatum» des Astronomischen Instituts der Universität Bern, dessen «Wiege» sich in einer nach MAUDERLIS Vorstellungen und Plänen errichteten Sternwarte an der Muesmattstrasse 25 befand [23]. Wenig später, am 23. Mai 1923, gründete MAUDERLI mit einer Anzahl von Freunden der Astronomie die «Astronomische Vereinigung Bern» (die heutige Astronomische Gesellschaft Bern). Die Sternwarte (Fig. 12) wurde bestückt mit einem 150 mm-Refraktor von G. und S. MERZ in München-Pasing, mehreren Sextanten, einem Prismenkreis und einem Universalinstrument von Heyde, mehreren Chronometern, darunter einem grossen Marine-Chronometer mit Registriervorrichtung von NARDIN in Le Locle, und einer Präzisionspendeluhr mit Sekundenkontakt nach der Uhrenfabrik Zenith ebenfalls in Le Locle. Die Kuppel hatte einen Durchmesser von 6 Metern. Das Gebäude besass einen Instrumentenraum, eine Bibliothek, eine Dunkelkammer sowie Räume für Seminare und Spezial-Vorlesungen. Auch eine Zeitempfangsstation wurde eingerichtet. Erster Assistent war der Gymnasiallehrer HANS MOLLET. Eifrige Mitarbeiter waren die beiden Studenten FRANZ FLURY

Fig. 10: Das Tellurische Observatorium um 1877 (Burgerbibl. Bern).



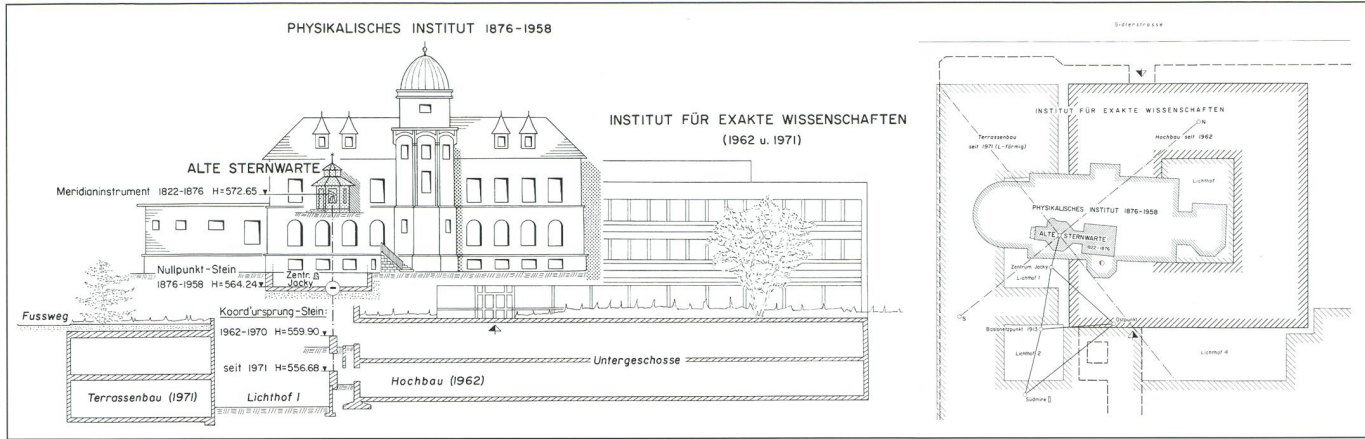


Fig. 11: Auf- und Grundriss der alten Sternwarte, des Tellurischen Observatoriums und des Instituts für Exakte Wissenschaften der Universität Bern (Dipl.-Ing. H. Oettli, Bern).

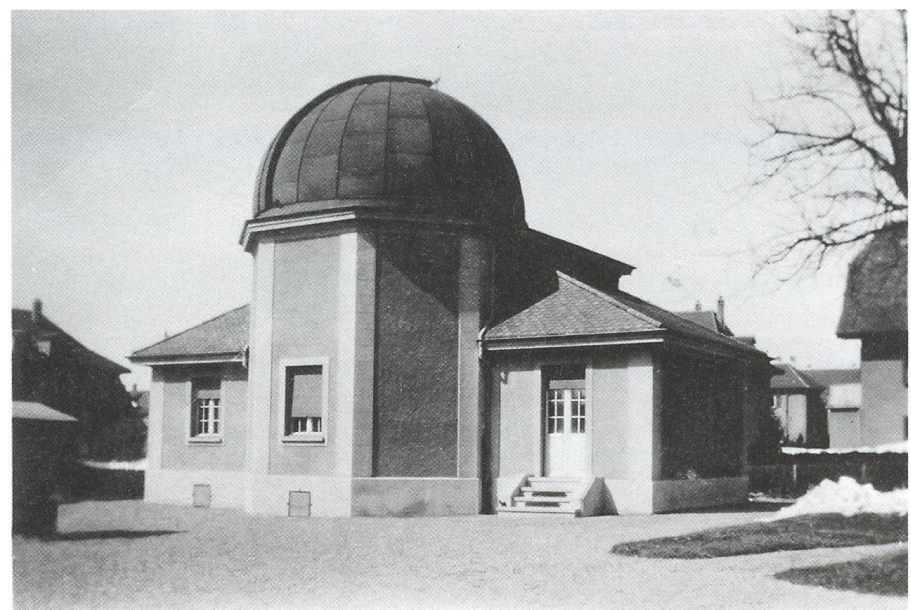
und MAXIME DE SAUSSURE. Am ersten astronomischen Praktikum, das in der neuen Sternwarte durchgeführt wurde, beteiligten sich im Sommersemester 1923 bereits 12, im Wintersemester 14 Studierende. Es bestand eine enge Zusammenarbeit mit den Mitgliedern der Astronomischen Vereinigung Bern. 1925 konnte der Haupt-Refraktor bei der Firma Merz gegen einen 175 mm-Refraktor umgetauscht werden. Zu Beginn der 1930er Jahre konzentrierte sich die Arbeit immer mehr auf die Bahnbestimmung von Kleinplaneten, deren Resultate an das Astronomische Rechen-Institut zu Berlin-Dahlem gesandt wurden. Diese umfangreichen Berechnungen waren vorwiegend die Arbeit der beiden Assistenten WERNER WASEM und MAX SCHÜRER [26]. Seit der Eröffnung des Instituts wurden öffentliche Demonstrationen durchgeführt. Bis 1932 zählte man bereits gegen 10 000 Besucherinnen und Besucher [24]. Ab 1933 übernahm SCHÜRER die Leitung der Übungen für Studierende. Ein Gross-Ereignis und Höhepunkt in der Karriere MAUDERLIS war sicher die vom 23. bis 27. Juli 1935 in Bern durchgeführte Versammlung der (internationalen) Astronomischen Gesellschaft [25]. MAUDERLI trat 1946 in den Ruhestand.

Im Wintersemester 1937/38 wurde MAX SCHÜRER (1910–1997) von Wien nach seinen Studien in Bern und Berlin zum ordentlichen Assistenten ernannt, nachdem er im April 1937 seine Dissertation zum Thema «Über die theoretische und praktische Festlegung eines Inertialsystems» [30] vorgelegt hatte, wofür er von der phil.-nat. Fakultät die höchste Auszeichnung erhielt. 1938 war er Mitbegründer der Schweizerischen Astronomischen Gesellschaft. Er habilitierte sich 1942 und übernahm 1946 als ausserordentlicher Professor die Leitung des

Astronomischen Instituts. Im selben Jahr wurde er in die Schweizerische Geodätische Kommission gewählt, die er später (von 1972 bis 1980) präsidierte. 1949 wurde er ordentlicher Professor der Astronomie und war 1951/52 sowie 1962/63 Dekan. Er widmete sich Problemen der Stelldynamik, sein Hauptinteresse galt aber stets der astronomischen Geodäsie. Er konnte seine praktischen Kenntnisse in der Bahnbestimmung und Störungsrechnung in Forschungsprojekte einfließen lassen, die für das Institut zukunftsweisend wurden. Seine eigentliche Pionierarbeit beruhte auf der frühen Erkenntnis, dass künstliche Erdsatelliten für die Erdvermessung und Erdpotentialbestimmung eine wichtige Rolle spielen würden. Er erkannte zudem die Notwendigkeit einer astronomischen Beobachtungsstation

ausserhalb der Stadt, da die Lichtverschmutzung schon damals kaum mehr Beobachtungen in der Stadt zu Forschungszwecken zulies. Er plante und verwirklichte die Sternwarte in Zimmerwald 1955/56, die mit einem von ihm berechneten und im eigenen Institut gebauten Doppelteleskop (40 cm Schmidt-Kamera und 60 cm Cassegrain-Teleskop) bestückt wurde [32]. Die Muesmatt-Sternwarte wird seither nur noch für die Amateur-Astronomie genutzt. Zu Beginn der Weltraum-Ära in den frühen 60er-Jahren setzte man das Instrument in Zimmerwald neben der Supernovae-Suche bereits zur astrographischen Vermessung von Satellitenspuren und von Lichtblitzen aktiver Satelliten ein. Die Resultate wurden zusammen mit jenen anderer Observatorien in einem weltweiten Triangulationsnetz mit einer für

Fig. 12: Die Muesmatt-Sternwarte in Bern um 1925 (Archiv AIUB).



die damalige Zeit revolutionären Genauigkeit von 5 Metern in einem globalen Koordinatensystem ausgewertet. Damit begannen die eigentlichen fundamental-astronomischen Beobachtungen in Zimmerwald. Die Bestimmung des Geoids in der Schweiz (der Referenzfläche für die Bestimmung der Höhen «über Meer») war stets ein besonderes Anliegen SCHÜRERS. Er entwickelte erste Ideen zu dessen Bestimmung und leitete während seiner Zeit als Lehrbeauftragter an der ETH Zürich (1968–1979) die Dissertation von WERNER GURTNER (seit 1974 SCHÜRERS Assistent am Institut für Geodäsie und Photogrammetrie an der ETHZ), die 1977 zum gewünschten Resultat, einem ersten für die Praxis verwendbaren Geoid in der Schweiz, führte [18]. Zu seiner Studentenschaft in Bern gehörten u.a. WILHELMINE BURGAT und GERHARD BEUTLER. IVO BAUERSIMA (geb. 1931) war seit 1968 SCHÜRERS Assistent in Bern, promovierte 1976 mit einer Arbeit «Über die Festlegung eines Inertialsystems» [2] und habilitierte sich 1980 mit einer «Allgemeinen Diskussion über die Rotation eines nichtstarrten Erdmodells» [3]. Das «Dreigespann» BAUERSIMA, BEUTLER, und GURTNER entwickelte die fundamental-astronomischen Ideen von SCHÜRER sowohl in theoretischer als auch in beobachtungs-technischer Hinsicht weiter, wobei schon früh auf die in rasantem Fortschritt begriffene Computertechnik gesetzt wurde.

SCHÜRER trat 1980 in den Ruhestand und starb 1997 [41]. Sein Nachfolger wurde PAUL WILD (geb. 1925) von Zürich. Er durchlief zwischen 1944 und 1950 ein Mathematik-Studium an der ETH Zürich. Er arbeitete seit 1947 einige Male mit der Gruppe von CHALONGE (Paris) in der Forschungsstation Jungfrauoch und war für ein Jahr Assistent an der Eidg. Sternwarte in Zürich. Von 1951 bis 1955 arbeitete er bei Prof. FRITZ ZWICKY in Pasadena (wo er mit EDWIN HUBBLE zusammentraf) an Positions- und Helligkeitsmessungen für einen mehrbändigen Galaxien-Katalog und begann auf Palomar Mountain (wo er mit WALTER BAADE zusammentraf) eine neue Supernovae-Suche, die er später zusammen mit SCHÜRER in Bern fortsetzte. 1956 assistierte er SLIPHER vom Lowell-Observatorium (Arizona) bei seinen Mars-Beobachtungen in Süd-Afrika. Nach seiner Rückkehr nach Bern im Frühling 1957 wurde WILD Assistent bei SCHÜRER und widmete sich der Himmelsüberwachung in Zimmerwald [40]. 1969 wurde er Oberassistent, 1971 erhielt er einen Lehrauftrag für Astronomie, wurde 1976 zum Honorar-Professor und 1980 zum ordentlichen Professor ernannt. Er führte in Zimmerwald die Suche nach Super-

novae konsequent fort und entdeckte deren 42. Hinzu kamen die Entdeckung von 4 Novae, von 7 Kometen (wovon Komet Wild 2 für die Stardust-Mission der NASA als Zielobjekt auserwählt wurde) sowie von 94 Kleinplaneten. Obwohl WILDS Interesse stets der Kosmologie galt, liess er die erfolgreichen fundamental-astronomischen Forschungsprojekte des Instituts weiterlaufen, konzentrierte aber seine eigene Tätigkeit ganz auf die Beobachtung. Weit über den Studentenkreis hinaus bekannt wurde er durch seine aus eigenen Erfahrungen gesammelten astronomisch-biographischen Anekdoten, mit denen er die Zuhörerschaft in Vorlesungen und öffentlichen Vorträgen zu begeistern vermochte. Allen bekannt sind seine verblüffenden kopfrechnerischen Fähigkeiten sowie seine kalligraphisch bestechend schöne Handschrift. Besonders erwähnenswert ist sein enorm breites (nicht nur astronomisches!) Wissen, von dem manche Institutsmitglieder noch heute (trotz Internet) profitieren können.

1991 wurde GERHARD BEUTLER (geb. 1946) als Extraordinarius für Astronomie und Direktor des Instituts gewählt. Er studierte von 1964 bis 1971 Astronomie, Physik und Mathematik an der Universität Bern, promovierte 1976 mit einer Arbeit über «Eine numerische Methode zur integralen Auswertung von Satellitenbeobachtungen» [5] und habilitierte sich 1983 mit einer Arbeit über die «Lösung von Parameterbestimmungsproblemen in Himmelsmechanik und Satellitengeodäsie mit modernen Hilfsmitteln» [6]. Er war seit 1984 Oberassistent und wurde 1996 Ordinarius am Astronomischen Institut in Bern. Schon während seiner Assistenz-Zeit konzentrierte BEUTLER all seine Kräfte (und jene des Instituts, einschliesslich der Assistenten ROTHACHER, SCHILDKNECHT und HUGENTOBLE) auf die Entwicklung computer-gestützter (numerischer) Methoden zur Lösung der fundamental-astronomischen Probleme [8]. Die anfänglich zum grossen Teil von BEUTLER selbst entwickelte Bernese-GPS-Software wurde weltweit bekannt und geschätzt. Er gab aber auch wesentliche Impulse zur «Wiederbelebung» der klassischen Richtungsbeobachtung mit modernen Hilfsmitteln, insbesondere mit den seit den 80er-jahren verfügbaren Charge Coupled Devices (CCD-Astrometrie). Damit sollte ein von BAUERSIMA theoretisch vorgeschlagenes Projekt [4] praktisch umgesetzt werden, in dem das inertielle Quasar-System via Richtungsbeobachtungen zu Erdsatelliten ins System der Fundamental-Sterne transformiert (Coupled Quasar, Satellite and Star Positioning, CQSSP) und dadurch ein für as-

trometrische Zwecke gut verfügbares optisches Bezugssystem realisiert werden kann. Schliesslich war BEUTLER massgebend mitbeteiligt an der Software-Entwicklung für die Satellitenbeobachtungs-Station in Zimmerwald. BEUTLER wurde im Laufe seiner Karriere Mitglied, Vorstands-Mitglied und Präsident der wichtigsten nationalen und internationalen astronomisch-geodätischen Komitees, Gesellschaften, Institutionen und Organisationen. Nicht zuletzt bilden seine auf numerischen Methoden und analytischen Überlegungen beruhenden Beiträge zur Himmelsmechanik und Erdrotation ein solides Fundament für die weitere Forschung am Astronomischen Institut im Bereich Astro- und Geodynamik [9]. Das Institut besteht heute aus drei Forschungsgruppen, die ihre Tätigkeiten und Resultate in bis dato mehreren hundert Publikationen in Fachzeitschriften präsentierten: (1) der GPS-Gruppe (Leiter URS HUGENTOBLE als Nachfolger von MARKUS ROTHACHER, der 1999 an die Forschungseinrichtung Satellitengeodäsie der TU München berufen wurde) mit dem Center for Orbit Determination in Europe (CODE), das täglich genaue Bahnelemente der GPS-Satelliten, Erdrotations-Parameter (Tageslänge, Polschwankung) sowie Stationskoordinaten, die ein globales terrestrisches Bezugssystem definieren, bestimmt; (2) der CCD-Gruppe (Leiter THOMAS SCHILDKNECHT), die neben astrometrischen Richtungsbeobachtungen auch Software zur automatischen Suche und Detektion von Raumschrott für die ESA (in Teneriffa) entwickelt; und (3) der SLR-Gruppe (Leiter WERNER GURTNER), die seit 1984 in der Satellitenbeobachtungs-Station Zimmerwald routinemässig Distanzmessungen mit Laser zu speziellen geodätischen Satelliten durchführt.

Die Fundamental-Station in Zimmerwald

Das Observatorium des Astronomischen Instituts der Universität Bern wurde 1955/56 in Zimmerwald, ca. 10 km südlich von Bern auf dem Längenberg in einer Höhe von etwa 900 Metern ü.M. erbaut. Zwischen 1956 und 1958 konnte erstmals mit einer kleinen Schmidt-Kamera (Öffnung 25 cm, Brennweite 104 cm) von dort aus beobachtet werden. Ab 1959 stand die grosse Schmidt-Kamera (Öffnung 40 cm, Brennweite 104 cm) sowie das Cassegrain-Teleskop (Öffnung 60 cm, Brennweite 13 m) zur Verfügung. Dank dem grossen Gesichtsfeld der Schmidt-Kamera von 6° konnten zahlreiche Supernovae, Novae, Kleinplaneten und Kometen entdeckt werden. Auf SCHÜRERS Initiative beteiligte man sich ab etwa 1965 an den welt-

weit koordinierten optischen (photographischen) Beobachtungs-Kampagnen aktiver und passiver Satelliten wie z.B. GEOS, Explorer, Pageos oder Echo. Damit erschien das Observatorium erstmals in einem weltweiten Netz von Satellitenbeobachtungs-Stationen. Diese Richtungsbeobachtungen verloren Mitte der 70er-Jahre wegen ihrer arbeitsintensiven Auswertung an Bedeutung und wurden durch die aufkommenden Laser- und Doppler-Methoden zur Distanzbestimmung ersetzt. 1971/72 fanden erste Versuche statt mit einem Laser, der auf dem Teleskop montiert wurde. Die dürftigen Erfolge führten 1974 zum Entschluss, eine neue Kuppel mit einem eigens für Laser-Distanzmessungen bestückten Telemeter von 40 cm Öffnung zu bauen. Bereits von 1976 an bis 1979 konnten Testmessungen mit einer Genauigkeit von 80 cm mit einem in Zusammenarbeit mit dem Institut für Angewandte Physik der Universität Bern gebauten Rubin-Laser durchgeführt werden. Zwischen 1981 und 1984 wurde ein neuer Laser angeschafft sowie die Optik, Elektronik und Software verbessert, wodurch die Beobachtungs-Genauigkeit auf 8 cm reduziert werden konnte. 1987 wurde WERNER GURTNER (geb. 1949) Leiter des Observatoriums, das unter seiner Führung zwischen 1984 und 1995 im operationellen Betrieb an zahlreichen internationalen Kampagnen wie MERIT, Wegener Medlas, Crustal Dynamics Project sowie dem International Earth Rotation Service teilgenommen hat. 1989 wurde mit dem Kauf einer

CCD-Kamera die optische Richtungsbeobachtung wieder vorangetrieben und modernste Software zur Auswertung der Bilddaten entwickelt. Damit stand eine Technologie zur Verfügung, mit der Distanzen und Richtungen zu Satelliten gleichzeitig gemessen werden können (was bislang jedoch noch nicht angewandt wurde). Seit 1992 wurde die Zusammenarbeit mit dem Bundesamt für Landestopographie (swisstopo) intensiviert werden, das sich seither personell und finanziell an den Laser-Beobachtungen beteiligt. Zusätzlich wurde ein permanenter GPS-Empfänger installiert und die Station im globalen Netz des International GPS Service integriert. Dadurch wurde die Station zum «bestvermessenen» Punkt der Schweiz, der daher als Referenz für die neue satellitengestützte Landesvermessung LV95 sowie für den Differential-GPS-Dienst für Navigations-Anwendungen verwendet wird. Der «Nullpunkt» der alten Sternwarte Bern, an den heute nur noch ein Gedenkstein (Fig. 13) erinnert [27], ging damit über zur Fundamental-Station in Zimmerwald. 1994 richtete die ETH Zürich eine Gravimeterstation im Keller des Observatoriums ein, dessen Erdzeitengravimeter kleinste Schwankungen der Erdanziehungskraft messen kann. Am 27. Juni 1997 wurde ein neues 1m-Teleskop (s. Titelbild) als multi-funktionales Instrument zur Laser- und CCD-Beobachtung eingeweiht [19]. Mit diesem Instrument und neuer Software kann die Station seither vollautomatisch betrieben werden. Im Jah-



Fig. 13: Der Gedenkstein im Gebäude der Exakten Wissenschaften mit dem Koordinaten-Ursprung der Schweiz. Landesvermessung (Archiv swisstopo, Bern-Wabern).

re 2002 gelangen dem Team von GURTNER, der 1999 Titular-Professor und 2002 Präsident des International Laser Ranging Service wurde, als weltweites Novum gleichzeitig in zwei Frequenz-Bereichen operationell zu messen. Die Fundamental-Station in Zimmerwald gilt heute als eine der führenden ihrer Art.

DR. ANDREAS VERDUN
Astronomisches Institut, Universität Bern,
Sidlerstrasse 5, CH-3012 Bern
andreas.verdun@aiub.unibe.ch

SAG - Kolloquium 2003: Astrofotografie

Termin: Samstag / Sonntag, 21./22. Juni 2003

Ort: 15:00 Uhr, Schulungsraum Feriensternwarte Calina in Carona

Referenten: HUGO BLIKSDORF, HUGO JOST, JOSEF SCHIBLI

Programmübersicht

Samstag, 21. Juni 2003, 15:00 - 18:00 Uhr

- Geschichte der Astrofotografie gestern - heute - morgen aus der Sicht der Profis und der Amateure (HUGO JOST).
- Klassische Fotografie mit der Maksutov Kamera (HUGO BLIKSDORF).

Sonntag, 22. Juni 2003, 09:30 - 12:00 Uhr

- Web Kameras versus CCD Kameras (JOSEF SCHIBLI).
- Was CCD-Kameras sonst noch alles können (JOSEF SCHIBLI).
- Bildverarbeitung mit dem PC (HUGO JOST).

Anmeldung:

Hugo Jost-Hediger, Lingeriz 89, 2540 Grenchen, Tel. 032 653 10 08, email: hugojost@bluewin.ch
Anmeldungen bitte bis spätestens 1. Juni 2003

Übernachtung in der Sternwarte Calina:

Anfragen bitte an Frau Susanne Brändli, Casella postale 8, 6914 Carona, Tel. 091 649 51 91

Bibliographie

- [1] BALMER, H.: Rudolf Wolf in Bern. *Vierteljahrsschrift der Naturforsch. Ges. in Zürich*, Jg. 138, Heft 4, Dez. 1993, p. 241 – 256.
- [2] BAUERSIMA, I.: *Über die Festlegung eines Inertialsystems*. Inaugural-Dissertation Universität Bern, 1976.
- [3] BAUERSIMA, I.: *Allgemeine Diskussion über die «Rotation» eines nichtstarrten Erdmodells*. Habilitation Universität Bern, 1980. *Mitteil. d. Satellitenbeobachtungs-Station Zimmerwald*, Nr. 5. Universität Bern, 1980.
- [4] BAUERSIMA, I.: Coupled Quasar, Satellite and Star Positioning (CQSSP). *Mitteil. der Satelliten-Beobachtungsstation Zimmerwald*, Nr. 13. Bern, Universität Bern 1984.
- [5] BEUTLER, G.: Eine numerische Methode zur integralen Auswertung von Satellitenbeobachtungen. Inaugural-Dissertation Universität Bern 1976. Auch erschienen als: *Integrale Auswertung von Satellitenbeobachtungen. Astronomisch-geodätische Arbeiten in der Schweiz*, Bd. 33, Zürich, SGK 1977.
- [6] BEUTLER, G.: Lösung von Parameterbestimmungsproblemen in Himmelsmechanik und Satellitengeodäsie mit modernen Hilfsmitteln. *Astronomisch-geodätische Arbeiten in der Schweiz*, Bd. 34, Zürich, SGK 1982.
- [7] BEUTLER, G.: Das Astronomische Institut der Universität Bern im Jahr 1998. Entwicklung des Instituts 1991 – 1997. Bern, Druckerei der Universität Bern 1998.
- [8] BEUTLER, G.: Bezugssysteme für Himmel und Erde. *Orion* 286 (3/1998), p. 4 – 15.
- [9] BEUTLER, G.: *Methods of Celestial Mechanics*. 2 Vols. Heidelberg / Berlin / New York (in Vorbereitung, Erscheinungsjahr voraussichtl. 2004)
- [10] Festschrift anlässlich des 100jährigen Bestehens der Schweizerischen Geodätischen Kommission 1861 – 1961. (Zürich, Schweiz. Geodätische Kommission 1962).
- [11] FLURY, F.: Die bernische Sternwarte vor 100 Jahren. *Verhandl. der Schweiz. Naturforsch. Ges.*, Jg. 103, Heft 2, 1922, p. 197 – 198.
- [12] FLURY, F.: Beitrag zur Geschichte der Astronomie in Bern. *Mitt. der Naturforsch. Ges. Bern*, 1927/28. Auch als Sonderabdruck: Bern, Verlag Paul Haupt 1929.
- [13] FORSTER, A.: Jahresbericht über die meteorologischen Beobachtungen der Sternwarte zu Bern für das Jahr 1873 und Plan für die Umwandlung der Berner Sternwarte in ein tellurisches Observatorium, der hohen Regierung zu Bern vorgelegt. Bern 1874.
- [14] FORSTER, A.: Physikalisches Institut und tellurisches Observatorium. In: *Die naturwissenschaftlichen und medizinischen Institute der Universität Bern 1896*. Biel, Schüler 1896. p. 5 – 9.
- [15] GORGÉ, V.: Die Entwicklung der exakten Wissenschaften an der Berner Hochschule – Ein Beispiel des Professionalisierungsprozesses. In [28], p. 319 – 351.
- [16] GRAF, J. H.: Professor Dr. Rudolf Wolf 1816 – 1893. Bern, Wyss 1894.
- [17] (GRAF, J. H.): Die Schweizerische Landesvermessung 1832 – 1864 (Geschichte der Du-fourkarte). Bern, Stämpfli 1896.
- [18] GURTNER, W.: Das Geoid in der Schweiz. Inaugural-Dissertation Nr. 6028 ETH Zürich, 1977. *Astronomisch-geodätische Arbeiten in der Schweiz*, Bd. 32, Zürich, SGK 1978.
- [19] GURTNER, W.: ZIMLAT: The New Zimmerwald Laser and Astrographic Telescope. *SLR Newsletter, Subcommittee of the CSTG, NASA/GSFC*. Greenbelt, June 1995. Sowie: ZIMLAT: Das neue Teleskop des Observatoriums Zimmerwald. Beitrag anlässlich der Einweihung des neuen Teleskopes im Observatorium Zimmerwald am 27. Juni 1997.
- [20] LUTSDORF, H. T.: Professor Rudolf Wolf und seine Zeit 1816 – 1893. *Schriftenreihe der ETH-Bibliothek*, Nr. 31. Zürich, ETH-Bibliothek 1993.
- [21] MAUDERLI, S.: Untersuchungen über Stabilität dynamischer Systeme in der Mechanik des Himmels. Inaugural-Diss. Solothurn, Zepfel 1910. 152 S. Auch als Beil. zum Jahresber. der Kt.-Schule Solothurn 1909/10.
- [22] MAUDERLI, S.: Über Komensurabilitäten in unserem Sonnensystem. Habilitationsschrift. Universität Bern 1919.
- [23] MAUDERLI, S.: Das neue Astronomische Institut der Universität Bern. *Verh. der Schweiz. Naturforsch. Ges.*, Jg. 103, Heft 2, 1922, S. 198-199.
- [24] MAUDERLI, S.: Zehn Jahre Astronomisches Institut Bern. *Mitt. der Naturforsch. Ges. in Bern* aus dem Jahre 1933. Bern 1934. Sitzungsber. der Astronomischen Ges. Bern, S. LIV-LV.
- [25] MAUDERLI, S.: Zur Tagung der Internationalen Astronomischen Gesellschaft (Zum Astronomen-Kongress in Bern, 23. – 27. Juli 1935). *Der Bund*, Nr. 337, 23. Juli 1935, p. 5.
- [26] MAUDERLI, S.: Aus der Arbeit am Astronomischen Institut der Universität Bern. *Mitt. der Naturforsch. Ges. in Bern* aus dem Jahre 1936. Auch als Sonderabdruck Bern, Haupt 1937.
- [27] OETTL, H.: Von der alten Sternwarte Bern zum Gedenkstein des Koordinatenursprunges. *Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik*, Vol. 10 (1986), p. 531 – 536.
- [28] SCANDOLA, P. / ROGGER, F. / SCHMIDLIN, S. (Hrsg.): *Hochschulgeschichte Berns 1528 – 1984*. Zur 150-Jahr-Feier der Universität Bern 1984. Bern, Universität Bern / Hallwag Verlag 1984. p. 736 – 738.
- [29] SCANDOLA, P. / FRITSCHY, D. / NÜTZI, G. / ROGGER, F. / STUCKER, H. / TOTI, A. / WITSCHI, B. (Hrsg.): *Die Dozenten der bernischen Hochschule. Ergänzungsband zu: Hochschulgeschichte Berns 1528 – 1984*. Bern, Universität Bern / Hallwag Verlag 1984.
- [30] SCHÜRER, M.: Über die theoretische und praktische Festlegung eines Inertialsystems. *Astron. Nachr.*, Nr. 6317, Vol. 264 (Okt. 1937).
- [31] SCHÜRER, M.: Die Geschichte der Sternwarte Bern. *Schweiz. Hochschulzeitung* (Sonderheft zur Einweihung des Instituts für Exakte Wissenschaften der Universität Bern), 35. Jg., Heft 2, Nr. 2, 1962, p. 93 – 97.
- [32] SCHÜRER, M.: Die neue Zweigsternwarte des Astronomischen Instituts der Universität Bern. *Die Sterne*, Jg. 38, Heft 1 – 2 (1962). p. 20 – 24.
- [33] TRALLER, J. G.: Über die Landes- Vermessung der Schweiz. *Allgem. Geograph. Ephem.*, Bd. 1, 1798. p. 267-280.
- [34] TRECHSEL, F.: Nachricht von der in den Jahren 1821 und 1822 in Bern errichteten Sternwarte. Aus einer am 22. Jul. 1822 in der allgemeinen Versammlung schweizerischer Naturforscher vorgelesenen, in der Bibliothèque universelle, Sept. 1822, und in dem litter. Archiv der Akademie zu Bern, V. Bd. 15 Heft, abgedruckten Abhandlung. Bern, Stämpfli 1823.
- [35] VERDUN, A.: Wechselwirkung zwischen Theorie und Beobachtung – Beispiele aus der Geschichte der klassischen Positions-Astronomie. *Orion* 310 (3/2002), p. 10 – 22.
- [36] VERDUN, A.: Johann Rudolf Koch. *Historisches Lexikon der Schweiz* (im Druck).
- [37] VERDUN, A.: Sigmund Mauderli. *Historisches Lexikon der Schweiz* (im Druck).
- [38] WEILENMANN, A.: Nekrolog auf Prof. Dr. Joh. Rudolf Wolf. *Vierteljahrsschrift der Naturforsch. Ges. in Zürich*, 39. Jg., 1894.
- [39] WILD, H.: Die selbstregistrierenden meteorologischen Instrumente der Sternwarte in Bern. München, Oldenbourg 1866.
- [40] WILD, P.: Ergebnisse der Himmelsüberwachung in Zimmerwald. Inaugural-Dissertation. Bern, 1974.
- [41] WILD, P. / GURTNER, W.: Prof. Max Schürer (1910 – 1997). *Orion* 287 (4/1998), Mitteilungen / Bulletin p. 1 – 2.
- [42] WOLF, R.: Geschichte der Vermessungen in der Schweiz als Historische Einleitung zu den Arbeiten der Schweiz. Geodätischen Commission. Zürich, Höhr 1879.
- [43] ZÖLLY, H.: Geschichte der Geodätischen Grundlagen für Karten und Vermessungen in der Schweiz. (Bern, Eidg. Landestopographie) 1948.

Wir suchen ab sofort eine / einen

ORION-Kassierin / ORION-Kassier

Diese Aufgabe besteht in der Betreuung der ORION-Rechnung und in der Anwerbung von Inserenten sowie der Abrechnung der Inserate für unsere Zeitschrift ORION. Mit dieser verantwortungsvollen Aufgabe wird ein wesentlicher Beitrag zur Überwachung der SAG-Finzen geleistet. Mit dieser ehrenamtlichen Tätigkeit ist eine Mitgliedschaft im ORION-Redaktionsteam sowie eine enge Zusammenarbeit mit dem Zentralvorstand der SAG verbunden.

Wir würden uns freuen, wenn sich unter der ORION-Leserschaft jemand für diese wichtige Aufgabe begeistern könnte.

Nähere Auskünfte erteilen gerne: **Herr N. CRAMER - Tel. 022 755 26 11 / Herr A. VERDUN - Tel. 031 631 85 95.**

Die ORION-Redaktion

Bewegung und Innovation

Skysensor 2000 PC

Die neue **Computersteuerung** für alle SP/SP-DX und GP-E/GP/GP-DX-Montierungen bietet:

- Komplettausstattung mit Motoren MT-2 !
- Schnelle Objektsuche durch Servomotoren mit bis zu 5°/sek Einstellgeschwindigkeit
- Einfache Initialisierung durch Speicherung von irdischen (!) oder stellaren Referenzobjekten
- Objektauswahl: ca. 14.000 Objekte aus Messier-, NGC-, IC-, UGC-, SAO- und GCVS-Katalog sowie Sonne, Mond, Mondkrater, Planeten, Jupitermonde

- Freier Speicher für die Eingabe von bis zu 30 Kometen, 30 künstlichen Satelliten, 60 Himmelsobjekten und 30 irdischen Beobachtungspunkten
- Automatische Satellitennachführung
- Flexible Auswahlkriterien für Beobachtungsobjekte: Höhe, Himmelsregion, Typ, Sternbild, Helligkeit und/ oder Größe
- Menüsteuerung und Anzeige in deutscher Sprache
- Gesichtsfeld-Scanning: Automatische Anzeige aller jeweils im Teleskopgesichtsfeld befindlichen Objekte
- PEC-Funktion
- Anzeige für Epoche 2000.0 in Elevation, Azimut, Helligkeit, Größe, Objektart und Sternbild
- Vielseitige Motorsteuerung: Bewegung unabhängig von parallaktischer oder azimutaler Aufstellung in RA/DE bzw. Azimut /Höhe in 3 Geschwindigkeiten, wobei die mittlere Geschwindigkeit frei zwischen 0,1x und 99x eingestellt werden kann. Freie Einstellung der Beschleunigungsrate bei der höchsten Geschwindigkeit
- Geringer Stromverbrauch (nur ca. 1A). Betrieb über Batteriepack oder optionales 12V-Netzteil
- Autoguider anschließbar
- Variables Anzeigefeld für Koordinaten, Sternzeit, Zonenzeit, Stoppuhr u.a.
- Einstellungen bleiben auch nach dem Ausschalten gespeichert
- Automatische Korrektur der Refraktion
- Elektronischer Getriebeausgleich
- Komplette Teleskopsteuerung über externe Astronomieprogramme wie z.B. Guide oder TheSky möglich (Anschluß an serielle PC-Schnittstelle mit optionalem Kabel erforderlich)
- Ausführliche deutsche Bedienungsanleitung



Technische Änderungen vorbehalten.

Planeten-, Kometen- und Satellitenbahnen

GERHARD BEUTLER

Der Artikel gibt eine Übersicht über Fragestellungen der modernen Himmelsmechanik des Planetensystems und des erdnahen Raumes. Drei Themenkreise werden entwickelt und durch Computer-Simulationen illustriert:

1. Unser Planetensystem ist etwa 4.5 Milliarden Jahre alt, was auf eine bemerkenswerte Stabilität deutet (jedenfalls verglichen mit der Stabilität politischer Systeme auf der Erde). Ob das System als Ganzes tatsächlich stabil ist, kann heute nicht abschliessend beurteilt werden. Numerische Experimente zeigen, dass es im Planetensystem Instabilitäten und chaotisches Verhalten gibt.
2. Das Dreikörperproblem ist nach dem Zweikörperproblem scheinbar die «zweit-leichteste» Aufgabe der Himmelsmechanik – und trotzdem ist sie in geschlossener Form schon dann nicht lösbar, wenn alle Himmelskörper als Punktmassen genähert werden. Hier wird eine Einführung in das Dreikörperproblem Erde-Mond-Sonne gegeben, bei dem Erde und Mond als Körper endlicher Grösse angenommen werden. Die Lösung der Aufgabe erfordert damit nicht nur eine Bahncharakterisierung, sondern auch die Beschreibung der Rotation von Erde und Mond. Kenndaten und moderne Erkenntnisse der Erd- und Mondrotation werden anhand numerischer Experimente erläutert.
3. Die Raumfahrt hat für die Himmelsmechanik, aber auch für die astronomische Positionsbestimmung und Navigation, eine neue Ära eingeläutet. Heute wird nicht mehr mit Sextanten und Chronometern navigiert, sondern mit Satellitensystemen. Etwas überspitzt kann man sagen, dass künstliche Erdsatelliten die Sterne als «Leuchtfener» abgelöst haben. Allerdings muss man dazu die Bahnen dieser künstlichen Erdsatelliten sehr genau bestimmen und voraussagen können. Die wichtigsten Bahn-Charakteristiken künstlicher Erdsatelliten werden anhand von numerischen Simulationen illustriert.

Präambel: Klassische und moderne Hilfsmittel der Himmelsmechanik

Die klassischen Bahnelemente: Es ist ein zentrales Anliegen der Fundamentalastronomie, die Bahnen von Planeten, Kometen, und Satelliten unseres Sonnensystems mit möglichst wenigen Kenngrössen zu beschreiben und zu präzisieren. Es war eine epochale Leistung von JOHANNES KEPLER (1571-1630) zu zeigen, dass jede Planetenbahn mit nur sechs Bahnelementen beschrieben werden kann. Figur 1 illustriert einen von mehreren Sätzen von Bahnelementen, nämlich

- die Halbachse a ,
- die numerische Exzentrizität e ,
- die Neigung i der Bahnebene,
- die ekliptikale Länge Ω des aufsteigenden Knotens,
- der Abstand ω des Perihels vom Knoten sowie
- die Periheldurchgangszeit T_0 .

Die Bewegungsgleichungen des Planetensystems: Es war eine ebenso fundamentale Einsicht von ISAAC NEWTON (1643-1727), dass die Bahnen der Himmelskörper durch differentielle mathematische Beziehungen beschrieben werden können und dass die Massenanziehung zwischen zwei beliebigen Massenelementen dem Gesetz der universalen Gravitation genügt.

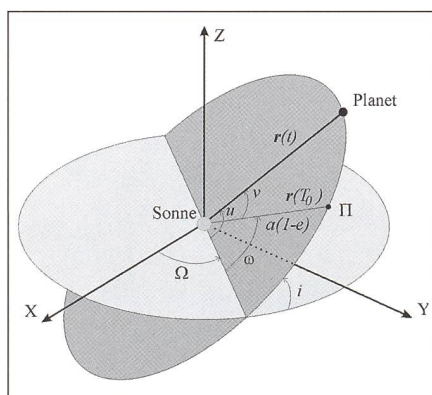


Fig. 1: Keplersche Bahnelemente.

Das zweite Newtonsche Axiom besagt, dass die *Änderung der Bewegung* (in heutiger Sprechweise die erste Ableitung des Impulses nach der Zeit) der *vektoriellen Summe der wirkenden Kräfte* gleichzusetzen ist. Dieses zweite Gesetz kann interpretiert werden als Bewegungsgleichung – nicht algebraisch, sondern in Worten ausgedrückt.

Das Newtonsche Gesetz der universalen Gravitation besagt bekanntlich, dass die Anziehungskraft zwischen zwei Körpern längs ihrer Verbindungslinie wirkt, den beiden Massen direkt, und dem Quadrat ihres Abstandes indirekt proportional ist.

Beim klassischen planetaren N-Körperproblem werden nur Punktmassen betrachtet. In einem Inertialsystem (z.B. im Schwerpunktssystem des Sonnensystems) wird unser (jedes) Planetensystem mathematisch durch ein gewöhnliches Differentialgleichungssystem zweiter Ordnung in der Zeit t beschreiben:

$$\ddot{\mathbf{r}}_i = -k^2 \sum_{j=1, j \neq i}^N m_j \cdot \frac{\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j}{|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|^3} := \mathbf{f}_i, \quad i=1,2,\dots,N \quad (1)$$

Dabei ist das Quadrat der sog. Gauss'schen Konstanten $k=0.01720209895$

gleich der Gravitationskonstanten, wobei man als Zeiteinheit den Tag, als Masseneinheit die Sonnenmasse und als Längeneinheit (im Wesentlichen) die astronomische Einheit verwendet.

Eine partikuläre Lösung des Systems ist definiert, wenn die Orts- und Geschwindigkeitsvektoren sämtlicher beteiligter Himmelskörper zu einem Zeitpunkt t_0 vorgegeben sind. Die Bewegungsgleichungen wurden erstmals von LEONHARD EULER (1707-1783) in der noch heute verwendeten Form (allerdings in Komponentenschreibweise) niedergeschrieben.

Ist die Zahl der Himmelskörper $N=2$, bewegen sich die beiden Punktmassen auf Kegelschnitt-Bahnen um den gemeinsamen Schwerpunkt und umeinander (d.h., dass sowohl $\mathbf{r}_1(t)$, $\mathbf{r}_2(t)$ als auch $\mathbf{r}(t) := \mathbf{r}_2(t) - \mathbf{r}_1(t)$ Kegelschnitte darstellen). Aus jedem Satz von Orts- und Geschwindigkeitsvektoren $\mathbf{r}(t)$ und $\mathbf{v}(t)$ können dann die Keplerschen Bahnelemente mit Formeln, die im Wesentlichen schon auf KEPLER zurückgehen, berechnet werden.

Numerische Integration als universelle Lösungsmethode: Ist die Zahl der Himmelskörper $N>2$, resultieren (möglicherweise) sehr komplizierte Bahnen. Jedenfalls gelingt die Lösung des Systems (1) im Allgemeinen nicht mehr in geschlossener Form. Bei gegebenen Anfangsbedingungen kann dieses aber mit den Methoden der numerischen Integration «mit beliebiger Genauigkeit» gelöst werden.

Die «Urversion aller Methoden zur numerischen Integration» ist die Eulersche Methode, welche ein Integrationsintervall $[t_0, t_n]$ durch die Teilpunkte t_k in Teilintervalle (z. B. gleicher Länge) unterteilt und innerhalb eines Teilintervalls $[t_k, t_{k+1}]$ die Lösung durch das folgende Polynom zweiten Grades (entsprechend einer Taylorreihe der Ordnung 2) approximiert:

$$\begin{aligned} \mathbf{r}_i(t) &= \mathbf{r}_i(t_k) + (t - t_k) \cdot \mathbf{v}_i(t_k) \\ &+ \frac{1}{2} \cdot (t - t_k)^2 \cdot \mathbf{f}_i(t_k), \text{ für } t \in [t_k, t_{k+1}] \end{aligned} \quad (2)$$

EULER verwendete die Formel (2) insbesondere, um an der Stelle t_{k+1} neue Anfangsbedingungen, d.h., die Vektoren $\mathbf{r}_i(t_{k+1})$ und $\mathbf{v}_i(t_{k+1})$ zu bestimmen. Den Geschwindigkeitsvektor erhält man natürlich durch Ableiten der Formel (1) nach der Zeit:

$$\mathbf{v}_i(t) = \mathbf{v}_i(t_k) + (t - t_k) \cdot \mathbf{f}_i(t_k) \quad (3)$$

Damit aber ist die universale Eulersche Lösungsmethode gegeben: Beginnend mit den Anfangsbedingungen kann man mit Hilfe der Differentialgleichungen (1) die Lösung stückweise durch ein Polynom zweiten Grades darstellen. Die Eulersche Lösungsmethode hat zwei bemerkenswerte Eigenschaften:

- Entgegen einer weitverbreiteten Meinung liefert die Eulersche Methode eine approximierende Funktion als Lösung: die Formeln (2) und (3) erlauben es, Funktionswerte und deren Ableitungen an jeder beliebigen Stelle (und nicht nur an den Zeitpunkten t_k) zu berechnen.
- Durch eine feinere Unterteilung erzielt man eine genauere Lösung.

Moderne Integrationsmethoden, die diesen Namen verdienen, teilen diese Eigenschaften mit der Eulerschen Methode. Sie unterscheiden sich lediglich darin von der Eulerschen Methode, dass die Lösungen lokal durch Polynome (Taylorreihen) höheren als zweiten Grades (Ordnung) approximiert werden (typischerweise werden Polynome vom Grad $q=10-14$ verwendet). Der Polynomgrad wird vom Benutzer festgelegt. Die Polynomkoeffizienten werden durch die Forderung festgelegt, dass die approximierende Funktion das Differentialgleichungssystem (1) lokal nicht nur (wie bei der Eulerschen Methode) an einer, sondern an mehreren Stellen erfüllt. Moderne Methoden sind um viele Grössenordnungen effizienter als die Eulersche Methode. Die bekannten Vielschrittverfahren und die sogenannten Kollokationsverfahren sind Vertreter dieser Klasse von Integrationsverfahren. Für Einzelheiten verweisen wir auf [1].

Oskulierende und mittlere Bahnelemente: Die numerisch integrierten Lösungen des Differentialgleichungssystems (1) sind approximierende Funktionen, die es uns erlauben, die Orts- und/oder Geschwindigkeitsvektoren (sowie bei Bedarf höherer Ableitungen) sämtlicher beteiligter Himmelskörper zu beliebigen Zeitpunkten innerhalb des durch die Integration überdeckten Intervalls zu berechnen.

Selbstverständlich ist es auch möglich, Funktionen dieser Vektoren zu berechnen. Instruktiv ist es insbesondere, eine Tabelle sogenannter *oskulierender Bahnelemente zu bestimmten Zeitpunkten* $t_k, k=1,2,\dots$ zu berechnen. Oskulierende Bahnelemente zur Zeit t erhält man, indem man mit den Formeln des Zweikörperproblems die Orts- und Geschwindigkeitsvektoren umrechnet in die Bahnelemente:

$$\mathbf{r}(t); \mathbf{v}(t) \rightarrow a(t), e(t), i(t), \Omega(t), \omega(t), T_0(t) \quad (4)$$

Die oskulierenden Bahnelemente sind einfach zu interpretieren: Der betrachtete Himmelskörper würde sich auf der durch die auf der rechten Seite von (4) stehenden Bahnelemente definierten Kepler-Bahn bewegen, wenn vom Zeitpunkt t an die gravitative Wirkung sämtlicher Himmelskörper (mit Ausnahme von zweien) ausgeschaltet würde.

Hat man eine Tabelle von oskulierenden Bahnelementen erstellt, kann man die zeitliche Entwicklung der Bahnen studieren. Die tatsächliche Bahn ist die Envelope der durch die Elemente (4) gegebenen Zweikörperbahnen. Dies ist sehr viel instruktiver und einleuchtender, als direkt die Orts- und Geschwindigkeitsvektoren zu analysieren – es käme keinem Himmelsmechaniker in den Sinn, direkt die Zustandsvektoren zu interpretieren.

Die oskulierenden Bahnelemente zeigen periodische Störungen verschiedenster Perioden. Die kürzesten sind gegeben durch die (ungestörten) Umlaufzeiten der Himmelskörper selber. Will man die Entwicklung eines Systems über sehr lange Zeit studieren (über Tausende von Umläufen), ist man im allgemeinen gut beraten, *mittlere Bahnelemente* als Mittelwerte der oskulierenden Elemente über längere Zeitintervalle zu bilden. Man erhält dann ein sehr viel besseres Bild der Entwicklung einer Bahn über lange Zeiträume. Als Mittelungsperioden verwendet man mit Vorteil die Umlaufzeiten der betrachteten Himmelskörper oder ganzzahlige Vielfache davon.

Das Programmsystem *Celestial Mechanics*: In diesem Artikel möchten wir einige wichtige Aspekte der Himmelsmechanik mit Hilfe numerischer Experimente behandeln, resp. illustrieren. Dazu verwenden wir das vom Autor entwickelte Programmsystem *Celestial Mechanics*, das dem Buch [1] beigegeben ist. Das Programmsystem umfasst acht Programme, zwei Testprogramme für numerische Integration, ein Programm zur Fourieranalyse, eines für Bahnbestimmung (für Erdsatelliten und

Kleinplaneten, Kometen, etc.), eines zur kinematischen Bestimmung der Bahn eines Satelliten mit Hilfe von GPS-Messungen (GPS=Global Positioning System), das Programm PLASYS zur Integration des Planetensystems, das Programm ERDROT zur Beschreibung der Rotation von Erde und Mond, sowie das Programm SATORB, mit welchem unter anderem Bahnen künstlicher Erdsatelliten simuliert werden können. Mit den drei letztgenannten Programmen wurden die meisten Figuren in diesem Artikel erzeugt.

Das Programmsystem ist konzipiert für Personal Computer (PC) mit Windows-Betriebssystemen. Um das Programmsystem effizient einzusetzen, ist ein leistungsfähiger PC mit einer Taktfrequenz von 500 MHz (oder mehr) und einer Speicherkapazität in der Grössenordnung einiger Gbytes sinnvoll.

Numerische Experimente im Planetensystem

Das Programm PLASYS: Sämtliche Simulationen in diesem Abschnitt wurden mit dem Programm PLASYS (siehe [1]) durchgeführt, das es erlaubt, unser Planetensystem zu konfigurieren (eine beliebige Auswahl der neun grossen Planeten sowie ein Kleinplanet mit wählbaren Bahnelementen können eingeschlossen werden) und, ausgehend von der Gegenwart (auch der genaue Ausgangszeitpunkt kann gewählt werden), vorwärts oder rückwärts über «beliebige Zeitintervalle» zu integrieren.

PLASYS erzeugt eine Datei mit Planetenpositionen sowie eine Datei mit Integrationskonstanten (zu Kontrollzwecken), die entweder mit dem mitgelieferten Grafik-System oder mit irgendeinem Graphik-Programm dargestellt werden können. Durch Darstellung der Planetenpositionen erhält man einen Eindruck vom Verlauf der Planeten- und Planetoidenbahnen. Figur 2 zeigt die Positionen der Planeten Jupiter (innerster Ring), Saturn (zweiter Ring von innen), Uranus (dritter Ring), Neptun (vierter Ring), sowie Pluto (äusserster «Ring») bei einer Integration des äusseren Planetensystems über die nächste Million Jahre. Die Integration erfolgte mit einem Vielschrittverfahren der Ordnung $q=14$ für Differentialgleichungen zweiter Ordnung. Die Schrittweite betrug 30 Tage.

Für jeden Himmelskörper werden zusätzlich entweder die sechs oskulierenden oder die sechs mittleren Bahnelemente als Funktion der Zeit in je eine Datei abgespeichert. Werden mittlere Elemente gespeichert, muss die Mittelungsperiode (in Einheiten der unge-

störten Umlaufzeiten) angegeben werden. Die gespeicherten Elemente können dann mit einem eigens entwickelten oder einem beliebigen anderen Graphik-Programm dargestellt werden. Sämtliche Darstellungen in diesem Artikel sind mit dem sogenannten «gnu-plot» System erzeugt worden.

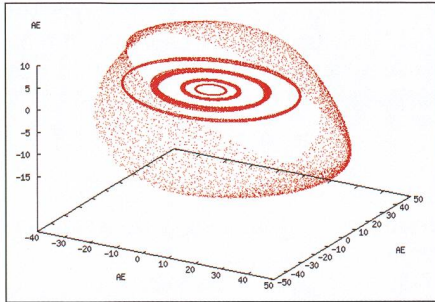


Fig. 2: Das äussere Planetensystem über eine Million Jahre.

«Sinnvolle» numerische Experimente: Das Programm PLASYS erlaubt es, eine ganze Palette von numerischen Experimenten zum Thema Entwicklung des Planetensystems anzustellen. Wir erwähnen nur deren drei, die im folgenden kurz gestreift werden sollen:

- Entwicklung des äusseren Planetensystems über einige Millionen Jahre.
- Entwicklung des inneren Planetensystems über einige 100000 Jahre.
- Entwicklung spezieller Planetoidenbahnen

Das Attribut «sinnvoll» ist vielleicht etwas provokativ. Man kann natürlich aus jeder Simulation etwas lernen. Man sollte aber vor der Simulation präzise Fragen stellen und diese dann mit gezielten numerischen Experimenten beantworten. Hier wollen wir zeigen, dass die mechanische Entwicklung des äusseren Systems im Wesentlichen durch die Planeten Jupiter und Saturn geprägt ist. Zudem werden wir die Frage nach der Stabilität des Planetensystems kurz anschneiden. Das innere Planetensystem ist geprägt durch das Wechselspiel zwischen den Planeten Venus und Erde. Wir gehen auf einige Klima-relevante Aspekte bei der Erde ein. Mit unserer Analyse von Kleinplanetenbahnen wollen wir illustrieren, wie man sich heute den Transfer von Materie vom äusseren ins innere Planetensystem vorstellt. Diese neuen Vorstellungen sind in den 1980er Jahren wesentlich von numerischen Experimenten geprägt worden.

Die Entwicklung des äusseren Planetensystems: Figur 2 deutet an, weshalb sich die IAU (Internationale Astronomische Union) schwer tut, den Planeten

Pluto als Hauptplaneten zu akzeptieren. Seine Neigung gegenüber der (momentanen) Ekliptikebene ist mit etwa 17° deutlich grösser als die der übrigen Planeten (die nächst kleinere Neigung ist die von Merkur mit 7°). Zudem ist Pluto's Exzentrizität mit $e=0.25$ so gross, dass ein Teil seiner Bahn innerhalb der fast kreisförmigen Bahn von Neptun verläuft. Dass sich Pluto bisher trotzdem in seiner Bahn gehalten konnte, hängt damit zusammen, dass seine Umlaufzeit sich zu derjenigen von Neptun wie 3:2 verhält. Damit finden die nahen Begegnungen (von der Sonne aus gesehen die Konjunktionen) der beiden Planeten genähert immer im gleichen Gebiet statt. Pluto hat es so eingerichtet, dass die Konjunktionen immer in der Nähe seines Aphels stattfinden. Sämtliche numerischen Experimente (ähnlicher Art wie unseres) deuten darauf hin, dass sich Pluto auf einer stabilen Bahn befindet. Mit einer Integration über eine Million Jahre kann natürlich abschliessend nur festgestellt werden, ob sich ein Planet während dieses Zeitintervalls in einer stabilen Bahn befand. Anhand der erzielten Resultate lassen sich über ein zehn mal längeres Zeitintervall allenfalls Prognosen (wie beim Wetter) abgeben. Damit ist aber auch angedeutet, warum man versucht, das Planetensystem über immer längere Zeitintervalle zu integrieren. Heute darf man mit einiger Sicherheit behaupten, dass unser System mindestens über Zeiträume von etwa einer Milliarde Jahre keine offensichtliche Instabilität zeigt.

Weitaus der grösste Teil der Masse, der Energie und des Drehimpulses des Planetensystems ist im Dreikörperproblem *Sonne Jupiter* (mit einer Tausendstel Sonnenmasse) *Saturn* (mit einer Dreitausendstel Sonnenmasse) enthalten. Man darf also davon ausgehen, dass die mechanische Entwicklung des Planetensystems durch dieses Dreikörperproblem geprägt ist. Experimente der hier vorgestellten Art bestätigen dies eindrücklich. So zeigt beispielsweise Figur 3 (ein Ausschnitt, der die Entwicklung der mittleren Halbachsen über die nächsten zehntausend Jahre zeigt), dass die Bahnhalbachsen von Jupiter und Saturn fast zu 100% antikorreliert sind (wenn die Halbachse von Jupiter maximal ist, ist diejenige von Saturn minimal und umgekehrt). Die Periode der Änderungen beträgt im Mittel etwa 940 Jahre. Da die Halbachse einer Planetenbahn die mittlere Bewegung festlegt, werden durch diese Störungen in der Halbachse sehr grosse Störungen in der ekliptikalen Länge der Planeten induziert. Der Effekt ist unter der Bezeichnung *grosse Ungleichheit* in der Himmelsmechanik wohlbekannt. Er wurde von PIERRE SIMON DE LAPLACE

(1749-1827) als langperiodische Störung, verursacht durch die 5:2-Kommensurabilität der Umlaufzeiten von Jupiter und Saturn, erklärt. Es ist übrigens bis heute nicht geklärt, ob diese Kommensurabilität zufälliger Natur ist, oder ob es dafür einen Grund gibt. Figur 3 illustriert aber auch sehr schön den Energieerhaltungssatz: In guter Näherung kann die Gesamtenergie des Planetensystems berechnet werden als Summe der Zweikörperenergien der Planeten. Diese Zweikörperenergie ist aber ihrerseits indirekt proportional der Halbachse a . Vernachlässigt man die Massen aller übrigen Planeten (ausser denjenigen von Jupiter und Saturn), ist die Gesamtenergie E des Systems zu nähern durch

$$E = -\frac{m_j}{2a_j} - \frac{m_s}{2a_s}$$

Durch die Forderung $E=const.$ ergibt sich

$$\delta a_s = -\frac{m_j}{m_s} \cdot \frac{a_s^2}{a_j^2} \cdot \delta a_j = -11.2 \cdot \delta a_j$$

Diese Beziehung wird durch Figur 3 sehr schön bestätigt. Die Amplitudenvariationen in Figur 3 sind übrigens nicht etwa Integrationsfehlern zuzuschreiben. Diese sind durch die Störungen der übrigen Planeten verursacht. Mit ähnlichen Näherungen gelingt es, die Störungen in der Exzentrizität zu erklären durch die Erhaltung des Betrages des Drehimpulses. Auch die Störungen in den Exzentrizitäten von Jupiter und Saturn sind antikorreliert. Man kann mit demselben Experiment «beweisen», dass die Bahnebenen von Jupiter und Saturn um ein und dieselbe Achse mit der gleichen Winkelgeschwindigkeit präzedieren (rotieren). Der Beobachter erhält also den Eindruck, dass die Bahnebenen von Jupiter und Saturn (fast) als starres Gebilde um ein und dieselbe Achse (die Achse des totalen Drehimpulses) rotieren – auch diese Eigenschaft eine Folge eines Erhaltungssatzes (für den Drehimpuls). Die numerischen Experimente zeigen, dass das äussere Planetensystem, wie eingangs erwähnt, tatsächlich durch das Dreikörperproblem *Sonne-Jupiter-Saturn* geprägt ist. Für weitere Informationen sei auf [1] verwiesen.

Entwicklung des inneren Planetensystems: Das innere Planetensystem mit den erdähnlichen Planeten besteht aus Merkur, Venus, Erde und Mars. Von der Masse, der Energie und vom Drehimpuls her ist das Paar Venus – Erde ebenso dominant wie das Paar Jupiter – Saturn im äusseren System. Während die Eigenschaften des äusseren Systems sehr gut ohne das innere System studiert werden können, gilt sinngemäss dasselbe *nicht* für das innere System.

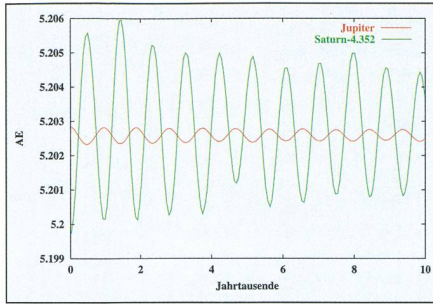
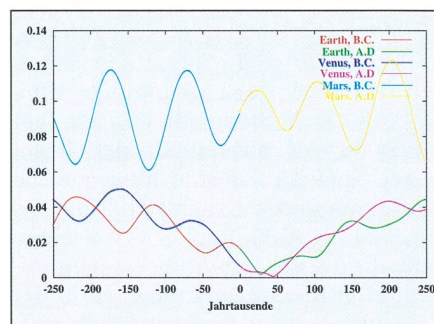


Fig. 3: Halbachsen von Jupiter (rot) und Saturn (grün) während der nächsten zehntausend Jahre.

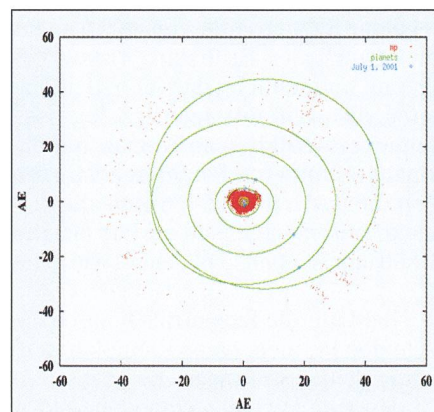
Würden wir das innere System ohne das äussere integrieren, könnten wir wesentliche Eigenschaften nicht verstehen. Die Integration des inneren Systems ist aufwendiger, da wir die Schrittweite der Integration dem schnellsten Planeten anpassen müssen. Selbst wenn wir den «Winzling» Merkur bei der Integration weglassen, müssen wir die Schrittweite der Integration auf fünf Tage reduzieren. Um zu sinnvollen Aussagen zu kommen, wurden bei der Integration sämtliche Planeten von Venus bis Neptun eingeschlossen. Wir beschränken uns hier auf die Diskussion eines Resultates, nämlich der Entwicklung der Bahn-Exzentrizitäten von Venus, Erde und Mars über die letzten und die nächsten 250 000 Jahre. Das Ergebnis findet man in Figur 4. Zunächst sieht man, dass die Halbachse von Mars wesentlich stärker durch die äusseren Planeten (insbesondere durch Jupiter) gestört wird als die Exzentrizitäten von Venus und Erde. Ähnlich wie beim Paar Jupiter-Saturn sieht man eine deutliche Antikorrelation der Exzentrizitäten, was zu interpretieren ist als Austausch von Drehimpuls zwischen den beiden inneren Planeten. Dem überlagert ist eine langperiodische Änderung, die den Exzentrizitäten beider Planeten gemein ist. Diese ist (wie man durch ein kleines Experiment sehr leicht nachweisen kann) durch die Störungen des äusseren Planetensystems verursacht. Man beachte, dass die momentane Exzentrizität der Erdbahn etwa $e=0.016$ beträgt und dass diese während der nächsten etwa 30 000 Jahren fast bis auf $e=0$ abnehmen wird. Vor etwas mehr als 200 000 Jahren hingegen betrug die Exzentrizität der Erdbahn mehr als $e=0.04$! Solche Unterschiede können klimatisch durchaus von Bedeutung sein: Während bei einer fast kreisförmigen Bahn praktisch keine Winter-Sommer Asymmetrien auf den beiden Hemisphären auftreten können, sind bei grösseren Exzentrizitäten deutliche Unterschiede (je nach Lage des Perihels der Erdbahn) zu erwarten: Zum einen ist bei grösserer

Exzentrizität die von der Sonne erhaltene Strahlung im Perihel deutlich grösser als im Aphel (der relative Unterschied beträgt $4e$), zum anderen werden die sonnen-näheren Teile der Bahn schneller durchlaufen als die sonnen-ferneren. MILUTIN MILANKOVITCH (1879-1958) hat mit mässigem Erfolg versucht, die klimatischen Veränderungen auf der Erde himelsmechanisch zu deuten. Figur 4 weist darauf hin, dass gewisse langperiodische Änderungen der Bahnelemente durchaus bedeutend sein können.

Fig. 4: Die Exzentrizitäten von Venus, Erde und Mars während der letzten und nächsten 250 000 Jahre.



Die Bahnen von Kleinplaneten: In der Neujahrsnacht des Jahres 1801 entdeckte GIUSEPPE PIAZZI (1746-1826) den ersten Kleinplaneten zwischen Mars und Jupiter. Der deutsche Mathematiker CARL FRIEDRICH GAUSS (1777-1855) begründete zum mindesten einen Teil seines Ruhmes auf der erfolgreichen Bestimmung der Bahn von Ceres aus einer kurzen Reihe von Beobachtungen. Heute sind weit über 100 000 Kleinplaneten mit Umlaufzeiten zwischen denen von Mars und Jupiter gesichert. Zudem kennt man heute schon einige hundert Objekte im Kuiper-Gürtel im äusseren Planetensystem. Figur 5 gibt die Positionen sämtlicher gesicherter Kleinplaneten am 1. Juli 2001 sowie der Planetenpositionen wieder. Sehr deutlich ist der



Ring zwischen Mars und Jupiter zu sehen. Ebenso sieht man je eine Wolke von Kleinplaneten etwa 60° von Jupiter entfernt auf der Jupiterumlaufbahn. Es ist dies die Gruppe der Trojaner und der Griechen. Die Kleinplaneten haben sich um eine stabile Lösung des Dreikörperproblems herum «ansiedeln» können.

Figur 6 gibt einen besseren Eindruck von der Verteilung der Kleinplaneten zwischen Mars und Jupiter. Sie stellt die Anzahl der Kleinplaneten mit grossen Halbachsen in Intervallen der Breite von $\Delta a=0.002$ AE dar. Diese Zahlen werden als Funktion der (aus der Halbachse berechneten) Umlaufzeit, in Einheiten der Umlaufzeit von Jupiter, dargestellt. Deutlich sieht man im Gürtel Häufungen, aber auch Lücken. Das Bild widerspricht intuitiven Erwartung: Ein unvoreingenommener, nicht einschlägig vorgebelasteter Wissenschaftler würde wohl eine Art Gaussverteilung mit einem Maximum irgendwo zwischen Mars und Jupiter erwarten. Ganz abwegig ist die Vorstellung nicht: Immerhin entspricht die Envelope des Histogramms grob diesen Vorstellungen. Man merkt natürlich sofort, dass (zum mindesten einige der) Häufungen und Lücken nicht zufällig verteilt sind, sondern dass sie an Stellen auftreten, wo das Verhältnis der Umlaufzeiten von Jupiter und Kleinplanet durch einen Quotienten kleiner ganzer Zahlen ausgedrückt werden kann. Man sagt in diesem Falle auch, dass die Umlaufzeiten kommensurabel sind. Deutlich sehen wir die Gruppe der Trojaner, deren Umlaufzeit mit der von Jupiter übereinstimmt (bei der Abszisse = 1) sowie die Hilda-Gruppe, deren Umlaufzeit $2/3$ derjenigen von Jupiter beträgt.

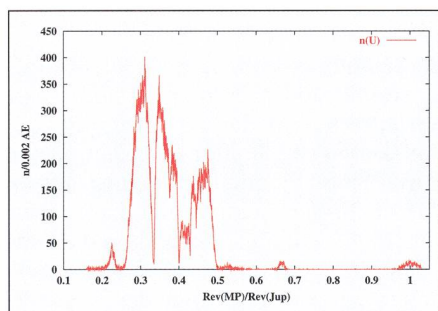
Die heutige Verteilung der Kleinplaneten hat sich aus einer ursprünglich ganz anderen (die wohl eher den oben geäusserten Vorstellungen entsprach) entwickelt. Damit stellt sich naturgemäss die Frage, wie sich die Gruppen und Lücken entwickelt haben. Relativ einfach kann man die Gruppen erklären: Die Kleinplaneten der Trojaner und der Hilda-Gruppe haben «Nischen» stabiler Lösungen des Dreikörperproblems Sonne-Jupiter-Kleinplanet (einer Koexistenz mit Jupiter) ausgebildet, die über Jahrmilliarden nicht aufgelöst werden. Man darf übrigens ja nicht meinen, dass jeder Kleinplanet mit einer Umlaufzeit von $2/3 U_J$ sich in einer stabilen Bahn befinden würde: Weitaus die meisten Kleinplaneten mit einer solchen Umlaufzeit stürzen entweder auf Jupiter ab oder sie werden durch ihn in ganz an-

Fig. 5: Positionen der Planeten und Planetoiden am 1. Juli 2001.

dere Bahnen geschleudert. Man könnte übrigens hier durch gezielte Experimente (Monte-Carlo-artige Simulationen) Aufschluss über die ursprüngliche Verteilung erhalten.

Nachdem wir die Existenz der Gruppen sozusagen «rein gravitativ» erklärt haben, stellt sich die Frage, wie die Lücken zu erklären sind. Die Frage ist natürlich nicht neu. Sie wurde erstmals vom amerikanischen Astronomen DANIEL KIRKWOOD (1814-1895) gestellt, der gegen Ende des 19ten Jahrhunderts aus der damals bekannten Population von etwa 100 Kleinplaneten glaubte, Lücken in der Verteilung von Kleinplaneten bei Kommensurabilitäten zu sehen – eine überaus spekulative Aussage (man dividiere die Zahlen in Figur 6 durch 1000 und überzeuge sich davon, dass man kaum mehr von einer «reichen» statistischen Basis sprechen kann!).

Fig. 6: Anzahl der Kleinplaneten pro 0.002 AE in der Halbachse, als Funktion der Umlaufzeit in Einheiten der Jupiter-Umlaufzeit.



Man ist intuitiv geneigt, die Lücken durch resonante Störungen zu erklären. Bewegt sich nämlich ein Kleinplanet in der prominenten 3:1-Lücke, erfährt er nach jeweils drei siderischen Umläufen wieder praktisch dieselben Störungen durch Jupiter. Eine Aufschaukelung der Störungen scheint durchaus plausibel. Ein Nachweis war – vor der Computer-Ära – aber extrem schwierig, ganz einfach weil analytische Methoden über mehr als einige hundert Umläufe schlicht nicht mehr zuverlässig sind. Aus patriotischen Gründen sei ein statistischer Erklärungsversuch von Prof. MAX SCHÜRER erwähnt: Er wollte die Lücken als ein statistisches Artefakt «wegdiskutiert» haben: Setzt man einen Kleinplaneten in einer Lücke aus, wird er vergleichsweise starke periodische Störungen (auch) in der Halbachse erleiden und so (genau wie ein Pendel im tiefsten Punkt) sich nur während vergleichsweise kurzer Zeit in der Lücke (entsprechend dem tiefsten Pendelpunkt) aufhalten. Diese statistische Hypothese wurde von FRANCOIS SCHWEIZER

in seiner Diplomarbeit [2] mit damals (in den 1960er Jahren) sehr aufwendigen numerischen Experimenten widerlegt.

Das Rätsel konnte, jedenfalls für die 3:1-Resonanz, erst gelöst werden durch die Arbeiten von JACK WISDOM [3], der eine grosse Zahl von Simulationen über Zeiträume von Hunderttausenden von Jahren mit den damals schnellsten Rechnern durchführen konnte. Interessanterweise lag der Schlüssel zur Erklärung der Lücken *nicht* in den Störungen der Halbachsen selbst verborgen, sondern in den Störungen der Bahnexzentrizitäten. Zwar beobachtet man durchaus resonante Störungen in den Halbachsen in der Nähe der 3:1-Resonanz. Diese sind aber immer noch deutlich zu klein, um die Lücken in Figur 6 statistisch zu erklären (die Amplituden betragen in tiefster Resonanz einige Hundertstel AE an Stelle von einigen Tausendstel AE ausserhalb der Resonanz). Spektakulär sind hingegen die Störungen in der Exzentrizität e . Dies wird durch Abbildung 7 veranschaulicht, die die Exzentrizitäten von fünf simulierten Kleinplanetenbahnen in der Nähe der 3:1-Resonanz darstellt (mit Umlaufzeiten von 0.32633, 0.32833, 0.33033, 0.33133, 0.33233 Jupiterumläufen). Zum Ausgangszeitpunkt war die Exzentrizität in allen Fällen auf $e=0.1$ gesetzt. Man beachte, dass in den beiden Beispielen mit der tiefsten Resonanz (0.33133, 0.33233) Exkursionen in der Exzentrizität bis $e=0.3$ an der Tagesordnung sind und dass Exzentrizitäten bis zu $e=0.6-0.7$ durchaus über längere Zeitintervalle vorkommen können! Erklären diese grossen Störungen in den Exzentrizitäten die Lücke in Figur 6 bei der 3:1-Kommensurabilität? Nach WISDOM kann die Frage wie folgt bejaht werden: Ein Kleinplanet in der 3:1-Kommensurabilität hat eine Halbachse von $a=2.5$ AE. Das Perihel liegt in einer heliozentrischen Distanz von $r_p=a(1-e)$. Bei einer Exzentrizität von $e=0.4$ liegt das Perihel eines Kleinplaneten bei einer heliozentrischen Distanz von $r_p=1.5$, also im Bereich der Marsbahn, bei einer Exzentrizität von $e=0.6$ sogar im Bereich der Erdbahn! WISDOM behauptet nun schlicht, dass alle Kleinplaneten, die während längerer Zeit grosse Bahnexzentrizitäten aufweisen, auf die genannten inneren Planeten abstürzen resp. abgestürzt sind – womit die 3:1-Lücke rein mechanisch erklärt ist. Die Erklärung ist ebenso plausibel wie genial!

Nicht nur die Exzentrizität, auch die Lage des Perihels einer Kleinplanetenbahn erleidet Störungen. Es ist instruktiv, den zum Perihel weisenden Vektor

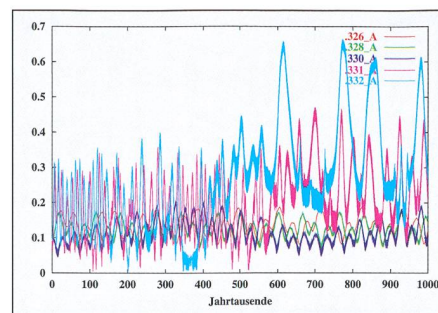


Fig. 7: Exzentrizitäten von fünf Kleinplaneten in 3:1-Resonanz mit Jupiter über eine Million Jahre.

mit der Länge e (auch Laplacescher Vektor genannt) im Inertialsystem als Funktion der Zeit aufzutragen. Die Figuren 8, 9 und 10 zeigen die Wanderung dieses Vektors für drei der Fälle von Figur 7. Figur 8 zeigt (schon fast) die normale Präzession des Laplaceschen Vektors eines «normalen» Kleinplaneten. Die Figuren 9 und 10 zeigen die chaotische Bewegung dieses Vektors im Falle tiefer Resonanz. Das Perihel scheint in beiden Fällen zu torkeln. Ähnliche Bilder erhält man beim Aufzeichnen des Bahnnormalenvektors. Störungen in der Neigung von mehr als zehn Grad sind durchaus keine Seltenheit. Aus Platzgründen wird auf diese Darstellungen verzichtet. Die Leserschaft sei auf die vertiefte Behandlung in [1] verwiesen.

Erd- und Mondrotation

Die Bewegungsgleichungen (1) charakterisieren ein N-Körperproblem, bei dem sämtliche beteiligten Himmelskörper als punktförmig angenommen werden. Bei vielen Problemstellungen der Himmelsmechanik genügt diese Näherung, bei anderen aber nicht. Das Dreikörperproblem Sonne-Erde-Mond, wie es in Figur 11 dargestellt ist, verlangt, dass Erde und Mond als ausgedehnte Himmelskörper behandelt werden. Wie passt man die Bewegungsgleichungen den verallgemeinerten Bedingungen an? Die Antwort, zuerst von EULER gegeben, lautet: *im Prinzip* ist keine Anpassung nötig, man hat aber Gleichungen vom Typ (1) für jedes Massenelement eines jeden Himmelskörpers aufzustellen. Durch geeignete Kombination aller Gleichungen vom Typ (1) pro Himmelskörper erhält man anschliessend

- je einen Satz von Differentialgleichungen für die Bewegung der Schwerpunkte der drei Himmelskörper sowie
- je einen Satz von Differentialgleichungen für die zeitliche Entwicklung der Drehimpulse der drei Himmelskörper (Drehimpulse bezogen auf die jeweiligen Schwerpunkte).

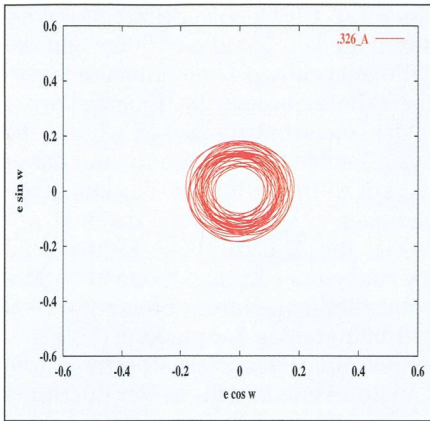


Fig. 8: Der Laplace-Vektor eines Klein-
planeten in seichter 3:1-Resonanz mit Jupiter.

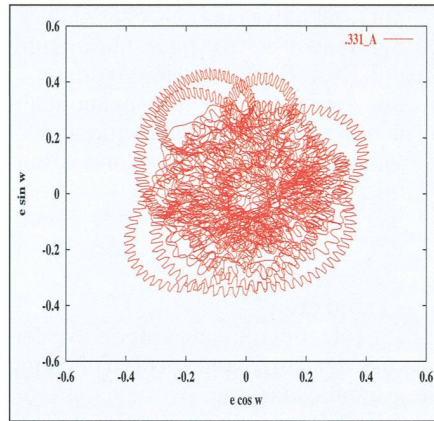


Fig. 9: Der Laplace-Vektor eines Klein-
planeten in tiefer 3:1-Resonanz mit Jupiter.

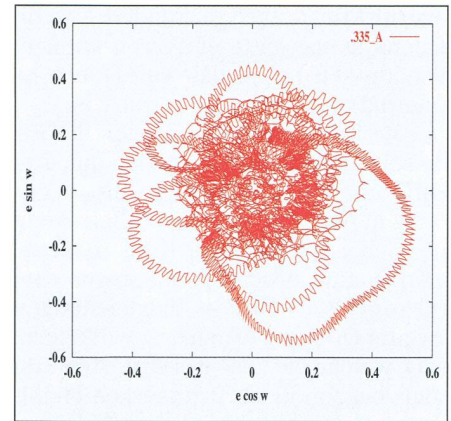


Fig. 10: Der Laplace-Vektor eines Klein-
planeten in tiefer 3:1-Resonanz mit Jupiter.

Figur 11 dient nicht nur als Hilfsmittel zur Herleitung der verallgemeinerten Bewegungsgleichungen des Systems, sie zeigt auch, wie die Aufgabe zu parametrisieren ist. Dazu wollen wir zunächst annehmen, dass Erde und Mond starre Körper sind. Das Dreikörperproblem ist offensichtlich gelöst, wenn wir zu jedem Zeitpunkt die Schwerpunkte der drei Himmelskörper *und* die Lage je eines mit der Erde und mit dem Mond starr verbundenen Koordinatensystems kennen. Figur 12 zeigt, wie man das körperfeste Koordinatensystem der Erde wählen kann. Zudem zeigt sie eine Möglichkeit für die Wahl eines raumfesten Koordinatensystems.

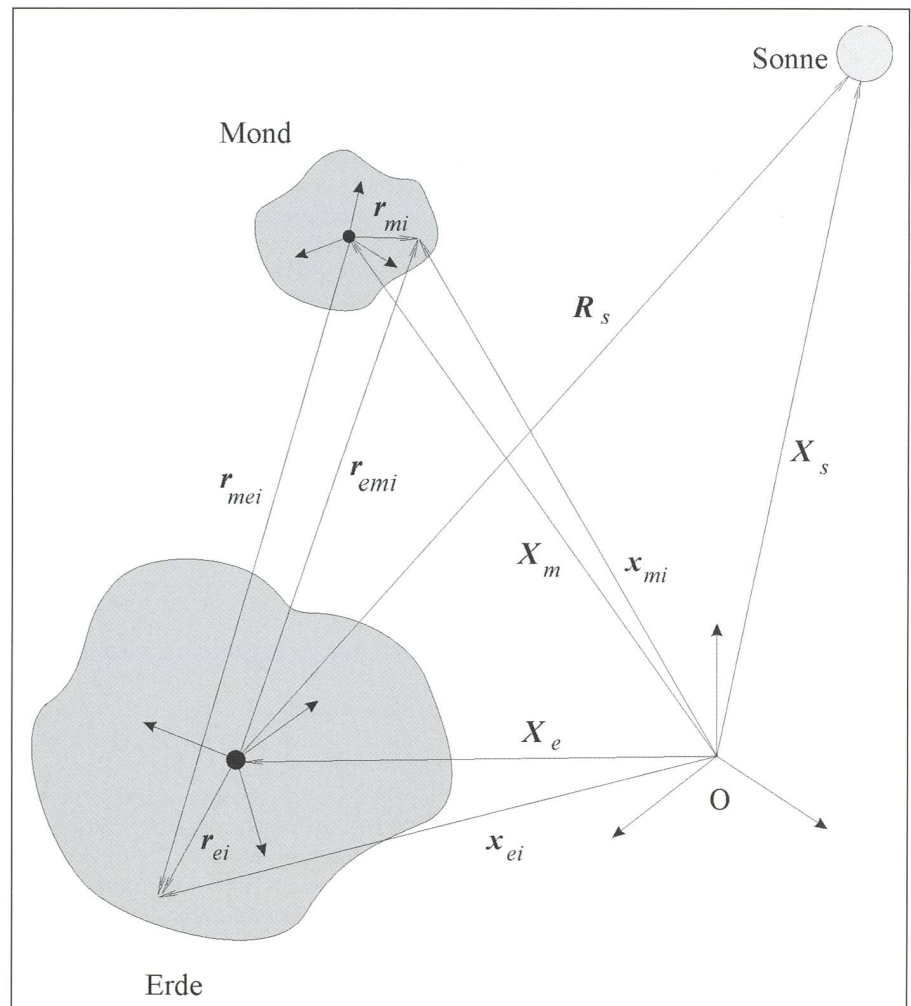
Um unsere Aufgabe zu lösen, müssen wir uns jetzt lediglich noch fragen, *wie* denn die Lage eines Koordinatensystems im inertialen Raum zu beschreiben ist. Figur 12 zeigt, dass dazu drei Winkel, auch Eulersche Winkel genannt, benötigt werden. In Figur 12 haben wir im inertialen Raum ein ekliptikales Koordinatensystem eingeführt. Ein ekliptikales Koordinatensystem hat die Ebene der Bahn des Systems Erde-Mond um die Sonne als Fundamentalebene (d.h., als erste Koordnatebene). Da diese Bahnebene – infolge der Planetenstörungen – selber im Raum nicht fix sein kann, müssen wir genauer von einem Ekliptiksystem zu einer bestimmten Epoche sprechen. Normalerweise verwendet man zu diesem Zweck heute das auf den 1. Januar 2000 bezogene System und bezeichnet es als System J2000.0. Als erdfestes System verwendet man üblicherweise ein geozentrisches, äquatoriales System – also ein konventionelles geographisches System.

Figur 12 zeigt also, dass die Lage des erdfesten, äquatorialen Systems im inertialen Raum zu einem bestimmten Zeitpunkt durch die drei Eulerschen Winkel Ψ , ε , Θ beschrieben werden kann. Sie sind «im Prinzip» zu identifizieren mit

der Summe Ψ aus Präzession und Nutation in Länge, der Nutation in Schiefe ε und der Sternzeit Θ . Allerdings ist zu beachten, dass wir diese Winkel hier einfach als Transformationsparameter zwischen dem raumfesten, ekliptikalen und dem erdfesten, äquatorialen Koordinatensystem eingeführt haben. Vom Standpunkt der Himmelsmechanik aus gesehen ist dies das einzig Richtige und Vernünftige.

Unterscheidungen zwischen wahren und mittleren Systemen sowie eine künstliche Aufspaltung in Präzession und Nutation, wie sie in Astronomie-Grundvorlesungen gebräuchlich sind, sind durch nichts zu rechtfertigen. Immerhin sei angemerkt, dass die Winkel Ψ und ε sich nur vergleichsweise langsam ändern, während Θ pro (Stern)Tag um 360° anwächst. Es sei nochmals vermerkt, dass

Fig. 11: Das Dreikörperproblem Sonne-Erde-Mond.



man im Prinzip auch ganz andere Koordinatensysteme hätte einführen können. Wichtig ist lediglich, dass eines raumfest (inertial), und das andere erdfest ist.

Die Bewegungsgleichungen der Erde setzen sich also zusammen aus drei Differentialgleichungen zweiter Ordnung in der Zeit, welche die Bewegung des Schwerpunktes der Erde im inertialen Raum beschreiben, sowie drei (gekoppelten) Differentialgleichungen zweiter Ordnung in den drei Winkeln Ψ , ϵ , Θ , welche die Lage des erdfesten Systems beschreiben. Anzumerken bleibt, dass aus den ersten zeitlichen Ableitungen der drei Eulerschen Winkel die momentane Lage der Rotationsachse und die Winkelgeschwindigkeit (aus der wiederum die Länge des siderischen Tages folgt) berechnet werden kann.

Sinngemäss gelten dieselben Überlegungen für die Bahn- und Rotationsbewegung des Mondes. Das Resultat kann verallgemeinert werden: In einem N-Körperproblem müssen für jeden Körper endlicher Ausdehnung drei Differentialgleichungen zweiter Ordnung für die drei Eulerschen Winkel den Bewegungsgleichungen für die Schwerpunkte beigelegt werden. Die Differentialgleichungen für die Bewegung der Schwerpunkte und für die Rotation der Himmelskörper sind alle miteinander gekoppelt. Man kann also im Prinzip die Entwicklung der Eulerschen Winkel (für Erde und Mond) nur im Rahmen der Lösung des verallgemeinerten Dreikörperproblems Erde-Sonne-Mond studieren.

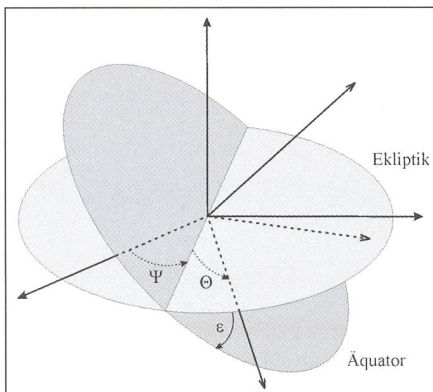


Fig. 12: Die drei Eulerschen Winkel.

Die Koppelung zwischen Bahn- und Rotationsbewegung ist allerdings nicht sehr stark. Man kann daher einen genäherten Eindruck von der Erdrotation erhalten, indem man die Schwerpunktsbewegung durch das System (1) beschreibt und diese in den Differentialgleichungen für die Eulerschen Winkel als bekannt annimmt. Das Programm ERDROT, das für die folgenden Simulationen verwendet wurde, erlaubt es,

- die Erdrotation bei als bekannt angenommener Schwerpunktsbewegung von Erde, Sonne und Mond oder
- die Mondrotation bei als bekannt angenommener Schwerpunktsbewegung von Erde, Sonne und Mond oder aber
- das Dreikörperproblem Erde, Sonne und Mond vollständig korrekt im oben erläuterten Sinn zu studieren.

Die folgenden Illustrationen wurden alle mit der korrekten (dritten) Lösung der Aufgabe erzeugt.

Die Rotation der Erde: Bei der numerischen Integration müssen die Anfangsbedingungen spezifiziert werden. Im Programm ERDROT werden die Positionen und Geschwindigkeiten der Schwerpunkte der beteiligten Himmelskörper aus einer sehr genauen Ephemeride (im wesentlichen einer «elektronischen» Version der Jahrbücher) übernommen, die Winkel Ψ , ϵ , und Θ werden aus den Formelsammlungen der IAU (Internationalen Astronomischen Union) übernommen. Die ersten Ableitungen dieser Grössen werden aus dem vorgegebenen Winkelgeschwindigkeitsvektor ω berechnet. Dieses Vorgehen erlaubt es, die Lage der Rotationsachse der Erde zum Ausgangszeitpunkt realistisch zu wählen. Bei der nachfolgenden Simulation wurde die Lage der Rotationsachse etwa 0.2" vom geographischen Nordpol entfernt gewählt.

Figur 13 zeigt die Projektion der Rotationsachse auf die Erdoberfläche (von oberhalb des Nordpols aus gesehen). Wir sehen, dass sich diese in guter Näherung auf einem Kreis mit Radius 0.2" (dies entspricht auf der Erdoberfläche etwa 6 m) um den geographischen Pol herum bewegt hat. Die Periode dieser Kreisbewegung beträgt bei einer starren Erde etwa 300 Tage. Sie wird Eulersche Periode genannt und kann allein aus der Tageslänge und aus den Hauptträgheitsmomenten der Erde berechnet werden. In Wirklichkeit beträgt die Hauptperiode der Polschwankung nicht 300, sondern etwa 430 Tage. Der Unterschied erklärt sich aus der Tatsache, dass die Erde nicht vollkommen starr ist. Die reale 430-tägige Periode wird nach ihrem Entdecker SETH CARLO CHANDLER (1846-1913) *Chandler-Periode* genannt. Die Chandler-Periode kann aus der Tageslänge, den Hauptträgheitsmomenten der Erde und aus der Elastizität der Erde berechnet werden. Der «grossen» Kreisbewegung von 0.2" sind kleine Kreise mit variierendem Radius überlagert. Dieser Anteil der Polschwankung wird *Oppolzer-Bewegung* genannt (nach Freiherr RITTER VON OPPOLZER [1841-1886]). Die Periode beträgt (fast)

einen Tag. Die Oppolzer-Bewegung wird durch die von Mond und Sonne auf die Erde ausgeübten Drehmomente verursacht. Befinden sich die Himmelskörper in der Äquatorebene, verschwinden die betreffenden Drehmomente und damit die zugehörigen Radien der Oppolzer-«Kringel». Da der Mond zweimal pro Monat die Äquatorebene kreuzt, sind die Radien der Kringel zweimal im Monat minimal. Da die Sonne zweimal pro Jahr (zu den Zeitpunkten des Frühjahres- und des Herbstbeginns) die Äquatorebene kreuzt, ist der durch die Sonne bedingte Radius der Oppolzer-Kringel zweimal pro Jahr minimal. Man könnte also der Oppolzer-Bewegung in Figur 13 die Zeitpunkte der Äquinoktien zuordnen.

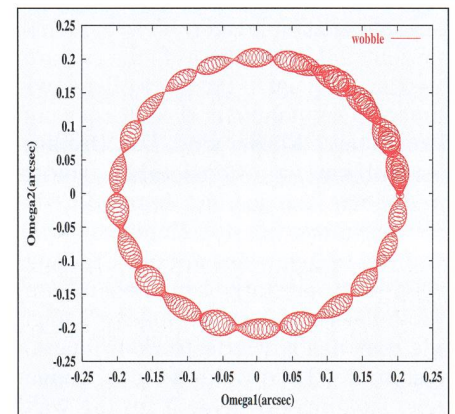


Fig. 13: Die Polschwankung während eines Jahres.

Wie bewegt sich der Rotationspol im Raum? Die Figuren 14-16 geben die (wohlbekannte) Antwort. Figur 14 zeigt, dass der Winkel Ψ in der Ekliptikebene pro Jahr im Mittel um etwa 50.4" abnimmt. Dies entspricht der Präzessionsbewegung des Rotationspols um den Ekliptikpol herum. Die zugehörige Periode beträgt folglich etwa 26000 Jahre. Man entnimmt der Figur 14 aber auch, dass der linearen Abnahme von Ψ deutlich eine periodische Komponente überlagert ist. Diese kann man genauer studieren, wenn man rein rechnerisch den linearen Anteil in Figur 14 eliminiert.

Das Resultat ist in Figur 15 enthalten. Wir erkennen eine grosse 18.6-jährige periodische Bewegung mit einer Amplitude von etwa 17" sowie halbjährliche Terme mit Amplituden von etwa 1.3". Der erste Term, der Hauptterm der Nutation in Länge, wird durch die periodische Änderung der Neigung der Mondbahnebene gegenüber der Äquatorebene «verschuldet»: Die Neigung der Mondbahnebene gegenüber der Ekliptikebene ist in etwa konstant mit $i=5^\circ$. Nun läuft aber der Mondknoten (die

Schnittgerade der Mondbahnebene mit der Ekliptikebene) einmal pro 18.6 Jahren in der Ekliptikebene (im Uhrzeiger) herum. Daraus folgt, dass der Schnittwinkel der Mondbahnebene mit der Äquatorebene sich innerhalb der Grenzen $\varepsilon - 5^\circ$ und $\varepsilon + 5^\circ$, also grob zwischen den Grenzen 18.5° und 28.5° , ändert. Unnötig zu sagen, dass die Präzession den maximalen (negativen) Wert annimmt, wenn die Neigung der Mondbahnebene gegen die Äquatorebene maximal ist. Figur 16 zeigt, dass der Winkel ε nur periodischen Änderungen unterworfen ist. Die Hauptperiode beträgt wiederum 18.6 Jahre, die Amplitude etwa $9.2''$. Die Figuren 14 und 16 zusammengekommen sagen, dass sich der Rotationspol der Erde in etwa auf einem geraden Kreissegel mit 23.5° Neigung um den Ekliptikpol herum bewegt. Zum Abschluss sei festgehalten, dass wir zwar in den Figuren 15 und 16 bloss zwei Terme (die 18.6-jährigen und die halbjährlichen Terme) identifizieren konnten. Eine Spektralanalyse der Zeitreihen zeigt jedoch, dass es Dutzende von Termen mit Amplituden grösser als eine Millibogensekunde gibt. Setzt man die Grenze noch tiefer an, kommt man «problemlos» auf Hunderte von Termen.

Mondrotation: Im Prinzip sollten wir nun eine ähnliche Diskussion zum Thema Mondrotation führen, wie wir sie oben zum Thema Erdrotation geführt haben. Platzgründe verbieten dies. Wir beschränken uns daher auf eine summarische Zusammenfassung der Resultate. Genau wie die Erde rotiert auch der Mond im inertialen Raum. Aus der Tatsache, dass wir (im Wesentlichen) immer dieselbe Seite des Mondes sehen, wissen wir, dass seine Rotationsperiode und seine Umlaufzeit heute identisch sind, also einen (siderischen) Monat betragen. Genau wie die Erde weist auch der Mond eine Polschwankung auf. Die der Eulerschen Periode entsprechende Periode ergibt sich wiederum aus den Hauptträgheitsmomenten des Mondes und aus der Rotationsperiode des Mondes. Die Periode beträgt etwas mehr als 140 Jahre. Beobachtet wurde sie

allerdings noch nie! Figur 17 deutet an, weshalb dem so ist. Sie zeigt, dass das Äquivalent zur Oppolzer-Bewegung vergleichsweise riesig ist: Anstelle von einigen Millibogensekunden wie im Falle der Erde (siehe Figur 13) beobachten wir Amplituden von mehreren hundert Bogensekunden! Die Bewegung erscheint im Übrigen sehr chaotisch. Die Grösse der Amplituden ist naturgemäss durch das vergleichsweise sehr grosse Drehmoment bedingt, das durch die Erde auf den Mond ausgeübt wird. Man hat im Übrigen auch diese Bewegung auf dem Mond noch nie beobachtet. ($100''$ auf dem Mond entsprechen etwa $0.5''$ von der Erde aus gesehen).

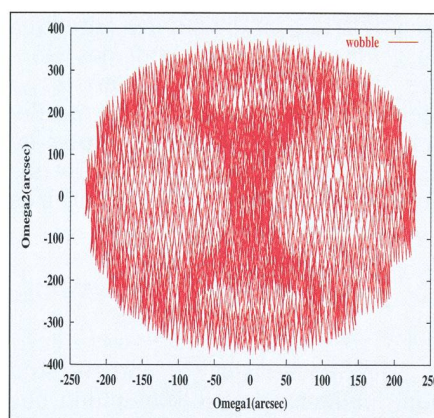


Fig. 17: Die Polschwankung des Mondes über 140 Jahre.

Wie bewegt sich der Rotationspol des Mondes im Raum? Nun, genau wie bei der Erde führt auch der Rotationspol des Mondes eine Präzessionsbewegung um die Ekliptikebene aus. Allerdings beträgt die Periode nur 18.6 Jahre an Stelle der etwa 26 000 Jahre bei der Präzession der Erdachse – sie ist gekoppelt mit der Präzession der Mondbahnebene. Die Neigung der Rotationsachse des Mondes gegenüber der Ekliptikebene beträgt übrigens nur etwa 1.5° (und nicht 23.5° wie im Falle der Erde). Die grundlegenden Fakten der Mondrotation sind längst bekannt. Sie wurden von GIOVANNI DOMENICO CAS-

SINI (1625-1712) rein empirisch aus langen Beobachtungsreihen gefunden und in Form von drei «Gesetzen» festgehalten:

1. Vom Nordpol aus gesehen rotiert der Mond gleichförmig im Gegenuhrzeigersinn um eine feste Achse. Siderische Rotationsperiode und Bahnumlaufzeit sind identisch.
2. Die Neigung der Mondbahnebene gegen die Ekliptik ist konstant.
3. Die Rotationsachse des Mondes, der Pol der Ekliptik und der Pol der Mondbahnebene liegen (in dieser Reihenfolge) in ein und derselben Ebene.

Cum grano salis ist die Rotation des Mondes durch die drei Cassinischen Gesetze recht gut erfasst. Man muss natürlich in Betracht ziehen, dass die sehr wohl existierenden (und heute, nicht zuletzt dank den Laser-Distanzmessungen zum Mond eindeutig nachgewiesenen) Nutationsbewegungen des Mondes im 17ten Jahrhundert nicht beobachtbar waren. Mehr Aufschluss zum Thema Mondrotation wird man durch Mondmissionen, wie sie beispielsweise von der japanischen Weltraumagentur geplant sind, erhalten.

Künstliche Erdsatelliten

Geschichtliches: Mit dem Start des ersten künstlichen Erdsatelliten Sputnik-I am 4. Oktober des internationalen geophysikalischen Jahres 1957 brach eine neue Ära in der Himmelsmechanik an. Künstliche Erdsatelliten können mit sehr hoher Genauigkeit über sehr lange Zeiträume beobachtet werden. Wichtig ist insbesondere, dass man eine Bahn über Hunderte von Umläufen genau beobachten kann. Die Raumflugära brachte in der Himmelsmechanik in mehrerlei Hinsicht eine Neuorientierung:

- Während bislang ausschliesslich Richtungen zu Himmelskörpern beobachtet wurden, kamen jetzt auch andere Beobachtungsarten zum Zuge. Zu nennen sind insbesondere
 - Distanzbeobachtungen zu Satelliten, die mit Reflektoren ausgerüstet sind,

Fig. 14: Präzession plus Nutation in Länge.

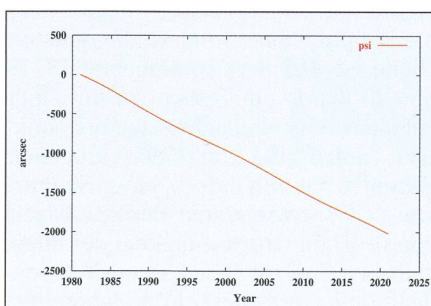


Fig. 15: Nutation in Länge.

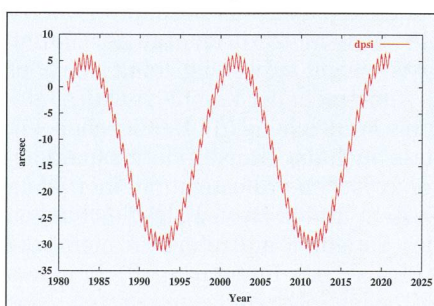
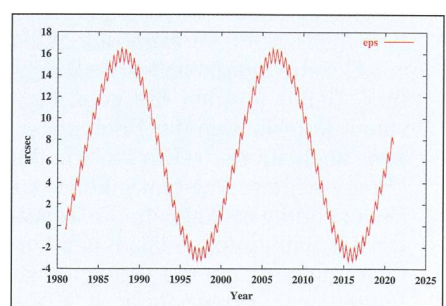


Fig. 16: Nutation in Schiefe.



- Beobachtung des Dopplereffektes von Frequenzen, die von aktiven Satelliten ausgesandt werden,
- Messung der Laufzeit von Signalen, die von aktiven Satelliten ausgesandt werden.
- Während man in der klassischen Himmelsmechanik des Planetensystems die auf einen Probekörper wirkenden Kräfte im Normalfall als bekannt annehmen durfte, war dies bei künstlichen Erdsatelliten zum Mindesten zu Beginn der Raumflügära nicht der Fall. Man musste das Gravitationsfeld der Erde aus den beobachteten Bahnen selbst ableiten. Schon Ende der 1960er Jahre wurden Dutzende von Termen des Gravitationsfeldes bestimmt. Bis Ende des zwanzigsten Jahrhunderts wurden in der Grössenordnung einige tausend Terme bestimmt, Ende des ersten Jahrzehnts des dritten Jahrtausends wird man gegen Hunderttausend solcher Terme mit grosser Genauigkeit bestimmt haben.
- In der klassischen Himmelsmechanik mussten im Allgemeinen nur Gravitationskräfte beachtet werden. Bei künstlichen Erdsatelliten mussten von Anbeginn weg auch andere Kräfte beachtet werden:
 - Der Luftwiderstand ist in Umlaufbahnen bis 1000 km Höhe von zentraler Bedeutung.
 - Unabhängig von der Höhe des Satelliten ist der sogenannte Strahlungsdruck zu beachten. Er ist dem Umstand zuzuschreiben, dass elektromagnetische Strahlung einen Impuls mit sich trägt: Jedes Photon, das auf eine Satellitenoberfläche auftrifft und absorbiert wird, überträgt auf diese den Impuls der Grösse $h\nu/c$ (h ist die Plancksche Wirkungskonstante, ν die Frequenz der Strahlung, c die Lichtgeschwindigkeit) in Richtung Sonne-Satellit. Wird das Photon reflektiert, wird im Maximum der doppelte Impuls normal zum Flächenelement, auf den das Photon auftraf, übertragen.
- Wird ein Satellit von der Erde aus beobachtet (Richtung, Distanz, Doppler, Laufzeit), enthält diese Beobachtung nicht nur Information zur geozentrischen Bahn des Satelliten, sondern auch zur Position und allenfalls zur Geschwindigkeit des Beobachters. Damit wurden die geozentrischen Koordinaten der Beobachter, aber auch subtilere Effekte wie die oben erwähnte Polschwankung der Beobachtung zugänglich. Das Zeitalter der Satellitengeodäsie, der Vermessung der Erde mit Hilfe von Satelliten, war angebrochen.

Die Bewegungsgleichungen: Man hatte also in der Himmelsmechanik mit einem Schlag sehr viel kompliziertere Aufgaben zu lösen. Himmelsmechanik wurde auch, vielleicht sogar vor allem, eine wichtige Anwendung der Theorie der Parameterbestimmung. Dies wird unter anderem dokumentiert durch die im Vergleich mit den Grundgleichungen (1) sehr viel komplexeren Grundgleichungen der Satellitenbewegung:

$$\ddot{\mathbf{r}} = -G \cdot \iiint_V \rho(dV) \cdot \frac{\mathbf{r} - \mathbf{r}_{dV}}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_{dV}|^3} \cdot dV + \mathbf{a}_{Mond} + \mathbf{a}_{Sonne} + \sum \mathbf{a}_{ng} \quad (5)$$

Dabei ist G die Gravitationskonstante, $\rho(dV)$ die Dichte der Materie in einem Volumenelement dV der Erde; $\mathbf{r}$ ist der geozentrische Radiusvektor des Satelliten, $\mathbf{r}_{dV}$ derjenige des Volumenelementes. $\mathbf{a}_{Mond}$ ist die auf den Satelliten ausgeübte Gravitationskraft des Mondes (im geozentrischen System), $\mathbf{a}_{Sonne}$ diejenige des Mondes. $\mathbf{a}_{ng}$ ist die Beschleunigung des Satelliten infolge einer nicht-gravitativen Kraft. Der erste Term in (5) kann noch als Gradient eines Potentials geschrieben werden:

$$\ddot{\mathbf{r}} = G \cdot \text{grad} \left(\iiint_V \frac{\rho(dV)}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_{dV}|} \cdot dV \right) + \mathbf{a}_{Mond} + \mathbf{a}_{Sonne} + \sum \mathbf{a}_{ng} \quad (6)$$

Die Gleichungen (5) und (6) sind vom mathematischen Standpunkt aus gesehen gleichwertig. Der Vorteil der Gleichung (6) besteht darin, dass das Integral nun nicht mehr eine vektorielle, sondern nur noch eine skalare Grösse darstellt.

Der erste Term in Gleichung (6) muss noch etwas eingehender diskutiert werden: Die Gleichungen (6) sind bezogen auf ein pseudo-inertiales, geozentrisches Koordinatensystem. Das System kann, weil geozentrisch, nicht echt inertial sein (es ist ja der beschleunigten Bewegung der Erde um den gemeinsamen Schwerpunkt Erde-Mond sowie der Bewegung dieses Schwerpunktes um die Sonne unterworfen). Wegen der Rotation der Erde in diesem System müsste man das Integral für jeden Zeitpunkt stets neu auswerten. Es empfiehlt sich daher, vor einer Auswertung in ein erdfestes System zu transformieren, das Integral dort auszuwerten, den Gradienten im erdfesten System zu bilden und dann das Resultat ins inertielle System zurückzutransformieren. Dies scheint aufwendig, lohnt sich aber in Anbetracht der Komplexität des Integrals in Gleichung (6). Damit sehen wir, dass auch die Transformationsparameter zwischen erdfestem und inertiell System in den Bewegungsgleichungen des Satelliten auftreten. Es bleibt die Aufgabe, das Integral in (6) in einem erdfesten System auszuwerten. Die

Schwierigkeit scheint darin zu bestehen, dass man die Dichte $\rho(dV)$ gar nicht kennt. Man kann aber einstweilen «so tun als ob» und erhält formal die folgende einfache Darstellung für das Potential am Ort des Satelliten im erdfesten System:

$$G \iiint_V \frac{\rho(dV)}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_{dV}|} \cdot dV = U(r, \lambda, \phi) = \frac{GM}{r} \cdot \sum_{i=0}^n \left(\frac{a_e}{r} \right)^i \sum_{k=0}^i P_i^k(\sin \phi) \left\{ C_{ik} \cdot \cos(k\lambda) + S_{ik} \cdot \sin(k\lambda) \right\} \quad (7)$$

r , λ und ϕ sind die sphärischen Koordinaten (geozentrische Distanz, Länge und Breite) des Satelliten im erdfesten System, M ist die Erdmasse, a_e ist der Äquatorradius, die (...) sind die zugeordneten Legendreschen Funktionen, deren Definition jeder mathematischen Formelsammlung entnommen werden kann. i ist der Grad, k die Ordnung der Entwicklung. Die Terme C_{ik} und S_{ik} sind komplizierte Funktionen der Dichte. Dies stört für die Potentialbestimmung aber wenig: Man führt diese einfach als Unbekannte ein und bestimmt sie! Man beachte, dass sämtliche Terme S_{i0} gleich Null gesetzt werden können. Der allererste Term beträgt $C_{00}=1$, womit dieser erste Term der Entwicklung in (7) mit $U_{00}=GM/r$ das Potential eines Massenpunktes der Masse M darstellt. Bezieht sich die Entwicklung auf ein Schwerpunktsystem, werden alle Terme vom Grad $i=1$ zu Null. Nach dem Hauptterm ist der Term C_{20} dominierend. Er charakterisiert die Abplattung der Erde. Sein Einfluss auf einen tieffliegenden Satelliten ist etwa 1000 mal grösser als derjenige der nachfolgenden Terme.

Charakteristische Störungen einer Satellitenbahn: In Anbetracht dieser Dominanz lohnt es sich, die Störungen einer Satellitenbahn infolge der Abplattung kurz zu charakterisieren. Wir beschränken uns darauf, die Störungen in der Halbachse, in der Rektaszension des aufsteigenden Knotens und im Argument des Perigäums (Winkelabstand des nächsten Punktes vom Knoten) darzustellen. Die Definition dieser Elemente kann in Figur 1 nachgesehen werden. Allerdings hat man zu beachten, dass die Bezugsebene für die geometrischen Elemente nun sinnvollerweise nicht mehr die Ekliptikebene, sondern die Äquatorebene ist. Bei den Abbildungen 18, 19 und 20 wurde ein Testsatellit mit einer oskulierenden Halbachse zum Zeitpunkt $t_0=1.$ Januar 2001 von $a=8000$ km, einer Exzentrizität von $e=0.07$, einer Neigung von $i=35^\circ$ sowie einem Perihelabstand von $\omega=0^\circ$ im Gravitationsfeld der abgeplatteten Erde integriert. Der oskulierende Knoten wurde bei $\Omega=0^\circ$ angenommen

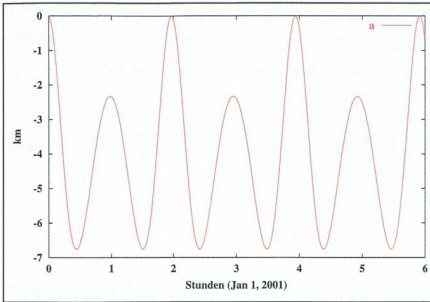


Fig. 18: Störungen der Halbachse durch die Abplattung.

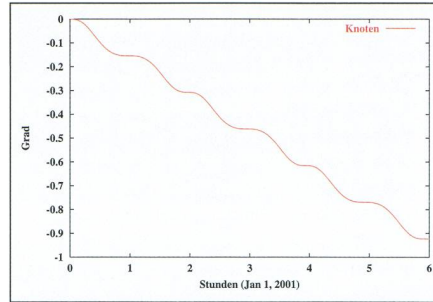


Fig. 19: Störungen der Rektaszension des aufsteigenden Knotens durch die Abplattung.

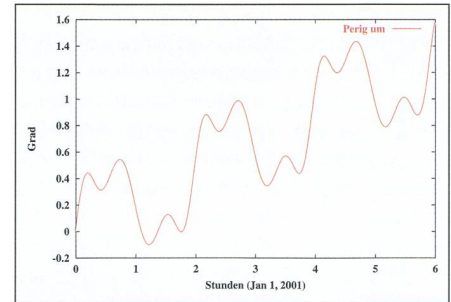


Fig. 20: Störungen des Perigäumsabstandes durch die Abplattung.

und die Integration wurde im Knoten (und somit auch im Perigäum) gestartet. Abbildung 18 zeigt die oskulierende Halbachse (minus 8000 km) über eine Zeitdauer von sechs Stunden. Man sieht nur periodische Störungen mit Perioden einer halben und einer vollen Umlaufzeit. Dieses Resultat war zu erwarten: Die Halbachse ist ja ein anderes Mass für die Energie eines Satelliten. Durch eine konservative Kraft kann aber die Energie nicht geändert werden. Ein ähnliches Bild würde man erhalten, wenn man die Exzentrizität als Funktion der Zeit auftragen würde.

Figur 19 zeigt die Entwicklung der oskulierenden Rektaszension des Knotens über denselben Zeitraum von sechs Stunden. Deutlich ist eine lineare Abnahme zu beobachten. Diese ist in der Tat bedeutend: Umgerechnet auf einen Tag beträgt die Regression des Knotens etwa 3.6° , was bedeutet, dass der Knoten einmal pro hundert Tage umläuft. Da andererseits die Neigung i gegen die Äquatorebene nur periodische Störungen kleiner Amplitude aufweist, bedeutet dies, dass der Bahnnormalenvektor auf einem geraden Kreiskegel der halben Öffnung i um die Polarachse präzediert (im Uhrzeigersinn). Figur 20 dokumentiert, dass auch das Perigäum relativ zum Knoten nicht an Ort bleibt. Dieses dreht sich vorwärts mit einer Winkelgeschwindigkeit von etwa 4.2° . Die Figuren 18, 19 und 20 demonstrieren eindrücklich, dass die Störung der Satellitenbahnen infolge der Erdabplattung bedeutend ist.

Es stellt sich natürlich die Frage, wie repräsentativ die Resultate in den Figuren 18-20 sind. Dazu ist zum einen zu sagen, dass die Störungen mit der Höhe (Halbachse) der Satelliten rasch kleiner werden – im Falle des Knotens und des Perigäumsabstandes nehmen z.B. die Störbeträge mit der 3.5-ten Potenz der Halbachse ab. Zum andern gilt es, die Abhängigkeit der Störungen (bei sonst gleichbleibenden Elementen) von der Neigung der Satellitenbahn zu beachten. Figur 21 zeigt diese Abhängigkeit

für die Regression des Knotens. Um den Effekt klarer herauszuschälen, wurden in dieser Abbildung die mittleren Störungen (gemittelt über einen Umlauf des Satelliten) aufgetragen. Abgesehen von der Neigung wurden in Figur 21 (übrigens auch in Figur 22) die gleichen Elemente wie in den vorausgegangenen Simulationen verwendet. Die Neigungsabhängigkeit der Störungen im Knoten ist in der Tat dramatisch: Bei $i=35^\circ$ erhalten wir die Winkelgeschwindigkeit von $-3.6^\circ/\text{Tag}$ bestätigt, bei einer Neigung von $i=63.4^\circ$ ist die Drehung etwa halb so gross, bei $i=90^\circ$ kommt die Knotendrehung zum Stillstand (was übrigens aus Symmetriegründen einleuchtend ist). Bei Satelliten mit einer Neigung $i>90^\circ$ dreht sich der Knoten vorwärts. Letztere Eigenschaft wird übrigens von Raumfahrtagenturen zum Erzielen sogenannter sonnensynchroner Bahnen ausgenutzt: Die Neigung wird so gewählt, dass die Bahnebene in Bezug auf die Sonne immer den gleichen Winkel einnimmt.

Figur 22 zeigt, dass auch die Perigäumsdrehung neigungsabhängig ist. Attraktiv ist insbesondere der Umstand, dass diese Drehung bei $i=63.4^\circ$ zum Stillstand kommt. Diese Aussage stimmt für alle Halbachsen und Exzentrizitäten. Die Neigung wird deshalb (völlig unzutreffend) *kritische Neigung* genannt. Immerhin hat diese Eigenschaft eine wichtige praktische Bedeutung. Bringt man z.B. einen Satelliten mit

grosser Exzentrizität e in eine Umlaufbahn mit dieser Neigung und setzt das Perigäum auf $\omega=-90^\circ$ (also in 63.4° südliche Breite), hält sich dieser Satellit die meiste Zeit über der Nordhalbkugel auf. Russische Kommunikationssatelliten nutzen diese Eigenschaft aus. Australien könnte durch eine sinngemässe Anwendung auch von der kritischen Neigung Gebrauch machen.

Es ist interessant, dass die Abplattung nur sehr kleine langperiodische Störungen verursacht. Langperiodische Störungen existieren und werden insbesondere von längenabhängigen Termen verursacht. Figur 23 zeigt solche Störungen in der Exzentrizität bei Berücksichtigung aller Terme bis und mit Grad und Ordnung 4. Dargestellt werden die mittleren Störungen in der Exzentrizität über einen Zeitraum von zwei Jahren. Das realistische Beispiel ist in roter Farbe wiedergegeben, das hypothetische, bei dem der Abplattungsterm künstlich auf Null gesetzt wurde, in grüner Farbe. Die rote Kurve zeigt, dass die Störungen im Allgemeinen kleine Amplituden aufweisen. Ausnahmsweise können diese gross werden, wenn Umlaufzeit und Rotationsperiode der Erde durch ein Verhältnis kleiner ganzer Zahlen ausgedrückt werden können (was im vorliegenden Beispiel nicht der Fall ist).

Mit Simulationen kann man auch Fragen der Art «was wäre, wenn ...» stellen. Die grüne Kurve beantwortet

Fig. 21: Störungen im Knoten durch die Abplattung bei verschiedenen Neigungen.

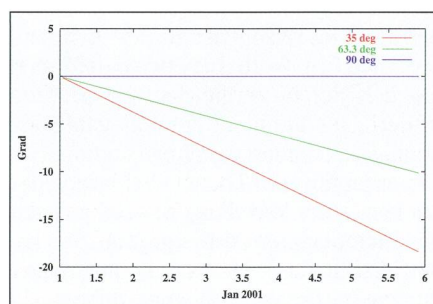
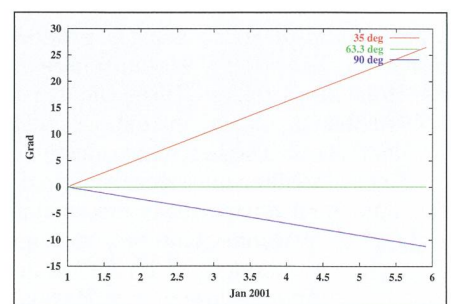
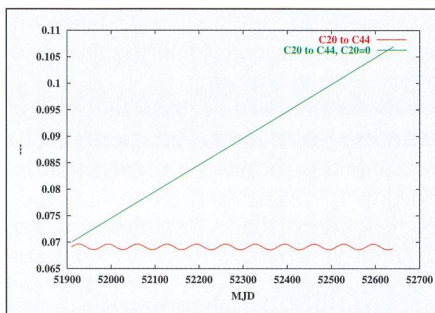


Fig. 22: Störungen im Perigäum durch die Abplattung bei verschiedenen Neigungen.



die Frage «was wäre, wenn die Abplattung der Erde gleich Null wäre, die übrigen Terme des Potentials jedoch unverändert blieben?» Merkwürdigerweise stellt man fest, dass in diesem hypothetischen Fall die Störungen in der Exzentrizität vergleichsweise riesig würden. Das Beispiel zeigt eindrücklich, dass die Abplattung der Erde eine stabilisierende Wirkung hat: Ganz offensichtlich bewirkt die «schnelle» Rotation der Bahnebene eine ebenso schnelle Änderung der Störgeometrie, was zu einer ganz wesentlichen Abschwächung der Störeinflüsse der höheren Terme des Erdgravitationsfeldes beiträgt.

Fig. 23: Störungen in der Exzentrizität über zwei Jahre infolge der Terme höherer Ordnung (mit und ohne C_{20}).



Nicht-gravitativ Störungen sind bei der Satellitenbewegung von grosser Bedeutung. Figur 24 gibt ein Beispiel. Dargestellt werden die Störungen des Perigäums und Apogäums einer Satellitenbahn in einer mittleren Höhe von ca. 700 km mit einer Exzentrizität von $e=0.05$. (Man kann die Störungen in diesen Grössen berechnen aus den Störungen in den Bahnelementen a und e .) Während die Perigäumshöhe nur leicht abnimmt, kommt das Apogäum vergleichsweise «rasant» (mit einer Geschwindigkeit von etwa 21 m/Tag) herunter. Ganz offensichtlich wird die Bahn immer kreisförmiger. Dieser Effekt wird tatsächlich beobachtet – und er ist einfach zu erklären: Bei einer Halbachse von $a=7100$ km und einer Exzentrizität von $e=0.05$ liegt das Apogäum um $2ae=710$ km höher als das Perigäum. Nun äussert sich der Luftwiderstand durch eine Bremsung in Bewegungsrichtung. Die Bremsung ist proportional der Dichte der Restatmosphäre in der Höhe des Satelliten. Diese Dichte ist höhenabhängig – sie nimmt exponentiell mit der Höhe ab. Das heisst aber, dass wir bei einem Satelliten mässiger Exzentrizität annehmen dürfen, dass nur in der Nähe des Perigäums eine wesentliche Bremsung stattfindet. Da im Perigäum der Bremseffekt senkrecht zum Radius-

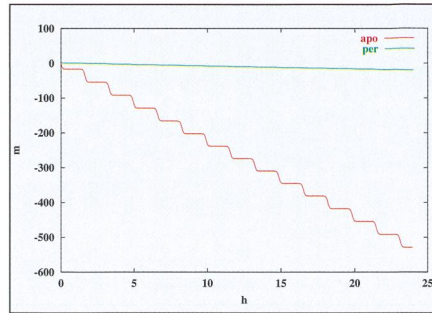


Fig. 24: Störungen im Perigäum und Apogäum infolge des Luftwiderstandes.

vektor (also normal zum Ortsvektor des Perihels) steht, kann dessen Höhe durch den Luftwiderstand kaum geändert werden. Hingegen bewirkt die Abnahme der Geschwindigkeit im Perigäum, dass der Satellit weniger weit nach aussen geschleudert werden kann: Die Apogäums Höhe nimmt ab. Es ist also quasi ein Naturgesetz, dass die Bahnen von Satelliten in tiefen Umlaufbahnen immer kreisförmiger werden. Ist die Bahn schliesslich fast kreisförmig, ist *de facto* «jeder Punkt ein Perihel» und es kann nur noch die Halbachse abnehmen, was schliesslich zum Absturz des Satelliten führt.

Rückblick und Zusammenfassung

Wir haben gezeigt, dass aus Planeten- und Kleinplanetenbahnen sehr viel ausgesagt werden kann über die Entwicklung unseres Planetensystems. Wir haben gesehen, dass unser Planetensystem mechanisch von den Planeten Jupiter und Saturn (und natürlich von der Sonne) geprägt ist. Das Studium ihrer Bahnelemente zeigt, dass ein immerwährender Austausch von Energie und Drehimpuls zwischen ihnen stattfindet. Im inneren Planetensystem spielen Venus und Erde eine ähnlich dominierende Rolle. Die Entwicklung ihrer Bahnelemente kann allerdings sinnvollerweise nur unter Einbezug des gesamten Planetensystems studiert werden. Auch zwischen Venus und Erde findet ein Austausch von Energie und Drehimpuls statt. Die «gemeinsam erlittenen» Störungen durch die Planeten des äusseren Systems bewirken zudem grosse Störungen sehr langer Perioden in Exzentrizität (und Bahnebene) der inneren Planeten. Heute beträgt die Exzentrizität der Erdbahn etwa $e=0.016$. Werte bis etwa $e=0.07$ sind möglich. Solche vergleichsweise grossen Änderungen können Klima-relevant sein. Schliesslich haben wir einige numerische Experimente zum Thema «Erklärung der Lücken in der Verteilung der Halbachsen von Kleinplaneten» durchgeführt. Wir haben gezeigt, dass schon über einen relativ kurzen Zeitbereich von einer Million Jah-

ren massive Störungen in der Exzentrizität zum Absturz von Kleinplaneten auf die inneren Planeten Mars und sogar Erde führen können.

Wenn wir von Bahnen von Himmelskörpern sprechen, stellen wir uns normalerweise die Entwicklung der sechs oskulierenden Bahnelemente (siehe Figur 1) vor. Darf man in einem N-Körperproblem einige der Himmelskörper nicht als Massenpunkte nähern, müssen wir gleichzeitig für jeden dieser Körper die drei Eulerschen Winkel eines körperfesten Koordinatensystems mitbestimmen. Sind in einem N-Körperproblem alle Körper von endlicher Grösse, führt dies zu einer Verdoppelung der Dimension des Systems der Bewegungsgleichungen. Wir haben einige Resultate anhand des Dreikörperproblems Erde-Mond-Sonne vorgestellt.

Abschliessend haben wir einige Eigenschaften der Bahnen künstlicher Erdsatelliten vorgestellt, obwohl im Bereich Himmelsmechanik des erdnahen Raumes die Bahnen oft nur Mittel zum Zweck in sehr komplexen Parameterbestimmungsproblemen sind. Die Näherung durch Keplersche Bahnen ist im Allgemeinen schon über kurze Zeiten (wenige Stunden) nicht mehr genügend. Die wichtigste Störkraft wird durch die Abplattung der Erde verursacht, die beispielsweise die Bahnebenen tiefer Satelliten um mehrere Grad pro Tag präzedieren lässt. Wir haben auch darauf hingewiesen, dass die Bewegungsgleichungen künstlicher Erdsatelliten immer nicht-gravitativ Störeinflüsse modellmässig erfassen müssen. Bei Satelliten unter einer Höhe von 1000 km ist der Luftwiderstand, verursacht durch die Restatmosphäre in diesen Höhen, von grosser Bedeutung. Der Luftwiderstand hat die Eigenschaft, die Exzentrizität der Bahnen zu verringern und die Halbachsen zu verkleinern. Schliesslich sorgt der Luftwiderstand für den Absturz der Satelliten. Je nach der ursprünglichen Höhe kann dies jedoch ein sehr langwieriger Prozess sein, der Jahrzehnte oder gar Jahrhunderte in Anspruch nehmen kann.

Prof. Dr. GERHARD BEUTLER

Astronomisches Institut, Universität Bern,
Sidlerstrasse 5, CH-3012 Bern
E-mail: beutler@aiub.unibe.ch

Bibliographie:

- [1] BEUTLER, G.: *Methods of Celestial Mechanics: Theory and Applications*, (Springer Verlag, 2004).
- [2] SCHWEIZER, F. *Astronomical Journal*, Vol. 74, No. 6, 1969, pp. 779-788.
- [3] WISDOM, J.: *Icarus*, pp. 51-74, No. 56, 1983.

Erdsatelliten als Mittel zur Erforschung der globalen Geodynamik

URS HUGENTOBLER

Mit dem Beginn des Raumfahrtzeitalters mit dem Start von Sputnik I am 4. Oktober 1957 wurde eine neue Technik der Erdvermessung möglich. Die Satelliten als Probekörper im Schwerfeld der Erde erlauben die Bestimmung der Masseverteilung im Erdinnern. Zudem lassen sich die künstlichen Himmelskörper als Referenzpunkte für die Vermessung der Erde verwenden. Grundlage dazu ist die genaue Vermessung der Bahnen der Satelliten. Mittels raumgestützter geodätischer Verfahren lassen sich heute z.B. die Kontinentalverschiebungen messen oder Rückschlüsse über Prozesse im Erdinnern ziehen. Zudem liefern sie die Grundlage zur Definition eines globalen terrestrischen Koordinatensystemes oder zum Einschieben einer Schaltsekunde. Der Artikel stellt geodätische Satelliten-Messtechniken vor und zeigt einige Resultate und Anwendungen am Beispiel des Global Positioning Systems (GPS).

Anfänge der Vermessung mit Satelliten

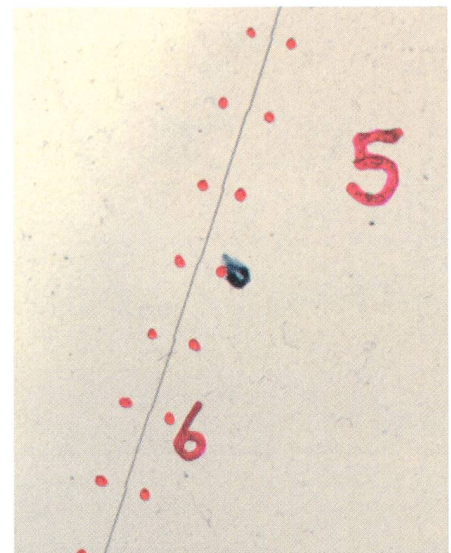
In den Anfängen der Raumfahrt wurden zur Bestimmung genauer Satellitenbahnen hauptsächlich optische Beobachtungen verwendet. Ganz zu Beginn waren sogar visuelle Beobachtungen und Winkelmessungen mit Theodoliten hilfreich zur Verbesserung der Bahnmodelle. So wurden z.B. 1957 im Moonwatch Projekt des Smithsonian Astrophysical Observatory (SAO) Amateurastronomen aufgefordert, Satellitenbeobachtungen mit Zeit- und Ortsangabe zu melden. Bereits 1958 hatte das SAO ein globales Beobachtungsnetz in Betrieb, bestehend aus zwölf Observatorien, welche zur Satellitenvermessung mit speziellen Kameras, sogenannten Baker-Nunn-Kameras, ausgerüstet waren.

Im Jahre 1961 wurde der erste Ballonsatellit Echo 1 mit einem Durchmesser von 30 m in eine Umlaufbahn gebracht. 1964 folgte Echo 2 mit einem Durchmesser von 40 m. Die beiden passiven Satelliten, welche Telekommunikationsexperimenten dienten, wurden auch für geodätische Messungen gebraucht. Der Ballonsatellit PAGEOS (Passive Geodetic Satellite) mit einem Durchmesser von 30 m wurde 1966 speziell für geodätische Anwendungen gestartet (Geodäsie = Erdvermessung). Er diente als Triangulationspunkt im Raum zur Vermessung von 45 global verteilten und mit von Wild-Heerbrugg entwickelten BC4-Kameras bestückten Messstationen. Winkelmessungen, möglichst gleichzeitig von verschiedenen Stationen aus gemacht, erlaubten erstmals die Vermessung eines weltweiten Triangulationsnetzes mit einer Genauigkeit von wenigen Metern. Daneben dienten die Messungen zur Verbesserung von Modellen des Schwere-

feldes der Erde sowie der Dichte der Atmosphäre in der Höhe der Satelliten aus der Bestimmung der Bremswirkung durch Luftreibung. Beides erlaubte eine genauere Berechnung der Bahnen auch anderer Satelliten.

Zur optischen Vermessung von Satelliten wurden photographische Weitwinkelkameras verwendet. Interessant ist die dreiachsige Montierung der Baker-Nunn-Kamera: Mittels Drehung um zwei Achsen konnte das Instrument so gelegt werden, dass der Satellit längs seiner Bahnbewegung verfolgt werden konnte durch Nachführung des Teleskopes um die dritte Achse. Strichspuren wurden z.B. mittels rotierender Blenden mit Zeitmarken versehen. Neben passiven (das Sonnenlicht reflektierende) Satelliten gab es aber auch aktive Satelliten wie ANNA-1B (1962), GEOS-1 (1965), GOES-2 (1968), welche mittels Blitzlampen Serien von kurzen Lichtpulsen generieren konnten. Diese Lichtpulse mussten dann auf den photographischen Aufnahmen gefunden und vermessen werden. Zeitsynchrone Messungen von verschiedenen Observatorien aus wurden durch diese Technik garantiert.

Zwischen 1965 und 1974 wurde auch die Schmidt-Kamera des Astronomischen Institutes Bern in Zimmerwald (40 cm Öffnung, 104 cm Brennweite) zur geodätischen Vermessung der Satelliten Echo 1 und 2, PAGEOS, GEOS 1 und 2 verwendet im Rahmen des WEST (West European Satellite Triangulation) Projektes. Mithilfe einer planparallelen Glasplatte, welche synchronisiert mit der Stationsuhr hin- und hergekippt wurde, wurden die Strichspuren der Satelliten auf den Schmidtplatten mit Zeitmarken versehen (siehe Figur 1). Damit wurde Zimmerwald schon damals zum bestvermessenen Punkt in der Schweiz.

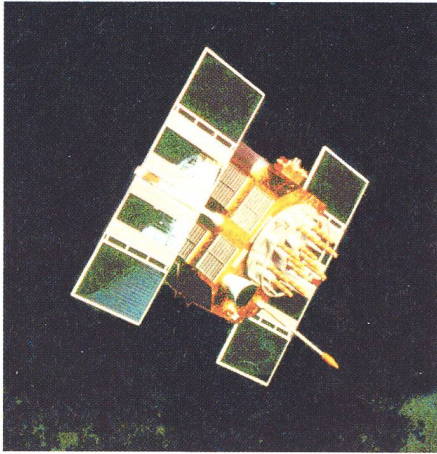


Figur 1: Ausschnitt aus einer Strichspuraufnahme des Ballonsatelliten PAGEOS vom 4. Oktober 1971 mit der 40 cm Schmidt-Kamera des Observatoriums Zimmerwald. Die roten Punkte bezeichnen Zeitmarken, welche mit einer vor der Filmkassette hin- und herkippenden Glasplatte aufgebracht wurden. Ziffern bezeichnen Referenzsterne für die astrometrische Vermessung der Satellitenspur.

Neue Messtechniken

Infolge der aufwendigen Verarbeitung photographischer Beobachtungen wurden astrometrische Messverfahren für geodätische Anwendungen nach und nach durch andere Techniken ersetzt. Bereits bei den ersten in Umlauf gebrachten Satelliten dienten Telemetriedaten zur Bahnbestimmung und damit zur besseren Vermessung des Erdschwerfeldes. Für geodätische Anwendungen entwickelte Transponder-techniken wurden bereits 1962 beim Satelliten ANNA-1B eingesetzt. Die Aussendungen des Satelliten konnten für präzise Dopplermessungen verwendet werden. 1960 wurden der erste TRANSIT-Satellit in den Orbit gebracht. Die Satelliten der TRANSIT-Serie der US Navy führten frequenzstabile Sender mit und dienten zur Navigation mittels Dopplersignalen. Ab etwa 1967 wurden diese Satelliten auch für geodätische Anwendungen eingesetzt. Das Observatorium Zimmerwald beteiligte sich an mehreren TRANSIT-Messkampagnen. Das TRANSIT-System blieb operationell bis 1996, als es durch GPS (Global Positioning System) ersetzt wurde.

Schon bald nach dem Bau des ersten Lasers durch MAIMAN im Jahre 1960 wurden Laser verwendet zur Distanzmessung zu Satelliten. Der erste mit Laser-Retroreflektoren ausgerüstete Satellit war Explorer 22, der 1964 ge-



Figur 2: GPS-Satellit der Block II A-Serie.

startet wurde. Noch im selben Jahr hat die NASA erfolgreich Laser-Echos des Satelliten gemessen. Heute werden immer mehr Satelliten mit Reflektoren ausgerüstet. Sehr erfolgreich waren und sind die speziell für geodätische Anwendungen entwickelten kugelförmigen Satelliten wie LAGEOS (Laser GEodetic Satellite) 1 und 2 oder Starlette. Diese Satelliten spielten und spielen eine Schlüsselrolle bei der Vermessung des Gravitationsfeldes der Erde und bei der Untersuchung von geophysikalischen Prozessen. Heute sind weltweit rund 30 Laser-Stationen im Betrieb, eine davon in Zimmerwald.

Für raumgestützte geodätische und geodynamische Anwendungen werden heute in erster Linie Beobachtungen von SLR (Satellite Laser Ranging), GPS und VLBI (Very Long Baseline Interferometrie) verwendet. Im folgenden sollen am Beispiel des GPS einige Resultate der Erdvermessung vorgestellt werden.

Wie funktioniert GPS?

Das Global Positioning System (GPS) dient der globalen Navigation und wird von der US Air Force betrieben. Der erste Satellit der NAVSTAR GPS-Serie wurde 1978 gestartet, und 1995 war die Konstellation, bestehend aus nominell 24 Satelliten, komplett und wurde seither laufend erneuert. Gegenwärtig befinden sich 29 aktive GPS-Satelliten im Orbit. Die Satelliten sind auf sechs Bahnebenen verteilt, welche 55° gegen den Äquator geneigt sind und deren aufsteigende Knoten um je 60° verschoben sind (siehe Figur 3). Sie umkreisen die Erde auf fast kreisförmigen Bahnen in einer Höhe von rund 20 000 km, die Umlaufzeit beträgt fast genau ein halber Sterntag (11^h58^m).

Ein GPS-Satellit trägt als wichtigsten Teil der Nutzlast Atomuhren mit sich. Mit einem Sender verbreitet er

einerseits Bahnelemente, aus denen ein Empfänger seine momentane Position errechnen kann. Andererseits übermittelt er den Stand der Uhr, so dass der Empfänger durch Vergleich dieser Information mit der Ablesung seiner internen Uhr die Laufzeit und damit die Distanz zum Satelliten bestimmen kann. Theoretisch reichen so gleichzeitige Messungen von drei GPS-Satelliten, damit der Empfänger seine Position im Raum errechnen kann. In praxi werden die Beobachtungen eines vierten Satelliten benötigt, so dass der Empfänger seine interne (Quarz-)Uhr synchronisieren kann. Mit mindestens vier Satelliten kann ein Empfänger somit seine Position überall auf oder in der Nähe der Erde bestimmen.

Trotz seiner primär militärischen Bestimmung kann das System auch für zivile Anwendungen verwendet werden, da ein Teil der ausgesendeten Information nicht verschlüsselt ist. Bis zum 2. Mai 2000 erreichte ein ziviler Nutzer des Systems eine Positioniergenauigkeit von ca. 300 m. Ab diesem Datum wurde eine künstliche Verschlechterung der Satellitenuhren definitiv ausgeschaltet, so dass seither einem zivilen Anwender die Positionierung in Echtzeit auf etwa 3 m genau gelingt, was für viele Anwendungen, z.B. für Navigation mit Auto, Schiff oder Flugzeug, ausreichend ist. Die verschlüsselte und nur dem militärischen Nutzer verfügbare Information erlaubt eine Positioniergenauigkeit in Echtzeit von ca. 30 cm.

Für geodätische Anwendungen sind sowohl 3 m als auch 30 cm Messgenauigkeit zu ungenau. Daher werden für hochpräzise Messungen direkt die auf zwei Frequenzen im Gigahertz-Bereich (Wellenlängen 19 cm und 25 cm) ausgesendeten Trägerwellen verwendet. Durch geeignete Auswertestrategien und Algorithmen können damit Genau-

igkeiten von wenigen Millimetern erreicht werden. Diese Methoden sind aufwendig und erfordern relativ grosse Rechenleistungen. Bestimmt werden müssen unter anderem die Satellitenbahnen, Uhrfehler der Satellitenuhren und der Einfluss der atmosphärischen Refraktion (Laufzeitverzögerung) auf die Mikrowellensignale.

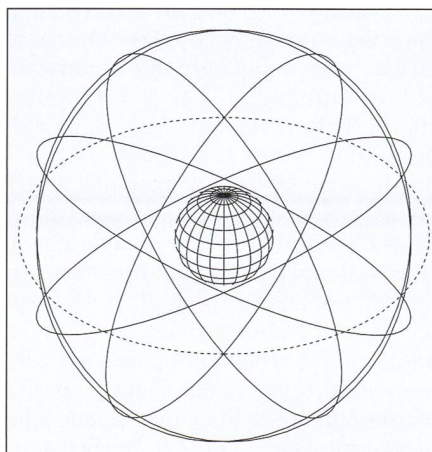
Neben dem amerikanischen GPS-Satellitensystem ist ein russisches Pendant, das GLONASS-System, im Orbit. Leider sind gegenwärtig nur 11 Satelliten funktionstüchtig, und die Zukunft dieses Navigationssystems ist ungewiss. Die EU und ESA planen zusammen ein europäisches Gegenstück zum GPS. Dieses System soll aus 24 Satelliten bestehen und gegenüber GPS wesentliche Verbesserungen aufweisen. Die ersten Satelliten sollen 2006 gestartet werden.

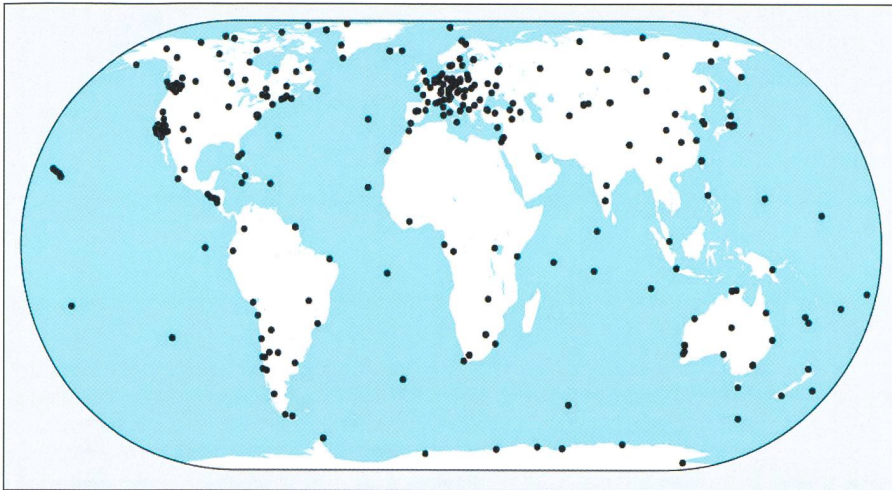
Ein globales Netz von Empfängern

Gegen Ende der 80er Jahre wurde klar, dass zum Erreichen von höchster Messgenauigkeit die von den GPS-Satelliten ausgesendete Bahninformation zu wenig genau ist. Damit nicht jeder Anwender seine eigenen Bahnen rechnen muss, wurde der IGS (International GPS Service) Dienst gegründet. Im Juni 1992 wurde der Testbetrieb aufgenommen, und im Januar 1994 begann der IGS mit dem routinemässigen Bereitstellen von präzisen GPS-Bahnen. Grundlage für die Berechnungen sind Messungen aus einem globalen Netz von fest montierten GPS-Empfängern. Mittlerweile sind über 350 Stationen im Betrieb (siehe Figur 4), welche von Dutzenden von Institutionen betrieben werden. Die Messungen dieser Stationen werden an mehreren Datenzentren gespeichert und über das Internet online zur Verfügung gestellt. Sieben Analysezentren berechnen jeden Tag Satellitenbahnen, Stationskoordinaten und weitere relevante Informationen und machen sie dem IGS verfügbar, welcher daraus gemittelte Bahnen rechnet und im Internet zur Verfügung stellt.

Eines der Analysezentren, das Center for Orbit Determination in Europe (CODE), wird am Astronomischen Institut der Universität Bern betrieben in Zusammenarbeit mit der Schweizerischen Landestopographie in Wabern, dem deutschen Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG) in Frankfurt a.M. und dem französischen Institut Géographique National in Paris. Das Rechenzentrum CODE spielt im IGS seit Beginn eine wesentliche Rolle. Die mit eigener Software gerechneten Resultate können sich in ihrer Qualität mit den

Figur 3: Bahnen der GPS-Satelliten, massstabsgetreu mit der Erdkugel.





Figur 4: Permanentes GPS-Messnetz des IGS (International GPS Service) bestehend aus über 350 Empfängern.

dessen Variabilität in der Ionosphäre untersucht werden. Da die Elektronen durch UV-Strahlung der Sonne erzeugt werden, kann in der Elektronenzahl sehr schön die Sonnenaktivität abgelesen werden.

Bewegliche Erdkruste

Beim Berechnen der Satellitenbahnen müssen auch die Koordinaten der Messstationen sowie die Transformationsparameter vom erdfesten System ins Inertialsystem (Erdrotationsparameter) bestimmt werden. Damit fallen täglich Koordinaten der global verteilten Stationen an mit einer Genauigkeit von wenigen Millimetern. Aus den langjährigen Koordinaten-Zeitserien lassen sich Geschwindigkeiten der einzelnen Stationen bestimmen. Figur 5 zeigt die horizontalen Geschwindigkeitsvektoren einiger am CODE verarbeiteten Stationen. Klar zum Vorschein kommt die Verschiebung der einzelnen tektonischen Platten, wie dies in den 20er Jahren von ALFRED WEGENER postuliert wurde. So verbreitert sich z.B. der Atlantik um ca. 2.5 cm pro Jahr. Für einzelne Gebiete erreichen die «Geschwindigkeiten» 10 cm pro Jahr.

Bei der Interpretation der Messresultate müssen neben den Plattenbewegungen noch andere Stationsbewegungen berücksichtigt werden. Einerseits sind dies die Gezeiten der festen Erde. In der Schweiz bewegt sich der Erdboden um ± 15 cm auf und ab im Rhythmus der Gezeiten. Diese Bewe-

Beschleunigung durch	Beschleunigung m/s^2	Bahnfehler nach einem Tag
Schwerkraft der Erde	0.59	165 000 km
Abplattung der Erde	$5 \cdot 10^{-5}$	10 km
Anziehung durch den Mond	$5 \cdot 10^{-6}$	3 km
Anziehung durch die Sonne	$2 \cdot 10^{-6}$	800 m
Weitere Terme des Erdschwerefeldes	$3 \cdot 10^{-7}$	200 m
Direkter Strahlungsdruck	$9 \cdot 10^{-8}$	20 m
Weitere Terme im Strahlungsdruck	$5 \cdot 10^{-10}$	2 m
Gezeiten der festen Erde	$1 \cdot 10^{-9}$	0.3 m

Tabelle 1: Auf GPS-Satelliten wirkende Beschleunigungen und zu erwartender Bahnfehler nach einem Tag bei deren Vernachlässigung.

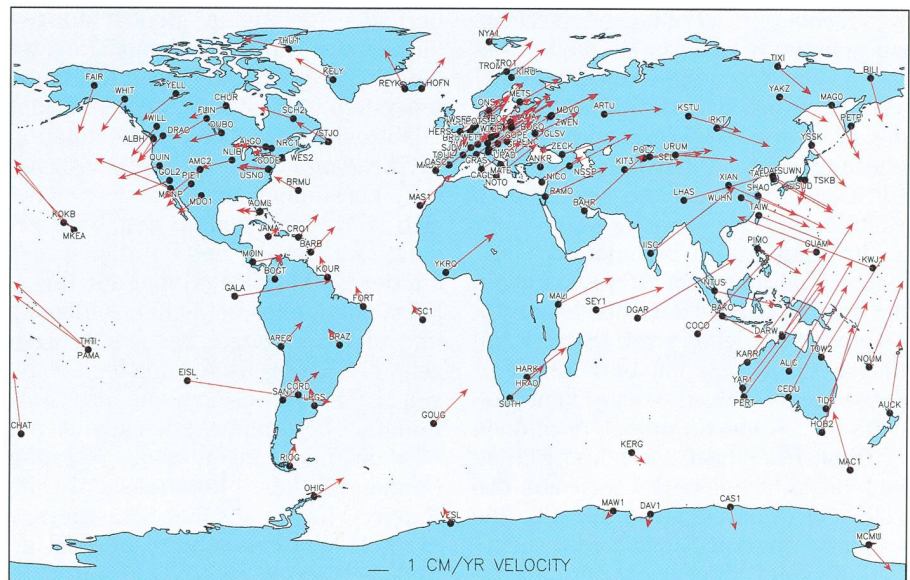
«Konkurrenten» von z.B. JPL/NASA oder ESA vergleichen lassen. Die Bernese GPS Software steht heute an über 200 Institutionen und Universitäten für präzise GPS-Auswertungen im Einsatz.

Die Bahnen der GPS Satelliten müssen jeden Tag neu gerechnet werden, da infolge von Störungen durch Sonne, Mond, Unregelmässigkeiten im Erdschwerefeld und sogar Strahlungsdruck der Sonne sich die Bahnen dauernd ändern. Tabelle 1 gibt einen Überblick über die wichtigsten Störkräfte und deren Wirkung auf die Bahn innerhalb eines Tages. Besonders heikel zu berechnen ist die kleine Kraft, welche das auf Solargenerator und Satellitenkörper auftreffende Sonnenlicht erzeugt. Hierzu sind genaue Kenntnisse über die Orientierung der Satelliten und die Oberflächeneigenschaften der beleuchteten Flächen nötig. Tatsächlich ist der Strahlungsdruck der limitierende Faktor bei der GPS-Bahnmodellierung. Trotzdem werden heute im IGS täglich Satellitenbahnen mit einer Genauigkeit von wenigen Zentimetern gerechnet, und das bei Satelliten mit rund sechs Metern Spannweite.

GPS hat neben geodätischen eine ganze Palette von weiteren Anwendungen. So können beispielsweise mittels der Satellitensignale Atomuhren auf ver-

schiedenen Kontinenten im Nanosekundenbereich miteinander verglichen werden. Da die Mikrowellensignale der Satelliten durch die Erdatmosphäre beeinflusst werden, kann einerseits die Refraktivität der Troposphäre und damit der Wasserdampfgehalt über den Messstationen bestimmt werden, andererseits kann der Elektronengehalt und

Figur 5: Horizontale Geschwindigkeitsvektoren von 49 GPS-Stationen des IGS Netzes.

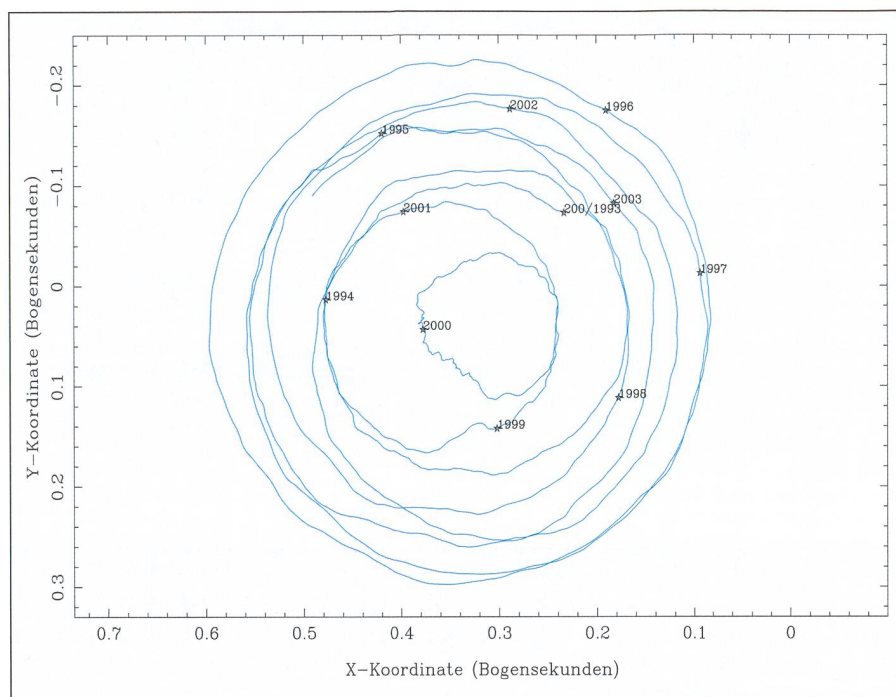


gung kann mit GPS präzise gemessen werden. Gezeiten wirken also nicht nur auf das Wasser, wie landläufig oft vermutet. Als zweiter, die Stationspositionen beeinflussender Effekt sei der Auflasteffekt durch ozeanische Gezeiten erwähnt: Infolge des Wasserdruckes auf die Erdkruste bei Flut kann sich eine Küstenstation im Extremfall um ± 10 cm in vertikaler Richtung bewegen. Schliesslich sei der atmosphärische Auflasteffekt erwähnt: Durch den sich ändernden Luftdruck und damit Druck auf die Erdkruste verändert sich die Höhe um rund 0.3 mm/mbar. Die Höhe kann sich dadurch durchaus um 1 cm verändern. Der Boden unter unseren Füßen ist also nicht wirklich starr. Alle die genannten Effekte können mit GPS gemessen werden, was eine Verbesserung der entsprechenden Modelle erlaubt, z.B. der Elastizität der Erdkruste.

Beim Anblick der Figur 5 stellt sich sofort die Frage nach dem Koordinatensystem, bezüglich welchem die Geschwindigkeiten dargestellt sind. Tatsächlich werde solche Resultate von den verschiedenen geodätischen Raumverfahren – SLR, GPS, VLBI – verwendet, um ein globales terrestrisches Koordinatensystem, das ITRF (International Terrestrial Reference Frame) zu definieren und zu kontrollieren, eine Aufgabe, die vom IERS (International Earth Rotation and Reference Systems Service) wahrgenommen wird.

Ein Koordinatensystem setzt sich aus zwei Teilen zusammen: (1) seiner Definition und (2) seiner Realisierung. Die Definition klärt Fragen zum Nullpunkt und Orientierung des Systemes. So soll sich z.B. die Erdkruste im Mittel gegenüber diesem Koordinatensystem nicht drehen. Die Realisierung des Systems befasst sich mit der Verfügbarkeit dieses Koordinatensystemes für Anwender aller Art, z.B. für Landesvermessungsämter. Hierzu werden die Koordinaten von wohldefinierten Stationen, z.B. permanenten GPS-Messpunkten des IGS mit hoher Präzision bestimmt und publiziert. Über feinmaschigere GPS-Netze werden diese Koordinaten weiterverbreitet.

In Zimmerwald befindet sich seit 1992 ein permanenter GPS-Empfänger, der von der Schweizerischen Landestopographie betrieben wird. Dieser Empfänger ist IGS-Station und Referenzpunkt für die schweizerische Landesvermessung. Seine Koordinaten sind im ITRF präzise eingemessen und werden laufend kontrolliert. Er realisiert das ITRF für die Landeskoordinaten. Die Landesvermessung LV95 wird heute mithilfe von GPS gemacht mit Zimmer-



Figur 6: Bewegung des Rotationspoles auf der Erdoberfläche von Juli 1993 bis April 2003, gemessen mit GPS. Der Pol bewegt sich in einem Kreis mit 15 m Durchmesser um den mittleren Pol (1 Bogensekunde entspricht 30 m auf der Erdoberfläche).

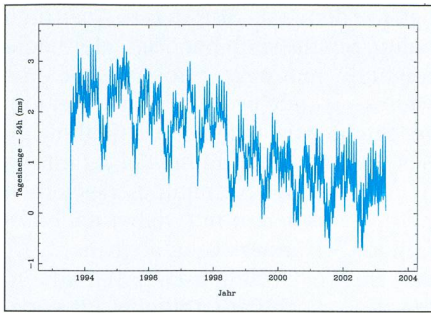
wald als Referenzpunkt. Der Zimmerwalder Empfänger ist auch Teil des Automatischen GPS-Netzes der Schweiz (AGNES), das ebenfalls von der Schweizerischen Landestopographie betrieben wird und heute aus 29 über das ganze Land verteilten permanenten GPS-Stationen besteht. Dieses Netz dient der Landesvermessung mit GPS, aber auch anderen Anwendungen wie Positionierung in Echtzeit z.B. im Katasterwesen, Navigation oder auch für meteorologische Anwendungen.

Variable Erdrotation

Beim Bestimmen der Bahnparameter für die GPS-Satelliten (im inertialen Raum gegeben) mittels von der Erdoberfläche getätigten Beobachtungen müssen die Transformationsparameter vom erdfesten ins raumfeste Koordinatensystem mitbestimmt werden. Damit ergibt sich die Möglichkeit, die Rotation der Erde und deren Unregelmässigkeiten zu bestimmen. Insbesondere eignet sich GPS zum Studium der Polbewegung (Wanderung der Rotationsachse auf der Erdoberfläche) und der Tageslänge mit hoher zeitlicher Auflösung und mit einer Genauigkeit von wenigen zehntel Millibogensekunden resp. wenigen zehn Mikrosekunden pro Tag. Ebenfalls bestimmt werden können mit GPS die Änderungen in der Nutation (Wanderung der Rotationsachse im Raum). Für die absolute Orientierung der Achse im Raum muss auf VLBI zurückgegriffen werden, denn nur VLBI

hat über die Vermessung von entfernten Quasaren mit radiointerferometrischen Techniken direkten Zugriff auf die absolute Orientierung der Erde im Inertialsystem.

Figur 6 zeigt die Bewegung der Rotationsachse am Nordpol von Sommer 1993 bis Frühjahr 2003. Der Pol wandert in einem Kreis mit variablem Radius um einen mittleren Pol innerhalb eines Gebietes mit einem Durchmesser von etwa 15 m. Von einem Tag zum nächsten verschiebt sich der Pol um bis zu 11 cm. Markierung des Rotationspoles mit einer Fahne im Eis ist somit nicht sehr sinnvoll. Einen ganzen Umlauf um den mittleren Pol vollführt der Rotationspol innerhalb von rund 430 Tagen, der sogenannten Chandlerschen Periode nach CHANDLER, der 1891 die Periode in der Polbewegung gefunden hat. Diese Polbewegung wurde bereits von EULER 1765 aufgrund seiner Studien der Kreisbewegung vorhergesagt. Die Periode beträgt nach dieser Rechnung allerdings 303 Tage. Der Ursprung dieser grossen Differenz zwischen der Eulerschen und der Chandlerschen Periode liegt in der Elastizität der Erde begründet. Dieser Unterschied ist einer der eindrucklichsten Beweise, dass wir auf einem elastischen Planeten und nicht auf einem starren Körper leben. «Unebenheiten» in der Polbewegung sowie der variable Radius können zu einem guten Teil auf Drehimpulsaustausch der festen Erde mit der Atmosphäre zurückgeführt werden.

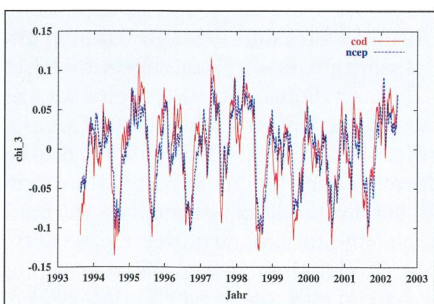


Figur 7: Tageslängenvariationen (minus 24 h) für ein Zeitintervall von Juli 1993 bis April 2003, gemessen mit GPS am CODE Rechenzentrum.

Die Tatsache, dass die Erde nicht starr ist, führt zusammen mit äusseren Kräften, ausgeübt durch Mond und Sonne, zu Variationen in der Tageslänge. Figur 7 zeigt die Tageslänge (minus 24 Stunden) als Funktion der Zeit über einen Zeitraum von fast zehn Jahren. Feststellen kann man Variationen mit unterschiedlichen Perioden. Vierzehntägliche Variationen in der Tageslänge mit einer Amplitude um 0.5 ms werden durch die Gezeitendeformation der Erde verursacht.

Deutlich sichtbar in Figur 7 ist eine Variation mit einer jährlichen Periode und einer Amplitude von etwa 1 ms. Diese saisonalen Schwankungen der Erdrotation können der Wechselwirkung der festen Erde und der Atmosphäre zugeschrieben werden. Wird nämlich der Drehimpuls der Erdrotation mit jenem der Atmosphäre verglichen, wobei letzterer anhand von globalen Daten von Wettermodellen aus Druckwerten und Windgeschwindigkeiten gerechnet werden kann, so stellt man eine sehr hohe Korrelation zwischen den beiden Zeitserien fest. Dies wird in Figur 8 gezeigt, in welcher einerseits die aus der mit GPS gemessenen Tageslängenva-

Figur 8: Vergleich der axialen Drehimpulsfunktionen der festen Erde bestimmt aus gemessenen Tageslängenvariationen (rot) und der Atmosphäre, gerechnet mithilfe von Druck- und Winddaten aus globalen Wettermodellen (grün). Ein Polynom zweiten Grades wurde von beiden Zeitreihen subtrahiert.



riation berechnete sogenannte axiale Drehimpulsfunktion (rote Kurve) zusammen mit der analogen Funktion gerechnet aus Wettermodellen (grüne Kurve) übereinandergelegt sind. Von beiden Funktionen wurde ein Polynom zweiten Grades subtrahiert. Bei der zweiten Funktion wurde das Vorzeichen gedreht, da die beiden Funktionen gegengleich laufen, so dass der totale Drehimpuls von fester Erde und Atmosphäre konstant bleibt. Die Übereinstimmung der beiden Funktionen ist frappant, so dass der Schluss gezogen werden kann, dass der fast ausschliessliche Grund der saisonalen Variationen der Tageslänge die Wechselwirkung der Erde mit der Atmosphäre ist. Ebenfalls mitbeteiligt an Tageslängenvariationen sind Änderungen ozeanischer Strömungen wie z.B. das Phänomen El Niño im südlichen Pazifik.

Figur 7 zeigt ein Trend zu kürzer werdenden Tagen. Diese dem generellen Trend entgegenlaufende Tendenz ist verursacht durch eine Variation der Tageslänge mit einer Periode in der Grössenordnung von wenigen Jahrzehnten, deren Ursache die (hauptsächlich magnetische) Wechselwirkungen zwischen dem Erdmantel und dem flüssigen Erdkern ist. Durch Flutreibung verlangsamt sich die Erdrotation sekular, was im Mittel zu einer Verlängerung der Tageslänge führt. Durch die Reibung wird Rotationsenergie dissipiert. Dabei übernimmt die Mondbahn den Drehimpuls, welcher dadurch der Erde verloren geht, was zu einer mittleren Vergrösserung des Abstandes zum Mond von 3.8 cm pro Jahr führt. Dieser Wert wurde bestätigt durch Laser-Distanzmessungen zum Mond. Der Effekt hat eine Zunahme der Tageslänge um 2.3 ms pro Jahrhundert zur Folge.

Eine sekulare Abnahme der Abplattung der Erde wirkt dem jedoch entgegen: Am Ende der letzten Eiszeit vor ca. 10000 Jahren sind im Norden gewaltige Eismassen verlorengegangen. Infolge des Wegfalls dieser Eislast hebt sich die Erdkruste in Skandinavien und Kanada noch heute um etwa 1 cm pro Jahr. Die sich dadurch effektiv verringernde Erdabplattung bewirkt, dass die tatsächliche Zunahme der Tageslänge lediglich 1.7 ms pro Jahrhundert beträgt. Diese kleine Zunahme der Tageslängen summiert sich. Der Tag hatte eine Länge von genau 24 Stunden um das Jahr 1820. Seit diesem Datum hat sich die Verlängerung der Tage auf rund 85 Sekunden aufaddiert! Kompensiert wird dieser «Rotationsrückstand» der Erde gegenüber der Atomzeit mit dem mehr oder weniger regelmässigen Einschieben von Schaltsekunden am 31. Dezember oder 31. Juni. Seit der Einführung der Schaltsekunden-

regelung im Jahre 1972 wurden bis heute 22 Schaltsekunden eingeschoben. Der IERS entscheidet aufgrund von Beobachtungen durch die raumgestützten geodätischen Techniken, wann eine Schaltsekunde nötig ist.

Neueste Entwicklungen

In diesem Artikel wurden einige von GPS-Messungen stammenden Resultate im Bereich Geodäsie/Geodynamik vorgestellt. Mit gleichem Recht hätten Resultate von SLR oder VLBI verwendet werden können. Die drei raumgestützten geodätischen Techniken ergänzen und kontrollieren sich gegenseitig sehr gut. GPS kann auf ein dichtes globales Messnetz zurückgreifen, von welchem ununterbrochene und zeitlich hochaufgelöste Messreihen geliefert werden; SLR weist eine geringe Empfindlichkeit auf systematische Fehler auf und profitiert von einer sehr guten Modellierbarkeit der Bahnen geodätischer Satelliten; VLBI schliesslich liefert den direkten Bezug zum Inertialsystem. Bestrebungen sind im Gange, die raumgestützten Messverfahren auf mathematisch korrekte Weise zu kombinieren, um so das Optimum für das Studium unseres Planeten Erde zu erreichen.

Mit neuen Satellitenmissionen, die bereits unterwegs oder geplant sind, soll das Gravitationsfeld mit bisher ungekannter räumlicher Auflösung vermessen werden. Erwähnt seien die Satelliten CHAMP (2000), GRACE (2001), GOCE (geplant für 2006), welche neuartige Instrumente wie Accelerometer oder Gradiometer sowie GPS-Empfänger mitführen. Höchste Ansprüche werden bei solchen Missionen selbstredend an die präzise Bahnbestimmung mit GPS gestellt.

Ein hochaufgelöstes genaues Modell für das Gravitationsfeld sowie dessen zeitliche Variationen ist unerlässlich für eine Vielzahl von wissenschaftlichen Anwendungen, von der Geophysik bis zur Ozeanographie. Kombination der Messungen der geodätischen Raumverfahren, der Resultate der Schwerfeld-Satellitenmissionen, von Schweremessungen am Boden, Messungen der Höhe des Meeresspiegels von Satelliten aus mit Radar (Altimetrie) und vieler weiterer geodätischer und geophysikalischer Messresultate tragen dazu bei, ein konsistentes Bild zu erhalten über die Abläufe in der Erde, an deren Oberfläche, in den Ozeanen und in der Atmosphäre. Dabei werden Satelliten auch in Zukunft eine wichtige Rolle spielen.

DR. URS HUGENTOBLER

Astronomisches Institut, Universität Bern

Sidlerstrasse 5, CH-3012 Bern

E-mail: urs.hugentobler@aiub.unibe.ch

Wiedergeburt der traditionellen Himmelsüberwachung und Astrometrie dank moderner Techniken

THOMAS SCHILDKNECHT

Die Suche nach «neuen» Objekten am Himmel und die genaue Vermessung derer Positionen gegenüber bekannten Objekten sind beides klassische Aufgaben der Astronomie. In den achtziger Jahren des letzten Jahrhunderts stiessen die damals dazu verwendeten Instrumente und Techniken jedoch an ihre Grenzen. In der Folge wurden diese Aufgaben als «uninteressant» eingestuft und gerieten innert weniger Jahre nahezu in Vergessenheit. In diesem Artikel möchten wir jedoch deren Wiedergeburt anhand aktueller Beispiele aus der Forschung aufzeigen.

Die klassische «Himmelsüberwachung»

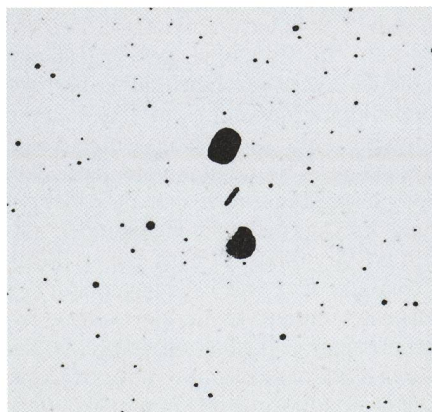
Seit jeher haben Menschen den Himmel sorgfältig beobachtet und nach Veränderungen und «Erscheinungen» abgesucht. Sie stellten etwa fest, dass einige wenige Objekte gegenüber der grossen Mehrheit der Sterne «wandeln», und gaben ihnen entsprechend den Namen «Wandelsterne» oder lateinisch «Planetae». Andere Erscheinungen tauchen sozusagen aus dem Nichts auf, wie etwa «neue» Sterne, sogenannte Novae (lat. Neue) und falls besonders hell, sogenannte Supernovae. Einige Sterne schienen auch mehr oder weniger regelmässig in ihrer Helligkeit zu schwanken. Eine besonders eindruckliche Erscheinung am Himmel stellte sicher jeweils das Auftauchen eines «neuen» Kometen dar. Heute wissen wir, dass «neu» in diesem Zusammenhang natürlich nicht unbedingt meint, dass Objekte an und für sich plötzlich «neu» entstehen, sondern dass sie für uns «neu» beobachtbar werden.

Diese «Überwachung» des Himmels wurde von den Astronomen vorerst rein visuell, später aber auch mit Hilfsmitteln, insbesondere Teleskopen, systematisch vorgenommen. Mit dem Aufkommen der Photographie konnten noch einmal deutlich schwächere Objekte beobachtet und zudem «objektiv» festgehalten werden. Im Laufe des letzten Jahrhunderts wurden dazu spezielle astronomische «Phototeleskope», sogenannte Schmidt-Kameras, gebaut. Diese Kameras können Himmelsgebiete von bis zu zehn Grad Durchmesser auf eine einzelne Photoplatte abbilden, wohingegen astronomische Teleskope im allgemeinen Gesichtsfelder von deutlich weniger als einem Grad Durchmesser aufweisen. Das Astronomische Institut der Universität Bern (AIUB) hat mit ei-

ner Schmidt-Kamera im Observatorium Zimmerwald während vier Jahrzehnten eine erfolgreiche Himmelsüberwachung durchgeführt. Zwischen Ende der fünfziger Jahre und Mitte der neunziger Jahre wurden über zehntausend Filme belichtet. Die «Ernte» lässt sich sehen, umfasst sie doch 49 Supernovae, gegen hundert Kleinplaneten und vier periodische Kometen! Fig. 1 zeigt einen Ausschnitt einer Aufnahme der Zimmerwalder Schmidt-Kamera vom 5. Dezember 1972. Die kurze Strichspur zwischen den beiden Markierungen stammt vom in Zimmerwald entdeckten Kleinplaneten Sisyphus.

Diese klassische photographische Technik war sehr zeit- und arbeitsaufwändig. Die Filme wurden am Teleskop circa fünfzehn bis zwanzig Minuten belichtet. Anschliessend mussten sie entwickelt, fixiert, gewässert und getrock-

Fig. 1: Ausschnitt einer Aufnahme der Zimmerwalder Schmidt-Kamera vom 5. Dezember 1972. Die kurze Strichspur zwischen den beiden Markierungen stammt vom in Zimmerwald entdeckten Kleinplaneten Sisyphus.



net werden, was Stunden in Anspruch nahm. Schliesslich benötigte der nachfolgende manuelle Suchprozess eine weitere Stunde pro Aufnahme. Bei dieser Suche wird eine neue Aufnahme eines bestimmten Himmelsfeldes mit einer früheren Aufnahme desselben Feldes verglichen und dabei nach allfälligen Veränderungen abgesucht. Es gibt im Wesentlichen zwei Techniken, um dies zu bewerkstelligen. Im sogenannten Blinkkomparator werden abwechselungsweise das Bild der einen oder der anderen Aufnahme in ein Binokular eingespiegelt. Objekte, die sich zwischen den Aufnahmen bewegt haben oder nur auf einer Aufnahme sichtbar sind, werden dabei als blinkende Punkte sichtbar. Bei der zweiten Technik werden die beiden Aufnahmen leicht verschoben übereinander gelegt, so dass alle Objekte, die sich weder bewegt noch ihre Helligkeit deutlich verändert haben, als Paare von Punkten erscheinen. Die Aufgabe besteht nun darin, nach vereinzelt Punkten, die zu keinem Paar gehören, zu suchen. Beide Techniken erfordern höchste Konzentration eines geübten Beobachters, und die Erfolgsraten sind damit stark «subjektiv».

Die Revolution der digitalen Bildaufnahme

Mitte der achtziger Jahre wurde die photographische Technik in der Astronomie innerhalb weniger Jahre durch bildgebende, digitale Detektoren abgelöst. Diese sogenannten «Charge Coupled Devices», oder kurz CCDs, wiesen gegenüber photographischen Platten oder Filmen eine Reihe von Vorteilen auf. Der herausragendste dürfte wohl ihre enorm hohe Lichtempfindlichkeit sein. Während bei photographischen Emulsionen im besten Fall einige wenige Prozent der einfallenden Photonen eine Schwärzung hinterlassen, so registrieren CCDs bis zu neun von zehn einfallenden Lichtteilchen. CCDs bestehen aus einer Matrice von lichtempfindlichen Bildelementen auf einem Siliziumplättchen. Die heute in der Astronomie verwendeten CCDs besitzen bis zu mehreren zehn Millionen Bildelemente, sogenannte «Pixel». Beim elektronischen «Auslesen» dieser Detektoren wird die in den einzelnen Pixel durch Lichteinfall erzeugte Ladung gemessen und ihr eine Zahl zugeordnet. Ein «Bild» ist damit also vorerst eine Menge von Zahlen im Speicher eines Computers. Genau dieses Vorliegen der Bildinformation in «digitaler» Form ermöglichte die direkte Verarbeitung von astronomischen Aufnahmen mittels Computern. Fig. 2 zeigt einen der am Zimmerwalder Teleskop eingesetzten CCD Detektoren.

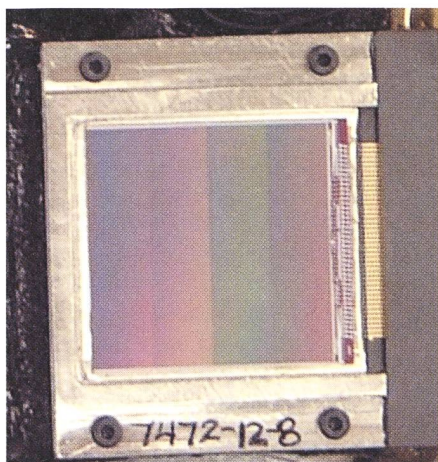


Fig. 2: Einer der am Zimmerwalder Teleskop ZIMLAT eingesetzten CCD Detektoren. Der Detektor besitzt 2048 x 2048 Bildelemente und hat einen Durchmesser von circa 2.5 Zentimetern.

Der Detektor besitzt 2048 x 2048 Pixel und hat einen Durchmesser von circa 2.5 Zentimetern.

Neben diesen überzeugenden Vorteilen besitzen CCDs gegenüber photographischem Material auch einige Nachteile. Hier wäre etwa die langfristige Speicherung der riesigen Datenmengen zu nennen. Während photographische Platten und Filme bei einigermaßen sorgfältiger Lagerung ohne weiteres hundert Jahre überdauern, kann niemand garantieren, dass unsere heutigen Speichermedien für elektronische Daten auch nur wenige Jahrzehnte überleben, oder dass es dannzumal noch entsprechende Lesegeräte geben wird. Ein weiterer wichtiger Nachteil ist die auf wenige Quadratzentimeter beschränkte Grösse der CCDs. Dies hatte gravierende Konsequenzen für die «Weitfeld-Astronomie», war doch einerseits die photographische Technik überholt, andererseits konnten die «kleinen» CCD-Detektoren die grossformatigen Filme und Photoplatten bei weitem nicht ersetzen. Als Folge davon wurden in den neunziger Jahren die meisten Schmidt-kameras ersatzlos stillgelegt! Die Entwicklungen in

der Detektor- und der Computertechnik lassen jedoch hoffen, dass dies nicht für immer so bleiben wird.

Die moderne Version der Himmelsüberwachung

Seit anfangs der neunziger Jahre arbeitet die Gruppe «optische Astrometrie» am AIUB mit CCD-Detektoren und hat dabei ein grösseres Softwarepaket zur Himmelsüberwachung entwickelt. Die Aufgabe bleibt im Prinzip die Gleiche wie im klassischen Fall, nämlich die Unterschiede zweier oder mehrerer Aufnahmen der gleichen Himmelsregion zu identifizieren. Die Schwierigkeit besteht dabei darin, die «wesentlichen» Unterschiede — zum Beispiel hervorgerufen durch ein Objekt, das nur auf einer Aufnahme sichtbar ist — von «kleinen», zufälligen, durch «Rauschen» bedingten Unterschieden trennen zu können.

Eine auf den ersten Blick bestehend einfache Methode besteht darin, zwei Aufnahmen rechnerisch voneinander zu subtrahieren. Vorausgesetzt, dass die Bilder unter genau den gleichen Bedingungen aufgenommen wurden (exakt gleicher Himmelsausschnitt, gleiche Belichtungszeit, etc.), sollten dabei auf dem Differenzbild alle Objekte, die weder ihre Position noch ihre Helligkeit verändert haben, nicht mehr vorhanden sein. Mit ande-

ren Worten sollten nur die Unterschiede übrig bleiben. Leider ist es in der Praxis unmöglich, die genannte Voraussetzung einzuhalten. Kleinste Änderungen in der Belichtungszeit, die Unruhe der Atmosphäre, sowie das unvermeidbare Rauschen der Lichtquellen selber führen unweigerlich dazu, dass ein solches Differenzbild immer auch Reste der Objekte, die sich nicht verändert haben, enthält. In einem weiteren Schritt muss daher versucht werden, diese «Reste» zu identifizieren (wie unterscheiden sie sich von «wahren» Änderungen?). Zuletzt kann auf dem gesäuberten Differenzbild nach übrigbleibenden Objekten, die dann hoffentlich Änderungen am Himmel entsprechen, gesucht werden.

Eine andere, völlig unterschiedliche Methode umgeht einen Teil dieser Schwierigkeiten. Dabei wird vorerst versucht, alle Objekte auf beiden Aufnahmen unabhängig voneinander zu finden. Anschliessend werden die beiden Listen von Objekten miteinander verglichen und die gemeinsamen Objekte eliminiert. Dieser Zugang umgeht scheinbar die Anforderung, dass beide Aufnahmen unter exakt identischen Bedingungen aufgenommen werden müssen. Aber auch hier können kleinste Unterschiede in den Aufnahmebedingungen zum Beispiel dazu führen, dass eine

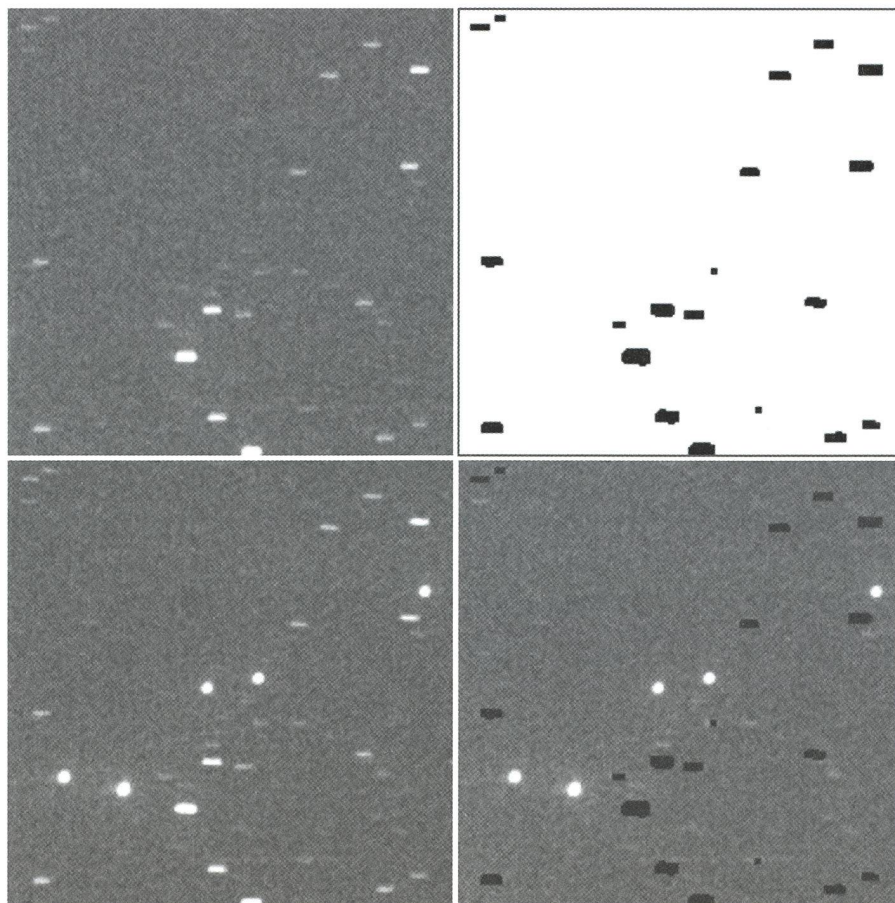


Fig. 3: Illustration der «Maskentechnik» bei der Himmelsüberwachung. Auf dem Referenzbild (oben links) werden alle Objekte identifiziert und eine entsprechende Maske (oben rechts) hergestellt. Von einem Suchbild (unten links) wird dann das Referenzbild subtrahiert und das resultierende Differenzbild zusätzlich mit der Maske abgedeckt. Übrig bleiben Objekte, die auf dem Suchbild «neu» sind, in unserem Beispiel (unten rechts) fünf geostationäre Satelliten.

Quelle auf der einen Aufnahme als einzelnes Objekt erscheint, während sie auf der anderen Aufnahme in zwei Objekte zerfällt.

Angesichts dieser Schwierigkeiten wurde versucht, die Stärken der oben genannten Methoden zu kombinieren. Die neu entwickelte Methode beruht im wesentlichen darauf, in einem Referenzbild sämtliche Objekte zu finden und diese dann bei der Auswertung der Suchbilder als bekannt vorauszusetzen. Das Referenzbild sollte dabei von möglichst hoher Qualität sein. Dies wird durch Kombination einer Reihe von Einzelaufnahmen desselben Himmelfeldes erreicht, wobei sich zufällige Unterschiede der Aufnahmen (Rauschen) ausmitteln. Der Vorgang ist in Fig. 3 zusammengefasst. Auf dem Referenzbild (Fig. 3, oben links) werden alle Objekte identifiziert und eine entsprechende Maske (Fig. 3, oben rechts) hergestellt. Von einem Suchbild (Fig. 3, unten links) wird dann das Referenzbild subtrahiert und das resultierende Differenzbild zusätzlich mit der Maske abgedeckt. Übrig bleiben Objekte, die auf dem Suchbild «neu» sind, in unserem Beispiel (Fig. 3, unten rechts) fünf geostationäre Satelliten.

Eine effiziente Implementierung dieser Methode erlaubt es nun, weitgehend automatisierte Himmelsüberwachungen durchzuführen. Im Gegensatz zur klassischen Methode ist dabei die Detektionseffizienz auch nicht mehr vom Beobachter und dessen «Tagesform» abhängig.

Astrometrie

Eine der ersten Fragen, die sich bei der Entdeckung eines «neuen» Objektes stellt, ist sicher «wo am Himmel» sich das Objekt befindet. Wir möchten dem Objekt, ähnlich einem Punkt auf einer Landkarte, Koordinaten in einem himmelsfesten Koordinatensystem zuordnen können. Dazu wird das Objekt richtungsmässig gegenüber Referenzsternen mit bekannten Koordinaten eingemessen. Die Bestimmung solcher Koordinaten wird Astrometrie genannt.

In einem ersten Schritt müssen die Lichtschwerpunkte des Objektes und der Referenzsterne im Koordinatensystem des CCD-Detektors, das heisst gegenüber dem Gitter der Bildelemente, bestimmt werden. Anschliessend kann mit Hilfe der bekannten Himmelskoordinaten der Referenzsterne eine Abbildungstransformation zwischen den Richtungen am Himmel und deren Abbildern auf dem Detektor bestimmt werden. Zuletzt wird diese Transformation benutzt, um die Himmelskoordinaten des neuen Objektes ausgehend von den gemessenen CCD-Koordinaten zu be-

rechnen. Hier zeigt sich ein weiterer Vorteil der digitalen Verarbeitung. Während im klassischen Fall die Photoplaten und Filme von Hand in einer mechanischen Messmaschine ausgemessen wurden, geschieht dies bei digitalen Bildern rechnerisch im Computer. Insbesondere die Bestimmung der Lichtschwerpunkte ist kein von einem Beobachter subjektiv vorgenommener und damit unwillkürlich mit einer Reihe von systematischen Fehlern behafteter Prozess mehr.

So bestimmte Richtungen, oft auch «astrometrische Positionen» oder «astrometrische Örter» genannt, dienen nicht nur dazu, die Position eines Objektes zu einem bestimmten Zeitpunkt anzugeben, sondern sind damit auch die Grundlage für die Beschreibung der Bewegung von Himmelskörpern. Beispiele dafür sind etwa die Bestimmung von Bahnen von Kleinplaneten und Kometen, aber auch von künstlichen Erdsatelliten.

Mit dem Aufkommen von Methoden zur direkten Distanzbestimmung für Körper im Planetensystem (insbesondere Radar) sind Richtungsbeobachtungen ab Mitte der siebziger Jahre für diese Objekte etwas in Vergessenheit geraten. Aber auch die Vermessung der Positionen von Sternen stiess an prinzipielle Grenzen. Gegeben durch die Luftunruhe und durch die sich ständig ändernde Refraktion in der Atmosphäre konnten die Positionen der Referenzsterne mit bodengestützten Beobachtungen nicht mehr genauer bestimmt werden. Die Situation änderte sich erst Mitte der neunziger Jahre mit den Resultaten des sehr erfolgreichen Astrometriesatelliten HIPPARCOS. Auf einen Schlag standen nun die Positionen von über hunderttausend Sternen mit einer hundertfach grösseren Genauigkeit als bisher zur Verfügung. Damit ergaben sich, für viele unerwartet, neue Möglichkeiten für die bodengestützte CCD-Astrometrie. Zum einen kann mit CCD-Astrometrie die hohe Genauigkeit der Referenzsternpositionen über kurze Winkeldistanzen sehr wohl auf unbekannte Objekte oder andere Sterne übertragen werden. Zum anderen war es dringend nötig, den HIPPARCOS-Katalog durch Einmessung weiterer Sterne zu «verdichten». In den üblichen, relativ kleinen Gesichtsfeldern der astronomischen Teleskope ist im Schnitt nämlich überhaupt kein HIPPARCOS-Stern vorhanden!

Jagd nach gefährlichen Kleinplaneten und Kometen

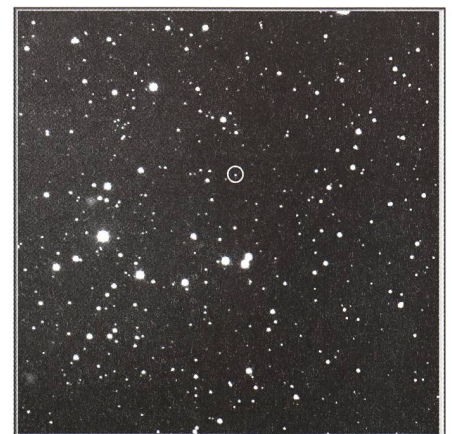
Seit langem ist bekannt, dass «herumvagabundierende» kleine Körper im Sonnensystem, wie Kleinplaneten und

Kometen, auch mit den grösseren Körpern kollidieren können. Die kraterübersäte Oberfläche unseres Mondes gibt dazu ein eindrückliches Beispiel ab. Auch auf der Erde sind viele Einschlagkrater bekannt. Die Wissenschaft ist heute der Meinung, dass solche Einschläge die Entwicklung der Biosphäre massgeblich beeinflusst haben. Insbesondere sind solche Ereignisse höchstwahrscheinlich auch für die bekannten Massensterben in der Erdgeschichte verantwortlich.

Die Möglichkeit solcher Einschläge wurde im Juli 1994 bei der Kollision des Kometen Shoemaker-Levy mit Jupiter weiten Teilen der Bevölkerung eindrücklich in Erinnerung gerufen. Als Folge davon wurden weltweit Programme zur Suche und Überwachung potentiell gefährlicher Körper im Sonnensystem initiiert. Die Suche sollte sich also auf Objekte, die der Erde nahe kommen können, sogenannte «Near Earth Objects» (NEOs), konzentrieren. So hat sich das Amerikanische Programm zum Ziel gesetzt, innerhalb von zehn Jahren 90% aller NEOs mit Durchmessern grösser als einem Kilometer zu finden und ihre Bahnen regelmässig zu verfolgen. Um dieses Ziel zu erreichen, werden sowohl Suchbeobachtungen an Teleskopen mit grossen Gesichtsfeldern als auch Nachfolgebeobachtungen zur Bestätigung von Entdeckungen und zur Verbesserung der Bahnen neu gefundener NEOs benötigt.

Die von uns entwickelten Techniken und das entsprechende Softwarepaket sind für diese Anwendung bestens geeignet. Für eine effiziente Suche sind die im Observatorium Zimmerwald zur Verfügung stehenden Gesichtsfelder jedoch zu klein. Zur Zeit werden NEO-

Fig. 4: Zimmerwalder CCD-Aufnahme des NEO 2001WA25 vom 4. Januar 2002. Der Kleinplanet ist das schwache Objekt im weissen Kreis ($m_v \sim 18.5$; Ausschnitt circa 12×12 Bogenminuten).



Suchszenarien und die entsprechende Auswertesoftware in Zusammenarbeit mit der Europäischen Weltraumagentur ESA am ESA 1-Meter Teleskop in Teneriffa getestet (siehe dazu weiter unten). Mit dem 1-Meter ZIMLAT Teleskop in Zimmerwald werden aber regelmässig Nachfolgebeobachtungen schwacher NEOs durchgeführt. Fig. 4 zeigt eine Zimmerwalder CCD-Aufnahme des NEO 2001WA25 vom 4. Januar 2002. Der Kleinplanet ist das schwache Objekt im weissen Kreis ($m_v \sim 18.5$).

Suche nach Raumschrott

Die Raumfahrt hat seit dem Start des ersten Satelliten unweigerlich ihren Abfall, oft auch als Raumschrott (engl. space debris, od. orbital debris) bezeichnet, im Weltraum hinterlassen. Bei jedem Start dient letztlich nur ein kleiner Bruchteil der in den Raum beförderten Masse als eigentliche Nutzlast. Der weitaus grösste Teil der Masse wird schon nach wenigen Minuten zu Raumschrott. Die heute gebräuchlichen «Wegwerf-Trägerraketen» hinterlassen meist ihre Oberstufen, Nutzlastverkleidungen, Adapterringe, etc. in einer Erdumlaufbahn. Auch die eigentliche Nutzlast wird natürlich nach Erfüllung ihrer Mission zu Raumschrott. Es ist daher nicht erstaunlich, dass die heute knapp 500 aktiven Satelliten nur 5 Prozent der bekannten künstlichen Objekte grösser als 10 bis 20 Zentimeter darstellen.

Raumschrott stellt in erster Linie für die Raumfahrt selber ein Problem dar. Die Schrotteile sind vor allem wegen ihrer hohen Relativgeschwindigkeit in Bezug auf andere Objekte in einer Umlaufbahn gefährlich. Im erdnahen Raum bewegen sich Objekte mit einer Geschwindigkeit von 7 bis 8 Kilometern pro Sekunde (etwa 27 000 Kilometer pro Stunde). Entsprechend hoch sind die bei einer allfälligen Kollision freiwerdenden Energien (die Energie wächst mit der Geschwindigkeit im Quadrat)! Die Energie eines 1 Millimeter grossen Aluminiumkugelhens bei 10 Kilometer pro Sekunde entspricht etwa der Energie einer Bowlingkugel bei einer Geschwindigkeit von 520 Kilometer pro Stunde! Im Mittel begegnen sich Objekte in erdnahen Umlaufbahnen mit etwa 10 Kilometern pro Sekunde Relativgeschwindigkeit, bei einem «Frontalzusammenstoss» können aber Geschwindigkeiten bis zu 16 Kilometern pro Sekunde vorkommen.

Im Auftrage der ESA setzten wir das Softwarepaket zur Himmelsüberwachung für die Suche nach Raumschrott in hohen Bahnen, insbesondere im geostationären Ring auf 36000 Kilometer Höhe, ein. Für die Beobachtungen wird

das 1-Meter Teleskop der ESA auf der Kanarischen Insel Teneriffa verwendet. Das Teleskop befindet sich auf 2500 Metern über Meer am Rande des 3700 Meter hohen Vulkans Teide (Fig. 5). Das Teleskop ist ein klassisches Ritchey-Chrétien-System auf einer englischen Montierung (Fig. 6). Am hinteren Ende des Tubus ist die CCD-Kamera und ein Teil der dazugehörigen Elektronik sichtbar. Die Kamera enthält ein Mosaik von vier CCD-Detektoren, die je 2048 x 2048 Bildelemente besitzen. Um das störende, in den Detektoren erzeugte Hintergrundsignal möglichst tief zu halten, werden die CCDs mit flüssigem Stickstoff auf -120° Celsius gekühlt.

Objekte im geostationären Ring bewegen sich gegenüber den Sternen scheinbar mit etwa fünfzehn Bogensekunden pro Sekunde. Um die Empfindlichkeit für die gesuchten Schrottobjekte zu steigern, wird das Teleskop während den Aufnahmen mit dieser Geschwindigkeit bewegt. Sterne hinterlassen daher auf den Bildern Strichspuren, während Objekte im geostationären Ring mehr oder weniger punktförmig abgebildet werden. Die Belichtungszeiten dürfen nicht mehr als einige Sekunden betragen, um die Strichspuren nicht allzu lange werden zu lassen. Fig. 7 zeigt einen kleinen Ausschnitt aus einer Suchaufnahme von Teneriffa. Die mit Pfeilen markierten Objekte (astronomische Helligkeit $m_v=19$) sind kleine Schrotteile von ca. 20 Zentimetern Durchmesser in einem Abstand von 36 000 Kilometern!

Die Auswertung der Suchaufnahmen erfolgt in Echtzeit, parallel zu den Beobachtungen. In Anbetracht der grossen Datenmengen – 120 Aufnahmen pro Stunde, circa 8 Gigabyte Daten pro Nacht – war es unabdingbar, den Auswerteprozess weitgehend zu automatisieren. Fig. 8 zeigt die Helligkeitsverteilung (in astronomischen Magnituden) aller während den 80 Beobachtungsnächten im Jahre 2002 gefundenen Objekte. Blaue Balken («correlated») re-

Fig. 5: Kuppel des ESA 1-Meter Teleskops in Teneriffa.

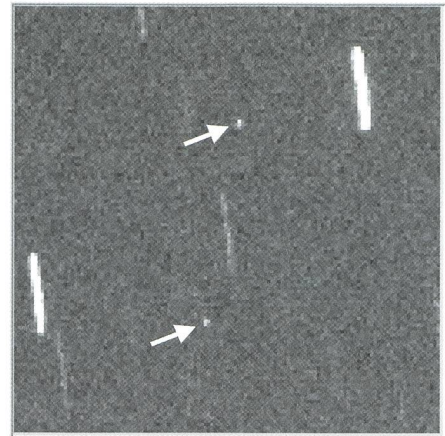
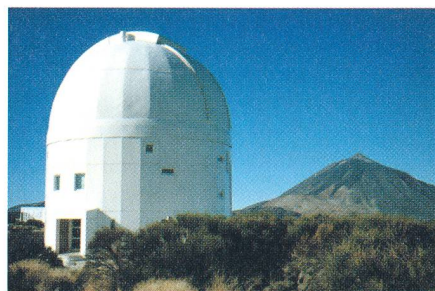
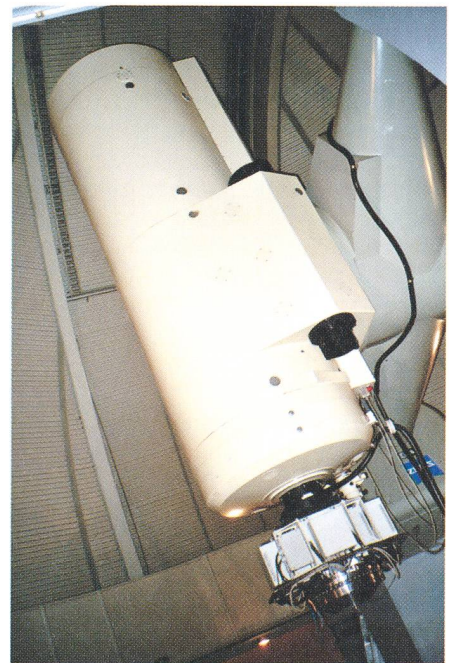


Fig. 7: Kleiner Ausschnitt aus einer Suchaufnahme von Teneriffa. Die mit Pfeilen markierten Objekte (astronomische Helligkeit $m_v=19$) sind kleine Schrotteile von ca. 30 Zentimetern Durchmesser in einem Abstand von 36 000 Kilometern!

präsentieren bekannte Satelliten und Raketenoberstufen, während unbekannte Objekte (Raumschrott) mit roten Balken («uncorrelated») dargestellt sind. Zusätzlich sind die instrumentelle Empfindlichkeit (blaue Kurve) und die entsprechenden Objektdurchmesser für einige Magnituden angegeben. Die bekannten Objekte sind um Magnitude 12.5 gruppiert, was dem für diese Objekte erwarteten mittleren Durchmesser von einigen Metern entspricht. Die grosse Population von unbekannten Teilen war unerwartet und ist erst mit diesen

Fig. 6: Das ESA 1-Meter Teleskop. Ein klassisches Ritchey-Chrétien-System auf einer englischen Montierung.



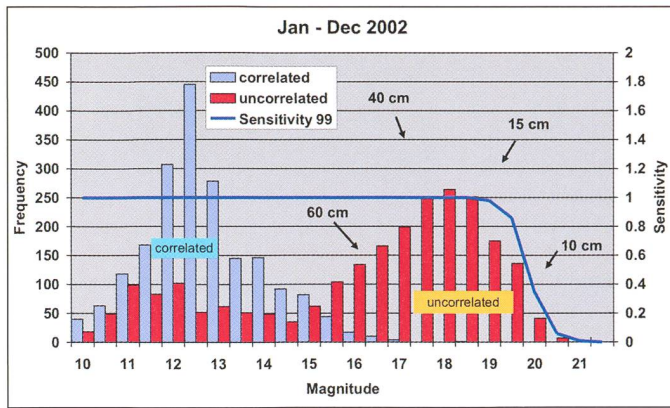


Fig. 8: Helligkeitsverteilung (in astronomischen Magnituden) aller während den 80 Beobachtungsnächten im Jahre 2002 gefundenen Objekte. Blaue Balken («correlated») repräsentieren bekannte Satelliten und Raketenoberstufen, während unbekannte Objekte (Raumschrott) mit roten Balken («uncorrelated») dargestellt sind.

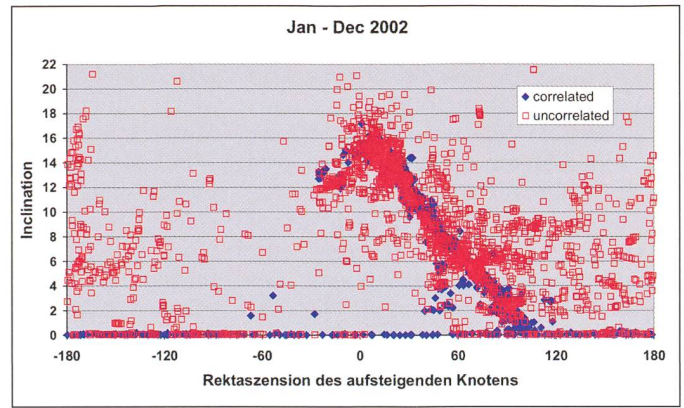


Fig. 9: Verteilung der Inklination gegenüber der Rektaszension des aufsteigenden Knotens für alle im Jahre 2002 gefundenen Objekte. Bekannte Objekte sind blau und unbekannte Objekte rot dargestellt.

Messungen entdeckt worden! Scheinbar hat die Verteilung der unbekannten Objekte ein Maximum um Magnitude 18, entsprechend einem Durchmesser von ungefähr 30 Zentimeter. Die scheinbare Abnahme der Population für Teile kleiner als 30 Zentimeter ist ausschliesslich durch die begrenzte Empfindlichkeit des Messsystems (blaue Kurve) gegeben, das heisst, dass die wahre Anzahl der Teile bei kleineren Durchmessern ohne weiteres noch zunehmen könnte.

Für alle gefundenen Objekte werden auch Bahnen bestimmt. Fig. 9 zeigt die Verteilung der Inklinationen gegenüber den Rektaszensionen der aufsteigenden Knoten für alle im Jahre 2002 gefundenen Objekte. Wiederum sind bekannte Objekte blau und unbekannte Objekte rot dargestellt. Die Hauptsignatur, von der Mitte oben nach rechts unten verlaufend, rührt von der wohlbekannten Präzession der Bahnebenen im kombinierten Schwerfeld von Erde, Mond und Sonne her. Auffallend ist jedoch die deutlich andere Verteilung der unbekannten Objekte im Vergleich zu den bekannten. Neben einem verteilten «Hintergrund» gibt es deutlich konzentrierte «Wolken». Diese Wolken, zusammen mit der grossen Anzahl kleiner Teile, sind eindeutiges Indiz, dass es mehrere Explosionen von Satelliten oder Raketenoberstufen im geostationären Ring gegeben haben muss!

Bahnen künstlicher Satelliten

Die Positionen künstlicher Satelliten werden heute hauptsächlich mit Hilfe ihrer Mikrowellen-Datenverbindung gemessen. Im einfachsten Fall wird die Laufzeit eines Signals, das von einer Bodenstation zum Satelliten und von diesem mittels eines sogenannten Transponders wieder zurück zur Bodenstation gesendet wird, gemessen.

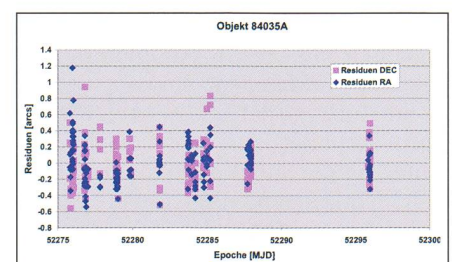
Diese Laufzeit wird dann in eine Distanz umgerechnet. Auf ähnlichem Weg kann auch die durch die Bewegung des Satelliten erzeugte Frequenzverschiebung der Trägerwelle des Kommunikationssignals, die sogenannte Dopplerverschiebung, gemessen werden. Aus dieser Messung kann die Relativgeschwindigkeit zwischen Satellit und Bodenstation bestimmt werden. Nur wenige Satelliten, deren Aufgaben speziell hohe Anforderungen an ihre Bahnengenauigkeit stellen, sind mit zusätzlichen Navigationssystemen, wie zum Beispiel GPS-Empfängern oder Retroreflektoren für die Laser-Distanzmessungen, ausgerüstet.

Kenntnis der genauen Bahn ist aber oft auch für die Betreiber eines Satelliten wichtig. So kann dadurch etwa der Treibstoffverbrauch zur Beibehaltung einer bestimmten Position im geostationären Ring minimiert werden. Ebenso sind genau bekannte Bahnen Voraussetzung, um in einem dicht besetzten Gebiet des geostationären Rings Kollisionen zwischen den Satelliten zu vermeiden. Die für solche Zwecke üblichen Transpondermessungen weisen, wegen unbekannter Verzögerungen in den Transpondern, zum Teil beträchtliche Fehler auf. Optische CCD-Astrometrie kann hier helfen, diese Systeme zu kalibrieren und in speziellen Fällen die Bahnbestimmung für geostationäre Objekte wesentlich zu verbessern. Die Genauigkeit einer astrometrischen Einzelmessung beträgt ein bis zwei zehntel Bogensekunden, was in der Distanz des geostationären Rings von 36'000 Kilometern etwa zwanzig bis vierzig Metern entspricht. Haben Satelliten einmal das Ende ihrer Lebensdauer erreicht und werden sie danach abgestellt oder fallen sie selbständig aus, so sind optische Beobachtungen meist das einzige Mittel,

um ihre Bahnen weiter zu verfolgen (Radar-messungen sind in grossen Höhen sehr aufwändig oder unpraktikabel).

Das Verhalten der Bahnen von aktiven und passiven Satelliten kann aber auch zur Bestimmung von Parametern des Erdgravitationsfeldes verwendet werden. Es zeigt sich, dass nicht mehr kontrollierte, «tote» geostationäre Objekte besonders gut geeignet sind, um längenabhängige Variationen der Erdbabplattung zu messen. In Zimmerwald werden daher einige interessante Objekte über Jahre hinweg regelmässig beobachtet und astrometrisch vermessen. Fig. 10 zeigt die Abweichungen von astrometrischen Messungen von einer durch diese Beobachtungen bestimmten Bahn für das geostationäre Objekt 84035A. Damit wird die hohe Beobachtungspräzision von circa 0.15 Bogensekunden pro Einzelmessung illustriert. Zur Erinnerung: ein Winkel von 0.1 Bogensekunden entspricht dem Durchmesser eines Zehnrapenstückes betrachtet aus 40 Kilometer Entfernung.

Fig. 10: Abweichungen von astrometrischen Messungen von einer durch diese Beobachtungen bestimmten Bahn für das geostationäre Objekt 84035A. Damit wird die hohe Beobachtungspräzision von circa 0.15 Bogensekunden pro Einzelmessung illustriert.



Realisierung von Referenzsystemen

Zur Beschreibung der Bewegung von Körpern benötigt man im Allgemeinen ein «ideales» Koordinatensystem, ein sogenanntes Inertialsystem. Ein solches System erfährt keine Beschleunigung und rotiert nicht. Die grossräumige Realisierung eines Inertialsystems ist alles andere als trivial. So werden etwa Distanzmessungen zu Satelliten von der Erde aus und damit in einem rotierenden System durchgeführt. Aber gegenüber welcher Referenz messen wir die Rotation der Erde? Traditionell erfolgten diese Messungen gegenüber den Sternen. Ein Ensemble von Sternen bildet in erster Näherung zwar ein gutes Inertialsystem, aber bei genauerer Betrachtung stellen wir fest, dass sämtliche Sterne an der globalen Rotation unserer Milchstrasse teilnehmen. Nach einem von ERNST MACH postulierten Prinzip stellen ferne kosmische Massen eine ideale Realisierung eines Inertialsystems dar. Solche Objekte werden heute in Form von Quasaren mittels Radioteleskopen beobachtet. Mit der Technik der «Very Long Baseline Interferometry» (VLBI) werden die Positionen dieser Quellen bestimmt und damit die Referenz für ein Inertialsystem, das internationale himmelfeste Koordinatensystem (ICRF), definiert. Gleichzeitig wird natürlich auch die Rotation der Erde in diesem Referenzsystem gemessen. Da die meisten Quasare im optischen Spektralbereich sehr schwach sind, ist es schwierig, die wesentlich besser zugänglichen, durch Sterne definierten Koordinatensysteme, wie zum Beispiel den HIPPARCOS-Sternkatalog, in das quasarfeste Bezugssystem einzuhängen.

Das AIUB verfolgt seit längerem die Idee, die Verknüpfung dieser zwei Referenzsysteme mittels optischer Beobachtungen von künstlichen Satelliten zu bewerkstelligen. Die Bahnen einiger künstlicher Satelliten werden heute mit sehr hoher Genauigkeit in einem erdfesten Koordinatensystem gemessen. Beispiele dafür sind die GPS-Satelliten oder geodätische Lasersatelliten. Über die VLBI-Messungen ist aber das erdfeste Koordinatensystem mit dem ICRF verknüpft, und so können auch die Positionen dieser Satelliten im ICRF dargestellt

werden (siehe Fig. 11). Messen wir nun andererseits von denselben Satelliten optische Richtungen in Bezug zu Referenzsternen, so können wir schliesslich die Positionen dieser Referenzsterne im ICRF bestimmen und die Aufgabe ist gelöst. Die Schwierigkeit liegt dabei klar bei der begrenzten Genauigkeit der CCD-Astrometrie. Um das Ziel zu erreichen, müssen wir garantieren können, dass die systematischen Fehler der Richtungsbeobachtungen zu den Satelliten etwa zwei Zehnerpotenzen kleiner sind als die Fehler der einzelnen Messungen. Ob wir dies erreichen, ist unklar, auszuschliessen ist es jedoch auch nicht.

Zusammenfassung

Die klassische Himmelsüberwachung und die Astrometrie fristeten in den vergangenen zwanzig Jahren ein Schattendasein innerhalb der Astronomie. Dies war einerseits bedingt durch die Ablösung der photographischen Technik durch digitale CCD-Detektoren, die zwar wesentlich empfindlicher sind als Photoemulsionen, aber bis vor kurzem zu klein waren, um eine effiziente Himmelsüberwachung durchzuführen. Andererseits war gleichzeitig ein

Desinteresse an der Suche nach kleinen Körpern im Sonnensystem festzustellen. Dies änderte sich schlagartig nach der Kollision des Kometen Shoemaker-Levy mit Jupiter im Jahre 1994, als weltweit Programme zur Suche nach «Near Earth Objects» initiiert wurden.

Auch die erdgebundene Astrometrie hat nach einer «Durststrecke» wieder ihren Platz gefunden. Die hochpräzisen, mittels des Astrometriesatelliten HIPPARCOS erstellten Sternkataloge ermöglichen auch der CCD-Astrometrie, ihre Genauigkeit um mindestens eine Zehnerpotenz zu steigern.

Die am AIUB in der Gruppe «optische Astrometrie» entwickelten Methoden und Softwarepakete werden heute erfolgreich zur Suche von kleinen Körpern im Sonnensystem und zur Vermessung derer Bahnen sowie zur Beobachtung von künstlichen Erdsatelliten eingesetzt. Diese Arbeiten stehen in enger Wechselwirkung mit den anderen Forschungsgebieten am AIUB, der Satellitengeodäsie und der Himmelsmechanik.

DR. THOMAS SCHILDKNECHT

Astronomisches Institut der Universität Bern
Sidlerstrasse 5, CH-3012 Bern
E-Mail: thomas.schildknecht@aiub.unibe.ch

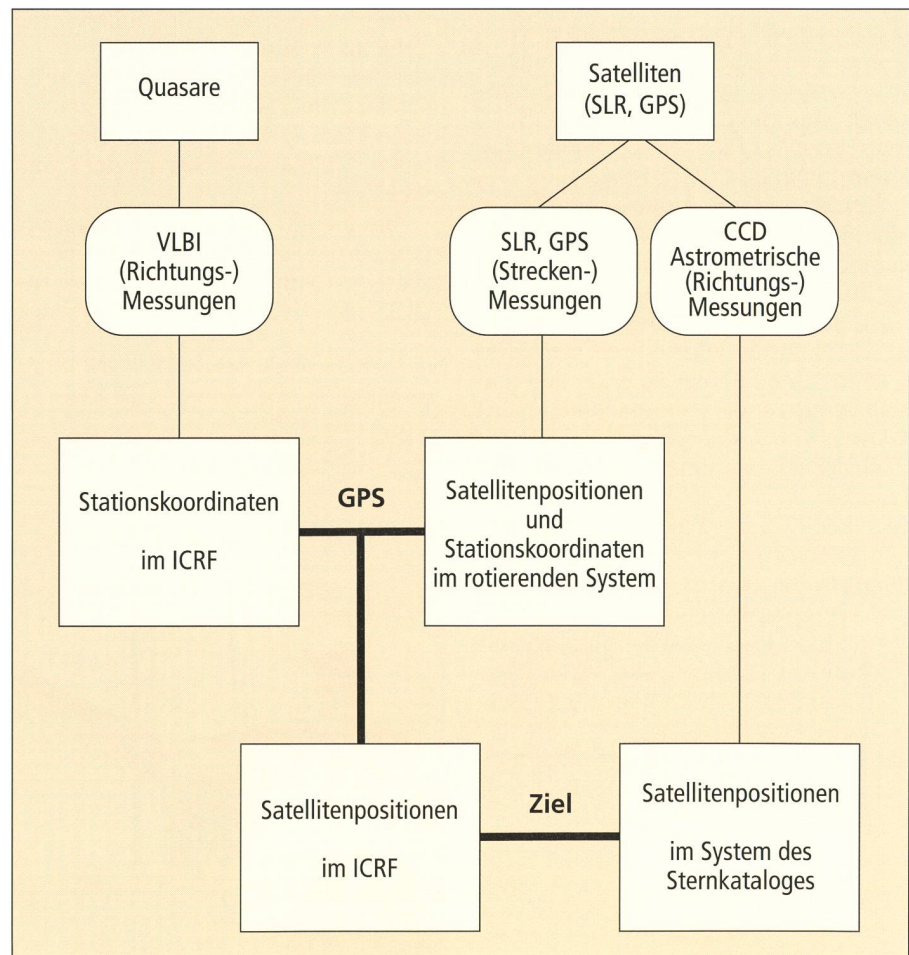


Fig 11: Verknüpfung des quasarfesten Koordinatensystems (ICRF) mit konventionellen Referenzsystemen basierend auf Sternkatalogen mittels optischer Beobachtung künstlicher Satelliten.

Die Fundamentalstation Zimmerwald

WERNER GURTNER

Aufgaben einer Fundamentalstation

Die moderne Erdvermessung, vor allem in ihrer globalen, regionalen (kontinentalen) und landesweiten Ausrichtung, bedient sich heute weitgehend satellitenbasierter Messverfahren, deren bekanntestes sich auf die hochgenaue Messung und numerische Auswertung der Signale des amerikanischen (militärischen) Satellitennavigationssystem GPS (Global Positioning System) stützt. Die Verfügbarkeit bzw. Realisierbarkeit dreidimensionaler Positionen im Genauigkeitsbereich von einem Zentimeter an praktisch jedem Punkt der Erdoberfläche wäre ohne die Verwendung solcher Satellitensystemen nicht möglich. Eine wesentliche Voraussetzung dafür stellen auch die Definition, die Bereitstellung und der Unterhalt eines weltweiten dreidimensionalen Koordinaten-Referenzsystems dar, in dem dann die entsprechenden Positionsbestimmungen durchgeführt werden. Das in der geodätischen Fachwelt verwendete System heisst International Terrestrial Reference System (*ITRS*¹) und steht seit 1989 in verschiedenen Altersgenerationen als tabellarische Positions- und Geschwindigkeitsangaben (International Terrestrial Reference Frames *ITRF*) einiger hundert Referenzpunkten zur Verfügung.

Einige dieser Referenzpunkte haben nun eine besondere Stellung dadurch, dass sie verschiedene geodätische Beobachtungsverfahren örtlich zusammenfassen, was es erlaubt, durch eine direkte Kombination aller dieser Verfahren systematische Fehler zu erkennen und insbesondere die (unterschiedlichen) Stärken der Verfahren optimal für die Realisierung des Referenzsystems einzusetzen.

Folgende primäre Beobachtungsarten können sich auf solchen fundamentalen Referenzstationen finden:

- Very Long Baseline Interferometry (VLBI): Positionsbestimmung mit Hilfe von Radioteleskopen und extragalaktischen Radioquellen (Quasare)
- Satellite Laser Ranging (SLR): Satellitendistanzmessungen mit Laserpulsen

- Permanente GPS-Empfänger, allenfalls kombiniert mit GLONASS (der russischen Version eines Satellitennavigationssystems)
- Permanente Sender des (französischen) satellitengestützten Positionierungssystems DORIS («Doppler Orbitography by Radiopositioning Integrated on Satellite»)
- Messung der Schwerkraft und ihrer Änderungen

Weitere Messungen können

- die Richtungen zu Satelliten (optische Richtungsbeobachtungen mit CCD-Kameras)
 - den Meeresspiegel (Pegelmessungen)
 - die Lotrichtung (astronomische Ortsbestimmung)
 - die Atmosphäre (insbesondere Luftdruck, Temperatur, Feuchtigkeit bzw. Wasserdampfgehalt)
 - die Umgebung (z.B. Sichtbarkeitsbedingungen, Verschiebungen, Deformationen, Senkungen, Bodenwassergehalt)
 - die Sonneneinstrahlung
 - die genaue Tageszeit (Anbindung an die Internationale Atomzeit)
- betreffen. Für die gemeinsame Auswertung der primären Daten ist eine genaue lokale Einmessung der Sensoren (Antennen, Teleskope, Gravimeter) entscheidend.

Ohne eine genaue und dauernde Kenntnis der Bewegung der Erde als gesamtes im Raum und bezüglich ihrer Ro-

tationsachse sowie der grossräumigen Bewegungsvorgänge auf der Erdoberfläche (Plattentektonik) wäre es unmöglich, die heute realisierbaren und stetig realisierten Genauigkeiten zu erreichen. Die Messungen auf den permanenten Referenzpunkten, insbesondere natürlich auf den Fundamentalstationen, sind Grundlage zur Bestimmung dieser Bewegungen.

Die Referenzstationen sowie die notwendigen Daten-, Analyse- und administrativen Zentren sind seit einigen Jahren, entsprechend den von ihnen betreuten Beobachtungstechniken, in Diensten der Internationalen Assoziation für Geodäsie (*IAG*) zusammengefasst:

- International VLBI Service (*IVS*)
- International Laser Ranging Service (*ILRS*)
- International GPS Service (*IGS*)
- International DORIS Service (*IDS*, ab vermutlich 2004)
- International Gravity and Geoid Commission (*IGGC*)

Die Bestimmung der Erdrotationsparameter und der Referenzsysteme wird vom

- International Earth Rotation and Reference Systems Service (*IERS*) durchgeführt.

Die Station Zimmerwald

In Zimmerwald sind die Beobachtungstechniken SLR, GPS/GLONASS, CCD, Schwerkraft (Erdszeitengravimeter) realisiert. Wir werden im folgenden schwerpunktmässig vor allem auf die Satellitendistanzmessung eingehen, da sie von der Einrichtung und vom Betrieb her eine Ausnahmestellung einnimmt. Die Geschichte der Station Zim-

Fig. 1: Die Fundamentalstation Zimmerwald.



¹ Zu den **fett-kursiv** gedruckten Begriffen und Abkürzungen sind am Schluss des Artikels weiterführende Internet-Links angegeben.

merwald wurde bereits auf S. 10/11 kurz zusammengefasst. Wir konzentrieren uns deshalb auf den Stand, wie er sich heute präsentiert.

Die Figur 1 zeigt links die «alte» Kuppel mit dem Schmidt-Cassegrain Doppel-Teleskop, den Mast mit der permanenten GPS-Antenne und rechts die «neue» Kuppel mit dem kombinierten Laser- und CCD-Teleskop. Vor der «alten» Kuppel ist knapp das Schachtfenster zum Gravimeter-Keller erkennbar.

Permanente GPS-Referenzstation

Seit 1992 betreibt **swisstopo**, das Bundesamt für Landestopographie, einen permanent arbeitenden GPS-Empfänger. Seine Antenne ist auf einem 9 Meter hohen Mast angebracht. Zimmerwald ist damit seit den ersten Tagen des IGS (Beginn der Test Campaign im Juni 1992) Referenzstation im weltweiten Netz des International GPS Service und seit 1995 Teil des europäischen Verdichtungsnetzes **EPN** (**EUREF** Permanent Network).

Die permanente Einbindung in das IGS-Netz und die örtliche Verknüpfung mit dem Laserteleskop (seinerseits Teil des International Laser Ranging Service ILRS) macht Zimmerwald «zum bestvermessenen Punkt» der Schweiz. Das Bundesamt für Landestopographie hat deshalb die Station Zimmerwald (bzw. einen verankerten Messingbolzen unter dem Antennenmast) als Referenzpunkt für die neue Landesvermessung LV95 gewählt. Sie stellt damit die Verknüpfung der Landesvermessung mit dem globalen Bezugssystem ITRS und dem regionalen europäischen Bezugssystem ETRS89 sicher.

Die Figur 2 zeigt die in den letzten 7 Jahren vom EPN wöchentlich bestimmten Positionen von Zimmerwald (Ost-, Nord- und Höhenkomponenten) im europäischen Bezugssystem (das im wesentlichen mit dem West- und Zentralteil des europäischen Kontinentes verknüpft ist).

Zimmerwald ist auch Teil des Automatischen GPS-Netztes Schweiz (AGNES) und des differentiellen Positionierungssystems Swipos des Bundesamtes für Landestopographie. Weiterführende Informationen darüber findet man auf den Webseiten der swisstopo.

Laserdistanzmessungen zu Satelliten

Das Messprinzip des «Satellite Laser Ranging» (SLR) ist vergleichsweise einfach: Ein auf der Station mit Hilfe eines Lasers erzeugter kurzer Lichtblitz wird durch das Teleskop gebündelt zu einem Satelliten geschickt, an ihm respektive

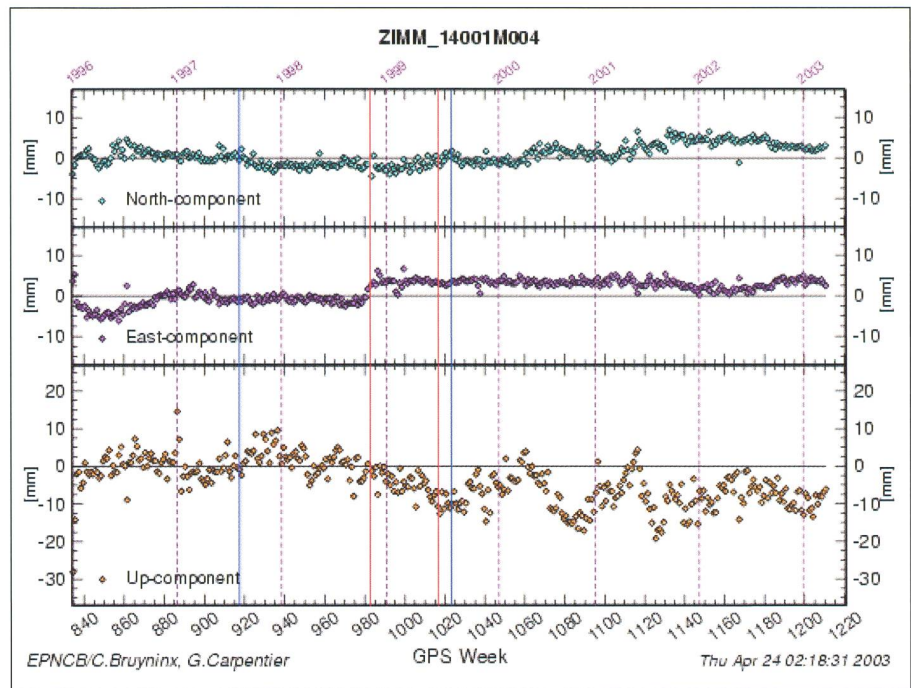


Fig. 2: Wöchentliche Positionsbestimmungen im Europäischen Bezugssystem.

von am Satelliten befestigten Retroreflektoren (Fig. 3) reflektiert und vom Teleskop wieder aufgefangen und detektiert. Die totale Laufzeit, die mit hochpräzisen Zeitintervallzählern gemessen wird, ergibt, multipliziert mit der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum, die doppelte Distanz des Satelliten zum Zeitpunkt der Messung. Korrekturen wegen der unterschiedlichen Lichtgeschwindigkeit im Teil der Distanz, der in der Atmosphäre verläuft, müssen angebracht werden, ebenso Kalibrierkorrekturen wegen zusätzlichen Lichtwegen im Instrument und den Verzögerungen der elektrischen Signale in den Kabeln und Geräten.

Die tatsächliche Realisierung dieses einfachen Messprinzips ist aber relativ aufwendig, vor allem wegen der hohen verlangten Messgenauigkeit und der ver-

schwindend kleinen Energie der aufgenommenen reflektierten Laserpulsen (unter Umständen weniger als ein Photon im Durchschnitt aller Pulse). Insbesondere das Störlicht des Tageshimmels verlangt einen hohen Aufwand an Vorrichtungen, die es erlauben, die empfangenen Laserphotonen überhaupt zu erkennen.

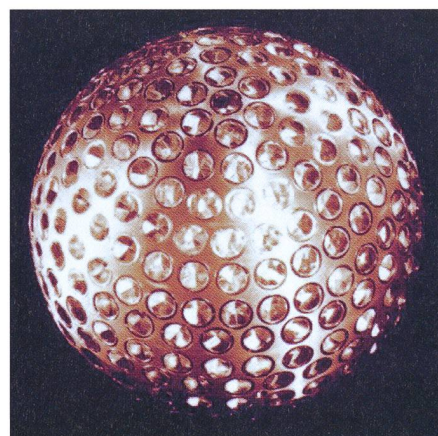
Laser-Distanzen zu Satelliten können nicht durch Wolken gemessen werden, sind im Vergleich zu GPS aufwendig in der Realisierung (gegenwärtig existieren weltweit nur etwa 40 SLR-Stationen, wovon gut die Hälfte regelmäßig die vom International Laser Ranging Service ILRS gesetzten Anforderungen erfüllen), haben aber den Vorteil der besseren Modellierbarkeit atmosphärischer Korrekturen und sind geometrisch stärker als die GPS-Distanzdifferenzen bzw. -Geschwindigkeiten. Satellitenseitig sind die Aufwendungen wesentlich geringer (nur passive Retroreflektoren notwendig).

Die Messdaten aller Stationen des ILRS werden in zwei Datenzentren (Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut DGFI in München und Goddard Space Flight Center GSFC der NASA in Greenbelt USA) gesammelt und den Auswertezentren zur Verfügung gestellt.

Sie werden benützt unter anderem für die

- Berechnung der Positionen und Positionsänderungen der Stationen
- Bestimmung der Erdrotationsparameter (Position der momentanen Erdachse, Änderung der Rotationsgeschwindigkeit)

Fig. 3: Satellit LAGEOS (Ø 60 cm).



- Bestimmung der momentanen Position des Schwerpunktes der Erde
- Hochpräzise Bahnbestimmung, z.B. für Altimetersatelliten, welche die Form der Meeresoberfläche mit Radar abtasten; als einzige Technik oder zusammen mit GPS oder DORIS
- Validierung von Satellitenbahnen, die routinemässig mit anderen Methoden (GPS, DORIS) bestimmt werden
- Gravitationsfeldbestimmungen
- Kalibrierung anderer Methoden der Bahnvermessung von Satelliten (Radar, optisch)

Das SLR-System in Zimmerwald

Seit den siebziger Jahren werden in Zimmerwald durch das Astronomische Institut der Universität Bern (AIUB), seit 1992 mit Unterstützung durch das Bundesamt für Landestopographie, Distanzmessungen zu Satelliten durchgeführt. Seit 1998 ist die Station Zimmerwald Teil des in diesem Jahr gegründeten International Laser Ranging Service.

Der Titanium-Saphir-Laser von Zimmerwald erzeugt 10 mal pro Sekunde einen Puls mit einer Länge von etwa 0.1 Nanosekunden ($1 \text{ ns} = 10^{-9}$ Sekunden), was einer geometrischen Länge von etwa 3 cm entspricht. Die Energie des Pulses ist relativ bescheiden (einige 10 Millijoules), dies ergibt allerdings in der kurzen Zeit des Pulses eine Leistung von einigen hundert Megawatt.

Die Messgenauigkeit der Laufzeit bzw. der einfachen Distanz beträgt auch etwa 0.1 ns bzw. 15 mm für die Einzelmessung. Mit der Möglichkeit, mehrere Messungen pro Sekunde durchführen zu können, kann durch eine Art Mittelbildung aller Messungen innerhalb eines

Zeitintervalles von einigen Sekunden bis Minuten die Streuung dieser «Mittelwerte» (sog. Normal Points) auf wenige Millimeter reduziert werden. Nicht reduziert werden damit allfällige systematische Fehler, die aber unterhalb eines Zentimeters sein sollten. Die Figur 4 zeigt die Streuungen der etwa 1800 Einzelmessungen und 14 Normal Points eines ca. 30-minütigen Durchgangs des Satelliten LAGEOS über Zimmerwald. Weiterverarbeitet werden von den Analyse-Zentren praktisch ausschliesslich die Normal Points.

Das im Jahre 1997 eingeweihte Teleskop (siehe Titelbild), das sowohl für das gebündelte Senden als auch für das Auffangen des reflektierten Laserstrahles benutzt wird, besitzt einen Hauptspiegel von 100 cm Durchmesser. Der Laserstrahl wird von unten in der vertikalen Drehachse in die Gabel und über 3 Umlenkspiegel seitlich entlang der horizontalen Drehachse in das Rohr des Teleskops eingeführt (Coudé-Strahlengang), wo er über einen weiteren Umlenkspiegel und den Sekundär- und Primärspiegel das Teleskop exzentrisch verlässt. Das reflektierte Licht benutzt denselben Weg in umgekehrter Richtung nach unten zum Empfänger/Detektor, der sich wie der Laser im Raum unterhalb des Teleskops befindet.

Die maximale Drehgeschwindigkeit des Teleskops um die Vertikalachse (Azimut) beträgt $30^\circ/\text{s}$, in der Horizontalachse (Elevation) $15^\circ/\text{s}$. Damit kann einerseits die Nachführung zenitnaher Durchgänge bis über 89° Elevation sichergestellt werden, andererseits kann sehr rasch zwischen verschiedenen Satelliten hin- und hergeschwenkt werden: eine Voraussetzung für eine optimale Ausnutzung der Kapazitäten. Fig. 5 zeigt ein Beispiel der Distanzmessun-

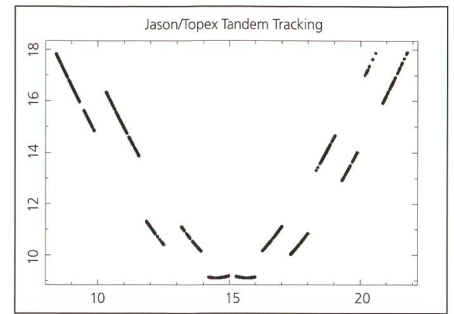


Fig. 5: Gemessene Distanzen: Rasches Wechseln zwischen Jason und Topex. (Laufzeiten in Millisekunden, Epochen in Minuten nach der vollen Stunde).

gen zu zwei Satelliten (Jason und Topex), die sich kurz hintereinander (Abstand ca. 1 Minute) in derselben Bahn befanden.

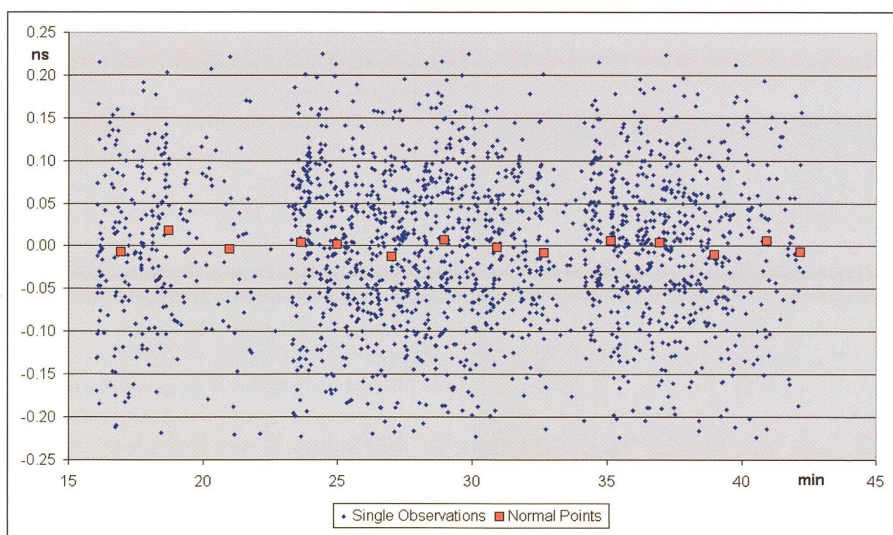
Das ganze System (Teleskop, Laser, Blenden, Filter, Verschlüsse, Detektoren, Zähler, Uhren) wird über einen DEC Alpha-Rechner gesteuert, der für besondere Aufgaben noch zwei Personal Computer (Teleskopsteuerung, Datenerfassung) und einige kleinere Mikroprozessoren kontrolliert. Die Benutzerführung läuft zentral über die Alpha. Alle im Beobachtungsbetrieb benötigten Manipulationen (z.B. inkl. Öffnen/Schliessen der Kuppel, Hochfahren und Teiljustieren des Lasers) können über den Rechner ausgeführt werden.

Mitarbeiter des Astronomischen Instituts und des Bundesamtes für Landestopographie sowie Physik- und Astronomie-Studenten der Universität Bern stellen den SLR-Beobachtungsbetrieb während zwei täglichen Arbeitsschichten praktisch sieben Tage in der Woche sicher. Durch die Möglichkeit, Beobachtungen für kürzere Intervalle ferngesteuert (z.B. von der Universität aus) beziehungsweise vollautomatisch (mit zwar reduzierter Effizienz) durchzuführen, können wir sogar eine nahezu lückenlose Überdeckung (24h/Tag) erreichen.

Fig. 6 zeigt die Anzahl monatlich gemessener Satellitendurchgänge seit 1997. Schwankungen in der Anzahl sind vor allem wetterbedingt. Eigentliche Lücken entstanden bei grösseren Unterhaltsarbeiten (z.B. mehrere Neubeschichtungen von Spiegeln). Bis jetzt wurden Messungen zu mehr als 50 verschiedenen Satelliten durchgeführt.

Eine Beobachtungsstation wird vor allem nach der Anzahl und Qualität der Beobachtungen beurteilt. Unter den ca. 40 Stationen des International Laser Ranging Service sind wir gegenwärtig (im Jahresmittel April 2002 - März 2003) an 8. Stelle bezüglich der totalen Anzahl gemessener Durchgänge aller Satelliten,

Fig. 4: Streuung der Einzelbeobachtungen und Normalpoints ($0.1 \text{ ns} = 15 \text{ mm}$).



an 5. Stelle betreffend der Anzahl gebildeter Normal Points zu den beiden geodynamischen LAGEOS-Satelliten (Fig. 7). Die Streuung der Einzelmessungen war mit dem bis anfangs März 2003 verwendeten Empfänger mit ca. 20 mm am oberen Ende der Skala. Der heutige Empfänger, eine «Single-Photon Avalanche Diode», ergibt eine Streuung von besser als 15 Millimetern, was uns etwa in das Mittelfeld bringen wird. Die Streuung der Normal Points (auf die LAGEOS-Satelliten) beträgt bei uns etwa 2.5 mm, diejenige der besten Stationen ca. 1.5 mm. Sehr wichtig ist die Absenz bzw. Konstanz der systematischen Distanz-Messfehler. Im letzten Jahresmittel war Zimmerwald hier an erster Stelle, vermutlich ein Resultat des (praktisch nur von uns) verwendeten Echtzeit-Kalibrierverfahrens.

Eine der Unsicherheiten in der Satelliten-Distanzmessung betrifft die Korrektur der gemessenen Laufzeiten wegen des Einflusses der Atmosphäre auf die Lichtgeschwindigkeit. Üblicherweise werden diese Korrekturen mit einem Modell berechnet, dessen freie Parameter Bodenluftdruck, Temperatur und Luftfeuchtigkeit mit präzisen Sensoren auf der Station erfasst werden. Die Lichtgeschwindigkeit in der Atmosphäre ist ebenfalls abhängig von der verwendeten Wellenlänge der Laserpulse. Als weltweit erste Station hat Zimmerwald im Sommer 2002 begonnen, regelmässig Distanzen in zwei Wellenlängen (423 nm = blau und 846 nm = infrarot) zu messen. Obschon die Genauigkeit bis jetzt noch nicht reicht, um aus den Unterschieden direkt auf die totale Korrektur zu schliessen, können damit zumindest gewisse obere Schranken für Restfehler in diesen troposphärischen Korrekturen angegeben werden.

Fig. 6: Anzahl monatlich beobachteter Satelliten-Durchgänge Januar 1997 - März 2003.

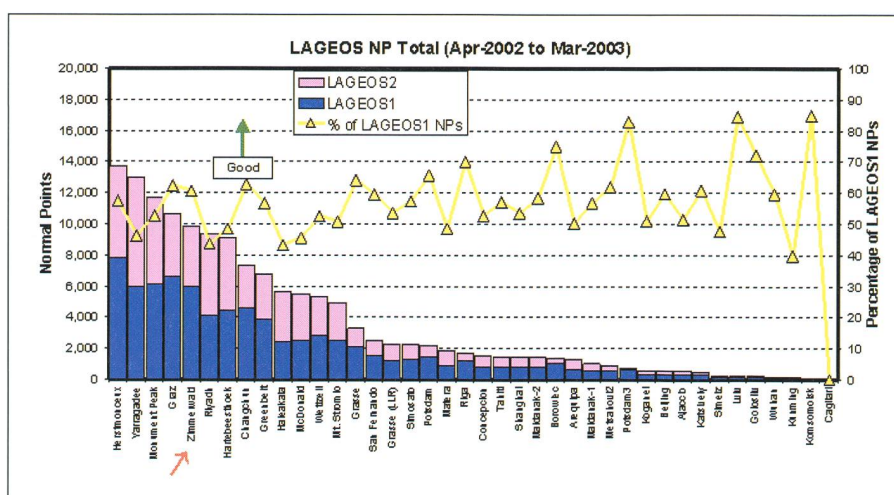
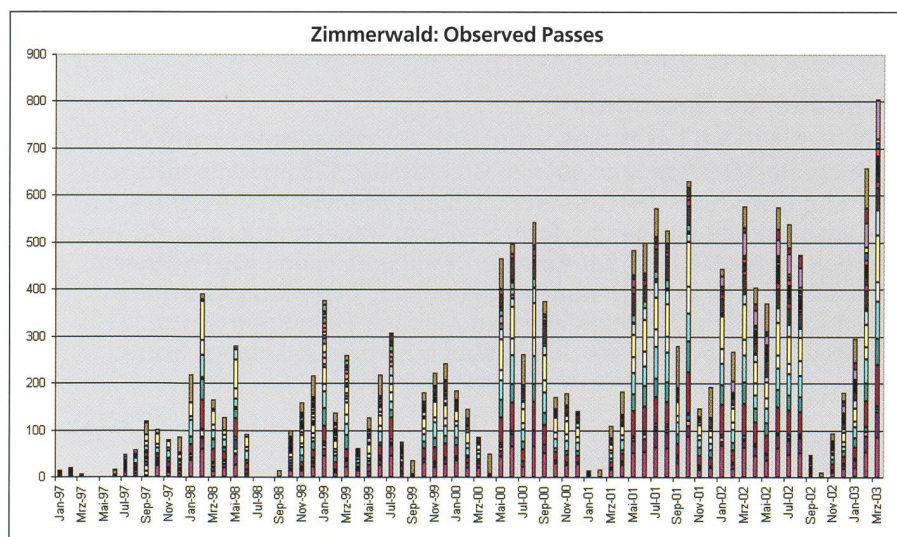


Fig. 7: Anzahl beobachteter LAGEOS Normal Points der ILRS Stationen (Zimmerwald mit Pfeil markiert. Quelle: ILRS).

Reduktionsoptik	Brennweite (m)	Bildfeld-Durchmesser (mm)	Bildfeld-Durchmesser (Bogenminuten)
FR/TV	1.22	16	45
CO1	4	15	13
CO2	4	60	52
CO3	8	30	13

Tabelle 1: Reduktionsoptiken

Nach anfänglichen Anlaufschwierigkeiten mit dem neuen SLR-System hat Zimmerwald nun einen Platz in der Spitzengruppe der ILRS-Stationen erreicht, den es nur mit dauernden und konsequenten Anstrengungen im Bereiche des Unterhalts, der Weiterentwicklungen und natürlich der Beobachtungstätigkeit behalten kann.

Ohne die personelle und finanzielle Beteiligung des Bundesamtes für Landestopographie und die finanzielle Unterstützung durch den Schweizerischen

Nationalfonds, die Schweizerische Akademie der Naturwissenschaften (über die Schweizerische Geodätische Kommission SGK) und die Hochschulförderung des Bundes wäre es unserem Institut nicht möglich gewesen, uns in diesem Bereich zu betätigen und international ganz vorne mitzuhalten.

Optische Richtungsbeobachtungen mit CCD

Das neue Teleskop wurde, in einer weltweit einzigartigen Weise, so konzipiert, dass es sowohl für SLR- als auch für optische Beobachtungen verwendet werden kann. Zu diesem Zweck wurde das Teleskop seitlich mit einer Instrumentenplattform ausgerüstet, auf der vier mit unterschiedlichen Reduktionsoptiken versehene Montageschlitten CCD-Kameras oder andere optische Empfänger aufnehmen können. Einer der Schlitten enthält eine hochempfindliche Videokamera, die während den Lasermessungen nachts zur visuellen Kontrolle der Satelliten-Nachführung verwendet wird. Die anderen drei Positionen (siehe Tabelle 1) sind vor allem für die Richtungs-Beobachtungen von Objekten wie Kleinplaneten, Satelliten, Raketenendstufen oder Raumschrott mit Einzelbild-CCD-Kameras reserviert.

Die Figur 8 zeigt eine Aufnahme mit einer CCD-Kamera in Position CO2. Die 7 geostationären Astra-Satelliten sind



Fig. 8: CCD-Aufnahme von Zimmerwald (Ausschnitt 12x12'): 7 geostationäre Astra-Satelliten.

als Punkte abgebildet, die Sterne bewegten sich während der Belichtungszeit von 2 Sekunden um eine halbe Bogenminute.

Der Strahlteiler in der horizontalen Achse des Teleskops, der den Lasersendestrahle ein- bzw. das empfangene Signal auskoppelt, kann für die Dauer von hochpräzisen CCD-Aufnahmen pneumatisch ausgeschwenkt werden. Ein Wechsel von einer Betriebsart auf die andere (SLR $\leftrightarrow$ CCD) dauert nur wenige Sekunden. CCD-Aufnahmen können dadurch leicht zwischen oder sogar in

SLR-Satellitendurchgänge eingeschoben werden. Dies ergibt insgesamt eine hervorragende Ausnutzung des Systems, die bei einem rein astronomischen Teleskop nie erreicht werden könnte.

Anwendungen der Richtungsbeobachtungen sind auf S. 30-35 beschrieben.

Erdgezeitenstation, Schweremessungen

Seit 1994 betreibt das Institut für Geodäsie und Photogrammetrie (IGP) der ETH Zürich in einem speziell dafür gebauten Kelleranbau ein sogenanntes Erdgezeitengravimeter, ein Gerät, das die durch Mond und Sonne hervorgerufenen periodischen Änderungen der Schwerkraft kontinuierlich misst. Diese Gezeitenkräfte bewirken zudem eine periodische vertikale Bewegung der Erdkruste (bei uns ca. ± 15 cm, die sich wiederum in den Satellitenbeobachtungen (Distanzen, GPS-Messungen) finden müssen. Säkulare vertikale Bewegungen müssen sich auch in einer kontinuierlichen Änderung der absoluten Schwerkraft auswirken. 1997 wurde mit einem Absolutgravimeter des Instituto Metrologico G. Collonetti von Turin erstmals in Zimmerwald die absolute Schwerkraft gemessen. Es ist geplant,

solche Messungen in nächster Zukunft in etwa jährlichem Rhythmus durch das Bundesamt für Metrologie und Akkreditierung (*metas*) wiederholen zu lassen. Die örtliche Nähe der gravimetrischen und geometrischen Messungen erlauben einen direkten Vergleich der Schwerkraft- mit den Vertikalpositions-Zeitreihen: Zu-mindest zum Zwecke der Überprüfung auf systematische Fehler in den einzelnen Messgrößen, Modellfehlern in den Reduktionen, wenn nicht sogar zur Bestimmung von geophysikalischen Parametern der Erdkruste.

PROF. DR. WERNER GURTNER

Astronomisches Institut der Universität Bern
Sidlerstrasse 5, CH-3012 Bern

E-Mail: werner.gurtner@aiub.unibe.ch

Weiterführende Links:

AIUB	http://www.aiub.unibe.ch
EPN	http://www.epncb.oma.be
EUREF	http://www.euref-iaig.org
IAG	http://www.gfy.ku.dk/~iag
IDS	http://ids.cls.fr
IERS	http://www.iers.org
IGGC	http://www.iag-iggc.org
IGP	http://www.igp.ethz.ch
IGS	http://igsb.jpl.nasa.gov
ILRS	http://ilrs.gsfc.nasa.gov
ITRF	http://www.iers.org/iers/products/itrf
ITRS	http://www.iers.org/iers/products/itrs
IVS	http://ivscc.gsfc.nasa.gov
metas	http://www.metas.ch
swisstopo	http://www.swisstopo.ch



Tel. 031 311 21 13 Fax 031 312 27 14

Ihr Partner für Teleskope und Zubehör

- Ferngläser, Spektive
- Teleskope, Okulare, Filter
- Stative, Montierungen
- Sternkarten, Sternatlanten, Astronomische Literatur
- CCD-Kameras, Astro-Software

- Wir haben auch für Sie das passende Astronomie-Teleskop
- Beratung, Service, Günstige Preise
- Seit über 60 Jahren am Casinoplatz und seit 1994 Ihr Astropartner



Unser sensationelles Setangebot!

MEADE ETX 125 EC SET mit Autostar und Felddreibeinstativ

Maksutov-Cassegrain-Teleskop mit 1900mm Brennweite, 125mm Spiegeldurchmesser, f/15.0. Multivergütete UHTC-Glasoptik, blaue Aluminium-Tubusfassung. 26mm Super-Plössl Okular und Sucherfernrohr 8x21, Gabelmontierung mit Teilkreisen, Motorbetrieb für RA/DEC mit Autostar-Handkontrollbox. GoTo-System mit über 14'000 abgespeicherten Himmelsobjekten, auf Tastendruck abrufbar! Komplettsset mit Aluminium-Dreibeinstativ und Autostar-Handkontrollbox zu einem ansehbaren Sparpreis. Dieses Setangebot erhalten Sie solange Vorrat!

Fr. 2238.-

Internet <http://www.zumstein-foto.ch>

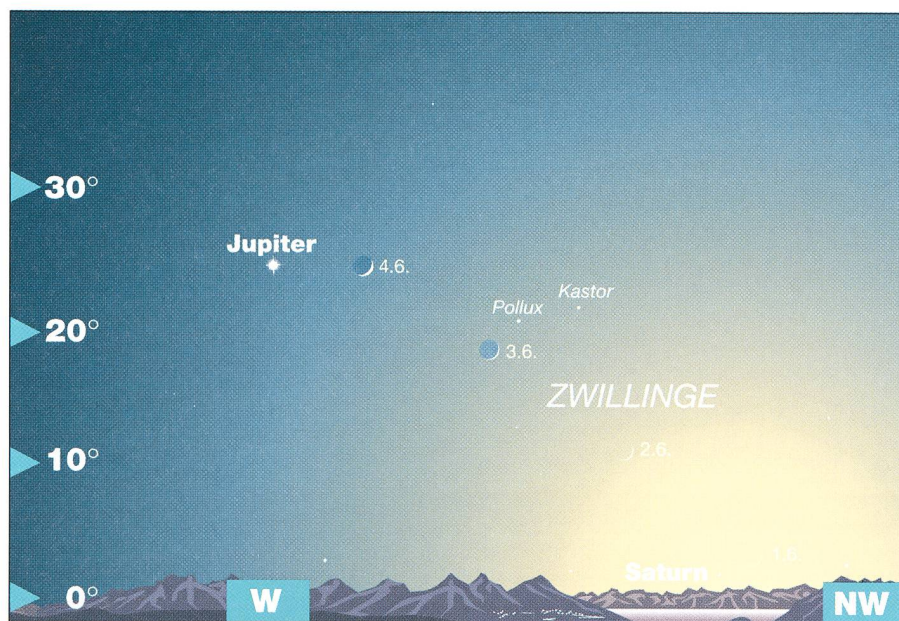
e-mail: astro@zumstein-foto.ch

Mars wird bald so hell wie Sirius

Der rote Planet nimmt Anlauf zur grossen Opposition

THOMAS BAER

Während sich Venus vom Morgenhimmel und Saturn vom Abendhimmel zurückziehen, Merkur nach seinem Transit vom 7. Mai 2003 weder im Juni noch Juli in der Dämmerung auftaucht und auch Jupiter immer kürzer sichtbar bleibt, beginnt der rötliche Mars im Sternbild Wassermann allmählich zum dominierenden Objekt am Nachthimmel aufzusteigen.



In den ersten Juni-Tagen zieht die schlanke zunehmende Mondsichel an Jupiter vorbei.
(Grafik: THOMAS BAER)

Die kurzen Sommernächte machen dieses Jahr auch die Planetenbeobachtungen schwierig. **Venus**, die seit einigen Monaten als «Morgenstern» vor Sonnenaufgang beobachtet werden konnte, zieht sich im Juni 2003 allmählich von dieser Position zurück und strebt ihrer oberen Konjunktion mit der Sonne entgegen. Sie gewinnt dabei an Deklination, klettert in der Ekliptik immer höher und passiert am 18. Juni 2003 den rötlichen Aldebaran, Hauptstern des Stiers, in nur 5° nördlichem Abstand. Allerdings ist das «Auge des Stiers» in der Morgendämmerung zu diesem Zeitpunkt noch nicht auszumachen. Während des Juli bleibt Venus unbeobachtbar. Versierte Sternfreunde können sie allenfalls noch zu Monatsbeginn kurz vor Sonnenaufgang erspähen. Auch ihre Begegnung mit Saturn entgeht uns.

Der fast volle Mond begegnet am 13. August 2003 dem roten Planeten Mars.
(Grafik: THOMAS BAER)

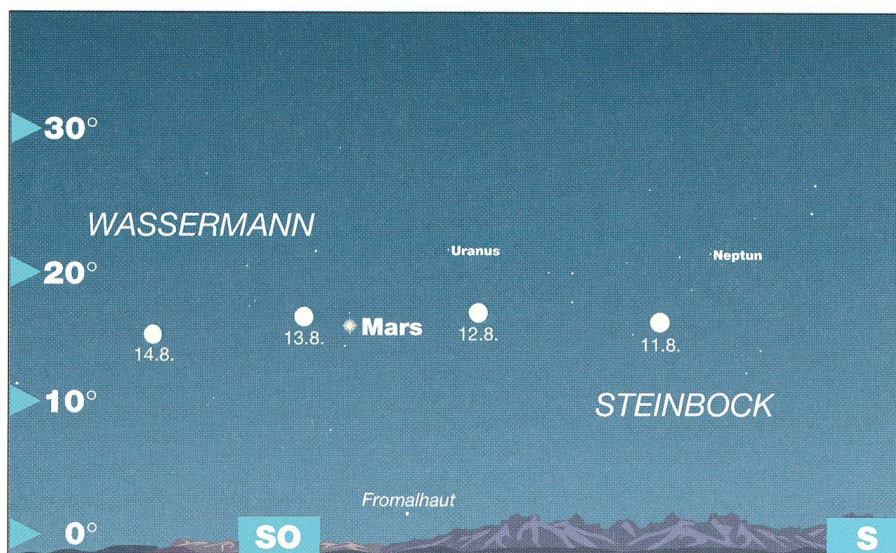
Nicht viel besser steht es in den Sommermonaten um den flinken Planeten **Merkur**. Nach seinem Durchgang vor der Sonne am 7. Mai 2003 (siehe separaten Artikel) gelangt er zwar schon am

3. Juni 2003 in seine grösste westliche Elongation. Trotz eines Winkelabstandes von 24°26' kommt aber nicht zu einer Morgensichtbarkeit, weil der Planet 9° südlicher als die Sonne im Tierkreis steht und damit kaum aus den horizontnahen Dunstschichten gelangt. Auch im Juli 2003, nach seiner oberen Konjunktion mit der Sonne, reicht es, diesmal am Abendhimmel, ebenfalls zu keiner Sichtbarkeit, womit uns auch die Begegnungen mit den Planeten Saturn am 1. Juli 2003 und **Jupiter** am 26. Juli 2003 entgehen.

Der grösste Planet der Sonnenfamilie verlagert sich immer weiter an den westlichen Horizont, womit seine abendliche Präsenz immer kürzer ausfällt. Er verlässt Ende Juni 2003 den Krebs und steuert fortan direkt auf den Löwenstern Regulus zu. Am 1. Juni 2003 erfolgt der Untergang des Riesenplaneten noch deutlich nach Mitternacht, doch schon am Monatsletzten verschwindet er gegen 22:30 Uhr MESZ. Ihm setzt ebenfalls die sehr spät einsetzende Abenddämmerung zu, was seine gute Beobachtungszeit auf anderthalb Stunden verkürzt. Im Juli 2003 schliesslich gibt Jupiter seine Abschiedsvorstellung und zieht sich Mitte Monat gänzlich vom Abendhimmel zurück.

Schon wesentlich früher als Jupiter hat sich Ringplanet **Saturn** vom Abendhimmel verabschiedet. Er steht im Juni 2003 mit der Sonne am Taghimmel und taucht erst Ende Juli 2003 allmählich am Morgenhimmel im Sternbild der Zwillinge wieder auf.

Der einzige Planet, der sich am Abendhimmel kräftig durchsetzt, ist **Mars**. Schon im Juni verlegt er seine Aufgänge vor Mitternacht und bleibt somit die ganze zweite Nachthälfte hindurch als auffälliges Gestirn sichtbar. Am längsten Tag des Jahres wan-



dert Mars nur 3° südlich am viel lichtschwächeren **Uranus** vorbei, der sich deutlich durch seine bläuliche Färbung verrät. Die Marshelligkeit nimmt weiter auf -1.4 mag zu, womit unser äusserer Nachbar bereits so hell strahlt wie Sirius im Grossen Hund. Der scheinbare Durchmesser des Planeten nimmt auf $17''$ zu, was bereits zahlreiche Details in einem leistungsstarken Fernrohr hervorbringt. Vor allem die weissliche Südpolarkappe soll-

te einwandfrei gesehen werden können. Im Juli 2003 steigert Mars seine Helligkeit weiter auf -2.3 mag., was ihn zum auffälligsten Objekt am Himmel macht; jetzt übertrifft er bereits sogar Jupiter an Leuchtstärke! Schon in der letzten Juli-Dekade bremst Mars seine rechtläufige Bewegung ab, wird stationär und setzt zur Oppositionsschleife an. Am 17. Juli 2003 begegnet der Mond dem hellen Objekt und bedeckt den Planeten, allerdings nicht für Europa.

In Teleskopen sind immer besser Details der Marsoberfläche zu erkennen, da die scheinbare Grösse weiter auf über $22''$ zugenommen hat. Reizvoll ist der Anblick der Himmelsszenerie Mitte August, wenn der Vollmond durch die Gegend des Wassermann wandert (Figur 2).

THOMAS BAER

Astronomische Gesellschaft Zürcher Unterland
CH-8424 Embrach

Erste Bilder des Merkur-Transits vom 7. Mai 2003

Merkurdurchgang begeisterte die Schulkinder

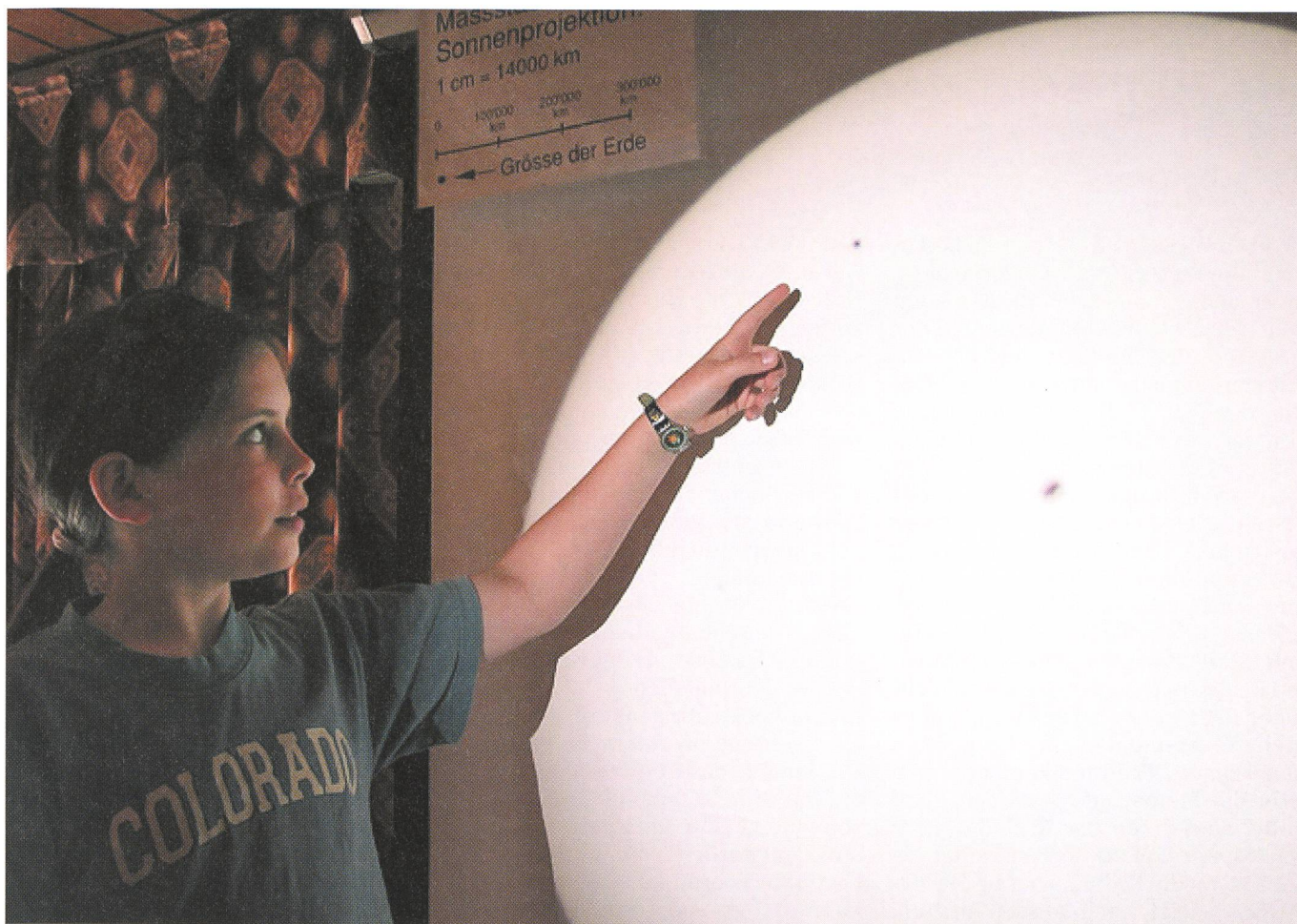
THOMAS BAER

Eine Schulverlegung in die Sternwarte nach Bülach während dreier Tage mit dem Höhepunkt des Merkurdurchgangs am 7. Mai 2003 begeisterte meine 4. Primarklasse aus Winkel. Fleissig beobachteten die Kinder an der Projektionswand im abgedunkelten Schulungsraum das metergrosse Sonnenbild mit dem langsam wandernden schwarzen Pünktchen.

Sonniges und heisses Mai-Wetter liess den Merkurtransit vom 7. Mai 2003 zu einem speziellen Erlebnis werden. Zwar hingen zum Zeitpunkt der ersten Berührung um 07:11 Uhr MESZ noch einige dünnere Wolkenreste vor der Sonne, doch schon bald löste sich das Gewölk dank Bise auf und ermöglichte eine exzellente Sicht auf das einzigartige Ereignis. Tiefschwarz zeigte sich der winzige Merkur in engem Abstand zum Sonnenrand.

Erst an unserem Coelostaten bot sich den Kindern meiner 4. Primarklasse und den Demonstratoren der Stern-





Besonders prächtig konnte man das schwarze Scheibchen an der Projektionswand des Coelostaten verfolgen. (Foto: JÜRGEN ALEAN)



Kurz vor dem Austritt entstand dieses Bild um 12:24 Uhr MESZ. Es wurde durch ein 8 Zoll Maksutov-Teleskop mit Brennweite 2m durch Okularprojektion aufgenommen. (Foto: JÜRGEN ALEAN)

wenigen Privilegierten gehört zu haben, die dieses seltene Phänomen an einem Arbeitstag live miterleben konnten.

Erst am 9. Mai 2016 wird man von Europa aus wieder einen Merkurdurchgang sehen können, obwohl bereits im November 2006 der flinke Planet ein weiteres Mal die Sonne kreuzt. Doch dieser Durchgang findet nachts statt und bleibt daher in unseren Breiten nicht zu beobachten. Freuen dürfen wir uns indessen schon auf den nächstjährigen Venusdurchgang vom 8. Juni. Interessanterweise findet dieser fast im gleichen Zeitraum wie der Merkurtransit vom 7. Mai 2003 statt: Beginn ist um 07:13.29 Uhr MESZ, das Ende um 13:25.59 Uhr MESZ. Damit wird man auch ihn in voller Länge von Europa aus sehen, sofern das Wetter auch dann mitspielt.

THOMAS BAER

Astronomische Gesellschaft Zürcher Unterland
CH-8424 Embrach

warte Bülach ein spektakuläres Bild. Die Sonne, metergross auf die Leinwand projiziert mit einem ordentlichen Sonnenfleck ziemlich in der Mitte, zeigte den merklich wandernden Winzling in beachtlicher Grösse und Schärfe. Am Projektionstisch zeichneten die Kinder die verschiedenen Phasen des Transits und waren sichtlich begeistert, zu den



Auch an den Teleskopen beobachteten die Kinder der 4. Klasse aus Winkel b. Bülach den Durchgang des Planeten Merkur. (Foto: JÜRGEN ALEAN)

Meteorströme II: Die Juni-Bootiden (JBO)

ANDREAS BUCHMANN

In Orion 297 wurde über die Leoniden berichtet. Etwas weniger spektakulär, aber genauso «launisch», ist ein weiterer Meteorstrom, derjenige der Juni-Bootiden (nicht zu verwechseln mit den Januar-Bootiden oder Quadrantiden QUA). Dieser Strom wurde von der International Meteor Organisation (IMO) lange Jahre für nicht mehr existent gehalten und aus der Liste der zu beobachtenden Ströme gestrichen. Die beobachteten Raten («zenithal hourly rate» (ZHR), korrigiert auf eine Grenzhelligkeit von 6.5mag und Radiant im Zenith) betrugen bis 1997 meist um die 1 im Maximum, also hart an der Grenze zu nicht mehr nachweisbar. Dies ist insofern nicht so erstaunlich, weil die Bahn von Komet 7P/ Pons-Winnecke, von dem die Meteoroiden stammen, jetzt völlig ausserhalb der Erdbahn liegt: Sie kommt von aussen nie näher als 0.24 AE an die Erdbahn heran. Da Meteoroiden meist nach aussen driften, sollten wir also keine neuen Sternschnuppen von 7P/ Pons-Winnecke mehr erhalten.

Am 27. Juni 1998 gab es einen grossen Ausbruch der JBO mit einem ZHR von mehr als 50 für mehr als 12 Stunden.

Was war passiert? Tatsächlich waren es alte Meteoroiden, die auf die Erde trafen: Sie wurden 1825 vom Kometen emittiert. Die damals ausgestossene Teilchenwolke blieb deshalb so lange stabil, weil sie in einer 1:2-Resonanz zum Jupiter steht, was das Wegdriften nach aussen hemmt.

2000 betrugen die Raten dann wieder höchstens etwa 2 pro Stunde. 2001 und 2002 gab es zu wenige Beobachtungen, um klare Aussagen machen zu können. Glaubt man den Theoretikern, welche die Bahnen von solchen Teilchenwolken simulieren, könnten es 2003 und vor allem 2004 wieder deutlich mehr sein. Die Theoretiker haben übrigens von der 1998er Beobachtung profitiert: Es gelang zu bestimmen, dass die Teilchen, welche auf die Erde trafen, mit 10-20 m/s Geschwindigkeit vom Kometen ausgestossen worden sein mussten. Die Charakterisierung dieses Parameters kann helfen, andere Ausbrüche vorherzusagen.

Die JBO in Kürze:

Aktiv vom 26.6. bis 2.7.; Maximum 2003 am 27.6., 19 Uhr 30 UT (also 21 Uhr 30 MESZ); Radiant: Rektaszensi-

on $\alpha = 224^\circ$ (15h), Deklination $\delta = 47^\circ$, also etwa 6° nördlich von α Boo; Raten (ZHR) zwischen 0 und 100; Geschwindigkeit 18 km/s; Helligkeitskoeffizient $r =$ etwa 3, also auch viele schwache Meteore. Erzeugender Komet: 7P/ Pons-Winnecke.

Tipps zur Beobachtung:

Beim Eindunkeln steht der Radiant etwa 85° über dem Horizont und sinkt dann bis Ende der kurzen Juni-nacht auf etwa 40° ab, so dass die Abendstunden für eine Beobachtung am besten geeignet sind. Die abnehmende schmale Mondsichel stört also auch nicht (Neumond am 29.). Die Meteore sind denkbar langsam, weil sie die Erde von hinten einholen müssen. Zum Zeitpunkt des Maximums am 27. ist es bei uns leider noch nicht dunkel, aber das Maximum ist sehr breit, so dass wir auch noch einige Meteore abbekommen dürften. Ernsthaftige Beobachter werden den Strom plotten (siehe Beobachtungsanleitung, welche in der letzten Ausgabe von Orion erschien).

ANDREAS BUCHMANN

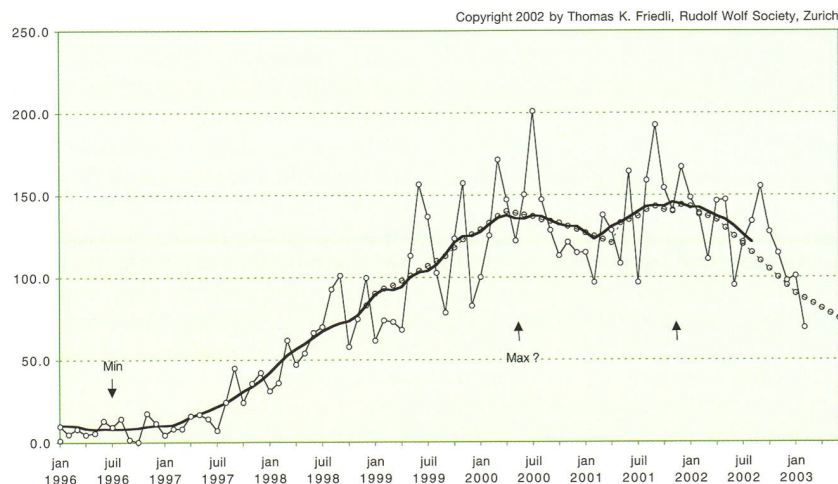
Froburgstr. 324, CH-8057 Zürich
abuchmann@mydiar.ch

Quellen

wgn, die Zeitschrift der IMO, Nr. 26-6; 28-4 und 30-4, sowie Meteorkalender unter www.imo.net

Swiss Wolf Numbers 2003

MARCEL BISSEGER, Gasse 52, CH-2553 Safnern



Januar 2003

Mittel: 97.0

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
34	61	74	90	99	119	82	112	138	116	
11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
150	112	111	113	111	94	99	93	117	85	
21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
87	84	112	121	81	128	126	108	99	121	47

Februar 2003

Mittel: 65.5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
53	62	36	54	88	114	130	122	135	109	
11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
127	103	95	79	25	32	15	40	55	71	
21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
67	55	43	43	49	43	50	51			

Die Sonnenfinsternis am 4. Dez. 2002 in Australien

ROBERT NUFER

Die totale Sonnenfinsternis am 4. Dezember 2002 verlief durch Afrika und endete kurz vor Sonnenuntergang im australischen Outback. Auf Grund der im Vergleich zu Afrika besseren Wetterstatistik in Australien und der besseren Reisebedingungen, in Afrika beginnt die Regenzeit, entschlossen wir uns, die Finsternis in Australien zu beobachten.

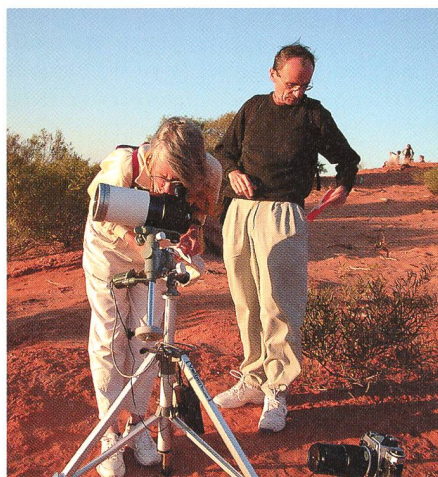


Bild 1: Manfred und Verena beim Beobachten durch das ETX90 während der partiellen Phase. Digitale Aufnahme mit einer Nikon Coolpix 995.

Wir waren eine Dreiergruppe, Manfred Grünig und seine Frau Verena, und ich. Die beiden reisten schon öfter im Mietwagen durch Australien, und so konnten wir auf dieser Reise von ihrem grossen Erfahrungsschatz profitieren. Wir hatten einen Nissan 4WD gemietet, so dass wir notfalls auch mal im Wagen hätten schlafen können. Ansonsten wollten wir in Road Houses oder Motels übernachten. Die Beobachtung der Finsternis war nördlich von Woomera vorgesehen, weit im Landesinnern und fernab jeglicher abendlichen Quellbewölkung in Küstennähe. Wir flogen am 24. Nov. 2002 über Singapur nach Melbourne, von wo aus wir zwei Tage später unsere insgesamt 5700 km lange und drei Wochen dauernde Autofahrt unter die Räder nahmen. Wir hatten eine Woche Zeit, um den idealen Standort zu finden. Uns blieb genügend Zeit, vor der Finsternis den Flinders Ranges Nationalpark und das Opal-Abbauggebiet von Andamooka zu besuchen. Und dann hatten wir Riesenglück, für die Nächte auf den 4. und 5. Dezember beim Road House von Pimba (Woomera) den letzten Wohncontainer mit drei Betten ergattern zu können; das hätten wir uns nicht träumen lassen, nur ein paar Duzend Kilometer südlich der

Zentrallinie! Der Finsternistag war auch vom Wetter her der schönste Tag der ganzen Reise: Nicht das kleinste Wölkchen war auszumachen. Wir waren bereits um zwölf Uhr am Beobachtungsort, 800 Meter nördlich der theoretischen Zentrallinie, und hatten viel Zeit, uns vorzubereiten. Nach 18 Uhr begann die partielle Phase, und um 19 Uhr 11 Min genossen wir die dreissig Sekunden dauernde Totalität. Es war nicht sehr dunkel, denn der Schattenradius betrug nur gut 15 km, und durch den tiefen Sonnenstand gelangte relativ viel Licht in die Schattenzone. Die Sonne stand zu diesem Zeitpunkt nur sieben Grad über dem Horizont. Der Horizont neben der Sonne war deutlich orange-rot gefärbt. Planeten oder Sterne konnten wir keine ausmachen. Eine halbe Stunde später versank die Sonne vom glutroten Himmel, noch etwa zu einem Drittel vom Mond bedeckt. Überglücklich konnten wir die folgenden zwei Wochen geniessen. Wir durchquerten die Nullarbor Plain in der grossen australischen Bucht, besuchten den Stirling Ranges Nationalpark, und erreichten am Schluss der Reise den australischen Südwesten, wo wir am 16. Dezember von Perth aus wieder nach Hause flogen.

Ein ausführlicher Reisebericht in Form eines Tagebuches mit vielen Bildern (8.5 MB PDF-Datei) kann von der Homepage des Astronomischen Vereins Basel (<http://Basel.Astronomie.ch>) heruntergeladen werden.

Bild 3: Serien-Aufnahmen kurz vor bis kurz nach der Totalität auf Kodak Elite Chrome 100 ASA mit einer Nikon FE2 durch Nikkor 200 mm bei f/4. Belichtungszeiten der ersten drei Aufnahmen 1/1000 sek, dann stetig zunehmend. Die Dias wurden digitalisiert und mit Photo-Paint geschärft und «vereinigt». Die Reflexionen der Überbelichtungen sind aus didaktischen Gründen beibehalten worden (oben rechts). Sie zeigen sehr schön, wie das Licht der ersten Sonnenstrahlen nach der Totalität aus einzelnen Mondtälern hervorscheint.

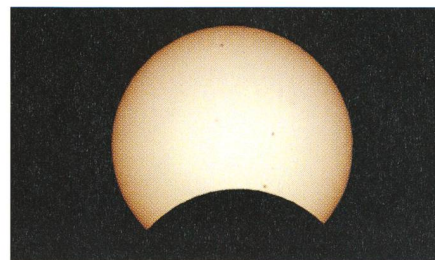
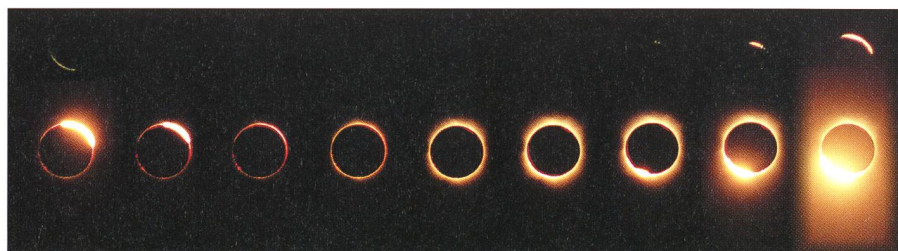


Bild 2: Die Partielle Phase der Finsternis. Digitale Aufnahme durch das ETX90 (Bild 1) mit einer Nikon Coolpix 995. Okularprojektion (28 mm) und Glasfilter (Identi-view).

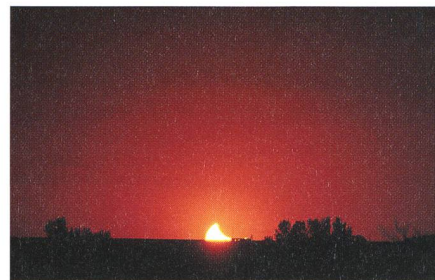


Bild 5: Der Untergang der noch zu einem Drittel bedeckten Sonne. Aufnahme auf Kodak Elite Chrome 100 ASA mit einer Nikon FE2 durch Nikkor 200 mm.

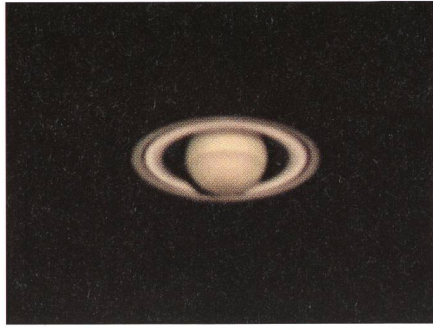
Bild 4: Sonnensicheln durch ein Gebüsch auf ein Blatt Papier projiziert. Digitale Aufnahme mit einer Nikon Coolpix 995. Die originale Aufnahme wurde im Computer stark kontrastverstärkt.



ROBERT NUFER
Im Römergarten 1, CH-4106 Therwil
Robert.Nufer@Bluewin.ch



Teleskop Maksutov 300/4800; Web Cam Philips Vesta Pro, Auflösung 640x480 Pixel; Bearbeitung von ca 540 AVI Frames mit Astrostak und Picture Windows; Muzzano, Aufnahme 18-03-03.



Muzzano, 27-2-03. Maksutov-Cassegrain 300/4800; WebCam Vesta Pro; Media di ca 350 frames selezionate da un video AVI di 30 secondi; Elaborazione con Astrostak e PICTURE Window; 350x296 pixel; 0.311 MB.



Muzzano, 27-02-03. Telescopio Maksutov-Cassegrain 300/4800; WebCam Vesta Pro; Media di 74 frames selezionate da un video di 20 secondi, 30 frames al secondo; Modo in bianco-nero; Elaborazione con Astrostak 2 e Picture Window; 320x303 pixel; 0.291 MB.

A. OSSOLA, MUZZANO,
Alosso@bluewin.ch



11-03-2003; Maksutov 300/4800; WebCam Vesta Pro-Auflösung 640x480 Pixel; Kombination von 41 AVI-Frames; Bearbeitung Astrostak und Picture Window 2.5; Aufnahmeort Muzzano/TI; 300x268 pixel; 0.268 MB.

AN- UND VERKAUF ACHAT ET VENTE

• Zu verkaufen

Sky and Telescope; 20 Jahrgänge, komplett 1983 bis 2002. Jahrgangweise in Ordnern bzw Schachteln. Preis nach Übereinkunft. Bitte sich melden bei:
HANS STALDER, Gotenstrasse 6/13, CH-3018 Bern.
Tel. 031 991 04 91.

• Suche

Basel: wo ich wohne ist der Himmelsausschnitt klein, Licht/Luftverschmutzung gross und weil kein Auto, suche ich Anschluss, um mit meinem GP8 an besserer Lage jeweils den Sternenhimmel beobachten zu können.
Tel./Fax: 061 301 59 55 - BRIGITTE BADER.

ASTRO-LESEMAPPE DER SAG

Die Lesemappe der Schweizerischen Astronomischen Gesellschaft ist die ideale Ergänzung zum ORION. Sie finden darin die bedeutendsten international anerkannten Fachzeitschriften:

Sterne und Weltraum
Sonne
Ciel et Espace
Galaxie
Sky and Telescope
Astronomy

Kosten: nur 30 Franken im Jahr!

Rufen Sie an: 071/841 84 41

HANS WITTWER, Seeblick 6, 9327 Tübach

Star Party vom 24.-26. Oktober 2003 in Falera

Wir möchten sie darüber informieren, dass wir am 24.-25.-26. Oktober 2003 die 2 Teleskopetreffen «mirasteilas» in Falera, Graubünden, Schweiz organisieren.

Auf unserer homepage

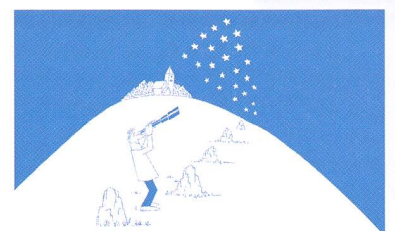
<http://www.mmirasteilas.net>

sind noch die genauen Daten angegeben. Wir möchten sie recht herzlich zu dieser Veranstaltung einladen und hoffen auf ein zahlreiches erscheinen.

Mit freundlichen Grüßen

**Astronomische
Gesellschaft Graubünden**

i.V. JOSÉ DE QUEIROZ und MANUEL TÖNZ



Die neue Maturität - Chance für die Astronomie in der Schule?

FRITZ EGGER

Die am 1. August 1995 in Kraft getretene Verordnung über die Anerkennung von gymnasialen Maturitätsausweisen (MAR) sieht vor, dass neben den Grundlagenfächern (Sprachen, Mathematik, Biologie, Chemie, Physik, Geistes- und Sozialwissenschaften, Bildendes Gestalten und/oder Musik) ein Schwerpunktsfach, darunter Physik und Anwendungen der Mathematik (P&AM), sowie ein Ergänzungsfach, u.a. Angewandte Mathematik (aber nicht gleichzeitig mit P&AM) gewählt werden müssen. Ferner haben die Kandidaten allein oder in einer Gruppe eine grössere eigenständige schriftliche oder schriftlich kommentierte Maturaarbeit zu erstellen und mündlich zu präsentieren. Diese Bestimmungen sind eine interessante Herausforderung an die Lehrkräfte un-

serer Mittelschulen, sind doch die Inhalte der Ergänzungs- und Schwerpunktsfächer nur in grossen Zügen umrissen.

An einem von der Schweizerischen Zentralstelle für die Weiterbildung der Mittelschullehrer (WBZ) und vom Verein schweizerischer Mathematik- und Physiklehrer (VSMP) im Mai 1998 durchgeführten Forum ist betont worden, dass die neuen Fächer und die Maturaarbeit Gelegenheiten für wirkliche Interdisziplinarität bieten. Es wurden mögliche Themenkreise erarbeitet und Ideen für Inhalte, Lehrpläne, Projekte, interdisziplinäre Themen ausgetauscht. Die Arbeit wird mit Hilfe eines Servers (ETH) fortgesetzt.

Neben Themen wie Simulation, Stochastik, Geometrie (eine Art Renaissance), Auswertung von Messdaten, Phi-

losophische Fragestellungen, Geschichte, wurde die Astronomie als wichtiger roter Faden durch das Fach P&AM behandelt. Sie ist nicht nur ein Anwendungsfeld der Mathematik, sondern in erster Linie eine die Erscheinungen beobachtende Wissenschaft, in der viele gezielte Beobachtungen einem Experiment entsprechen. Die anwesenden Physik- und Mathematiklehrer sehen vor, einen Lehrgang zu entwerfen, der diesen Gegebenheiten gerecht wird. Eine reelle Chance für die Astronomie in der Schule.

Einhellig wurde zudem festgestellt, dass die Lehrerausbildung, vor allem aber die Fortbildung, vermehrt astronomische Kenntnisse vermitteln soll. Die Anstrengungen der Arbeitsgruppe «Astronomie im Mittelschulunterricht» der WBZ werden selbstverständlich fortgesetzt. Es sei hier auch auf die Rencontres «Enseignants - Astronomes» hingewiesen, die am 3./4. November 1998 in Sitten stattfinden (Kontaktstelle: Observatoire de Genève, 1290 Sauverny).

FRITZ EGGER

Coteaux 1, CH-2034 Peseux

VERANSTALTUNGSKALENDER / CALENDRIER DES ACTIVITÉS

Juni 2003

• 2. Juni 2003

20:00 Uhr: Präsolare Sternenstaub - Botschafter aus der Zeit vor dem Sonnensystem. Vortrag von Philipp Heck, Zürich. Ort: Schulhaus Hubelmatt West. Veranstalter: Astronomische Gesellschaft Luzern (AGL).

• 5. Juni 2003

Missionen zur Sonnenforschung im All. Vortrag von Dr. A. Zehnder, Paul Scherrer Institut (PSI). Info und Anmeldung: Seminarreihe zur Weltraumtechnik, Sekretariat der HTA-BE, Tel. 031 33 55 111. Kostenpflichtig! www.hta-be.bfh.ch. Ort: Hochschule für Technik & Informatik, Aula der HTA-BE, Morgartenstr. 2c, 3014 Bern

• 12. Juni 2003

Erdbeobachtung aus dem Weltraum. Vortrag von Dr. U. Frei, Remote Sensing Laboratories (RSL), Universität Zürich. Info und Anmeldung: Seminarreihe zur Weltraumtechnik, Sekretariat der HTA-BE, Tel. 031 33 55 111. Kostenpflichtig! www.hta-be.bfh.ch. Ort: Hochschule für Technik & Informatik, Aula der HTA-BE, Morgartenstr. 2c, 3014 Bern

• 19. Juni 2003

Swiss Motors on Mars. Vortrag von Dipl. Ing. E. Elmiger, Maxon Motor AG, Sachseln. Info und Anmeldung: Seminarreihe zur Weltraumtechnik, Sekretariat der HTA-BE, Tel. 031 33 55 111. Kostenpflichtig! www.hta-be.bfh.ch. Ort: Hochschule für Technik & Informatik, Aula der HTA-BE, Morgartenstr. 2c, 3014 Bern

• 21./22. Juni 2003

SAG-Kolloquium 2003: Astrofotografie. Referenten: Hugo Blikisdorf, Hugo Jost, Josef Schibli. Info und Anmeldung: Hugo Jost, Lingeriz 89, 2450 Grenchen, Tel. 032/653 10 08. E-Mail hugojost@bluewin.ch. Ort: Feriensternwarte Calina, Carona/TI.

• 26. Juni 2003

Globale Satelliten-Kommunikation. Vortrag von Dipl. Ing. A. Kuonen, Verestar Inc., Leuk. Info und Anmeldung: Seminarreihe zur Weltraumtechnik, Sekretariat der HTA-BE, Tel. 031 33 55 111. Kostenpflichtig! www.hta-be.bfh.ch. Ort: Hochschule für Technik & Informatik, Aula der HTA-BE, Morgartenstr. 2c, 3014 Bern

• 28. Juni 2003

13 bis 18 Uhr: Astrofloh 2003. Verkauf von Teleskopen, astronomischem Zubehör und Literatur sowie extraterrestrischem Gestein und Metall. Info: Philipp Heck. E-Mail: philipp@darksky.ch. www.astroinfo.org/events/af/ Ort: Foyer des Kirchengemeindehaus, Limmatstrasse 114 (Nähe Limmatplatz), Zürich.

Juli 2003

• 3. Juli 2003

Zukunftsaussichten in der Raumfahrt. Vortrag von Dr. F. Casal, Energy-Parametrics, Jona. Info und Anmeldung: Seminarreihe zur Weltraumtechnik, Sekretariat der HTA-BE, Tel. 031 33 55 111. Kostenpflichtig! www.hta-be.bfh.ch. Ort: Hochschule für Technik & Informatik, Aula der HTA-BE, Morgartenstr. 2c, 3014 Bern

• 19. Juli bis 8. August 2003

The International Astronomical Youth Camp. Info und Anmeldung: Jörg Dietrich, Tel. ++49 89 32 386 944. E-Mail: info@iayc.org - www.iayc.org/2003/ Ort: Klingenthal, Deutschland.

September 2003

• 12./13. September 2003

3rd European Symposium on the Protection of the Night Sky. Info: Prof. Dr. Hans-Ulrich Keller, Carl Zeiss-Planetarium, D-70173 Stuttgart, BRD, Tel. +49 711 162 9215 oder +49 711 162 9226, E-Mail:

HUKPLAN@planetarium.s.shuttle.de. Ort: Planetarium Stuttgart (BRD). Veranstalter: International Dark-Sky Association (IDA).

Oktober 2003

• 24. bis 26. Oktober 2003

4. Stuttgarter CCD-Workshop. Info und Anmeldung: Schwäbische Sternwarte e.V., Geschäftsstelle, Seestr. 59/A, D-70174 Stuttgart, BRD, Tel. +49 711 226 0893, Fax +49 711 226 0895. E-Mail: ccd@sternwarte.de www.sternwarte.de/verein/ccd-ws/. Ort: Planetarium Stuttgart und Sternwarte Stuttgart, Uhlandshöhe (BRD).

• 24. bis 26. Oktober 2003

Amateur-Teleskoptreffen Mirasteilas. Info und Anmeldung: José De Queiroz, Tel. 081 921 30 48. E-Mail: teleskoptreffen@mirasteilas.net - www.mirasteilas.net. Ort: Falera/GR.

• 24./25. Oktober 2003

Nachmittags/abends: Mobiles Planetarium Zürich. Programme: D' Schtärnefee Mira, Fahrt durch die Milchstrasse, A Star is Born. Info: www.plan.ch. Ort: Kulturama Zentrum, 7153 Falera/GR. Veranstalter: José De Queiroz, Teleskoptreffen Mirasteilas.

• 31. Oktober (ev. 7.11.) 2003

19:30 Uhr: Die Welt des Kleinen Prinzen, Asteroidenforschung auf der Sternwarte Eschenberg. Vortrag von Markus Griesser. Ort: Universität Zürich, Hörsaal N.N., Rämistr. 71. Veranstalter: Astronomische Vereinigung Zürich (AVZ) und Gesellschaft der Freunde der Urania-Sternwarte.

astro!Info-Veranstaltungskalender
Hans Martin Senn - Tel. 01/312 37 75
astro!Info-Homepage: <http://www.astroinfo.ch/>
E-Mail: senn@astroinfo.ch

Freiwilligenarbeit in der Astronomie

STEPHAN SPAHR

Für unzählige Engagierte der SAG und der vielen lokalen Vereinen ist Amateur-Astronomie nicht nur persönliches Lernfeld und Freizeitbeschäftigung, sondern ein Beitrag zur kulturellen Vielfalt und zur volksnahen Bildung in unserer Gesellschaft. Sie ermöglichen unzähligen Interessierten ein ausserordentliches Erlebnis in einer Volkssternwarte, vernetzen Amateure und ihr Wissen untereinander, setzen sich ein gegen die Lichtverschmutzung und vieles mehr. Dies alles geschieht oft ohne Entgelt, sondern in Form eines freiwilligen Engagements. Dabei erwerben sie sich nicht nur astronomisches Wissen, sondern ebenso soziale Kompetenzen im Umgang mit Menschen. Diese Arbeit verdient nicht nur unser Dankeschön, sie soll auch besser anerkannt sein als kompetente Freiwilligenarbeit. Der Schweizerische Sozialzeit-Ausweis ist ein Instrument zum Nachweis von Fähigkeiten und Kompetenzen aus freiwilliger und ehrenamtlicher Arbeit, z.B. in der Amateur-Astronomie.

Verstehen, nachweisen und fördern der Freiwilligenarbeit

Freiwillige und ehrenamtliche Arbeit ist ein gesellschaftlicher Beitrag an Mitmenschen und Umwelt. Sie verdient entsprechende Anerkennung und Aufwertung. Durch Freiwilligenarbeit werden Fähigkeiten und Kompetenzen erworben und unter Beweis gestellt. Der Schweizerische Sozialzeit-Ausweis richtet sich an Freiwillige und Ehrenamtliche aus allen Bereichen. Er soll helfen, freiwillige und ehrenamtliche Arbeit so nachzuweisen, dass der Wert der eigenen Arbeit verstanden und sichtbar wird. Erfahrungen aus der Freiwilligenarbeit werden so vergleichbar mit anerkannter Berufserfahrung. Der Sozialzeit-Ausweis ist somit ein Hilfsmittel zur gezielten Förderung und Aufwertung der Freiwilligenarbeit.

Der Sozialzeit-Ausweis

In Form einer persönlichen Arbeitsmappe enthält der Sozialzeit-Ausweis Nachweis-Dokumente, die als Beleg bei einer Stellenbewerbung oder bei einem beruflichen Wiedereinstieg dienen. Damit wird freiwillige und ehrenamtliche Arbeit auch im Hinblick auf die zukunftsgerichtete Forderung nach einer

Anrechnung bei den Sozialversicherungen oder nach einem Steuerabzug dokumentiert.

Ein Leitfaden hilft beim Gebrauch des Ausweises und bietet eine Fülle von Beispielen sowie Informationen zur Freiwilligenarbeit.

Das Angebot

- Allgemeine Einführung in das aktuelle Verständnis von Freiwilligenarbeit
- Eine Auflistung von heute anerkannten Standards in der Freiwilligenarbeit
- Leitfaden mit Erläuterungen zum Ausfüllen der Nachweise und Mustervorlagen
- Hinweise auf Beratungs- und Kontaktstellen sowie weiterführende Materialien
- Eine tabellarische Uebersicht zur Erfassung der geleisteten Arbeit
- Eine tabellarische Uebersicht der besuchten Weiterbildungen
- Leere Nachweisdokumente

Einheitlicher Ausweis für die ganze Schweiz

Der Schweizerische Sozialzeit-Ausweis ist ein Produkt des forum FREIWILLIGEN-ARBEIT.ch. Es wurde in Zusammenarbeit mit dem Bundesamt für Berufsbildung und Technologie BBT realisiert.

Bezugsadresse:

Geschäftsstelle Sozialzeit-Ausweis
Schwarztorstrasse 20, 3007 Bern
Tel 031 398 40 87, Fax 031 398 40 86
info@sozialzeitausweis.ch

Faire connaître le bénévolat afin de l'encourager

Le travail volontaire représente une contribution appréciable envers le prochain et l'ensemble de la société. A ce titre, il mérite reconnaissance et considération. En outre, les activités de ce genre permettent à la fois de mettre à l'épreuve les compétences antérieures et d'en acquérir de nouvelles. L'attestation de bénévolat est donc destinée aux bénévoles comme aux responsables au

sein des organisations. Son objectif est de faire apparaître et apprécier le travail accompli. Les expériences acquises dans ce cadre sont alors placées sur un pied d'égalité avec les activités professionnelles. Autrement dit, cet instrument aide à promouvoir le bénévolat et à souligner son importance.

L'attestation de bénévolat

Ce document se présente sous la forme d'un portefeuille personnel. Il contient une série de pièces qui se révéleront utiles à l'intéressé s'il fait des offres de service ou s'il reprend un métier. D'autre part, il servira de justificatif pour une demande d'imputation auprès des assurances sociales ou pour une réduction d'impôts éventuelle.

Un vademecum, accompagné de modèles et d'une foule d'informations sur les activités bénévoles, en facilite l'utilisation.

Comprendere, valorizzare e promuovere il volontariato

Il lavoro volontario rappresenta un pregevole contributo a favore del prossimo e di tutta la società. A tale titolo esso merita riconoscimento e considerazione. Inoltre, le attività di volontariato permettono di acquisire e di mettere alla prova capacità e competenze. L'attestato di volontariato è destinato sia ai volontari che ai responsabili in seno alle organizzazioni. Lo scopo di tale documento è di valorizzare il lavoro volontario e far sì che l'impegno individuale sia messo in evidenza e ottenga il dovuto riconoscimento. L'esperienza maturata in tale ambito viene così posta su un piede d'uguaglianza con le attività professionali. In altre parole, l'attestato di volontariato aiuta a promuovere il volontariato e a sottolinearne l'importanza.

L'attestato di volontariato

L'attestato di volontariato si presenta sotto forma di una cartella personale contenente una serie di documenti che potranno rivelarsi utili nella ricerca di un impiego o nell'eventualità di una reintegrazione professionale. L'attestato potrà inoltre servire da giustificativo per una richiesta di compensazione presso le assicurazioni sociali o per un'eventuale detrazione dalle imposte. Un vademecum corredato di modelli e di numerose informazioni sul volontariato facilita l'utilizzo dell'attestato.

STEPHAN SPAHR
Bellevue - CH-3294 Büren a.A

PETER D. WARD, DONALD BROWNLEE, *Rare Earth; why complex life is uncommon in the Universe*, Copernicus, Springer-Verlag, New York, 2000, 333 pp., relié, ISBN 0-387-98701-0, prix Euro 26.20

Ce livre bien fait et très intéressant est dédié à la mémoire d'EUGÈNE SHOEMAKER et de CARL SAGAN. La question qui y est discutée concerne la pluralité des mondes habités: il s'agit de se faire une idée de la fréquence des planètes qui abriteraient non seulement la vie, mais une vie «complexe», c'est-à-dire non seulement microbienne, mais «animale», les animaux entendus ici étant évolués, à l'image des mammifères qui nous entourent.

Depuis une quarantaine d'années, il est d'un usage assez répandu, chez les astronomes surtout, d'admettre que l'univers recèle une foule de planètes abritant la vie, et même une

vie évoluée, voire intelligente – au sens de «capable de construire des radiotélescopes». C'est la conséquence naturelle du «principe de banalité», ou du principe copernicien, extrapolé à l'humanité. Et l'on sait depuis quelques années que notre soleil n'est pas seul à être accompagné de planètes, puisqu'une bonne centaine d'autres étoiles ont été découvertes depuis, qui sont dans le même cas. Ainsi commence-t-on peu à peu à pouvoir préciser certains des facteurs qui figurent dans la fameuse équation de FRANK DRAKE, qui donne le nombre de civilisations extraterrestres présentes dans notre galaxie. En 1974, CARL SAGAN estimait ce nombre à un million. Le mérite de ce livre est de réexaminer en détail tous les facteurs qui, dans l'histoire de la terre, ont permis non pas tellement l'apparition de la vie proprement dite (encore très énigmatique

mais apparemment très précoce), mais surtout son évolution vers des formes animales complexes, telles que celles que nous voyons aujourd'hui. Or, le recensement de toutes les conditions qui ont été réunies sur la terre (et sur la terre seule, dans le système solaire) laisse fortement penser que la probabilité d'existence d'une vie complexe sur d'autres planètes est extrêmement faible, même si un nombre beaucoup plus grand de planètes peuvent éventuellement abriter une vie élémentaire. En particulier, les auteurs soulignent l'importance de la tectonique des plaques pour régulariser la quantité de gaz carbonique – crucial par son effet de serre – dans l'atmosphère, mais aussi pour favoriser la diversité biologique. Bien entendu, d'autres facteurs tels que «zone d'habitabilité» (autour du soleil, mais aussi dans la galaxie), présence de la



MATERIALZENTRALE

P.O.Box 715
CH-8212 Neuhausen a/Rhf
+41(0)52-672 38 69
email: astroswiss@hotmail.com

Ihr Spezialist für Selbstbau und Astronomie

- *Spiegelschleifgarnituren*, Schleifpulver, Polierpech.
- *Astro-Mechanik* wie Fangspiegelzellen, Stunden-, Deklinationskreise, Okularschlitten, Sucher, Adapter usw.
- *Qualitäts-Astro-Optik* wie Spectros-Schweiz und andere Marken: Helioskop, Achromate, Okulare, Filter, Fangspiegel, bel./unbel. Fadenkreuzokulare, Sucher, Messokulare, Zenitprisma, Parabolspiegel ø bis 30 cm, Schmidt-Cassegrain, Newton-Teleskope, Refraktoren usw.
- **MEADE-Händler**: Sie erhalten bei uns sämtliche Produkte aus dem MEADE-Katalog.

Alles Weitere im SAG Rabatt-Katalog «Saturn»

4 internationale Antwortscheine (Post) oder CHF 4.50 in Briefmarken zusenden.

Attraktiver SAG-Barzahlungs-Rabatt

Schweizerische Astronomische Gesellschaft



Dark-Sky Switzerland

Gruppe für eine effiziente Aussenbeleuchtung
Fachgruppe der Schweizerischen Astronomischen Gesellschaft
Mitglied der International Dark-Sky Association

www.darksky.ch

info@darksky.ch

Wir brauchen Ihre Unterstützung, denn wir wollen

- ⇒ die Bevölkerung über Lichtverschmutzung aufklären
- ⇒ Behörden und Planer bei Beleuchtungskonzepten beraten
- ⇒ neue Gesetzestexte schaffen

Dazu brauchen wir finanzielle Mittel* und sind auf Ihren Beitrag angewiesen.
Ihr Beitrag zählt und ist eine Investition in die Qualität des Nachthimmels.
Direkt auf PC 85-190167-2 oder über www.darksky.ch



**Mitglieder CHF 20
Gönner ab CHF 50**

DSS Dark-Sky Switzerland - Postfach - 8712 Stäfa - PC 85-190167-2

* z.B. für Pressedokumentation, Material, Porto, Telefon

BUCHBESPRECHUNGEN BIBLIOGRAPHIES

lune et de Jupiter et Saturne, sont examinés et discutés en détail. La conclusion est que le million de civilisations galactiques de CARL SAGAN pourraient fort bien se réduire à une seule. Les auteurs ont des compétences parfaitement pertinentes: PETER WARD est géologue et a travaillé sur les extinctions massives; DONALD BROWNLEE est astronome et dirige la mission Stardust (qui doit recueillir des poussières cométaires et les ramener sur terre): il est spécialiste de l'origine du système solaire, des comètes et météorites, et de l'astrobiologie.

Cet excellent livre est riche en références et comporte un index. Il sera particulièrement apprécié de tous ceux qui s'interrogent sur la place de l'homme dans l'univers, sur l'astrobiologie en général, et sur les origines de la vie et son évolution. Sa nature pluridisciplinaire est à souligner, et ne fait que renforcer son intérêt pour quiconque désire se cultiver. Je le recommande très chaudement à tout curieux que l'anglais ne rebute pas!

GIRAUD ROBERT: «Les planètes visitées», Castor Poche, Flammarion, 2002, (nouvelle édition), 128 pp., broché, ISBN 2-08161278-X, Euros 6.-.

Ce petit livre, simple et en général bien fait, est destiné aux enfants à partir de 10 ou 11 ans. Il commence assez logiquement par la Terre et la Lune, continue, par ordre d'éloignement, par Vénus, Mars et Mercure et finit par les planètes géantes et leurs satellites glacés. Pluton est bien situé dans le contexte des objets transneptuniens qui constituent la ceinture de Kuiper, et les astéroïdes, de la ceinture classique entre Mars et Jupiter, sont également décrits. Les comètes ne sont décrites que très brièvement. Par contre, deux photos spectaculaires de l'astéroïde Eros, prises par la sonde NEAR, figurent en bonne place.

Une dernière partie, intitulée «Comprendre les planètes», tente de décrire la matière dont les planètes se sont formées. Cette partie n'est pas la meilleure, peut-être parce qu'elle est trop ambitieuse. En effet, invoquer «la pression gravitationnelle» pour expliquer l'impossibilité de formation d'un gros satellite très près d'une planète est décidément bien fâcheux. On s'étonne aussi de voir, dans un commentaire en marge, la sonde COROT lancée en 2001, donc avec plusieurs années d'avance! Cela dit, il faut quand même souligner le souci d'actualité dont témoigne l'auteur, et les très beaux clichés en couleur des 8 pages centrales. La plupart ont été pris par des sondes spatiales, mais quelques-uns sont des représentations d'artiste ou des images synthétiques, d'ailleurs dûment signalées comme telles. On espère seulement que ces dernières n'introduiront pas de confusion dans l'esprit des petits lecteurs.

Ce petit livre agréable à lire est susceptible d'instiller le goût de l'astronomie chez les enfants.

PIERRE NORTH

Impressum Orion

Leitende Redaktoren/Rédacteurs en chef:

Dr. NOËL CRAMER, Observatoire de Genève,
Ch. des Maillettes 51, CH-1290 Sauverny
Tél. 022 755 26 11

e-mail: noel.cramer@obs.unige.ch
http://obswww.unige.ch/~cramer

Dr. ANDREAS VERDUN, Astronomisches Institut,
Universität Bern, Sidlerstrasse 5, CH-3012 Bern
Tél. 031 631 85 95

e-mail: andreas.verdun@aiub.unibe.ch
http://www.aiub.unibe.ch

Manuskripte, Illustrationen und Berichte sind an obenstehende Adressen zu senden. Die Verantwortung für die in dieser Zeitschrift publizierten Artikel tragen die Autoren.

Les manuscrits, illustrations et rapports doivent être envoyés aux adresses ci-dessus. Les auteurs sont responsables des articles publiés dans cette revue.

Auflage/Tirage:

2800 Exemplare, 2800 exemplaires.

Erscheint 6 x im Jahr in den Monaten Februar, April, Juni, August, Oktober und Dezember.

Paraît 6 fois par année, en février, avril, juin, août, octobre et décembre.

Copyright/Copyright:

SAG. Alle Rechte vorbehalten.

SAS. Tous droits réservés.

Druck/Impression:

Imprimerie du Sud SA, CP352, CH-1630 Bulle 1

e-mail: michel.sessa@imprimerie-du-sud.ch

Anfragen, Anmeldungen, Adressänderungen sowie Austritte und Kündigungen des Abonnements auf ORION (letzteres nur auf Jahresende) sind zu richten an: Für Sektionsmitglieder an die Sektionen. Für Einzelmitglieder an das Zentralsekretariat der SAG:

Informations, demandes d'admission, changements d'adresse et démissions (ces dernières seulement pour la fin de l'année) sont à adresser: à leur section, pour les membres des sections; au secrétariat central, pour les membres individuels.

SUE KERNEN, Gristenbühl 13, CH-9315 Neukirch.
Tél. 071 477 17 43, E-mail: sag.orion@bluewin.ch

Abonnementspreise

Schweiz: SFr. 60.-, Ausland: € 50.-.

Jungmitglieder (nur in der Schweiz): SFr. 30.-

Mitgliederbeiträge sind erst nach Rechnungsstellung zu begleichen.

Abonnement

Suisse: Frs. 60.-, étranger: € 50.-.

Membres juniors (uniquement en Suisse): Frs. 30.-.
Le versement de la cotisation n'est à effectuer qu'après réception de la facture.

Zentralkassier/Trésorier central:

URS STAMPFLI, Däleweidweg 11, (Bramberg)

CH-3176 Neuenegg,

Postcheck-Konto SAG: 82-158 Schaffhausen.

Einzelhefte sind für SFr.10.- zuzüglich Porto und Verpackung beim Zentralsekretär erhältlich.

Des numéros isolés peuvent être obtenus auprès du secrétariat central pour le prix de Frs.10.- plus port et emballage.

Aktivitäten der SAG/Activités de la SAS:

http://www.astroinfo.ch

Ständige Redaktionsmitarbeiter/ Collaborateurs permanents de la rédaction

THOMAS BAER, Bankstrasse 22,
CH-8424 Embrach
e-mail: thomas.baer@wt.net.ch

ARMIN BEHREND, Vy Perroud 242b
CH-2126 Les Verrières/NE
e-mail: omg-ab@bluewin.ch

JEAN-GABRIEL BOSCH,
90, allée des Résidences du Salève,
F-74160 Collonges S/Salève

HUGO JOST-HEDIGER, Lingeriz 89,
CH-2540 Grenchen
e-mail: hugo.jost@infrasys.ascom.ch

STEFAN MEISTER, Steig 20,
CH-8193 Eglisau
e-mail: stefan.meister@astroinfo.ch

HANS MARTIN SENN, Püntstrasse 12,
CH-8173 Riedt-Neerach
e-Mail: senn@astroinfo.ch

Übersetzungen/Traductions:

Dr. H. R. MÜLLER,
Oescherstrasse 12,
CH-8702 Zollikon

Korrektor/Correcteur:

Dr. ANDREAS VERDUN,
Astronomisches Institut, Universität Bern,
Sidlerstrasse 5, CH-3012 Bern
e-mail: verdun@aiub.unibe.ch

Inserate/Annonces:

Das Amt des Orion-Kassiers ist z.Z. vakant.
Bitte wenden Sie sich an die leitenden Redaktoren.

Le poste de caissier Orion est momentanément vacant. Veuillez vous adresser aux rédacteurs en chef.

Redaktion ORION-Zirkular/ Rédaction de la circulaire ORION

MICHAEL KOHL,
Im Brand 8, CH-8637 Laupen
e-mail: mike.kohl@gmx.ch

Astro-Lesemappe der SAG:

HANS WITTWER,
Seeblick 6,
CH-9372 Tübach

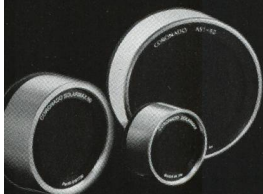
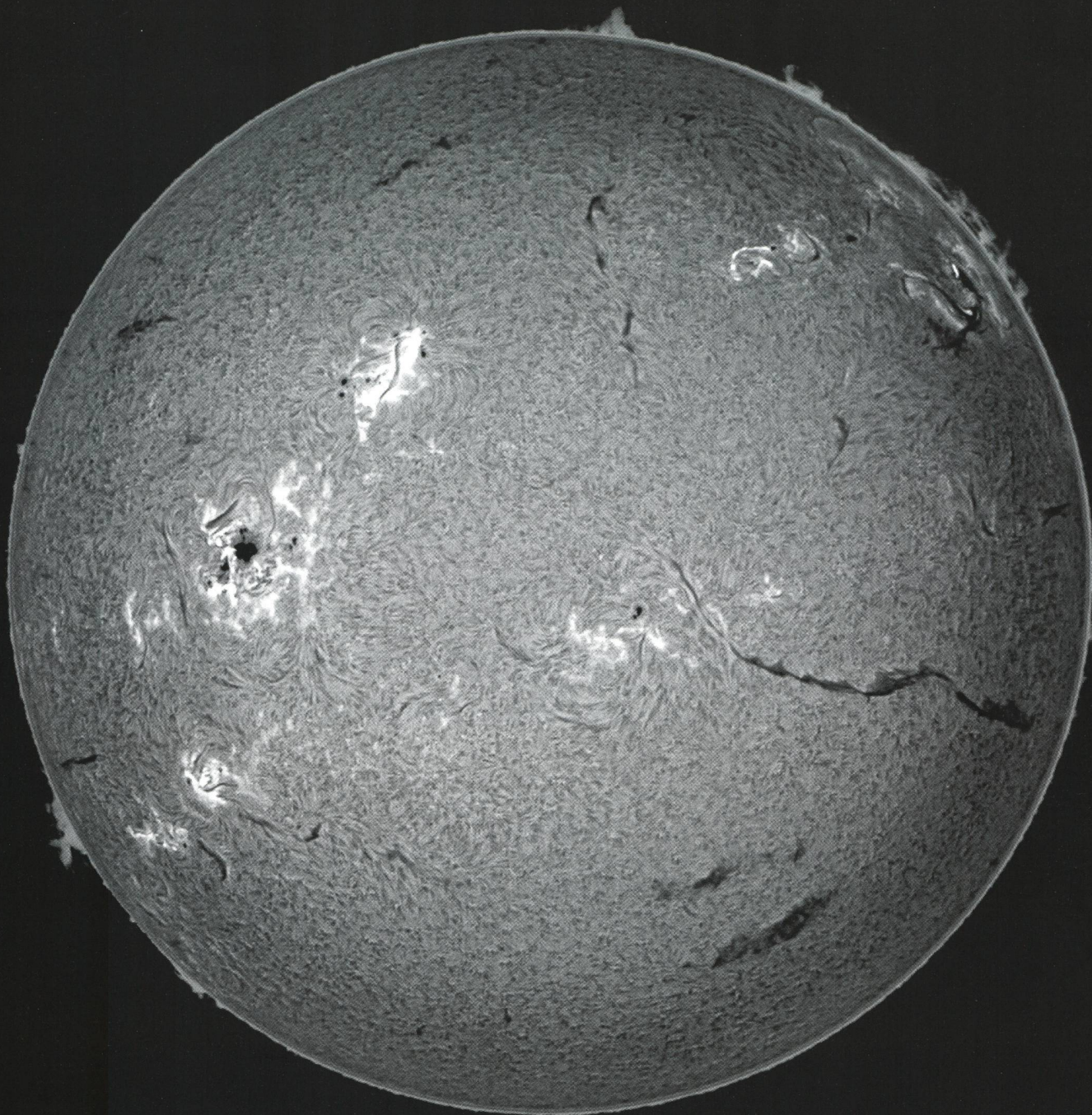
ISSN 0030-557 X

Inserenten / Annonceurs

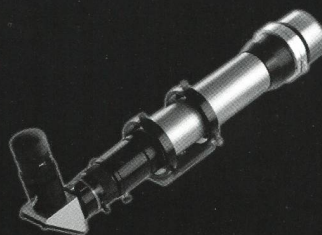
• **ASTRO-LESEMAPPE**, Seite/page 46; • **ASTRO-MATERIAL**, Seite/page 49; • **DARK-SKY SWITZERLAND**, Stäfa, Seite/page 49; • **GALILEO**, Morges, Seite/page 51; • **MEADE INSTRUMENTS EUROPE**, D-Gräfelfing, Seite/page 2; • **SAG-KOLLOQUIUM 2003**, Sternwarte Calina, Carona, Seite/page 11; • **STAR PARTY**, Falera, Seite/page 46; • **WYSS FOTO**, Zürich, Seite/page 13,52; • **ZUMSTEIN FOTO-VIDEO**, Bern, Seite/page 40.

CORONADO

Coronado Filters



Solar Max 40mm, BF05, Tmax : 1960.-
Solar Max 60mm, BF10, Tmax : 4859.-
Solar Max 90mm, BF10, Tmax : 9766.-



MaxScope 40mm : 3374.-
MaxScope 60mm : 6206.-
MaxScope 90mm : bald, *bientôt*

Wir stehen gerne für eine persönliche Beratung zu Ihrer Verfügung :
Pour un conseil personnalisé et professionnel, n'hésitez pas à nous contacter :

www.galileo-planet.ch

GALILEO · Grand-Rue 68 · CH-1110 Morges · e-mail : info@galileo-planet.ch
Tél : +41 (0) 21 803 30 75 · Fax : +41 (0) 21 803 71 20



CGE SERIE

**Gutes Werkzeug ist die Basis
für erfolgreiches Arbeiten.**

CELESTRON®

Optik	CGE 800	CGE 925	CGE 1100	CGE 1400
Brennweite	2032mm / F10	2350mm / F10	2800mm / F10	3910mm / F11
Sekundärspiegel-Obstruktion	2,7"	3,35"	3,75"	4,5"
Auflösungsvermögen nach Raleigh-Bogensekunden	0.68	0.59	0.50	0.39
Vergütung	Starbright TM	Starbright TM	Starbright TM	Starbright TM
Tubusmaterial	Kohlefaser	Aluminium	Kohlefaser	Aluminium
Fastar-Vorbereitung	ja	nein	ja	ja

Standard Zubehör	CGE 800	CGE 925	CGE 1100	CGE 1400
Okular	25mm Plössl	25mm Plössl	25mm Plössl	25mm Plössl
Zenit Spiegel/Prisma	Zenitprisma 11/4"	Zenitprisma 11/4"	Zenitprisma 11/4"	Zenit Spiegel 2"
Sucherfernrohr	6x30 gerade	9x50 gerade	9x50 gerade	9x50 gerade
Stromversorgung	Autobatterie- getaktetes Netzteil	Autobatterie- getaktetes Netzteil	Autobatterie- getaktetes Netzteil	Autobatterie- getaktetes Netzteil
Gegengewichte	1 x 5 kg	1 x 12 kg	1 x 12 kg	2 x 12 kg

CGE-Serie mit GPS-Option

**CGE – eine deutsche,
parallaktische GOTO-Montierung für
die komplette Baureihe der
CELESTRON Schmidt-Cassegrain-
Optiken.**

CGE 1400
Fr. 15'990.-

CGE 1100
Fr. 9'990.-

CGE 925
Fr. 9'290.-

CGE 800
Fr. 8'290.-

CGE 1400
CGE 1100
CGE 925
CGE 800

CGE-Montierung
Fr. 7'390.-

Technische Daten der CGE-Montierung

Software:

- Objektdatenbank mit 40.000 Objekten
- 400 benutzerdefinierte Objekte
- Hibernat-Funktion: erhält die Position auch bei ausgeschalteter Montierung
- Polausrichtungsfunktionen für Nord- und Süd-Himmel
- Diverse Bewegungsfilter/es werden nur Objekte über dem Horizont angezeigt
- Permanentes PEC – korrigiert den periodischen Fehler, den alle Schneckenantriebe konstruktionsbedingt besitzen.

Elektronik:

- erschütterungsfreier Lauf und sanfte Bewegungsabläufe bei der Schnellpositionierung durch elektronische Rampensteuerung
- Nullpunktgeber in beiden Achsen
- permanente Echtzeituhr
- Frei definierbare Endschalter in der Stundenachse
- 12V Gleichstrom-Servomotoren mit angesetzten Achscodern
- 850 mA Stromaufnahme
- Encoder Auflösung: 0,11 Bogen-sekunden!
- 4"/Sekunde Maximalgeschwindigkeit

Mechanik:

- Stundenachse/Deklinationsachse:
- 1" = 2,54 cm hydraulisch geschliffene Welle aus V2A rostfreiem Stahl
- zwei vorgespannte Kegelrollenlager Ø 50 mm
- 120 mm/83 mm Ø Drucklager
- vorgespanntes Ø 135 mm Bronze-Schneckenrad mit 180 Zähnen, gefertigt nach US-Präzisionsnorm AGMA 10
- 11 mm Ø geschliffene Schnecke aus rostfreiem Stahl
- 4-Punkt/2-Punkt Drucklager-Kupplung mit rostfreier Andruckscheibe. Erlaubt eine rutschfeste Klemmung, besonders wichtig für fotografische Anwendung.
- Rundlaufgenauigkeit 10-15 Bogensek. Pendelschlag/ohne elektron. Korrektur
- Polhöhe: 10° bis 60° nördl. oder südl. Breite
- Tragkraft: 29,5 kg

Optionales Zubehör (kl. Auswahl):

- 12 V „Power Tank“ 7Ah Batterie-Stromversorgung (Best. Nr. 919367)
- 2" 70° Axiom Weitwinkelokulare
- Telekompressor f/6,3 (Best. Nr. 919529)
- CN 16 6PS Modul (Best. Nr. 919255)
- Polsucher beleuchtet

CELESTRON Teleskope von der Schweizer Generalvertretung mit Garantie und Service.

proastro
P. WYSS PHOTO-VIDEO EN GROS

Dufourstrasse 124 • 8034 Zürich
Tel. 01 383 01 08 • Fax 01 383 00 94
E-Mail: info@wyssphotovideo.ch