

# Wiedergeburt der traditionellen Himmelsüberwachung und Astrometrie dank moderner Techniken

Autor(en): **Schildknecht, Thomas**

Objektyp: **Article**

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

Band (Jahr): **61 (2003)**

Heft 316

PDF erstellt am: **24.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-898405>

## **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

## **Haftungsausschluss**

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

# 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»

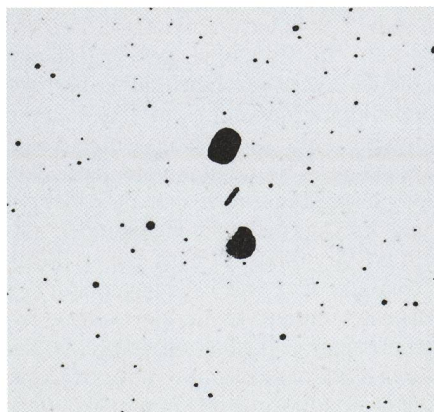
Seit jeher haben Menschen den Himmel sorgfältig beobachtet und nach Veränderungen und «Erscheinungen» abgesehen. Sie stellten etwa fest, dass einige wenige Objekte gegenüber der grossen Mehrheit der Sterne «wandeln», und gaben ihnen entsprechend den Namen «Wandelsterne» oder lateinisch «Planetae». Andere 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 eindrückliche 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 abgesehen. 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 Bionokular 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 Matrix 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.

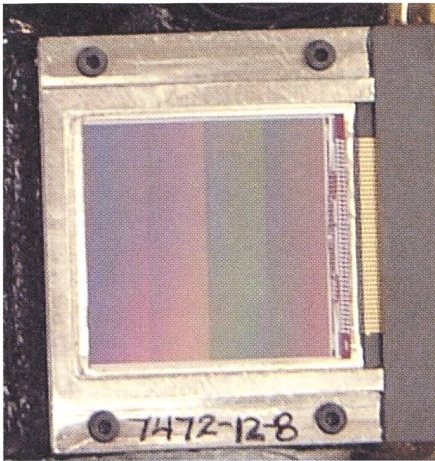


Fig. 2: Einer der am Zimmerwalder Teleskop ZIMLAT eingesetzten CCD Detektoren. Der Detektor besitzt 2048 x 2048 Bildelemente und hat einen Durchmesser von circa 2.5 Zentimetern.

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

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 Differenzenbild zusätzlich mit der Maske abgedeckt. Übrig bleiben Objekte, die auf dem Suchbild «neu» sind, in unserem Beispiel (unten rechts) fünf geostationäre Satelliten.

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

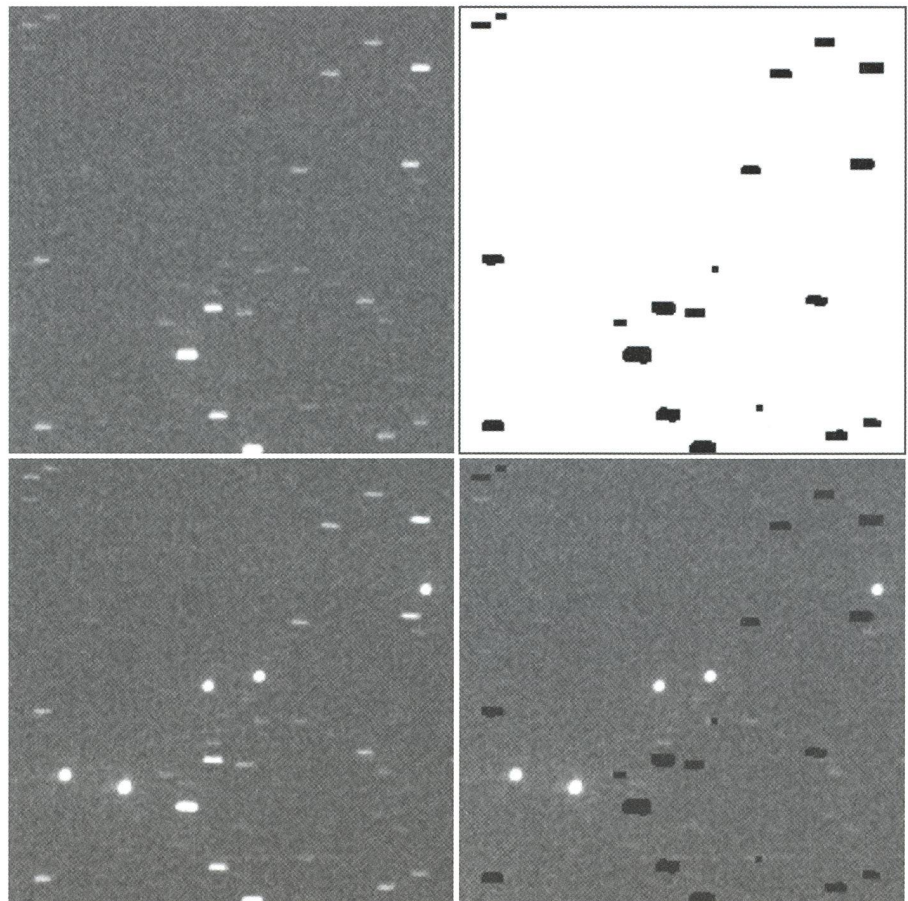
### Die moderne Version der Himmelsüberwachung

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 Differenzenbild 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 Differenzenbild 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 Differenzenbild 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



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 himmelfesten 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

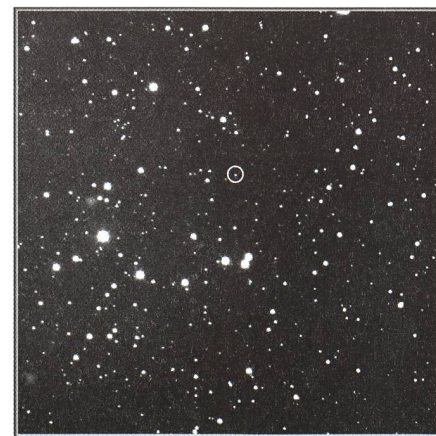
Seit langem ist bekannt, dass «herumvagabundierende» kleine Körper im Sonnensystem, wie Kleinplaneten und

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  $12 \times 12$  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  $-120^\circ$  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») pre-

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

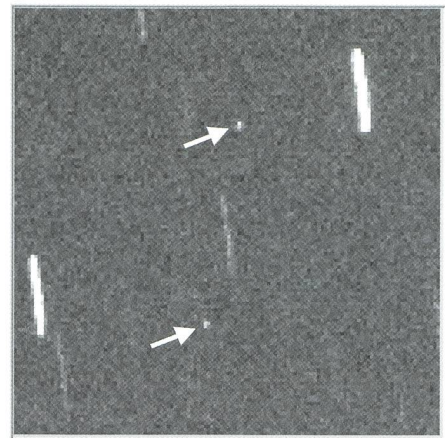
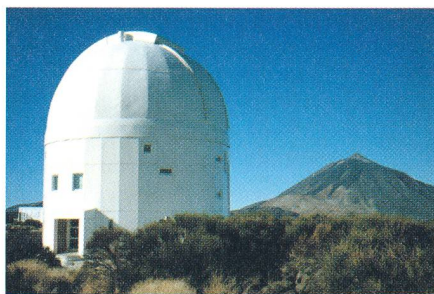
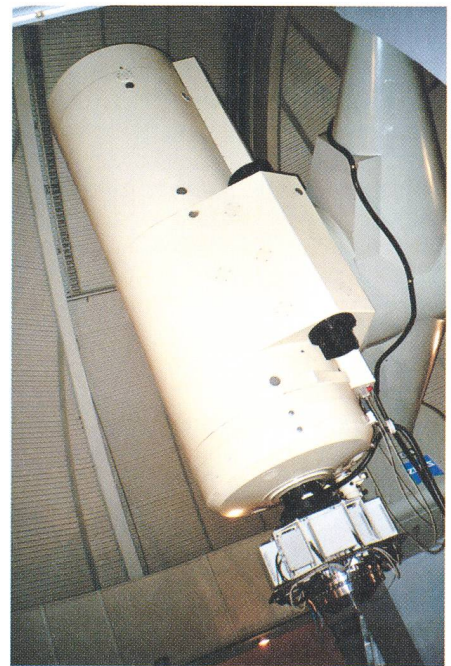


Fig. 7: Kleiner Ausschnitt aus einer Suchaufnahme von Teneriffa. Die mit Pfeilen markierten Objekte (astronomische Helligkeit  $m_v=19$ ) sind kleine Schrotteile von ca. 30 Zentimetern Durchmesser in einem Abstand von 36 000 Kilometern!

äsentieren 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 unbekanntem Teilen war unerwartet und ist erst mit diesen

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



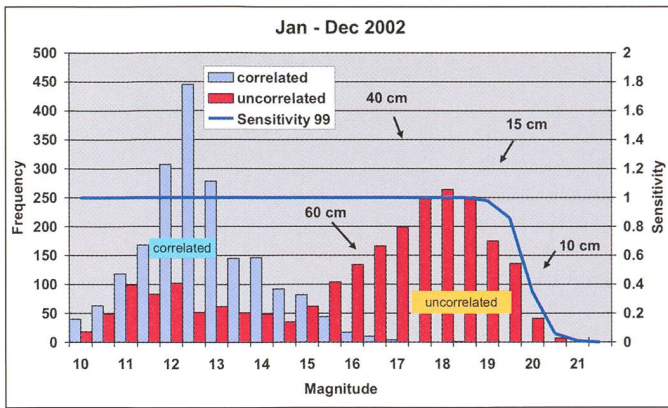


Fig. 8: Helligkeitsverteilung (in astronomischen Magnituden) aller während den 80 Beobachtungsnächten im Jahre 2002 gefundenen Objekte. Blaue Balken («correlated») repräsentieren bekannte Satelliten und Raketenoberstufen, während unbekannte Objekte (Raumschrott) mit roten Balken («uncorrelated») dargestellt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

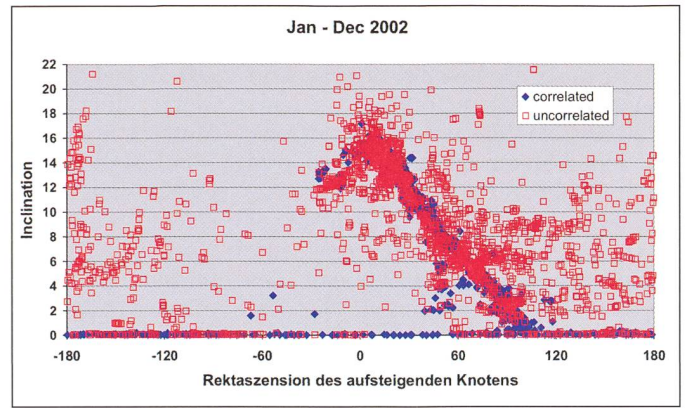


Fig. 9: Verteilung der Inklination gegenüber der Rektaszension des aufsteigenden Knotens für alle im Jahre 2002 gefundenen Objekte. Bekannte Objekte sind blau und unbekannte Objekte rot dargestellt.

Messungen entdeckt worden! Scheinbar hat die Verteilung der unbekannt 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 wohlbekannt Präzession der Bahnebenen im kombinierten Schwerefeld von Erde, Mond und Sonne her. Auffallend ist jedoch die deutlich andere Verteilung der unbekannt 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.

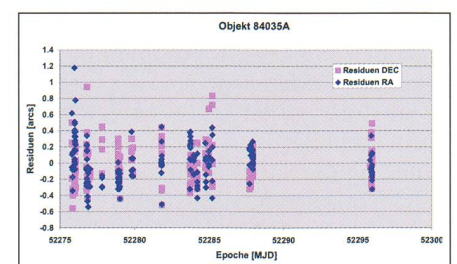
Diese Laufzeit wird dann in eine Distanz umgerechnet. Auf ähnlichem Weg kann auch die durch die Bewegung des Satelliten erzeugte Frequenzverschiebung der Trägerwelle des Kommunikationssignals, die sogenannte Dopplerverschiebung, gemessen werden. Aus dieser Messung kann die Relativgeschwindigkeit zwischen 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 Erdabplattung 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 himmelsfeste 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

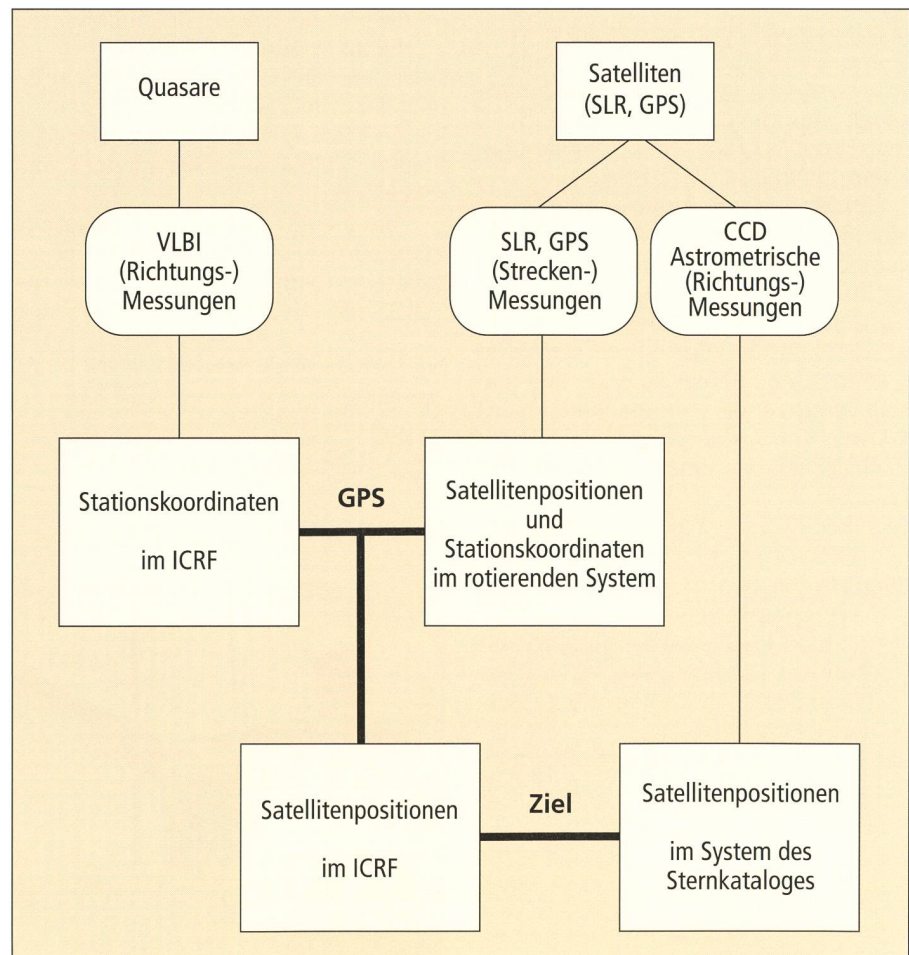


Fig 11: Verknüpfung des quasarfesten Koordinatensystems (ICRF) mit konventionellen Referenzsystemen basierend auf Sternkatalogen mittels optischer Beobachtung künstlicher Satelliten.