HAMFU
HISTORY

KRIEG IM AETHER

Vorlesungen an der Eidgenössischen Technischen Hochschule in Zürich
im Wintersemester 1979/1980
Leitung: Abteilung für Übermittlungstruppen, Divisionär A. Guisolan

Satellitengeodäsie und ihre militärische Bedeutung

Referent: Werner Gurtner, Dr. sc. techn.

Diese Vorlesung wurde durch die Stiftung HAMFU digitalisiert und als
PDF Dokument für www.hamfu.ch aufbereitet.

SATELLITENGEODÄSIE UND IHRE MILITÄRISCHE BEDEUTUNG

Dr. W. Gurtner

1. Einleitung

Künstliche Erdsatelliten sind seit Beginn des "Weltraumzeitalters" - 1957 umkreiste Sputnik erstmals die Erde - auf grosses Interesse der Oeffentlichkeit gestossen. Weniger bekannt jedoch ist die Tatsache, dass bis jetzt mehr als 60 Prozent aller amerikanischen und russischen Erdsatelliten militärischen Zwecken dienten. Viele Aufgaben, welche an Satelliten gestellt werden, können nur gelöst werden, wenn ihre Bahnen sehr genau vorausberechnet oder vermessen werden können. Voraussetzung dazu ist unter anderem eine detaillierte Kenntnis des Gravitationsfeldes und der Form und Grösse der Erde. Der Wissenschaftszweig, der sich damit befasst, ist die sogenannte Geodäsie, die Erdvermessung, welche sich in den letzten Jahren ebenfalls der Satelliten als Hilfsmittel bedient (Satellitengeodäsie).

Im folgenden sollen nun die Aufgaben und Methoden der Satellitengeodäsie näher beschrieben und ihre Bedeutung für militärische Anwendungen erläutert werden.

Im letzten Kapitel wird die Satellitenbeobachtungsstation Zimmerwald der Universität Bern - die einzige Stelle in der Schweiz, welche sich aktiv mit Satellitengeodäsie beschäftigt - vorgestellt.

Zu Beginn jedoch möchten wir, um uns mit dem gesamten Problem vertrauter zu machen, anhand einfacher Ueberlegungen einige Eigenschaften der Bahnen von um die Erde kreisenden Satelliten herausarbeiten.

Adresse des Autors:

Werner Gurtner, Dr. sc. techn.
c/o Astronomisches Institut der Universität
3012 Bern

2. Eigenschaften der Bahnen künstlicher Erdsatelliten

2.1. Allgemeines

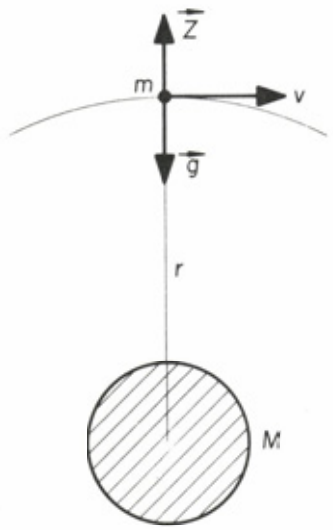
Grundsätzlich bewegen sich künstliche Erdsatelliten auf Bahnen um die Erde, welche denselben Gesetzen gehorchen wie die Bahnen der Planeten um die Sonne.

Unter der Voraussetzung, dass die Zentralmasse ($M_z >> m_{sat}$) kugelförmig und radialsymmetrisch aufgebaut ist, verläuft die Bahn gleich wie diejenige um einen Massenpunkt:
Es gelten die 3 bekannten Keplerschen Gesetze:

1. Der Satellit beschreibt einen Kegelschnitt (Ellipse), der Zentralkörper befindet sich in einem Brennpunkt.
2. Der Radiusvektor überstreicht in gleichen Zeiten gleiche Flächen.
3. Das Quadrat der Umlaufzeit U dividiert durch die 3. Potenz der grossen Halbachse a ist konstant: $U^2 / a^3 = \text{const.}$

2.2. Spezialfall: Kreisbahn

Indem wir uns hier auf den einfachsten Fall der Kreisbahn eines Massenpunktes um eine grosse Zentralmasse beschränken, können wir sehr einfach drei wichtige Grössen - Bahnradius, Geschwindigkeit und Umlaufzeit - miteinander verknüpfen (Fig. 1).



Legende:

m = Masse des Satelliten
v = Geschwindigkeit des Satelliten
r = Bahnradius des Satelliten
z = Zentrifugalkraft
g = Schwerkraft
M = Masse des Zentralkörpers

Fig. 1 Kreisbahn als Spezialfall einer Satellitenbahn

Die Zentrifugalkraft z ist entgegengesetzt gleich der Anziehungskraft g:

$$z = \frac{m \cdot v^2}{r} \quad , \quad g = G \cdot \frac{M \cdot m}{r^2} \quad (G = \text{Gravitationskonstante})$$

Aus $|z| = |g|$ folgt:

$$v = \sqrt{\frac{G \cdot M}{r}}$$

Mit der Satellitengeschwindigkeit v als Funktion der Winkelgeschwindigkeit ω ergibt sich:

$$v = r \cdot \omega = r \cdot \frac{2\pi}{U} = \sqrt{\frac{G \cdot M}{r}}, \quad U = \frac{2\pi}{\sqrt{G \cdot M}} \cdot r^{3/2} \quad U: \text{Umlaufszeit}$$

Für die Erde ist: $G \cdot M = 3.986 \cdot 10^{14}$ $m^3 s^{-2}$

und damit: $v = \frac{1.996 \cdot 10^7}{\sqrt{r}}$ m/s, $U = 3.147 \cdot 10^{-7} \cdot r^{3/2}$ s

Für einen in 100 km Höhe fliegenden Satelliten gilt also:

$r = R_{Erde} + 100$ km $= 6478000$ m

und damit: $v = 7.84$ km/3, $U = 86.5$ min

Mit $r = 42160$ km erhalten wir eine Umlaufzeit von $U = 23^h56^m$, also gleich einem Sterntag (= Zeit, die die Erde für eine Umdrehung braucht): Falls dieser Satellit in der Aequatorebene von Westen nach Osten dreht, befindet er sich immer über demselben Punkt der Erde; der Satellit ist geostationär.

2.3. Bahnellipse

Die (allgemeinere) Ellipsenbahn eines Satelliten kann durch die folgenden 5 Parameter beschrieben werden (Fig. 2 und 3):

a: grosse Halbachse

e: 1. numerische Exzentrizität; $e^2 = \frac{a^2 - b^2}{a^2}$

i: Bahnneigung: Winkel zwischen der Bahnebene und der Aequatorebene XY der Erde

Ω: Knotenlänge: Winkel zwischen dem aufsteigenden Knoten Ω und dem Frühlingspunkt Υ

ω: Winkel zwischen der Richtung zum Perigäum FΠ (erdnächster Punkt der Bahn) und der Knotenlinie FΩ

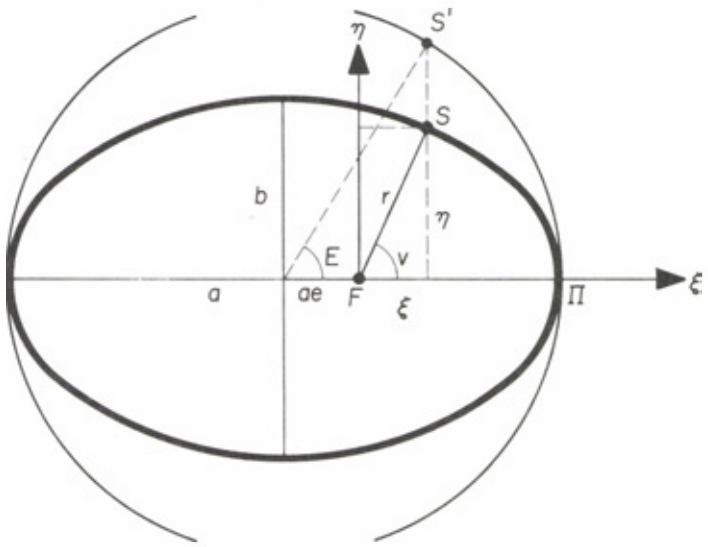


Fig. 2 Bahnparameter 1

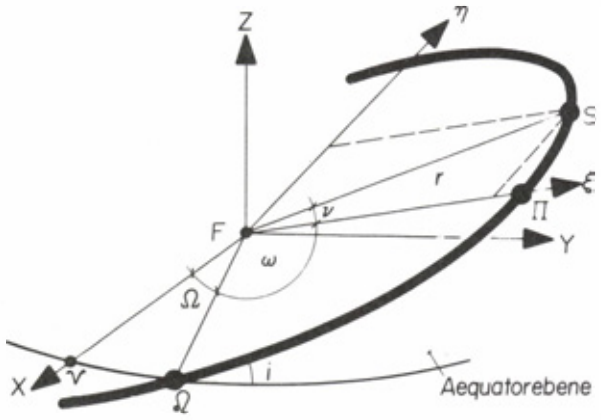


Fig. 3 Bahnparameter 2

Ein weiterer Parameter wird benötigt, um den Ort des Satelliten in der Bahn zu einem bestimmten Zeitpunkt berechnen zu können. Man kann beispielsweise angeben, wann der Satellit das Perigäum durchlaufen hat.

Mit diesen 6 Bahnelementen ist es nun möglich, den theoretischen Ort (die Koordinaten) des Satelliten im Raume für beliebige Zeitpunkte zu berechnen. Im nächsten Kapitel werden wir zeigen, dass nun die tatsächliche Bahn eines Satelliten mehr oder weniger von der streng geometrischen Form einer Ellipse abweicht. Trotzdem behalten die oben beschriebenen Parameter ihre Wichtigkeit, da die tatsächliche Bahn jederzeit für ein kurzes Stück durch eine Ellipse angenähert werden kann.

2.4. Störungen der Bahn

Da nun aber
- die Erde weder kugelförmig noch bezüglich Dichte radialsymmetrisch aufgebaut ist,
- andere Himmelskörper (Mond, Sonne) mit ihrer Anziehungskraft auf den Satelliten wirken,
- selbst in grosser Höhe der Satellit durch den Luftwiderstand gebremst wird,
- der Strahlungsdruck der Sonne auf den Satelliten einwirkt,

bewegt sich der Satellit auf einer wesentlich komplizierteren Bahn. Anders ausgedrückt: die 6 Bahnparameter (s. 2.3.) der Satelliten ändern sich ständig.

Die grösste gravitationelle Störkraft rührt von der Abplattung der Erde (ca. 20 km) her (Fig. 4). Diese zusätzlichen Massen (in der Fig. 4 schraffiert dargestellt) können wir uns anschaulich als "Aequatorwulst" entlang des Aequators konzentriert denken. Wir können uns nun rein qualitativ ihren Einfluss auf die Bahnlage (den Knoten und die Neigung) vorstellen (Fig. 5):

Nähert sich der Satellit von Südwesten her dem Aequator, wird er vom "Wulst" zusätzlich angezogen - in Fig. 5 als Stoss im Punkt 1 dargestellt. Der Satellit geht steiler nach Norden, die Bahnneigung ist also grösser geworden (i_1), der Knoten von Ω_0 nach Westen (Ω_1) gewandert. Nördlich des Aequators passiert das umgekehrte (Punkt 2): Die Bahnneigung i wird wieder kleiner (i_2), der Knoten Ω jedoch wandert weiter nach Westen (Ω_2); die Abplattung der Erde bewirkt eine fortschreitende Drehung der Bahnebene (maximal etwa 10^0 pro Tag, abhängig unter anderem von der Bahnneigung und der Halbachse a), die Bahnneigung erfährt eine kleine periodische Aenderung um einen Mittelwert (maximal ± 2').

2 - 5

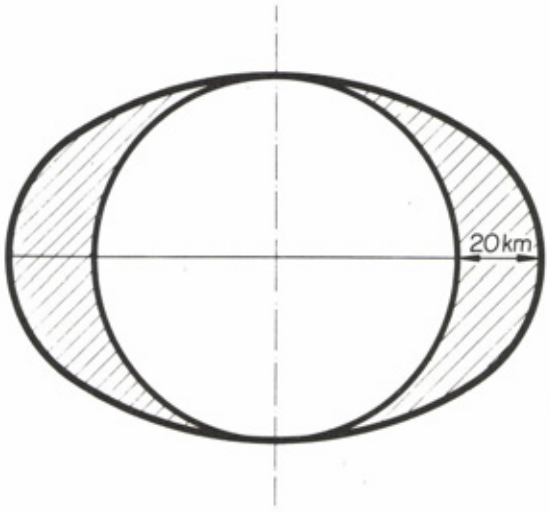


Fig. 4 Abplattung der Erde

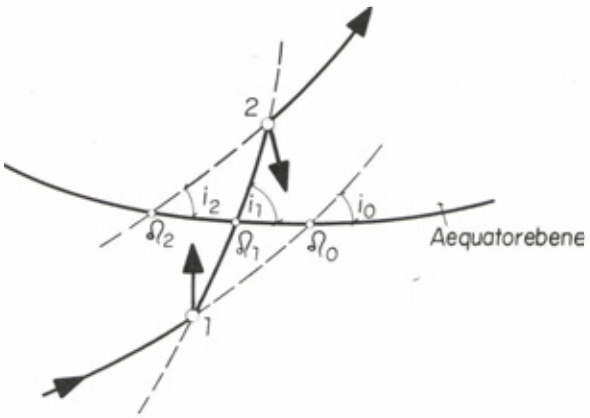


Fig. 5 Einfluss der Abplattung auf Bahnparameter

Die Aenderungen der andern Parameter sind anschaulich weniger leicht zu deuten.

Die Richtung der grossen Halbachse (Perigäumsrichtung), gegeben durch ω (s. Fig. 3),ändert sich ebenfalls fortlaufend: Die Ellipse dreht sich in ihrer Ebene. Der Betrag ist vor allem abhängig von der Neigung: im Maximum bis gegen 20° pro Tag, bei $i = 63^{o}.4$ bleibt ω jedoch konstant. Die Halbachse (a) und die Exzentrizität (e) erfahren wegen der Abplattung nur periodische Aenderungen.

Der Luftwiderstand bewirkt eine dauernde Abnahme der Länge der Halbachse (a) (und damit der Umlaufzeit) sowie der Exzentrizität (e).

Der Strahlungsdruck kann kleine Aenderungen der Bahnlage, des Perigäums (Π) und der Exzentrizität (e) bringen. Diese Ueberlegungen sind jedoch schon recht schwierig.

Die Darstellung der orthogonalen Projektion der Satellitenbahn auf die Erdoberfläche in der Weltkarte ergibt eine wellenförmige Kurve (Fig. 6). Die maximale geographische Breite, die der Satellit erreichen kann, entspricht gerade der Bahnneigung i. Dass sich aufeinanderfolgende Umläufe eines Satelliten im allgemeinen nicht über denselben Gebieten der Erdoberfläche decken, rührt von der Erddrehung her ($22^{o}.5$ in 90 Minuten). Der Abstand der Kurven auf der Oberfläche setzt sich aus der Erddrehung und der Knotendrehung pro Umlaufszeit zusammen.

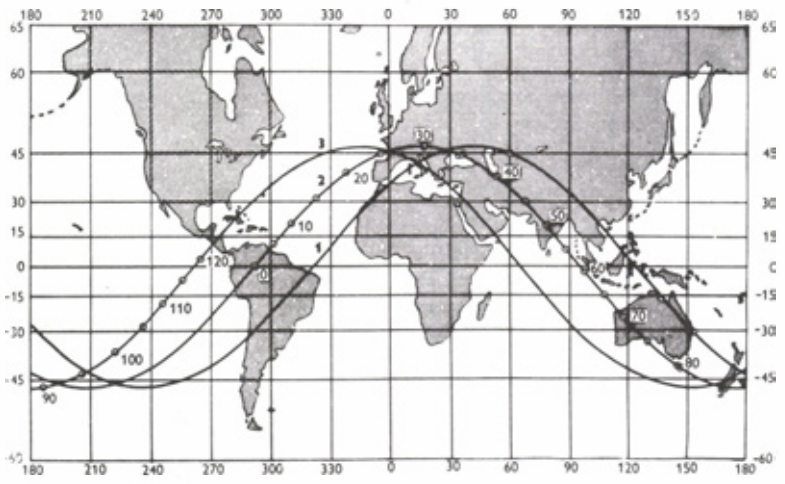


Fig. 6 Drei aufeinanderfolgende Umläufe von Echo 1, Aug. 1960

3. Satellitengeodäsie: Ihre Aufgaben, Methoden und Hilfsmittel

3.1. Aufgaben

Die Aufgabe der Geodäsie allgemein ist die Bestimmung der Form und Grösse der Erde sowie ihres Gravitationsfeldes. Die mittlere Meeresoberfläche entspricht einer bestimmten Niveaufläche des Schwerepotentials. (Schwerepotential = Gravitationspotential + Zentrifugalpotential). Falls das Schwerepotential als Funktion des Ortes bekannt ist, kann die Form dieser Niveaufläche, also auch die Form der Erde, berechnet werden. Figur 7 zeigt die Abweichungen dieser Fläche - des sogenannten Geoides - von einem mittleren Rotationsellipsoid. (Aequidistanz der Kurven: 10m).
In neuerer Zeit wurde die Aufgabe insofern erweitert, als auch zeitliche Aenderungen erfasst werden sollen.

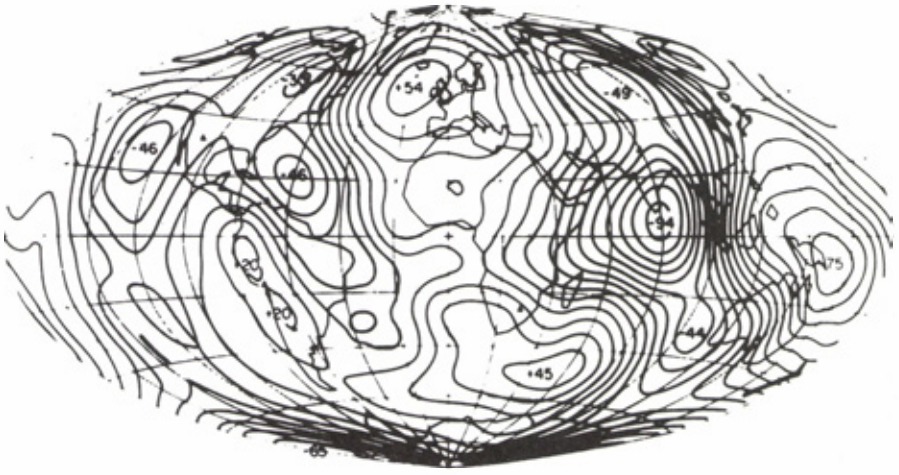


Fig. 7 Form der Erde

Die klassische terrestrische Geodäsie stösst jedoch bei der Lösung dieser Aufgaben im globalen, d.h. weltumfassenden Rahmen aus verschiedenen Gründen auf enorme Schwierigkeiten, von denen wir einige erwähnen wollen:

- Die Sichtweiten auf der Erdoberfläche sind begrenzt. Die Dreiecksseiten von Triangulationsnetzen können deshalb kaum länger als 60 km sein. Unvermeidliche Fehler wirken sich bei grossen (kontinentalen) Netzen spürbar aus. Die Ueberbrückung von Meeren ist so nicht möglich.

- Astronomische Ortsbestimmungen werden durch den inhomogenen Aufbau der Erde verfälscht und können deshalb nicht mit einer mathematischen Bezugsfläche in Verbindung gebracht werden.

- Schweremessungen zur Bestimmung des Gravitationsfeldes sind auf dem Meer (70 % der Erdoberfläche!) nur schlecht möglich.

Der Einbezug von Satelliten bringt nun aber wesentliche Vorteile, da

- Satelliten gleichzeitig von sehr weit auseinander liegenden Stationen sichtbar sind und als Hochziele verwendet werden können (Ueberbrückung langer Distanzen),

- Satelliten Probekörper im Gravitationsfeld darstellen: Falls ihre Bahnen exakt vermessen werden, können aus den Störungen Rückschlüsse auf den Aufbau des Gravitationsfeldes gezogen werden.

3.2. Beobachtungsmethoden

3.2.1. Richtungsmessungen

Die von der Sonne beleuchteten Satelliten (passive Satelliten) oder Satelliten, welche Lichtblitze aussenden (aktive Satelliten), werden zusammen mit Fixsternen photographiert. Da die Richtungen auf die Fixsterne genau bekannt sind (Sternkataloge), kann die Richtung auf den Satelliten bestimmt werden.

Als Instrumente verwendet man transportable ballistische Kameras (Bsp. WILD BC-4, Fig. 8) oder astronomische Instrumente (Bsp. Schmidtteleskop der Sternwarte Zimmerwald, Fig. 9). Der mittlere Fehler liegt in der Grössenordnung von einer Bogensekunde.

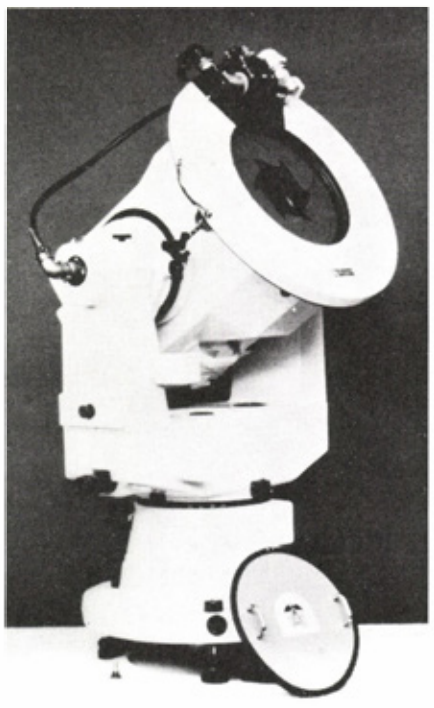


Fig. 8 Transportable ballistische Kamera WILD BC-4

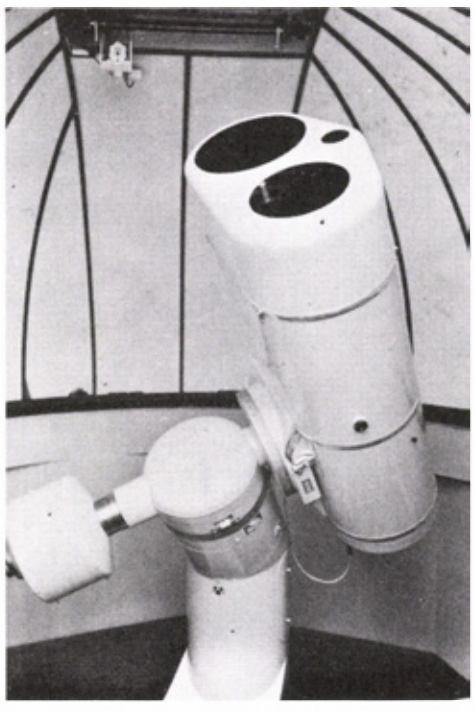


Fig. 9 Schmidtteleskop der Sternwarte Zimmerwald

3.2.2. Laufzeitmessungen (Distanzen)

Mit Hilfe eines Pulslasers werden kurze Lichtblitze (Bsp. 20 Nanosekunden, Energie 2 Joule) zum Satelliten geschickt. Diese werden von speziellen Retroreflektoren (Fig. 10) zurück reflektiert und auf der Station wieder empfangen. Aus dieser Laufzeit des Lichtes hin und zurück erhält man - bei bekannter Lichtgeschwindigkeit - die doppelte Distanz Station - Satellit. Der mittlere Fehler einer Distanz beträgt, je nach Verfahren und Laser-Typ, einige cm bis einen Meter.

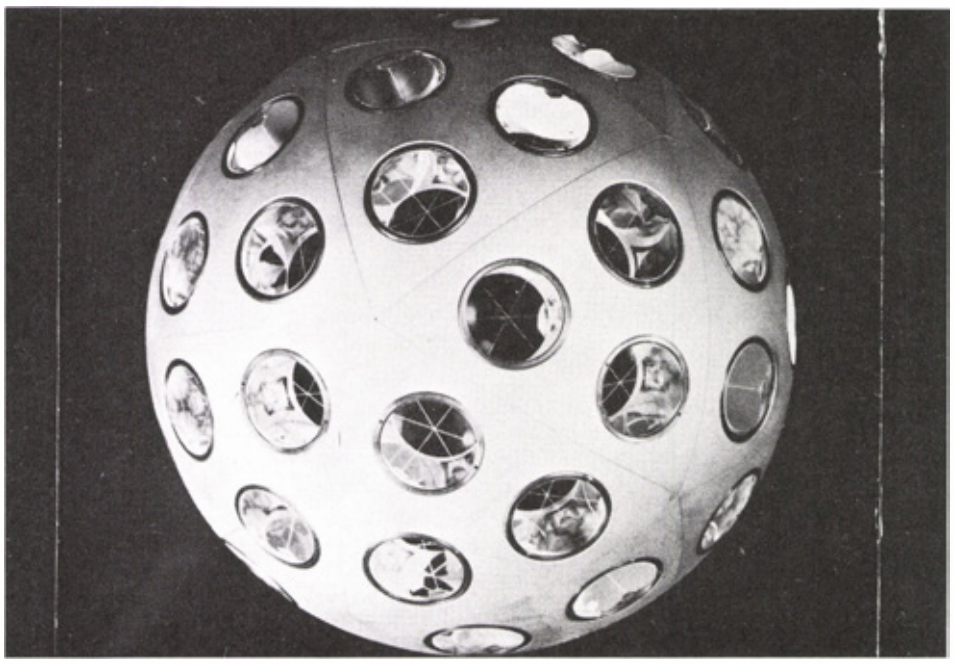


Fig. 10 Geodätischer Satellit Starlette (Ø 24 cm, 47 kg)

3.2.3. Frequenzmessungen (Geschwindigkeiten)

Die Messung der Dopplerverschiebung einer vom Satelliten ausgesendeten Frequenz ergibt die relative Geschwindigkeitskomponente Vr des Satelliten in Richtung auf den Empfänger A (Fig. 11).
Ein Vorteil dieser Methode liegt darin, dass sie wetter- und tageszeitunabhängig ist.

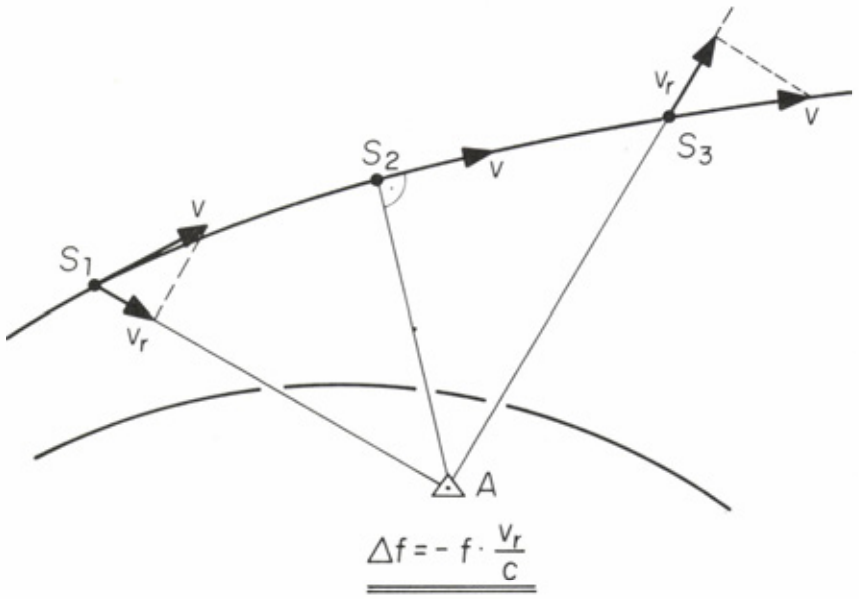


Fig. 11 Geschwindigkeitsmessung mit Dopplereffekt

3.2.4. Andere Methoden

Radarmessungen liefern ebenfalls Distanzen bzw. Distanzdifferenzen. Mit Hilfe von Interferometer-Messungen oder Funkpeilung kann die Richtung eines Satelliten festgestellt werden. Diese Verfahren sind weniger genau, werden jedoch etwa zur Bestimmung von ersten Bahnelementen oder für Ueberwachungsaufgaben verwendet.

Zur Bestimmung von Gravitationsfeldparametern werden in neuster Zeit mit in Satelliten eingebauten Instrumenten die erste Ableitung der Gravitationskraft oder Distanzänderungen zwischen Satelliten gemessen.

3.3. Auswertemethoden

3.3.1. Geometrische Methoden

Messen zwei Stationen A und B (Fig. 12) gleichzeitig die Richtung auf einen Satelliten S, wird durch die beiden Richtungen eine Ebene ABS definiert, welche die beiden Stationen enthält. Ein zweimaliges Anwenden liefert zwei Ebenen ABS_1 und ABS_2, deren nun bekannte Schnittgerade die räumliche Richtung AB von der einen Station auf die andere angibt.

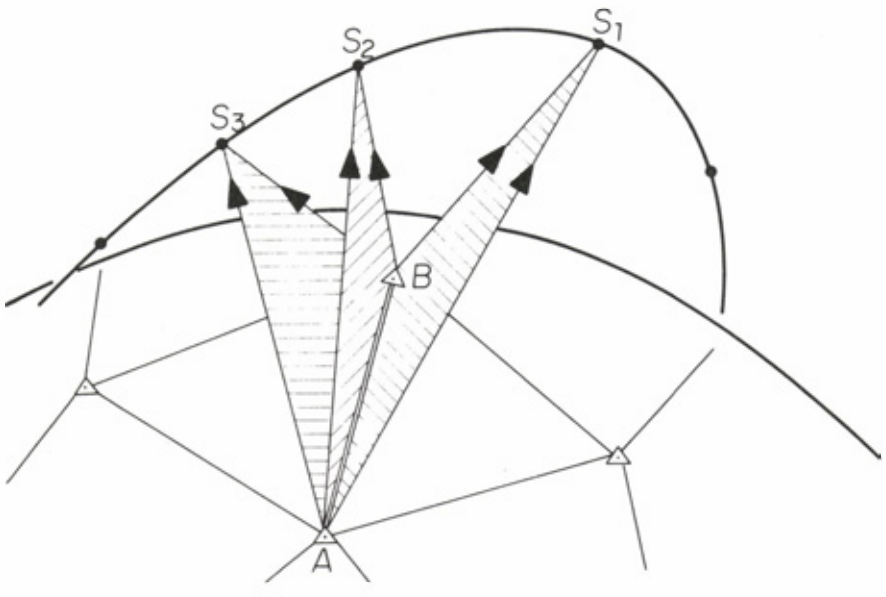


Fig. 12 Positionsbestimmung mit Richtungsmessung

Damit ist es möglich, ein räumliches weltumspannendes Dreiecksnetz von Richtungen aufzuspannen. Eine gemessene Distanz liefert den Massstab. Als Beispiel sei das Weltnetz des U.S. Coast and Geodetic Survey (Fig. 13) erwähnt, das die Koordinaten der beteiligten Stationen in einem globalen Koordinatensystem mit einer Genaugkeit von etwa ± 5 m lieferte.

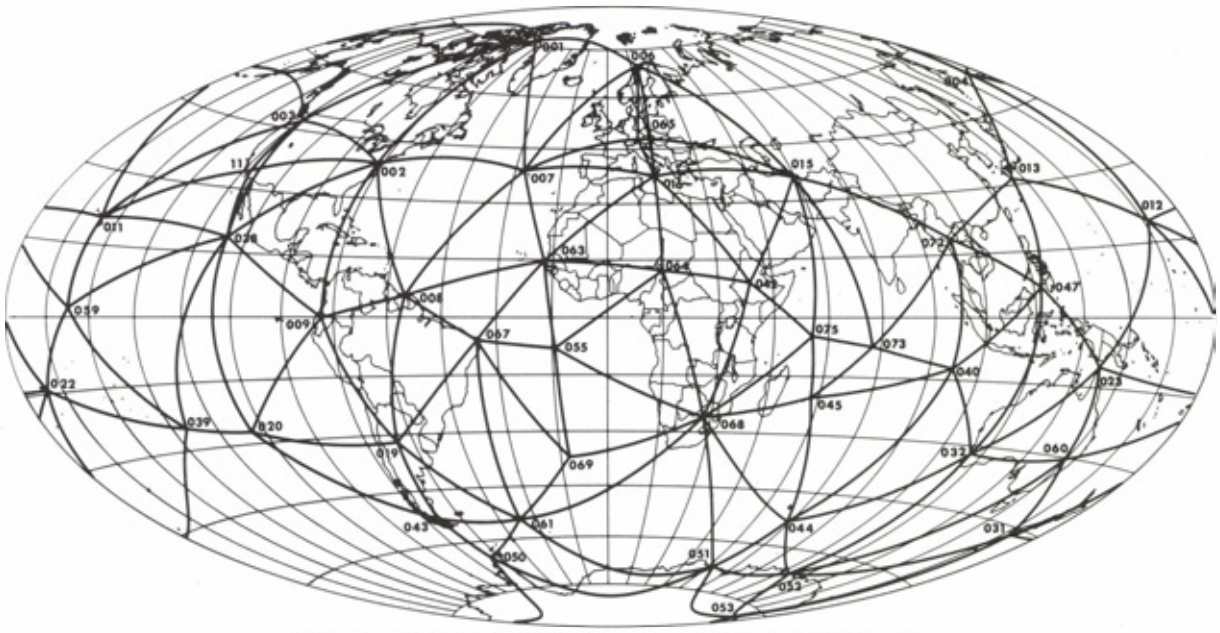


Fig. 13 Das Weltnetz des U.S. Coast and Geodetic Survey

3.3.2. Dynamische Methoden

Mit den in Abschnitt 3.2. dargestellten Methoden werden Satellitenbahnen punktweise genau vermessen. Mit Hilfe analytischer oder numerischer Methoden wird nun versucht, durch die Variation von Stationskoordinaten, Bahnelementen, Gravitationsfeld-Parametern, Luftwiderstands- und Strahlungsdruckparametern usw. eine Bahn so zu berechnen, dass sie mit den tatsächlichen Beobachtungen "möglichst gut" übereinstimmt. Je nach der Aufgabenstellung, der Bahn des Satelliten und der Auswertung erhalten wir als Resultat einen oder mehrere dieser Parameter.

3.3.3. Doppler-Satelliten

Auf das durch das amerikanische Navigationssystem bekannte Verfahren der Ortsbestimmung mit Hilfe von speziellen Dopplersatelliten soll kurz näher eingegangen werden.

Gemäss 3.2.3. können mit Hilfe von Dopplerverschiebungsmessungen die Geschwindigkeitskomponenten von Satelliten in Richtung Empfänger bestimmt werden. Damit kann also auch die Distanzänderung zwischen zwei Zeitpunkten (beispielsweise in einem Intervall von 30 Sekunden) berechnet werden. Sind die Koordinaten des Satelliten zu Beginn und am Ende dieses Intervalles bekannt, kann der geometrische Ort, auf dem sich der Empfänger befinden muss, angegeben werden: Es ist der geometrische Ort aller Punkte, welche von den beiden Satellitenorten eine konstante (nämlich die gemessene) Distanzdifferenz einhalten: ein Rotationshyperboloid. Durch mindestens dreimaliges Anwenden dieses Verfahrens erhalten wir durch Schnitt der geometrischen Oerter sofort die Koordina-

ten des Empfängers. Die Koordinaten (bzw. die momentanen Bahnparameter) des Satelliten werden laufend vom Satelliten selbst ausgesendet. Sie werden aus etwa einen bis zwei Tage zurückliegenden Bahnvermessungen besonderer Tracking Stations extrapoliert und dem Satelliten eingespeichert (sog. Broadcast Ephemeris). Für besondere Zwecke stehen einige Zeit später die genaueren Bahnelemente (Precise Ephemeris) zur Verfügung. Momentan können etwa 5 Satelliten des US-NNSS (US Navy Navigational Satellite System; Fig. 14) empfangen werden. Ein weiteres System GPS (Global Positioning System) mit 24 Satelliten ist im Aufbau begriffen.

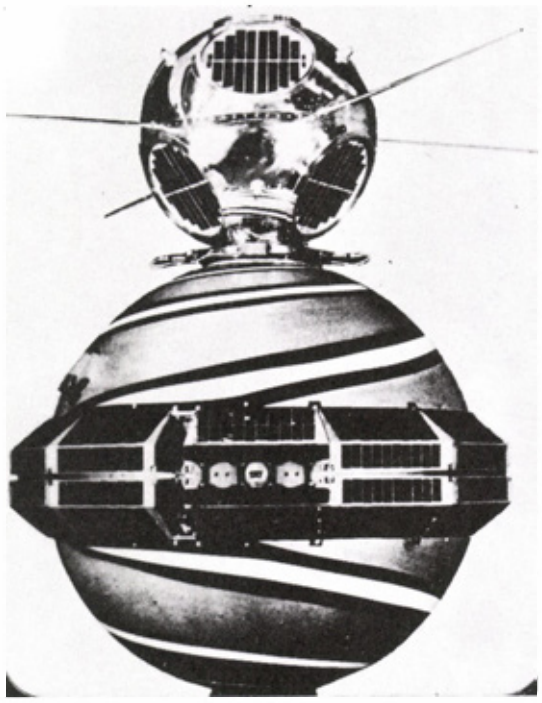


Fig. 14 Navigationssatellit Transit

4. Die Bedeutung der Satellitengeodäsie im militärischen Bereich

In diesem Kapitel wollen wir versuchen, anhand einiger Beispiele die Bedeutung, welche die Satellitengeodäsie für die Verwendung von Satelliten zu militärischen Zwecken besitzt, zu erläutern. Damit soll auch gezeigt werden, dass - selbst wenn man sich auf das Studium der militärischen Kriegführung im Weltraum beschränkt - die weitere Entwicklung in der Satellitengeodäsie sehr genau verfolgt werden sollte.

4.1. Die Kenntnis des Gravitationspotentials

Die genaue Kenntnis des tatsächlichen Gravitationspotentials liefert die Möglichkeit, Satellitenbahnen vorauszuberechnen und damit auch spezielle Bahnen mit bestimmten gewünschten Eigenschaften auszuwählen.

Beispiele:

- Geostationäre Bahnen eignen sich besonders gut für Nachrichtensatelliten, da sie von einem bestimmten Punkt der Erdoberfläche aus immer in derselben Richtung sichtbar sind.
- Polnahe Gebiete können jedoch von solchen Satelliten nicht bedient werden. Eine Möglichkeit, diese Schwierigkeit zu umgehen, ist die folgende: Es wird eine stark exzentrische Bahn mit einer hohen Bahnneigung i (vgl. Fig. 3) gewählt, das Apogäum (erdfernster Punkt) liegt auf der Seite des interessierenden Polgebietes (Fig. 15). Da die Geschwindigkeit des Satelliten umso kleiner wird, je weiter von der Erde weg er sich befindet, bleibt er für den grössten Teil der Umlaufszeit über der gewünschten Hemisphäre (beispielsweise ca. 11 von 12 Stunden). Um zu verhindern, dass sich die Ellipse innerhalb der Bahnebene dreht (vgl. 2.4), wählt man eine Neigung von ca. 63°, bei der keine Perigäumsdrehung erfolgt. Als Beispiel seien die russischen Molniya-Satelliten erwähnt.

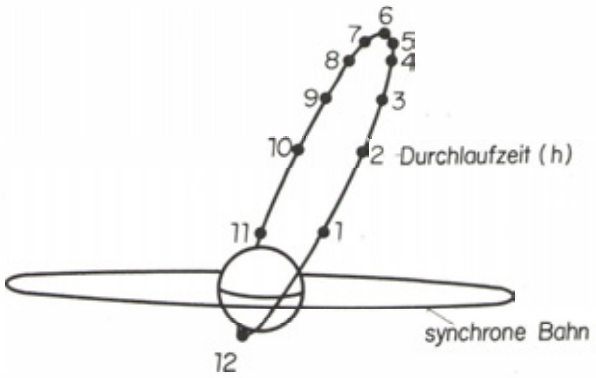


Fig. 15 Satellitenbahn ohne Perigäumsdrehung

- Frühwarnsatelliten haben oft eine synchrone Bahn (U = 24 h; vgl. 2.2.) mit einer Bahnneigung von 10°, so dass sie abwechslungsweise auch Gebiete hoher Breiten überwachen können.
- Aufklärungssatelliten haben oft eine Bahnebene, welche die Sonne enthält, so dass immer praktisch dieselben Beleuchtungsverhältnisse auftreten (Fig. 16). (Der Satellit fliegt auf der Tagseite stets etwa um Mittag Ortszeit über den Aequator.) Da sich nun jedoch die Erde um die Sonne bewegt, muss die Bahnebene genau diese Bewegung ($\Delta\Omega$ = 360°/365 Tage = 0.986^{o}/Tag) kompensieren: Für einen Satelliten in einer Kreisbahn in 300 km Höhe hat die Knotendrehung bei einer Bahnneigung i von ca. 97° (rückläufig) gerade diesen gewünschten Betrag. Als Beispiel seien die amerikanischen Big Bird Satelliten erwähnt.

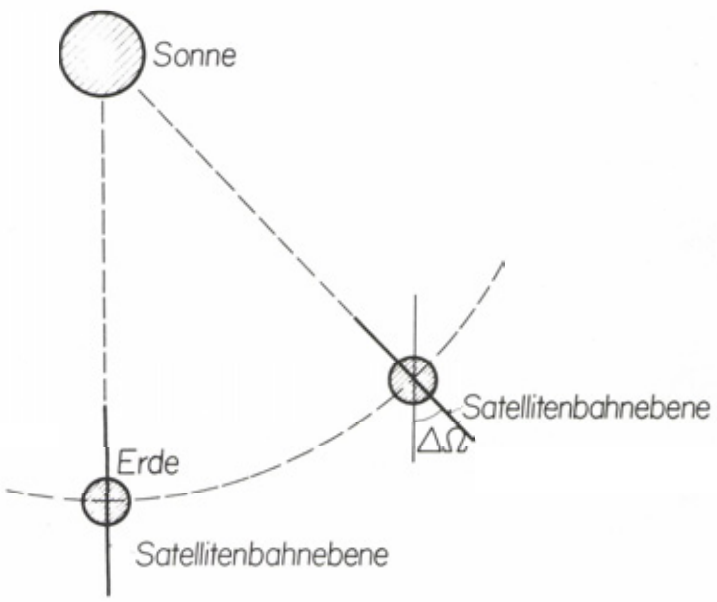


Fig. 16 Satellitenbahn mit "Sonne in Bahnebene"

4.2. Bahnvermessung

Aus der Art der Bahn eines Satelliten können Rückschlüsse gezogen werden auf beispielsweise folgende Charakteristiken:

- den Typ oder die Aufgabe des Satelliten
- seine ungefähre Lebensdauer
- mögliche Durchgangszeiten über einem bestimmten Gebiet. Es kann sofort berechnet werden, zu welchen Zeiten ein Satellit (ohne schwerwiegende aktive Veränderungen der Bahnelemente, insbesondere der Bahnebene) unmöglich über einem Gebiet sein kann. Die Separierung der nicht-gravitationellen Kräfte (Luftwiderstand) gibt Rückschlüsse auf das Massen/Oberflächenverhältnis.

Die genaue Kenntnis der tatsächlichen Bahn ist für diejenigen (zukünftigen?) Satelliten von Bedeutung, welche aktiv die Lenkung von Flugkörpern übernehmen. Die Bestimmung von Koordinaten möglicher Ziele mit Hilfe von Satelliten braucht ebenfalls eine genaue Kenntnis der Bahn des Satelliten.

4.3. Ortsbestimmung

Genaue Koordinaten der Stationen, welche Bahnvermessungen durchführen, sind natürlich von grundlegender Bedeutung. Ebenso müssen die Koordinaten von Abschussanlagen weitreichender Flugkörper in diesem globalen System bekannt sein. Es scheint, dass das neue Dopplersystem (GPS) die Möglichkeit bieten wird, Ortsbestimmungen in sehr kurzer Zeit so genau durchzuführen, dass ebenfalls die Bedürfnisse taktischer Truppenkörper befriedigt werden können. Wann wird die Bestimmung der Geschützkoordinaten mit Karte und Batterie-Instrument der Vergangenheit angehören?

5. Die Satellitenbeobachtungsstation Zimmerwald

In der Schweiz befasst sich seit etwa 1966 das Astronomische Institut der Universität Bern mit Satellitengeodäsie. Bis etwa 1974 wurden im Rahnen von internationalen Kampagnen mit der Schmidt-Kamera der Sternwarte in Zimmerwald (40 cm Oeffnung, 1 m Brennweite; Fig. 9) Richtungsmessungen nach Satelliten durchgeführt.

Anfangs der siebziger Jahre wurden mit einem vom Institut für angewandte Physik gebauten Rubin-Riesenpuls-Laser erste Versuche mit Distanzmessungen nach geodätischen Satelliten durchgeführt. 1975/76 wurde die Sternwarte Zimmerwald mit einem neuen Anbau versehen, der nun die Laser-Entfernungsmessanlage enthält (Fig. 17, linke Kuppel).

Fig. 17 Satellitenbeobachtungsstation Zimmerwald

Die Figur 18 zeigt eine schematische Darstellung der Laserstation.

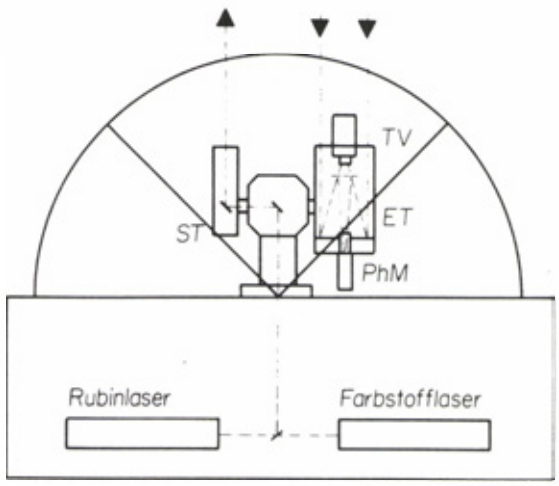


Fig. 18 Schematische Darstellung der Laserstation. Rubinlaser: Erzeugt Lichtblitze, deren Laufzeit zum Satelliten und zurück gemessen wird. Beim Austreten eines Blitzes aus dem Laser wird ein Nanosekundenzähler gestartet. ST: Sendeteleskop; ET: Empfangsteleskop; PhM: Photomultiplier. Stoppt den Zähler im Moment, wo er den am Satelliten reflektierten Lichtblitz detektiert; TV: Fernsehkamera. Falls der Satellit photographiert wird (Richtungsbeobachtung), kann er mit Hilfe des Farbstofflasers zu genau definierten Zeiten beleuchtet werden (Anbringen von Zeitmarken auf die photographierte Spur des Satelliten).

Dank der in den Strahlengang der Empfangsoptik eingebauten Fernsehkamera können die von der Sonne beleuchteten Satelliten auf einem Monitor verfolgt und damit mit manuellen Korrekturen die automatische Nachführung des Teleskopes verbessert werden. Die Kamera, eine spezielle, hochempfindliche Nachtsichtkamera, gestattet es, Objekte bis zur 15. Grösse zu beobachten. Es ist beispielsweise möglich, den geodätischen Satelliten "Starlette" (Fig. 10) - eine Kugel von nur 24 cm Durchmesser - aus einer Distanz von mehr als 1000 km einwandfrei zu verfolgen.

Die Figur 19 zeigt die Sende- und Empfangsoptik. Rechts ist das Sendeteleskop (Galilei, 5fache Aufweitung), links das Empfangsteleskop (50 cm Spiegel) mit Photomultiplier. Die Fernsehkamera ist oben auf dem Empfangsteleskop nur knapp sichtbar.

Fig. 19 Sende- und Empfangsoptik der Laserstation

Ein wesentlicher Teil der Aufbauarbeiten besteht in der Entwicklung von Programmen, welche die Steuerung der Teleskope und die Messdaten-Erfassung und -Weiterverarbeitung mit Hilfe des Stationscomputers (PDP 11/40) besorgen. Daneben wurden ebenfalls Programme zur Berechnung von Satellitenbahnen, Stationskoordinaten, Gravitations- und Luftwiderstandsparameter aufgrund tatsächlicher oder simulierter Beobachtungen auf dem Grosscomputer der Universität Bern entwickelt.

Damit besitzt die Schweiz eine Stelle, welche grundsätzlich die zukünftigen Entwicklungen in der Satellitengeodäsie weiterverfolgen kann und die sich selbst in diesem Gebiet aktiv beteiligt.