UNIVERSITÄT BERN

Faszination Himmelsmechanik und Satellitengeodäsie – eine Nachlese

G. Beutler
Astronomisches Institut, Universität Bern

Astronomische Gesellschaft Bern

15. November 2011, 19:30 (Beginn)

866. Sitzung

Hörsaal 106, Hauptgebäude der Universität Bern

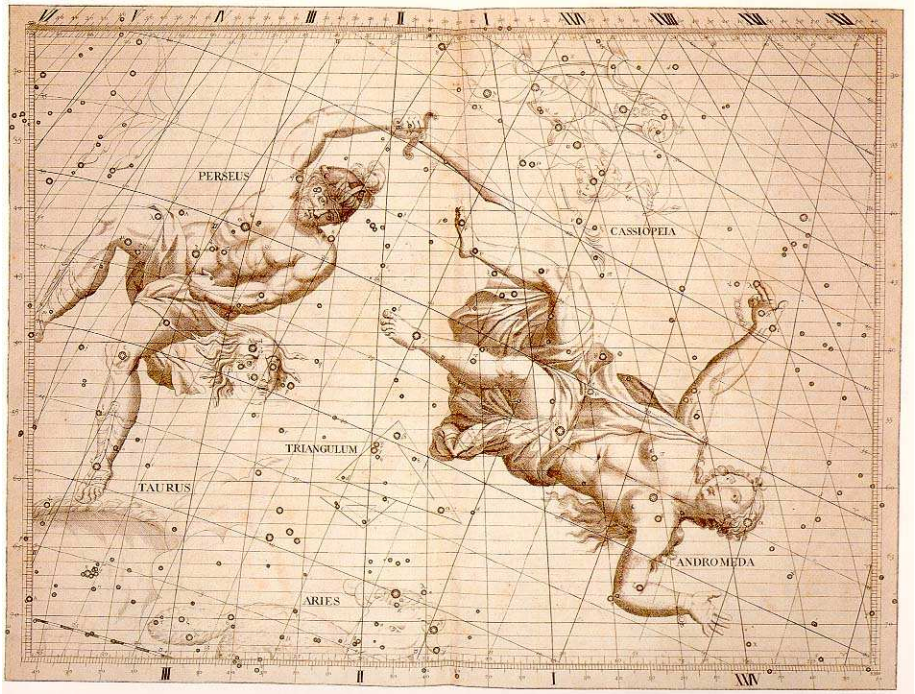
Inhalt

- **(Fundamental)Astronomie, Geodäsie, und Navigation**
  - **Unsere Wissenschaft in der „guten alten“ Zeit**
  - **Planetenbahnen nach Tycho de Brahe und Kepler**
  - **Newtons Gravitationsgesetz, Eulers Bewegungsgleichungen**
  - **Triumphe der Störungsrechnung**
  - **Revolution in der Raumflugära**
- **Globale Navigations-Satellitensysteme (GNSS)**
- **Aufbau und Leistungen des IGS 1991-1998**
- **Das Gravitationsfeld der Erde (2004-2011)**
- **Schlusswort?**

Inhalt: GB-Spezifisches

- **Frühe Arbeiten: Lizenziat, Doktorat, Habilitation**
- **Kanada – UNB (1983/84)**
- **Bernese GNSS Software (1985-1990)**
- **IGS Chairmanship**
- **Das Buch**
- **Projekt „Satellitengeodäsie“ im Rahmen der Exzellenzinitiative an der Technischen Universität München**
- **Schlusswort!**

Astronomie und Geodäsie einst ...

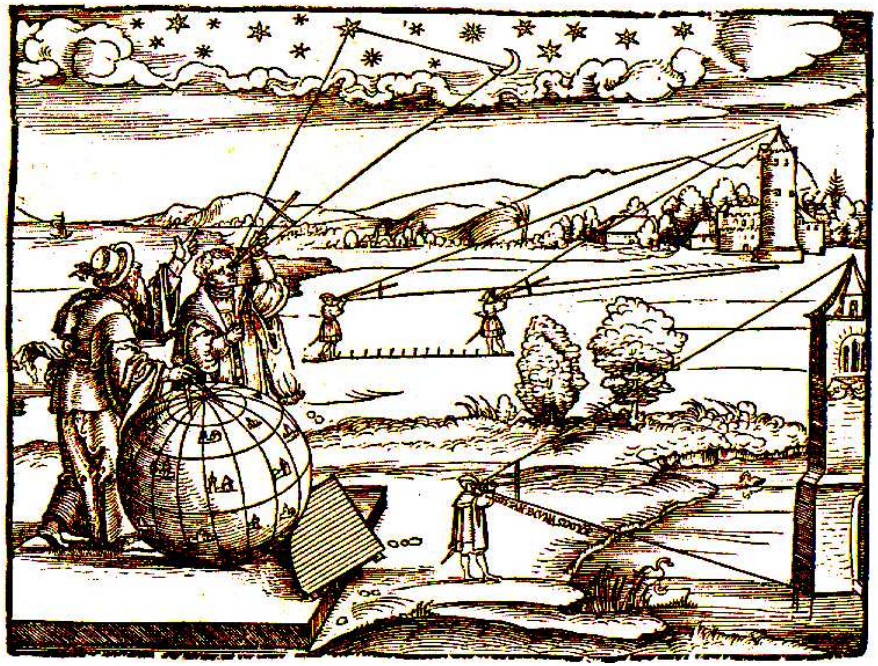


Flamsteed's Sternatlas von 1729.

Voraussetzung für erfolgreiche Positionierung und Navigation:

- **Bezugssystem am Himmel, realisiert durch Sternkarten und -kataloge**
- **Jahrbücher mit den Bahnprognosen von Sonne, Mond, etc.**
- **Genaue Uhren**

Astronomie und Geodäsie einst

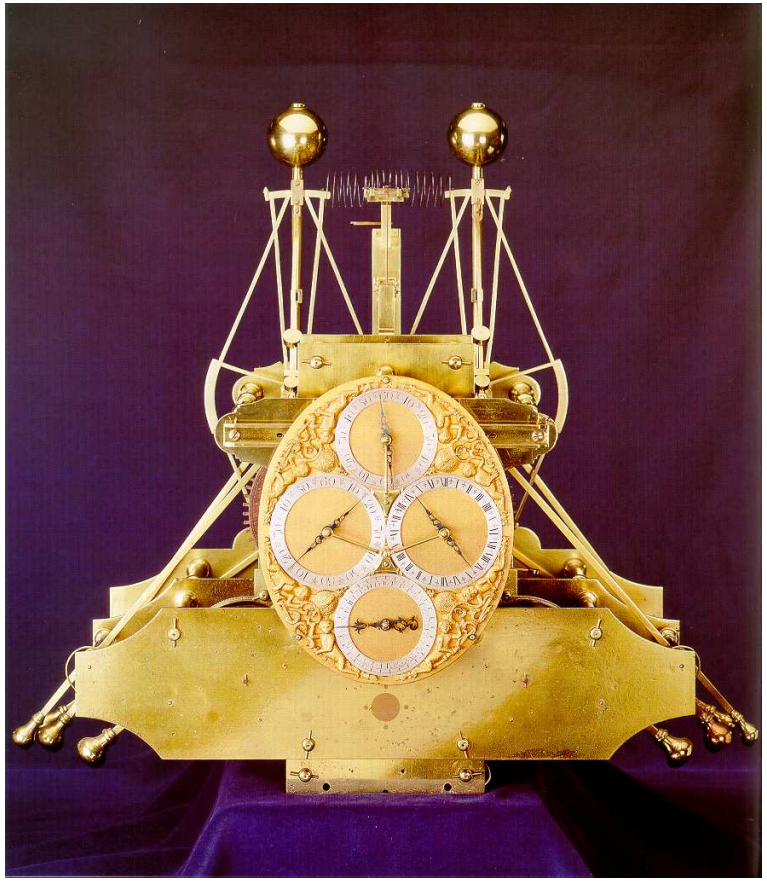


Peter Apian's *Geographia* 1533

Positionieren hiess Winkel und Zeiten messen.

Von der Messtechnik her gibt es keine Unterschiede zwischen den terrestrischen und „himmlischen" Anwendungen – dies stimmt auch heute noch mit gänzlich anderen Techniken!

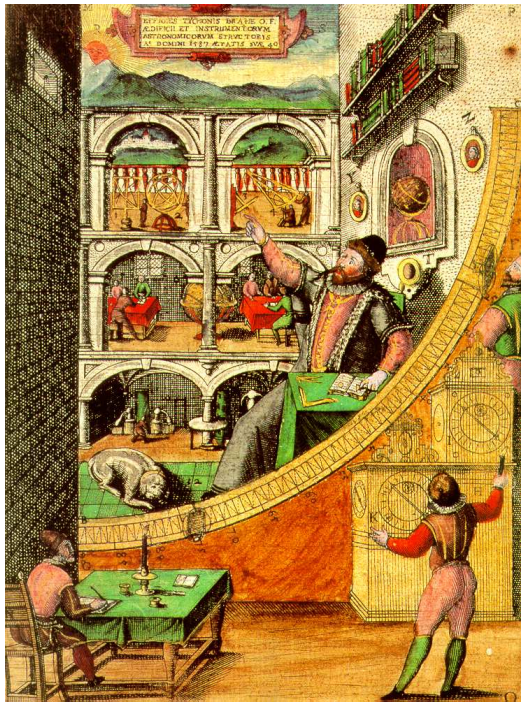
Positionieren/Navigagieren einst

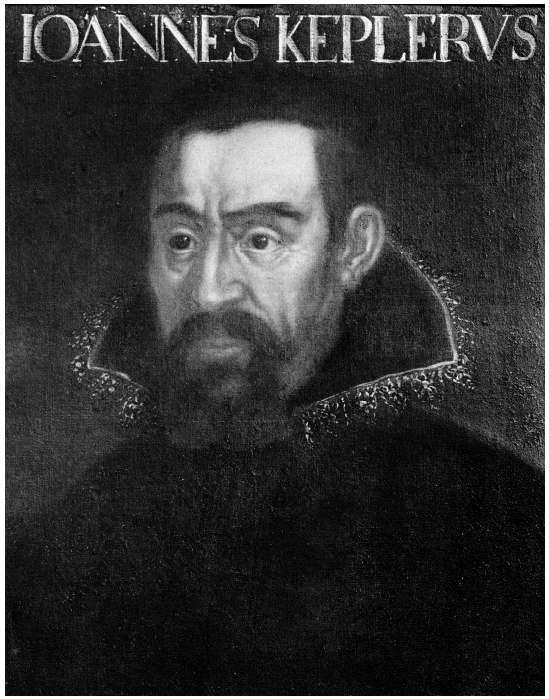


Harrison I, First marine chronometer

- **Mechanische Uhren wurden lange Zeit in Astronomie und Geodäsie „nur“ als Interpolatoren verstanden und genutzt.**
- **Die Schiffs-Chronometer lösten ab Mitte des 18ten Jahrhunderts die Monddistanzen ab.**
- **Die Astronomen und Geodäten trennten sich sehr ungerne von ihren potentiell hochgenauen Uhren (siehe Dana Sobel).**
- **Die Entwicklung war aber langfristig nicht aufzuhalten: Seit 1980 diktieren uns die Physiker die Atomzeit.**

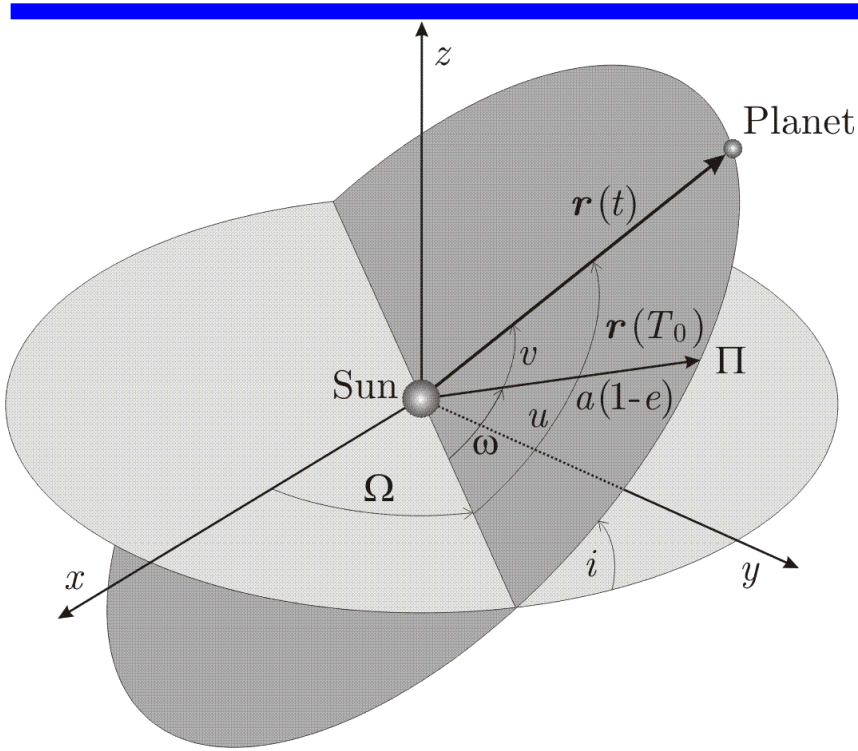
Planetenbahnen nach Tycho Brahe und Kepler





Tycho Brahe (1546-1601) beobachtete Sonne, Mond und Sterne während > 20 Jahren (Dänemark und Prag). Johannes Kepler (1571-1630) wurde um 1600 von Tycho nach Prag geholt, um ihm bei der Theorie der Planetenbewegung zu helfen.

Planetenbahnen nach Tycho Brahe und Kepler



Ellipsenbahn

Die Bahnebene ist durch die Neigung *i* gegen die Ekliptik und durch die Länge Ω des aufsteigenden Knotens festgelegt.

Die Orientierung in der Bahn in der Bahnebene ist durch den Abstand ω des Perihels vom Knoten festgelegt.

Grösse und Form der Ellipse sind durch die Halbachse *a* und durch die Exzentrizität *e* gegeben.

Newton‘s Gravitationsgesetz

Gesetz der universellen Gravitation

Zwei Massenpunkte der Massen *m* und *M* ziehen sich mit einer Kraft *f* an, die dem Produkt *m M* der Massen direkt und dem Quadrat der Entfernung indirekt proportional ist

$$\boldsymbol{f} = G\,\frac{m\,M}{r^2}\,\boldsymbol{e}$$

Sir Isaac Newton (1643-1727)

Aus Axiomen und Gravitationsgesetz folgen Kepler‘s Gesetze!

Euler‘s Beitrag

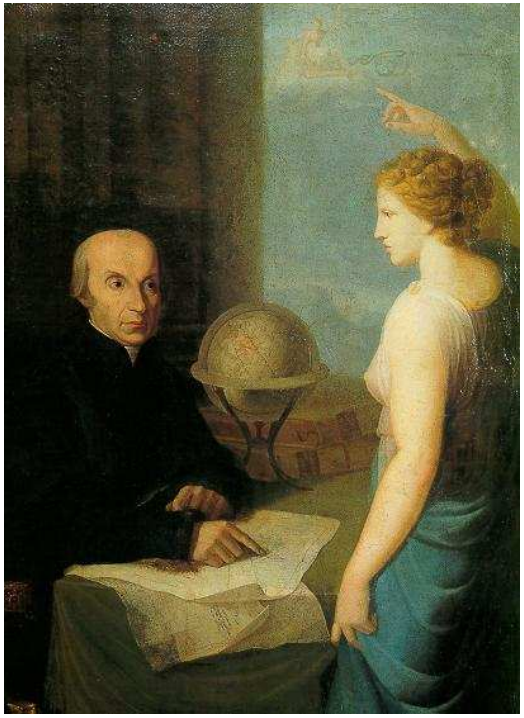
Cela posé, prenant l'element du tems dt pour constant, le changement instantané du mouvement du Corps sera exprimé par ces trois équations :

$$\text{I. } \frac{2ddx}{dt^2} = \frac{X}{M}; \quad \text{II. } \frac{2ddy}{dt^2} = \frac{Y}{M}; \quad \text{III. } \frac{2ddz}{dt^2} = \frac{Z}{M}$$

d'où l'on pourra tirer pour chaque tems ecoulé t les valeurs x, y, z, & par conséquent l'endroit où le Corps se trouvera. C. Q. F. T.

Leonhard Euler (1707-1783) verdanken wir die Bewegungsgleichungen der Himmelsmechanik in heutiger Gestalt (auch die des Starrkörpers).

Erste Bahnbestimmung



Am Abend des 1. Januar 1801 wird der Kleinplanet Ceres entdeckt und anschliessend während etwa 40 Tagen (ca 1/40 Umlaufszeit) beobachtet.

Bald darauf wurden Pallas, Juno und Vesta entdeckt. Heute kennt man > 100‘000 Kleinplaneten.

→ Neue Bahnbestimmungsaufgabe!

Giuseppe Piazzi (1746-1826), der Entdecker der Ceres.

Erste Bahnbestimmung

Carl Friedrich Gauss (1777-1855)

Erste Bahnbestimmung

Bahnverbesserung → Methode der kleinsten Quadrate

MONATLICHE

CORRESPONDENZ

ZUR BEFÖRDERUNG

DER

ERD- UND HIMMELS-KUNDE.

SEPTEMBER, 1809.

XVII.

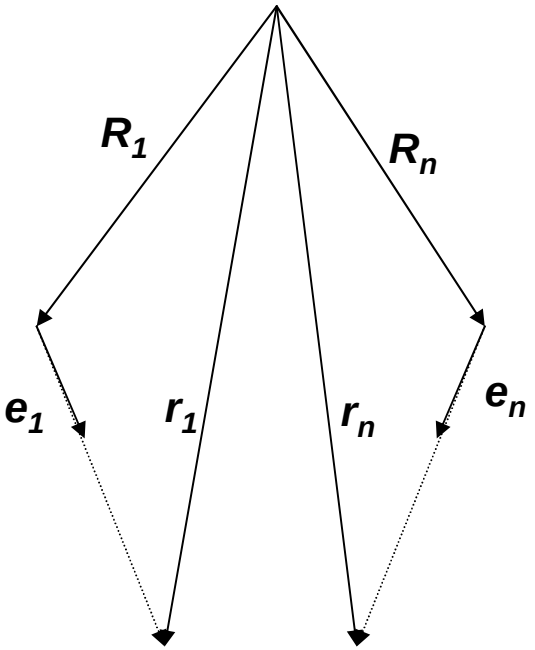
Summarische Übersicht der zur Bestimmung der Bahnen der beyden neuen Hauptplaneten angewandten Methoden.

Vom

Hrn. Prof. *Gauss*. *)

Die von Kreis- und Parabel-Hypothesen unabhängige Bestimmung der Bahn eines Himmelskörpers aus einer kurzen Reihe von Beobachtungen beruhet auf zwey Forderungen: I. Muss man Mittel haben, die Bahn zu finden, die drey gegebenen vollständigen Beobachtungen Genüge thut; II. Muss man die so gefundene Bahn so verbessern können, dass die Differenzen der Rechnung von dem ganzen Vorrath der Beobachtungen so gering als möglich werden.

Erste Bahnbestimmung



$r_i = R_i + \Delta_i e_i$

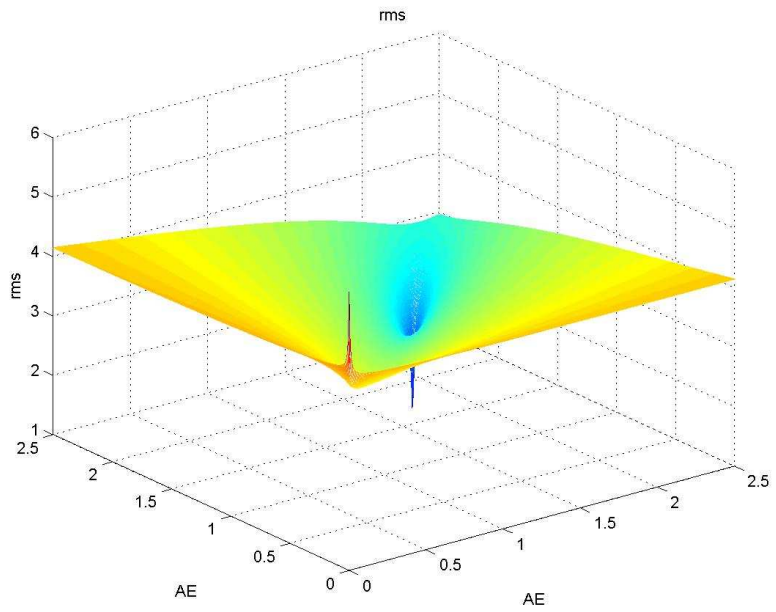
Schwierigkeiten

- keine Näherungen für die sechs Bahnelemente bekannt,
- Zusammenhang zwischen Beobachtungen und Bahnelementen nicht linear.

Gauss reduziert die Zahl der Bahnelemente von sechs auf zwei:

Die topozentrischen Distanzen Δ_i zum HK zu zwei Beobachtungsepochen t_i werden als Parameter verwendet und so variiert, dass alle übrigen Beobachtungen bestmöglich im mittelquadratischen Sinne dargestellt werden!

Erste Bahnbestimmung



Mehr dazu siehe Beutler, Methods of Celestial Mechanics, Volume I, Chapter 8

Man stellt die mittelquadratische Abweichung als Funktion der systematisch variierten Distanzen Δ_1 und Δ_n dar.

Das Minimum entspricht der Lösung!

→ Kann man heute als Praktikumsübung machen.

Gauss hat wesentlich mehr (+/- durchsichtige) Analyse betrieben!

Triumphe der Störungsrechnung

Die Bewegungsgleichungen des Planetensystems lauten:

$$\ddot{\boldsymbol{r}}_i = -k^2(m_0+m_i)\,\frac{\boldsymbol{r}_i}{r_i^3} - k^2 \sum_{j=1, j\neq i}^{n} m_j \left\{ \frac{\boldsymbol{r}_i - \boldsymbol{r}_j}{|\boldsymbol{r}_i - \boldsymbol{r}_j|^3} + \frac{\boldsymbol{r}_j}{r_j^3} \right\}, \quad i = 1, 2, \ldots, n$$

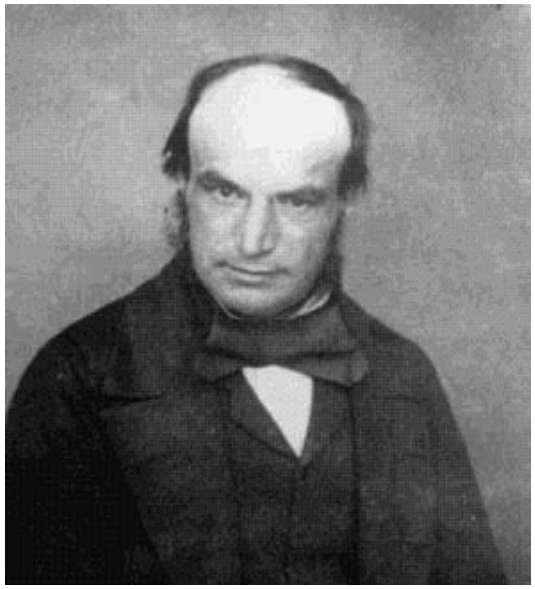
Zu Beginn des 19. Jahrhunderts war(en)

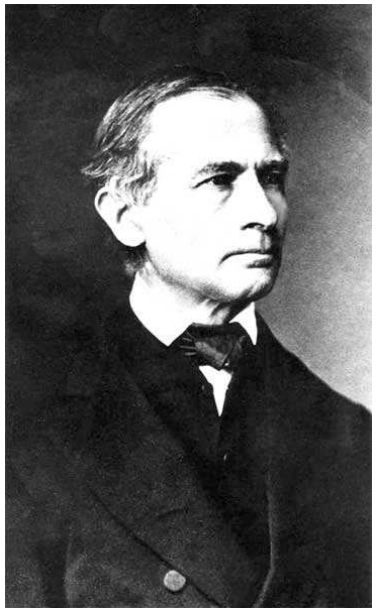
die Massen m_j „bekannt“ (durch Gravitationsfeldbestimmung),

die Beobachtungsgenauigkeit so hoch, dass durch das Modell nicht erklärte Abweichungen von wenigen Bogensekunden in den Planetenbahnen eindeutig festgestellt werden konnten,

die (analytische) Störungsrechnung so weit fortgeschritten, dass sich diese Störungen durch einen hypothetischen Planeten erklären liessen (→ Gravitationsfeldbestimmung!!)

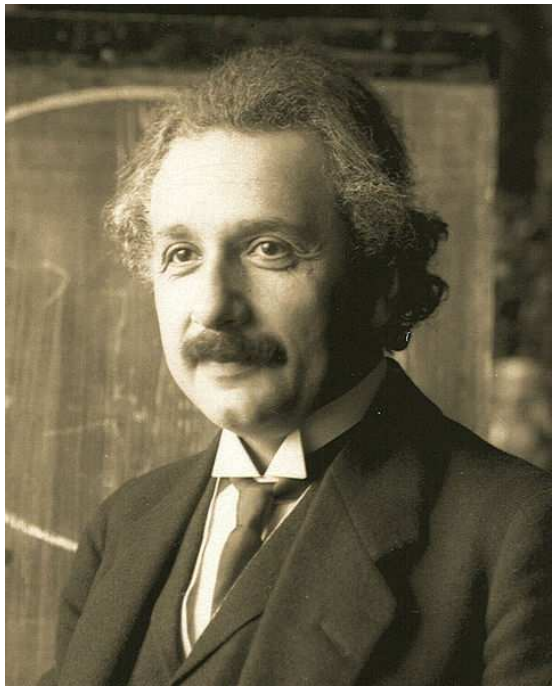
Triumphe der Störungsrechnung





Urbain Jean Joseph Leverrier (1811-1877) und John Cough Adams (1819-1892) berechneten die Position des „neuen“ Planeten auf Grund der Störungen von Uranus. Johann Gottfried Galle (1790-1853), „Gehilfe“ Encke‘s an der Sternwarte zu Berlin, entdeckte Neptun am 23. September 1846 in Berlin aufgrund der Rechnungen von Leverrier!

Triumphe der Störungsrechnung



Leverrier wollte seinen Triumph wiederholen und die berühmte Periheldrehung des Merkur von –43“/Jahrhundert durch den neuen Planeten Volcano erklären.

Erst Albert Einstein (1879-1955) erklärte die Periheldrehung richtig im Rahmen seiner allgemeinen Relativitätstheorie!

Das Raumzeitalter

Sputnik I

Mit dem Start von Sputnik I am 4. Oktober 1957

- **eröffneten sich der Himmelsmechanik neue Horizonte,**
- **rückten Astronomie, Geodäsie, später Geodynamik und Erdwissenschaften viel näher zusammen.**

So konnte beispielsweise die Abplattung der Erde C_{20} aus der Beobachtung der Präzession der Satelliten-Bahnebenen viel genauer bestimmt werden als mit klassischer astrogeodätischer Arbeit.

Schon zu Beginn der 1960er Jahre wurden Dutzende, bald danach Hunderte von Termen des Gravitationsfeldes der Erde bestimmt – heute sind es Zehntausende.

Das AIUB im Raumzeitalter

Astronomische Kuppel (links) mit Cassegrain und Schmidt-Telekop, mit dem u.A. der Komet Wild-2 entdeckt wurde.

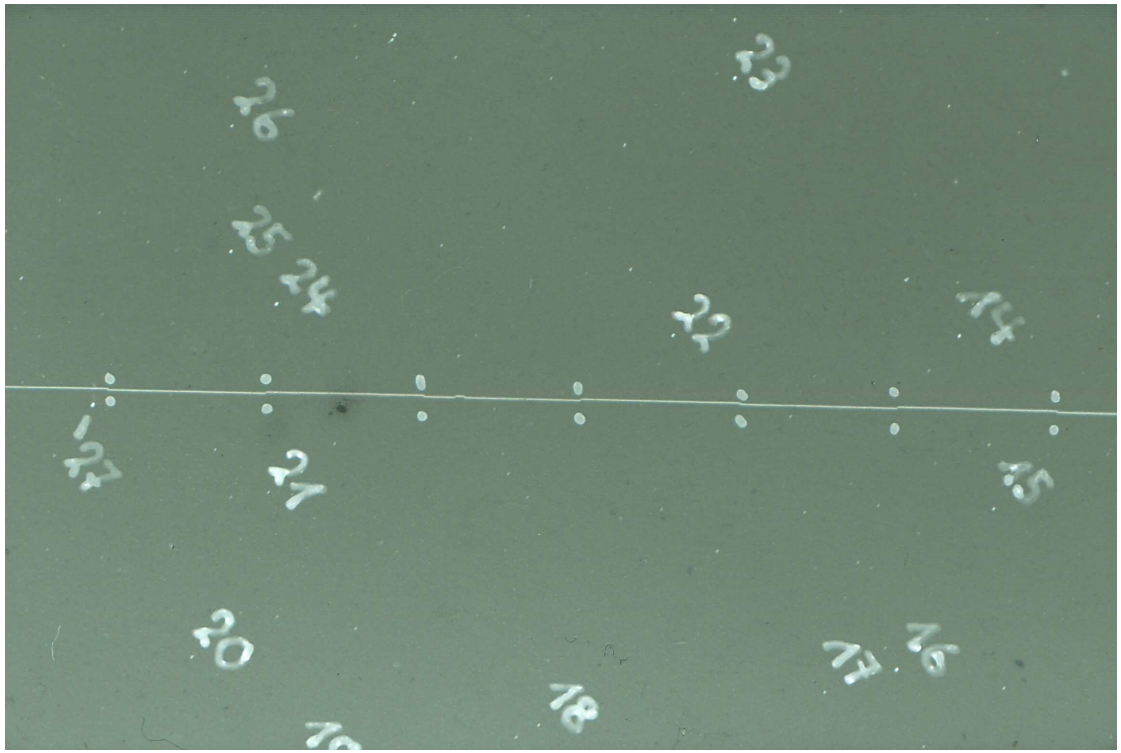
Zimmerwald mit 1-m-Laser-Teleskop (rechts), seiner offiziellen GPS-Station (plus weiteren GPS- und GLONASS Empfängern) ist der Ursprung der Landesvermessung.

Das AIUB im Raumzeitalter

UNIVERSITÄT BERN

- **Ab etwa 1965 beteiligte sich das AIUB auf Initiative von *Prof. Max Schürer* an den weltweit koordinierten optischen Beobachtungs-kampagnen aktiver und passiver geodätischer Satelliten.**
- **Insbesondere wurden die Satelliten *Geos*, *Explorer*, *Pageos* und *Echo* mit der Zimmerwalder Schmidt-Kamera beobachtet.**
- **Als Resultat erschien Zimmerwald erstmals als Station im weltweiten Netz der Satellitenbeobachtungsstationen. Die Genauigkeit der Stationskoordinaten betrug damals etwa 5 m.**
- **Mitte der 1970er Jahre gerieten die Richtungsbeobachtungen mehr und mehr in Vergessenheit. Grund dafür war, dass die Reduktion der photographischen Beobachtungen äusserst arbeitsintensiv war und dass die neuen Methoden „genauer“ waren.**
- **Ab Ende der 1970er Jahre betrieb das AIUB in Zimmerwald eine Lasersternwarte – geleitet von Werner Gurtner bis 2009.**
- **Nach seinem Tod teilten sich Thomas Schildknecht, Martin Ploner und Adrian Jäggi die Arbeit – SLR-seitig mit grösstem Erfolg!**

Das AIUB im Raumzeitalter



Zimmerwalder Aufnahme eines passiven Satelliten. Die Versetzungen wurden mit einer Kippkassette erzeugt, die Zeitpunkte von Assistenten auf ein Tonband gesprochen!!!

Meine erste Arbeiten am AIUB

UNIVERSITÄT BERN

Erste Anstellung als Hilfsassistent ca. 1966 – ca. zwei Wochen später erhielt ich eine Anfrage von Prof. Heiri Leutwyler ...

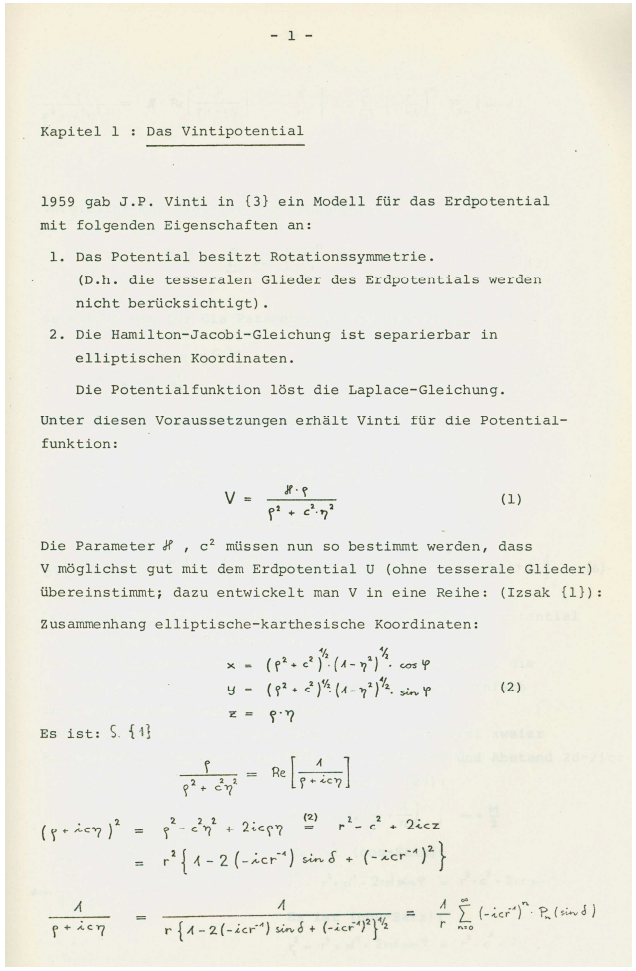
Erste Arbeit am AIUB: Ausmessen von Zimmerwalder Echo-, Pageos- und Geos-Aufnahmen in der Sektion für Schiess-versuche (GRD, Thun).

Die Arbeit war stinklangweilig und anstrengend, aber wirklich! Dafür gab es damals den Lohn bar an der Loge.

Mithilfe bei der Entwicklung der Reduktionsprogramme auf der „Grossrechenanlage“ Bull-Gamma-30S (S wie Scientific) in der Passerelle.

Das AIUB durfte die Anlage selber bedienen. Ich habe eine Operator-Prüfung gemacht + bestanden – damals in meinen Augen der wertvollste Ausweis in meinem bisherigen Studium.

Lizenziat (1971)



- 1 -

Kapitel 1 : Das Vintipotential

1959 gab J.P. Vinti in {3} ein Modell für das Erdpotential mit folgenden Eigenschaften an:

1. Das Potential besitzt Rotationssymmetrie.
   (D.h. die tesseralen Glieder des Erdpotentials werden nicht berücksichtigt).
2. Die Hamilton-Jacobi-Gleichung ist separierbar in elliptischen Koordinaten.

   Die Potentialfunktion löst die Laplace-Gleichung.

Unter diesen Voraussetzungen erhält Vinti für die Potential-funktion:

$$V = \frac{\mathcal{M}\cdot\rho}{\rho^2 + c^2\cdot\eta^2} \qquad (1)$$

Die Parameter $\mathcal{M}$, c^2 müssen nun so bestimmt werden, dass V möglichst gut mit dem Erdpotential U (ohne tesserale Glieder) übereinstimmt; dazu entwickelt man V in eine Reihe: (Izsak {1}):

Zusammenhang elliptische-karthesische Koordinaten:

$$\begin{aligned} x &= (\rho^2 + c^2)^{1/2}\cdot(1-\eta^2)^{1/2}\cdot\cos\varphi \\ y &= (\rho^2 + c^2)^{1/2}\cdot(1-\eta^2)^{1/2}\cdot\sin\varphi \\ z &= \rho\cdot\eta \end{aligned} \qquad (2)$$

Es ist: S. {1}

$$\frac{\rho}{\rho^2 + c^2\eta^2} = \mathrm{Re}\left[\frac{1}{\rho + ic\eta}\right]$$

$$\begin{aligned} (\rho + ic\eta)^2 &= \rho^2 - c^2\eta^2 + 2ic\rho\eta \overset{(2)}{=} r^2 - c^2 + 2icz \\ &= r^2\left\{1 - 2(-icr^{-1})\sin\delta + (-icr^{-1})^2\right\} \end{aligned}$$

$$\frac{1}{\rho + ic\eta} = \frac{1}{r\left\{1 - 2(-icr^{-1})\sin\delta + (-icr^{-1})^2\right\}^{1/2}} = \frac{1}{r}\sum_{n=0}^{\infty}(-icr^{-1})^n\cdot P_n(\sin\delta)$$

- Das Vinti-Potential kann als eine typische Theoretiker-“Üebung“ der frühen Tage der Satellitengeodäsie angesehen werden.
- Prof. Schürer hat mich in einem Satz perfekt in das Thema eingeführt: „machen Sie mal was daraus …“
- Ich war durchaus unglücklich mit dem Thema, habe aber „viel dabei gelernt“.
- Das Vinti-Potential kann als das Potential zweier Massen mit imaginärem Abstand auf der z-Achse (Rotationsachse der Erde) verstanden werden.
- Ziel wäre eine einfache analytische Näherung der Bewegung eines Satelliten gewesen.
- Eigentlich wollte ich die Arbeit in früheren Jahren vernichten … Andreas Verdun hat meine späteren Versuche vereitelt.

Lizenziat (1971)

$$\frac{\mathcal{M}\rho}{\rho^2+c^2\eta^2} = \mathcal{M}\cdot \mathrm{Re}\left[\frac{1}{\rho+ic\eta}\right] = \frac{\mathcal{M}}{r}\left\{1+\sum_{n=1}^{\infty}\left(-\frac{c^2}{r^2}\right)^n\cdot P_{2n}(\sin\delta)\right\}$$

Vergleicht man dies mit dem Erdpotential

$$U = -\frac{\mu}{r}\left\{1-\sum_{n=1}^{\infty} J_n\cdot\left(\frac{a_e}{r}\right)^n\cdot P_n(\sin\delta)\right\} \qquad (3)$$

so erhält man für die Parameter im Vintipotential:

$$\mathcal{M} = -\mu = -G\cdot M$$
$$c^2 = J_2\cdot a_e^2 \qquad (4)$$

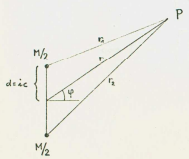
und somit für das Vintipotential:

$$V = -\frac{\mu\rho}{\rho^2+c^2\eta^2} = -\frac{\mu}{r}\left\{1+\sum_{n=1}^{\infty}\left(-\frac{c^2}{r^2}\right)^n\cdot P_{2n}(\sin\delta)\right\} \qquad (5)$$

Als Störpotential ΔV erhält man:

$$\Delta V = U-V = \frac{\mu}{r}\left\{J_3\cdot\left(\frac{a_e}{r}\right)^3\cdot P_3(\sin\delta)+\left(J_2^2+J_4\right)\cdot\left(\frac{a_e}{r}\right)^4\cdot P_4(\sin\delta)+\ldots\right\} \qquad (6)$$

Da J_3 von der Grössenordnung J_2^2 ist, ist dieses Störpotential von 2. Ordnung im Parameter J_2.
Dass das Potential V auf Bewegungsgleichungen führt, die vollständig integriert werden können, kann sehr einfach folgendermassen eingesehen werden:
Man kann das Vintipotential erzeugen als Potential zweier Massenpunkte gleicher Masse M/2 = 1/2 Erdmasse und Abstand 2d=2ic: (s. Stumpff {12}):



$$V = -mG\left(\frac{1}{r_1}+\frac{1}{r_2}\right) \quad ; \quad m=\frac{M}{2}$$

Es ist (cos-Satz):

$$r_1^2 = r^2+d^2-2rd\sin\varphi = r^2-c^2-2rc\sin\varphi\ i$$

Es ist (cos-Satz):

$$r_2^2 = r^2+d^2+2rd\sin\varphi = r^2-c^2+2rc\sin\varphi\ i$$

Kapitel 3 : Darstellung von Satellitenbahnen durch oskulierende Vintibahnen.

In den Kapiteln 3 und 4 soll untersucht werden, wie gut die Bahnen von Satelliten durch solche im Vintipotential dargestellt werden.

"Vintibahnen": Bahnen bei Bewegung im Kraftfeld des Vintipotentials.
"Vergleichsbahnen": Bahnen im Kraftfeld eines Potentials, das die Glieder bis zur 4. Ordnung der Entwicklung des Erdpotentials nach zonalen Kugelfunktionen umfasst.

Es wird dabei angenommen, dass die Anfangsbedingungen Ort und Geschwindigkeit für beide Bahnen identisch sind. D.h. die Vintibahnen sind oskulierende Bahnen der "tatsächlichen" Bahnen. T_o ist die Oskulations- oder Ausgangsepoche.

Das Kapitel ist unterteilt in zwei Abschnitte:

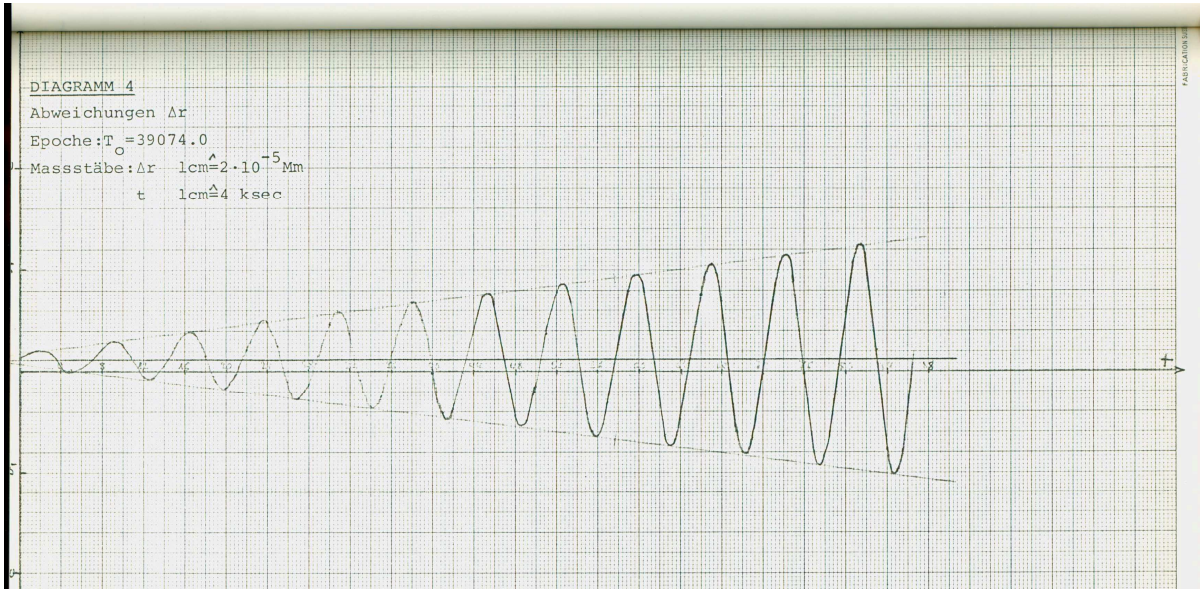
1) Gegenüberstellung Vintibahnen - Vergleichsbahnen
2) Numerische Integration

In Abschnitt 1) werden durch numerische Integration Ephemeriden für bestimmte Satelliten bei Bewegung in den Kraftfeldern beider Potentiale gerechnet. Dieser Vergleich ist insbesondere unabhängig von der Entwicklung der Integrale (4b), Kap. 2. Diese Ephemeriden werden miteinander verglichen.

In Abschnitt 2 wird das Verfahren für die numerische Integration besprochen. Insbesondere wird die Genauigkeit der numerischen Integration anhand des 2-Körperproblems diskutiert.

Angabe der Epochen im Modifizierten Julianischen Datum (MJD). Dabei ist: MJD = Julianisches Datum - 2 400 000.5

Lizenziat (1971)



Bahnvergleich: Typische Differenzen!

Die Periode entspricht der Umlaufszeit, die linear anwachsende Amplitude wird durch die unterschiedliche mittlere Bewegung bei identischen Anfangsbedingungen verursacht.

- → **Man hätte vorgängig eine Parameterbestimmung mit der Halbachse als Parameter machen müssen.**
- → **Man beachte den „personal touch“ der Figur!**

Astronomisch-geodätische Arbeiten in der Schweiz

herausgegeben von der

Schweizerischen Geodätischen Kommission
(Organ der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft)

Integrale Auswertung von Satellitenbeobachtungen

VORWORT

Seit dem Aufkommen der Satellitengeodäsie hat man sich auch in der Schweiz (bisher vorallem im Astronomischen Institut der Universität Bern) praktisch und theoretisch mit diesem Gebiet befasst, und Ergebnisse dieser Arbeiten sollen ebenfalls in den "Astronomisch-geodätischen Arbeiten in der Schweiz" veröffentlicht werden. Die vorliegende Abhandlung von Herrn Dr. G. Beutler beschäftigt sich mit der Auswertung von Satellitenbeobachtungen. Die bisher übliche Trennung in geometrische und dynamische Methoden wurde zugunsten einer integralen Betrachtungsweise aufgegeben. Es hat sich gezeigt, dass auch für Bogen über 2 - 3 Tage eine befriedigende Darstellung der Beobachtungen möglich ist, und dies bei sehr problematischen Satelliten wie PAGEOS einer war. Es kann dadurch der Informationsinhalt der Beobachtungen wesentlich besser ausgeschöpft werden, als bei der Beschränkung auf simultane Beobachtungen allein. Systematische Fehlereinflüsse und fehlerhafte Beobachtungen können sofort entdeckt und eliminiert werden. Das Verfahren erfordert allerdings eine ausgeklügelte numerische Integration.

Die Schweizerische Geodätische Kommission dankt Herrn Beutler für diese mit grosser Akribie durchgeführte Arbeit. Erste Anwendungen auf Beobachtungen in Zimmerwald, Delft und Graz haben die Nützlichkeit der Methode voll bestätigt. Zu danken ist auch für die Niederschrift des Manuskripts durch Frau Ch. Strickler und das Zeichnen der Figuren durch Herrn W. Gurtner. Die Arbeit wurde in verdankenswerter Weise unterstützt vom Schweizerischen Nationalfonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung (Forschungskredit Nr. 2.396 - 0.75).

Der Präsident der
Schweizerischen Geodätischen Kommission
Prof. Dr. M. Schürer

Doktorat (1977)

Damit ist das Konzept in groben Zügen vorgestellt. Es schien mir nicht sinnvoll, zwei "Superprogramme" zu entwickeln, die allen Aufgaben hätten gerecht werden können. Vernünftiger schien es, zwei Basisprogramme für Simulation und Parameterbestimmung zu entwickeln. Diese Basisprogramme sind so beschaffen, dass sie die allen Aufgaben gemeinsamen Teile enthalten. Ausserdem ist die Struktur so beschaffen, dass die absehbaren Erweiterungen für die Lösung irgendeiner der gegebenen Aufgaben einfach und lokalisiert erfolgen können. Dieses Vorgehen hat sich sehr gut bewährt.

Den beiden Programmen ist folgende Struktur zugrunde gelegt:

a) Beobachtungskonfiguration
- N Beobachtungsstationen; $N \leqslant 20$
- Beobachtungstypen
  1. Richtungsbeobachtungen (Photographische Aufnahmen)
  2. Distanzbeobachtungen (Laser)
  3. Radialgeschwindigkeiten (Doppler)
- Anzahl Beobachtungen: nur durch die Speicherkapazität der externen Speichermedien begrenzt.

b) Kräftemodell
- Erdpotential dargestellt durch eine Entwicklung nach Kugelfunktionen. Der Grad, bis zu welchem diese Entwicklung gehen soll, ist frei wählbar. ($n \leqslant 14$)
  (Eine Erhöhung dieser Grenze ist problemlos.)
- Gravitationswirkungen von Sonne, Mond.

Stationskoordinaten von Delft (Zimmerwald fix) mit Pageos-Aufnahmen bestimmt.

Potential der Arbeit wäre „ungeheuer“ gewesen.

Bogen 10:

X	=	3 919 674 m ± 10 m
Y	=	298 841 m ± 3 m
Z	=	5 005 895 m ± 12 m
Δt	=	- 12.3 msec ± 2.1 msec

Bogen 11:

X	=	3 919 681 m ± 9 m
Y	=	298 841 m ± 3 m
Z	=	5 005 882 m ± 11 m
Δt	=	- 13.3 msec ± 2.0 msec

Habilitation (1983)

UNIVERSITÄT BERN

Astronomisch-geodätische Arbeiten in der Schweiz

herausgegeben von der

Schweizerischen Geodätischen Kommission

(Organ der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft)

Lösung von Parameter-bestimmungsproblemen in Himmelsmechanik und Satellitengeodäsie mit modernen Hilfsmitteln

VORWORT

In allen Naturwissenschaften gibt es zahlreiche und wichtige Aufgaben der Bestimmung von Modellparametern bei Vorgängen , die von gewöhnlichen Differentialgleichungen regiert werden . Die klassischen analytischen Lösungsmethoden werden in vielen Fällen den heutigen Ansprüchen an Genauigkeit und Schnelligkeit nicht mehr gerecht ; ausserdem sind sie oft sehr speziell auf ihre Probleme zugeschnitten .

In der vorliegenden umfangreichen Arbeit entwickelt Herr Dr. G. Beutler ein einheitliches Verfahren zur strengen numerischen Behandlung aller derartigen Aufgaben . Den Anstoss zur systematischen Beschäftigung mit diesem Problemkreis empfing er von der praktischen Satellitengeodäsie . Die dort gewonnenen Erkenntnisse gingen auch in seine Vorlesungen über Himmelsmechanik ein . Aus diesen beiden Arbeitsgebieten unseres Institutes stammen die Anwendungsbeispiele in der vorliegenden Arbeit . Gemeinsamkeiten und Unterschiede treten klar zutage . Für alle , die sich mit der Bahnbestimmung von Himmelskörpern befassen , ist besonders lehrreich der Vergleich der klassischen Methoden von Gauss und Laplace mit dem hier angewandten Verfahren . - Die mathematischen Herleitungen sind rigoros und ausführlich dargestellt , in grösster Allgemeinheit für die Bewältigung auch ganz verwickelter Aufgaben aus allen Gebieten . Die Arbeit verdient daher weite Verbreitung und Beachtung .

Ich danke der Schweizerischen Geodätischen Kommission dafür , dass sie sie freundlicherweise in die angesehene Reihe ihrer Publikationen aufnimmt .

Prof. Paul Wild

Astronomisches Institut
der Universität Bern

Habilitation (1983)

Die Himmelsmechanik in ihrem ursprünglichen Sinn beschäftigt sich mit der Bewegung von Planeten, Planetoiden, Kometen, Meteoren und von natürlichen Satelliten der Planeten in unserem Sonnensystem. In der vorliegenden Arbeit soll auch die Beschreibung der Bewegung künstlicher Erdsatelliten und anderer künstlicher Raumsonden unter den Begriff Himmelsmechanik fallen.

Die Bahnen aller dieser Himmelskörper sind partikuläre Lösungen von gewöhnlichen Differentialgleichungssystemen zweiter Ordnung in der Zeit t (Bewegungsgleichungen). Sie folgen aus den Newton'schen Axiomen der Mechanik und aus dem Newton'schen Gravitationsgesetz (siehe Kapitel 3).

Mit dem Begriff Parameter bezeichnen wir alle diejenigen Grössen, die
a. das Differentialgleichungssystem eindeutig festlegen, und die
b. genau eine partikuläre Lösung des betreffenden Systems definieren. (1)

Unter Parameterbestimmung ist demnach die Bestimmung der unter (1) eingeführten Grössen zu verstehen. (2)

Beispiele für solche Parameter:

Zu a: Massen der Planeten.
Koeffizienten von Entwicklungen des Erdpotentials (bei der Beschreibung der Bewegung künstlicher Erdsatelliten).

Zu b: Anfangs- oder Randwerte: Orts- und Geschwindigkeitsvektoren der Himmelskörper zu einer bestimmten Epoche T_0 resp. Ortsvektoren der Himmelskörper zu zwei verschiedenen Epochen T_1 und T_2.

Dabei ist es sinnvoll, zwei verschiedene Sätze von sogenannten Grundgleichungen einzuführen:

a. die Grundgleichungen für die Bewegung von natürlichen Himmelskörpern des Sonnensystems (Kapitel 3.2)
b. die Grundgleichungen für die Bewegung von künstlichen Erdsatelliten (Kapitel 4.2)

Ausgehend von diesen Grundgleichungen können für die klassische Himmelsmechanik resp. für die Satellitengeodäsie verschiedene spezielle Parameterbestimmungsprobleme (z.B. reine Bahnbestimmung) formuliert werden.

Zur Bestimmung der in (1) eingeführten Parameter stehen die Beobachtungen zur Verfügung.

Eine Beobachtung oder eine Messung ϕ_j' ist (abgesehen vom wahren Messfehler ε_j) gleich dem Wert einer reellen Funktion $\phi_j(p_1,p_2,\ldots,p_{n_p})$ der unbekannten Parameter p_i, $i = 1,2,\ldots,n_p$ an der Stelle $p_i = p_i^*$, $i = 1,2,\ldots,n_p$; dabei sind die p_i^*, $i = 1,2,\ldots,n_p$ die wahren Werte der unbekannten Parameter.

Es gilt:

$$\phi_j' + \varepsilon_j = \phi_j(p_1^*,p_2^*,\ldots,p_{n_p}^*),\ j=1,2,\ldots,n_b \qquad (3)$$

Wo: n_b: Anzahl der Beobachtungen (Messungen)
n_p: Anzahl der Parameter
$p_i, i=1,2,\ldots,n_p$: Bezeichnung der Parameter
$p_i^*, i=1,2,\ldots,n_p$: Wahre Parameterwerte
$\phi_j(p_1,p_2,\ldots,p_{n_p})$, $j=1,2,\ldots,n_b$: Beobachtete (gemessene) Funktionen.
$\phi_j(p_1^*,p_2^*,\ldots,p_{n_p}^*)$, $j=1,2,\ldots,n_b$: Wahre Funktionswerte.

Habilitation (1983)

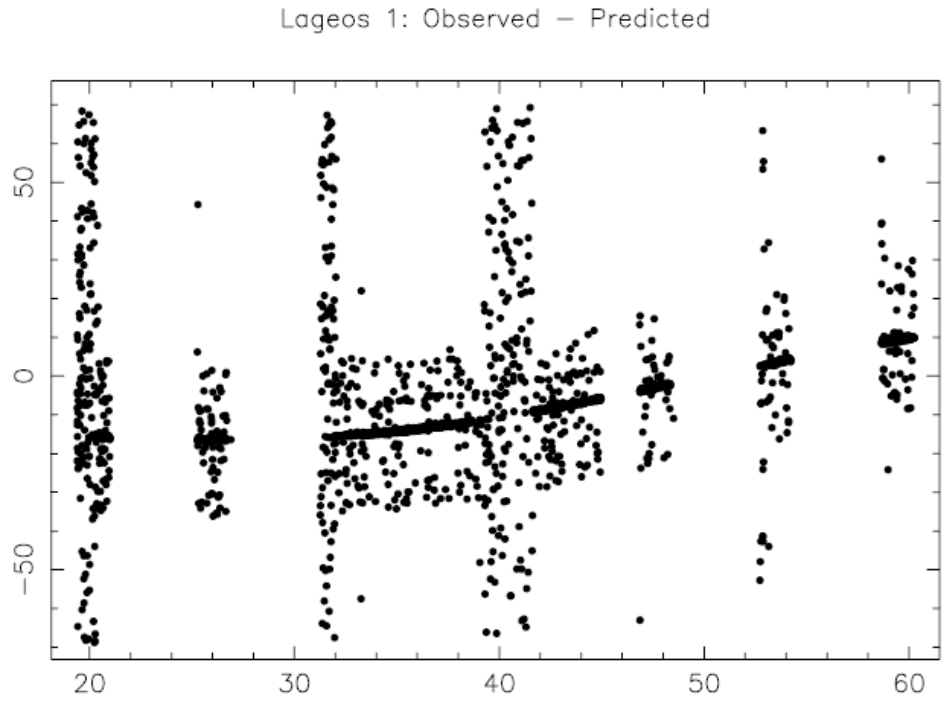


Fig. 8.14. Observed-predicted light travel times (ns) to Lageos 1, observed at Zimmerwald Observatory on July 7, 2002, $07^h19^m - 08^h00^m$ UT

Parallel zu meiner Habil-Arbeit „bastelte“ ich ein Real-time Filter, dokumentiert im Vorlesungsskript „digitale Filter und Schätzprozesse“), mit dem der SLR-Messprozess in Zimmerwald optimiert werden sollte – und wurde.

Mir war mulmig zumute, da ich Europa vor den ersten Tests mit echten Beobachtungen verlassen musste.

Ich war sehr erleichtert als ich in Kanada erfuhr, dass das Filter „einfach so“ funktionierte und sich seither (fast) immer bewährt hat.

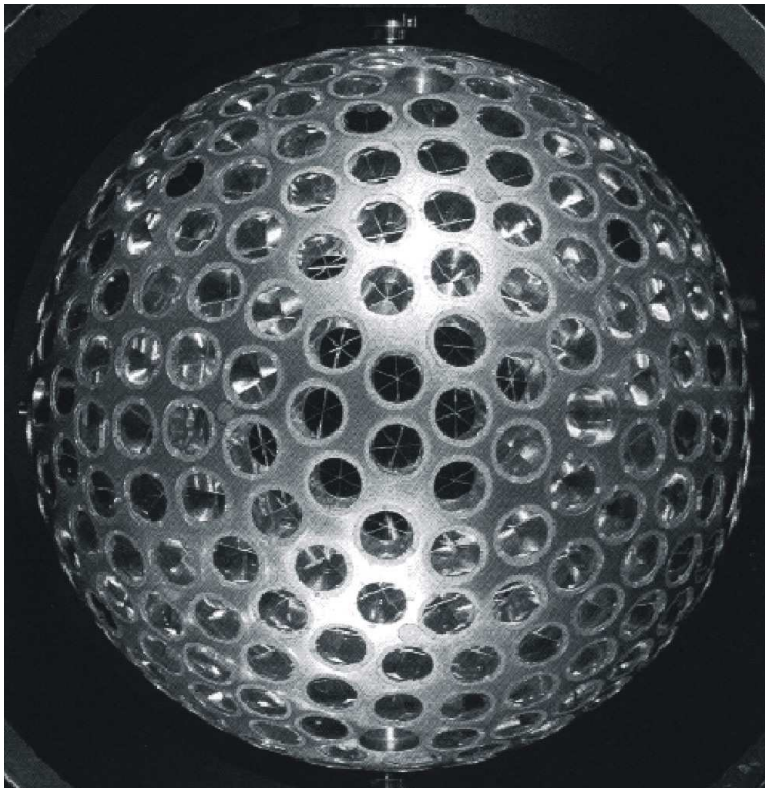
Fundamentalastronomie heute

UNIVERSITÄT BERN

Durch die Ära der Raumfahrt wurde die Fundamental-astronomie revolutioniert:

- **Die Sterne wurden durch Mikrowellensignale aussendende Satelliten oder Quasare ersetzt.**
- **Die Richtungsbeobachtungen zu den Sternen wurden durch durch Distanzmessungen zwischen Satellit und Empfänger ersetzt (resp. durch Distanzdifferenzen zu Satelliten, Quasaren) von zwei Empfängern aus.**
- **Diese Distanzen werden durch Laufzeitmessungen von elektromagnetischen Signalen realisiert.**
- **Die Sternkataloge wurden durch ein inertiales System von Quasaren (Radiogalaxien) und/oder durch die Satelliten-bahnen in diesem System ersetzt.**
- **Es *musste* ein extrem genaues terrestrisches Bezugs-system geschaffen werden.**

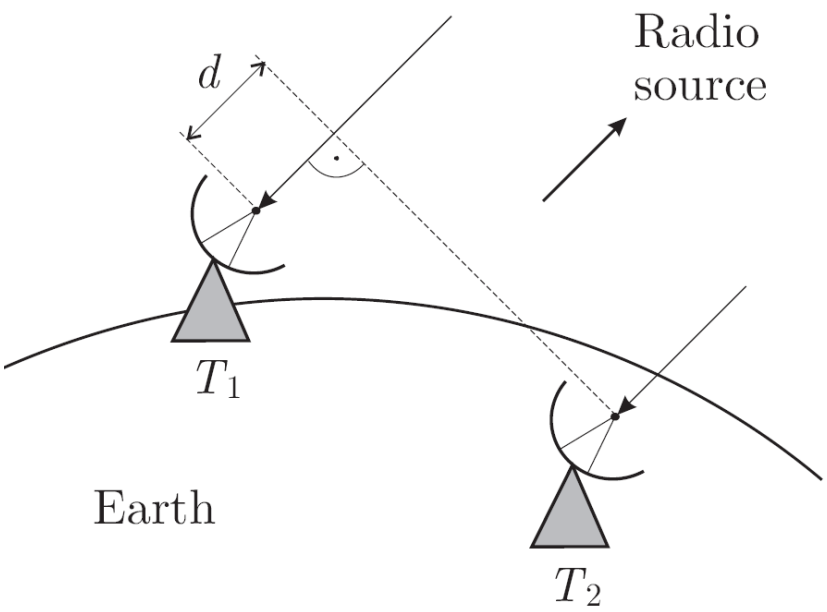
Fundamentalastronomie heute



Lageos 2

- **Distanzmessung mit Laser**
- **Vor dem Start von CHAMP im Jahr 2000 beruhte unser Wissen vom Gravitationsfeld der Erde von terrestrischen *Messungen* und von der Vermessung der Bahnen künstlicher Erdsatelliten.**
- **Heute ist Laser unabdingbare Notwendigkeit zur Kalibration der Mikrowellensysteme und zur absoluten Lagerung der terrestrischen Bezugssysteme.**

Fundamentalastronomie heute



VLBI-Teleskop in Wettzell (links), Ersetzen der optischen durch Mikrowellenbeobachtungen.

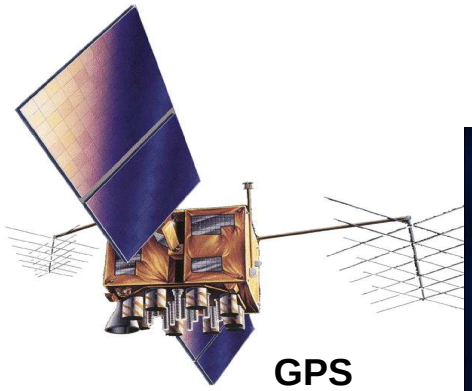
Globale Navigationssysteme

UNIVERSITÄT BERN

Global Positioning System (GPS): **USA**

Global Navigation Satellite System (GLONASS): **Russland**

GALILEO: **Europa**



GPS

GLONASS

GALILEO

Kanada-Aufenthalt 1983-1984

UNIVERSITÄT BERN

Der Forschungsaufenthalt an der University of New Brunswick (UNB) 1983-84 war wahrscheinlich der entscheidende Karriereschritt:

Erster Kontakt mit Messungen des Globalen Positionierungssystems (GPS)

Basierend auf den in Diss/Habil entwickelten Verfahren und Programmen wurde ein Auswerteprogramm für GPS-Phasenbeobachtungen entwickelt → Urversion der Bernese GPS Software (BSW) – enthielt schon Bahnparameter.

Weihnachten 1983: Erste Ambiguity-fixed Lösung mit den Beobachtungen eines Macrometer-Netzes bei Ottawa. „Kriminelle“ Autofahrt via Quebec nach Ottawa (mit „freezing rain“+Familie) zu Jan Kouba.

Ich wurde restlos vom wissenschaftlichen Potential des GPS überzeugt.

Für die Familie war das Kanada-Jahr schlicht phantastisch. The „great outdoors“ sind wirklich unbeschreiblich schön. Zudem sind kanadische Winter „truly remarkable – to say the least“.

Ich gewann die Überzeugung, dass die Arbeiten des AIUB den Vergleich mit denen der renommiertesten Forschungsinstitutionen nicht zu scheuen braucht(e), sein „Marketing“ hingegen schon.

→ Dies wollte ich nach der Rückkehr nach Bern grundlegend ändern.

Witzig war übrigens, dass ich in Bern einerseits auf einer bis Ende 1983 befristeten Stelle sass, andererseits unterschreiben musste, dass ich nach dem Kanada-Aufenthalt nach Bern zurückkehren würde ... Ich unterschrieb.

Kanada-Aufenthalt 1983-1984

Die wissenschaftlichen Erkenntnisse „meines“ Kanada-Jahres wurden festgehalten in:

- **G. Beutler, D.A. Davidson, R.B. Langley, R. Santerre, P. Vanicek, D.E. Wells (1984) „*Some theoretical and practical aspects of geodetic positioning using carrier phase difference observations of GPS satellites*“, Technical Report, Dept. Of Surveying Engineering, University of New Brunswick**

Das Dokument diente nicht nur in Bern als Leitlinie für die Entwicklung wissenschaftlicher GPS-Auswerteprogramme. Als visionär darf das folgende Zitat gelten, das erst jetzt, mit der Entwicklung von Galileo, realisiert werden kann.

- ***„In the authors‘ opinion, the best way of modelling the clocks is the following: define a statistical model of clock performances using available information on clock offset, drift, jitter. This leads to a simple stochastic differential equation ... for the clock synchronization errors as a function of time ...“***

Globale Navigationssysteme

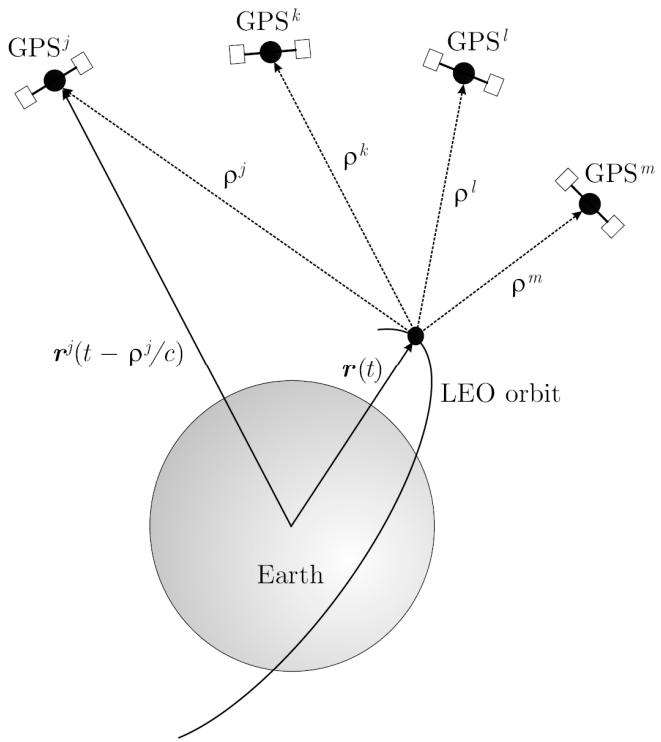
Die globalen Navigationssatellitensysteme (GNSS) bieten *dem armen Mann und der armen Frau)" die Möglichkeiten der modernen Positionierung und Navigation.**

) *z.B. Mercedes- oder Fahrrad-Besitzern …

Für die Wissenschaft (astronomische Geodäsie, Geodynamik) sind es die *Arbeitspferde,* die anhand kurz vorgestellt werden sollen

- **Mess-Prinzipien**
- **Die heile Welt und die**
- **Die reale Welt**

Globale Navigationssysteme



GNSS können auf der Erde und im erdnahen Raum verwendet werden.

Jeder Satellit und jeder Emfänger ist mit einer genauen Uhr ausgestattet.

Gemessen wird die Laufzeit von elektromagnetischen Signalen zwischen Satellit und Empfänger.

➔Distanz ρ zwischen Sender und Empfänger.

Klo-Rollenmodell der GPS-Beobachtung benötigt Himmelsmechaniker mit Klo-Rolle + Filzstift beim Satelliten, Sekretär(in) beim Empfänger mit Taschenrechner + Filzstift + Bundesordner sowie einen Paternoster zwischen Satellit und Empfänger, der sich mit Lichtgeschwindigkeit bewegt.

Das Modell wurde leider nie patentiert!

Globale Navigationssysteme

Die Laufzeit eines Signals $t_e - t^s$ setzt sich zusammen aus:

$$c\,(t_e - t^s) = \rho + c\,(\Delta t_e - \Delta t^s) + \Delta\rho_i + \Delta\rho_t$$

- **Aus ρ wird die Position des Empfängers, aber auch die Bahn des Satelliten bestimmt.**
- **$c\,(\Delta t_e - \Delta t^s)$ dient der Uhren-Synchronisation.**
- **$\Delta\rho_I$, die Signalverzögerung in der Ionosphäre, dient der Ionosphärenmodellierung.**
- **$\Delta\rho_t$, die Signalverzögerung in der Troposphäre, dient der Meteorologie (insbesondere der Bestimmung des Wasserdampfgehaltes der Atmosphäre).**
- **Der normale Navigator nimmt die Satellitenposition und Δt^s als bekannt an, eliminiert $\Delta\rho_i$ und setzt $\Delta\rho_t = 0$. Er hat dann nur noch vier Unbekannte (drei Koordinaten seiner Position und den Uhrfehler Δt_e).**

Die Jahre 1984-1991 am AIUB

UNIVERSITÄT BERN

- Entwicklung der „Bernese Second Generation GPS Software“, später Bernese GPS Software (BSW) genannt, mit namhaften Beiträgen von Markus Rothacher, Werner Gurtner, Thomas Schildknecht.
- Zusammenarbeit mit Wild Herbrugg (heute Leica), Entwicklung der PoPS-Software – ohne Übertreibung ein Kunstwerk, dessen Weiterentwicklung leider in den 1990er Jahren aufgegeben wurde.
- Aufbau der sehr fruchtbaren Zusammenarbeit mit dem Bundesamt für Landestopographie.
- Auswertung des Turtmann-Testnetzes im Rahmen der SGK.
  - Hauptresultat – 1: Ja, GPS kann für cm-genaue Anwendungen auch in den Alpen verwendet werden (!).
  - Hauptresultat – 2: Die Bernese GPS Software hat für die moderne Landesvermessung in der Schweiz eine entscheidende Rolle gespielt.
- Das AIUB etabliert sich als eine der weltweit führenden Forschungs-institutionen im Bereich Satellitengeodäsie, insbesondere GPS-Methodologie.
- Zimmerwald etabliert sich als gute Laserstation.
- Photographische Astrometrie wird langsam durch CCD Beobachtungen oder ähnliche Techniken abgelöst.

DREIDIMENSIONALES TESTNETZ TURTMANN 1985 - 1993

TEIL II (GPS-NETZ)

F. Jeanrichard (Herausgeber)

Autoren:

Gerhard Beutler
Alain Geiger
Markus Rothacher
Stefan Schaer
Dieter Schneider
Adrian Wiget

1995

VORWORT

Im Band 45 dieser Publikationsreihe der Schweizerischen Geodätischen Kommission mit dem Titel: "Dreidimensionales Testnetz Turtmann 1985 - 1990", Teil I, sind die Anlage und Installation des Testnetzes Turtmann sowie die terrestrische Messung des Netzes beschrieben.

Der vorliegende zweite Band befasst sich mit der Beschreibung der 14 GPS-Messkampagnen, welche von 1985 - 1993 stattfanden (Kapitel 5), sowie mit der Auswertung der Messungen und der Beurteilung der Resultate (Kapitel 6). Das Kapitel 7 ist der kombinierten Ausgleichung der GPS-Messungen mit den terrestrischen Beobachtungen gewidmet.

Im Rahmen dieser 14 GPS-Messkampagnen, welche in Zusammenarbeit mit 15 verschiedenen schweizerischen und ausländischen Instituten durchgeführt worden sind, konnten 16 verschiedene Typen von GPS-Empfängern erprobt werden. Die Menge der dabei gewonnenen Messdaten ist beträchtlich und deren Auswertung und Analyse konnte nur mit einem enormen Effort bewältigt werden. Diese Arbeiten wurden von Herrn Professor G. Beutler, Direktor des Instituts für Astronomie der Universität Bern, den Herren Alain Geiger, Markus Rothacher, Stefan Schaer, Dieter Schneider und Adrian Wiget mit Brillianz geleitet, durchgeführt und in aller Gründlichkeit dokumentiert. Die Schweizerische Geodätische Kommission dankt allen Beteiligten wärmstens für die beispielhafte Arbeit, welche meist neben den täglichen Verpflichtungen geleistet werden musste. Ebenso gilt unser Dank allen schweizerischen und ausländischen Institutionen, welche sich an den Messkampagnen beteiligt hatten und damit einen wesentlichen Beitrag zur Entwicklung der satellitengestützten Messverfahren in der Geodäsie und der praktischen Vermessung geleistet haben.

Die folgenden Ziele waren bei der Konzeption des Testnetzes Turtmann festgelegt worden:

1. Test und Evaluation von GPS-Empfängern
2. Test neuer geodätischer Messgeräte und Messmethoden
3. Untersuchung von rezenten Bewegungen der obersten Erdkruste

Ohne Zweifel konnten aufgrund der im Testnetz Turtmann gewonnenen Erfahrungen die grundsätzlich bei GPS-Messungen auftretenden Probleme erkannt werden. Diese betreffen die Wahl des Troposphärenmodells (besonders bei Netzen mit grossen Höhendifferenzen), die genaue Kenntnis der Satelliten-Bahndaten (wichtig bei grossen Netzen), die Bildung von Ionosphärenmodellen sowie die Berücksichtigung von Antennenkalibrierungen. Bei der kombinierten Ausgleichung der terrestrischen Messungen zusammen mit den GPS-Koordinatensätzen wurden einige interessante Ergebnisse erzielt. Die Korrelation zwischen den Residuen der Vertikalkomponente der GPS-Koordinaten und den Stationshöhen weist auf noch unvollkommen erfasste systematische Restfehler in den Messungen hin.

Zwischen den ersten Messkampagnen von 1985 und jener von 1993 hat sich die Konstellation der GPS-Satelliten stark verändert. Die Qualität der GPS-Empfänger sowie der Auswerteprogramme wurde wesentlich verbessert. Deswegen dürfte es z. Z. noch schwierig sein, kleinste Relativbewegungen der obersten Erdkruste aus den über eine relativ kurze Zeitspanne vorhandenen wiederholten Messungen aufzudecken. Aber die neueren Messungen im Testnetz Turtmann und deren Auswertung erreichen eine immer grössere Perfektion. In naher Zukunft werden diese eine Antwort auf die tektonischen Fragestellungen in dieser Region erlauben.

Die Schweizerische Geodätische Kommission dankt den Autoren des vorliegenden Bandes aufrichtig für den wichtigen Beitrag zur Entwicklung der geodätischen Wissenschaft in der Schweiz. Ihr Dank gilt auch Frau Christine Studer für die Bearbeitung des Manuskripts und Dr. Beat Bürki für die Vorbereitung der Drucklegung. Nicht zuletzt ist sie der Schweizerischen Akademie der Naturwissenschaften für die Übernahme der Druckkosten dieses Bandes zu Dank verpflichtet.

Im Namen der Schweizerischen Geodätischen Kommission:

Direktor F. Jeanrichard
Bundesamt für Landestopographie
Vizepräsident der SGK

Prof. Dr. H.-G. Kahle
ETH Zürich
Präsident der SGK

Die Jahre 1985-1990

NUM	NAME	RESIDUALS IN MILLIMETERS		
		L1_86_WM --> LTPNEW93		
		N	E	U
10	1.BRUN	-11.4	2.0	-0.3
20	2.BRAE	1.1	-1.6	11.6
31	3.GPS	-7.8	0.5	4.5
40	4.ERGI	-3.3	2.8	-9.9
50	5.OEMS	8.0	-1.0	16.7
61	6.GPS	-2.1	-0.7	7.0
70	7.TURT	12.7	-4.9	-16.4
80	8.SUST	2.8	2.8	-13.2
RMS PER COORD		7.9	2.6	12.1

TRANSFORMATION PARAMETERS		
TRANSLATION IN X	54.4 ± 3.3	MM
TRANSLATION IN Y	291.3 ± 3.3	MM
TRANSLATION IN Z	671.8 ± 3.3	MM
ROTATION AROUND X	-0.34 ± 0.34	"
ROTATION AROUND Y	-0.00 ± 0.41	"
ROTATION AROUND Z	-0.03 ± 0.25	"
SCALE FACTOR	-0.80 ± 1.20	MM/KM

Tabelle 6.3-7: Vergleich der 1986er WM-101-Lösung (ohne Antennenoffsets) mit der terrestrischen Lösung

Die Jahre 1985-1990

NUM	NAME	RESIDUALS IN MILLIMETERS		
		L1_86_TR --> LTPNEW93		
		N	E	U
20	2.BRAE	-2.7	0.4	3.4
31	3.GPS	-1.4	0.1	0.2
40	4.ERGI	2.4	-1.5	1.5
50	5.OEMS	5.4	-1.8	-0.9
61	6.GPS	-1.9	3.2	3.7
70	7.TURT	-3.1	-1.0	-4.8
80	8.SUST	1.3	0.7	-3.1
RMS PER COORD		3.1	1.7	3.2

TRANSFORMATION PARAMETERS		
TRANSLATION IN X	69.2 ± 1.2	MM
TRANSLATION IN Y	285.7 ± 1.2	MM
TRANSLATION IN Z	660.0 ± 1.2	MM
ROTATION AROUND X	-0.80 ± 0.12	"
ROTATION AROUND Y	0.74 ± 0.14	"
ROTATION AROUND Z	0.10 ± 0.09	"
SCALE FACTOR	-1.68 ± 0.41	MM/KM

Tabelle 6.3-13: Vergleich der 1986er Trimble-Lösung mit der terrestrischen Lösung

Das Jahr 1991

- **1991 wurde ich zum Direktor des AIUB und Extraordinarius für Astronomie gewählt und – wie es sich gehört – mit neuen Pflichten in Administration und Lehre „zugedeckt“.**
- **Ich ging mit dem ernsten und unumstösslichen Vorsatz an die IUGG-Generalversammlung nach Wien, *keine neuen Verpflichtungen* zu übernehmen.**
- **Dies ging gut bis zum letzten Tag der Versammlung, als mir Prof. Ivan Mueller mitteilte, das IGS Planning Committee hätte mich als Chairman des *IGS Campaign Oversight Committee* vorgeschlagen ...**
- **Die Annahme dieses Vorschlages führte**
  - **zu einem immer „ernsthafteren“ Engagement in der IAG**
  - **zu einer relativ glücklichen Zeit meiner Karriere als IGS Chairman (bis Ende 1997); ich durfte eng zusammenarbeiten mit *Eminenzen* wie Ivan Mueller und Jan Kouba ...**
- **Trotzdem habe ich auf Anfrage immer betont, dass ich mich „*miserable as usual*“ fühle.**

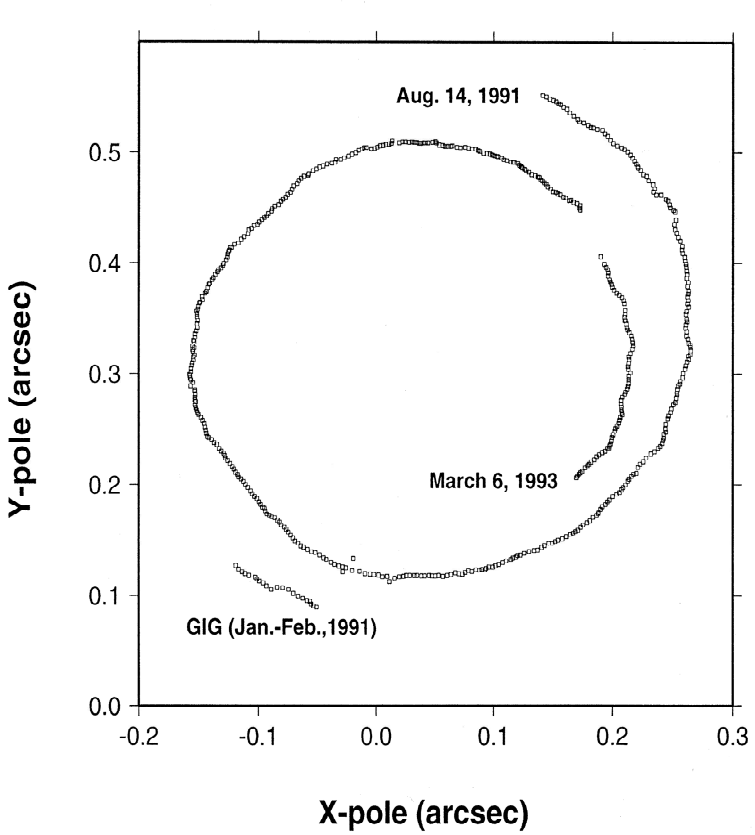
Entwicklung des IGS

- The primary motivation in planning the IGS was the recognition in 1989 that the most demanding users of the GPS satellites, the geophysical community, were purchasing receivers in exceedingly large numbers and using them as more or less black boxes, using software packages which they did not completely understand, mainly for relative positioning.

- The other motivation was the generation of precise ephemerides for the satellites together with by-products such as earth orientation parameters and GPS clock information.

Die Planung für den IGS begann 1989 in Edinburgh (mit Brand)

Entwicklung des IGS



- Erste Versuche, die Polschwankung mit GPS zu bestimmen (aus Proceedings, IGS-Workshop in Bern, 1993).
- Es wurde klar, dass man im IGS nicht einfach nur die Satellitenbahnen bestimmen konnte, sondern auch den Pol, Stationskoordinaten, etc.

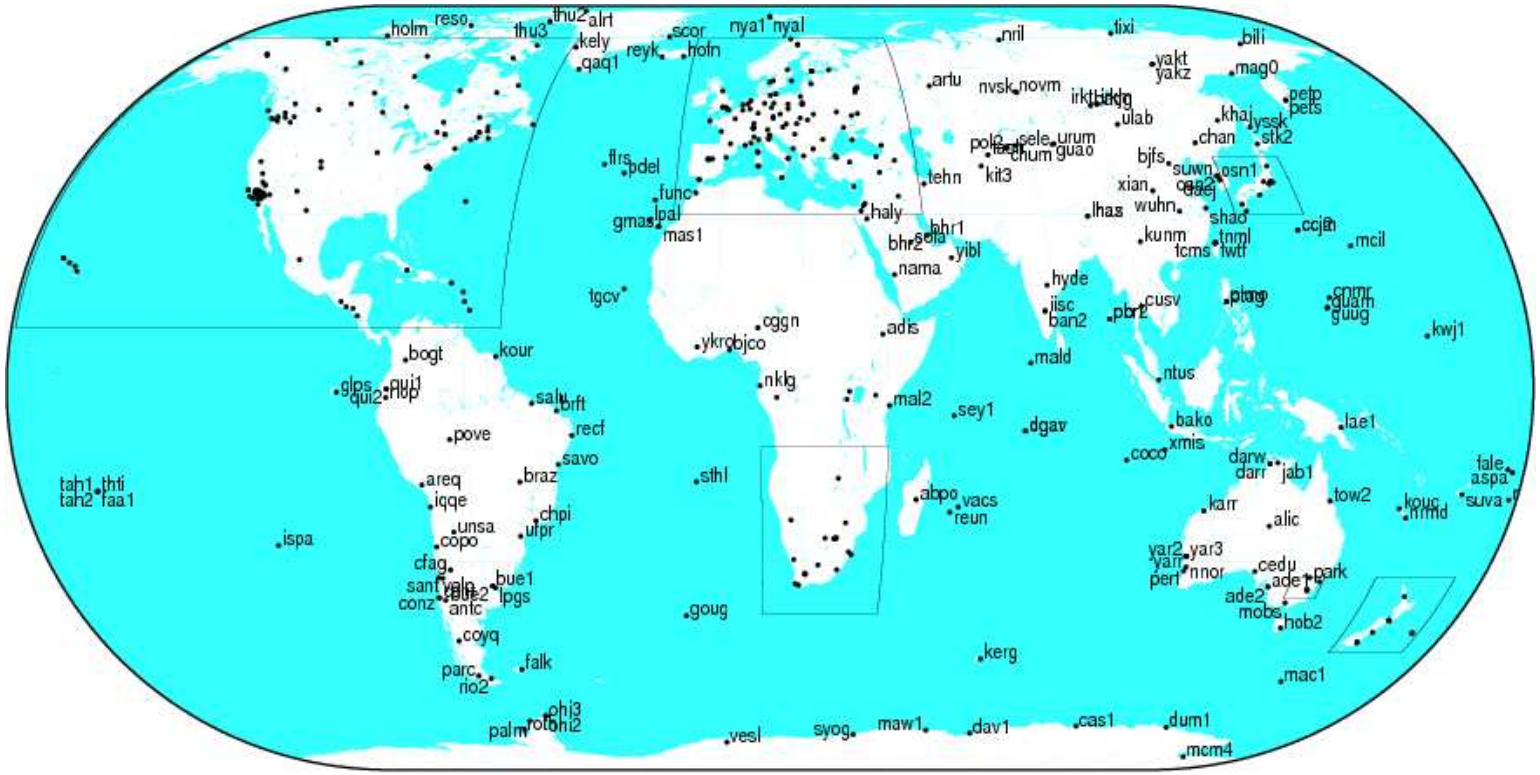
Entwicklung des IGS

Der IGS war ursprünglich eine freiwillige Zusammenarbeit von wissenschaftlichen Organisationen mit dem Ziel, täglich die Bahnen aller GPS-Satelliten zu bestimmen.

Heute ist der IGS eine Organisation mit einem weltweiten Netz von >> 200 GNSS-Stationen, deren Messungen bestmöglich wissenschaftlich genutzt werden.

Der IGS ist heute ein interdisziplinärer Dienst für Geodäsie, Geodynamik, Fundamentalastronomie und für eine viel, viel breitere "Öffentlichkeit".

Entwicklung des IGS



Das IGS Netz wuchs von 1992 bis 2011 von ca 30 auf über 500 Stationen.

Entwicklung des IGS

- **Die Beobachtungen des IGS-Netzes werden (mindestens) täglich den IGS-Datenzentren übermittelt.**
- **Die Stationen des IGS-Netzes übermitteln die Daten mindestens einmal täglich an regionale IGS Datenzentren, diese übermitteln ihre Daten an drei globale Zentren.**
- **Die IGS-Analysezentren holen sich die Daten und werten diese aus.**
- **Das Bundesamt für Landestopographie und das AIUB betreiben in Zimmerwald mehrere GPS- resp. GNSS-Empfänger für IGS und andere Zwecke.**

Entwicklung des IGS

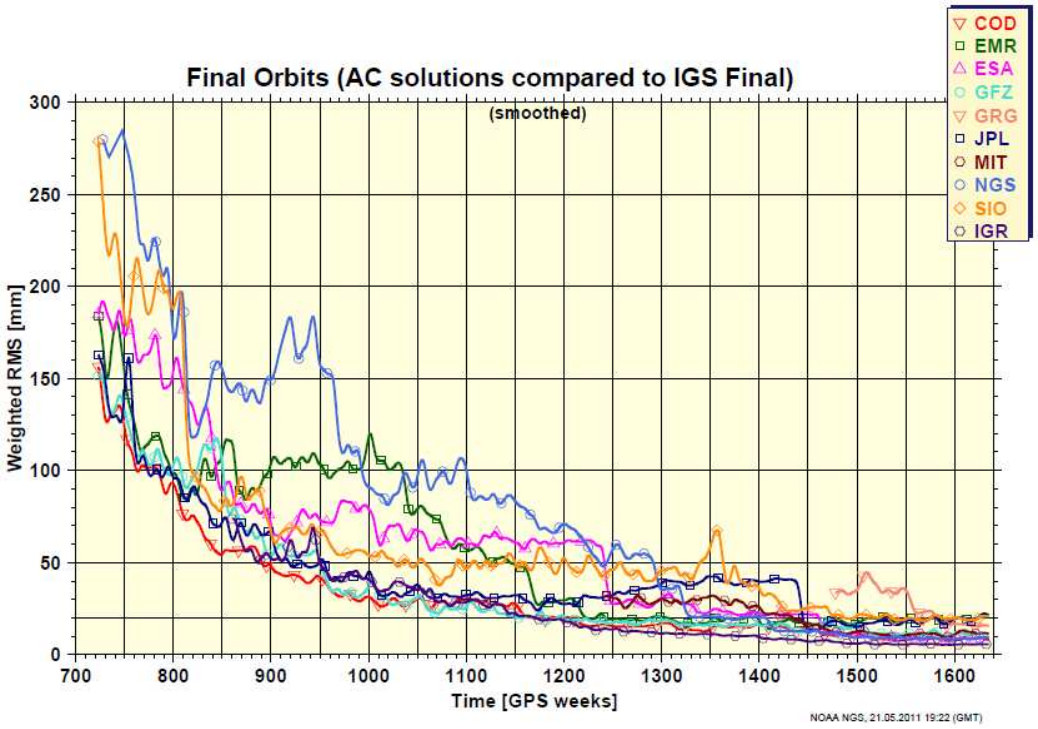
UNIVERSITÄT BERN

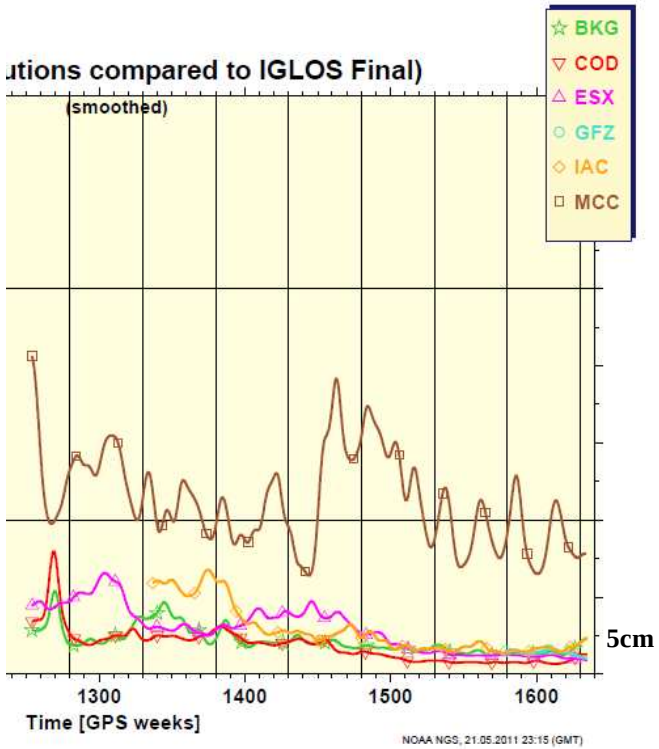
Zusammen mit *swisstopo*, *Bundesamt für Geodäsie und Kartographie* (*BKG*) und dem Institut für Astronomische und Physikalische Geodäsie (IAPG) der TU München betreibt das AIUB das IGS-Analysezentrum *CODE* = *Center for Orbit Determination in Europe.*

CODE produziert täglich

- **Bahnen für sämtliche GPS-Satelliten (cm-genau)**
- **Satellitenuhrkorrekturen (alle 10s, 10psec-genau)**
- **Stationskoordinaten**
- **Polkoordinaten**
- **Ionosphärenmodelle**
- **...**

Entwicklung des IGS

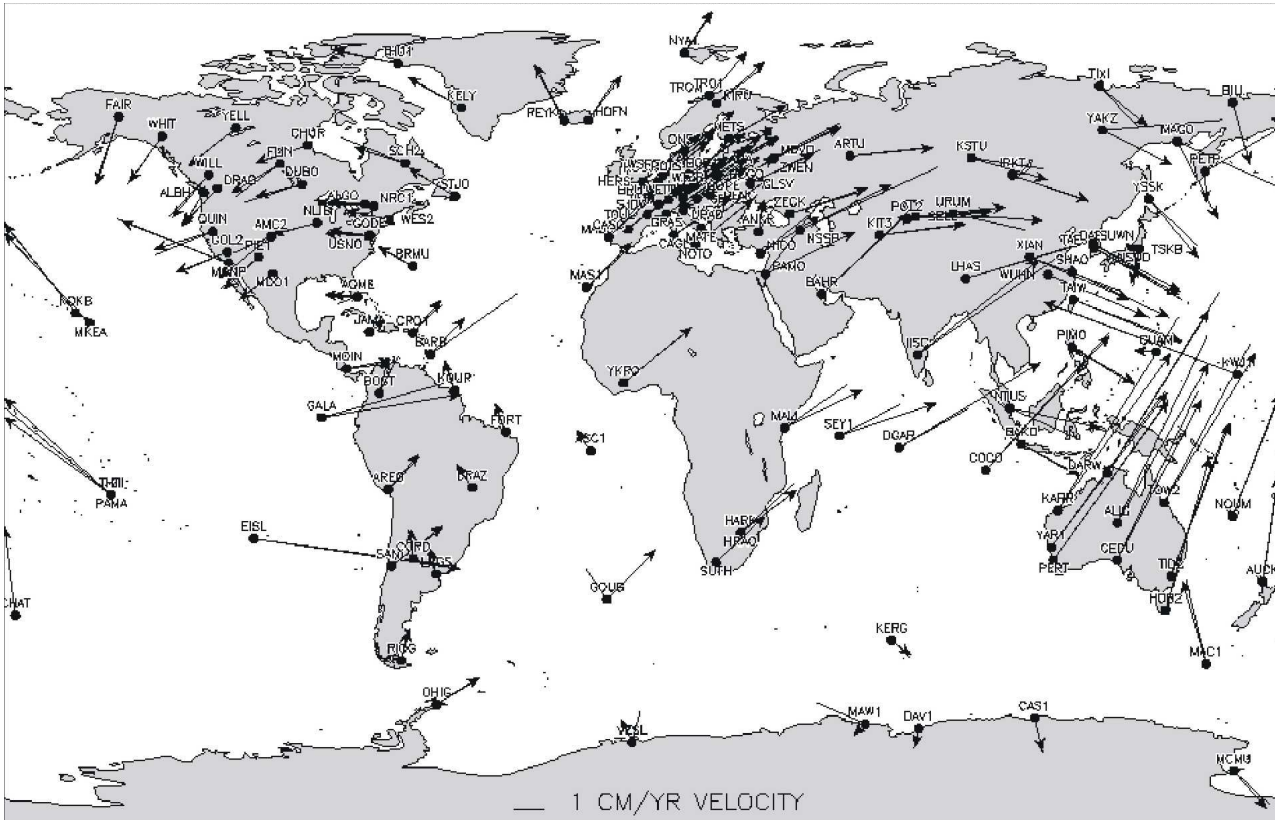




Konsistenz von IGS-Bahnen. GPS (links) and GLONASS (rechts):

Heute liegt die Konsistenz der einzelnen IGS Zentren auf dem 1-2 cm Niveau

Entwicklung des IGS

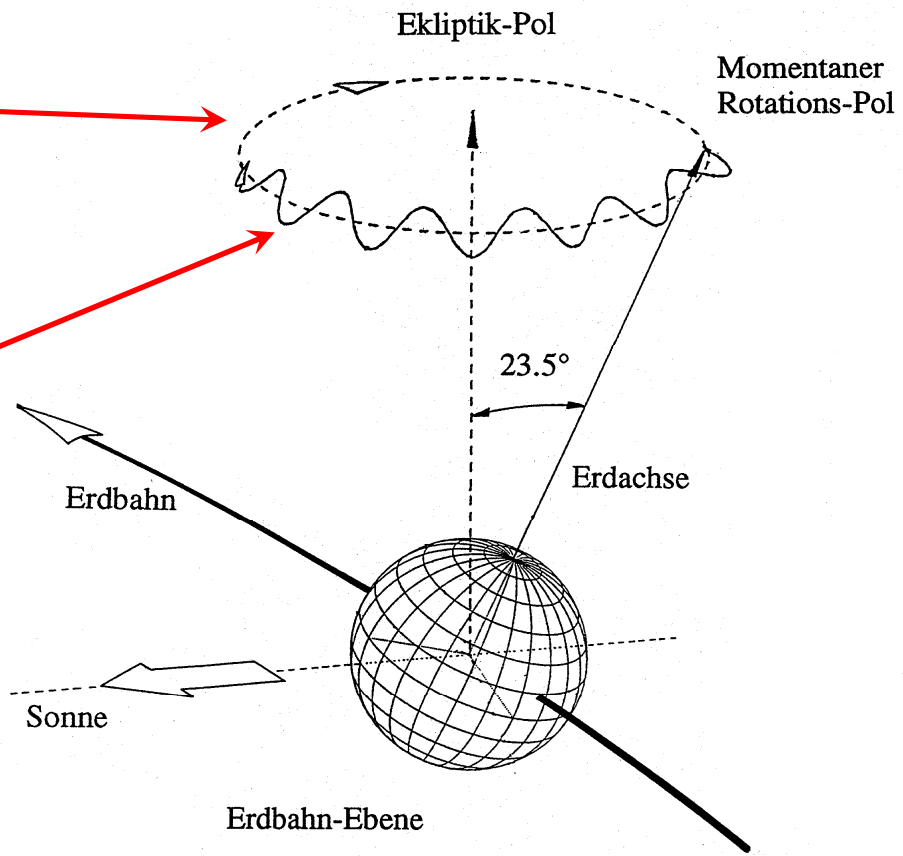


Kontinentalverschiebung, in „Real-Time“ bestimmt.

Entwicklung des IGS

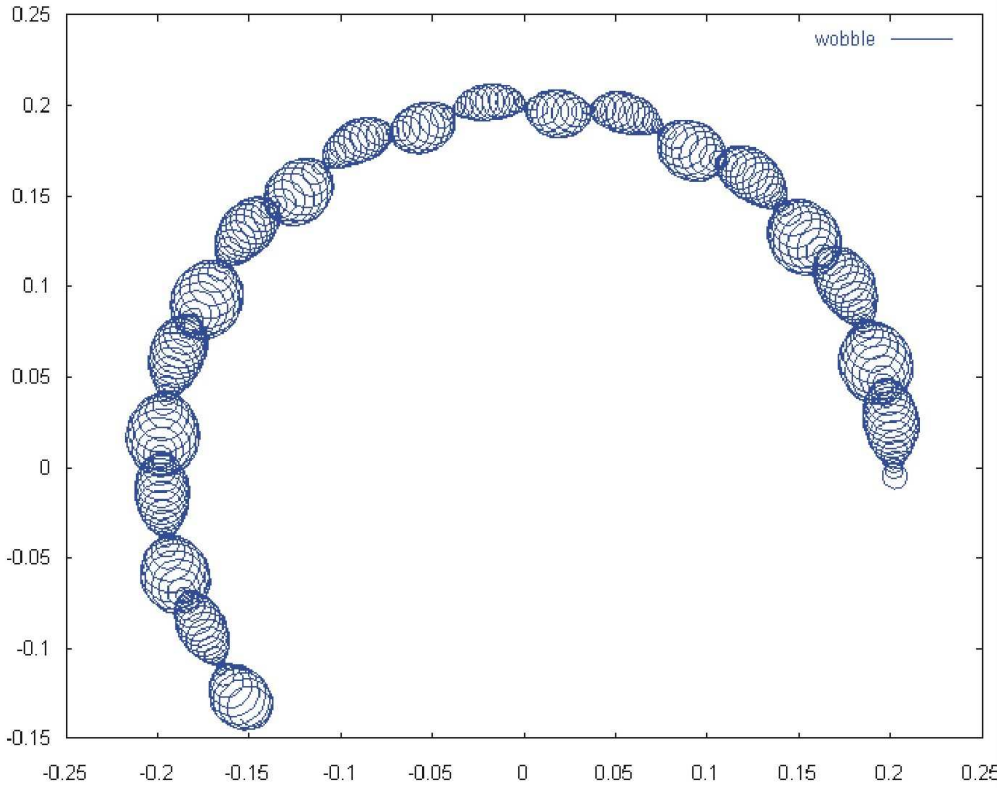
Präzession
Amplitude: 23.5°
Periode: 26‘000 J

Nutation
Amplitude: ca. 9"
Periode: 18.6 J



Die kurzperiodische Nutation ist der quasi-säkularen Präzession überlagert.

Entwicklung des IGS

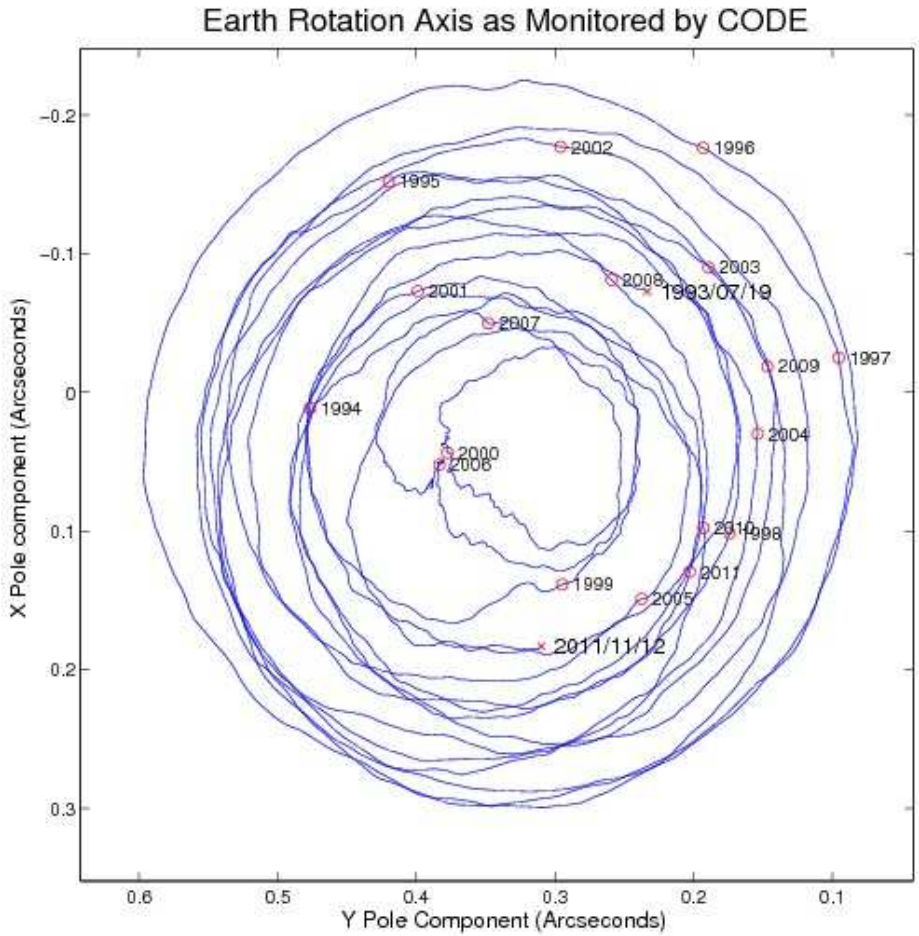


Mit Programm *CelMech* berechnet.

***CelMech* ist dem Werk *Methods of Celestial Mechanics (Springer, 2005)* beigelegt.**

Simulierte Bewegung des Rotationspols über 10 Monate

Entwicklung des IGS



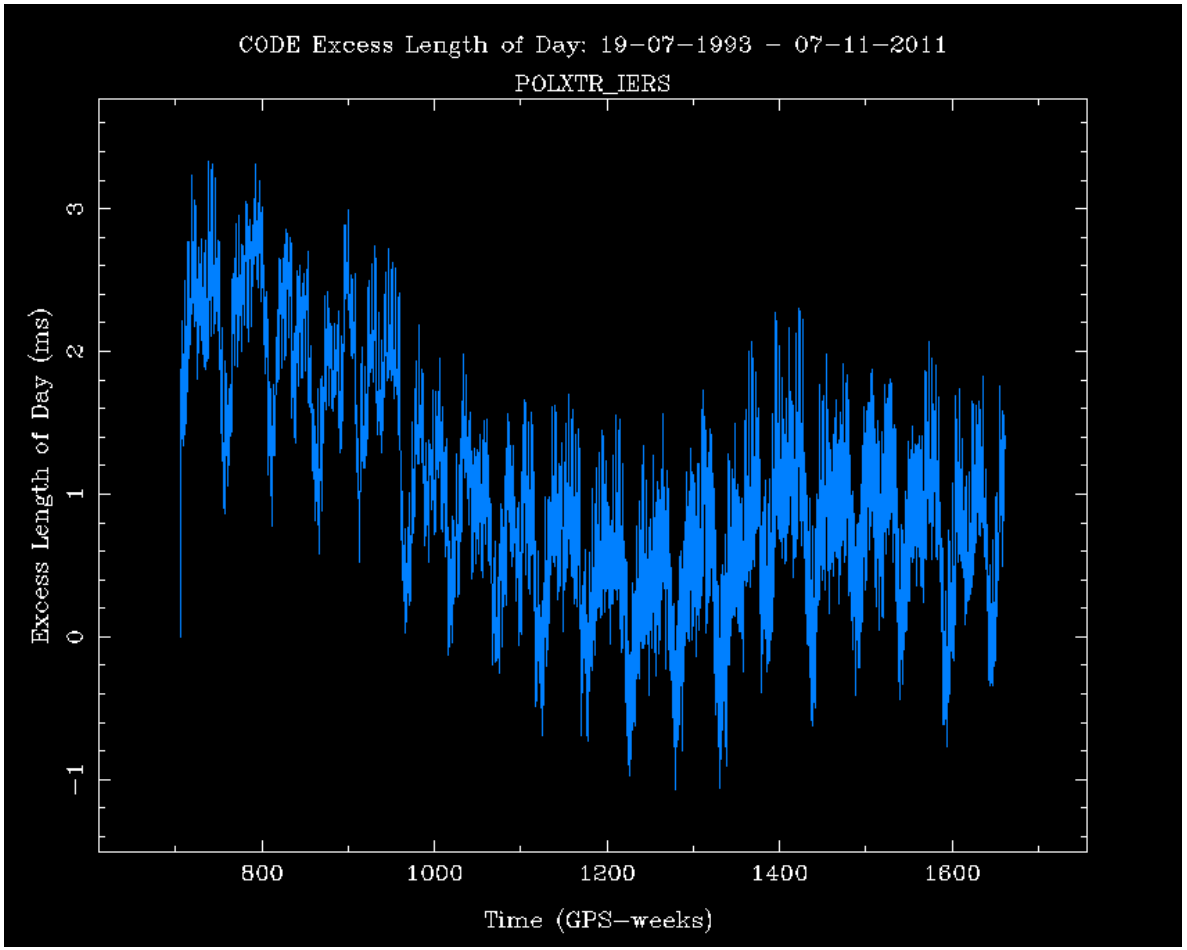
- **Polschwankung 20. Juli 1993 – 12. November 2011**
- **Bestimmt vom IGS-AZ CODE**

Entwicklung des IGS

UNIVERSITÄT BERN

Polbewegung 1993-2009

Entwicklung des IGS



Tageslänge, vom IGS seit 1992 für jeden Tag bestimmt. Entgegen dem generellen Trend hat die Tageslänge in den letzten 20 Jahren (um wenige Millisekunden) abgenommen!

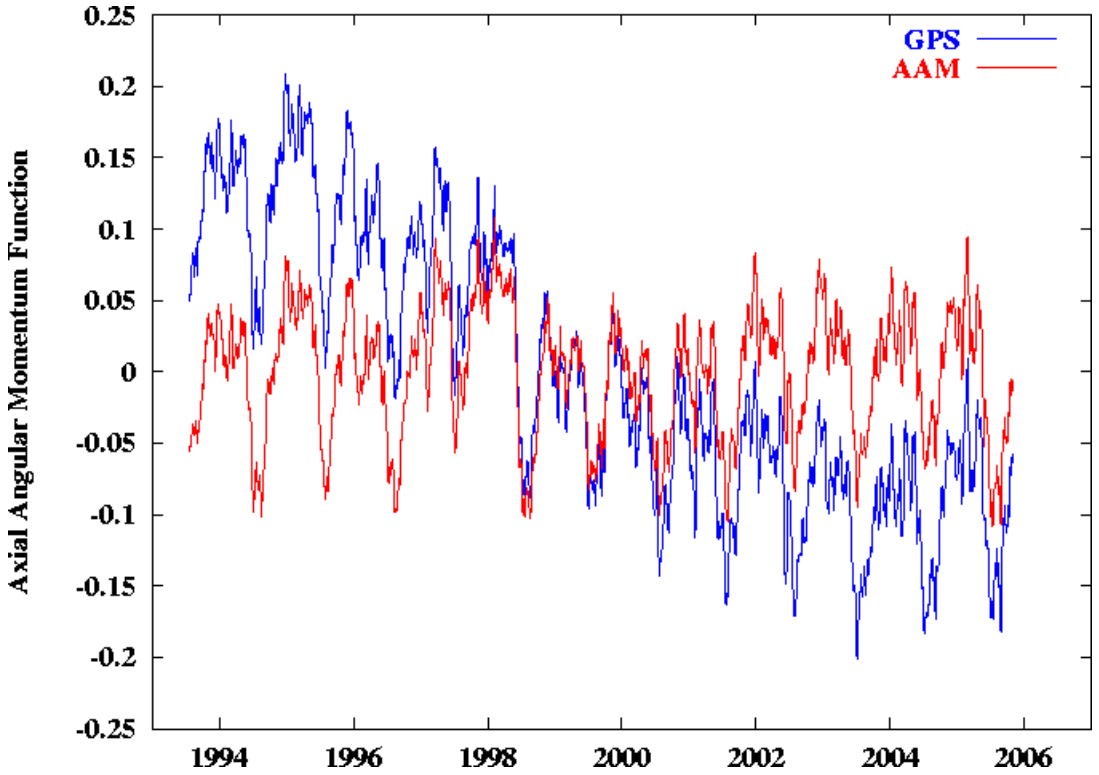
Aus der Tageslänge kann die dritte Komponente des Drehimpulses des Erkörpers berechnet und mit der dritten Komponente des Drehimpulses der Atmosphäre verglichen werden.

Entwicklung des IGS

Die Tageslänge ist proportional den Änderungen (der dritten Komponente) des Drehimpulses der Erde (Proportionalität von Drehimpuls und Winkelgeschwindigkeit)

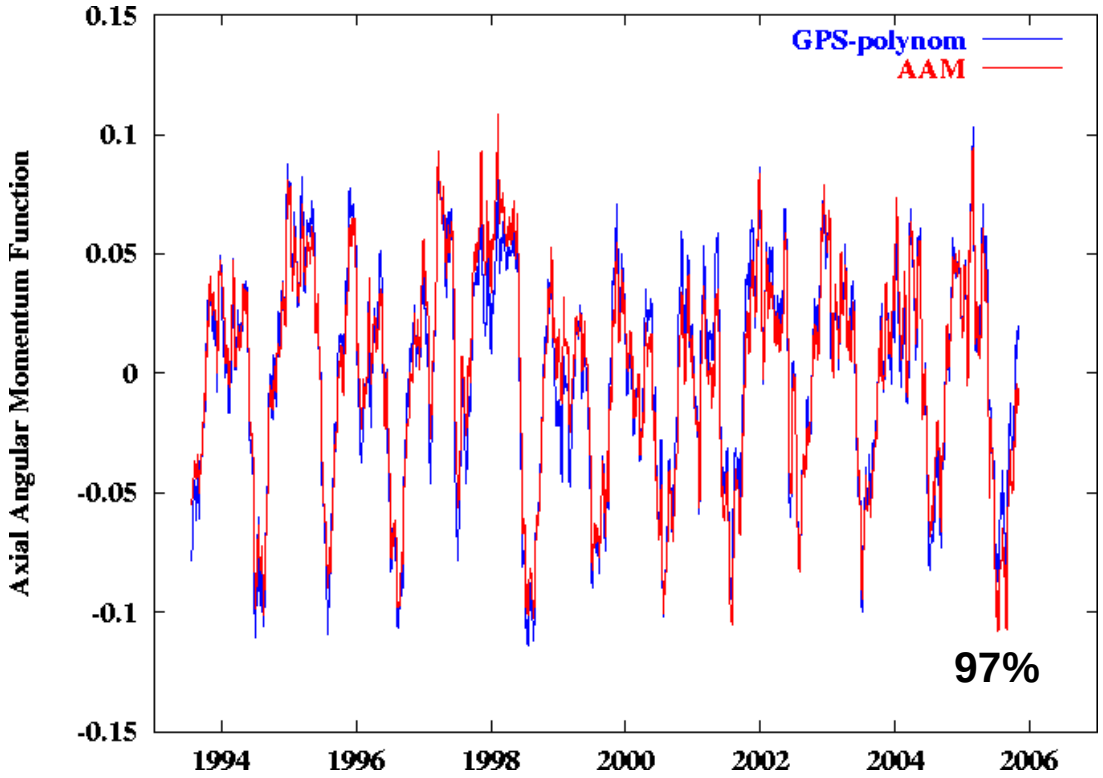
Man kann somit die Tageslängenänderungen umrechnen auf Drehimpulsänderungen und diese vergleichen mit dem Drehimpuls der Atmosphäre.

Entwicklung des IGS



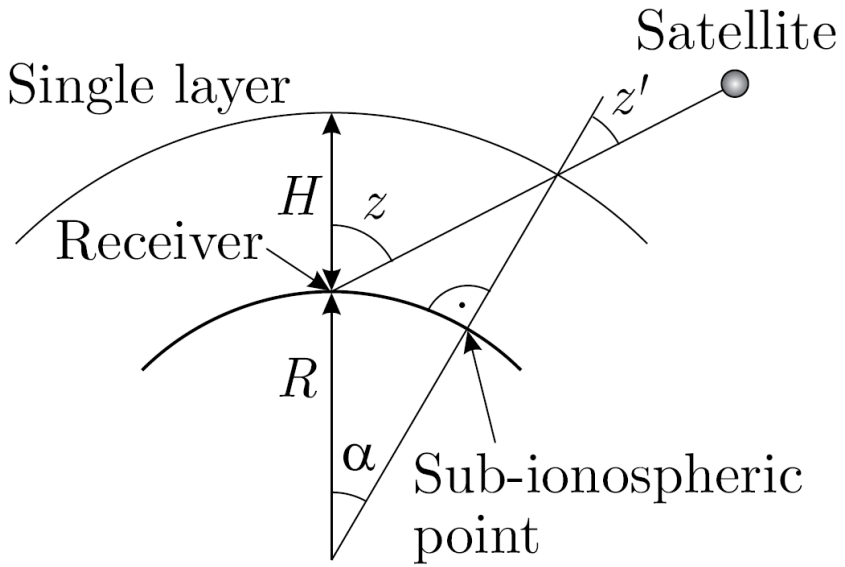
Drehimpulsfunktionen der Atmosphäre und der festen Erde (3. Komponente)

Entwicklung des IGS



Drehimpulsfunktionen der Atmosphäre und der festen Erde (nach Abzug der langperiodischen Effekte).

Entwicklung des IGS



Die Ionosphärenkorrektur ist indirekt proportional dem Quadrat der Frequenz und direkt proportional der Zahl n_e der freien Elektronen zwischen Satellit und Empfänger:

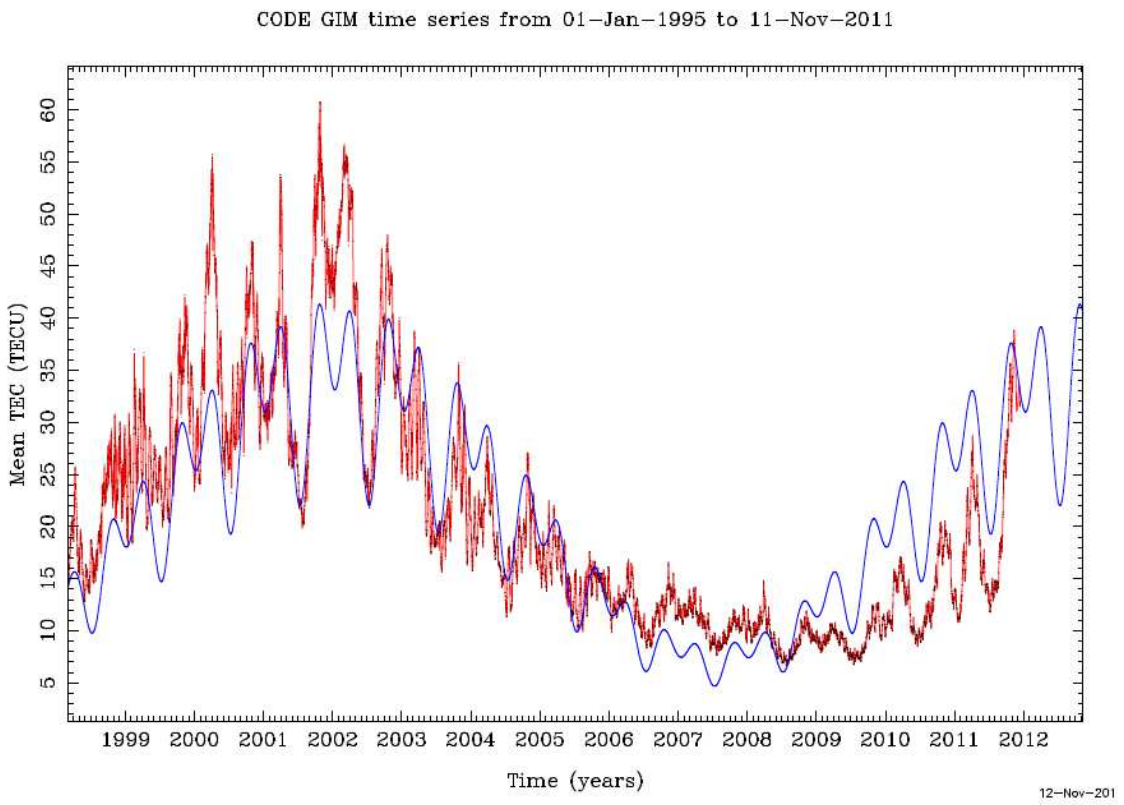
$$\Delta\rho_I = n_e / \nu^2 \quad \text{oder} \quad \Delta\rho_I = n_{e,sl} / (\nu^2 \cos z')$$

Entwicklung des IGS

UNIVERSITÄT BERN

Animierte Globale Ionosphären- Modelle

Entwicklung des IGS



Mittlerer Elektronengehalt (#e/m$^{2)}$: Der 11-jährige Sonnenzyklus, die Rotationsdauer der Sonne sowie (halb)jährliche Variationen sind sichtbar.

Die 1990er Jahre am AIUB

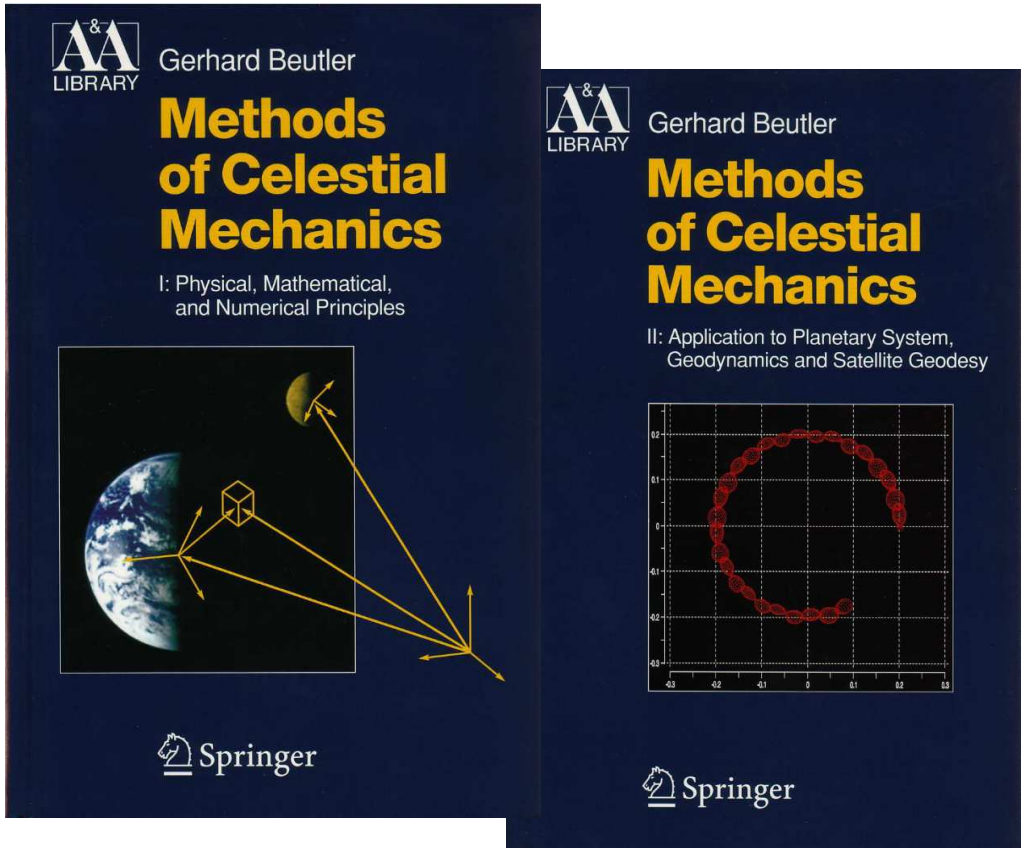
UNIVERSITÄT BERN

- Die Einweihung des 1m-Teleskops ZIMLAT im Jahr 1997 war von fundamentaler Bedeutung für das AIUB.
- Das Teleskop ist für Laser- und CCD-Beobachtungen geeignet.
- Ab diesem Zeitpunkt war Zimmerwald eine der bedeutendsten Stationen des ILRS.
- Dies wurde international dadurch honoriert, dass Werner Gurtner erst Chairman von Eurolas, dann vom ILRS Governing Board war.
- Mit ZIMLAT konnte sich die CCD-Gruppe mit Thomas Schildknecht als Leiter eine Führungsrolle bei der Beobachtung und Katalogisierung von Space Debris erarbeiten.
- Im Bereich CCD resultierte eine fruchtbare Zusammenarbeit mit der ESA, insbesondere mit der ESOC in Darmstadt.

Das Buch

- **Mit meinem Rücktritt als Chairman des IGS Ende 1997 (Nachfolger war Prof. Christoph Reigber, GFZ) kam die Idee auf, einmal im Leben „etwas Sinnvolles“ zu tun.**
- **Es reifte der Beschluss, ein Buch zu schreiben. Der Plan bestand darin**
  - **im Rahmen des ersten „Sabbatical“ etwa 1000 Seiten Vorlesungs-manuskripte im Verhältnis 3:1 zu kondensieren,**
  - **auf Englisch („Bernese English“) zu übersetzen ...**
  - **um ausgeruht, verjüngt und dynamisch die weiteren ca. 10 Jahre im Amt zu bestehen.**
- **Die Berufung von Markus Rothacher (damals Leiter unserer GPS-Gruppe) an die TU München kam dazwischen ➔ Start des Projektes erst im Jahr 2001).**
- **Das Buch-Projekt „franste“ sodann leicht aus → Zwei Bände, ein Programmsystem, 3-4 Jahre Fronarbeit.**

Das Buch



Einfachst-mögliche Darstellung von z.T. komlizierter Materie

Grundgleichungen Planetensystem, Satellitenbewegung, System Erde, Sonne, Mond

Störungsgleichungen

Variationsgleichungen

Numerische Lösung von (linearen) Differentialgleichungen, AWP, RWP

Numerische Quadratur

Bahnbestimmung (AWP, RWP)

Erweiterte Bahnbestimmung

Erdrotation (Liouville-Euler-Gleichungen)

Satellitenbewegung

Entwicklung des Planetensystems

Programmsystem CelMech

Dank an Andreas Verdun und Leos Mervart

Das Buch: Störungsgleichungen

Es sei $I(t) \in \{ a(t), e(t), i(t), \Omega(t), \omega(t) , T_0(t) \}$ **eines der sechs oskulierenden Bahnelemente.**

Gemäss der Definition der oskulierenden Bahnelemente darf man sie wie folgt als Funktion der Zeit schreiben (man beachte, dass keine explizite Zeitabhängigkeit vorliegt):

$$I(t) \stackrel{\text{def}}{=} I\left(\boldsymbol{r}(t), \dot{\boldsymbol{r}}(t)\right)$$

Um direkt die zeitliche Entwicklung von $I(t)$ **zu studieren, differenzieren wir diese Beziehung nach der Zeit** t**:**

$$\dot{I} = \sum_{l=1}^{3} \left\{ \frac{\partial I}{\partial r_l}\, \dot{r}_l + \frac{\partial I}{\partial \dot{r}_l}\, \ddot{r}_l \right\} = \nabla_r I \cdot \dot{\boldsymbol{r}} \; + \; \nabla_v I \cdot \ddot{\boldsymbol{r}}$$

Die zweite Ableitung auf der rechten Seite darf mit Hilfe der Störungsgleichungen (in kartesischen Koordinaten) wie folgt ersetzen:

$$\dot{I} = \nabla_r I \cdot \dot{\boldsymbol{r}} \; + \; \nabla_v I \cdot \left\{ -\mu\, \frac{\boldsymbol{r}}{r^3} + \delta \boldsymbol{f} \right\} = \nabla_v I \cdot \delta \boldsymbol{f}$$

Das Buch

UNIVERSITÄT BERN

- **Das Buch-Projekt hat sowohl mir, als auch dem Institut sehr viel gebracht (Selbsteinschätzung!).**
  - **Der Versuch, die gesamte Himmelsmechanik des erdnahen Raumes und unseres Planetensystems theoretisch einigermassen einheitlich und elementar darzustellen, war für mich eine wissenschaftliche Verjüngungskur – hat leider nur geistig geklappt(!).**
  - **Das Buch hat mir gezeigt, wie unvollkommen wir eigentlich unsere Monitor-Aufgaben des Planeten Erde – gerade im Bereich Erdrotation – wahrnehmen (z.T. rein empirische Modellierung, unbefriedigende Nutzung der Gesetze der Dynamik).**
  - **Das Buch hat einige AIUB-Projekte stimuliert (im Bereich Bahnbestimmung von NEOs, Space Debris, Arbeiten im Bereich der empirischen Bahn-Modellierung, erste Arbeiten zur Bestimmung des Gravitationsfeldes der Erde „in himmelsmechanischer Tradition“).**
  - **Das Buch hat mich motiviert, Teile des Instituts in die Richtung „Bahnbestimmung von LEOs + Gravitationsfeldbestimmung einzuspuren“ ...**

Institute for Advanced Study (IAS)

UNIVERSITÄT BERN

Im Rahmen des IAS der Technischen Universität München konnten

- **Adrian Jäggi als Carl von Linde Junior Fellow (=junger Kerl)**
- **ich als Hans Fischer Senior Fellow (=alter Kerl)**
- **mit Reiner Rummel (auch er als „alter Kerl“)**

während mehr als drei Jahren als Gäste in München unbeschwert zusammenarbeiten und forschen. Adrian und ich haben in drei Kalender-Jahren insgesamt je ein Jahr in München gelebt.

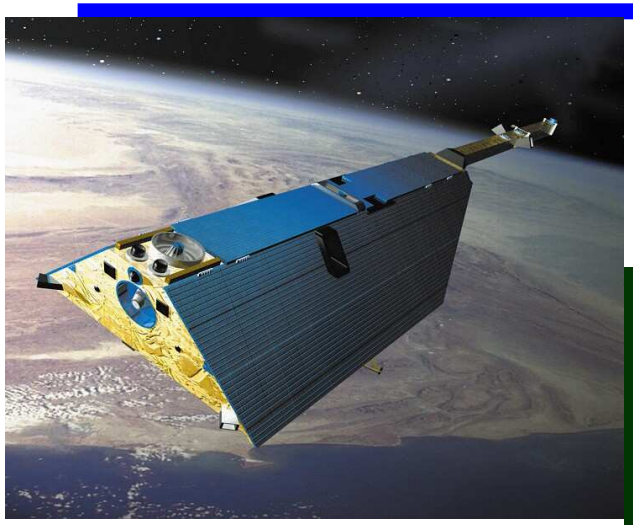
Mich hat das Projekt vor verfrühten Altersdepressionen bewahrt.

Das Projekt wurde grosszügig unterstützt vom IAS:

- **Sämtliche Spesen (Reise + Aufenthalt) wurden übernommen**
- **1.5 Postdoc-Stellen wurden für mehr als drei Jahre finanziert**
- **Infrastrukur-Beiträge für Computer an der TUM waren eingeschlossen.**

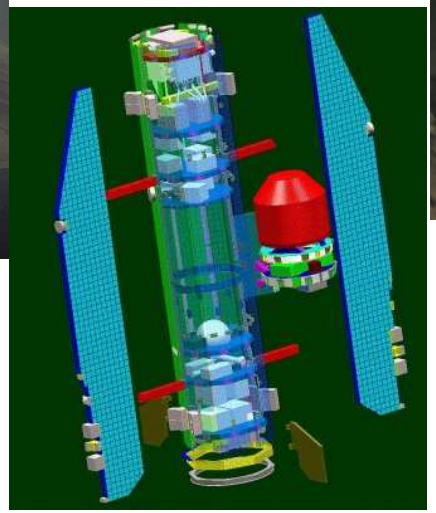
Zusammen mit dem NF-Projekt „Gravitationsfeldbestimmung“ und der Beteiligung am GOCE/HPF Projekt ergab dies eine respektable, effiziente und administrativ inexistente Arbeitsgruppe.

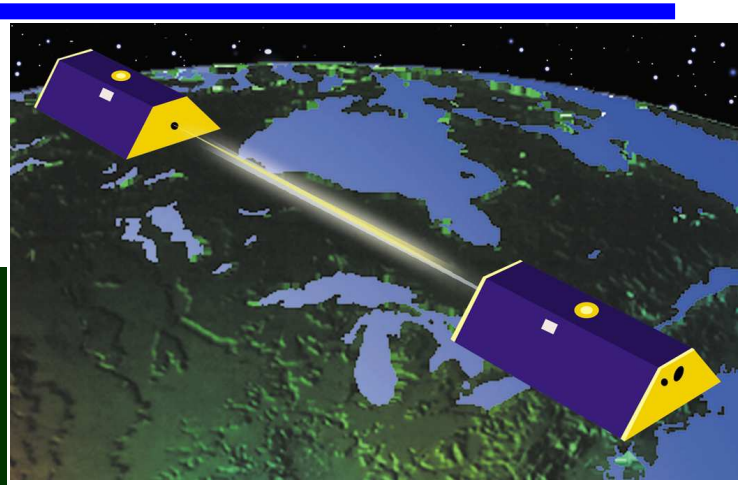
Gravitationsfeldbestimmung



CHAMP

GOCE





GRACE A and B

Das goldene Zeitalter der Gravitationsfeldbestimmung begann mit dem Start von CHAMP in Juli 2000. GRACE wurde 2002 in Umlauf gebracht u.A. um die zeitliche Variation des Gravitationsfeldes der Erde zu bestim-men. GOCE wird 2009 mit einem dreidimensionalen Gradiometer gestartet.

Der *Celestial Mechanics Approach*

… wurde/wird am AIUB entwickelt

… wird verwendet um ganze Ensembles von Bahnen und Gravitationsfeldern zu erzeugen, wobei

- die Physik einzig durch die Gesetze der Himmelsmechanik beschrieben wird

- und die Effizienz durch die Möglichkeiten moderner numeri-scher Analyse limitiert sind.

Differentialgleichung einer Satellitenbahn:

$$\ddot{r} = f(r, \dot{r}, V(r), \ldots)$$

Gravitationsfeldbestimmung

$$V(r,\lambda,\phi) = \frac{GM}{r}\sum_{i=0}^{\infty}\left(\frac{a}{r}\right)^i \sum_{k=0}^{i} P_i^k(\sin\phi)\left\{ C_{ik}\cos k\lambda + S_{ik}\sin k\lambda \right\}$$

$$N(\phi,\lambda) = a \sum_{i=2}^{\infty}\sum_{k=0}^{i} P_i^k(\sin\phi)\left\{ C_{ik}\cos k\lambda + S_{ik}\sin k\lambda \right\}$$

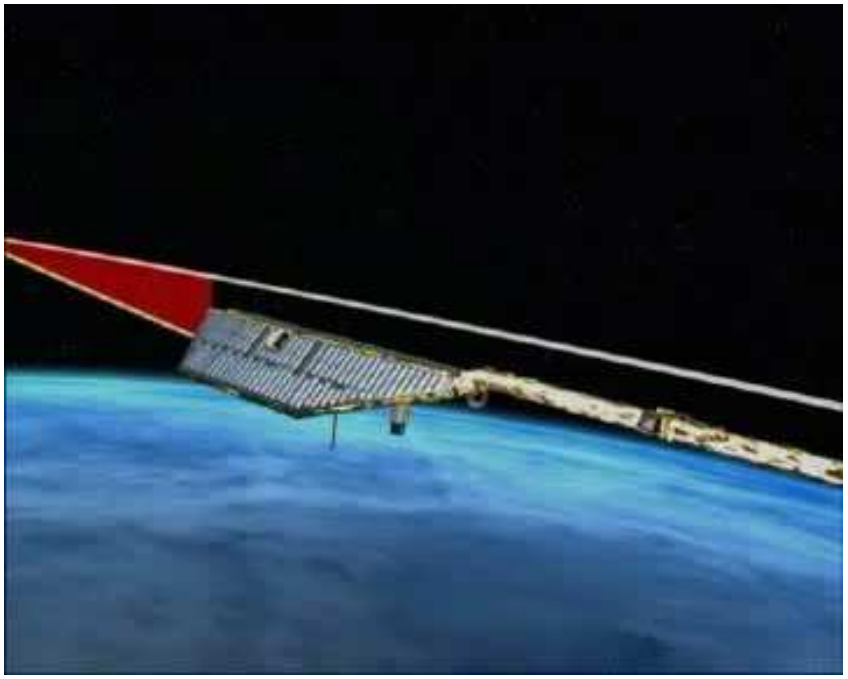
$$\Delta g(\phi,\lambda) = \gamma \sum_{i=2}^{\infty}(i-1)\sum_{k=0}^{i} P_i^k(\sin\phi)\left\{ C_{ik}\cos k\lambda + S_{ik}\sin k\lambda \right\}$$

Das Gravitationspotential V der Erde nach Kugelfunktionen entwickelt (*r* = geoz. Distanz, ϕ = Breite, λ = Länge).

Aus *V* berechnet man die Geoidhöhe *N* in *m* über dem Ellipsoid. Das Geoid ist eine Äquipotentialfläche in der Nähe der Meeresoberflächen.

Gravitationsanomlien Δg sind die Differenzen zwischen der aus *V* berechneten Gravitationsbeschleunigung und der einer homogenen ellipsoidischen Erde.

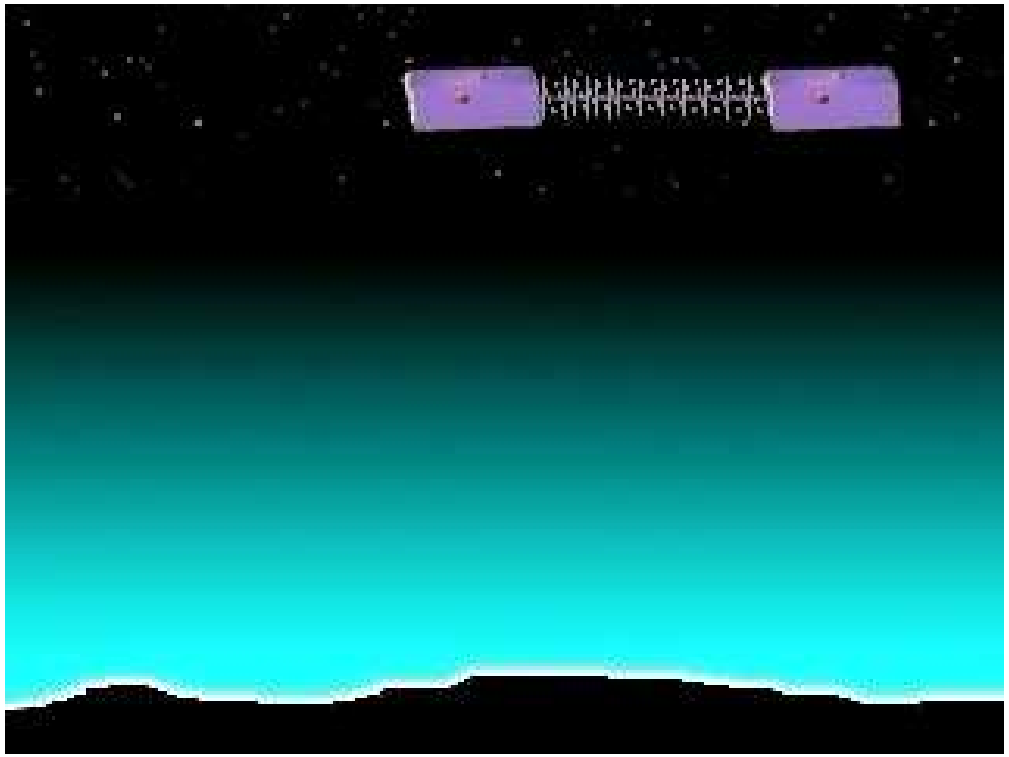
... mit Satellitenbahnen



CHAMP in Orbit

- **CHAMP hatte einen GPS-Empfänger an Bord, mit dem die Positionen rein kinematisch (wie bei einem Fahrrad, Mercedes) -- aber cm-genau bestimmt werden.**
- **Die Positionen werden interpretiert als Messungen einer GPS-Bahn, die ihrerseits vom Gravitationsfeld des Satelliten abhängt.**
- **Das Gravitationspotential wird nach Kugelfunktionen entwickelt. Etwa 10'000 Parameter können resp. müssen bestimmt werden.**
- **Lars Prange hat im Rahmen seiner Dissertation das genaueste "CHAMP-only" Gravitationsfeld aus allen verfügbaren Daten bestimmt.**
- **CHAMP verglühte wenige Tage vor dem Diss-Vortrag von Lars im Herbst 2010! (wahrscheinlich spürte CHAMP, dass er nicht mehr gebraucht wurde).**

Zwischensatellitenmessungen



Die Entfernung zwischen den GRACE-A und -B wird mittels Mikrowellen (K-Band Link) kontinuierlich mit einer stupenden Genauigkeit von wenigen Mikro-metern vermessen!

Gleichzeitig werden die Satellitenpositionen mit GPS (wie bei CHAMP) mit cm-Genauigkeit bestimmt.

Registriert wird „im Wesentlichen“ die Distanzänderung der Satelliten infolge der Massen „unter“ den Satelliten

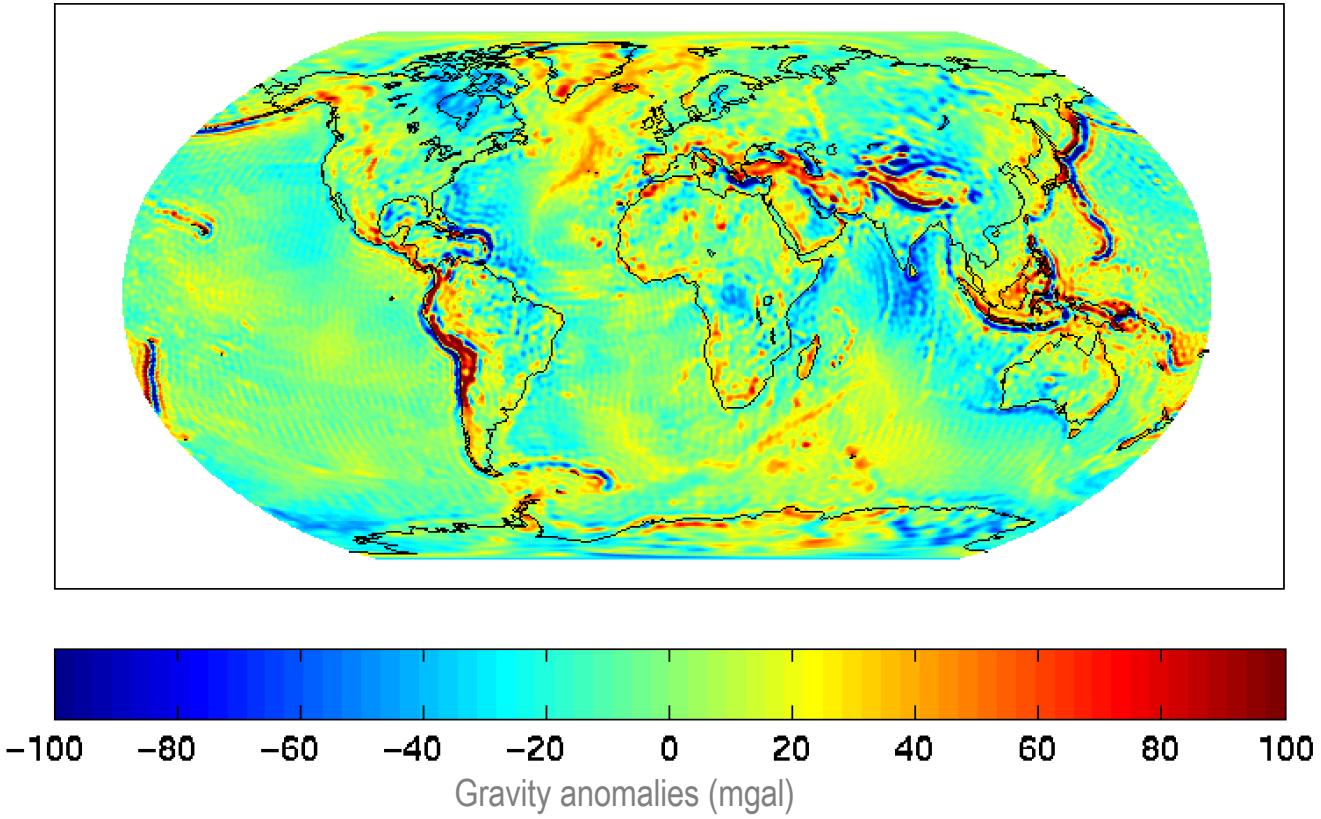
Die 3-d Position beider Satelliten wird mittels GPS mit einer Genauigkeit weniger cm bestimmt.

Die Kombination GPS / K-Band ist eine Herausforderung!

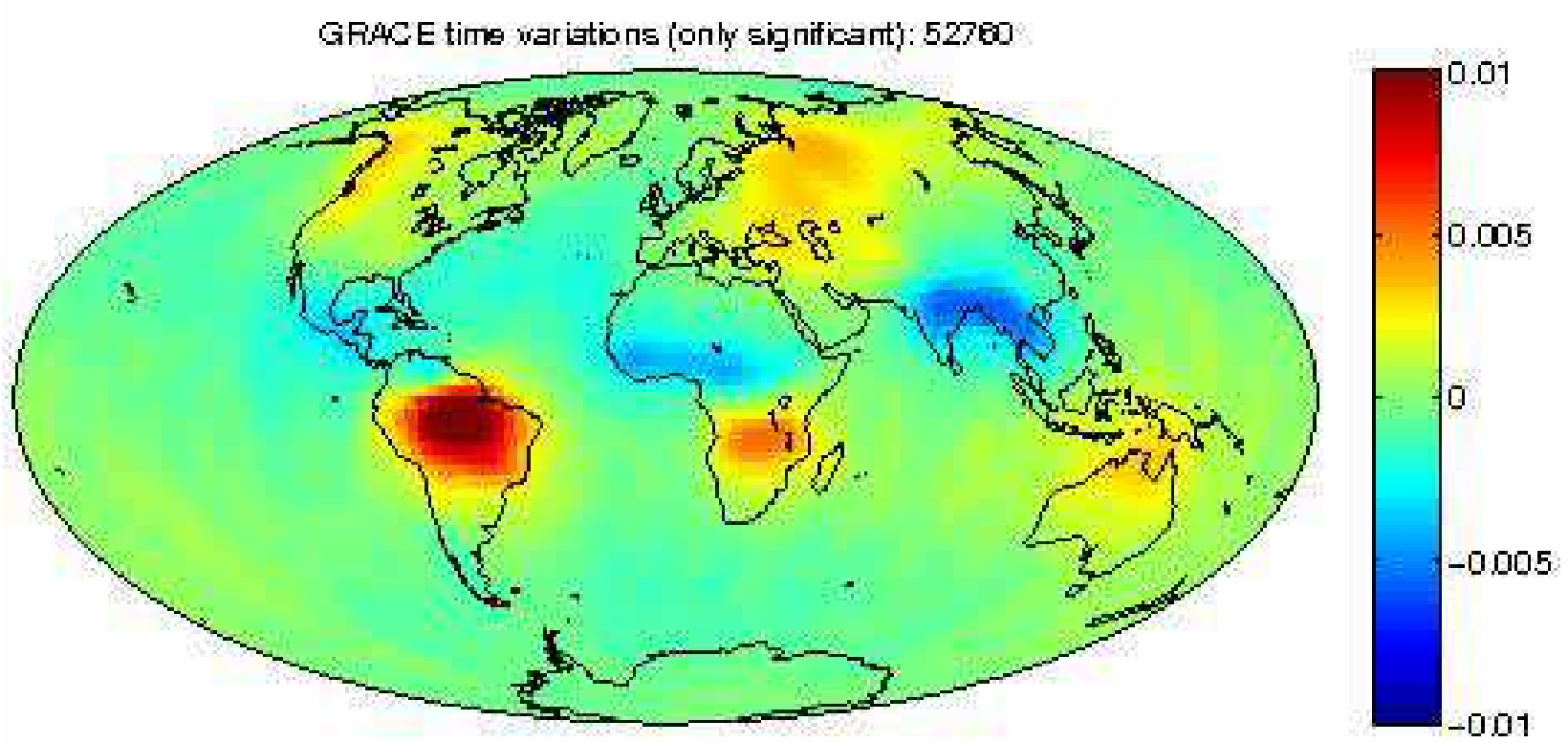
GRACE Lösungen

UNIVERSITÄT BERN

AIUB-GRACE03Sp: 4 Jahre GRACE GPS & K-Band Daten (n = 160)

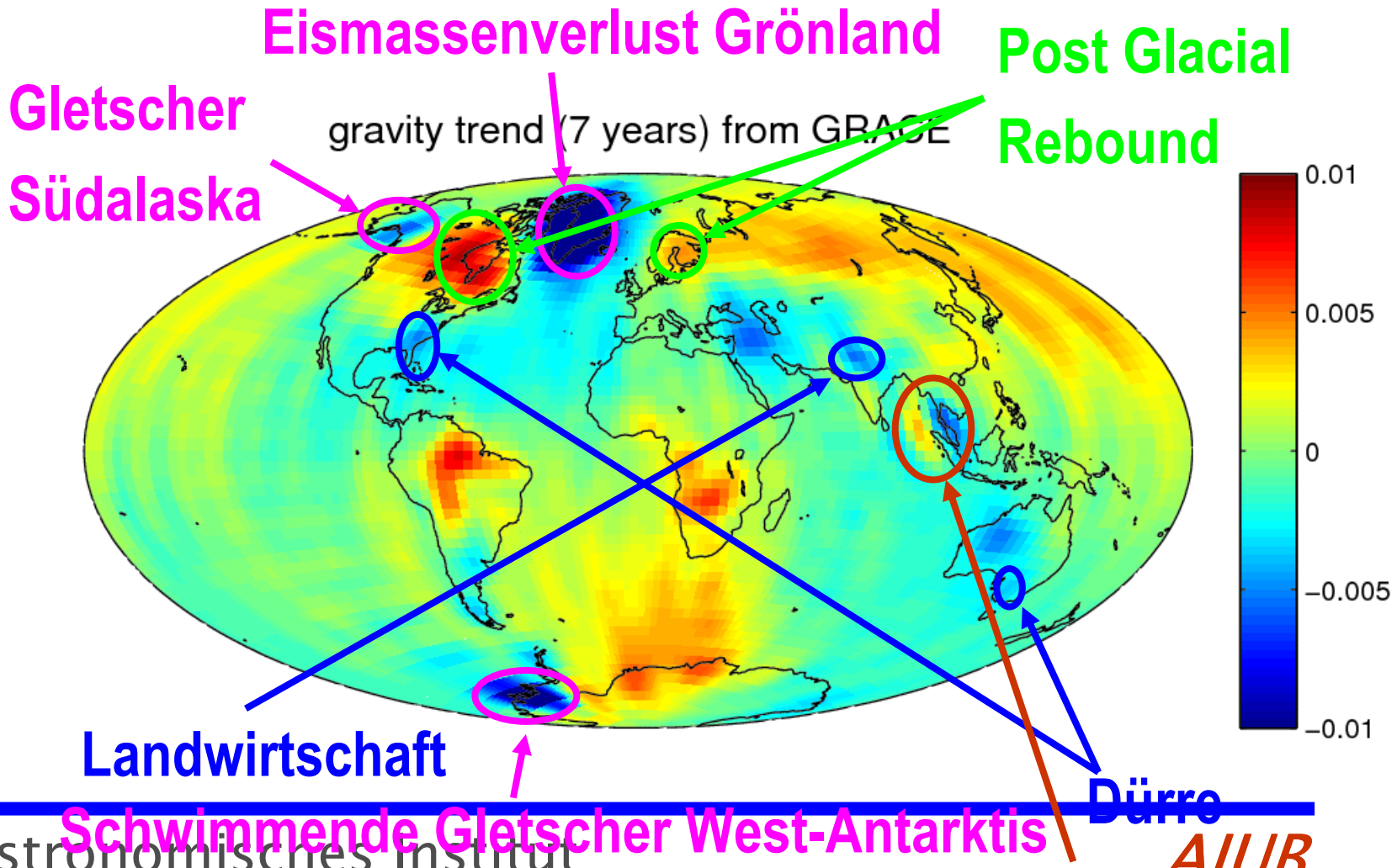


Zeitliche Änderungen des Gravitationsfeldes

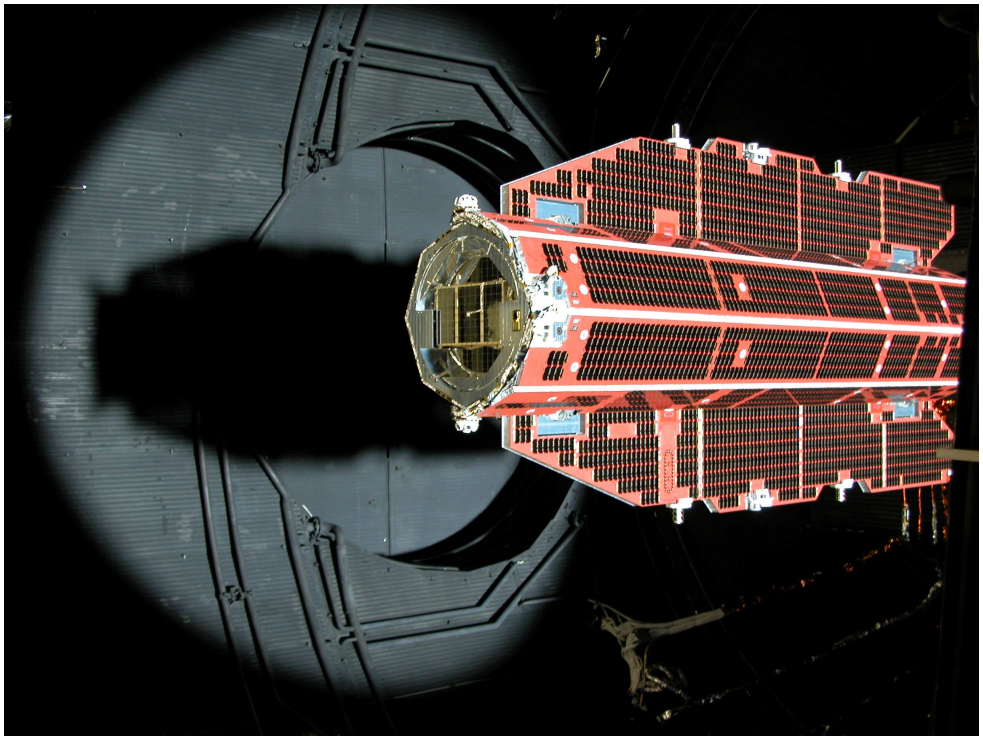


Analyse über sieben Jahre (2003-2009) am AIUB. Artikel von Uli Meyer et al.

Säkulare Zeitvariationen (bis 30, signifikant)



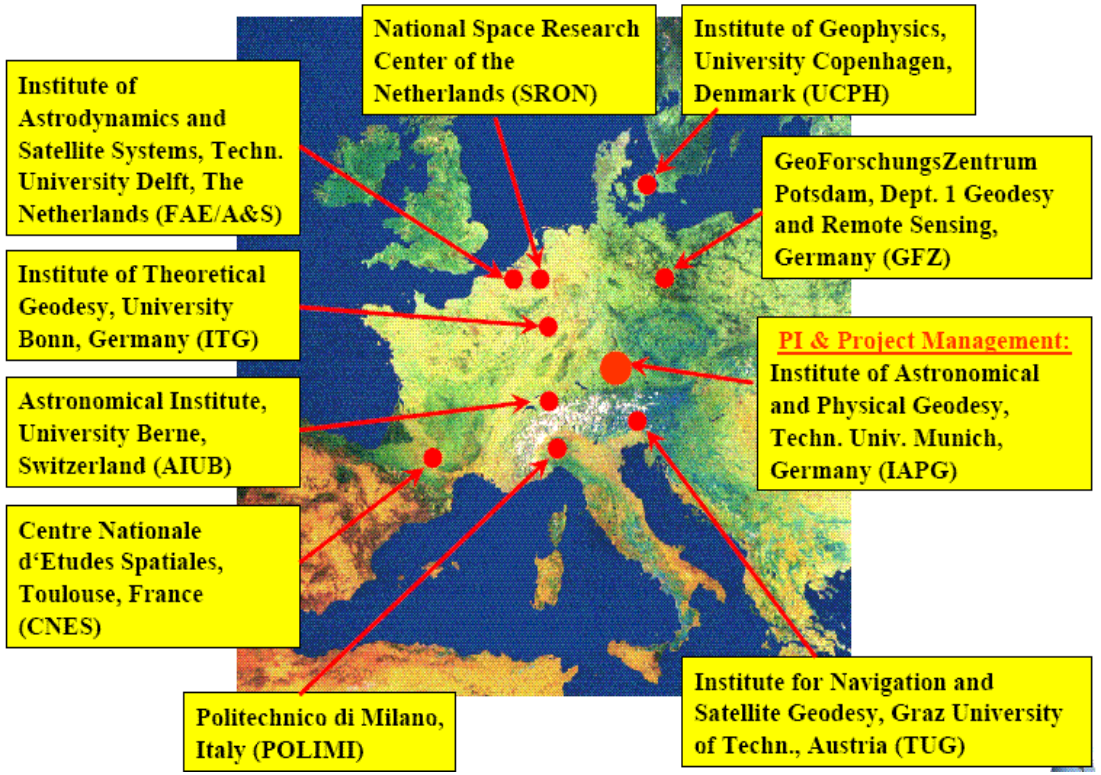
Gravitationsfeldbestimmung



Der GOCE-Satellit der ESA (Start am 17. März 2009) ist mit einem europäischen GPS-Empfänger und einem Gradiometer (sechs dreiachsigen Beschleunigungsmessern) ausgestattet.

Das AIUB erzeugt den Precise Science Orbit (Heike Bock, Adrian Jäggi, Ulrich Meyer).

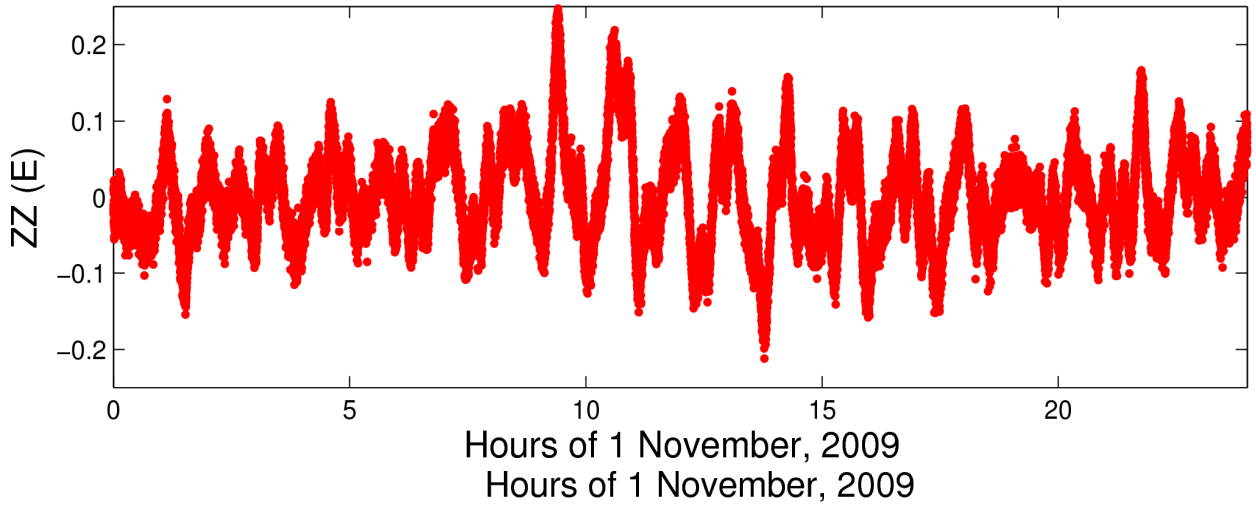
GOCE-HPF



GOCE-HPF (High-level Processing Facility): Eine gelungene europäische Zusammenarbeit.

Erweiterung des CMA auf GOCE

Wir verwenden parametrische Techniken zur Beschreibung der Gradiometer-Charakteristiken.



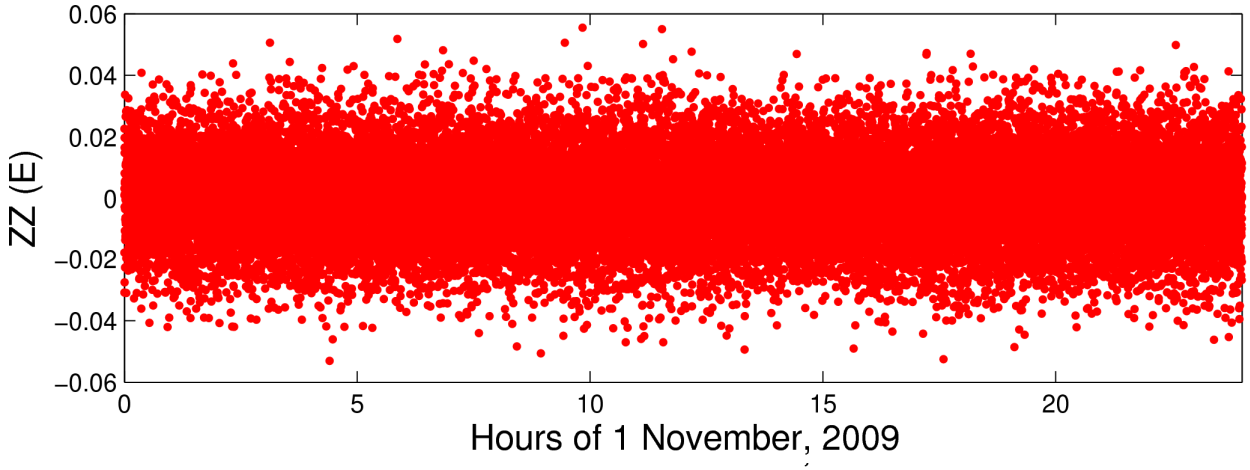
Hours of 1 November, 2009

Die folgenden Parameter werden aufgesetzt (zusätzlich zu den Parametern des Gravitationsfeldes)

- **Offset und Drift pro Tag**
- **Once-, Twice-, and Three-times-per-rev- (-day) Parameters pro Tag**

Erweiterung des CMA auf GOCE

Zusätzlich wird jede Gradiometer-Zeitreihe durch eine stückweise stetige und lineare Funktion mit dem Knotenabstand einer Minute dargestellt



Praktisch alle Signale ausserhalb der eigentlichen Gradiometer-Bandbreite werden durch diese Parametrisierung erfasst.

Der Zugang ist originell und von der Qualität her konkurrenzfähig!

UNIVERSITÄT BERN

Bahn- und Gravitationsfeldbestimmung mit dem "Celestial Mechanics Approach" am AIUB

Das Team 2007-2011 (SNF/IAS TU München, HPF GOCE):

A. Jäggi, U. Meyer, H. Bock, L. Prange, G. Beutler

Publikationen:

http://www.aiub.unibe.ch/content/research/gnss/publications

Schlusswort?

1990	**Diss.**	E. Frei	Rapid Static Positioning With the GPS
1991		M. Rothacher	Orbitography of Satellite Systems
1992		U. Wild	Ionosphere Modeling Using the IGS
1993		T. Schildknecht	CCD Astrometry
1994		L. Mervart	Ambiguity Resolution
1995		E. Brockmann	Combination of GPS Solutions
1997		U. Hugentobler	Applications of CCD Astrometry
1997		A. Verdun	CCD Algorithms for Astrometry
1999		S. Schaer	Ionosphere Modeling Using the GPS
1999		T. Springer	GPS Orbit Modeling and Time Transfer
1999		H. Habrich	GLONASS Processing Strategies
2003		H. Bock	Efficient LEO Orbits Determination
2006		R. Musci	Identification and Recovery of GEO and GTO
2006		A. Jäggi	Pseudo-Stochastic Modelling of LEO Orbits
2008		C. Flohrer	Validation of Satellite-Geodetic Techniques
2010*		L. Prange	Gravity Field Determination Using CHAMP
2011*		M. Meindl	Multi GNSS Analysis
2011*		C. Früh	Astrometric Image Processing
2011*		T. Flohrer	Observation Scenarios for Space Surveillance
2012*		J. Herzog	Cataloguing High-Altitude Objects
2012*		L. Ostini	Space-Geodetic Time Series
1998	**Habil.**	M. Rothacher	Contribution of GPS to Earth Sciences
2004		T. Schildknecht	The Search for Space Debris in High-Altitude Orbits
2010*		A. Verdun^{+}	Die Arbeiten Eulers in der Himmelsmechanik
2011*		R. Dach	Kombination von allen GNSS in der Analyse

Ich habe längst nicht jede Dissertation selber betreut.

Ich habe aber jede Arbeit kritisch gelesen und mit den Doktorandinnen und Doktoranden ausgiebig besprochen.

Dies war/ist eine sehr zeitaufwendige, aber auch eine sehr schöne und (hoffentlich gegenseitig) inspirierende Aufgabe.

Sie hat m.E. sehr zum Zusammenhalt im Institut beigetragen.

Für mich war es eine Ehre und ein Privileg, das AIUB zwanzigeinhalb Jahre leiten zu dürfen!