

Wissenschaftliches Kolloquium

der
Bayerischen Kommission für die Internationale Erdmessung (BEK), München

am
Freitag, 28.11.2003, 14.30 h

in der
Bayerischen Akademie der Wissenschaften
Marstallplatz 8, 80539 München

Kurzfassungen der Vorträge





Professor Rudolf Sigl
1928 - 1998

Vortragsprogramm

- 14.30 h Univ.-Prof.Dr.-Ing. Reiner Rummel, Vorsitzender der Kommission und Lehrstuhl für Astronomische und Physikalische Geodäsie der Technischen Universität München
Rudolf Sigl und die Bayerische Kommission für die Internationale Erdmessung
- 15.00 h em. Univ.-Prof. Dr.rer.nat. Dr. E.h. Josef Stoer, Lehrstuhl für Angewandte Mathematik II der Universität Würzburg
Neuere Verfahren der numerischen Mathematik
- 15.30 h Univ.-Prof. Dr. Hans-Peter Bunge,
Institut für Allgemeine und Angewandte Geophysik, Ludwig-Maximilians-Universität München
Eine Reise zum Erdmittelpunkt und zurück: Neue Einsichten zur dynamischen Erdentwicklung durch komplexe Geosimulationen
- 16.00 h Pause
- 16.30 h Univ.-Prof. Dr.phil.nat. Markus Rothacher, Forschungseinrichtung Satellitengeodäsie der Technischen Universität München
Variationen der Erdrotation: von Stunden zu Jahrhunderten
- 17.00 h Dr.-Ing. Christof Völksen, BEK
Aktuelle Arbeiten der BEK als lokales Analysezentrum im Rahmen des EUREF Permanent Network (EPN)
- 17.15 h Dr.-Ing. Gerd Boedecker, BEK
Der Beitrag der BEK zur Fluggravimetrie: Entwicklung des StrapDown Airborne Gravimetry System (SAGS4)

Professor *Rudolf Sigl* verstarb vor fünf Jahren, im Jahr 1998. Er wäre heuer 75 Jahre geworden. Die Bayerische Kommission für die Internationale Erdmessung (BEK), deren Ständiger Sekretär und Vorsitzender er von 1976 bis zu seinem Tode war, nimmt dies zum Anlass, sich mit einem Kolloquium des großen Beitrags Rudolf Sigls zu den Arbeiten der BEK dankbar zu erinnern.

Seit Gründung der Kommission waren ihre Arbeiten inspiriert durch die Entwicklungen in Astronomie, Mathematik und Geophysik. Diese und die aktuellen Arbeiten der Kommission sind Gegenstand des Kolloquiums.

Das Kolloquium wird unterstützt durch die Deutsche Geodätische Kommission und die Studiengänge für Geodäsie und Geoinformation der Technischen Universität München und der Universität der Bundeswehr München

Rudolf Sigl und die Bayerische Kommission für die Internationale Erdmessung

Reiner Rummel

Vorsitzender der Bayerischen Kommission für die Internationale Erdmessung,
Lehrstuhl für Astronomische und Physikalische Geodäsie der TU München

Professor Rudolf Sigl verstarb vor fünf Jahren, im Jahr 1998. Er hätte heuer seinen 75. Geburtstag gefeiert. Sein wissenschaftliches Werk war eng mit der Bayerischen Kommission für die Internationale Erdmessung (BEK) verbunden. Von 1956 bis 1960 war er Oberkonservator der BEK, später Kommissionsmitglied und schließlich von 1976 bis zu seinem Tode ständiger Sekretär bzw. Kommissionsvorsitzender. Somit konnte Rudolf Sigl die Weichenstellungen des wissenschaftlichen Programms der Kommission über viele Jahre entscheidend beeinflussen. Für sein wissenschaftliches Werk wurden Rudolf Sigl viele Auszeichnungen zuteil. Er war unter anderem Mitglied der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, der Österreichischen Akademie der Wissenschaften und der Academia Scientiarum et Artium Europea, Träger der Levallois Medaille, der höchsten Auszeichnung der Internationalen Assoziation für Geodäsie und Ehrendoktor der Universität Karlsruhe.

Sein frühes wissenschaftliches Wirken fiel zeitlich zusammen mit dem Eintritt in das Raumfahrtzeitalter. Obwohl Rudolf Sigl in seiner wissenschaftlichen Arbeit noch stark in der klassischen Geodäsie verwurzelt war, sah er schnell, dass Satelliten die Möglichkeiten der Geodäsie grundlegend verändern würden. Der Erdkörper wurde als Ganzes erfassbar; die Dynamik der Oberflächenprozesse der festen Erde, der Eisschilde und der Ozeane und die Unregelmäßigkeiten der Rotationsbewegung unseres Planeten sollten präzise messbar werden. Die Geodäsie entwickelte sich zu einem wichtigen Teil der Erdwissenschaften. Die Ausgangssituation in der Bundesrepublik war in den sechziger Jahren jedoch alles andere als günstig. Es bedurfte eines großen Weitblicks und Durchsetzungsvermögens, Satellitengeodäsie in Deutschland Wirklichkeit werden zu lassen. In der Bayerischen Erdmessungskommission entstand um Max Kneissl und Rudolf Sigl ein Konzept für den Aufbau sowohl einer geometrischen als auch einer dynamischen Satellitengeodäsie. Der geometrische Teil sollte sich der Anwendung klassisch geodätisch-astronomischer Methoden auf Satelliten bedienen. Die Erdfigur wird dabei mit einem erdumspannenden räumlichen Polyeder geometrisch erfasst. Die dynamische Satellitengeodäsie leitet Erdfigur, Rotationsverhalten des Erdkörpers und Erdschwerefeld aus der Bahnbewegung künstlicher Erdsatelliten ab. Die damit verbundenen Vorarbeiten in der BEK, am Deutschen Geodätischen Forschungsinstitut und an der Technischen Hochschule München mündeten 1970 in den Sonderforschungsbereich „Satellitengeodäsie“. Durch die Beteiligung des Instituts für Angewandte Geodäsie (heute Bundesamt für Kartographie und Geodäsie) konnte 1972 mit dem Aufbau eines Observatoriums, der Fundamentalstation in Wettzell im Bayerischen Wald begonnen werden, das heute Weltruf genießt. Damit begründete Rudolf Sigl zusammen mit einigen Weggefährten in Deutschland eine Entwicklung auf dem Gebiet der Satellitengeodäsie an, die bis heute äußerst erfolgreich fortgeführt wird.

Dieser aus der BEK heraus initiierte Einstieg ins Raumzeitalter ist ähnlich grundlegend und revolutionär wie die Gründungsperiode der Königlich Bayerischen Kommission für die europäische Gradmessung, wie sie in ihrem Gründungsjahr 1868 noch hieß. Der preußische General Baeyer hatte aufgerufen, aus den wenigen

Gradmessungen und Kleinnetzen in Europa rein im Dienste der Wissenschaften ein europäisches Gesamtnetz werden zu lassen. Nach einigem Zögern schloss sich Bayern dieser Initiative an und die Gründungsmitglieder dieser Kommission, der Geodät C.M. von Bauernfeind, der Astronom J. von Lamont, der Mathematiker L. P. von Seidel und der Physiker C.A. Steinheil, stellten ihre wissenschaftliche Arbeit in den Dienst dieser Sache. Aus der europäischen Gradmessung wurde die internationale Gradmessung und schließlich die wissenschaftliche Geodäsie, so wie sie in der Internationale Assoziation der Geodäsie heute gepflegt wird. Gleichzeitig entstanden über diese Arbeiten exzellente Grundlagen für die bayerische Landesvermessung.

Auch heute beteiligt sich die Bayerische Erdmessungskommission, im Rahmen ihrer bescheidenen Möglichkeiten, aktiv an der wissenschaftlichen Neuorientierung der Geodäsie. Als regionales Analysezentrum erfasst die BEK in einem europäischen Gesamtprojekt aus GPS-Messungen kontinuierlich und millimetergenau Lage und Veränderungen der Lage von mehr als 60 Stationen im Mittelmeerraum. Den zweiten Schwerpunkt bildet die Entwicklung eines Fluggravimeters. Es wird die detailgenaue Messung der lokalen Variationen der Schwerkraft ermöglichen und somit die Satellitenverfahren ideal ergänzen. Rudolf Sigls Anliegen war es, den Fortschritt auf dem Fundament der Tradition zu gestalten. So blieb er immer den klassischen astronomisch-geodätischen Verfahren verbunden und wollte durch Kontinuität ihren Nutzen erhalten, gleichzeitig war er ein weitsichtiger Förderer dieser Neuorientierung der Arbeiten der Bayerischen Kommission für die Internationale Erdmessung.

Neuere Verfahren der numerischen Mathematik

Josef Stoer

Lehrstuhl für Angewandte Mathematik II der Universität Würzburg

Viele gesellschaftlich bedeutende Anwendungen in den Natur- und Ingenieurwissenschaften hängen ab von der

- wachsenden Leistungsfähigkeit der Computer und der
- Entwicklung effizienter Methoden.

Beides macht die Lösung immer komplexerer Aufgaben erst möglich.

Bei der Entwicklung von Algorithmen spielt die *Mathematik* resp. die *Numerische Mathematik* eine oft übersehene wichtige Rolle.

Ihr Beitrag zur Steigerung der Effizienz soll anhand von Verfahren zur Lösung von linearen Gleichungen beschrieben werden. Er beruht darauf, daß man spezielle Strukturen dieser Gleichungen immer besser berücksichtigt. Neuere direkte wie iterative Verfahren zur Lösung von linearen Gleichungen mit *Toeplitzmatrizen* illustrieren die so möglichen Effizienzgewinne.

So erfordert das klassische Eliminationsverfahren von Gauß für eine n -reihige Matrix A zur Lösung von $Ax = b$, d.h. die Berechnung von $A^{-1}b$, im allgemeinen $O(n^3)$ arithmetische Operationen und eine Matrix-Vektor-Multiplikation Au bereits $O(n^2)$ Operationen.

Für spezielle dünn besetzte Matrizen A , z.B. für Diagonal- oder Tridiagonalmatrizen, sind bekanntlich erhebliche Einsparungen möglich. Dies gilt aber auch für Systeme mit Toeplitzmatrizen, d.h. Matrizen $A \equiv A_n$ mit $A_n = (a_{i-j})_{i,j=1,\dots,n}$, die durch $2n - 1$ Zahlen $a_k \in \mathbb{C}$, $k = 0, \pm 1, \dots, \pm (n - 1)$ gegeben und in der Regel vollbesetzte Matrizen sind.

Lineare Gleichungen $A_n x = b$ mit Toeplitzmatrizen kommen in vielen Anwendungen vor, z.B. in der Zeitreihenanalyse (lineare Filter und Prädiktion), der Bildverarbeitung und der Statistik.

Die a_k sind häufig die Fourierkoeffizienten einer reellen, stetigen und 2π -periodischen *erzeugenden Funktion* f ,

$$a_k = \int_{-\pi}^{\pi} e^{-ik\theta} f(\theta) d\theta, \quad k = 0, \pm 1, \dots$$

Z.B. sind in der Zeitreihenanalyse die a_k die Kovarianzen eines diskreten stationären stochastischen Prozesses mit der Spektraldichte f . Die Matrix A_n benutzt von den a_k nur die a_k mit $|k| < n$.

Zur Lösung eines Toeplitzsystems $A_n x = b$ kennt man mittlerweile sehr effiziente direkte (endliche) und iterative Verfahren.

Wichtige *direkte Verfahren* sind

a) das $O(n^2)$ -Verfahren von Levinson (1946) und seine Verallgemeinerungen z.B. von Bareiss (1964). Sie benutzen Rekursionsformeln für Dreieckszerlegungen der Inversen $B_k := A_k^{-1}$, $k \geq 1$. Sie werden instabil, falls einige der A_k fast singular sind. Numerisch stabile "look-ahead" Algorithmen stammen u.a. von Freund (1994).

b) "Schnelle" $\mathcal{O}(n(\log n)^2)$ -Verfahren gehen auf Bitmead und Anderson (1980) zurück. Sie berechnen rekursiv bestimmte additive Zerlegungen von B_{2^j} , $j = 0, 1, 2, \dots$, die wieder instabil werden, falls einige der A_{2^j} fast singularär sind.

c) Für *Zirkulanten* C_n , d.h. spezielle Toeplitzmatrizen $C_n = (c_{i-j})_{i,j=1,\dots,n}$ mit $c_k = c_{n+k}$ für alle $k \in \mathbb{Z}$, kann man die Lösung $x = C_n^{-1}b$ von $C_n x = b$ mit nur $\mathcal{O}(n(\log n))$ Operationen berechnen (Anwendung von FFT).

Effiziente *iterative Verfahren* zur Lösung von $A_n x = b$ wurden vorwiegend für positiv definite Toeplitzmatrizen (mit einer positiven erzeugenden Funktion f) angegeben: Sie laufen auf *präkonditionierte cg-Verfahren* hinaus, in dem man als Präkonditionierungsmatrix eine geeignete positiv definite Zirkulante $C_n \approx A_n$ wählt, etwa

$$C_n := \arg \min_{C: C=C^H \text{ Zirk.}} \|C - A_n\|_\infty \quad (\text{Strang (1986)}),$$

$$C_n := \arg \min_{C: C \text{ Zirk.}} \|C - A_n\|_F \quad (\text{T. Chan (1988)})$$

mit vielen Verallgemeinerungen, z. B. von T. Huckle (1993 ...).

Man erhält so Verfahren, die für großes n beliebig schnell gegen die Lösung $A_n^{-1}b$ von $A_n x = b$ konvergieren. Verallgemeinerungen auf least-squares Probleme sind möglich.

Eine gute Übersicht über iterative Verfahren findet man in R.H. Chan und M.K. Ng (1996).

Literatur

- [1] E.H. Bareiss: Numerical solution of linear equations with Toeplitz and vector Toeplitz matrices. *Numer. Math.*, **13** (1969), 404–424.
- [2] R. Bitmead and B. Anderson: Asymptotically fast solution of Toeplitz and related systems of linear equations. *Linear Alg. Appl.*, **34** (1980), 103–116.
- [3] R.H. Chan and M.K. Ng: Conjugate gradient methods for Toeplitz systems. *SIAM Review*, **38** (1996), 427–482.
- [4] T. Chan: An optimal circulant preconditioner for Toeplitz systems. *SIAM J. Sci. Stat. Comput.*, **9** (1988), 766–771.
- [5] R. Freund: A look-ahead Bareiss algorithm for general Toeplitz matrices. *Numer. Math.*, **68** (1994), 35–69.
- [6] T. Huckle: Some aspects of circulant preconditioners. *SIAM J. Sci. Stat. Comput.*, **14** (1993), 531–541.
- [7] G. Strang: A proposal for Toeplitz matrix calculations. *Stud. Appl. Math.*, **74** (1986), 171–176.

Eine Reise zum Erdmittelpunkt und zurück: Neue Einsichten zur dynamischen Erdentwicklung durch komplexe Geosimulation

Hans-Peter Bunge

Institut für Allgemeine und Angewandte Geophysik, Ludwig-Maximilians-Universität München

Die Erde ist eine Wärmekraftmaschine, die in der Tiefe gespeicherte Hitze durch großräumige Konvektionsprozesse nach Außen abführt. Im aus flüssigem Eisen bestehenden Erdkern treiben diese Konvektionen das Erdmagnetfeld in einem sich selbst erhaltenden Dynamo Mechanismus. Im festen aus Silikaten bestehenden Erdmantel manifestieren sich die Konvektionsströme durch zähflüssiges Kriechverhalten, mit Raten von wenigen cm pro Jahr. Auf geologische Zeiträume betrachtet treibt die Kriechverformung des Erdmantels Plattentektonik und Drift der Kontinente.

In der letzten Dekade haben Geophysiker weltweit einen Quantensprung in ihrem Verständnis planetarer Dynamik vollzogen. Seismische Tomogramme des Erdinnern kartieren heute Auf- und Abströme des Erdmantels mit erstaunlicher Genauigkeit. Paläomagnetische Untersuchungen datieren lateral Bewegungen der Erdkruste über weite Zeiträume der Erdgeschichte. Geodätische Beobachtungen messen Erdbewegungen in Echtzeit. Materialwissenschaften liefern ein besseres Verständnis der Geomaterialien unter den Extrembedingungen des Erdinnern.

Integriert werden muss diese Vielzahl an Beobachtungen letztendlich in theoretischen Modellen, zur Überprüfung unserer Hypothesen. Diese Aufgabe gewinnt in den letzten Jahren vor allem dadurch an Bedeutung, dass der enorme Anstieg numerischer Rechenkapazität heute ungewöhnlich komplexe Geo-Simulationen ermöglicht, die noch vor wenigen Jahren undenkbar gewesen wären. Ein Beispiel ist hier der japanische Earth Simulator, oder innovative Netzwerke von PCs.

In meinem Vortrag will ich versuchen, die oben genannten Fortschritte konkret unter dem Gesichtspunkt der Geodynamik und der Geo-Simulation zu betrachten. Dabei komme ich am Ende meines Vortrags speziell auf Fragen der Datenassimilierung zu sprechen, die auf Grund eines "Anfangswert-Problems" der Geowissenschaften, welches ich erläutern werde, zukünftig eine zentrale Rolle in der Gestaltung dynamischer Erdmodelle spielen wird.

Variationen der Erdrotation: von Stunden zu Jahrhunderten

Markus Rothacher

Forschungseinrichtung Satellitengeodäsie der Technischen Universität München

Im Laufe der Geschichte haben sich die Methoden, mit denen die Rotation und die Variationen der Rotation der Erde erfasst werden können, von Beobachtungen mit bloßem Auge über optische Teleskope bis hin zu den heutigen geodätischen Raumverfahren und Laserkreisel in dramatischer Weise verändert. Entsprechend ist auch das Wissen über die physikalischen Einflüsse, die die Stellung der Achse und die Drehgeschwindigkeit der Erde verändern können, stark angewachsen. In diesem Vortrag wollen wir deshalb eine Reise durch die Zeit unternehmen, indem wir beginnend im alten Griechenland die für das Verständnis der Erdrotation wichtigsten geschichtlichen Entwicklungen und Ereignisse Revue passieren lassen. Dabei werden wir einer Vielfalt von Variationen in der Erdrotation begegnen, solchen, die sich über Jahrtausende erstrecken ebenso wie periodischen Vorgängen, die sich innerhalb von Stunden abspielen.

Griechische Augen: Die Stellung der Erdachse im Raum

Erste Vermutungen, dass sich die Erde um ihre Achse dreht, gehen bereits auf Aristarch von Samos zurück, der im 3. Jahrhundert vor Christus gelebt hat. Diese Vermutungen wurden aber von Ptolemäus als unsinnig zurückgewiesen und erst viel später wieder aufgegriffen. Um 130 v.Chr. wurde durch Hipparch von Nicäa als erstes Phänomen, das direkt mit der Rotation der Erde zusammenhängt, die Präzession, die rückläufige Bewegung des Frühlingspunktes aufgrund der Kräfte von Sonne und Mond, entdeckt.

Optische Instrumente: Die Stellung der Erdachse im erdfesten System

Im Jahre 1758 veröffentlichte Leonard Euler (1707 - 1783) seine Arbeit über die Rotationsbewegung eines starren Körpers und postulierte, dass die Stellung der Erdachse auch gegenüber einem erdfesten Bezugssystem nicht fest sei, sondern eine Kreisbewegung mit einer Periode von etwa 300 Tagen (Eulerperiode) ausführen müsse. Heute wird dieses Phänomen Polschwankung genannt. Allerdings konnte die Polschwankung erst viel später (d.h. im 19. Jahrhundert) nachgewiesen werden, als durch ausgereifte und ausgeklügelte optische Instrumente (z.B. dem Ertelschen Vertikalkreis) bedeutende Fortschritte in der Beobachtungsgenauigkeit erzielt worden waren. 1892 entdeckte Seth Carlo Chandler (1846 - 1913) allerdings, dass die Hauptperiode der Polschwankung (neben der jährlichen Variation) statt 300 rund 432 Tage (Chandlerperiode) beträgt. Der Unterschied ist auf die Elastizität der Erde zurückzuführen. Der Anregungsmechanismus dieser Eigenschwingung des Erdkörpers ist immer noch nicht restlos geklärt.

Vom Weltraum aus: Die Erde als System

Mit dem Start des ersten künstlichen Erdsatelliten Sputnik im Jahre 1957 begann die Erforschung des Weltraums und damit die Einführung der geodätischen Raumverfahren. Beginnend mit der Very Long Baseline Interferometry (VLBI: Beobachtung von extragalaktischen Radioquellen mit Radioteleskopen) und dem Satellite - und dem Lunar Laser Ranging (SLR und LLR: Distanzmessungen mit Laserpulsen), später fortgesetzt mit dem Global Positioning System (GPS), ist eine gewaltige Verbesserung der erreichbaren Genauigkeiten für die Bestimmung der Erdorientierungspara-

meter eingetreten. Während mit optischen Instrumenten die Stellung der Erdachse ungefähr mit einer Genauigkeit von 1 m bestimmt werden konnte, waren es nun Zentimeter oder gar Millimeter. Durch die immer genauer werdende Bestimmung der Variationen der Erdrotation sind auch die sich darin widerspiegelnden Phänomene immer vielfältiger geworden. Es wurde klar, dass sich gemäss der Euler-Liouvilleschen Gleichung neben den durch Sonne und Mond ausgeübten Drehmomenten auch sämtliche Massenverlagerungen und Strömungen im System Erde, sei es in der Atmosphäre, in den Ozeane oder gar dem Erdinnern, mit jeweils unterschiedlichen Perioden auf die Erdrotation auswirken müssen. Damit ist aus dem Erfassen der Erdrotationsschwankungen ein globales Monitoring der Komponenten des Systems „Erde“ geworden.

Lokale Rotationssensoren: Die verloren geglaubte momentane Rotationsachse

Mit der Einweihung des Laserkreisels auf der Fundamentalstation Wettzell im Bayerischen Wald im Herbst 2001 ist ein völlig neues Kapitel in der Beobachtung von Schwankungen der Erdrotation eröffnet worden. Bei einem Laserkreisel (auch Ringlaser genannt) laufen zwei Laserstrahlen in entgegengesetzten Richtungen um ein Quadrat oder einen Ring herum. Da die Erdrotation sich unterschiedlich auf die zwei gegenläufigen Laserstrahlen auswirkt, ergibt sich – wie beim Dopplereffekt – ein Frequenzunterschied. Dieser Frequenzunterschied wird gemessen und enthält Information sowohl über die Stellung der momentanen Erdrotationsachse in einem erdfesten System als auch über die Drehgeschwindigkeit. Neben dem Grossringlaser „G“ in Wettzell gibt es auch in Neuseeland ähnliche Instrumente. Mit diesen neuartigen lokalen „Rotationssensoren“ ist es gelungen, die sogenannten Oppolzerterme, die tägliche Variationen der Stellung der momentanen Rotationsachse beschreiben und die den geodätischen Raumverfahren nicht direkt zugänglich sind, mit einer Genauigkeit von etwa 1 Millibogensekunde (3 cm auf der Erdoberfläche) zu bestimmen. Ringlaser können jedoch zur Zeit „nur“ zur Erfassung von kurzperiodischen Variationen der Erdrotation verwendet werden, da sie über längere Zeiträume (> 10 Tage) noch nicht modellierbare Driften aufweisen.

Integration und Kombination: IGGOS und das Gesamtbild

Anhand der bisherigen Ausführungen sehen wir, dass jede der Beobachtungstechniken ihre Vorteile und Nachteile mit sich bringt. Deshalb ist heutzutage klar erkannt worden, dass nur eine Integration und Kombination der einzelnen Beobachtungsverfahren zu einem „Integrated Global Geodetic Observing System“ (IGGOS) und eine gemeinsame Betrachtungsweise der Erdrotation zusammen mit der Geometrie der Erde und dem Schwerfeld es erlauben werden, verlässliche Aussagen über die vielfältigen Einflüsse auf die Erdrotation zu machen und damit dem Ziel, die Prozesse im System Erde und die Wechselwirkungen in diesem System besser zu erfassen und zu verstehen, einen Schritt näher zu rücken.

Aktuelle Arbeiten der BEK als lokales Analysezentrum im Rahmen des EUREF Permanent Network (EPN)

Christof Völksen

Bayerische Kommission für die Internationale Erdmessung

Mit dem Einzug moderner Satellitenverfahren in die geodätische Positionsbestimmung, wie dem Global Positioning System (GPS), hat sich der Arbeitsbereich der Bayerischen Kommission für die Internationale Erdmessung seit Anfang der 90er Jahre verändert. Nach dem Abschluss der Arbeiten in der IAG Subkommission RETrig (Réseau Européen des Triangulations), die sich auf die Analyse terrestrischer geodätischer Beobachtungen bezogen, hat die BEK Aufgaben als Rechenzentrum für die neugegründete IAG Subkommission EUREF (European Reference System) übernommen. Mit Hilfe der Satellitengeodäsie wurden zunächst Daten von regionalen GPS-Kampagnen ausgewertet, um Positionsbestimmungen vorzunehmen. Seit Ende 1995 wird schließlich ein Netz von zunächst neun permanenten GPS-Stationen im Mittelmeerraum analysiert. Diese Aufgaben werden als offizielles *Local Analysis Centre (LAC)* im Rahmen des EUREF Permanent Network (EPN) wahrgenommen und stellen einen wesentlichen Beitrag der BEK zur Realisierung eines europäischen Referenzsystems dar.

Augenblicklich bearbeitet die BEK ein Netz permanenter GPS-Stationen mit mehr als 60 Referenzstationen. Die Daten einer Kalenderwoche werden in Abschnitten von einem Tag prozessiert und die sieben Tageslösungen anschließend in einer Wochenlösung zusammengefasst. Diese Wochenlösung wird dann über das Internet an das *Combination Centre (CC)* für EUREF beim Bundesamt für Kartographie und Geodäsie in Frankfurt weitergeleitet, welches die individuellen Wochenlösungen der einzelnen Analysezentren gemeinsam ausgleicht und die daraus gewonnenen Koordinaten als ein offizielles EUREF-Produkt frei zur Verfügung stellt.

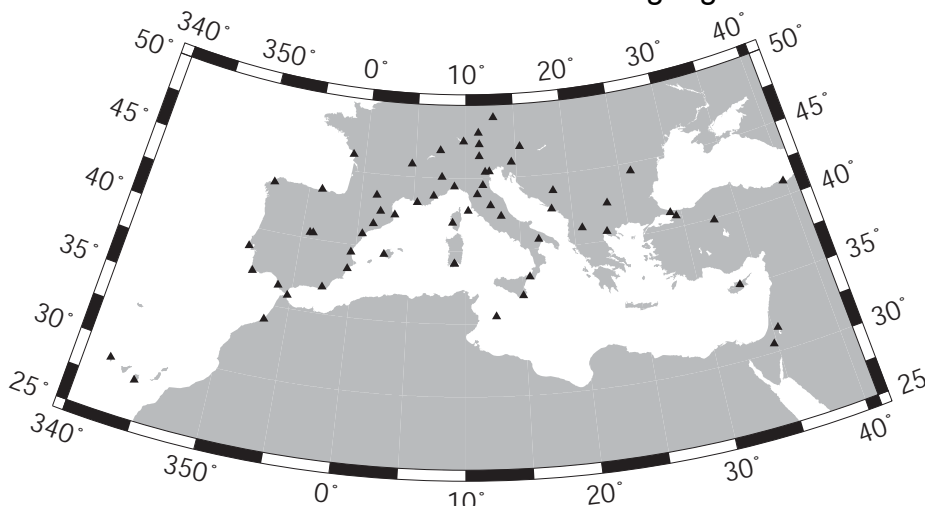


Abbildung 1: Verteilung der permanenten GPS-Referenzstationen

Das Netz der BEK (siehe Abb. 1) umfasst im wesentlichen den mediterranen Raum und Teile der Alpen. Dieses Gebiet zeichnet sich durch seine vielfältige tektonische Struktur aus. Hier treffen die Afrikanische, die Arabische und die Europäische Platte aufeinander und bilden u.a. ausgeprägte Subduktions- und Verschiebungszonen. Diese Tektonik verursacht Positionsänderungen der jeweiligen Referenzstationen, die sowohl kontinuierlich als auch episodisch, verursacht durch Erdbeben, auftreten

können. Mit Hilfe der kontinuierlichen Koordinatenbestimmung der Stationen lassen sich diese Änderungen sehr wohl beobachten und bestimmen. Daher umfasst die Realisierung eines Referenzsystems nicht nur die Bestimmung der Koordinaten, sondern auch die Bestimmung der Geschwindigkeiten der jeweiligen Stationen.

Beispielhaft seien hier die Ergebnisse der Analyse von GPS-Daten über einen Zeitraum von etwa 1.5 Jahren vorgestellt (März 2002 bis November 2003). Aus den täglichen Lösungen wurden für eine bestimmte Epoche Koordinaten und Geschwindigkeiten bestimmt. Voraussetzung für die richtige Abschätzung der Geschwindigkeiten, die als linear angenommen werden, ist, dass sich während dieses Zeitraums keine Koordinatenänderungen aufgrund von episodischen Ereignissen ergeben haben. Als episodische Ereignisse können Erdbeben oder eben auch Änderungen bei der Aufstellung der jeweiligen GPS-Stationen eine Rolle spielen. Die Änderung der Aufstellung aufgrund von Antennenwechseln ist bislang noch immer sehr kritisch, da sie signifikante Positionsänderungen verursachen. Obwohl Korrekturmodelle für die jeweiligen Antennen existieren, sind diese bislang nicht ausreichend und lassen noch immer signifikante Positionsänderungen zu. Als Beispiel sei die Station *Cap de Creus* (CREU) in Spanien genannt. Hier wurde der Radom, welcher zum Schutz der Antenne montiert wurde, beschädigt und durch einen Radom gleichen Typs ersetzt. Später wurde die Antenne komplett durch eine Antenne anderen Typs ohne Radom ersetzt.

In Abbildung 2 ist die Zeitreihe für die Station CREU dargestellt. Deutlich sind die Sprünge in der Position zu erkennen, die mit dem Wechsel des Instrumentariums einhergehen.

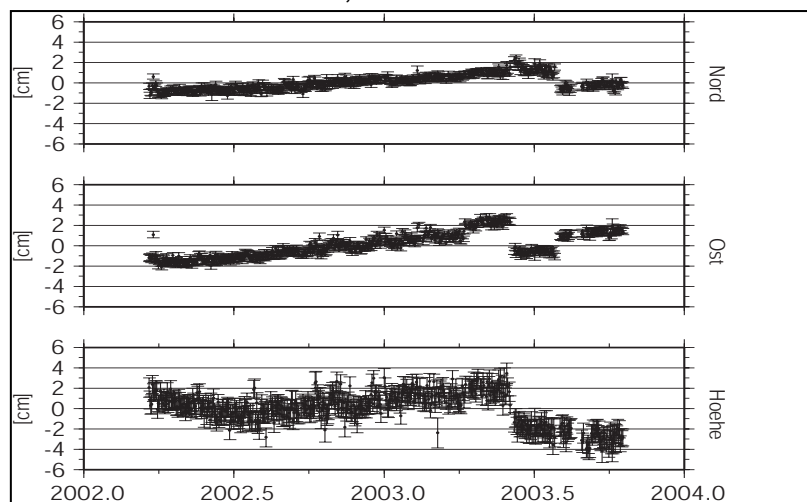


Abbildung 2: Zeitreihen der Positionsänderungen der Station *Cap de Creus* (CREU)

Diese Situation macht deutlich, wie sorgfältig analysiert werden muss, um derartige auftretende Positionsänderungen nicht fälschlicherweise auf tektonische Einflüsse zurückzuführen. Aber nicht nur der Austausch des Instrumentariums führt zu scheinbaren Positionsänderungen. Ähnliche Sprünge können auch bei der Verwendung verschiedener Auswertestrategien oder einer Änderung des Bezugssystems beobachtet werden. Seit dem Beginn der Auswertung des permanenten GPS-Netzes (1995) sind mehrmals die Auswertestrategien und auch die Realisierungen des Bezugssystems verändert worden. Jedesmal mit dem Effekt, dass es zu kleinen systematischen Positionsänderungen führt, die die Bestimmung des Geschwindigkeitsfeldes beeinflussen.

Daher beabsichtigt die BEK eine erneute Prozessierung aller Daten seit 1995 mit identischen Auswerteoptionen, identischer Realisierung des Referenzsystems und verbesserten Antennenmodellen, um ein in sich konsistentes Geschwindigkeitsfeld ableiten zu können. Erst dann ist es möglich, Deformationen in Bezug auf die Tektonik eingehend zu untersuchen und ein verbessertes Referenzsystem abzuleiten.

Der Beitrag der BEK zur Fluggravimetrie: Entwicklung des StrapDown Airborne Gravimetry System (SAGS4)

Gerd Boedecker

Bayerische Kommission für die Internationale Erdmessung

Die Gravimetrie zur Vermessung des Erdschwerefeldes als Hilfswissenschaft der physikalischen Geodäsie und anderer Geowissenschaften, der Metrologie, Navigation und Satellitennutzung, hat in den letzten Jahren eine Vielfalt an neuen Messmethoden und –Instrumenten hervorgebracht: Hervorzuheben sind sehr hohe Messgenauigkeiten z.B. für geodynamische Untersuchungen an Observatorien, insbesondere aber die atemberaubenden Fortschritte bei den Satellitenmethoden zur Ausmessung des globalen Erdschwerefeldes durch die CHAMP- und GRACE- Missionen.

Über diese Fortschritte darf jedoch nicht vergessen werden, dass die räumliche Auflösung der Satellitenmethoden nur bis herunter zu ca. 50 ... 100 km reicht. Feinere Strukturen des Erdschwerefeldes für hochauflösende Geoidberechnungen oder die geophysikalische Interpretation von Salzkuppen (Öl), Sedimentbecken (Grundwasser), Mineralvorkommen, Details tektonischer Plattenränder etc. sind weiter terrestrischen Beobachtungsverfahren vorbehalten – zu denen auch die Fluggravimetrie zählt. Wegen des Effizienzvorteils gegenüber der klassischen Landgravimetrie ist diese in den letzten ca. 10...20 Jahren zunehmend in der Entwicklung. Der gegenwärtige Stand der Technik wird gekennzeichnet durch Beschränkung auf Skalargravimetrie – statt der Bestimmung des vollen Schwerevektors – noch begrenzte räumliche Auflösung – ca. 3...8 km, je nach Gerät und Situation – und hohen Aufwand – insbesondere für ein relativ großes Messflugzeug. Standard ist insbesondere das LaCoste-Romberg Fluggravimeter (Skalar); einen deutlichen Fortschritt bringt das SGL der Firma Sander Geophysics. Beide sind allerdings weiterhin Skalargravimeter auf kreiselstabilisierter Plattform mit den dadurch gegebenen Beschränkungen und Ansprüchen.

Daher wird weltweit an mehreren Institutionen weiter nach Möglichkeiten zur Weiterentwicklung gesucht, insbesondere durch Nutzung der StrapDown-Technik, die durch Verzicht auf eine Plattform größere Robustheit und kleinere Baugrößen ermöglicht, allerdings auch neue Herausforderungen stellt. Hierbei sind verschiedene Vorgehensweisen möglich: Entweder man ‚trimmt‘ ein technisch verwandtes Trägheitsnavigationsgerät oder man baut ein Instrument aus Komponenten neu auf.



Dieser letztere Weg wird von der BEK beschritten; er erlaubt insbesondere die Optimierung der Konfiguration der Einzelsensoren im Hinblick auf die Gravimetrie. So werden beim SAGS4 (StrapDown Airborne Gravimetry System)-Prototyp (siehe Abbildung) zwei höchst genaue Akzelerometer im Vertikalkanal eingesetzt – zwei weitere in den Horizontalkanälen – , das Gerät ist im Gegensatz zu üblichen Trägheitsnavigationsgeräten thermostatisiert, aufwändig geschirmt und auf niederfrequenten Dämpfern gelagert, um den Sensoren optimale Bedingungen zu schaffen. Die Erfahrungen mit den Vorgänger-Prototypen lassen erwarten, dass in Ruhe das hochfrequente Störrauschen im mGal-Bereich (10^{-5} ms^{-2}), also 10^{-6} g , liegen wird und insofern die Forderungen erfüllt werden. Weiter ist der Signalfluss optimiert; ein PC-104-Rechner ist auf gleicher Grundplatte für Kontrolle, numerische Filterung und Datenlogging zuständig. Schwerpunkt der Arbeit am Fluggravimeter sind die Modellierung, dabei insbesondere die Kalibrierung aus Flugmessungen selbst. Darin wiederum erfordert der Hebelarm-Effekt – also die differentielle Beschleunigung zwischen dem Ort der GPS-Antenne und dem Ort des Fluggravimeters – noch besondere Anstrengung. Auf Grund der noch nicht abgeschlossenen Modellierung konnte daher der begleitende testweise Einsatz der Vorgänger SAGS2.2 und SAGS3 noch nicht zu verwertbaren Schweremessungen führen, trug jedoch wesentlich zur Weiterentwicklung und Flugtauglichkeit des neuen SAGS4 bei.

Gemäß der Grundgleichung der Fluggravimetrie – vereinfacht: **Schwere = Gesamtbeschleunigung minus kinematische Beschleunigung** – tritt neben die Sensorentwicklung für den Gesamtbeschleunigungsvektor – des ‚Fluggravimeters‘ – völlig gleichberechtigt die Weiterentwicklung für die Bestimmung der kinematischen Beschleunigung aus GNSS (bisher: GPS). Hier sind besondere Herausforderungen die Beherrschung des Ionosphäreneinflusses und die Steigerung der Messrate. Der Ionosphäreneinfluss führt zu Positionsfehlervariationen von typisch 30 cm mit entsprechenden Beschleunigungsfehlern. Hierzu haben wir in 2002 wesentliche Arbeiten durchgeführt und publiziert. Dabei wurden die Informationen aus einem Netz von GPS-Bodenreferenzstationen in der Nähe des Flugweges für Korrekturen genutzt, die eine Genauigkeit von wenigen Zentimetern (Flugzeugposition, relativ) ermöglichen. In typischen Messszenarios wird jedoch die Nutzung eines dichten Referenznetzes kaum möglich sein; daher werden weitere Vorgehensweisen untersucht. Außerdem ist eine höhere Messrate vonnöten, die auch für kleine ranke Flugzeuge die Flugtrajektorie hinreichend beschreibt, wozu ein Messpunktabstand von ca. 1 m längs der Trajektorie wichtig erscheint. Die Nutzung hochratiger GPS-Empfänger ist daher zur Zeit ein wesentlicher Arbeitsschwerpunkt. Ein weiterer Schwerpunkt ist die Ableitung der kinematischen Beschleunigung aus GPS-Positionen (evtl. auch aus GPS-Doppler-Geschwindigkeiten). Dabei müssen Differenzierungsalgorithmen mit numerischen Filtern der verrauschten Beobachtungen optimal verbunden werden. Das im Titel erwähnte neue Fluggravimeter SAGS4 steht damit nicht nur für einen neuen Prototyp, sondern für die Entwicklungsstufe, die wir zur Zeit erreicht haben; dies soll der Kurzvortrag illustrieren.

Diese Entwicklung ist als Teilprojekt auch in das vom BMBF im GeoTechnologien-Programm geförderte Verbundprojekt ‚Fluggravimetrie‘ eingebunden, in dem drei unterschiedliche Institutionen mit jeweils eigenen technischen Entwicklungen mit zwei Firmen zum Technologietransfer kooperieren. Weiter wurden und werden die Arbeiten von zahlreichen Institutionen auf verschiedene Weise unterstützt. Darunter seien außer dem BMBF hier beispielhaft genannt das GeoForschungsZentrum Potsdam und die Bayerische Akademie der Wissenschaften.