

Zum Wandel in der Zielsetzung geodätischer Forschung

Hermann Drewes

Zusammenfassung

Die Geodäsie hat sich in den letzten Jahrzehnten vor allem aufgrund der Entwicklungen in der Mess- und Computertechnik dramatisch gewandelt. Es stehen Beobachtungstypen und Rechnerleistungen zur Verfügung, mit denen Messungen und Analysen durchgeführt werden können, die vor einer Generation undenkbar waren. Dadurch hat sich auch die Zielsetzung der geodätischen Forschung erweitert. Die klassische Aufgabe der Ausmessung der Erdoberfläche wird auf die kontinuierliche Erfassung von Auswirkungen des globalen Wandels und der Geodynamik ausgedehnt. Zu diesem Zweck richtete die Internationale Assoziation für Geodäsie (IAG) im Jahre 2003 das »Global Geodetic Observing System« (GGOS) ein, das sämtliche geometrischen und gravimetrischen Beobachtungen zur konsistenten Darstellung von globalen Deformationen und Massentransportprozessen im System Erde integrieren soll.

Summary

Geodesy has undergone a dramatic change during the last decades. It is mainly caused by the development of the measuring and computing technologies. New types of observations and efficient computers are available permitting measurements and analyses which were unthinkable a generation ago. The objectives of geodesy have been expanded through this change. The classical problems of geodesy as the science of measuring the Earth surface have been broadened to comprise the detection of effects of global change and geodynamics. The International Association of Geodesy (IAG) followed the development by establishing the Global Geodetic Observing System (GGOS) in 2003. As an association project it will integrate all geometric and gravimetric observations for combined parameter estimation. The objective is a consistent description of global deformation and mass transport processes in the system Earth.

1 Einleitung

Die Definition der Geodäsie als Wissenschaft von der Ausmessung und Abbildung der Erdoberfläche (Helmert 1880) ist bis heute allgemein gültig. Traditionell hat sie eine erdwissenschaftliche und eine ingenieurwissenschaftliche Ausrichtung (z.B. Gerke 1972) und schließt die Bestimmung des äußeren Schwerefeldes der Erde ein (z.B. Torge 2001, 2002). Man kann auch eine Unterteilung nach den Messverfahren in die geometrische und die gravimetrische Geodäsie vornehmen. Die geometrische Geodäsie hat die klassische Zielsetzung der Bestimmung der Gestalt des Erdkörpers und seiner Orientierung im Welt- raum, der Erfassung von topographischen Strukturen und Bauwerken sowie der Festlegung der Lage von politischen und Eigentums- grenzen. Die gravimetrische Geodäsie be-

stimmt das äußere Erdschwerefeld in Form von Potenzial und Anomalien und leitet daraus u. a. Bezugsflächen (z. B. Äquipotenzialflächen) für die Bestimmung der Höhen der Erdoberfläche ab.

Die Genauigkeit der geodätischen Messverfahren wurde vor allem durch die extrem genauen Zeitmessungen, aus denen über die Laufzeit elektromagnetischer Wellen präzise Distanzen abgeleitet werden, in den letzten Jahrzehnten enorm gesteigert. Dies gilt sowohl für die Geometrie (Streckennetze) als auch für die Gravimetrie (freier Fall von Probemassen). Die Entwicklung der Raumfahrt erlaubt Messungen von der Erde zum Mond und zu künstlichen Erdsatelliten bzw. von den Satelliten zur Erdoberfläche und zu anderen Satelliten, mit denen die globale Messung zwischen Punkten auf der Erde ohne Sichtverbindung und im Weltraum zwischen Satelliten sowie die direkte dreidimensionale Erfassung der Erdoberfläche möglich ist. Bei den Auswerteverfahren können durch die rasante Steigerung der Leistungsfähigkeit elektronischer Rechner neue mathematische Methoden angewandt werden, mit denen die hohe Messgenauigkeit und die sehr große Zahl weltweit verteilter Messwerte ausgeschöpft werden.

Diese drei technischen Entwicklungen – die Steigerung der Messgenauigkeit, die Ausweitung der Weltraum-Messverfahren und die enorme Leistung der elektronischen Datenverarbeitung – führten dazu, dass die Geodäsie ihre Ausrichtung in der Forschung erheblich erweitern konnte. Heute ist es möglich, die »klassischen« geodätischen Größen (Punktpositionen, Oberflächen, Erdrotation und Schwerepotenzial) und deren sogar kleinste zeitliche Änderungen mit sehr hoher Auflösung in globaler Ausdehnung signifikant zu erfassen. Die früher stationär und statisch ausgerichtete »Ausmessung der Erdoberfläche« wird ausgeweitet zur »Messung und Analyse von Erscheinungen und Effekten physikalischer Prozesse im System Erde«, wobei das System den ganzheitlichen Zusammenhang im Erdkörper und im erdnahen Raum beschreibt. Da die Prozesse fast immer eine geometrische und eine gravimetrische Komponente aufweisen, müssen beide Verfahren integriert, d.h. simultan und konsistent zusammenfassend, behandelt werden. Bei der nachfolgenden Diskussion dieser Integration wollen wir uns auf die Geodäsie als Erdwissenschaft beschränken.

2 Geodätische Messung und Parameterschätzung

Die prinzipielle Arbeitsweise der Geodäsie ist in Abb. 1 skizziert. Die Messungen, die geometrischen und gravimetrischen Beobachtungen, beziehen sich immer auf die

Realität. Da diese sehr komplex und deshalb nur schwer zu beschreiben ist, schaffen wir uns vereinfachende physikalische Modelle, die wir parametrisieren und mit Hilfe mathematischer Algorithmen darstellen. Die geodätische Schätzung, z. B. durch Ausgleichsrechnung, verbindet die Messdaten durch die Algorithmen nur mit diesen Parametern, nicht mit der Realität.

Zur Verbindung der Messungen mit den Parametern sind Referenzsysteme erforderlich, die festlegen, worauf sich die zu schätzenden Größen beziehen sollen. Zum Beispiel sind Positionskordinaten nicht direkt schätz-

3 Elemente des Systems Erde

Das System Erde setzt sich aus den Elementen (Komponenten) der festen, flüssigen und gasförmigen Erde zusammen. Wir wollen diese in Geosphäre (feste Lithosphäre, viskose Asthenosphäre und flüssiger Kern), Hydrosphäre (flüssiges Wasser), Kryosphäre (eisbedeckte Gebiete), Atmosphäre (Troposphäre und Ionosphäre) und Biosphäre (biologische Massen) unterteilen. Jedes dieser Elemente besitzt geodätisch messbare (geometrische oder gravimetrische) Eigenschaften wie z.B. Form und Gewicht.

Physikalische Vorgänge innerhalb der Elemente und zwischen ihnen, wie z.B. Gravitation, Thermodynamik, Druck, Spannung und Reibung, erzeugen Signale, die mit geodätischen Beobachtungssystemen erfasst werden können (Abb. 2). Das sind z.B. Veränderungen geometrischer Größen oder Schwereänderungen.

Die Signale beeinflussen jedoch nicht nur einzelne geodätische Größen. Im Allgemeinen werden mehrere Parametergruppen gleichzeitig betroffen: Geometrische Veränderungen rufen meist auch Schwereänderungen hervor. Die physikalischen Modelle dürfen deshalb nicht getrennt für einzelne Signale erstellt werden, sondern sie müssen sämtliche Elemente und Prozesse einschließen.

Form und Deformationen der festen Erde, ozeanische und atmosphärische Strömungen und Auflasten sowie alle Massenverlagerungen durch Wasser und Vegetation sind konsistent zu modellieren und bezüglich der zu schätzenden Größen (Punktpositionen, Oberflächengestalt, Erdorientierung und -schwerefeld) zu parametrisieren. Ebenso müssen die geodätischen Auswertverfahren die Messungen sämtlicher Beobachtungstypen bei der Parameterschätzung

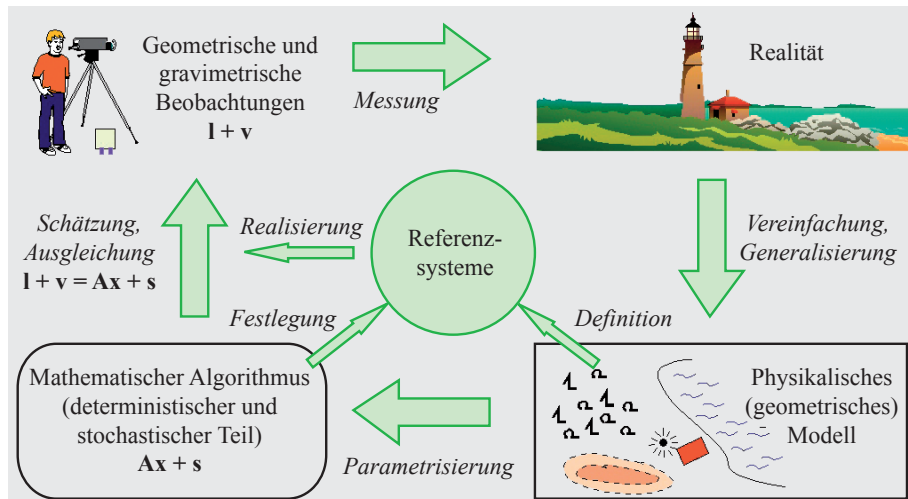


Abb. 1: Geodätische Messungen und Parameterschätzung

bar, sondern benötigen die Definition eines Koordinatensystems. Die Referenzsysteme werden mit dem physikalischen Modell definiert und im mathematischen Algorithmus festgelegt. Sie müssen gleichermaßen für die geometrischen und gravimetrischen Verfahren gelten. Wenn sich z.B. die Schwerefeldparameter auf den Massenmittelpunkt der Erde (Geozentrum) beziehen, müssen auch die geometrischen Größen eine geozentrische Referenz haben. Dies ist besonders wichtig bei den geodätischen Weltraumverfahren, bei denen Satellitenbahnen unter Verwendung von Erdschwerefeldmodellen berechnet und aus diesen Stationspositionen auf der Erdoberfläche bestimmt werden. Bei der Parameterschätzung sind die Referenzsysteme dann gemäß ihrer Definition konsistent zu realisieren.

Die physikalischen Modelle, die der Parametrisierung zugrunde liegen, spielen eine fundamentale Rolle. Ein fehlerhaftes Modell führt zu falscher Parameterschätzung, auch bei fehlerfreien Messungen. In der Vergangenheit konnten die Modelle im Allgemeinen einfach (meist nur geometrisch) gehalten werden, weil die Zielsetzung und die geringere Messgenauigkeit keine Darstellung komplizierter Zusammenhänge erforderten. Heute müssen sie jedoch sehr umfassend und genau sein, damit sämtliche Effekte, die sich in den Messungen widerspiegeln, mit den benötigten Parametern dargestellt werden können. Die Voraussetzungen für die physikalischen Modelle im System Erde werden deshalb im Folgenden beschrieben.

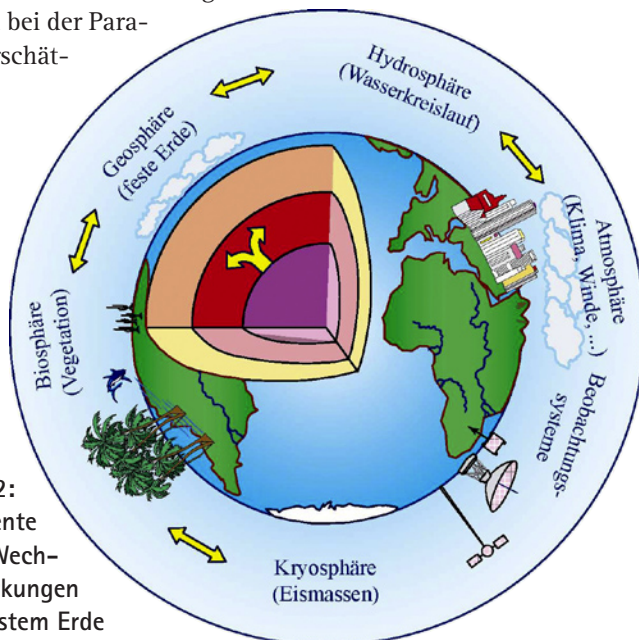


Abb. 2: Elemente und Wechselwirkungen im System Erde

berücksichtigen. Sie sind auf konsistente Referenzsysteme zu beziehen, in die auch die Bahnen der Erdsatelliten und die Richtungen zu den extraterrestrischen Signalquellen (z.B. Quasare) transformiert werden können (Abb. 3). Auf diese Weise werden die Signale des Systems Erde von den geodätischen Parametern konsistent und umfassend dargestellt.

Die Integration sämtlicher Elemente und Messdaten ist ein grundlegendes Erfordernis zur richtigen Erfassung der Eigenschaften und Prozesse des Systems Erde. Bearbeitet man die einzelnen Elemente getrennt, verfälschen die Einflüsse von anderen, nichtmodellierten Elementen auf die Messgrößen eventuell die Schätzung der einbezogenen Parameter. Führt man die Parameterschätzung mit nur einem Beobachtungstyp durch, werden die Eigenschaften und Prozesse der Systemelemente eventuell unvollkommen oder systematisch verfälscht dargestellt, weil wichtige Informationen aus anderen Messgrößen fehlen. Im folgenden sollen solche gegenseitigen Beeinflussungen beispielhaft diskutiert werden.

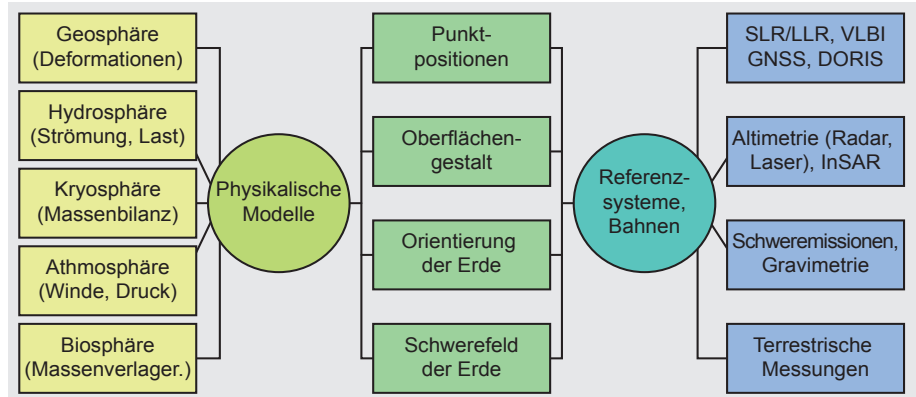


Abb. 3: Zusammenhänge zwischen Signalen der Elemente des Systems Erde und den geodätischen Beobachtungen

und gasförmigen Erde wirken und welche geodätischen Parameter sie beeinflussen. Es ist klar ersichtlich, dass dieselben Vorgänge durch unterschiedliche Wirkung verschiedene Parametergruppen verändern. Man kann einem Prozess deshalb nicht nur eine einzige Wirkung zuordnen, vielmehr sind sämtliche Größen betroffen. Zur Modellierung der Vorgänge müssen somit alle geodätischen Messungen und Parameter herangezogen werden.

Die einzelnen geodätischen Beobachtungen werden aber von mehreren Eigenschaften und Vorgängen gleichzeitig beeinflusst. Tab. 2 stellt dar, dass Veränderungen

4 Wechselwirkungen zwischen Signalen und Parametern

Signale der Prozesse im System Erde gehen in der festen Erde z.B. von der Konvektion im Mantel, Plattentektonik, Erdbeben, Vulkanen und isostatischen Ausgleichsbewegungen aus. In der Hydrosphäre und Kryosphäre gibt der gesamte Wasserkreislauf durch Niederschläge, Verdunstung, Abfluss und Abschmelzung von Eismassen messbare Signale. Die Atmosphäre beeinflusst geodätische Messungen und Parameter z.B. durch den Wasserdampf, Luftdruck, Winde und ionisierte Schichten. In der Biosphäre finden Massenverlagerungen z.B. durch jahreszeitliche Einflüsse statt. Die Prozesse verfälschen einerseits direkt die Messgrößen, z.B. durch Refraktion und Beschleunigung der Instrumente, andererseits die zu schätzenden Parameter, z.B. durch Bewegung von Punkten, Variation der Meeresoberfläche, Schwereänderungen, Schwankungen des Erdrotationspols und der Rotationsgeschwindigkeit (Tagelänge).

Tab. 1 zeigt Beispiele, wie die einzelnen Prozesse in der festen, flüssigen

Tab. 1: Beispiele der Wirkung geophysikalischer Prozesse auf geodätische Parameter

Prozess	wirkt als	und beeinflusst
<i>Kern-, Mantelkonvektion</i>	<ul style="list-style-type: none"> Plattenbewegung Krustendeformation Massenverlagerung Drehimpuls, -moment 	<ul style="list-style-type: none"> Punktepositionen Meeresoberfläche Schwerefeld Erdrotation
<i>Niederschlag</i>	<ul style="list-style-type: none"> Auflast Abfluss ins Meer Grundwasserstand Trägheitsmoment 	<ul style="list-style-type: none"> Punktepositionen Oberflächengestalt Schwerefeld Erdrotation
<i>Strömungen in Atmosphäre und Ozeanen</i>	<ul style="list-style-type: none"> Auflast Druck Massenverlagerung Drehimpuls, -moment 	<ul style="list-style-type: none"> Punktepositionen Meeresoberfläche Schwerefeld Erdrotation

Tab. 2: Beispiele der Beeinflussung geodätischer Parameter durch geophysikalische Prozesse

Parameter	wird beeinflusst durch	der Prozesse in
<i>Punkteposition</i>	<ul style="list-style-type: none"> Plattenbewegungen Auflasteffekte 	<ul style="list-style-type: none"> (feste) Geosphäre Hydro-, Atmosphäre
<i>Oberfläche</i>	<ul style="list-style-type: none"> Abfluss, Deformation Luftdruck 	<ul style="list-style-type: none"> Hydro-, Geosphäre Atmosphäre
<i>Erdrotation</i>	<ul style="list-style-type: none"> Strömungen, Druck Deformation 	<ul style="list-style-type: none"> Hydro-, Atmosphäre (feste) Geosphäre
<i>Schwerefeld</i>	<ul style="list-style-type: none"> Grundwasser Deformation 	<ul style="list-style-type: none"> Geo-, Hydrosphäre (feste) Geosphäre

eines Parameters nicht durch einen einzigen Prozess erklärt werden können. Es muss das gesamte System Erde betrachtet werden. In die Modellierung der Vorgänge im System Erde und zur Parameterschätzung sind deshalb sämtliche Systemelemente einzubeziehen. Damit entsteht ein komplexes System von Beobachtungen und Parametern, das zu integrieren ist.

5 Integration geometrischer und gravimetrischer Verfahren

Die meisten Prozesse im System Erde erzeugen sowohl geometrisch als auch gravimetrisch zu beobachtende Effekte. Deshalb sind die Ergebnisse beider Verfahren simultan in die Parameterschätzung einzubeziehen. Dies geschieht durch die Kombination der Messungen in einem gemeinsamen Auswertansatz. Die zur Beobachtung des Systems Erde heute wichtigsten Messungen stammen aus den geodätischen Weltraumbeobachtungsverfahren:

- Global Navigation Satellite Systems (GNSS),
- Satellite and Lunar Laser Ranging (SLR, LLR),
- Very Long Baseline Interferometry (VLBI),
- Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite (DORIS),
- Satellite Altimetry (verschiedene Missionen),
- Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR),
- Challenging Minisatellite Payload Mission (CHAMP),
- Gravity Recovery and Climate Experiment Mission (GRACE).

Gegenwärtig führen einzelne Gruppen von Wissenschaftlern und insbesondere die wissenschaftlichen Dienste der Internationalen Assoziation für Geodäsie (IAG), vor allem der »International GNSS Service« (IGS), der »International Laser Ranging Service« (ILRS), der »International VLBI Service for Geodesy and Astrometry« (IVS), der »International DORIS Service« (IDS) und der »International Earth Rotation and Reference Systems Service« (IERS) Parameterschätzungen durch Kombination unterschiedlicher Messdaten aus:

- Punktpositionen und -geschwindigkeiten werden durch Kombination verschiedener geometrischer Beobachtungen (GNSS, SLR/LLR, VLBI, DORIS) von den entsprechenden Services (IGS, ILRS, IVS, IDS) und den Kombinationszentren des IERS für den International Terrestrial Reference Frame (ITRF) berechnet (z.B. Altamimi et al. 2002, Angermann et al. 2004, Drewes et al. 2006).
- Die Erdoberfläche und deren Deformation wird als kinematischer Meeresspiegel durch Kombination und Kreuzkalibration verschiedener Satellitenaltimetrie-Missionen (z.B. Bosch 2003) und auf den Kontinenten durch kombinierte InSAR und GNSS-Messungen (z.B. Delouis et al. 2000) bestimmt.
- Die Orientierung und Rotationsschwankungen der Erde werden wie die Punktpositionen aus kombinierten ge-

ometrischen Beobachtungen abgeleitet (z.B. Gambis 2004). Die Drehimpulsänderungen aus Massenverlagerungen in Atmosphäre und Ozeanen werden durch gekoppelte Modelle berechnet (z.B. Seitz et al. 2004).

- Parameter des Erdschwerefeldes werden durch Kombination von Weltraum-, Flug-, Schiff- und terrestrischen Messungen in globalen Modellen und regionaler Verdichtung bestimmt (z.B. Kern et al. 2003).

Es bestehen jedoch einige Mängel bei der Durchführung der Kombination. Es werden nicht immer identische Konstanten, Konventionen und Modelle benutzt; z.B. werden die IERS Conventions (McCarthy and Petit 2004) und das Geodätische Referenzsystem 1980 (GRS80, Moritz 2000) nicht immer beachtet. Die geschätzten Parameter unterscheiden sich oft schon in der Definition, was zu unterschiedlichen Ergebnissen führt. Man kann z.B. nicht-lineare Punktgeschwindigkeiten durch mathematische Funktionen oder in Abhängigkeit von physikalischen Einflüssen (z.B. Druckauflasten) schätzen. Auch die Referenzsysteme sind nicht immer identisch. Die Definition der heute gebräuchlichen geometrischen (ITRF, McCarthy and Petit 2004) und gravimetrischen (IGSN71 und absolute Schweremessungen, Torge 1989) Referenzsysteme unterscheidet sich in der Reduktion der permanenten Gezeiten (»tide-free« bzw. »zero-tide«). Schließlich entsprechen nicht alle durchgeführten Rechnungen immer dem heutigen Stand der wissenschaftlichen Forschung, z.B. weil die Software nicht aktualisiert ist.

Die gemeinsame Kombination von geometrischen und gravimetrischen Daten wird kaum durchgeführt. Vielmehr werden die Effekte des jeweils anderen Beobachtungstyps durch Modelle erfasst oder aus den Messungen reduziert. Z.B. wird bei der Punktbestimmung mit GPS im Allgemeinen ein statisches Erdschwerefeldmodell benutzt, obwohl man aus den Ergebnissen Deformationen, die Schwereänderungen hervorrufen, ableiten will. Bei der Bestimmung von Schwerfeldparametern oder Meeresspiegelvariationen aus Satellitenbeobachtungen werden nicht-lineare Bewegungen der Referenzstationen, aus deren Messungen die Satellitenbahnen modelliert werden, im Allgemeinen nicht berücksichtigt, obwohl später z.B. jahreszeitliche Schwerfeld- oder Meeresspiegel-Variationen dargestellt werden. Abb. 4 und 5 zeigen das Geoid vom 25. März und 25. September 2003 im Norden Südamerikas sowie Höhenschwankungen der GPS-Station Brasilia im Zentrum der größten Geoidänderung. Beide Parameter weisen saisonale Variationen auf, die bisher jedoch unabhängig voneinander ohne Berücksichtigung der gegenseitigen Wechselwirkungen berechnet werden.

Die strenge Integration der Beobachtungen durch Kombination erfordert die Konsistenz der Messungen, Konstanten, Modelle, Referenzsysteme, Auswertemethoden und der zu schätzenden Parameter. Nur wenn deren vollständige Kompatibilität gewährleistet ist, können zuverlässige Ergebnisse bereit gestellt werden, die den hohen

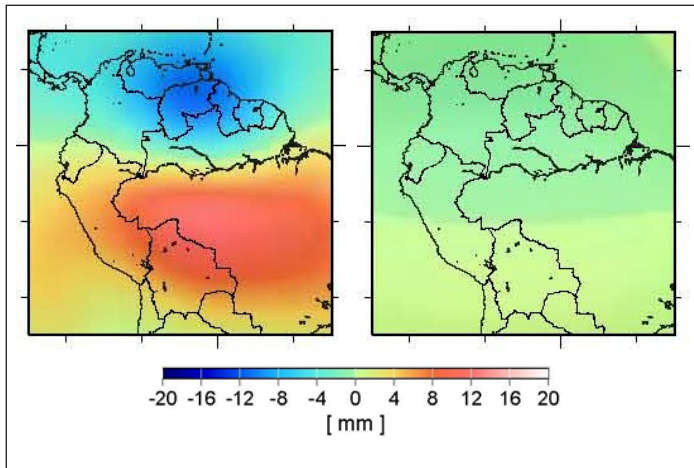


Abb. 4: Geoidvariationen im Norden Südamerikas zwischen Ende März (links) und Ende September 2003 (rechts) aus GRACE-Beobachtungen (Schmidt et al. 2006)

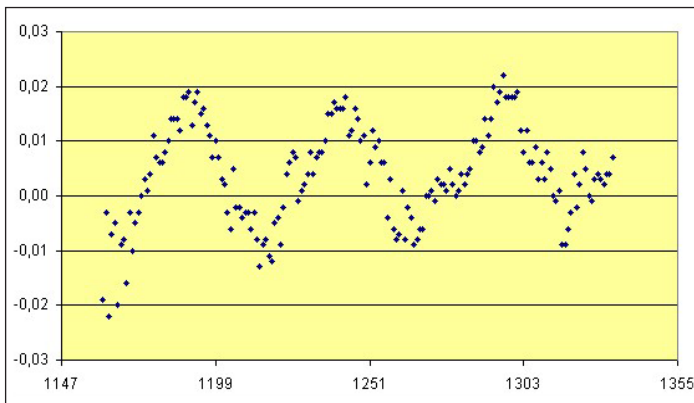


Abb. 5: Höhenänderungen der GPS-Station Brasilia (BRAZ) von GPS-Woche 1161, April 2002 bis 1337, August 2005 (Seemüller et al. 2005)

Anforderungen an die Darstellung der Erscheinungen und Auswirkungen physikalischer Prozesse im System Erde gerecht werden.

5.1 Konsistente Messungen

Die Grundlage fast aller Beobachtungen in der modernen Geodäsie sind Zeitmessungen (Laufzeit elektromagnetischer Signale, Epochzeit). Bedingung der Konsistenz der Messungen sind deshalb identische Zeitsysteme (Atomzeit TAI, geozentrische Zeit TCG, Epochzeit UT1). Laufzeitmessungen in einem Medium (Atmosphäre) müssen in gleicher Weise wegen physikalischer Effekte reduziert werden (atmosphärische Refraktion, Umwelt- und instrumentelle Effekte). Sämtliche Beobachtungen in einem Ort müssen sich auf einen genau definierten Referenzpunkt beziehen; die Beziehung geometrischer und gravimetrischer Messungen zueinander muss genau bekannt (lokale Vermessungen) und alle relevanten Informationen über die Beobachtungen müssen genau dokumentiert und verfügbar sein (Metadaten).

5.2 Konsistente Konstanten, Konventionen, Modelle

Die fundamentalen Konstanten, Konventionen und Modelle der Geodäsie wurden in jüngster Zeit oft diskutiert. Eine Änderung des geodätischen Referenzsystems von 1980 (GRS80) und der betreffenden Resolutionen der IAG, die diese definieren, wurde jedoch als nicht notwendig erachtet (z.B. Groten 2004), obwohl Diskrepanzen mit anderen Festlegungen (z.B. den IERS Conventions) und dem häufigen Gebrauch einzelner Wissenschaftler(gruppen) und wissenschaftlicher Dienste bestehen. Die bei globalen geometrischen Koordinatenbestimmungen übliche Reduktion der permanenten Tiden (»tide free«) widerspricht einer IAG-Resolution von 1983. Schwerfeldparameter werden im Allgemeinen ohne diese Reduktion berechnet (»zero tide«). Deshalb gilt für die Höhenbestimmung aus ellipsoidischen Höhen h , die aus ITRF-Koordinaten abgeleitet werden, orthometrischen Höhen H aus reduzierten Nivellements und Geoidhöhen N aus manchen Schwerfeldmodellen *nicht* die fundamentale Beziehung

$$h - H = N.$$

Die zur Umrechnung von Schwereänderungen in Deformationen normalerweise benutzten Loveschen Zahlen sind für niedere Frequenzen sehr unsicher. Für Reduktionen werden Dichtewerte der Erdkrustenmassen benutzt ($2,67 \text{ g/cm}^3$), die nicht mit den gängigen geophysikalischen Modellen übereinstimmen ($2,6 \text{ g/cm}^3$ im PREM, Dziewonski and Anderson 1981). Bei der Reduktion der troposphärischen Refraktion werden unterschiedliche Abbildungsfunktionen (»mapping functions«) von der Vertikalen auf geneigte Strecken verwendet.

5.3 Konsistente Referenzsysteme

Geometrische und gravimetrische Referenzsysteme können durch unterschiedliche Parameter definiert und realisiert sein. Das geodätische Datum eines Systems wird dabei definiert, es kann nicht gemessen oder geschätzt werden. Der Ursprung eines dreidimensionalen geometrischen Koordinatensystems ist durch die Koordinatenwerte X_0, Y_0, Z_0 , der eines gravimetrischen z.B. durch die Werte C_{10}, C_{11}, S_{11} der Kugelfunktionsentwicklung des Erdschwerfeldes festgelegt. Benutzt man für die dynamische Satellitenbahnbestimmung ein Schwerfeldmodell mit $C_{10} = C_{11} = S_{11} = 0$, liegt der Koordinatenursprung immer im Massenmittelpunkt (Geozentrum) und die aus der Bahn und geometrischen Messungen abgeleiteten Koordinaten der terrestrischen Stationen sind dann automatisch geozentrisch. Es besteht kein Freiheitsgrad für »Geozentrums-« oder »Ursprungsvariationen«. Die häufig so bezeichneten Effekte, die aus Stationskoordinatenänderungen abgeleitet werden, sind »mittlere« Bewegungen des Netzes.

Entsprechendes gilt für die Orientierung des Koordinatensystems, die geometrisch durch die Lage des Erdrotationspols (X_p, Y_p) und die Zeitdifferenz UTC-UT1, gravimetrisch durch die Koeffizienten zweiten Grades der Kugelfunktionsentwicklung des Erdschwerefeldes ($C_{21}, C_{22}, S_{21}, S_{22}$) festgelegt wird. Hierbei ist bemerkenswert, dass die Lage des Pols nicht physikalisch (Richtung der Achse des größten Hauptträgheitsmoments, die C_{21}, S_{21} entspricht), sondern durch Konvention (Lage im BIH-System 1984) definiert ist. Geometrisch bestimmte »Erdrotationsschwankungen« sind in Wirklichkeit Rotationen des Referenznetzes der Beobachtungsstationen. Wegen möglicher Netzdeformationen sind sie nicht notwendigerweise identisch mit Änderungen der Lage der Hauptträgheitsachse, die aus Massenverlagerungen berechnet werden. Der Maßstab der Koordinaten wird schließlich geometrisch aus der Lichtgeschwindigkeit und gravimetrisch aus der geozentrischen Gravitationskonstanten (GM) abgeleitet, die ebenfalls konsistent gehalten werden müssen.

Für die hierarchisch aufgebauten Referenzsysteme, z.B. zälestisches und terrestrisches Referenzsystem, die durch die Erdorientierungsparameter (EOP) verbunden sind, muss die Konsistenz ebenfalls garantiert sein, was derzeit nicht der Fall ist, da sie weitgehend unabhängig voneinander berechnet werden.

5.4 Konsistente Auswertemethoden und Algorithmen

Geodätische Parameter können nur dann konsistent geschätzt werden, wenn die benutzten Auswertemethoden und Algorithmen kompatibel sind. Bei der Ausgleichung nach der Methode der kleinsten Quadrate und bei Filtertechniken werden die Parameter und Residuen z.B. unterschiedlich behandelt. Wenn Lösungen kombiniert werden sollen, dürfen sie nicht intern deformiert sein, z.B. durch überzählige Datumsbedingungen. Freie Normalgleichungen für die Ausgleichung müssen einen Rangdefekt (bei stationären dreidimensionalen Netzen 7) bezüglich des Datums haben. Die größte Diskrepanz zwischen verschiedenen Messtypen entsteht durch systematische Fehler. Deshalb müssen robuste Schätzer benutzt werden. Eines der größten Probleme bei der Kombination heterogener Beobachtungen ist die Gewichtung. Die Varianz-Kovarianz-Schätzung muss deshalb streng durchgeführt werden.

5.5 Konsistente Parameter

Physikalische Effekte können als Parameter geschätzt oder von den Beobachtungen reduziert werden, wenn sie nicht weiter benötigt werden, z.B. Refraktion, Gezeiten, Auflasteffekte. Sie sollten jedoch nur reduziert werden, wenn der Fehler der Reduktion vernachlässigbar gegen-

über der Genauigkeit der Messungen ist. Werden sie reduziert, müssen stets identische Reduktionsmodelle benutzt werden. Ein Beispiel sind die Auflasteffekte, die teilweise reduziert, teilweise in die Modelle integriert (z.B. bei Ozeangezeiten), teilweise als Parameter geschätzt werden (z.B. Atmosphärenauflasten). Effekte können auch zwischen Parametern übertragen werden. Zum Beispiel sind Troposphärenparameter und Punkthöhen oder Stationsgeschwindigkeiten und Erdrotationsparameter hoch miteinander korreliert. Wird einer der Parameter geschätzt, der andere modelliert, gehen Modellfehler direkt in die geschätzten Werte.

6 Schlussfolgerungen

Die Zielsetzung der Geodäsie als Erdwissenschaft hat sich auf die Messung und Analyse von Erscheinungen und Wirkungen physikalischer Prozesse im System Erde ausgedehnt. Dabei werden die grundlegenden Beobachtungstypen und Auswertemethoden von den klassischen Verfahren übernommen bzw. aus diesen abgeleitet. Neu ist das Zusammenführen der verschiedenartigen geometrischen und gravimetrischen Daten in einen gemeinsamen konsistenten Auswertungsansatz, der einem der Realität möglichst nahen physikalischen Modell angepasst wird und geophysikalische Analysen und Interpretationen erlaubt. Das »Global Geodetic Observing System« (GGOS) der IAG soll die Voraussetzungen dafür schaffen und die Integration der verschiedenen Verfahren in internationalem Rahmen gewährleisten (Drewes 2006).

Bisher ist die geodätische Forschung sehr stark auf die mathematischen Algorithmen und die Parameterschätzung konzentriert. Es wird versucht, die aus den Messungen gewonnenen Ergebnisse möglichst glatt durch mathematische Funktionen darzustellen. So werden z.B. bei Schwerefeldmodellen anstelle der tatsächlichen, die Gravitation verursachenden Massenverteilungen in der Erde, mathematisch bestens geeignete Funktionen (i.A. Kugelfunktionen) geschätzt. Auch bei globalen Schwereänderungen wird primär nicht der ursächliche physikalische Prozess (z.B. hydrologische Variationen) parametrisiert, vielmehr werden die zeitabhängigen Parameter einer mathematischen Funktion (Kugelfunktion) bestimmt. Das gleiche gilt für die Darstellung und Analyse von Zeitreihen, bei denen ohne Untersuchung des physikalischen Hintergrunds meist transzendente, überwiegend trigonometrische Funktionen (z.B. in Fourierreihen) gewählt werden, obwohl die gemessenen Werte zwar periodisch, aber nicht unbedingt harmonische Schwingungen sind. Die physikalischen Modelle sollten ihren Eigenschaften entsprechend parametrisiert werden, z.B. durch periodische Anregungsfunktionen bei Erdrotationsschwankungen und den reziproken Abstand beim Schwerepotenzial.

Bei der rein mathematischen Vorgehensweise ist die Gefahr groß, dass Ergebnisse aus physikalisch nicht be-

gründeten Funktionen falsch interpretiert werden. Einfache Beispiele sind periodische Variationen, die nicht harmonisch sondern asymmetrisch sind, aber durch harmonische Schwingungen angepasst werden. Selbst wenn sie nur eine eindeutige, regelmäßige Periode aufweisen, wird das Ergebnis einer Fourieranalyse eine Vielzahl harmonischer Schwingungen signifikant hervorbringen (Abb. 6). Dies ist in der Praxis bei vielen Zeitreihen der Fall, die z. B. durch das Wetter mit jährlicher Periode, aber nicht harmonischer Schwingung beeinflusst sind, z. B. durch starken Niederschlag zu einer Jahreszeit, des-

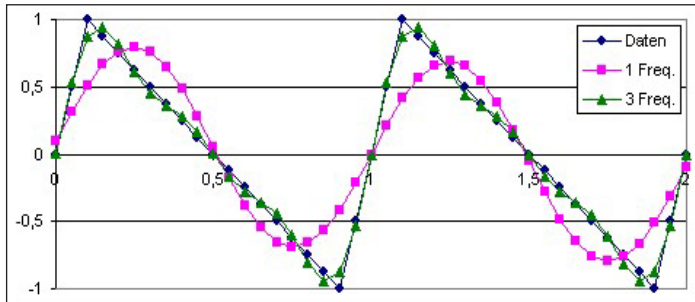


Abb. 6: Anpassung einer asymmetrischen Zeitreihe mit einer einzigen klar ausgeprägten Periode durch eine harmonische Schwingung mit einer bzw. drei Frequenzen, deren Koeffizienten hoch signifikant geschätzt wurden.

sen Wasser im Boden schnell akkumuliert und nach einigen Monaten langsam abfließt.

Die Zielsetzung der geodätischen Forschung muss in Zukunft die physikalischen Modelle stärker in den Vordergrund rücken. Sie bilden die Grundlage der modernen geodätischen Forschung. Die Signale des Systems Erde haben eine geophysikalische Ursache und werden integriert von den geodätischen Beobachtungsverfahren gemessen. Sie müssen auch auf der Basis realitätsnaher physikalischer Modelle parametrisiert und die Messdaten und Ursachen integrierend geschätzt werden. Die geodätischen Teildisziplinen (Geometrie, Gravimetrie) dürfen dabei nicht mehr weitgehend unabhängig voneinander arbeiten, sondern müssen konsistent zusammengeführt werden. So wird die Geodäsie einen fundamentalen Beitrag zur Erforschung des Systems Erde zum Nutzen von Wissenschaft und Gesellschaft leisten.

Literatur

- Altamimi, Z., P. Sillard, C. Boucher: ITRF2000: A new release of the International Terrestrial Reference Frame for Earth science applications. *J. Geophys. Res.* (107) B10, 2, 19 pp, 2002.
- Angermann, D., H. Drewes, M. Krügel, B. Meisel, M. Gerstl, R. Kelm, H. Müller, W. Seemüller, V. Tesmer: ITRS Combination Center at DGFI: A terrestrial reference frame realization 2003. *Dt. Geod. Komm., München, Reihe B, Nr. 313*, 2004.
- Bosch, W.: Geodetic application of satellite altimetry. Springer, IAG Symposia, Vol. 126, 3–22, 2003.
- Delouis, B., P. Lundgren, J. Salichon, D. Giardini: Joint inversion of InSAR and teleseismic data for the slip history of the 1999 Izmit (Turkey) earthquake. *Geophys. Res. Lett.* (27) 3389–3392, 2000.
- Drewes, H.: Science Rationale of the Global Geodetic Observing System (GGOS). Proc. Joint Assembly »Dynamic Planet 2005«, IAG Symposia No. 130 (im Druck), Springer, 2006.
- Drewes, H., D. Angermann, M. Gerstl, M. Krügel, B. Meisel, W. Seemüller: Analysis and refined computations of the International Terrestrial Reference Frame. In: J. Flury, R. Rummel, C. Reigber, M. Rothacher, G. Boedecker, U. Schreiber (Eds): *Observation of the Earth System from Space*, 343–356, Springer, 2006.
- Dziewonski, A.M., D.L. Anderson: Preliminary Reference Earth Model. *Phys. Earth Planet. Inter.* (25) 297–356, 1981.
- Gambis, D.: Monitoring Earth orientation using space-geodetic techniques: state-of-the-art and prospective. *J. Geodesy* (78) 295–303, 2004.
- Gerke, K.: Geodäsie als Natur- und Ingenieurwissenschaft. *Zeitschr. für Verm.* (97) 522–531, 1972.
- Groten, E.: Fundamental parameters and current (2004) best estimates of the parameters of common relevance to astronomy. *J. Geodesy* (77) 724–731, 2004.
- Helmert, F.R.: *Die mathematischen und physikalischen Theorien der höheren Geodäsie*, Band 1. Teubner Leipzig, 1880.
- Kern, M., K.P. Schwarz, N. Sneeuw: A study on the combination of satellite, airborne, and terrestrial gravity data. *J. Geodesy* (77) 217–225, 2003.
- McCarthy, D.D., G. Petit: IERS Conventions (2003). IERS Technical Note No. 32, 2004.
- Moritz, H.: Geodetic Reference System 1980. *J. Geodesy* (74) 128–133, 2000.
- Schmidt, M., S.-C. Han, J. Kusche, L. Sánchez, C.K. Shum: Regional high-resolution spatiotemporal gravity modeling from GRACE data using spherical wavelets. *Geophys. Res. Lett.* (33) L08403, 4pp, 2006.
- Seemüller, W., K. Kaniuth, H. Drewes: Station positions and velocities of the IGS regional network for SIRGAS. DGFI Report No. 76, 2004 (Update 2005).
- Seitz, F., J. Stuck, M. Thomas: Consistent atmospheric and oceanic excitation of the Earth's free polar motion. *Geophys. J. Int.* (157) 25–35, 2004.
- Torge, W.: *Gravimetry*. De Gruyter Berlin, 1989.
- Torge, W.: *Geodesy*. 3rd Edition, De Gruyter Berlin and New York, 2001.
- Torge, W.: *Geodäsie*. 2. Auflage, De Gruyter Berlin, 2002.

Anschrift des Autors

Hon.-Prof. Dr.-Ing. Hermann Drewes
 Alfons-Goppel-Straße 11, 80539 München
 drewes@dgfi.badw.de