

---

Heinz Kautzleben

## Geodäsie am Beginn des 21. Jahrhunderts<sup>1</sup>

### Einleitung

Unbestritten gilt: Die Geodäsie ist nur eine kleine Disziplin. Sie gilt heute als „trocken“, legt kaum spektakuläre Ergebnisse vor und wirkt in Wissenschaft und Praxis als ausgesprochener „Dienstleister“. Manche meinen, daß sie „Herrschaftswissen“ sammelt und als „Buchhalter“ wirkt. Es gilt aber auch: Die Geodäsie ist ein Musterbeispiel dafür, wie dank des wissenschaftlichen Herangehens Aufgaben praktisch gelöst werden können, die man nur als Teil einer Gesamtheit exakt verstehen und lösen kann und für die jeweils nur fehlerbehaftete Beobachtungen mit großen Lücken beschafft werden können.

Anlaß für den Vortrag<sup>2</sup> ist zum einen das „Jahr der Geowissenschaften“, zu dem in Deutschland das Jahr 2002 in der Aktion „Wissenschaft im Dialog“ proklamiert wurde. Die Veranstaltung ist einer der Beiträge, die die Leibniz-Sozietät zu dieser leider notwendigen Öffentlichkeitskampagne im Interesse der Wissenschaft allgemein und der Sozietät im besonderen erbringt. Da man die Leistung einer Gelehrtensozietät als Summe der individuellen Leistungen ihrer Mitglieder definiert, ist es leicht festzustellen, daß die Leibniz-Sozietät seit ihrer Begründung durch Leibniz die Entwicklung der Geowissenschaften und speziell der Geodäsie in hohem Maße permanent gefördert hat. Dabei war und ist die Sozietät besser als jede Fachvereinigung in der Lage, den realen Fortschritt disziplinübergreifend zu analysieren und zu würdigen.

Der zweite und entscheidende Anlaß ist der außerordentlich große Fortschritt, den die Geodäsie in den letzten beiden Jahrzehnten erreicht hat. Er wurde deutlich auf der Wissenschaftlichen Generalversammlung der Interna-

1. Vortrag vor dem Plenum der Leibniz-Sozietät am 21. März 2002
2. Bei den Darlegungen wurden die Erfahrungen genutzt, die der Vortragende bei seiner vieljährigen wissenschaftlichen Tätigkeit in der Akademie der Wissenschaften der DDR, in der internationalen wissenschaftlichen Zusammenarbeit und im Zusammenwirken mit den Vertretern der praktischen Geodäsie sammeln konnte. Der Vortragende bittet um Verständnis, daß er auf die namentliche Nennung der an der vertrauensvollen Zusammenarbeit beteiligten Kollegen verzichten und sich auf den herzlichen Dank an sie alle beschränken muß. Ebenso muß darauf verzichtet werden, die verwendete Literatur zu zitieren.

tionalen Assoziation für Geodäsie (kurz: IAG), die Anfang September 2001 in Budapest stattfand und an der sich die führenden Geodäten aus über 50 Ländern beteiligten. Diese Veranstaltung stand unter dem Gesamthema „Vistas for Geodesy in the New Millennium“. (Siehe Anhang)

Der Sprung in der Entwicklung der Geodäsie und ihrer praktischen Anwendung ist der breiten Öffentlichkeit in den letzten beiden Jahrzehnten durch die geodätische Nutzung von künstlichen Erdsatelliten bekannt geworden. Dabei wird die enge Verbindung von Geodäsie und Navigation, von Orts- und Kursbestimmung, auf neue Weise für jedermann sichtbar und nutzbar gemacht.

Im Titel des Vortrages wurde das Zeitmaß „ein Jahrhundert“ gewählt. Es ist ein Kompromiß zwischen dem Zeitraum von mehreren Jahrtausenden, den die Geodäsie bisher zurückgelegt hat, und dem aktuellen Entwicklungstempo, das wesentliche Fortschritte etwa alle 10 Jahre bringt. Es zwingt zum Verzicht auf viele wichtige Details und zur Verallgemeinerung, was aber kein Nachteil bei einem Vortrag im Plenum der Leibniz-Sozietät sein dürfte.

Nach der Einleitung wird im Abschnitt 2 kurz die Geodäsie und ihre Stellung in Wissenschaft und Praxis charakterisiert. Dabei werden drei Wesenszüge hervorgehoben: 1. strebt die Geodäsie nach einer streng mathematischen Formulierung, 2. lebt die Geodäsie von der engen Verbindung von Wissenschaft und Praxis, 3. geht es in der Geodäsie nicht ohne die internationale Zusammenarbeit.

Im Abschnitt 3 wird die Methodik der Geodäsie analysiert. Dabei werden die Probleme Mathematisierung, Physikalisierung, Einsatz von Instrumenten zu behandeln sein. Die Überschrift „Alles ist klar, das Problem ist die Genauigkeit“ soll andeuten, worauf es in der Geodäsie ankommt: Die Geodäsie ist eine Approximationswissenschaft, sowohl historisch wie auch logisch betrachtet. Am Anfang steht die Frage: Was verstehen wir unter „Natur“?

Im Abschnitt 4 werden dann der heutige Stand und die anstehenden Aufgaben charakterisiert. Kurz gesagt: 1. Die Erde wird heute in Wissenschaft und Praxis von der Geodäsie wirklich als Einheit bearbeitet, und das bei dem Genauigkeitsniveau, das 1 : 1 Milliarde erreicht hat. 2. Es ist nicht klar, ob der Approximationsprozeß konvergiert. 3. Die Widersprüche zwischen den drei Säulen Geometrie, Schwerefeld, Rotation erfordern neue Lösungen. 4. Die zeitlichen Änderungen der geodätischen Größen können nicht mehr als kleine Störungen betrachtet werden und stehen im Mittelpunkt der Forschung.

## Die Geodäsie in Wissenschaft und Praxis

Es werden hier lediglich einige Thesen genannt, ohne sie im Einzelnen zu begründen. Sie alle beschreiben Aspekte, unter denen die Geodäsie heute behandelt werden könnte.<sup>1</sup>

a) Die geowissenschaftliche Disziplin Geodäsie gehört sowohl zu den Naturwissenschaften wie auch zu den Ingenieurwissenschaften. Sie ist eine messende Disziplin. Die Fortschritte in der Geodäsie sind eng mit den Fortschritten in der Meßtechnik und der Rechentechnik verbunden und von ihr abhängig.

b) Die wissenschaftliche Geodäsie entwickelt in erster Linie Methoden, diese müssen strengen mathematischen Forderungen genügen und den Eigenschaften des Objektes maximal angepaßt sein.

c) Die Ergebnisse der Geodäsie sind nicht Theorien, sondern Zahlen: die Meßwerte und deren Genauigkeit. Deren Weiterverarbeitung und Deutung übergibt bzw. überläßt die Geodäsie anderen Disziplinen, zumindest sucht sie dazu die Zusammenarbeit. Das hat Vor- und Nachteile. Sie kann genau messen, ohne ebenso genau erklären zu müssen.

d) Die Geodäsie arbeitet besonders eng mit der Astronomie und der Geophysik zusammen. Äußerer Ausdruck dafür sind die gemeinsam betriebenen Arbeitsgebiete astronomische Geodäsie und Gravimetrie.

e) Die Geodäsie sammelt wie alle Geowissenschaften Informationen; ihre Informationen haben die Form von Meßdaten und von Erkenntnissen, die in diesen enthalten sind. Dabei kann man prinzipiell nicht unterscheiden, welche Informationen der Wissenschaft und welche der Praxis dienen. Diese Verknüpfung von Wissenschaft und Praxis ist charakteristisch für die Geodäsie wie für alle Geowissenschaften. Die geodätischen Informationen bilden die unverzichtbare Grundlage, sozusagen das „Skelett“ für alle anderen geowissenschaftlichen Informationen. Und sie bilden Randbedingungen für erklärende Hypothesen und Theorien.

f) Besonders eng sind die Beziehungen der (praktischen) Geodäsie einerseits zur Kartographie und andererseits zur Navigation, die man auch als operative Ortung bezeichnen kann.

g) Heute ist in vielen Hochschulen die Geodäsie einem Fachbereich Geoinformatik zugeordnet, zu dem weiterhin solche Disziplinen wie Photo-

---

1. Zur Vertiefung und Ergänzung dazu ist sehr lesenswert die Monographie von Ernst Buschmann: Gedanken über die Geodäsie: einige naturwissenschaftliche, technische, philosophische und wirtschaftliche Aspekte. Stuttgart: Konrad Wittwer, 1992.

grammetrie, aerokosmische Fernerkundung (Remote Sensing), Kartographie, geographische Informationssysteme gehören. In analoger Weise sind die geodätischen Dienste in den meisten Ländern mit den auf den genannten Disziplinen aufbauenden Diensten zusammengefaßt. In der BRD ist es das Bundesamt für Kartographie und Geodäsie.

h) Das Berufsethos des Geodäten wird dadurch bestimmt, daß er die volle Verantwortung für seine Arbeitsergebnisse übernimmt, bis hin zur juristischen Verantwortung. Seine Ergebnisse müssen einwandfrei sein - sie müssen dem letzten Stand der wissenschaftlichen Erkenntnis und der technologischen Möglichkeiten entsprechen; triviale Fehler und schludrige Arbeit müssen ausgeschlossen sein.

i) Die Geodäsie ist eine der ältesten wissenschaftlichen Disziplinen; sie existiert seit mehreren Jahrtausenden. Sie wurde zu allen Zeiten weiterentwickelt und besitzt bis heute und sicher auch in der Zukunft eine große wissenschaftliche und praktische Bedeutung.

j) Die Entstehung und die weitere Entwicklung der Geodäsie resultieren aus dem gesellschaftlichen Bedürfnis, das persönliche bzw. das staatliche Eigentum an Grund und Boden und an Territorien zu definieren und zu sichern und zielstrebig zu nutzen.

Die Geodäsie hat zwei Wurzeln; diese sind bis heute noch spürbar. Zum einen erforderte die Einteilung der Felder Handlungen, die heute als Liegenschaftsvermessung bezeichnet werden. Wann damit begonnen wurde, verliert sich im Dunkel der Frühzeit vor mindestens vier Jahrtausenden. Zum andern führte die Ergänzung der Reiseberichte der Händler und Seeleute durch zuverlässige Ortsangaben und Karten zur Entwicklung der Landes- und Erdmessung. Damit begannen die Griechen ab etwa 500 v.Ch. Der Beginn ist mit den Namen Pythagoras (Erdkugel) und Demokrit (Einführung von Länge und Breite) verbunden.

k) Das oben genannte Bedürfnis kommt noch im Wort „Geodäsie“, d.h. Erdteilung, zum Ausdruck, das sich bis heute als Bezeichnung für die Wissenschaftsdisziplin erhalten hat. Dagegen ist das mehr zutreffende Wort „Geometrie“, d.h. Erdmessung, im Laufe der Jahrhunderte zur Bezeichnung eines Zweiges der Mathematik geworden. Das ist einer der vielen Hinweise darauf, daß die Probleme der Geodäsie im Laufe der Jahrhunderte Anstöße zu weitreichenden wissenschaftlichen Entwicklungen gegeben haben.

l) Zu erwähnen ist auch, daß die Geodäsie an der internationalen Standardisierung der Maßeinheiten für Länge, Zeit und Gewicht wesentlich beteiligt war und ist.

m) In ihrer langen Geschichte hat die Geodäsie Beiträge zur Entwicklung des Erdbildes als Teil des Weltbildes geleistet. Es dürften einige Schlagworte genügen: die Figur und die Größe der Erde, ihre Eigenschaft und ihre Stellung als Himmelskörper, was ist die Schwerkraft? Zum andern schuf sie die ersten Voraussetzungen dafür, daß sich das moderne Gefühl für Raum und Zeit herausbilden konnte.

### **„Alles erscheint klar, das Problem ist die Genauigkeit.“**

Die Geodäsie<sup>1</sup> gehört zu den wissenschaftlichen Disziplinen, deren Erkenntnisproblematik die Genauigkeit ist. Der Ausgangspunkt sind vielfach die Alltagserfahrungen. Auf den ersten Blick scheint alles klar. Die Probleme erscheinen und wachsen, je genauer man hinschaut und je tiefer man nach- und weiterdenkt.

Das Anliegen der Geodäsie ist die Aus- oder Vermessung der geometrischen Struktur von mehr oder weniger großen Teilen der Erdoberfläche und dieser Fläche als Ganzes. Man muß zwischen Vermessung und Aufnahme der Erdoberfläche unterscheiden. Die Vermessung schafft das Gerüst, die Aufnahme füllt es mit weiteren Daten aus und umhüllt es.

Die Schwierigkeiten der Geodäsie beginnen bereits bei der Definition der Erdoberfläche und sie ergeben sich auf der anderen Seite aus der Dimension der Erde. Sehr bald zeigt sich, daß auch die Atmosphäre beachtet werden muß.

Zum ersten: Die Erdoberfläche ist unregelmäßig gestaltet und wird durch die Natur und den Menschen ständig verändert. Die Festländer sind durch Ozeane und Meere getrennt, die insgesamt über 70 % der Erdoberfläche bilden. Eine spezielle Behandlung erfordern die vereisten Gebiete. Als Ganzes ist sie eine geschlossene Fläche. Das Innere der Erde ist nicht zugänglich. Was und wie soll man da messen? Auf dem Festland ersetzt man die kontinuierliche Fläche durch Netze von dauerhaft markierten Punkten und bestimmt die räumliche Lage dieser Festpunkte relativ zueinander. Für die Vermessung der weit weniger stabilen Oberfläche der Ozeane und Meere muß man andere Konzepte entwickeln. Die einfache Aneinanderreihung der regionalen Netze

---

1. Von den Lehrbüchern zur Geodäsie ist zur Einführung in das Gesamtgebiet u.a. zu empfehlen das von Wolfgang Torge: Geodesy. An Introduction. Berlin, New York: de Gruyter, 1980. Als „Klassiker“ gilt das Buch von Weikko A. Heiskanen und Helmut Moritz: Physical Geodesy. Original edition publ. by W.H. Freeman and Company, San Francisco, 1967. Reprint: Institute of Physical Geodesy, Technical University Graz, Austria, 2000. Beide Autoren waren bzw. sind Mitglieder der Leibnizschen Gelehrtensozietät.

auf den Festländern zu einem globalen Netz, das die ganze Erdoberfläche überdeckt, ist wegen der Wasserflächen praktisch unmöglich. Man braucht ein Verfahren, das die Figur der Erde als Ganzes bestimmt und den Rahmen für die Einordnung der regionalen Netze liefert.

Zum zweiten: Die Oberfläche der Erde beträgt 510 Millionen km<sup>2</sup>, der Umfang 40.000 km. Wenn man den Abstand zwischen zwei beliebigen Punkten der Erdoberfläche auf 1 cm genau bestimmen will, muß man eine Meßgenauigkeit von  $10^{-9}$  (d.h. 1 : 1 Milliarde) erreichen. Wie ist der erforderliche Aufwand zu bewältigen? Das geht nur in wissenschaftlich begründeter Arbeitsteilung sowohl in methodischer Hinsicht wie auch zwischen den beauftragten Institutionen aller Länder, und zwar innerstaatlich und international. Die internationale Zusammenarbeit der Geodäten wird nicht nur von den wissenschaftlichen Erfordernissen bestimmt; sie wird in höchstem Maße durch die staatlichen Interessen und den Charakter der politischen Beziehungen zwischen den Staaten beeinflusst.

Die Methodik der Geodäsie baut auf der systematischen Nutzung und Vertiefung von Alltagserfahrungen auf, muß aber sehr bald Begriffe und Methoden entwickeln, für deren Verständnis diese Erfahrungen nicht mehr ausreichen. Man sollte aber auch nicht verschweigen, daß manche Erschwernisse ihre Ursachen in der langen Geschichte der Geodäsie und im „Fachjargon“ haben.

Eine zentrale Rolle spielen die Definition und die Realisierung des Bezugssystems für die geodätischen Messungen. Die Geodäsie kommt noch weitgehend mit den klassischen Begriffen des absoluten Raumes und der absoluten Zeit aus. Seit etwa zwei Jahrzehnten müssen in Grenzfällen die Vorstellungen der allgemeinen Relativitätstheorie beachtet werden.

Den Charakter der Geodäsie bestimmen die wissenschaftliche Forderung, daß die Lösungen für ihre Aufgaben mathematisch so streng wie nur irgend möglich formuliert werden müssen, und die Forderungen des Ingenieurs, daß der zur Lösung erforderliche Aufwand nicht höher als unbedingt notwendig sein soll, was letztlich bedeutet, die Frage nach der Genauigkeit der Meßergebnisse so streng wie irgend möglich zu beantworten.

Viele Prinzipien, nach denen die Geodäten vorgehen, kann man bereits bei der Diskussion der einfachsten Fälle deutlich machen.

Die Ausmessung eines kleinen (bis zu 100 km<sup>2</sup> großen) Teils der Erdoberfläche im Bereich des Festlandes stellt begrifflich keine besonderen Anforderungen, insbesondere, wenn das Relief ruhig ist und das Gebiet für sich betrachtet werden kann. Auf Grund der Alltagserfahrungen kann man die

Lotrichtung als Flächennormale einer virtuellen Bezugsfläche verwenden und diese Fläche bei nicht zu hohen Ansprüchen an die Genauigkeit im Meßgebiet als horizontale Ebene ansehen. Das erweist sich aber als eine Zwangsbedingung für die Bearbeitung der Meßwerte und erfordert eine Ausgleichung der Widersprüche.

Bei der Feldarbeit mißt der Geodät in jedem Festpunkt zu allen benachbarten Festpunkten die Entfernungen und die Winkel zwischen den Richtungen zu jeweils zwei von ihnen. Dabei werden die Winkel aus meßpraktischen Gründen auf die Lotrichtung bezogen. Bei der häuslichen Arbeit werden dann die gesammelten Meßdaten geordnet und in ein einheitliches Koordinatensystem umgerechnet; im einfachsten Fall ist das ein kartesisches System. Die einzelnen Netzmaschen werden dabei aneinandergesetzt. Man arbeitet also „vom Kleinen ins Große“ und muß folglich in Kauf nehmen, daß mit wachsender Größe des Netzes auch die Fehler anwachsen. Daraus erklärt sich die Suche nach übergeordneten Kontrollen.

Die häusliche Arbeit ergibt für jeden Festpunkt eine Angabe für seine Lage in der horizontalen Bezugsfläche und eine Angabe für die Höhe relativ zu ihr. Damit wird aber auch die Bezugsfläche relativ zu den Festpunkten in rein geometrischen Größen exakt festgelegt. Diese Festlegung kann verwendet werden, um auf einfache Weise das Netz der Festpunkte zu verdichten und um die Voraussetzungen für die Realisierung des Bezugssystems und damit die Zuverlässigkeit der geodätischen Vermessung insgesamt zu überprüfen. Die Widersprüche werden dann zum Ausgang für die weiterführenden Forschungen.

Das erscheint alles ganz einfach - deshalb einige wenige Bemerkungen zu den auftretenden meßtechnischen Schwierigkeiten:

- Man braucht Sichtverbindungen zwischen den benachbarten Meßpunkten. Wenn man sie erst schaffen muß, kann es sehr teuer werden.
- Die Einflüsse der Atmosphäre auf die Ausbreitung des Lichtes setzen der Meßgenauigkeit deutliche Grenzen, insbesondere bei der Messung von Vertikalwinkeln. Bei der Höhenbestimmung erreicht man höhere Genauigkeiten mit Hilfe des sog. Nivellements. Dabei wird der geometrische Abstand der Äquipotentialflächen des Schwerfeldes gemessen.
- Da die Abstände zwischen den Festpunkten relativ groß sind, können sie nicht direkt mit Hilfe von Meßlatten gemessen werden, und zwar wegen des hohen Aufwandes und wegen der unzureichenden Meßgenauigkeit. Diese Schwierigkeiten wurden mit der Einführung der Triangulation im 15. Jhd. überwunden.

- Seit den 60er Jahren des 20. Jhd. werden die Entfernungen aus den Messungen der Laufzeit von Mikrowellen oder des Lichtes abgeleitet. Dadurch, daß in allen Bereichen der Geodäsie dieses Meßprinzip genutzt wird, sind die heutigen großen Fortschritte möglich geworden.

Die begrifflichen Probleme werden deutlich, wenn ein größerer Teil der Erdoberfläche vermessen werden bzw. die geforderte Genauigkeit ein gewisses Maß übersteigen soll, oder wenn mehrere Meßgebiete zusammengefügt oder miteinander verglichen werden sollen. In diesen Fällen ist eine Ebene als Bezugsfläche nicht mehr ausreichend. Die Messungen zeigen, daß die Lotrichtungen in den Festpunkten sich relativ zur Ebene mit der Entfernung systematisch ändern.

Eine sehr gute Lösung bringt bereits der Übergang von der Ebene zur nächst einfachen Bezugsfläche, zur Kugeloberfläche. Damit kann man das gesamte Gebiet stückweise in der oben beschriebenen Weise vermessen und die Teilergebnisse einfach aneinander legen. Das Bezugssystem, insbesondere seine Orientierung, kann aber nicht mehr willkürlich gewählt werden.

Zur Lösung dieses Problems führt die Beobachtung, daß die Erde und der Fixsternhimmel sich offensichtlich relativ zueinander drehen und daß die Drehgeschwindigkeit und die Richtung der Drehachse relativ zum Erdkörper und relativ zu den Fixsternen sogar außerordentlich konstant sind.

Astronomische Beobachtungen können zur Orts- und Richtungsbestimmung auf der Erdoberfläche genutzt werden; allerdings kann nur die Lage, nicht die Höhe bestimmt werden. Auf hoher See gab es lange Zeit keine andere Möglichkeit zur Ortsbestimmung. Auf dem Festland können die Punkte mit astronomischen Beobachtungen als Kontrollpunkte in die geodätischen Netze einbezogen werden. Es ist eine Frage der erreichbaren Genauigkeit, wie man das macht. Während man die geographische Breite bereits in der Antike recht genau bestimmen konnte, hat es bis zur 2. Hälfte des 19. Jhd. gedauert, bis man die geographische Länge „in den Griff bekam“. Dazu mußten genau gehende Uhren erfunden und entwickelt und für den Uhrenvergleich die Nachrichtenübertragung mit Hilfe von elektromagnetischen Wellen genutzt werden.

Die Zusammenführung von Geodäsie und Astronomie erfolgte vor zweieinhalb bis drei tausend Jahren. Ihre Verbindung wirft eine Fülle von Fragen nach den Eigenschaften und dem dynamischen Verhalten der Erde auf. Als wichtigste Probleme seien nur genannt: die Deformation der Erde durch die Zentrifugalkraft, die Schwankungen der Erdrotation, die Gezeiten. Bis heute



ist nicht exakt gelöst, wie die Erdatmosphäre zu berücksichtigen ist. Sie liegt oberhalb der Erdoberfläche, wirkt sich aber in der Erdrotation aus.

Astronomisch-geodätische Beobachtungen erbrachten bereits vor 25 Jahrhunderten den Beweis dafür, daß die Erde im Großen und Ganzen als Kugel angesehen werden kann, genauer formuliert: daß man als Bezugsfläche für die geodätischen Messungen eine Kugeloberfläche verwenden sollte.

Erst 22 Jahrhunderte später, im Jahre 1736/37, wurde durch astronomisch-geodätische Beobachtungen bewiesen, daß ein Rotationsellipsoid, das an den Polen abgeplattet ist, eine viel bessere Näherung ist.

Spätestens Karl Friedrich Gauß hat zu Beginn des 19. Jhd. erkannt, daß auch das nicht ausreicht und als Bezugsfläche eine bestimmte Äquipotentialfläche der Schwerkraft, nämlich das später so genannte Geoid, anzusehen ist.

Was Gauß dazu bewogen hat, zeigt sich, wenn man darüber nachdenkt, was die Geodäten bei ihren Messungen und bei der Wahl des Bezugssystems auch in den einfachsten Fällen eigentlich tun. Sie beziehen sich auf die Lotrichtung im Meßgebiet, das heißt auf den Richtungsvektor des Schwerfeldes der Erde, allgemeiner: auf die geometrische Struktur des Schwerfeldes im Meßgebiet. Diese ist viel glatter als die Geometrie der physischen Erdoberfläche, weil sie sich aus der Integration über die gesamte Masse der Erde ergibt. Die örtlichen Unregelmäßigkeiten in der Massenverteilung wirken sich in der örtlichen Struktur des Schwerfeldes kaum aus.

Also: Das Ziel der geodätischen Messungen sind geometrische Größen (die räumlichen Koordinaten der Festpunkte auf der Oberfläche der Erde), dem Meßprozeß liegt jedoch ein physikalisches Modell (das der Massenverteilung der gesamten Erde) zu Grunde. Dieses Modell muß mit möglichst wenigen Annahmen über die reale Massenverteilung in der Erde auskommen, da diese viel zu wenig bekannt ist. Grundsätzlich dürfen die Annahmen zum Modell das angestrebte Meßergebnis nicht wesentlich beeinflussen. Wenn die Geodäten im Ergebnis der Vermessung die Bezugsfläche geometrisch durch die Koordinaten der dabei genutzten Festpunkte definieren, möchten sie sich im Grunde genommen von den Annahmen zur Massenverteilung lösen. Damit umgehen sie auch das Problem, daß ihr mathematisch einfaches Referenzmodell die physikalischen Verhältnisse im Erdinnern nur unzureichend widerspiegeln kann. Das zeigt sich deutlich beim sog. Internationalen Geodätischen Referenzellipsoid (World Geodetic Datum).

Aus der Betrachtung schon der einfachsten Fälle wird ein weiteres Prinzip ersichtlich, dem die Geodäten bei ihrem Vorgehen folgen: das Prinzip der schrittweisen Näherung, sukzessiven Approximation oder Iteration. Die suk-

zessive Approximation funktioniert nur dann, wenn in jedem Näherungsschritt ein neues, sorgfältig durchdachtes Modell eingeführt wird und weitere Meßmethoden eingesetzt werden. Diese Forderung ergibt sich mathematisch gesehen daraus, daß der Gesamtprozeß der Gewinnung der geodätischen Information komplex und darüber hinaus nichtlinear ist. Es gibt manche Anzeichen dafür, daß die Iteration nicht konvergiert und auf chaosartige Verhältnisse hinausläuft.

Auf der Verbindung zwischen der geometrischen Form der Erdoberfläche und dem Schwerfeld der Erde beruht auch die Rolle der Meere und Ozeane in der Geodäsie. Die Alltagserfahrungen besagen, daß sich das Wasser immer an der tiefsten Stelle der Erdoberfläche sammelt und daß die Oberfläche eines ungestörten Wasserkörpers überall senkrecht zur Lotrichtung ist. Wenn man die Störungen durch Strömungen, Wellen und Wind vernachlässigen könnte, müßte die Oberfläche der Weltmeere also eine Äquipotentialfläche des Schwerfeldes oder, anders gesagt, eine Niveaufläche des Schwerepotentials sein. Die praktische Konsequenz für die Geodäsie ist, daß man unter bestimmten Voraussetzungen die ungestörte Oberfläche der Weltmeere als Bezugsfläche für die Höhenmessungen in allen Teilen der Erdoberfläche ansehen und nutzen kann. Die entsprechende Niveaufläche des Schwerepotentials wird Geoid genannt.

Leider gibt es bei der Nutzung des Geoids große theoretische und praktische Probleme.

Zum einen muß man bei der Höhenbestimmung das Geoid in jedem Meßpunkt kennen, auf dem Festland also gewöhnlich im Untergrund, der für Messungen nicht zugänglich ist. Man muß folglich extrapolieren oder die gesamte Struktur des Schwerfeldes auf und oberhalb der Erdoberfläche bestimmen. Das Geoid hat nur in gewisser Näherung die Form eines an den Polen abgeplatteten Rotationsellipsoids, mit dem es sich bei der Bearbeitung der geodätischen Messungen recht gut rechnen läßt. Die Geoidundulationen gegenüber dem Ellipsoid (bis zu wenigen hundert Metern groß) werden durch die Unregelmäßigkeiten der Massenverteilung im Erdinnern verursacht.

Die Nutzung des Meeresniveaus als Bezugsfläche für die Höhenmessung erfordert die permanente Messung des Meeresspiegels an möglichst vielen Wasserstandsmessern, Pegeln. Es hat sich sehr bald gezeigt, daß das Festland am Ort mancher Pegel sich gegenüber dem Massenmittelpunkt der Erde meßbar hebt und senkt. Der Vergleich der Pegel ist nur in internationaler Zusammenarbeit möglich. Der Vergleich über die Ozeane hinweg erfordert zusätzliche globale geodätische Messungen.

Nachdem die überragende Bedeutung des Geoids für die Geodäsie erkannt worden war, wurde es zu einer vordringlichen Aufgabe der Geodäsie, das Geoid und, allgemeiner, die Struktur des Schwerfeldes weltweit zu bestimmen.

Die Grundlage dafür bilden die Schweremessungen. Sie liefern im jeweiligen Meßpunkt bestenfalls die Richtung und den Betrag des Schwerevektors, d.h. die Lotrichtung und den Abstand zwischen den Niveaulflächen, sowie die Krümmung der Niveaulflächen.<sup>1</sup> Die Schwere kann seit dem Ende des 20. Jhd. in einem stabilen Meßpunkt auf etwa  $10^{-10}$  genau, bezogen auf den Absolutbetrag der Schwerkraft, gemessen werden. Das wurde innerhalb von zwei Jahrzehnten durch einen Sprung in der Meßgenauigkeit der Gravimeter um drei bis vier Zehnerpotenzen erreicht. Damit ergibt sich die merkwürdige Situation, daß die Schwere in einem stabilen Meßpunkt genauer gemessen werden kann, als die Koordinaten dieses Punktes bezogen auf das geozentrische Bezugssystem bekannt sind.

Das Fazit aller dieser Überlegungen ist, daß man die geometrische Form der Erdoberfläche nur mathematisch-physikalisch einwandfrei bestimmen kann, wenn man die Erde als Ganzes untersucht und im Prinzip in jedem Punkt der Erdoberfläche geodätische, gravimetrische und astronomische Meßwerte gewonnen hat. Das gilt auch, wenn man sich auf Teilgebiete der Erdoberfläche beschränken will.

Die Geodäsie sucht die Lösung einer spezifischen Randwertaufgabe der mathematisch-physikalischen Potentialtheorie. Man kennt das Potential des Schwerfeldes auf und oberhalb der Oberfläche der irdischen Massenverteilung und sucht die Form dieser Oberfläche. Die Lösung erfolgt durch sukzessive Approximation. Die Schwierigkeiten bei der Lösung der Randwertaufgabe sind zweifacher Art - bedingt durch die Unvollständigkeit des Beobachtungsmaterials und zum andern durch das mathematische Verfahren. Die Überwindung dieser Schwierigkeiten hat nicht nur akademische, sondern eminent praktische Bedeutung. Von ihr hängt entscheidend ab, welches geodätische Bezugssystem in den einzelnen Ländern als verbindlich für die amtlichen Kartenwerke gelten soll. In den ehemals sozialistischen Ländern war das von dem sowjetischen Geodäten Molodenskij entwickelte Verfahren verbindlich. Nach dem Zusammenbruch der sozialistischen Länder wird an-

---

1. Zur Einführung und Übersicht ist u.a. zu empfehlen das Lehrbuch von Wolfgang Torge: Gravimetry. Berlin, New York: de Gruyter, 1989.

scheinend dieses Verfahren mit vielen praktischen Folgen im Westen übernommen.

Leider gilt die strenge Formulierung der Randwertaufgabe und ihrer Lösung nur für ein statisches Erdmodell, das stationär rotiert. Die Geodäsie muß sich deshalb wohl oder übel intensiv mit den zeitlichen Änderungen aller Größen befassen, die für ihre unmittelbare Aufgabe gebraucht werden. Bis heute werden diese Änderungen in der Geodäsie als Störungen betrachtet, die durch geeignete Verfahren zu eliminieren sind. Man spricht von Korrekturen und Reduktionen.

Es wurde schon gesagt, daß mit terrestrischen geodätischen Messungen die Meere und Ozeane praktisch nicht überwunden werden können. Bis zum Ende der 60er Jahre des 20. Jhd. konnten die regionalen geodätischen Netze auf verschiedenen Kontinenten nur mit der Genauigkeit der astronomisch-geodätischen Ortsbestimmung miteinander verbunden werden. Diese ist nicht viel besser als etwa 1 km, d.h.  $10^{-4}$ , bezogen auf den Durchmesser der Erde. Es gab zwar viele Versuche, indirekte Sichtverbindungen herzustellen und Ballons oder den Mond als Hochziele zu verwenden. Sie brachten keine praktischen Ergebnisse, aber methodische Erfahrungen, die bald genutzt werden konnten.

Die geodätische Verbindung aller Kontinente, schließlich operativ zwischen allen Punkten der Erdoberfläche, wurde und wird durch die geodätische Nutzung der künstlichen Erdsatelliten, kurz: Satellitengeodäsie, erreicht. Die künstlichen Satelliten wurden zuerst als Hochziele genutzt, dann als Sonden im Schwerfeld der Erde und dann als aktive Bezugspunkte eines globalen Navigationssystems aus diesen Satelliten im erdnahen Weltraum. Die Satellitengeodäsie brachte innerhalb von drei Jahrzehnten einen Sprung in der Genauigkeit der Ortsbestimmung für beliebige Punkte der Erdoberfläche um 5 bis 6 Zehnerpotenzen. Zu Beginn des 21. Jhd. beträgt die maximale Genauigkeit  $10^{-9}$ , d. h. absolut etwa 1 cm in allen drei Koordinaten eines geozentrischen Koordinatensystems.

Bei der geodätischen Nutzung der künstlichen Erdsatelliten spielen die Grundfragen der Geodäsie erneut eine große Rolle. Sie erscheinen nur auf eine andere Weise miteinander verknüpft. Die Satellitengeodäsie ist keinesfalls unabhängig von den terrestrischen Methoden. Die größte praktische Bedeutung hat die Nutzung der Satelliten für die Navigation oder operative Ortung erreicht. Seit etwa zehn Jahren sind zwei globale Satellitennavigationssysteme realisiert, das schon allgemein bekannte Global Positioning

System (GPS) der USA und das GLONASS, das noch die Sowjetunion eingerichtet hat. Das beste ist das GPS.<sup>1</sup>

Das GPS besteht aus 24 Satelliten, die in Höhe von etwa 20.000 km freifliegend die Erde umlaufen, und zwar auf Bahnen, die eine Neigung von  $63^\circ$  besitzen. In jedem Punkt der Erdoberfläche sind damit jederzeit mindestens 4 Satelliten sichtbar. Jeder Satellit sendet permanent modulierte Mikrowellensignale aus, die auch Informationen über seine Umlaufbahn enthalten und Uhrenvergleiche auf  $10^{-13}$  genau ermöglichen. Wenn man in einem Meßpunkt mit Hilfe eines geeigneten Meßgerätes gleichzeitig die Signale von drei Satelliten empfängt, kann man die momentane Position dieses Meßpunktes relativ zu den Bahnen dieser drei Satelliten bestimmen. Mit Hilfe der Bahn-  
daten der Satelliten ergeben sich dann die geozentrischen Koordinaten des Meßpunktes.

Das geodätische Problem besteht vor allem darin, die Bahnen der GPS-Satelliten relativ zur Erde mit höchstmöglicher Präzision zu bestimmen und zu überwachen. Um das Problem zu durchschauen, braucht man eigentlich nur die Bahn eines Satelliten zu betrachten. Die Bahn um die Erde ist in erster Näherung eine Kepler-Ellipse, die mit der Erde mitgeführt wird, deren Neigung aber raumfest ist. Die Erde dreht sich innerhalb dieser Bahn und verursacht durch die Unregelmäßigkeiten in ihrer Massenverteilung verschiedenartige Störungen der Ellipse.

Wenn die Bahn des Satelliten von mehreren Meßstationen aus permanent verfolgt wird, können diese Störungen bestimmt und daraus wieder Daten über die Massenverteilung in der Erde und das Rotationsverhalten der Erde abgeleitet werden.

Die Analyse erfordert aufwendige Iterationsrechnungen. Im ersten Schritt werden die Beobachtungen in bezug auf die Drehbewegung der Erde relativ zur Bahnebene des Satelliten reduziert. Die Daten dazu müssen unabhängig durch geodätisch-astronomische Beobachtungen beschafft werden. Die Höhe der GPS-Satelliten über der Erdoberfläche ist so hoch, daß ihre Bahnen durch die Unregelmäßigkeiten des Schwerefeldes der Erde nur noch relativ wenig beeinflußt werden. Um das Schwerefeld der Erde zu untersuchen, werden

---

1. Inzwischen wurde bekannt, daß der Ministerrat der Europäischen Union beschlossen hat, ein eigenes europäisches Globales Navigations-Satelliten-System für zivile Zwecke mit der Bezeichnung „Galileo“ zu errichten.

spezielle Satelliten in geringer Höhe (etwa 500 km) benötigt.<sup>1</sup> Deren Bewegungen werden jedoch schon durch die Atmosphäre beeinflusst, und dieser Einfluß muß durch geeignete zusätzliche Vorrichtungen gemessen werden. Die Bahn des Satelliten wird auf ein rein geometrisch definiertes Koordinatensystem mit dem Massenmittelpunkt der Erde als Ursprung bezogen. Ein solches System wird in der Geodäsie „dreidimensional“ und geozentrisch genannt. Wenn man die Lage des Beobachtungspunktes auf der Erdoberfläche relativ zu den Umlaufbahnen der GPS-Satelliten bestimmt, erhält man die Lage des Beobachtungspunktes in bezug auf das dreidimensionale geozentrische System. Man erhält aus dem GPS keine Angaben für die Höhe des Beobachtungspunktes in bezug auf das Geoid. Dazu braucht man zusätzlich die Kenntnis der geometrischen Struktur des Schwerefeldes der Erde.

Die beste Genauigkeit bei der Bahnverfolgung des Satelliten bringt die Lasermessung der Entfernung zwischen Station und Satellit (Genauigkeit 1 cm) in Abhängigkeit von der Zeit (auf Mikrosekunden genau). Bei dieser Genauigkeit zeigen die Bahnstörungen, daß die Erde kein starrer Körper ist. Sie wird in gesetzmäßiger Weise von den Gezeiten deformiert. Das muß schon bei der Definition des Bezugssystems beachtet werden. Zum anderen sind die Meßpunkte keine Festpunkte, sie unterliegen erkennbar tektonischen Bewegungen. Diese werden bei der Realisierung des Systems als Korrekturen behandelt und gehören erst nachträglich zu den Forschungszielen.

Auf die von den Geodäten gemeinsam mit den Astronomen durchgeführten Arbeiten zur Untersuchung und Überwachung der Erdrotation wurde im Vortrag bereits mehrfach hingewiesen. Es ist ein wichtiges und faszinierendes Arbeitsgebiet, so daß dazu einiges mehr gesagt werden muß.<sup>2</sup>

Die Erde verhält sich wie ein Kreisel. Das Verhalten wird schon viele Jahrhunderte lang beobachtet, und zwar mit ansteigender Genauigkeit, man erkennt immer neue Details. Das bringt jedoch die Gefahr, daß die säkularen Vorgänge von einer wachsenden Flut von Details überdeckt werden. Die mathematisch-physikalische Beschreibung des Rotationsverhaltens hat bereits eine hohe Reife erreicht. Es ist aber nicht möglich, das Verhalten mit der erforderlichen Genauigkeit zu prognostizieren. Daraus ergibt sich die sehr

1. Das zeitlich letzte derartige Experiment heißt „Gravity Recovery and Climate Experiment“ (GRACE). Es wird von der NASA gemeinsam mit dem Geoforschungszentrum Potsdam durchgeführt. Die beiden GRACE-Satelliten wurden am 16.03.2002 gestartet.
2. Eine fundierte Darstellung bietet das Buch von Helmut Moritz und Ivan I. Mueller: *Earth Rotation. Theory and Observation*. New York: Ungar 1987.

große Bedeutung der kontinuierlichen Arbeit des Internationalen Dienstes zur Überwachung der Erdrotation (englisch: IERS). Die physikalische Theorie zur Erklärung des Rotationsverhaltens erfordert Aussagen zum gesamten System Erde: Erdkörper + Ozeane + Atmosphäre, zum strukturellen Aufbau und zu den rheologischen Parametern des Erdinnern ebenso wie zu den dynamischen Vorgängen in den Ozeanen und der Atmosphäre, einschließlich zu der daraus resultierenden wechselnden Belastung des Erdkörpers.

Die Geodäten befassen sich in erster Linie mit der Beobachtung und der mathematisch-physikalischen Beschreibung des Rotationsverhaltens. Das Kunststück besteht auch hier darin, Größen zu definieren, die sowohl eine sinnvolle, von Voraussetzungen freie Beschreibung ermöglichen als auch beobachtet werden können.

### **Die aktuelle Situation**

Die Entwicklung der Geodäsie kennt Zeitabschnitte, in denen große Fortschritte erfolgt sind, aber keine Unstetigkeiten im Sinne der Mathematik. Die Bemerkungen zur aktuellen Situation können deshalb direkt an die Ausführungen im letzten Abschnitt anschließen. Ohne zu wiederholen, was dort bereits zum gegenwärtigen Stand und den anstehenden Problemen ausgeführt wurde, soll jetzt noch etwas zu folgenden vier Teilgebieten bzw. Problemstellungen gesagt werden: A) kleinräumige Vermessungen, B) regionale Vermessungen, C) Meeresgeodäsie, D) geodätische Nutzung der Erdsatelliten.

#### **Zu A:**

Der Fortschritt bei den kleinräumigen Vermessungen wird durch die ingenieurwissenschaftlichen Forschungen und Entwicklungen, vor allem durch die allseitige Nutzung der Informationstechnik gekennzeichnet. Es gibt Versuche, die neuen Systeme der Satellitennavigation auch für dieses Teilgebiet zu nutzen. Der Nutzen dürfte davon abhängen, ob und wie weit deren Genauigkeit erhöht werden kann.

#### **Zu B:**

a) Bei den regionalen Vermessungen hat die astronomisch-geodätische Ortsbestimmung an Bedeutung verloren. An deren Stelle ist die Nutzung des GPS getreten. In technischer Hinsicht sind damit die Voraussetzungen gegeben, daß die Landesvermessungen in allen Ländern völlig vergleichbar durchgeführt und miteinander verbunden werden können. Nach dem Zusammenbruch des Sozialismus beteiligen sich auch die ehemals sozialistischen

Länder, mit Ausnahme der Russischen Föderation, an derartigen internationalen Projekten.

b) Zu einem Schlüsselproblem der Geodäsie entwickeln sich gegenwärtig sehr deutlich die Höhenbestimmungen, insbesondere wenn eine Genauigkeit gefordert wird, die mit der Genauigkeit der Lagebestimmungen vergleichbar ist. Die Ursachen dafür liegen vor allem in den Problemen bei der Bestimmung des Schwerefeldes.

Auf dem Festland kann die Schwerkraft in einem Meßpunkt seit einigen Jahren genau genug gemessen werden. Es gibt jedoch immer noch große Lücken in der flächenhaften und ausreichend detaillierten Aufnahme des Schwerefeldes. Auf den Meeren und Ozeanen gibt es inzwischen geeignete Meßverfahren in Form der Altimetrie. Es ist aber nach wie vor nicht ausreichend klar, auf welche Fläche die Schweremessungen bezogen werden sollen. Die Wasseroberfläche ist dafür nicht geeignet, weil sie viel zu stark veränderlich ist. Schwierigkeiten gibt es auch bei den vereisten Gebieten, die sich ebenfalls relativ stark verändern.

Zur Lösung für diese Probleme wären zwei Wege denkbar: Zum einen könnte man sich ein globales geodätisches Beobachtungssystem vorstellen, mit dessen Hilfe das Schwerefeld weltweit kontinuierlich bestimmt und überwacht werden kann, so daß zeitliche Mittelwerte gebildet werden können. Der IAG ist ein solches Projekt kürzlich vorgeschlagen worden. Die Randwertaufgabe der Geodäsie könnte dann in gewisser Näherung wie bisher für den Fall eines statischen Erdmodells gelöst werden. Zum andern wäre es denkbar, die Randwertaufgabe auf den Fall eines zeitlich veränderlichen Erdmodells zu erweitern. Solche theoretischen Versuche sind mir bisher nicht bekannt.

c) Natürlich ist es in der Zukunft der Geodäten viel mehr beliebt und letztlich auch erfolgreich, sich mit überschaubaren Projekten, die international nur locker abgestimmt sind, zu befassen als alle Kräfte in die Mitwirkung an großen, straff organisierten internationalen Programmen zu stecken. Auch für solche Projekte besteht ein großer Bedarf. Ihr Ziel ist vor allem die Untersuchung der Bewegungen der Erdkruste in geowissenschaftlich interessanten Regionen sowie der relevanten Schwereänderungen. Zunehmend interessieren in ähnlicher Weise die Veränderungen der Eismassen. Die Geodäsie beteiligt sich damit an der Erforschung des „Systems Erde“, wie heute die ganzheitlichen Arbeiten der Geowissenschaften unter Betonung der Umweltproblematik bezeichnet werden.



d) Als ständige Aufgabe der praktischen Geodäsie gilt nach wie vor die sog. Laufendhaltung der geodätischen Datensätze. Darunter versteht man die Erhaltung, Ergänzung, Erweiterung und Modernisierung der schon einmal durchgeführten Regional- und Landesvermessungen. Weite Gebiete der Erdoberfläche, besonders in den Entwicklungsländern, sind auch heute noch nicht befriedigend oder überhaupt noch nicht aufgenommen worden. Hinzu kommt die Verbindung der Landesvermessungen zu einer homogenen weltweiten geodätischen Aufnahme. Diese aufwendigen Arbeiten müssen wissenschaftlich, insbesondere ingenieurwissenschaftlich, begleitet werden.

**Zu C:**

a) Der Begriff „Meeresgeodäsie“ wurde zu Beginn der zweiten Hälfte des 20. Jhd. geprägt. Der Anlaß war damals die Ausdehnung der Landesvermessungen auf die küstennahen Bereiche, um die sog. „Wirtschaftszonen“, in denen die mineralischen Rohstoffe im Meeresuntergrund ausgebeutet werden, genau genug markieren zu können. Diese Aufgabe ist dank Nutzung der Navigationssatelliten gelöst. Aus dem gleichen Grunde ist auch die Lagebestimmung auf hoher See am Beginn des 21. Jhd. praktisch kein Problem mehr.

b) Es wurde schon betont, daß das Höhenproblem immer noch aktuell ist. Man muß diese Aussage aber weiter fassen: Die Geodäsie hat große Probleme mit dem Einfluß der Wassermassen auf die Struktur der Erdoberfläche und die Struktur des Schwerefeldes. Hinzu kommt noch der Einfluß der Wassermassen auf die Rotation der Erde. Das sind Probleme der Dynamik. Sie sind im Ansatz schon lange bekannt. Heute kann man messen. Bei ihrer Aufklärung arbeiten die Geodäten eng mit den Ozeanologen zusammen. Auch diese Arbeiten werden der Erforschung des „Systems Erde“ zugeordnet.

c) Die wichtigste Methode zur Höhenmessung im marinen Bereich ist die sog. Satellitenaltimetrie. Dabei wird die Flughöhe des Satelliten über der Wasseroberfläche mittels Radar gemessen. In mehreren Iterationsschritten erhält man aus diesen und weiteren Daten die Höhe des Meeresspiegels relativ zum Erdmittelpunkt, sprich: zum Erdellipsoid, die Undulationen des Geoids gegenüber dem Ellipsoid und schließlich die Abweichungen des Meeresspiegels gegenüber dem Geoid. Diese Abweichungen werden durch Wellen, Meeresströmungen, regionale Unterschiede in der Wassertemperatur und im Salzgehalt u.ä. verursacht. Es muß wohl nicht betont werden, daß die Satellitenaltimetrie - wie die Satellitengeodäsie generell - nur von den ökonomisch und wissenschaftlich-technisch stärksten Staaten betrieben werden kann. Wie die Geodäten in den anderen Ländern daran mitwirken und sie nut-

zen können und müssen und wie das organisiert wird, wäre das Thema eines weiteren Vortrages.

**Zu D:**

Am Beginn des 21. Jhd. steht die geodätische Nutzung der künstlichen Erdsatelliten absolut im Mittelpunkt der wissenschaftlichen und der praktischen Geodäsie. Diese Aufgabe ist nur in straff organisierter internationaler Zusammenarbeit zu lösen. Sie bestimmt in hohem Maße die Tätigkeit der IAG. Ein Ausdruck dafür ist der "International GPS Service (IGS)", der von der IAG eingerichtet wurde und organisiert wird.<sup>1</sup>

Der IGS begann seine Aktivitäten offiziell am 1. Januar 1994 nach einer erfolgreichen mehr als einjährigen Pilotphase. Der IGS heißt seit 1999 ausführlich "International GPS Service to support geodetic and geophysical research activities, through GPS data and data products". Der IGS vereinigt über 250 weltweit verteilte permanente GPS-Tracking-Stationen, drei Global Data Centers, viele operationelle oder regionale Datenzentren, sieben Analysezentren, einen Koordinator der Analysezentren, einen Koordinator für das IGS-Referenz-System und ein Zentralbüro. Geführt wird der IGS durch einen Vorstand; dessen Vorsitzender ist z.Z. ein Wissenschaftler aus der BRD.

Die Global Data Centers befinden sich in den USA und in Frankreich. Der Koordinator der Analysezentren arbeitet in der Schweiz, der Koordinator für das IGS-Referenz-System in Kanada. Das Zentralbüro befindet sich in den USA und wird durch die NASA finanziert. Der IGS umfaßt Arbeitsgruppen: IGS-Referenz-System, Troposphäre, Ionosphäre, Echtzeit-Anwendungen und fördert Projekte: Präzise Zeitübertragung, Orbiter in niedrigen Bahnen, den International GLONASS Service und das Project for Sea Level Studies. An diesen Aktivitäten beteiligen sich über 100 Institutionen und Organisationen.

Der IGS bietet routinemäßig an: die hochwertigen Bahndaten für alle GPS-Satelliten (genauer als 5 cm) und die vorläufigen Bahndaten (etwa 25 cm genau); die Parameter der Erdrotation; die Bestimmung der Koordinaten der Tracking-Stationen und ihrer zeitlichen Änderungen im internationalen terrestrischen Referenzsystem (ITRF).

1. Ausführliche Informationen über den IGS enthält die Broschüre „International GPS Service. Information and Resources. 2001“, herausgegeben vom IGS Central Bureau, JPL MS 238-580, 4800 Oak Grove Drive, Pasadena, CA 91109.

Das Zentralbüro unterhält ein IGS Information System (CBIS). Es ist im World Wide Web unter <http://igsb.jpl.nasa.gov> zugänglich.

Der IGS bietet seit 2001 routinemäßig folgende Datenprodukte an:

- die geozentrischen Koordinaten und deren zeitliche Änderungen von über 130 gleichmäßig verteilten IGS-Tracking-Stationen. Die Genauigkeit der endgültigen Werte für die horizontale bzw. vertikale Position beträgt 3 mm bzw. 6 mm. Die Werte stehen nach 12 Tagen bereit. Die Genauigkeit der endgültigen Werte für die Änderungen beträgt 2 mm/a bzw. 3 mm/a.
- die Parameter der Erdrotation Polbewegung und Änderungen der Polbewegung bzw. der Tageslänge. Die Genauigkeit der Werte, die nach 17 Stunden bereitstehen, beträgt 0,2 mas bzw. 0,4 mas/per day und 0,03 ms/per day. Die Genauigkeit der endgültigen Werte, die nach 13 Tagen verfügbar sind, beträgt 0,1 mas bzw. 0,2 mas/per day und 0,02 ms/per day.
- die atmosphärischen Parameter. Die Genauigkeit der endgültigen Werte für die Verzögerung längs des Weges vertikal durch die Troposphäre, die nach 4 Wochen verfügbar sind, beträgt 4 mm. Angaben für die Ionosphäre sind in Entwicklung.

Der IGS zeigt, daß die geodätische Nutzung der künstlichen Erdsatelliten ein sehr hohes Niveau erreicht hat. Daraus darf nicht geschlossen werden, daß die wissenschaftlichen Fragen befriedigend geklärt und nur noch technische Verbesserungen notwendig wären. Das Hauptproblem besteht auch in der Satellitengeodäsie darin, die zeitlichen Änderungen des Systems Erde „in den Griff“ zu bekommen. Lösungen dafür werden in den oben genannten Projekten gesucht. Die Satellitengeodäsie hat dabei den Vorteil und zugleich die Schwierigkeit, daß sie global arbeitet.

## **Zwei Schlußbemerkungen**

Die Geodäsie ist am Beginn des 21. Jhd. nach wie vor ein Musterbeispiel dafür, wie dank des wissenschaftlichen Herangehens Aufgaben praktisch gelöst werden können, die man nur als Teil einer Gesamtheit exakt verstehen und lösen kann und für die jeweils nur fehlerbehaftete Beobachtungen mit großen Lücken beschafft werden können.

Die Geodäsie hat am Beginn des 21. Jhd. ein Niveau erreicht, auf dem es ihr möglich ist, in Wissenschaft und Praxis ihre „alten“ Probleme auf neue Weise anzugehen. Es ist erfreulich, daß die deutschen Geodäten daran an vorderster Front mitwirken. Bei aller Freude darüber darf nicht vergessen oder verschwiegen werden, daß dabei auch die Voraussetzungen genutzt werden, die von der Geodäsie in der ehemaligen DDR geschaffen wurden. Die Geo-

däsie in der DDR wurde - für sich gesehen und in der Zusammenarbeit mit der Geodäsie in der untergegangenen Sowjetunion und den anderen ehemals sozialistischen Staaten - auf einem hohen Niveau betrieben. (Siehe Anm. 7) Beim Anschluß der DDR an die BRD wurden die Arbeitsstätten in der DDR mit ihrer durchweg großen Tradition, die zu Zeiten der DDR erarbeitete Datenbasis und zahlreiche Mitarbeiter übernommen. Für die Institutionen wurde eine neue Führung aus der alten BRD eingesetzt. Man kann dieser bestätigen, daß sie die ihr gebotene Chance gut genutzt hat. Das Institut in Potsdam ist heute in der erweiterten BRD das führende Zentrum der Geodäsie mit großer internationaler Ausstrahlung, so wie es das vierzig Jahre lang in der DDR war und zuvor seit der Begründung durch Baeyer und Helmert – beide waren Mitglieder der Leibnizschen Gelehrtensozietät – in den sechs Jahrzehnten bis zum Beginn des 1. Weltkrieges im Deutschen Reich. Für die Zentren in Leipzig und Dresden wäre ähnliches zu sagen.

## Anhang

Zur Wissenschaftlichen Generalversammlung der Internationalen Assoziation für Geodäsie: Die Proceedings liegen auf einer CD-ROM vor, die vom Zentralbüro der IAG per e-mail unter [iag@gfy.ku.dk](mailto:iag@gfy.ku.dk) angefordert werden kann.

Übersicht: „Vistas for Geodesy in the New Millennium“

IAG 2001 Scientific Assembly

2-7 September 2001, Hungary, Budapest

Organized by the International Association of Geodesy and the Hungarian Academy of Sciences

Program:

Symposium A: Fine-tuning Reference Frame Implementation

5 Sessions

Postersession of Symposium A

Symposium B: From Eötvös to Satellite Gradiometry – New Vistas in Measuring and Modelling the Earth’s Gravity Field

5 Sessions

Postersession of Symposium B

Symposium C: Geometry and Beyond – Using Global Navigation Satellite Systems (GNSS) in New Ways

5 Sessions

Postersession of Symposium C

Symposium D: Modelling Earth Processes and Global Change

5 Sessions

Postersession of Symposium D

Special Session E1: Scientific Cooperation in Geodesy and Geophysics in Central and Eastern European Countries (CEEC)

Special Session E2: Research Challenges for Young Scientists

Special Session E3: Information Session on the New Structure of the IAG

450 Teilnehmer aus 53 Ländern

angemeldet 450 papers, präsentiert 379 papers, 126 oral, 253 posters

