

Horst Montag

## **Gedanken zur faszinierenden Entwicklung der Geodäsie seit den 1950er Jahren**

### **1. Einige Bemerkungen zum Stand der Landesvermessung Mitte der 1950er Jahre**

Ziel der Landesvermessung ist die Schaffung geodätischer Grundlagennetze für die Lage, die Höhe und das Schwerefeld als Referenzrahmen für alle weiteren Vermessungen eines Landes. Die klassische Meßmethode für die Lage-Grundlagennetze war die Triangulation. Die auf diese Weise geschaffenen großräumigen geodätischen Netze waren prinzipiell auf die Kontinente beschränkt, da die Ozeane, abgesehen von einigen Meerengen, nicht überbrückt werden konnten. Sie waren also immer nur „Insellösungen“. Die in den 1950er Jahren aufkommenden Mikrowellenentfernungsmessungen über große Distanzen ermöglichten neben den Triangulationsnetzen auch die Punktbestimmung durch Trilaterationsnetze. Die erwähnten Einschränkungen trafen aber auch auf die Trilaterationsnetze zu, und auch das Genauigkeitspotential blieb in der gleichen Größenordnung.

Die instrumentelle Ausrüstung bestand im Wesentlichen aus Sekundentheodoliten für astronomische Anschlussmessungen und die Triangulationen, aus Invardrähten für die Basismessungen zur Bestimmung des Maßstabes des Netzes und den ersten Mikrowellenentfernungsmessern für die Trilaterationen. Großen Aufwand erforderte der Bau von Signaltürmen über den trigonometrischen Punkten zur Gewährleistung der direkten Sicht über die großen Distanzen. Für die Höhenreferenznetze dienten Präzisions-Libellennivellierinstrumente (und erste Kompensatornivelliere) und für die Schwere-Grundlagennetze wurden neben wenigen stationären Pendelapparaten vor allem Präzisions-Federgravimeter eingesetzt.

Parallel bzw. im Vorlauf zu den Entwicklungen der Messtechnik wurden die Lösungen der theoretischen Probleme (ellipsoidische Rechnung und Abbildung, Theorie der physikalischen Höhen, Potentialtheorie) entsprechend

den jeweiligen Anforderungen ständig verfeinert. Die Hilfsmittel zur Auswertung der Messdaten entsprechend diesen Theorien waren allerdings in Anbetracht heutiger Möglichkeiten sehr bescheiden. Sie waren geprägt durch Formulare, Logarithmentafeln (9- oder mehrstellig, Interpolation mit zweiten Differenzen), Astronomische Jahrbücher und mechanische Rechenmaschinen (meist Doppellaufwerk zur gleichzeitigen Berechnung von  $x$  und  $y$ ).

Die bei den klassischen Grundlagenvermessungen für die Lagekoordinaten angewendeten Mess- und Auswertemethoden wurden zwar im Laufe der Jahrzehnte immer weiter verbessert, ihre Fortschritte wurden aber zunehmend geringfügiger. Das Genauigkeitspotential erreichte Mitte der 1950er Jahre etwa  $10^{-5}$  bis  $10^{-6}$  und war damit quasi erschöpft. Die klassischen Methoden waren so praktisch zu ihrem Höhepunkt gelangt.

## 2. Satelliten revolutionieren die Geodäsie

Mit dem Start von Sputnik I am 4. Oktober 1957 wurde auch in der Geodäsie eine neue Ära eröffnet, die Satellitengeodäsie entstand. Erstmals wurde eine globale Vermessung der Erde mit geodätischer Genauigkeit möglich. Damit ist eine Vielzahl neuer Erkenntnisse über die Größe und Figur der Erde, über geometrische und physikalische Parameter der Erde, verbunden. Die hohe Genauigkeit enthüllte auch die zeitliche Variation der meisten dieser Parameter.

Der hohe Genauigkeitssprung durch die Satellitengeodäsie lässt sich anschaulich durch zwei Beispiele charakterisieren. Die geometrische Methode der Satellitengeodäsie wurde auch schon auf unseren natürlichen Satelliten, den Mond, angewendet. J. A. Euler benutzte ihn um 1770 erstmalig für Aufgaben der Gradmessung. Nimmt man die gleiche Genauigkeit für die Richtungsmessung ( $\leq \pm 1''$ ) an, so ergibt sich allein aus der günstigeren Geometrie bei künstlichen Erdsatelliten (Höhe z.B. 1000 km) eine Genauigkeitssteigerung um den Faktor 400. Noch größer ist der Effekt bei den Methoden der dynamischen Satellitengeodäsie. Sie wurden erstmals von P. S. Laplace (1749–1827) auf den Mond angewandt, um aus der Knotenbewegung des Mondes die Erdabplattung abzuleiten. Vergleicht man die durch die Erdabplattung verursachte Knotenbewegung des Mondes von etwa  $6,2''/a$  mit derjenigen eines künstlichen Erdsatelliten von (je nach Bahn) etwa  $6^\circ/d$ , so ergibt sich allein aus diesem Phänomen – wieder bei gleicher Messgenauigkeit – eine Genauigkeitssteigerung um den Faktor  $10^6$ ! Das bestätigt in beeindruckender Weise, dass große Erkenntnissprünge in der Wissenschaft oder Technik nur durch neue Prinziplösungen möglich sind. Zusätzlich wurde natürlich im Laufe der Zeit auch die Messgenauigkeit ständig weiter verbessert;

aber auch auf dem Gebiet der Messtechnik wurden Genauigkeitssprünge nur durch die Anwendung neuer Wirkprinzipien erzielt (z. B. Laser, VLBI).

### Klassische Geodäsie versus Satellitengeodäsie

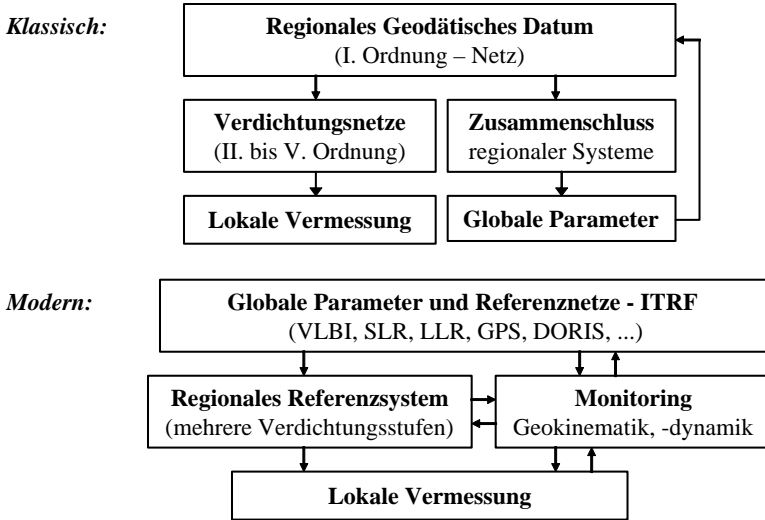


Fig. 1: Prinzip der Schaffung globaler und regionaler geodätischer Referenzsysteme: Vergleich der klassischen mit der modernen Vorgehensweise

Die prinzipielle Vorgehensweise beim Aufbau geodätischer Netze als Realisierung bzw. Manifestierung eines geodätischen Referenzsystems ist aus Fig 1 erkennbar. In klassischer Zeit stand am Beginn die Schaffung eines Triangulationsnetzes I. Ordnung (Punktabstand 30 km bis 50 km, Winkelmessungen, Maßstab durch Basismessungen und anschließende Übertragung auf nahegelegene Dreiecksseiten I. Ordnung durch Basisvergrößerungsnetz). Das wurde dann verdichtet über Netze II. bis V. Ordnung (unterschiedlich in einzelnen Ländern) bis zu Aufnahmepunkten für lokale Vermessungen. Die Verdichtung erfolgte also „vom Großen ins Kleine“, wobei das „Große“ aber bestenfalls eine Ländergruppe war. Ein Problem bestand darin, dass für die Berechnungen der Dreiecke I. Ordnung auf der gekrümmten Erdoberfläche die Kenntnis globaler Parameter eine Voraussetzung war. Wegen der zweckmäßigen Approximation der Erde durch ein Ellipsoid betraf das die Parameter eines Ellipsoids und dessen Orientierung. Diese Parameter – als

„Geodätisches Datum“ bezeichnet – waren aber aus kleinen Landesnetzen nur unvollkommen bestimmbar, so dass insbesondere seit Mitte des 19. Jahrhunderts durch die Aktivitäten vieler berühmter Geodäten Bestrebungen zum Zusammenschluss verschiedener Landesnetze unternommen wurden (Beginn mit der Mitteleuropäischen Gradmessung durch J. J. Baeyer im Jahre 1862 über die Europäische Gradmessung 1867, die Internationale Erdmessung 1886 bis schließlich zur heutigen Internationalen Assoziation für Geodäsie innerhalb der Internationalen Union für Geodäsie und Geophysik). Auf diese Weise wurde sukzessive ein regional bestanschließendes Ellipsoid einschließlich astronomischer Orientierung im Raum bestimmt. Damit stand der jeweils beste Parametersatz zur Verfügung, der für die Berechnung der ellipsoidischen Koordinaten großräumiger geodätischer Grundlagennetze der Landesvermessung verwendet werden konnte.

Im Zeitalter der kosmischen bzw. Satellitengeodäsie ist das grundsätzlich anders. Am Anfang stehen hier globale Netze, da die höchsten Genauigkeiten erreicht werden, wenn von global verteilten Stationen die Satelliten mit unterschiedlichen (und redundanten) Verfahren beobachtet werden (Satelliten bewegen sich um die ganze Erde und halten sich auch nicht an politische oder andere Grenzen). Auf diese Weise gelingt erst durch satellitengeodätische Verfahren die Bestimmung eines geozentrisch gelagerten mittleren Erdellipsoids, welches das Geoid global am besten approximiert. Die aus den Analysen erhaltenen geozentrischen 3-D-Koordinaten der weltweit verteilten Stationen stellen die Realisierung des globalen Referenzsystems dar. Die weitere Verdichtung kann relativ beliebig, ohne die strenge schrittweise Vorgehensweise, erfolgen, da die Genauigkeit nur unwesentlich vom Abstand der Punkte abhängt. Das klassische Prinzip „vom Grossen ins Kleine“ kann also eigentlich erst durch die modernen Verfahren verwirklicht werden. Die hohe Genauigkeit, die heute erreicht wird, macht es notwendig, einerseits eine Vielzahl geokinematischer und geodynamischer Parameter zu berücksichtigen, andererseits bietet sie auch die Möglichkeit, diese Effekte immer genauer zu analysieren.

Die Mess- und Auswerteverfahren der klassischen und Satellitennetze sind in Fig. 2 schematisch gegenübergestellt. Als Messverfahren standen in klassischer Zeit die astronomischen Längen-, Breiten- und Azimutbestimmungen, die terrestrischen Winkel-, Höhen- und Längenmessungen sowie die gravimetrischen Messungen (Schwere, Schwereunterschiede) zur Verfügung. Die astronomischen Messungen dienten vor allem zur Lagerung und Orientierung des Netzes auf der Ellipsoidoberfläche, in Kombination mit den terrestrischen Lagebestimmungen aber auch zur Bestimmung von Geoid-

strukturen. Die Ergebnisse der terrestrischen Messungen sind relative Koordinaten in Lage und Höhe, allerdings bestenfalls auf große Regionen bzw. Kontinente ausgedehnt. Die Schweremessungen liefern zwar prinzipiell Geoidhöhen, wegen der lückenhaften Überdeckung der Erde aber nur sehr unvollkommen.

In der Satellitengeodäsie werden zur Bestimmung von Stationskoordinaten heute meist Messungen von Distanzen und Distanzänderungen von terrestrischen Punkten zu Satelliten (oder umgekehrt) benutzt. Zur Bestimmung des Schwerfeldes der Erde kommen insbesondere auch Messungen zwischen Satelliten und Altimetermessungen vom Satelliten aus hinzu. Im Ergebnis stehen bei der reinen geometrischen Methode ähnlich wie in der klassischen Geodäsie relative Koordinaten, allerdings großräumiger, zur Verfügung. Die neue Qualität wird durch die dynamische Methode erreicht. Neben geometrischen können auch physikalische Größen bestimmt werden. In erster Linie betrifft das globale Lösungen mit präzisen geozentrischen (absoluten) Koordinaten sowie die Bestimmung des globalen Gravitationsfeldes und damit des Geoides (hier und im Folgenden wird nicht unterschieden zwischen dem klassischen Geoid nach Stokes und dem Quasigeoid nach Molodenski).

<b>Klassische Geodäsie</b>			<b>Satellitengeodäsie</b>			
<b>Messungen</b>			<b>Messungen zu, von und zwischen Satelliten</b>			
<b>Geodätisch-astronomische</b> ☉ A	<b>Terrestrische</b> Distanzen, Höhen, Winkel	<b>Gravimetrische</b> Schwere, -unterschiede	<b>Richtungen</b>	<b>Distanzen</b> (Laser, MW)	<b>Distanzänderung</b>	<b>Zeit</b> (Laufz., Epoche)
<b>Auswertemethode und -ergebnisse</b>			<b>Auswertemethode und -ergebnisse</b>			
<b>Geodätisch - astronomische</b>		<b>Gravimetrische</b>	<b>Geometrische</b>		<b>Dynamische</b>	
<b>Koordinatenunterschiede Geoidstrukturen</b>		<b>Geoid, Koordinaten auf Geozentrum beziehbar</b>	<b>Relative Koordinaten (ggf. globale Lösung)</b>		<b>Geozentrische Koordinaten Gravitationsfeld und Geoid (absolute Größen)</b>	
<b>Hohe Nachbargenauigkeit, Insellösungen</b>		<b>Problem: geringe globale Datendichte &amp;-genauigkeit</b>	<b>Hohe Genauigkeit</b>		<b>Globale Lösungen Sehr hohe Genauigkeit</b>	

Fig. 2: Prinzipieller Vergleich von Messungen und Ergebnissen in klassischer und moderner Geodäsie

### 3. Neue Möglichkeiten und Erkenntnisse durch moderne kosmisch-geodätische Verfahren

Die Grundlage der dynamischen Satellitengeodäsie ist die präzise Bahnbestimmung künstlicher Erdsatelliten. Dazu bedurfte es zunächst einer entsprechenden Bahntheorie, die auf der Basis der klassischen Himmelsmechanik

für künstliche Erdsatelliten weiterentwickelt und entsprechend den steigenden Anforderungen und Messgenauigkeiten ständig verfeinert werden muss-te. Damit war auch eine ständige Erweiterung der in die Bahnmodellierung eingehenden Parameter verbunden. Die Parameter selbst konnten aber im allgemeinen erst durch entsprechende Bahnanalysen ermittelt werden. Diese iterative Verbesserung einer Vielzahl von Parametern ist andererseits die Quelle vieler neuer geowissenschaftlicher Erkenntnisse. Für reine Positionsbestimmungen auf der Erde ist die Bahnbestimmung hingegen nur ein notwendiger Zwischenschritt. Eine wichtige Ergänzung erfahren die satellitengeodätischen Verfahren durch die Nutzung extragalaktischer Strahlungsquellen (Quasare); sie erlauben vor allem die Realisierung und Überwachung eines Inertialsystems, leisten aber auch zu anderen Parametern unabhängige Beiträge.

Im Rahmen internationaler Kooperation sind auf diese Weise immer wieder neue und verfeinerte Erkenntnisse über die vielfältigen Parameter des Systems Erde und deren Wechselwirkungen erzielt worden. Das betrifft insbesondere die Figur und Größe der Erde einschließlich Schwerefeld und Geoid, das globale Referenzsystem, die Geokinetik und Geodynamik sowie einige physikalische Phänomene (Gravitationskonstante, relativistische Effekte).

### **3.1 Messsysteme**

Die Voraussetzung für hochpräzise Bahnanalysen ist neben der Theorie der Bahnmechanik und der Wechselwirkung der verschiedenen Parameter ein globales Stationsnetz mit entsprechenden Messgeräten und ein internationaler Datenaustausch. Das setzt international abgestimmte Projekte bzw. Dienste voraus. Um bestmögliche Genauigkeiten zu erzielen und insbesondere systematische Fehler weitgehend auszuschalten, ist eine Kombination verschiedener, aber in der Messgenauigkeit gleichwertiger Messverfahren notwendig. Diese Redundanz – sowohl hinsichtlich der Messgenauigkeit als auch der Sensibilität für die Bestimmung der einzelnen Parameter – wird heute erreicht durch optische Laserentfernungsmessungen zu künstlichen Erdsatelliten (SLR – Satellite Laser Ranging), verschiedene Mikrowellenverfahren (vor allem GPS, Messungen zwischen Satelliten = SST Satellite to Satellite Tracking, Altimeter) und Gradiometer im Satelliten. Im Sinne der Redundanz ist die zusätzliche Nutzung von Lasermessungen zum Mond (LLR) und der Mikrowellen-Interferometrie mit sehr langen Basislinien (Very Long Baseline Interferometry - VLBI) zu Quasaren von besonderer Bedeutung.

Diese Messverfahren hat es in der Form in den 1950er Jahren noch nicht gegeben. Das Laser-Prinzip wurde erst 1960 experimentell nachgewiesen, bei der Mikrowellenmesstechnik begannen damals die ersten geodätischen Anwendungen und die Quasare waren noch nicht einmal entdeckt. Zusätzlich haben sich die Genauigkeit und der Anwendungsbereich in den letzten Jahrzehnten enorm weiterentwickelt. Die erreichten Genauigkeiten liegen heute bei globalen Anwendungen im Zentimeter- bis Subzentimeterbereich ( $10^{-9}$ ).

### **3.2 Figur der Erde**

Wie schon kurz erwähnt, beschränkte sich die Kenntnis der globalen Figur der Erde vor der Satellitenära auf die Erdabplattung und einige lokale bis regionale Strukturen des Schwerefeldes bzw. des Geoides, die aus geodätisch-astronomischen und/oder gravimetrischen Messungen abgeleitet worden waren. Die sich daraus ergebende Genauigkeit für das Geoid lag in der Größenordnung von 10 m bis zu mehreren Metern. Schon im Jahre 1958 wurde durch die Auswertung der ersten Satellitenbeobachtungen die Abplattung in Form des zonalen Kugelfunktionskoeffizienten  $J_2$  genauer bestimmt als es vorher möglich war. 1959 folgte das Glied  $J_3$ , das unter dem Begriff „Birnenform“ der Erde als neue Erkenntnis auch außerhalb der Fachliteratur gefeiert wurde. In den folgenden Jahren wurden immer wieder neue verfeinerte Erdmodelle mit immer größerer räumlicher Auflösung und Genauigkeit publiziert. Von besonderer Bedeutung waren in den ersten Jahren die verschiedenen Modelle „Standard Earth“ (SE-Modelle) des Smithsonian Astrophysical Observatory. Es folgten viele weitere Modelle anderer Institutionen. Erwähnt seien die jeweils mehrfach weiterentwickelten Modelle GEM, OSU, GRIM, JGM und andere. Die globale Auflösung erreichte dabei oft 180 mal 180 (z.T. wesentlich mehr) der Entwicklung nach Kugelfunktionen (180 mal 180 entspricht Auflösung ( $\lambda/2$ ) von 110 mal 110 km an der Erdoberfläche). Die globalen Lösungen wurden mehrfach ergänzt anhand von Altimetermessungen zur Meeresoberfläche, so dass das globale Geoid in Meeresgebieten zeitweise besser bekannt war als auf den Kontinenten. Durch jüngste, noch laufende komplexe Satellitenprojekte mit niedrigfliegenden Satelliten, ausgerüstet mit GPS-Empfängern, Laserreflektoren und vor allem hochsensiblen Akzelerometer-Systemen zur Elimination der nichtgravitativen Bahnstörungen (CHAMP) sowie zusätzlich SST zwischen zwei ca. 200 km hintereinander fliegenden Satelliten (GRACE), wurden sehr hohe Genauigkeiten bei erhöhter und homogener Auflösung über die gesamte Erde erhalten. Unter Einbeziehung dieser neuesten Ergebnisse erreicht die Genauigkeit für das globale Geoid heute

bereits das Zentimeterniveau. Für einige niedere Harmonische, insbesondere  $J_2$ , zeigten sich auch bereits zeitliche Variationen. Die weitere Verfeinerung des globalen Geoids, d.h. die genaue Erfassung der Detailstrukturen bis in den lokalen Bereich, erfolgte durch regionale Kombinationslösungen (Aerogravimetrie, Einbeziehung von terrestrischen Schweremessungen sowie Vergleich von Nivellements Höhen mit ellipsoidischen Höhen aus GPS-Messungen). In einigen Gebieten liegt so die Genauigkeit der Geoidhöhe heute insgesamt im Zentimeterniveau. Der für viele Anwendungen wichtige Horizontalgradient der Geoidundulation pro Kilometer erreicht teilweise den Millimeterbereich. Beide Parameter sind für die heutige geodätische Praxis von großer Bedeutung; sie ermöglichen die Umwandlung der durch GPS erhaltenen ellipsoidischen Höhen in Normalhöhen

### 3.3 Globales geodätisches Referenzsystem

In der Geodäsie werden zwei Arten von Referenzsystemen benötigt, ein terrestrisches System zur Festlegung von Koordinaten von Punkten auf der Erdoberfläche und ein inertiales Referenzsystem zur Orientierung der geodätischen Netze im Raum sowie als Basis für die Bahnbestimmung künstlicher Erdsatelliten. Das globale geozentrische terrestrische Referenzsystem wird festgelegt durch das Massenzentrum der Erde als Ursprung, die mittlere Lage der Rotationsachse im Erdkörper (z-Achse) und den Schnittpunkt des mittleren Meridians von Greenwich mit dem Äquator (x-Achse; y-Achse Ergänzung zum Rechtssystem). Das inertielle Referenzsystem ist raumfest orientiert und hat als Ursprung ebenfalls das Geozentrum (eigentlich nur quasi-inertial wegen der nicht gleichförmigen Bahnbewegung der Erde um die Sonne).

Alle diese Parameter, die die Referenzsysteme definieren, sind zeitlichen Variationen unterworfen. Zur Realisierung der Orientierung des Inertialsystems müssen die Phänomene Präzession und Nutation überwacht werden. Sie wurden früher durch astronomische Beobachtungen bestimmt. Heute geschieht das durch die Anbindung an die extragalaktischen Strahlungsquellen mittels VLBI. Dabei wird eine Genauigkeit von besser als  $0,001''$  erreicht, im Gegensatz zu bestenfalls  $0,1''$  bei früheren optisch-astronomischen Beobachtungen. Das terrestrische System wird vor allem durch die Variationen des Erdrotationsvektors (Polbewegungen und Rotationsschwankungen) beeinflusst. Sie müssen deshalb ständig überwacht werden. Dazu wurde bereits 1899 der internationale Polbewegungsdienst und einige Jahre später der Zeit- oder Rotationsdienst eingerichtet. Mit klassischen astronomischen Messungen wurde in diesen wissenschaftlichen Diensten bis 1987 der Erdrotati-



onsvektor überwacht. Ab 1988 trat an ihre Stelle der International Earth Rotation Service (IERS); die astronomischen Verfahren wurden durch die modernen kosmisch-geodätischen Verfahren ersetzt, die um zwei bis drei Zehnerpotenzen höhere Genauigkeiten erzielen. Wegen dieser hohen Genauigkeit müssen heute viele weitere geodynamische Effekte berücksichtigt und eliminiert werden. Dazu zählen insbesondere alle Massenverlagerungen im Erdkörper und deren geometrische (Punktbewegungen) und gravimetrisch/physikalische Auswirkungen (Änderung des Gravitationsfeldes). Im Abschnitt 3.4 werden einige dieser Parameter charakterisiert.

Seit 1988 werden durch den IERS jährlich Kombinationslösungen zur Bestimmung der Referenzsysteme veröffentlicht. Grundlage dafür sind heute weltweit erhaltene Daten unterschiedlicher Messverfahren, nämlich VLBI, SLR, LLR, GPS und DORIS. Das terrestrische Referenzsystem unter der Bezeichnung ITRF<sub>xx</sub> (International Terrestrial Reference Frame, xx für Jahreszahl) besteht aus Koordinatensätzen, einschließlich Punktbewegungen, für ein globales Stationsnetz. Die Genauigkeit der Punktkoordinaten liegt bei  $\pm 1$  cm (z.T.  $\leq \pm 5$  mm) und damit auf den Erdradius bezogen bei  $10^{-9}$  bis  $10^{-10}$ ; die Punktbewegungen haben eine Unsicherheit von etwa  $\pm 1$  mm/a oder besser. Die Verdichtung des globalen Netzes bis in den lokalen Bereich ist quasi mit der gleichen Genauigkeit möglich. Damit besteht erstmalig die Voraussetzung für ein einheitliches Referenzsystem mit geodätischer Genauigkeit, das weltweit für alle Vermessungen genutzt werden kann. Für Deutschland geschah die Verdichtung auf der Grundlage des ITRF89 über das europäische System ETRS89 (EUREF-Kampagnen in nahezu ganz Europa) zum deutschen Referenzsystem DREF und dann weiter zu den Referenznetzen der einzelnen Bundesländer.

### **3.4 Geodynamische Parameter**

Die Kombination der verschiedenen kosmisch-geodätischen Verfahren erlaubt Subzentimetergenauigkeit für Phänomene globalen bis lokalen Ausmaßes. Damit ist eine Vielzahl von Erscheinungen erstmals nachweisbar; andere können im Vergleich zu den klassischen Verfahren mit wesentlich höherer Präzision bestimmt werden. Mit der höheren Genauigkeit ist auch eine wesentlich höhere zeitliche und/oder räumliche Auflösung für die einzelnen Phänomene verbunden. Der Nachweis dieser Phänomene ist eine wesentliche Grundlage für weiter gehende geowissenschaftliche Untersuchungen zur Struktur und Dynamik des Erdkörpers und seiner Bewegungen im Raum. Diese Interpretation kann um so besser erfolgen, je mehr Informationen zur Ver-

fügung stehen. In diesem Sinne wird das kürzlich auf der IUGG-Generalversammlung 2003 beschlossene Netz komplexer Stationen (neben den kosmisch-geodätischen Messverfahren zusätzliche geophysikalische und geologische Messungen an den gleichen Stationen) mit der Bezeichnung Integrated Global Geodetic Observing System (IGGOS) weitere Fortschritte bringen.

Im Folgenden soll der Kenntnisstand einiger Phänomene charakterisiert werden.

*Geozentrum:* Das Geozentrum ist physikalisch definiert als das Massenzentrum der Erde, einschließlich Ozean und Atmosphäre. Änderungen der Massenverteilung der Erde bewirken somit auch Änderungen des Geozentrums. Das Geozentrum ist auch das dynamische Zentrum der Satellitenbewegungen (ein Brennpunkt der oskulierenden Kepler-Ellipse) und kann insofern aus der Bahnanalyse als Ursprung des geozentrischen Koordinatensystems abgeleitet werden. Die ebenfalls aus der Bahnanalyse hervorgehenden Stationskoordinaten beziehen sich dann im geometrischen Sinne auf dieses Zentrum. Der Nachweis gelingt also nur durch Satellitenmethoden. Bisherige Analysen haben erste Ergebnisse gebracht; sie zeigten u.a. Jahres- und Halbjahreswellen mit Amplituden von einigen Millimetern.

*GM (Gravitationskonstante  $G$  mal Erdmasse  $M$ ):* GM ist als Hauptglied der Gravitationsfeldentwicklung aus Bahnanalysen von Erdsatelliten und Bahnen von Raumsonden bestimmbar. Die Genauigkeit liegt heute bei  $10^{-9}$ . Andererseits wird der Maßstab von Satellitennetzen gemeinsam von GM (Maßstab der Bahnbestimmung) und der Lichtgeschwindigkeit (Messungen) bestimmt. Der Vergleich der jährlichen ITRF – Lösungen zeigt eine Maßstabgenauigkeit von mindestens  $10^{-9}$  und bestätigt somit das Ergebnis. Es sei erwähnt, dass die Gravitationskonstante selbst als physikalische Grundgröße nur mit einer Genauigkeit von  $10^{-4}$  bis  $10^{-5}$  nachgewiesen wurde.

*Erdorientierungsparameter (EOP):* Die EOP oder Erdrotationsparameter (ERP) bestehen aus den Polbewegungen und Erdrotationsschwankungen bzw. der rotationsgebundenen Zeit. Die Polkoordinaten  $x_p$  und  $y_p$  können heute mit einer Genauigkeit von etwa  $\pm 5$  mm bei einer zeitlichen Auflösung von besser als 1 Tag bestimmt werden. Das entspricht in der Genauigkeit gegenüber den klassischen astronomischen Verfahren einer Steigerung um mindestens den Faktor 100. Ähnliche Genauigkeitssteigerungen betreffen den Nachweis von Rotationsschwankungen (in Form der Tageslänge LOD) und die Bestimmung der rotationsgebundenen Zeit UT (Universal Time). Die erreichbare Genauigkeit liegt heute bei  $\pm 0,03$  ms bis  $\pm 0,05$  ms. Die gewissenschaftliche In-

terpretation dieser hoch aufgelösten Variationen des Erdrotationsvektors ermöglicht zunehmend differenziertere Erkenntnisse über die Wechselwirkung der verschiedenen Phänomene, wie den Effekten der Kern-Mantel-Kopplung, der Mantelkonvektion, den verschiedenen Oberflächeneffekten (Tektonik, Hydrologie, Dynamik des Meeres), den atmosphärischen Einflüssen sowie den Einwirkungen anderer Himmelskörper (Gezeiten).

*Deformationen der Erdoberfläche:* Die Bewegungen von Punkten der Erdoberfläche können sehr unterschiedliche Ursachen haben. In erster Linie sind zu nennen globale Plattentektonik, andere regionale oder lokale tektonische Erscheinungen, seismische Ereignisse, Auflasteffekte (großräumige postglaziale Entlastungseffekte, Meeresgezeiten, Grundwasser, Luftdruck, sonstige Massenbewegungen) oder Erdgezeiten. Der Nachweis des Gesamtbetrages der Punktbewegungen gelingt heute für die großräumigen bis globalen Erscheinungen mit einer Genauigkeit von  $\pm 1$  mm/a bis  $\pm 0,1$  mm/a. Die Zeitcharakteristik kann bis in den Tagesbereich aufgelöst werden. Bei entsprechendem Aufwand erreicht man diese Genauigkeit auch für regionale oder lokale Effekte.

Die Trennung der einzelnen Bewegungsanteile ist wesentlich für die Erforschung der verschiedenen geodynamischen Prozesse und deren Wechselwirkungen. Sie gelingt insbesondere über den zeitlichen Ablauf, der sich von säkular bis kurzperiodisch (Stunden) erstreckt. Mit dem räumlichen und zeitlichen Bewegungsverhalten liegen wichtige Eingangsgrößen für weitergehende Interpretationen zur Dynamik des Erdkörpers vor. Die Ergebnisse tragen zum Verständnis vieler Erscheinungen, u.a. zur Prognose von Erdbeben, bei und sind so von großer gesellschaftlicher und wirtschaftlicher Bedeutung.

#### **4. Schlussbemerkungen**

In den letzten 50 Jahren hat die Geodäsie einen beispiellosen Progress, quasi eine Revolution erlebt. In diesen 50 Jahren hat sich nicht nur die Genauigkeit für die Bestimmung großräumiger Netze um den Faktor 1000 erhöht, sondern es gab auch einen enormen Erkenntnisfortschritt über den Status und die Dynamik des Systems Erde. In erster Linie betrifft das die Größe und Figur der Erde, einschließlich Gravitationsfeld und Geoid, das globale Referenzsystem sowie die Deformation des Erdkörpers und eine Vielzahl geodynamischer Effekte. Diese neuen Erkenntnisse sind auch von großer gesellschaftlicher und wirtschaftlicher Relevanz. Möglich wurde der Fortschritt in erster Linie durch die völlig neuen Methoden der kosmischen Geodäsie unter Nutzung

der künstlichen Erdsatelliten und der in dieser Zeit entdeckten Quasare. Darüber hinaus haben neuartige technische Entwicklungen wie die Erfindung des Laserprinzips und die moderne Rechen- und Kommunikationstechnik zu diesem Entwicklungssprung beigetragen.

Die neuen erweiterten Potentiale der Geodäsie sind nicht nur für den Erkenntnisfortschritt von großer Bedeutung, sondern sie haben auch für die Praxis des Vermessungswesens neue Möglichkeiten geschaffen. Das präzise globale Referenzsystem steht für alle Landesvermessungen zur Verfügung und ermöglicht somit ein einheitliches System für alle Vermessungen. In Europa ist durch die Einführung des ETRS89 ein wichtiger Schritt in dieser Richtung unternommen worden. Die Vereinheitlichung der geodätischen Grundlagen ermöglicht auch erweiterte Anwendung der Geodäsie z.B. bei der grenzüberschreitenden Navigation oder dem Aufbau großräumiger Geo-Informationssysteme (GIS). Andererseits erlaubt die Anwendung von Methoden der Satellitengeodäsie, insbesondere von GPS in Kombination mit weitmaschigen Referenzpunkten eine beträchtliche Reduzierung der Anzahl der geodätischen Festpunkte für Anschlussmessungen jeglicher Art.