

Horst Montag

## **Referenzsysteme für globale Vermessungen und geodynamische Untersuchungen mittels geodätischer Raummethoden**

### **1. Einleitende Betrachtungen**

50 Jahre Vermessung und Überwachung der Erde mit Hilfe von Satelliten – das ist auch eine geodätische Erfolgsgeschichte bisher nicht gekannten Ausmaßes. Die neu entstandene Teildisziplin Satellitengeodäsie ermöglichte erstmalig eine globale Vermessung mit geodätischer Genauigkeit. Damit ist eine Vielzahl neuer Erkenntnisse über die Größe und Figur der Erde, über geometrische und physikalische Parameter des Erdkörpers und seiner Wechselwirkung mit anderen Himmelskörpern verbunden. Die hohe Genauigkeit enthüllte auch die zeitlichen Variationen der meisten dieser Parameter. Die Überwachung dieser geodynamischen Erscheinungen ist im Rahmen permanenter internationaler wissenschaftlicher Beobachtungs- und Analysendienste zu einer wichtigen Aufgabe geworden.

Mit der Satellitengeodäsie ist für die Geodäsie auch eine völlig neue Aufgabenstellung verbunden, die Bahnbestimmung künstlicher Erdsatelliten. Einerseits dient diese Bahnbestimmung als ein notwendiger Zwischenschritt für die Bestimmung hochgenauer Positionen bzw. Stationskoordinaten auf der Erde. Andererseits ist die präzise Analyse der Satellitenbahnen eine Quelle neuer Erkenntnisse über eine Vielzahl von Erscheinungen des Systems Erde. Das betrifft sowohl gravitative als auch nichtgravitative Parameter, die entsprechende Bahnstörungen gravitativer bzw. nichtgravitativer Art verursachen und damit aus den Bahnanalysen abgeleitet werden können. Voraussetzungen dafür sind neben einem Vorlauf für eine entsprechende Bahntheorie globale Stationsnetze und die Anwendung verschiedener Beobachtungs- bzw. Messverfahren (Redundanz). Eine Kombination verschiedener prinzipiell unterschiedlicher, aber in der Messgenauigkeit gleichwertiger Messverfahren ist notwendig, um bestmögliche Genauigkeiten zu erzielen und insbesondere systematische Fehler weitgehend auszuschalten. Diese Redundanz – sowohl hinsichtlich der Messgenauigkeit als

auch der sich überlappenden jeweils einzigartigen Beiträge für die Bestimmung der einzelnen Parameter – wird heute erreicht durch optische Laserentfernungsmessungen zu künstlichen Erdsatelliten (SLR – Satellite Laser Ranging), verschiedene Mikrowellenverfahren zur Messung von Distanzen, Distanzänderungen oder -differenzen (GPS, DORIS, Satellite to Satellite Tracking – SST, Altimetermessungen vom Satelliten zur Erdoberfläche) sowie durch Gradiometermessungen im Satelliten. Im Sinne der Redundanz und zur Bestimmung zusätzlicher Parameter ist die Nutzung weiterer, ebenfalls in den letzten 50 Jahren neu entstandener, geodätischer Raumverfahren von besonderer Bedeutung. Es sind dies Lasermessungen zu unserem natürlichen Satelliten, dem Mond (LLR – Lunar Laser Ranging), die zusätzlich die Bestimmung von Parametern des Erde-Mond-Systems ermöglichen, und die Mikrowellen-Interferometrie mit sehr langen Basislinien (Very Long Baseline Interferometry – VLBI) zu extragalaktischen Strahlungsquellen (Quasaren), die die Realisierung und Überwachung eines Inertialsystems ermöglichen.

Die erreichten Genauigkeiten liegen heute bei globalen Anwendungen im Zentimeter- bis Millimeterbereich ( $10^{-9}$  bis  $10^{-10}$  mit Bezug auf den Erdradius).

Im Rahmen internationaler Kooperation sind im Laufe der ständigen Weiterentwicklung der dynamischen Satellitengeodäsie sowie der VLBI immer wieder neue und verfeinerte Erkenntnisse über die vielfältigen Parameter des Systems Erde und deren Wechselwirkung erzielt worden. Zu nennen sind insbesondere die Figur und Größe der Erde einschließlich Schwerefeld und Geoid, das globale Referenzsystem, die Geokinematik und Geodynamik sowie einige physikalische Phänomene (Gravitationskonstante, relativistische Effekte).

Zur Bestimmung des Schwerefeldes der Erde bzw. des Geoides dienen vor allem SST- und Altimetermessungen sowie Gradiometermessungen im Satelliten. Auf die großen Fortschritte bei der Vermessung des globalen Gravitationsfeldes wird hier nicht weiter eingegangen; es sei auf den Beitrag von R. Rummel in diesem Band verwiesen.

Die Ergebnisse der neuen geodätischen Raumverfahren haben in einem halben Jahrhundert gegenüber den klassischen terrestrischen Verfahren einen Genauigkeitssprung um einen Faktor von mehr als  $10^3$  erbracht, ein Fortschritt, der in der Entwicklung der altherwürdigen Disziplin Geodäsie einmalig ist und wohl auch bleiben wird.

## 2. Überwachung der Erde durch moderne kosmisch-geodätische Verfahren

Die Ergebnisse klassischer terrestrischer Messungen sind relative Koordinaten in Lage und Höhe sowie prinzipiell auch Geoidhöhen, allerdings mit geringer Genauigkeit und bestenfalls auf große Regionen bzw. Kontinente ausgedehnt.

Die neue Qualität wird durch die dynamische Methode der Satellitengeodäsie erreicht. Neben geometrischen können auch physikalische Größen mit hoher Genauigkeit und im globalen Umfang bestimmt werden. In erster Linie sollen hier Lösungen für grundlegende Referenzsysteme und die Bestimmung präziser geozentrischer (absoluter) Stationskoordinaten eines globalen Netzes betrachtet werden. Das Monitoring der damit verbundenen Parameter ist die Basis für umfassende geodynamische Untersuchungen.

### 2.1 Globales geodätisches Referenzsystem

Die Grundlagen aller geodätisch-geodynamischen Untersuchungen sind die Definition, Realisierung und Überwachung entsprechend genauer Referenzsysteme. Im Einzelnen werden zwei Arten von Referenzsystemen benötigt, ein terrestrisches System zur Festlegung von Koordinaten der Punkte 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 Lage der Rotationsachse im Erdkörper (z-Achse) und den Schnittpunkt des mittleren Meridians von Greenwich mit dem Äquator (x-Achse; die y-Achse ist die Ergänzung zum Rechtssystem, ebenfalls in der Äquatorebene liegend). Das inertiale Referenzsystem ist raumfest orientiert und hat als Ursprung ebenfalls das Geozentrum (eigentlich nur quasi-inertial wegen der Bahnbewegung der Erde um die Sonne). Bei der Realisierung beider Systeme müssen heute wegen der erreichten Genauigkeit relativistische Effekte berücksichtigt werden ([3], [5], [7]).

Der International Earth Rotation and Reference Systems Service (IERS) unterscheidet beim terrestrischen System zwischen dem International Terrestrial Reference System (ITRS), wodurch die Parameter des Systems definiert werden, und dem International Terrestrial Reference Frame (ITRF) als seine Realisierung. Das ITRS ist folgendermaßen definiert [11]:

- Der Ursprung ist das Geozentrum, also Massenzentrum der Erde einschließlich Ozean und Atmosphäre,
- die Einheit ist das SI-Meter unter Berücksichtigung relevanter relativistischer Modelle,
- die Orientierung erfolgt durch die Erdorientierungsparameter (EOP) der Epoche 1984,0; diese Orientierung wird mit bestmöglicher Genauigkeit beibehalten, und zwar durch Überwachung der EOP und durch Anwendung der sog. No-net-rotation-Bedingung bezüglich horizontaler tektonischer Bewegungen der über die ganze Erde verteilten Beobachtungsstationen.

Die Realisierung (Manifestierung) des terrestrischen Referenzsystems, also die Schaffung des ITRF, kann nur durch dreidimensionale Koordinaten von auf der Erdoberfläche vermarkten Festpunkten erfolgen.

Alle Parameter, die die Referenzsysteme definieren und realisieren, sind wegen der unterschiedlichen geodynamischen Prozesse zeitlichen Variationen unterworfen. Diese zeitlichen Änderungen müssen bei der Realisierung eines Referenzsystems berücksichtigt werden. Andererseits sind sie wichtige Eingangsgrößen für geodynamische Untersuchungen.

Analog unterscheidet man beim Inertialsystem auch zwischen den Definitionen für die Parameter des Systems (ICRS – International Celestial Reference System) und der Realisierung (ICRF – International Celestial Reference Frame). Bei der Realisierung spielen die Phänomene Präzession und Nutation der Erde eine zusätzliche Rolle. 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 0,5 mas (milli arc second, 1 mas = 0,001 Bogensekunden, entsprechend 3 cm auf der Erdoberfläche) erreicht, im Gegensatz zu bestenfalls 0,1 Bogensekunden bei früheren optisch-astronomischen Beobachtungen. Bezüglich weiterer Einzelheiten sei auf die Annual Reports des IERS [12] sowie die weitere Literatur verwiesen ([3], [4], [5], [8]).

Das terrestrische Referenzsystem (bzw. der Referenz-Rahmen – ITRF) wird neben den Erdkrustenbewegungen (s. Abschn. 2.2) vor allem durch die Variationen des Erdrotationsvektors (Polbewegungen und Rotationsschwankungen, s. Abschn. 2.3) beeinflusst. Beide Phänomene sind nicht vorhersagbar und müssen deshalb ständig überwacht werden.

Die Polbewegungen wurden erst in den siebziger Jahren des 19. Jahrhunderts entdeckt, und zu ihrem permanenten Nachweis wurde bereits 1899 der internationale Polbewegungsdienst eingerichtet. Einige Jahre später folgte

dann in internationaler Kooperation der Zeit- oder Erdrotationsdienst. Mit klassischen astronomischen Messungen wurde in diesen wissenschaftlichen Diensten bis 1987 das Erdrotationsverhalten überwacht. Ab 1988 trat an ihre Stelle der IERS; die astronomischen Verfahren wurden durch die modernen kosmisch-geodätischen Verfahren ersetzt, die um etwa drei Zehnerpotenzen höhere Genauigkeiten erzielen und somit auch die wesentlich höheren Positionsgenauigkeiten auf der Erde ermöglichen. Wie schon erwähnt müssen wegen dieser hohen Genauigkeit heute viele weitere geodynamische Effekte berücksichtigt und eliminiert werden. Dazu zählen insbesondere alle Massenverlagerungen im Erdkörper und deren geometrische (Punktbewegungen durch Gezeiten, Tektonik, Auflasteffekte etc.) und gravimetrisch-physikalische Auswirkungen (Änderung des Gravitationsfeldes durch Massenverlagerungen, Variation des Geozentrums, Satellitenbahnstörungen).

Seit 1988 werden durch den IERS Kombinationslösungen zur Bestimmung der Referenzsysteme für bestimmte Epochen (Abstand ein bis mehrere Jahre) veröffentlicht. Grundlage dafür sind weltweit erhaltene Daten der genannten unterschiedlichen redundanten Messverfahren.

Das vom IERS realisierte terrestrische Referenzsystem unter der Bezeichnung ITRF(xx)xx (International Terrestrial Reference Frame, xxxx oder xx für Jahreszahl) besteht neben den Parametern für den Ursprung, den Maßstab und die Orientierung aus Koordinatensätzen, einschließlich Punktbewegungen, für ein globales Stationsnetz. Das aktuelle System ist das ITRF2005. Es beruht auf langjährigen (kumulativ bis einschließlich 2005 ausgewertet) VLBI-, SLR-, DORIS- und GPS-Daten. Der Vergleich mit dem ITRF2000, das ebenfalls eine besondere Bedeutung eingenommen hat, zeigt die gute Übereinstimmung und damit die hohe Genauigkeit bezüglich Ursprung, Maßstab und Orientierung sowie deren zeitliche Raten. Die Differenzen der Transformationsparameter und deren zeitliche Änderungen (pro Jahr) sowie die mittleren Unsicherheiten (m.F.) zwischen dem ITRF2000 und ITRF2005, abgeleitet aus 70 weltweit verteilten Stationen, sind in Tabelle 1 zusammengestellt ([1], [2], [13]).

Detaillierte Untersuchungen ([1], [2]) haben die große Konsistenz bestätigt. Der Ursprung (Geozentrum) und seine zeitliche Änderung wurden abgeleitet aus SLR-Daten, die durch verschiedene Analysenzentren ausgewertet wurden. Die Unterschiede liegen für die geozentrische x- und y-Komponente ( $T_x$ ,  $T_y$ ) unter einem Millimeter, für die z-Komponente ( $T_z$ ) beträgt die Differenz etwa 5 mm. Zur Bestimmung des Maßstabes und seiner zeitlichen Variation dienten VLBI- und SLR-Daten (s. Abschn. 2.3), ebenfalls als Kombi-

nation der Lösungen verschiedener Analysenzentren. Für den Maßstab liegt die Konsistenz im Bereich von  $4 \cdot 10^{-10}$ . Die Orientierung wird mit einer Unsicherheit von etwa  $\pm 0,01$  mas (0,3 mm an der Erdoberfläche) aufrecht erhalten.

<b>Wert Ändg.</b>	<b>Tx [mm] [mm/a]</b>	<b>Ty [mm] [mm/a]</b>	<b>Tz [mm] [mm/a]</b>	<b>D <math>10^{-9}</math> <math>10^{-9}/a</math></b>	<b>Rx mas mas/a</b>	<b>Ry mas mas/a</b>	<b>Rz mas mas/a</b>
<b>Wert m.F.</b>	0,1 $\pm 0,3$	-0,8 $\pm 0,3$	-5,8 $\pm 0,3$	0,40 $\pm 0,05$	0,000 $\pm 0,012$	0,000 $\pm 0,012$	0,000 $\pm 0,012$
<b>Ändg. m.F.</b>	-0,2 $\pm 0,3$	0,1 $\pm 0,3$	-1,8 $\pm 0,3$	0,08 $\pm 0,05$	0,000 $\pm 0,012$	0,000 $\pm 0,012$	0,000 $\pm 0,012$

T – Translationen des Ursprungs; D – Maßstab; R – Rotationen

*Tabelle 1: Differenzen der Transformationsparameter ITRF2000 minus ITRF2005 und zeitliche Änderungen dieser Transformationsparameter*

Entsprechend der Wirksamkeit der übrigen Messverfahren für die Bestimmung der einzelnen Parameter werden diese zur Kontrolle oder Ergänzung eingesetzt. Besonders umfangreich ist das globale Netz von GPS-Stationen, wodurch insbesondere eine Erhöhung der Punktdichte sowie wegen der automatisierten und wetterunabhängigen Messtechnik eine hohe zeitliche Auflösung für die einzelnen Phänomene erreicht wird.

Die Genauigkeit der Punktkoordinaten liegt bei bzw. unter  $\pm 5$  mm für die sogenannten Core-Stationen und besser als  $\pm 1$  cm für die übrigen Stationen; das entspricht auf den Erdradius bezogen einer Genauigkeit von etwa  $10^{-9}$ . Die Punktbewegungen haben eine Unsicherheit von meist besser als  $\pm \pm 1$  mm/a (s. Abschn. 2.2).

Die Verdichtung des globalen Netzes bis in den lokalen Bereich ist mit GPS-Messungen quasi mit der gleichen Genauigkeit möglich. Damit bestehen erstmalig die Voraussetzungen 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 ETRS-89 (EUREF-Kampagnen in nahezu ganz Europa) zum deutschen Referenzsystem DREF und dann weiter zu den Referenznetzen der einzelnen Bundesländer.

## 2.2 Punktbewegungen und Krustendeformationen

Neben der Bestimmung hochpräziser Stationskoordinaten ist die Untersuchung von Punktbewegungen und Krustendeformationen wie oben erwähnt von großer Bedeutung für die Realisierung und Überwachung eines Referenzsystems. Gleichzeitig sind die Ergebnisse zur Kinematik der globalen Netze wichtige Informationen für die Erforschung der Deformation der Erde als Folge der Wechselwirkung der verschiedenen geodynamischen Prozesse. 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, Erdzeiten und Belastungsdeformationen durch großräumige postglaziale Entlastungseffekte, Meereszeiten, Grundwasser- und Luftdruckschwankungen sowie sonstige Massenbewegungen auf der Erdoberfläche und im Erdinnern. Die Trennung der einzelnen Anteile ist schwierig, sie kann nur in interdisziplinärer geowissenschaftlicher Kooperation erfolgen. Ein wichtiger Schlüssel ist dabei der zeitliche Ablauf der einzelnen Phänomene, der sich von säkular bis kurzperiodisch (Stunden) erstreckt.

Insbesondere ist das Modell der plattentektonischen Erdkrustenverschiebungen in den letzten Jahren immer weiter verfeinert und mit geologisch-geophysikalischen Hypothesen und Erkenntnissen verglichen worden. Dabei hat sich gezeigt, dass die über große Zeiträume geltenden geotektonischen Bewegungsmodelle im Allgemeinen recht gut mit den aus globalen kosmisch-geodätischen Messungen erhaltenen gegenwärtigen Bewegungen übereinstimmen. Der Nachweis der Punktbewegungen gelingt heute für die großräumigen bis globalen Erscheinungen mit einer Genauigkeit von etwa  $\pm 1$  mm/a bis  $\pm 0,1$  mm/a. Die Zeitcharakteristik kann bis in den Tagesbereich aufgelöst werden. Bei entsprechendem Aufwand (Punktdichte) erreicht man diese Genauigkeit auch für regionale oder lokale Effekte.

Das globale Bewegungsbild für die Stationen des ITRF2005 ist in ([1], [13]) auch graphisch dargestellt. Die Richtung der Bewegung ist durch die Pfeilrichtung angegeben, die Bewegungsgeschwindigkeit (cm/a) wird durch die Länge der Pfeile symbolisiert. Neben den Kontinenten sind auch die Grenzen der großen tektonischen Platten eingezeichnet. Die Bewegungsgeschwindigkeiten der einzelnen Punkte liegen zwischen 1 cm/a und über 10 cm/a; sie lassen die globale Schollenstruktur deutlich sichtbar werden. Auch die Bewegungsrichtungen der Punkte einer Platte sind weitgehend gleich. Neben der weitgehenden Übereinstimmung der Geschwindigkeiten und Richtungen der Bewegungen mit den geologisch-geophysikalischen Model-

len für geologische Zeiträume gibt es auch viele Diskrepanzen, die für weitere Untersuchungen besonders interessant sind. An den Rändern der großen tektonischen Platten, insbesondere in Kompressionszonen, ist das Bewegungsbild durch die vielen Mikroplatten sehr komplex. In derartigen Gebieten (z.B. Mittelmeer, Südostasien, Anden, Karibik) wurden zusätzliche Verdichtungen im Rahmen spezieller Kampagnen geschaffen, um das Bewegungsverhalten detaillierter zu erfassen. Die komplexe Interpretation des globalen und regionalen Bewegungsbildes führt zu weiteren Erkenntnissen über die Wechselwirkung der verschiedenen geodynamischen Phänomene. Diese neuen Erkenntnisse können neben dem wissenschaftlichen Aspekt in unterschiedlicher Weise genutzt werden. So erlauben sie u.a. Gefahrenggebiete einzuschätzen und zu dem Langzeitziel Erdbebenprognose beizutragen.

### **2.3 Zu weiteren geodynamischen Parametern**

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 weitergehende geowissenschaftliche Untersuchungen zur Struktur und Dynamik des Erdkörpers und seiner Bewegungen im Raum. Die Interpretation und Trennung der einzelnen Anteile kann umso besser erfolgen, je mehr Informationen zur Verfügung stehen. In diesem Sinne wird das 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 Observing System (IGOS) weitere Fortschritte bringen. Der durch die IAG formulierte geodätische Beitrag, das Global Geodetic Observing System (GGOS), konzentriert sich auf die fundamentalen Größen Erdoberfläche, Gravitationsfeld und Erdrotation sowie deren Änderungen [14].

*Geozentrum:* Das Geozentrum ist physikalisch definiert als das Massenzentrum der Erde, einschließlich Ozean und Atmosphäre. Änderungen der Massenverteilung in und auf 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 im geometrischen Sinne als Ursprung des geozentrischen Koordinatensystems abgeleitet werden. Der präzise Nachweis des Geozentrums gelingt nur durch diese Satellitenmethoden. Die ersten Analysen zeigten u.a. Jahres- und Halbjahreswellen mit Amplituden von einigen Millimetern [6]. Mit der Realisierung von ITRF2005 wurden insbesondere die seit 1993 vorliegenden SLR-Daten analysiert und durch GPS-Auswertungen ergänzt ([1], [10], [13]). Gegenüber der Lage im ITRF2005 zeigten sich dabei Schwankungen des Geozentrums von bis zu  $\pm 10$  mm für die x- und y-Komponente und bis  $\pm 20$  mm für die z-Komponente. Ausgeprägt sind Jahreswellen mit Amplituden von 2 bis 4 mm für x und y und 3 bis 5 mm für die z-Komponente. Die Unsicherheiten liegen bei  $\pm 0,5$  mm für die x- und y-Komponente und betragen etwa  $\pm 1$  mm für die z-Komponente. Weiterhin sind saisonale Variationen erkennbar. Mit Wochenlösungen für SLR können diese genauer untersucht werden. Eine Herausforderung für die Zukunft stellen Untersuchungen säkularer Effekte dar. Sie deuten sich im Submillimeterbereich für die x- und y-Komponente sowie im Millimeterbereich für die z-Komponente an (Tab. 1). Interpretationen ([1], [10]) offenbaren Zusammenhänge mit Belastungsdeformationen, insbesondere durch Ozeangezeiten, mit jahreszeitlichen Massenverschiebungen, mit klimatischen und anderen Massentransporten sowie auch mit dem Maßstab.

*Maßstab und GM (Gravitationskonstante  $G$  mal Erdmasse  $M$ ):* Der Maßstab von Satellitennetzen wird abgesehen von Messfehlern gemeinsam von GM (Maßstab der Bahnbestimmung der Satelliten) und der Lichtgeschwindigkeit (Maßstab bei den Messungen) bestimmt. Aus Genauigkeitsgründen werden hier für die Satellitennetze SLR-Messungen benutzt. Demgegenüber ist das globale VLBI-Netz unabhängig von GM; hier wird der Maßstab abgesehen von Mess- oder Modellfehlern nur durch die Lichtgeschwindigkeit festgelegt. Da die Lichtgeschwindigkeit als physikalische Konstante eingeführt wird, ist das aus Bahnanalysen unter Nutzung von SLR-Daten abgeleitete GM von entscheidender Bedeutung. Der aus VLBI-Analysen auf völlig unterschiedliche Weise (unabhängig von GM) mit vergleichbar hoher Präzision bestimmte Maßstab kann so hervorragend zur unabhängigen Ergänzung und Kontrolle eingesetzt werden (Redundanz). GM als Hauptglied der Gravitationsfeldentwicklung der Erde ist nicht nur aus Bahnanalysen von Erdsatelliten ableitbar, sondern zusätzlich auch aus Bahnen von Raumsonden bestimmbar. Dadurch ist eine weitere Kontrollmöglichkeit gegeben. Die Genauigkeit von GM liegt heute insgesamt bei besser als  $10^{-9}$ . Es sei erwähnt, dass die Gravi-

tationskonstante selbst als physikalische Grundgröße nur mit einer Genauigkeit von etwa  $10^{-5}$  nachgewiesen wurde.

Der Vergleich der neueren ITRF – Lösungen (Tab. 1) zeigt eine Maßstabgenauigkeit von etwa  $0,5 \cdot 10^{-9}$ ; das entspricht einer Positionsgenauigkeit auf der Erdoberfläche von etwa  $\pm 3$  mm. Die zeitliche Änderung zwischen den neueren ITRF-Lösungen liegt unter  $10^{-10}$  und ist noch nicht signifikant. Die beiden hier eingesetzten Verfahren VLBI und SLR zeigen derzeit geringfügige Diskrepanzen ([1], [9]) im Bereich von  $10^{-9}$ , deren Ursachen in verschiedenen Messfehlern gesucht werden (Atmosphäre, Mess-Bias, Restfehler bei der relativistischen Modellierung einer oder beider Methoden). Detaillierte Untersuchungen verschiedener Lösungen deuten auf zeitliche Variationen im Bereich von etwa 5 mm hin, teilweise mit saisonalem Charakter ([1], [2], [9]). Auch Korrelationen mit den Variationen des Geozentrums sind erkennbar.

*Erdorientierungsparameter (EOP):* Die Erdorientierungsparameter (EOP), auch als Erdrotationsparameter (ERP) bezeichnet, bestehen, wie bereits oben erwähnt, aus den Polbewegungen und den Erdrotationsschwankungen bzw. der rotationsgebundenen Zeit. Sie variieren infolge der verschiedenen geodynamischen Phänomene, die sowohl das Trägheitsmoment der Erde (Umverteilung von Massen) als auch den Drehimpuls (Gezeitenreibung, zonale Winde, Ozeanströmungen, Dynamik des inneren Erdkerns) ständig verändern.

Die Polkoordinaten  $x_p$  und  $y_p$  sind die Koordinaten des Celestial Ephemeris Pole (CEP) relativ zu dem IERS Reference Pole (IRP). Der CEP unterscheidet sich von dem augenblicklichen Pol der Rotationsachse der Erde durch quasi tägliche Schwankungen mit Amplituden unter 0,01 Bogensekunden. Gemessen werden die Polkoordinaten in einer Tangentialebene am Pol,  $x_p$  positiv in Richtung des IERS-Referenzmeridians ( $\lambda = 0^\circ$ ) und  $y_p$  positiv in Richtung des Meridians  $\lambda = 90^\circ$  West.

Bei der Analyse der rotationsgebundenen Zeit wird die Abweichung der Universalzeit (Universal Time UT1) von 24 Stunden betrachtet und als Länge des Tages (Length of Day – LOD) bezeichnet.

Sowohl die Polkoordinaten als auch die Geschwindigkeit der Erdrotation sind infolge der geodynamischen Effekte vielfältigen Schwankungen unterworfen. Die Bewegungen der Erdrotationsachse relativ zur Kruste erreichen Amplituden von etwa 10 m; das Periodenspektrum erstreckt sich von Subtagesperioden bis zu säkularen Bewegungen. Besonders hervorzuheben sind drei Bereiche, die freie Schwingung mit einer Periode von etwa 435 Tagen

(Chandler-Periode), die erzwungenen jahreszeitlichen Schwingungen und ein säkularer Trend. Die Chandler-Welle ist variabel sowohl bezüglich der Periodenlänge (im Bereich mehrerer Tage) als auch der Amplitude. Die veränderliche Amplitude schwankt zwischen 3 m und 8 m. Die ebenfalls veränderlichen jahreszeitlichen Schwingungen (insbesondere Jahreswelle und Halbjahreswelle) werden vor allem verursacht durch jahreszeitliche Massenverschiebungen in der Atmosphäre und Hydrosphäre. Ihre Amplituden variieren im Bereich von 2 m bis 3 m für die Jahreswelle und bei 0,3 m für die Halbjahreswelle. Die säkularen Bewegungen erfolgen etwa in Richtung des Meridians  $80^\circ$  West mit einer Rate von etwa 1 dm/a; sie sind dabei aber irregulär. Erwähnt werden sollen weiterhin die Variationen mit Tages- und Halbtagesperiode, die durch Gezeiten hervorgerufen werden. Ihre Amplituden liegen aber nur im Bereich von (oder unter) Millibogensekunden bzw. von einigen Zentimetern.

Insgesamt gelingt heute mit Hilfe der kosmisch-geodätischen Verfahren der Nachweis der Polbewegungen mit einer Genauigkeit von besser als  $\pm 5$  mm bei einer zeitlichen Auflösung von besser als 1 Tag. Das entspricht in der Genauigkeit gegenüber den klassischen astronomischen Verfahren einer Steigerung um den Faktor 1000 für die Amplituden und um den Faktor 10 bis 100 für die zeitliche Auflösung.

Auch die Variationen in der Tageslänge LOD sind sehr komplex und teilweise irregulär. Die Einflüsse von Massenverschiebungen im Erdinnern, insbesondere des flüssigen Erdkerns, sowie Klimaschwankungen erzeugen langsame bis trendartige Variationen, atmosphärische Einflüsse verursachen saisonale Oszillationen und Gezeiten bewirken eine Vielzahl kurz- und langperiodischer Wellen. Irreguläre Erscheinungen wie der Einfluss des El Nino konnten auch bereits nachgewiesen werden. Die Amplituden der einzelnen Erscheinungen betragen bis mehrere Millisekunden (ms).

Der Nachweis der Rotationsschwankungen der Erde in Form der Tageslänge LOD erreicht heute eine Genauigkeit von  $\pm 0,01$  ms bis  $\pm 0,03$  ms. Gemeinsam mit der hohen zeitlichen Auflösung können damit mehr und mehr die verschiedenen Effekte getrennt werden.

Die gemeinsame Interpretation beider Erscheinungen, der Polbewegungen und Rotationsschwankungen, ermöglicht weitere Erkenntnisse über ihre Ursachen sowie über die komplexe Wechselwirkung der verschiedenen geodynamischen Phänomene.

### 3. Schlussbemerkungen

In den letzten 50 Jahren konnte die Genauigkeit für die Bestimmung großräumiger geodätischer Netze um den Faktor 1000 erhöht werden. Das führte auch zu einem 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 als Basis für alle Vermessungen sowie die Deformation des Erdkörpers und eine Vielzahl geodynamischer Effekte und deren Wechselwirkung. Möglich wurde der Fortschritt in erster Linie durch die völlig neuen Methoden der Satelliten- bzw. Raumgeodäsie 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 Fortschritte bei der Nutzung der Mikrowellentechnik 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 Länder zur Verfügung und liefert somit ein einheitliches System für alle Vermessungen. In Europa ist durch die Einführung des Europäischen Terrestrischen Referenzsystems ETRS-89 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).

### Literatur

- [1] Altamimi, Z. et al.: Long term stability of the ITRF origin and scale. Paper EGU General Assembly. Vienna 2007
- [2] Bianco, G.; Luceri, V.; Devoti, R.: ITRF2005: Evaluation and its consistency. Paper EGU General Assembly. Vienna 2007
- [3] Capitaine, N. et al. (Eds.): Proceedings of the IERS Workshop on the implementation of the new IAU Resolutions. IERS Technical Notes No. 29. Frankfurt/M., 2002, 134 S.
- [4] Gambis, D.: Earth orientation monitoring using various techniques. Proc. Colloqu. IAU 178. Cagliari (Italy), 2000
- [5] McCarthy, D.D.; Petit, G. (Eds.): IERS Conventions 2003. Verlag BKG, Frankfurt/M., 2004, 127 S.

- [6] Montag, H.: Geocenter motions derived by different satellite methods. IERS Technical Notes No. 25. Paris, 1999, S. 71–76
- [7] Montag, H.: Zu relativistischen Effekten in der Satelliten- bzw. Raumgeodäsie. Sitzungsberichte d. Leibniz-Sozietät. Berlin, Bd. 78/79 (2005), S. 275–288
- [8] Montag, H.; Gendt, G.; Wilson, P.: On the determination of the terrestrial reference frame by SLR and GPS techniques. J. Geodynamics, Vol. 22, 1/2, 1996, S. 63–77
- [9] Ries, J. C.: Satellite laser ranging and the terrestrial reference frame; principal sources of uncertainty in the determination of the scale. Paper EGU General Assembly. Vienna 2007
- [10]Wu, X. et al.: Geocenter motion and reference frame – Geophysical and geodetic perspectives. Paper EGU General Assembly. Vienna 2007
- [12]IERS Annual Reports. Herausgeber: Central Bureau des IERS, jährlich.
- [11]IERS Homepage unter <http://www.iers.org/>
- [13]ITRF im Internet unter [http://itrf.ensg.ign.fr/ITRF\\_solutions/2005/ITRF2005.php](http://itrf.ensg.ign.fr/ITRF_solutions/2005/ITRF2005.php)
- [14]International Association of Geodesy, Internet unter <http://www.iag-aig.org/>