

Horst Montag

## **Meeresniveau und Erdrotationsvektor – zwei moderne Forschungsrichtungen mit Ursprung in der Mitteleuropäischen Gradmessung bzw. Internationalen Erdmessung**

Vortrag auf dem Kolloquium „Wissenschaftliche Geodäsie und ihre Geschichte“ am 14.09.2012 in Berlin

### **Zusammenfassung**

Die Untersuchungen zu den vielfältigen Phänomenen des Systems Erde stehen heute im Mittelpunkt geowissenschaftlicher Forschung. Neben dem Nachweis der einzelnen geodynamischen Effekte ist vor allem die Untersuchung ihrer zeitlichen Variationen von besonderer Bedeutung. Viele dieser Effekte sind sehr klein und werden zusätzlich durch vielfältige Störungen überlagert. Deshalb sind höchste Messgenauigkeiten und möglichst lange Zeitreihen erforderlich.

Zu diesen Phänomenen gehören das mittlere Meeresniveau und der Erdrotationsvektor. Dank der Weitsicht der 1862 gegründeten Mitteleuropäischen Gradmessung (MEG), 1867 in Europäische Gradmessung (EG) und ab 1886 in Internationalen Erdmessung (IE) umbenannt, wurden bereits in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts Forschungen und Messprogramme zur Erforschung dieser Phänomene durchgeführt.

Die Untersuchung des mittleren Meeresspiegels und seiner Änderungen wurde schon 1864 durch die MEG empfohlen. An der Station Swinemünde (heute Swinoujście) wurde dann 1870 ein Mareograf installiert und betreut. Danach folgten verschiedene weitere Pegelstationen der Ost- und Nordsee. Seit der Zeit wurden die Wasserstände kontinuierlich registriert und mehrfach zur Untersuchung verschiedener Effekte ausgewertet. Heute erfolgen diese Untersuchungen global in wesentlich erweiterter Form (u.a. Einbeziehung der Altimetrie).

Die mögliche Variation des Erdrotationspols wurde erstmals 1883 in der EG diskutiert. Um die Polschwankungen nachzuweisen, wurden 1888 spezielle astronomische Beobachtungen an mehreren Stationen beschlossen. Diese

Aktivitäten der IE führten dann 1899 zur Einrichtung des ersten internationalen wissenschaftlichen Dienstes, des Internationalen Polbewegungsdienstes. Dieser Dienst besteht bis heute und hat eine Vielzahl neuer Erkenntnisse über das Rotationsverhalten der Erde erbracht. Heute werden für diese Untersuchungen im Rahmen des modernisierten Dienstes (IERS – International Earth Rotation and Reference Systems Service) kosmisch-geodätische Messmethoden eingesetzt.

Obwohl die heutige Messgenauigkeit für beide Phänomene wesentlich höher ist, sind die langen Messreihen insbesondere für die Erforschung langperiodischer und säkularer Variationen von großer Bedeutung.

## 1. Einleitung

Die Gründung der Mitteleuropäischen Gradmessung (MEG) durch Johann Jacob Baeyer im Jahre 1862, also vor 150 Jahren, ist ein Meilenstein in der Geschichte der Geodäsie und gilt als Gründungsdatum der heutigen Internationalen Assoziation für Geodäsie (IAG) der Internationalen Union für Geodäsie und Geophysik (IUGG). Ziel der MEG war es, zunächst durch Kooperation mehrerer mitteleuropäischer Staaten die vorhandenen geodätischen Netze zusammenzuschließen und gemeinsam weiterzuentwickeln, um auf diese Weise bessere Erkenntnisse über die Erde zu gewinnen (Baeyer 1861 und 1862). Nach dem Beitritt weiterer europäischer Staaten wurde 1867 aus der MEG die Europäische Gradmessung (EG), und schließlich wurde die Organisation 1886 nach der Mitgliedschaft außereuropäischer Staaten in Internationale Erdmessung (IE) umbenannt.

Dank der Weitsicht der an der Kooperation in der MEG bzw. IE beteiligten Wissenschaftler wurden schon sehr früh Themen aufgegriffen, die auch heute noch von großer Bedeutung sind. Es wurde erkannt, dass wegen der Kleinheit der zu untersuchenden Phänomene und der überlagerten Störungen sowohl höchste Genauigkeiten bei der Messung als auch möglichst lange Zeitreihen erforderlich sind. Dank dieser langen Zeitreihen, deren Genauigkeit im Laufe der Zeit ganz wesentlich verbessert wurde, können daraus heute verfeinerte Erkenntnisse zu Teilbereichen des Gesamtsystems Erde abgeleitet werden.

Zu den von der MEG bzw. IE untersuchten Phänomenen gehören das mittlere Meeressniveau (MSL - Mean Sea Level) und der Erdrotationsvektor (ERP – Earth Rotation Parameters), bestehend aus Polbewegung und Rotationschwankungen. Die Ergebnisse sind heute sowohl von großer gesellschaftlicher als auch praktischer Bedeutung. Sie tragen u.a. bei zur Untersuchung von

Klimaschwankungen mit all seinen Auswirkungen, zur Realisierung eines Referenzsystems, zur Navigation und zu weiteren Anwendungen.

Der Stand der Untersuchung beider Phänomene wird kurz charakterisiert. Insbesondere werden die Aktivitäten der MEG bzw. IE und deren Bedeutung für die heutige Forschung dargestellt.

## 2. Einflussgrößen und Wechselwirkungen

Mittleres Meeresniveau (MSL)	Erdrotationsvektor (ERP)
Ab- und Zunahme der Festlandgletscher	Ab- und Zunahme der Festlandgletscher
Tektonische und sedimentäre Veränderungen der Meeresbecken	Tektonische und andere Massenverlagerungen in und auf der Erde
Atmosphärische Massenverlagerungen: Luftdruck, Winde, Wellen	Seismische Anregungseffekte
Meeresströmungen sowie Änderungen	Elastizitätsparameter der Erde
Hydrologischer Wasserkreislauf: Seen, Flüsse, Grundwasser	Atmosphärische Massenverlagerungen: Luftdruck, zonale Winde
Luni-solare Gezeiteneffekte	Variation von Meeresspiegel u. Strömungen
Temperatur und Dichte der Meere sowie deren Änderungen	Hydrologischer Wasserkreislauf: Seen, Flüsse, Grundwasser
Postglaziale Ausgleichsbewegungen	Wechselwirkung zwischen flüssigem äußeren Erdkern und Mantel
Schwereänderungen	Luni-solare Gravitationswirkungen, einschl. Gezeitenreibung
Schwankungen des Erdrotationsvektors	Sonnenwindeneinfluss auf Magnetosphäre
Expansion der Erde bzw. Änderung der Gravitationskonstante?	Expansion der Erde bzw. Änderung der Gravitationskonstante?

Tabelle 1: Einflussgrößen bzw. Störeffekte und Wechselwirkungen

Die Ursachen der Variationen des mittleren Meeresspiegels sowie des Erdrotationsvektors sind sehr komplex. Alle Veränderungen im Erdkörper, auf der Erdoberfläche, in der Atmosphäre sowie im Kosmos haben prinzipiell auch Auswirkungen auf das mittlere Meeresniveau und den Erdrotationsvektor, allerdings im Allgemeinen in sehr unterschiedlicher und z.T. noch nur wenig bekannter Weise. Die wesentlichen Einflussgrößen bzw. Störeffekte auf das mittlere Meeresniveau und den Erdrotationsvektor sind in Tabelle 1 zusam-

mengefasst. Daraus lassen sich auch die Wechselwirkungen erkennen. Eine gegenseitige Beeinflussung besteht damit auch zwischen den zu betrachtenden Phänomenen Meeresspiegel und Erdrotationsvektor selbst. Auf weitere Details und eine quantitative Analyse dieser Einflussgrößen kann an dieser Stelle nicht weiter eingegangen werden. Eine genaue Untersuchung der zeitlichen Variationen des mittleren Meeresspiegels und des Erdrotationsvektors setzt aber zumindest die näherungsweise Elimination der wichtigsten jeweiligen Störeffekte voraus. Im Rahmen einer interdisziplinären Interpretation der Ergebnisse und deren Restabweichungen können in einem iterativen Prozess die Einflussgrößen dann auch quantitativ besser separiert und zugeordnet werden. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse sind ein wichtiger Beitrag zu den aktuellen Erforschungen der komplexen Wechselwirkungen im System Erde.

### **3. Beobachtungen des mittleren Meeresniveaus**

Die ersten systematischen Wasserstandsbeobachtungen an der südlichen Ostseeküste begannen schon vor der Gründung der MEG, und zwar in Swinemünde (heute Swinoujście). Dort wurde 1811 ein Lattenpegel installiert, der täglich einmal abgelesen und für hydrographische Zwecke genutzt wurde. J. J. Baeyer erkannte schon früh die fundamentale Bedeutung des mittleren Meeresniveaus als Höhenreferenzfläche für die Geodäsie. In den Jahren 1837-47 war er mit dem Problem konfrontiert, als er verschiedene Küstenvermessungen an Ost- und Nordsee sowie ein Nivellement zwischen Berlin und der Ostsee durchführte (Baeyer 1840). Folgerichtig empfiehlt er bereits auf der 1. Allgemeinen Konferenz der MEG im Jahre 1864, „die mittlere Höhe der verschiedenen Meere in einer möglichst großen Zahl wo es angeht, mittels registrierender Apparate zu bestimmen“ (Foerster 1865).

Ab 1870 wurden durch die Europäische Gradmessung (EG) bzw. Internationale Erdmessung (IE) an verschiedenen Stationen der Ost- und Nordsee registrierende Mareografen eingerichtet. Die Betreuung der Stationen wurde dem Centralbureau der EG bzw. IE im Geodätischen Institut (zunächst in Berlin, ab 1892 in Potsdam) übertragen. Im Einzelnen betraf das die Stationen Swinemünde (1870), Warnemünde (1883), Wismar (1885), Travemünde (1886), Marienleuchte (1893), Arkona (1893), Bremerhaven (1897), Pillau (heute Baltijsk, 1897) und Stolpmünde (heute Ustka, 1908). Neben den präzisen Wasserstandsregistrierungen ist die ständige Kontrolle der Höhenkonstanz des jeweiligen Pegelnullpunktes von entscheidender Bedeutung (Seibt 1881 und 1885; Westphal 1900; Kühnen 1916; Montag 1964). Im Allgemei-

nen wurden dazu regelmäßige, meist jährliche, Kontrollnivellements zu einem Hauptreferenzpunkt und darüber hinaus zwecks Absicherung zu mehreren weiteren stabilen Höhenfestpunkten auf geologisch sicherem Grund in der weiteren Umgebung des Pegels (möglichst mindestens 6 – 10) durchgeführt. Aus diesen regelmäßigen Höhenkontrollen konnten über die Jahrzehnte hinweg auch kleinere Höhenänderungen der Pegelnullpunkte weitgehend nachgewiesen und bei der Bestimmung rezenter Niveauverschiebungen zwischen mittlerem Meeresspiegel und Küste als Korrekturen berücksichtigt werden (Montag 1967).

Um von den Niveauverschiebungen zu Höhenänderungen des mittleren Meeresspiegels zu gelangen, müssen u.a. etwaige Änderungen der Höhenreferenzpunkte (verursacht durch geologisch-tektonische Höhenänderungen, Setzungserscheinungen von Gebäuden u.a.m.) untersucht werden. Das ist ein komplexer geowissenschaftlicher Prozess, bei dem der Beitrag der Geodäsie darin besteht, durch weiträumige wiederholte Präzisionsnivellements lokale und regionale Höhenveränderungen zu bestimmen und weitgehend zu berücksichtigen. Entsprechende Aktivitäten unternahm auch die Gradmessung. So wurde in den Jahren 1882-1888 ein sogenanntes Gradmessungsnivellement zwischen Ostsee, Nordsee, Atlantik und Mittelmeer durchgeführt, das zwar vor allem zur Bestimmung der Höhenunterschiede der verschiedenen Meere diente, aber auch zur Untersuchung etwaiger Landhebungen bzw. Landsenkungen genutzt werden konnte. Mit ähnlicher Zielstellung wurde in den Jahren 1896 – 1911 im Auftrag des Zentralbüros der IE durch die Trigonometrische Abteilung der Preußischen Landesaufnahme ein Ostseeküstennivellement zur Verbindung der Pegelnullpunkte ausgeführt. Weitere im Laufe der Zeit durch die jeweilige Landesaufnahme durchgeführte sowohl spezielle als auch allgemeine Nivellements der Küstenregionen wurden ebenfalls mitbenutzt, um Aussagen über die Konstanz der Pegelreferenzpunkte abzuleiten.

### **3.1 Messverfahren und Datenanalysen – einst und heute**

Wie erwähnt, wurden anfangs nur Lattenpegel verwendet, an denen zu bestimmten Tageszeiten (anfangs nur einmal täglich) der Wasserstand visuell abgelesen wurde. Die Ablesefehler, hauptsächlich verursacht durch Wellen, waren beträchtlich. Sie konnten durch die Berechnung von Monats- und Jahresmittelwerten nur teilweise reduziert werden. Die Einführung von kontinuierlich aufzeichnenden Mareografen durch die EG war ein großer Fortschritt. Einerseits werden die Wellen als größte Störquelle durch die Bauart der Anlage schon vor der Messung entsprechend gedämpft und andererseits können

aus den Registrierungen ohne großen Aufwand beliebig viele Tageswerte übernommen und zu Monats- bzw. Jahresmittelwerten verarbeitet werden. Auf diese Weise können viele natürliche Störeffekte, insbesondere Gezeiten und meteorologisch bedingte Störeinflüsse, schon in der ersten Bearbeitungsstufe reduziert bzw. weitgehend eliminiert werden.

Die heutigen modernen Mareografen arbeiten zwar nach dem gleichen Grundprinzip, erlauben aber durch ihre Automatisierung wesentlich schnellere und umfassendere Auswertungen. Durch ihre recht gute globale Verteilung an nahezu allen Küsten können sie wesentlich besser sowohl zu einem einheitlichen globalen Höhensystem als auch zur Untersuchung von Meeresspiegelvariationen infolge von Klimaänderungen beitragen. Von entscheidender Bedeutung sind aber auch heute die Anschlüsse an geodätische Höhenfestpunkte sowie deren ständige Kontrolle. An einigen Basisstationen werden die Höhenkontrollen durch präzise absolute Schweremessungen ergänzt, um den Einfluss der Schwerebeschleunigung auf den Wasserstand bzw. die Höhe der Referenzpunkte zu untersuchen. Darüber hinaus spielt heute für die flächenhafte Untersuchung des Meeresspiegels die Satellitaltimetrie eine immer größere Rolle. Dabei fungieren die Mareografen mit ihren Höhenfestpunkten als Referenz. Diese Höhenfestpunkte werden heute mehr und mehr durch satellitengeodätische Methoden (Laser, GPS) auch im geozentrischen Referenzsystem überwacht, wodurch ein absoluter Höhenbezug realisiert werden kann. Neuere präzise Bestimmungen des globalen Schwerfeldes durch spezielle Satellitenprojekte (CHAMP, GRACE, GOCE) ermöglichen darüber hinaus, den Einfluss des globalen Gravitationsfeldes zu berücksichtigen. Zusätzlich leisten heute Bojen im offenen Meer, deren 3-D-Positionen durch GPS kontinuierlich gemessen werden, einen Beitrag.

Die Analysen der Wasserstandsbeobachtungen dienten in den ersten Jahrzehnten vor allem zur Bestimmung des mittleren Wasserstandes an den einzelnen Pegelstationen (Seibt 1881, 1885; Westphal 1900; Kühnen 1916). Hintergrund war neben den ozeanographischen Aspekten die Realisierung eines Referenzniveaus für die Höhenbestimmungen im Landesinnern. Erst längere Messreihen der Wasserstände an den Pegeln erlaubten auch, zeitliche Variationen des mittleren Wasserstandes abzuleiten. Wichtig ist dabei, die vielfältigen ozeanographischen, hydrologischen, meteorologischen und geologisch-geophysikalischen Störeffekte (Tab. 1) möglichst weitgehend abzutrennen. Eine umfassende Analyse der zeitlichen Variationen an den obigen Stationen der südlichen Ostseeküste (Montag 1967) ergab Werte für den säkularen Anstieg des Wasserstandes (relativ zum Festland) zwischen 1,5 mm/a

und 0,8 mm/a mit Unsicherheiten von etwa  $\pm 0,2$  bis  $\pm 0,3$  mm/a. Die Beträge nehmen ab von West nach Ost, was durch die postglaziale Hebung Skandinaviens erklärt werden kann. Der lineare Trend ist überlagert durch periodische Erscheinungen. Erkennbar ist auch eine Verstärkung des Anstiegs gegen Ende des analysierten Zeitraumes. Neuere Analysen bestätigen diesen Trend.

Die aktuelle Bedeutung der Forschungen zur Klimaänderung hat in den letzten Jahrzehnten eine Vielzahl von Ergebnissen für zeitliche Wasserstandsänderungen sowohl an vielen Küsten der Erde als auch aus Altimeterdaten für das offene Meer erbracht. So wurden aus 38 Küstenpegeln von Church und White (2011) für den Zeitraum 1900 bis 2009 ein globaler Mittelwert für den Anstieg des mittleren Meeresniveaus von  $1,7 \pm 0,2$  mm/a abgeleitet. Für den Zeitraum 1993-2009 erhalten die gleichen Autoren aus ca. 200 Stationen einen mittleren Meeresspiegelanstieg von  $2,8 \pm 0,8$  mm/a. Das zeigt eine deutliche Beschleunigung. Bestätigt wird das durch weitere Autoren. Als Beispiel sei Barnett (1984) genannt, der aus 152 Stationen für den Zeitraum 1881-1980 einen Wert von  $1,43 \pm 0,14$  mm/a und für die Zeit 1930-1980 einen Betrag von  $2,27 \pm 0,23$  mm/a erhielt.

Aus der Fülle der neueren Analysen unter Nutzung von Altimeterdaten seien hier beispielhaft nur Ergebnisse der Auswertung der Daten der Satelliten Topex/Poseidon, Jason-1 und -2 genannt. Durch drei Auswertezentren wurden für den Zeitraum 1992-2011 als globaler Mittelwert folgende Ergebnisse erhalten: Universität von Colorado in Boulder:  $3,1 \pm 0,4$  mm/a, CSIRO - Marine & Atmospheric Research, Australia:  $3,1 \pm 0,4$  mm/a und AVISO - CNES, Frankreich:  $3,2 \pm 0,6$  mm/a (CU Sea Level Research Group, 2012; Church und White, 2011). Darüber hinaus liefern die Altimeterdaten flächenhafte Ergebnisse für die einzelnen Meeresgebiete, die zum Teil stark von dem globalen Mittelwert abweichen. Aus diesen Abweichungen wiederum lassen sich neue Erkenntnisse über die komplexe Wirkung der verschiedenen meteorologisch-ozeanographischen Phänomene ableiten.

#### **4. Zur Bestimmung des Erdrotationsvektors von den Anfängen bis heute**

Die Variation des Erdrotationsvektors, bestehend aus Polbewegungen und Rotationsschwankungen, ist für die Astronomie ein vergleichsweise junges Phänomen. Theoretische Gleichungen zum Rotationsverhalten fester frei rotierender Körper wurden durch L. Euler und J. Lagrange im 18. Jahrhundert abgeleitet. Ein Nachweis in astronomischen Beobachtungen gelang aber zu-

nächst nicht. Die Entdeckung der Polbewegung geht auf das Jahr 1844 zurück. Nahezu zeitgleich vermuteten C.A.F. Peters und F.W. Bessel 1844 nach der Auswertung astronomischer Beobachtungen einen derartigen Effekt. Peters interpretierte aus den Zenitdistanzmessungen des Polarsterns von 1842-1843 in Pulkovo eine Polhöhenänderung mit einer Periode von ca. 304 Tagen (Peters 1844). Bessel kam zu der Vermutung nach der Auswertung eigener Meridiankreismessungen von 1841-1843 in Königsberg. Er äußerte „den Verdacht gegen die Unveränderlichkeit der Polhöhe“ in einem Brief an A. von Humboldt. Die Zeit für die Entdeckung war aber offenbar noch nicht reif, denn Humboldt hat sich darüber nicht sehr positiv geäußert, und auch die Publikation von Peters blieb zunächst ohne Wirkung. Die später gegründete Gradmessungsorganisation hat das Thema mehrfach diskutiert. Auf der 7. Allgemeinen Konferenz der Europäischen Gradmessung 1883 in Rom schlug E. Fergola erstmalig vor, das Problem der möglichen Veränderlichkeit des Pols durch simultane Beobachtungen an zwei Stationen gleicher geographischer Breite zu untersuchen (Baeyer 1884). Wenig später, im Jahre 1885, fand K. F. Küstner in Berlin in den Messreihen der Polhöhe einen periodischen Effekt mit einer Amplitude von ca.  $0,3''$  (ca. 10 m auf der Erdoberfläche), publiziert die Ergebnisse aber erst 1888 (Küstner 1888). Er gilt allgemein als Entdecker der Polbewegung. Im Jahre 1888 wurde auf der Konferenz der Permanenten Commission der IE in Salzburg durch W. Foerster eine Spezielle Commission zur Untersuchung der Breitenvariationen vorgeschlagen (Helmert 1889). Auf Veranlassung dieser Kommission wurden 1889/90 spezielle Breitenbeobachtungen in Berlin, Potsdam und Prag durchgeführt. Daraus konnten jährliche Breitenschwankungen von ca.  $0,5''$  nachgewiesen werden (Albrecht, 1891). Zur weiteren Verifizierung dieser Ergebnisse wurden auf Veranlassung der IE in den Jahren 1891/92 parallele Breitenbeobachtungen in Europa (Berlin, Prag, Straßburg) und in Honolulu (Hawaii) durchgeführt. Die Ergebnisse zeigten die erwarteten gegenläufigen Breitenänderungen in Europa und an der um etwa  $180^\circ$  in der geografischen Länge unterschiedlichen Station Honolulu (Albrecht 1893). Das war die endgültige Bestätigung der Existenz der Polschwankung. Durch die Analyse aller astronomischen Beobachtungen zwischen 1840 und 1891 fand S. C. Chandler im Jahre 1891 für die Polbewegungen neben der Jahreswelle eine überlagerte Periode von 427 Tagen (Chandler 1892). Die letztere, die nach heutigen Kenntnissen variiert, wurde später nach ihm benannt.

Die Resultate der parallelen Beobachtungen in Europa und Honolulu waren für die IE die Grundlage weiterer systematischer Untersuchungen. Das



führte dann auf der 11. Allgemeinen Konferenz der IE 1895 in Berlin zu dem Beschluss, einen Internationalen Breiten- bzw. Polhöhendienstes einzurichten. Nach nochmaliger Bestätigung auf der 12. Allgemeinen Konferenz 1898 in Stuttgart wurde der Internationale Breitendienst 1899 gegründet (Helmert und Albrecht 1899). Er ist damit der erste permanent arbeitende wissenschaftliche Dienst in internationaler Kooperation. Der Dienst bestand zunächst aus 6 astronomischen Stationen – global verteilt auf dem gleichen Breitengrad, nämlich  $39^{\circ}08'$ . Durch die gleiche Breite konnten überall die gleichen Sterngruppen beobachtet werden, sodass bestimmte Fehler von vornherein eliminiert wurden. Um die Fehler weiter zu reduzieren, wurden auch alle Stationen mit gleichen Zenitteleskopen ausgerüstet, und es wurde einheitlich nach der Horrebow-Talcott-Methode beobachtet. Die Stationen waren: Carloforte (Italien), Tschardjui (ab 1927 Kitab, Russland, Usbekistan), Mizusawa (Japan), Ukiah (USA), Cincinnati (bis 1916, USA) und Gaithersburg (bis 1915, USA). Das Zentralbüro des Breitendienstes, das die Arbeiten koordinierte und die Daten auswertete, war bis 1922 im Geodätischen Institut Potsdam angesiedelt und stand unter der Leitung von Th. Albrecht. Von 1922 bis 1935 und dann wieder von 1962 bis 1987 (in erweiterter Form als International Polar Motion Service IPMS) fungierte das Astronomische Observatorium in Mizusawa als Zentralbüro.

Die Untersuchung von Rotationsschwankungen bzw. von Variationen der rotationsgebundenen Zeit wurde erst im 20. Jahrhundert durch verbesserte Messungen möglich. Insbesondere der Zeitvergleich mittels Radiosignalen ermöglichte die Definition einer Universalzeit UT. Im Jahre 1919 wurde dann auch für die Zeit ein internationaler Dienst eingerichtet und durch das Bureau International de l'Heure (BIH) in Paris koordiniert. Eine weitere bedeutende Wegmarke war die Erfindung und Einführung der gegenüber den herkömmlichen Pendeluhrn wesentlich genaueren Quarzuhrn Anfang der 1930er Jahre. Durch ihren Einsatz bei astronomischen Beobachtungen gelang F. Pavel und W. Uhink vom Geodätischen Institut Potsdam 1934 der Nachweis von Rotationsschwankungen der Erde (Pavel und Uhink 1935). Durch einen weiteren technischen Fortschritt – den Einsatz von Atomuhren seit den 1960er Jahren bei den vom BIH koordinierten internationalen astronomischen Beobachtungsprogrammen – gelangen mehr und mehr detaillierte Erkenntnisse über die Rotationsschwankungen der Erde.

Eine entscheidende Verbesserung der Überwachung des Rotationsverhaltens der Erde ist durch die modernen kosmisch-geodätischen Verfahren möglich geworden. Nach anfänglichen parallelen Messungen mit den klassischen

astronomischen Beobachtungen und einigen speziellen Messkampagnen wurde ab 1988 ein völlig neuer Dienst unter ausschließlicher Anwendung kosmisch-geodätischer Verfahren eingerichtet. Dieser neue internationale Dienst IERS (International Earth Rotation Service, später erweitert auf International Earth Rotation and Reference System Service) basiert auf globalen Netzen folgender Messsysteme: Radiointerferometrie mit sehr langer Basis (VLBI – Very Long Baseline Interferometry), Lasermessungen zu Satelliten und zum Mond (SLR bzw. LLR – Satellite bzw. Lunar Laser Ranging) sowie den beiden Mikrowellenverfahren unter Nutzung von Satelliten GPS und DORIS (IERS-Jahresberichte und IERS-Website). Ziel dieses Dienstes ist es, simultan alle Parameter zu bestimmen, die zur Realisierung und Überwachung eines absoluten (geozentrischen) geodätischen Referenzsystems nötig sind. Dazu gehören Polbewegungen und Rotationsschwankungen als Orientierungsparameter des Koordinatensystems innerhalb des Erdkörpers, Präzession und Nutation als Orientierungsparameter im Raum, Parameter zur Realisierung des Geozentrums (Schwerpunkt der Erde) als Koordinatenursprung und der Maßstab. Die Potenz der erwähnten kosmisch-geodätischen Methoden zum Nachweis dieser einzelnen Parameter ist sehr unterschiedlich. Deshalb ist es von großem Vorteil, möglichst alle Methoden auf sogenannten Geodynamischen Observatorien simultan einzusetzen. Im Rahmen von internationalen Projekten der IAG, der Nachfolgeorganisation der 1862 gegründeten MEG, werden aus diesem Grunde gegenwärtig die globalen Netze mehr und mehr mit derartigen komplexen Messstationen ausgerüstet. Durch die Kombination der Daten der einzelnen Messsysteme bei der Auswertung können die unterschiedlichen Parameter optimal bestimmt werden. Um etwaige Auswertefehler zu vermeiden, erfolgen die Analysen in mehreren internationalen Zentren. Auf diese Weise können die erwähnten Parameter mit bisher nicht gekannter Präzision bestimmt und überwacht werden. Die Genauigkeiten betragen für die Polkoordinaten 0,1 bis 0,2 Millibogensekunden (besser als 1 cm auf der Erdoberfläche) und für die rotationsgebundene Zeit bzw. die Tageslänge besser als 0,1 ms. Diese hohe Genauigkeit führte auch zum Nachweis sehr differenzierter Periodenspektren. Neben den schon anfangs erkannten Jahres- und Chandler-Wellen der Polbewegung, deren Superposition zu relativ starken zeitlichen Variationen der Gesamtamplitude führt, ist inzwischen ein umfangreiches Spektrum bis in den Subtagbereich nachgewiesen worden. Ähnliches trifft für die Rotationsschwankungen zu. Für das Geozentrum als Koordinatenursprung des dreidimensionalen geodätischen Referenzsystems ermöglichen die Genauigkeiten im Subzentimeterbereich heute erste

quantitative Aussagen über seine Variationen, verursacht durch Massenverlagerungen innerhalb des Erdkörpers, auf der Erdoberfläche oder in der Atmosphäre. Das ist eine Situation, wie sie zu Beginn der Aktivitäten der Organisation der Internationalen Erdmessung für die Lage des Pols, dessen Variationen auf der Erdoberfläche mit mehr als 10 m wesentlich größer sind, vorhanden war. Auch daran ist der Fortschritt bei der Genauigkeit der Überwachung des Systems Erde erkennbar.

## **5. Schlussbemerkungen**

Die von der Mitteleuropäischen Gradmessung bzw. Internationalen Erdmessung initiierten Forschungen zu den Problemen Meeresniveau und Erdrotationsvektor sind heute als Beitrag zur Überwachung des Systems Erde von großer aktueller Bedeutung. Insbesondere die dadurch zur Verfügung stehenden langen Zeitreihen sind für das Langzeitverhalten von unschätzbarem Wert.

Die Genauigkeit und der Umfang der Daten zur Bestimmung der einzelnen Parameter haben sich vor allem in den letzten Jahrzehnten dank des Einsatzes moderner Satellitentechniken rasant entwickelt. So lag die Genauigkeit der Polkoordinaten nach der Entdeckung der Polbewegungen bei  $\pm 0,1$  Bogensekunden ( $\pm 3$  m) und heute bei  $\pm 0,1$  Millibogensekunden ( $\pm 3$  mm), das ist ein Faktor 1000! Ähnlich ist es bei der rotationsgebundenen Zeit, deren Variationen erst in den 1930er Jahren entdeckt wurden. Der Wasserstand an den Küsten wurde anfangs nur punktuell an wenigen Pegeln visuell abgelesen, während heute das Meeresniveau global über die gesamte Fläche mit hoher Genauigkeit überwacht werden kann.

Die Analyse der langen Zeitreihen in Kombination mit den hochgenauen neueren Daten bringt eine Vielzahl neuer Erkenntnisse zum Periodenspektrum der einzelnen Phänomene und zu deren Wechselwirkungen. Neben der wissenschaftlichen Bedeutung ist die Überwachung der Phänomene mit der heutigen Genauigkeit auch von großer praktischer und volkswirtschaftlicher Relevanz. So sind die präzisen Erdrotationsparameter die Grundlage für ein modernes Referenzsystem und damit für die Satellitennavigation, die heute für nahezu alle Zweige der Wirtschaft und des gesellschaftlichen Lebens von großer Bedeutung ist. Die präzise Erforschung des Zeitverhaltens sowohl der Erdrotationsparameter als auch des mittleren Meeresspiegels trägt wesentlich zur Untersuchung von Klimaphänomenen und deren Änderungen bei und ist damit hochaktuell.

## Literatur

- Albrecht, Th. (1891): Bericht über die Resultate der fortlaufenden Breitenbeobachtungen zu Berlin, Potsdam und Prag 1889-1890. Verhandl. d. 1890 in Freiburg abgeh. Conf. d. Perm. Comm. d. Int. Erdm., Berlin
- Albrecht, Th. (1893): Resultate der Beobachtungsreihen in Berlin, Prag, Straßburg und Honolulu betreffend die Veränderlichkeit der Polhöhe. Astron. Nachr. 131(3131)
- Baeyer, J.J. (1840): Nivellement zwischen Swinemünde und Berlin. Berlin
- Baeyer, J.J. (1861): Über die Größe und Figur der Erde. Eine Denkschrift zur Begründung einer mitteleuropäischen Gradmessung. Georg Reimer Verlag Berlin.
- Baeyer, J.J. (1862): Zur Entstehungsgeschichte der europäischen Gradmessung. Berlin
- Baeyer, J. J. (1884): Jahresbericht mit Verh.der im Oct. 1883 in Rom abgehaltenen Siebten All. Conf. d. Europ. Gradmessung, Berlin
- Barnett, T.P. (1984): The Estimation of "Global" Sea Level Change. A Problem of Uniqueness. Journal of Geophysical Research 89 (C12), Washington
- Bessel, F.W. (1844): Brief an A. v. Humboldt, in H.J. Felber (Ed.) Briefwechsel zwischen Alexander v. Humboldt und Friedrich Wilhelm Bessel. Akademie-Verlag, Berlin 1994
- Chandler, S. C. (1892): On the variation of latitude. Astron. Journal, 12, Boston
- Church, J.A. und White, N.J. (2011): Sea Level Rise from the late 19<sup>th</sup> to the early 21<sup>st</sup> Century. Surveys in Geophysics, Vol. 32, Springer Berlin
- CU Sea Level Research Group (2012): University of Colorado, Homepage, Boulder
- Foerster, W. (1865): Verhandlungen der ersten allgemeinen Konferenz 1864, Berlin
- Helmert, F.R. (1889): Bericht über die Thätigkeit des Centralbureaus. Verhandl. d. Sept. 1888 in Salzburg abgehaltenen Conf. d. Perm. Comm. d. Int..Erdm., Berlin
- Helmert, F. R. und Albrecht, Th. (1899): Der Internationale Polhöhendienst. Astron. Nachr. 148(3532)
- Höpfner, J. (2001): The International Latitude Service – A Historical Review from the Beginning to its Foundation in 1899 and the Period until 1922. Surveys in Geophysics 21, Kluwer Acad. Publ.
- IERS (International Earth Rotation and Reference System Service): Jahresberichte und Homepage, Paris und Frankfurt
- Kühnen, F.J. (1916): Das Mittelwasser der Ostsee bei Travemünde, Marienleuchte, Wismar, Warnemünde, Arkona, Swinemünde, Pillau, Memel und das Mittelwasser der Nordsee bei Bremerhaven in den Jahren 1898-1910. Veröff. Königl. Preuß. Geod. Inst., Neue Folge Nr. 70. Berlin
- Küstner, F. (1888): Neue Methode zur Bestimmung der Aberrations-Constante nebst Untersuchungen über die Veränderlichkeit der Polhöhe. Beobachtungs-Ergebnisse der Königlichen Sternwarte zu Berlin, Heft 3, Berlin

- Montag, H. (1964): Die Wasserstände an den ehemaligen Pegelstationen des Geodätischen Instituts Potsdam bis 1944. Arb. aus d. Geod. Inst. Potsdam Nr. 5. Potsdam
- Montag, H. (1967): Bestimmung rezenter Niveaueverschiebungen aus langjährigen Wasserstandsbeobachtungen der südlichen Ostseeküste. Arb. aus d. Geod. Inst. Potsdam Nr. 15. Potsdam
- Pavel, F. und Uhink, W. (1935): Die Quarzuhren des Geodätischen Instituts Potsdam. Verlag Schaidt
- Peters, C.A.F. (1844): Resultate aus Beobachtungen des Polarsterns am Ertelschen Verticalkreis der Pulkowaer Sternwarte. Astron. Nachr. 22(509-512), Altona
- Seibt, W. (1881): Das Mittelwasser der Ostsee bei Swinemünde. Publ. Königl. Preuß. Geod. Inst. Berlin
- Seibt, W. (1885): Das Mittelwasser der Ostsee bei Travemünde. Publ. Königl. Preuß. Geod. Inst. Berlin
- Westphal, W. (1900): Das Mittelwasser der Ostsee bei Travemünde, Marienleuchte, Wismar, Warnemünde, Arkona und Swinemünde in den Jahren 1882/1897. Veröff. Königl. Preuß. Geod. Inst., Neue Folge Nr. 2. Berlin