

Übergeordnete geodätische Koordinaten in Deutschland heute – Teil 1: Globale Koordinatensysteme und ihre Realisierungen

Top Level Geodetic Coordinates in Germany Today – Part 1: Global Coordinate Systems and their Realizations

Barbara Görres und Axel Nothnagel

Für die unterschiedlichen Bedürfnisse des Vermessungswesens, der Navigation und geodynamischer Untersuchungen stehen seit Ende der 1990er-Jahre großräumige konsistente Referenzsysteme zur Verfügung. Während die traditionelle Realisierung eines Bezugssystems mit den klassischen Messverfahren zu einer Arbeit vom „Kleinen ins Große“ zwang und Netze vergrößert werden mussten, geht man heute den umgekehrten Weg. Die schnelle Entwicklung der weltraumgeodätischen Verfahren, insbesondere des GPS, ermöglicht und verlangt einen Umbruch hin zu völlig neu und anders gestalteten Bezugssystemen. Ausgehend von den globalen Systemen werden durch Verdichtung mit GPS-Messungen weitere Systeme für regionale oder gar kleinräumige Anwendungen der alltäglichen Vermessungspraxis geschaffen, die die Systeme der klassischen Landesvermessung heute nach und nach ersetzen.

Das „Europäische Datum ETRS89“ als bundesweit einheitliches Bezugssystem für Geobasisinformationen der Landesvermessung und des Liegenschaftskatasters wurde direkt von einem globalen System abgeleitet. Deshalb ist das Verständnis der globalen Systeme nicht mehr nur von rein akademischem Interesse. Leider ist dieser Themenkreis für den Anwender bisher aber kontextbedingt nur bruchstückhaft und verstreut in vielen Einzelveröffentlichungen dargestellt. Dieser Artikel beleuchtet deshalb in seinem ersten Teil die Zusammenhänge und Entwicklungsstufen des International Terrestrial Reference System (ITRS) und seiner Realisierungen sowie die für den Einsatz der globalen Satellitennavigationssysteme (engl. Global Navigation Satellite Systems – GNSS) definierten Systeme, wobei auch auf begriffliche Differenzierungen eingegangen wird. Im zweiten Teil wird die Verwendung von Referenzsystemen in der Landesvermessung thematisiert werden. Dabei werden wir die Entwicklung vom European Terrestrial Reference System 1989 (ETRS89) bis hin zu den Anwendungen im Bereich der Referenzstationsdienste für GPS im Gesamtzusammenhang darstellen.

Schlüsselwörter: Referenzsysteme, Referenzrahmen, Referenznetze, ITRS, ITRF, WGS84

Since the end of the 1990ies, large scale consistent reference systems are available for the needs of surveying, navigation and geodynamical investigations. While the traditional realizations of reference systems were constraint through classical methods to work from small to large with extensions of triangular networks, we can now choose the opposite approach. Through the fast developments of the space-geodetic

techniques a complete change of paradigm and different types of reference systems emerge. Starting from truly global systems, we can develop networks for regional and even smaller surveying applications from densifications by GPS measurements. The historical networks of land surveying are, thus, being replaced step by step. The European Datum ETRS89 as a unified reference system for geospatial informations of land surveying and cadastre is directly linked to a global system. For this reason, the understanding of the global relationships is more than an academic exercise. Unfortunately, this topic of interest to the general user has only been addressed incoherently in many distributed publications. For this reason, this article, in its first part, illuminates the general conceptions and development stages of the International Terrestrial Reference System (ITRS) and its realizations as well as those systems which are defined for the applications of global navigation satellite systems (GNSS). For a better understanding, we also address conceptual definitions and nomenclature. In the second part the applications of reference systems in land surveying will be addressed. We will depict in a general context the developments from the European Terrestrial Reference System 1989 (ETRS89) to applications in the framework of permanent reference station networks for GPS.

Keywords: Reference systems, reference frames, ITRS, ITRF, WGS84

1 MOTIVATION UND EINLEITUNG

Die Veröffentlichung des International Terrestrial Reference Frame 2008 (ITRF2008) im Juli 2011 bietet einen willkommenen Anlass, auf die Bedeutung übergeordneter Referenznetze hinzuweisen. Sie bilden die Grundlage für vielerlei Anwendungen in der Geodäsie und finden ihren Niederschlag in heutiger Zeit auch in der deutschen Landesvermessung und den nachgeordneten Gebrauchskoordinaten. Der ITRF2008 ist die neueste Realisierung des International Terrestrial Reference Systems (ITRS), für das der Internationale Erdrotations- und Referenzsystemdienst (engl. International Earth Rotation and Reference Systems Service - IERS) verantwortlich zeichnet (Altamimi u.a. 2011). Die Zusammenhänge und Entwicklungsstufen der geodätischen Referenzsysteme vom ITRS über die erste Realisierung des European Terrestrial Reference System 1989 (ETRS89) zu den heutigen Gebrauchskoordinaten sind kontextbedingt bisher nur bruchstückhaft und verstreut in vielen Einzelveröffentlichungen dargestellt. Deshalb möchten wir in diesem Artikel die Entwicklungsgeschichte noch einmal aufrollen und die Detailinformationen in einen Gesamtzusammenhang bringen.

Um die Vielfalt der Begrifflichkeiten zu entwirren, werden wir zuerst kurz auf die Bezeichnungen Referenzsystem, Referenzrahmen und Referenznetz eingehen. Das Referenzsystem ist zunächst einmal nur eine mathematische Konstruktion, die aus Definitionen und Konventionen besteht, (also mehr oder weniger am „grünen“ Tisch vereinbart werden kann). Dazu gehören Details wie die Definition des Ursprungs und der Achsrichtungen (*Abb. 1*), aber möglicherweise auch Ellipsoidparameter u.Ä. Aller-

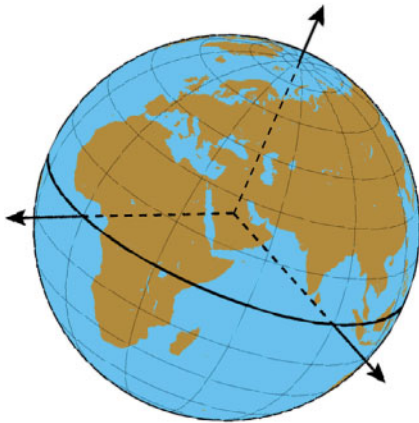


Abb. 1 | Definition eines erdfesten Referenzsystems, z.B. als ITRS mit den entsprechenden Ursprungs- und Achsfestlegungen

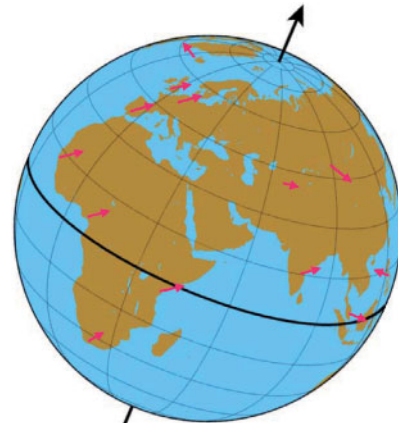


Abb. 2 | Realisierung eines erdfesten Referenzsystems, z.B. als ITRF mit Stationen an der Erdoberfläche und ihren Koordinaten und Geschwindigkeitsvektoren

dings können solche Definitionen nur eine beschreibende Funktion haben, da die jeweiligen Elemente physikalisch nicht greifbar sind. So kann man zwar theoretisch festlegen, dass z.B. der Ursprung im Geozentrum liegen soll, aber dieser ist weder zugänglich noch millimetergenau zu lokalisieren.

Erst durch entsprechende Vermarkungen oder wohldefinierte Bauteile von Messinstrumenten sowie die dazugehörigen geometrischen Messungen (Abb. 2) wird ein Referenzrahmen tatsächlich realisiert (aus dem Englischen vom Wort *frame* abgeleitet, im Deutschen auch oft als Referenznetz bezeichnet). Die Lage des Geozentrums, um bei obigem Beispiel zu bleiben, wird erst durch Lasermessungen zu Satelliten und deren Auswertung über Bahnparameter und (zunächst noch datumsfreie) Koordinaten der Beobachtungsstationen (genauer gesagt der Achsenschnittpunkte der Laserteleskope) indirekt lokalisiert. Bei der weiteren Auswertung wird dann die Lagerung aller Beobachtungsstationen, also das sog. Datum, so realisiert, dass diese bestmöglich mit den Systemdefinitionen für den Ursprung und die Achsrichtungen übereinstimmt. Global betrachtet ist damit ein Referenzrahmen die Realisierung eines Referenzsystems durch einen Satz von Koordinaten für eine Anzahl fundamentaler Bezugspunkte. Die Bezugspunkte sind immer durch Vermarkungen an den Erdkörper angebunden und die Voraussetzung für die Verwendung der Systeme in der geodätischen Praxis. Die Koordinatenachsen selbst sind aber in keinem Fall materialisiert.

Ähnliche Überlegungen kann man auch für lokale Referenzsysteme und Referenzrahmen bzw. -netze anstellen, wobei bei ebenen Systemen noch eine Bezugsfläche definiert werden muss. So kann man sich also den Begriff Referenzsystem als einen übergeordneten Begriff vorstellen, der in aller Regel den Referenzrahmen bzw. das Referenznetz als Materialisierung einschließlich der Datumsfestlegung beinhaltet. Da in diesem Zusammenhang vieles von Vereinbarungen abhängt, spricht man oft auch von vereinbarten Bezugssystemen.

An dieser Stelle sollte man sich klar machen, dass unsere heutigen Koordinaten ihren Ausgangspunkt tatsächlich vor vielen hundert Jahren bei den ersten Messungen der geographischen Breite astronomischer Observatorien hatten. Die Breite ist nämlich die einzige

Größe, die tatsächlich aus einer physikalischen Eigenschaft der Erde, der Erdrotation, unzweideutig erwächst. Erst 1884 kam bei der Internationalen Meridiankonferenz durch Konvention die heute weltweit gültige einheitliche Nulllinie für die geographische Längendefinition, der Greenwich-Meridian, dazu. Aus durchaus praktikablen Gründen hat jede weitere Generation von Astronomen, Geodäten und anderen Geowissenschaftlern trotz ständig wachsender Erkenntnisse über die Form der Erde und die Variabilität der Lage der Erdrotationsachse (Polbewegung) sowie steigender Messgenauigkeiten diese Konzeption in ihren Grundzügen beibehalten. Dies gilt auch für die geozentrisch kartesischen Koordinaten, die seit Einzug der globalen Satellitengeodäsie Anfang der 1960er Jahre bei der Auswertung der meisten Beobachtungsdaten und somit letztendlich auch im ITRS Verwendung finden. Die Achsrichtungen wurden nämlich nicht jeweils beliebig neu ausgerichtet, sondern sollten sich wiederum vom Erdmittelpunkt ausgehend an einer mittleren Rotationsachse (Z-Achse) und am Schnittpunkt des Nullmeridians mit dem Äquator (X-Achse) orientieren. Mit der Nutzung geozentrisch kartesischer Koordinaten (X, Y, Z) sind die Polarkoordinaten (B, L, H) als Ortsangaben bei vielen globalen geodätischen Anwendungen, außer vielleicht in der großräumigen Kartographie oder geophysikalischen Korrektionsmodellen, eher in den Hintergrund gerückt, entfällt doch bei ihnen die Notwendigkeit für eine zusätzliche Festlegung von Ellipsoidparametern. Sollte trotzdem Bedarf für eine Umrechnung geozentrisch kartesischer Koordinaten in ellipsoidische vorliegen, so bedient man sich heute des GRS80-Ellipsoids mit seinen Formparametern /Petit und Luzum 2010/. Damit verlässt man dann quasi die Bezugsfläche der Äquatorebene und bezieht sich fortan auf die Oberfläche eines Referenzellipsoids.

Im Hinblick auf die Nutzung der globalen Satellitennavigationssysteme (engl. Global Navigation Satellite Systems – GNSS) hat man es neben den erdfesten Referenzsystemen auch mit himmelfesten zu tun, welche durch eine Kette von Transformationen ineinander überführt werden können. Himmelfeste Systeme sind in der Regel inertial oder quasi-inertial, die hier behandelten erdfesten Referenzsysteme nehmen an der Rotation der Erde teil. Die Erdrotation ist dann das Verbindungselement zwischen dem himmelfesten System

der Satellitenbahnen und dem erdfesten System der Stationen an der Erdoberfläche.

Die Neuzeit hat auch noch in einer anderen Weise einen erheblichen Einschnitt bei den Koordinaten und ihren Systemen mit sich gebracht. Durch die überaus hohe Messgenauigkeit der modernen weltraumgestützten geodätischen Beobachtungsverfahren wird die Instabilität der Erdkruste im Bereich einiger Millimeter pro Jahr schon innerhalb weniger Jahre sichtbar und muss deshalb im Gesamtkonzept berücksichtigt werden. Vor allem aufgrund der Bewegung der Kontinentalplatten kann auf der Grundlage materieller Punkte auf der Erde kein Referenzsystem existieren, bezüglich dessen alle Referenzpunkte in Ruhe sind. Aus diesem Grund werden die Koordinaten des ITRS heute immer für eine Referenzepoche (z.B. 01.01.2005 für das ITRF2008) zusammen mit den entsprechenden Geschwindigkeitskomponenten in mm/Jahr angegeben. In Mitteleuropa betragen diese wegen der globalen Kontinentaldrift ca. 25 mm/Jahr in Nordostrichtung. In verschiedenen Regionen haben die Bewegungen aufgrund der globalen und regionalen Krustendynamik natürlich andere Ausprägungen (Abb. 3). Für jeden Messpunkt muss daher auch immer sein Geschwindigkeitsvektor, d.h. die Geschwindigkeiten in X, Y- und Z-Richtung, angegeben werden.

Trotz und vielleicht auch wegen der genannten Komplexität der Materie sind hochgenaue Koordinaten heute mehr denn je wichtige Grundbausteine des geodätischen Schaffens und stehen deshalb im Fokus vieler Anstrengungen. Während früher die einzelnen Staaten eigene Referenzsysteme für ihre nationalen geodätischen Aufgaben definierten und realisierten, ermöglicht und verlangt heute der Einsatz geodätischer Raumverfahren eine konsistente Definition von Bezugssystemen. Beginnend mit den globalen, können diese durch GNSS-Beobachtungen verdichtet werden bis hin zu Systemen, die in regionalen oder kleinräumigen Anwendungen in der alltäglichen Vermessungspraxis Verwendung finden. Die logische und hierarchische Abfolge soll im Folgenden erläutert werden.

2 GLOBALE REFERENZSYSTEME UND IHRE REALISIERUNG

Die Schaffung des ITRS war von Anfang an eng mit dem Wunsch verbunden, die Ergebnisse verschiedener globaler Beobachtungsverfahren in einem konsistenten System zusammenzuführen. Während beim ITRS viele zivile Beteiligte aus unterschiedlichen Bereichen zusammenarbeiten, hat das World Geodetic System 1984 (WGS84) seinen Ursprung im US Militärapparat (NIMA 2000). Seinen hohen Bekanntheitsgrad verdankt das WGS84 der Tatsache, dass es von Anfang an das Referenzsystem des Global Positioning System (GPS) war und alle Koordinaten, die mit handelsüblichen GPS-Empfängern bestimmt wurden, mit dem WGS84 in Verbindung gebracht wurden. Dass es zu den Differenzen, zum anderen inzwischen aber vor allem Gemeinsamkeiten zwischen ITRS und WGS84 gibt, werden wir im Weiteren erläutern.

2.1 Das International Terrestrial Reference System

Das ITRS wurde 1991 bei der Generalversammlung der Internationalen Union für Geodäsie und Geophysik (IUGG) in Wien und quasi zeitgleich mit Übernahme durch die International Association of Geodesy (IAG) als das konventionelle globale Referenzsystem der Geodäsie verabschiedet (IAG 1992). Das ITRS ist primär als geozentrisch gelagertes kartesisches Koordinatensystem definiert, zu dessen Festlegung eine ganze Reihe von wichtigen Parametern gehört, die das System in seinen geometrischen Eigenheiten definiert. Dazu gehören solche grundlegenden Dinge wie die Tatsache, dass der Ursprung der Schwerpunkt der festen Erde zusammen mit seiner flüssigen und gasförmigen Hülle sein soll. Die Z-Achse soll die mittlere Rotationsachse der Erde von 1900 bis 1905 sein und die X-Achse soll durch den Schnittpunkt des mittleren Meridians von Greenwich mit dem

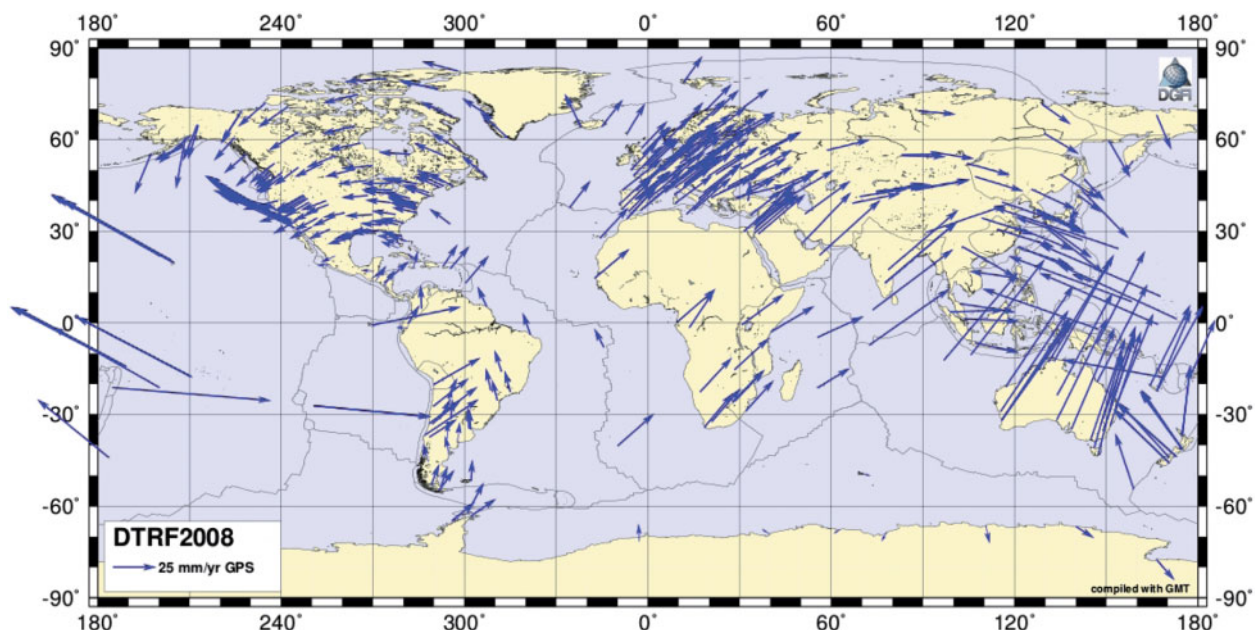


Abb. 3 | Bewegungsvektoren in mm/Jahr der GPS-Referenzpunkte im ITRF2008 nach Seitz et al. (2010)

mittleren Äquator von 1900 bis 1905 definiert werden. Die Y-Achse vervollständigt ein Rechtssystem (Abb. 1). Alle zugrundeliegenden Definitionen und Konventionen sind heute in den sog. Conventions des International Earth Rotation and Reference Systems Service beschrieben /Petit and Luzum 2010/.

Der Begriff des ITRS fristet allerdings seit seiner Einführung ein „Mauerblümchendasein“, da es, anders als das WGS84, so gut wie nie außerhalb der Geodäsie in Erscheinung getreten ist. Dies soll sich in naher Zukunft ändern, da es Anstrengungen gibt, den Begriff des ITRS über eine ISO-Norm und eine verstärkte Nutzung in disziplinübergreifenden Aktivitäten in das Bewusstsein der Allgemeinheit zu bringen /Boucher 2010/.

Einen größeren Bekanntheitsgrad haben hingegen die Realisierungen des ITRS, die unter dem Namen ITRF in mehr oder weniger regelmäßiger Folge veröffentlicht werden. Unter einem Terrestrial Reference Frame (TRF) wird die Realisierung des jeweils zugehörigen Systems verstanden. Die Bezeichnung des jeweiligen ITRF bezieht sich auf den Umfang der Beobachtungsdaten, die in die Berechnungen eingeflossen sind. Beim ITRF2008 bedeutet dies also die Einbeziehung sämtlicher vorliegender Beobachtungsdaten bis Ende 2008.

Die Lage des Ursprungs, die Orientierung der Achsen und der Maßstab, die zusammen das geodätische Datum verkörpern, werden, wie oben schon erwähnt, physikalisch durch einen Satz von vermarkten Punkten auf der Erdoberfläche und mathematisch-numerisch durch die zugehörigen Koordinaten sowie Bewegungsvektoren materialisiert. Für jeden Messpunkt muss daher auch immer sein Geschwindigkeitsvektor, d.h. die Geschwindigkeiten in X, Y- und Z-Richtung, angegeben werden. Die Datensätze des ITRF bestehen deshalb für jeden der Punkte aus geozentrisch, kartesischen Koordinaten, den jeweiligen Geschwindigkeiten und der zwingenden Angabe einer Referenzepoche. Für das ITRF2008 ist dies der 1.1.2005 (Tab. 1). Mit diesen Informationen kann man für jeden Zeitpunkt die aktuell gültige Koordinate berechnen. Die Referenzepoche ist nicht zu verwechseln mit dem o.g. Bezeichnungsjahr.

Zu den Beobachtungsverfahren, die zur Schaffung und Pflege des ITRF beitragen, gehören Laserentfernungsmessungen zu Satelliten (Satellite Laser Ranging = SLR), Radiointerferometrie mit

Radioteleskopen (Very Long Baseline Interferometry = VLBI) sowie Dopplerbeobachtungen des französischen DORIS-Systems (Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated on Satellites) und zivil-geodätische Messungen mit dem GPS. ITRF-Punkte sind meist permanent operierende Messeinrichtungen der weltraumgestützten Geodäsie bzw. deren invariante Punkte wie Schnittpunkte der Drehachsen oder Phasenzentren von Antennen. Nur noch in wenigen Fällen handelt es sich bei ITRF-Punkten um Vermarkungen im klassischen Sinne, d.h. Messpfähle oder Bodenpunkte.

Organsiert und ausgewertet werden die Messungen von den jeweils verantwortlichen Diensten der IAG, zu denen der International Laser Ranging Service (ILRS) /Pearlman et al., 2002/, der International GNSS Service (IGS) /Dow et al., 2009/, der International VLBI Service for Geodesy and Astrometry (IVS) /Schlüter und Behrend, 2007/ und der International DORIS Service (IDS) /Willis et al. 2010/ gehören. Für die Erstellung der Beiträge zu den ITRF werden immer alle Beobachtungsdaten der einzelnen Verfahren verwendet, z.B. bei VLBI von 1980 bis 2008 oder bei SLR von 1983 bis 2008. Der globale VLBI-Input zum ITRF2005 und ITRF2008 wurde am Institut für Geodäsie und Geoinformation der Universität Bonn berechnet /Vennebusch et al. 2007; Böckmann et al. 2010/. Das ITRS Product Center des IERS setzt die Datensätze der einzelnen Techniken dann mittels einer Ausgleichung der Widersprüche zu einem konsistenten Referenzrahmen, dem jeweiligen ITRF, zusammen.

Bei dieser Kombination spielen vor allem solche Stationen eine entscheidende Rolle, an denen mehrere Beobachtungstechniken gleichzeitig in unmittelbarer Nachbarschaft zur Verfügung stehen. Hier können nämlich die lokalen Exzentrizitäten (sog. local ties) zwischen den Referenzpunkten der verschiedenen Verfahren mit terrestrischen Verfahren gemessen werden. Dazu werden in der Regel die Positionen der jeweiligen Referenzpunkte in ein lokales Pfeilernetz herab gelegt, der topozentrische Verbindungsvektor berechnet und dieser dann in das geozentrische System transformiert. Gute Beispiele für solche Fundamentalstationen sind die Geodätischen Observatorien Wettzell im Bayerischen Wald /Seeger et al. 1997/ und in Concepcion in Chile /Hase 2011/, die beide vom Bundesamt für Kartographie und Geodäsie betrieben werden. An einigen anderen

	Referenzepoche (jeweils 1.1.)	Messpunkte	VLBI	SLR	GPS	DORIS	Stationsbewegungen
ITRF88	1988	120	X	X	-	-	Modell
ITRF89		113	X	X	-	-	
ITRF90		120	X	X	-	-	
ITRF91		131	X	X	X	-	
ITRF92		155	X	X	X	-	
ITRF93	1993	160	X	X	X	-	geschätzt
ITRF94		209	X	X	X	X	
ITRF96	1997	290	X	X	X	X	
ITRF97		309	X	X	X	X	
ITRF2000		800	X	X	X	X	
ITRF2005	2000	608	X	X	X	X	
ITRF2008	2005	934	113	127	565	129	

Tab. 1 | ITRF-Realisierungen mit Gesamtanzahl der verwendeten Messpunkte (N.B.: Viele Stationen betreiben mehrere Verfahren)

Stationen konnte die Vermessung der jeweiligen Verbindungselemente allerdings noch nicht mit ausreichender Genauigkeit realisiert werden, so dass hier für die Pflege des ITRF noch Optimierungspotenzial besteht.

Des Weiteren stellt auch heute noch die Datumsfestlegung eine nicht zu unterschätzende Schwierigkeit dar. Hier müssen der Ursprung (3 Translationen), die Orientierung der Achsen (3 Rotationen) und der globale Maßstab festgelegt werden. Nun lässt sich zwar beispielsweise sehr leicht definieren, dass der Ursprung des globalen, geozentrisch kartesischen Koordinatensystems der Massenschwerpunkt der Erde einschließlich der Ozeane und der Atmosphäre ist, aber eine Messgröße gibt es dafür erst einmal nicht. Erst dadurch, dass man Laserentfernungsmessungen zu Satelliten auswertet und den Brennpunkt der elliptischen Bahn als Unbekannte schätzt, lässt sich dieser Schwerpunkt berechnen. Dazu bedient man sich meist des gesamten vorhandenen SLR-Beobachtungsmaterials, da darin eine gute Mischung aus Messungen zu hoch und niedrig fliegenden Satelliten vorhanden ist.

Bei der Festlegung der Achsrichtungen muss man in ähnlicher Weise indirekt vorgehen. Es heißt, dass z.B. die Z-Achse der mittleren Rotationsachse der Jahre 1900 bis 1905 entsprechen soll. Es ist aber leicht einzusehen, dass sich diese Definition damals wie heute nur schwer materialisieren lässt. Man musste sich deshalb bei einer der ersten Realisierungen, die ein Vorläufer der heutigen ITRF-Reihe war, zuallererst an Punkte anhängen, auf denen bereits astronomische Beobachtungen für die geographische Länge und Breite durchgeführt worden waren. Mit Hilfe der Kenntnis der Polbewegung konnte man so einen direkten Bezug zur Rotationsachse und dem dazugehörigen Greenwich-Meridian schaffen.

Bei den weiteren Versionen des ITRF, deren Abfolge man aus Tab. 1 entnehmen kann, wurden die Koordinaten der VLBI- und SLR-Stationen dann auf die jeweils vorherige aufgefördert, um eine eindeutige Datumsfestlegung mit Bezug zur Vorgängerversion und damit zu der vorgegebenen Systemfestlegung zu realisieren. Eine Aufforderung wird hier nur noch durch die Einführung einer sog. No-Net-Rotation-Bedingung zur Verhinderung einer Netto-Rotation realisiert. Würde man diese Bedingung nicht ansetzen, könnte möglicherweise eine scheinbare Polbewegung erzeugt werden, weil sich z.B. alle Punkte auf der Ost- oder Westhalbkugel in ihrer Gesamtheit nach Norden bewegen. Schließlich bleibt noch die siebte Datumskomponente, der Maßstab. Dieser wurde beim ITRF2008, wie bei den meisten anderen Realisierung auch, durch die VLBI- und SLR-Beobachtungen vorgegeben.

An dieser Stelle wäre die Datumsfestlegung normalerweise abgeschlossen, wenn nicht auch noch die Bewegungen der Stationen wegen der Erdkrustendynamik berücksichtigt werden müssten. Auch hier werden Bedingungsgleichungen angesetzt, die eine Netto-Translation (NNT) und eine Netto-Rotation (NNR) des Gesamtsystems mit der Zeit verhindern. Das Basismodell der neueren ITRFs ist das geophysikalische NNR-NUVEL1A-Kontinentaldriftmodell /DeMets et al. 1994/, das die Erde seinerzeit in 12 große kontinentale Erdkrustenplatten eingeteilt hat, die in der Summe aller Einzelbewegungen keine Netto-Translation und -Rotation vollführt haben. Von diesem Modell wurde das „Bewegungsdatum“ abgeleitet, indem man die gemessenen Geschwindigkeitsvektoren mit den entsprechenden NNR- und NNT-Ratenbedingungen auf die Modellvektoren aufge-

feldert hat. Durch entsprechende Fortschreibung auf die jeweilige Nachfolgerealisierung ist dieses Datum also bis zum ITRF2008 übertragen worden.

Man fragt sich jetzt natürlich mit Recht, warum die weltweiten GPS-Messungen des IGS bei der Datumsfestlegung nicht berücksichtigt werden. Das liegt daran, dass zum einen die GPS-Satelliten wegen ihrer vergleichbar hohen Bahnen sehr viel unempfindlicher für das Massenzentrum sind. Zum anderen spielen hier die Phasenzentren der Antennen auf den Satelliten eine besondere Rolle. Ihre Positionen relativ zum Schwerpunkt des Satelliten wurden nämlich mit Koordinaten des ITRF2005 quasi rückgerechnet, so dass eine gegenseitige Abhängigkeit erzeugt wurde. Darum wurden die 560 GPS-Punkte wie auch die etwas ungenaueren 66 DORIS-Punkte für das ITRF2008 nur in den von den VLBI- und SLR-Stationen gebildeten Referenzrahmen quasi zur Verdichtung eingehängt.

Die Berechnungen zu den jeweiligen ITRFs werden seit je her vom IERS ITRS Product Center am Institut Geographique National in Paris durchgeführt und als IERS-Produkt veröffentlicht. Mit der Berechnung eigener Versionen des ITRF2005 und des ITRF2008 ist seit einigen Jahren auch das Deutsche Geodätischen Forschungsinstitut (DGFI) in München in die Erstellung globaler Referenzrahmen eingestiegen /Angermann et al. 2004/, /Seitz et al. 2010/, vgl. Abb. 3. Damit liegt jeweils eine zweite Lösung vor und ermöglicht erstmals eine gegenseitige Qualitätskontrolle, da nur über eine völlig eigenständige Berechnung mit eigenen Methoden und Ansätzen eine zweifelsfreie Verifizierung erfolgen kann.

Zur historischen Entwicklung ist zu bemerken, dass die erste offizielle Auflage des ITRF, das ITRF88, 120 VLBI- und SLR-Messplattformen an 96 Stationen beinhaltete (vgl. Tab 1). Zu diesem Zeitpunkt lagen noch keine ausreichend genauen und langzeitstabilen Messreihen vor, so dass die Bewegungen der Station einem geophysikalischen Modell (AM0-2) /Minster and Jordan 1978/ entnommen werden mussten. Das änderte sich mit dem ITRF91, für das erstmals eigene Geschwindigkeitskomponenten aus den Messungen bestimmt werden konnten. Gleichzeitig kamen die Positionen der ersten 14 zivilen, permanent besetzten GPS-Punkte dazu. Die Zahl der beteiligten Stationen, an denen ein oder mehrere Messverfahren eingesetzt werden, ist im Laufe der Zeit stetig angewachsen und erreicht mit 934 Messpunkten an 580 Stationen ihren derzeitigen Stand (Tab. 1). In Deutschland gehören 8 GPS, 2 SLR und 2 VLBI-Stationen zum ITRF2008-Datensatz. Die Genauigkeit der Koordinaten und Geschwindigkeiten der Punkte hängt sehr stark von der Länge der Beobachtungsdauer und der Qualität der Monumentierung ab. Für die besten Stationen werden meist Standardabweichung von einem Millimeter bzw. 0,1 mm/Jahr angegeben. Die meisten Punkte haben eine Genauigkeit von wenigen Millimetern.

Grundsätzlich kann man davon ausgehen, dass ein neuer ITRF immer dann berechnet wird, wenn ein signifikanter Zuwachs an Beobachtungsdaten und/oder eine neue Erkenntnis in der Methodik der Berechnung zu verzeichnen ist. Neue ITRF-Versionen haben also nichts mit den natürlichen oder anthropogenen Veränderungen der Referenzpunkte oder ihrer Koordinaten zu tun. Theoretisch sollten sich die Koordinaten von gut beobachteten Stationen dabei nicht ändern. Allerdings passiert es häufig, dass sich die veröffentlichten Koordinaten mancher Punkte von einer Realisierung zur nächsten tatsächlich um wenige Zentimeter ändern. Das liegt zum einen z.B.

daran, dass die zeitliche Länge des Datensatzes für eine Station einen ganz erheblichen Einfluss auf die Schätzung der Koordinaten zur Referenzeпоche und der Bewegungskomponenten hat. Die Schätzung aus einer Zeitreihe von nur wenigen Jahren wird also durch das Hinzufügen von Beobachtungen weiterer Jahre sehr viel stabiler. Zum Anderen kann eine Änderung der Stationskonstellation, also eine Änderung des Schwerpunkts des Beobachtungsnetzes von einer Realisierung zur anderen, zu unerwünschten Verschiebungen des Gesamtnetzes führen. Das ist z.B. dann der Fall, wenn sich durch die Hinzufügung einer weiteren SLR-Station das Ergebnis der Bestimmung des Massenmittelpunkts der Erde verändert, weil insbesondere die Z-Komponente extrem stark von der globalen Verteilung der SLR-Stationen abhängt /Altamimi et al. 2011/.

So ergeben sich auch für Punkte in Deutschland verschiedene Positionen innerhalb der verschiedenen Realisierungen des ITRF. Zur Veranschaulichung der Entwicklung der Koordinaten werden exemplarisch die Koordinaten des GPS-Punktes WTZR am Geodätischen Observatorium Wettzell im Bayerischen Wald betrachtet, der heute gern als Referenzpunkt gewählt wird, um regionale GPS-Netze in das ITRF einzubinden. Die Station Wettzell zählt zu denjenigen mit den längsten Datenreihen weltweit. Der Punkt selbst taucht zwar erst im ITRF94 erstmalig auf, jedoch können für die länger zurückliegenden Realisierungen die Koordinaten der Vorgänger-GPS-Punkte bzw. der VLBI-Station mit den vorhandenen „local ties“ auf den Punkt WTZR bezogen werden. Da alle Koordinaten zum jeweiligen ITRF-Bezugsdatum vorliegen, werden sie mit den zugehörigen Verschiebungsvektoren sowohl auf den 1.1.1988 (Abb. 4) als auf den 1.1.2012 (Abb. 5) umgerechnet, um die ITRF-Lösungen vergleichbar zu machen und das Zusammenwirken von Koordinaten und Geschwindigkeitsvektoren zu verdeutlichen. Im Vergleich der ersten ITRF-Realisierungen variieren die Nord- und Ost-Komponenten weitgehend stetig um bis zu einen Dezimeter, wenn man auf die Epoche 1988 zurückrechnet. Beginnend mit dem ITRF94 tritt eine Stabilisierung im Bereich weniger cm ein. Auch eine Betrachtung des

VLBI-Punktes, die keine Anwendung von „local ties“ erforderte, führt zu nahezu identischen Verlauf der Grafiken.

Das Vorwärtsrechnen in der Zeit bis zum 1.1.2012 macht deutlich, dass die seit dem ITRF91 mitgeschätzten Geschwindigkeiten erst mit länger werdenden Zeitreihen an Genauigkeit zugenommen haben. Der scheinbare Ausreißer beim ITRF93 ist auf eine Änderung der Auswertestrategie zurück zu führen, weil man versucht hat, die Geschwindigkeitsvektoren an die langfristige Entwicklung der Erdrotationsparameter anzupassen /Altamimi, pers. Komm./ . Das Zusammenwirken von Epochenpositionen und Geschwindigkeitsvektoren wird hier besonders augenscheinlich. Bemerkenswert ist auch die Änderung der Nord-Komponente von einer scheinbar stabilen Situation von 1994-1997 über 2000 nach 2005-2008 von immerhin 5 cm. Heute kann aufgrund der guten Stationsverteilung und der besseren Auswertemodelle von einer Stabilisierung innerhalb weniger cm ausgegangen werden. Bei den nächsten Realisierungen ist mit einer weiteren Stabilisierung der Schwankungsbreite in den 1 cm-Bereich zu rechnen.

Auch wenn also für einzelne Punkte des ITRF2008 eine Millimetergenauigkeit angegeben wird, so ist diese von den Nutzern doch mit Bedacht zu interpretieren und zu verwenden. Es handelt sich nämlich dabei immer noch nur um relative Genauigkeiten, während die absolute Genauigkeit, wie gezeigt, entsprechend niedriger angesetzt werden sollte.

2.2 Das World Geodetic System 1984

In Anlehnung an die Aussage des WGS84-Referenzdokuments /NIMA 2000/, (heute herausgegeben von der US National Geospatial Intelligence Agency) ist das WGS84 ein „globales geozentrisches Referenzsystem und eine Sammlung von Modellen“. Letztere sind ausführlich in dem genannten Referenzdokument aufgeführt und wurden in Anlehnung an das ITRS mehrfach überarbeitet. Auch hier ist der Ursprung im Geozentrum definiert und die Achsrichtungen

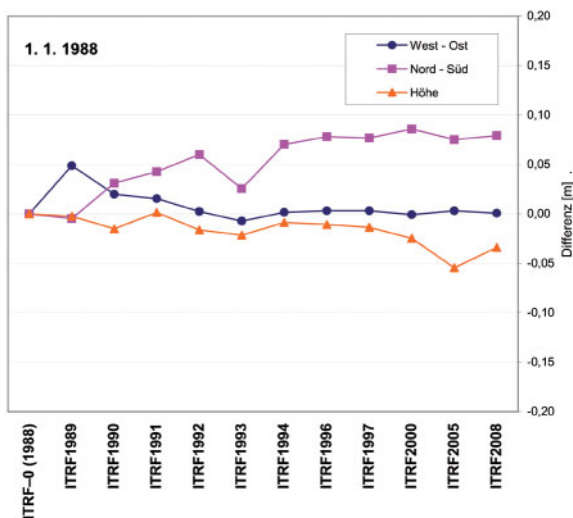


Abb. 4 | Koordinaten des GPS-Punktes WTZR des Geodätischen Observatoriums Wettzell für alle bisher vorliegenden ITRF-Realisierungen zurückgerechnet auf die Epoche 1.1.1988

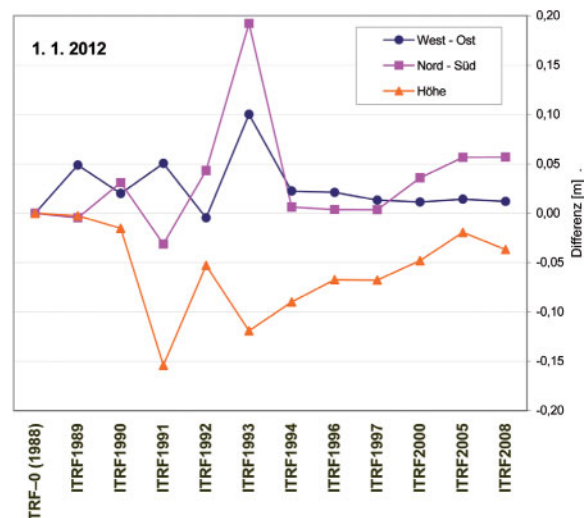


Abb. 5 | Koordinaten des GPS-Punktes WTZR des Geodätischen Observatoriums Wettzell für alle bisher vorliegenden ITRF-Realisierungen vorwärts gerechnet auf die Epoche 1.1.2012

sind an die ITRS-Definition angepasst. Die Systemdefinitionen des Referenzsystems selbst sind heute sehr eng an die IERS Conventions 1996 /McCarthy 1996/ angelehnt. Wesentlicher Unterschied ist aber beispielweise, dass im Gegensatz zum kartesisch definierten ITRS in der WGS84-Definition ein Ellipsoid als Rechenfläche bereits enthalten ist.

Für eine Nutzung des WGS84 fehlen jetzt nur noch die notwendigen Stationen mit ihren Koordinaten, um die Realisierungen bzw. das Referenznetz zu schaffen. Dazu scheint es angebracht, aus dem NIMA (2000)-Dokument (übersetzt) zu zitieren:

„Ein konsistenter globaler Satz von dreidimensionalen Stationskoordinaten bestimmt den Ort des Ursprungs, die Orientierung eines orthogonalen Satzes kartesischer Achsen und einen Maßstab. ... Die Stationskoordinaten, die das operationelle WGS84-Referenznetz ausmachen, sind diejenigen der permanenten Department-of-Defense-GPS-Monitorstationen.“

Daran anschließend sind in dem Dokument explizit die Koordinaten von dreizehn Air Force und NIMA-Stationen aufgelistet, die damit erst einmal die einzigen physikalisch realisierten WGS84-Punkte auf der Erde sind. Allerdings werden diese Monitorstationen dazu benutzt, um die Bahnparameter der GPS-Satelliten zu bestimmen, die als sog. Broadcast Ephemerides von den Satelliten zur Positionsbestimmung auf der Erde abgestrahlt werden. Damit ist das WGS84 über die GPS-Satelliten zumindest für die GPS-Nutzer omnipresent. Allerdings müssen bei der Genauigkeit prinzipiell Abstriche gemacht werden, weil die (vorhergesagten) Bahndaten nur eine Genauigkeit von 2 - 3 m haben, wie aus *Abb. 6* entnommen werden kann. Damit ist dann auf der Erde eine Bestimmung von Koordinaten im WGS84 nur mit Metergenauigkeit möglich.

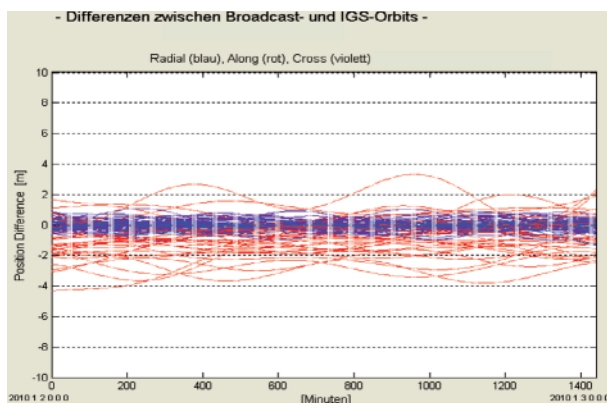


Abb. 6 | Unterschiede zwischen Broadcast Ephemerides und endgültigen präzisen Bahndaten des IGS

Die ursprüngliche Realisierung des WGS84 basierte übrigens auf Dopplermessungen zum U.S. Navy Navigation Satellite System (bekannt als DOPPLER Transit) und den daraus mit Metergenauigkeit berechneten Stationskoordinaten zu den ursprünglich nur fünf GPS-Monitorstationen. Alle weiteren Realisierungen (*Tab. 2*) wurden dem Stand der Kenntnisse des IERS und an die verschiedenen ITRS-Realisierungen angepasst /NIMA 2000/; zunächst als WGS84 (G730) an das ITRF91 durch Einbeziehung von IGS-Stationen in die Berechnung und Festhalten ihrer Koordinaten mit dem Ergebnis verbesserten Genauigkeit von 0.1 m, später als WGS84(G873) an das

Bezeichnung	In Gebrauch
WGS72	bis Ende 1986
WGS84	seit 01.01.1987
WGS84(G730)	seit 29.06.1994
WGS84(G873)	seit 29.09.1996
WGS84(G1150)	seit 21.01.2002

Tab. 2 | Systemdefinitionen (Spalte 1) und Realisierungen des WGS84

ITRF94 und zuletzt an das ITRF2000, wobei das Netz der Monitorstationen immer weiter ausgebaut wurde.

Seit GPS-Woche 1150 wird das WGS84(G1150) als Grundlage für die Bestimmung der Broadcast-Bahnen verwendet. Während die Geschwindigkeitsvektoren bisher aus Modellannahmen abgeleitet wurden, sind erst in dieser neuesten Realisierung erstmals auch geschätzte Geschwindigkeitskomponenten für die einzelnen Koordinaten enthalten /True 2004/.

Untersuchungen von Altamimi (pers. Komm.) haben ergeben, dass die Stationskoordinaten der WGS84(G1150)-Realisierung mit denen des ITRF2008 auf einem Niveau von 10 cm übereinstimmen. Das WGS84 kann also quasi als minder genaue Realisierung des ITRS gelten, wobei es keine offiziellen Transformationsparameter zwischen den Systemen gibt.

2.3 Bezugssysteme für GLONASS und Galileo

Ebenso wie bei GPS werden auch bei Verwendung der anderen GNSS die Bahnparameter in einem speziell definierten Referenzsystem berechnet und abgestrahlt. Das Referenzsystem des russischen Navigationssystem GLONASS wird als PE-90 (Parameters of the Earth 1990) oder PZ-90 (Parametry Zemli 1990) bezeichnet. Nach russischen Angaben liegt der Ursprung des Systems im Geozentrum, die Achsrichtungen sind gleichermaßen definiert wie für das ITRS. Ein Ellipsoid als Rechenfläche ist dort ebenfalls definiert. Der ursprünglichen Realisierung lagen Beobachtungen von 26 Bodenstationen aus zugrunde, heute liegt die Übereinstimmung zwischen PZ-90 und WGS84 im Meterbereich /Boucher und Altamimi 2001/.

Das Bezugssystem des europäischen GNSS, das sich noch immer in seiner Aufbauphase befindet, ist das „Galileo Terrestrial Reference System“ GTRF. Es ist geplant, dass die sog. Galileo Sensor Stationen (GSS) zuerst in einer freien Netzausgleichung prozessiert werden, um eine höchstmögliche innere Konsistenz zu erreichen /GGSP 2011/. In einem zweiten Schritt soll dann die Lagerung des Netzes an das jeweils aktuelle ITRF erfolgen. Damit und mit einer Verdichtung des GSS durch weitere Netzpunkte soll eine höchstmögliche Qualität erreicht werden, die den Anforderungen an eine 3 cm (2 sigma)-Genauigkeit für die Positionen der Bodenstationen gerecht wird. Mit dieser geplanten Anpassung an das ITRF kann man davon ausgehen, dass das GTRF eine (weitere) Realisierung des ITRS ist /GGSP 2011/.

Die gemeinsame Nutzung mehrerer GNSS in einer Messung wirft die Frage auf, in welchem Referenzsystem letztlich die Koordinatenergebnisse erhalten werden, da bei reinen Navigations- oder Precise Point Positioning-Lösung die Koordinaten an der Erdoberfläche direkt im System der Bahndaten ermittelt werden. Werden in einer

derartigen Messung also gleichzeitig die Signale von Satelliten mehrerer verschiedener GNSS (GPS, GLONASS, GALILEO) verarbeitet, liegen die Bahndaten der jeweiligen Satelliten im jeweils eigenen System vor. Man kann aber davon ausgehen, dass dies wegen der vergleichsweise geringeren Genauigkeitsanforderungen des Nutzers und der geringen Unterschiede zwischen den verschiedenen Referenzsystemen (WGS84, PE-90, GTRF) keine Rolle spielen wird. Da sich bei relativen Messungen in kleineren Netzen die Beziehung der Neupunkte zu einem Referenzsystem primär nach dem Referenzsystem der Anschlusspunkte richtet, ist dies auch hier nicht problematisch.

3 AUSBLICK

Zum Abschluss dieses Teiles dürfen wir zweifelsfrei behaupten, dass für die Positionierung auf der Erde heute verschiedene Referenzsysteme mit unterschiedlichen Spezifizierungen und Genauigkeiten zur Verfügung stehen. Für die Bedürfnisse des Vermessungswesens und der Geodynamik ist das ITRS als hochgenaues, einheitliches globales Referenzsystem das System der Wahl. Da wir in das globale ITRS vergleichsweise bequem und spannungsfrei Verdichtungsnetze unterschiedlicher Größenordnungen einhängen können, die selbst bei kontinentalen Ausdehnungen auf wenige Millimeter genau sind, sind wir erstmals wirklich in der Lage, dem geodätischen Grundprinzip „vom Großen ins Kleine“ zu folgen. Im zweiten Teil dieses Aufsatzes werden wir diesen Gedanken verfolgen und auf die Verdichtung des ITRS eingehen. Dabei werden wir auch die Entwicklung und die derzeitige Situation bei den Gebrauchskordinaten erläutern.

4 LITERATUR

- Altamimi, Z.; Collilieux, X.; Métivier, L. (2011): ITRF2008: an improved solution of the international terrestrial reference frame. *J Geod*, 85(8): 457-473, DOI 10.1007/s00190-011-0444-4.
- Angermann, D. et al. (2004): ITRS Combination Centre at DGFI - A terrestrial reference frame realization 2003. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe B, Nr. 313, München.
- Böckmann, S.; Artz, T.; Nothnagel, A. (2010): VLBI terrestrial reference frame contributions to ITRF2008. *J Geod*, 84(3): 201-219, DOI 10.1007/s00190-009-0357-7.
- Boucher, C. (2010): Keynote address - Geodetic Reference Frames: 40 years of technological progress and of international cooperation (1970-2010). IAG Commission 1 Symposium 2010, Reference Frames for Applications in Geosciences (REFAG2010), Paris, 4.-8.10.2010, http://iaig.ign.fr/abstract/pdf/Keynote1_REFAG2010.pdf.
- Boucher, C.; Altamimi, Z. (2001): ITRS, PZ-90 and WGS84: current realizations and the related transformation parameters. *J Geod*, 75(11), 613-619.
- DeMets, C., Gordon, R.G., Argus, D.F., Stein, S. (1994): Effect of recent revisions of the geomagnetic reversal time scale on estimates of current plate motions. *Geophys. Res. Lett.*, 21(20), 2191-2194.
- Dow, J.; Neilan, R.; Rizos, C. (2009): The International GNSS Service in a changing landscape of Global Navigation Satellite Systems. *J Geod*, 83(3-4): 191-198, DOI 10.1007/s00190-008-0300-3.
- GGSP (2011): Galileo Geodetic Service Provider Consortium. <http://www.ggsp.eu>, Aufruf 2011-08-10.

Hase, H. (2011): In: *Encyclopedia of Solid Earth Geophysics; Geodesy networks and reference systems*, Springer, ISBN: 978-90-481-8701-0.

IAG Geodesist's Handbook (1992): *Bulletin Géoédésique*, 66, 128pp.

McCarthy, D. (1996): IERS Conventions 1996. IERS Technical Note 21, Observatoire de Paris.

Minster, J. B.; Jordan, T. H. (1978): Present-day plate motions. *J Geophys Res*, 83, 5331-5254.

NIMA (2000): National Imagery and Mapping Agency; Department of Defense - World Geodetic System 1984; NIMA Technical Report 8350.2, Third Edition, Amendment 1; NIMA Stock No. DMATR83502WGS84; Bethesda MD.

Pearlman, M. R.; Degnan, J. J.; Bosworth, J. M. (2002): The International Laser Ranging Service, *Adv. Space Res.*, 30(2), 125-143, DOI 10.1016/S0273-1177(02)00277-6.

Petit, G.; Luzum, B. (2010): IERS Conventions 2010, IERS Technical Note 36, Verlag des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt am Main.

Schlüter, W.; Behrend, D. (2007): The International VLBI Service for Geodesy and Astrometry (IVS): current capabilities and future prospects. *J Geod*, 81(6-8):379-387, DOI 10.1007/s00190-006-0131-z.

Seeger, H. et al. (1997): Zur Geschichte der Fundamentalstation Wettzell, Deutsche Geodätische Kommission, Reihe B, Heft 305, München.

Seitz, M. et al. (2010): Die Berechnung des Internationalen Terrestrischen Referenzrahmens ITRF2008 am DGFI. *Z f Vermessungswesen*, 135, Heft 2, 73-79.

True, S.A. (2004): Planning the future of the World Geodetic System 1984. Proc. IEEE Position Location and Navigation Symposium, Monterey, CA, 26-29 April 2004, 639-648.

Vennebusch, M.; Böckmann, S.; Nothnagel, A. (2007): The contribution of Very Long Baseline Interferometry to ITRF2005; *J Geod*, 81(6-8):553-564, DOI:10.1007/s00190-006-0117-x.

Willis, P. et al. (2010): The International DORIS Service, Toward maturity, in *DORIS: Scientific Applications in Geodesy and Geodynamics*, P. Willis (Ed.), *Adv Space Res*, 45(12):1408-1420, DOI: 10.1016/j.asr.2009.11.018.

Dr.-Ing. Barbara Görres

RHEINISCHE FRIEDRICH-WILHELMS-
UNIVERSITÄT BONN
INSTITUT FÜR GEODÄSIE UND
GEOINFORMATION

Nussallee 17 | 53115 Bonn
E-Mail: goerres@uni-bonn.de



Dr.-Ing. Axel Nothnagel

RHEINISCHE FRIEDRICH-WILHELMS-
UNIVERSITÄT BONN
INSTITUT FÜR GEODÄSIE UND
GEOINFORMATION

Nussallee 17 | 53115 Bonn
E-Mail: nothnagel@uni-bonn.de

