

Übergeordnete geodätische Koordinaten in Deutschland heute – Teil 2: Bezugssysteme für Europa

Top Level Geodetic Coordinates in Germany Today – Part 2: Reference Systems for Europe

Barbara Görres und Axel Nothnagel

Ausgehend von dem jeweils aktuellen International Terrestrial Reference Frame (ITRF) als Realisierung des International Terrestrial Reference System (ITRS), die im ersten Teil unseres Aufsatzes /Görres, Nothnagel 2012/ behandelt haben, wurden und werden regionale Bezugssysteme für Europa und nachfolgend auch für die Bundesrepublik Deutschland etabliert und aktualisiert. Die Verfahrensschritte sind auch hier mehr oder weniger abhängig von den jeweiligen Gegebenheiten und den zur Verfügung stehenden Beobachtungsdaten. So basiert jede neue Realisierung des European Terrestrial Reference Systems 1989 (ETRS89) als European Terrestrial Reference Frame (ETRF) auf den neusten Berechnungen des ITRS, die unter Hinzunahme weiterer Beobachtungen aber auch mit moderneren Berechnungsansätzen durchgeführt werden. Die deutsche Landesvermessung mit ihren SAPOS-Stationen als Grundpfeiler eines allgemeinen Raumbezugspunktfeldes ist in diesen übergeordneten Rahmen eingebunden. Allerdings war das Datum dieses Netzes bereits in den Anfängen des GPS-Zeitalters festgelegt worden und ist damit heute nicht mehr in allerletzter Schärfe konsistent mit dem ETRS89. Aufgrund von immer wieder notwendig werdenden Anpassungen, können die Inkonsistenzen im Bereich von wenigen Millimetern aber problemlos hingenommen werden.

Schlüsselwörter: Referenzsysteme, Referenzrahmen, Referenznetze, ETRS89, ETRF2000, DREF91

Embarking from the current International Terrestrial Reference Frame (ITRF) as the latest realisation of the International Terrestrial Reference System (ITRS), described in the first part of this publication /Görres, Nothnagel 2012/, regional reference systems have been established and maintained for Europe and subsequently also for the Federal Republik of Germany. The procedures are dependent on the prevailing circumstances and the observations at hand. Every new realisation of the European Terrestrial Reference System 1989 (ETRS89) as European Terrestrial Reference Frame (ETRF) is based on the computations of the preceeding ITRS which are carried out with a wealth of new observations and the newest analysis procedures. The German ordnance survey with its SAPOS stations as the backbone of a nationwide control network is embedded in this higher level frame. However, the datum of this network has already been defined in the beginnings of the GPS era and is, thus, not consistent with the ETRS at the ultimate accuracy level. Since there will be a constant need for refinements and adjustments, e.g., due to improved GNSS antenna phase reference calibrations in the near-field, the small inconstancies at the level of a few millimetres may be acceptable without grave consequences.

Keywords: Reference systems, reference frames, ETRS89, ETRF2000, DREF91

1 EINLEITUNG

Die Erfolgsgeschichte des GPS in der Vermessungspraxis hat zu einer entscheidenden Wandlung der Bedeutung und der Abhängigkeiten von Bezugssystemen geführt. Im Gegensatz zu früheren Realisierungen basieren daher heute die gebräuchlichen Bezugssysteme beinahe ausschließlich auf einer Verkettung von globalen Systemen und deren Verdichtungen durch GPS-Messungen hin zu homogenen geodätischen Referenznetzen für regionale oder gar kleinräumige Anwendungen. Nachdem wir im ersten Teil unseres Aufsatzes /Görres, Nothnagel 2012/ mit dem International Terrestrial Reference Frame 2008 (ITRF2008) den übergeordneten Rahmen für die ganze Erde abgesteckt haben, schlagen wir in diesem Teil den Bogen zu den Gebrauchskordinaten. Dabei kommt dem European Terrestrial Reference System 1989 (ETRS89) und seinen Realisierungen, den European Terrestrial Reference Frames (ETRF), als Verdichtungen des ITRF für den europäischen Kontinent, eine besondere Bedeutung zu. Die Einführung des ETRS89 als Bezugssystem für die Landesvermessung ist also ein klassischer geodätischer Vorgang „Vom Großen ins Kleine“, sollte man meinen. Dies würde allerdings nur dann gelten, wenn bereits 1989 tatsächlich das ITRF2008 als übergeordneten Bezugsrahmen zur Verfügung gestanden hätte. Tatsächlich ist es aber so, dass 1989 nur das ITRF89 mit seiner doch eher spärlichen Punktdichte zur Verfügung stand und die Einbindung nur über die damals vorhandenen Verknüpfungspunkte möglich war. Es ist also schnell einzusehen, dass in den letzten zwanzig Jahren immer wieder kleinere Justierungen am Referenzrahmen notwendig waren, um die Koordinaten der Punkte an die Systemdefinitionen des ETRS89 anzupassen. Wir werden deshalb auf einige der Ungereimtheiten eingehen, die im Zusammenhang mit dem ETRS89 im Raum stehen. Außerdem werden wir dann auch den nächsten Schritt, nämlich die weitere Verdichtung mittels eines Referenznetzes für die Bundesrepublik Deutschland beschreiben. Die Punkte dieses Netzes und ihre Koordinaten sind dann die Grundlage für die aktuellen Gebrauchskordinaten, bei denen aber, wie wir leider erkennen müssen, eine zwar mögliche aber oft aus praktischen Erwägungen (noch) nicht realisierbare Spannungsfreiheit fehlt.

2 EIN REGIONALES BEZUGSSYSTEM FÜR EUROPA

Die Verwendung eines globalen Referenzsystems und seiner Realisierungen würde für die praktische Arbeit im regionalen Rahmen den entscheidenden Nachteil mit sich bringen, dass sich die Koordinaten der Punkte aufgrund der Plattentektonik und anderer globaler Einflüsse fortlaufend ändern. So bewegt sich die europäische Platte gegenüber dem globalen Bezugsrahmen um etwa 25 mm pro Jahr nach Nordosten (Abb. 1). Ständig wechselnde Koordinaten sind jedoch für den praktischen geodätischen Gebrauch ungeeignet. Dies macht die Definition eines speziellen, vom globalen System abgeleiteten Referenzsystems für die Europäische Platte erforderlich.

Formal wurde von der Sub-Kommission „Reference Frame for Europe (EUREF)“ der International Association of Geodesy (IAG) anlässlich der EUREF-Sitzung in Florenz 1990 beschlossen, ein vom globalen Referenzsystem ITRS ausgehendes, einheitliches Referenzsystem für die Europäische Platte zum Nutzen für alle geodätisch-geodynamischen Projekte zu definieren. Für andere Kontinente gibt es ebenfalls entsprechende Kommissionen.

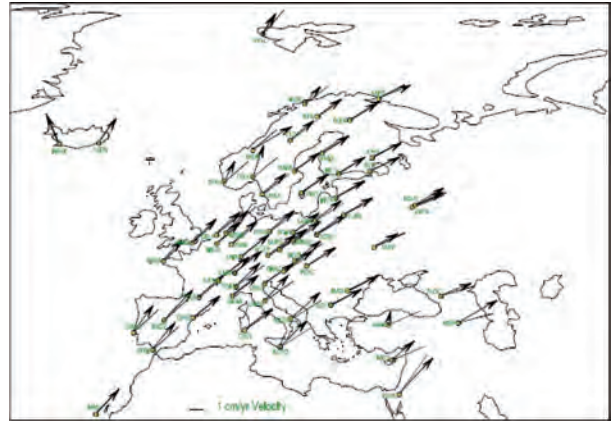


Abb. 1 | Im ITRS bewegen sich die Punkte Mitteleuropas mit einer Geschwindigkeit von ca. 2,5 cm/Jahr nach Nordost (aus /Augath 2001/)

2.1 Definition des ETRS89

Als Basis für das neu zu definierende European Reference System wurde das ITRS ausgewählt, da man schon damals die ITRF-Lösungen als die beste globale Realisierung eines geodätischen Referenzsystems ansah. Damit die Zahlenwerte der Koordinaten der europäischen Stationen im neuen System möglichst unverändert bleiben, muss das System mit der eurasischen Platte mitbewegt werden. Rechnerisch wird die europäische Kontinentaldrift, also die Bewegung der eurasischen Platte gegenüber dem globalen Bezugsrahmen, durch „Einfrieren“ der Koordinaten der auf der europäischen Platte liegenden Stationen des ITRS ausgeschaltet (Abb. 2). Dies wurde umgesetzt, indem die Koordinaten der europäischen SLR- und VLBI-Stationen aus dem ITRF89 ausgewählt und auf den Zeitpunkt 1.1.1989 umgerechnet wurden. Diese Festlegungen begründen das neue System, das als ETRS89 bezeichnet wurde. Die Zahl „ETRS,89“ steht hierbei allerdings lediglich für den Zeitpunkt der Beschlussfassung sowie der Auskopplung aus dem ITRF.

Erstmals ergab sich durch Definition des ETRS89 in der Vermessungsgeschichte die Möglichkeit, die bisher stets auf nationaler Ebene definierten Referenzsysteme durch ein dreidimensionales, europaweit homogenes geodätisches Bezugssystem abzulösen. Für die Verebnung im praktischen Gebrauch wurde dem ETRS89 zwingend das GRS80-Ellipsoid als Referenzellipsoid zugeordnet /Adam et al. 2000/.



Abb. 2 | EPN-Stationen und ihre Bewegungsvektoren im ETRF2000 (aus <http://www.epncb.oma.be>)

2.2 Die European Terrestrial Reference Frames als Realisierung des ETRS89

Die erste Realisierung innerhalb des ETRS89 ist gleichzeitig untrennbar mit der Systemdefinition verbunden. Als Basissatz dienten geozentrische Koordinaten von 35 europäischen SLR- und VLBI-Teleskopen, die aus dem ITRF89 ausgewählt und zur Referenzepoche 1.1.1989 berechnet wurden (Adam et al. 2000). Sie sind als ETRF89 somit gleichzeitig die erste Realisierung wie auch die Grundlage der ursprünglichen Systemdefinition ETRS89. Man findet auch EUREF als Bezeichnung dieses Referenzrahmens.

ITRF89 (1989.0) = ETRF89 (1989.0) = EUREF

In den Folgejahren wurde das Punktnetz des ETRS89 durch mehrere mehrtägige sogenannte EUREF-Kampagnen sukzessiv erweitert und verdichtet. Als Instrumentarium dienten ausschließlich GPS-Messungen, die gegenüber den klassischen geodätischen Techniken eine einfache und schnelle Möglichkeit zur Verdichtung der globalen Netze bieten. Umgekehrt waren die EUREF-Aktivitäten die treibende Kraft, um die GPS-Technik von ihrem Beginn an in Europa zu etablieren.

Zuerst waren nur die westeuropäischen Staaten in diesem Bereich aktiv, bis die politische Gesamtsituation auch die Ausweitung auf die osteuropäischen Staaten erlaubte. Bei der ersten europäischen Verdichtungskampagne EUREF89 kamen alle ca. 70 in Europa verfügbaren 2-Frequenz-Empfänger zum Einsatz. Ende der 1990er Jahre reichte das Netz im Nordwesten bis nach Grönland, im Osten bis zur russischen Grenze und im Südosten bis in die Türkei und nach Zypern. Die erreichte Genauigkeit betrug 3-4 cm in horizontaler und 5-6 cm in vertikaler Richtung. Die in den Ländern beobachtete Punktzahl wurde durch den Gedanken bestimmt, dass mindestens drei, besser jedoch etwa doppelt so viele Punkte erforderlich sind, um die Transformation zwischen den neu zu etablierenden ETRF-Koordinaten und den nationalen Systemen zu ermöglichen.

Zur Wahrung der Homogenität des Netzes wurden bis 1995 ausschließlich die umgebenden SLR-/VLBI-Stationen und bereits vorhandene EUREF-Stationen als Anschlusspunkte zugelassen. Nach den Erfahrungen bei der Auswertung der Kampagnen im östlichen Mittelmeerraum stellte sich diese Praxis allerdings als nicht optimal heraus, da viele der Anschlusspunkte nicht den Genauigkeitsansprüchen der modernen GPS-Kampagnen gerecht wurden (Görres, Seeger 1994). Die Empfehlung der EUREF-Kommission wurde daraufhin dahingehend verändert, dass von 1995 an alle EUREF-Kampagnen an IGS-Stationen angebunden werden sollten und benachbarte EUREF-Punkte nur noch zur Kontrolle dienen (Boucher, Altamimi 2011).

Zur gleichen Zeit wurden bereits die ersten Erneuerungskampagnen durchgeführt (z.B. EUREF D/NL 1993 aus EUREF1993). Diese waren nötig geworden, weil die ersten Messungen mit einer nur spärlichen Anzahl von Satelliten oder zur Zeit des Ionosphärenmaximums durchgeführt worden waren und deshalb nicht den Anforderungen an das moderne Genauigkeitsniveau entsprachen. Auch die Anzahl der GPS-Permanentstationen wurde seitdem in allen Staaten, so auch in der Bundesrepublik Deutschland, fortwährend erhöht. Auf unterschiedlichen Organisationsstufen entstanden so verschiedene Permanentnetze.

Auf europäischer Ebene wird das ETRS89 heute durch das EUREF Permanent Network (EPN) realisiert (/Bruyninx 2004/, *Abb. 2*). Es handelt sich dabei zwar um ein eher wissenschaftlich motiviertes Punktnetz, das aber zu jeder Zeit die Grundfestlegungen des ETRS89 durch die entsprechenden Koordinaten realisiert. Es besteht aus ca. 250 GNSS-Permanentstationen (GPS und GLONASS), deren Genauigkeit mit 1 cm in jeder Beobachtungsepoche angegeben wird (class A-Stations, <http://www.epncb.oma.be>). Es versteht sich als Verdichtung des globalen IGS-Netzwerks und genügt seinen Regularien. Der Punktabstand beträgt in Deutschland ca. 100 km.

Bei der regelmäßigen Auswertung dieses Netzes versucht man, die Anbindung an das ITRS bestmöglich zu erhalten. Dabei gestaltet sich der Übergang vom ITRS zum ETRS89 allerdings nur in der Theorie einfach. In der Praxis hingegen sind die Auswerteschritte eher komplex. Zu (fast) jeder Realisierung des ITRS in Form eines ITRF $_{yyyy}$, wobei $yyyy$ das Bezeichnungsjahr des jeweiligen ITRFs ist (vgl. Teil 1 unseres Aufsatzes /Görres, Nothnagel 2012/), wird auch eine neue Realisierung des ETRS89 als ETRF $_{yyyy}$ abgeleitet /Altamimi, Boucher 2002/. Dazu werden zuerst die ITRF $_{yyyy}$ -Koordinaten aller EPN-Stationen über ihre Geschwindigkeitsvektoren auf die Epoche 1989.0 zurück gerechnet. Diese Koordinaten werden dann mit globalen Translationsparametern zum Zeitpunkt 1989.0 vom ITRF $_{yyyy}$ (Epoche 1989.0) in das ETRF $_{yyyy}$ verschoben (*Tab. 1*). Die Translationsparameter wiederum werden (nur) über die Stationen berechnet, die bereits im ETRF89 zum Netz gehörten, und beziehen sich demnach immer auf den Schwerpunkt des damaligen Netzes /Boucher, Altamimi 2011, Anhang 1/. Die Größe der Gesamttranslation entspricht der Gesamtbewegung des europäischen Kontinents von ca. 25 mm/Jahr nach Nordosten.

Obwohl es eigentlich im ETRS89 keine Bewegungen der Stationen mehr geben sollte, kann dies im EPN nur teilweise realisiert werden. So werden die Geschwindigkeitskomponenten, die für das jeweilige ITRF $_{yyyy}$ ermittelt wurden, nur durch eine globale Rotation Zentral-europas reduziert. Es handelt sich dabei um die Winkelgeschwindigkeit der eurasischen Platte in der jeweiligen ITRF-Version /Altamimi, Boucher 2002/. Da es sich um eine starre Rotation des gesamten Kontinents handelt, verbleiben für alle Stationen residuelle Rotationsbeträge, die zwar meist nur kleine Bewegungsbeträge von ca. 1 mm/Jahr hervorrufen, die aber nicht in allen Fällen vernachlässigbar sind. Zudem ändern sich die Koordinatenwerte insbesondere im Mittelmeerraum durch die Plattentektonik oder an anderen Stellen durch sogenannte Intraplattendeformationen. So ist beispielsweise mit der Station Roumeli/Kreta heute eine Bewegungsrate von ca. 36 mm/Jahr verknüpft.

Die Stationen mit den nach der oben angegebenen Prozedur berechneten Koordinaten (und den meist kleinen Geschwindigkeitskomponenten) stellen dann das Referenznetz ETRF $_{yyyy}$ dar. Zur Umrechnung weiterer Stationen in jede ETRF-Realisierung, die nicht im Originaldatensatz des ITRF $_{yyyy}$ enthalten sind veröffentlicht die EUREF Working Group entsprechende Translations- und Rotationsparameter /Boucher, Altamimi 2011/.

Leider ist die Liste der Komplikationen hier noch nicht zu Ende. So wurde das ETRF2005 zwar berechnet, aber von der „EUREF Technical Working Group“ (TWG) nicht zum Gebrauch empfohlen, da man gravierende Koordinatenverschiebungen feststellte, die allein auf geänderte Lagerungen von ITRF2000 und ITRF2005 zurückgehen

/Boucher, Altamimi 2011/. Um trotzdem von der verbesserten Qualität des ITRF2005 gegenüber der des ITRF2000 zu profitieren, wurden die Koordinaten aller im ITRF2005 enthaltenen europäischen Stationen in das ETRF2000 transformiert und sind als ETRF2000(R05) publiziert. Ebenso wurde mit dem ITRF2008 verfahren (*Tab. 1*).

ITRS		ETRS89 und Referenzeпоche	
ITRF88			
ITRF89	→	ETRF89	1.1.1989
ITRF90	→	ETRF90	
ITRF91	→	ETRF91	
ITRF92	→	ETRF92	
ITRF93	→	ETRF93	
ITRF94	→	ETRF94	
ITRF96	→	ETRF96	
ITRF97	→	ETRF97	
ITRF2000	→	ETRF2000	
ITRF2005	→	ETRF2000(R05)	
ITRF2008	→	ETRF2000(R08)	1.1.2005

Tab. 1 | Realisierung der ETRF $_{yyyy}$ aus den ITRF $_{yyyy}$

Im Zuge dieser Änderung in der Vorgehensweise bei der Berechnung der beiden neuesten Realisierungen ETRF2005 und ETRF2008 wurde auch der strenge Bezug zur ursprünglichen Referenzeпоche 1.1.1989 aufgegeben und statt dessen die Referenzeпоche aus den zugehörigen Realisierungen ITRF2005 und ITRF2008 übernommen.

Betrachtet man die Koordinatenlisten der verschiedenen ETRFs, so fällt auf, dass es trotz aller Vorsätze zur Stabilisierung immer wieder Veränderungen in den Koordinaten der europäischen Stationen gibt. Dies gilt nicht nur für die Stationen, die in tektonisch aktiven Regionen liegen, sondern auch für solch zentrale und eigentlich stabile Gebiete wie die Bundesrepublik Deutschland. Zur Veranschaulichung dieser Entwicklung stellen wir den Einfluss der Verfahrensschritte, wie schon im ersten Teil dieses Artikels, durch die jeweils gültigen Koordinaten des GPS-Punktes WTZR am Geodätischen Observatorium Wettzell im Bayerischen Wald dar. Die Koordinaten werden zunächst für die ursprünglich für das ETRS89 gewählte Referenzeпоche 1989.0 berechnet (*Abb. 3*). Sie variieren dann im Vergleich zur ersten Realisierung ETRF89 um bis zu 3 cm.

Rechnet man jedoch alle Realisierungen vorwärts auf den Zeitpunkt 1.1.2012, zeigt sich ein ähnlicher Effekt wie beim Vergleich der verschiedenen ITRF-Realisierungen desselben Punktes (Teil 1, *Abb. 5*) mit Schwankungen in den einzelnen Koordinatenkomponenten bis zum Dezimeterbereich (*Abb. 4*). Der Grund dafür sind auch hier die bereits im ITRF aufgetretenen Variationen, die mit dem größeren Umfang an Beobachtungen und veränderten Auswertestrategien zu tun haben.

Es kann an dieser Stelle natürlich nur eine rhetorische Frage sein, wie sich die beschriebenen Änderungen der Zahlenwerte von Jahr zu Jahr mit dem ursprünglichen Zweck der Nutzung des ETRS89 für nationale Referenzsysteme vertragen. Hatte man sich doch am Anfang eigentlich stets unveränderliche und einheitlich definierte Koor-

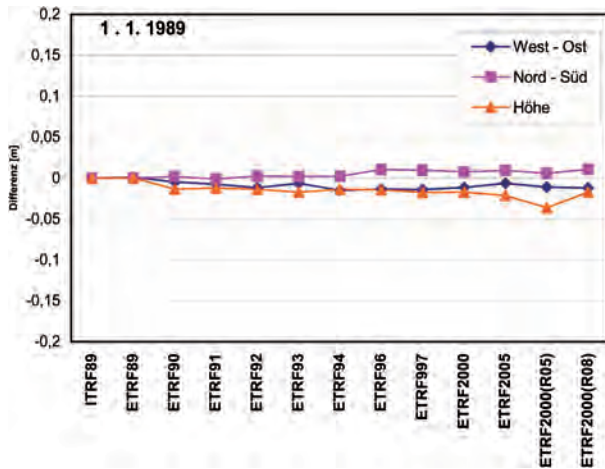


Abb. 3 | Koordinaten des GPS-Punktes WTZR des Geodätischen Observatoriums Wettzell für alle bisher vorliegenden ETRF-Realisierungen zurückgerechnet auf die Epoche 1.1.1989

dinaten gewünscht. In der Praxis hat man aber beispielsweise das DREF91 für die Bundesrepublik Deutschland (vgl. Kap. 3.2.1) über die Punkte der Kampagne EUREF-D/NL93 definiert, die ursprünglich im ITRF91 ausgewertet und dann nach ETRF91 (Epoche 1989.0) transformiert worden war. In der Schweiz wurden die Koordinaten der landesweiten Verdichtung im ITRF93 (Epoche 1993.0) berechnet und anschließend nach ETRF93 transformiert, wobei durch Vernachlässigung individueller Stationsgeschwindigkeiten von einer Identität zur Epoche 1989.0 ausgegangen wurde /Wiget 2008/. Diese Widersprüche und kleinen Inhomogenitäten muss man aus verschiedenen Gründen in Kauf nehmen. So lag eben bei der Etablierung der ersten Realisierungen des ETRS89 noch kein homogenes Anschlusspunktfeld im ITRS vor. Genauso wenig waren die GPS-Satellitenkonstellation, das GPS-Punktnetz oder die Auswerteverfahren bereits soweit ausgereift, wie dies heute der Fall ist. Niemand hätte auf diesen Reifeprozess warten mögen, und so ist es nur verständlich, dass die Entwicklungsschritte sich gegenseitig überholen und ungewünschte Diskrepanzen nach und nach zu Tage treten.

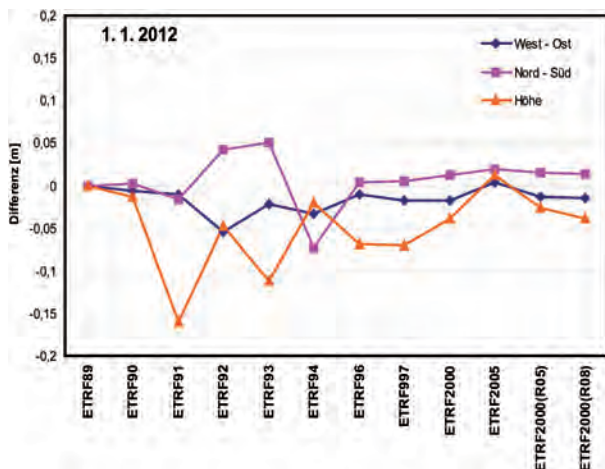


Abb. 4 | Koordinaten des GPS-Punktes WTZR des Geodätischen Observatoriums Wettzell für alle bisher vorliegenden ETRF-Realisierungen vorwärts gerechnet auf die Epoche 1.1.2012

2.3 Inkonsistenz zwischen ITRS und ETRS89 und ihre Konsequenzen

Neben den genannten entwicklungshistorischen Sachverhalten und Defiziten des „übergeordneten“ europäischen Referenzrahmens ETRF sollte an dieser Stelle, quasi als interessante Nebenbemerkung, auf einen weiteren Problempunkt eingegangen werden. Seit der Identität der ITRF- und ETRF-Realisierungen am 1.1.1989 entfernen sich die europäischen Stationen wegen der Kontinentaldrift Europas kontinuierlich von den Positionen, die ihnen durch ihre „fixierten“ Koordinaten eigentlich zugewiesen worden waren. Der dreidimensionale Abstand hat nach 23 Jahren eine Größenordnung von fast 60 cm erreicht.

Bei Auswertungen von Punktnetzen größerer Ausdehnung ist aus Konsistenzgründen aber immer darauf zu achten, dass die verwendeten Satellitenbahnen und die terrestrischen Referenzkoordinaten im selben System vorliegen müssen. Dies bedeutet, dass solche GPS-Auswertungen immer im jeweils gültigen ITRF durchzuführen sind (derzeit also ITRF2008), weil auch die Satellitenbahndaten im jeweiligen ITRF berechnet sind (siehe Teil 1). Daher müssen die Koordinaten aller Anschlusspunkte zunächst in das aktuelle ITRF transformiert werden. In der GPS-Auswertung werden dann alle Punktkoordinaten in diesem System berechnet und anschließend in das ETRS89 und die jeweilige Realisierung transformiert.

Geschieht dies nicht, sondern werden bei der Berechnung im ITRF angegebene präzise Bahndaten zusammen mit einem oder mehreren im ETRS89 koordinierten Anschlusspunkten verwendet, wird das gesamte Netz wegen der so bestehenden Inkonsistenz zwischen Bahndaten und Referenzkoordinaten verzerrt und verkippt. Ein Fehler in der Höhe der Referenzkoordinate würde zu einer Maßstabsänderung führen, die jedoch im hier diskutierten Fall nicht von Bedeutung ist, da ITRS und ETRS89 keinen signifikanten Höhenunterschied gegeneinander aufweisen. Eine Abweichung in den Zahlen der horizontalen Komponenten eines Anschlusspunktes von 1" (ausgedrückt z.B. in geographischer Länge oder Breite) der Referenzstation führt jedoch nach /Beutler et al. 1987/ zu einer Rotation des gesamten Netzes von 0,1". Das Netz rotiert dabei um die Achse in der horizontalen Ebene, die senkrecht auf dem Differenzvektor zwischen verwendeter und richtiger Position steht (Abb. 5).

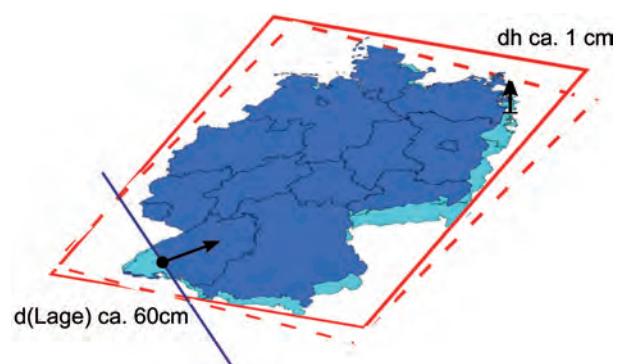


Abb. 5 | Zunehmende Inkonsistenz zwischen Bahndaten im aktuell gültigen ITRFyyyy und Anschlusspunkten des ETRS89 führt zu einer Verkipfung des gesamten Netzes.

Für eine Abweichung von ca. 60 cm, wie sie in bisher 23 Jahren durch Abzug der Kontinentaldrift zwischen ITRF- und ETRF-Koordinaten entstanden ist und einer angenommenen Netzausdehnung von 1000 km (beispielsweise ungefähre Nord-Süd-Ausdehnung Deutschlands), führt dies heute schon zu einem rein systembedingten Fehler in der Höhe zwischen nördlichstem und südlichstem Punkt im Netz von ca. 1 cm. Dies ist zwar heute für kleinere Netze bedeutungslos und somit noch kein akutes Problem, jedoch muss daran gedacht werden, dass dieser Effekt wegen der fortschreitenden Kontinentaldrift mit der Zeit zunimmt.

3 NATIONALES BEZUGSSYSTEM FÜR DEUTSCHLAND

Die Einführung des von der Europäischen Union als einheitliches Bezugssystem für europäische Geodaten empfohlene Bezugssystem ETRS89 und alle weiteren Stufen der Netzverdichtung liegt in der Verantwortung der einzelnen europäischen Staaten. Weil die Wiedervereinigung ohnehin die Neudefinition eines einheitlichen deutschen Referenzsystems erforderlich gemacht hatte, bot sich auch für die Bundesrepublik Deutschland im Zuge der Bestrebungen nach Vereinheitlichung im europäischen Rahmen die Möglichkeit, aufgrund der geschichtlichen Entwicklung und des föderalistischen Aufbaus extrem heterogen gestaltete geodätische Grundlagennetze nach und nach abzulösen.

3.1 Einführung von ETRS89 in Deutschland

Die „Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland“ AdV hat im Mai 1991 (also nach der Wiedervereinigung!) beschlossen, das „Europäische Datum ETRS89“ als neues Bezugssystem für Geobasisinformationen der Landesvermessung und des Liegenschaftskatasters einzuführen. Erstmals gibt es auf diese Weise ein dreidimensionales Bezugssystem, das die bisherige klare Trennung von Lage- und Höhen Bezugssystemen in der deutschen Landesvermessung aufhebt. In der Praxis können die kartesischen Koordinaten des ETRS89 durch Nutzung des Bezugsellipsoids GRS80 als Rechenfläche natürlich trotzdem in Lagekomponenten und ellipsoidische Höhe umgerechnet und je nach Anwendung getrennt weiterverwendet werden.

Bei der Festlegung des neuen Bezugssystems hatte man keine Rücksicht darauf nehmen können, dass in den Bundesländern erst kurz zuvor mit der Erneuerung der alten Grundlagennetze des Deutschen Hauptdreiecksnetzes (DHDN) begonnen worden war. Überdies waren die Lösungen des erneuerten DHDN letztlich doch wieder Lösungen einzelner Bundesländer geworden (in NRW beispielsweise Netz77) und führten wie bisher in der Historie der deutschen Bezugssysteme stets zu Spannungen an den Ländergrenzen. Laufende Arbeiten sollten jedoch zu Ende geführt werden können und es wurde vorgesehen, die erneuerten Systeme neben dem neuen System noch eine Zeit lang parallel zu führen. Im Jahr 1995 ergänzte die AdV den Beschluss dann noch durch Festlegung der Universalen Transversalen Mercator-Abbildung (UTM) als einheitlichem Abbildungssystem für groß- und kleinmaßstäbige Karten.

3.2 Realisierung des Systems ETRS89 in Deutschland

Da zur praktischen Anwendung des ETRS89 natürlich wesentlich engmaschigere Festpunktnetze als im europäischen Rahmen notwendig sind, wurde für die Bundesrepublik Deutschland eine mehrstufige Hierarchie vorgegeben, in der die ursprünglich in 1989 gemessenen EUREF-Punkte als A-Netz galten, Punkte einer deutschlandweiten Messung als B-Netz, und diejenigen im Verantwortungsbereich der Landesvermessungsverwaltungen aus der nächsten Verdichtungsstufe als C-Netze vorgesehen waren.

3.2.1 Das Deutsche Referenznetz 1991

Das Deutsche Referenznetz 1991 (DREF91 = B-Netz) war ursprünglich als Voraussetzung für das neue einheitliche Bezugssystem Deutschlands vorgesehen. Als erste Realisierung des ETRS89 in Deutschland gedacht, wurde bereits im Jahre 1991 eine groß angelegte nationale GPS-Kampagne zur Verdichtung des Netzes EUREF durchgeführt /Lindstrot 1999/. 84 neue Punkte kamen zu den bestehenden EUREF-Punkten hinzu. Als Anschlusspunkte dienten Punkte der Kampagne EUREF-D/NL93, die ursprünglich im ITRF91 ausgewertet worden war (Abb. 6). Durch Transformation wurden sie in das ETRF91 (Epoche 1989.0) überführt.



Abb. 6 | DREF91: Deutsches Referenznetz im ETRS89 (aus /Lindstrot 1999/)

Im Nachhinein erwies sich jedoch die Genauigkeit der DREF-Koordinaten als problematisch. Messanordnung, Empfänger und Auswertetechnik hatten dem Stand der Technik in 1991 zwar entsprochen, aber schon allein die Konstellation des GPS mit nur ca. 15 aktiven Satelliten während der Messkampagne erlaubte die Koordinatenbestimmung nur mit einer Genauigkeit von 1 bis 2 cm in der Lage und 2 bis 4 cm in der Höhe /Beckers et al. 2005/. Obwohl sich die nicht ausreichende Genauigkeit insbesondere durch Spannungen in den Höhenkomponenten negativ bemerkbar machte, wurden weitere Verdichtungsnetze unter Zwang in DREF91 eingerechnet, so auch die Stationen des Satellitenpositionierungsystems SAPOS (Kap. 3.2.2).

Die Landesvermessungsämter haben seinerzeit für ihren jeweiligen Zuständigkeitsbereich weitere Referenzpunkte bestimmt. Nordrhein-Westfalen beispielsweise hat das Netz DREF (B-Netz) durch das sogenannte NWREF (C-Netz) durch Hinzufügen weiterer 169 Punkte bis zu einem durchschnittlichen Punktabstand von 15 bis 20 km verdichtet, die in den Rahmen ETRF91 (1989.0) eingerechnet wurden /Irsen, Spata 1999/.

3.2.2 SAPOS als Realisierung des ETRS89

Parallel zu den geschilderten Aktivitäten hat sich schon früh die Einsicht durchgesetzt, dass permanent betriebene Referenzstationen mit einer entsprechenden Bereitstellung von Beobachtungs- bzw. Korrekturdaten die richtige Entwicklung für die Zukunft sind. Deshalb wurden nach und nach GNSS-Positionierungsdienste etabliert, die permanente Referenzstationen betreiben. In heutiger Zeit stellen deren Koordinaten die in der Bundesrepublik Deutschland gebräuchlichen Realisierungen des Referenzsystems ETRS89 dar, während die Netze der frühen 1990er Jahre keine Bedeutung mehr haben.

Von Amts wegen wird das ETRS89 heute in der Bundesrepublik Deutschland durch den Satellitenpositionierungsdienst SAPOS realisiert (<http://www.sapos.de/>). Damit beschreitet man denselben Weg wie im globalen und europäischen Rahmen, in denen die Referenznetze jeweils durch das IGS- bzw. EPN-Permanentnetz präsent gehalten werden und die bis zum Ende der 1990er Jahre üblichen Kampagnenmessungen abgelöst wurden. Die AdV begann mit dem Aufbau im Jahr 1995, in dem ebenfalls der Vollausbau des GPS offiziell bekannt gegeben wurde. Seit 2002 ist SAPOS flächendeckend zum Echtzeitpositionierungsdienst mit vernetzten Referenzstationen ausgebaut. Homogene Koordinaten der Referenzstationen lagen zunächst nicht vor, da sie mit unterschiedlichen Messkonfigurationen und Auswertemethoden ermittelt und unter Zwang in DREF91 eingerechnet worden waren. So wurden in den verschiedenen Bundesländern beispielweise unterschiedliche ITRF-Realisierungen verwendet und keine länderübergreifenden Lösungen erstellt.

Um trotzdem einen länderübergreifenden Einblick in den Zustand des vorhandenen gesamtdeutschen Netzes zu bekommen, beauftragte die AdV das Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG) mit einer Diagnoseausgleichung /Beckers et al. 2005/. Die Beobachtungsdaten der 42. KW 2002 (GPS-Woche 1188) aller 260 SAPOS-Stationen wurde dazu einer gemeinsamen Ausgleichung unterzogen, um eine deutschlandweite, homogene, spannungsfreie Lösung für alle Stationskoordinaten mit einer inneren Genauigkeit von ca. 1 cm zu erzeugen (*Abb. 7*). Zur Definition des geodätischen Datums und zur Einbindung des SAPOS-Netzes in das EUREF-Netz wurden 8 IGS-

Stationen in die Lösung integriert. Des Weiteren wurden auch Beobachtungen von neun Stationen aus den Nachbarländern genutzt, um eine ausreichende Genauigkeit in den Grenzregionen zu gewährleisten.

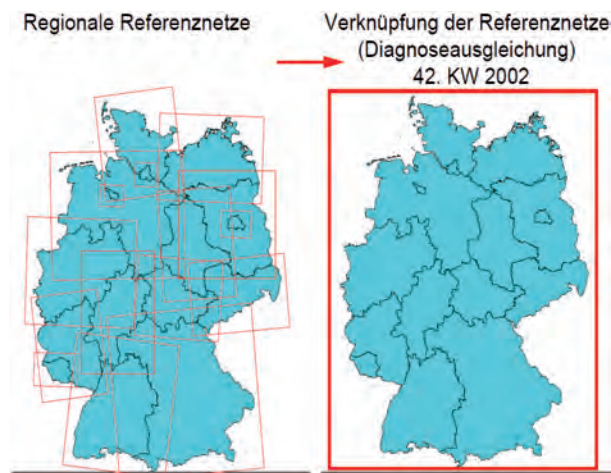


Abb. 7 | Weiterentwicklung regionaler Referenznetze durch die (Diagnoseausgleichung) (aus Faulhaber 2003)

Die Auswertung erfolgte zuerst nach den Grundsätzen für Auswertungen innerhalb der EUREF-Gruppe. Als innere Genauigkeit der neu ausgeglichenen Koordinaten wurde dabei für die Lage und die Höhe ca. 1 cm erreicht. In der endgültigen Lösung wurde dann jedoch die alte Lagerung in der Realisierung des DREF91 beibehalten, um die Koordinatenabweichungen für die Vielzahl der bisher in DREF91 und beim Aufbau von SAPOS bestimmten Koordinaten möglichst gering zu halten. Spannungen zwischen der Bundesrepublik Deutschland und den Nachbarländern wurden dazu in Kauf genommen. Durch die Transformation der Ergebnisse aus der Diagnoseausgleichung auf die bisherigen amtlichen Koordinaten (DREF91) wurde eine neue Realisierung des ETRS89 erzeugt, in der die Werte durch die veränderte Lagerung um maximal 1 cm in der Lage und 8 mm in der Höhe verändert wurden. Betrachtet man aber die Differenzen dieser neuen Koordinaten zu den alten Koordinaten vor der Diagnoseausgleichung, betragen diese bis zu 4 cm in der Lage und bis 5 cm in der Höhe (in Wissen und Kiel bis 7 cm in der Höhe), ein systematischer Trend ist nicht erkennbar.

Mit der Diagnoseausgleichung der SAPOS-Referenzstationen im Jahr 2002 (Bezug Epoche 2002.79 und Lagerung in DREF91) wurde wiederum eine neue Realisierung des ETRS89 erzeugt. Die AdV empfahl den 16 Ländern mit Beschluss vom Mai 2003 die Einführung der nun homogenen, spannungsfreien Koordinaten der Diagnoseausgleichung als neue amtliche Koordinaten ihrer SAPOS-Referenzstationen. Um Spannungen zu allen vorher entstandenen Koordinaten zu vermeiden, wurde den Ländern deren Anpassung aber nur empfohlen. Als Alternative war die Möglichkeit vorgesehen, die neuen Koordinaten der Referenzstationen nur dann einzuführen, wenn der Raumvektor gebildet aus den Koordinaten vor und nach der Diagnoseausgleichung die Länge von 15 mm überschreiten sollte. Die Ausführung wurde in der Praxis mit unterschiedlichem Aufwand und zu unterschiedlichen Zeitpunkten durchgeführt: In Niedersachsen beispielsweise wurden nur zwei Punkte in der Lage angepasst, in Bayern und Nordrhein-Westfalen aber fand eine durchgreifende Erneuerung statt. Eine Folge dieser Vorgehensweise sind neue Inhomogenitäten, die allerdings wesentlich geringer als vorher sind.

Über ihren direkten Zweck bei der GNSS-Positionsbestimmung hinaus sind die Referenzstationen durch den in 2004 von der AdV gefassten Beschluss für den „einheitlichen Raumbezug des amtlichen Vermessungswesens in Deutschland“ direkt in das bundesweit einheitliche Festpunktfeld einbezogen /AdV 2006/. Dieses enthält neben Höhen- und Schwerefestpunkten sowohl Geodätische Grundnetzpunkte als auch Referenzstationspunkte. Ihre Koordinaten sollen eine Standardabweichung von 5 mm in der Lage und 8 mm für die Höhe nicht überschreiten. Die Änderung von Koordinatenwerte ist vorgesehen, wenn sie sich in der Lage um mindestens 10 mm oder in der Höhe um 15 mm verändert haben. Die Handhabung dieser Vorgaben in den einzelnen Bundesländern soll wegen der vielen Sonderfälle an dieser Stelle nicht weiter vertieft werden. Dazu wird auf die entsprechenden Veröffentlichungen der zuständigen Behörden verwiesen.

Die SAPOS-Stationen sind heutzutage für viele, wenn nicht sogar für die meisten (GPS-) Anwendungen die Anschlusspunkte schlechthin. Bei der Benutzung von Flächenkorrekturparametern oder virtuellen Referenzstationen erhält der Nutzer auf Knopfdruck Koordinaten für seine Neupunkte. Die Rechnungen im Empfänger werden in der Regel in geozentrisch kartesischen Koordinaten durchgeführt und erst am Ende des Prozesses erfolgt die Verebnung in UTM-Koordinaten und die Umrechnung in Normalhöhen, die als Ergebnis angezeigt werden können (wenn keine höheren Genauigkeiten gefordert sind). Als Grundlage dieser sogenannten „Echtzeit-Datumsübergänge“ dienen Transformations- und Undulationsmodelle, die es letztendlich ermöglichen, die traditionelle Trennung in Lage und Höhe im Vermessungswesen zugunsten einer echten dreidimensionalen Anwendung aufzugeben.

Dabei verlässt man sich gerne darauf, dass die Anschlusskoordinaten von den Landesvermessungsämtern nach bestem Wissen und Gewissen bestimmt und gepflegt werden. Im Vergleich zu der Vor-SAPOS-Zeit ist das auch durchaus gerechtfertigt, obwohl aus den genannten praktischen Erwägungen heraus auf die Etablierung einer bestmöglich erreichbaren Spannungsfreiheit verzichtet wurde.

4 ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUSSFOLGERUNGEN

Hochgenaue Koordinaten und vor allem ihre einheitliche Betrachtung in homogenen Bezugssystemen sind heute mehr als je zuvor nicht nur die Grundbausteine des geodätischen Schaffens und der wissenschaftlichen Betrachtung /Nothnagel et al. 2010/ sondern auch von elementarer Bedeutung für unsere Gesellschaft. Ausgehend vom ITRS ergibt sich für unsere Referenzsysteme und die Gebrauchskordinaten eine fast strenge Abfolge vom Großen ins Kleine wie wir sie in unseren beiden Aufsätzen dargestellt haben. Zusammenfassend sind die jeweiligen Referenzsysteme, Bezugsrahmen, Bezugsflächen und Koordinatentypen noch einmal in Tab. 2 aufgelistet.

Genaugenommen gibt es bei kartesischen Koordinaten keine Bezugsfläche, die vereinbarte Äquatorebene stellt gleichwohl eine Hauptebene dar, auf die sich die Koordinaten beziehen lassen. Die Einführung eines Bezugsellipsoids bringt es mit sich, dass alle Koordinaten auch in mehreren Koordinatentypen dargestellt werden können, die sich wiederum aus strengen Umrechnungen ergeben. Wie bereits erwähnt, werden GPS-interne Rechnungen immer in kartesischen Koordinaten durchgeführt. Die Ausgangskordinaten werden

	Referenzsystem	Bezugsrahmen (Datum)	Bezugsfläche	Koordinatentyp
Global	ITRS	ITRFyyyy	vereinbarte Äquatorebene	3D-kartesisch
Global	WGS84	WGS84 (Gwwwww)	(Äquatorebene) WGS84-Ellipsoid	(3D-kartesisch) ellipsoidisch
Europa	ETRS89	ETRFyyyy	(Äquatorebene) GRS80-Ellipsoid	(3D-kartesisch) ellipsoidisch
Deutschland	ETRS89	DREF91 (2002.79)	GRS80-Ellipsoid	UTM verebnet
Deutsche Bundesländer	ETRS89	SAPOS (Bundesland)	GRS80-Ellipsoid	UTM verebnet

Tab. 2 | Übergeordnete geodätische Referenzrahmen

dazu aus den jeweils vorliegenden Koordinatentypen entsprechend umgerechnet, wie dies auch für die Darstellung der Ergebnisse in umgekehrter Richtung erfolgt. In den Zeilen für die Bundesrepublik Deutschland und ihre Bundesländer ist für den Koordinatentyp nur UTM-verebnet als das in der Regel für den Nutzer sichtbare Endprodukt einer ganzen Kette von Umrechnungen angegeben.

Die ursprüngliche Aufgabe, mit dem ETRS89 ein unverrückbar stabiles europaweites Koordinatensystem für praktische Aufgaben der Landesvermessung und andere Anwendungen mit Georeferenzierung zu schaffen, ist mit großem Erfolg realisiert worden. Auch wenn es heute, wie dargestellt, noch Raum für geringfügige Verbesserungen gäbe, so darf man nicht vergessen, zu welchem frühen Zeitpunkt die Idee zu dieser gravierenden Umstellung geboren und die Arbeiten dazu in die Tat umgesetzt wurden. Des Weiteren sind die jeweiligen zeitlichen und räumlichen Gegebenheiten maßgeblich dafür verantwortlich, dass die geplante Spannungsfreiheit in der Bundesrepublik Deutschland hier und da im Bereich einiger Millimeter aufgegeben werden musste. Es wird sich aber gar nicht vermeiden lassen, dass in Zukunft immer wieder kleinere Justierungen an Koordinaten von Referenzstationen vorgenommen werden müssen. Dies kann durch vielerlei neuere Erkenntnisse, wie z.B. im Bereich der Nahfeldkalibrierung von GNSS-Antennen, hervorgerufen werden, aber auch aus Gründen von anthropogenen oder natürlichen Veränderungen notwendig werden. Das Grundgerüst der geodätischen Zusammenhänge bleibt allerdings bestehen.

DANKSAGUNG

Wir bedanken uns bei Dr.-Ing. Thomas Artz für die kritische Durchsicht des Manuskripts und die Erstellung der einleitenden Grafiken im ersten Teil.

LITERATUR

Adam, J.; Dunkley, P.; van der Marel, H.; Augath, W.; Gubler, E.; Schluter, W.; Boucher, C.; Gurtner, W.; Bruyninx, C.; Hornik, H. (2000): The European reference system coming of age. In: Schwarz K.P. (Ed.): Geodesy beyond 2000: the challenges of the first decade, IAG General Assembly, Birmingham, July 19–30, 1999. Berlin, 2000. (International Association of Geodesy Symposia 121), 47–54.

AdV (2006): Richtlinien für den einheitlichen Raumbezug des amtlichen Vermessungswesens in der Bundesrepublik Deutschland, Stand: 26.01.2006. Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland.

Altamimi, Z.; Boucher, C. (2002): The ITRS and ETRS89 Relationship: New Results from ITRF2000. EUREF Publication No. 10; Mitteilungen des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie, Band 23, Frankfurt am Main 2002, 49–52.

Augath, W (2001): Beiträge des Vermessungswesens zur Ortung und Navigation im Wandel. Tagungsband der DGON-Jubiläumsveranstaltung (1951 – 2001), S. 195–210, Bonn.

Beckers, H.; Behnke, K.; Derenbach, H.; Faulhaber, U.; Ihde, J.; Irsen, W.; Lotze, J.; Strerath, M. (2005): Diagnoseausgleichung SAPOS® – Homogenisierung des Raumbezugs im System ETRS89 in Deutschland. In: Zeitschrift für Vermessungswesen, 203–206.

Beutler, G.; Bauersima, I.; Gurtner, W.; Rothacher, M.; Schildknecht, T.; Geiger, A. (1987): Atmospheric refraction and other important biases in GPS carrier phase observations. Mitt. Satell.-Beobachtungsstn. Zimmerwald, 22, 26ff.

Boucher, C.; Altamimi, Z (2011): Memo : Specifications for reference frame fixing in the analysis of a EUREF GPS campaign. <http://etrs89.ensg.ign.fr>.

Bruyninx C. (2004): The EUREF Permanent Network: a multi-disciplinary network serving surveyors as well as scientists. In: Geoinformatics, 7, 32–35.

Faulhaber, U. (2003): Satellitenpositionierungsdienst SAPOS – Stand und Trend. POSNAV-Symposium Dresden.

Görres, B.; Seeger, H. (1994): The EUREF- Cyprus93 GPS Campaign, Campaign description and preliminary results. Report on the Symposium of the IAG Sub-commission for the EUREF held in Warsaw in June 1994; Veröffentlichung der Bayerischen Kommission für die Internationale Erdmessung, Heft 54, München.

Görres, B.; Nothnagel, A. (2012): Übergeordnete geodätische Koordinaten in Deutschland heute – Teil 1: Globale Koordinationssysteme und ihre Realisierungen. In: allgemeine vermessungsnachrichten (avn) 119 (2012) 3, 104–112.

Irsen, W.; Spata, M. (1999): ETRS89 – European Terrestrial Reference System. In: NÖV 32, 135–141.

Lindstrot, W. (1999): Das Deutsche Referenznetz 1991 DREF 91. Mitteilungen des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie, Band 9, Frankfurt am Main.

Nothnagel, A.; Angermann, D.; Börger, K.; Dietrich, R.; Drewes, H.; Görres, B.; Hugenobler, U.; Ihde, J.; Müller, J.; Oberst, J.; Pätzold, M.; Rothacher, M.; Schreiber, U.; Schuh, H.; Soffel, M. (2010): Space-Time Reference Systems for Monitoring Global Change and for Precise Navigation. Mitteilungen des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie, Band 44.

Wiget, A. (2008): Das Bezugssystem ETRS89 und nationale Koordinatensysteme der Schweiz. <http://www.swisstopo.admin.ch>.

Dr.-Ing. Barbara Görres

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

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



Dr.-Ing. Axel Nothnagel

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

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

