

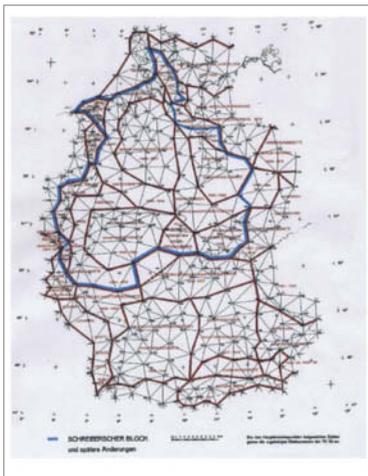
Basisinformationen zur Einführung von ETRS89-Koordinaten in Bayern

Von Günter Klein,
Richard Gedon
und Manfred Klette,
München



In dem vorliegenden Artikel werden grundlegende Informationen zu dem künftigen dreidimensionalen Bezugssystem ETRS89 vermittelt. Entsprechende Informationen bezüglich des neuen Höhen Bezugssystems DHHN92 enthält ein separater Artikel von D. Weber. Außerdem informiert ein Beitrag von Andreas Brünner über die Datenkommunikation bei SAPOS.

Entstehung landesweiter Koordinaten in Bayern



Bereits bei den ersten Überlegungen zur Vermessung des gesamten bayerischen Landesgebiets im Jahre 1801 waren sich die Geometer einig, dass hierfür landesweit verteilte Festpunkte mit Koordinaten in einem einheitlichen Bezugssystem erforderlich sind. Als Bezugsfläche für die Berechnungen legte *J. G. Soldner* eine Kugel fest, die das Ellipsoid im Breitenkreis der Münchner Frauenkirche berührte. Alle Berechnungen im System der Soldner-Koordinaten mussten nach den Formeln der sphärischen Trigonometrie auf der Soldnerkugel durchgeführt werden.

Bild 1: Das deutsche Hauptdreiecksnetz (DHDN)

Auf Grund des Runderlasses des Reichs- und Preußischen Ministers des Innern über den »Zusammenschluss der Landesvermessungen« wurde ab 1935 begonnen, die Grundlagenvermessung in ganz Deutschland einheitlich zu gestalten. Eine Konsequenz daraus war in Bayern die Umstellung vom Soldner- auf das Gauß-Krüger-Koordinatensystem, auf der Basis des für Mitteleuropa optimal angepassten Bessel'schen Erdellipsoids. Die Umrechnung des bayerischen Hauptdreiecksnetzes in Gauß-Krüger-Koordinaten, verbunden mit Neumessungen, dauerte bis 1955.

Nach der deutschen Wiedervereinigung wurde das 1983 berechnete Staatliche Trigonometrische Netz (STN) der neuen Länder nur formell mit dem Deutschen Hauptdreiecksnetz (DHDN) der alten Bundesländer zum DHDN1990 vereinigt. Zur Koordinatenberechnung diente im DHDN der alten Bundesländer das Bessel-Ellipsoid mit der Verebnung nach Gauß-Krüger, im STN das Krassowski-Ellipsoid und ebenfalls die Gauß-Krüger-Abbildung (System 42/83). Daneben existieren z. B. in Berlin, Sachsen, Thüringen oder Hessen noch Sonderlösungen als »Gebrauchssysteme«.

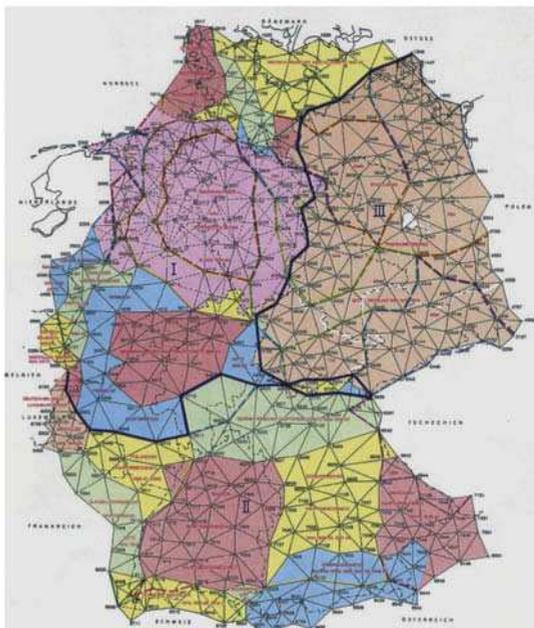


Bild 2:
Das Deutsche Hauptdreiecksnetz (DHDN 1990) nach der Wiedervereinigung

Notwendigkeit der Einführung neuer Koordinaten im vereinigten Deutschland

Nach der Wiedervereinigung gab es in den alten und in den neuen Ländern somit völlig unterschiedliche Koordinatensysteme, was keinesfalls auf Dauer belassen werden konnte. Sehr rasch kamen die im AdV-Arbeitskreis Grundlagenvermessung zusammengeschlossenen Länder zu der Entscheidung, in ganz Deutschland neue, auf dem Navigationssystem GPS beruhende Koordinaten einzuführen. Erste Tests mit GPS-Messungen ab dem Jahre 1983 haben ergeben, dass das DHDN-System auch nach umfangreichen regionalen Verbesserungsmaßnahmen durch Streckenmessungen noch beträchtliche Spannungen aufwies. Das System 42/83 der ehemaligen DDR beruhte dagegen auf einer völligen Neumessung und war deshalb wesentlich homogener. Im Mai 1991 hat die Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland (AdV) auf ihrer 88. Tagung die Einführung eines einheitlichen Bezugssystems im vereinigten Deutschland für die Bereiche Landesvermessung und Liegenschaftskataster beschlossen, und zwar das europaweit favorisierte Bezugssystem ETRS89 mit UTM-Verebnung. Dieser Beschluss wurde vom Plenum der AdV im Mai 1995 bekräftigt.

Das europäische Koordinatensystem ETRS89

Physische Grundlage für ein präzises, globales, geodätisches Referenzsystem bildet ein ständig wachsendes, globales Netz von derzeit ca. 800 Stationen, deren Koordinaten mit höchster Genauigkeit in einem geozentrischen Referenzsystem bestimmt und permanent überwacht werden. Für diese Aufgabe ist der Internationale Erdrotationsdienst IERS (früher in Paris, jetzt am Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG) in Frankfurt am Main) zuständig. Seit 1988 wurden bisher zehn ITRF – (International Terrestrial Reference Frame) – Lösungen (ITRF88 bis ITRF2000) durch den Erdrotationsdienst präsentiert. Die Stationskoordinaten von etwa 800 Stationen an gut 500 Standorten und deren Bewegungs-Geschwindigkeiten definieren die ITRF2000 Lösung.

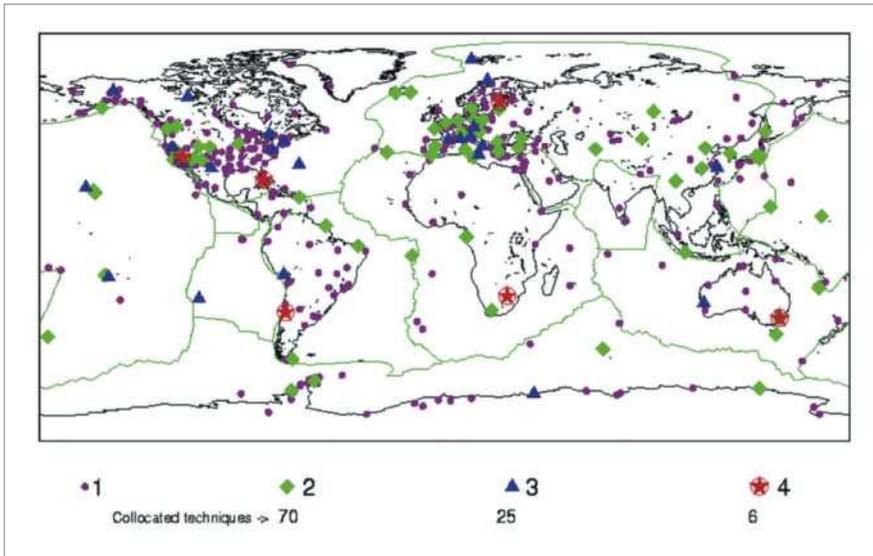


Bild 3: Die Koordinaten der ITRF-Stationen zur Epoche 1989.0 bilden die Grundlage des ETRS89-Systems

Die Beobachtungsstationen des globalen Netzes bewegen sich mit den jeweiligen Kontinentalplatten. Zur Festlegung des Bezugssystems für die Stationsgeschwindigkeiten benutzen nahezu alle Lösungen das geologisch-geophysikalische Plattenbewegungsmodell »Nuvel 1A«. Bei der Festlegung des ITRF wird jeweils die »rotationsfreie« (NNR= No Net Rotation) Lösung eingesetzt. Die NNR-Lösung von »Nuvel 1A« wird so konzipiert, dass das Integral über die Geschwindigkeitsvektoren sämtlicher Punkte der Erdoberfläche Null ergeben soll.

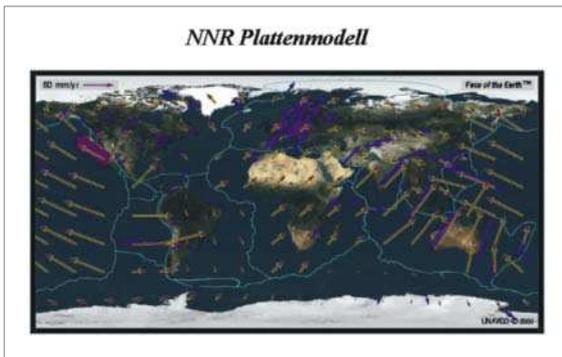


Bild 4: Die ITRF-Stationen wandern mit den Kontinentalplatten, auf denen sie errichtet sind.

Ein veränderliches Bezugssystem, realisiert durch fortwährend aktualisierte ITRF-Koordinaten, ist für geodätische Zwecke denkbar ungeeignet. Deshalb wurde im Mai 1990 in der für das europäische Referenzsystem zuständigen Subkommission der »International Association of Geodesy« (IAG) beschlossen, die ITRF-Koordinaten der Stationen in und um Europa, wie sie sich für den Jahresbeginn 1989.0 ergeben, unverändert beizubehalten und mittels dieser Koordinaten das europäische Netz ETRF89 festzulegen (European Terrestrial Reference Frame 1989). Das zugehörige Bezugssystem wird als »European Terrestrial Reference System 1989« (ETRS89) bezeichnet.

Zum ETRS89-System gehört das bei der EUREF-Tagung 1992 in Bern eingeführte, geozentrisch gelagerte Ellipsoid GRS80, das schon im Jahr 1980 von der »International Union for Geodesy and Geophysics (IUGG)« als Koordinaten-Bezugsfläche »Geodetic Reference System 1980« vorgeschlagen wurde.

Der Wunsch nach einem einheitlichen Abbildungsverfahren für die Verebnung der ellipsoidischen ETRS89-Koordinaten in allen europäischen Ländern hat sich leider nicht erfüllt. In Deutschland hat die AdV im Mai 1995 beschlossen, als Abbildungssystem die Universale Transversale Mercator Projektion (UTM) mit 6° breiten Meridianstreifen auf dem GRS80-Ellipsoid einzuführen. Mit einigen Ausnahmen haben auch andere europäische Länder dieses Abbildungssystem eingeführt. Zur Kompensation der Maßstabsverzerrung wurde für den Mittelmeridian der bereits international verwendete, jedoch für Deutschland nicht optimale Maßstabsfaktor von 0.9996 gewählt. Mit den Mittelmeridianen 9° und 15° werden die Meridiansysteme UTM32 und UTM33 in Deutschland verwendet.

Das bayerische Festpunktfeld für ETRS89-Koordinaten

Für die praktische Verwendung liegen bei Vermessungen die ITRF-Beobachtungsstationen zu weit auseinander. Aus diesem Grunde vereinbarten die IAG-Subkommission für das europäische Referenzsystem und die Working-Group VIII (GPS) des Comité Européen des Responsables de la Cartographie Officielle (CERCO) im Jahre 1988 eine europäische GPS-Kampagne zur Verdichtung des Weltnetzes. So fand im Mai 1989 in Gemeinschaftsarbeit aller europäischer Landesvermessungsbehörden eine erste EUREF-Kampagne statt (Hierarchiestufe A der Festpunkte). In den nächsten Jahren folgten noch weitere EUREF-Kampagnen in den ost- und südeuropäischen Ländern und auch EUREF-Nachbesse-

rungs-Kampagnen, wo spätere Messungen (z. B. die DREF-Kampagne) Genauigkeitsmängel aufgedeckt hatten.

Für praktische vermessungstechnische Aufgaben waren jedoch noch weitere Verdichtungen nötig. In Deutschland wurde im April 1991 in Zusammenarbeit aller Landesvermessungsämter, des Instituts für Angewandte Geodäsie (IfAG), einiger Geodätischer Universitätsinstitute und Vermessungsfirmen, unter der Leitung des AdV-Arbeitskreises Lagefestpunktfeld, das Deutsche Referenznetz 1991 (DREF91) als Hierarchiestufe B geschaffen (102 Punkte).

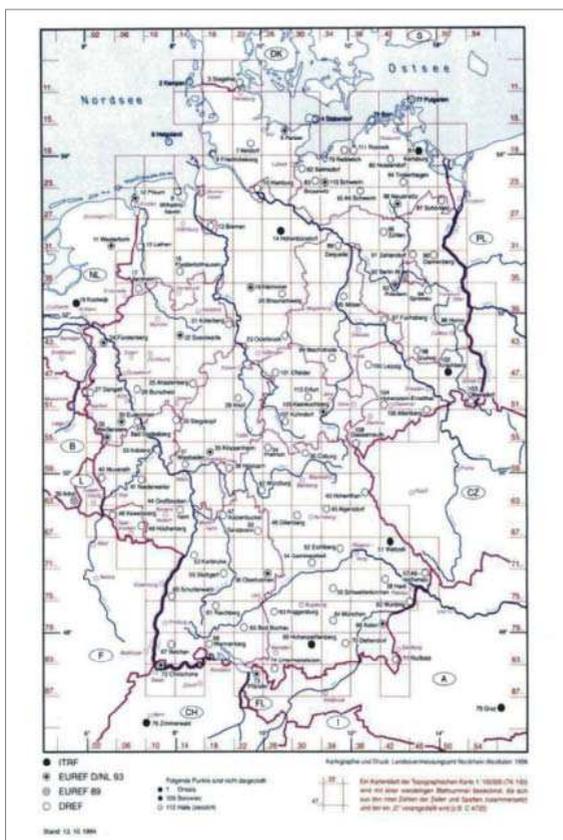


Bild 5:
Das DREF-Netz (hier der Stand von 1991) wurde in Bayern in den Jahren 1993 bis 2003 noch in drei weiteren Stufen verdichtet.

Die DREF-Punkte lagen für den Anschluss weiterer Vermessungen immer noch zu weit auseinander (~80 km). Daher hat jedes Landesvermessungsamt eine weitere Punktverdichtung (Hierarchiestufe C; Abstände 15 bis 25 km) durchgeführt. Das bayerische C-Netz entstand hauptsächlich in den Jahren 1993 und 1994. Im ersten Jahr wurden mehrere kleine Netze gemessen, immer in den Gebieten, wo gerade auftragsmäßig Netzverdichtungen im Gebrauchsnetz (DHDN) stattfanden. Erst im Jahr 1994 wurde der restliche Teil Bayerns in drei größeren Kampagnen fertig gemessen. Die Beobachtungszeit betrug zweimal 2-3 Stunden.

Die Netze wurden mit der Bernese Software ausgewertet und dann einer Netzausgleichung mit dem Programm PAGE über Vektoren und Kovarianzmatrizen unterzogen. Bei der Netzausgleichung wurden nicht nur die 3 EUREF-Punkte und 20 DREF-Punkte in Bayern festgehalten, sondern auch 27 Punkte der sog. PIGEO-Kampagne des IfAG (2x24 Stunden, Messungen auf einer Geoid-Traversal durch Bayern). Insgesamt wurden damals in Bayern 198 C-Netz-Punkte geschaffen, mit einem durchschnittlichen Punktabstand von 25 km.

Die langen Beobachtungszeiten, die man für statische GPS-Positionierungen wegen der Mehrdeutigkeitsbestimmung braucht (mindestens 30 min pro Punkt und lange Anfahrtswege zu den C-Punkten), waren für die Vermessungspraxis nicht günstig. Software, die schnelle Mehrdeutigkeitslösung in wenigen Minuten erlaubt (Rapid-Static-Methode und später RTK), kann jedoch nur erfolgreich auf kurzen Distanzen eingesetzt werden. Je nach Zustand der Ionosphäre dürfen hier die Distanzen zwischen zwei GPS-Empfängern 7 bis 15 km nicht überschritten werden. Damit bei Vermessungsarbeiten immer die schnelle Mehrdeutigkeitslösung angewendet werden kann, hat man in den Jahren 1994 bis 1998 das vorhandene C-Netz in Bayern weiter verdichtet (D-Netz; Punktabstände etwa 12 km, 2500 Punkte). Die Messdauer betrug dabei zweimal ca. zwei Stunden, auf unterschiedliche Tageszeiten verteilt.

Eine weitere Verdichtung des C-Netzes erfolgte auf Antrag der Vermessungsämter durch so genannte D++ Punkte (siehe *Bild 9*). Ebenfalls nur auf Antrag der Vermessungsämter wurde das D-Netz lokal noch durch Festpunkte der Hierarchiestufe E oder durch Katasterfestpunkte (KFP) verdichtet.

Die Entwicklung von SAPOS®

Die GPS-Satelliten senden Signale aus, mit deren Hilfe der Standort eines Empfangsgeräts weltweit auf ca. 10 m genau (im Jahre 1985 waren es noch ca. 100 m) ermittelt werden kann. Beim gleichzeitigen Einsatz von zwei hochgenauen GPS-Empfängern (sie müssen GPS-Signale auf den beiden Frequenzen L1 und L2 empfangen können) lassen sich die Koordinatenunterschiede zwischen den beiden Stationen durch differenzielle GPS-Messung (DGPS) jedoch mit cm-Genauigkeit bestimmen. Je weiter die beiden Empfänger voneinander entfernt sind, desto länger muss die Beobachtungszeit sein. Stellt man nun einen Empfänger auf einem bekannten Punkt auf (Referenzstation), so kann man gleichzeitig mit einem zweiten Empfänger (Rover) eine große Zahl von Neupunkten bestimmen. Wenn man die Referenzstation mit einem Funksender zur Abstrahlung von Korrekturwerten ausstattet, lassen sich die Koordinaten der Neupunkte sogar sofort (»real-time«) im Feld berechnen. Diese Überlegungen lagen den ersten Beschlüssen der Jahre 1995 bis 1999 im AdV-Arbeitskreis Raumbezug zum Aufbau eines bundesweiten Netzes permanenter Referenzstationen zu Grunde. Da dadurch dreidimensionale Koordinaten (= Positionen) bestimmt werden, erhielt dieses System von Stationen die Bezeichnung »SATelliten POSitionierungsdienst der deutschen Landesvermessung (SAPOS)« und das geschilderte Verfahren den Namen »Hochgenauer Echtzeit POSitionierungs-Service (HEPS)«. Um Zentimetergenauigkeit zu erreichen, wäre ein Netz von Referenzstationen mit einer Maschenweite von ca. 25 km nötig gewesen. Wegen der hohen Kosten, sowohl beim SAPOS-Betreiber als auch beim SAPOS-Nutzer, ist von der Realisierung eines derartigen flächendeckenden Dienstes in Bayern Abstand genommen worden.

Eine Vergrößerung des Abstandes der Referenzstationen bis auf 60 km erschien möglich, wenn nicht nur Korrekturwerte einzelner Stationen, sondern auch interpolierte Korrekturwerte für den Raum zwischen den Stationen erhältlich sind. In diesem Fall müssen jedoch die Referenzstationen entweder untereinander oder mit einer Zentralstation datentechnisch vernetzt werden. Dies führt zur Technik der virtuellen Referenzstation (VRS) bzw. der Flächenkorrekturparameter (FKP). Bei der VRS teilt ein Rover der Zentrale seine genäherten Koordinaten mit und erhält speziell für diesen Ort berechnete Korrekturdaten zurück. Bei den FKP wird die Rechenarbeit der Interpolation in die umgebenden Referenzstationen auf den Rover verlegt, der hierzu die nötigen Informationen erhält. Mit diesen Entwicklungen wurde gleichzeitig der Datendienst für das Handy-Funknetz (GSM) in Deutschland nahezu lückenlos aufgebaut, wodurch

eine preisgünstige Kommunikation in beiden Richtungen zwischen Rover und einer SAPOS-Zentrale möglich wurde.

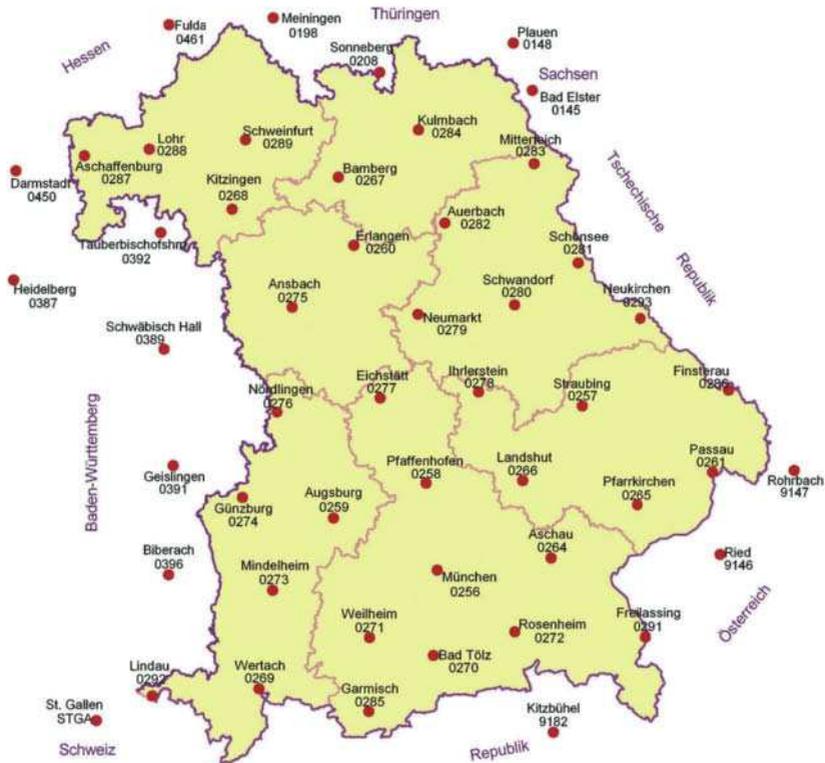


Bild 6: Das Referenzstationsnetz von SAPOS in Bayern; Stand August 2004.

Realisierung von SAPOS® in Bayern

Nach eingehenden Untersuchungen entschied sich die bayerische Landesvermessung für das System der virtuellen Referenzstation mit mittlerweile 35 ständig arbeitenden eigenen Referenzstationen und einer SAPOS-Zentrale am

Bayerischen Landesvermessungsamt in München sowie Datenübertragung vom und zum Kunden über GSM. Die Empfangsantennen der Referenzstationen mussten freie Rundum-Sicht haben und wurden aus Kostengründen in der Regel auf öffentliche Gebäude montiert. Die Einrichtung der Datenkommunikation zwischen den Referenzstationen und der Zentrale erforderte einen wesentlichen Teil der Aufbauarbeit. Die Daten dürfen an der Zentrale nämlich maximal eine Verzögerung von 0,25 Sek. aufweisen. Da SAPOS bis an die Grenzen Bayerns eine homogene Genauigkeit liefern soll, ist auch die Einbeziehung außerbayerischer Referenzstationen in das Netz erforderlich. Derzeit (Mitte 2004) ist dies mit Baden-Württemberg, Hessen, Thüringen, Sachsen, der Schweiz und teilweise mit Österreich verwirklicht. In Österreich ist jedoch das Referenzstations-Netz APOS noch im Aufbau, sodass hier leider noch nicht alle geplanten Referenzstationen verfügbar sind. Mit Tschechien wurden erste vorbereitende Kontakte aufgenommen. Seit April 2004 ist es möglich, den SAPOS-HEPS-Dienst auch über Internet, das derzeit kostengünstigste Kommunikationsmedium, zu nutzen. Die bidirektionale Verbindung zwischen Rover und SAPOS-Zentrale wird hierbei über GPRS oder UMTS hergestellt, welche für die benötigten Datenmengen kostengünstiger als GSM sind.



Bild 7:
Antenne der Referenzstation
Bamberg

Homogenisierung der deutschen SAPOS®-Stationskoordinaten

Die Anfang der Neunziger Jahre hierarchisch aufgebauten EUREF- und DREF-Netze entsprachen bereits nach zehn Jahren nicht mehr dem Stand der Technik und wiesen Spannungen im Bereich einiger Zentimeter auf. Gründe dafür waren kleine Fehler bei den EUREF-Anschlusspunkten (z. B. verursachte ein Kalibrierungsfehler des Lasers in Wettzell einen Fehler von 4 cm in der Höhe, ungenaue Koordinaten der Station Pfänder von etwa 3 cm in der Lage), geringe Anzahl von GPS-Satelliten in den Jahren der EUREF- und DREF-Messungen, noch nicht so gute GPS-Empfänger wie heute sowie unzureichende Kenntnisse über die Eigenschaften der GPS-Antennen.

Die deutschen Länder haben für den zwischenzeitlich aufgebauten SAPOS-Dienst die Stationskoordinaten auf uneinheitliche Weise ermittelt: in Bayern durch eine gemeinsame Ausgleichung mehrtägiger Empfängerdaten der Referenzstationen und Lagerung in der aktuellen Berechnung des EUREF; in mehreren anderen Ländern erfolgte die Koordinierung der SAPOS-Stationen durch Koordinatenübertragung von nächstgelegenen B-, oder C-Netz-Punkten. Da eine Vernetzungssoftware mindestens 1 cm Genauigkeit (2σ) für die SAPOS-Stationskoordinaten fordert, waren die von vielen Ländern ermittelten Koordinaten für die korrekte Bestimmung der Korrekturen zu ungenau. Außerdem ergaben sich an den Ländergrenzen Koordinatensprünge von einigen Zentimetern. Auch verlangten Großkunden, wie die Deutsche Bahn-AG und ASCOS (Ruhrgas AG), von der AdV hochgenaue und homogene Koordinatensätze für alle SAPOS-Referenzstationen in Deutschland.

Diesen Zwängen hat die AdV Rechnung getragen und beschlossen, homogene SAPOS-Koordinaten hoher Genauigkeit für ganz Deutschland einzuführen. Gemäß dem AdV-Beschluss »Diagnoseausgleichung der Koordinaten der SAPOS-Referenzstationen im System ETRS89« wurde eine gemeinsame Ausgleichung der Messdaten der SAPOS-Referenzstationen der 42. Kalenderwoche des Jahres 2002 mit Lagerung im DREF durchgeführt. Diese Lösung gilt seit 1.10.2003 in Bayern sowie im Wesentlichen auch für alle übrigen SAPOS-Stationen in Deutschland. Die Lagerung dieser Ausgleichung erfolgte jedoch leider im DREF und nicht in dem international benutzten EUREF.

Anpassung der bereits bestimmten ETRS89-Koordinaten an die homogenen SAPOS®-Koordinaten

Die Neufestsetzung der Koordinaten der SAPOS-Stationen zum 1.10.2003 erforderte die Angleichung aller bis dahin berechneten ETRS89-Koordinaten des Festpunktfeldes (Hierarchiestufen A,B,C,D,E und Katasterfestpunkte) sowie der so genannten Massepunkte, um landesweit ein homogenes Koordinatenfeld zu erhalten. Je nach dem Koordinierungsverfahren bei der Punktbestimmung mussten folgende drei Fälle mit unterschiedlichen Lösungsansätzen unterschieden werden:

Fall 1, Punktbestimmung mit SAPOS nach dem 1.10.2003: Bei der Koordinierung werden die neuen SAPOS-Stationskoordinaten als Ausgangswerte verwendet, gleichgültig, ob SAPOS im Echtzeit- oder Postprocessing-Verfahren verwendet wird. Alle nach dem 1. 10. 2003 mit SAPOS erzeugten ETRS89-Koor-

dinaten liegen daher spannungsfrei in dem durch die neuen SAPOS-Koordinaten definierten System.

Fall 2, Punktbestimmung mit SAPOS vor dem 1.10.2003: Da in Bayern schon die vor dem 1.10.2003 gültigen SAPOS-Stationskoordinaten in sich homogen waren, gestaltete sich die Anpassung relativ einfach. Sämtliche in Bayern mit SAPOS bestimmten Koordinaten konnten mit einem einheitlichen Verschiebungsvektor aus der 3D-Helmerttransformation von SAPOS(alt) nach SAPOS(neu) transformiert werden ($dX= +0,010\text{m}$, $dY= +0,008\text{m}$, $dZ= +0,001\text{m}$).

Fall 3, Punktbestimmung aus dem Festpunktfeld: Die bisherigen ETRS-Koordinaten der Festpunkte sowie die Koordinaten der davon mittels eigener Referenzstationen (Pärchen) polar abgesetzten Punkte waren sowohl in sich als auch zu den bisherigen Koordinaten der SAPOS-Stationen inhomogen. Daher mussten alle diese Punkte in Bezug auf die neuen SAPOS-Koordinaten neu berechnet werden. Dieses große Projekt wurde innerhalb von vier Monaten bei minimalem Personaleinsatz vom Bayerischen Landesvermessungsamt (BLVA) in folgenden 5 Schritten erledigt.

Im ersten Schritt wurden die **C-Netz-Punkte** neu berechnet. Hierzu standen folgende Beobachtungen zur Verfügung:

- eine neue, das gesamte bayerische C-Netz umfassende GPS-Messkampagne (nun 150 Punkte), die das BLVA zusammen mit den Bezirkfinanzdirektionen und Vermessungsämtern im Jahre 2003 durchgeführt hat (Beobachtungszeiten 2x6 Stunden) sowie
- drei Kampagnen des BKG zur Bestimmung eines satellitengeodätisch-nivellitischen Geoids (SatNiv-Geoid): Bayern-Nord (1999), Bayern-Süd (1999) und Hessen/Unterfranken (2000). Die Beobachtungszeiten betragen hier 2 x 24 Stunden.

Mit der neuen C-Netz-Kampagne wurden alle C-Punkte aktuell koordiniert; mit den Daten der SatNiv-Kampagnen konnte die Genauigkeit von etwa 60 % der C-Punkte deutlich gesteigert und kontrolliert werden. Bei der Ausgleichung der C-Netz-Kampagne dienten nur die SAPOS-Stationen mit ihren neuen Koordinaten als Anschlusspunkte. Tabelle 1 informiert über den Beobachtungsaufwand und Bild 8 zeigt das Netzbild der C-Netz-Auswertung.

Kampagne	Beginn der Sessions	Ende der Sessions	Durchgeführt von	GPS-Antennen (ohne SAPOS)	GPS-Empfänger (ohne SAPOS)	C-Netz-Punkte Neuberechnet
Bayern-Nord	27.04.1999	14.05.1999	Bundesamt f. Kartografie und Geodäsie (BKG)	TRM14532.00 TRM22020.00+GP TRM33429.00+GP DORNE MARGOLIN T	TRIMBLE 4000SSI Rogue SNR-8000	59
Bayern-Süd	07.09.1999	24.09.1999	Bundesamt f. Kartografie und Geodäsie (BKG)	TRM14532.00 TRM22020.00+GP TRM33429.00+GP DORNE MARGOLIN T	TRIMBLE 4000SSI Rogue SNR-8000	62
Hessen/ Unterfranken	03.05.2000	11.05.2000	Bundesamt f. Kartografie und Geodäsie (BKG)	TRM14532.00 TRM22020.00+GP TRM33429.00+GP DORNE MARGOLIN T	TRIMBLE 4000SSI Rogue SNR-8000	13
Cnetz_03	01.04.2003	27.10.2003	Bayer. Landesvermessungsamt 25 Trupps BFD Ansbach, 16 Trupps BFD Augsburg, 10 Trupps BFD Landshut, 23 Trupps BFD München, 18 Trupps BFD Würzburg, 11 Trupps	LEIAT502 LEIAT303 TRM4800 TRM39105.00 TRM41249.00	LEICASR520 TRIMBLE4700	150

Tabelle 1: Zur Neuberechnung des C-Netzes wurden GPS-Messungen des BKG und Messungen aus der Gemeinschafts-Kampagne von BLVA und Vermessungsämtern im Jahr 2003 verwendet.

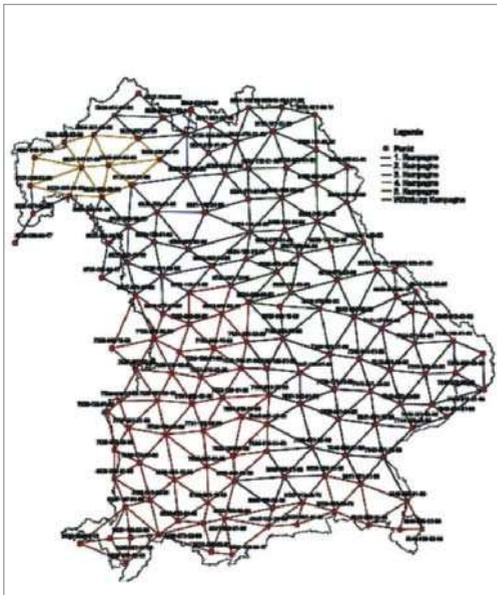


Bild 8:
Das C-Netz wurde, ausgehend von den homogenen SAPOS-Koordinaten, vollständig neu berechnet.

Bei der Implementierung der hochgenauen Beobachtungen der SatNiv-Kampagnen konnten die SAPOS-Stationen leider nicht direkt als Anschlusspunkte dienen, da die meisten Stationen erst später errichtet wurden. Für den Übergang gab es die Alternative, **entweder** die SAPOS-Stationen mit neu durchzuführenden Messungen mit DREF-Punkten zu verknüpfen (die SatNiv-Kampagnen hatten DREF-Punkte als Anschlusspunkte) – eine sehr aufwendige Option – **oder** rein rechnerisch vorzugehen und die SatNiv-Kampagnen um die Beobachtungsdaten von EUREF/GREF-Permanentstationen zu ergänzen und neu auszugleichen. Da für die EUREF/GREF-Permanentstationen Messungen der Jahre 1999, 2000 und 2003 zur Verfügung standen, konnte man die EUREF/GREF-Stationen als Hilfsanschlusspunkte verwenden, unter Berücksichtigung der zeitlichen Änderungen ihrer Koordinaten (Drift der eurasischen Erdplatte). Für die erste Möglichkeit haben sich einige neue Bundesländer entschieden, in Bayern wurde die zweite Möglichkeit realisiert. Als Hilfsanschlusspunkte wurden EUREF-(Kloppenheim, Wettzell, Pfänder) und GREF-Permanentstationen (Gotha, Erlangen, Oberpfaffenhofen) verwendet. Die Ergebnisse (Koordinatensätze und Varianz-Kovarianzmatrizen) aus der neuen C-Netz-Kampagne und den SatNiv-Kampagnen wurden gemeinsam einer Ausgleichung unterzogen. Dabei wurden die SAPOS-Stationen und die temporär auf die SAPOS-Stationen angefelderten EUREF- und GREF-Stationen als Anschlusspunkte verwendet. Alle Berechnungen dieses ersten Schrittes wurden mit Hilfe der Bernese GPS-Software (Version 4.2) durchgeführt.

Im zweiten Schritt wurde die Neuberechnung des Netzes **Hierarchiestufe D** durchgeführt. Die in den Jahren 1991-2000 gesammelten Basisvektoren samt Kovarianzkoeffizienten wurden einer neuen Netzausgleichung unterzogen. Die in Schritt 1 neu berechneten Koordinaten des C-Netzes dienten dabei als Anschlusspunkte. Für die Netzausgleichung korrelierter Basisvektoren wurde die PAGE-Software (LVA Hessen) verwendet.

Im folgenden dritten Schritt wurden die in den Jahren 2000-2002 in 20 Projekten entstandenen 20 **D++ Punkte** (siehe *Bild 9*) mit der SKI-PRO Software (der Fa. Leica) bearbeitet und archiviert. Hierfür dienten die Koordinaten von C- und D-Punkten als Anschlusswerte. Die in den drei Schritten neu berechneten Koordinaten zeichnen sich durch eine hohe innere Genauigkeit aus(A, B,- und C-Punkte mit 0,5 cm in der Lage und 0,8 cm in der Höhe; D- und D++ Punkte mit 0,8 cm in der Lage und 1,2 cm in der Höhe – jeweils 2σ).

SKI D++ Projekte

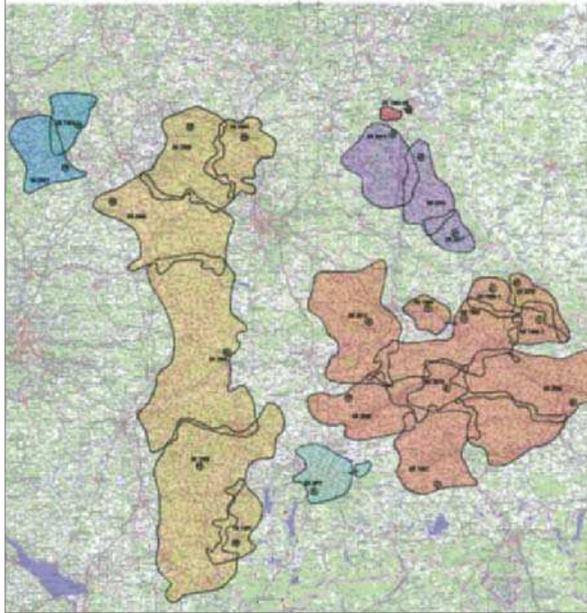


Bild 9:
In einem großen Teil
Bayerns wurde das
D-Netz durch das
D++Netz verdichtet.

Im vierten Schritt wurden die Festpunkte der **Hierarchiestufe E und die KFP**, deren Koordinaten am BLVA gespeichert waren, nicht mehr mit den Original-Beobachtungsdaten neu berechnet, sondern auf folgende Weise transformiert: Als Stützpunkte dienten sämtliche übergeordneten Punkte (Schritte 1 bis 3). Die nach einer bayernweiten 3D-Helmerttransformation zwischen ihren bisherigen und ihren neuen homogenen ETRS89-Koordinaten noch verbleibenden Klaffungen wurden multiquadratisch auf ein Bayern überdeckendes, regelmäßiges Gitter ($3' \times 5'$) umgerechnet. Jeder Punkt wurde sodann flächenhaft innerhalb seiner Gittermasche transformiert. Die neuen Koordinaten der Punkte ergaben sich somit aus der Kombination der 3D-Helmerttransformation und der bilinearen Interpolation in das Gitter mit den Restklaffungen. Mit diesem Verfahren ergab sich eine enorme Zeitersparnis gegenüber ähnlich genauen, bisher verwendeten Verfahren, da der Rechenaufwand für die multiquadratische Verteilung der Restklaffungen nur einmal anfiel. Die Koordinatenverschiebungen der 3D-Gitterdatei lassen sich im topozentrischen Koordinatensystem (Lage, Höhe) gut darstellen (*Bild 10* und *Bild 11*).

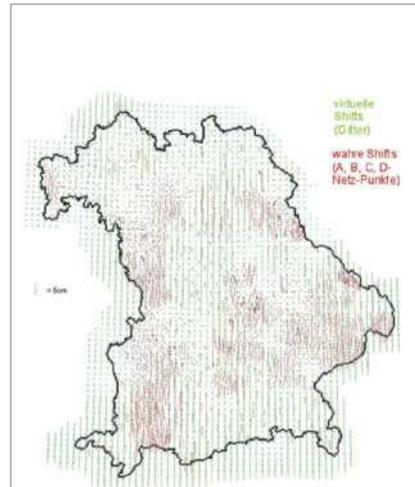
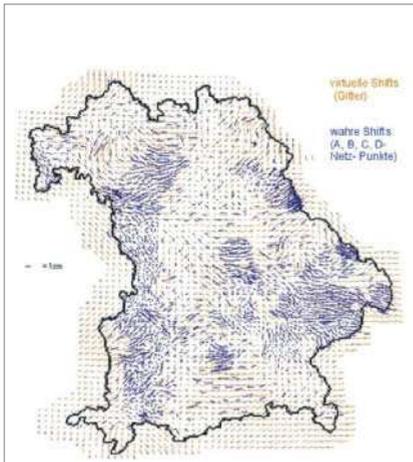


Bild 10, Bild 11: Die zu verteilenden Restklaffungen der Stützpunkte in Lage und Höhe werden durch die virtuellen Gitterpunkte gut repräsentiert.

Im fünften und letzten Umrechnungsschritt wurden die so genannten **Massepunkte** der Vermessungsämter und Direktionen für Ländliche Entwicklung auf die gleiche Weise wie die Festpunkte im vierten Schritt transformiert. Hierzu wurden die Koordinatenspeicher der genannten Behörden dem BLVA übermittelt, das die neuen Koordinaten zusammen mit etwaigen Fehlerprotokollen anschließend zurück sandte.

Mit den geschilderten Verfahren wurde der gesamte amtliche ETRS89-Koordinatenbestand in Bayern (zirka 250 000 Punkte) von November 2003 bis Februar 2004 in die neue, bundesweit homogene, durch SAPOS vorgegebene Realisierung des Koordinatensystems ETRS89 überführt. Das Ergebnis dieser Aktion ist eine zentimetergenaue Homogenität sämtlicher bisher in Bayern gemessener ETRS89-Koordinaten, gleichgültig wann, wie und von wem (Bayer. Landesvermessungsamt, Vermessungsämter oder Direktionen für Ländliche Entwicklung) sie bestimmt wurden.

Transformation von GK- in UTM-Koordinaten

Die Einführung des ETRS89-Systems sowie der UTM-Abbildung (Verebnung) in die Streifen 32, bzw. 33 soll die bestehenden Netzspannungen im GK-Koordinatensystem in Deutschland weitgehend beseitigen. In Bayern wird die Einfüh-

rung durch die Umrechnung aller Koordinaten der Digitalen Flurkarte (DFK) erfolgen. Die Bayerische Vermessungsverwaltung wird die Umstellung erst nach der Einführung von ALKIS durchführen (frühestens 2006). Dabei sollen die neu gemessenen und die bereits in ETRS89 bestimmten Stützpunkte des Bayerischen Landesvermessungsamtes, der Vermessungsämter und der Direktionen für Ländliche Entwicklung Ausgangswerte für die Transformationen liefern.

Neben den mit GPS gemessenen Stützpunkten können viele Tausend Trigonometrische Punkte (TP) als Stützpunkte verwendet werden, die nach 1980 durch Triangulation und Trilateration eingemessen worden waren. Für die Gewinnung dieser 2D-Stützpunkte wurde im Bayerischen Landesvermessungsamt ein Verfahren entwickelt, das auf den Daten der dort vorliegenden Datei der Messelemente (MED) basiert.

Diese geplante Transformation von mehreren Millionen Punkten wird federführend von der Bezirksfinanzdirektion München erledigt werden. Das dort entwickelte TRAFO-Programm wird in zwei Schritten arbeiten: Im ersten Schritt wird jeweils nach Abschluss der Stützpunktbestimmung in einem Teilgebiet zeitnah eine Probetransformation durchgeführt. Die erhaltenen Restklaffungen werden Aufschlüsse über Netzspannungen und fehlende Punktidentitäten geben. Daraus kann sich die Notwendigkeit zu Ergänzungs- und Nachmessungen ergeben. Nach Abschluss aller Probetransformationen in Teilgebieten und den Archivabgleichen zwischen Nachbarämtern wird im zweiten Schritt jeweils eine amtsweite Transformation durchgeführt.

Auch das endgültige Berechnungsverfahren der Umstellung soll zweistufig vorgenommen werden: Zunächst werden alle dreidimensionalen ETRS89-Koordinaten in ebene UTM-Koordinaten umgerechnet. Als weitere Stützpunkte stehen die aus der MED-Berechnung stammenden UTM-Koordinaten parat. Die anschließende GK-UTM-Umformung wird maschenweise mittels überbestimmter Affintransformation erfolgen. Die Verschiebungsvektoren in den Stützpunkten werden mittels punktspezifischer Interpolation an sämtlichen in ALKIS enthaltenen GK-Koordinaten angebracht.

Bayernweites Transformationsmodul für GK- und UTM-Koordinaten

Solange die amtliche Überführung aller Gebrauchskoordinaten in das ETRS89-System nicht realisiert ist, muss zwischen den beiden Systemen ständig transformiert werden. Um mit einer Genauigkeit von einigen Zentimetern zwischen gemessenen GPS-Koordinaten im ETRS89 und den entsprechenden lokalen

Gebrauchskoordinaten (GK im System DHDN) umzurechnen, kann mit Hilfe von Passpunkten ein regelmäßiges Raster berechnet werden, das neben einer großräumigen Transformation (z. B. für ganz Bayern) die kleinräumigen Verzerrungen des Gebrauchsnetzes großenteils berücksichtigt. Bei Verwendung eines derartigen Punktrasters ist es möglich, die GPS-Messungen direkt genähert in das amtliche Netz zu überführen, ohne dass jeweils lokale Transformationsparameter berechnet werden müssen. Ein solches Gitter mit Verschiebungsvektoren lässt sich für ein Gebiet von der Größe Bayerns in den Controller eines GPS-Empfängers übertragen. Das ermöglicht dem Anwender im Felde, mit der Genauigkeit von einigen Zentimetern, im lokalen Koordinatensystem (GK) zu arbeiten.

Zur Bestimmung der Restklaffungen zwischen dem homogenen ETRS89-System und dem mit Spannungen behafteten GK-System in Bayern wurde im Frühjahr 2003 mit 2500 identischen TP und im Sommer 2004 mit 4700 TP (sieben Punkte pro TK25) jeweils eine 3D-Helmert-Transformation berechnet. Die daraus entstandenen Restklaffungsvektoren in den Stützpunkten wurden jeweils auf ein Gitter ($3' \times 5'$, gebietsweise auch $1,5' \times 2'$) multiquadratisch interpoliert (Bild 12 und Bild 13). Die so berechneten virtuellen Restklaffungen, gemeinsam mit den globalen Transformationsparametern, ergaben die Parameterdatei, welche die Differenzen zwischen den geographischen Koordinaten im DHDN (Bessel-Ellipsoid) und ETRS89 (GRS80-Ellipsoid) enthält. Die Parameter werden vom Bayerischen Landesvermessungsamt unter der Bezeichnung »Passpunkt-freies Transformationsmodul« vertrieben.

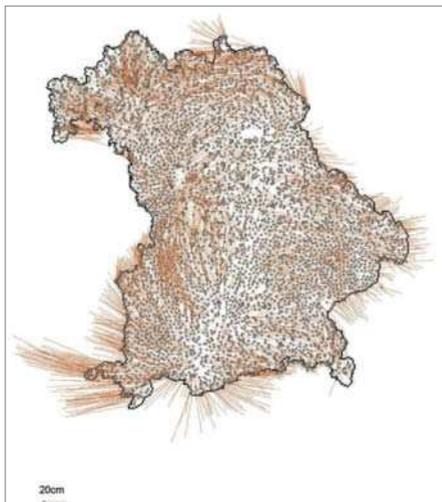


Bild 12:

Die konkreten Klaffungen zwischen ETRS89- und Gauß-Krüger(DHDN)-Koordinaten...

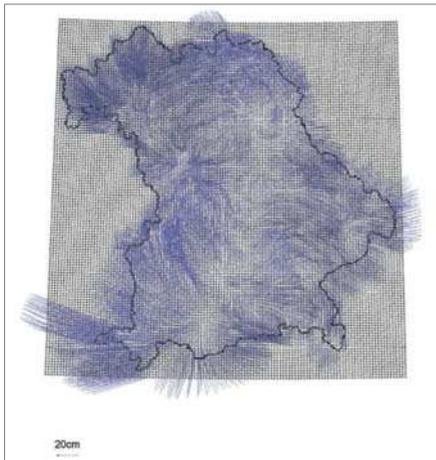


Bild 13:
 ...werden durch die virtuellen
 Klaffungen der Rasterpunkte
 repräsentiert.

Ein Koordinatenvergleich für 528 zufällig ausgewählte, mit dem Transformationsmodul nach GK umgeformte TP's ergab überwiegend Lagedifferenzen zwischen 3 bis 5 cm und einige wenige »Ausreißer« von bis zu 12 cm.



Bild 14: Das im Sommer 2004 berechnete, wesentlich detailliertere Gitter hat die durchschnittliche Lagegenauigkeit noch weiter verbessert.

Literatur:

- Ziegler, Th.*, 1976: Die Entstehung des bayerischen Katasterwerks, Sonderheft des Deutschen Vereins für Vermessungswesen (DVW) Landesverein Bayern e. V., München.
- Seeberger, M.*: Wie Bayern vermessen wurde, Hefte zur Bayerischen Geschichte und Kultur, Band 26.
- Vetter, K.*, 2003: Umstellung des Koordinatensystems auf ETRS89/UTM-Leitfaden für die Vermessungsämter, Vortrag für die Referendare im BLVA.
- Schmidt, R.*, 1995: Referenz- und Koordinatensysteme in der deutschen Grundlagenvermessung, NÖV NRW 1/1995.