



## GPS-relevante Koordinatensysteme und deren Bezug zum Österreichischen Festpunktfeld

Robert Weber<sup>1</sup>, Gerhard Walter<sup>2</sup>, Stefan Klotz<sup>3</sup>

<sup>1</sup> *Institut für Theoretische Geodäsie und Geophysik, Abteilung Theoretische Geodäsie, Technische Universität Wien, Gußhausstraße 27-29, A-1040 Wien*

<sup>2</sup> *Institut für Theoretische Geodäsie und Geophysik, Abteilung Theoretische Geodäsie, Technische Universität Wien, Gußhausstraße 27-29, A-1040 Wien*

<sup>3</sup> *Institut für Theoretische Geodäsie und Geophysik, Abteilung Theoretische Geodäsie, Technische Universität Wien, Gußhausstraße 27-29, A-1040 Wien*

VGI – Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation **83** (4), S. 190–200

1995

BibTeX:

```
@ARTICLE{Weber_VGI_199518,  
  Title = {GPS-relevante Koordinatensysteme und deren Bezug zum Österreichischen Festpunktfeld},  
  Author = {Weber, Robert and Walter, Gerhard and Klotz, Stefan},  
  Journal = {VGI -- Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation},  
  Pages = {190--200},  
  Number = {4},  
  Year = {1995},  
  Volume = {83}  
}
```





# GPS-relevante Koordinatensysteme und deren Bezug zum Österreichischen Festpunktfeld

Robert Weber, Gerhard Walter, Stefan Klotz, Wien

## Zusammenfassung

Der vorliegende Artikel beschreibt zunächst allgemein die im Rahmen von GPS genutzten Koordinatensysteme und stellt die Zusammenhänge zwischen den betrachteten Systemen dar. Im weiteren Verlauf wird der Internationale GPS-Dienst für Geodynamik (IGS) vorgestellt und auf Produkte dieser Institution hingewiesen, welche auch dem österreichischen GPS-Nutzer zur Verfügung stehen. Einen weiteren Schwerpunkt bildet die Analyse der Transformation von Festpunkten des Landessystems in einen geozentrischen Bezugsrahmen. Ausgehend davon werden Überlegungen zu einer Anpassung des österreichischen Bezugssystems an die Erfordernisse einer modernen Landesvermessung angestellt.

## Abstract

This paper starts with a discussion of GPS-related coordinate systems and the transformations between these systems. Later on the development and organization of the International GPS Service for Geodynamics (IGS) is briefly addressed and special emphasis is placed on IGS-results and products, which are available to all GPS users. Furthermore we analyse the transformation of Austrian triangulation points into a geocentric reference frame and conclude with some remarks concerning the establishment of a new Austrian reference frame.

## 1. Einleitung

Die weitgehende Aufnahme der satellitengestützten Punktbestimmung mit Hilfe des GPS in die Gruppe der nun auch im kommerziellen Bereich anerkannten Verfahren der Vermessung und Navigation wurde in jüngster Vergangenheit vollzogen. Diese Akzeptanz ist vor allem auf die einfache Verfügbarkeit des seit Ende 1993 operationell erklärten und voll ausgebauten Satellitensystems, auf die Entwicklung stabiler Empfängerhardware und auf die vereinfachte Handhabung der entsprechenden Auswertesoftware zurückzuführen. Eine Vielzahl vermessungstechnischer Aufgaben lassen sich heute unter Einbeziehung von GPS und unter Anpassung der Meßkonzepte effizienter und kostengünstiger lösen. Gleichzeitig hat diese breite Nutzung einer globalen Meßtechnik vermehrt auch Fragen über Definition und Realisierung von Referenzsystemen hervorgerufen, welche vormals nur für wissenschaftliche Anwender von Interesse waren. In der Folge seien deshalb jene Koordinatensysteme, die eine einfache Beschreibung der GPS-Beobachtungsgrößen erlauben, sowie ihr Bezug zueinander betrachtet.

## 2. GPS-relevante Koordinatensysteme

Ein vereinfachtes geometrisches Modell für GPS-Phasenbeobachtungen der Form

$$\Phi_R^S(t) = \frac{f}{c} \cdot |\underline{x}_S(t - \tau_R^S) - \underline{x}_R(t)| \quad (2.1)$$

verlangt sowohl die Empfängerposition  $\underline{x}_R$  wie auch jene des Satelliten  $\underline{x}_S$  in einem einheitlichen System ( $f$  = Signalfrequenz,  $c$  = Lichtgeschwindigkeit,  $\tau_R^S$  = Signallaufzeit). Stationskoordinaten sind jedoch im allgemeinen in einem geozentrischen, erdfesten Koordinatensystem gegeben, die Satellitenbewegung dagegen wird am einfachsten in einem Inertialsystem durch die Bewegungsgleichungen (2.2) beschrieben

$$\ddot{\underline{r}} = -\frac{GM}{r^3} \underline{r} + P(\underline{r}, \dot{\underline{r}}, t), \quad (2.2)$$

wobei  $P(\underline{r}, \dot{\underline{r}}, t)$  die Summe der Störungsterme beschreibt.

Die Satellitenbahn resultiert als partikuläre Lösung dieses Differentialgleichungssystems 2.Ordnung und entspricht zugleich der Lösung des häufiger benutzten Systems von sechs Differentialgleichungen 1.Ordnung ( je 3 Gleichungen für Position und Geschwindigkeit). Um GPS-Beobachtungen auszuwerten, sind nun entweder die Stationskoordinaten in das Inertialsystem oder die Satellitenpositionen in ein erdfestes Bezugssystem umzurechnen. Die deformierbare Erdkruste erschwert allerdings die Definition eines derartigen erdfesten Systems deutlich. So sind die durch geophysikalische Prozesse oder Gezeitenwirkung verursachten

Punktverschiebungen um einen Faktor 5–10 größer als die heute mit GPS erreichbare Meßgenauigkeit. Die Berechnung im inertialen Referenzsystem setzt dagegen die Kenntnis der genauen Orientierung der Erdachse im Raum zur Transformation zwischen den Systemen voraus. Die Beschreibung der Bezugssysteme erfordert zur besseren Übersicht eine hierarchische Einteilung in drei Gruppen: inertielle, global-terrestrische und lokal-terrestrische Systeme. Diese Auflistung ist keineswegs vollständig und dient lediglich der einfachen Einordnung aller im weiteren Verlauf betrachteten Repräsentanten der verschiedenen Gruppen.

Zunächst sei jedoch auf den Unterschied der in weiterer Folge häufig benutzten Begriffe „Bezugssystem“ und „Bezugsrahmen“ hingewiesen. Während das „Bezugssystem“ die theoretische, ideale Definition eines Koordinatensystems im Raum bezeichnet, versteht man unter „Bezugsrahmen“ die Realisierung eines solchen Systems z.B. in Form von definierten Stationskoordinaten. Auf diese Weise ist es durchaus möglich, daß zu ein und demselben Bezugssystem verschiedene Bezugsrahmen nebeneinander existieren. Ein Bezugssystem ist nicht notwendigerweise allein durch die Festlegung seiner Koordinatenachsen definiert, sondern kann zusätzliche Richtlinien (Modelle) und Datensätze zur Reduktion von Meßgrößen oder zur zeitlichen Transformation des Systems umfassen.

## 2.1 (Quasi-) Inertielle Bezugssysteme und zugehörige Bezugsrahmen

Der klassischen Mechanik folgend werden jene ausgezeichneten Bezugssysteme, in denen die Trägheitsgesetze uneingeschränkt gültig sind, Inertialsysteme genannt. Diese nicht-rotierenden Systeme ruhen bezogen auf den absoluten Raum oder bewegen sich in diesem mit konstanter Geschwindigkeit. Die allgemeine Relativitätstheorie definiert dagegen Inertialsysteme als im lokalen Gravitationsfeld „frei fallende Koordinatensysteme“. Beschränken wir unsere Betrachtungen allerdings auf einen ausreichend kleinen isotropen Bereich im Raum, wie z.B. unser Sonnensystem, lassen sich jedenfalls Inertialsysteme im klassischen Sinn angeben. Geringe Korrekturen aufgrund relativistischer Effekte sind jedoch gerade bei den Satellitenverfahren an die Beobachtungen und das zugrundeliegende Zeitmaß anzubringen. „Quasi-Inertial“ werden speziell jene nicht-rotierenden Systeme genannt, deren Ursprung eine beschleunigte Bewegung ausführt. Dies trifft für geozen-

trische Systeme aufgrund der beschleunigten Bewegung der Erde um die Sonne zu.

Als Inertialsystem wird heute das *Conventional Inertial System (CIS)* verwendet, dessen Ursprung im Massenmittelpunkt der Erde liegt und dessen Z-Achse definitionsgemäß in Richtung der mittleren Drehimpulsachse der Erde (CEP = Celestial Ephemeris Pole) zur Standardepoche J2000.0 weist. Die X-Achse zeigt zum zugehörigen Frühlingspunkt. Die Realisierung erfolgt als konventionelles kinematisches oder als konventionelles dynamisches System.

Das *konventionelle kinematische System* basiert einerseits auf den aus VLBI-Messungen gewonnenen sphärischen Koordinaten extragalaktischer Radioquellen. Diese Realisierung weist innere Positionsgenauigkeiten von  $\pm 0.1$  mas ( $1 \text{ mas} = 0.001''$ ) auf. Die Wartung des Systems obliegt dem Internationalen Erdrotationsdienst (IERS) mit Sitz in Paris. Andererseits beruht es auf den Positionen und Eigenbewegungen der Objekte des 5. Fundamentalkataloges (FK5). Die innere Genauigkeit der Positionen liegt hier bei  $\pm 50$  mas. Eine deutliche Verbesserung der Situation wird durch den Übergang auf den Objektkatalog der Hipparcos-Mission erwartet ( $\pm 2$  mas).

Das *konventionelle dynamische System* beruht auf den Bewegungsgleichungen und wird durch die Positionen der Körper im Sonnensystem wie z.B. durch Planeten oder auch künstliche Erdsatelliten (GPS) realisiert. Als offiziell anerkanntes Modell natürlicher Körper fungieren hier die JPL Ephemeriden DE200 aus dem Jahre 1992 (Position  $\pm 10$  mas), wenngleich inzwischen schon eine Reihe weiterentwickelter Modelle am Jet Propulsion Laboratory verfügbar sind. Die Beschreibung der Bewegungsgleichungen von GPS-Satelliten benötigt ein geozentrisches dynamisches Bezugssystem mit ausreichender Kurzzeitstabilität (zumindest 7 Tage wünschenswert). Auf dessen aktuelle Genauigkeit wird später noch eingegangen.

## 2.2 Globale terrestrische Bezugssysteme und zugehörige Bezugsrahmen

Globale terrestrische Bezugssysteme sind geozentrische mit dem Erdkörper mitrotierende Koordinatensysteme mit dem Ursprung im Massenschwerpunkt der Erde (einschließlich Ozeane und Atmosphäre). Als *Conventional Terrestrial System (CTS)* wird jenes System bezeichnet, dessen Z-Achse in Richtung des CTP (= Conventional Terrestrial Pole, siehe Abb.1) weist und dessen XZ-Ebene durch eine Längenkon-

vention (beinhaltet den mittleren Meridian von Greenwich) festgelegt ist. Der CTP repräsentiert genähert die mittlere Position des CEP der Jahre 1900-1905, dessen Bewegung relativ zur Erdkruste sich über 6 Jahre nahezu ausmittelt.

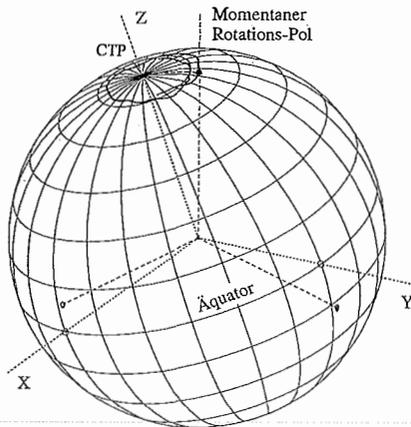


Abb. 1: Rotationsachse der Erde zur Festlegung der Z-Achse

Globale terrestrische Bezugsrahmen sind Realisierungen solcher Systeme in Form von Koordinatensätzen von Punkten, welche unter Zuhilfenahme von VLBI und satellitengestützten Meßtechniken gewonnen wurden. Unter dem Gesichtspunkt der nicht starren Erde wird zwar die Bewegung dieser Stationen mittels eines zugehörigen Geschwindigkeitsmodells berücksichtigt, eine gemeinsame globale Rotation der Punkte relativ zur Erdkruste allerdings nicht zugelassen (no net rotation condition). Die Position eines auf der festen Erdoberfläche gegebenen Punktes zum Zeitpunkt  $t$  läßt sich durch die einfache Beziehung (McCarthy, 1992)

$$\underline{r} = \underline{r}_0 + \underline{v}_0 (t - t_0) + \sum_i \Delta \underline{r}_i (t) \quad (2.3)$$

beschreiben, wobei  $\underline{r}_0$  und  $\underline{v}_0$  Ort und Geschwindigkeit zur Epoche  $t_0$  und  $\Delta \underline{r}_i$  periodische Effekte wie z.B. die Gezeitenwirkung bedeuten.

Der Geschwindigkeitsvektor  $\underline{v}_0$  kann bei Vorlage eines Plattenbewegungsmodells noch in

$$\underline{v}_0 = \underline{v}_{\text{Platte}} + \underline{v}_R \quad (2.4)$$

aufgespalten werden, wobei  $\underline{v}_R$  die nicht durch das Modell erfaßte Restgeschwindigkeit bezeichnet. GPS-Auswertungen sind heute in der Lage, global Aussagen sowohl über den vorerst unbekanntes Ortsvektor (Lage ca.  $\pm 5\text{mm}$ , Höhe ca.  $\pm 1\text{cm}$ ) als auch bei Vorlage eines ausreichend langen Beobachtungszeitraumes über dessen zeitliche Änderung  $\underline{v}_0$  bzw.  $\underline{v}_R$  zu treffen (vgl. Abb.2).

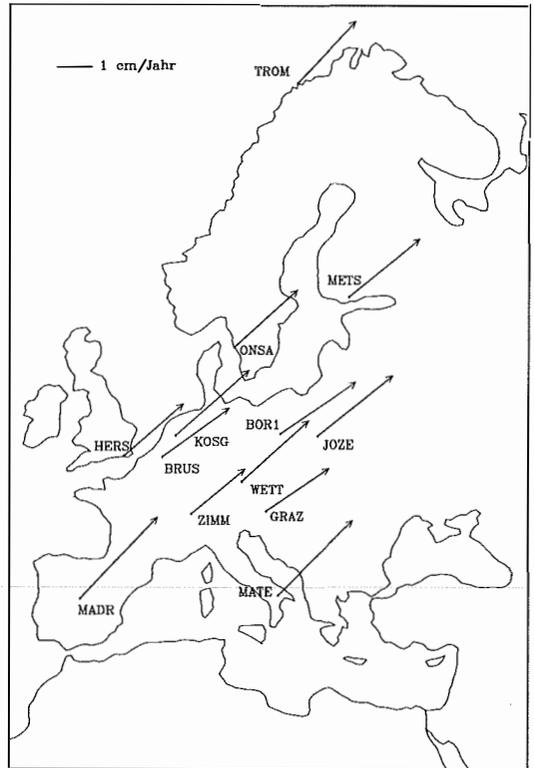


Abb. 2: ITRF93-Geschwindigkeitsvektoren europäischer Stationen als 24-Monatslösung des CODE-GPS-Rechenzentrums

Im folgenden seien zwei bekannte Beispiele für ein CTS angeführt:

Das *World Geodetic System 1984 (WGS 84)* ist das vom amerikanischen Verteidigungsministerium veröffentlichte System zur Beschreibung der Bahndaten der GPS-Satelliten. Dabei wurden die Parameter des Geodetic Reference Systems 1980 (vgl. Moritz, 1992) zur Festlegung des Ellipsoides übernommen. (Tab.1)

$$\begin{aligned} a &= 6\,378\,137 \text{ m} \\ C_{2,0} &= -484.16685 \cdot 10^{-6} \\ GM &= 3\,986\,005 \cdot 10^8 \text{ m}^3 \text{ s}^{-2} \\ \omega &= 7\,292\,115 \cdot 10^{-11} \text{ s}^{-1} \end{aligned}$$

- a..... Große Halbachse
- $C_{2,0}$ . Zonaler Kugelfunktionskoeffizient 2.Grades
- $GM$  . Geozentrische Gravitationskonstante
- $\omega$  .... Winkelgeschwindigkeit der Erdrotation

Tab. 1: Parameter des Geodetic Reference Systems 1980 (GRS 80)

Eine Kugelfunktionsentwicklung des Störpotentials bis Grad und Ordnung 36 ist ebenfalls Teil des Referenzsystems (Boyle, 1987). Die im GPS-Signal mitgesendeten Satellitenpositionen

(Broadcast-Ephemeris) sind im WGS 84 berechnet und können direkt im Empfänger oder in einfacher Auswertesoftware verarbeitet werden. Alle Echtzeitanwendungen (Navigation) sind damit vorrangig an dieses System gebunden. Ein wie oben beschriebenes CTS wird durch das WGS 84 allerdings mit nur geringer Genauigkeit realisiert, da es sich auf wenige (fünf) Monitor-Stationen stützt, deren Koordinaten zudem ursprünglich einer verbesserten Doppler-Lösung entstammen. Ein global gültiges CTS sollte heute aber die durch Satellitentechniken bestmöglich erzielbare Genauigkeit widerspiegeln. Eine jüngst erfolgte Koordinatenkorrektur des WGS84-Referenznetzes konnte gewährleisten, daß WGS84-Koordinaten zumindest im Meterbereich mit dem bestmöglichen CTS-Bezugsrahmen übereinstimmen. Während diese Systeminkonsistenz für kleinräumige GPS-Vermessungsaufgaben als typische Differenzverfahren ohne Bedeutung ist, nimmt die Notwendigkeit eines hochgenauen CTS für großräumige oder gar globale Netze rasch zu.

Das *IERS Terrestrial Reference System (ITRS)* (Boucher, Altamimi, 1989) ist das heute gültige System für die geometrische Beschreibung der von VLBI, GPS, DORIS, SLR und LLR bestimmten Stationskoordinaten. Der darin definierte Bezugsrahmen ITRF (= IERS Terrestrial Reference Frame) findet weltweit Anwendung und wird aufgrund regelmäßiger Messungen aller Raumtechniken unterhalten und laufend verbessert. Als Referenzellipsoid wird das GRS 80-Ellipsoid verwendet. Die aktuellste Lösung ITRF93 (die beiden Ziffern bezeichnen jene Jahreszahl, deren Beobachtungen noch vollinhaltlich in der Lösung berücksichtigt wurden) bezieht sich auf einen Satz von derzeit ca. 150 global verteilten Stationskoordinaten mit einer Konsistenz im 1–2cm-Bereich und auf ein zugehöriges Geschwindigkeitsmodell (Boucher et al., 1994). Der Aufbau und die Verdichtung des ITRF stützt sich seit der Aufnahme des Probebetriebs des Internationalen Dienstes für Geodynamik im Jahre 1992 (siehe Abschnitt 3) massiv auf GPS.

#### Transformation zwischen CIS und CTS

Der Übergang vom inertialen System CIS in ein globales erdfestes Referenzsystem CTS gelingt mittels folgender Drehmatrizen

$$\underline{r}_{CTS}(t) = XYUNP \underline{r}_{CIS}(t) \quad (2.5)$$

wobei  $\underline{r}_{CIS}$  und  $\underline{r}_{CTS}$  Ortsvektoren im jeweiligen System darstellen, und das Zeitargument  $t$  mit ausreichender Genauigkeit durch

$t = (TAI - 2000 \text{ Jan } 1.5 \text{ TAI}) / 36525 \text{ Tage}$   
(TAI ... Internationale Atomzeit)  
berechnet wird.

Die Präzessionsmatrix  $P$  berücksichtigt die Präzession zwischen der Referenzeпоche J2000.0 und dem aktuellen Datum und beschreibt den Übergang vom CIS zum mittleren System zur aktuellen Epoche. Die Nutationsmatrix  $N$  beschreibt die Nutation zum aktuellen Datum und bewirkt den Übergang vom mittleren zum wahren Himmelsystem. Die Matrix  $U$  legt die Rotation um den Stundenwinkel des wahren Frühlingspunktes fest und beinhaltet damit den Übergang zum rotierenden System. Die Polbewegungsmatrizen  $X$  und  $Y$  berücksichtigen schließlich die Lage des CEP im erdfesten System und vermitteln den Übergang zum CTP. Die Transformationsmatrizen setzen sich aus den Einzeldrehmatrizen

$$\begin{aligned} P &= R_z(-z) \cdot R_Y(\vartheta) \cdot R_z(-\zeta) \\ N &= R_X(-(\varepsilon + \Delta\varepsilon)) \cdot R_z(-\Delta\psi) \cdot R_X(\varepsilon) \\ U &= R_z(\Theta_{Gr}) \\ X \cdot Y &= R_Y(-x_P) \cdot R_X(-y_P) \end{aligned} \quad (2.6)$$

zusammen, wobei  $z$ ,  $\vartheta$ ,  $\zeta$  die Präzessionswinkel,  $\Delta\psi$ ,  $\Delta\varepsilon$  Nutation in Länge und Schiefe,  $\varepsilon$  die mittlere Ekliptikschiefe,  $\Theta_{Gr}$  die wahre Sternzeit Greenwich und  $x_P$  bzw.  $y_P$  die Polkoordinaten bedeuten. Aufgrund der Definition als gleichförmig rotierendes System ist für die Transformation in das WGS84 allerdings die mittlere Sternzeit Greenwich zu benutzen. Die Drehmatrizen  $R_X$ ,  $R_Y$ ,  $R_Z$  bezeichnen dabei eine Drehung um die jeweilige Koordinatenachse. Es ist an dieser Stelle zu bemerken, daß die Orientierung des terrestrischen Systems im Inertialsystem grundsätzlich nur drei Drehparameter benötigt. Die Aufteilung in fünf nun nicht mehr unabhängige Drehungen hat formale Gründe, deren Erläuterung allerdings hier zu weit führen würde.

Abbildung 2 zeigt deutlich, daß europäische Stationen im ITRS eine gleichartige Bewegung von etwa 3 cm pro Jahr erfahren. Dies entspricht der tektonischen Bewegung der eurasischen Platte im globalen Bezugssystem. Diese stete Koordinatenänderung ist aber für den praktischen Vermessungsgebrauch hinderlich. So wurde auf der EUREF-Sitzung 1990 in Florenz beschlossen auf dem stabilen Teil der eurasischen Platte den Datensatz der europäischen ITRF-Stationen zur Epoche 1989.0 festzuhalten und in Anlehnung an das globale System mit ETRF89 (European Terrestrial Reference Frame) zu bezeichnen. Koordinaten im zugehörigen ETRS-System sind also genau zur Epoche 1989.0 mit jenen im ITRS identisch. Die zeitliche Entwicklung wird mit einem globalen kinemati-

schen Modell beschrieben, welches die eurasi- sche Platte einer räumlichen Drehbewegung von ca. 1 mas/Jahr um eine durch den Massen- schwerpunkt der Erde gelegte Achse unterzieht. Diese Drehung entspricht etwa den oben ge- nannten 3cm/Jahr. Komplizierte tektonische Ver- hältnisse wie im Mittelmeerraum oder im Alpen- gebiet sind damit allerdings noch nicht zu erfassen und fordern eine permanente Verbesserung der kinematischen Modelle. Die Umrechnung von Koordinatensätzen vom ITRF-Bezugsrah- men in das ETRS89-System gelingt mit Hilfe einer 7-Parameter-Ähnlichkeitstransformation und ist in (Boucher, Altamimi, 1995) ausführlich behandelt.

Die stetige Verbesserung von Referenzsystemen und Bezugsrahmen unter Zuhilfenahme von VLBI-, Laser- oder GPS-Messungen ist ein iterativer Prozeß. Jede nach einem genau definierten physikalischen Modell reduzierte Beobachtung ist einem Referenzsystem zuzuordnen und kann zur Verbesserung dessen Bezugsrah- mens (also der Stationskoordinaten) und des be- nutzten physikalischen Modells selbst beitragen. Jede Veränderung von Stations- oder Satelliten- koordinaten beeinflußt den Bezugsrahmen und umgekehrt, jede Änderung des offiziell anerkannten physikalischen Modells beeinflußt wieder das Referenzsystem.

### 2.3 Lokale terrestrische Bezugssysteme und zu- gehörige Bezugsrahmen

Mit Hilfe der klassischen geodätischen Metho- den war an die Schaffung globaler Referenzsys- teme nicht zu denken. So bedienten sich die verschiedenen Staaten beim Aufbau ihres Lan- destriangulierungsnetzes eines lokalen Bezugs- systems. Dies geschah im allgemeinen durch die willkürliche Wahl eines Fundamentalpunktes möglichst im Zentrum des Netzes, in dem die astronomische Breite und Länge sowie das astronomische Azimut zu einem terrestrischen Zielpunkt fehlerfrei in das geodätische System übernommen wurden. Nach der Festlegung der Dimensionen eines Referenzellipsoides definierte man den Netzmaßstab durch die Reduktion einer nahe am Fundamentalpunkt gelegenen Basis (mittels der bekannten orthometrischen Höhe) auf das Ellipsoid. Damit ist die Lagerung des Referenzellipsoides gegenüber dem Geoid erfolgt, und auch das mit dem Ellipsoid verbundene Ko- ordinatensystem ist eindeutig mit dem Erdkörper verbunden. Im allgemeinen fällt nun aber der El- lipsoidmittelpunkt nicht mit dem Erdschwerpunkt zusammen, zu dem man ohne Satellitentechni- ken keinen Zugriff hatte. Der Aufbau des Lan-

desnetzes erfolgte sodann ausgehend vom Zen- tralpunkt durch die klassische Netzausbreitung und Netzverdichtung auf dem Bezugsellipsoid.

Lokale terrestrische Bezugssysteme sind also erdfeste Koordinatensysteme deren Ursprung gegenüber dem Erdschwerpunkt verschoben ist und deren Achsen kleine Verdrehungen gegen- über den CTS-Achsen aufweisen. Als Beispiel sei hier die österreichische Realisierung ange- führt. Das österreichische Netz wurde im Funda- mentalpunkt Hermannskogel gelagert und mit- tels der Übernahme des Ausgangsazimuts Her- mannskogel-Hundsheimer Berg orientiert. Als Bezugsellipsoid diente das Besselellipsoid ( $a = 6\,377\,397.155\text{m}$ ,  $e^2 = 6.674\,3722 \cdot 10^{-3}$ ). Die- ser Bezugsrahmen wird auch als „*geodätisches Datum MGI*“ (= Militär-Geographisches Institut) bezeichnet. Weiterführende Informationen über Aufbau und Entwicklung des österreichischen Grundlagnetzes können den Arbeiten von (Zeger, 1993) entnommen werden. Die Übernahme des Ausgangsazimutes hat sich als nicht fehler- frei erwiesen. Daraus resultieren heute Verdre- hungen der Achsen des österreichischen Be- zugsellipsoides gegenüber dem ITRS im Bereich von einigen Altsekunden.

Die Transformation lokaler Landessystemkoor- dinaten in ein geozentrisches System erfolgt vor- erst durch Umrechnung der Landeskoordinaten in das kartesische System

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_{MGI} = \begin{pmatrix} (N+h) \cos\varphi \cos\lambda \\ (N+h) \cos\varphi \sin\lambda \\ (N(1-e^2) + h) \sin\varphi \end{pmatrix} \quad (2.7)$$

$$\text{mit } N = \frac{a}{\sqrt{1-e^2 \sin^2 \varphi}}$$

und mittels einer nachfolgenden räumlichen Ähnlichkeitstransformation der Gestalt (kleine Drehungen vorausgesetzt):

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_{CTS} = \begin{pmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{pmatrix} + (1+s) \begin{pmatrix} 1 & \omega_z & -\omega_y \\ -\omega_z & 1 & \omega_x \\ \omega_y & -\omega_x & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_{MGI} \quad (2.8)$$

Numerische Größen für die Umwandlung von österreichischer Landessystemkoordinaten in das ITRF93 werden im Kapitel 4 angegeben.

### 3. Der Internationale GPS-Dienst für Geo- dynamik (IGS)

Im August 1991 wurde anlässlich der 20. Gener- alversammlung der Internationalen Union für Geodäsie und Geophysik (IUGG) in Wien der Be- schluß gefaßt, das Konzept eines Internationalen

## GPS TRACKING NETWORK OF THE INTERNATIONAL GPS SERVICE FOR GEODYNAMICS OPERATIONAL AND PLANNED STATIONS

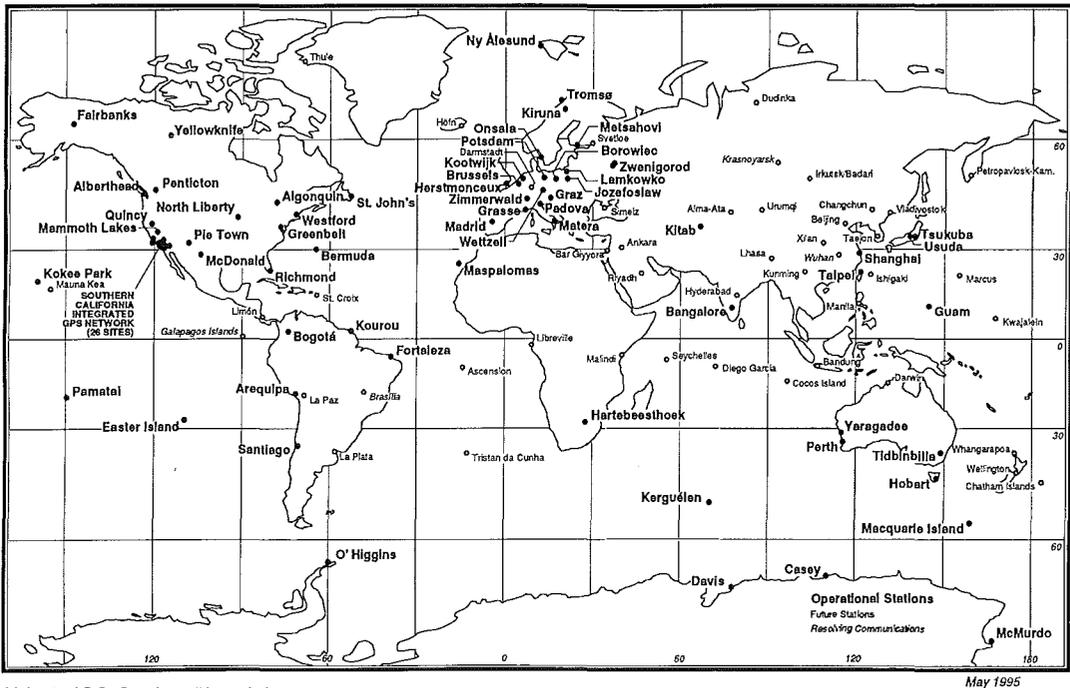


Abb. 3: IGS-Stationsübersicht

Dienste zu erproben, dessen vorrangiges Ziel die Unterstützung von geodätischen und geophysikalischen Forschungsarbeiten durch permanente Bereitstellung der aus GPS abgeleiteten Resultate ist. Die Testphase im Jahr 1992 verlief derart erfolgreich, daß sie ohne Unterbrechung von einem IGS-Pilot-Service abgelöst wurde und schließlich am 1.1.1994 der offizielle IGS-Dienst seinen Betrieb aufnahm. IGS verfügt heute über ein Netz von über 80 weltweit verteilten permanenten GPS-Stationen, die von verschiedenen staatlichen und universitären Organisationen betrieben werden (siehe Abb. 3). Von einer IGS-Permanent-Station wird nicht nur die örtlich fixe Aufstellung (vorzugsweise in der Nähe einer VLBI-, SLR- oder LLR-Station), sondern auch die Aufnahme von Code und Phase auf beiden Frequenzen, ein 24-Stunden-Betrieb und der Anschluß an internationale Datennetze zur Weiterleitung der Daten innerhalb weniger Stunden nach ihrer Aufnahme gefordert.

Über drei globale Datenzentren gelangen die GPS-Meßwerte an sieben Auswertezentren von denen eines in Kanada, drei in den USA und drei in Europa ihren Sitz haben. Diese Analysezentren produzieren tägliche hochpräzise Ephemeriden der GPS-Satelliten mit Genauigkeiten von  $\pm 0.15$  m pro Bahnpunkt (Precise Epheme-

ris), bestimmen ebenfalls täglich die Koordinaten des CEP im terrestrischen System mit einer Genauigkeit von  $\pm 0.2$  mas sowie das Rotationsverhalten der Erde (Length of Day) auf  $\pm 0.04$  msec und berechnen zusätzlich die Koordinaten und Geschwindigkeiten der Beobachtungsstationen im aktuellen ITRS. Die Lagegenauigkeit für ITRF93-Stationen liegt derzeit bei etwa  $\pm 1$  cm. Die Ergebnisse aller sieben IGS-Rechenzentren werden wöchentlich vom Center-Koordinator und vom IERS-Subbüro einer Kontrolle unterzogen.

Bereits die Dokumentation allein der wesentlichsten Ergebnisse von IGS würde den Rahmen dieses Artikels sprengen. Deshalb sei stellvertretend und als Beweis für die Güte der von IGS zur Verfügung gestellten Bahndaten das Ergebnis einer am europäischen Zentrum für Bahnbestimmung in Bern (CODE) durchgeführten Langzeitstudie in Abb.4 dargestellt. Gezeigt wird das zeitliche Verhalten der 1170 km langen Basislinie zwischen der schwedischen IGS-Station in Onsala und der österreichischen Station Graz-Lustbühel über einen Zeitraum von 70 Tagen. Zu Vergleichszwecken wurde diese Linie einerseits mit den von den Satelliten abgestrahlten Broadcast-Ephemeriden und andererseits mit den IGS-Precise-Ephemeris ausgewertet. Die Ergebnisse zei-

gen klar, daß die IGS-Bahndaten die Bestimmung dieser Strecke mit einer Genauigkeit von  $\pm 3$  ppb erlauben und die Koordinatenkomponenten der freien Station Graz im  $\pm 5$  mm Bereich in Lage und im  $\pm 1$ cm Bereich in der Höhe variieren. Die Variationen der Broadcast-Lösung sind deutlich um einen Faktor 10 größer.

Die Güte der Bahndaten wirkt sich proportional zur Länge der auszuwertenden Basislinie aus. Für großräumige GPS-Netze ist die Verwendung der präzisen Bahndaten daher unerlässlich und bildet eigentlich erst die notwendige Voraussetzung für die Schaffung hochgenauer Bezugsrahmen.

Satellitengestützte Meßtechniken erlauben heute die Durchführung geodätischer und geodynamischer Studien mit einer noch nie dagewesenen Präzision. GPS spielt aufgrund seiner weiten Verbreitung eine zentrale Rolle im Reigen

dieser Techniken und besitzt in IGS ein engagiertes internationales Forum, das sich um verbesserte Auswertemodelle, qualitativ hochstehende Produkte und einen einfachen Zugriff zu diesen bemüht. IGS betreibt ein im Zentralbüro am Jet Propulsion Laboratory installiertes Informationssystem, das über Internet und WorldWideWeb (URL: <http://igs.cb.jpl.nasa.gov>) den Abruf von Informationen über das Stationsnetz und den aktuellen Datenbestand sowie nicht zuletzt den Zugriff auf die Produkte wie z.B. die präzisen Bahndaten erlaubt (Liu et al., 1994).

#### 4. Der Bezug des Österreichischen Festpunktfeldes zum ITRF

Zur Verdichtung des ITRF wurden in den vergangenen Jahren mehrere europäische und nationale Verdichtungskampagnen durchgeführt. In Österreich wird seitens des Bundesamtes für Eich- und Vermessungswesen (BEV) ein GPS-Grundnetz aufgebaut (AGREF), dessen Auswertung kurz vor dem Abschluß steht. Dieses Netz dient auch geodynamischen Zwecken und wird dem Anwender Punkte zur Verfügung stellen, die neben den Gebrauchskordinaten auch solche im internationalen Bezugsrahmen besitzen. Für die Anbindung eines Netzes an das ITRF sind jedenfalls die Produkte des IGS, speziell die Stationsdaten der nächstgelegenen IGS-Permanentstationen und die präzisen Bahndaten erforderlich. Als Beispiel für die erreichbaren Genauigkeiten sei die Einrechnung eines Pfeilers am Dach der Technischen Universität Wien gezeigt. Verwendet wurden die IGS-Stationen Graz, Wettzell(D) und Zimmerwald(CH) und die Ephemeriden des CODE. In Abbildung 5 sind die Abweichungen in Breite, Länge und Höhe der drei Einzelösungen von einer Netzwerklösung aufgetragen, die wegen der einheitlichen Modellierung der Troposphäre in der Wiener Station die optimale Lösung darstellt. Lagegenauigkeiten besser als 1 cm können auch für Basislinienlängen von meh-

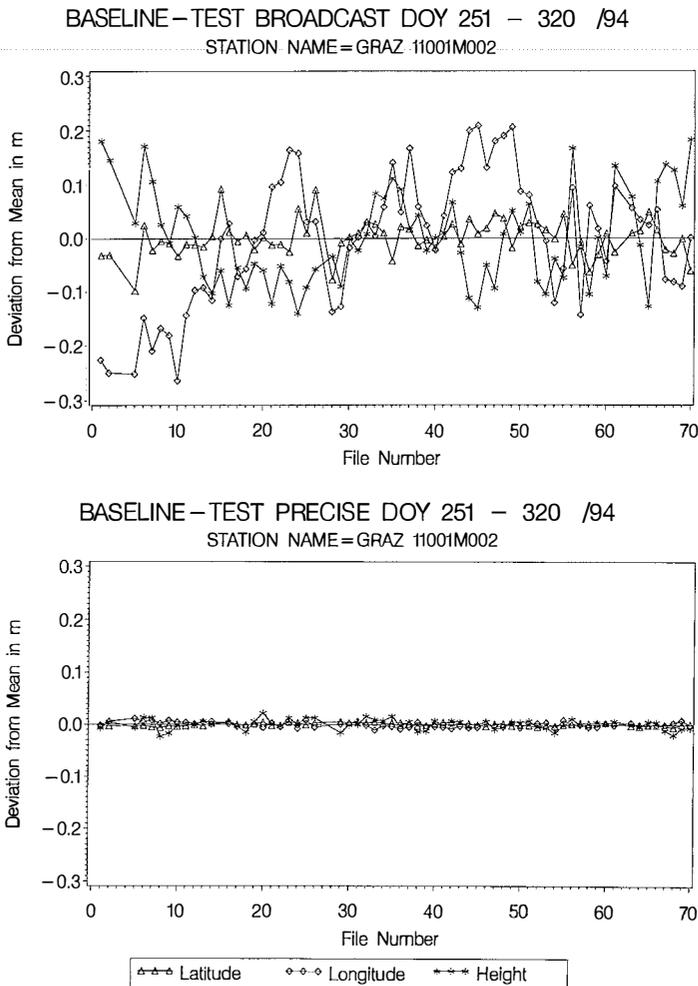


Abb.4: Vergleich Broadcast-Precise anhand der Basislinie ONSA-GRAZ

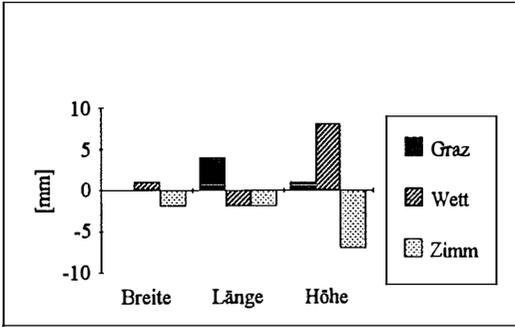


Abb. 5: Einrechnung in das ITRF93: Abweichungen der Einzel- von einer Gesamtlösung

renen hundert Kilometern erzielt werden, wenn Beobachtungen von mindestens 12 Stunden vorliegen. Das Beispiel belegt die Qualität der verwendeten Orbits und zeigt die Genauigkeit in der heutigen Realisierung des internationalen Bezugsrahmens.

Bereits aus wenigen absolut in das ITRF eingerechneten Punkten können die Verdrehungen und Verschiebungen des alten österreichischen Datums MGI bestimmt werden. Aus den 14 in Abbildung 6 dargestellten Punkten, die aus verschiedenen Kampagnen stammen, wurden die dort angeführten Parameter der räumlichen Ähnlichkeitstransformation (im Sinne MGI → ITRF) ermittelt.

Diese Parameter können für manche Anwendungen – etwa in der Navigation – bereits ausreichend sein. Für eine genauere Analyse des österreichischen Festpunktfeldes sind freilich nähere Untersuchungen notwendig. Abb. 7 zeigt die Ergebnisse einer an der Abteilung für Theoretische Geodäsie der TU Wien durchgeführten Kampagne (Klotz, 1995). Das im Juli 1994 beobachtete Netz besteht aus 74 Punkten, die zum Teil Punkte des Netzes 1. Ordnung oder des

AGREF sind. Dargestellt sind die Residuen nach einer Transformation unter Verwendung der Punkte 1. Ordnung als Identpunkte.

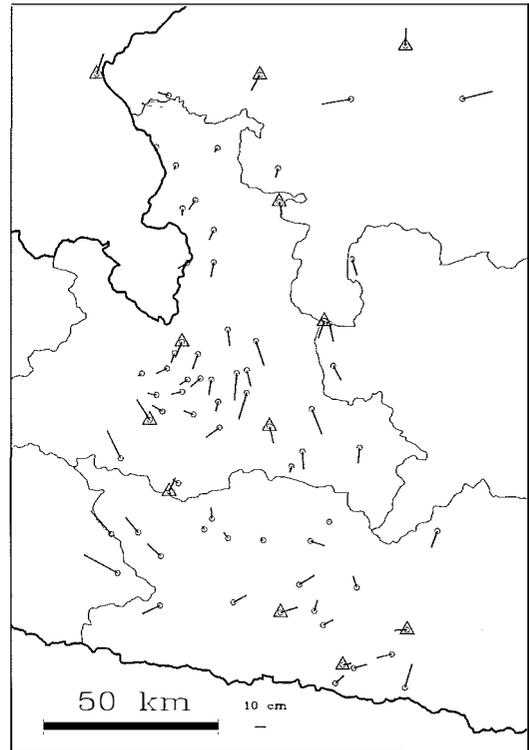
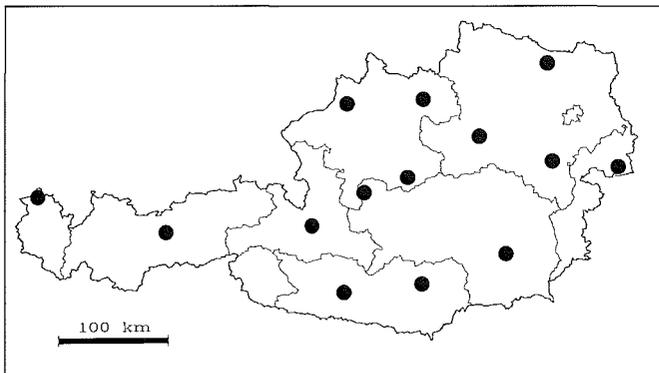


Abb. 7: Lagerresiduen nach der Transformation ITRF93 MGI

Abbildung 8 zeigt eine Detailstudie in der Dreiecksmasche der Triangulierungspunkte 1. Ordnung HKOE = Hochkönig, RRFK = Reißbrachkopf und MMDL = Mosermandl. Die Residuen bei der Transformation der ITRF93-Koordinaten in das Gebrauchssystem betragen bis zu 20 cm.



$$\Delta X = 575 \pm 7 \text{ m}$$

$$\Delta Y = 93 \pm 5 \text{ m}$$

$$\Delta Z = 466 \pm 7 \text{ m}$$

$$\omega_X = -5.1 \pm 0.1''$$

$$\omega_Y = -1.6 \pm 0.3''$$

$$\omega_Z = -5.2 \pm 0.1''$$

$$s = 2.5 \pm 0.6 \text{ ppm}$$

Abb. 6: Identpunkte für die räumliche Ähnlichkeitstransformation und ermittelte Parameter

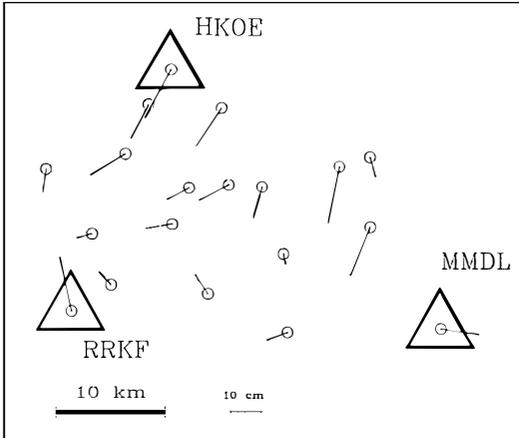


Abb. 8: Dreiecksmasche HKOE - RRFK - MMDL

Das zentrale Problem bei einer Homogenisierung der Gebrauchskoordinaten ist die Frage nach einem geeigneten Algorithmus für die Interpolation der Residuen in kleinräumigen Bereichen. Die möglichen Methoden reichen von Interpolations- über Kollokations- bis hin zu Algorithmen, die sich der Methode der Finiten Elemente bedienen. Als Beispiel sind die Klaffungen von Abb. 8 mit der multiquadratischen Methode nach (Hardy, 1972) interpoliert worden (Walter, Klotz, 1995).

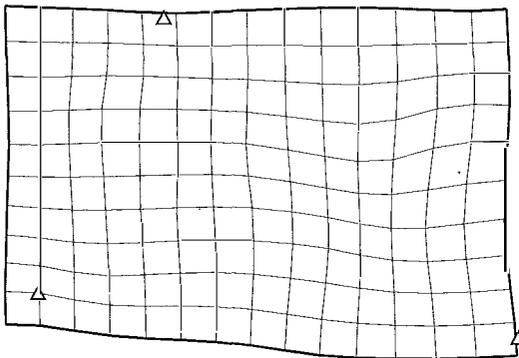


Abb. 9: Interpolation der Klaffungen

## 5. Ein neues Bezugssystem für Österreich ?

Mit dem Eindringen der Verfahren der Satellitengeodäsie in die Vermessungspraxis verändern sich auch die Anforderungen an das Festpunktfeld. An ein modernes nationales Bezugssystem können heute die folgenden Anforderungen gestellt werden:

- Anschluß an globale geodätische Bezugssysteme

- Grundlage für die Beobachtung geodynamischer Vorgänge
- Anschlußmöglichkeit für Folgemessungen der Ingenieur- und amtlichen Vermessung
- Gewährleistung eines homogenen Festpunktfeldes mit hoher Genauigkeit
- Möglichkeit der eindeutigen und umkehrbaren Überführung von Koordinaten des bestehenden Landesvermessungssystems in das neue Bezugssystem

Mit der hochgenauen Realisierung durch das ITRF sind heute alle Voraussetzungen für den Anschluß an globale geodätische Bezugssysteme geschaffen. Dieser globale Bezug ist sowohl für grenzüberschreitende Ingenieurprojekte als auch für Informationssysteme, deren Daten über Ländergrenzen hinweg ausgetauscht werden, von großer Bedeutung. Aber nicht nur für die Aufgaben der Vermessung, sondern auch für andere Bereiche sind internationale Bezugsrahmen erforderlich. Das zeigt ein Projekt der Abteilung Theoretische Geodäsie (TU Wien), bei dem in Zusammenarbeit mit der österreichischen Zivilluftfahrtbehörde AustroControl die Navigationsanlagen von Österreich in den internationalen Bezugsrahmen eingerechnet wurden.

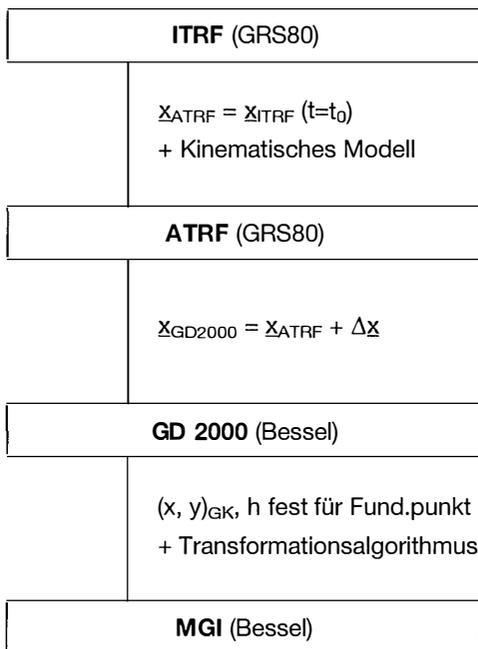
Das nationale Bezugssystem bildet neben dem Präzisionsnivellement auch die Grundlage für die Beschreibung rezenter Krustenbewegungen. Durch Wiederholungsmessungen kann die zeitliche Abhängigkeit der Koordinaten bestimmt und die Erstellung eines Bewegungsmodelles für den Ostalpenraum ermöglicht werden.

Zusätzlich muß die Anschlußmöglichkeit für Folgemessungen der Ingenieur- und der amtlichen Vermessung gewährleistet sein. Das daher erforderliche homogene Festpunktfeld bringt durch die Vereinfachung bei der Einschaltung von Neupunkten auch wirtschaftliche Vorteile. Dazu ist aber ein eindeutiger Bezug zum System der bestehenden Landesvermessung herzustellen, der die auftretenden Verzerrungen berücksichtigt. Dies betrifft ebenfalls die Höhenkomponente, unterstützt doch der Aufbau eines GPS-gestützten Referenzsystems auch die Neuberechnung des Geoides.

Vor der Erstellung eines neuen österreichischen Bezugssystems ist jedoch eine weitere Verdichtung und eine Anbindung weiterer Punkte des bestehenden Triangulierungsnetzes an das GPS-Grundnetz (AGREF) notwendig. Dann kann eine gemeinsame Ausgleichung der terrestrischen und der GPS-Daten erfolgen. In einer Analyse der Verzerrungen können damit grobe Fehler erkannt werden. Außerdem ist beim Aufbau eines neuen Bezugsrahmens darauf zu achten,

daß die Vorteile, die die derzeitige Lagerung bietet, nicht verlorengehen. So sind dank der im Fundamentalpunkt getroffenen Annahmen Lotabweichungen und Geoidundulationen im österreichischen Staatsgebiet klein. Die Reduktion der geodätischen Meßgrößen auf das Ellipsoid und die Verzerrungen der Projektion können einfach berechnet werden und liegen innerhalb vertretbarer Größenordnungen.

Im Anschluß wird in Tab.2 ein mehrstufiges Konzept für die Verwirklichung eines neuen österreichischen Bezugssystems skizziert, welches in groben Zügen einem derzeit in der Schweiz diskutierten Vorschlag zum Aufbau einer GPS-gestützten Landesvermessung (Schneider et al., 1994) folgt. Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, daß die vorgestellte Vorgangsweise nur eine von mehreren denkbaren Varianten darstellt. Daneben sind durchaus andere Konzepte möglich, die nicht zwingend den Übergang auf ein neues Bezugssystem erfordern. Rechtliche Aspekte bei der Umsetzung wurden vorerst jedenfalls ausgeklammert.



Tab.2: Konzept für ein neues Bezugssystem für Österreich

Das ITRF selbst ist wegen seiner zeitlich veränderlichen Koordinaten nicht als Bezugsrahmen für die Vermessungspraxis geeignet. Deswegen könnte ähnlich dem ETRF zunächst ein „Austrian Terrestrial Reference Frame“ (ATRF)

festgelegt werden, das definitionsgemäß zu einer bestimmten Epoche  $t = t_0$  mit dem ITRF der entsprechenden Epoche übereinstimmt. Für diesen Zeitpunkt werden die dreidimensionalen Koordinaten eines zu wählenden Fundamentalpunktes festgehalten. Als solcher Referenzpunkt bietet sich die Station Graz-Lustbühel an, die in alle internationalen Netze eingebunden ist, und die neben GPS auch andere Raumtechniken (SLR) nützt. Das ATRF dient zunächst wissenschaftlichen Zwecken. In diesem System wäre ein kinematisches Modell zu entwickeln, das alle Punkte des betrachteten Grundnetzes enthält, und das für eine gemeinsame Ausgleichung von geodätischen Beobachtungen verschiedener Epochen verwendet werden kann.

Das neue österreichische Datum, in Tabelle 2 „Geodätisches Datum 2000“ (GD2000) genannt, soll andererseits die Vorteile des bestehenden Systems behalten. Daher wären weiterhin das Bessel-Ellipsoid und die Österreichische Meridianstreifenabbildung beizubehalten, wenngleich gezeigt werden kann, daß vorteilhaftere Abbildungen für Österreich möglich sind (Bretterbauer, 1995). Weiterhin werden die Gebrauchskordinaten des Fundamentalpunktes oder die Verzerrungsgrößen beim Übergang zum neuen System in diesem Punkt festgehalten. Fordert man nun, daß die Achsen des Systems GD2000 parallel zu jenen des ATRF sind, und läßt man keine Maßstabsänderung zwischen diesen beiden Systemen zu, ist die Lagerung des neuen Systems GD2000 zum globalen Bezugsrahmen erfolgt. Der Übergang erfolgt durch einen konstanten Verschiebungsvektor, ist mathematisch eindeutig und von Messungen unabhängig.

Das verbleibende Problem ist der zu entwickelnde Algorithmus für die Transformation zwischen dem alten System MGI und dem GD2000. Die zu behandelnden Klaffungen erreichen über ganz Österreich Größenordnungen von etwa zwei Metern und sollten jedenfalls in einen systematischen und in einen zufälligen Anteil getrennt werden. Eine Gegenüberstellung der verschiedenen Möglichkeiten der Interpolation im Vektorfeld dieser Residuen ist im Rahmen dieses Beitrages nicht möglich. Es soll aber in diesem Zusammenhang die Methode der Finiten Elemente (Carosio, Plazibat, 1995) speziell erwähnt werden.

#### Literatur

- [1] Beutler G., Brockmann E., Gurtner W., Hugentobler U., Mervart L., Rothacher M., Verdun A. (1994): Extended Orbit Modeling Techniques at the CODE Processing Center of the International GPS Service for Geodynamics (IGS): Theory and Initial Results, Manuscripta Geodaetica, Volume 19, Heft 6.

- [2] *Beutler G., Mueller I., Neilan R., Weber R. (1994):* IGS – Der Internationale GPS-Dienst für Geodynamik, Zeitschrift für Vermessungswesen, Heft 5, 1994, Wittwer Verlag, Stuttgart.
- [3] *Boucher C., Altamimi Z. (1989):* The Initial IERS terrestrial reference frame, IERS Technical Note 1, Central Bureau of IERS-Observatoire de Paris.
- [4] *Boucher C., Altamimi Z., Duhem L. (1992):* Results and Analysis of the ITRF93, IERS Technical Note 18, Central Bureau of IERS-Observatoire de Paris.
- [5] *Boucher C., Altamimi Z. (1995):* Specifications for reference frame fixing in the Analysis of a EUREF GPS campaign, Institute Geographique National, Paris.
- [6] *Boyle M. (1987):* Supplement to Department of Defense World Geodetic System 1984, Part I, DMA Technical Report, Washington.
- [7] *Bretterbauer K. (1995):* Koordinatensysteme – der rote Faden durch Geodäsie und GIS, Universität Innsbruck, Institut für Geodäsie, Beiträge zur VIII. Internationalen Geodätischen Woche, Innsbruck.
- [8] *Carosio A., Plazibat M. (1995):* Lineare Transformation mit finiten Elementen. Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik, Heft 4/95.
- [9] *Hardy R. L. (1972):* Geodetic Applications of multiquadratic analysis, Allgemeine Vermessungsnachrichten 79, S. 398-406.
- [10] *Hofmann-Wellenhopf B., Lichtenegger H., Collins J. (1994):* GPS – Theory and Practice, Springer-Verlag, Wien, New York.
- [11] *Klotz S., 1995:* Messung und Auswertung eines regionalen GPS-Netzes zur Datumsbestimmung im österreichischen Festpunktfeld, Diplomarbeit, Technische Universität Wien, in Vorbereitung.
- [12] *Liu R., Gurtner W., Zumberge J., Neilan R. (1994):* Introducing the Central Bureau Information System of the International GPS Service for Geodynamics, IGS Central Bureau, JPL, Pasadena.
- [13] *McCarthy D. (1992):* IERS Standards 1992, IERS Technical Note 13, Central Bureau of IERS-Observatoire de Paris.
- [14] *Moritz H., Mueller I. (1988):* Earth Rotation, Theory and Observation, Ungar-Verlag, New York.
- [15] *Moritz H. (1992):* Geodetic Reference System 1980, Bulletin Geodesique, Vol.66, Nr.2.
- [16] *Mueller, A. (1993):* Bestehende und künftige geodätische Bezugssysteme in Europa und im wiedervereinigten Deutschland, aus: Das Global Positioning System im praktischen Einsatz der Landes- und Ingenieurvermessung, Schriftenreihe Studiengang Vermessungswesen, Heft 45, Neubiberg.
- [17] *Schneider D., Gubler E., Marti U. (1994):* Aufbau der neuen Landesvermessung LV95: Terrestrische Bezugssysteme und Bezugsrahmen. Berichte aus der L+T, Wabern.
- [18] *Seidelmann (1992):* Explanatory Supplement to the Astronomical Almanac U.S. Naval Observatory, Washington.
- [19] *Walter G., Klotz S. (1995):* Using GPS to analyse the Austrian triangulation network, Proceedings of the Third International Seminar on GPS in Central Europe, Penc.
- [20] *Weber R., Beutler G., Rothacher M. (1994):* Aufgaben und Produkte des CODE-GPS-Rechenzentrums im Rahmen von IGS. Proceedings des 34.DVW Fortbildungsseminars „GPS-Leistungsbilanz 1994“, Karlsruhe.
- [21] *Zeger J. (1993):* Die historische Entwicklung der staatlichen Vermessungsarbeiten (Grundlagenvermessungen) in Österreich, Band IV, Neutriangulierung, Wien.

*Anschrift der Autoren:*

Dipl.-Ing. Dr. Robert Weber, Dipl.-Ing. Gerhard Walter, Stefan Klotz, Institut für Theoretische Geodäsie und Geophysik, Abteilung Theoretische Geodäsie, Technische Universität Wien, Gußhausstraße 27-29, A-1040 Wien.



## Von der Feldskizze zum Digitalen Feldplan

*Florian Helm, Wien*

### Zusammenfassung

Die moderne vermessungstechnische Planerstellung wird bei den Aufnahmearbeiten im Feld entweder durch die Registrierung zweckbezogener Codes oder durch die manuelle Anfertigung einer Feldskizze gestützt. Für die letztere Strategie hat sich durch die Entwicklung der Pentop-Computer die Möglichkeit zur sofortigen on-line-Darstellung der vermessenen Punkte im Feld in Form sogenannter „Graphischer Feldbuch“-Software (GF) eröffnet. Um die Zwänge, welche sich aus der starken CAD-Bindung solcher GF ergeben, zu überwinden, wurde das Konzept des „Digitalen Feldplanes“ (DF) erdacht. Wie durch interaktives Zeichnen die Flexibilität der herkömmlichen Feldskizze erreicht und durch effektive Kontrollmechanismen besondere Qualitätssicherung realisiert werden kann, wird hier diskutiert.

### Abstract

Up to date surveys are supported during field-work either by registration of appropriate codes or by preparing a manual sketch. Considering the latter strategy, the development of Pentop-Computer has enabled ways to directly plot the surveyed points on the screen by means of “Graphical Fieldbook”-Software (GF). However, there are some constraints brought in by the use of customary CAD-software as basis. These can be overcome by the concept of a “Digital Field Map” (DF); interactive drawing will preserve the flexibility of the field-based sketch we are accustomed to and effective control algorithms will assure the quality of the field map.