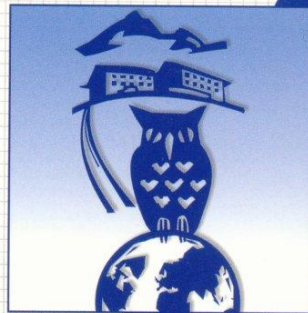


Chesi/Weinold (Hrsg.)

12. Internationale Geodätische Woche Obergurgl 2003



Wichmann

Jäger, R., Kälber, S., Schneid, S. und S. Seiler (2003):

Konzepte und Realisierungen von Datenbanken zur hochgenauen Transformation zwischen klassischen Landessystemen und ITRF/ETRS89 im aktuellen GIS- und GNSS-Anwendungsprofil.

(Chesi/Weinold, Hrsg.): 12. Internationale Geodätische Woche Obergurgl 2003 Wichmann Verlag, Heidelberg. ISBN 3-87907-401-1. S. 207-211.

Konzepte und Realisierungen von Datenbanken zur hochgenauen Transformation zwischen klassischen Landessystemen und ITRF/ETRS89 im aktuellen GIS&GNSS-Anwendungsprofil

¹⁾ Prof. Dr.-Ing. Reiner Jäger, ²⁾ Dipl.-Ing. (FH) Simone Kälber,
¹⁾ Dipl.-Ing. (FH) Sascha Schneid und ³⁾ Dipl.-Ing. (FH) Stephan Seiler

¹⁾ Fachhochschule Karlsruhe - University of Applied Sciences
Studiengang Vermessung und Geomatik & Int. Studiengang Geomatics (MSc)
Moltkestrasse 30, D-76133 Karlsruhe. URL: www.dfhb.de

²⁾ Lamprechtstrasse 13, D-76227 Karlsruhe

³⁾ Ingenieurbüro Seiler (IBS), Hauptstrasse 45, D-77886 Lauf, URL: www.ib-seiler.de

1. Einführung

Mit der breiten Nutzung von GNSS (GPS/GLONASS/GALILEO) als allgemeine Positionierungssysteme und der Einrichtung von GNSS-Korrekturdiensten verdrängen beim Aufbau moderner Geodatenbanken die GNSS konsistenten ITRF-basierten Bezugssysteme - wie z. B. das europäische ETRS89 - zunehmend die Georeferenzierung bezüglich der klassischen Landessysteme. Die Fortführung der in den klassischen Landesdatumssystemen bestehenden Datenbanken im ITRF/ETRS89 erfordert daher die Transformation der Positionsdaten $(N,E)_{\text{klass}}$ vom klassischen ins ITRF/ETRS89 Datum $(N,E)_{\text{ITRF}}$. Mit der theoretischen Lösung (COPAG-Konzept) des Problems verknüpft sich die anschließende Realisierung und standardisierte Bereitstellung entsprechender Transformationsparameter-Datenbanken. Darüber hinaus erschließt die cm-Genauigkeit von GNSS-Diensten, wie z.B. SAPOS® und ascos® in Deutschland, u .a. auch das Potenzial einer GNSS-basierten Höhenbestimmung, was – zur Bestimmung von Landeshöhen H - die Umreferenzierung des ellipsoidischen GNSS-Höhenbezugs h_{ITRF} auf die betreffende potenzialtheoretisch definierte Höhenbezugsfläche HBF eines klassischen Höhensystems erfordert. Auch hier geht die konzeptionelle Lösung (DFHBF-Konzept) einher mit der Realisierung und standardisierten Bereitstellung einer entsprechenden Transformationsparameter-Datenbank.

2. DFHBF-Datenbanken - paßpunktfreie GNSS-basierte Bestimmung von Landeshöhen

Die GNSS-basierte Bestimmung von Landeshöhen H erfordert stets eine Transformation der ellipsoidischen Höhen h auf die physikalisch definierte Landeshöhenbezugsfläche (HBF). Kennzeichnend für das DFHBF-Konzept (SCHNEID UND JÄGER, 2002a,b,c) ist, dass das Ideal der in Bezug auf das GNSS-Datum (z.B. ETRS89) angepassten und von systematischen Fehlern freien stetigen HBF durch die sog. Digitale Finite Elemente Höhenbezugsfläche (DFHBF) übernommen wird. Konkret wird die HBF dabei als zweidimensionales mit den Parametern \mathbf{p} festgelegtes Finite Element Modell $\text{NFEM}(\mathbf{p}|\mathbf{B},\mathbf{L})$ realisiert. Zur FEM-Repräsentation $\text{NFEM}(\mathbf{p}|\mathbf{B},\mathbf{L})$ der HBF werden bivariate Polynome verwendet, die über den Maschen eines regelmäßigen oder unregelmäßigen Finite Elemente Maschennetzes in Ansatz gebracht werden. Damit stellt sich die Basisgleichung, welche die wesent-

lichen Komponenten ellipsoidische GNSS-Höhe h , Landeshöhe H und HBF-Höhe $N(B,L) =: NFEM(p,B,L)$ unter sich vereinigt, im DFHBF-Ansatz dar als:

$$H = h - NFEM(p | B, L) - h \cdot \Delta m = h - DFHBF(p, \Delta m | B, L, h) \quad (1)$$

Mit $h \cdot \Delta m$ wird die aus physikalischen Gründen bei vielen derzeitigen Gebrauchshöhensystemen erforderliche Modellierung eines Maßstabsanteils modelliert.

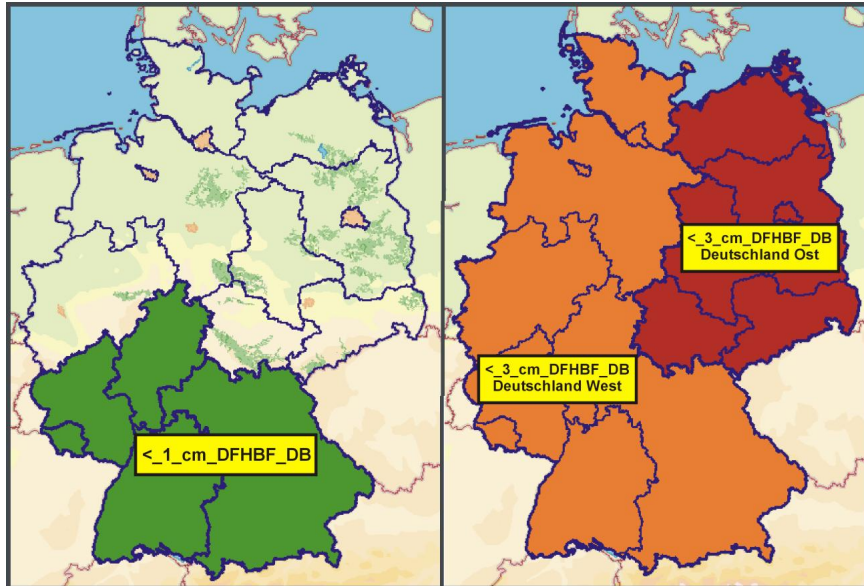


Abb. 1: Übersicht über Stand und Status von DFHBF_DB in Deutschland (Stand Oktober 2002). Links: hochgenaue „<_1cm_DFHBF_DB“ der südlichen Bundesländer. Rechts: „<_3cm_DFHBF_DB Deutschland West und Ost“.

Im Zugriff auf die aus den DFHBF-Parametern \mathbf{p} und Δm sowie den Designparametern des FEM-Gitters bestehende DFHBF_DB erhält der GNSS-Nutzer eine aus dem Finite Elemente Modell $NFEM(\mathbf{p}|B,L)$ der HBF und dem Maßstabsanteil $h \cdot \Delta m$ zusammengesetzte DFHBF-Höhenkorrektur $DFHBF(B,L,h)$ (1). Damit ist die am Ort (B,L,h) ermittelte ellipsoidische GNSS-Höhe h direkt und passpunktfrei in die Landeshöhe H umzurechnen. Das DFHBF-Konzept basiert im Gegensatz zu den klassischen Ansätzen der GNSS-Höhenbestimmung dabei auf die vollständige Neuberechnung der durch die Parameter \mathbf{p} repräsentierten HBF. DFHBF_DB werden mittels der DFHBF_Produktionssoftware in einer Kleinste-Quadrate-Ausgleichung mit \mathbf{p} und Δm im Unbekanntenanteil bei Ausschöpfung aller verfügbaren Beobachtungsdaten und durchgreifender statistischer Qualitätskontrolle berechnet. Als Observable können ellipsoidische Höhen h bzw. Höhenbaselines, Landeshöhen H bzw. Nivellement, Geoidhöhen $N_B(B,L)^j$ bzw. Geoid“patches“ (Teilbereiche mit individuellen Datumparametern) sowie Lotabweichungen (ξ, η) und gegebenenfalls auch Schwereanomalien Δg in Ansatz gebracht werden (Tab.1; JÄGER UND SCHNEID 2002a,b,c). Die Qualitätssicherung wird so in die DFHBF-Berechnung (Tab. 1) verlagert und entfällt bei der Anwendung von DFHBF_DB. Die DFHBF_Produktionssoftware wird ferner für die

anstehende Umrechnung der alten NN-Höhen in die neuen europäischen Normalhöhen verwendet. Abb.1, links, gibt einen aktuellen Überblick über die in Zusammenarbeit mit den Landesvermessungsämtern seitens des DFHBF-Teams Karlsruhe berechneten landesweiten "1cm"-DFHBF-Datenbanken (Genauigkeit der DFHBF-Korrektur $(1) \leq 1\text{cm}$). Einhergehend mit der Akzeptanz des DFHBF_DB Standards in der GNSS-Industrie werden diese von diesen Behörden zwischenzeitlich als amtlich Geodatenprodukte für den breiten Nutzerkreis von GNSS/GPS-Diensten wie SAPOS® und ascos® und sowie dem GIS-Bereich bereitgestellt (siehe www.sapos.de, dort Baden-Württemberg und Rheinland-Pfalz).

Tab. 1: Wesentliche Funktionale Modelle zur Berechnung der Parameter \mathbf{p} und Δm von DFHBF-Datenbanken

$$\begin{aligned} h + v &= H + h \cdot \Delta m + \text{NFEM}(\mathbf{p} | B, L) \\ N_G(B, L)^j + v &= \text{NFEM}(\mathbf{p} | B, L) + \partial N_G(\mathbf{d}^j) \\ \xi + v &= -\mathbf{f}_B / M(B) \cdot \mathbf{p} + \partial B(\mathbf{d}_{\xi, \eta}) \\ \eta + v &= -\mathbf{f}_L / (N(B) \cdot \cos(B)) \cdot \mathbf{p} + \partial L(\mathbf{d}_{\xi, \eta}) \\ H + v &= H \\ C + v &= C(\mathbf{p}) \end{aligned}$$

Die Abb. 1, rechts gibt einen Überblick über die seitens des Mitautors und DFHBF-Kooperationspartners IBS berechneten bundesweiten "3cm"-DFHBF-Datenbanken (SEILER, 2002). Vor dem Hintergrund der auf EUREF-Ebene deklarierten Zielsetzung der Berechnung einer geschlossenen europäischen HBF ist das DFHBF-Projektteam Karlsruhe auch mit entsprechenden fachlich-wissenschaftlichen Aktivitäten und der Absichtserklärung zur Berechnung der HBF Europa in der FIG Working Group "GPS-Heighting" sowie der IAG Subcommission for Europe (EUREF) vertreten.

3. COPAG/DFLBF-Datenbanken - paßpunktfreie Transformation zwischen den Lagekoordinaten klassischer Landessysteme und ETRS89

Dieser Teil befasst sich mit der homogenisierenden cm-genauen und nachbarschaftstreuen Transformation der Lagekoordinaten klassischer nationaler Bezugssysteme $(N, E)_{\text{klass}}$ in das einheitliche ITRF/ETRS89-Datum $(N, E)_{\text{ITRF}}$. Neben der mit COPAG-Konzept erzielten Verbesserung und Homogenisierung der geometrischen Qualität, wird erst mit der ITRF-Referenzierung die Voraussetzung für die künftige Nutzbarkeit und Fortführung bestehender Datenbestände geschaffen und damit eine hohe volks- und betriebswirtschaftliche Wertschöpfung sowie ein Signal bzw. Schrittmotor für weitere innovative Entwicklungen im GIS-, GNSS- und LBS-Sektor etabliert. Das Ansatzkonzept basiert auf einer streng dreidimensionalen räumlichen Ähnlichkeitstransformation zwischen den beiden Bezugssystemen. Linearisiert man diese unter der Voraussetzung kleiner Drehwinkel und Verschiebungen mit dem Linearisierungspunkt der geographischen Koordinaten $(B, L, h)_1$, so erhält man im Ergebnis der 3D-Ähnlichkeitstransformation in geographischen Koordinaten (B, L, h) für den Lageanteil (B, L) die Beziehungen (JÄGER UND KÄLBER, 2000):

$$\begin{aligned} B_2 + v &= B_1 + \partial B_1(\mathbf{d}; \Delta a, \Delta f | B_1, L_1, h_1) = B_1 + \partial B_1(u, v, w, \varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \Delta m; \Delta a, \Delta f | B_1, L_1, h_1) \\ L_2 + v &= L_1 + \partial L_1(\mathbf{d}; \Delta a, \Delta f | B_1, L_1, h_1) = L_1 + \partial L_1(u, v, w, \varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \Delta m; \Delta a, \Delta f | B_1, L_1, h_1) \end{aligned} \quad (2)$$

Als Datums- bzw. Transformationsparameter \mathbf{d} treten 3 Translationen (u, v, w) , drei Rotationen $(\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z)$ und der Parameter einer Maßstabsdifferenz Δm zwischen den beiden Bezugssystemen auf. Die Parameter Δa und Δf sind die bekannten Änderungen der Ellipsoiddi-

mensionen beim Übergang von Referenzsystem 1 (z.B. DHDN) auf Referenzsystem 2 (z.B. ETRS89). Nachdem es bei der anstehenden o. g. Transformationsproblematik ausschließlich um die Transformation des Lagebezugs (B,L) geht - und für die betreffenden Objektpositionen (z.B. AP-Punkte, Grenzpunkte, Gebäudebestände etc.) auf den entsprechenden Datenbanken in der Vergangenheit auch keine Höhenangaben archiviert wurden - ist auf die Höhenkomponente h als dritte Gleichung - mit Ausnahme des Anteils von 3D-Paßpunkten (z.B. TP) - zu verzichten.

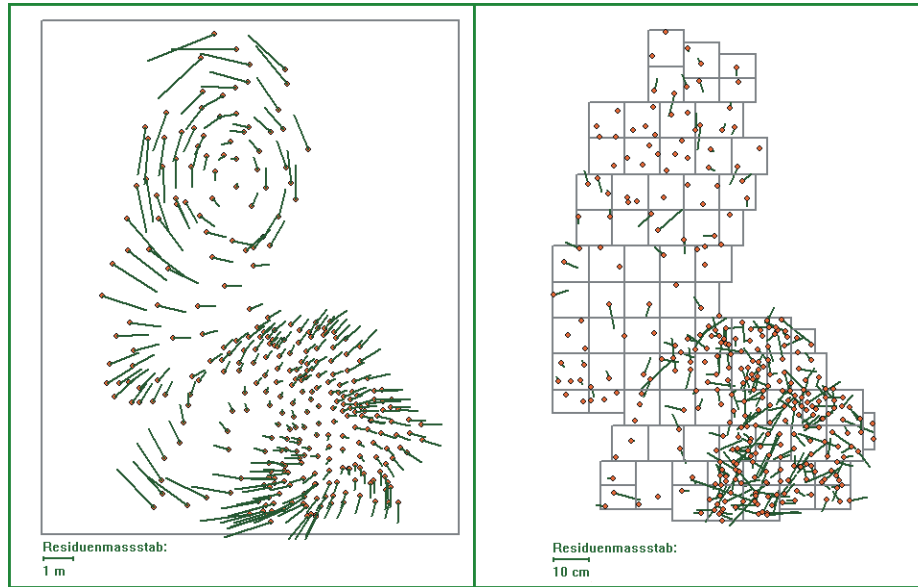


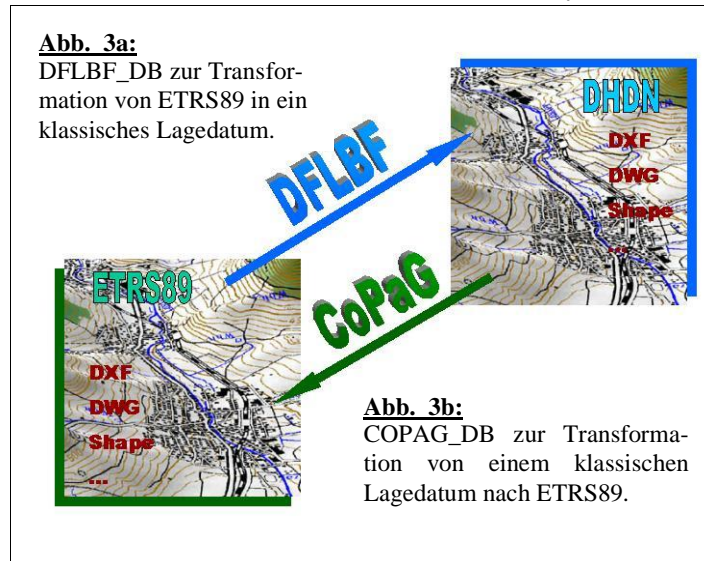
Abb. 2. Links: Residuen der Überführung der deutschen DHDN-Lagekoordinaten nach ETRS89 mit nur einem bundesweiten Transformationsparametersatz d . Rechts: Strenge Transformation der Lagekoordinaten von DHDN nach ITRF (ETRS89) unter Aufteilung in 81 „Patches“. Dies führt zu einer drastischen Reduktion der Residuen auf < 3 cm im Mittel.

Ein Vorteil des Ansatzes (2) ist, dass die ellipsoidischen Höhen h_1 nur in untergeordneter Genauigkeit gebraucht werden. Daher kann die Höheninformation h_1 in der aus frei zugänglichen Geoid- und Höhenmodellldatenbanken gewonnen werden.

Weitere Überlegungen zur Überführung der klassischen Lagekoordinaten ins ITRF-Datum sind in Bezug auf die Theorie sowie dem mathematischen Modell zur Behandlung der sog. Hauptschwachformen anzustellen, die es im Zuge der Transformation ins ITRF netzverbessernd zu homogenisieren gilt. Bei den Hauptschwachformen handelt es sich um langwellige - im Gebiet Deutschland West bspw. in den Bereich mehrerer Meter hineinreichende (Abb. 2, links) - Aufbiegungen in der Netzgeometrie der bestehenden klassischen trigonometrischen Landesnetze (JÄGER UND KÄLBER, 2000). Zur Lösung des Schwachformen-Problems erfolgt die Aufteilung („Patching“) des zu transformierenden Gesamtgebietes in Teilgebiete; so auch der Name COPAG = „Continuously Patched Georeferencing“. Im Testbeispiel (Abb. 2, rechts) reduzierte sich die mittlere Restklaffung bei 81 Teilgebieten so auf ei-

nen Betrag unter 3 cm. Zur Erzielung stetiger Transformationsparameter \mathbf{d} sind geeignete Stetigkeitsbedingungen in Form zusätzlicher Restriktionen an die Transformationsparameter benachbarter Teilgebiete ("Patches") zu formulieren.

Aufbauend auf Testrechnungen (Abb. 2) wurden mit der Software REF3D©Jäger/Kälber zwischenzeitlich für Deutschland zwei bundesweite Datenbanken berechnet (SEILER, 2002), nämlich die „(3-5) cm_COPAG_DB DE“ (Abb. 3a) bzw. die „(3-5)cm_DFLBF_DB DE“ (Abb. 3b). Die COPAG_DB bzw. die DFLBF_DB (Digitale Finite Elemente Lage-Bezugs-Flächentransformation, in Anlehnung an DFHBF) leisten die stetigen und nachbarschaftstreuen Transformationen von den klassischen Landessystemen Deutschland West/Ost nach ETRS89 bzw. von ETRS89 in die klassischen Landessystemen Deutschland West/Ost je-



weils mit einer Genauigkeit von (3-5) cm. Die DFLBF_DB findet Einsatz zur passpunktfreien Transformation im SAPOS®- und ascos®-Bereich (bei direktem DFLBF_DB_Zugriff sowie auch zur Erzeugung von sog. LSKS-Dateien bei Leica-Equipment). Die Berechnung von "1cm" COPAG bzw. DFLBF_DB ist lediglich eine

Frage der entsprechenden Passpunktdichte, wie z.B. erfolgreiche Testrechnungen für das Landesgebiet Rheinland-Pfalz zeigen. Mit der Allgemeingültigkeit des COPAG-Konzeptes kann die Berechnung von COPAG-/DFLBF-Datenbanken für beliebige Länder erfolgen.

4. Literatur

- Jäger, R. und S. Kälber (2000): *Konzepte und Softwareentwicklungen für aktuelle Aufgabenstellungen in den Bereichen GPS und Landesvermessung*. DVW Mitteilungen, Landesverein Baden-Württemberg. 10/2000. ISSN 0940-2942.
- Jäger, R. und S. Schneid (2002a): *DFHBF-Homepage*. URL: www.dfhbf.de.
- Jäger, R. und S. Schneid (2002b): *Passpunktfreie direkte Höhenbestimmung – ein Konzept für Positionierungsdienste wie SAPOS®*. 4. SAPOS® Symposium, Mai 2002. Landesvermessung und Geobasisinformation Niedersachsen (LGN), Hannover. S. 149-166.
- Jäger, R. und S. Schneid (2002c): *GNSS Online Heighting based on the Concept of a Digital Finite Element Height Reference Surface (DFHRS) and the Evaluation of the European HRS*. Proceedings, GNSS 2002 Symposium. CD-ROM Publication. The Nordic Institute of Navigation, Kopenhagen.
- Seiler, S. (2002): *IBS-Homepage*. URL: www.ib-seiler.de